



BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ

**BİLECİK
ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**KATKILI METAL OKSİT İNCE FİLMLEİN ÜRETİMİ
VE BAZI FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Mehmet Fatih GÖZÜKIZIL
Doktora Tezi**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Nurgül ÖZBAY**

**İkinci Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Sinan TEMEL**

**BİLECİK 2020
Ref. No: 10340062**



BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ

**BİLECİK
ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**KATKILI METAL OKSİT İNCE FİLMLEİN ÜRETİMİ
VE BAZI FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Mehmet Fatih GÖZÜKIZIL
Doktora Tezi**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Nurgül ÖZBAY**

**İkinci Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Sinan TEMEL**

BİLECİK 2020



BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ

**BİLECİK
SEYH EDEBALI UNIVERSITY**

**Graduate School of Sciences
Department of Energy Systems Engineering**

**FABRICATION OF DOPED METAL OXIDE THIN FILMS
AND INVESTIGATION OF THEIR SOME PHYSICAL
PROPERTIES**

Mehmet Fatih GÖZÜKIZIL
Doctoral Thesis

Thesis Advisor
Prof. Dr. Nurgül ÖZBAY

Co-Advisor
Assist. Prof. Dr. Sinan TEMEL

BİLECİK 2020

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam ve lisansüstü eğitim hayatım boyunca engin tecrübelerinden ve bilgisinden yararlandığım, öğrencisi olmaktan her zaman onur duyduğum bana yol gösteren saygı değer hocam Prof. Dr. Nurgöl ÖZBAY'a en içten saygı ve teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora öğrenimim süresince bilgi ve fikirlerini hiçbir zaman esirgemeyen, gerek bir bilim adamı gerekse insanı vasıfları ile her zaman yanımda olduğunu hissettiren, özellikle tüm deneysel çalıőmalarımnda titizlik, sabır ve özveriyle katkılarını esirgemeyen çok kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Sinan TEMEL'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalıőmalarımın her aşamasında desteklerini ve yardımını esirgemeyen değerli arkadaşım Mehmet Süleyman YILDIRIM'a, tez sürecinde yanımda olduğunu hissettiren Doç. Dr. Cenk KARAKURT'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca maddi manevi desteklerini benden esirgemeyen, yetişip değerli mesleğime sahip olmamı sağlayan, her zaman bana güç veren aileme minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında yanımda olan, yoğun çalışma sürecimde yardımlarını esirgemeyen, iyi ve kötü günleri birlikte paylaőtığımız, çok değerli ve sevgili eşim Ebru GÖZÜKIZIL'a sabır ve anlayışlılarından dolayı, tüm sıkıntılarımla başa ıkمامı sağlayan oğullarım Ömer Efe ve Mert Ali'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

BEYAN

Katkılı Metal Oksit İnce Filmlerin Üretimi Ve Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi adlı doktora tezi hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel ahlak kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırmalar Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte beyan edilmelidir.			
DESTEK ALINMIŞTIR	<input checked="" type="checkbox"/>	DESTEK ALINMAMIŞTIR	<input type="checkbox"/>
Destek alındı ise;			
Destekleyen Kurum: Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)	<input checked="" type="checkbox"/>	2018- 01.BŞEÜ.11-02	
2- TÜBİTAK	<input type="checkbox"/>		
Diğer;			

Öğrenci Adı ve Soyadı

Mehmet Fatih GÖZÜKIZIL

Tarih

15.06.2020

İmza

.....

ÖZET

Günümüz teknoloji dünyasının sürekli gelişmesi daha çok katma değerli ürünler işlenebilmesine olanak sunmaktadır. Bu da alternatif ve ekonomik yarıiletken malzemelere olan ihtiyacı artırmaktadır. Yarıiletken teknolojisinin maliyetinin düşürülmesi ve kolay ulaşabilir olması ince filmlerle mümkün olmaktadır. Bu çalışma kapsamında ZnO ince filmler kompleks ve pahalı teknoloji ile yapılan üretim tekniklerine alternatif olarak geliştirilen ve literatürde ilk defa kullanılacak “Sol-Gel Manyetik Döndürerek Kaplama yöntemi” ile elde edilmiştir. Geliştirilen bu teknikte döndürme işlemi, diğer pahalı tekniklerden farklı şekilde manyetik olarak gerçekleştirilmektedir. Özgün yüzeysel özellikleri bulunan çeşitli metallere katılarak elektriksel yapıları değiştirilebilen ZnO ince filmler birçok güncel teknolojik alanlarda kullanılmaktadır. Al ve Cd katılama işlemi % 1, % 3 ve % 5 oranlarında artırılarak yapılmıştır. Katkılı ve katkısız ZnO ince filmlerin bazı fiziksel özellikleri, X-Işını Kırınımı (XRD) Cihazı, Alan Emisyonu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) ve UV-Vis. Spektrofotometresi kullanılarak incelenmiştir. Yapılan XRD analizlerinde elde edilen tüm ince filmlerin polikristal yapıda olduğu ve hekzagonal ZnO yapısı ile birebir örtüştüğü görülmüştür. FESEM görüntüleri incelendiğinde ise, filmin tüm yüzeyine hemen hemen homojen dağılmış nanoboyutta taneciklerden meydana geldiği görülmüştür. UV-Vis. Spektroskopisi ölçümleri ile elde edilen yasak enerji aralığı değerleri yaklaşık 3.3 eV olarak hesaplanmıştır. Katkılı ZnO ince filmlerin özellikleri incelendiğinde, kaplamanın yüzeye homojen olarak dağıldığı, katılama miktarı arttıkça tane boyutu değerlerinin arttığı ve yüzeyde boşlukların yok olduğu dolayısıyla birbirlerine daha iyi tutunan nanoboyuttaki taneciklerden oluştuğu görülmüştür. Ayrıca katkılı ince filmlerde yasak enerji aralığı değerlerinin katılama miktarı arttıkça azaldığı gözlemlenmiştir. Literatürde ilk defa kullanılan bu ince film üretim tekniği ile katkılı ve katkısız ince filmler daha basit ve ekonomik bir şekilde rahatlıkla üretilebilmiştir.

Anahtar Kelimeler

İnce Film; Sol-Gel; Manyetik döndürerek kaplama; ZnO; Al katkılı ZnO; Cd katkılı ZnO

ABSTRACT

The continuous development of today's technology allows more value-added products to be processed. This increases the need for alternative and economical semiconductor materials. Reducing the cost of semiconductor technology and making it easily accessible is possible with thin films. In this study, ZnO thin films were obtained by "Sol-Gel Magnetic Rotating Coating method which was used for the first time in the literature and developed as an alternative to production techniques made with complex and expensive technology. In this developed technique, the spinning process is performed magnetically, unlike other expensive techniques. ZnO thin films are used in many current technological fields and their electrical structure can be changed by adding various metals with specific surface properties. Doping of Al and Cd was done by increasing at the ratio of 1%, 3% and 5%. Some physical properties of doped and undoped ZnO thin films were examined using X-Ray Diffraction (XRD), Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) and UV-Vis. Spectrophotometer. XRD analysis showed that all thin films were polycrystalline and overlapped with hexagonal ZnO structure. When FESEM images were examined, it was seen that the film consisted of particles of nanoscale which were almost homogeneously distributed over the entire surface of the film. The band gap values obtained by UV-Vis. Spectroscopy measurements were calculated as approximately 3.3 eV. When the properties of doped ZnO thin films were examined, it was seen that the coating was distributed homogeneously on the surface, the particle size values increased as the doping amount increased and the cavities on the surface disappeared and thus formed of nanoscale particles which were held better to each other. In addition, it was observed that band gap values decreased with increasing amount of doped films. With this thin film production technique, which was used for the first time in the literature, thin films, with and without additives, could be produced more easily and economically.

Key Words

Thin Film; Sol-Gel; Magnetic spin coating ; ZnO; Al doped ZnO; Cd doped ZnO

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEŞEKKÜR
BEYANNAME
ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ.....	1
2.MATERYAL YÖNTEM	3
2.1.Yarıiletkenler	3
2.1.1.Yarıiletkenlerde Katkılama.....	4
2.1.2.n – Tipi Yarıiletkenler.....	5
2.1.3.p – Tipi Yarıiletkenler.....	6
2.2.Metal Oksit İnce Filmler	7
2.3.İnce Film Üretim Teknikleri.....	8
2.3.1.Gaz Fazda Büyütme	9
2.3.2.Sıvı Fazda Büyütme	11
2.3.3.Katı Fazda Büyütme	13
2.4.Sol-Gel Yöntemi.....	13
2.5.Döndürerek Kaplama (Spin Coating) Tekniği	15
2.6.Manyetik Döndürerek Kaplama Tekniği	17
2.7.Literatür Özeti	18
3.DENEYSEL YÖNTEM	25
3.1.Manyetik Döndürerek Kaplama Sisteminin Kurulumu.....	25
3.2.Manyetik Döndürerek Kaplama Yöntemi	26
3.3.Sol-Gel Çözeltilerinin Hazırlanması	27
3.4.Deney Parametrelerinin Belirlenmesi	27
3.5.Deneyin Yapılışı.....	29
3.5.1.Katkısız ZnO Kaplama Deneyinin Yapılışı	29

3.5.2.Cd Katkılı ZnO Kaplama Deneyinin Yapılışı.....	29
3.5.3.Al Katkılı ZnO Kaplama Deneyinin Yapılışı	30
4.DENEYSEL SONUÇLAR.....	31
4.1.İnce Filmlerin Yapısal Karakterizasyonu	31
4.1.1.ZnO İnce Filmlerinin Yapısal Karakterizasyonu.....	33
4.1.2.Cd Katkılı ZnO İnce Filmlerin Yapısal Karakterizasyonu	43
4.1.3.Al Katkılı ZnO İnce Filmlerin Yapısal Karakterizasyonu.....	46
4.2.İnce Filmlerin Yüzeysel Karakterizasyonu	49
4.2.1.ZnO İnce Filmlerin Yüzeysel Karakterizasyonu	52
4.2.2.Cd Katkılı ZnO İnce Filmlerin Yüzeysel Karakterizasyonu	56
4.2.3.Al Katkılı ZnO İnce Filmlerin Yüzeysel Karakterizasyonu	60
4.3.İnce Filmlerin Optik Karakterizasyonu	63
4.3.1.ZnO İnce Filmlerinin Optik Karakterizasyonu.....	64
4.3.2.Cd katkılı ZnO İnce Filmlerinin Optik Karakterizasyonu	66
4.3.3.Al katkılı ZnO İnce Filmlerinin Optik Karakterizasyonu.....	67
5.SONUÇ VE ÖNERİLER.....	69
KAYNAKLAR	73
ÖZ GEÇMİŞ.....

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 2.1. Mutlak sıfır sıcaklığında iletim ve valans bantları.	4
Şekil 2.2. Saf Silisyum yapısı	5
Şekil 2.3. Si kristaline P katkılanması	6
Şekil 2.4. Si kristaline B katkılanması	7
Şekil 2.5. Sol-Gel Yöntemi.....	14
Şekil 2.6. Döndürerek Kaplama Tekniği	16
Şekil 2.7. Manyetik Döndürerek Kaplama Tekniği.....	17
Şekil 3.1. Sol-gel manyetik döndürerek kaplama tekniği şematik gösterimi.	25
Şekil 4.1. X-ışınlarının kristal tarafından kırınımı.....	32
Şekil 4.2. X-ışını Kırınımı (XRD) cihazı.....	34
Şekil 4.3. A1 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu	35
Şekil 4.4. A2 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu	35
Şekil 4.5. A3 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu.	36
Şekil 4.6. A serisi ince filmlerin karşılaştırmalı XRD analiz spektrumu.....	36
Şekil 4.7. B1 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu.....	37
Şekil 4.8. B2 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu.....	38
Şekil 4.9. B3 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu.....	38
Şekil 4.10. B serisi ince filmlerin karşılaştırmalı XRD analiz spektrumu.....	39
Şekil 4.11. C1 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu.....	40
Şekil 4.12. C2 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu.....	40
Şekil 4.13. C3 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu.....	41
Şekil 4.14. C serisi ince filmlerin karşılaştırmalı XRD analiz spektrumu.....	41
Şekil 4.15. ZnO ince filmlerin karşılaştırmalı XRD analiz spektrumu.....	42
Şekil 4.16. CZO1 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu.	44
Şekil 4.17. CZO3 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu.	44
Şekil 4.18. CZO5 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu.	45
Şekil 4.19. Katkısız ZnO ile katkılı CZO ince filmlerin karşılaştırmalı XRD analiz spektrumu.....	45
Şekil 4.20. AZO1 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu.	47
Şekil 4.21. AZO3 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu.	47

