

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI



MALZEME ÜRETİM TEKNOLOJİSİNDE EŞ KATKILI Eu:AlZnO
İNCE FİLMLEİN DALDIRMA KAPLAMA YÖNTEMİ İLE
ÜRETİMİ, YAPI, MORFOLOJİK VE OPTİK ÖZELLİKLERİ

OSMAN SALİH GÜNDOĞDU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. ELİF GÜNGÖR (Tez Danışmanı)**
 Prof. Dr. Yasemin ACAR
 Doç. Dr. Gülşah BOZKIR

BALIKESİR, HAZİRAN – 2026

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Malzeme Üretim Teknolojisinde Eş Katkılı Eu:AlZnO İnce Filmlerin Daldırma Kaplama Yöntemi ile Üretimi, Yapı, Morfolojik ve Optik Özellikleri**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Osman Salih GÜNDOĞDU

ÖZET

**MALZEME ÜRETİM TEKNOLOJİSİNDE EŞ KATKILI Eu:AlZnO İNCE
FİLMLERİN DALDIRMA KAPLAMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ, YAPI,
MORFOLOJİK VE OPTİK ÖZELLİKLERİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
OSMAN SALİH GÜNDOĞDU
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ELİF GÜNGÖR)**

BALIKESİR, HAZİRAN - 2026

Bu tez çalışmasında, Europiyum (Eu) ve Alüminyum (Al) eş katkılı ZnO ince filmler (Eu:AlZnO), sol-jel daldırma kaplama yöntemiyle cam alt tabakalar üzerine kaplandı ve yapısal, morfolojik, optik ile fotolüminesans özellikleri incelendi. İnce filmler X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), UV-Görünür bölge spektrofotometresi (UV-Vis) ve fotolüminesans (PL) spektroskopisi kullanılarak karakterize edildi.

XRD sonuçları, tüm filmlerin hegzagonal wurtzit ZnO yapısında ve baskın (002) yöneliminde kristalleştiğini gösterdi. Eu katkı oranının %5'e kadar artırılması kristal kaliteyi iyileştirirken, daha yüksek katkı oranlarında örgü gerilmeleri nedeniyle kristal yapıda bozulmalar gözlemlendi. SEM analizleri, %5 Eu katkılı filmin daha homojen ve kompakt bir yüzey morfolojisine sahip olduğunu ortaya koydu.

Optik analizler, düşük Eu katkılı filmlerde yaklaşık %97 geçirgenlik gösterirken, yüksek katkı oranlarında geçirgenliğin azaldığı belirlendi. Optik bant aralığı, Eu katkısının artmasıyla 2.97 eV'den 2.82 eV'ye düşmüş, Urbach enerjisi sonuçları ise yapısal düzensizliğin katkı oranına bağlı olarak değiştiğini gösterdi.

PL çalışmaları, filmlerin UV ve görünür bölgede emisyon sergilediğini, Eu katkılarının kusur kaynaklı yeşil-sarı emisyonları baskılayarak emisyon karakterini mavi-mor bölgeye kaydırıldığını ortaya koydu. Sonuçlar, sentezlenen Eu:AlZnO ince filmlerin yüksek optik geçirgenlik, iyileştirilmiş kristal yapı, ayarlanabilir bant aralığı ve geliştirilmiş fotolüminesans özellikleri sergilediğini göstermektedir; bu da söz konusu malzemelerin yeni nesil UV fotodetektörleri, ışık yayan diyotlar (LED'ler), fotovoltaiik güneş pilleri ve akıllı pencere uygulamalarında kullanım açısından büyük bir potansiyele sahip olabileceğini düşündürmektedir. Ayrıca, bulgular %5 Eu katkı oranının yapısal, optik ve morfolojik özellikler açısından optimum performans sağladığını ve optoelektronik uygulamalar için en uygun bileşimi temsil ettiğini göstermektedir.

ANAHTAR KELİMELER: Daldırma kaplama, eş katkılı Eu:AlZnO, fotolüminesans, ince film, sol-jel, şeffaf iletken oksitler, XRD

ABSTRACT

**PRODUCTION, STRUCTURAL, MORPHOLOGICAL AND OPTICAL
PROPERTIES OF CO-DOPED Eu:AlZnO THIN FILMS BY DIP COATING
METHOD IN MATERIALS PRODUCTION TECHNOLOGY
MSC THESIS
OSMAN SALIH GUNDOGDU
BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
PHYSICS
(SUPERVISOR: PROF. DR. ELIF GUNGOR))**

BALIKESİR, JUNE - 2026

In this thesis study, co-doped Europium (Eu) and Aluminum (Al) ZnO thin films (Eu:AlZnO) were deposited on glass substrates using the sol-gel dip-coating method, and their structural, morphological, optical, and photoluminescence properties were investigated. The thin films were characterized using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), UV-Vis spectrophotometry, and photoluminescence (PL) spectroscopy.

XRD results showed that all films crystallized in the hexagonal wurtzite ZnO structure and a dominant (002) orientation. While increasing the Eu doping concentration to 5% improved crystal quality, structural defects were observed at higher doping levels due to lattice stresses. SEM analyses revealed that the 5% Eu-doped film possessed a more homogeneous and compact surface morphology.

Optical analyses revealed that while films with low Eu doping exhibited approximately 97% transmittance, transmittance decreased at higher doping levels. The optical bandgap decreased from 2.97 eV to 2.82 eV with increasing Eu doping, while Urbach energy results indicated that structural disorder varied depending on the doping level.

PL studies revealed that the films exhibited emission in the UV and visible regions, and that the Eu dopant suppressed the green-yellow emission caused by defects, shifting the emission profile toward the blue-violet region. The results indicate that the synthesised Eu:AlZnO thin films possess high optical transmittance, improved crystal structure, tunable bandgap, and improved photoluminescence properties suggesting that these materials may hold high potential for use in next-generation UV photodetectors, light-emitting diodes (LEDs), photovoltaic solar cells, and smart window applications. Furthermore, the findings indicate that a 5% Eu doping level provides optimal performance in terms of structural, optical, and morphological properties and represents the most suitable composition for optoelectronic applications.

KEYWORDS: Dip coating, co-doped Eu:AlZnO, photoluminescence, thin film, sol-gel, transparent conductive oxides, XRD

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	5
2.1 Kristal Yapı	5
2.2 Kristal Örgü	5
2.2.1 Temel örgü türleri	7
2.2.2 Üç boyutlu örgü türleri	8
2.3 Yarıiletkenler.....	11
2.3.1 Yarıiletkenlerin bant yapısı	13
2.4 Katkılı Yarıiletkenler	14
2.4.1 n-Tipi yarıiletkenler	15
2.4.2 p-Tipi yarıiletkenler	16
2.5 ZnO Özellikleri.....	17
2.5.1 ZnO kristal yapısı	18
2.6 İnce Filmler ve Teknolojide Uygulamaları.....	20
2.6.1 İnce film üretim teknikleri	22
2.6.1.1 Sol-Jel yöntemi	24
2.6.1.2 Döndürme ile kaplama yöntemi	26
2.6.1.3 Püskürtme ile kaplama yöntemi	28
2.6.1.4 Daldırma ile kaplama yöntemi	29
3. DENEYSEL TEKNİKLER.....	33
3.1 X Işını Kırınımı (XRD)	33
3.1.1 Kristal yapı parametreleri	35
3.2 Taramalı Elektron Mikroskobu Spektroskopisi (SEM)	37
3.3 Ultraviyole-Görünür Spektroskopisi (UV-VİS)	40
3.3.1 Soğurma katsayısının bulunması	42
3.3.2 Yasak enerji aralığının bulunması	43
3.4 Fotolüminesans Spektroskopisi (PL).....	46
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	48
4.1 Kimyasallar.....	48
4.2 Alttabakanın Hazırlanması	48
4.3 Çözeltilerin Hazırlanması	49
4.4 İnce Filmlerin Kaplanması	51
5. BULGULAR TARTIŞMA.....	54
5.1 İnce Filmlerin Yapısal Özellikleri.....	54
5.1.1 Kristal yapı analizi.....	54
5.1.2. Taramalı elektron mikroskobu analizleri (SEM)	62
5.2 İnce Filmlerin Optik Özellikleri	67
5.2.1 Ultraviyole görünür spektroskopi analizi (UV-Vis)	67
5.2.2 Fotolüminesans analizleri	78

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
6. SONUÇ	88
7. KAYNAKLAR	92
ÖZGEÇMİŞ	119

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Üç boyutlu bir örgünün ilkel hücresi	6
Şekil 2.2: Wigner-seitz hücresi	7
Şekil 2.3: İki boyutlu uzayda beş örgü türü	8
Şekil 2.4: Örgü ve öteleme vektörleri aralarındaki açılar	9
Şekil 2.5: Kristal sistemleri	10
Şekil 2.6: Yarıiletkenlerin bant yapıları.....	14
Şekil 2.7: n-tipi yarıiletken malzemenin oluşturulması	16
Şekil 2.8: p-tipi yarıiletken malzemenin oluşturulması	17
Şekil 2.9: Hekzagonal Wurtzite kristal yapı.....	19
Şekil 2.10: ZnO hekzagonal kübik (sfalerit tipi kübik) kristal yapısı	20
Şekil 2.11: ZnO hekzagonal (NaCl tipi) kristal yapısı	20
Şekil 2.12: İnce film üretim teknikleri	23
Şekil 2.13: Döndürme ile kaplama methodu.....	26
Şekil 2.14: Döndürme ile kaplama cihazı	27
Şekil 2.15: Döndürme süresi ve hızına göre film kalınlığı değişim grafiği.....	28
Şekil 2.16: Püskürtme ile kaplama yöntemi şematik gösterimi	29
Şekil 2.17: Daldırma ile kaplama yöntemi şematik gösterimi	30
Şekil 2.18: Daldırma ile kaplama cihazı	30
Şekil 3.1: Rigaku SmartLab difaktometresi	34
Şekil 3.2: Difaktometre iç görünümü.....	35
Şekil 3.3: Bragg kırınımı yasasının geometrisi	36
Şekil 3.4: SEM cihazı şematik gösterimi	38
Şekil 3.5: Taramalı elektron mikroskobu (SEM) sistemi.....	39
Şekil 3.6: TESCAN MAIA3 XMU cihazı	39
Şekil 3.7: L7 Double Beam UV-VIS spektrometre cihazı	41
Şekil 3.8: L7 Double Beam UV-VIS spektrometre cihazının numune bölümü.....	41
Şekil 3.9: UV-VIS spektrometre cihazının iç diyagramı.....	42
Şekil 3.10: Bir yarıiletkenin soğurma katsayısının enerji ile değişimi	44
Şekil 3.11: Fotolüminesans sistemi	47
Şekil 3.12: Fotolüminesans spektrometrenin iç görünümü.....	47
Şekil 4.1: Ultrasonik banyo.....	49
Şekil 4.2: Eş katkılı Eu:AlZnO çözeltisinin hazırlanış aşamaları.....	50
Şekil 4.3: Eş katkılı Eu:AlZnO ince filmlerin üretim aşamaları.....	53
Şekil 4.4: Eş katkılı Eu:AlZnO ince filmlerin üretim aşaması.....	53
Şekil 5.1: Katkısız AlZnO ince filmin XRD spektrumu	55
Şekil 5.2: %1 Eu:AlZnO filmin XRD spektrumu	55
Şekil 5.3: %3 Eu:AlZnO filmin XRD spektrumu	56
Şekil 5.4: %5 Eu:AlZnO filmin XRD spektrumu	56
Şekil 5.5: %7 Eu:AlZnO filmin XRD spektrumu	57
Şekil 5.6: %10 Eu:AlZnO filmin XRD spektrumu	57
Şekil 5.7: Katkısız AlZnO ince filmin yüzey görüntüsü.....	62
Şekil 5.8: %1 Eu:AlZnO ince filmin yüzey görüntüsü	63
Şekil 5.9: %3 Eu:AlZnO ince filmin yüzey görüntüsü	64
Şekil 5.10: %5 Eu:AlZnO ince filmin yüzey görüntüsü	65
Şekil 5.11: %7 Eu:AlZnO ince filmin yüzey görüntüsü	66

ŞEKİL LİSTESİ (devam)

Sayfa

Şekil 5.12: %10 Eu:AlZnO ince filmin yüzey görüntüsü	67
Şekil 5.13: Farklı Eu:AlZnO ince filmlerin geçirgenlik (%) spektrumları	69
Şekil 5.14: Farklı Eu:AlZnO ince filmlerin soğurma spektrumları	69
Şekil 5.15: ZnO ince filmin $(\alpha h\nu)^{1/2}-h\nu$ grafikleri	70
Şekil 5.16: Katkısız AlZnO ince filminin $(\alpha h\nu)^{1/2}-h\nu$ grafiği	72
Şekil 5.17: %1 Eu:AlZnO ince filminin $(\alpha h\nu)^{1/2}-h\nu$ grafiği	72
Şekil 5.18: %3 Eu:AlZnO ince filminin $(\alpha h\nu)^{1/2}-h\nu$ grafiği	73
Şekil 5.19: %5 Eu:AlZnO ince filminin $(\alpha h\nu)^{1/2}-h\nu$ grafiği	73
Şekil 5.20: %7 Eu:AlZnO ince filminin $(\alpha h\nu)^{1/2}-h\nu$ grafiği	74
Şekil 5.21: %10 Eu:AlZnO ince filminin $(\alpha h\nu)^{1/2}-h\nu$ grafiği	74
Şekil 5.22: Farklı Eu katkı oranına sahip AlZnO ince filmlerin E_g değişimi	75
Şekil 5.23: Eu:AlZnO ince filmlerin Urbach enerjisi (E_U)	76
Şekil 5.24: Farklı Eu katkı oranlarına sahip AlZnO ince filmlerin optik enerji bant aralığındaki (E_g) ve Urbach enerjisindeki (E_U) değişim	77
Şekil 5.25: AlZnO ince filmin PL spektrumu	80
Şekil 5.26: %1 Eu:AlZnO ince filmin PL spektrumu	80
Şekil 5.27: %3 Eu:AlZnO ince filmin PL spektrumu	81
Şekil 5.28: %5 Eu:AlZnO ince filmin PL spektrumu	81
Şekil 5.29: %7 Eu:AlZnO ince filmin PL spektrumu	82
Şekil 5.30: %10 Eu:AlZnO ince filmin PL spektrumu	82
Şekil 5.31: CIE renk düzeni	84
Şekil 5.32: Eu:AlZnO ince filmlerin CIE diyagramı	86

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Daldırma ile kaplama yönteminin avantajları ve dezavantajları	31
Tablo 4.1: Eş katkılı Eu:AlZnO ince filmlerin hazırlanmasında kullanılan çözelti. miktarı.....	50
Tablo 4.2: İnce Film Kalınlıkları	52
Tablo 5.1: Farklı Eu katkı oranlarında Eu:AlZnO ince filmlerin yapısal parametreleri.....	61
Tablo 5.2: Farklı Eu Katkı oranlarına sahip AlZnO ince filmlerin optik özellikleri	77
Tablo 5.3: Eu:AlZnO ince filmlerin renk kordinatları	86

SEMBOL LİSTESİ

$\text{\AA}$	: Angstrom
A	: Soğurma (Absorbans)
a, b, c, r, γ	: Birim hücre parametreleri
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat
D	: Kristal boyutu
d	: Kristal yapının atomik düzlemler arası mesafe
E_g	: Yasak enerji aralığı
E_U	: Urbach enerjisi
eV	: Elektron volt
h, k, l	: Miller indisleri
$h\nu$	: Foton enerjisi
I	: Geçen X-ışınları şiddeti
I_0	: Gelen X-ışınları şiddeti
ITO	: İndiyum Kalay Oksit
K	: Scherrer sabiti
n	: Kırılma indisi
$n:$	: Kırınım mertebesi
T	: Geçirgenlik (Transmittans)
TCO	: Şeffaf İletken Oksit
V_o	: Oksijen boşlukları
V_{Zn}	: Çinko boşlukları
Zn_i	: Çinko ara yer atomları
α	: Soğurma katsayısı
β	: Yansıma tepe genişliği
δ	: Dislokasyon yoğunluğu
ε	: Örgü gerilimi
θ	: Kırınım açısı
λ	: X-ışınının dalga boyu
Ω	: Ohm

ÖNSÖZ

Bu çalışma, sol-jel daldırma ile kaplama yöntemiyle üretilen eş katkılı Eu:AlZnO ince filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özelliklerinin incelenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Deneysel süreçlerin yürütülmesinde, tez çalışmamın başlangıcından tamamlanmasına kadar tüm aşamalarda engin bilgi, birikim ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, karşılaştığım her zorlukta yapıcı yaklaşımlarıyla beni yönlendiren ve destekleyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Elif GÜNGÖR'e en içten şükranlarımı sunarım. Çalışmalarım boyunca bilgilerini esirgemeyen, ihtiyaç duyduğum her an kıymetli fikirleriyle tezime büyük katkılar sağlayan Prof. Dr. Yasemin ACAR ve Prof. Dr. Mustafa Burak ÇOBAN hocalarıma verdikleri desteklerden dolayı teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca olduğu gibi, bu uzun ve zahmetli lisansüstü eğitim sürecinde de sabır, sevgi ve inançla hep yanımda olan, beni her koşulda destekleyen ve motive eden sevgili aileme ve tüm sevdiklerime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Balıkesir, 2026

Osman Salih Gündoğdu

1. GİRİŞ

Günümüz teknoloji ekosisteminde elektronik ve optoelektronik cihazların sınırlarını zorlayan sürekli gelişim, yalnızca yüksek verimlilik değil, aynı zamanda ekonomik ve sürdürülebilir yarı iletken mimarilerine olan ihtiyacı en üst düzeye çıkarmıştır (Gözükızıl et al., 2020). Bu stratejik gereksinimlerin odağında yer alan ince film teknolojileri; malzeme bilimi, katı hal fiziği ve yüzey mühendisliğinin sinerjik birleşimiyle modern bilimsel devrimin temel taşı konumuna yükselmiştir. İnce filmlerin sunduğu en kritik avantaj, malzemenin fiziksel, kimyasal ve optik karakteristiklerinin atomik ölçekte kontrol edilebilmesidir. Bu eşsiz kontrol mekanizması; yüksek performanslı fotovoltaik hücrelerden ultra-hassas gaz sensörlerine, biyosensörlerden yeni nesil transistör teknolojilerine kadar uzanan geniş bir endüstriyel spektrumda inovasyonun kapılarını aralamaktadır (Arun et al., 2025; Gözükızıl et al., 2020).

İnce filmler, çeşitli fiziksel ve kimyasal biriktirme teknikleriyle bir altlık yüzeyinde oluşturulan, kalınlıkları birkaç nanometreden mikrometre mertebesine kadar değişen yapısal katmanlardır (Rubin et al., 2023; Smith and Holfman, 1996). Üç boyutlu yığın formlarına kıyasla devasa yüzey-hacim oranı ve nano boyutta ortaya çıkan kuantum sınırlama etkileri, bu yapılara makroskobik formlarında görülmeyen üstün elektriksel, optik, manyetik ve mekanik nitelikler kazandırmaktadır (Attaf, 2011). Bu özgün fizikokimyasal farklılıklar, ince filmleri yeni nesil transistörler, manyetik veri saklama birimleri, korozyon dirençli kaplamalar, fotovoltaik enerji dönüşüm sistemleri ve biyomedikal sensörler gibi ileri teknoloji alanlarının temel yapı taşlarına dönüştürmüştür (Rubin et al., 2023; Lee et al., 1996; Palimar et al., 2013; Umar et al., 2019). Özellikle enerji krizlerine karşı geliştirilen çevre dostu teknolojiler ve optoelektronik cihazların minyatürizasyonu hedefleri, üretim maliyeti düşük ve yüksek performanslı yarıiletken ince film malzemelerinin geliştirilmesine yönelik küresel ihtiyacı giderek artırmaktadır (Sood et al., 2025; Eslamian, 2017; Sharma et al., 2024).

İnce film teknolojisinin endüstriyel açıdan en kritik malzeme sınıflarından biri, görünür bölgede yüksek optik geçirgenlik ile üstün elektriksel iletkenlik özelliklerini eşzamanlı olarak sunan saydam iletken oksitlerdir (Patel et al., 2024). Bu şeffaf iletken oksit (TCO) malzemeler, güneş pillerinde (Liu et al., 2025), ince film transistörlerde (Fortunato et al., 2012), dokunmatik ekranlarda (Patel et al., 2024), sıvı kristal ekranlarda (Křištofová et al.,

2016) ve ışık yayan diyotlarda (Morales-Masis et al., 2017) aktif elektrot katmanı olarak geniş uygulama alanları bulmuştur (Hafdallah et al., 2011). Günümüzde bu alandaki tartışmasız endüstriyel standart, üstün elektriksel mobilitesi ve çevresel kararlılığı nedeniyle indiyum kalay oksit ITO malzemesidir (Seyhan and Kartal, 2023; Liu et al., 2025). Ancak, optoelektronik pazarının katlanarak büyümesi, ITO bileşimindeki indiyumun doğada nadir bulunması ve artan hammadde maliyetleri gibi kısıtlamalarla birlikte, malzemenin düşük mekanik esnekliği ve hidrojen plazması altındaki kimyasal kararsızlığı araştırmacıları alternatif TCO'lara yöneltmiştir (Liu et al., 2025; Patel et al., 2024). Bu alternatif TCO'lar arasında çinko oksit (ZnO), oda sıcaklığında sahip olduğu geniş doğrudan yasak enerji aralığı (3.37 eV), yüksek eksiton bağlanma enerjisi (60 meV) ve üstün kimyasal kararlılığı nedeniyle dikkat çekici bir yere sahiptir (Singh et al., 2020). Bu özellikleriyle birlikte, ZnO'nun saydam iletken oksit malzemeler içerisinde optik geçirgenliğinin yüksek ve iletken olmasının ultraviyole (UV) lazer diyotları, yüzey akustik dalga cihazları, gaz sensörleri ve transparan elektronik tasarımları gibi uygulama alanı bulmuştur (Ghamsari and Dhara, 2019; Janotti and Van de Walle, 2009). Üstelik ZnO, yüksek sıcaklıklardaki termal stabilitesi, doğada bol bulunması, düşük maliyeti, toksik olmaması ve biyouyumlu yapısı sayesinde çevre dostu ve sürdürülebilir nanoteknoloji uygulamaları için de rakipsiz bir seçenektir (Babayevska et al., 2022; Chandraiahgari et al., 2015). Katkısız ZnO ince filmleri, örgü yapılarındaki çinko ara yer atomları (Zn_i) ve oksijen boşlukları (Vo) gibi dokusal kusurları nedeniyle n-tipi iletkenlik sergilemektedir (Braga et al., 2018; Kim and Park, 2009). Bu nedenle, ZnO ince filmlerin şeffaflık ve düşük özdirenç gibi temel özelliklerinin iyileştirilmesi için Ga, In, Al, Co ve Sn gibi çeşitli elementlerin katkılanması kritik önem taşımaktadır (Demirbilek vd., 2022). Özellikle, Al katkısı, ZnO filmlerinin elektriksel iletkenliğini artırırken, görünür bölgedeki optik geçirgenliğini koruma potansiyeli sunmaktadır (Yahi et al., 2025). Al katkısı ayrıca film morfolojisini ve kristal yapısını belirgin şekilde etkilemekte, tane boyutunu küçülterek daha yoğun ve homojen bir yüzey morfolojisi oluşturmakta, kristal yönelimini düzlemler lehine güçlendirmekte, bu değişiklikler filmin elektriksel iletkenliğini ve optik kalitesini doğrudan optimize etmektedir (Balaprakash, 2016). Bu nedenle, Al katkılı ZnO ince filmler, özellikle görünür bölgedeki yüksek şeffaflığı ve iyileştirilmiş elektriksel iletkenliği ile fotovoltaik cihazlar ve LED'ler için ideal bir adaydır (Chauhan, Anand, et al., 2014; Chauhan, Singh, et al., 2014). Al katkılı ZnO ince filmlerin termal stabilitesi, düşük tabaka direnci ve yüksek geçirgenlik değerleri, onları ITO uygun maliyetli bir alternatif olarak konumlandırmaktadır (Murugesan et al., 2018; Thienprasert et al., 2013). Bu sayede Al katkılı ZnO ince filmler, gelecekteki

optoelektronik uygulamalar için umut vadeden bir TCO malzemesi olarak öne çıkmaktadır (Sönmez et al., 2019; Ünal, 2023).

Son yıllarda, ZnO'nun optik ve elektriksel özelliklerini iyileştirmek ve yeni kullanım alanları oluşturmak amacıyla nadir toprak elementleri ile katkılama çalışmaları da yoğunluk kazanmıştır (İpek ve Karaaslan, 2021). Özellikle, lantanit serisinden bir element olan Eu katkısı, ZnO matrisinde lüminesans özelliklerini artırarak, özellikle kırmızı ışık emisyonu sayesinde yeni nesil optoelektronik uygulamalar için cazip potansiyeller sunmaktadır (Jouad et al., 2020). Eu'nun ZnO yapısına entegrasyonu, malzemenin fotolüminesans spektrumunu modifiye ederek belirli dalga boylarında emisyon şiddetini artırabilmekte ve böylece gelişmiş optik cihazların üretiminde yeni kapılar açmaktadır (Dai et al., 2011). Bu kapsamda, Eu ve Al'nin birlikte ZnO matrisine katkılандığı eş katkılama süreci hem elektriksel iletkenliği iyileştirme hem de optik özelliklerini, özellikle lüminesans verimliliğini, artırma potansiyeline sahip hibrit malzemelerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Öföfoğlu, 2014; Chari, 2025). Ancak, katkılamanın ZnO'nun yapısal, optik ve elektriksel özellikleri üzerindeki etkileri, katkı konsantrasyonu, katkılama yöntemi ve ısıtma işlemi gibi parametrelere bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Aktaş ve Ünal, 2022). Bu nedenle, Al konsantrasyonunun optimize edilmesi, ZnO filmlerin yapısal ve elektriksel özelliklerini iyileştirirken (Varol, 2017), Eu katkısının lüminesans özelliklerini artırmada kritik bir rol oynamaktadır. Bu çok yönlü optimizasyon, cihaz performansını doğrudan etkileyerek, geleceğin optoelektronik ve fotonik aygıtları için geliştirilmiş fonksiyonelliğe sahip, özelleştirilmiş geniş bant aralıklı yarı iletken malzemelerin tasarımına olanak tanımaktadır.

Malzeme üretim teknolojilerinde ince filmlerin kalitesi, kullanılan büyütme tekniği ile doğrudan ilişkilidir. Daldırma ile kaplama yöntemi; düşük kurulum maliyeti, uygulama basitliği, karmaşık geometrilere sahip yüzeylerin kolayca kaplanabilmesi ve seri üretime uygunluğu ile diğer tekniklerden ayrılmaktadır (Butt, 2022; Yasir et al., 2022). Bu yöntemle üretilen filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri, başlangıç çözeltisinin kimyasal bileşimi ve tavlama sıcaklığı gibi parametrelerle hassas bir şekilde kontrol edilebilmektedir (Saleem, 2012; Sengupta et al., 2011). Bu tez çalışması, bu avantajları dikkate alarak, eş katkılı Eu:AlZnO ince filmlerin daldırma yöntemiyle üretilmesi, yapısal, morfolojik ve optik özelliklerinin detaylı bir şekilde karakterizasyonunu ve yeni nesil optoelektronik aygıtlar için potansiyelini değerlendirmeyi hedeflemektedir. Bununla birlikte, Eu ve Al eş katkısının ZnO ince filmlerin kristal yapısı, yüzey morfolojisi, optik geçirgenliği ve

fotolüminesans özellikleri üzerindeki etkilerini derinlemesine inceleyerek bu etkileşim mekanizmalarını aydınlatmayı amaçlamaktadır. Yapılan kapsamlı analizler, performansı artırılmış Eu:AlZnO ince filmlerin gelecekteki uygulamalarına temel oluşturacaktır.

Bu tez çalışması, modern optoelektronik teknolojilerinin temel bileşenleri arasında yer alan şeffaf iletken oksit malzemelere yönelik yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Çalışmanın temel amacı, düşük maliyetli, kolay uygulanabilir ve endüstriyel ölçekte üretime uygun bir yöntem olan sol-jel daldırmalı kaplama tekniği kullanılarak cam alt tabakalar üzerinde üretilen Eu:AlZnO ince filmlerin yapısal, morfolojik, optik ve fotolüminesans özelliklerini sistematik olarak araştırmaktır. Çalışma kapsamında değişen, Eu katkı oranlarının (%1, %3, %5, %7 ve %10) yapısal kararlılık, yüzey morfolojisi, optik geçirgenlik ve lüminesans özellikleri üzerindeki incelenmiştir. Elde edilen bulguların, yeni nesil optoelektronik malzemelerin geliştirilmesine ve üretim süreçlerinin optimize edilmesine katkı sağlaması beklenmektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER

Bu bölümde, kristal yapılar, yarıiletken malzemelerin temel özellikleri, ZnO'nun fiziksel ve kimyasal özellikleri ile ince film üretim teknikleri ele alınmıştır. İnce film tabanlı yarıiletken sistemlerin yapısal, elektriksel ve optik davranışlarının kavranabilmesi amacıyla öncelikle kristal örgü yapısı, bant aralığı kavramı ve katkılama prensipleri detaylandırılmıştır. Devamında ZnO'nun kristal yapısı ve malzeme özellikleri kapsamlı biçimde incelenmiş, bu özelliklerin ince film üretim süreçlerine olan etkileri değerlendirilmiştir. Son kısımda ise ince film üretim yöntemlerinin genel ilkeleri özetlenmiş ve çalışmada tercih edilen sol-jel tabanlı daldırma kaplama yöntemi ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

2.1 Kristal Yapı

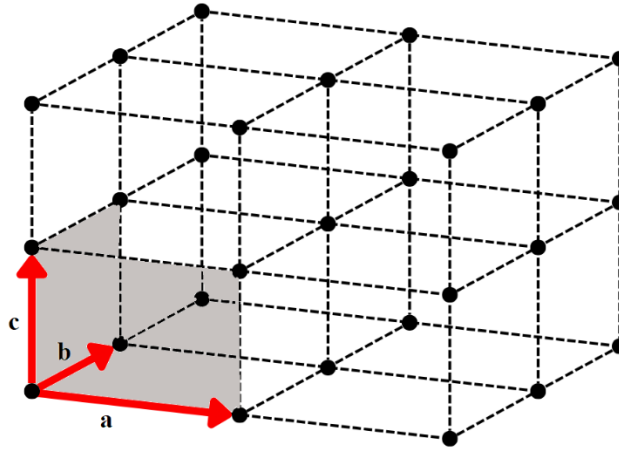
Kristal yapılar, atom, molekül veya iyonların üç boyutlu uzayda periyodik bir düzende tekrarlanan katı sistemlerdir. Bu periyodik yapının en temel birimi birim hücredir ve kristal yapının tüm özelliklerini yansıtan en küçük yapı taşıdır. Belirli yönlerde ardışık öteleme işlemleriyle uzayda tekrarlanarak tam kristal yapı oluşturulur (Özdemir, 2019). Kristal yapılar, belirli düğüm noktalarında konumlanmış atom veya atom gruplarından (bazı) meydana gelir. Periyodik örgü dizilimi ile bu bazı bileşeninin birleşimi, kristal yapıyı oluşturur. Bu ilişki matematiksel olarak “Örgü + Baz = Kristal Yapı” formülüyle ifade edilir (Cereser, 2016). Kristaller, belirli simetri kurallarına göre oluşmaktadır. Bu simetrik düzen, kristallerin fiziksel ile kimyasal özelliklerini büyük ölçüde belirler (Fausty, 2020). Kristal katıların keskin bir erime noktasına sahip olması, düzenli atomik dizilimlerinden kaynaklanmaktadır. Atomlar arasındaki periyodik mesafeler ve bağlar, kristalin genel özelliklerini şekillendiren temel unsurlardır (Fausty, 2020). Bu atomik düzenlemeler, malzemenin mekanik dayanıklılığını, termal iletkenliğini, elektriksel direncini ve optik geçirgenliğini doğrudan etkilemektedir. Kristal yapıların aksine, atom veya moleküllerin uzun menzilli düzen göstermediği ve rastgele yerleşim sergiledikleri yapılara amorf yapılar denir. Amorf malzemeler, uzun menzilli düzen eksikliği nedeniyle belirli bir erime noktasına sahip değildir, geniş bir sıcaklık aralığında yumuşayarak akışkan hale geçerler (Altinkaynak, 2011). Cam ve bazı polimerler amorf yapılara örnek olarak verilebilir (Altinkaynak, 2011).

2.2 Kristal Örgü

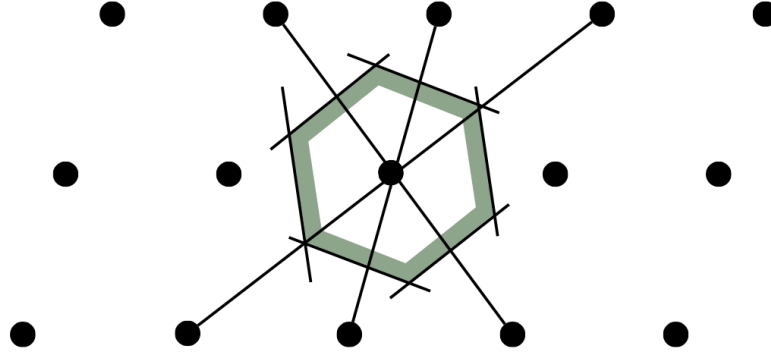
Kristal örgü, katı maddeleri oluşturan atom, molekül veya iyonların üç boyutlu uzayda periyodik bir düzende düzenli dizildiği geometrik bir yapıdır. Bu periyodik düzen, kristal

yapının temel özelliklerini belirler. Her örgü noktası belirli bir konumda yer alarak sistematik bir bütünlük sağlar. Kristalografide kristal örgüler geometrik özellikleri bakımından ele alınır ve ideal bir kristal örgünün periyodik tekrarlarla uzayı tamamen doldurduğu kabul edilir (Özdemir, 2019)

Kristal örgü yapısı, a , b , c temel öteleme vektörleri ile tanımlanır ve bu vektörler yardımıyla kristalin atomik dizilimi ifade edilir. Bir kristalin herhangi bir r konumundaki atom dizilimi, $r' = r + x_1a + x_2b + x_3c$ konumunda da aynıdır. Burada x_1 , x_2 , x_3 tam sayılardır ve bu özellik kristal örgünün periyodik tekrar eden yapısını gösterir. Eğer bu öteleme vektörleri kullanılarak kristalin herhangi iki noktasındaki atomik dizilim aynı olacak şekilde bir tamsayı üçlüsü bulunabiliyorsa, bu vektörlere ilkel öteleme vektörleri adı verilir. İlkel öteleme vektörleri ile oluşturulan en küçük hacimli yapı ilkel hücre olarak tanımlanır (şekil 2.1) ve kristal örgünün temel yapı taşı oluşturur (Valéry, 2017). Ayrıca, bir örgü noktasından tüm komşu örgü noktalarına çizilen doğruların orta noktalarından dikme düzlemleri oluşturularak tanımlanan en küçük hacimli hücre Wigner-Seitz hücresi olarak adlandırılır (Şekil 2.2). Bu hücre, kristal örgünün simetri özelliklerini belirlemede ve yapının temel bileşenlerini anlamada önemli bir referans sistemidir (Dunlap, 2018)



Şekil 2.1: Üç boyutlu bir örgünün ilkel hücresi



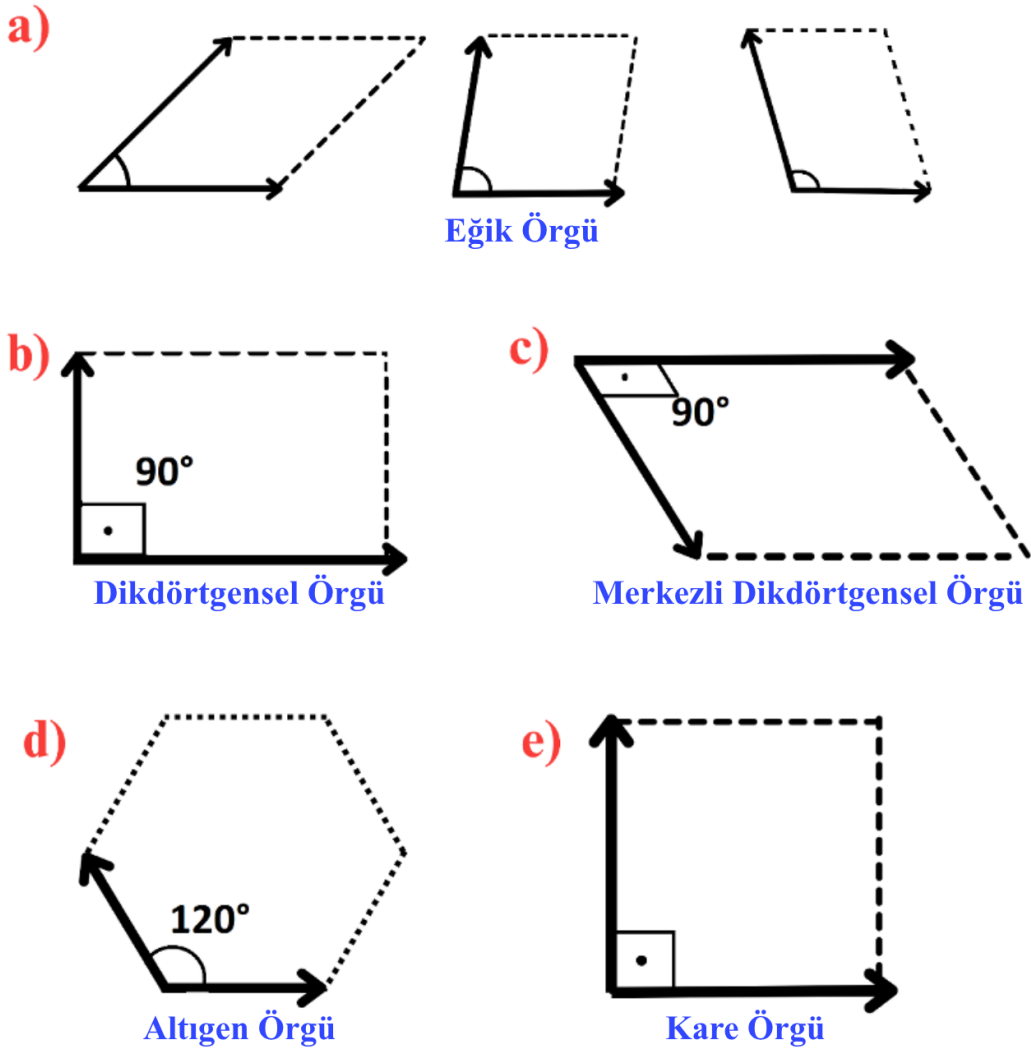
Şekil 2.2: Wigner-seitz hücresi

2.2.1 Temel örgü türleri

İki boyutlu kristal örgü tipleri, temel öteleme vektörlerinin uzunlukları (a ve b) ile aralarındaki γ açısına göre belirlenir. Bu vektörlerin uzunlukları ve açılarının serbestçe seçilebilir olması nedeniyle, teorik olarak sonsuz sayıda farklı örgü konfigürasyonu mümkündür. Bununla birlikte, belirli simetri koşulları ve açı değerleri esas alınarak bu örgüler sınıflandırılabilir (Podestá et al., 2019; Kittel, 1996).

İki boyutta eğik örgü, dikdörtgensel örgü, merkezli dikdörtgensel örgü, altıgen örgü ve kare örgü olmak üzere toplam beş farklı Bravais örgüsü bulunmaktadır. Bu örgüler, kristal yapıların temel birimlerini oluşturur ve simetri özellikleri malzemenin fiziksel davranışlarını doğrudan etkiler. Şekil 2.3a'da gösterilen eğik örgü, en genel iki boyutlu örgü tipidir. Bu örgüde, örgü vektörleri farklı uzunluklara sahip olabilir ($a \neq b$) ve aralarındaki açı ($\gamma \neq 90^\circ$) herhangi bir değer alabilir. Birim hücre paralelkenar şeklinde olup en düşük simetriye sahiptir. Dikdörtgensel örgü, eğik örgünün özel bir biçimini temsil eder. Bu örgüde temel vektörlerin uzunlukları farklı olabilir ($a \neq b$), ancak aralarındaki açı $\gamma = 90^\circ$ 'dir (Kubovy, 1994). Dolayısıyla örgü noktaları dikdörtgen bir biçimde dizilir ve simetri seviyesi eğik örgüye kıyasla daha yüksektir. Daha yüksek simetriye sahip merkezli dikdörtgenksel örgü, dikdörtgensel örgüye benzer niteliktedir (Şekil 2.3c). Ancak ilkel hücrede ek bir örgü noktası barındırır (Hathcock, 2025). Bu konfigürasyon, örgü noktalarının daha kompakt bir dizilim oluşturmasını temin eder. Şekil 2.3d'de sunulan altıgen örgü, özgün bir simetri sergiler; burada $a = b$ ve vektörler arasındaki açı $\gamma = 120^\circ$ 'dir (Moeck and DeStefano, 2018). Örgü noktaları düzenli bir altıgenin köşelerinde konumlanır ve her nokta altı komşu ile çevrelenir. Bu yapı, özellikle yüzey özellikleri açısından belirleyici rol üstlenir. Son olarak, Şekil

2.3e’de belirtilen kare örgü, iki boyutlu örgüler arasında en yüksek simetri düzeyine sahiptir. Bu örgüde $a = b$ ve $\gamma = 90^\circ$ olup, tüm örgü noktaları eşdeğer uzaklıklarda düzenlenmiştir (Moeck and DeStefano, 2018). Bu üstün simetrik yapı, çok sayıda kristal sisteminde temel örgü olarak benimsenir.

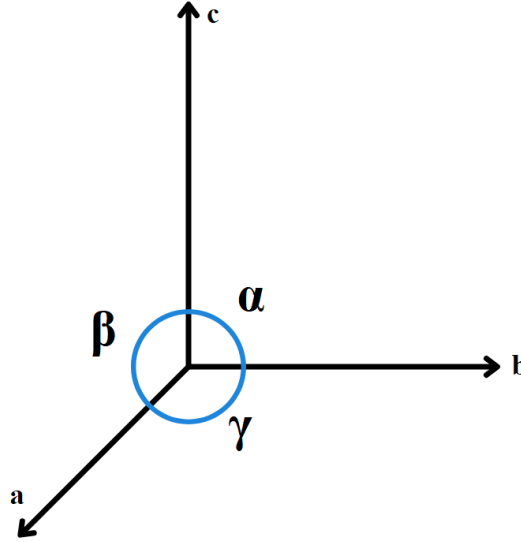


Şekil 2.3: İki boyutlu uzayda beş örgü türü

2.2.2 Üç boyutlu örgü türleri

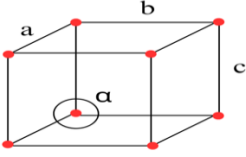
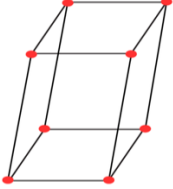
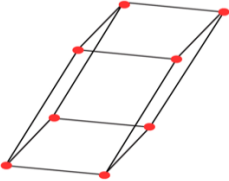
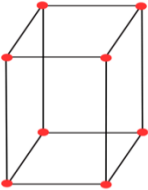
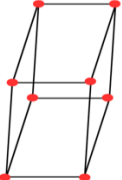
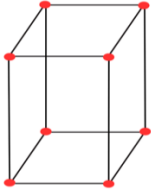
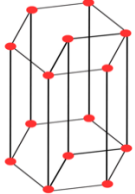
Kristal yapılar, atomların üç boyutlu uzayda belirli simetri kurallarına göre periyodik biçimde tekrarlanan düzenli dizilimlerini tanımlar. Bu yapıları tanımlamak için kullanılan temel parametreler birim hücre parametreleri olarak bilinir ve örgü vektörlerinin uzunluklarını (a , b , c) ile aralarındaki açıları (α , β , γ) kapsar (Şekil 2.4). Bu parametreler,

kristal yapının geometrik özelliklerini belirleyerek uzayda farklı düzenli yapı tiplerinin oluşumuna olanak sağlar (Browne and Attfield, 2020).



Şekil 2.4: Örgü ve öteleme vektörleri aralarındaki açılar

Birim hücre parametreleri birbirinden farklı triklinik, monoklinik, ortorombik, tetragonal, kübik, trigonal ve hekzagonal olmak üzere yedi farklı kristal sistemi vardır (Sanjiv, 2022). Bu yedi temel sistem, kristalin simetri özelliklerine göre farklılıklar gösterir (Sanjiv, 2022). Kristal yapıları daha ayrıntılı incelemek için, Bravais örgüleri kullanılmaktadır. Bravais örgüleri, kristallerin geometrik düzenini tanımlayan bir yapı olup, toplamda 14 farklı çeşidi bulunmaktadır (Koçak, 2017). Bu örgüler, temel simetri özelliklerine göre yedi tanesi ilkel ve yedi tanesi ilkel olmayan hücreler olarak sınıflandırılır (Koçak, 2017). Her bir Bravais örgüsü, belirli bir kristal sistemine ait olup, kristalin yapısını ve simetrisinin özelliklerini tam olarak yansıtır (Koçak, 2017). Şekil 2.5'te yedi kristal sistemi ve bu sistemlere karşılık gelen on dört farklı Bravais örgüsü gösterilmektedir.