Şekil 4.22. AZO5 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu.	48
Şekil 4.23. Katkısız ZnO ile katkılı AZO ince filmlerin karşılaştırmalı XRD analiz spektrumu.....	48
Şekil 4.24. Taramalı elektron mikroskobu.....	51
Şekil 4.25. Alan Emisyonu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM).....	53
Şekil 4.26. C3 serisi ZnO ince filmlerin 20kx büyütme FESEM görüntüleri.	54
Şekil 4.27. C3 serisi ZnO ince filmlerin 50kx büyütme FESEM görüntüleri.	54
Şekil 4.28. C3 serisi ZnO ince filmlerin 100kx büyütme FESEM görüntüleri	55
Şekil 4.29. C3 serisi ZnO ince filmlerin tane boyutu değerleri.	56
Şekil 4.30. ZnO serisi ince filmlerin FESEM görüntüleri.	57
Şekil 4.31. CZO1 serisi ince filmlerin FESEM görüntüleri.....	57
Şekil 4.32. CZO3 serisi ince filmlerin FESEM görüntüleri.....	58
Şekil 4.33. CZO5 serisi ince filmlerin FESEM görüntüleri.....	58
Şekil 4.34. Katkısız ZnO ile katkılı CZO ince filmlerin karşılaştırmalı FESEM görüntüleri.	59
Şekil 4.35. AZO1 serisi ince filmlerin FESEM görüntüleri	60
Şekil 4.36. AZO3 serisi ince filmlerin FESEM görüntüleri.	61
Şekil 4.37. AZO5 serisi ince filmlerin FESEM görüntüleri.	61
Şekil 4.38. Katkısız ZnO ile katkılı AZO ince filmlerin karşılaştırmalı FESEM görüntüleri.	62
Şekil 4.39. UV-Vis. Spektrofotometresi	65
Şekil 4.40. ZnO yasak enerji aralığı grafiği.....	66
Şekil 4.41. Cd katkılı ZnO yasak enerji aralığı grafiği.....	67
Şekil 4.42. Al katkılı ZnO yasak enerji aralığı grafiği.....	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 2.1. İnce Film Üretim Yöntemleri.....	9
Çizelge 3.1. ZnO serisi için filmlerin kaplama parametreleri.....	28
Çizelge 3.2. Cd katkılı ZnO serilerin adlandırılması.	28
Çizelge 3.3. Al katkılı ZnO serilerin adlandırılması.....	29
Çizelge 4.1. A serisi piklerine ait bilgiler.	37
Çizelge 4.2. B serisi piklerine ait bilgiler.	39
Çizelge 4.3. C serisi piklerine ait bilgiler.	42
Çizelge 4.4. A3, B3 ve C3 serilerinin piklerine ait bilgiler.	43
Çizelge 4.5. Katkısız ZnO ile katkılı CZO ince filmlerin tane boyutu değerleri.....	46
Çizelge 4.6. Katkısız ZnO ile katkılı AZO ince filmlerin tane boyutu değerleri.....	49
Çizelge 4.7. C3 serisi ZnO ince filmlere ait EDX sonuçları.....	56
Çizelge 4.8. CZO ince filmlere ait EDX sonuçları	60
Çizelge 4.9. AZO ince filmlere ait EDX sonuçları.....	63
Çizelge 4.10. Yasak enerji aralığı değerleri.....	67
Çizelge 4.11. İnce filmlerin yasak enerji aralığı değerleri.....	68

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ**Simgeler**

mm: Milimetre

cm: Santimetre

°C: Santigrat derece

D: Tane boyutu

d: Düzlemler arası mesafe

E_c : İletim bandının enerjisi

E_g : Yasak enerji aralığı

E_v : Valans bandının enerjisi

eV: Elektron volt

g: Gram

K: Kelvin

M: Molar

λ : Dalga boyu

μ l: Mikrolitre

μ m: Mikrometre

v: Frekans

ρ : Özdirenç

σ : Elektriksel iletkenlik

Ω cm: Ohm santimetre

θ : Gelen ışık ile yansıtıcı düzlem arasındaki açı

θ_B : Bragg açısı

2θ : Kırınım açısı

B: Yarı pik genişliği

n: Yansıma mertebesi

Å: Angstrom

Kısaltmalar

XRD: (X-Ray Diffraction) X-Işını Kırınımı

EDX: Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi

FESEM: (Field Emission Scanning Electron Microscope) Alan Emisyon
Taramalı Elektron Mikroskobu

FWHM: (Full Width Half Maximum) Yarı pik genişliği

ICDD: (International Center for Diffraction Data) Uluslararası Kırınım Veri
Merkezi

LED: (Light Emitting Diode) Işık yayan diyot

MEA: Monoetanolamin

UV: Ultraviyole

RF: Radyo frekansı

SEM: (Scanning Electron Microscope) Taramalı Elektron Mikroskobu

1. GİRİŞ

Asırlardan beridir metaller inceltiirerek ahşap, seramik ve cam yüzeylerde aktif olarak kullanılmış olup, özellikle 1940'lerden sonra ince film teknolojisi kullanımına olan ilginin artması ile günümüze kadar gelişerek taşınmıştır. Yaşanan teknolojik gelişmeler ile ince filmlerin kullanım alanları da çeşitlenmiştir. Optoelektronik endüstrisinin mikro ve nano yapılı malzeme üretiminin temelini oluşturan ince filmler, elektronik aygıt teknolojilerinin sürekli gelişmesi ile katma değerli ürünler işlenebilmesine olanak sunmaktadır. Birçok cihazın yarıiletkenlerinde, optoelektronik diyotlarda, optik ve elektriksel özellik gösteren maddelerin ince tabakalarının oluşumunda ince film teknolojisinden yararlanılmaktadır.

Çeşitli üretim yöntemleri kullanılarak, kaplanacak materyalin atomlarının veya moleküllerinin filmi desteklemesi ile filmin meydana gelmesine yardımcı olan bir alttaş üzerine dizilmesi ve ince bir katman halinde oluşturulan, genellikle 1 mikrometrenin altında kalınlığa sahip olan malzemeler ince film olarak adlandırılır (Bilgin, 2003). İnce film teknolojisi, endüstrinin gelişimi için gerekli nano boyutta yeni malzeme sentezinde önemli ve büyük bir artışa yol açmıştır. Bu gelişmeler ile mikroelektronik, optik ve nanoteknoloji alanlarında ilerlemeler hızlanmıştır. Filmler kullandıkları malzemelere, ömürlerinin artması, ısıya ve basınca dayanımı gibi birçok etkin özellikleri kazandırmıştır. Bilişim teknolojilerinde, sıkça kullandığımız elektronik cihazların yapımında, optik ve elektronik devrelerde ince filmler aktif olarak kullanılmaktadır (Eckertová, 1986).

Yarıiletken ince film teknolojisinde metal oksit ince filmler, elektronik, manyetizma, optik, güneş enerjisi depolaması, piller, fotovoltaik malzemeler, gaz ve nem sensörleri gibi geniş uygulama alanları ile teknolojik ve bilimsel araştırmalarda dikkat çekici malzemelerdir. Çinko oksit (ZnO) de metal oksitlerin içerisinde çok popüler ve çok çalışılan bir malzemedir. Çinkonun zehirsiz ve doğada bol miktarda mevcut bir element olması, ZnO kullanımının artmasındaki en büyük etken olmuştur (Addonizio vd., 2014). ZnO oldukça geniş yasak enerji aralığı değerine (~3,3 eV) sahip ve direkt bant yapılı bir yarıiletkendir. Geniş bant aralığından dolayı elektromanyetik dalga spektrumunun mavi ve morötesi bölgesinde LED yapımı için uygun malzeme olarak kabul edilmektedir (Salam vd., 2013).

Optik, basınç ve ısı elektriksel özelliklerinin iyi olması ve ayrıca toksik madde içermeyerek çevresel duyarlılığı, kolay ulaşılabilir, kullanışlı ve maliyetinin uygun olması sebepleri ile ZnO yarıiletkenler birçok kullanım ve uygulama alanına sahiptir. Bu uygulamalar; gaz sensörleri, ince film transistörler, fotoelektrik cihazlar, optoelektronik cihazlar, güneş hücreleri, UV dedektörler, piezoelektrik güç çeviriciler, yüzey akustik devreleri, termoelektrik aygıtlar, pH sensörleri, biosensörler gibi uygulamalardır (Tsay vd., 2010).

ZnO'nun özellikleri ısı ile işlemle veya uygun katkı ile değiştirilebilmektedir. Katkı atomu olarak Al, In, Ga, Li, Cu, Sn ve Mg kullanıldığı pek çok uygulama alanı vardır. Çinko oksit yarıiletkenine Al, In, Ga gibi iyon katkıları yapılarak iletkenliği artırılabilir (Lee vd., 2014; Qian vd., 2013). Sn katkılı ZnO ince filmlerin optik geçirgenlikleri artarken, özdirençlerinde azalma meydana gelmektedir, bu durum güneş pilleri yapımı için çok avantajlı bir durumdur (Pan vd., 2014). Yasak enerji aralığı Mg katkısı ile kolayca değiştirilerek genişletilebilir (Fen vd., 2019). Katkılı ve katkısız ZnO ince filmler; Lazer depolama, ultrasonik sprej, magnetron saçırma, elektron demetli buharlaştırma ve sol-gel gibi birçok teknikte üretilebilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan sol-gel döndürerek kaplama tekniği, literatürde katkılı ve katkısız ZnO ince filmlerin üretiminde sıklıkla kullanılan bir tekniktir. Bu teknikte, döndürme işlemini yapabilmek için pahalı ve yurt dışından ithal edilen sistemler kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında döndürme işlemi, literatürde ilk defa kullanılan, çok daha basit ve ucuz bir yöntem olan manyetik döndürücü ile gerçekleştirilmiştir. ZnO ince filmler, diğer yöntemlere göre daha basit olan Sol-Gel Döndürerek Kaplama yönteminin geliştirilmesi ile literatürde ilk defa kullanılacak olan düşük maliyetli Sol-Gel Manyetik Döndürerek Kaplama yöntemi ile elde edilmiştir. İleri teknoloji ve maliyetli cihaz kullanımı gerektiren ince film üretim tekniklerine alternatif olarak geliştirilen ve literatürde ilk kez kullanılan Sol-Gel Manyetik Döndürerek Kaplama yöntemi ile katkısız ZnO ince filmler, 1%, 3% ve 5% Al ve Cd katkılanarak üretilen ZnO ince filmler üretilmiştir. Üretilen katkılı ve katkısız ZnO ince filmlerin yapısal, yüzeysel ve optik özellikleri, X-Işını Kırınımı (XRD) Cihazı, Alan Emisyonu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) ve UV-Vis. Spektrofotometresi kullanılarak karakterize edilmiştir.

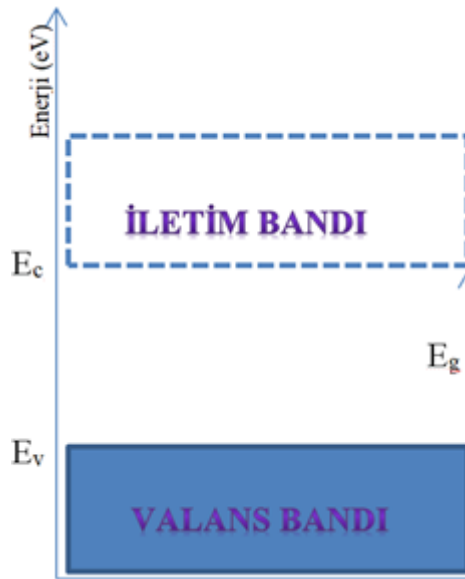
2. MATERYAL YÖNTEM

2.1. Yarıiletkenler

Kristal yapılı elektroniğin çağdaş temeli ne metal ne de yalıtkan olan yarıiletken olarak isimlendirilen malzemelere dayanmaktadır. Yarıiletkenlerin elektriksel özellikleri iletken ve yalıtkan malzemelerin arasında orta seviyede almaktadır. Bunun nedeni yarıiletkenlerin elektron enerji seviyelerinin oldukça özel bir düzende olmasıdır (Phillips, 2010). Oda sıcaklığında yalıtkanlar 10^{14} ile 10^{20} $\Omega.cm$ aralığında özdirence, iletkenler ise 10^{-6} $\Omega.cm$ 'den daha küçük özdirence sahipken, yarıiletkenlerin özdirençleri iletkenlerin ve yalıtkanların arasındaki bölgede 10^{-2} ile 10^9 $\Omega.cm$ aralığında değişmektedir. Sıcaklığın değişimi ile yarıiletkenlerin elektriksel iletkenliği de değişiklik göstermektedir. Yarıiletkenlerin özdirenci sıcaklığın artması ile küçülürken sıcaklık azaldıkça artar ve mutlak sıfır noktasına geldiğinde yalıtkanlık özelliği gösterir (Dikici, 2012).