 KÜBİK	Bravis Örgüsü Basit cisim merkezli Basit yüzey merkezli	Birim Hücre Parametreleri $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
 MONOKLİNİK	Bravis Örgüsü Basit	Birim Hücre Parametreleri $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
 TRİKLİNİK	Bravis Örgüsü Basit Taban merkezli	Birim Hücre Parametreler $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
 ORTOROMBİK	Bravis Örgüsü Basit Taban merkezli Cisim merkezli Yüzey merkezli	Birim Hücre Parametreler $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
 TRİGONAL	Bravis Örgüsü Basit	Birim Hücre Parametreler $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
 TETRAGONAL	Bravis Örgüsü Basit Cisim merkezli	Birim Hücre Parametreler $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
 HEKZAGONAL	Bravis Örgüsü Basit	Birim Hücre Parametreler $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$

Şekil 2.5: Kristal sistemleri

2.3 Yarıiletkenler

Yarıiletken malzemeler, elektriksel iletkenlikleri açısından iletkenler ve yalıtkanlar arasında yer alan, özellikle modern elektronik cihazların temelini oluşturan kritik materyallerdir. Bu malzemelerin en belirgin özelliği, elektriksel iletkenliklerinin kristal yapıları, enerji bant aralıkları, taşıyıcı konsantrasyonları, katkılama, sıcaklık, ışık veya uygulanan gerilim gibi dış etkenlerle geniş bir aralıkta kontrol edilebilmesidir (Çelik ve Koç, 2020). Bu benzersiz özellik, yarıiletkenleri transistörler, diyotlar ve entegre devreler gibi çeşitli elektronik bileşenlerde vazgeçilmez kılmaktadır. Yarıiletken malzemelerin iletkenlik değerleri genellikle 10^{-6} ile $10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ arasında değişmekte olup, sıcaklık, ışık veya katkı maddeleri gibi dış etkenlerle değiştirilebilir.

Yarıiletken malzemeler düzenli kristal yapılara sahiptir ve atomlar arası bağlar ağırlıklı olarak kovalent karakterdedir (Khakhar, 2023). Her atom, komşu atomlarla elektron paylaşarak kararlı bir yapı oluşturur. Bununla birlikte, sıcaklık, ışık veya katkılama gibi dış etkenler altında bazı elektronlar valans bandından koparak iletim bandına geçer (Bernardo et al., 2024). Bu süreçte iletim bandında serbest elektronlar, valans bandında ise boşluklar oluşur (Emriskova, 2021). Elektron ve boşlukların zıt yönlerde hareketi, yarıiletkenlerde elektrik akımının taşınmasını sağlar.

Yarıiletkenler, yasak enerji aralığının büyüklüğüne göre iletkenlerden ve yalıtkanlardan ayrılırlar. Bu aralık genellikle 0.1 eV ile 4 eV arasında değişmektedir (Islam et al., 2024). Bu bant aralığı, valans bandındaki elektronların termal veya fotonik uyarım ile iletim bandına geçişini belirleyerek malzemenin elektriksel iletkenliğini doğrudan etkiler (Erkişi, 2022). Yarıiletkenlerde elektronlar valans bandından iletim bandına termal olarak uyarıldığında, değerlik bandında boşluklar bırakırlar ve bu boşluk elektron çiftlerinin oranı sıcaklığın tersiyle değişir (Correia et al., 2017). Yarıiletken malzemeler, elementel, bileşik ve organik formlar dahil olmak üzere geniş bir yelpazede incelenmekte olup, her biri kendine özgü bant yapısı ve taşıyıcı dinamikleri ile farklı elektronik ve optoelektronik uygulamalar için özelleştirilmiştir.

Elementer yarıiletkenler, tek bir kimyasal elementten oluşan ve periyodik tablonun IV-A grubunda yer alan malzemelerdir. Bu grubun en bilinen üyeleri silisyum ve germanyumdur. Özellikle silisyum, yüksek saflıkta üretilebilmesi ve kararlı özellikleri nedeniyle mikroelektronik sanayinin temelini oluşturmaktadır. Bu malzemeler, termal enerjiyle

kolayca uyarılabilen ve serbest elektron ile boşluk çiftleri oluşturabilen yarıiletken özelliklerini, kristal kafeslerindeki kovalent bağ yapılarından almaktadır. Bu elementlerin bant aralıkları, oda sıcaklığında elektronik cihaz uygulamaları için uygun seviyelerde olup, yüksek saflıkta üretim süreçleri sayesinde elektriksel özellikleri hassas bir şekilde kontrol edilebilir. Bu kontrol yeteneği, transistör ve diyot üretiminde temel bir avantaj sağlarken, doping yoluyla n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerin oluşturulmasına da olanak tanır.

Bileşik yarıiletkenler ise iki veya daha fazla farklı elementin belirli oranlarda birleşerek oluşturduğu malzemelerdir. Bunlar genellikle III-V veya II-VI grubu elementlerinden meydana gelir. Bu bileşikler, element yarıiletkenlere kıyasla daha geniş bant aralıklarına ve yüksek elektron hareketliliklerine sahip olabilirler, bu da onları yüksek frekanslı elektronik, optoelektronik ve lazer diyot gibi özel uygulamalar için ideal kılar. Örneğin, galyum arsenit ve indiyum fosfit gibi III-V yarıiletkenler, hızlı anahtarlama ve yüksek sıcaklık performansı gerektiren mikrodalga ve milimetre dalga uygulamalarında önemli rol oynar. Bu bileşiklerin heteroyapı oluşturma potansiyeli, optik ve elektronik özelliklerin mühendislik açısından ayarlanabilmesine olanak tanıyarak, gelişmiş aygıt performansları sunar. Bu malzemelerin enerji bant yapılarının doğrudan veya dolaylı olması, fotovoltaik hücreler ve LED'ler gibi optoelektronik aygıtların verimliliğini doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. Bu bağlamda, doğrudan bant aralığına sahip bileşik yarıiletkenler foton emisyonu ve soğurumu açısından daha verimli olup, ışık yayan diyotlar ve güneş pilleri gibi cihazlarda tercih edilirken, dolaylı bant aralığına sahip olanlar ise genellikle daha uzun taşıyıcı ömürleri sunar. Bu farklılıklar, her bir yarıiletken türünün belirli uygulama alanlarındaki üstünlüğünü belirlemede kilit rol oynamaktadır.

Organik yarıiletkenler, karbon atomlarının ana iskeleti oluşturduğu, genellikle polimerik veya moleküler yapıda bulunan malzemelerdir ve inorganik muadillerine kıyasla esneklik, hafiflik, düşük maliyetli üretim imkanları sunarlar. Bu malzemelerin elektriksel iletkenliği, moleküller arası elektron transferi yoluyla gerçekleşmekte olup, genellikle inorganik yarıiletkenlere göre daha düşüktür ancak kimyasal modifikasyonlarla optimize edilebilir. Bu malzemelerin bant aralığı, moleküler enerji seviyelerinin örtüşmesiyle belirlenir ve optik absorpsiyon ile emisyon özelliklerini doğrudan etkiler. Organik yarıiletkenler, özellikle organik güneş pilleri, organik ışık yayan diyotlar ve esnek elektronik cihazlar gibi yenilikçi uygulamalar için büyük bir potansiyel taşımaktadır. Özellikle, düşük sıcaklıkta işlenebilirlik

ve ayarlanabilir moleküler yapılar, bu malzemelerin özel optoelektronik ve biyomedikal sensör uygulamalarında yeni ufuklar açmasını sağlamaktadır.

2.3.1 Yarıiletkenlerin bant yapısı

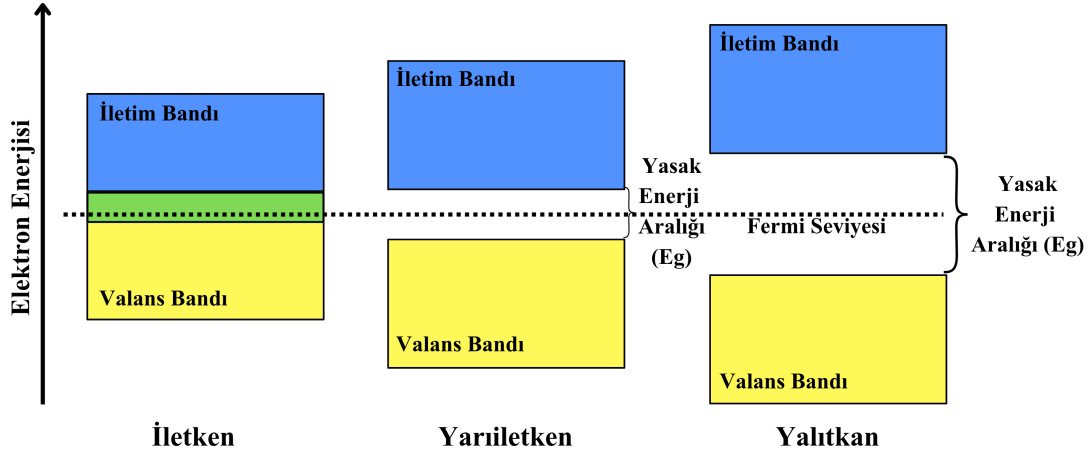
Katı hal fiziğinde, yarıiletken malzemelerin elektriksel ve optik özellikleri bant teorisiyle açıklanmaktadır (Khakhar, 2023). Kristal yapıya sahip katılarda atomların düzenli ve periyodik dizilimi, elektronların enerji düzeylerinde belirli izinli ve yasaklanmış bölgelerin oluşumuna yol açar (Tengeler, 2017). Bu olgu, kristal örgüdeki periyodik potansiyel alanın doğal bir sonucudur. Elektronlar, bu potansiyel içinde yalnızca belirli enerji seviyelerinde bulunabilir ve bu seviyeler izinli bantlar olarak adlandırılır (Sekavčnik et al., 2025). İzinli bantlar arasındaki elektronların erişemediği enerji bölgesi ise yasak enerji aralığı veya bant aralığı (E_g) olarak tanımlanır (Pereira et al., 2024). Bu bant yapısı, bir yarıiletkenin optik ve elektriksel özelliklerini temelden belirler (Lédée, 2018).

Elektronlar, katı maddelerde enerji seviyelerine göre valans bandı ve iletim bandı olarak iki ana bantta konumlanır (Emriskova, 2021). Bu bantlar arasındaki yasak enerji aralığı, malzemenin elektriksel iletkenliğini belirleyen temel parametredir (Qiu, 2021). Bant aralığının genişliği, malzemenin iletken, yarıiletken veya yalıtkan karakterini doğrudan tayin eder (Heckmann, 2018). İletkenlerde bu aralık ihmal edilebilir düzeydedir ve elektronlar serbestçe hareket edebilir; yarıiletkenlerde ise tipik olarak 0.1–3.5 eV arasında değişirken, yalıtkanlarda 5 eV'nin üzerindedir. (Kittel ve McEuen, 2018)

Kristal kafes içindeki bir elektronun potansiyel enerjisi, atom çekirdeklerinin konumuna göre değişim gösterir. Çekirdeğe en yakın bölgede bu enerji minimum düzeyde olup, atomlar arası interstisyel bölgelerde ise yükselir. İç yörüngedeki çekirdek elektronları, güçlü bağları nedeniyle elektriksel iletkenliğe doğrudan katkıda bulunmaz. Buna karşın, dış kabuktaki valans elektronları kristal boyunca delokalizasyon eğilimi sergileyerek malzemenin elektriksel özelliklerini belirler (Güneri, 2009).

Yarıiletkenlerde, elektronların valans bandından iletim bandına geçişi için dışarıdan bir enerji girdisi zorunludur. Bu enerji, tipik olarak ısı uyarım, foton soğurulması veya elektrik alanı uygulanması yoluyla temin edilebilir (Bernardo et al., 2024). Metallerde valans ve iletim bantlarının örtüşmesi nedeniyle elektronlar serbestçe hareket edebilmekteyken (Turner ve Debbage, 2018), yarıiletkenlerde bu geçiş belirli bir enerji bariyerinin aşılmasını

gerektirmektedir (Ashcroft and David, 1976). Yalıtkanlarda ise bant aralığı oldukça geniş olduğundan, oda sıcaklığındaki termal enerji bu bariyeri aşmaya yeterli değildir (Gullo, 2018). Bununla birlikte, yarıiletkenlerde uygun sıcaklık, ışık veya elektriksel koşullar altında bu enerji aralığı aşılabildiği için malzemenin iletkenliği dış etkenlerle etkin bir biçimde kontrol altına alınabilmektedir (Ahmadov et al., 2022). Bant yapıları Şekil 2.6’da sunulmaktadır.



Şekil 2.6: Yarıiletkenlerin bant yapıları

Yasak enerji bant aralığı (E_g), yarıiletken malzemelerin kimyasal bileşimi ve kristal yapısıyla doğrudan ilişkilidir. Örneğin, silisyum için $E_g=1.12\text{eV}$, germanyum için $E_g= 0.67 \text{ eV}$ ve galyum arsenit için $E_g= 1.43 \text{ eV}$ değerlerindedir (Peter ve Cardona, 2010). Bu farklılıklar, malzemelerin optoelektronik ve mikroelettronik uygulamalardaki performanslarını belirleyen temel etkenlerdir. Ayrıca, bant aralığı sıcaklık ve basınç gibi dış etkenlerden etkilenir (Francisco-López et al., 2019). Sıcaklık arttıkça atom titreşimleri yoğunlaşır ve bu, enerji bantlarında daralmalara yol açar (Francisco-López et al., 2019). Bu daralma, yasak bant enerjisinin azalmasına neden olur; böylece daha düşük enerjili fotonlar veya termal enerjiyle elektron geçişleri mümkün hale gelir (Güler and Güler, 2017). Yasak bant genişliğinin belirlenmesi ise malzeme karakterizasyonunda kritik bir adımdır ve genellikle optik soğurma spektrumları kullanılarak yapılır (Güler and Güler, 2017).

2.4 Katkılı Yarıiletkenler

Katkılı yarıiletkenler, kristal yapıya kontrollü oranlarda yabancı atomlar eklenerek elektriksel iletkenliği modifiye edilen yarıiletken malzemelerdir (Pramanik et al., 2024). İçsel yarıiletkenlerde iletkenlik, valans bandındaki elektronların termal uyarım yoluyla

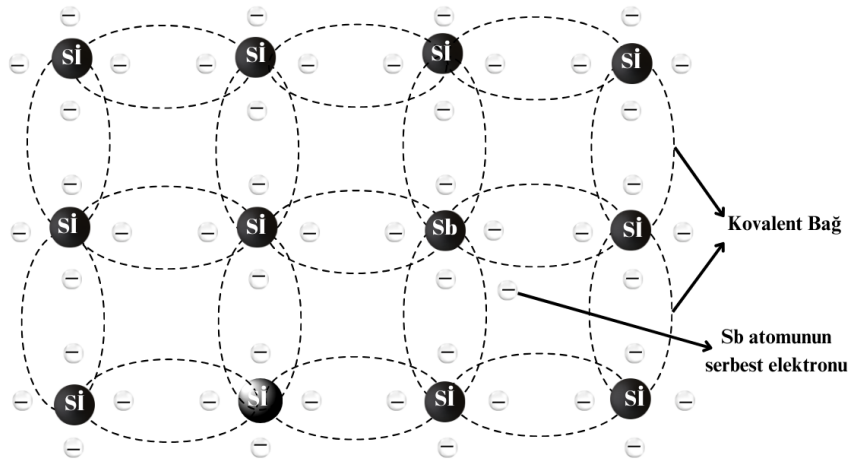
iletim bandına geçişiyle sağlanırken (Khakhar, 2023), katkılı yarıiletkenlerde bu süreç dışarıdan ilave edilen safsızlık atomları aracılığıyla etkin biçimde düzenlenir. Katkılama işlemi, belirli konsantrasyonlarda yabancı atomların kristal kafese entegre edilmesiyle gerçekleştirilir ve malzemenin iletkenliğini önemli ölçüde artırır (Jordan, 2017).

Katkılı yarıiletkenlerin elektriksel ve optik özellikleri, eklenen safsızlık atomlarının türüne göre değişir. Grup V elementleri gibi donör katkılar (örneğin, silisyuma fosfor eklenmesi) elektron yoğunluğunu artırırken, Grup III elementleri gibi akseptör katkılar (örneğin, bor) boşluk yoğunluğunu artırır. Bu şekilde katkılı yarıiletkenler n-tipi veya p-tipi olarak sınıflandırılır.

2.4.1 n-Tipi yarıiletkenler

n-tipi yarıiletkenler, elektronların taşıyıcı olarak işlev gördüğü ve katkı atomlarının donör karakter sergilediği yarıiletken malzemelerdir. n-tipi katkılama, yarıiletken kristal yapısına fosfor, arsenik veya antimon gibi beş değerlikli atomların kontrollü eklenmesiyle gerçekleştirilir. Bu katkı atomları, valans elektronlarını ana kristal kafese bağladıktan sonra fazla bir elektron bırakır. Bu elektron, düşük bir enerji bariyeriyle (~ 0.01 eV) iletim bandına uyarılır ve böylece malzemenin elektriksel iletkenliği önemli ölçüde artırılır. Bu süreç, taşıyıcı hareketliliğini ve genel elektriksel performansı iyileştirir. Elektron yoğunluğu, bu tür yarıiletkenlerde boşluk yoğunluğundan daha yüksek olduğundan, n-tipi malzemeler genellikle elektronik cihazlarda hızlı anahtarlama ve yüksek frekanslı uygulamalar için tercih edilir (Tannous, 2016). n-tipi yarıiletkenlerin elektronik band yapısında, donör enerji seviyesi iletim bandının hemen altında yer alır ve bu durum, elektronların termal veya optik yolla kolayca uyarılmasını sağlar (Garip, 2021).

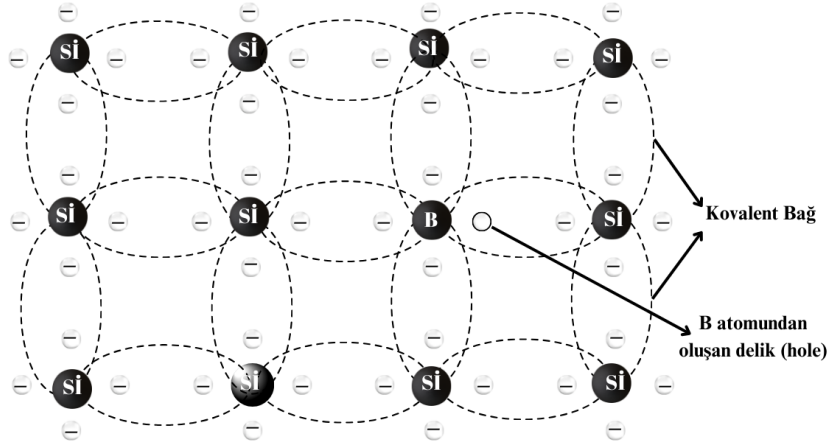
n-tipi yarıiletkenlerde katkılama işlemi, kristal yapıda yeni enerji seviyeleri oluşturur ve malzemenin optik özelliklerini değiştirir. Özellikle soğurma kenarında enerji kaymaları, optik geçirgenlikte azalma ve kırılma indeksinde değişimler gözlenir (Fischer et al., 2011; Poumirol et al., 2021). Şekil 2.7’de n-tipi yarıiletken malzemenin oluşturulması gösterilmektedir.



Şekil 2.7: n-tipi yarıiletken malzemenin oluşturulması

2.4.2 p-Tipi yarıiletkenler

p-tipi yarıiletkenler, çoğunluk taşıyıcıları boşluklar olan ve akseptör atomlarıyla katkılandırılmış malzemelerdir. Katkılama işlemi sırasında yarıiletken kristaline bor (B), alüminyum (Al), galyum (Ga) veya indiyum (In) gibi üç değerlikli atomlar eklenir. Bu atomlar, dört değerlikli silisyum (Si) veya germanyum (Ge) kristal yapısına yerleştiğinde, bağ kuracak yeterli elektrona sahip olmadıklarından dolayı valans bandında bir eksiklik oluşur. Bu eksiklik, boşluk olarak adlandırılır ve pozitif yüklü bir taşıyıcı gibi davranarak elektriksel iletimi sağlamaktadır (Khattak, 2019; Papachristou, 2022). Bu boşluklar, komşu atomlardan elektron çekerek kristal içinde hareket edebilir, böylece iletkenliğe katkıda bulunurlar (Khoury, 2017; Khwaira, 2023). p-tipi malzemelerde boşluk konsantrasyonu elektron konsantrasyonundan daha yüksek olup, akseptör enerji seviyesi valans bandına çok yakın konumlanır; bu durum, valans bandındaki elektronların bu seviyelere kolayca geçiş yaparak serbest boşluklar bırakmasına imkân tanır (Martinez, 2019). Bu durum, p-tipi yarıiletkenlerin fotovoltaiik hücreler ve transistörler gibi çeşitli elektronik aygıtlarda kritik bir bileşen olarak kullanılmasını sağlar (Adak et al., 2019). Özellikle, p-tipi ve n-tipi yarıiletkenlerin birleşimi olan p-n eklemler, diyotların, transistörlerin ve diğer katkı hal devrelerinin temelini oluşturarak fotovoltaiik hücrelerin de prensibini açıklar (Bomben, 2018; Çelik ve Koç, 2020; Şahan et al., 2024). p tipi yarıiletken malzemenin oluşturulması Şekil 2.8’de verilmektedir.



Şekil 2.8: p-tipi yarıiletken malzemenin oluşturulması

2.5 ZnO Özellikleri

Çinko oksit (ZnO), II-VI grubu bir yarıiletken malzemedir ve elektronik, optoelektronik, sensör teknolojileri ve nanoteknoloji alanlarında geniş uygulama potansiyeline sahiptir. Özellikle ZnO ince filmleri, TCO'lar olarak güneş pillerinde ve LED'lerde tercih edilmektedir (Ameen et al., 2018; Büyük ve Ilıcan, 2019). Oda sıcaklığında 3.37 eV'lık direkt yasak bant aralığına sahip olan ZnO, optoelektronik cihazlar, fotovoltaik sistemler ve nanoteknoloji tabanlı uygulamalar için uygundur (Nahhas, 2019; Ünal, 2023). Bu geniş bant aralığı, malzemenin UV ışık emme ve emisyon kabiliyetini sağlayarak, UV ve mavi ışık kaynaklarında değerli kılar (Gora et al., 2023; Nahhas, 2019; Gora et al., 2023; Nahhas, 2019).

ZnO'nun elektriksel özellikleri, doğal n-tipi iletkenlik gösterir. Bu, yapısındaki çinko fazlalığına (Kim and Park, 2009) veya stokiometrik olmayan büyüme koşullarına (Ashrafi and Jagadish, 2007) bağlıdır. Üretim sürecinin düşük maliyetli ve çevre dostu olması, ZnO'yu sürdürülebilir bir malzeme yapar (Gallegos et al., 2018; Muslih and Munir, 2018). Özellikleri ise yüksek eksiton bağlanma enerjisi sayesinde güçlü soğurma ve emisyon sergilenmektedir. Kimyasal modifikasyon ve katkılama esnekliği sunar (Barnes and Das, 2018; Moussa et al., 2021). Yüksek termal ve mekanik kararlılığı (Muslih and Munir, 2018), UV lazer diyotları, gaz ve biyosensörler gibi yüksek performanslı uygulamalarda kullanımını sağlar. Görünür ışık bölgesinde yüksek geçirgenlik gösteren ZnO ince filmleri, güneş pilleri ve LED teknolojilerinde TCO olarak yaygınlaşmıştır (Gallegos et al., 2018; Muslih and Munir, 2018). Buna ek olarak, geniş bant aralığına sahip n-tipi bir yarı iletken

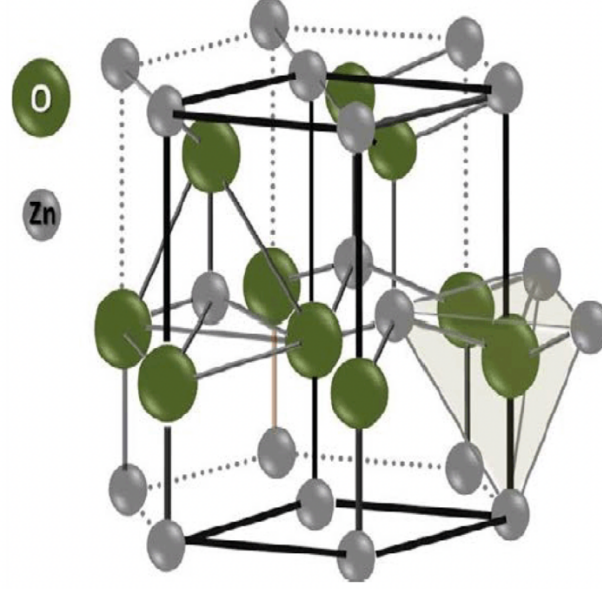
olan ZnO, optoelektronik cihazlarda ve gaz sensörleri içinde yaygın olarak incelenmektedir. Bu malzemenin en belirgin özelliklerinden biri, görünür bölgede yüksek optik geçirgenliğe ve geniş optik bant aralığına sahip olmasıdır (Büyük ve İlcan, 2019). Bu geniş bant aralığı, ZnO'nun yüksek enerjili fotonları soğurma kabiliyetini artırırken, şeffaflığı ise optoelektronik uygulamalar için ideal bir aday olmasını sağlar (Efkere, 2024; İlcan ve Büyük, 2018; Shahzad et al., 2021). Bununla birlikte, ZnO'nun 60 meV'lik yüksek eksiton bağlanma enerjisi, oda sıcaklığında dahi eksitonların kararlılığını sağlayarak, düşük eşik değerli optik cihazların geliştirilmesinde önemli bir avantaj sunmaktadır (Aşma et al., 2021; Raha and Ahmaruzzaman, 2022). Ayrıca, ZnO'nun yüksek elektron hareketliliği ve termal kararlılığı, onu ışık yayan diyotlar ve fotovoltaiik cihazlar gibi elektronik uygulamalarda oldukça etkili kılmaktadır (Kara et al., 2024). Bu benzersiz özellikleri sayesinde ZnO, fotokatalitik ve termoelektrik uygulamalarda da kayda değer performans sergileyen umut vadeden fonksiyonel oksit nanoyapılarından biridir (Takçı, 2022).

2.5.1 ZnO kristal yapısı

Çinko oksit, kristalografik açıdan kararlı formu olan hegzagonal wurtzite yapısında kristalleşir. Bu yapının uzay grubu P6₃mc olup, ZnO'nun en yaygın ve stabil kristal formunu temsil eder. Wurtzite yapısı, Zn ve O atomlarının hegzagonal dizilimle oluşturduğu üç boyutlu kristal kafes sistemidir ve ZnO'nun kristalografik, optik ile elektriksel özelliklerinin belirlenmesinde kritik rol oynar (Jagadish and Pearton, 2011).

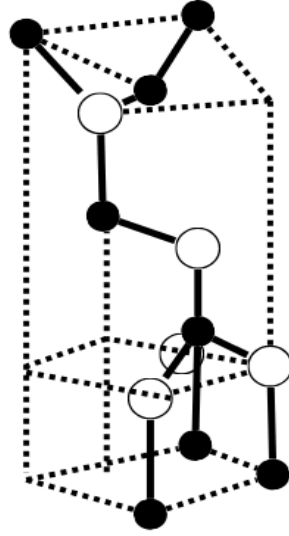
ZnO'nun wurtzite yapısında her bir çinko (Zn²⁺) iyonu dört oksijen (O²⁻) iyonuyla, her bir oksijen iyonu da dört çinko iyonuyla tetrahedral koordinasyon oluşturur. Bu düzen, iyonik ve kovalent bağ karakterlerinin birleşimini sergileyerek ZnO'nun hem yarıiletken hem de piezoelektrik özellik göstermesine neden olur. Kristal örgü, iki karşılıklı alt örgü (Zn ve O) içerir ve bu alt örgüler birbirine göre c-ekseni boyunca yaklaşık $u = 0.3825$ oranında ötelenmiştir. Bu parametre, oksijen atomlarının çinko atomlarına göre konumunu belirleyen içsel bir yerleşim oranıdır. ZnO'nun wurtzite yapısında birim hücre parametreleri yaklaşık olarak $a = 3.249 \text{ Å}$ ve $c = 5.206 \text{ Å}$ değerindedir. İdeal c/a oranı yaklaşık 1.633 olup, bu oran ZnO'nun yüksek simetriye sahip, kararlı bir kristal örgüye sahip olduğunu göstermektedir (özgür et al., 2005; Ellmer 2011). Hekzagonal wurtzite yapısında, Zn ve oksijen atomları, (001) yüzeyi üzerinde polar bir düzenleme gösterir ve c-ekseni doğrultusunda yönelim sağlar. Bu yönelim, ZnO'nun tüm yapısal, fiziksel ve elektriksel özelliklerinin belirlenmesinde belirleyici bir faktördür (Jagadish and Pearton, 2011). ZnO'nun wurtzite

kristal örgüsündeki Zn–O bağ uzunluğu yaklaşık 1.97 Å olup, bu güçlü bağ yapısı malzemenin yüksek mekanik kararlılığını destekler. İnce film formunda üretildiğinde genellikle (002) yönelimi baskın olur; bu yönelim ZnO’nun optik ve elektriksel özelliklerini doğrudan etkileyen önemli bir faktördür (Demirci, 2006; Kahveci, 2017).

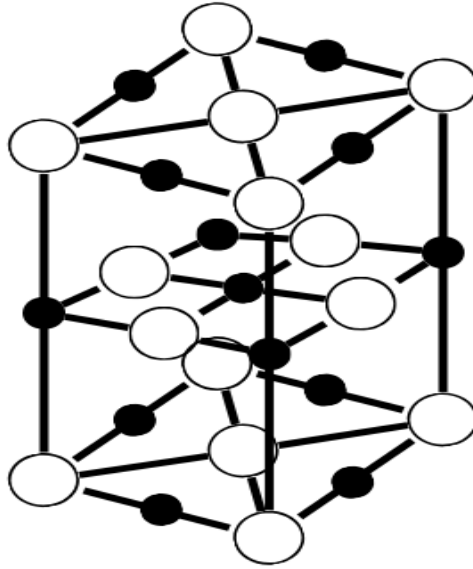


Şekil 2.9: Hekzagonal Wurtzite kristal yapısı (Kahveci, 2017)

ZnO, termodinamik denge koşullarında wurtzite fazında kararlıdır; ancak belirli koşullar altında sfalerit tipi kübik veya kübik NaCl (rocksalt) yapısı gibi alternatif kristal fazlarda da stabilize olabilir. Sfalerit fazı genellikle kübik alt tabakalar üzerinde epitaksiyel büyüme sırasında ortaya çıkar. Yüksek basınç altında ise NaCl yapısına geçiş yapar. Bununla birlikte, bu fazlar termodinamik olarak kararsızdır ve standart ortam koşullarına dönüldüğünde wurtzite fazına geri döner (Özgür et al., 2005).



Şekil 2.10: ZnO hekzagonal kübik (sfalerit tipi kübik) kristal yapısı



Şekil 2.11: ZnO hekzagonal (NaCl tipi) kristal yapısı

2.6 İnce Filmler ve Teknolojide Uygulamaları

İnce filmler, farklı üretim teknikleriyle kontrollü bir şekilde alttabaka üzerine atomsal veya moleküler düzeyde oluşturulan ince tabakalardır. Genellikle nanometre ile mikrometre kalınlığında, tek veya çok katmanlı yapılar halinde karakterize edilirler (Rubin et al., 2023). Yüzey/hacim oranı ve kuantum sınırlama etkileri gibi boyutsal faktörler nedeniyle yığın halindeki malzemelerden farklı optik, elektriksel ve mekanik özellikler sergilerler (Attaf,

2011). Bu özellikler, ince filmleri mikroelektronik, optoelektronik, sensör ve enerji depolama uygulamalarında kritik bir konuma getirir (Rubin et al., 2023).

Malzeme biliminde ince film teknolojisi, yüzey mühendisliği ve nanoteknoloji alanlarında temel bir araştırma konusudur ve fonksiyonel özellikleri atomik düzeyde düzenlemeye imkân verir (Ateş and Gönüllü, 2019). Fiziksel buhar biriktirme, CVD ve atomik katman biriktirme gibi yöntemlerle üretilen ince filmler, kompozisyon, yapı ve kalınlık açısından hassas kontrol edilerek istenilen elektriksel, optik, manyetik veya mekanik özelliklerin elde edilmesini sağlar (Rubin et al., 2023). Bu sayede yeni nesil elektronik ve fotonik cihazların geliştirilmesinde kritik bir rol oynar.

Elektronik ve yarı iletken teknolojilerinde en yaygın kullanım alanlarına sahiptir (Rubin et al., 2023). Silikon, galyum arsenit, germanyum, kadmiyum sülfid ve kadmiyum tellürit gibi yarı iletken malzemelerden üretilen ince filmler, mikroelektronik devreler, transistörler ve optoelektronik cihazlarda yüksek performans ve enerji verimliliği sağlar (Sancakoğlu, 2020). Nanoteknoloji ve polimer bilimindeki gelişmeler hem daha verimli hem de daha düşük maliyetli yarı iletken ince film malzemelerine olan ilgiyi artırmıştır (Sancakoğlu, 2020). Nanoyapılı ince filmler, güneş hücrelerinde enerji verimliliği için önemli bir kaynak olarak değerlendirilmektedir (Sancakoğlu, 2020).

Enerji sektöründe ince filmler, güneş hücrelerinin verimliliğini artırarak maliyetleri düşürür. Optik kaplamalarda ışık geçirgenliği ve yansıtıcılığı optimize ederken, fotovoltaik hücrelerde güneş enerjisini daha verimli dönüştürür ve sürdürülebilir enerji teknolojilerinde de önemli bir yer tutar (Rubin et al., 2023). Batarya teknolojilerinde de ince filmlerin verimliliği artırdığı görülmektedir (Rubin et al., 2023).

Biyomedikal mühendisliğinde biyosensörler, ilaç taşıma sistemleri ve implant kaplamalarında yaygın olarak kullanılır (Rubin et al., 2023). Mezoporöz titanyum yüzeyler ve nanotübüler titanyum katmanları, biyomedikal uygulamalar için çekici bir seçenektir. Bu yüzeyler ilaç kapsülasyonu, büyüme faktörleri ve antibiyotikler için tasarlanabilir (Muzzio et al., 2020). Hidroksiapatit kaplamaları, implant yüzeylerinin biyoyumluluğunu artırarak kemik bütünleşmesini destekler (Ekmekci and Yurtcan, 2020). Altın ve platin metalik kaplamalar, nöronlardan sinyal izlemek için mikroelektrot olarak kullanılırken, platin bazlı ince filmler kalp pili, implante defibrilatör, stent ve işitme yardımcı cihazlarında iyi

elektriksel iletkenlik ve biyouyumlulukları nedeniyle tercih edilir (Muzzio et al., 2020). Biyoseramik ince filmler, implant ve protezlerin kaplanmasında metal alttabakaya kıyasla daha iyi korozyon direnci ve biyoaktivite sağlar (Muzzio et al., 2020). Tıbbi cihazlar ve tanı araçlarında da ince film teknolojisi önemli uygulamalara sahiptir (Rubin et al., 2023).

Özellikle piezoelektrik özellik gösteren ince filmlerin elektronik cihazlar, optoelektronik devreler ve bilgi teknolojisi alanlarında şeffaf elektrotlar, güneş pilleri, gaz sensörleri, fotodiyotlar, transistörler, varistörler, fotodedektörler ve yüzey akustik dalga aygıtları gibi potansiyel uygulamaları, bu alandaki araştırmaların yoğunlaşmasına neden olmuştur (Aydın, 2018). Bu filmler, optik kaplamalar, termal bariyer kaplamalar ve mekanik aletlerin sertliğini artırma gibi çeşitli endüstriyel kullanımlara da sahiptir (Götsch et al., 2019).

Sonuç olarak, ince film teknolojisi geniş uygulama yelpazesi ve yenilikçi çözümleriyle modern bilimin ve mühendisliğin ayrılmaz bir parçasıdır. Elektronikten biyomedikale, enerjiden malzeme mühendisliğine uzanan bu teknoloji, gelecekte yeni nesil malzemelerin ve cihazların geliştirilmesini hızlandıracaktır (Rubin et al., 2023).

2.6.1 İnce film üretim teknikleri

İnce film üretim teknikleri, malzeme bilimi ve nanoteknoloji alanlarında kapsamlı bir uygulama yelpazesine sahip olup, çok çeşitli yöntemlerle üretilebilmektedir. İnce filmler, atomik veya moleküler düzeyde kontrollü depozisyon yoluyla alttabaka yüzeylerine uygulanarak, malzemenin yüzey özelliklerini istenen biçimde değiştirmek amacıyla geliştirilmiştir. Bu teknikler, genel olarak buhar fazı büyütme, sıvı fazı büyütme ve katı fazı büyütme şeklinde üç ana kategoriye ayrılmaktadır (Krishna, 2002). Her bir yöntem, kullanılan malzeme ve hedeflenen film karakteristiklerine göre farklı avantajlar sunmaktadır (Şekil 2.12).



Şekil 2.12: İnce film üretim teknikleri

Buhar fazı büyütme teknikleri, ince filmlerin bir altlık yüzeyine buharlaştırılmış malzemenin kontrollü biçimde çökertilmesi esasına dayanır (Sakthinathan et al., 2025). Bu teknikler arasında fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) en yaygın olanlardır. PVD’de hedef malzeme fiziksel olarak buharlaştırılıp yüzeye taşınırken, kimyasal buhar biriktirmede reaktif gazlar yüzeyde kimyasal reaksiyona girerek film oluşturur. Genellikle yüksek sıcaklık ve vakum koşulları gerektiren bu yöntemler, yüksek saflıkta, yoğun ve düzgün ince filmler üretmek için tercih edilir (Basu, 2022; Sancakoğlu, 2020)

Katı fazı büyütme yöntemleri ise ince filmlerin doğrudan katı halden büyütülmesiyle elde edildiği tekniklerdir (Barbier, 2022). Buhar ve sıvı fazı yöntemlerine kıyasla daha az yaygın olan bu teknikler (Barbier, 2022; Sönmezoğlu et al., 2012) genellikle yüksek sıcaklıklarda yeniden kristalleşme veya yüzey modifikasyonu süreçleriyle gerçekleştirilir (Kang et al., 2015; Marzouki, 2020). Özellikle yarıiletken üretiminde yüzey özelliklerini iyileştirmek veya difüzyon tabakaları oluşturmak amacıyla kullanılır (Miroshnik et al., 2021; Kahrizi and Sohi, 2020).

Sıvı fazda büyütme yöntemleri, kimyasal çözeltiler kullanılarak ince filmlerin oluşturulmasını sağlar (Alfaro-Cruz et al., 2023). Bu gruptaki başlıca teknikler kimyasal banyo, sol-jel ve elektrokimyasal biriktirme olarak sıralanabilir (Sönmezoğlu et al., 2012).

Kimyasal banyo yöntemi, belirli sıcaklık ve pH koşullarında çözeltideki kimyasal reaksiyonlarla film tabakasının altlık yüzeyine birikmesine dayanır (Chaudhari, 2021; Toma et al., 2024) Düşük sıcaklık ve maliyet avantajıyla öne çıkar (Hone and Abza, 2019). Elektrokimyasal biriktirme, elektrolit çözeltisindeki iyonların elektriksel potansiyel farkıyla elektrot yüzeyine biriktirilmesine dayanır (Yang, 2022). Film kalitesi, uygulanan potansiyel, akım yoğunluğu, elektrolit bileşimi ve sıcaklık gibi parametrelere bağlıdır. Metal oksitler, süperiletkenler ve yarıiletkenlerin kaplanması sıklıkla tercih edilir (Bhattacharya and Deb, 2000). Sol-jel yöntemi ise sıvı fazı büyütme tekniklerinde önemli bir yere sahiptir. Metal tuzları veya alkoksitler, uygun çözücünde hidroliz ve yoğunlaşma reaksiyonlarıyla kolloidal jel oluşturur. Yaşlandırma sonrası kaplamaya hazır hale gelen sol, düşük sıcaklık, yüksek homojenlik ve ekonomiklik avantajlarıyla yaygın kullanılır (Azem and Birlik, 2018). Uygulama teknikleri arasında döndürme, püskürtme ve daldırma kaplama bulunur. Döndürme ile kaplama yönteminde çözelti, yüksek hızda dönen altlık üzerine damlatılarak merkezkaç kuvvetiyle yüzeye homojen şekilde yayılır. Püskürtme ile kaplama, sol çözeltisinin bir püskürtme tabancası aracılığıyla altlık üzerine homojen olarak dağıtılması prensibine dayanır. Daldırma ile kaplama yönteminde ise altlık, belirli bir hızda sol içerisine daldırılıp çıkarılarak kaplama gerçekleştirilir. Her üç yöntem de film kalınlığının kontrol edilebilirliği, düşük maliyet ve kolay uygulanabilirlik açısından avantaj sağlar (Nikitenkov, 2017).

İnce film üretim teknikleri, üretilen malzemeye ve hedeflenen özelliklere bağlı olarak değişkenlik gösterir. Buhar fazda büyütme, yüksek sıcaklıkta ve vakum ortamında gerçekleşen hassas kaplama yöntemleri sunarken, sıvı fazda büyütme daha düşük sıcaklıkta, kontrollü ve ekonomik çözümler sağlar. Özellikle sol-jel yöntemi, sunduğu esneklik ve kolay uygulanabilirlik ile geniş bir kullanım alanına sahip olup, daldırmalı kaplama gibi tekniklerle homojen ve kaliteli ince filmler üretmek mümkündür. Biz çalışmamızda sol jel daldırma kaplama yöntemini kullandığımız için bu tekniği detaylandırdık.

2.6.1.1 Sol-Jel yöntemi

Sol-jel yöntemi, özellikle ince film kaplamaları başta olmak üzere geniş bir uygulama yelpazesine sahip olup, düşük sıcaklıklarda yüksek saflıkta malzeme sentezine olanak tanıyan etkili bir yöntemdir (Klein, 1988). Tarihsel olarak 1846 yılında Ebelmen tarafından tesadüfen keşfedilmişse de başlangıçta bilim camiasında yeterli ilgi görmemiştir. 1939 yılında Geffcken'in ince film üretimi üzerine yürüttüğü çalışmalar, bu yöntemin gelişimine

öncülük etmiştir. 1950'li yıllardan itibaren ise sol-jel yöntemi, malzeme bilimi disiplininde yaygın olarak benimsenmiştir (Klein, 1988).

Sol-jel yöntemi, çözelti bazlı bir tekniktir ve başlangıçta sıvı fazda bulunan bir sistemin katı faza dönüşmesiyle ilerleyen bir süreçtir (Pierre, 2013). Bu yöntemde genellikle metal tuzları veya metal alkoksitler başlangıç malzemesi olarak kullanılır. Özellikle ince film kaplamalar, nano malzemeler, lif yapılar ve mikro gözenekli zarlar gibi geniş bir uygulama alanına sahip bir yöntemdir. Sol-jel sürecinde, katı maddelerin sıvı süspansiyon içinde çözünmesiyle sol oluşmaktadır. Bu sistemde, Van der Waals kuvvetleri ve elektrostatik itme kuvvetleri, yerçekimi kuvvetine kıyasla daha baskın olduğu için çözünen malzemeler çökme eğilimi göstermez. Zamanla, çözeltideki moleküllerin genişleyerek daha büyük yapılara dönüşmesiyle jel fazı meydana gelir. Jelin oluşumu, katı yapıların devamlılığını sağlayarak elastik bir özellik kazandırmaktadır (Pierre, 2013). Bu yöntem, bir "sol" fazından bir "jel" fazına geçişi içeren temel bir prensibe dayanır (Sert et al., 2021).

Sol-jel yöntemi, tozlar, filmler, kaplamalar, mikroküreler ve fiberler gibi özel ürünlerin elde edilme imkânı sunarak, düşük sıcaklıklarda homojen iyileştirilmiş özelliklere sahip yeni katıların sentezlenmesine olanak tanımaktadır (Navas et al., 2021). Bu sayede hem enerji tasarrufu sağlanır hem de kaplanan yüzeyin her noktasında eşit kalınlık elde edilir. Düşük kırılma indisi sayesinde optik uygulamalarda tercih edilen bu filmler, gözenekli yapılar veya çok katmanlı kaplamalar şeklinde üretilebilir. Ayrıca, yöntemin uygulanabilirliği yüzey geometrisiyle sınırlı değildir, farklı şekillere sahip altlıklara kolayca kaplanabilir. (Brinker and Scherer, 1990). Bu esneklik, sol-jel yöntemini, geleneksel film üretim tekniklerine kıyasla farklı endüstriyel ve bilimsel uygulamalar için daha cazip hale getirmektedir (Saygılı and Çakmak, 2020; Topçu, 2022). Yöntemin temel avantajları arasında düşük üretim maliyetleri, homojen film oluşumu, ayarlanabilir bileşim ve gözeneklilik kontrolü ile büyük yüzeylerin kolayca kaplanabilmesi yer almaktadır (Demirkıran, 2012; Elbeyli et al., 2014). Ancak, sol-jel yönteminin kurutma aşamasında büzülme ve çatlama eğilimi göstermesi, ayrıca nihai üründe kalıcı gözeneklilik ve istenmeyen hidroksil gruplarının tamamen giderilmesinin zorluğu gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır (Çiğil et al., 2019).

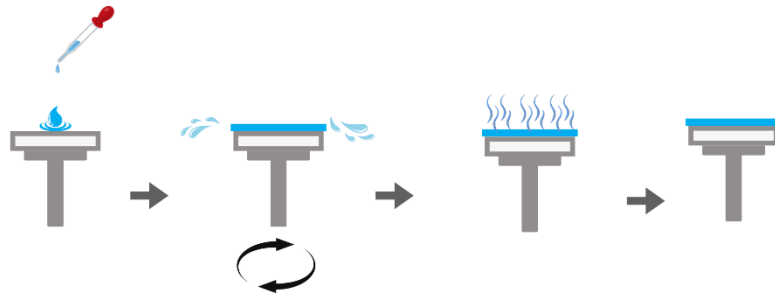
Sol-jel yönteminin avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Kullanılan kimyasal malzemelerin yüksek maliyeti, kaplama sırasında yaşanan malzeme kaybı, bazı kimyasalların toksik olması ve süreçte karbon kalıntılarının oluşma ihtimali, yöntemin

dikkatli bir şekilde uygulanmasını gerektirmektedir (Hasançebi, 2006). Bu dezavantajlara rağmen, sol-jel yöntemi genel olarak ekonomik ekipman kullanımı, düşük işlem sıcaklıkları ve yüksek saflıkta homojen ince filmler elde etme potansiyeli nedeniyle ince film üretiminde tercih edilen bir tekniktir (Delgado et al., 2018; Elhamali et al., 2016; Lucas et al., 2017).

2.6.1.2 Döndürme ile kaplama yöntemi

Döndürme ile kaplama yöntemi, ince film kaplama teknikleri arasında yaygın olarak kullanılan ve yüksek homojenlikte filmler elde edilmesini sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem, özellikle elektronik, optoelektronik ve yarı iletken malzeme üretim süreçlerinde tercih edilmektedir (Chaudhari, 2021; Liu, 2020; Meyerhofer, 1978).

Döndürme ile kaplama süreci genellikle dört temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, kaplanacak yüzeyin uygun şekilde temizlenmesi ve yüzeyde herhangi bir kontaminasyon bulunmadığından emin olunması gerekmektedir. Yüzeyin temizliği, kaplamanın homojenliği açısından kritik öneme sahiptir. İkinci aşamada, kaplanacak çözeltinin yüzeye kontrollü bir şekilde damlatılması gerçekleştirilir. Üçüncü aşamada ise, altlık belirlenen hızda döndürülerek solüsyonun yüzeye yayılması sağlanır. Son aşamada, çözücünün buharlaşması ile film kurur ve belirlenen kalınlıkta bir kaplama elde edilir. (Bornside et al., 1989). Döndürme ile kaplama yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.13'te, döndürme ile kaplama cihazı Şekil 2.14'te gösterilmiştir.

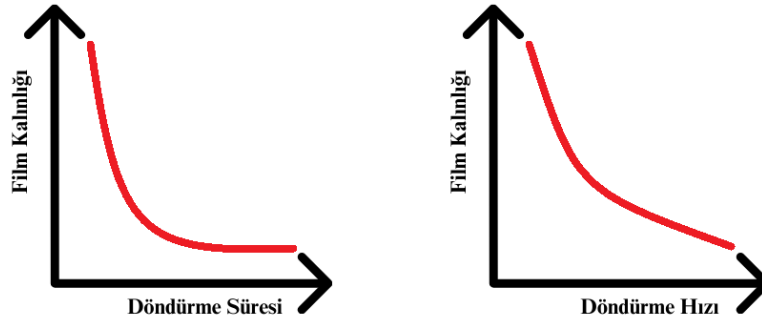


Şekil 2.13: Döndürme ile kaplama methodu



Şekil 2.14: Döndürme ile kaplama cihazı

İnce film kaplama sürecinde film kalınlığının düzgünlüğünü belirleyen iki temel kuvvet bulunmaktadır. Bunlardan ilki, sıvının altlık yüzeyine yayılarak dışa doğru hareket etmesine neden olan merkezkaç kuvvetidir. İkincisi ise bu harekete ters yönde etki eden sürtünme kuvvetidir (Loehnert et al., 2024). Döndürme işlemi sırasında merkezkaç kuvvetinin etkisi, yerçekimi kuvvetinin ihmal edilebilir hale gelmesine yol açar. Bu nedenle, film incelme sürecinde baskın olarak merkezkaç kuvveti etkili olur (Mustafa and Jameel, 2021). Dönme aşamasında, taşıyıcı yüzey üzerindeki solüsyonun oluşturduğu buhar dengeli bir döngü meydana getirir. Bu durum, kütle transfer katsayısının ve buharlaşma oranının sabit kalmasına yol açar (Bornside et al., 1993). Kaplama işlemi tamamlandıktan sonra film, son kalınlığına buharlaşma süreci ile ulaşır (Yin, 2023). Buharlaşma, yüzeyden sıvı taşınımının sona ermesiyle tamamlanır. Bu yöntem, kaplama kalınlığının hassas bir şekilde kontrol edilebilmesine olanak tanımaktadır. Film kalınlığı, çözeltinin viskozitesi, dönüş hızı ve dönüş süresi gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir (Kadhim et al., 2020; Lee et al., 2019). Daha yüksek dönüş hızları genellikle daha ince filmler elde edilmesini sağlarken, düşük hızlar daha kalın kaplamalar oluşturur (Trabelsi, 2021). Döndürme ile kaplama yönteminde film kalınlığının döndürme süresi ve hızına göre değişimi Şekil 2.15'te gösterilmiştir.



Şekil 2.15: Döndürme süresi ve hızına göre film kalınlığı değişim grafiği

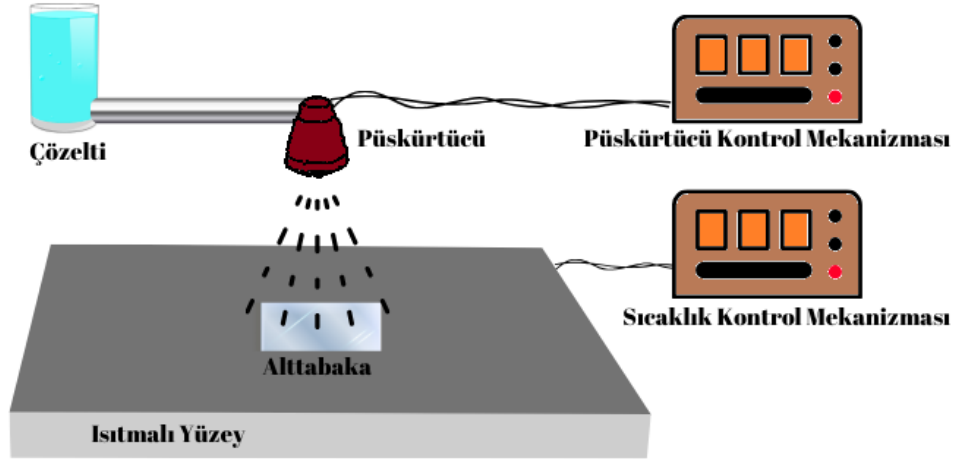
2.6.1.3 Püskürtme ile kaplama yöntemi

Püskürtme yöntemi, ince film kaplama teknikleri arasında yaygın olarak kullanılan, ekonomik ve verimli bir üretim süreci sunan bir tekniktir (Raj et al., 2021). Bu yöntemde, uygun bir çözelti hazırlanarak atomize edilir ve taşıyıcı bir gaz (genellikle hava veya azot) yardımıyla sıcak bir yüzeye püskürtülerek ince film formasyonu sağlanır (Balada, 2024). Püskürtme yöntemi, özellikle büyük ölçekli üretim süreçlerinde tercih edilmektedir. Vakum sistemlerine ihtiyaç duyulmaması ve sürecin kolay kontrol edilebilir olması gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır (Chaudhari, 2021).

Bu yöntemde, kaplama kalitesini belirleyen temel parametreler arasında taban sıcaklığı, püskürtme oranı, çözelti konsantrasyonu ve püskürtme başlığının özellikleri bulunmaktadır (Picard, 2015; Sabnis, 2013). Özellikle püskürtülen damlacıkların boyutu, film homojenliği ve yüzey morfolojisi üzerinde doğrudan etkili olmaktadır (Rietveld et al., 2007; Tarımcı, 2009). Bunun yanı sıra, püskürtme başlığının alt tabandan uzaklığı, çözelti içeriğindeki safsızlık oranı ve çözücü bileşimi gibi faktörler de elde edilen filmin yapısal ve optik özelliklerini belirlemektedir (Bose et al., 2013; Sharma, 2016). Bu yöntem, hem n-tipi hem de p-tipi katkılama işlemlerine izin vermesi nedeniyle yarı iletken ve optoelektronik uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır (Bian, 2007; Du et al., 2006). Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen püskürtme işlemi, kaplamanın kristal yapısını geliştirmekte ve ince filmin mekanik dayanımını artırmaktadır (Kyprianidis, 2011; Meghwal et al., 2020).

Püskürtme yöntemi düşük maliyetli, hızlı ve ölçeklenebilir bir ince film kaplama tekniği olup, özellikle elektronik, fotonik ve enerji depolama uygulamalarında önemli bir yere sahiptir (An et al., 2019; Sönmezoğlu et al., 2012). Süreç parametrelerinin optimize edilmesi,

elde edilecek filmlerin istenilen fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olmasını sağlamak açısından kritik öneme sahiptir (Sabnis, 2013). Şekil 2.16’da püskürtme ile kaplama yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.

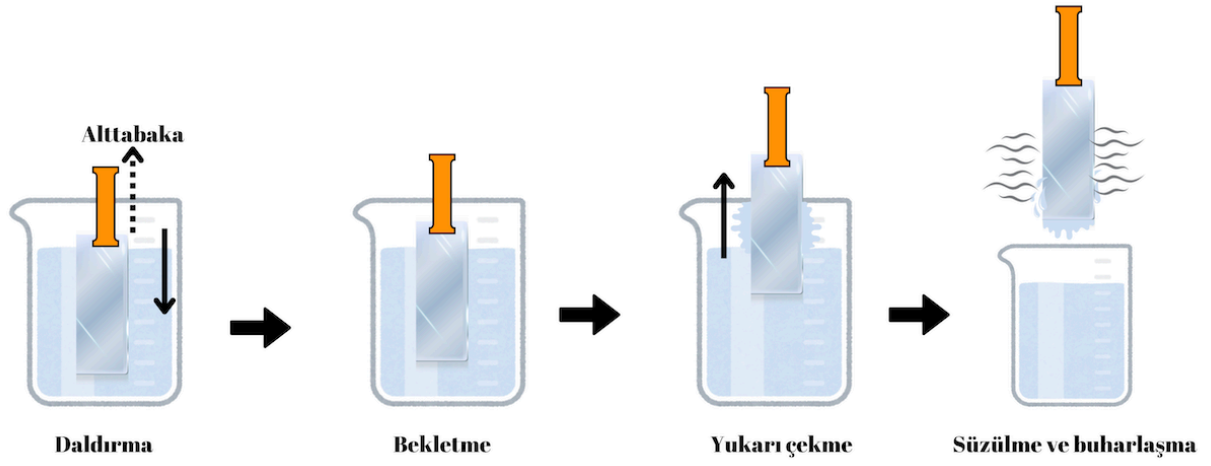


Şekil 2.16: Püskürtme ile kaplama yöntemi şematik gösterimi

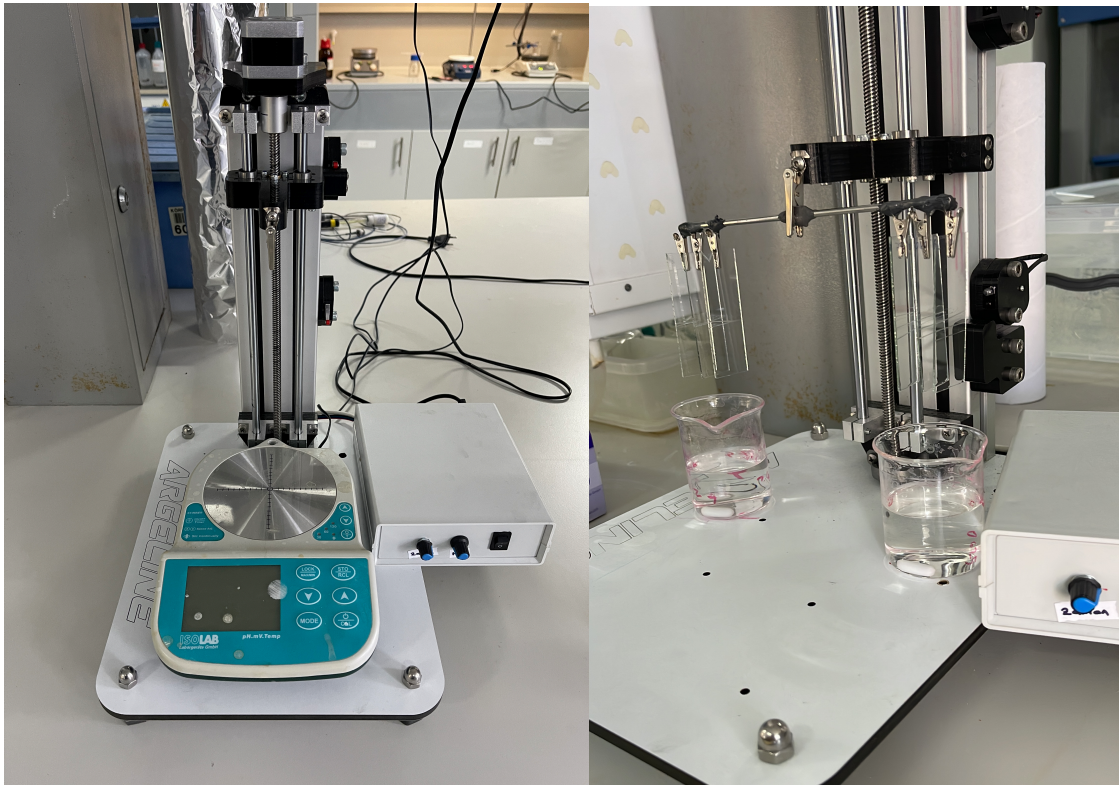
2.6.1.4 Daldırma ile kaplama yöntemi

Daldırma ile kaplama yöntemi, sıvı bazlı kaplama teknikleri arasında yer almakta olup, ince film malzemelerinin alt tabaka üzerine homojen biçimde biriktirilmesinde etkili bir tekniktir. Bu yöntemde alt tabaka belirli bir hızda kaplama çözeltisine daldırılmış ve aynı hızda geri çekilmiştir. Çözelti içerisindeki kaplama malzemesi, yüzey gerilimi ve viskozite etkisiyle alt tabakaya tutunmuş ve çözücünün buharlaşması sonucunda film tabakası oluşmuştur (Chaudhari, 2021; Sönmezoğlu et al., 2012).

Daldırma kaplama süreci; daldırma, çözelti içinde bekletme, çekme, süzülme ve buharlaşma olmak üzere beş temel aşamadan oluşmuştur. İlk aşamada alt tabaka sabit bir hızla çözeltiye indirilmiş, belirli bir süre bekletilerek sol bileşenlerinin yüzeye homojen biçimde tutunması sağlanmıştır. Ardından tabaka aynı hızla yukarı çekilmiş, fazla çözelti yüzeyden süzülerek uzaklaşmış ve son aşamada çözücünün buharlaşmasıyla film yapısı tamamlanmıştır (Güngör and Güngör, 2012). Şekil 2.17’de daldırma kaplama yöntemi şematik olarak Şekil 2.18’de daldırma kaplama cihazı gösterilmiştir. Bu yöntemin sağladığı avantajlar ve karşılaşılabilecek olası dezavantajları bulunmaktadır ve Tablo 2.1’de ayrıntılı olarak verilmiştir.



Şekil 2.17: Daldırma ile kaplama yöntemi şematik gösterimi



Şekil 2.18: Daldırma ile kaplama cihazı

Tablo 2.1: Daldırma ile kaplama yönteminin avantajları ve dezavantajları

Avantajlar	Dezavantajlar
Düzgün bir kaplama elde edilir (Butt, 2022).	Homojen bir kaplama yapmak karmaşık ve zorlayıcı olabilir (Sert et al., 2021).
Kaplama kalınlığı kontrol edilebilir; daldırma hızı ve çözeltinin özellikleri ayarlanarak film hassas şekilde kontrol edilebilir (Faustini et al., 2010).	Çözeltinin büyük bir kısmı kullanılmadan atılabilir, bu da maliyeti artırabilir (Lehtihet, 2020).
Çok katmanlı kaplama yapılabilir (Yasir et al., 2022).	Özellikle çok katmanlı kaplama gerektiğinde, her katmanın kuruma ve tavlama süresi, üretim sürecini uzatabilir (Yasir et al., 2022)
Daldırma hızı ve çözeltinin özellikleri ayarlanarak film hassas şekilde kontrol edilebilir (Faustini et al., 2010).	
Basit bir mekanizma ile uygulanabilir ve maliyeti düşüktür (Castillo-Vilcatoma et al., 2021).	

Daldırma ile kaplama yöntemi, homojen film elde edilmesine, geniş yüzey alanlarının kaplanmasına ve çok katmanlı yapıların üretilmesine imkân tanımıştır. Ayrıca, alt tabaka geometrisinden bağımsız olarak kontrollü ve tekrarlanabilir film kalınlığı sağlanabilmektedir. Bununla birlikte, çözeltinin viskozitesi, yüzey gerilimi, çözücü uçuculuğu, sıcaklık ve ortam koşulları gibi parametrelerin optimize edilmemesi durumunda yüzey homojenliği bozulabilmektedir (Chaudhari, 2021; Sert et al., 2021). Benzer şekilde, alt tabakanın yüzey pürüzlülüğü, daldırma hızı ve ortam koşulları da film morfolojisini doğrudan etkilemektedir (Yasir et al., 2022). Bu nedenle, yöntemin başarıyla uygulanabilmesi için bu parametrelerin dikkatlice kontrol edilmesi gerekmektedir.

Kaplanan film kalınlığı işlem parametrelerine bağlı olarak değişkenlik gösterir ve en önemli belirleyicilerden biri çekme hızıdır (Faustini et al., 2010). Düşük çekme hızlarında yüzey gerilimi baskın hâle gelerek ince filmler elde edilirken, çekme hızının artmasıyla birlikte viskoz sürüklenme etkisi artar, buna bağlı olarak film kalınlığı da yükselir (Chaudhari, 2021; Sönmezoğlu et al., 2012). Çözeltinin viskozitesi ve daldırma hızı belirli bir seviyenin

üzerinde olduğunda film kalınlığı, viskoz sürüklenme ve yerçekimi kuvvetleri arasındaki dengeyle belirlenir (Faustini et al., 2010; Sönmezoğlu et al., 2012).

Daldırma ile kaplama yöntemi, yüksek yüzey kalitesi ve istenen morfolojik yapının elde edilmesine olanak tanıdığı için ince film üretiminde yaygın olarak tercih edilmektedir (Butt, 2022; Saygılı ve Çakmak, 2020). Bu yöntemle üretilen filmler, sensörler, optoelektronik cihazlar ve enerji uygulamaları gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Tezel et al., 2022; Tumbul, 2019). Kaplama sonrasında gerçekleştirilen kurutma ve tavlama işlemleri, filmin son özelliklerini belirleyen kritik aşamalardır. Kurutma süreci, çözücünün uzaklaştırılmasıyla film yapısını stabilize eder ve tavlama işlemi ise organik kalıntıların giderilmesini, kristal yapının gelişmesini ve yüzey düzgünlüğünün iyileşmesini sağlar (Gündoğdu ve Güngör, 2024). Tavlama sıcaklığı, süresi ve atmosfer koşulları, filmin morfolojisi, optik geçirgenliği ve elektriksel özellikleri üzerinde belirleyici etki yapar (Gündoğdu ve Güngör, 2024). Uygun tavlama koşullarında kristal örgü düzeni artar, taşıyıcı hareketliliği ve elektriksel iletkenlik iyileşir (Tumbul, 2019). Ancak aşırı yüksek sıcaklıklar, malzeme yapısında bozulmalara yol açarak film kalitesini düşürebilir (Gündoğdu ve Güngör, 2024). Bu nedenle, tavlama parametrelerinin dikkatle optimize edilmesi büyük önem taşır. Tavlama süresinin ve atmosferin uygun şekilde ayarlanması, yüzeydeki düzensizliklerin giderilmesine ve homojen bir yapının elde edilmesine katkı sağlar (Gündoğdu ve Güngör, 2024). Uygulanan işlem ve tavlama parametreleri seçildiğinde, yüksek kristal kalitesine ve istenen optoelektronik özelliklere sahip ince filmler üretilmektedir (Güngör ve Güngör, 2012; Tumbul, 2019).

3. DENEYSEL TEKNİKLER

Bu bölümde, filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özelliklerini belirlemek amacıyla uygulanan deneysel analiz yöntemleri detaylandırılmaktadır. İnce filmlerin kristal yapısını incelemek için X-ışını kırınımı (XRD), optik özelliklerini belirlemek için Ultraviyole ve Görünür Işık Spektrofotometresi (UV-VIS), lüminesans özelliklerini analiz etmek için Fotolüminesans (PL) ve yüzey morfolojisini değerlendirmek üzere Taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Kullanılan cihazlar, ölçüm yöntemleri ile analiz süreçleri açıklanacak, elde edilen verilerin doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlamak için izlenen yöntemler detaylandırılacaktır.

3.1 X Işını Kırınımı (XRD)

Katı malzemelerin kristal yapısının belirlenmesi ve karakterizasyonu için en yaygın kullanılan tekniklerden biri X-ışını kırınımı (XRD) yöntemidir (Leng, 2008). XRD analizi, malzemelerin kristal yapısını belirlemenin yanı sıra faz bileşimini, kafes parametrelerini, kristal boyutunu, mikroyapısal gerinimleri ve kristalleşme derecesini incelemek için de kullanılmaktadır (Kreller, 2015). Temeli, 1913 yılında William Henry Bragg ve William Lawrence Bragg tarafından geliştirilen Bragg yasasına dayanmaktadır. Bu yasa, X-ışınlarının kristal içindeki atomik düzlemlerden yansırken oluşturduğu yapıcı girişim koşullarını açıklamaktadır.

Kristal bir yapıya yönlendirilen X-ışınları, malzemenin atomlarıyla etkileşime girerek her yönde saçılır. Kristal örgüdeki atomların belirli bir periyodik düzene sahip olması nedeniyle, saçılan ışınlar arasında belirli faz ilişkileri oluşur. Bu faz ilişkileri, belirli açılarda yapıcı girişimlere yol açarken diğer doğrultularda yıkıcı girişimlere neden olur. Dolayısıyla, X-ışını kırınımı yalnızca belirli θ açılarında gerçekleşir ve kristalin atomik düzeni ile düzlem aralıkları hakkında bilgi sağlar (İgenegbai, 2020). Bragg yasası;

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (n= 1,2,3,\dots). \quad (3.1)$$

ile belirtilir. n : kırınım mertebesi (tam sayı değeri), λ : kullanılan X-ışınının dalga boyu, d : kristal yapının atomik düzlemleri arasındaki mesafe, θ : kırınım açısıdır. Bu denklem, belirli bir dalga boyundaki X-ışınlarının, kristal içerisindeki atomik düzlemlerden kırınımına uğrayarak girişim oluşturduğu açılarını belirlemektedir. Kristal yapıların düzenli atom dizilimleri, gelen X-ışınlarını belirli açılarda yansıtarak difraksiyon desenleri

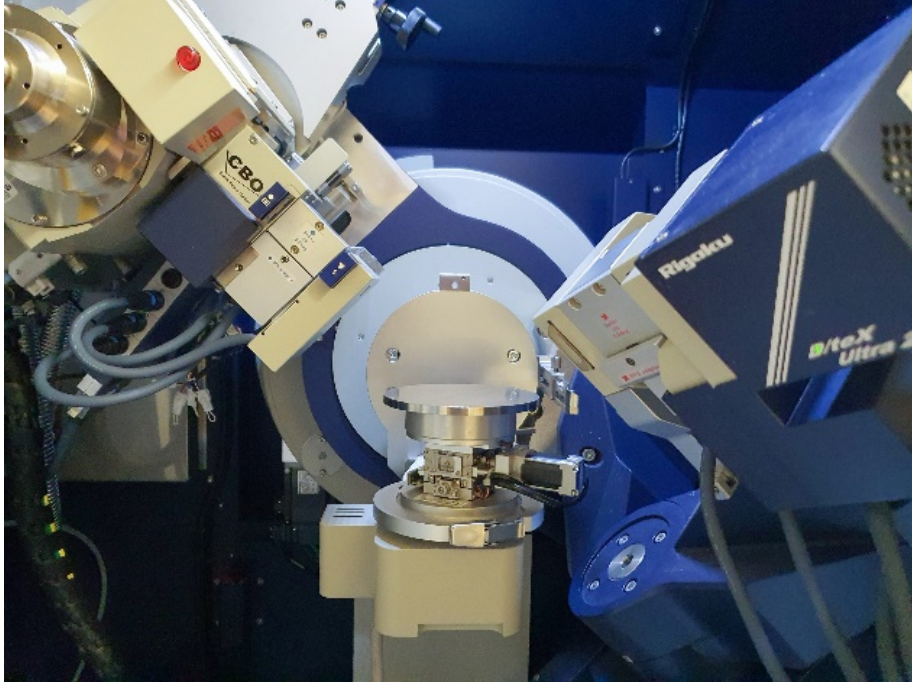
oluşturmaktadır. Bu desenlerin incelenmesi, kristalin kafes yapısı hakkında detaylı bilgi sağlamaktadır. Bu analiz tekniği ile kristal yapıdaki atomların dizilimi, kristallenme kalitesi, kafes parametreleri ve kristalite boyutları tayin edilebilmektedir (Kırık ve Şahin, 2022).

XRD analizi sırasında yüksek enerjili X-ışınları numuneye gönderilir ve numuneden saçılan ışınların belirli açılarda oluşturduğu girişim desenleri kaydedilir. Tipik bir XRD cihazı, X-ışını tüpü, numune tutucu ve detektörden oluşur ve X-ışınları genellikle ($\text{CuK}\alpha$, $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) veya molibden ($\text{MoK}\alpha$, $\lambda = 0.7107 \text{ \AA}$) gibi hedef malzemeler kullanılarak üretilir. Kristal malzemelerdeki düzenli atomik düzlemler, gelen X-ışınlarının bu düzlemlerden belirli açılarda yansımaya ve girişim desenleri oluşturmaya olanak tanır. Difraktometre, X-ışınlarının numune ile etkileşiminden kaynaklanan kırınım desenlerini kaydeder. Elde edilen verilerden malzemenin kristal fazı, yapısı ve diğer yapısal özellikleri belirlenir. Bu yöntem birçok endüstriyel ve bilimsel alanda kullanılmaktadır (Bunaciu et al., 2015).

Bu tez çalışmasında farklı Eu katkı oranlarda üretilen Eu:AlZnO ince filmlerinin XRD analizleri Bartın Üniversitesi'ndeki Rigaku SmartLab difraktometresinde yapılmıştır (Şekil 3.1). Rigaku SmartLab difraktometresinde, $\text{Cu-K}\alpha$ radyasyon kaynağı ($\lambda=1.5406 \text{ \AA}$) kullanılmıştır. Cihaz, 5° - 90° arasındaki 2θ tarama aralığında veri toplayabilmekte ve yüksek hassasiyetli dedektörü (D/teX Ultra 250) sayesinde düşük sinyal seviyelerinde bile detaylı analiz imkânı sunmaktadır. Ayrıca, otomatik hizalama sistemi ve Grazing Incidence XRD (GIXRD) gibi gelişmiş ölçüm modları, özellikle ince filmlerin analizi için önemli avantajlar sağlamaktadır. Şekil 3.2' de XRD difraktometresinin iç görünümü verilmektedir.



Şekil 3.1: Rigaku SmartLab difraktometresi

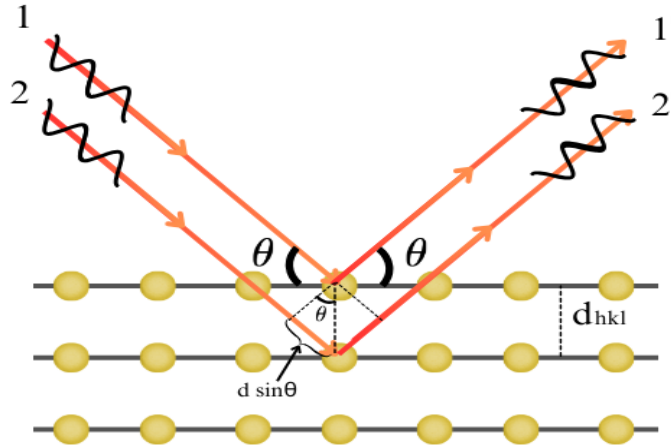


Şekil 3.2: Difaktometre iç görünümü

3.1.1 Kristal yapı parametreleri

Kristal yapı parametreleri, malzemelerin kristallenme derecesi, faz yapısı ve mikro yapısal özelliklerinin belirlenmesinde önemli bilgiler sağlamaktadır. Bu parametreler, XRD desenlerinden elde edilen kırınım pikleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Pik konumu, şiddeti ve yarı maksimumdaki pik genişliği (FWHM), tanecik boyutu, örgü parametreleri, gerinim ve dislokasyon yoğunluğu gibi yapısal özelliklerin belirlenmesinde kullanılmaktadır (Gündoğdu vd., 2026).

X-ışını kırınımında düzlemler arası mesafe (d), Denklem 3.1’de verilen Bragg yasası kullanılarak hesaplanmaktadır (Şekil 3.3) (Igwebike-Ossi, 2017; Terzano et al., 2019). Bu mesafe, numunelerin kristal düzlemlerinin yönlenmesini ve kristal boyutunun tespitini mümkün kılmaktadır (Atan, 2022).



Şekil 3.3: Bragg kırınımı yasasının geometrisi

Hekzagonal yapıya sahip örgü parametreleri (a ve c), Bragg yasası ile hesaplanan d düzlemler arası mesafeye bağlı olarak Denklem 3.2 ile belirlenir (Dorri, 2024; Lhimr et al., 2019).

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (3.2)$$

Burada a ve c , kristal kafes parametreleri; h , k , l , miller indisleri; d ise düzlemler arası mesafedir.

Tanecik boyutu (kristalit boyutu), bir malzemenin mikroyapısal özelliklerini ve XRD kırınım piklerinin genişliğini doğrudan etkileyen temel bir parametredir. Tanecik boyutu belirlemede Debye-Scherrer denklemi (Denklem 3.3) kullanılmaktadır (Monshi et al., 2012).

$$D = \frac{0,9 \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3.3)$$

Burada D , kristal boyutunu (nm); K , Scherrer sabitini (yaklaşık 0.9); λ , X-ışını dalga boyunu; β , yarı maksimum pik genişliğini (radyan); θ ise Bragg açısını göstermektedir.

Dislokasyon yoğunluğu (δ), kristalde bir hacim başına düşen toplam çizgisel hata olarak tanımlanmakta ve malzemenin yapısal kusurları hakkında bilgi vermektedir. Dislokasyon yoğunluğu Denklem 3.4 ile verilmektedir (Suganya et al., 2019)

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (3.4)$$

Mikroyapısal örgü gerilimi (ε) kristal kafesindeki atomların ideal konumlarından sapması sonucu oluşan iç gerilmeleri ve mikroyapısal deformasyonları ifade etmektedir. Bu doğrultuda örgü gerilimi Denklem 3.5 ile ifade edilir.

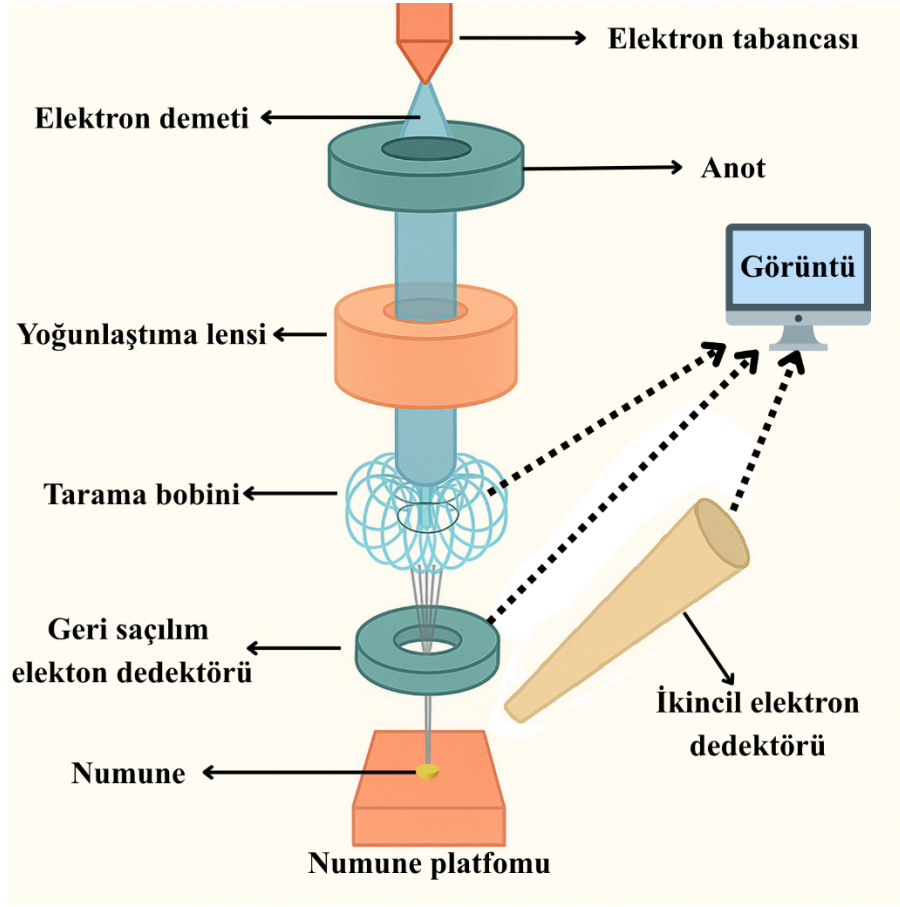
$$\varepsilon = \frac{\beta \cos \theta}{4} \quad (3.5)$$

3.2 Taramalı Elektron Mikroskobu Spektroskopisi (SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), malzeme yüzeylerinin mikro ve nano ölçekteki morfolojik özelliklerinin incelenmesinde kullanılan yüksek çözünürlüklü bir görüntüleme yöntemidir (Choudhary and ka, 2017). SEM cihazı, yalnızca yüzey topografisini ortaya koymakla kalmaz, aynı zamanda malzemenin fiziksel ve yapısal özelliklerinin incelenmesinde de önemli bir analiz aracıdır (Choudhary and ka, 2017; Plaza, 2021). Teknik, yüksek enerjili elektronların numune yüzeyine yönlendirilmesi ve bu elektronların yüzeydeki atomlarla etkileşmesi sonucu meydana gelen çeşitli sinyallerin dedektörler aracılığıyla algılanması prensibine dayanır (Diacci, 2021; Khajavizadeh, 2023). Elektron–madde etkileşimi sonucunda sekonder elektronlar, geri saçılan elektronlar ve karakteristik X-ışınları gibi farklı sinyaller oluşur. Bu sinyaller, numunenin yüzey morfolojisi ve mikroskobik yapısı hakkında detaylı bilgi sağlar (Diacci, 2021).

SEM cihazı genel olarak elektron optik sistemi, numune odası ve görüntüleme sistemi olmak üzere üç temel bileşenden oluşur. Şekil 3.4’te SEM cihazının şematik gösterimi verilmiştir. Elektron optik sistemi, elektron demetinin oluşturulmasından ve numune yüzeyine odaklanmasından sorumludur. Bu sistemde elektron kaynağı, elektronları hızlandırmak için kullanılan anot plakası, demeti incelten ve odaklayan elektromanyetik mercekler ile numune yüzeyini tarayan tarama bobinleri bulunur. Numune odası, elektron–numune etkileşiminin gerçekleştiği bölümdür. Bu bölümde hem optik sistem hem de numune yaklaşık 10^{-4} Pa

basınç değerinde vakum ortamında tutulur. Bu vakum koşulu, elektronların hava molekülleriyle etkileşmesini önleyerek ışın kararlılığını sağlar.



Şekil 3.4: SEM cihazı şematik gösterimi

Elektron demetinin yüzey üzerinde taranmasıyla sekonder elektronlar ve geri saçılan elektronlar gibi farklı sinyaller meydana gelir. Sekonder elektronlar, yüzey topografisinin belirlenmesinde, geri saçılan elektronlar ise numunedeki atomik numara farklarına bağlı kontrastın oluşturulmasında kullanılır. Görüntüleme sistemi, bu sinyalleri algılayan dedektörler, sinyalleri güçlendiren elektronik birimler ve görüntüyü ekrana aktaran sistemlerden oluşur. Dedektörlerden gelen sinyaller elektronik olarak işlenir, dijital forma dönüştürülür ve yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilir.

Bu çalışmada, Bartın Üniversitesi'nde bulunan TESCAN MAIA3 XMU marka SEM cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz, yüksek çözünürlükteki yüzey görüntülerini elde etmek için son derece gelişmiş bir teknolojiye sahiptir. TESCAN MAIA3 XMU, özellikle nanoteknoloji, malzeme bilimi ve ince film araştırmalarında yaygın olarak tercih edilmektedir çünkü düşük

vakum modu ve yüksek verimli dedektörleri sayesinde, iletken olmayan veya düşük iletkenliğe sahip numuneler üzerinde dahi hassas analizler yapılmasına imkân tanır. Cihaz, birden fazla dedektör ve gelişmiş optik sistemlerle donatılmıştır, böylece yüzey yapısı ve kimyasal analizler arasındaki ilişkiler derinlemesine incelenebilir. Şekil 3.5 ve şekil 3.6’da SEM ölçümlerinde kullanılan TESCAN MAIA3 XMU cihazı gösterilmektedir.



Şekil 3.5: Taramalı elektron mikroskobu (SEM) sistemi



Şekil 3.6: TESCAN MAIA3 XMU cihazı

3.3 Ultraviyole-Görünür Spektroskopisi (UV-VİS)

Ultraviyole-Görünür (UV-VIS) spektroskopisi, malzemelerin belirli dalga boylarındaki ışığı soğurma ve geçirme davranışlarını incelemek amacıyla kullanılan temel optik karakterizasyon yöntemlerinden biridir (Huang, 2020). Bu yöntem, ince film yapıları, polimerler ve metal oksitlerin optik özelliklerinin belirlenmesinde yaygın biçimde kullanılmaktadır (Parajuli et al., 2023). Işığın madde ile etkileşimi sonucu elde edilen geçirgenlik ve soğurma değerleri üzerinden malzemenin optik parametreleri belirlenmektedir (Parajuli et al., 2023)

Bir UV-Vis spektrometresi, ışık kaynağı, monokromatör, numune bölmesi ve dedektör olmak üzere dört temel bileşenlerden oluşur (Parajuli et al., 2023). Cihaz, belirli dalga boylarında ışık göndererek numunenin soğurma veya geçirgenlik spektrumunu belirler (Parajuli et al., 2023).

UV-Vis spektrometresinin çalışma prensibi, ışık kaynağından çıkan demetin prizma yardımıyla farklı dalga boylarına ayrıştırılması esasına dayanmaktadır. Işık girişe odaklandıktan sonra, toplayıcı aynalar tarafından monokromatöre yönlendirilir. Monokromatör, istenen dalga boyunu seçerek ikinci dereceden radyasyonu ortadan kaldırır. Tek dalga boyuna indirgenmiş ışık, filtrelerden geçirilerek numunenin üzerine düşürülür. Foton enerjisi malzemenin bant aralığından büyükse ışık soğurulur, aksi durumda geçirgenlik gözlenir. Numuneden geçen ışık demeti, silikon fotosel dedektör tarafından elektrik sinyaline dönüştürülerek dijital göstergede kaydedilir.

Ölçümler, Balıkesir Üniversitesi optoelektronik ve fotonik araştırma laboratuvarında 190–1100 nm dalga boyu aralığında çalışan L7 Double Beam UV-VIS Spectrophotometer spektrometresi kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen geçirgenlik ve soğurma verilerinden, soğurma katsayısı ve enerji bant aralığı hesaplanmıştır. Kullanılan cihaz şekil 3.7’de ve cihazın numune bölümü Şekil 3.8’de, cihazın şematik diyagramı ise Şekil 3.9’da gösterilmiştir.

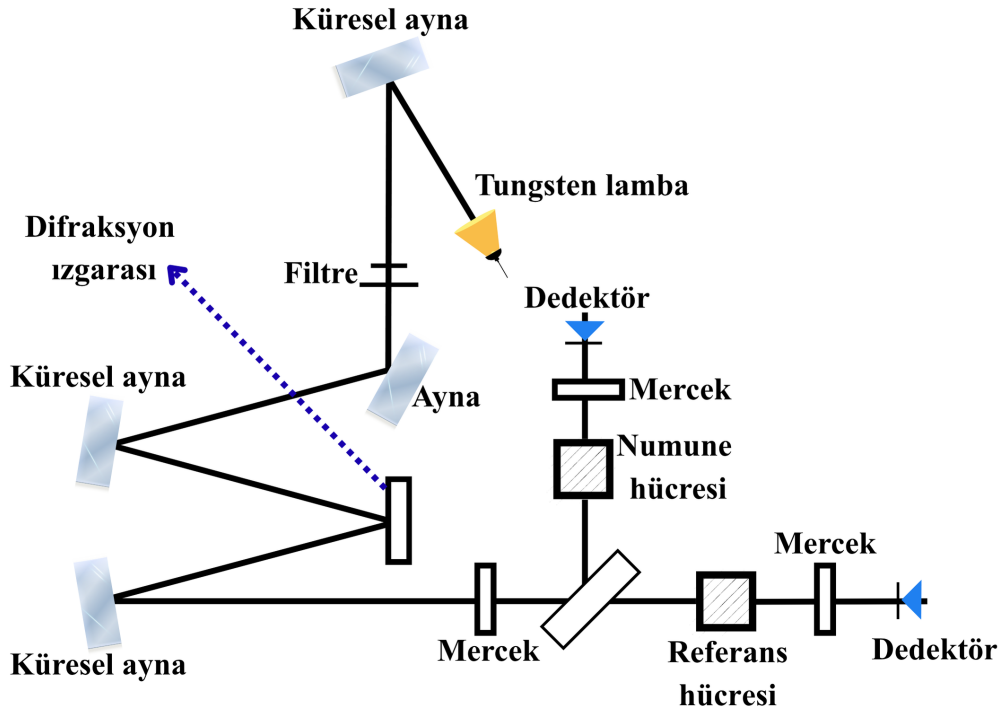
.



Şekil 3.7: L7 Double Beam UV-VIS spektrometre cihazı



Şekil 3.8: L7 Double Beam UV-VIS spektrometre cihazının numune bölümü



Şekil 3.9: UV-VIS spektrometre cihazının iç diyagramı

3.3.1 Soğurma katsayısının bulunması

Tek renkli bir ışık demetinin, soğurucu özelliğe sahip bir ortamdan geçerken maruz kaldığı şiddet azalması Beer–Lambert yasası ile tanımlanır (Gressner and Arndt, 2019). Bu yasa, ışığın ortam içerisindeki zayıflamasının, yol uzunluğu ve ortamın soğurma katsayısı ile orantılı olduğunu belirtir (Gressner and Arndt, 2019). Bir numune üzerine düşen I_0 şiddetindeki ışığın, numuneden geçtikten sonraki I şiddeti olmak üzere, ışığın diferansiyel değişimi şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{dI}{dx} = -\alpha I \quad (3.6)$$

Burada; α soğurma katsayısı, x ortam içindeki yol uzunluğu, I ortamdan geçen ışığın anlık şiddetidir. Bu diferansiyel denkleminin sınır koşulları $I = I_0$ ($x=0$) ve $I = I_T$ ($x=d$) olacak şekilde entegre edilirse;

$$I_T = I_0 e^{-\alpha d} \quad (3.7)$$

Lambert yasasını verir. Soğurma katsayısı denklem 3.8 ile ifade edilir (Kara, 2008)

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{I_0}{I_T} \right) \quad (3.8)$$

Işık geçirgenliği (T), numuneden geçen ışık şiddetinin, gelen ışık şiddetine oranı olarak tanımlanır (Vasconcelos et al., 2020). Bu büyüklük, malzemenin ışığı ne ölçüde ilettiğini gösterir (denklem 3.9):

$$T = \frac{I_T}{I_0} \quad (3.9)$$

Geçirgenlik değeri genellikle cihaz tarafından yüzde olarak veya 0-1 aralığında sayısal olarak verilir (Goblet et al., 2021). Bu değer arttıkça, malzemenin ışığı daha fazla ilettiği, dolayısıyla optik yoğunluğunun azaldığı anlaşılır.

Geçirgenlik ile soğurma katsayısı arasındaki ilişki denklem 3.10 ile verilir:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \quad (3.10)$$

UV-Vis spektrofotometrelerde ayrıca absorbans (A) değeri de ölçülür. Absorbans, malzemenin gelen ışığın ne kadarını soğurduğunu ifade eder ve geçirgenlikten logaritmik dönüşümle elde edilir (denklem 3.11):

$$A = -\log T \quad (3.11)$$

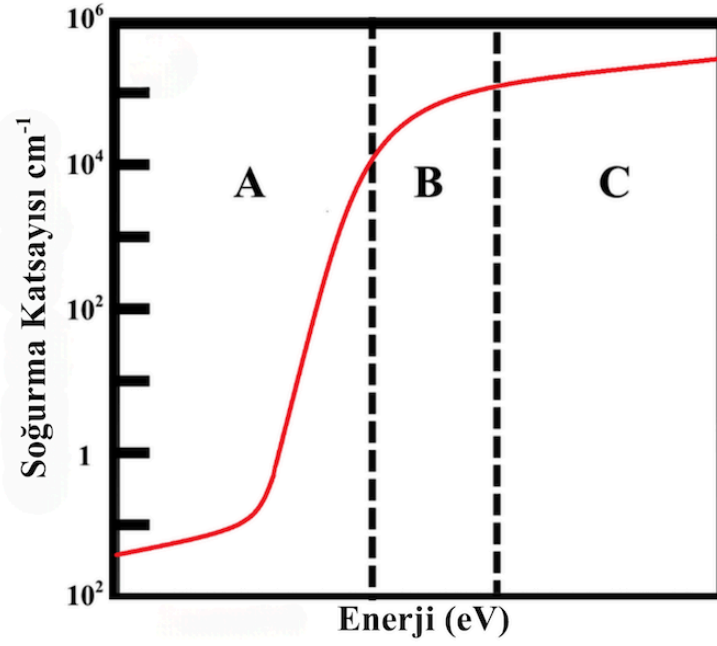
Absorbans değeri 0'a yaklaştıkça malzemenin saydamlığı artar, yüksek değerler ise güçlü soğurmayı gösterir. Absorbans verileri kullanılarak soğurma katsayısı denklem 3.12 ile hesaplanır (Soraya et al., 2022).

$$\alpha = \frac{2.303 A}{d} \quad (3.12)$$

Burada d film kalınlığını, A spektrofotometreden elde edilen absorbans değerini ve α soğurma katsayısını temsil ifade eder.