Yarıiletkenler farklı fiziksel ve kimyasal özellikleri olan malzemelerdir. Bu maddeler, elementlerin periyodik cetveldeki yerine bağlı olarak, benzer davranışlı gruplara ayrılırlar. En iyi bilinen yarıiletkenler periyodik cetvelin IV. sütunundaki C (karbon-elmas), Si (silisyum), Ge (germanyum) ve α -Sn (alfa-kalay) tarafından oluşan yarıiletkenlerdir. Bunlardan yoğun çalışmalara konu olan Si ve Ge elektronik teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. III. ve V. grup bileşikleri yarıiletkenlerin başka bir sınıfını oluştururlar. Bu grubun en iyi bilinen örnekleri GaAs ve InSb'dir. II. ve VI. grup bileşikleri yarıiletkenlere örnek olarak CdS ve ZnS verilebilir. Bağ, esas olarak kovalent özelliklidir. Yük aktarımı; III. ve V. gruptakilerden daha büyüktür (Dikici, 2012).

Katıyı oluşturmak üzere bir araya gelen çok sayıdaki atomların elektronları belirli enerji düzeyleri ile katıların bant yapılarını oluşturmaktadır. Elektronların kararlı durumda buldukları enerji bandına valans bandı (E_v), uyarıldıklarında ulaşabildikleri enerji bandına ise iletim bandı (E_c) denir. Mutlak sıfır sıcaklığında iletim bandı tamamen boş iken tüm elektronlar valans bandını tamamen doldurur. Yasak enerji aralığı (E_g) olarak adlandırılan ve valans bandı ile iletim bandı arasında yer alan bölgede serbest elektron bulunmaz (Pankove, 1975). Şekil 2.1'de mutlak sıfır sıcaklığında yasadık enerji aralığı, iletim ve valans bantları gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Mutlak sıfır sıcaklığında iletim ve valans bantları.

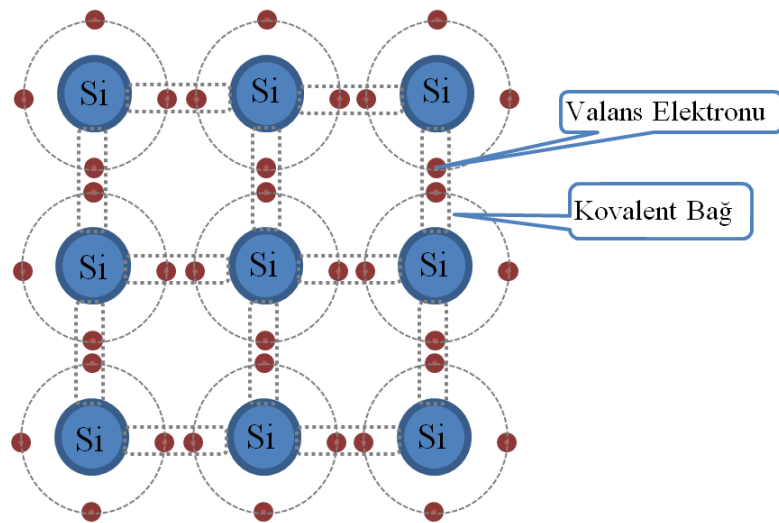
Yasak enerji aralığı değerlerine göre malzemeler üç grupta sınıflandırılmaktadır. İletkenlerde yasak enerji aralığı neredeyse bulunmayarak iletim bandı ile valans bandı iç içe geçmiş durumdadır. Yarıiletkenlerde ise yasak enerji aralığı 4eV mertebesinin altında olmaktadır. Yalıtkanlarda bu aralık oldukça büyük olduğundan elektronların valans bandından iletim bandına geçebilmeleri imkansızdır (Kittel, 1996).

2.1.1. Yarıiletkenlerde Katkılama

Has bir yarıiletkende elektron ve boşluk (hol) konsantrasyonları birbirine eşittir. Çünkü bir elektron valans bandından iletim bandına ısıl veya optik uyarılma ile çıkarılırken geride daima bir hol bırakır. Has yarıiletkenlere katkılama işlemi, uygun atomların yarıiletken içine çeşitli tekniklerle katkılanmasıyla yapılır. İstenilen özellikte yarıiletken elde etmek için, yarıiletken içerisinde belirli oranda safsızlık atomları kullanılır. Buna göre yarıiletken içine giren atom ortama elektron vererek (donör) iyonlaşır ve iletkenliğe katkıda bulunursa “n-tipi yarıiletken”; yarıiletken içine giren atom, içinde bulunduğu ortamdan elektron alarak (akseptör) iyonlaşır ve iletkenliğe bu şekilde katkıda bulunursa “p-tipi yarıiletken” olarak adlandırılır. Katkılı yarıiletken oluşturulması hem taşıyıcı konsantrasyonunu artırmak için gerekli olurken hem de diyot, transistör gibi elektronik devre elemanı yapımına imkan vermektedir (Omar, 1975).

2.1.2. n – Tipi Yarıiletkenler

Yarıiletken element donör atomlarıyla katkılanarak n-tipi katkılama elde edilir. V. grup elementlerinden biri (P, As, Sb,...) IV. grup elementlerinden Silisyum (Si) kristaline katkılanarak n-tipi Si yarıiletkeni elde edilmesi n-tipi katkılama işlemine örnek olarak verilebilir. Saf Si atomları komşusu olan Si atomları ile kovalent bağ yapar. Şekil 2.2’de bağlar Si atomunun valans elektronları ve ikişer elektron içeren bağ yapısı gösterilmiştir.

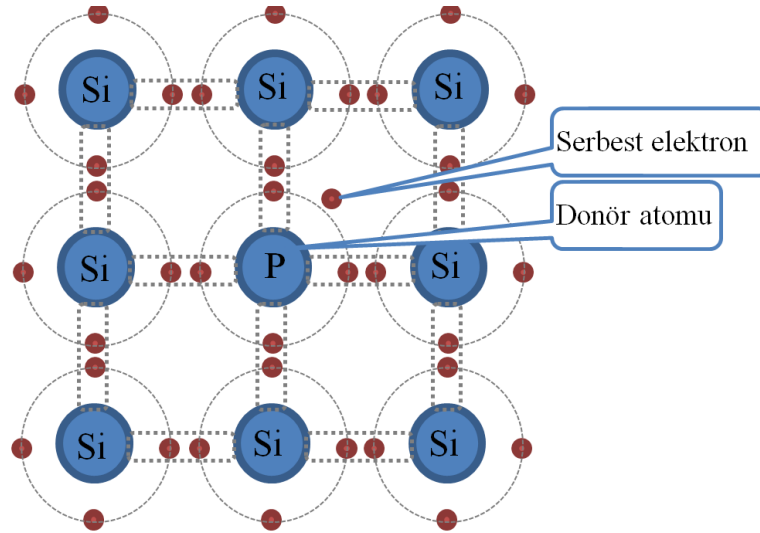


Şekil 2.2. Saf Silisyum yapısı

Tüm elektronlar kovalent bağ ile bağ yapısına katıldıklarından, herhangi bir elektronun iletim bandına geçmesi için yasak enerji aralığına (E_g) eşit ve ya daha büyük enerjiye ihtiyaç duyar.

V. grup elementlerin yörüngelerinde beş elektronu bulunduğundan katkılama atomu olarak kullanılır. Şekil 2.3’deki gibi Si kristalinin Fosfor (P) ile katkılanması düşünüldüğünde; Fosforun valans bandında bulunan beş elektronunun dört tanesi Si atomları ile kovalent bağ yaparken bir elektron çok zayıf elektostatik kuvvetle Si atomuna bağlanır ve az bir enerji ile buradan koparılabilir. Zayıf kuvvetle bağlı bu elektron Si atomu elektronlarının yasak enerji aralığı değerinden çok daha küçük bir enerji ile iletim bandına geçebilir. Valans bandında iletim bandına geçen elektrona karşılık bir boşluk oluşmaz. Elektron veren P atomu donör atomu olarak isimlendirilir.

n-tipi yarıiletkenin azınlık taşıyıcıları boşluklarken çoğunluk taşıyıcıları ise elektronlardır (Sailor, 2012).

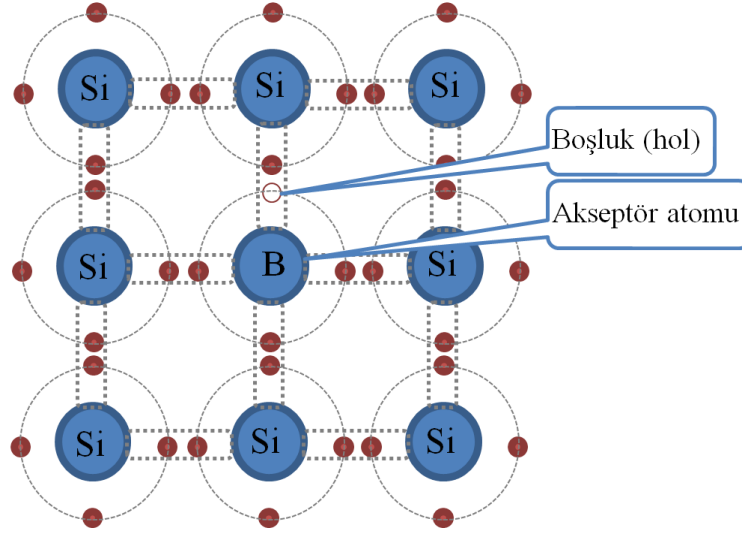


Şekil.2.3. Si kristaline P katkılanması

2.1.3. p – Tipi Yarıiletkenler

p-tipi katkılamada yarıiletken, akseptör atomları ile katkılanmıştır. Akseptör olarak periyodik tablonun III. grup elementlerinden (B, Ga, Al, In, ...) biri, IV. grup elementlerinden Silisyum (Si) kristaline katkılanarak p-tipi Si yarıiletkeni elde edilmesi p-tipi katkılama işlemine örnek olarak verilebilir.

III. Grup elementlerinden olan Bor (B) Şekil 2.4’de görüldüğü gibi Si kristaline katkılanırsa, Si atomları ile borun 3 elektronu kovalent bağ yapar ve kristalde bir boşluk (hol) kalır. Komşu atomun elektronlarından biri çok az bir enerji ile buraya gelebilir. Dolayısıyla yasak enerji aralığından daha küçük bir enerji ile valans bandında boşluk oluşur. Valans bandında oluşan bu boşluğa karşılık iletim bandında bir elektron oluşmaz. Burada, B atomu, elektron aldığı için akseptör atomu olarak isimlendirilir. p-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk taşıyıcıları boşluklar, azınlık taşıyıcıları ise elektronlardır (Sailor, 2012).



Şekil.2.4. Si kristaline B katkılanması

2.2. Metal Oksit İnce Filmler

Metal oksitler; bant aralıklarının geniş olması, elektriksel iletkenliklerinin iyi olması, optiksel geçirgenliğe sahip olması, IR bölgesinde yüksek yansıtma gibi özellikleri sayesinde çeşitli alanlarda kullanılabilir. Metal oksit ince filmler; elektronikten, manyetizmaya, optik ve güneş enerjisi korunumundan pillere ve fotovoltaik malzemelere, gaz ve nem sensörleri gibi geniş uygulama alanları olan malzemelerdir (Xia vd., 2017).

Yarıiletken teknolojisinde güncel olarak çok çeşitli alanlarda ince filmler kullanılmaktadır. Çinko oksit (ZnO), indiyum kalay oksit (ITO), kadmiyum oksit (CdO), Magnezyum oksit (MgO) ve Bakır oksit (CuO) gibi birçok farklı metal oksit ince filmler üzerine son zamanlarda birçok çalışmalar yapılmıştır (Carballeda-Galicia vd., 2000).

Zehirli kadmiyum kimyasal içeren CdO ince filmler ile az bulunan ve değerli indiyum içeren ITO ince filmlerin kullanım alanları kısıtlıdır. Fakat metal oksit ince filmler arasında yer alan yüksek optik geçirgenliği ve geniş bant aralığına sahip ZnO ince filmler, toksik madde içermeyerek çevresel duyarlı, kolay ulaşılabilir, kullanışlı ve maliyetinin uygun olması sebepleri ile geniş kullanım alanına sahiptir (Kanmani & Rhim, 2014).

Yeni nesil yarıiletken olan ZnO ince filmler, gaz sensörleri, organik atık su arıtımı, fotovoltaik hücrelerin katmanları, fotodetektörler, çeşitli elektronik ve

optoelektronik cihazlar, biyosensörler, esnek veya giyilebilir UV ışık sensörler, spintronik cihazlar, biyomedikal uygulamalar ve yüzey akustik dalga (SAW) cihazlar gibi birçok kullanım alanına sahiptir (Chakraborty vd., 2018; Kumar vd., 2015; Md Ralib & Nordin, 2019).