3.3.2 Yasak enerji aralığının bulunması

Yarıiletken malzemelerde soğurma katsayısının enerjiye bağlı değişimi, malzemenin elektronik bant yapısı hakkında bilgi vermektedir. Soğurma katsayısı enerji grafiği genel olarak üç bölgeye ayrılır: A, B ve C bölgeleri (Amato, 2019). Şekil 3.10'da bir yarıiletkenin soğurma katsayısının enerji ile değişimi verilmiştir.



Şekil 3.10: Bir yarıiletkenin soğurma katsayısının enerji ile değişimi

A bölgesi düşük enerjili soğurma bölgesi olup, yapı kusurlarının veya amorf bölgelerdeki lokal enerji seviyelerinin neden olduğu geçişleri temsil eder. Bu bölgede soğurma katsayısı oldukça düşüktür ($\alpha < 1\text{cm}^{-1}$) (Ganaie and Zulfequar, 2020).

B bölgesi, Urbach kuyruğu olarak bilinen bölgedir ve değerlik bandı ile iletkenlik bandı arasındaki geçişlere yaklaşan enerji aralığında görülür. Bu kısımda soğurma katsayısı yaklaşık $1 < \alpha < 10^4\text{cm}^{-1}$ mertebesinde. Bu bölge, yasak enerji aralığına yakın geçişleri ve bant kenarı eğimini temsil eder.

C bölgesi ise yüksek enerjili soğurma alanıdır. Burada banttan banda geçişler baskındır ve soğurma katsayısı $\alpha > 10^4\text{cm}^{-1}$ değerine ulaşır. Bu bölgede foton enerjisi, yasak enerji aralığını aşmış olduğundan, geçişler doğrudan bant geçişleri şeklinde gerçekleşmektedir (Amato, 2019; Kara, 2008).

İnce film ve yarı iletken malzemelerin optik karakterizasyonunda sıklıkla kullanılan Tauc denklemi, malzemenin optik bant aralığını (E_g) ve elektron geçişinin türünü (direkt veya indirekt) belirlemek için kullanılan temel bir matematiksel modeldir (Ünal, 2023). Bu denklem malzemenin soğurma katsayısı (α) ile foton enerjisi ($h\nu$) arasındaki ilişki ifade eder ve Denklem 3.13’de verilmektedir.

$$(ahv)^{\frac{1}{n}} = A (hv - E_g) \quad (3.13)$$

Burada; α soğurma katsayısı cm^{-1} , hv foton enerjisi (eV), E_g yasak enerji aralığı, A sabit ve n değeri geçiş türüne göre:

$n = \frac{1}{2}$: Doğrudan izinli geçişler,

$n = \frac{3}{2}$: Doğrudan yasak,

$n = 2$: Dolaylı izinli geçişler,

$n = 3$: Dolaylı yasak.

Uygun geçiş türüne bağlı olarak $(ahv)^{\frac{1}{n}} - hv$ arasındaki ilişki kullanılarak Tauc grafiği çizilir. Grafiğin doğrusal bölgesine çizilen teğetin hv eksenini kestiği nokta, malzemenin optik bant aralığı (E_g) değerini verir. Sentezlenen ZnO, doğrudan geniş yasak enerjili bir yarı iletken malzeme olduğundan, optik geçiş türü doğrudan izinli olarak kabul edilir ve $n = 1/2$ için Denklem 3.14 gibi yazılır.

$$(ahv)^2 = A(hv - E_g) \quad (3.14)$$

ZnO için, $(ahv)^2 - hv$ grafiği çizilerek, doğrusal kısmın enerji eksenini kestiği nokta E_g değeri bulunur (Tauc et al., 1966; Mott and Davis, 2012).

Urbach kuyruğu, bir yarı iletkenin optik bant aralığının hemen altında ($hv < E_g$) gözlenen ve optik absorpsiyon katsayısındaki üstel artışı ifade eden bölgedir. Bu bölgede düşük enerjili fotonların soğurulması, kristal yapıdaki kusurlar, örgü düzensizlikleri ve fonon etkileşimleri sonucu oluşan lokalize enerji durumları nedeniyle meydana gelir. Bu davranış, ilk kez Franz Urbach tarafından açıklanmış olup Urbach kuyruğu olarak adlandırılmaktadır (Urbach, 1953). Soğurma katsayısının foton enerjisine (hv) bağlı değişimi Urbach kuralına göre Denklem 3.15 gibi ifade edilir.

$$\alpha = \alpha_0 e^{\left(\frac{hv}{E_U}\right)} \quad (3.15)$$

Burada α_0 bir sabit, E_U ise malzemenin kristal yapısındaki kusur yoğunluğunu ve yapısal düzensizliğini ifade eden Urbach enerjisidir (Srikant and Clarke, 1988). Eşitliğin her iki tarafının doğal logaritması alındığında Denklem 3.16 ile ifade edilir.

$$\ln(\alpha) = \ln(\alpha_0) + \frac{hv}{E_U} \quad (3.16)$$

Bu eşitliğe göre, $\ln(\alpha)$ 'nın foton enerjisine (hv) karşı grafiği çizildiğinde, doğrusal bölgenin eğiminin tersi ($1/\text{eğim}$) Urbach enerjisi (E_U) değerini vermektedir. Bu yöntemle ince filmlerin yapısal kusur dereceleri belirlenebilmektedir (Keskenler et al., 2014).

3.4 Fotolüminesans Spektroskopisi (PL)

Fotolüminesans spektroskopisi (PL), yarı iletken ve ince film malzemelerin optoelektronik özelliklerinin incelenmesinde yaygın olarak kullanılan güçlü bir karakterizasyon tekniğidir. Bu yöntem, bir malzemenin belirli bir dalga boyundaki ışıkla uyarılması sonucu yayılan fotonların enerjilerinin analiz edilmesine dayanır. PL ölçümleri, malzeme içerisindeki kusurlar, safsızlık seviyeleri, bant aralığı enerjisi ve katkı elementlerinin etkileri hakkında önemli bilgiler sunar.

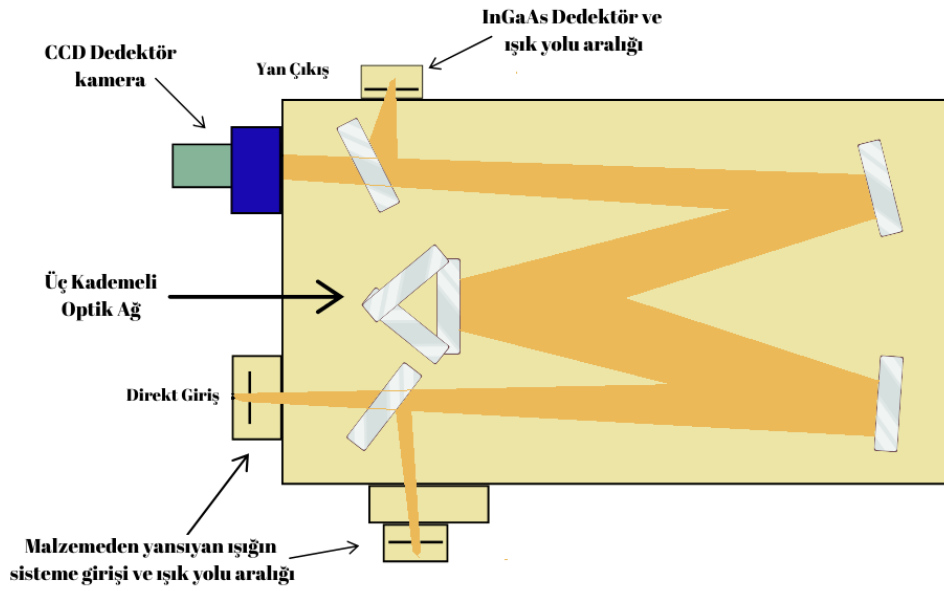
PL cihazında lazer ışınının numune üzerine doğru bir şekilde odaklanabilmesi için, ışın uygun yönlere yönlendirilir ve bu yönlendirme işlemi, farklı odak uzunluklarına sahip iki mercek kullanılarak yapılır. Lazer ışınlarının pik değerleri oldukça yüksek olduğundan, spektrometrenin ön kısmına bir filtre yerleştirilmiştir. Bu filtre, lazer ışını ve onun harmonik bileşenlerinin spektrumda görünmesini engelleyerek sadece istenen fotolüminesans sinyalinin ölçülmesini sağlamaktadır. Spektrometrenin optik yolundaki aynalar, ışının yönünü değiştirerek optik ağırlara iletilmesini sağlar. Işın, daha sonra aynalar aracılığıyla tekrar yönlendirilir ve son olarak CCD kameraya iletilerek kaydedilir. Bu optik düzenek, ölçümlerin doğru ve hassas bir şekilde yapılmasına olanak tanır, böylece numunenin özellikleri en iyi şekilde analiz edilebilir (Çoban, 2016; Karaduman, 2024).

Eu:AlZnO ince filmlerin fotolüminesans ölçümleri, Balıkesir Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (BÜBTAM) bulunan, Andor Solis SR 500i-BL model spektrometre ile ölçülmüştür. Bu spektrometre, Şekil 3.11'de gösterilmektedir. Spektrometrenin iç görünümü Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Fotolüminesans ölçümleri, Eu:AlZnO ince filmlerinin optik özelliklerini analiz etmek amacıyla görünür ışık bölgesinde gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler sırasında 349 nm dalga boyunda bir lazer uyarımı kullanılmıştır. Lazer ışını, numunenin yüzeyine odaklanarak fotolüminesans emisyonu uyarılmış ve yayılan ışık dedektör aracılığıyla kaydedilmiştir. Elde edilen ölçüm verileri,

Origin Pro 8.0 yazılımı ile analiz edilerek yayma spektrumları oluşturulmuştur. Bu spektrumlar, Eu:AlZnO filmlerinin optik özellikleri hakkında önemli bilgiler sunmaktadır.



Şekil 3.11: Fotolüminesans sistemi



Şekil 3.12: Fotolüminesans spektrometrenin iç görünümü

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, Eu eş katkılı AlZnO ince filmlerin üretimine ilişkin deneysel yöntem ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Üretim sürecinde kullanılan kimyasal maddeler, alttabakaların temizlenme işlemleri, çözelti hazırlama aşamaları, ince film kaplama parametreleri ve uygulanan ısı işlem koşulları sistematik biçimde açıklanmıştır. Deneysel düzenek ile işlem parametrelerinin ayrıntılı olarak verilmesi, elde edilen ince filmlerin kontrollü, tekrarlanabilir ve güvenilir özellikler göstermesini sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Eu katkı oranı, Al katkı miktarı, kaplama sayısı, tavlama sıcaklığı ve tavlama süresi gibi üretim parametrelerinin film oluşumu ve nihai özellikleri üzerindeki etkileri dikkate alınarak deneysel yöntem oluşturulmuştur.

4.1 Kimyasallar

Bu çalışmada çözelti hazırlamak için çinko asetat dihidrat ≥ 98.00 ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), alüminyum nitrat nonahidrat ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, ≥ 95.0 saflık), europiyum(III) nitrat hidrat ($\text{Eu}(\text{NO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, 99.99 saflık), etanolamin ($\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$, ≥ 99.00 saflık) ve etanol (EtOH , ≥ 99.45 saflık) kullanılmıştır. Tüm kimyasallar Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiştir. Alttabanın temizliği için etanol (EtOH) ve aseton ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$, 99.5 saflık) kullanılmış olup, bu kimyasallar da Sigma-Aldrich firmasından tedarik edilmiştir.

4.2 Alttabakanın Hazırlanması

Eş katkılı Eu:AlZnO ince filmlerinin üretiminde, kaplama işlemi için 1 mm kalınlığında ve 26×76 mm boyutlarında cam alttabakalar kullanılmıştır. Kaplama öncesinde, alttabakaların yüzeyindeki organik ve inorganik kirleri gidermek amacıyla kapsamlı bir temizleme süreci uygulanmıştır. İlk olarak alttabakalar sabunlu suyla yıkanarak kaba kirlerden arındırılmış, ardından 80°C sıcaklıkta ultrasonik banyoda sırasıyla 15'er dakika aseton, etanol ve saf su kullanılarak üç aşamalı kimyasal temizleme gerçekleştirilmiştir. Temizleme sonrası alttabakalar, partikül kontaminasyonunu önlemek ve kurutmak üzere etüvde bekletilerek kaplama işlemine hazırlanmıştır. Bu hazırlık adımı, ince filmlerin homojen tutunmasını sağlayarak safsızlıkların yol açabileceği mikroyapısal bozulmaları engellemek için kritik öneme sahiptir.

İnce filmler, sol-jel daldırma kaplama yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Bu yöntemde, önceden hazırlanan Eu eş katkılı AlZnO çözeltileri, belirlenen çekme hızı ve kaplama

parametreleri doğrultusunda cam alttabakalar üzerine uygulanarak homojen ince film kaplamaları elde edilmiştir. Kullanılan daldırma kaplama yöntemi, filmlerin tekdüze kalınlık ve düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olmasını sağlayarak, optoelektronik uygulamalar açısından kritik öneme sahip morfolojik ve yapısal bütünlüğün korunmasına katkıda bulunmaktadır.



Şekil 4.1: Ultrasonik banyo

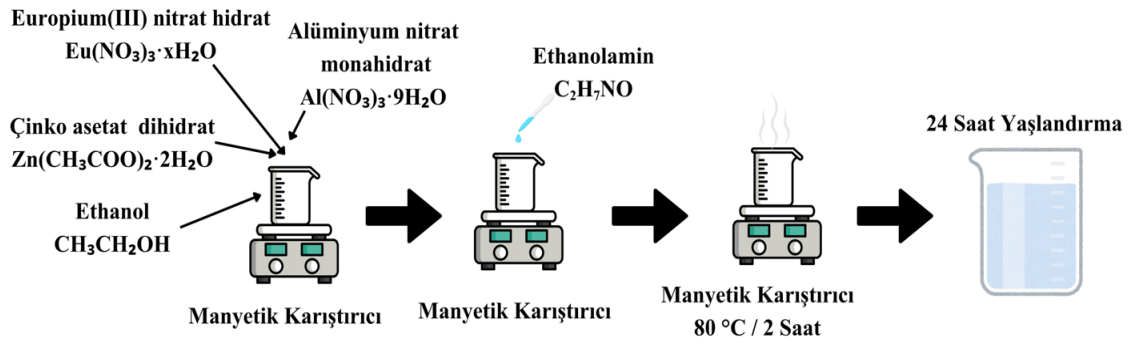
4.3 Çözeltilerin Hazırlanması

Eş katkılı Eu:AlZnO ince filmlerinin sentezlenmesinde 0.2 M konsantrasyona sahip kaplama çözeltisi hazırlanmıştır. Çözelti hazırlığında, öncül bileşiklerin çözünürlüğü, kimyasal etkileşimleri ile ince film oluşumuna olan etkileri dikkate alınarak uygun çözücüler ve katkı maddeleri titizlikle seçilmiştir.

Sol-jel yöntemiyle üretilen Al katkılı ZnO ince filmler üzerine yapılan araştırmalar, %2 oranındaki Al katkısının, ZnO'nun hekzagonal wurtzite kristal yapısını koruyarak kristal kalitesini artırdığını ve optik geçirgenliği iyileştirdiğini ortaya koymaktadır (Ammaih et al., 2014; Mondragón-Suárez et al., 2002; Jia, 2010). Daha yüksek katkı oranlarında yapısal bozulmalar ve optik kayıplar gözlenebilse de %2 seviyesinin yapısal kararlılık ile optik performans arasında ideal bir denge sunduğu bildirilmektedir (Hou et al., 2013; Jia, 2010). Bu literatür verileri ışığında çalışmamızda; yüksek kristal kaliteye, optik kararlılığa ve yüksek geçirgenliğe sahip ince filmler elde etmek amacıyla Al katkı oranı %2 olarak belirlenmiştir.

Çözelti hazırlık sürecinde, 80 mL etanol içerisine ana bileşen olarak çinko asetat dihidrat ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) eklenmiştir. Ardından, alüminyum nitrat nonahidrat ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) ve europiyum(III) nitrat hidrat ($\text{Eu}(\text{NO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) Tablo 4.1’deki katkı oranlarında çözeltiye ilave edilmiştir. Karışım, manyetik karıştırıcı üzerinde 80 °C sıcaklıkta 2 saat boyunca sürekli karıştırılarak homojen bir hale getirilmiştir. Bu aşamadan sonra, çözeltinin stabilitesini artırmak ve film kalitesini optimize etmek ve bulanık çözeltiyi şeffaf hale getirmek için etanolamin stabilizatör olarak eklenmiştir. Çözelti, filmin morfolojik ve optik özelliklerini etkileyebilecek olası partikül oluşumunu engellemek amacıyla 24 saat boyunca dinlenmeye bırakılmıştır. Bu bekletme süreci, çözeltinin moleküler düzeyde homojenleşmesini ve viskozitesinin stabilizasyonunu sağlayarak kaplama işlemi için ideal koşulları oluşturmuştur. Bu bekleme süresi aynı zamanda, kimyasal reaksiyonların tamamlanmasına ve çözeltinin daha kararlı bir yapıya ulaşmasına katkıda bulunur.

Eu eş katkılı AlZnO çözeltisinin hazırlanış aşamaları Şekil 4.2’de şematik olarak gösterilmiştir. Bu çözeltinin hazırlanmasında kullanılan öncüllerin miktarları Tablo 4.1’de belirtilmiştir.



Şekil 4.2: Eş katkılı Eu:AlZnO çözeltisinin hazırlanış aşamaları

Tablo 4.1: Eş katkılı Eu:AlZnO ince filmlerin hazırlanmasında kullanılan çözelti miktarı

	$\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	$\text{Eu}(\text{NO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$	EtOH	$\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$
		O)	O)		
AlZnO	3.44176	0.1200416	0	80 ml	20 damla
%1 Eu:AlZnO	3.40664	0.1200416	0.054076	80 ml	20 damla
%3 Eu:Al ZnO	3.3364	0.1200416	0.162230	80 ml	20 damla
%5 Eu:Al ZnO	3.26616	0.1200416	0.270384	80 ml	20 damla
%7 Eu:Al ZnO	3.19592	0.1200416	0.378537	80 ml	20 damla
%10 Eu:Al ZnO	3.09056	0.1200416	0.540768	80 ml	20 damla

4.4 İnce Filmlerin Kaplanması

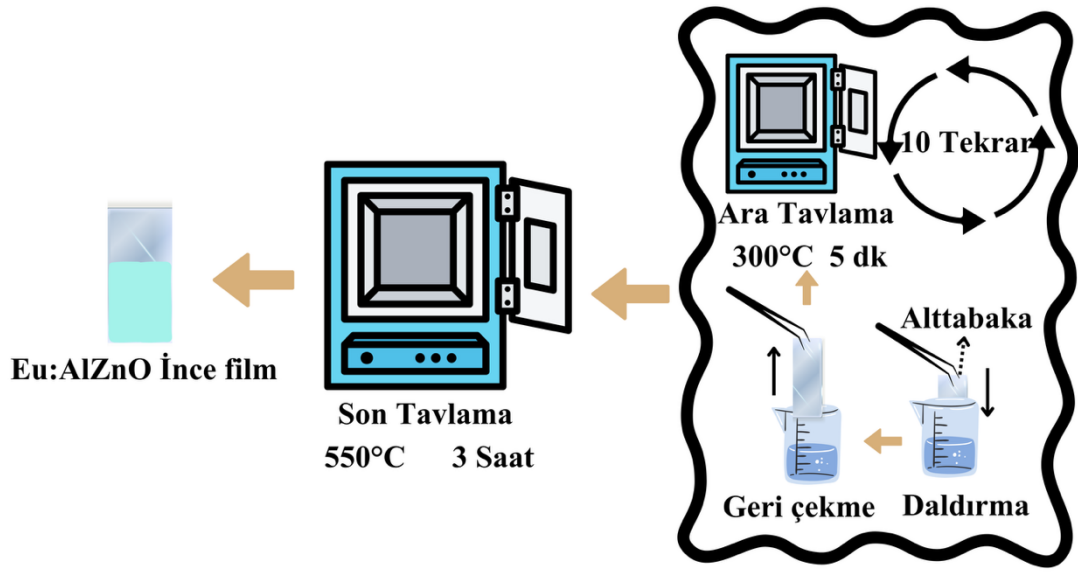
Eş katkılı Eu:AlZnO ince filmler, kontrollü sol-jel daldırma kaplama tekniği kullanılarak temizlenen cam alttabakalar üzerine homojen bir şekilde kapanmıştır (Şekil 4.3 ve Şekil 4.4). Bu teknik, çözelti viskozitesi, daldırma hızı, bekletme süresi ve geri çekme hızı gibi parametrelerin dikkatli bir şekilde ayarlanmasını gerektirir (Demirbilek vd., 2022). Optimum film kalınlığı ve homojenliğini sağlamak amacıyla her daldırma ve geri çekme döngüsü belirli bir hızda ve sürede gerçekleştirilmiştir. Spesifik olarak, çözelti içinde bekletme süresi 20 saniye olarak ayarlanmış ve daldırma-geri çekme hızı 0.9cm/s olarak uygulanmıştır. Bu işlem, filmlerin yüzey özelliklerini ve kalınlığını hassas bir şekilde kontrol etmeyi mümkün kılmaktadır (Güngör and Güngör, 2012). Filmlerin istenen kalınlığı ve homojenliği elde edilene kadar daldırma-geri çekme döngüsü 10 kez tekrarlanmıştır. Daldırma işleminin tekrar edilmesinin temel amacı, ince filmin kalınlığını kontrollü bir şekilde artırmaktır. Her bir kaplama işleminden sonra filmler, 300 °C’de 5 dakika süreyle ön ısıtmaya tabi tutularak çözücü kalıntılarının giderilmesi ve kısmi kristalizasyonun sağlanması amaçlanmıştır. Her bir daldırma işleminden sonra yapılan ara tavlama işlemi, kaplanan alt tabakada çözeltinin buharlaşmasını sağlamak ve filmdeki organik bileşenlerin uçurulmasını temin etmek amacıyla gereklidir (Demirbilek vd., 2022; Gündoğdu vd., 2026). Bununla birlikte ara tavlamanın amacı, her bir katmanın yeterince kurummasını sağlamak, böylece sonraki katmanların düzgün bir şekilde tutunmasını ve homojen bir film yapısının oluşmasını sağlamaktır (Demirbilek vd., 2022; Gündoğdu vd., 2026). Son olarak filmlere 550 °C’de 3 saat tavlama işlemi uygulanmıştır. Bu tavlama süreci, filmdeki organik bileşenlerin tamamen uzaklaştırılmasını, kristal yapının gelişimini ve dolayısıyla filmin optik ve elektriksel özelliklerinin optimize edilmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda, film yüzeyinde çatlak oluşumunu engelleyerek daha yoğun ve kararlı bir morfoloji sağlamaktadır (Ilıcan ve Büyük, 2018). Son tavlama sıcaklığı ve süresi, film özelliklerini doğrudan etkileyen kritik parametrelerdir. Yetersiz tavlama amorf fazın varlığını sürdürmesine, aşırı tavlama ise istenmeyen tane büyümesi ve morfolojik bozulmalara yol açabilir (Ilıcan ve Büyük, 2018; Gündoğdu vd., 2026). Bu nedenle, optimum tavlama koşulları, filmin hedeflenen uygulamalar için gerekli olan yüksek performanslı özelliklerini sağlamak adına titizlikle belirlenmelidir. Üretilen ince filmlerin farklı Eu katkı oranlarına bağlı olarak sergilediği kalınlık değerleri Tablo 4.2’de verilmektedir. Bütün filmlerde kaplama işlemi 10 döngü olarak sabit tutulmasına rağmen, elde edilen film kalınlıklarının katkı konsantrasyonu ile önemli ölçüde değiştiği görülmüştür. Sol-jel daldırma kaplama yönteminde altlık üzerinde oluşan tabakanın kalınlığı temel olarak çözeltinin viskozitesine bağlıdır (Brinker

and Scherer, 1990). Tablo incelendiğinde, %1 Eu ilavesiyle film kalınlığının referans filme göre 1.71 μm 'den 6.98 μm 'ye yükseldiği belirlenmiştir. Bu artışın, ilave edilen nadir toprak elementinin sol içindeki reaksiyonları etkileyerek başlangıçta daha yoğun bir ağ yapısı oluşturmasından ve çözelti viskozitesini artırmasından kaynaklandığı öngörülmektedir (Znaidi, 2010).

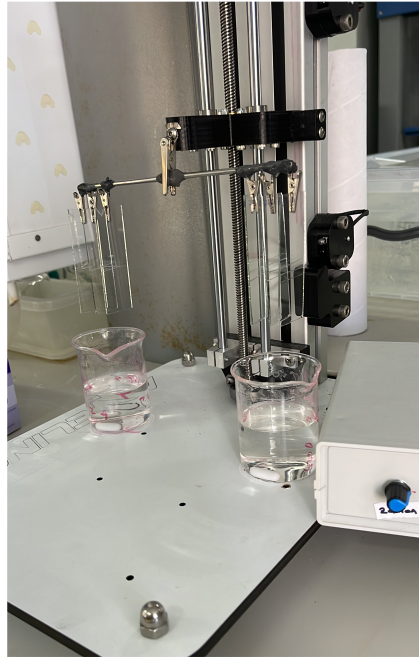
Diğer yandan, Eu katkı oranının %3'ten %10'a çıkarılmasıyla kalınlıkların sistematik bir şekilde azalarak 1.9 μm 'ye kadar gerilediği tespit edilmiştir. İyonik yarıçapı Zn^{2+} (0.074 nm) iyonundan büyük olan Eu^{3+} (0.095 nm) iyonlarının yüksek konsantrasyonlarda yapıya dahil olması, Zn-O-Zn polimerik zincirlerinin büyümesini sterik etki ile sınırlandırmaktadır (Ali et al., 2013). Artan katkı miktarının büyük moleküler zincirler yerine daha küçük kümeler oluşturarak çözelti viskozitesini düşürdüğü ve akışkanlığı artırdığı düşünülmektedir. Dolayısıyla, azalan viskoziteye bağlı olarak çekme işlemi sırasında altlık yüzeyinde tutunan çözelti miktarı azalmış ve film kalınlıklarında belirgin bir düşüş eğilimi gözlenmiştir.

Tablo 4.2: İnce Film Kalınlıkları

İnce Film	Katkı	Film Kalınlıkları
AlZnO	$\text{Zn}_{0,98}\text{Al}_{0,02}\text{O}$	1.71 μm
%1 Eu:AlZnO	$\text{Zn}_{0,97}\text{Al}_{0,02}\text{Eu}_{0,01}\text{O}$	6.98 μm
%3 Eu:AlZnO	$\text{Zn}_{0,95}\text{Al}_{0,02}\text{Eu}_{0,03}\text{O}$	3.03 μm
%5 Eu:AlZnO	$\text{Zn}_{0,93}\text{Al}_{0,02}\text{Eu}_{0,05}\text{O}$	2.63 μm
%7 Eu:AlZnO	$\text{Zn}_{0,91}\text{Al}_{0,02}\text{Eu}_{0,07}\text{O}$	2.20 μm
%10 Eu:AlZnO	$\text{Zn}_{0,88}\text{Al}_{0,02}\text{Eu}_{0,1}\text{O}$	1.69 μm



Şekil 4.3: Eş katkılı Eu:AlZnO ince filmlerin üretim aşamaları



Şekil 4.4: Eş katkılı Eu:AlZnO ince filmlerin üretim aşaması

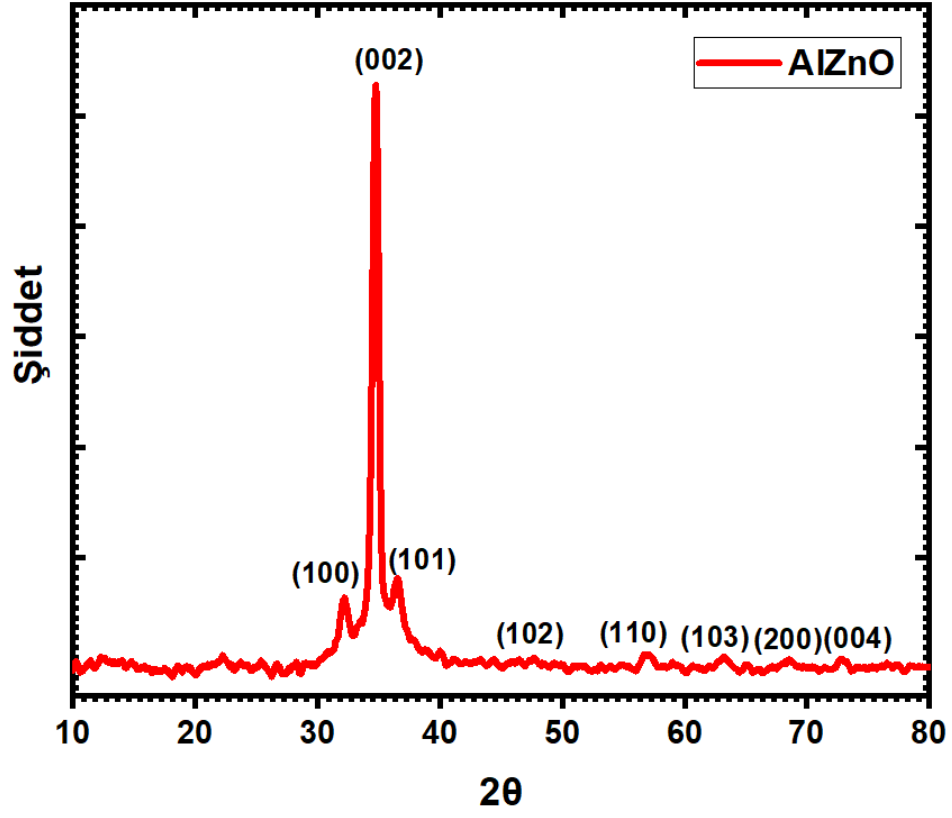
5. BULGULAR TARTIŞMA

Bu bölümde, farklı Eu katkı oranlarında sentezlenen Eu eş katkılı AlZnO ince filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri çeşitli karakterizasyon teknikleri kullanılarak incelenmiş ve elde edilen bulgular bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiştir. Filmlerin kristal yapısı X-ışını kırınımı (XRD), yüzey morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM), optik emisyon özellikleri fotoluminesans (PL) spektroskopisi ve optik geçirgenlik ile bant aralığı özellikleri ise UV-Görünür (UV-Vis) spektroskopisi kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirilerek Eu katkı oranının kristal yapı, kusur yoğunluğu, yüzey morfolojisi, optik geçirgenlik ve elektronik bant yapısı üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak ortaya konulmuştur.

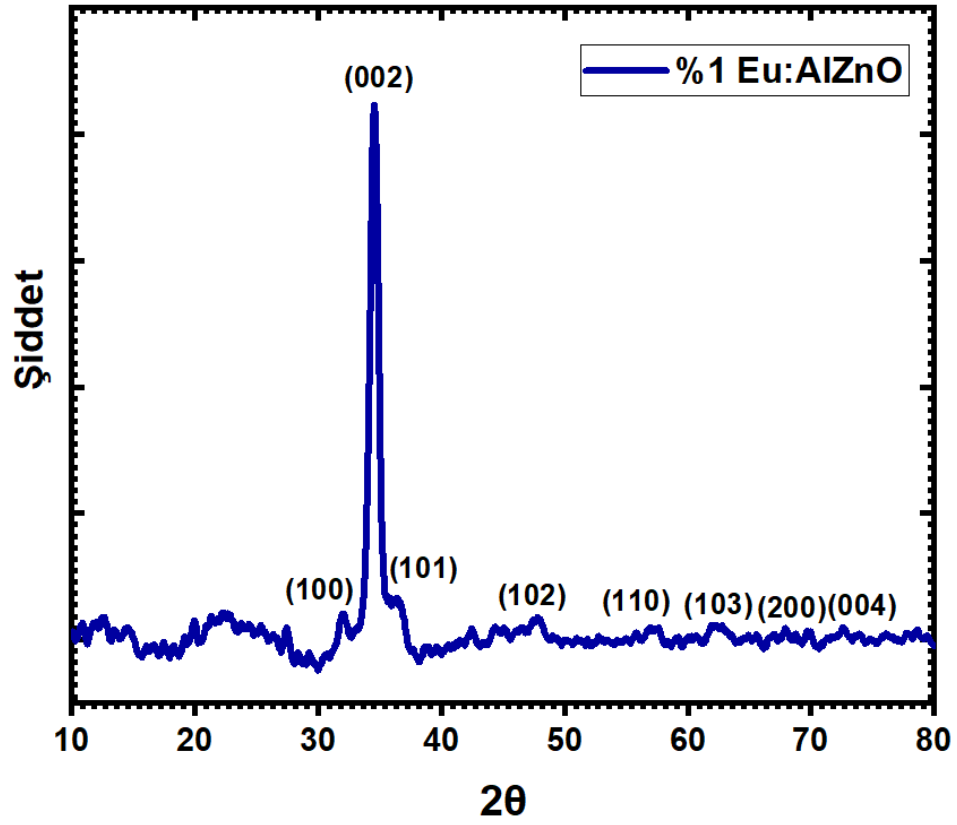
5.1 İnce Filmlerin Yapısal Özellikleri

5.1.1 Kristal yapı analizi

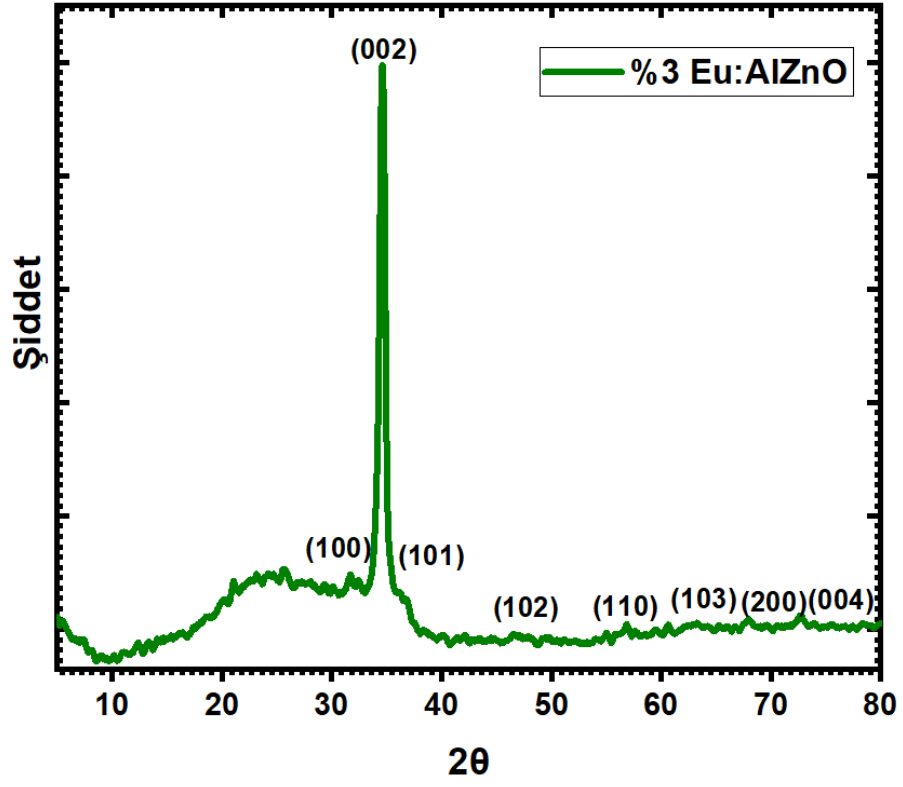
Eş katkılı Eu:AlZnO ince filmlerin kristalografik yapıları, XRD ölçümleriyle belirlenmiş olup, elde edilen XRD spektrumları Şekil 4.4–4.9’da verilmektedir. Tüm filmlerde, yaklaşık 34.5° – 34.8° 2θ açılarında yoğun bir kırınım piki gözlenmiş ve bu pik, hegzagonal wurtzit ZnO yapısına ait (002) düzlemini temsil etmektedir (Chi et al., 2017; Mohammed et al., 2020) Yalnızca (002) yönelimine ait pikin belirgin biçimde baskın olması, filmlerin c-ekseni boyunca güçlü bir tercihli yönelim sergilediğini ortaya koymaktadır (Chi et al., 2017; Mohammed et al., 2020). İnce filmlerde Eu katkı oranının artmasına karşın hegzagonal wurtzit ZnO kristal fazı korunmuş olup, kırınım desenlerinde faz geçişine veya ikincil faz oluşumuna işaret eden herhangi bir ek pik tespit edilmemiştir (Hasabeldaim et al., 2019; Petersen et al., 2010; Wei et al., 2024). Bu bulgu, Eu iyonlarının AlZnO kafesine başarıyla entegre olduğunu ve ana kafes yapısını bozmadığını göstermektedir (Büyük ve Ilıcan, 2019; Lupan et al., 2020; Petersen et al., 2010).



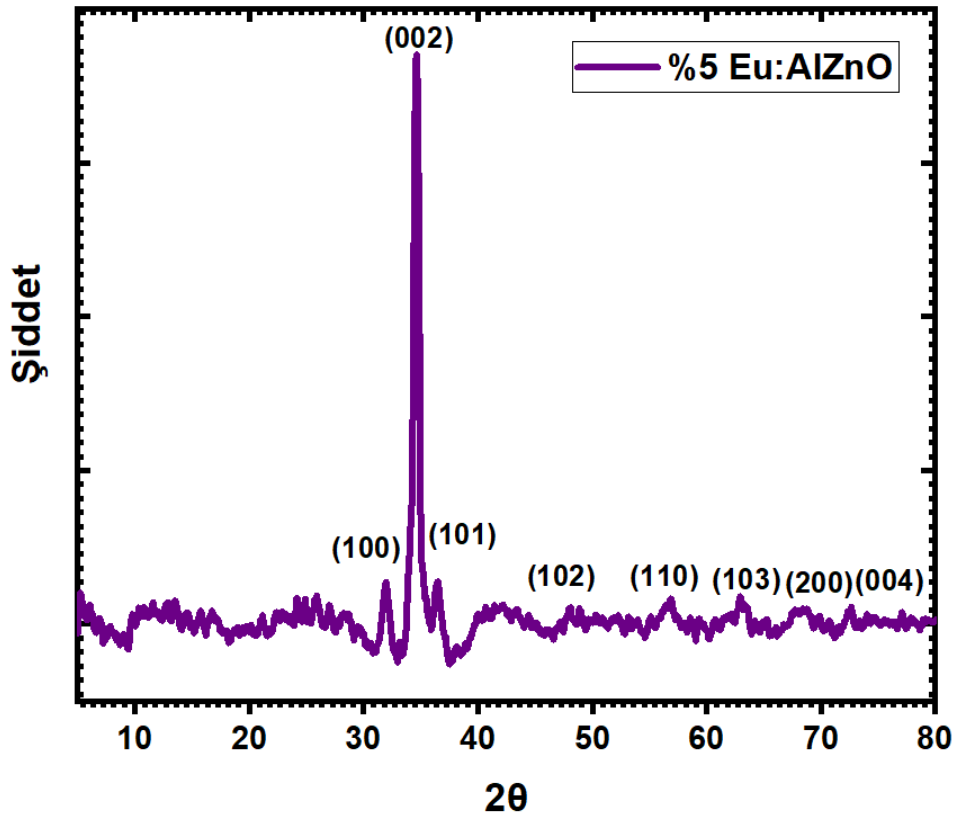
Şekil 5.1: Katkısız AlZnO ince filmin XRD spektrumu



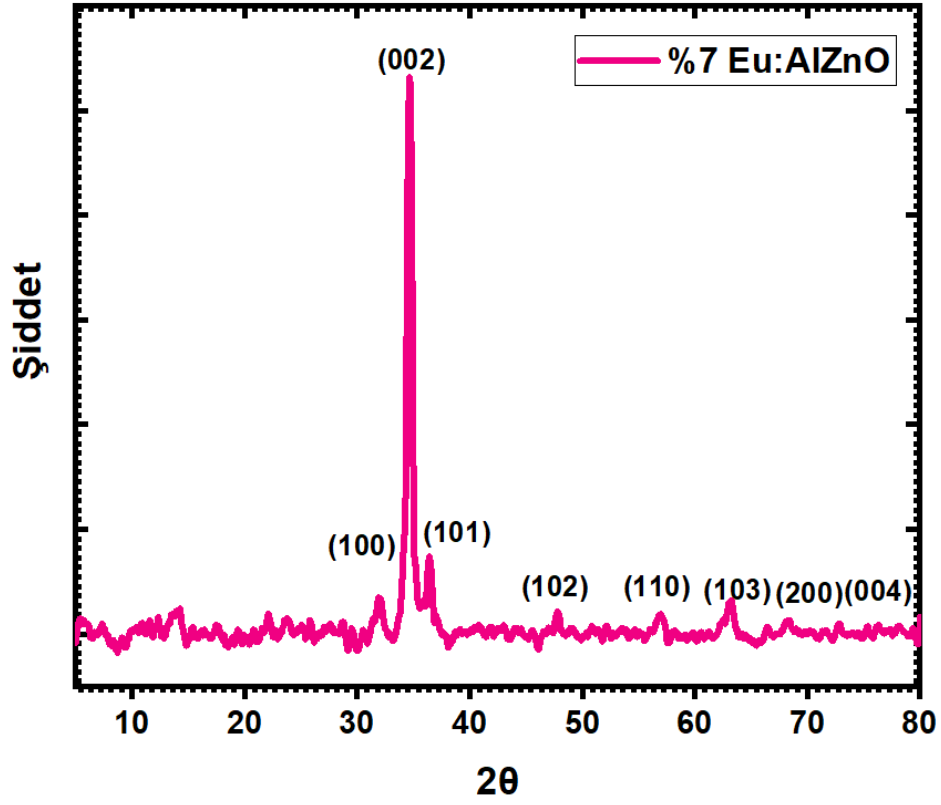
Şekil 5.2: %1 Eu:AlZnO filmin XRD spektrumu



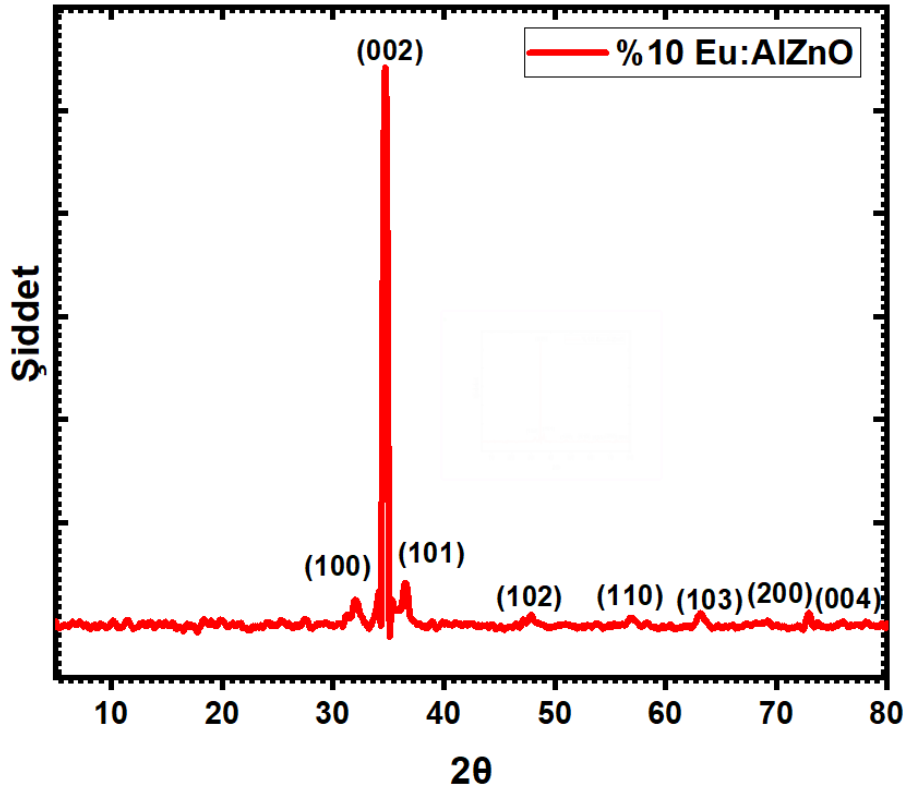
Şekil 5.3: %3 Eu:AlZnO filmin XRD spektrumu



Şekil 5.4: %5 Eu:AlZnO filmin XRD spektrumu



Şekil 5.5: %7 Eu:AlZnO filmin XRD spektrumu



Şekil 5.6: %10 Eu:AlZnO filmin XRD spektrumu

Filmlere ait 20 pik konumları, düzlem arası mesafeler (d), yarı maksimum pik genişlikleri (FWHM), kristalit boyutları (D), dislokasyon yoğunlukları (δ), örgü gerilimi (ϵ) ve örgü parametreleri Tablo 4.3'te özetlenmiştir. Katkısız AlZnO filminde pik konumu 34.75° ve $d_{(002)}$ mesafesi $2.5819 \text{ \AA}$ olarak belirlenmiştir. %1 Eu katkılı filmde ise pik konumu küçük bir kayma ile 34.56° 'ya gerilemiş, buna paralel olarak d değeri $2.5951 \text{ \AA}$ 'ye yükselmiştir. Bu düşük açılı kayma, Eu^{3+} iyonlarının Zn^{2+} iyonuna kıyasla daha büyük iyonik yarıçapından kaynaklanmakta olup ($0.947 \text{ \AA} \rightarrow \text{Eu}^{3+}$; $0.74 \text{ \AA} \rightarrow \text{Zn}^{2+}$), Eu^{3+} iyonlarının ZnO kafesine başarılı bir şekilde ikame edildiğini ve kafes sabitlerinde genişleme yarattığını işaret etmektedir (Büyük ve İlcan, 2019). Bu bulgu, literatürdeki Eu katkılı ZnO ince filmleri üzerine gerçekleştirilen çalışmalarla da tutarlılık göstermektedir (Hasabeldaim et al., 2019; Wei et al., 2024). Bununla birlikte, %1'in üzerinde Eu katkı oranlarında pik konumunun büyük bir açı kayması yapması ve d mesafesinin azalması, artan katkı oranları ile kafes parametrelerinde daralma meydana geldiğini ortaya koymaktadır. Bu davranış, yüksek Eu katkı oranlarında kristal yapıda gerilim oluşumunu veya Eu iyonlarının intertisyel yerleşimini yansıtabilmektedir (Davesne, 2014). %3 ve %5 Eu katkılı filmlerde kırınım piki 34.63° konumunda sabit kalmış, d değeri ise $2.5902 \text{ \AA}$ seviyesinde dengelenmiştir. Bu, düşük ve orta katkı düzeylerinde kafes geriliminin bir sınıra ulaştığını göstermektedir. %7 ve %10 Eu katkılarında pik konumunun yüksek açılı kayması ise kafes sıkışmasını, belirli bir çözünürlük limitinin aşıldığını ve Eu iyonlarının kafes içindeki etkin çözünürlüğünün azalmaya başladığını belirtmektedir (İlcan ve Büyük, 2018; Petersen et al., 2010).

Kristal boyutları incelendiğinde katkısız AlZnO filminde 4.25 nm olan kristal boyutu, %1 Eu katkısıyla 6.06 nm 'ye, %3 Eu katkısında 6.67 nm 'ye, %5 Eu katkısında ise 7.49 nm 'ye ulaşarak en yüksek değerini göstermiştir. Bu artış, Eu iyonlarının belirli bir katkı oranına kadar kristal büyümesini teşvik ettiğini, tane sınırlarındaki difüzyonu kolaylaştırarak tane büyümesini desteklediğini göstermektedir. Ancak katkı oranının %7 ve %10 seviyelerine çıkmasıyla kristal boyutunun sırasıyla 7.28 nm ve 7.16 nm 'ye gerilemiştir. Bu azalma, aşırı katkılamanın kristal yapının düzenliliğini bozarak kristalleşme seviyesinin düştüğünü (Gençyılmaz et al., 2012) ve tanecik boyutunun küçüldüğünü işaret etmektedir (Nyarige et al., 2022; Senol ve İmamoğlu, 2021; Singh et al., 2020). Benzer çalışmalarda da, daha yüksek Eu konsantrasyonlarında kristalit boyutunda bir azalma olduğu gözlemlenmiştir (Rayes et al., 2017). Bu durum, Eu^{3+} iyonlarının ZnO kafesindeki Zn^{2+} iyonlarının yerini almasıyla oluşan kafes deformasyonuna bağlanabilir, çünkü Eu^{3+} iyonları Zn^{2+} iyonlarından daha büyük iyonik yarıçapa sahiptir (Bessadok et al., 2024). Bu iyonik yarıçap farklılığı,

özellikle daha yüksek konsantrasyonlarda, kristal büyümesini engelleyici Eu–O–Zn bağları oluşturarak kristalit boyutunda bir azalmaya yol açabilir (Naik et al., 2020).

Artan Eu katkısı ile dislokasyon yoğunluğu belirgin şekilde azalmıştır. Tablo 4.3’de görüldüğü gibi katkısız AlZnO filminde 0.0553 nm^{-2} olan bu değer, %1 Eu katkılı filmde 0.0272 nm^{-2} ’ye gerilemiş, %3 ve %5 Eu katkılı filmlerde ise sırasıyla 0.0225 nm^{-2} ve 0.0178 nm^{-2} olarak hesaplanmıştır. Bu azalış, Eu^{3+} iyonlarının ZnO kafesindeki kusurları pasifleştirerek kristal mükemmelliğini artırdığını ve kafes gerilimini düşürdüğünü göstermektedir (Lupan et al., 2020). Ancak %7 ve %10 Eu katkı oranlarında dislokasyon yoğunluğunun tekrar artarak sırasıyla 0.0189 nm^{-2} ve 0.0195 nm^{-2} seviyelerine ulaşması, optimum katkı seviyesinin aşılmasıyla birlikte aşırı Eu iyonlarının kafes yapısında yeni kusurlar oluşturmaya başladığına işaret etmektedir. Bu bulgular, Eu^{3+} iyonlarının kafes parametrelerini ve kristal boyutunu etkileyerek dislokasyon yoğunluğunda önemli değişikliklere yol açtığını ve optimum bir katkı oranının üzerinde bu etkilerin tersine dönebildiğini açıkça ortaya koymaktadır (Afifah et al., 2023). Bu değişimler, Eu katkısının ZnO’nun yapısal özelliklerini modüle etme potansiyelini vurgulamaktadır ve Er^{+3} katkılı ZnO filmlerinde gözlemlenen benzer dislokasyon yoğunluğu azalışı ve kristalit boyutu artışı ile paralellik göstermektedir (Tolera et al., 2025).

Örgü gerilimi değerleri de benzer bir eğilim izleyerek düşük katkı seviyelerinde azalmış, %5 Eu katkısında en düşük seviyesine ulaşmış ve daha yüksek katkı seviyelerinde yeniden artış göstermeye başlamıştır. Bu durum, optimum katkı seviyesinin ötesinde Eu iyonlarının kümelenmesi sonucu lokal gerilmelerin arttığını ve kristal ağda yapısal bozukluklara yol açtığını göstermektedir (Kumar et al., 2016).

Örgü parametreleri incelendiğinde, katkısız AlZnO filminde $a = 3.198 \text{ Å}$ ve $c = 5.163$ olarak belirlenirken, %1 Eu katkılı filmde bu değerler $a = 3.207 \text{ Å}$ ve $c = 5.190$ ’ye yükselmiştir. %3 ve %5 Eu katkılarında hafif bir küçülme gözlenerek a parametresi 3.2010 Å ve c parametresi ise 5.1804 Å değerleri elde edilmiştir. %7 ve %10 Eu katkılarında ise a parametresi $3.1979\text{-}3.1938 \text{ Å}$ aralığına, c parametresi $5.1779\text{-}5.1688 \text{ Å}$ aralığına gerilemiştir. Bu değişimler, düşük Eu katkı seviyelerinde kafes genişlemesi yarattığını, yüksek seviyelerde ise kısmi sıkılaşma veya çözünürlük sınırına yaklaşma etkilerini ortaya koyduğunu göstermektedir (Petersen et al., 2010; Singh et al., 2020.). Bu genişleme, Eu^{3+} iyonlarının daha büyük iyonik yarıçapından kaynaklanmakta olup, Zn^{2+} iyonlarını ikame

etmesiyle indüklenen yerel kafes distorsiyonuyla açıklanabilir (Badhan et al., 2026). Fakat, kafes parametrelerinde gözlemlenen değişim yalnızca iyonik yarıçap farkından değil, aynı zamanda katkı konsantrasyonu, kristaldeki kusurların varlığı ve mekanik olarak indüklenen gerilim gibi diğer faktörlerden de etkilenmektedir (Ashour et al., 2022; Lysak et al., 2023). Bu bulgular genel olarak incelendiğinde, Eu katkısının AlZnO ince filmlerin kristal yapısı üzerinde belirgin ve sistematik etkiler yarattığı anlaşılmaktadır. %1-%5 Eu katkı oranlarında kristal kalitesini iyileştirici etkiler öne çıkmakta olup, kristalit boyutundaki artış ile dislokasyon yoğunluğu ve örgü gerilimindeki azalma bunun başlıca kanıtlarıdır. Öte yandan, %7 ve %10 Eu katkılarında örgü gerilmesinin birikmesi ve kusur yoğunluğunun yükselmesiyle kristal yapıda kısmi bozulma meydana gelmektedir.

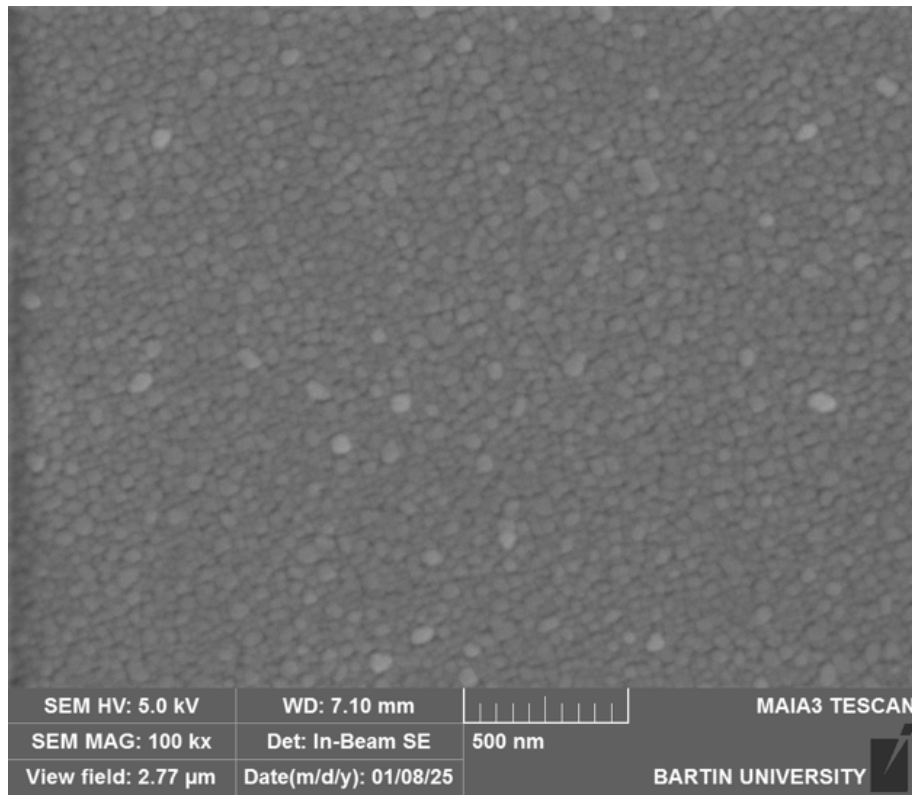
XRD analizleri, AlZnO ince filmler için yaklaşık %5 Eu katkısının kristal kalite bakımından optimum seviye olduğunu göstermektedir.

Tablo 5.1: Farklı Eu katkı oranlarında Eu:AlZnO ince filmlerin yapısal parametreleri

İnce film	2 θ (°)	d ₍₀₀₂₎	FWHM (radyan)	D (nm)	δ (nm ⁻²)	ϵ	Örgü parametreleri (Å)	
							a	c
AlZnO	34.75	2.5819	0.0341	4.250	0.0553	8.16x10 ⁻³	3.1980	5.1638
%1 Eu:AlZnO	34.56	2.5951	0.0239	6.060	0.0272	5.72x10 ⁻³	3.2070	5.1902
%3 Eu:AlZnO	34.63	2.5902	0.0217	6.670	0.0225	5.20x10 ⁻³	3.2010	5.1804
%5 Eu:AlZnO	34.63	2.5902	0.0193	7.490	0.0178	4.62x10 ⁻³	3.2010	5.1804
%7 Eu:AlZnO	34.66	2.5877	0.0196	7.280	0.0189	4.70x10 ⁻³	3.1979	5.1779
%10 Eu:AlZnO	34.71	2.5844	0.02029	7.160	0.0196	4.84x10 ⁻³	3.1938	5.1688

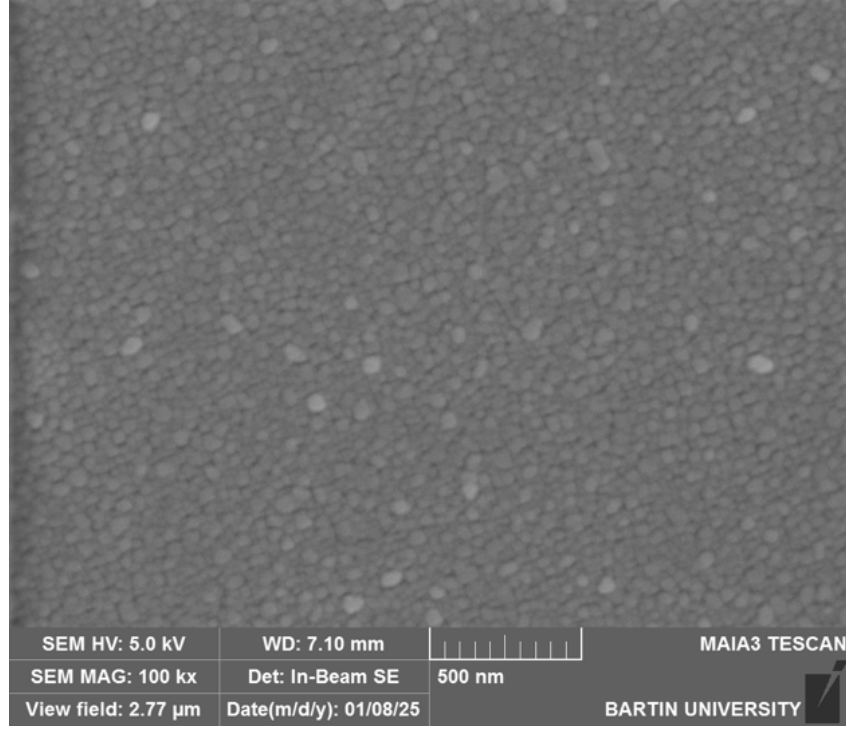
5.1.2. Taramalı elektron mikroskobu analizleri (SEM)

Farklı Eu katkı oranlarına sahip AlZnO ince filmlerin morfolojik özelliklerini incelemek amacıyla, 5 kV hızlandırma gerilimi kullanılarak 100 kx büyütme oranında alınan SEM yüzey görüntüleri Şekil 4.10-4.15'te sunulmuştur. SEM görüntüleri, Eu katkı oranlarının artmasıyla tane yoğunluğunda, yüzey topografyasında ve kristal büyüme davranışında belirgin değişiklikler meydana geldiğini göstermektedir. Bu durum, filmlerin morfolojisinde sistematik bir dönüşümün gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Özellikle düşük Eu katkı oranlarında filmler daha homojen ve yoğun bir tane yapısı sergilerken, katkı oranının artmasıyla yüzey pürüzlülüğü ve tane boyutlarındaki düzensizlikler belirginleşmiştir.



Şekil 5.7: Katkısız AlZnO ince filmin yüzey görüntüsü

Katkısız AlZnO ince filminde yüzey, küçük boyutlu ve düzensiz dağılımlı tanelerden oluşmakta olup, film genelinde süreksizlikler ve boşluklar gözlenmiştir. Yüzey kompakt bir yapı sergilememektedir. Bu özellik, düşük kristalit boyutu ile sınırlı tane büyümesi arasında doğrudan bir ilişkiyi yansıtmaktadır. Bu morfolojik yapı, XRD analizlerindeki yüksek dislokasyon yoğunluğu ve düşük kristalit boyutu bulgularıyla tam uyum içindedir.

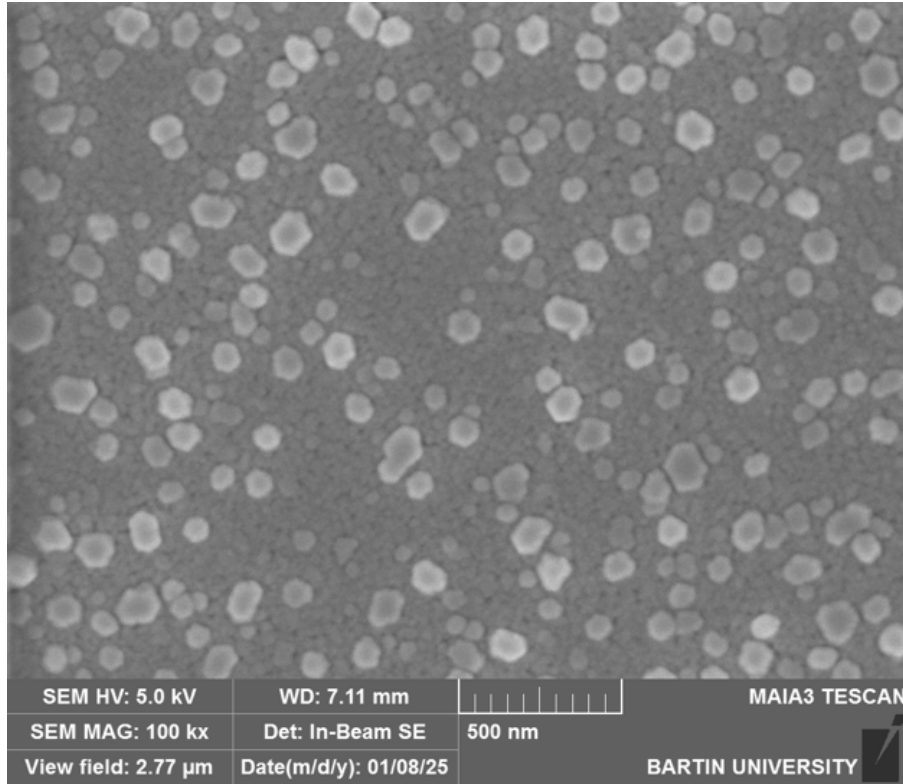


Şekil 5.8: %1 Eu:AlZnO ince filmin yüzey görüntüsü

%1 Eu katkı oranına sahip AlZnO ince filmin SEM görüntüsü (Şekil 5.8), morfolojik açıdan homojen, kompakt ve nanoboyutlu taneciklerden oluşan bir yüzey yapısını temsil etmektedir. Literatürle uyumlu olarak, Eu katkılı ZnO sistemlerinde bu düşük katkı seviyesi, yüzeyde herhangi bir çatlak veya dökülme olmaksızın pürüzsüz ve polikristal bir morfolojinin oluşmasını sağlar (Singh et al., 2020). Bu aşamada Eu iyonları, tane büyümesini baskılayarak daha ince ve homojen dağılımlı bir tane yapısı gelişimine yardımcı olur (Petersen et al., 2010; Singh et al., 2020). Film yüzeyinin gözeneksiz ve düzgün bir süreklilik sergilemesi, malzemenin düzgün büyüme karakterini koruduğuna ve başarılı bir biriktirme sürecine işaret eder (Ilıcan ve İlgü, 2018; Otieno et al., 2020). Katkı miktarının daha yüksek seviyelere çıkarılması durumunda gözlenebilecek yapısal bozulmaların ve tanecik düzensizliklerinin aksine, %1'lik oran kristal kalitesinin ve yüzey bütünlüğünün korunduğu kararlı bir yapı sunmaktadır.

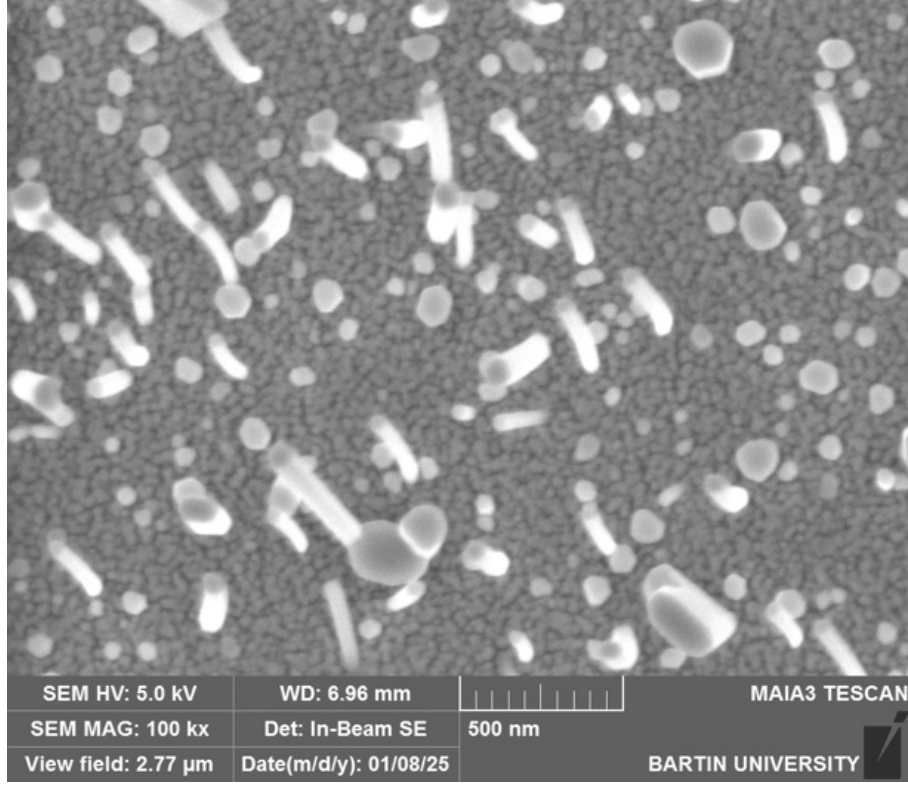
%3 Eu katkı oranına sahip AlZnO ince filmin SEM görüntüsü (Şekil 5.9), yüzey morfolojisinin daha kararlı ve yoğun bir yapıya evrildiği kritik bir geçiş aşamasını temsil etmektedir. SEM görüntüsüne göre, %1'lik katkı oranına kıyasla tanelerin birbirleriyle birleşmeye başladığı ve yüzeyde "kristal adacıkları" olarak tanımlanan daha büyük ve belirgin yapıların olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, artan Eu iyonu ile tane sınırlarının

hareketliliğini etkileyerek kristal büyüme mekanizmasını temelden değiştirdiğini göstermektedir. Literatürde de benzer şekilde, katkı miktarındaki bu tür kontrollü artışların kristal boyutunda büyümeyi teşvik ettiği ve tanelerin daha kompakt bir form kazanmasına yardımcı olduğu bildirilmektedir (Mkawi et al., 2015; Nowsherwan et al., 2025). Bu %3'lük katkı seviyesinde yüzey, boşluksuz ve homojen bir biçimde alt tabakayı kaplamaktadır. Bu morfolojik yapı, sistemin aşırı doygunluğa ulaşmadığı ve kristal kalitesinin iyileşme gösterdiği bir evreyi temsil etmektedir.



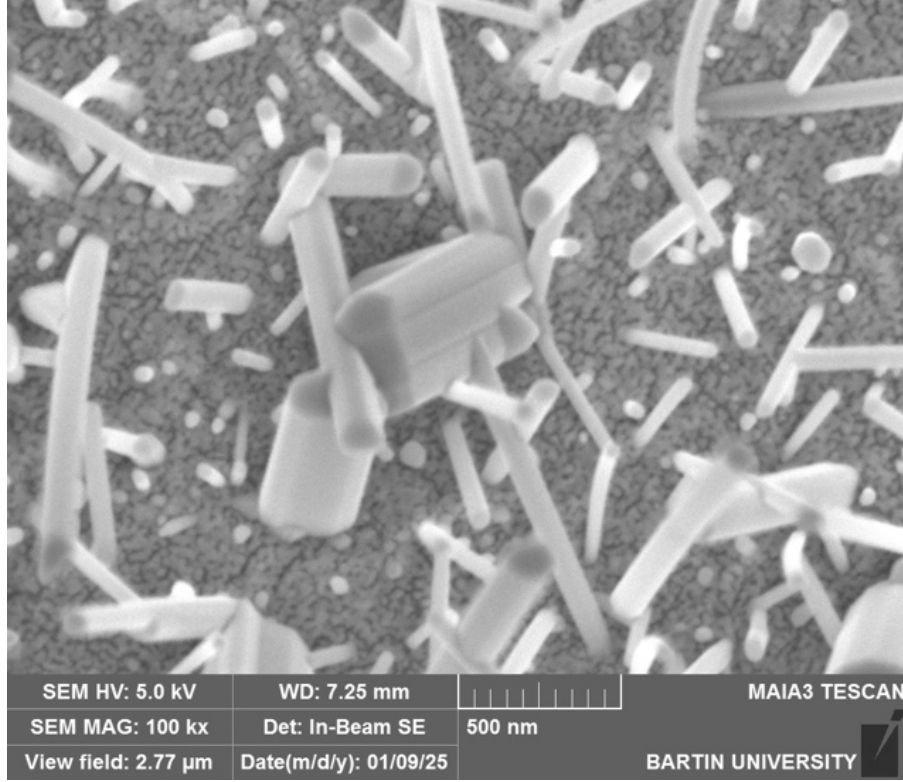
Şekil 5.9: %3 Eu:AlZnO ince filmin yüzey görüntüsü

%5 Eu katkı oranına sahip AlZnO ince filmin SEM görüntüsü (Şekil 5.10), malzemenin en belirgin tane boyut artışına ve en düzenli, kompakt yapıya ulaştığı aşamayı göstermektedir. Literatürde Eu katkılı ZnO sistemlerinde benzer şekilde, katkının filmi daha yoğun ve sıkı paketlenmiş bir yapıya dönüştürdüğü (Singh et al., 2020) ve homojen bir sütunlu büyüme karakteri kazandırdığı bildirilmektedir (Lupan et al., 2020). Bu katkı seviyesinde yüzeydeki boşluk ve gözeneklerin minimize edilmesi, malzemenin yapısal bütünlüğünü artırmaktadır. Sonuç olarak %5 Eu katkılı film, sistemin yapısal kusurlarının en aza indiği ve en yüksek mikroyapısal kararlılığa ulaştığı ideal morfolojiyi yansıtmaktadır. Bu morfolojik gelişim, XRD analizlerinde saptanan optimum kristal kaliteyi destekler niteliktedir.



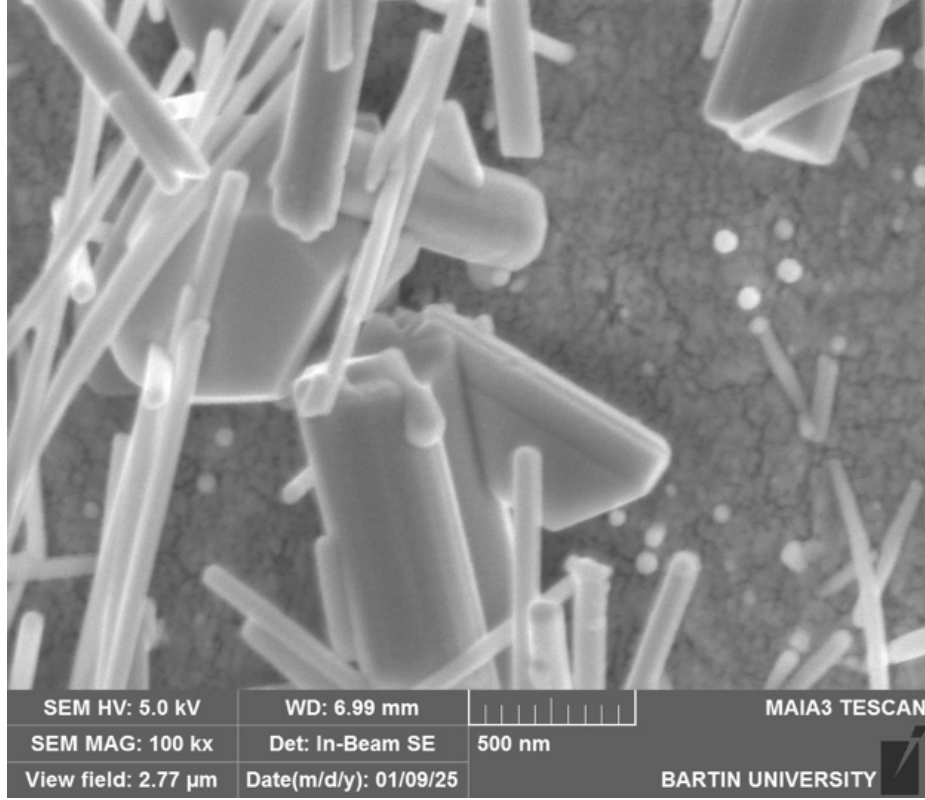
Şekil 5.10: %5 Eu:AlZnO ince filmin yüzey görüntüsü

Şekil 5.11, %7 Eu katkı oranına sahip AlZnO ince filmin yüzey görüntüsünü göstermektedir. Eu^{3+} iyonlarının ZnO matrisine eklenmesi kristal büyümesini sınırlamakta ve buna bağlı olarak daha küçük tane boyutlarına sahip bir yüzey morfolojisi oluşumuna yol açmaktadır (Singh et al., 2020). %7 gibi yüksek katkı seviyesinde, Eu^{3+} iyonlarının Zn^{2+} iyonlarından büyük iyonik yarıçapı kristal kafesinde mekanik gerilim yaratarak tanelerin yüzeyde kümelenmesine neden olmaktadır (Naik et al., 2020). Bu aşamada, düşük katkı oranlarındaki pürüzsüz ve kompakt yapıdan, tane sınırlarının karmaşıklaştığı ve homojenliğin gerilediği bir yüzey karakteristiğine geçiş gözlenmektedir. Bu morfolojik değişimler, filmin optik ve elektriksel özelliklerini belirleyici biçimde etkilemektedir (Miquelot et al., 2019). Benzer şekilde, literatürde Sm ve Er katkılı ZnO filmlerinde de artan katkı konsantrasyonlarıyla tane boyutlarında değişiklikler ve kümeleşme eğilimleri rapor edilmiştir (Nyarige et al., 2022)



Şekil 5.11: %7 Eu:AlZnO ince filmin yüzey görüntüsü

%10 Eu katkı oranına sahip AlZnO ince filmin SEM görüntüsü (Şekil 5.12), yüzey morfolojisinin kritik bir bozulma evresine girdiğini, homojen yapının yerini düzensiz şekilli ve boyutları heterojenleşmiş tanelere bıraktığını göstermektedir. Bu morfolojik dönüşüm, özellikle bazı bölgelerde belirginleşen kümelenme eğilimleriyle karakterize edilmektedir (Mkawi et al., 2015; Qian et al., 2024). Aşırı Eu katkısının kristal büyüme sürekliliğini sekteye uğratarak yüzeyde gerilim birikimine yol açması, yüksek konsantrasyonlu katkılı sistemlerde gözlenen yapısal bozulmalarla benzerlik göstermektedir (Li et al., 2018). Bu morfolojik değişim, XRD analizlerinde kristal boyutunun düşmesi ve dislokasyon yoğunluğunda gözlenen artış eğilimiyle tam bir uyum içindedir. Literatürdeki nadir toprak elementi katkılı diğer ZnO çalışmalarıyla uyumlu olarak, katkı oranının belirli bir seviyeye çıkması tane sınırlarını bozarak kristal kalitesinde düşüşe neden olan aşırı doygunluk etkisini göstermektedir (Büyük ve Ilıcan, 2019). %10 Eu katkılı filmin görüntüsü homojenliğini kaybetmiş, tane boyutları arasında büyük farklar bulunan ve yer yer kümelenmelerin başladığı bir yüzey yapısını temsil etmektedir.



Şekil 5.12: %10 Eu:AlZnO ince filmin yüzey görüntüsü

5.2 İnce Filmlerin Optik Özellikleri

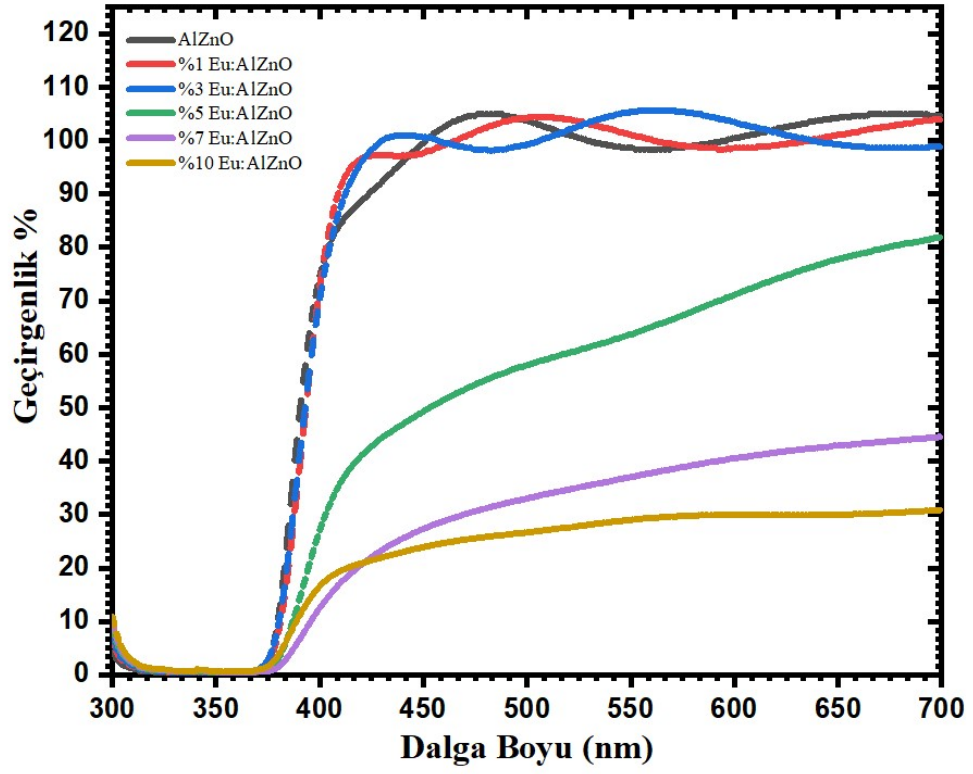
5.2.1 Ultraviyole görünür spektroskopisi analizi (UV-Vis)

Eu eş katkılı AlZnO ince filmlerin optik özellikleri, Eu katkı oranının optik geçirgenlik ve elektronik bant yapısı üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla UV-Vis spektroskopisi ile analiz edilmiştir. Bu kapsamda, optik soğurma verilerinden E_g bant aralığı değerleri Tauc yöntemi (Denklem 3.14) kullanılarak hesaplanmıştır. İnce film yarıiletkenlerde bant aralığını belirlemede yaygın olarak kullanılan bu yöntem, soğurma katsayısı (α) ile foton enerjisi ($h\nu$) arasındaki ilişkiye dayanmaktadır ve doğrusal bölgenin enerji eksenini kestiği nokta bant aralığını vermektedir (Amorin et al., 2018).

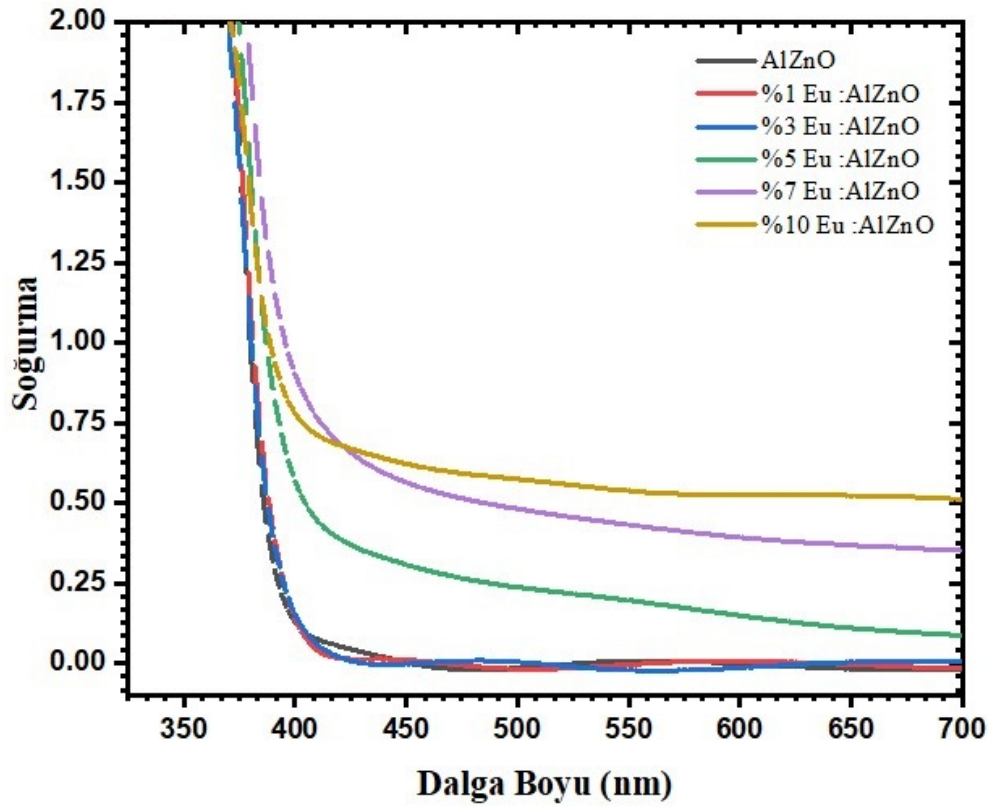
ZnO doğrudan bant aralıklı bir yarıiletken olmasına rağmen, Eu ve Al katkılanması sonucunda oluşan örgü bozuklukları, kusur seviyeleri, oksijen boşlukları ve yerel yapısal düzensizlikler optik soğurma kenarında değişimlere neden olabilmekte ve optik geçiş karakterini etkileyebilmektedir (Pankove, 1971; Mott and Davis, 1979; Özgür et al., 2005; Guillén, 2025). Bu nedenle Tauc analizinde dolaylı izinli geçişi temsil eden $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$ grafiği daha belirgin bir doğrusal bölge göstermiştir. Bu doğrultuda optik bant aralığı hesaplamalarında dolaylı geçiş yaklaşımı esas alınmıştır. ZnO tabanlı filmlerin doğrudan bant aralıklı

yarıiletken karakteri nedeniyle hesaplamalarda $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$ grafikleri tercih edilmiştir (Shakti and Gupta, 2010).

Şekil 5.13’da farklı Eu katkı oranlarına sahip AlZnO ince filmlerin geçirgenlik spektrumları verilmektedir. Düşük katkı oranlarında filmlerin görünür bölgede yüksek geçirgenlik sergilediği gözlemlenmiştir. Bu bulgu, kristal yapının düzenli olduğunu ve optik saçılma mekanizmalarının sınırlı kaldığını işaret etmektedir. ZnO tabanlı ince filmlerin geniş bant aralığı nedeniyle görünür ışıktaki yüksek geçirgenlik gösterdiği literatürde yaygın biçimde rapor edilmiştir (Chowdhury et al., 2012). Buna karşılık, katkı oranının %5 ve üzerine çıkmasıyla geçirgenlikte belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Yüksek katkı oranlarında artan kusur yoğunluğu, tane sınırı düzensizlikleri ve yüzey pürüzlülüğü, ışık saçılmasını artırarak optik geçirgenliği düşürmektedir. Ayrıca artan film kalınlığı da geçirgenlik değerlerinin düşmesine katkıda bulunabilir (Aydın, 2018; Demirbilek vd., 2022). Özellikle, artan katkı konsantrasyonu ile filmlerdeki deformasyonlar ve bant sarkmaları bant kenarlarının keskinliğini azaltarak soğurma özelliklerini etkileyebilir (Gençyılmaz et al., 2012). Bu durum, özellikle görünür bölgedeki ortalama geçirgenlik değerlerindeki azalmayla da desteklenmektedir (Karakaya, 2017). Bu bağlamda, optik geçirgenlikteki artışın genellikle optik bant aralığının genişlemesiyle ilişkili olduğu bilinmektedir (Kırık ve Şahin, 2022). Bu etki, özellikle Al katkısının neden olduğu Moss-Burstein kayması ile açıklanabilmekte ve iletim bandındaki en düşük enerji seviyelerinin dolmasıyla Fermi seviyesinin daha yüksek enerjilere kayması sonucu optik bant aralığının genişlemesine yol açmaktadır.



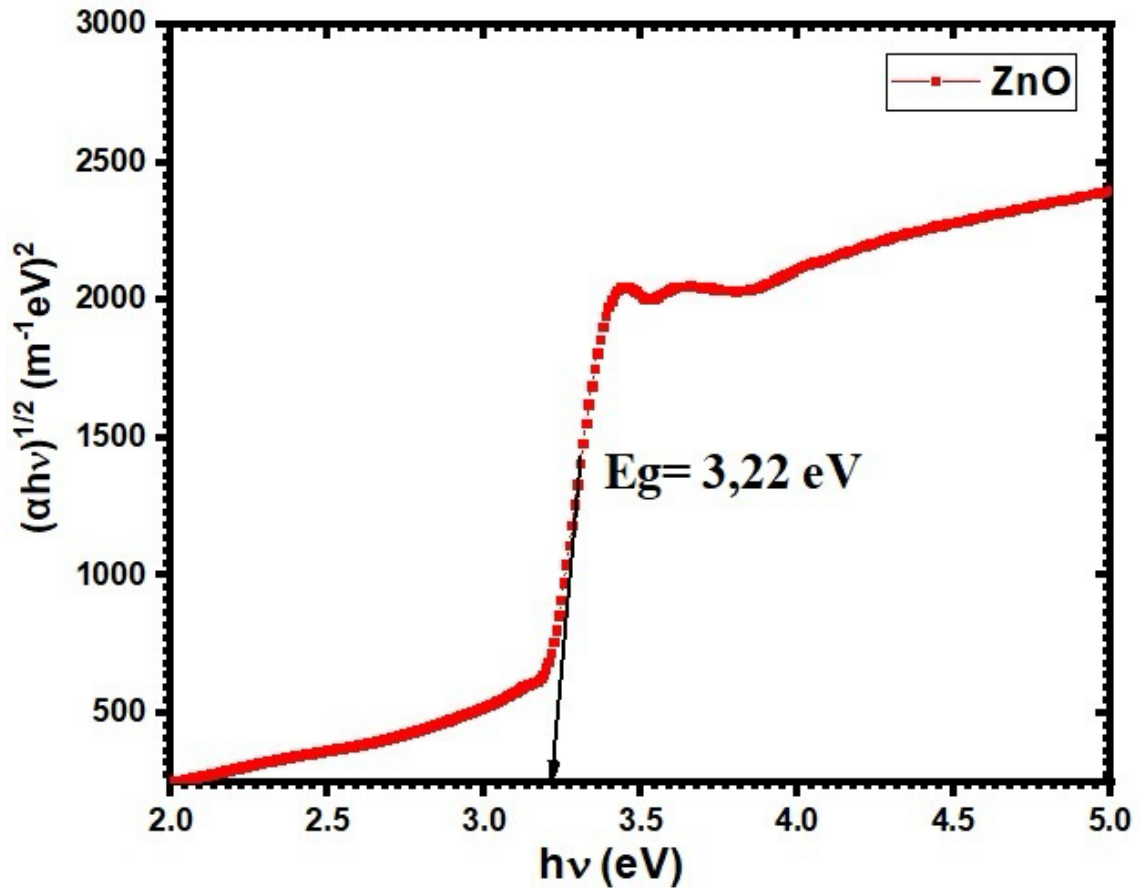
Şekil 5.13: Farklı Eu:AlZnO ince filmlerin geçirgenlik (%) spektrumları



Şekil 5.14: Farklı Eu:AlZnO ince filmlerin soğurma spektrumları

Şekil 5.14’de soğurma spektrumları, katkısız filmde UV bölgesinde absorpsiyon kenarı ve görünür bölgede düşük soğurma göstermektedir. Eu katkı oranı arttıkça soğurma sistematik olarak yükselir. Özellikle yüksek oranlarda görünür bölgede belirgin artar (Aydın, 2018; Demirbilek vd., 2022). Bu, Eu iyonlarının bant aralığında lokal enerji seviyeleri oluşturarak optik geçiş olasılığını artırmasından kaynaklanır (Ferrero et al., 2021; Gençyılmaz et al., 2012; Sarangapani et al., 2019). Literatürde Eu katkısının ZnO tabanlı yapılarda absorpsiyon kenarını genişlettiği ve soğurma şiddetini artırdığı rapor edilmiştir (Gençyılmaz et al., 2012)

Katkısız ZnO ince filmin optik bant aralığı Tauc yöntemiyle $E_g = 3.22$ eV olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu değer, literatürdeki saf ZnO verileriyle (3.37eV) uyumlu olup, meydana gelen küçük kaymanın kristal boyutu etkisi veya yapısal kusurlardan kaynaklandığı değerlendirilmektedir (Ferrero et al., 2021; Sarangapani et al., 2019). ZnO ince filmlerin $(\alpha h\nu)^{1/2}-h\nu$ grafikleri Şekil 5.15’de sunulmuştur.