ZnO yarıiletken ince filmler, Sn, Ga, In, Si, Mg, Ag ve Al, gibi metal elementler yardımıyla katkılanarak değişik özelliklere sahip olabilmektedirler. Yapılan birçok çalışmada metal elementler katkılanarak ZnO bileşiğinin elektrik iletkenliğinin arttığı (Azhar vd., 2018), optik özelliklerinin değiştiği (ZH Li vd., 2014) tespit edilmiştir. Aynı zamanda molekülün yüzey morfolojisinin (Fiaz Khan vd., 2018) ve absorpsiyon enerjisinin (Xu, Zheng, vd., 2019) de değiştiği gözlemlenmiştir. ZnO ince filmlere kadmiyum elementi ile katkılama işlemi yapılarak, kristal yapı kalitesinin artırılması, ışık emme katsayısının geliştirilmesi, bant boşluğunun azaltılması gibi yapısal, elektriksel ve optik özellikleri iyileştirilebilmektedir.

2.3. İnce Film Üretim Teknikleri

İnce Filmler vakumlu sistemlerin ilk kullanılmaya başlanmasından itibaren üretilmiştir, ancak teknolojik olarak cihazlarda kullanılmaya başlanması 40 yılı aşkın sürede geliştirilmiştir. Vakumlu sistemlerin gelişimi ile çeşitli modern yöntemlerle elde edilen ince film kaplamalarının kristal yapıları, elektriksel ve optik davranışları araştırılmaya başlanmıştır. Cam ve plastik bir taban üzerine ince metalik kaplamalar, elektronik ve optik amaçlı ve yüksek verimli olarak üretilmeye devam edilmektedir (Matthews, 1975). Endüstriyel üretimin geliştirilmesi için yapılan ince film çalışmaları ilk olarak cam ve seramik yüzeyler üzerine dekorasyon olarak kullanılmaya başlanmış, daha sonra gümüş tuzlarının cam yüzeyler üzerinde büyütülmesi ile gümüş filmleri elde edilmiştir. 19. yüzyılda bilimsel çalışmaların gelişmesi ile modern ve güncel ince film elde etme yöntemleri keşfedilmiştir. 1838 yılında ilk ince film elektroliz yöntemi ile elde edilmiş, 1852’de Bunsen kimyasal reaksiyon yöntemiyle, Faraday “asal gaz içerisinde buharlaştırma” yöntemiyle, Nahrwold ve Kundt “Joule ısıtması” yöntemiyle yine ince film elde etmişlerdir (Hass vd., 1973).

Yüzey maddenin dış ortamla temasta bulunduğu yani çevresel etkileşime girdiği kısımdır. Dış görüntü ve renk, sürtünme, aşınma ve korozyon gibi mekanik özellikler, ışık geçirgenliği, yansıma ve ışığı içeriye hapsedme gibi optik özellikler, ayrıca

elektriksel ve ısı özellikleri malzemelerin yüzeyleri tarafından belirlenir. Yüzey davranışı malzemenin belirtilen özellikler açısından nasıl davranacağını saptar. Bu tür özellikler iyileştirilmek istenildiğinde malzemenin tümünün yerine yüzeysel özelliklerinin iyileştirilmesi yeterlidir. Görselliği artırma ve oksitlenmeyi engelleme amaçlı metallerin boyanması, değerli olan altın yerine malzemelerin altın ile kaplanması yüzey özelliklerini iyileştirmeye örnek olarak verilebilir. Bazı durumlarda yüzeyden beklenen özellik malzemenin kütlesinden beklenmez. Aşınmaya karşı daha mukavemetli olması istenen malzemenin kütlesinin esnek olması istenildiğinde, malzemenin yüzeysel özelliği olan aşınma dayanımı iyileştirilerek, iç kısmının kırılabilirliği engellenebilir. Yüksek nitelikli bir malzemeyi tamamıyla üretmek ekonomik ve teknolojik olarak mümkün olmadığı durumlarda, ince film olarak yüzeyi kaplama tercih edilir ve yüzeysel olarak aynı özelliklerde malzemeler üretmek mümkündür.

İnce film; altlık üzerine çeşitli yöntemlerle kaplama yapılarak yüzeyde ince bir tabaka oluşturma esasına dayanır. İnce filmler yüzeylerde mikrometre (μm)- nanometre (nm) boyutlarında uygulanırlar. Kontrollü ve istenilen koşullarda üretilebilen ince filmler gelişen teknolojik alanlarda, endüstriyel malzemelerin özelliklerinin araştırmalarında kullanılmaktadır. Ayrıca yüzey özelliklerinin rahatlıkla incelenebilir olması, nanometre-mikrometre mertebesinde üretildiklerinden oluşturulan sistemlerin az yer kaplaması, çevresel değişikliklerden minimum seviyede etkilenmesi, ekonomik ve geliştirilebilir olmaları gibi birçok avantajları vardır.

İnce filmler katı, sıvı ve gaz fazında farklı yöntemlerle üretilebilirler. Başlıca ince film üretme yöntemleri; çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. İnce Film Üretme Yöntemleri

Gaz Fazda Büyütme	Sıvı Fazda Büyütme	Katı Fazda Büyütme
Kimyasal Buhar Biriktirme	Sol-Gel Yöntemi	Mekanik Aşındırma
Fiziksel Buhar Biriktirme	Kimyasal Banyo Yöntemi	Devitrifikasyon
	Elektrokimyasal Yöntem	

2.3.1. Gaz Fazda Büyütme

İnce film olarak kaplaması istenilen malzeme çeşitli yöntemler ile buharlaştırılarak, kaplayacağı alttaş malzeme üzerine taşınır, burada biriktirilir ve

yoğunlaştırılarak kaplama işlemi yapılır. Buhar fazında yapılan kaplama teknikleri; kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve fiziksel buhar biriktirme (PVD) olmak üzere ikiye ayrılır.

2.3.1.1. Kimyasal Buhar Biriktirme

Buhar halinde taşıyıcı bir gaz ile kimyasal reaksiyona girmesi sonucunda oluşan katının ısıtılmış kapalı ortamda bulunan malzemenin kaplanması ‘kimyasal buhar biriktirme’ (Chemical Vapour Deposition, CVD) olarak adlandırılır. Temelde bu sistem buhar fazındaki malzemenin istenilen basınç değerlerine ayarlanmış ortamda kimyasal yöntemlerle katı kaplama malzemesi oluşturmaya dayanır (Dobkin & Zuraw, 2003). Kaplamaların kalınlıkları μm mertebededir ve kaplama sıcaklığı, yapılan kaplamanın türüne bağlı olarak 500-1100 °C arasında değişir. Kimyasal Buhar Biriktirme yöntemi ile malzeme geniş yüzeyinin tamamen kaplanabilmesi ayrıca kaplanmamış bir bölgenin kalmamış olması yöntemin en belirgin avantajı olarak bilinir. Kaplama Stokiyometresi, morfolojisi, kristal yapısı ve yönü, kaplama parametreleri değiştirilerek kontrol altına alınabilir. Atmosferik basınçlı, alçak basınçlı, metal-organik, plazma destekli ve lazer kimyasal buhar biriktirme yöntemleri vardır (Abegunde vd., 2019).

2.3.1.2. Fiziksel Buhar Biriktirme

Son yıllarda endüstriyel alanlarda kullanımı başlanan fiziksel buhar biriktirme yöntemleri 19. yüzyılın başlarından itibaren günümüze kadar geliştirilmiştir. Yariletken teknolojinin gelişimi ile fiziksel buhar biriktirme yöntemi günümüzde aktif olarak çip, diyot, transistor gibi mikro-elektronik malzemelerin üretimi, oksidasyon ve korozyona karşı dirençli malzemelerin oluşturulması ve medikal ürünler gibi pek çok farklı alanda kullanılmaktadır (Baptista vd., 2018).

Farklı kaplama işlemleriyle geliştirilerek uygulanan bu sistemde, kaplanacak malzemenin, vakumlu bir ortamda ısıtılarak buharlaştırılan kaplayıcı malzeme tarafından ince film şeklinde kaplanmasıdır. Yüksek enerji verilerek iyonlaştırılan ve reaktif gazlardan oluşturulmuş plazma halindeki hammadde, kontrollü olarak kaplanacak malzemenin üzerine biriktirilir. Malzeme yüzeyinin, yüksek enerjili hızlandırılmış gaz iyonları bombardıman edilerek, saçtırılan atomlar ve hedef yüzeyden koparılan atomların, buhar fazına geçerek kaplanması esasına dayanır (Mattox, 2010).

Fiziksel buhar biriktirme yöntemi buharlaştırma ve saçtırma olmak üzere iki grupta incelenmektedir. Buharlaştırma; termal buharlaştırma tekniği, elektron demetli buharlaştırma tekniği, ark buharlaştırma tekniği, moleküler demetli epitaksi tekniği ve lazer ile buharlaştırma tekniği yöntemleri ile saçtırma ise; radyo frekansı saçtırma tekniği, radyo frekanslı magnetron saçtırma tekniği, doğru akım saçtırma tekniği yöntemleri ile yapılmaktadır (Abegunde vd., 2019).

2.3.2. Sıvı Fazda Büyütme

Sıvı fazda büyütme ile ince film üretme; kimyasal banyo yöntemi, elektrokimyasal yöntem, sol-gel yöntemi olarak üç ana üretim metoduna ayrılır.

2.3.2.1. Elektrokimyasal Yöntem

Elektrokimyasal Yöntem; elektrik akımı yardımı ile çözelti içerisindeki materyalin iletken olan alttaş üzerine kaplanması olarak tanımlanabilir. Bu yöntem temelde çözeltinin hazırlandığı hücre, referans elektrot, karşıt elektrot ve çalışma elektrotu kısımlarında oluşmaktadır. Yüzey etki alanını artırmak için elektrot yüzeyinin pürüzlendirilmesi ve geliştirilmiş elektrokimyasal aktiviteye sahip bir malzeme ile ince film kaplama işlemi yaparak elektrot performansı geliştirilebilir. Performansı artırmak için elektrot yüzeyine farklı bir film şeklinde elektroaktif madde bırakılır ve filmin elektrot üzerine yapışması engellenir (Ivanovskaya vd., 2018). Kaplama sırasında çözeltiye uygulanan potansiyelin etkisiyle, çözelti içerisindeki kaplanacak materyaller iyonize edilerek, hedef iletken yüzeye yönlendirilmektedir. Bu iyon akımı yoğunluğu, çözeltiye uygulanan potansiyel, çözelti sıcaklığı ve alttaban yüzey büyüklüğü ile doğru orantılıdır. Kapanacak materyalin yüzey büyüklüğü ve morfolojisinin kontrolü açısından bu yöntem oldukça avantajlıdır. Çözeltideki iyon akımının miktarını kontrol etmek için, çözeltiye uygulanan gerilim ya da iyon akım yoğunluğu kontrol edilebilir (Taktakoğlu ve Kavak, 2016).

Elektrokimyasal yöntem ile üretilen ince filmlerin kalitesini ve yapısal özelliklerini etkileyen parametreler; depozisyon potansiyeli, elektrolite katılan maddelerin cinsi ve miktarı, çözelti pH'ı, akım yoğunluğu, elektrolit sıcaklığı, çözelti içine katılan kimyasal katkı maddeleri şeklinde sıralanabilir (Bard vd., 2001).

2.3.2.2. Kimyasal Banyo Yöntemi

Kimyasal banyo yöntemi; kimyasal maddelerin belirli kütleli/hacimsel oranlarda karışımı ile hazırlanan çözeltinin, optimum sıcaklıklarda malzemenin üzerinde film olarak biriktirilmesidir. Kimyasal banyolama, su banyosu, termal manyetik karıştırma düzeneği, hazırlanan çözelti banyosu, kaplanacak olan malzeme, kaplanacak malzemeyi tutma maşası, termometre ve pH metreden oluşmaktadır. Yöntemde kaplanacak malzeme banyoya daldırılır. Film biriktirme aşamasında çözeltinin pH'ı, sıcaklığı ve karıştırma hızı sabit tutulmalıdır. Oluşturulan filmlerin kalitesine ve kalınlığına; hazırlanan kaplama çözeltisinin konsantrasyonu, pH'ı ve sıcaklığı, katalizörün yapısı, reaksiyon süresi, karıştırma hızı, kurutma aşaması ve kurutma ortamı gibi parametreler etki eder (Lincot vd., 2006).

Diğer yöntemlerle kıyaslandığında bu yöntem; basit ve daha ucuz ekipmanlara sahip olması, hızlı, pratik ve tekrarlanabilir olması, yüzey alanları büyük ve farklı şekillerdeki malzemelerin düşük sıcaklıklarda kaplanabilmesi gibi avantajlara sahiptir.