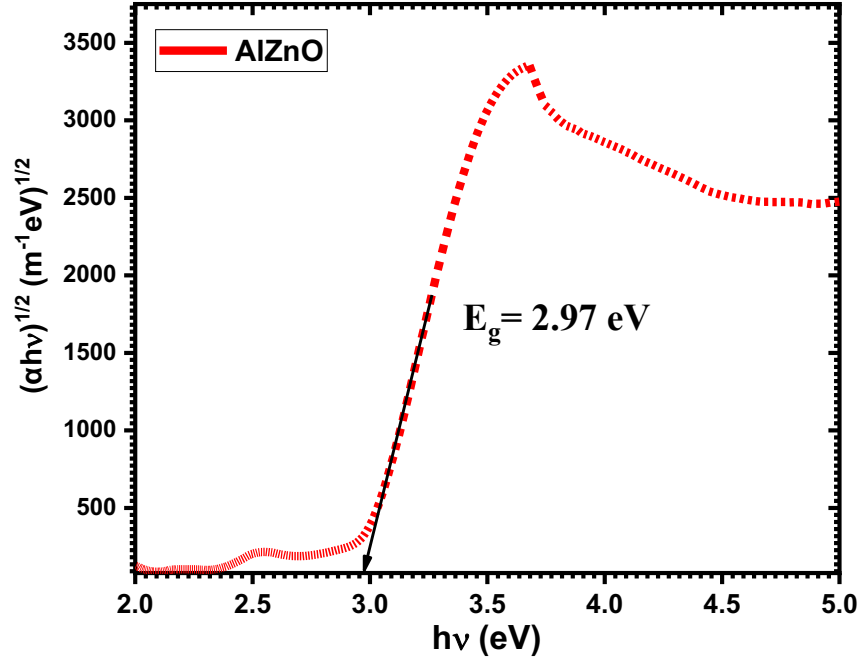
Şekil 5.15: ZnO ince filmin $(\alpha h\nu)^{1/2}-h\nu$ grafikleri

Şekil 5.16’de verilen katkısız AlZnO ince filmi için optik bant aralığı değeri $E_g=2.97$ eV olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, literatürde sol-jel yöntemiyle üretilen benzer ZnO tabanlı ince filmlerde raporlanan bant aralığı değerleriyle uyumludur (Shakti and Gupta, 2010).

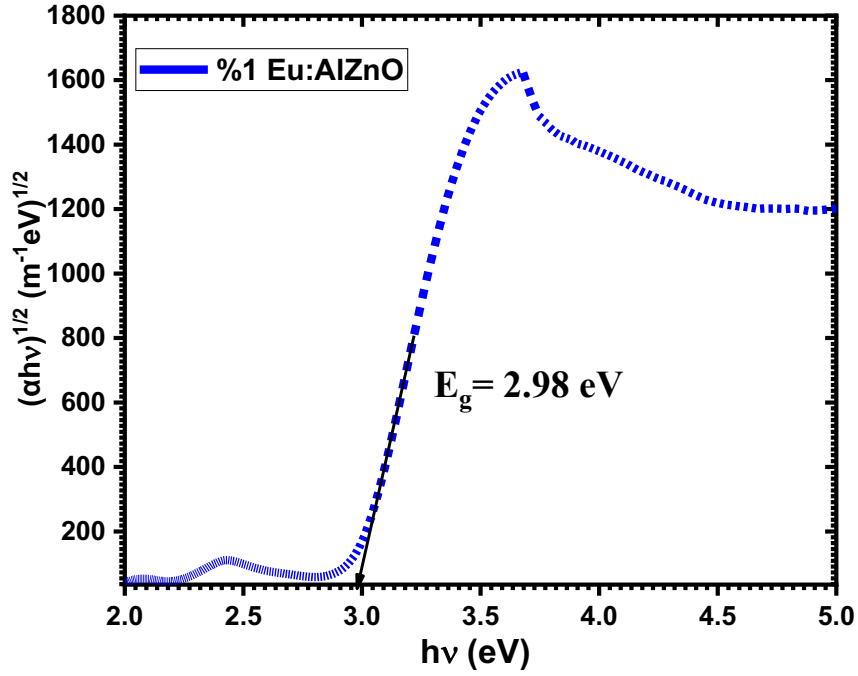
Şekil 5.17 ve 5.18’te verilen %1 ve %3 Eu katkılı filmlerde bant aralığı $E_g=2.98$ eV olarak tespit edilmiştir. Düşük katkı oranlarında gözlenen bu sınırlı genişleme, katkı kaynaklı serbest taşıyıcı yoğunluğunun artmasıyla absorpsiyon kenarının kısa dalga boyuna kaymasından kaynaklanmakta olup, Burstein–Moss etkisiyle açıklanabilir (Kırık ve Şahin, 2022). Bu davranış, düşük Eu seviyelerinde bant yapısının büyük ölçüde korunduğunu ve belirgin yerel durum oluşumunun henüz baskın olmadığını işaret etmektedir.

Eu katkı oranının %5’e ulaşmasıyla optik bant aralığında belirgin daralma meydana gelmiş ve $E_g=2.82$ eV değeri elde edilmiştir. Bu keskin düşüş, yüksek katkı derişimiyle bant aralığı içinde oluşan yerel enerji seviyelerinin yoğunlaşması ve absorpsiyon kenarında kuyruk oluşumunun güçlenmesiyle ilişkilendirilebilir (Ferrero et al., 2021; Sarangapani et al., 2019). Literatürde, yüksek katkı konsantrasyonlarında bant aralığı daralmasının kusur kaynaklı seviyelerle bağlantılı olduğu vurgulanmaktadır (Gençyılmaz et al., 2012).

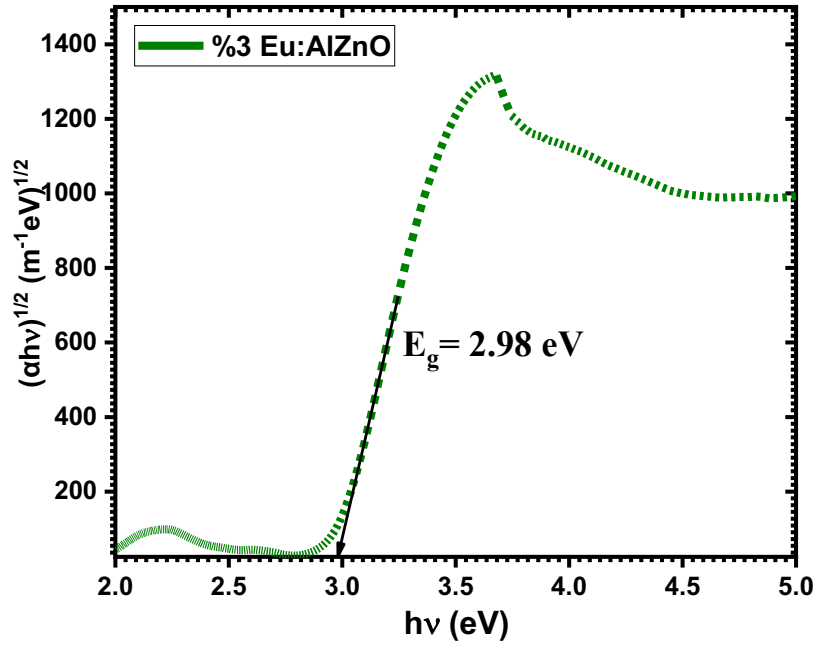
Şekil 5.20 ve 5.21’de verilen %7 ve %10 Eu katkılı filmlerde bant aralığı değerleri sırasıyla $E_g=2.85$ eV ve $E_g=2.89$ eV olarak hesaplanmıştır. Yüksek konsantrasyonlarda, muhtemelen katkı atomlarının kafes içi çözünürlük sınırına yaklaşmasıyla birlikte optik özellikler stabilize olmuş, katkı kaynaklı kusurlar ve yerel düzensizlikler bant aralığının daralmış bu yeni seviyede kalmasını baskılamıştır (Trad, 2021; Zhao and Yang, 2014).



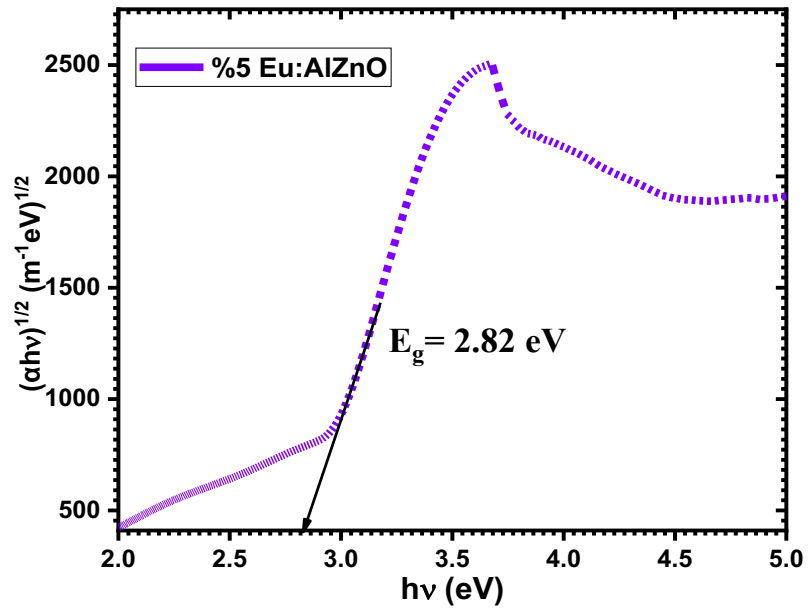
Şekil 5.16: Katkısız AlZnO ince filminin $(\alpha h\nu)^{1/2}$ - $h\nu$ grafiği



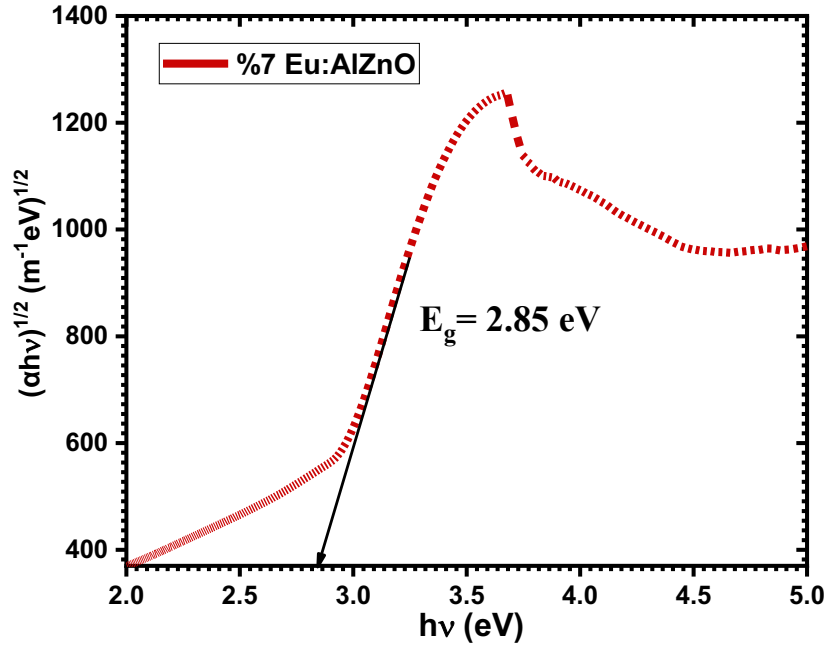
Şekil 5.17: %1 Eu:AlZnO ince filminin $(\alpha h\nu)^{1/2}$ - $h\nu$ grafiği



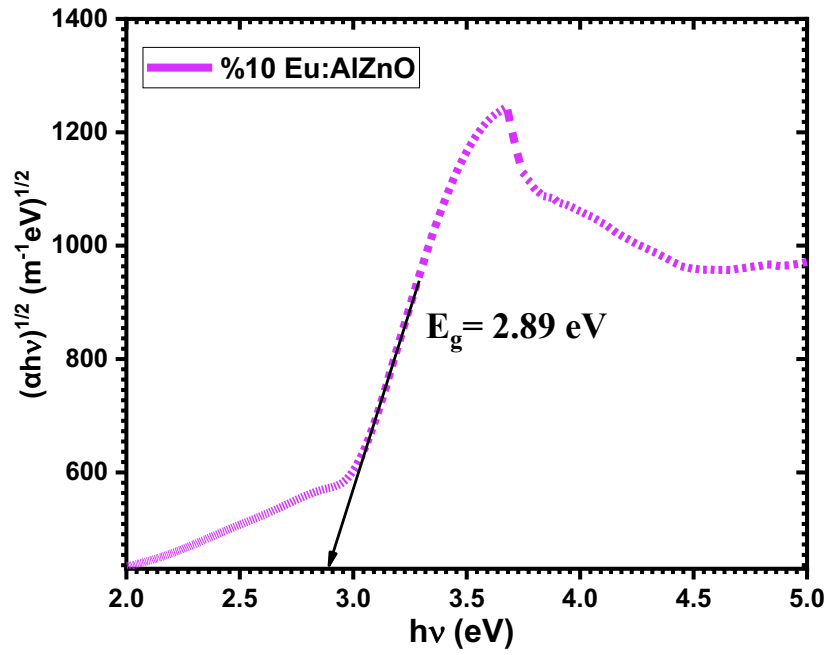
Şekil 5.18: %3 Eu:AlZnO ince filminin $(\alpha h\nu)^{1/2}$ - $h\nu$ grafiği



Şekil 5.19: %5 Eu:AlZnO ince filminin $(\alpha h\nu)^{1/2}$ - $h\nu$ grafiği



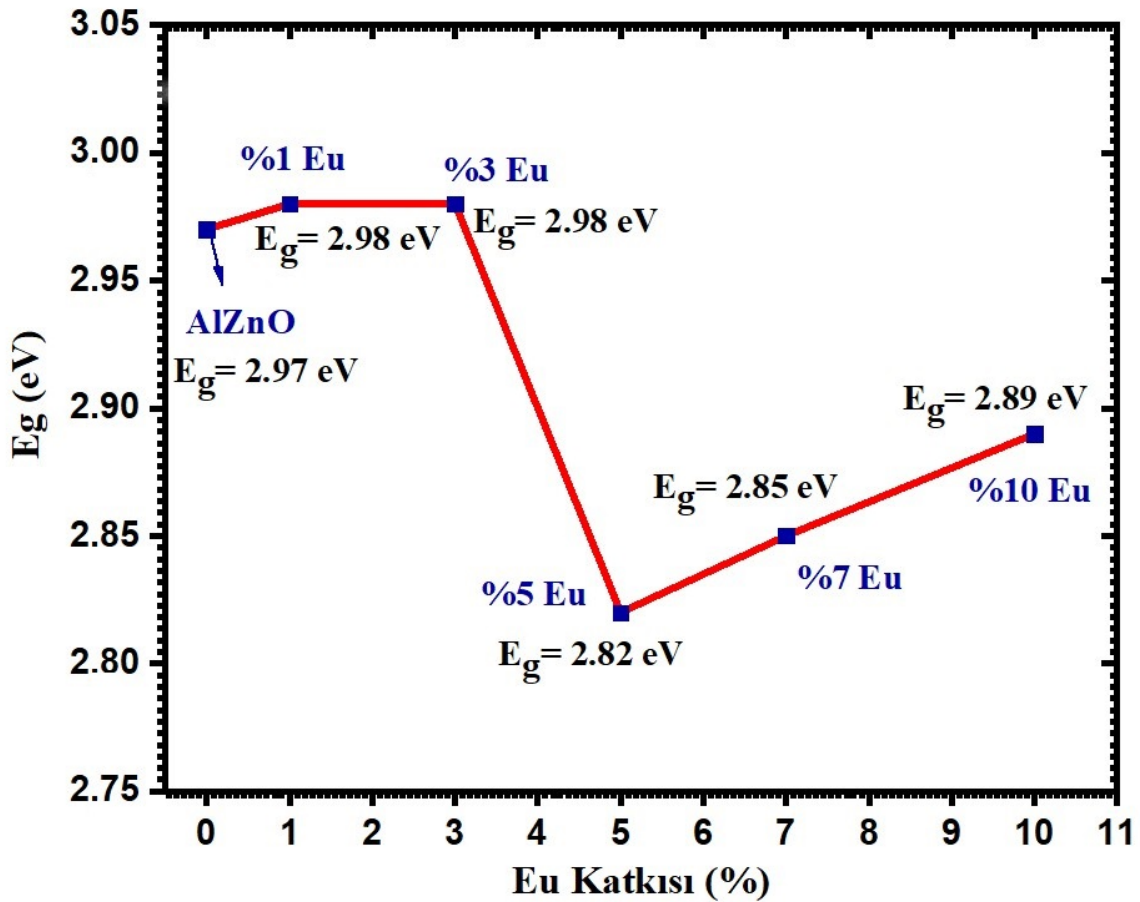
Şekil 5.20: %7 Eu:AlZnO ince filminin $(\alpha h\nu)^{1/2}$ - $h\nu$ grafiği



Şekil 5.21: %10 Eu:AlZnO ince filminin $(\alpha h\nu)^{1/2}$ - $h\nu$ grafiği

Şekil 5.22’de, Eu katkı oranına bağlı olarak AlZnO ince filmlerin optik bant aralığı değişimi verilmektedir. Düşük katkı oranlarında gözlenen sınırlı bant aralığı genişlemesi, katkılamanın serbest taşıyıcı yoğunluğunu artırarak absorpsiyon kenarının daha yüksek

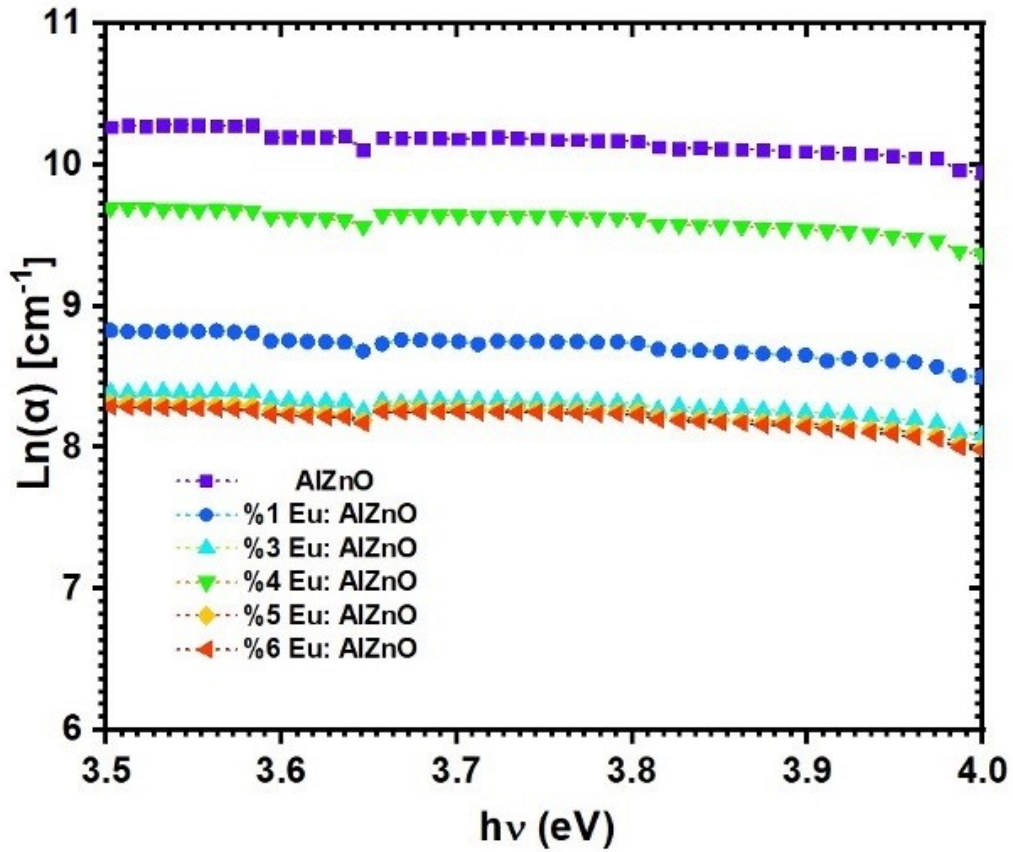
enerjilere kaymasına bağlanabilir. Buna karşın, katkı oranının %5'e ulaşmasıyla bant aralığında belirgin daralma eğilimi gözlenmiştir. Bu daralma, yüksek katkı oranlarında katkı atomlarının kristal kafes içerisinde kusur merkezleri ve yerel enerji seviyeleri oluşturarak bant yapısını bozmasıyla ilişkilendirilebilir (Zhao and Yang, 2014). Daha yüksek katkı oranlarında bant aralığındaki değişimin sınırlı kalması, kusur kaynaklı etkilerin baskın hale geldiğini ve optik geçişlerin bu durumlarca denetlendiğini göstermektedir. Literatürde de yüksek katkı seviyelerinde katkı kaynaklı kusur durumlarının bant aralığını daralttığı rapor edilmiştir (Trad, 2021).



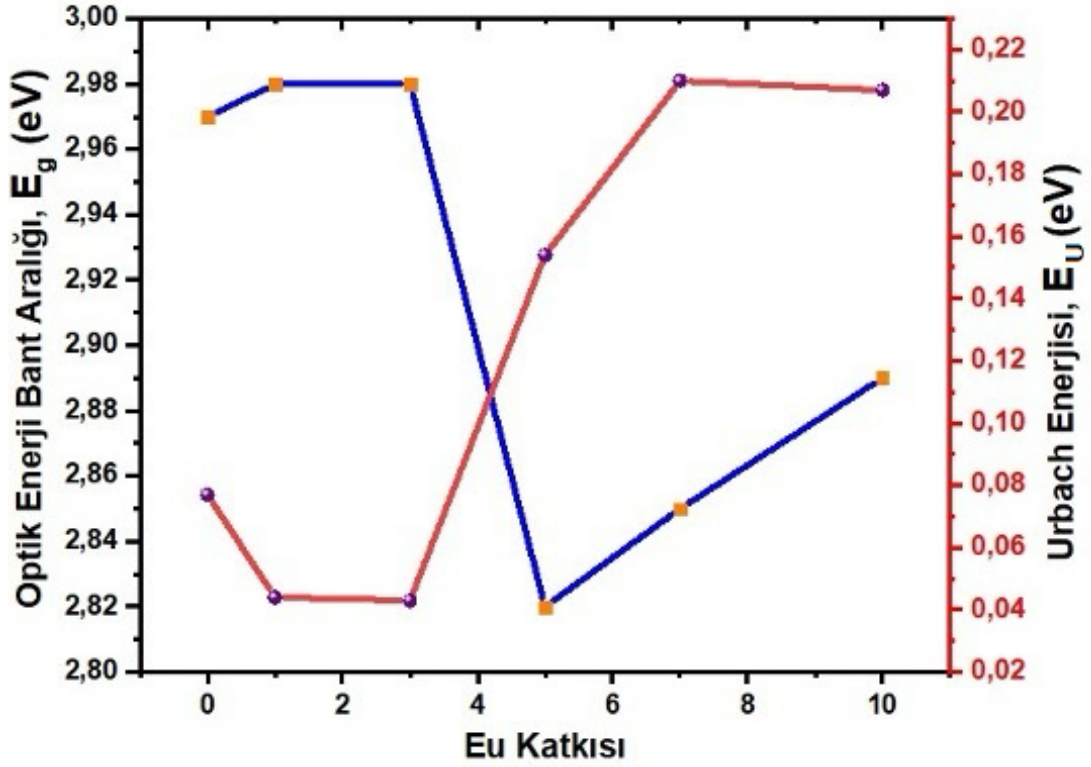
Şekil 5.22: Farklı Eu katkı oranına sahip AlZnO ince filmlerin E_g değişimi

Malzemelerin kristal yapısındaki düzensizlik derecesi ve bünyesindeki kusur yoğunluğunun analiz edilmesinde Urbach enerjisi (E_U) kullanılmaktadır. Yarıiletkenlerde iletim ve değerlik bantlarının kenarlarında, yapısal bozukluklar ve kusurlardan kaynaklanan ve yasak bant aralığına doğru uzanan lokalize enerji seviyeleri (Urbach kuyruğu) bulunur (Srikant ve Clarke, 1998). Keskenler vd. (2012), tarafından belirtildiği üzere, ZnO tabanlı ince filmlerde Urbach kuralı doğrudan kristal yapıdaki kusurların ve yapısal düzensizliklerin bir

fonksiyonu olarak çalışmaktadır. Bu kapsamda, AlZnO ince filmlerin Urbach enerjileri, $\ln(\alpha)$ karşı foton enerjisi ($h\nu$) grafiğinin (Şekil 5.23) doğrusal bölgesinin eğiminin tersi alınarak belirlenmiştir. Farklı Eu katkı oranlarına sahip filmlerin optik özellikleri, E_g ve E_U enerjisi değerleri Tablo 5.3'te özetlenmiştir. E_g ve E_U arasındaki ilişki ise Şekil 5.30'da verilmiştir.



Şekil 5.23: Eu:AlZnO ince filmlerin Urbach enerjisi (E_U)



Şekil 5.24: Farklı Eu katkı oranlarına sahip AlZnO ince filmlerin optik enerji bant aralığındaki (E_g) ve Urbach enerjisindeki (E_U) değişim

Tablo 5.2: Farklı Eu Katkı oranlarına sahip AlZnO ince filmlerin optik özellikleri

Filimler	E_g (eV)	E_U (eV)	Geçirgenlik (%)
AlZnO	2.97	0.077	96.16
%1 Eu:AlZnO	2.98	0.045	97.42
%3 Eu:AlZnO	2.98	0.043	97.16
%5 Eu:AlZnO	2.82	0.154	63.22
%7 Eu: AlZnO	2.85	0.210	35.29
%10 Eu:AlZnO	2.89	0.207	27.42

Analiz sonuçlarına göre, katkısız AlZnO filminde 0.077 eV olan E_U değeri, düşük Eu katkı oranlarında (%1 ve %3 için) sırasıyla 0.045 eV ve 0.043 eV değerlerine gerilemiştir. Urbach enerjisindeki bu azalma, düşük konsantrasyonlardaki Eu katkısının kristal örgüdeki lokal gerilmeleri hafifleterek yapısal düzeni artırdığını ve kusur yoğunluğunu azalttığını göstermektedir. Bu yapısal iyileşme, Tablo 5.3'te açıkça görüldüğü üzere %97'nin üzerine çıkan yüksek optik geçirgenlik ve hafifçe genişleyen optik bant aralığı ($E_g=2.98$ eV) bulgularıyla tam bir uyum içindedir. Ancak, Eu katkı oranının %5 seviyesine ulaşmasıyla

Urbach enerjisinde keskin bir artış (0.154 eV) gözlemlenmiş, %7 ve %10 katkılı filmlerde ise bu değer sırasıyla 0.210 eV ve 0.207 eV seviyelerinde en yüksek noktasına ulaşmıştır. Şenol vd., (2020), ZnO yapılarında katkılama kaynaklı Urbach enerjisindeki artışın, kristal içindeki bozulmaların ve kusur merkezlerinin doğrudan arttığına işaret ettiğini rapor etmiştir. E_U değerindeki bu ani ve belirgin yükseliş, yüksek katkı oranlarında kristal yapıdaki deformasyonların ve örgü bozulmalarının ciddi oranda arttığını doğrulamaktadır. Özellikle Eu^{3+} iyon yarıçapının Zn^{2+} iyon yarıçapından farklı olması, kafes içinde çözünürlük sınırına yaklaşıldıkça şiddetli gerilmelere yol açmaktadır (Şenol vd., 2020).

Şekil 5.24 incelendiğinde, ZnO tabanlı ince filmler için literatürde rapor edilen Urbach enerjisi ile optik bant aralığı arasındaki ters orantı açıkça görülmektedir. Benramache ve ark. (2013) katkılı ZnO filmlerde yapısal düzensizliğin artmasıyla potansiyel bariyerlerin yükseldiğini ve lokalize kusur enerji seviyelerinin bant aralığına doğru genişleyerek (Urbach kuyruğu) optik bant aralığının daralmasına neden olduğunu kanıtlamıştır (Benramache et al., 2013; Goktaş et al., 2013). Artan yapısal bozukluklar (artan E_U), absorpsiyon kenarında kuyruk oluşumunu güçlendirmiş ve optik bant aralığının (E_g) 2.82 eV seviyelerine kadar daralmasını tetiklemiştir. Artan bu kusur merkezleri ve yüzey saçılma mekanizmaları, filmlerin optik geçirgenliğinin yüksek katkı oranlarında %27 seviyelerine kadar düşmesini yapısal düzeyde desteklemektedir.

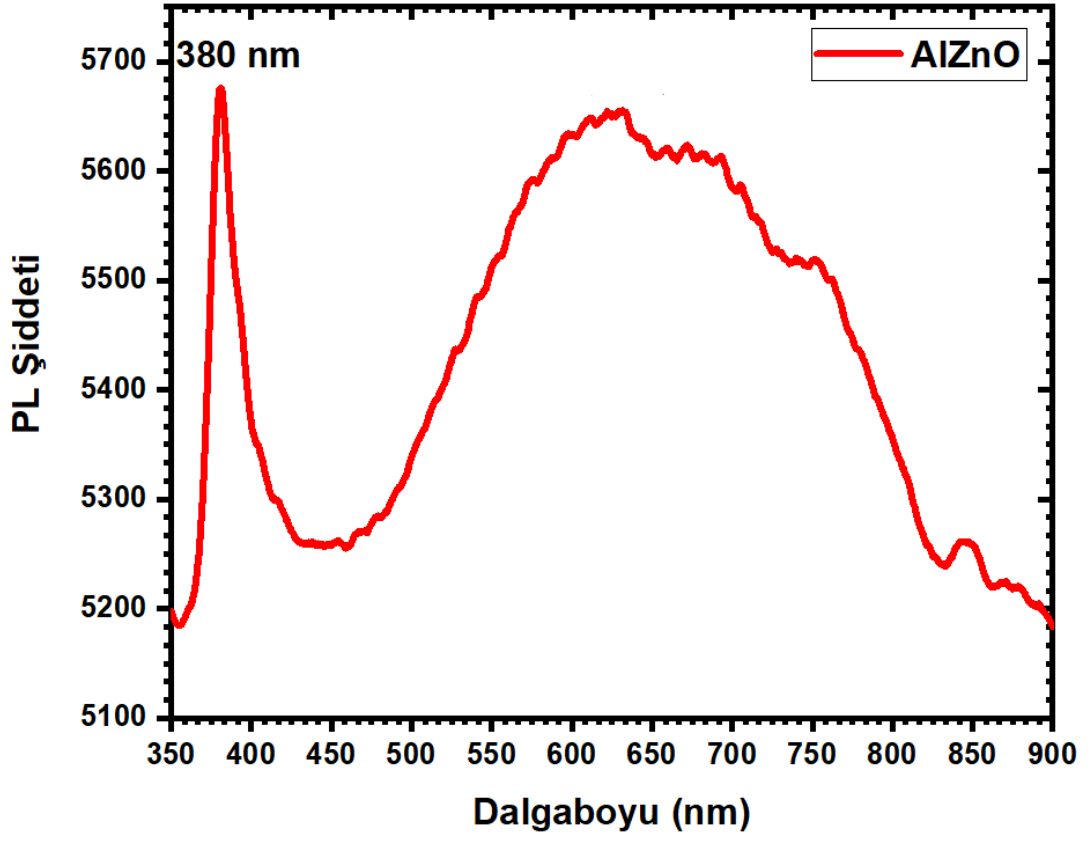
5.2.2 Fotolüminesans analizleri

Yarı iletken ince filmlerde kristal kalitesi, elektronik enerji seviyeleri, kusur yapıları (oksijen boşlukları, çinko ara konum atomları vb.) ve katkı elementlerinin kristal örgü içerisindeki davranışları hakkında önemli bilgiler sağlayan fotolüminesans (PL) analizi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, farklı Eu katkı oranlarına sahip Eu eş katkılı $AlZnO$ ince filmlerinin oda sıcaklığında 349 nm dalga boyuna sahip UV lazer ile uyarılması sonucunda elde edilen PL spektrumları Şekil 5.25–5.30’da sunulmuştur.

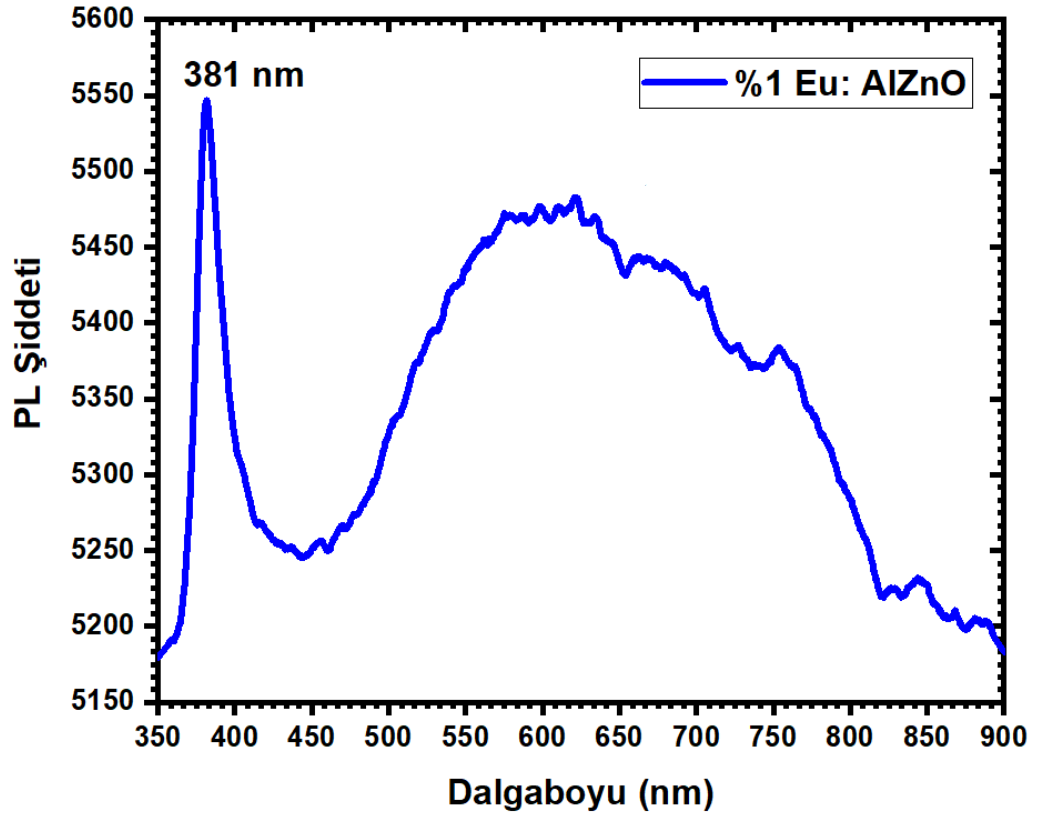
Şekil 5.25’te verilen $AlZnO$ ince filmin fotolüminesans spektrumu, iki ana emisyon bölgesinden oluşmaktadır (Cao et al., 2019; Samavati et al., 2017). İlk olarak, yaklaşık 370-380 nm dalga boyu civarında gözlemlenen keskin UV piki, malzemenin bant kenarı emisyonu (NBE) olarak tanımlanır ve temel olarak serbest eksiton rekombinasyonundan kaynaklanır ve filmin kristallğine bağlıdır (Bhujbal et al., 2019). Al katkılmasıyla birlikte, Burstein-Moss etkisi nedeniyle Fermi seviyesinin yükselmesine ve optik bant aralığının

genişlemesine bağlı olarak bu NBE pikinde daha kısa dalga boylarına doğru bir maviye kayma görülmesi tipik bir akademik bulgudur (Cao et al., 2019). İkinci ana bölge olan 450-700 nm aralığındaki geniş derin seviye emisyonu (DLE) ise film yapısındaki yapısal kusurları temsil eder (Samavati et al., 2017). Bu bölgede görülen yeşil ışıma genellikle oksijen boşlukları (V_o) ile ilişkilendirilirken, mavi ve menekşe ışımlar çinko ara yer atomları (Zn_i) veya çinko boşlukları (V_{Zn}) gibi noktasal kusurlardan kaynaklanmaktadır (Bhujbal et al., 2019). Spektrumdaki NBE pikinin şiddetinin DLE bölgesine oranı, filmin kristal kalitesinin bir göstergesi olarak literatürde yaygın şekilde kabul edilmektedir (Cao et al., 2019; Samavati et al., 2017). Yüksek bir oran, düşük kusur yoğunluğunu ve yüksek kristallenme derecesini işaret etmektedir (Bhujbal et al., 2019). Eu katkısının bu oran üzerindeki etkisi, katkı iyonlarının kristal örgü içerisindeki yerleşimi ile katkılama sonucunda oluşan kusur merkezlerinin türü ve yoğunluğuna bağlı olarak değişebilmektedir.

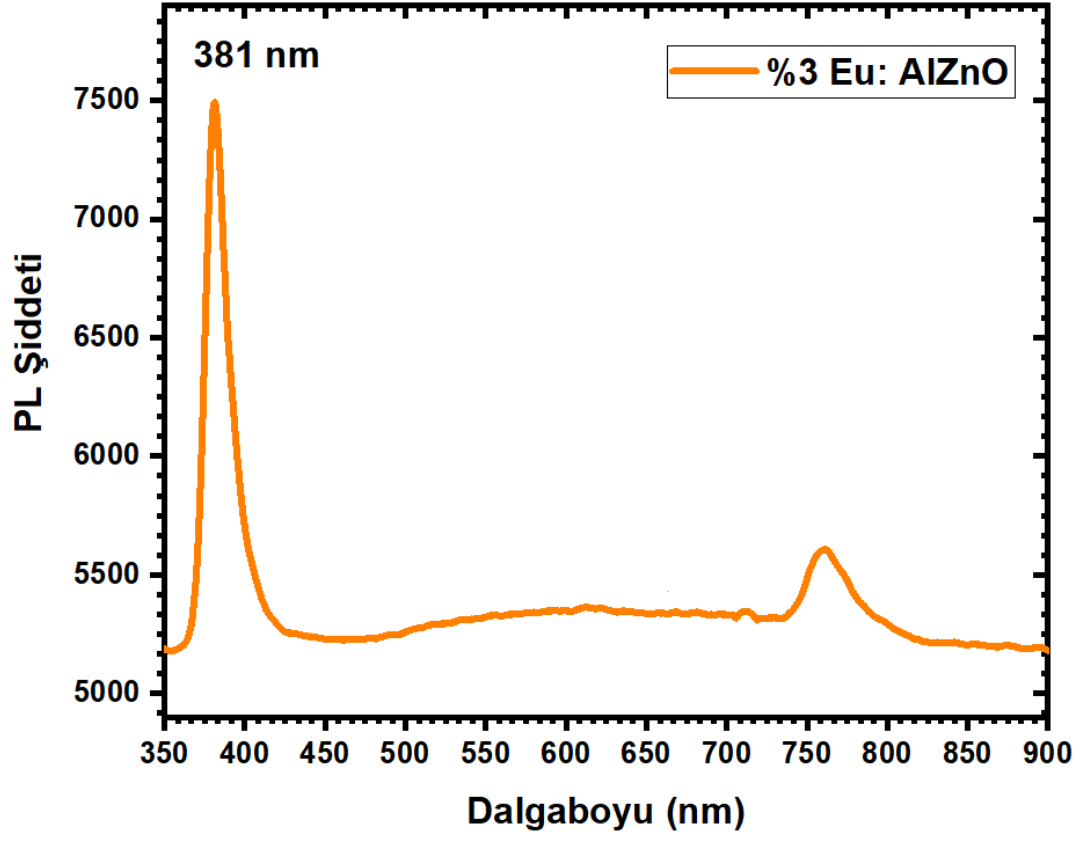
Şekil 5.26 ile Şekil 5.30 arasında verilen farklı Eu katkılı AlZnO ince filmlerin fotoluminesans spektrumları, katkı oranındaki artışın malzemenin optik kalitesi ve kusur yapısı üzerindeki etkisini sistematik olarak ortaya koymaktadır. Yaklaşık 380 nm civarında gözlemlenen morötesi bant kenarı emisyonu, temel olarak serbest eksitonların ışımsal rekombinasyonunu temsil etmektedir (Kim ve Leem, 2021). Bu süreçte 450-700 nm aralığındaki görünür bölge emisyonunun kademeli olarak bastırılması, katkı etkisinin yapıdaki oksijen boşlukları (V_o) ve çinko ara yer atomları (Zn_i) gibi derin seviye kusurlarını pasifize etme potansiyeline işaret etmektedir (Shen et al., 2012; Zhang, 2020). Ancak %7 (Şekil 5.29) ve %10 (Şekil 5.30) seviyelerindeki yüksek katkı oranlarında, NBE şiddeti mutlak değerde korunsa da spektral taban yoğunluğundaki yükselme ve dağılım genişlemesi, aşırı katkı miktarının örgü içi düzensizlikleri ve yeni kusur merkezlerini tetikleyebileceğini göstermektedir (Ko et al., 2000; Makino et al., 2004). Ayrıca, 750–800 nm dalga boyu aralığında gözlenen pikler malzemenin fiziksel veya optik özelliklerini yansıtmamaktadır. Bu sinyaller, güçlü UV emisyonunun monokromatör sisteminde oluşan ikinci mertebe kırınımı nedeniyle ortaya çıkan ölçüm sinyalleri olarak değerlendirilmiştir. Dolayısıyla bu sinyaller akademik değerlendirmede gerçek fotoluminesans geçişleri olarak kabul edilmemelidir (Lee et al., 2014; Stöger-Pollacch et al., 2023).