2.3.2.3. Sol-Gel Yöntemi

Sol-gel yöntemi kimyasalların çözelti halinde kullanıldığı elverişli bir prosestir. Genelde, sol-gel prosesi bir sıvı "sol"den (çoğunlukla kolloidal) bir katı "jel" fazına geçişi içeren bir sistemdir. Bu metot seramik ya da cam materyalleri çok çeşitli formlarda üretmeye imkan verir. Çok ince ya da küresel şekilli tozlar, kaplamalar, seramik fiberler, mikroporöz inorganik membranlar, monolitik seramikler ve camlar bu yöntem ile üretilebilir (Brinker ve Scherer 2013).

Kimyasal bir süreç olan Sol-Gel yöntemi; başlangıç olarak bir çözeltinin ve bu çözeltiden jelimsi yapı oluşturulması prensibine dayanır. Klasik yöntemlere göre daha düşük sıcaklıklarda (100-600°C) çalışılmaktadır. İnce filmler; daldırma, döndürme ve püskürtme gibi farklı metotlarla optimum şekilde hazırlanabilir. Yüzey alanı geniş malzemelerde; homojen yapı elde edilmesi ve çok katlı kaplamaların kolay biriktirilebilmesi bu yöntemin geniş kullanım alanlarına sahip olmasını sağlamıştır (Pierre, 1998) .

Daldırılmalı kaplama tekniği, püskürtme kaplama tekniği, döndürerek kaplama tekniği, laminer akış kaplama yöntemi, silindirik kaplama yöntemi, presle kaplama gibi çeşitleri sol-gel kaplama teknikleri vardır.

2.3.3. Katı Fazda Büyütme

Mekanik aşındırma ve devitrifikasyon olarak ikiye ayrılan katı fazda büyütme işlemi buhar ve sıvı fazda büyütme tekniklerine göre daha az tercih edilir.

2.3.3.1. Mekanik Aşındırma

Mekanik aşındırma, malzemelerin aşındırılması ile büyük taneli yapıların bozunması sonucunda nano kristalli malzemelerin elde edilmesi olarak tanımlanır. Saf metaller, intermetalik veya önceden yağlanmış tozlar gibi homojen (genellikle stokiyometrik) bileşim tozları, yüksek enerjili bir bilyalı değirmende öğütülür. Öğütülmüş malzemedeki kırılmış, enerjisi yüksek parçacıkların tekrar birleşimi ile mikro ve nano yapıda malzemeler üretilebilir. Aşındırma süresi ve miktarına bağlı olarak tanecik boyutları ayarlanarak, son derece ince yapılar elde edilebilir. Micro ve nano boyutta yüksek saflıkta, intermetalik ve karışmaz alaşımlar elde edilebilir (Suryanarayana, 2019).

2.3.3.2. Devitrifikasyon

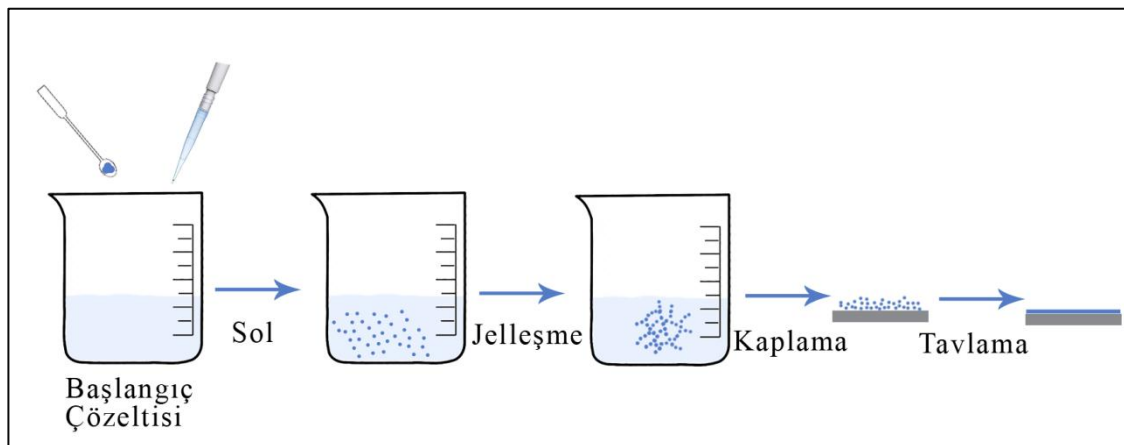
Devitrifikasyon, amorf malzemelerin belirli sıcaklık ve süre içerisinde kontrollü olarak kristalleşmesi ile mikro ve nano yapıları kaplamaların elde edilmesidir. Kristal faz ilk önce serbest yüzeyde çekirdeklenir ve amorf kristalimsi yapılar meydana gelir ve hızlıca katılaştırılma ile elde edilen amorf faz, sıcaklığın düşürülmesi ile kristalleşir. Yüzey pürüzlülüğü çekirdeklenme fazının uzamasına sebep olur. Çekirdeklenme oranı arttığında film büyüme oranı azalır. Kristalleşme parametrelerinin kontrolü ile farklı tane boyutlu filmler üretilebilir. (Donaldson vd., 2016; Vestel vd., 2003) .

2.4. Sol-Gel Yöntemi

Kimyasal bir yöntem olan sol-gel yönetimi, başlangıçta bir sol solüsyonu ve bu solüsyon kullanılarak jelimsi yapı oluşturulması esasına dayanan yöntemdir. (Çözeltiler ya da kolloidal süspansiyonlardan üretilen jellerin kimyasal prosesi olarak tanımlana bilir.) Sol, çözelti içerisindeki katı partiküllerin kararlı süspansiyonudur (Wright & Sommerdijk, 2001). Jel, sıvı bileşenler içeren, sıvının içyapısında dağılan katı atomlara sahip gözenekli durumdur. En küçük çözücü parçacıkları ile çözünen parçacıklar arasında bağ kurulması jel oluşumu için önemli bir kriterdir. Jeli oluşturan moleküller

birbirine zayıf veya kuvvetli bağlarla bağlanarak, aralarındaki boşluklarda sıvı bulunan iskelet şeklinde dokular oluştururlar. Sonuç olarak, sıvı bağlarıyla sıvı ortamının birleşmesi sonucu oluşan akıcı olmayan ortam yani jel oluşur (Pierre, 1998).

Genellikle asetat gibi solüsyon içerisinde kolay çözüne bilen malzemelerin tercih edildiği sol-gel yönteminde; solüsyon oluşturmak için optimum miktarda toz, çözücü içerisinde koyulur ve yapı homojen olana kadar karıştırılır. Elde edilen homojen solüsyon jel kıvamına gelene kadar ısıtılarak karıştırılır. Jel oluşumu sonrasında ısı işlem uygulanarak jelden toz materyal elde edilir. Toz materyal elde edilmesinden sonra termal ayrıştırma işlemi ile istenmeyen bileşiklerin uzaklaştırılması sağlanarak toz tablet elde edilir (Aegerter & Mennig, 2004). Sol-gel yönteminin süreçlerini gösterilen Şekil 2.5’de görüldüğü gibi çözeltinin (solün) farklı aşamaları ile malzemelerin değişik formları oluşturulabilir. Bu yöntem, film, seramik, aerojel, partiküller ve fiber gibi çeşitli boyut, şekil ve biçimlerde ürün elde etmek için kullanılabilir.



Şekil 2.5. Sol-Gel Yöntemi

Sol-gel yönteminde; çözelti konsantrasyonu, kaplama katman sayısı, tavlama sıcaklığı ve süresi, değişik materyallerle katkılama gibi parametreler değiştirilerek farklı kalınlık ve fiziksel özelliklerde ince film elde etmek mümkün olmaktadır. Sol-gel yöntemi, geniş alanların kolayca kaplanabilmesi ve de çok katlı filmlerin homojen şekilde oluşturulabilmesi bakımından geniş kullanım alanına sahiptir. Sol-gel yöntemi neredeyse her türlü tek bileşenli ya da çok bileşenli oksit filmlerin üretiminde kullanılabilir (Uhlmann vd., 1997).

Bu yöntem genellikle organik olmayan kaplamalarda tercih edilir. Sol-gel yönteminin teknolojik olarak en önemli noktası; katılaşmadan önce çözeltinin, daldırma, döndürme ve püskürtme yaygın yöntemleri ile ince film hazırlanmasında ideal olmasıdır. Sol-gel yöntemi kendi içinde daldırarak kaplama, döndürerek kaplama, akış kaplama, spreycaplama gibi kaplama tekniklerine ayrılır.

Sol-Gel yönteminin avantajları:

- Sol-gel yöntem ile film üretiminde yüksek sıcaklıklara çıkmak gerekmediğinden malzemelerde termal bozulma meydana gelmez.
- Sistemin oluşturulmasında kullanılan ekipman basit ve kolay ulaşılabilir. Vakum gerektirmez ve süreçleri kolay kontrol edilebilir. Yüksek saflıkta malzemeler ve nanokristal malzemeler üretilebilir.
- Farklı malzemeler karıştırılarak süreç başlatılabildiğinden katkılı film yapımı için uygundur.
- Gerekli parametreler değiştirilerek gözenekli yapılar oluşturulabilir ve farklı geometrik yüzeyler için kaplamalar yapılabilir.
- Çevre kirliliği oluşturmaz ve hazırlanan ortamla etkileşimde bulunmaz.
- Şeffaf malzemeler ile çalışmaya uygunluğu nedeniyle optik kalitesi yüksek uygulamalar için kullanılabilir.

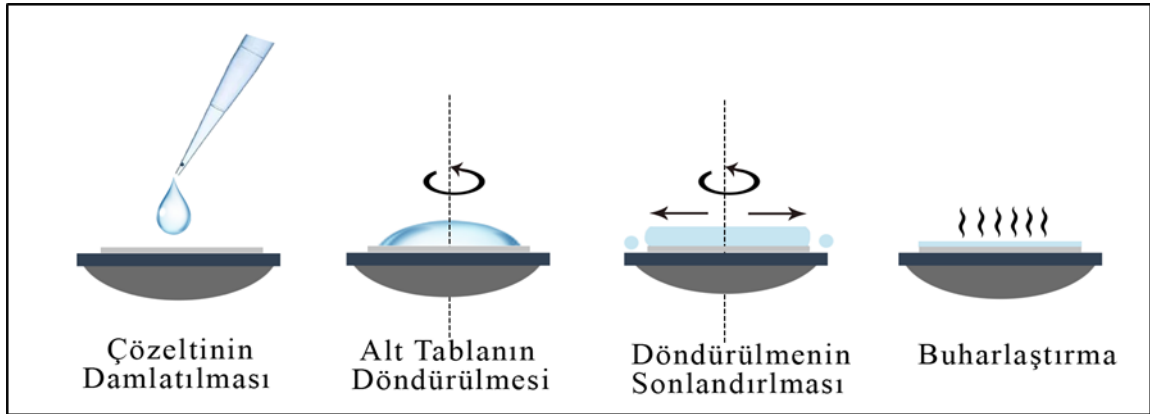
Sol-Gel yönteminin bazı dezavantajları

- Sürekli ve fazla üretim yapılması durumunda hızlı süreçlere göre solüsyon kaybı fazladır.
- Çok katmanlı filmlerin üretimi için çalışma süresi fazladır.
- Hazırlanan sol-gel çözeltilerinin belirli ömürleri vardır.
- Büyük ölçekli kaplamalar için maliyet yüksektir (Wright & Sommerdijk, 2001).

2.5. Döndürerek Kaplama (Spin Coating) Tekniği

Döndürerek kaplama tekniği; sert yüzeyler ve az pürüzlü taşıyıcılar üzerine ince filmler biriktirmek için kullanılan bir tekniktir. Kaplanacak olan yüzey yüksek hızlarda döndürülür. İnce filmler bir alttaş yüzeyinin, hazırlanmış olan sol-gel çözeltisi damlaları ile kaplanmasıyla oluşturulur ve oluşturulan tabakanın düzenli olması

amacıyla döndürülür. İnce filmlerin oluşma aşamaları Şekil 2.6'da gösterildiği gibi çözeltinin damlatılması, alt tablanın döndürülmesi, döndürme işleminin bitirilmesi ve buharlaştırma safhası şeklindedir.



Şekil 2.6. Döndürerek Kaplama Tekniği

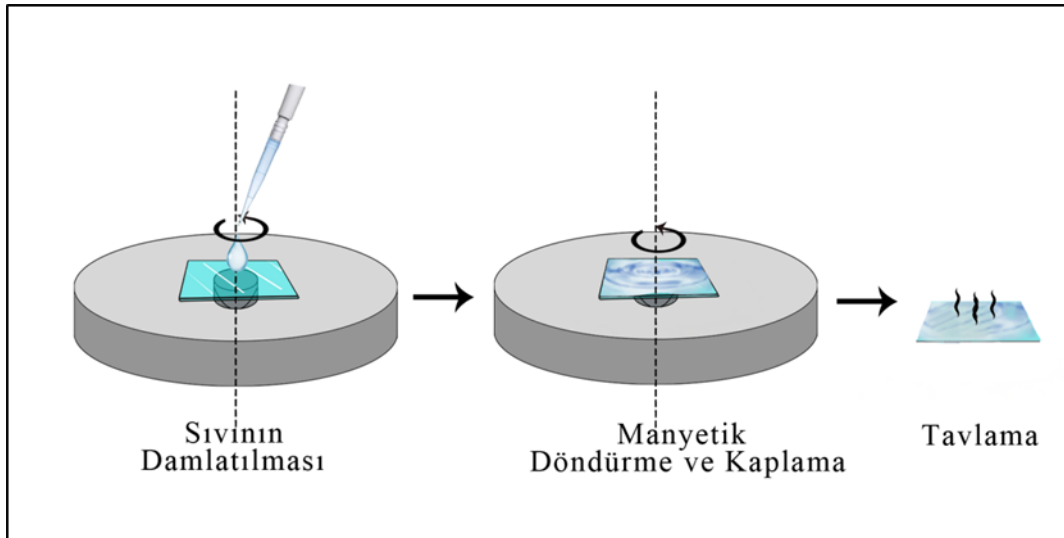
İnce film oluşumunda yüzey kaplama aşamasında, yüzey üzerine bir miktar hazırlanan çözeltiden damlatılır. Daha sonra döndürme aşamasında, damlatılan çözelti, dönme hızından oluşan merkezci kuvvet ile radyal hareketle kaplanacak olan yüzeyin dışına doğru akar. Döndürme işlemi bittiğinde, fazla olan sıvı kaplanacak yüzeyden taşarak yüzeyi terk eder. Film kalınlıkları inceltilmesi ile akışkana karşı oluşan direnci artacağından, oluşturması istenen film kalınlığının inceltilecek yüzeyden taşan çözelti miktarı azalacaktır. Akışkanlığa karşı direncin artmasına uçucu olmayan madde konsantrasyonundaki artış da sebep olur. Filmlerin incelmesindeki son ve en önemli adım buharlaştırma aşamasıdır.

Döndürerek kaplama işleminin avantajı yüzeyde oluşmaya başlayan film tabakasının düzgün olarak dağılması ve film kalınlığının kaplanacak yüzeyin tüm bölgelerinde homojen özellik göstermesidir. Hazırlanan çözeltinin viskozitesi değişmediği sürece film kalınlıkları da aynı kalır. Film kalınlıklarının düzgün olması; kaplanacak yüzey üzerine damlatılan çözeltinin radyal olarak dışarıya akmasına sebep olan merkezci kuvvet ve ters yönde gelişen sürtünme kuvveti ile sağlanmaktadır. Oluşan filmin inceltme safhasında yer çekimi kuvveti ihmal edilerek merkezci kuvvetle oluşturulur.

Döndürerek kaplama; basitliği, yüksek hızda çalışması, üniform yapıda ince filmler oluşturabilmesi ve yeniden üretilebilirlik gibi özellikleri ile birçok alanda kullanılması tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemle AlO, ZnO, TiO, SiO, CuO, SnO, CdO, MgO gibi çeşitli çok katmanlı metal oksit ince filmlerin üretilmesi mümkündür. Döndürerek kaplama yöntemi ile üretilen çok katmanlı metal oksit ince filmler; elektronik ve optoelektronik cihazlar, güneş pilleri, bilgisayar diskleri gaz algılayıcılar, optik reflektörler, yansıma önleyici kaplamalar, optik filtreler gibi birçok alanda kullanılmaktadır(Nandita vd., 2018).

2.6. Manyetik Döndürerek Kaplama Tekniği

Temelde bu teknik; şekil 2.7' de görüldüğü gibi manyetik alan oluşturan bir tabla, tablanın üzerine yerleştirilen ve dönme hızı 0-3000 rpm arasında ayarlanabilen manyetik döndürücü, döndürücünün üzerine yerleştirilen kaplanacak malzeme ve ince film kaplaması için hazırlanmış çözeltiden oluşur.



Şekil 2.7. Manyetik Döndürerek Kaplama Tekniği

Manyetik döndürerek kaplama tekniğinde; istenilen oranda ayarlanabilen manyetik döndürücü üzerine yerleştirilen ve dönmeye başlayan alttaş üzerine hazırlanan sol-gel çözeltisinin damlatılarak işlem başlatılır. Damlatılan çözelti dönme hızından oluşan kuvvet ile alttaşın üzerine yayılır ve fazla gelen çözelti alttaşın üzerinden kenarlara doğru akar. Manyetik döndürme işlemi tamamlandıktan sonra oluşturulan

filmler kristalleşme için belirli sıcaklıklarda tavlama işlemine tabi tutulurlar. Tavlama işleminden sonra yoğunlaşmış homojen ince filmler elde edilirler. Manyetik döndürme süresi, manyetik döndürme hızı, çözelti konsantrasyonu, damlatılan çözelti miktarı, tavlama sıcaklığı ve tavlama süresi oluşacak olan ince filmlerin yapısal özellikleri üzerinde etkilidir.

2.7. Literatür Özeti

Schuler ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Sol-gel yöntemi ile Al katkılı ZnO filmleri üretmiştir. Ürettikleri optik geçirgenlikleri yüksek ZnO filmlerin elektriksel dirençlerinin $5 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$ olduğunu tespit etmişlerdir (Schuler & Aegerter, 1999).

Shaogiang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada kaplanmak üzere silikon/gözenekli malzemeler seçmişlerdir. Elde ettikleri ZnO filmlerde iyi kristal yapının oluştuğunu ve kaplanacak malzeme ve tavlama sıcaklıklarının kristalleşme üzerinde etkili olduğunu ve gözenekli malzemelere kaplamanın çok daha iyi tutunduğunu bulmuşlardır (Shaoqiang vd., 2005).

Umar ve arkadaşları Silikon taban üzerine fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile ZnO ince filmler oluşturmuş ve 60-100 nm çapında 5–15 μm uzunluğunda nano filamentler üretmişlerdir. Tek kristalli, kusursuz hegzagonal yapılı UV emisyonların oda sıcaklığında iyi olan ZnO filmleri ürettiklerini yapısal ve optik analizleri sonucunda belirlemişlerdir (Umar vd., 2006).

Li ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, farklı oranlarda Ni katkılanmış ZnO ince filmlerin bazı fiziksel özelliklerini incelemişlerdir. Yapısal ve manyetik özellikleri incelediklerinde katkılamanın filmin yapısını değiştirmedini ve oda sıcaklığında kaplamaların ferromagnetik özellik gösterdiğini gözlemlemişlerdir (BB Li vd., 2006).

Kim ve arkadaşları başlangıç çözeltisini çinkoasetat ve nikel-asetat materyallerini etanol ve 2-methoxyethanol ile çözdürerek hazırlamışlardır. Farklı oranlarda katkılama yaparak elde ettikleri filmlerin yapısal, optiksel ve elektriksel özelliklerini incelenmişlerdir (Kim vd., 2008).

Li ve arkadaşları kimyasal banyo depolama yöntemiyle silikon alttaşlar üzerine ZnO ince filmler üretmişlerdir. Düzgün ve hegzagonal wurtzite yapılı ZnO nano

çubuklar oluşturmuş olup sıcaklık, molarite ve sürenin bu çubuklar üzerinde etkilerini araştırmışlardır (Q Li vd., 2010).

Fragg ve arkadaşları döndürerek kaplama ile farklı oranlarda katkılanmış ZnO ince filmlerin fotoluminesans ve optik özelliklerini incelemişlerdir. Düzgün ve yüzeye iyi tutunmuş Ni katkılı ZnO ince filmleri başarıyla üretmişlerdir (Farag vd., 2011).

Sun ve arkadaşları n-ZnO/MgO/TiN/n+-Si hetero yapıları elde etmişlerdir. MgO ve TiN kaplamalar Si üzerine darbeli lazer kaplama ile ZnO kaplamalar ise metal-organik kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile elde edilmiş olup emisyon bandlarının 350-850 nm arasında olduğunu gözlemlemişlerdir (Sun vd., 2008).

Iechi ve arkadaşları şeffaf ve elektron enjeksiyon tabakası olarak çalışan n-tipi ZnO filmleri kullanarak statik indüksiyon transistörü ile çift hetero kavşak tipi organik ışık yayan diyotları birleştiren yeni tip bir organik ışık yayan transistör üretilebileceğini önermişlerdir (Iechi vd., 2005).

Hunge ve arkadaşları Kimyasal sprey piroliz yöntemi ile ZnO ince filmler üretmiş ve yüzey sıcaklığının yapı üzerine etkisini, ZnO ince filmlerinin morfolojik, optik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan araştırmalar sonucunda foto katalitik ve CO₂ gazı algılama uygulamaları için ürettikleri ZnO filmlerin uygun olduğunu önermişlerdir (Hunge vd., 2018).

Zhu ve arkadaşları farklı oranlarda Al katkılama yaparak magnetron püskürtme yöntemi ile ZnO ince filmler üretmişlerdir. Püskürtme işlemini gaz döngü kontrol sistemi ile izlemiş ve kontrol etmişlerdir. Reaktif olarak püskürtülmüş ZnO: Al ince filmlerin; kristal yapısı, morfolojileri, kimyasal bileşimler, optik ve elektriksel özellikleri sistematik olarak araştırılmıştır (Zhu vd., 2019).

Söğüt ve arkadaşları kimyasal püskürtme yöntemi ile belirli oranlarda flor ve bor katkılı ZnO ince filmler üretmişler ve katkılamamanın flüoresans verimliliği üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çinkonun flüoresans verimliliğinin; oluşturulan ZnO ince filmlere flor katkılama miktarı arttıkça azaldığı, bor katkılama miktarı arttıkça arttığını gözlemlemişlerdir (Söğüt vd., 2018).

Ishak ve arkadaşları formaldehit gazının tespiti için katkılı ve katkısız ZnO ince filmler üretmişler, morfolojik yapılarını ve optik özelliklerini incelemişlerdir. Farklı konsantrasyonlarda Al, Ga, In ve Sn ile katkılamalar yaparak Sol-gel yöntemi ile ZnO

ince filmler biriktirmişlerdir. Katkılamanın ZnO ince filmlerin yüzey pürüzlülüğünü ve optik özelliklerini değiştirdiğini gözlemlemişlerdir (Ishak vd., 2018).

Xu ve arkadaşları düşük maliyetli sol-gel yöntemi ile Ag katkılı ZnO ince filmler üretmişlerdir. Tavlama süresinin değişiminin ZnO ince filmlerin optik ve elektriksel özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Ag katkılı ZnO ince filmler için tavlama süresinin optimum 30-40 dakika olduğunu tespit etmişlerdir (Xu vd., 2018).

Claypoole ve arkadaşları Si katkılı ZnO ince filmleri magnetron püskürtme yöntemi ile cam altlıklar üzerinde biriktirmişlerdir. Farklı oranlardaki Si katkılı ZnO filmlerin optik ve elektriksel özellikleri üzerine; voltaj oranı, basınç ve oksijen yüzdesinin etkilerini araştırmışlardır (Claypoole vd., 2018).

Elmas ve arkadaşları termiyonik vakum ark tekniği ile grafen katkılı nanokompozit ZnO ince filmleri silikon ve cam alttaşlar üzerine biriktirmişlerdir. Çeşitli analiz teknikleri kullanarak, katkılamanın ZnO nanokompozit ince filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir (Elmas vd., 2019).

Shabannia ve arkadaşı tarafından gözenekli silikon yüzeyler üzerine kimyasal banyo biriktirme yöntemi ile ZnO ince filmler sentezlenmiştir. Büyüme sıcaklığının ZnO ince filmlerin yapısal ve optik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. ZnO ince filmlerin tane boyutunun büyüme sıcaklığının artması ile yavaş yavaş arttığını tespit etmişlerdir (Shabannia & Selman, 2017).

Dao ve arkadaşı, ar plazma işleminin, polikristalin ZnO ince filmlerin elektriksel, optik, morfolojik ve kristal yapısı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. AR plazma ile polikristalin ZnO ince filmlerin optoelektronik özelliklerini geliştirmişlerdir (Dao & Makino, 2019).