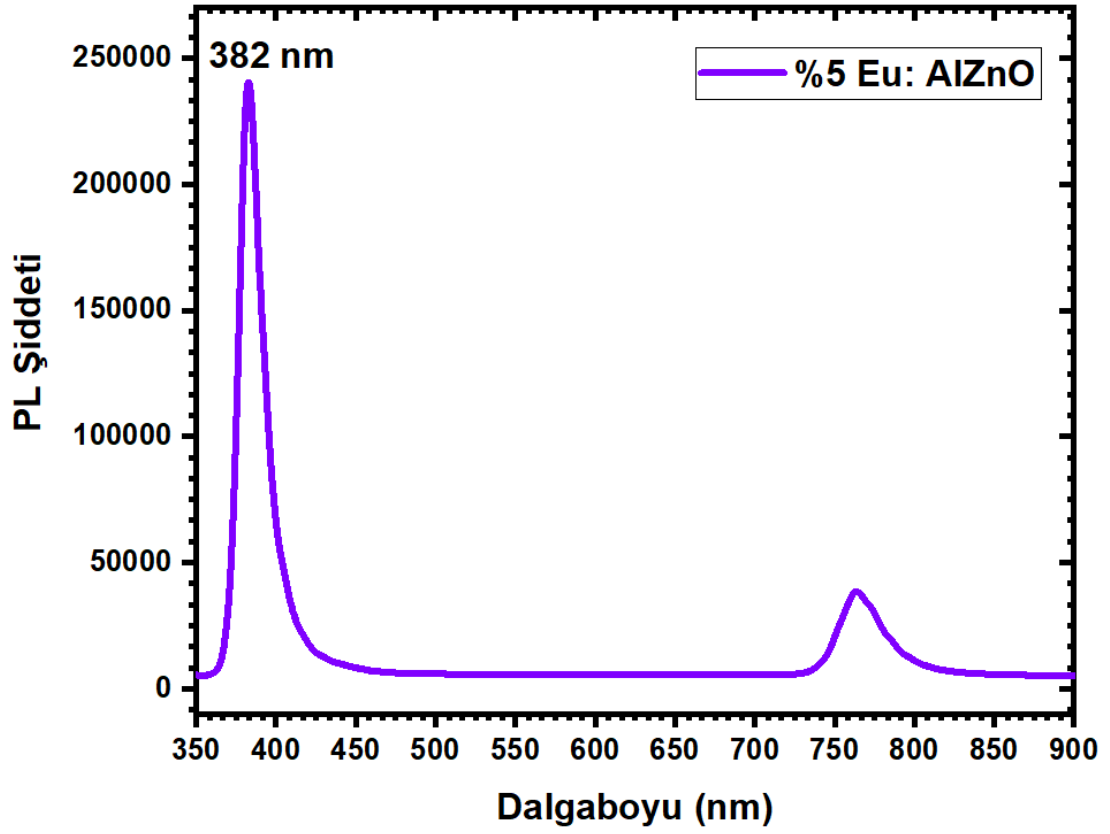
Şekil 5.25: AlZnO ince filmin PL spektrumu



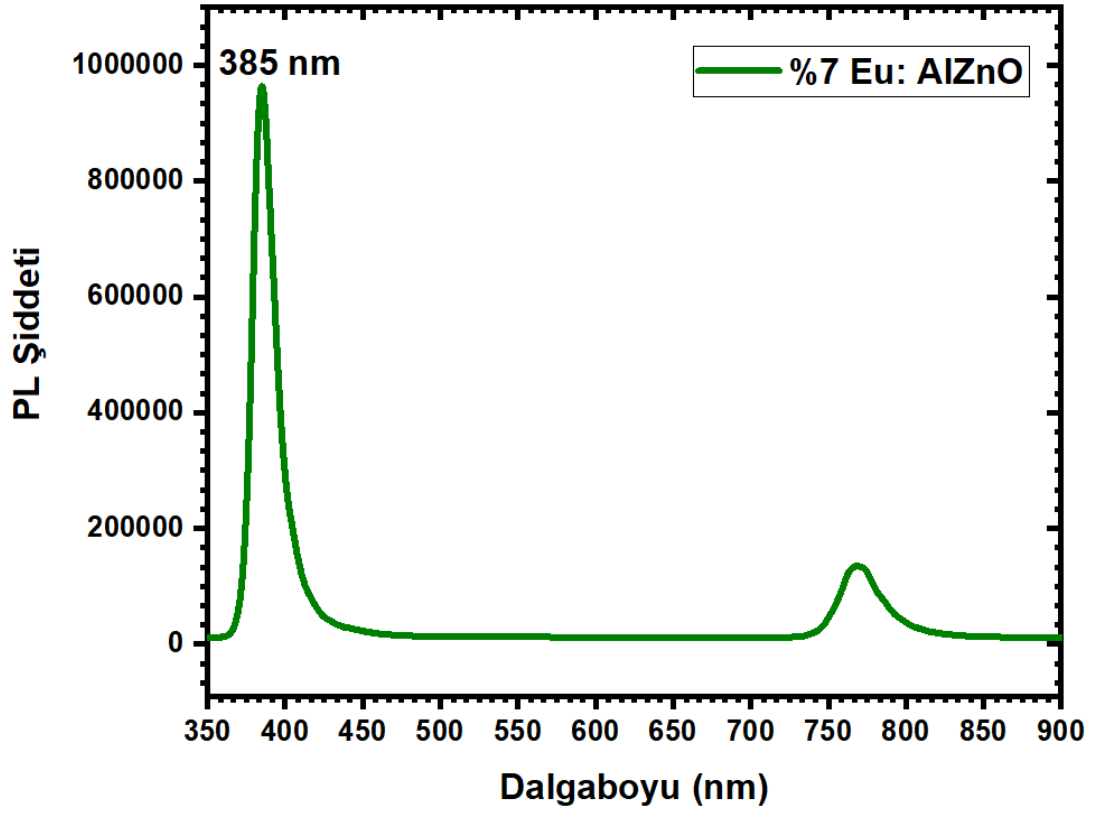
Şekil 5.26: %1 Eu:AlZnO ince filmin PL spektrumu



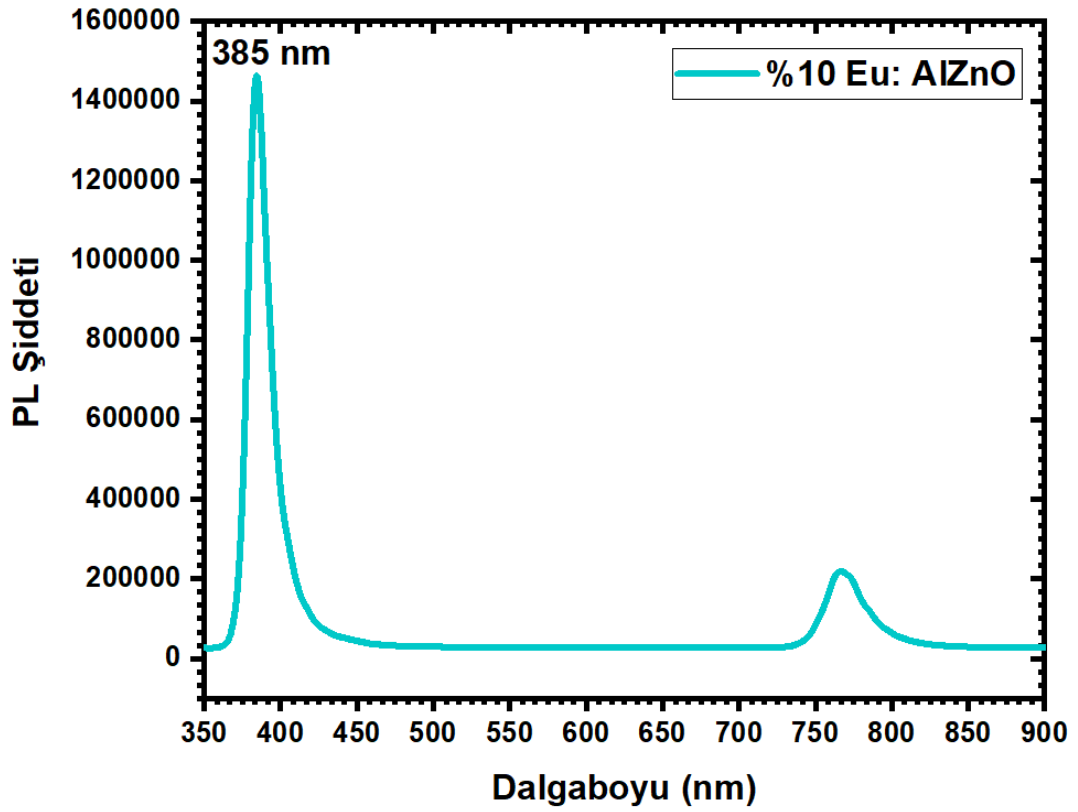
Şekil 5.27: %3 Eu:AlZnO ince filmin PL spektrumu



Şekil 5.28: %5 Eu:AlZnO ince filmin PL spektrumu

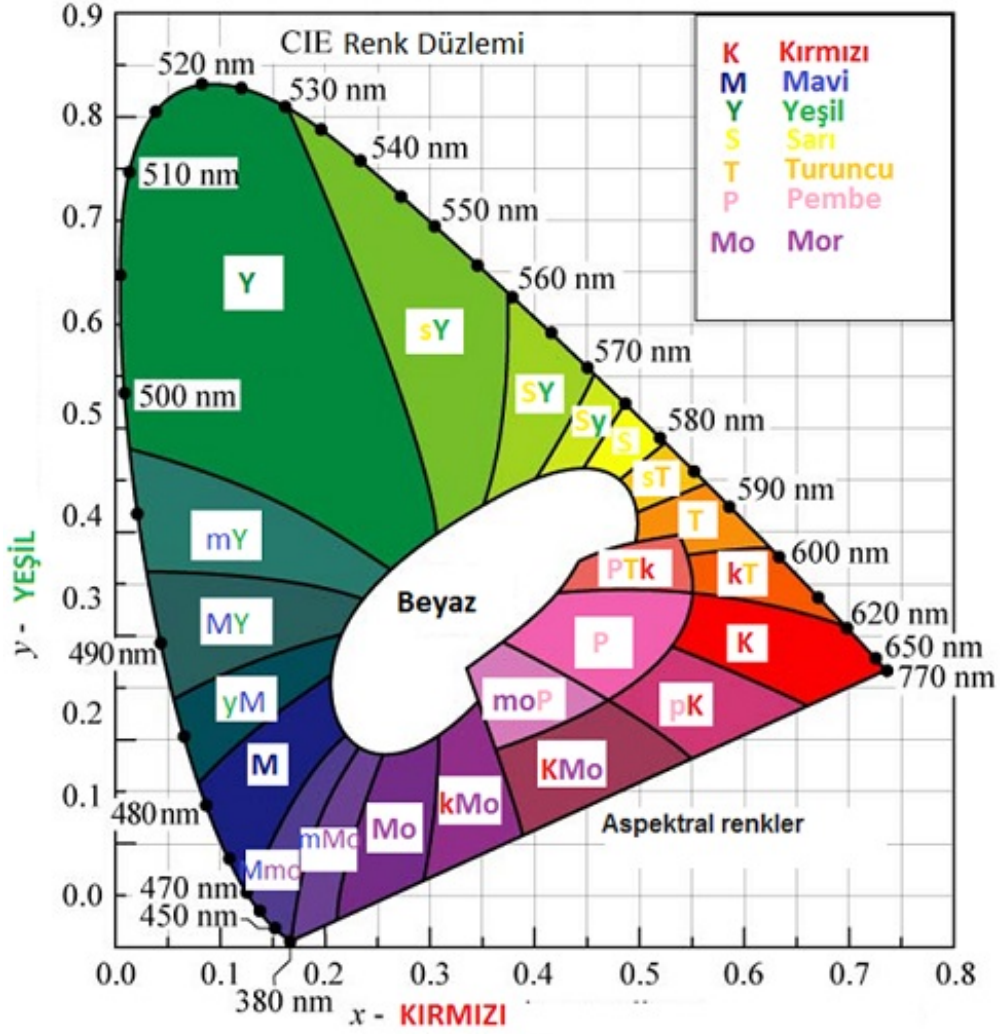


Şekil 5.29: %7 Eu:AlZnO ince filmin PL spektrumu



Şekil 5.30: %10 Eu:AlZnO ince filmin PL spektrumu

Filmlerin sergilediği ışıma rengi, spektrumdaki UV ve görünür bölge emisyonlarının şiddet oranına ve bu bölgelerdeki baskın tepe noktalarına bağlı olarak değişmektedir (Şekil 5.31). Saf veya Al katkılı ZnO yapılarında ışıma karakteri, yaklaşık 419 nm'deki menekşe (Zn_i), 480 nm civarındaki mavi (V_{Zn}) ve 535 nm dolaylarındaki yeşil (V_o) emisyonlarının birleşiminden oluşmaktadır (Bhujbal et al., 2019; Cao et al., 2019). Bu geniş derin seviye emisyonu bandı, filmlere genellikle sarımsı-yeşil veya mavi-mor bir görünür ışıma kazandırır (Samavati et al., 2017; Viter et al., 2016). Katkısız AlZnO filminde maviye yakın bir mavi-mor emisyonun sebebi, sol-jel yöntemiyle üretilen filmlerde yoğun olarak bulunan çinko yer arası atomları (Zn_i) ve çinko boşluklarıdır (V_{Zn}). AlZnO filmine Eu katkılındığında, bu mavi-mor emisyon merkezleri o kadar yoğundur ki, spektrumun görünür bölgesini tamamen baskılar ve Eu iyonlarından gelebilecek zayıf kırmızı sinyaller, bu mavi kusur emisyonunun altında kalır ve görünmez (Shen et al., 2022; Sahu et al., 2025). Analiz edilen Eu katkılı AlZnO filmlerde ise, Eu katkısı arttıkça (özellikle %5 seviyesine kadar) bu kusur kaynaklı görünür bölge ışımlarının belirgin şekilde bastırıldığı görülmektedir. Bu durum, filmin renginin kusur odaklı mavi tonlarından uzaklaşarak, UV/mavi-mor sınırındaki bant kenarı emisyonunun baskın olduğu daha saf ve soğuk bir ton karakterine kaydığını göstermektedir. Dolayısıyla, Eu katkısı malzemenin optik saflığını artırarak ışıma rengini kusur renklerinden arındırmakta ve emisyonu spektrumun yüksek enerjili (UV/mavi-mor) ucuna doğru yoğunlaştırmaktadır.



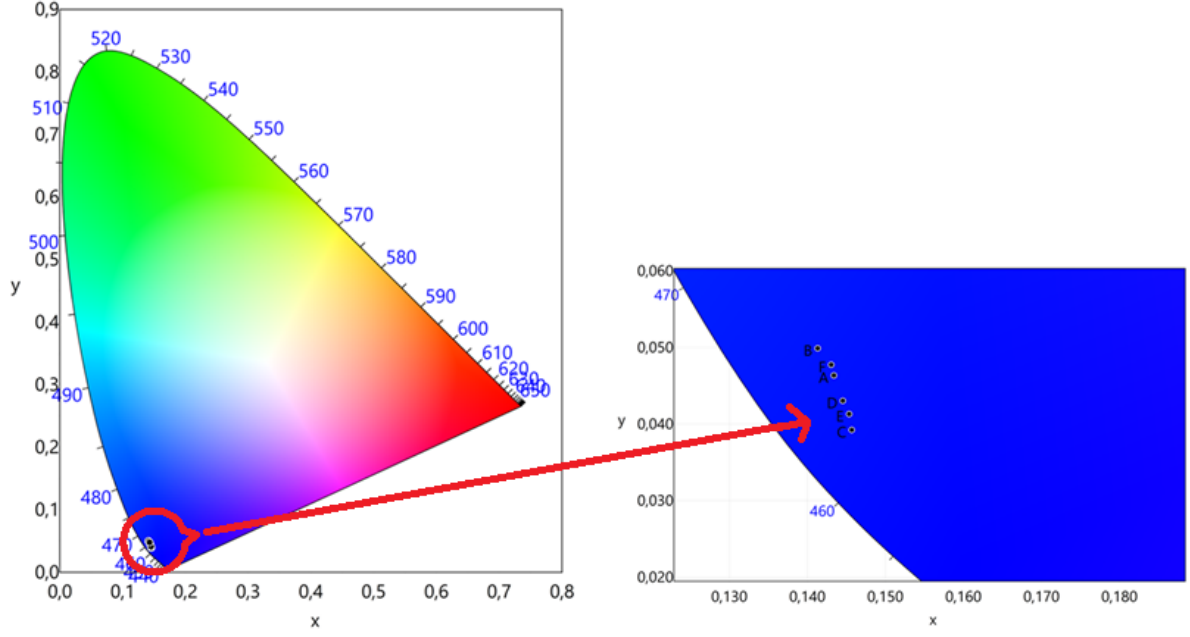
Şekil 5.31: CIE renk düzeni

Üretilen katkısız AlZnO ve eş katkılı Eu:AlZnO ince filmlerin 349 nm lazer uyarımı ile yayılan renkleri CIE (Commission International de l'Eclairage) 1931 kromatiklik diyagramı kullanılarak incelenmiştir (Jayasimhadri et al., 2009). Bu diyagram ile fotoluminesans spektrumlarından elde edilen koordinatlar, filmlerin uyarım altında dışarıya tam olarak hangi renkte ışık verdiğini (renk kalitesini ve saflığını) matematiksel olarak ifade etmektedir. Şekil 5.19'da farklı Eu katkı oranlarında üretilen AlZnO filmlerin CIE renk koordinatları (x, y), emisyon spektrumu verileri hesaplanmıştır (Şekil 5.32). CIE renk koordinatları (x, y), AlZnO filmi için (0.143402; 0.046358), %1 Eu katkılı AlZnO filmi için (0.141336; 0.049898), %3 Eu katkılı AlZnO filmi için (0.145702; 0.039236), %5 Eu katkılı AlZnO filmi için (0.144548; 0.043050), %7 Eu katkılı AlZnO filmi için (0.145362; 0.041318) ve %10 Eu katkılı AlZnO filmi için ise (0.143062; 0.047762) olarak bulunmuştur (Tablo 5.2). Bu renk koordinatları, Eu katkısının filmlerin algılanan rengi üzerinde doğrudan bir etkisi

olduğunu ve Eu katkı oranı arttıkça renk noktasının CIE diyagramı üzerinde nasıl bir değişim gösterdiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Elde edilen tüm koordinat verileri incelendiğinde, filmlerin CIE renk uzayının derin mavi/mor bölgesinde yer aldığı görülmektedir. Katkısız AlZnO filminin koordinatları ($x = 0.143402$ ve $y = 0.046358$ olarak belirlenmiş olup, bu durum ZnO yapısındaki içsel kusurlardan (özellikle çinko yer arası atomları, Zni kaynaklanan maviye yakın bölge ışımlarının varlığı ile uyumludur. Yapıya %3 oranında Eu katkılı olduğunda, y koordinatının serinin en düşük değeri olan 0.039236'ye gerilediği ve renk emisyonunun diğer filmlere kıyasla mora yakın mavi/mor bölgesine kaydığı ve morumsu mavi karakter sergilediği görülmektedir. Ancak, Eu katkı oranının %5 ve üzerine çıkarılmasıyla birlikte y değerlerinde yeniden bir yükselme eğilimi (maksimum %10 Eu için $y = 0.047762$) gözlenmiştir. %5 Eu:AlZnO filmlerde %3 Eu katkılı filme göre mor karakter bir miktar azalmış, emisyon yeniden mavi-mor bölgeye yaklaşmıştır. %7 Eu:AlZnO filmlerde düşük y değeri nedeniyle morumsu mavi karakter korunmuş, ancak %3 katkılı filme göre mor etkisi daha zayıf kalmıştır. %10 Eu:AlZnO filmlerde y değerindeki yükselme ile birlikte emisyon daha belirgin mavi karakter göstermiş ve katkısız filme yakın davranış sergilemiştir. Bu durum, yüksek katkı oranlarında meydana gelen bu değişim, aşırı katkılamaya bağlı olarak gelişen örgü deformasyonları, yeni kusur merkezlerinin oluşumu ve nadir toprak elementlerinde sıklıkla karşılaşılan konsantrasyon sönümlenmesi mekanizmaları ile açıklanabilir. Özellikle, artan Eu konsantrasyonu ile renk koordinatlarının diyagramın mavi/mor bölgesi içinde kayması, Eu iyonlarının baskın UV emisyonunu güçlendirerek veya görünür bölgedeki derin seviye emisyonlarını pasifleştirerek filmin algılanan rengini değiştirdiğini işaret etmektedir (Singh et al., 2020).

%5 Eu katkılı AlZnO ince filminin CIE koordinatları, emisyonun mavi-mor bölgede konumlandığını göstermektedir. %3 katkılı filme kıyasla mor karakterin bir miktar azalması ve daha dengeli bir mavi/mor emisyon elde edilmesi, bu filmin özellikle mavi/mor ışık yayan diyotlar (LED) ve optoelektronik düz panel ekran teknolojileri için potansiyel bir konakçı matris adayı olduğunu göstermektedir. XRD analizlerinde gözlenen kristal yapıdaki iyileşme ve tercihli yönelimin korunması ile SEM görüntülerinde belirlenen daha homojen yüzey morfolojisi, Eu iyonlarının yapı içerisine daha dengeli şekilde yerleştiğini göstermektedir. Bu durumun kusur merkezlerinin kontrol altına alınmasına katkı sağlayarak daha dengeli bir mavi-mor emisyon oluşumunu desteklediği düşünülmektedir.



Şekil 5.32: Eu:AlZnO ince filmlerin CIE diyagramı

Tablo 5.3: Eu:AlZnO ince filmlerin renk kordinatları

Filmler	x	y	
AlZnO	0.143402	0.046358	Katkısız AlZnO filminin CIE koordinatları, emisyonun maviye yakın mavi-mor bölgede yer aldığını göstermektedir.
%1 Eu:AlZnO	0.141336	0.049898	y değerindeki artış nedeniyle emisyon, katkısız filme göre daha belirgin mavi karakter göstermektedir.
%3 Eu:AlZnO	0.145702	0.039236	En düşük y değerine sahip olan bu film, diğer numunelere kıyasla mor bölgeye daha yakın morumsu mavi emisyon sergilemiştir.
%5 Eu:AlZnO	0.144548	0.043050	%3 Eu katkılı filme göre mor karakter bir miktar azalmış, emisyon yeniden mavi-mor bölgeye yaklaşmıştır.
%7 Eu:AlZnO	0.145362	0.041318	Düşük y değeri nedeniyle morumsu mavi karakter korunmuş, ancak %3 katkılı filme göre mor etkisi daha zayıf kalmıştır.
%10 Eu:AlZnO	0.143062	0.047762	y değerindeki yükselme ile birlikte emisyon daha belirgin mavi karakter göstermiş ve katkısız filme yakın davranış sergilemiştir.

Literatürde Eu^{3+} iyonlarının karakteristik olarak ~614 civarında kırmızı emisyon sergilediği bilinmesine rağmen, bu çalışmada sentezlenen tüm filmlerin CIE renk koordinatları mavi-mor bölgede yer almıştır. Bu durum, iki temel mekanizma ile açıklanabilir: İlk olarak, 349 nm UV uyarımı altında ZnO konakçı matrisinde yer alan çinko yer arası atomları (Zn_i) ve çinko boşlukları (V_{Zn}) gibi içsel kusur seviyelerinin (DLE) son derece baskın bir mavi emisyon üretmesidir. İkinci olarak, AlZnO ana matrisinden Eu^{3+} iyonlarının iç f-f enerji seviyelerine gerçekleşmesi beklenen radyasyonsuz enerji transferi verimliliğinin, matris içi kusur rekabeti nedeniyle sınırlı kalmasıdır (Mangalam and pita, 2018; Ahmed et al., 2014). Sonuç olarak, Eu katkısı matrisin kendi kusur merkezlerini yeniden organize ederek emisyonu modüle etmiş, ancak kırmızı emisyon merkezlerini baskın hale getirecek eşiğe ulaşamamıştır.

6. SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında, modern malzeme bilimi ve optoelektronik teknolojilerinde önemli bir yere sahip şeffaf iletken oksit (TCO) malzemelerine yönelik yenilikçi bir yaklaşım ortaya konulmuş; Eu ve Al eş katkılı ZnO ince filmler başarıyla sentezlenmiş ve yapısal, morfolojik ile optik özellikleri kapsamlı olarak karakterize edilmiştir. Çalışmanın temelini oluşturan Eu ve Al eş katkılı ZnO ince filmler, düşük maliyet, yüksek homojenlik ve endüstriyel ölçekte üretilebilirlik gibi önemli avantajlar sunan sol-jel daldırma kaplama yöntemi kullanılarak cam alttabakalar üzerinde üretilmiştir. Yapılan analizler, Eu^{3+} iyonlarının Zn^{2+} iyonlarının yerine geçmesi sonucunda iyonik yarıçap farklılığından kaynaklanan örgü gerilmelerinin oluştuğunu ve buna bağlı olarak kristal kafes parametrelerinde sistematik değişimlerin meydana geldiğini göstermiştir. Elde edilen deneysel bulgular birlikte değerlendirildiğinde, Eu ve Al iyonlarının ZnO kristal örgüsü içerisindeki sinerjik etkileşiminin malzemenin kristalografik, morfolojik ve optik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği ortaya konulmuştur. Bu sonuçlar, Eu ve Al eş katkılı ZnO ince filmlerin yeni nesil optoelektronik ve fotonik uygulamalarda kullanılabilecek potansiyele sahip fonksiyonel TCO malzemeleri arasında yer alabileceğini göstermektedir.

Yapısal karakterizasyonu kapsamında gerçekleştirilen XRD analizleri, sentezlenen tüm Eu eş katkılı AlZnO ince filmlerin ZnO'nun karakteristik hekzagonal wurtzit kristal yapısını koruduğunu ve belirgin bir ikincil faz oluşumu gözlenmeksizin kristalleştiğini göstermiştir. XRD desenlerinde yaklaşık $2\theta = 34.5^\circ\text{--}34.8^\circ$ aralığında gözlenen ve (002) düzlemine karşılık gelen baskın kırınım piki, filmlerin c-ekseni doğrultusunda belirgin bir tercihli yönelime sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, Eu^{3+} iyonlarının ZnO kristal örgüsüne önemli ölçüde dâhil olduğunu ve katkılama işleminin kristal yapıyı koruyarak gerçekleştiğini düşündürmektedir. Scherrer denklemi kullanılarak hesaplanan tanecik boyutunun, Eu katkı oranının %5'e kadar artırılmasıyla 4.25 nm'den 7.49 nm'ye yükseldiği belirlenmiştir. Bu artış, uygun katkı seviyelerinde kristallenmenin iyileştiğini ve kristal kusurlarının azaldığını göstermektedir. Ancak Eu katkı oranının %7 ve %10 seviyelerine çıkarılmasıyla kristalit boyutunun 7.16 nm'ye düştüğü gözlenmiştir. Bu durum, Zn^{2+} iyonuna (0.074 nm) göre daha büyük iyonik yarıçapa sahip Eu^{3+} iyonlarının (0.095 nm) yüksek katkı oranlarında kristal örgüde yerel gerilmeler oluşturmaları, örgü deformasyonunu artırması ve buna bağlı olarak kristal büyümesini sınırlandırması ile açıklanabilir. Ayrıca yüksek katkı

oranlarında meydana gelen örgü bozulmaları ve kusur yoğunluğundaki artışın da kristal kalitesinin azalmasına katkı sağladığı değerlendirilmektedir.

Filmlerin morfolojik ve boyutsal özellikleri, Eu katkı oranının yüzey yapısı ve film oluşumu üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. SEM analizleri, %5 Eu katkılı filmin daha kompakt, homojen ve gözenek yoğunluğu düşük bir yüzey morfolojisine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu katkı oranında tane sınırlarının daha belirgin hâle gelmesi ve yüzey sürekliliğinin artması, filmin yapısal kalitesinin iyileştiğine işaret etmektedir. Bu özellikler, optik ve elektriksel uygulamalar açısından daha uygun bir yüzey morfolojisinin elde edildiğini göstermektedir. Film kalınlığı ölçümleri, Eu katkısının sol-jel çözeltisinin kimyasal yapısı ve kaplama davranışı üzerinde önemli bir etkisinin bulunduğunu ortaya koymuştur. Katkisız AlZnO filmde 1.71 μm olarak belirlenen kalınlık, %1 Eu katkısıyla 6.98 μm 'ye yükselmiştir. Bu artışın, düşük Eu katkı oranlarında çözelti içerisindeki yoğunlaşma süreçlerinin ve polimerik ağ oluşumunun desteklenmesiyle ilişkili olduğu düşünülmektedir. Eu katkı oranının %10'a kadar artırılmasıyla film kalınlığının yeniden 1.69 μm seviyesine düşmesi ise, yüksek katkı oranlarında Eu iyonlarının oluşturduğu sterik engelleme etkisi ve buna bağlı olarak Zn–O–Zn ağ yapısının gelişiminin sınırlandırılmasıyla açıklanabilir. Bunun sonucunda çözelti viskozitesinin azalması ve daldırma kaplama sırasında altlık üzerinde tutunan malzeme miktarının düşmesi, film kalınlığındaki azalmaya katkı sağlamış olabilir.

Optik karakterizasyon sonuçları, Eu katkı oranının sentezlenen AlZnO ince filmlerin optik özellikleri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Özellikle %1 ve %3 Eu katkılı filmlerde yaklaşık %97 optik geçirgenlik değerine ulaşılması, bu filmlerin görünür bölgede yüksek şeffaflık sergilediğini ve şeffaf iletken oksit uygulamaları açısından önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymuştur. Buna karşılık, Eu katkı oranının artırılmasıyla birlikte kristal örgüde oluşan gerilmeler, kusur yoğunluğundaki artış ve tane yapısındaki değişimlere bağlı olarak ışık saçılmasının artması sonucunda, %10 Eu katkılı filmde optik geçirgenlik %27.42 seviyesine kadar düşmüştür. Tauc yöntemi kullanılarak belirlenen optik bant aralığı (E_g) değerleri, katkisız filmde 2.97 eV olarak hesaplanırken, düşük Eu katkı seviyelerinde 2.98 eV'a kadar hafif bir artış göstermiş, katkı oranının %5'e ulaşmasıyla birlikte 2.82 eV'a kadar azalmıştır. Bu değişimin, düşük katkı seviyelerinde taşıyıcı yoğunluğuna bağlı Burstein–Moss etkisi ile yüksek katkı seviyelerinde katkı iyonlarının oluşturduğu kusur seviyeleri ve yerel enerji durumlarının birlikte etkisinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Eu katkı oranının %7 ve %10 seviyelerine

ıkarılmasıyla optik bant aralığının sırasıyla 2.85 eV ve 2.89 eV değerlerinde sınırlı bir artış gösterdiği belirlenmiştir.

Kristal düzensizliğinin bir göstergesi olan Urbach enerjisi (E_U) sonuçları da optik bant aralığı analizlerini desteklemiştir. Urbach enerjisi, katkısız filmde 0.077 eV iken %3 Eu katkılı filmde 0.043 eV'a düşmüş, bu durum düşük katkı oranlarında kristal düzeninin iyileştiğine işaret etmiştir. Buna karşılık, yüksek Eu katkı oranlarında yapısal düzensizliklerin ve lokalize enerji durumlarının artmasına bağlı olarak Urbach enerjisi yükselmiş ve %7 Eu katkılı filmde 0.210 eV ile en yüksek değerine ulaşmıştır.

Fotolüminesans sonuçları, 349 nm dalga boylu lazer uyarımı altında sentezlenen Eu eş katkılı AlZnO ince filmlerin hem UV hem de görünür bölgede optik olarak aktif olduğunu göstermiştir. Yaklaşık 380 nm'de gözlenen yakın bant kenarı (NBE) emisyonu, filmlerin yüksek kristal kalitesine işaret ederken, 450–700 nm aralığında gözlenen geniş derin seviye emisyonu (DLE) bantları ise oksijen boşlukları, çinko ara konum atomları ve diğer yapısal kusurlardan kaynaklanan ışınımsal geçişlerle ilişkilendirilmiştir. Eu katkısının artmasıyla birlikte görünür bölgedeki kusur kaynaklı emisyonların azaldığı ve UV/DLE emisyon şiddeti oranında değişim meydana geldiği belirlenmiştir. Bu durum, Eu katkısının kusur merkezlerinin oluşumu ve ışınımsal yeniden birleşme süreçleri üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. CIE renk koordinatları, tüm filmlerin mavi-mor bölgede emisyon sergilediğini ortaya koymuştur. %3 Eu katkılı film en düşük y koordinat değerine sahip olarak en belirgin morumsu-mavi emisyon karakterini gösterirken, %5 Eu katkılı film daha dengeli bir mavi-mor emisyon sergilemiştir. Bu sonuç, %5 Eu katkı oranının renk kararlılığı ve emisyon özellikleri açısından optoelektronik ve fotonik uygulamalar için daha uygun bir katkı seviyesi olabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasından elde edilen bulgular, sol-jel daldırma kaplama yöntemiyle üretilen Eu ve Al eş katkılı ZnO ince filmlerin yapısal, morfolojik ve optik zelliklerinin Eu katkı oranı değiştirilerek etkin bir şekilde kontrol edilebildiğini ortaya koymuştur. Tüm karakterizasyon sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, %5 Eu katkı oranının kristal kalite, yapısal bütünlük ve yüzey morfolojisi bakımından en uygun performansı sağladığı belirlenmiştir. Buna karşılık, yüksek optik geçirgenliğin ön planda olduğu uygulamalar için %1–3 Eu katkı oranının, fotolüminesans performansının önemli olduğu uygulamalar için ise %5 Eu ve üzerindeki katkı oranlarının daha uygun sonuçlar

sunduğu görölmüştür. Elde edilen bulgular, Eu ve Al eş katkılı ZnO ince filmlerin ayarlanabilir optik bant aralığı, yüksek optik geçirgenlik ve iyileştirilmiş kristal yapıları sayesinde UV fotodedektörler, fotovoltaiik güneş pilleri, şeffaf iletken elektrotlar ve akıllı pencere teknolojileri gibi optoelektronik uygulamalar için umut vadeden bir malzeme sistemi olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu çalışma, Eu katkısının ZnO kristal yapısı üzerindeki etkilerinin anlaşılmasına katkı sağlayarak, Eu ve Al eş katkılı ZnO tabanlı ince filmlerin geliştirilmesine yönelik gelecekte yapılacak araştırmalar için deneysel bir temel oluşturmuştur.