Hasan ve arkadaşları düşük maliyetli, ticari ve ince alüminyum folyo üzerine, yüzey akustik dalga yöntemi ile ZnO ince filmlerin biriktirilmesi ile esnek ultraviyole ışık sensörleri geliştirmişlerdir. Yüzey hassasiyetini arttırmak için, basitleştirilmiş hidrotermal işlemi ile ZnO nano çubukların cihazın yüzeyinde daha da büyütülmesini sağlamışlardır. Esnek ve giyilebilir ultraviyole ışık sensörlerinde, oluşturdukları ZnO nano çubukların kullanılabilirliğini önermişlerdir (Hasan vd., 2019).

Bhowmick ve arkadaşları ZnO ince filmlerin 250 ve 300 °C'de hidrojen ve karbon monoksit gazlarının algılanmasında mükemmel hassasiyete sahip olduğunu kanıtlamışlardır (Bhowmick vd., 2018).

Chakraborty ve arkadaşları hibrit RGO/ZnO ince film transistörleri ile düşük sesler için hassas biyosensörler üzerinde araştırma yapmışlardır. Oluşturdukları biyosensörlerin 20 dB'den daha düşük sesleri %60 hassasiyet oranında tespit edilebildiğini kaydetmişlerdir (Chakraborty vd., 2018).

Li ve arkadaşları yüksek performanslı ZnO ince film transistörlerini atomik katman kaplama ile üretmişlerdir. Biriktirmenin ve tavlama sıcaklığının cihazların özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Uygun büyüme ve tavlama sıcaklıklarında optimum ZnO ince film transistörlerin üretilebileceğini göstermişlerdir (H Li vd., 2019).

Rahman ve arkadaşları ZnO ince filmleri sol-gel döndürerek kaplama yöntemi ile üretmişler ve güneş pilleri hücrelerinde uygulamışlardır. Faz değişim materyali olarak üst tabakada polietilen glikol kullanmışlar ve güneş hücrelerin sıcaklığını azaltmak için faz değişim materyalinin yüzdeliğini ve konsantrasyonunu değiştirmişlerdir (Rahman vd., 2018).

Guerrero de León ve arkadaşları reaktif darbeli lazer depolama yöntemi ile ZnO ince filmler üretmiş, Zn iyonlarının ortalama kinetik enerjilerinin kristalin oryantasyonu ve kalitesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Lazer susturucular kullanarak plazama yoğunluğunu sabit tutarak ortalama kinetik iyon enerjisini değiştirerek denemeler yapmışlardır. Plazmadaki ortalama iyon kinetik enerjisi arttıkça kirstalleşme derecesinin azaldığını tespit etmişlerdir (Guerrero de León vd., 2019).

Meng ve arkadaşları sol-gel yöntemi ile kendinden düzleştirilmiş ve düşük dirençli Al katkılı ZnO ince filmler üretmişlerdir. Çok yönlü saydam iletken oksit malzeme ile ışık emilimini artırarak ve aynı anda ışık saçılımını yoğunlaştırarak yüksek kaliteli fotoaktif katmanların elde edilmesini sağlamışlardır (Meng vd., 2018).

Fen ve arkadaşları sol-gel döndürerek kaplama yöntemi ile Mg katkılı ZnO ince filmler üretmişlerdir. Ürettikleri ince filmlere döndürme hızı ve Mg katkı konsantrasyonunun etkilerini çeşitli yöntemlerle incelemişlerdir. Katkılamının ince film yüzey morfolojisini geliştirdiğini gözlemlemişlerdir (Fen vd., 2019).

Xu ve arkadaşları sol-gel metodu ile Ag katkılı ZnO ince filmler kaplamışlardır. ZnO filmlerin mikro yapılarının, optik ve elektriksel özelliklerinin ve ayrıca tavlama sıcaklığının katkı malzemesi olarak kullanılan Ag'nin kimyasal yapısı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir (Xu, Xian, vd., 2019).

Ali ve arkadaşları sol-gel döndürerek kaplama metodu ile katkısız ve Sm, La katkılı ZnO ince filmleri silikon altlıklar üzerine kaplamışlardır. Sm ve La katkılamanın ZnO filmlerinin fiziksel özelliklerine etkilerini incelemişlerdir (Ali vd., 2019).

Potlog ve arkadaşları sprey piroliz yöntemi ile oksijen ve argon atmosferi kullanılarak katkısız ve Al katkılı ZnO İnce filmler biriktirmişlerdir. Biriktirme sonrası tavlama vakumunun, yapının morfolojik ve optik özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Termal vakum tavlamanın, özellikle oksijen atmosferinde sentezlenen Al-katkılı ZnO ince filmlerde yapısal ve morfolojik değişimlere neden olduğunu, gaz atmosferi ve Al konsantrasyonunun yapısına bağlı olarak elektriksel iletkenliğin değiştiğini gözlemlemişlerdir (Potlog vd., 2019).

Rahal ve arkadaşları faklı kadmiyum konsantrasyonlarında katkılama yaparak cam altlıklar üzerine ZnO ince filmleri kaplamışlardır. Çinko asetat de hidrat, kadmiyum asetat, metanol ve etanol amin, başlangıç maddeleri, çözücü ve stabilizatör olarak kullanmışlardır. Farklı Cd katkılama (ağırlıkça % 0, % 2 ve % 10) konsantrasyonlarına sahip nano yapıları ZnO ince filmleri 2 saat boyunca 500 °C'de tavlama ve elde ettikleri filmlerin yapısal, optik ve elektriksel özelliklerini anlamak için farklı yöntemlerle karakterize etmişlerdir (Rahal vd., 2016).

Bai ve arkadaşları kuvars altlıklar üzerinde puls lazer biriktirme yöntemi ile Cd katkılı ZnO ince filmler biriktirmişlerdir. Oluşturdukları ince filmlerin bant yapılarını, optik özelliklerini deneysel ve teorik olarak incelenmişlerdir. Cd konsantrasyonunu değiştirerek, fotoluminesans spektrumunda ultraviyolede Kelly ışığına farklı emisyonlarda üretilen filmlerin bant aralıklarının 3.219 eV ila 2.197 eV arasında geniş bir aralıkta ayarlanabileceğini gözlemlemişlerdir (Bai vd., 2012).

Charlesbabu ve arkadaşları Cd katkılı ZnO ince filmler, döndürerek kaplama teknikleri ile bir cam alt tabaka üzerine biriktirmişlerdir. İnce filmlerin yapısal özelliklerini incelemek için X-ışını kırınımı metodu ile çalışmışlardır. X ışını kırınım verileri ile büyütülen filmlerin (100) yönünde ve altıgen wurtzite fazlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Ortalama tanecik boyutunun 10 ile 12 nm arasında değiştiğini

raporlamışlardır. UV spektral analizinden, bir cam substrat üzerinde kaplanmış ZnO filminin bant boşluğunun 3.4 eV, saf ZnO filminin 3.44 eV ve ağırlıkça % 2, % 4 ve % 6 Cd-katkılı ZnO filminin bant aralığının sırasıyla 3.43, 3.429 ve 3.423 eV olarak tespit etmişlerdir (Charlesbabu vd., 2017).

Vinoth ve arkadaşları Cd katkılı ve katkısız ZnO filmleri RF magnetron püskürtme yöntemiyle üretmişlerdir. X-ışını kırınımı (XRD) sonuçlarına göre filmlerin altıgen yapıya sahip (002) düzlem boyunca tercih edilen oryantasyona sahip olduğunu ve ikincil pikler gözlenmediğini tespit etmişlerdir. Yaptıkları ölçümlerden CZO filmlerinin n tipi iletkenliğe sahip olduğu Cd konsantrasyonundaki artışla bant boşluğunun azaldığını Tauc metodu ile bulmuşlardır. Filmlerin çeşitli konsantrasyonları arasında, ağırlıkça % 20 Cd'ye sahip olan CZO, metanola karşı daha iyi gaz tepkisi sergilerken, % 10 Cd'ye sahip olan CZO, amonyak gazına karşı maksimum gaz tepkisi göstermiştir (Vinoth vd., 2017).

Debbichi ve arkadaşları Cd katkılı ve katkısız ZnO filmleri kimyasal banyo biriktirme yöntemi ile safir altlık üzerine kaplamışlardır. Yaptıkları hesaplamalar sonucunda, Zn bölgelerinde yer değiştiren Cd'lerin, Zn boşluklarının oluşum enerjisini düşürerek ZnO içinde uzun mesafeli ferromanyetizme katkıda bulunduğu ve böylece manyetik momentlerden kaynaklanan Zn boşluklarının dengelediğini ortaya koymuşlardır (Debbichi vd., 2014).

Ameen ve arkadaşları şeffaf Cd katkılı ve katkısız ZnO ince filmleri Si altlıklar üzerine p-tipi diyot imal edebilmek için kaplamışlardır. İnce film kaplama işlemini sol-gel döndürerek kaplama tekniği ile yapmışlardır. Cd katkılı ZnO ince filmler çok kristalli bir yapı sergilemiş ve geçirgenlik ölçümleri, filmlerin UV ve görünür bölgeler için % 47 ile % 92 arasında değişen şeffaflığa sahip olduğunu gösterdiğini tespit etmişlerdir. Oluşturdukları filmlerin optik bant boşluğunun Cd içeriği ile 3.27 ile 3.19 eV arasında değiştiğini hesaplamışlardır. CdZnO bazlı diyotların optik ve optoelektronik iletişimde fotodedektör olarak kullanılabileceğini önermişlerdir (Ameen vd., 2019).

Rahal ve arkadaşları ağırlıkça % 2, % 5 ve % 10 arasında farklı konsantrasyonlarda Cd katkılı ve katkısız ZnO ince filmleri sol-gel daldırarak kaplama yöntemi ile cam ve silikon altlıklar üzerine biriktirmişlerdir. Çinko asetat dehidrat, kadmiyum asetat dehidrat, 2-metoksietanol ve etanolamin, sırasıyla bir başlangıç

materyali, doping, solvent ve stabilizatör olarak kullanmışlardır. Ürettikleri filmleri 500 °C'de 120 dakika boyunca tavlama işlemine tabi tutmuş ve yapısal, morfolojik ve optik özelliklerini farklı analiz teknikleri kullanarak karakterize etmişlerdir (Rahal vd., 2018).

Kumar ve arkadaşları cam altlıklar üzerine ağırlıkça %0-%10 arasında değişen miktarlarda Cd katkılayarak magnetron püskürtme yöntemi ile ZnO ince filmler üretmişlerdir. Cd konsantrasyonunun Cd katkılı ZnO ince filmlerin yapısı, elektriksel ve optik özellikleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Oluşturdukları katkılı filmleri incelediklerinde ağırlıkça % 4 Cd konsantrasyonunda tane büyüklüğünün maksimum olduğunu ve elektriksel direncin minimum olduğunu tespit etmişlerdir (Kumar vd., 2015).

3. DENEYSEL YÖNTEM

3.1. Manyetik Döndürerek Kaplama Sisteminin Kurulumu

Sistemin kurulumu için IKA marka, Big Squid White model, ısıtmasız, yüksek hızda dönebilen (0-3000 rpm) manyetik karıştırıcı, özel yapışkanlı PTFE yuvarlak teflon manyetik döndürücü ve ince film oluşumu sırasında altlık döndürülürken üzerine damlatılan sol-gel çözeltisinin etrafa sıçramasını önleyen bir kapak kullanılmıştır. Kapağın üzerinde uygulama sırasında çözeltiyi mikropipetle altlığın üzerine damlatabilmek için küçük bir delik vardır. Manyetik döndürerek kaplama cihazının gösterimi Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Sol-gel manyetik döndürerek kaplama cihazının gösterimi.

Cihaz kurulumundan sonra Al, Cd katkılı ve katkısız ZnO ince filmler, manyetik döndürerek kaplama yöntemi ile elde edilmiş ve bazı fiziksel özellikleri incelenmiştir.

3.2. Manyetik Döndürerek Kaplama Yöntemi

Manyetik döndürerek kaplama yöntemi, elde edilecek filmler için hazırlanan çözeltilerin bir taban üzerine aktarıldıktan sonra bu tabanı çeşitli hızlarda ve sürelerde manyetik olarak döndürerek çözeltinin bu taban üzerine yayılması ile film oluşturulmasıdır. Manyetik döndürerek kaplama olayı temelde beş aşamadan meydana gelmektedir. Bu aşamalar;

- Hazırlanan çözeltinin altlık üzerine damlatılması,
- Altlığın farklı hızlarda ve sürelerde manyetik olarak döndürülmesi,
- Döndürülerek elde edilen ince filmin kurutulması,
- Çok katlı yapı hazırlamak için sürecin tekrarlanması,
- Elde edilen çok katlı filmde yapının kristalleşmesi için farklı sıcaklıklarda tavlama işleminin gerçekleştirilmesi.