7. KAYNAKLAR

- Adak, S., Cangi, H., and Yılmaz, A. S.** (2019). Mathematical modeling and simulation of the photovoltaic system's output power depends on temperature and irradiance. *International Journal of Engineering Research and Development*, 11(1), 316-327.
- Ahmadov, G. M., Ibrahimov, H. B., Jafarov, M. A.** (2022). Influence of external factors on the electrical conductivity of $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.5}\text{Se}_{0.5}$. *Chalcogenide Letters*, 19(1), 55.
- Ahmed, S. M., Szymanski, P., El-Nadi, L. M., and El-Sayed, M. A.** (2014). Energy-transfer efficiency in Eu-doped ZnO thin films: the effects of oxidative annealing on the dynamics and the intermediate defect states. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6(3), 1765-1772.
- Aktaş, S., and Ünal, F.** (2022). Metal oksit ve organik bazlı çoklu heteroeklemin yapısal ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 508–520.
- Alfaro-Cruz, M. R., Luévano-Hipólito, E., and Torres-Martínez, L. M.** (2023). Desarrollo y repercusión de las películas delgadas en la actualidad, *Revista Ciencia UANL*, 26(121), 56.
- Ali, S. M., Hussain, S. T., Bakar, S. A., Muhammad, J., and Rehman, N. U.** (2013). Effect of doping on the structural and optical properties of SnO_2 thin films fabricated by aerosol-assisted chemical vapor deposition. In *Journal of Physics: Conference Series*, 439(1), 012013.
- Althumairi, N. A., Fouzri, A., Kayed, T. S., Mekki, A., Lusson, A., Sallet, V., And Majid, A.** (2022). Microstructural, optical, and electrical properties of Eu, Tb co-doped ZnO micropods elaborated by chemical bath deposition on a p-Si substrate. *The European Physical Journal Plus*, 137(9), 1097.
- Altinkaynak, H.** (2011). Ortotik plastiklerin genel özellikleri, oksidatif ve mekanik yıpranmaları, *Ankara Sağlık Hizmetleri Dergisi*, 10(2), 15-21.
- Amato, A.** (2019). Low thermal noise coating for new generation gravitational-wave detectors. Doctoral Thesis, Université de Lyon, Lyon.
- Ammaih, Y., Lfakir, A., Hartiti, B., Ridah, A., Thevenin, P., and Siadat, M.** (2014). Structural, optical and electrical properties of ZnO: Al thin films for optoelectronic applications. *Optical and Quantum Electronics*, 46, 229-234.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- An, S., Joshi, B., Yarin, A. L., Swihart, M. T., and Yoon, S. S. (2020). Supersonic cold spraying for energy and environmental applications: one-step scalable coating technology for advanced micro-and nanotextured materials, *Advanced Materials*, 32(2), 1905028.
- Arun, A., Sreenivasan, N., Patil, J. H., Kusanur, R., Ramachandraiah, H., and Ramakrishna, M. V. (2025). Thin films for next generation technologies: a comprehensive review of fundamentals, growth, deposition strategies, applications, and emerging frontiers. *Processes*, 13(12), 3846–3846.
- Ashcroft, N. W. and Mermin, N. D. (1976). *Solid State Physics*. Saunders College Publishing, New York.
- Ashrafi, A., and Jagadish, C. (2007). Review of zincblende ZnO: Stability of metastable ZnO phases, *Journal of Applied Physics*, 102(7).
- Aşma, A., Yaman, E., and Temel, S. (2021). Biyokütleden üretilen karbon altlık üzerinde zno nanoparçacıkların biriktirilmesi ve karakterizasyonu, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(3), 431-439.
- Atan, E. (2022). Eş kanallı açısız presleme (EKAP) ile deforme edilen ETP bakırın mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 24(72), 875-885.
- Ateş, H., and Gönüllü, M. P. (2019). Atomik Katman Biriktirme Tekniğine Genel Bakış: ZnO, TiO₂ ve Al₂O₃ Filmlerin Üretimi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C Tasarım ve Teknoloji*, 7(3), 649.
- Attaf, B. (Ed.) (2011). *Advances in Composite Materials for Medicine and Nanotechnology*. IntechOpen, Rijeka.
- Aydın Ünal, F. (2024). Alkali metal katkılı ZnO malzemesinin üretimi ve karakterizasyonu, *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(3), 1230-1241.
- Aydın, C. (2018). Mn/Ni katkılı nanoyapılı ZnO yarıiletken ince filmlerin yüzey morfolojileri, optik sabitleri ve dispersiyon enerji parametreleri, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(1), 319-328.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Aydoğu, H. S., and Uzkalan, S.** (2019). The structural, surface morphology, optical and electrical properties of zno film doped gallium at 10%. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, 043, 108-124.
- Azem, N. F. A., ve Birlik, İ.** (2018). Sol-jel yöntemi ile hazırlanmış z-ZnO nanopartiküllerin optimizasyonu. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 20(58), 121-127.
- Babayevska, N., Przysiecka, Ł., Iatsunskyi, I., Nowaczyk, G., Jarek, M., Janiszewska, E., and Jurga, S.** (2022). ZnO size and shape effect on antibacterial activity and cytotoxicity profile. *Scientific Reports*, 12(1), 8148.
- Balada, E. L.** (2024). Metal Oxide Thin Films for Optoelectronic Applications. Doctoral Thesis, Aarhus University, Aarhus.
- Balaprakash, V.** (2016). Effect of aluminum doping on the structural, morphological, electrical and optical properties of ZnO thin films prepared by sol-gel dip coating. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 54(11), 689–693.
- Barbier, M.** (2022). Croissance et étude de phases max basées sur des terres rares et ordonnées magnétiquement. Doctoral Thesis, Université Grenoble Alpes, Grenoble.
- Barnes, B., and Das, K. S.** (2018). Resistance switching and memristive hysteresis in visible-light-activated adsorbed ZnO thin films, *Scientific Reports*, 8(1), 2184.
- Basu, R.** (2022). A review on single crystal and thin film Si–Ge alloy: growth and applications, *Materials Advances*, 3(11), 4489-4513.
- Benramache, S., Belahssen, O., Guettaf, A., and Arif, A.** (2013). Correlation between electrical conductivity-optical band gap energy and precursor molarities ultrasonic spray deposition of ZnO thin films. *Journal of Semiconductors*, 34(11), 113001.
- Bernardo, C. P. C. V., Lameirinhas, R. A. M., Cunha, J. P. de M., and Torres, J. P. N.** (2024). A revision of the semiconductor theory from history to applications, *Deleted Journal*, 6(6), 316.
- Bessadok, M. N., Bouri, A., Ananias, D., Mrabet, S., Vázquez-Vázquez, C., and El Mir, L.** (2024). Physical properties of a Eu³⁺-doped Zn₂SiO₄ phosphor ceramic material with enhanced thermal sensitivity at low temperatures. *RSC advances*, 14(53), 39598-39608.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bhattacharya, R. N., and Deb, S. K.** (2000). A low-cost approach to fabrication of multinary compounds for energy-related applications. *Japanese Journal of Applied Physics*, 39, 424.
- Bhujbal, P. K., and Pathan, H. M.** (2019). Deposition of amorphous and crystalline Al doped ZnO thin films by RF magnetron sputtering and their comparative properties. *ES Energy & Environment*, 4(2), 15-18.
- Bian, J.** (2007). Fabrication of ZnO p-n homojunction by ultrasonic spray pyrolysis and its electroluminescence properties. *Journal of Inorganic Materials*, 22(1), 173-175.
- Bomben, M.** (2018). Silicon trackers for high luminosity colliders, Doctoral dissertation, Université Paris Diderot, Paris.
- Bornside, D. E., Brown, R. A., Ackmann, P., Frank, J. R., Tryba, A. A., and Geyling, F. T.** (1993). The effects of gas phase convection on mass transfer in spin coating. *Journal of Applied Physics*, 73(2), 585.
- Bornside, D. E., Macosko, C. W., and Scriven, L. E.** (1989). Spin coating: One-dimensional model. *Journal of Applied Physics*, 66(11), 5185.
- Bose, S., Keller, S. S., Alstrøm, T. S., Boisen, A., and Almdal, K.** (2013). Process optimization of ultrasonic spray coating of polymer films. *Langmuir*, 29(23), 6911.
- Braga, J. P., Lima, G. R. D., Gozzi, G. and Fugikawa-Santos, L.** (2018). Electrical characterization of thin-film transistors based on solution-processed metal oxides. *Design, Simulation and Construction of Field Effect Transistors*, IntechOpen, London, 135-156.
- Brinker, C. J., and Scherer, G. W.** (1990). *Sol-Gel Science: The Physics And Chemistry Of Sol-Gel Processing*, Gulf Professional Publishing.
- Browne, A. J., and Attfield, J. P.** (2020). Orbital molecules in vanadium oxide spinels, *Physical Review B*, 101(2), 024112.
- Bunaciu, A. A., Udriștioiu, E. G., and Aboul-Enein, H. Y.** (2015). X-Ray diffraction: instrumentation and applications. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 45(4), 289.
- Butt, M. A.** (2022). Thin-film coating methods: a successful marriage of high-quality and cost-effectiveness—a brief exploration. *Coatings*, 12(8), 1115–1115.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Büyük, G., and İlcan, S.** (2019). Sol jel yöntemiyle elde edilen ZnO filminin yapısal, morfolojik ve optik özelliklerine erbiyum katkısının etkisi. *Süleyman Demirel University Faculty of Arts and Science Journal of Science*, 14(2), 179-192.
- Cao, Y., Cai, Y., Yao, C., Bao, S.-B., and Han, Y.** (2019). The photoluminescence, field emission and femtosecond nonlinear absorption properties of Al-doped ZnO nanowires, nanobelts, and nanoplane-cone morphologies. *RSC Advances*, 9(59), 34547.
- Castillo-Vilcatoma, D., Loarte, S., Fernandez-Chillcce, A., Pastrana, E. C., and Pastrana, R.** (2021). Designing and fabrication of a low-cost dip-coater for rapid production of uniform thin films. *Química Nova*, 45(01), 97-100.
- Cereser, A.** (2016). Time-of-flight 3D neutron diffraction for multigrain crystallography. Doctoral Thesis, Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, 134.
- Chandra, U. (Ed.)** (2017). *Recent Applications in Sol-Gel Synthesis*. IntechOpen, Rijeka.
- Chandraiahgari, C. R., Bellis, G. D., Ballirano, P., Balijepalli, S. K., Kačiulis, S., Caneve, L., Sarto, F., and Sarto, M. S.** (2015). Synthesis and characterization of ZnO nanorods with a narrow size distribution. *RSC Advances*, 5(62), 49861–49870.
- Chari, M.** (2025). Al katkılı ZnO malzemelerin üretilmesi ve özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye.
- Chaudhari, M. N.** (2021). Thin film deposition methods: a critical review. *International Journal For Research In Applied Science And Engineering Technology*, 9(5), 5215-5220.
- Chauhan, R. N., Anand, R. S., and Kumar, J.** (2014). RF-sputtered Al-doped ZnO thin films: Optoelectrical properties and application in photovoltaic devices. *Physica Status Solidi (a)*, 211(11), 2514–2522.
- Chauhan, R. N., Singh, C., Anand, R. S., and Kumar, J.** (2014). Thickness-dependent structural, optical, and electrical characteristics of ZnO:Al thin films and application in OLEDs. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 61(11), 3775–3782.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Chopra, K. L.** (2012). *Thin Film Device Applications*. Springer Science & Business Media, New York, 400.
- Choudhary, O. P., and Kalita, P.** (2017). Scanning electron microscope: advantages and disadvantages in imaging components. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(5), 1877.
- Chowdhury, F., Hasan, S. F., and Alam, M. S.** (2012). Morphological and optical properties of vacuum evaporated ZnO thin films. *Turkish Journal of Physics*, 36(1), 1-7.
- Correia, E. D. S., Dantas, J. de M., and Andrade, J. E.** (2017). Considerações acerca dos conceitos de condutores, isolantes e semicondutores nos livros de Ensino Médio sob um olhar da teoria de bandas de energia. *Scientia Plena*, 13(1).
- Çelik, A., ve Koç, F.** (2020). Polikristal tür bir fotovoltaiik panelin I-V karakteristiğinin analitik modellenmesi ve deneysel validasyonu. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(4), 2491.
- Çiğil, A. B., Kandırmaz, E. A., Birtane, H., and Kahraman, M. V.** (2019). Preparation and characterization of highly hydrophilic polyethyleneimine coatings. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(3), 973.
- Çoban, M. B.** (2016). Bazı lantanit içeren metal organik çerçevelerin sentezlenmesi ve karakterizasyonu, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, Türkiye.
- Dai, Q., Luo, L., Huang, F., Xiong, D., Tang, X., and Chen, J.** (2011). Influence of annealing and europium-doping on the structure and optical properties of zno thin films grown on quartz substrate by magnetron sputtering. *Materials Science Forum*, 687, 667–672.
- Delgado, A., Guerra, Y., Padrón-Hernández, E., and Peña-Garcia, R.** (2018). Combining the sol gel method and spin coating to obtain YIG films with low FMR linewidth on silicon (100) substrate. *Materials Research Express*, 5(2), 26419.
- Demirbilek, N., Kaya, M., and Yakuphanoglu, F.** (2022). Saf ZnO ve katkılı ZnO:Al_xMn_y (x=1% at., y=1%, 2%, 3%, 5% at.) yarı iletken ince filmlerin yapısal ve optiksel özellikleri ile üretilen diyotların elektriksel özelliklerinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(1), 163-174.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Demirci, B.** 2006. İndiyum katkılı ZnO ince filmlerinin bazı fiziksel özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye.
- Demirkıran, N.** (2012). Sol-jel kaplama çözeltisi bileşiminin hidrojen peroksit yanıtlarına etkisi. *Karaelmas Science and Engineering Journal*, 2(2), 18.
- Diacci, C.** (2021). Organic Bioelectronic Devices for Selective Biomarker Sensing: Towards Integration With Living Systems. Doctoral Thesis, Linköping University, Linköping.
- Dorri, S.** (2024). Magnetron Sputter Epitaxy of CrB₂/TiB₂ Diboride Superlattice Thin Films. Doctoral Thesis, Linköping University, Linköping.
- Du, G., Liu, W., Bian, J., Hu, L., Liang, H., Wang, X. S., Liu, A. M., and Yang, T.** (2006). Room temperature defect related electroluminescence from ZnO homojunctions grown by ultrasonic spray pyrolysis. *Applied Physics Letters*, 89(5).
- Dunlap, R. A.** (2018). *Crystalline Structure*. Morgan & Claypool Publishers, San Rafael.
- Efkere, H. İ.** 2024. Yüksek sıcaklıkta tavlanmış Cu katkılı ZnO (CZO) arayüzeyli Au/n-Si yapısının dielektrik özelliklerinin detaylı incelenmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Dergisi*, 5(1), 1-12.
- Ekmekçi, S., Yurtcan, M. T.** (2020). Darbeli lazer biriktirme (PLD) ile Ti-6Al-4V üzerine hidroksiapatitin (HAp) ince filmlerinin hazırlanması. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 598-605.
- El Jouad, M., Bouabdalli, E. M., Touhtouh, S., Addou, M., Ollier, N., and Sahraoui, B.** (2020). Red luminescence and UV light generation of europium doped zinc oxide thin films for optoelectronic applications. *The European Physical Journal Applied Physics*, 91(1), 10501.
- Elbeyli, S., Erol, M., Birlik, İ., Ebelioğlu, M. F., Mermer, Ö., Yiğit, R., Taş, S., Toparlı, M., Çelik, E.** 2014. Production and characterization of Cu:SnO₂ films on glass substrates by sol-gel method for gas sensors. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14(1), 21-26.
- Elhamali, S. M., Ibrahim, N., and Radiman, S.** (2016). Structural, optical and magnetic properties of Y₂O₃ doped with erbium and terbium nanofilms using sol-gel method. *Journal of Advances in Nanomaterials*, 1(1), 1-8.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ellmer, K.** (2011). *Transparent Conductive Zinc Oxide—Basics and Applications in Thin Film Solar Cells*. Springer, Berlin.
- Emriskova, N.** (2021). System Development and Validation for the CMS Inner Tracker at High Luminosity LHC. Doctoral Thesis, Université de Lyon, Lyon.
- Erken, Ö.** (2020). $\text{Cu}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}$ ince filmlerin hazırlanması ve fiziksel karakterizasyonu: güneş pillerinde tampon tabaka olarak kullanılabilirliklerinin araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(5), 783-793.
- Erkişi, A.** (2022). $\text{Ga}_4\text{X}_3\text{Mn}$ ($\text{X} = \text{P}$ and As)’in manyetik ve elektronik özelliklerinin incelenmesi üzerine ilk ilkeler çalışması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi*, 17(2), 371.
- Ersen, M.** (2012). Ti_3Al ve Y_3Al bileşiklerinin elektronik yapısının ve titreşim özelliklerinin yoğunluk fonksiyonel teorisi ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Kırşehir, Türkiye.
- Eslamian, M.** (2017). Inorganic and organic solution-processed thin film devices. *Nano-micro letters*, 9(1), 3.
- Faustini, M., Louis, B., Albouy, P. A., Kuemmel, M. and Grosso, D.** (2010). Preparation of sol-gel films by dip-coating in extreme conditions. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(17), 7637-7645.
- Fausty, J.** (2020). Towards the full field modeling and simulation of annealing twins using a finite element level set method. Doctoral Thesis, Université PSL (Paris Sciences & Lettres), Paris, 158
- Ferrero, M., Arcidiacono, R., Mandurrino, M., Sola, V., and Cartiglia, N.** (2021). *An Introduction to Ultra-Fast Silicon Detectors*. CRC Press, Boca Raton, 224.
- Fischer, S. A., Isborn, C. M. and Prezhdo, O. V.** (2011). Excited states and optical absorption of small semiconducting clusters: Dopants, defects and charging. *Chemical Science*, 2(3), 400-406.
- Fortunato, E., Barquinha, P., and Martins, R.** (2012). Oxide semiconductor thin-film transistors: a review of recent advances. *Advanced materials*, 24(22), 2945-2986.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Francisco-López, A., Charles, B., Weber, O. J., Alonso, M. I., Garriga, M., Campoy-Quiles, M., Weller, M. T. and Goñi, A. R. (2019). Equal footing of thermal expansion and electron–phonon interaction in the temperature dependence of lead halide perovskite band gaps. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 10(11), 2971-2977.
- Gallegos, M. V., Aparicio, F., Peluso, M. A., Damonte, L. C., and Sambeth, J. E. (2018). Structural, optical and photocatalytic properties of zinc oxides obtained from spent alkaline batteries. *Materials Research Bulletin*, 103, 158.
- Ganaie, M. and Zulfequar, M. (2020). Study of morphological, electrical and optical behaviour of amorphous chalcogenide semiconductor. *Advances in Condensed-Matter and Materials Physics - Rudimentary Research to Topical Technology*, IntechOpen, London, 1-22.
- Garip, İ. (2021). Design and application of multi-axis solar tracking system to increase the efficiency of solar cell. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C Tasarım ve Teknoloji*, 9(4), 749.
- Gençyılmaz, O., Karakaya, S., Atay, F., and Akyüz, İ. (2012). Co katkılı ZnO ince filmlerinin üretimi ve karakterizasyonu. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14(2), 15-24.
- Ghamsari, M. S., and Dhara, S. (2019). *Nanorods and Nanocomposites*. IntechOpen eBooks. London, 280
- Goblet, M., Matin-Mann, F., Lenarz, T., and Paasche, G. (2021). Optical absorbance of the tympanic membrane in rat and human samples. *PLoS ONE*, 16(7), e0254941..
- Goktas, A., Mutlu, I. H., Yamada, Y., and Celik, E. (2013). Influence of pH on the structural optical and magnetic properties of $Zn_{1-x}Mn_xO$ thin films grown by sol–gel method. *Journal of alloys and compounds*, 553, 259-266...
- Gora, M. K., Kumar, A., Choudhary, B. L., Dolia, S. N., Kumar, S., and Singhal, R. K. (2023). Electronic, structural and optical properties of Gd-doped ZnO powder synthesized by solid-state reaction method. *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research*, 58(1), 53.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Götsch, T., Wernig, E., Klötzer, B., Schachinger, T., Kunze-Liebhäuser, J., and Penner, S.** (2019). An ultra-flexible modular high vacuum setup for thin film deposition. *Review of Scientific Instruments*, 90(2).
- Gözükızıl, M. F., Temel, S., and Özbay, N.** (2020). Production and characterization of Al-doped ZnO thin films with sol-gel magnetic spin coating technique. *Sakarya University Journal of Science*, 24(1), 172–177.
- Gressner, A. M. and Arndt, T.** (2019). LAP. In: *Springer Reference Medizin*, Springer Nature, Berlin, 1437.
- Guillén, C.** (2025). Determination of the band gap energy of SnO₂ and ZnO thin films with different crystalline qualities and doping levels. *Electronic Materials*, 6(1), 3.
- Gullo, F.** (2018). Investigation of physical process at polymer insulation-conductive filler interface. Doctoral Thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- Güler, S. H. and Güler, Ö.** (2017). The electrical and optical properties of TiO₂ reinforced by carbon nanotubes, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23(7), 870.
- Gümüş, C.** (2006). ZnO İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.
- Gündoğdu, O. S. ve Güngör, E.** (2024). ZnO İnce filmlerin yapısal, morfolojik ve lüminesans özelliklerine tavlama sıcaklığının etkisi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 14(4), 1529.
- Gündoğdu, O. S., Karaduman, F. ve Güngör, E.** (2026). Beyaz ışık yayan indiyum katkılı ZnO ince filmlerde tavlama sıcaklığının etkisi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 16 (2), 806-826.
- Güneri, E.** (2009). Kimyasal depolama yöntemi ile elde edilmiş SnS ince filmlerin yapısal, elektriksel ve optiksel özelliklerinin incelenmesi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye.
- Güngör, T. ve Güngör, E.** (2012). Computer controlled dip coating system design. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 3(1), 1-4.
- H. C., Martins, L. da S., Lopes, F. H. and Urbano, A.** (2018). Thickness effect on the optical band gap of V₂O₅ thin films deposited by thermal evaporation. *Semina Ciências Exatas e Tecnológicas*, 38(2), 59.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hafidallah, A., Ynineb, F., Aida, M. S. and Attaf, N.** (2011). In doped ZnO thin films. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(26), 7267-7270.
- Hasançebi, Ö.** (2006). Electrical, structural and optical properties of copper oxide thin films prepared by sol-gel method. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Hathcock, M.** (2025). dirac cone and acoustic wave manipulation with origami inspired reconfigurable phononic structures. Doctoral Thesis, University of Michigan, Ann Arbor.
- Heckmann, T.** (2018). Reverse engineering secure systems using physical attacks. Doctoral Thesis, Université Paris Sciences et Lettres, Paris.
- Hone, F. G. and Abza, T.** (2019). Short review of factors affecting chemical bath deposition method for metal chalcogenide thin films. *International Journal of Thin Films Science and Technology*, 8(2), 43.
- Hou, Q., Meng, F., and Sun, J.** (2013). Electrical and optical properties of Al-doped ZnO and ZnAl₂O₄ films prepared by atomic layer deposition. *Nanoscale research letters*, 8(1), 144.
- Huang, C. B.** (2020). Low-dimension functional nanomaterials for the detection of pressure and strain. Doctoral Thesis, Université de Strasbourg, Strasbourg.
- Igenegbai, V. O.** (2020). catalytic solid oxide membrane reactors: development and application in the oxidative coupling of methane. Doctoral Thesis, University of Michigan, Ann Arbor.
- Igwebike-Ossi, C. D.** (2017). X-ray techniques. In: *Failure Analysis and Prevention*, IntechOpen, London, 1-24.
- Ilıcan, S. ve İlğü Büyük, G.** (2018). Nanoyapılı lantan katkılı ZnO filmlerinin elde edilmesi ve karakterizasyonu. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(9), 174-187.
- Ilıcan, S., ve Büyük, G. İ.** (2018). Nanoyapılı lantan katkılı ZnO filmlerinin elde edilmesi ve karakterizasyonu, *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(9), 174-187.
- Islam, M. N., Das, B. N., Shit, G. C. and Lahiri, A.** (2024). Analysis of electromagnetic effect on semiconducting medium. *Research Square*, 1-20.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- İpek, Y. ve Karaaslan, N. M.** (2021). Rare earth element doped ZnO thin films and applications. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 7(2), 305-313.
- Jagadish, C. and Pearton, S. J.** (Eds.) (2011). *Zinc Oxide Bulk, Thin Films and Nanostructures: Processing, Properties, and Applications*. Elsevier, Oxford.
- Jama, M. G.** (2015). Composites semi-conducteurs pour l'éclairage. Doctoral Thesis, Université de Bordeaux, Bordeaux.
- Janotti, A., and Van de Walle, C. G.** (2009). Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor. *Reports on progress in physics*, 72(12).
- Jia, Y. Q., Shi, D. M., & Yan, J.** (2011). Synthesis of Al-Doped ZnO Nanoparticles and its Electromagnetic Performance. *Advanced Materials Research*, 143, 271-276.
- Jogi, A., Ayana, A., and Rajendra, B. V.** (2023). Modulation of optical and photoluminescence properties of ZnO thin films by Mg dopant. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(7), 624.
- John, R., and Rajakumari, R.** (2012). Synthesis and characterization of rare earth ion doped nano ZnO. *Nano-Micro Letters*, 4(2), 65-72.
- Jordan, M.** (2017). Growth optimization and process development of indium gallium nitride/gallium nitride solar cells. Doctoral Thesis, Université de Toulouse, Toulouse.
- Jouad, M. E., Bouabdalli, E. M., Touhtouh, S., Addou, M., Ollier, N., and Sahraoui, B.** (2020). Red luminescence and UV light generation of europium doped zinc oxide thin films for optoelectronic applications. *The European Physical Journal Applied Physics*, 91(1), 10501–10501.
- Júnior, E. A. A., Nobre, F. X., Sousa, G. da S., Cavalcante, L. S., Santos, M. R. de M. C., Souza, F. L., and Matos, J. M. E. de.** (2017). Synthesis, growth mechanism, optical properties and catalytic activity of ZnO microcrystals obtained via hydrothermal processing. *RSC Advances*, 7(39), 24263.
- Kadhim, A. K., Swadi, S. M. and Ali, G. M.** (2020). Design and implementation of a feedback programmable spin coating system. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 17(3), 1516-1523.
- Kahrizi, M. and Sohi, P. A.** (Eds.) (2020). *Recent Advances in Nanophotonics: Fundamentals and Applications*. IntechOpen, London, 174.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kahveci, E.** (2017). Galyum Katkılı Çinko Oksit İnce Filmlerin Karakterizasyonu ve Üretim Parametrelerinin İnce Filmlere Olan Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye.
- Kang, S. L., Park, J. H., Ko, S., and Lee, H.** (2015). Solid-State conversion of single crystals: the principle and the state-of-the-art. *Journal of the American Ceramic Society*, 98(2), 347.
- Kara, İ., Kayış, A. F., ve Yalçınkaya, Ö.** (2024). SILAR yöntemi ile hazırlanan zno ince filmlerin yapısal, yüzey ve optik özelliklerine nikel katkısının etkisinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Dergisi*, 5(2), 140-155.
- Kara, K.** (2008). Atmalı Filtreli Katodik Vakum Ark Depolama Yöntemi ile p-Tipi ZnO (Çinko Oksit) Üretimi ve Yapısal Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye.
- Karaduman, F.** (2024). Karboksilat Köprülü Mangan Bileşiğinin Sentezi, Yapısal ve Lüminesans Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, Türkiye.
- Karakaya, S.** (2017). MG katkılı ZNO filmlerinin üretimi ve karakterizasyonu. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 19(56), 500-509.
- Keskenler, E. Y. Ü. P., Aydın, S., Turgut, G., and Doğan, S.** (2014). Optical and structural properties of bismuth doped ZnO thin films by sol-gel method: Urbach rule as a function of crystal defects. *Acta Physica Polonica A*, 126(3), 782-786.
- Khajavizadeh, L.** (2023). Materials Design for the Improvement of SiC Field Effect Gas Sensor Performance in High Temperature Process Control Applications. Doctoral Thesis, Linköping University, Linköping, 130.
- Khakhar, D. V.** (2023). quantum mechanics for materials science: understanding the atomic scale. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 11(7), 442.
- Khattak, Y. H.** (2019). Modeling of High Power Conversion Efficiency Thin Film Solar Cells. Doctoral Thesis, Universitat Politècnica de València, Valencia.
- Khoury, R.** (2017). Nanometer Scale Point Contacting Techniques for Silicon Photovoltaic Devices. Doctoral Thesis, Université de Lyon, Lyon.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Khwaira, Y. A. R.** (2023). Contribution to the Construction of the Silicon Pixel Trajectorymeter of the ATLAS Experiment for the High Luminosity Phase of the LHC. Doctoral Thesis, Aix-Marseille Université, Marseille.
- Kırık, N. S., ve Şahin, B.** (2022). Nadir toprak elementi Ce katkılı ZnO/CuO kompozit ince filminin yapısal, morfolojik ve optik özelliklerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Dergisi*, 3(1), 33-43.
- Kim, D., and Leem, J.** (2021). Crystallization of ZnO thin films without polymer substrate deformation via thermal dissipation annealing method for next generation wearable devices. *RSC Advances*, 11(2), 876.
- Kim, Y. and Park, C. H.** (2009). Rich variety of defects in ZnO via an attractive interaction between O vacancies and Zn interstitials: Origin of n-type doping. *Physical Review Letters*, 102(8), 086403.
- Klein, L. C.** (1988). *Sol-Gel Technology for Thin Films, Fibers, Preforms, Electronics, and Specialty Shapes*. Noyes Publications, Park Ridge.
- Ko, H. J., Chen, Y. F., Hong, S., Wenisch, H., Yao, T., and Look, D. C.** (2000). Ga-doped ZnO films grown on GaN templates by plasma-assisted molecular-beam epitaxy. *Applied Physics Letters*, 77(23), 3761.
- Koçak, A. B.** (2017). New Theoretical Concepts for Designing Oxide Interfaces With Exotic Properties for Electronics and Spintronics. Doctoral Thesis, Université de Cergy-Pontoise, Cergy-Pontoise.
- Kreller, C. R.** (2015). Fuel Cell Materials Characterization Part 1: X-Ray Diffraction and X-Ray Fluorescence. *Technical Report, U.S. Department of Energy*, Washington D.C., 1-40.
- Krishna, S.** (Ed.) (2002). *Handbook of Thin Film Deposition Processes and Techniques: Principles, Methods, Equipment and Applications*. William Andrew Publishing, Norwich.
- Křištofová, P., Rudnik, E., and Miškuřová, A.** (2016). Hydrometallurgical methods of indium recovery from obsolete lcd and led panels. *Metallurgy and Foundry Engineering*, 42(3), 157–157.
- Kubovy, M.** (1994). The perceptual organization of dot lattices. *Psychonomic Bulletin & Review*, 1(2), 182-190.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kyprianidis, K.** (Ed.) (2011). *Advances in Gas Turbine Technology*. InTech, Rijeka.
- Lédée, F.** (2018). Crystallization and Functionalization of 2-Dimensional Hybrid Halide Perovskites for Photovoltaics and Light-Emitting Devices. Doctoral Thesis, Université de Rennes 1, Rennes.
- Lee, C., Lim, K., and Song, J.** (1996). Highly textured ZnO thin films doped with indium prepared by the pyrosol method. *Solar energy materials and solar cells*, 43(1), 37-45.
- Lee, U. G., Kim, W., Han, D. H., and Chung, H. S.** (2019). A modified equation for thickness of the film fabricated by spin coating. *Symmetry*, 11(9), 1183.
- Lee, W., Lee, H., and Hahn, J. W.** (2014). Correction of spectral deformation by second-order diffraction overlap in a mid-infrared range grating spectrometer using a PbSe array detector. *Infrared Physics & Technology*, 67, 327-332.
- Lehtihet, M.** (2020). Realization of Composite Coatings by Liquid Techniques for Solar Infrared Light Management. Doctoral Thesis, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau.
- Leng, Y.** (2008). X-ray diffraction methods. *Materials Characterization*, Elsevier, Amsterdam, 45-78.
- Lhimr, S., Bouhlassa, S., Bouhlassa, S., Bouhlassa, S., Ammary, B., Ammary, B., and Ammary, B.** (2019). Effect of molar ratio on structural and size of ZnO/C nanocomposite synthesized using a colloidal method at low temperature, *Indonesian Journal of Chemistry*, 19(2), 422.
- Li, J., Sathasivam, S., Taylor, A., Carmalt, C. J., and Parkin, I. P.** (2018). Single step route to highly transparent, conductive and hazy aluminium doped zinc oxide films. *RSC Advances*, 8(74), 42300.
- Liu, H., Zhu, Y., Xiong, W., Yang, Y., Li, S., and Bai, S.** (2025). Transparent conductive oxide films and their applications in silicon heterojunction and perovskite/silicon tandem photovoltaics. *ACS Applied Energy Materials*, 8(7), 4032-4047.
- Liu, M., Wang, L., Zhao, W., Cao, X., Fan, J., Zhang, Z., ... and Zhuang, L.** (2025). Sustainable valuable materials from waste heterojunction solar cells: a focus on the purification of indium. *Sustainability*, 17(4), 1460.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Liu, X.** (2020). Elaboration and Characterization of Organic Semiconducting Thin Films for Optoelectronics. Doctoral Thesis, Université de Bordeaux, Bordeaux.
- Loehnert, R., Braun, A. and Bora, D. K.** (2024). Combine influences of nanoparticulate hematite thin film thickness, roughness, and weight on its photoelectrochemical performance and viscous/thermal characteristics of source precursor. *arXiv Preprint*, 2403.19069, 1-20.
- Lucas, I., Jiménez-Cavero, P., Vila-Fungueiriño, J. M., Magén, C., Sangiao, S., Teresa, J. M. D., Morellón, L. and Rivadulla, F.** (2017). Chemical solution synthesis and ferromagnetic resonance of epitaxial thin films of yttrium iron garnet. *Physical Review Materials*, 1(7), 074407.
- Lupan, C., Khaledialidusti, R., Mishra, A. K., Postica, V., Terasa, M.-I., Magariu, N., Pauporté, T., Viana, B., Drewes, J., Vahl, A., Faupel, F., and Adelung, R.** (2020). Pd-functionalized ZnO:Eu columnar films for room-temperature hydrogen gas sensing: a combined experimental and computational approach. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(22), 24951.
- Lysak, A., Przeździecka, E., Wierzbicka, A., Jakiela, R., Khosravizadeh, Z., Szot, M., Adhikari, A., and Kozanecki, A.** (2023). Temperature dependence of the bandgap of Eu doped {ZnCdO/ZnO}₃₀ multilayer structures. *Thin Solid Films*, 781, 139982.
- Makino, T., Segawa, Y., Kawasaki, M. and Koinuma, H.** (2005). Optical properties of excitons in ZnO-based quantum well heterostructures. *Semiconductor Science and Technology*, 20(4), 78-82.
- Makino, T., Segawa, Y., Yoshida, S., Tsukazaki, A., Ohtomo, A., and Kawasaki, M.** (2004). Gallium concentration dependence of room-temperature near-band-edge luminescence in n-type ZnO:Ga. *Applied Physics Letters*, 85(5), 759.
- Mangalam, V., and Pita, K.** (2018). Effect of the interaction distance on 614 nm red emission from Eu³⁺ ions due to the energy transfer from ZnO-nc to Eu³⁺ ions. *Optical Materials Express*, 8(10), 3115-3132.
- Martinez, B.** (2019). Optoelectronic Properties of Narrow Band Gap Nanocrystals: Application to Infrared Detection. Doctoral Thesis, Sorbonne Université, Paris, 140
- Marzouki, R.** (2020). Synthesis methods and crystallization. IntechOpen, London.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Meghwal, A., Anupam, A., Murty, B. S., Berndt, C. C., Kottada, R. S., and Ang, A. S. M.** (2020). Thermal spray high-entropy alloy coatings: a review. *Journal of Thermal Spray Technology*, 29(5), 857.
- Meyerhofer, D.** (1978). Characteristics of resist films produced by spinning. *Journal of Applied Physics*, 49(7), 3993-3997.
- Miquelot, A., Despotopoulou, M. M., Vahlas, C., Villeneuve-Faure, C., Dragoe, N., Prud'homme, N., and Debieu, O.** (2019). Morphological, structural, optical, and electrical study of nanostructured thin films: Charge transport mechanism of p-type Co₃O₄. *Materials Chemistry and Physics*, 240, 122059.
- Miroshnik, L., Rummel, B., Li, A. B., Balakrishnan, G., Sinno, T. and Han, S. M.** (2021). Maintaining atomically smooth GaAs surfaces after high-temperature processing for precise interdiffusion analysis and materials engineering. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 39(6), 062203.
- Mkawi, E. M., Ibrahim, K., Ali, M. K. M., Farrukh, M. A., and Mohamed, A. S.** (2015). The effect of dopant concentration on properties of transparent conducting Al-doped ZnO thin films for efficient Cu₂ZnSnS₄ thin-film solar cells prepared by electrodeposition method. *Applied Nanoscience*, 5(8), 993.
- Moeck, P. and DeStefano, P.** (2018). Accurate lattice parameters from 2D-periodic images for subsequent Bravais lattice type assignments. *Advanced Structural and Chemical Imaging*, 4(1), 1-15.
- Mondragón-Suárez, H., Maldonado, A., de la L. Olvera, M., Reyes, A., Castanedo-Pérez, R., Torres-Delgado, G., and Asomoza, R.** (2002). ZnO: Al thin films obtained by chemical spray: effect of the Al concentration. *Applied Surface Science*, 193(1-4), 52-59.
- Monshi, A., Foroughi, M. R., and Monshi, M. R.** (2012). Modified scherrer equation to estimate more accurately nano-crystallite size using XRD. *World Journal of Nano Science and Engineering*, 2(3), 154.
- Morales-Masis, M., De Wolf, S., Woods-Robinson, R., Ager, J. W., and Ballif, C.** (2017). Transparent electrodes for efficient optoelectronics. *Advanced Electronic Materials*, 3(5), 1600529.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Mott, N. F. and Davis, E. A.** (2012). *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials*. Oxford University Press, Oxford.
- Moussa, N. B., Lajnef, M., Jebari, N., Villebasse, C., Bayle, F., Chaste, J., Madouri, A., Chtourou, R. and Herth, É.** (2021). Synthesis of ZnO sol–gel thin-films CMOS-compatible. *RSC Advances*, 11(37), 22723-22730.
- Murugesan, M., Arjunraj, D., Mayandi, J., Venkatachalapathy, V., and Pearce, J. M.** (2018). Properties of Al-doped zinc oxide and In-doped zinc oxide bilayer transparent conducting oxides for solar cell applications. *Materials Letters*, 222, 50–53.
- Muslih, E. Y. and Munir, B.** (2018). *Fabrication of ZnO thin film through chemical preparations*. Zinc Oxide Based Nano Materials and Devices (Ed: Nahhas, A. M.), InTech, Rijeka,
- Mustafa, H. A. M. and Jameel, D.** (2021). Modeling and the main stages of spin coating process: A review. *Journal of Applied Science and Technology Trends*, 2(2), 119-123.
- Muzzio, N., Azzaroni, O., Moya, S. and Pasquale, M. A.** (2020). *Concepts for designing tailored thin film surfaces with potential biological applications*. Thin Film Processes - Artifacts on Surface Phenomena and Technological Facets (Ed: Mittal, K. L.), IntechOpen, London, 1-24.
- Nahhas, A. M.** (Ed.) (2019). *Zinc Oxide Based Nano Materials and Devices*. IntechOpen, London.
- Naik, E. I., Naik, H. S. B., Viswanath, R., Gowda, I. K. S., and Prabhakara, M. C.** (2020). Bright red luminescence emission of macroporous honeycomb-like Eu^{3+} ion-doped ZnO nanoparticles developed by gel-combustion technique. *SN Applied Sciences*, 2(5), 863.
- Navas, D., Fuentes, S., Castro-Álvarez, A. and Chávez-Ángel, E.** (2021). Review on sol-gel synthesis of perovskite and oxide nanomaterials. *Gels*, 7(4), 275.
- Nikitenkov, N.** (Ed.) (2017). *Modern Technologies for Creating the Thin-Film Systems and Coatings*. BoD–Books on Demand, Norderstedt.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Nowsherwan, G. A., Azhar, M. R., Anwar, N., Ahmed, M., Ali, Q., Nowsherwan, N., Riaz, S., Naseem, S., and Lai, W. (2025). Exploring the advanced optoelectronic properties of Nd-doped ZnO thin films for next-generation perovskite solar cells. *ACS Omega*, 10(18), 18251.
- Nunes, D., Pimentel, A., Gonçalves, A., Pereira, S., Branquinho, R., Barquinha, P., Fortunato, E. and Martins, R. (2019). Metal oxide nanostructures for sensor applications. *Semiconductor Science and Technology*, 34(4), 043001.
- Nyarige, J. S., Nambala, F., and Diale, M. (2022). A comparative study on the properties of $\text{Er}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ and $\text{Sm}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ nanostructured thin films for electronic device applications. *Materials Today Communications*, 33, 104441.
- Otieno, F., Airo, M., Erasmus, R., Quandt, A., Billing, D. G., and Wamwangi, D. (2020). Annealing effect on the structural and optical behavior of $\text{ZnO}:\text{Eu}^{3+}$ thin film grown using RF magnetron sputtering technique and application to dye sensitized solar cells. *Scientific Reports*, 10(1), 8557.
- Öföfoğlu, G. (2014). Opto-Elektronik Uygulamalarda Kullanılabilecek Katkısız ve Al Katkılı ZnO Filmlerinin Üretilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye.
- Özdemir, R. (2019). Elektrodepolama ile üretilen CoNi alaşım ince film kaplamaların yapısal ve manyetik özellikleri üzerine ek katkı maddelerinin etkisi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C Tasarım ve Teknoloji*, 7(3), 661.
- Özgür, Ü., Alivov, Y. I., Liu, C., Teke, A., Reshchikov, M. A., Doğan, S., ... and Morkoç, H. (2005). A comprehensive review of ZnO materials and devices. *Journal of Applied Physics*, 98(4), 041301.
- Palimar, S., Bangera, K. V., and Shivakumar, G. K. (2013). Study of the doping of thermally evaporated zinc oxide thin films with indium and indium oxide. *Applied Nanoscience*, 3(6), 549-553.
- Pankove, J. I. (2012). *Optical Processes in Semiconductors*. Courier Corporation, New York.
- Papachristou, C. J. (2022). Introduction to electromagnetic theory and the physics of conducting solids. *arXiv Preprint*, Cornell University.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Parajuli, D., Dangi, S., Sharma, B. R., Shah, N. L., and KC, D.** (2023). Sol-gel synthesis, characterization of ZnO thin films on different substrates, and bandgap calculation by the Tauc plot method. *Bibechana*, 20(2), 113.
- Patel, J., Sharme, R. K., Quijada, M. A., and Rana, M. M.** (2024). A review of transparent conducting films (TCFs): Prospective ITO and AZO deposition methods and applications. *Nanomaterials*, 14(24), 2013.
- Patil, S. A., Jagdale, P. B., Singh, A., Singh, R., Khan, Z., Samal, A. K. and Saxena, M.** (2023). 2D zinc oxide – Synthesis, methodologies, reaction mechanism, and applications. *Small*, 19(14), 2206063.
- Pereira, C. M. O., Azevedo, F. S. and Silva, E. O.** (2024). Remarks on the study of electronic properties and photoionization process in rotating 2D quantum rings. *arXiv Preprint*, Cornell University, 2410, 11595.
- Peter, Y. U., and Cardona, M.** (2010). *Fundamentals of semiconductors: physics and materials properties*. Springer Science & Business Media, , Berlin, 778.
- Petersen, J., Brimont, C., Gallart, M., Schmerber, G., Gilliot, P., Ulhaq-Bouillet, C., Rehspringer, J., Colis, S., Becker, C., Slaoui, A., and Dinia, A.** (2010). Correlation of structural properties with energy transfer of Eu-doped ZnO thin films prepared by sol-gel process and magnetron reactive sputtering. *Journal of Applied Physics*, 107(12).
- Picard, Q.** (2015). Hybrid Biomaterials: Carbon Fibers Cloth / Calcium Phosphates: Synthesis, Characterization and Biocompatibility. Doctoral Thesis, Université de Bordeaux, Bordeaux.
- Pierre, A. C.** (2013). *Introduction to Sol-Gel Processing*. Springer, New York, 394.
- Plaza, A. C.** (2021). Accelerated Aging and Durability of Selective Materials for Concentrating Solar Power Plant Receivers. Doctoral Thesis, Université de Perpignan, Perpignan.
- Podestá, J. M., Mèndez, C. M., Toro, S. and Huespe, A. E.** (2019). Symmetry considerations for topology design in the elastic inverse homogenization problem. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 128, 54-77.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Poumirol, J., Majorel, C., Chery, N., Girard, C., Wiecha, P. R., Mallet, N., Monflier, R., Larrieu, G., Cristiano, F., Royet, A. S., Alba, P. A., Kerdilès, S., Paillard, V. and Bonafos, C.** (2021). Hyper-doped silicon nanoantennas and metasurfaces for tunable infrared plasmonics. *ACS Photonics*, 8(5), 1393-1399.
- Pramanik, M. B., Rakib, M. A. A., Siddik, M. A. and Bhuiyan, S.** (2024). Doping effects and relationship between energy band gaps, impact of ionization coefficient and light absorption coefficient in semiconductors. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 9(1), 10-15.
- Qian, Y., Murayama, M., Guan, S., and Zhao, X.** (2024). annealing temperature-dependent luminescence color coordination in Eu-doped AlN thin films. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 12(1), 20.
- Qiu, H.** (2021). Interfacing Responsive Molecules With 2D Semiconductors: Fabrication of Multifunctional Devices. Doctoral Thesis, Université de Strasbourg, Strasbourg.
- Raha, S. and Ahmaruzzaman, M.** (2022). ZnO nanostructured materials and their potential applications: progress, challenges and perspectives. *Nanoscale Advances*, 4(8), 1868-1925.
- Raj, C. S. A., Sebastian, S. and Rajendran, S.** (2021). A review on spray pyrolysis deposited CZTS thin films for solar cell applications. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 23(9), 1196-1210.
- Rajan, K. J., Ganesan, K., Lanka, S., Bishnoi, S., and Sunkara, M. V.** (2016). Probing high temperature ferromagnetism and its paramagnetic phase change due to Eu ³⁺ incorporation in ZnO nanophosphors. *RSC advances*, 6(79), 75669-75680.
- Rietveld, I. B., Kobayashi, K., Yamada, H. and Matsushige, K.** (2007). Model supported morphology control of electrospray deposited poly(vinylidene fluoride) film. *Macromolecular Symposia*, 249(1), 322-327.
- Rubin, S., Mizrachi, D., Friedman, N., Edri, H., and Golan, T.** (2023). The world of advanced thin films: Design, fabrication, and applications. *Fusion of Multidisciplinary Research, An International Journal*, 4(1), 393-406.
- Sabnis, S. M.** (2013). Process flow of spray pyrolysis technique. *IOSR Journal of Applied Physics*, 4(5), 44-48.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Sahu, D., Acharya, B. S., and Panda, N. R.** (2016). Luminescence properties of rare earth doped metal oxide nanostructures: A case of Eu-ZnO. *AIP Conference Proceedings*, 1728(1), 020165.
- Sakthinathan, S., Meenakshi, G. A., Vinothini, S., Yu, C., Chen, C., Chiu, T. and Vittayakorn, N.** (2025). A review of thin-film growth, properties, applications, and future prospects. *Processes*, 13(2), 587.
- Saleem, M. R.** (2012). Effect of zinc acetate concentration on the structural and optical properties of ZnO thin films deposited by Sol-Gel method. *International Journal of the Physical Sciences*, 7(23), 2971-2979.
- Samavati, A., Samavati, Z., Ismail, A. F., Othman, M. H. D., Rahman, M. A., Zulhairun, A. K., and Amiri, I. S.** (2017). Structural, optical and electrical evolution of Al and Ga co-doped ZnO/SiO₂/glass thin film: role of laser power density. *RSC Advances*, 7(57), 35858.
- Sancakoğlu, O.** (2020). *Technological background and properties of thin film semiconductors*. 21st Century Surface Science - A Handbook, IntechOpen, London.
- Sanjiv, M.** (2022). Introduction to crystal growth. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 10(4), 433-437.
- Sarangapani, P., Chu, Y., Charles, J., Klimeck, G., and Kubis, T.** (2019). Band-tail formation and band-gap narrowing driven by polar optical phonons and charged impurities in atomically resolved III-V semiconductors and nanodevices. *Physical Review Applied*, 12(4), 044045.
- Savaroğlu, G. ve İlcan, S.** (2018). Yüksek kaliteli ZnO filmin üretimi için çözeltilerin hazırlanmasında ultrasesin etkisi. *Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(2), 69-75.
- Saygılı, Y. S. ve Çakmak, B.** (2020). Toprak işleme makinalarının aktif elemanlarında yüzey kaplama uygulamaları. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 8(sp1), 92-99.
- Sekavčnik, S., Kohl, P. and Nötzel, J.** (2025). Entangled photon pair generator via biexciton-exciton cascade in semiconductor quantum dots and its simulation. *arXiv Preprint*, Cornell University, 2510.09262.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Sengupta, J., Sahoo, R. K., Bardhan, K. K., and Mukherjee, C. D.** (2011). Influence of annealing temperature on the structural, topographical and optical properties of sol-gel derived ZnO thin films. *Materials Letters*, 65, 2572–2574.
- Sert, Y., Yeşilyurt, M., Günaydın, Ö., Emir, L. ve Küçükömeroğlu, T.** (2021). Dövme kalıplarında aşınma mekanizmaları. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(1), 202-219.
- Seyhan, A., and 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.
- Shahzad, S., Javed, S. and Usman, M.** (2021). A review on synthesis and optoelectronic applications of nanostructured ZnO. *Frontiers in Materials*, 8, 613825.
- Shakti, N., and Gupta, P. S.** (2010). Structural and Optical Properties of Sol-gel Prepared ZnO Thin Film. *Applied Physics Research*, 2(1), 19.
- Sharma, R. K.** (2016). Innovative Design of Rare Earth Nickelates as Cathodes for Solid Oxide Fuel Cells. Doctoral Thesis, Université de Bordeaux, Bordeaux.
- Sharme, R. K., Quijada, M., Terrones, M., and Rana, M. M.** (2024). Thin conducting films: preparation methods, optical and electrical properties, and emerging trends, challenges, and opportunities. *Materials*, 17(18), 4559.
- Shen, H., Shi, X., Wang, Z., Hou, Z., Xu, C., Duan, L., ... and Wu, H.** (2022). Defects control and origins of blue and green emissions in sol-gel ZnO thin films. *Vacuum*, 202, 111201.
- Shen, Q., Gao, Z., Huai-Yi, D., Zhang, G., Pan, N., and Wang, X.** (2012). Suppression of visible light emission of ZnO nanostructures by Ga-doping. *Acta Physica Sinica*, 61(16), 167105.
- Shportko, K. V.** (2019). Disorder and compositional dependences in Urbach-Martienssen tails in amorphous (GeTe)_x(Sb₂Te₃)_{1-x} alloys. *Scientific Reports*, 9(1), 1-12.
- Singh, A., Arya, P., Choudhary, D., Kumar, S., Srivastava, A. K., and Singh, I. B.** (2020). Cost-effective ZnO–Eu³⁺ films with efficient energy transfer between host and dopant. *SN Applied Sciences*, 2(5), 870.
- Smith, D. L. and Hoffman, D. W.** (1996). *Thin-Film Deposition: Principles and Practice*. McGraw-Hill, New York, 616.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Sood, S., Kumar, P., Raina, I., Misra, M., Kaushal, S., Gaur, J., ... and Singh, G. (2025). Enhancing optoelectronic performance through rare-earth-doped ZnO: Insights and applications. *Photonics*, 12(5), 454.
- Soraya, M. M., Ahmed, F. B. M., and Mahasen, M. M. (2022). Enhancing the physical, optical and shielding properties for ternary $\text{Sb}_2\text{O}_3\text{--B}_2\text{O}_3\text{--K}_2\text{O}$ glasses. *Journal of Materials Science Materials in Electronics*, 33(28), 22077.
- Sönmez, N. A., Kaya, M. D., Sertel, B. C., Asar, T., ve Özçelik, S. (2019). n-Si ve PET alttaşlar üzerine RF-kaplanan GZO ince filmlere tavlama sıcaklığının etkileri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(4), 1757-1764.
- Sönmezoğlu, S., Koç, M. ve Akın, S. (2012). İnce film üretim teknikleri. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 28(5), 389-404.
- Srikant, V., and Clarke, D. R. (1998). On the optical band gap of zinc oxide. *Journal of applied physics*, 83(10), 5447-5451.
- Srivathsa, M., and Rajendra, B. V. (2023). Effect of lanthanum doping on the structural, morphological, and optical properties of spray-coated ZnO thin films. *Engineering Proceedings*, 59(1), 32.
- Stöger-Pollach, M., Zenz, K., Ursin, F., Schilberg, J., and Stöger, L. (2023). A correction for higher-order refraction in cathodoluminescence spectrometry. *Ultramicroscopy*, 251, 113770.
- Suganya, S., Jothibas, M., and Muthuvel, A. (2019). Effect of temperature on different properties of ZnS nanoparticles synthesized by solid-state reaction method. *Journal of Nanoscience and Technology*, 5(4), 787.
- Şahan, M., Küçük, H. ve Kaya, R. (2024). Measurement of global solar radiation using photovoltaic collectors at six different tilt angles (0° , 30° , 37° , 45° , 60° and 90°) in the south direction in Osmaniye. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(2), 1-15.
- Şenol, S. D., Ozugurlu, E., and Arda, L. (2020). The effect of cobalt and boron on the structural, microstructural, and optoelectronic properties of ZnO nanoparticles. *Ceramics International*, 46(6), 7033-7044.
- Takçı, D. K. (2022). Fabrication and characterization of ZnO nanofibers by electrospinning technique. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(4), 2178-2186.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Tannous, C.** (2016). Semiconductor Physics and Devices. Master's Thesis, Université de Bretagne Occidentale (UBO), Brest, France.
- Tarımci, B. U.** (2009). Elektro-püskürtme yöntemi ve nanoteknolojideki uygulamaları. *Ankara Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Dergisi*, 38(2), 117.
- Tauc, J., Grigorovici, R., and Vancu, A.** (1966). Optical properties and electronic structure of amorphous germanium, *physica status solidi (b)*, 15(2), 627-637.
- Tengeler, S.** (2017). Cubic Silicon Carbide for Direct Photoelectrochemical Water Splitting. Doctoral Thesis, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau.
- Terzano, R., Denecke, M. A., Falkenberg, G., Miller, B. W., Paterson, D., and Janssens, K.** (2019). Recent advances in analysis of trace elements in environmental samples by X-ray based techniques (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 91(6), 1029.
- Tezel, N. S., Tezel, F. M. ve Kariper, İ. A.** (2022). Daldırma metodu ile üretilen TiO₂ ince filmlerin derişime bağıli elektrikselsel, optik ve yapısal analizi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi (UMAGD)*, 14(2), 522-530.
- Thienprasert, J., Rujirawat, S., Klysubun, W., Duenow, J. N., Coutts, T. J., Zhang, S., Look, D. C., and Limpijumnong, S.** (2013). Compensation in Al-doped ZnO by Al-related acceptor complexes: synchrotron x-ray absorption spectroscopy and theory. *Physical Review Letters*, 110(5), 055502.
- Turner, G. C. and Debbage, P.** (2018). Molecular imaging with nanoparticles: the dwarf actors revisited 10 years later. *Histochemistry and Cell Biology*, 150(6), 733-751.
- Toma, F. T. Z., Rahman, M. S., Hussain, K. M. A. and Ahmed, S. F.** (2024). Thin film deposition techniques: A comprehensive review. *Journal of Modern Nanotechnology*, 4, 1-18.
- Topçu, İ.** (2022). Sol-jel yöntemi ile üretilen silika tabanlı hidrofofik aerogellerin karakterizasyon özelliklerinin incelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 34, 481-486.
- Trabelsi, F.** (2021). Sol-Gel/ALD Low Temperature Process: Study of Al₂O₃ and Codoped TiO₂ Nanostructures for Photovoltaic Applications. Doctoral Thesis, Université de Lyon, Lyon.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Trad, F.** (2021). Influence of the Insertion of Boron and Phosphorus on the Optical and Structural Properties of Silicon Nanocrystals in a Silica Matrix. Doctoral Thesis, Université de Lorraine, Nancy.
- Tumbul, A.** (2019). Effect of monoethanolamine content on the crystallinity of ZnO thin films. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi*, 14(1), 155-161.
- Tüzemen, Ş. E.** (2007). ZnO İnce Filmlerinin Eldesi ve Aygıt Üretimi İçin Parametrelerinin Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye.
- Umar, H., Kavaz, D., and Rizaner, N.** (2019). Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles using Albizia lebbeck stem bark, and evaluation of its antimicrobial, antioxidant, and cytotoxic activities on human breast cancer cell lines. *International journal of nanomedicine*, 14, 87-100.
- Urbach, F.** (1953). The long-wavelength edge of photographic sensitivity and of the electronic absorption of solids. *Physical review*, 92(5), 1324.
- Ünal, F. A.** (2023). Production and characterization of alkali metal doped ZnO materials. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(3), 883-890.
- Ünal, F. A.** (2024). Alkali metal katkılı ZnO malzemesinin üretimi ve karakterizasyonu. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(3), 1230-1241.
- Valéry, A.** (2017). Microtexture Characterization by Automated Crystal Orientation Mapping in TEM for the Development of Advanced Technologies in Microelectronics. Doctoral Thesis, Université Grenoble Alpes, Grenoble.
- Varol, Ü.** (2017). Hidrotermal Yöntemle ZnO ve Al Katkılı ZnO Filmlerinin Büyütülmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Vasconcelos, H. C., Lopes, J. A., Pereira, M. J., and Pinto, A. S.** (2020). Fluorescence behavior of phytoplankton blooms by time-correlated single-photon counting (TCSPC). In: *Fluorescence Methods for Investigation of Living Cells and Microorganisms*, IntechOpen, London, 1-20.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Viter, R., Iatsunskyi, I., Fedorenko, V., Tumėnas, S., Balevičius, Z., Ramanavičius, A., Balme, S., Kempinski, M., Nowaczyk, G., Jurga, S., and Bechelany, M.** (2016). Enhancement of Electronic and Optical Properties of ZnO/Al₂O₃ Nanolaminate Coated Electrospun Nanofibers. *The Journal of Physical Chemistry C*, 120(9), 5124.
- Xin, M.** (2018). Effect of Eu doping on the structure, morphology and luminescence properties of ZnO submicron rod for white LED applications. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 12(3), 177-182.
- Yahi, A. H., Kacha, A. H., Anani, M., and Salim, K.** (2025). Optimizing Al-doped ZnO thin films: structural, optical, and electrical enhancements for solar cells. *Physics of the Solid State*, 67(4), 259–268.
- Yang, D.** (Ed.) (2022). *Thin Films - Deposition Methods and Applications*. IntechOpen, London, 140.
- Yasir, A. S., Hussein, B. M., Hameed, A. S., Ridha, N. J., Alosfur, F. K. M., Tahir, K. J. and Madlol, R. A.** (2022). Design and fabrication of a low-cost dip coating system for depositing homogeneous and transparent ZnO thin films. *Al-Bahir Journal for Engineering and Pure Sciences*, 1(2), 1-12.
- Yavru, C. A., Üncü, İ. S., Kaleli, M. ve Akyürekli, S.** (2022). CIGS ince film yüzeyindeki morfolojik farklılıkların GLCM görüntü işleme yöntemi ile incelenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi*, 17(2), 460-469.
- Yin, Y.** (2023). Advances and perspectives of spin coating techniques. *Applied and Computational Engineering*, 7(1), 291-296.
- Zhang, Y.** (2020). Fabrication, Structural and Spectroscopic Studies of Wide Bandgap Semiconducting Nanoparticles of ZnO for Application as White Light Emitting Diodes. Doctoral Thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA Lyon), Lyon.
- Zhao, Z., and Yang, P.-Z.** (2014). Insight into insulator-to-metal transition of sulfur-doped silicon by DFT calculations. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 16(33), 17499.
- Znaidi, L.** (2010). Sol–gel-deposited ZnO thin films: A review. *Materials Science and Engineering: B*, 174(1-3), 18-30.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Osman Salih GÜNDOĞDU

Doğum tarihi ve yeri :

e-posta :

Öğrenim Bilgileri	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi / Fizik Bölümü	2026
Y. Lisans	Çankırı Karatekin Üniversitesi / İş Sağlığı ve Güvenliği	2025
Lisans	Balıkesir Üniversitesi / Fizik Bölümü	2023
Lise	Bahçelievler Anadolu Lisesi Bulancak/ Giresun	2018

Yayın Listesi

Gündoğdu, O. S. ve Güngör, E. (2024). ZnO ince filmlerin yapısal, morfolojik ve luminesans özelliklerine tavlama sıcaklığının etkisi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 14(4), 1529-1537. <https://doi.org/10.21597/jist.1520695>

Gündoğdu, O. S., Karaduman, F. ve Güngör, E. (2026). Beyaz Işık Yayan İndiyum Katkılı ZnO İnce Filmlerde Tavlama Sıcaklığının Etkisi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 16(2), 806-826. <https://doi.org/10.31466/kfbd.1739077>