İlk aşamada filmi kaplayabilecek kadar çözelti duran veya yavaşça dönen altlık üzerine mikropipet ile damlatılır. Daha sonra altlık yüksek bir devirle (1000-3000 rpm) manyetik olarak döndürülür. Sıvının fazlası film üzerinde merkezci kuvveti yenerek dışarı doğru ilerler ve altlığı damlalar halinde terk eder. Geriye kalan ıslak film, altlık üzerine homojen olarak dağılır. Döndürme işlemi bittikten sonra filmlerin kurutulması işlemine geçilir. Kurutma aşamasından sonra kaplama işlemi tamamlanır ve film oluşumu gerçekleşir. Bu adımlar sırasıyla aynı filmler için tekrarlanarak çok katlı filmler elde edilebilir. Bu teknik oda sıcaklığında gerçekleştiğinden dolayı, elde edilen çok katlı filmlerde yapının yüksek sıcaklıklarda kristalleşmesi için farklı sıcaklıklarda tavlama işlemi yapılması gerekir.

Döndürerek kaplama yönteminde; film kalınlığı, dönüş hızı, dönüş zamanı, kaplama katman sayısı, çözelti hacmi ve tavlama sıcaklığı gibi parametreler değiştirilerek üretilmek istenen filmler kolayca çeşitlendirilebilir.

Bu çalışmada üretilen ince filmler için altlık malzeme olarak ISOLAB marka mikroskop lamı kullanılmıştır. Kullanılan cam altlıkların temizlenmesi için 5 dakika ultrasonik banyoda aseton ile karıştırma, 5 dakika ultrasonik banyoda metanol ile karıştırma, Ultra saf su ile durulama, Kurutma aşamaları takip edilmiştir.

3.3. Sol-Gel Çözeltilerinin Hazırlanması

ZnO ince filmleri üretmek için kullanılacak sol-gel çözeltisi 0,5 M olarak hazırlanmıştır. Bu sol-gel çözeltisi için $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ (çinko asetat dihidrat), çözücü olarak 2-metoksietanol ve stabilizör olarak monoetanolamin (MEA) kullanılmıştır. Çözelti hazırlanırken önce çözeltinin hazırlanacağı kaba 30 ml 2-metoksietanol konulmuştur. İçerisine 3,3005 gr çinko asetat dihidrat ilave edilmiştir. 10 dk. 70 °C'de karıştırılmıştır. Daha sonra çözeltiliye 0,3 ml monoetanolamin (MEA) damla damla eklenmiştir. 150 dk. 70 °C'de karıştırılmış ve son olarak hazırlanan çözelti iki gün bekletilmiştir.

Cd katkılı ZnO ince filmleri üretmek için kullanılacak sol-gel çözeltisi 0,5 M olarak hazırlanmıştır. Bu sol-gel çözeltisi için $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ (çinko asetat dihidrat), çözücü olarak 2-metoksietanol ve stabilizör olarak monoetanolamin (MEA) kullanılmıştır. Cd katkısı için $Cd(CH_3CO_2)_2 \cdot 2H_2O$ (kadmiyum asetat dihidrat) kullanılmıştır. Katkılama işlemi, ZnO çözeltisine %1, %3 ve %5 oranlarda kadmiyum asetat dihidrat eklenerek gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan çözeltiler 2 saat oda sıcaklığında karıştırılarak 2 gün oda sıcaklığında bekletilmiştir.

Al katkılı ZnO ince filmleri üretmek için kullanılacak sol-gel çözeltisi 0,75 M olarak hazırlanmıştır. Bu sol-gel çözeltisi için $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ (çinko asetat dihidrat), çözücü olarak 2-metoksietanol ve stabilizör olarak monoetanolamin (MEA) kullanılmıştır. Al katkısı için $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ (alüminyum nitrat nonahidrat) kullanılmıştır. Katkılama işlemi, ZnO çözeltisine %1, %3 ve %5 oranlarda alüminyum nitrat nonahidrat eklenerek gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan çözeltiler 3 saat oda sıcaklığında karıştırılarak 2 gün oda sıcaklığında bekletilmiştir.

3.4. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi

Üretilen filmlerden en iyi sonucu elde edebilmek için damlatma çözeltisi, döndürme süresi, döndürme hızı, kaplama katman sayısı ve tavlama sıcaklıkları parametreleri değiştirilerek sonuçlar incelenmiştir.

ZnO serisi için yapılan denemeler sonucunda; damlatma çözeltisi miktarının 15 µl, döndürme süresinin de 30 s olması kararlaştırılmıştır. Kaplama katman sayısı olarak 3,6 ve 9 kat ince film kaplama denemeleri yapılmıştır. Yapılan katman sayısı denemelerinde 9 katlı filmin yüzey üzerinde boşluksuz ve homojen bir şekilde dağıldığı

gözenmiştir. Döndürme hızları 1000, 2000 ve 3000 rpm olarak belirlenen filmlerin 9 katman olarak kaplanması ve hava ortamında 300, 400 ve 500°C’de tavlama sıcaklığına karar verilmiştir. ZnO serisi için seçilen bu parametreler Çizelge 3.1 ’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. ZnO serisi için filmlerin kaplama parametreleri

Döndürme Hızı (rpm)	Katman Sayısı	Tavlama Sıcaklığı (°C)	Seri Adı
1000	9	300	A1
		400	A2
		500	A3
2000	9	300	B1
		400	B2
		500	B3
3000	9	300	C1
		400	C2
		500	C3

Katkısız ZnO ince film kaplama çalışmaları sonucunda optimum deney parametreleri olarak; damlatma çözeltisi miktarının 15 µl, döndürme süresinin de 30 s, dönme hızı 3000 rpm, tavlama sıcaklığı 500 °C olarak belirlenmiş olup Al ve Cd katkı ZnO ince film üretimi için bu deney parametrelerinde çalışmalar yapılmıştır.

Karşılaştırılan %1, %3 ve %5 Cd katkı 3 adet serinin ve katkısız ZnO serisinin adlandırılması Çizelge 3.2’de gösterilmektedir

Çizelge 3.2. Cd katkı ZnO serilerin adlandırılması.

Döndürme Hızı (rpm)	Katman Sayısı	Tavlama Sıcaklığı (°C)	Cd katkı miktarı (%)	Seri Adı
3000	9	500	-	ZnO
3000	9	500	1	CZO1
3000	9	500	3	CZO3
3000	9	500	5	CZO5

Karşılaştırılan %1, %3 ve %5 Al katkılı 3 adet serinin ve katkısız ZnO serisinin adlandırılması Çizelge 3.3 'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.3. Al katkılı ZnO serilerin adlandırılması.

Döndürme Hızı (rpm)	Katman Sayısı	Tavlama Sıcaklığı (°C)	Al katkı miktarı (%)	Seri Adı
3000	9	500	-	ZnO
3000	9	500	1	AZO1
3000	9	500	3	AZO3
3000	9	500	5	AZO5

3.5. Deneyin Yapılışı

3.5.1. Katkısız ZnO Kaplama Deneyinin Yapılışı

Çözelti hazırlama aşaması bittikten sonra, temizlenen cam tabanlar üzerine, manyetik döndürerek kaplama aşamasına geçilmiştir. Deney parametreleri belirlenen ince filmleri üretmek için, cam altlıklar yüksek hızlarda dönebilen manyetik platform üzerine uygun bir şekilde yerleştirildi. Belirtilen miktarda çözelti mikro pipet yardımıyla cam tabanın her yerine eşit dağılmasını sağlamak için tam merkeze gelecek şekilde damlatıldı ve manyetik olarak döndürme işlemi başlatıldı. Dönüş süresi tamamlanınca cam altlıklar alındı ve kurumaları için fırının içerisinde 100°C'de 10 dakika boyunca ısı işleme tabi tutuldu. Kurutma işlemi yüzeyde tutunan çözeltiyi buharlaştırmak ve içerisindeki organik bileşiklerin yüzeyden uzaklaşmasını sağlamak için gerekli bir işlemdir. Bir kat kaplama için yapılan bu işlemler tekrarlanarak, 9 katlı filmler elde edildi. Daha sonra filmler, belirtilen sıcaklıklarda 2 saat süreyle tavlandı. Tavlama sonrası oluşan filmler oda sıcaklığına kadar soğutularak karakterizasyonlarının yapılabilmesi için hazır hale getirildi.

3.5.2. Cd Katkılı ZnO Kaplama Deneyinin Yapılışı

%1, %3 ve %5 oranlarında Cd katkılama yapılarak hazırlanan çözelti, temizlenerek kaplanmaya hazır hale getirilen cam tabanlar üzerine manyetik döndürerek kaplama aşamasına geçilmiştir. Deney parametreleri belirlenen ince filmleri üretmek

için, cam altlıklar yüksek hızlarda dönebilen manyetik platform üzerine uygun bir şekilde yerleştirildi. Belirtilenen miktarda çözelti mikro pipet yardımıyla cam tabanın her yerine eşit dağılmasını sağlamak için tam merkeze gelecek şekilde damlatıldı ve manyetik olarak 3000 rpm döndürme hızında döndürme işlemi başlatıldı. Dönüş süresi tamamlanınca cam altlıklar alındı ve kurumaları için fırının içerisinde 100 °C'de 10 dakika boyunca ısıtılma tabii tutuldu. Kurutma işlemi yüzeyde tutunan çözeltiyi buharlaştırmak ve içerisindeki organik bileşiklerin yüzeyden uzaklaşmasını sağlamak için gerekli bir işlemdir. Bir kat kaplama için yapılan bu işlemler tekrarlanarak, 9 katlı filmler elde edildi. Daha sonra filmler, 500°C'de hava ortamında 2 saat süreyle tavlandı.

3.5.3. Al Katkılı ZnO Kaplama Deneyinin Yapılışı

%1, %3 ve %5 oranlarında Al katkılama yapılarak hazırlanan Al katkılı ZnO çözeltisi hazırlanmıştır. 3000 rpm hızda manyetik olarak döndürülen cam tabanlar üzerine mikro pipet yardımı ile hazırlanmış olan Al katkılı ZnO kaplama çözeltisi belirlenen miktarda damlatılarak ince film kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Dönüş işlemi bitirildikten sonra platformdan alınan cam altlıklar, organik bileşiklerin yüzeyden uzaklaşması ve yüzeyde tutunan çözeltiyi uzaklaştırmak amacı ile 100 °C'de 10 dakika ısıtılma tabii tutulmuştur. Her kaplama katı için aynı işlemler uygulanarak 9 katlı Al katkılı ZnO ince filmler elde edilmiş ve kaplama işlemi tamamlandıktan sonra 2 saat süreyle 500 °C de tavlama işlemine tabii tutulmuştur.

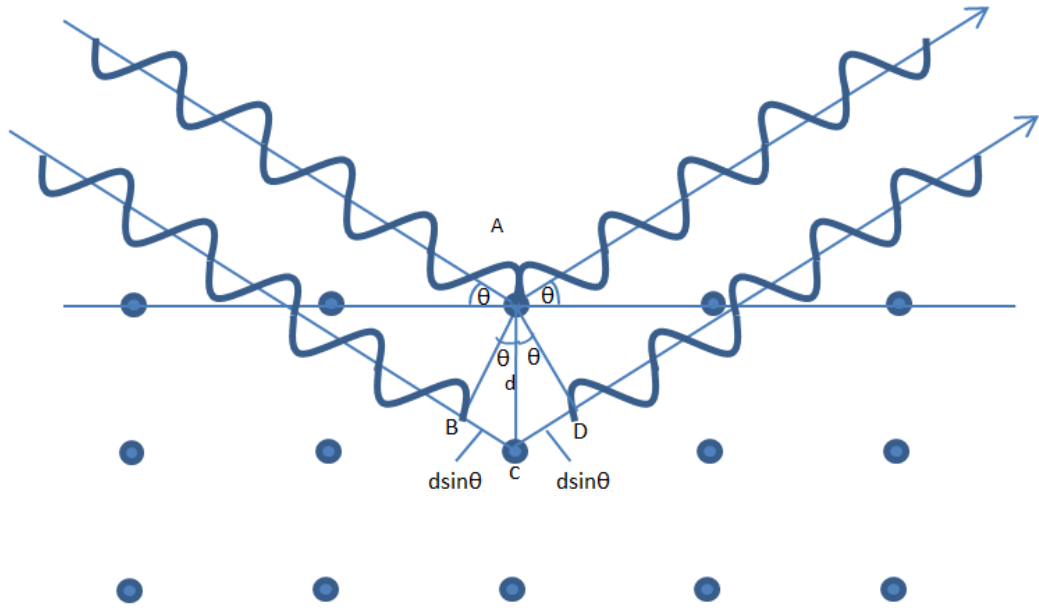
4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. İnce Filmlerin Yapısal Karakterizasyonu

Max Von Laue'nin öncü araştırmasından sonra, X-ışını kristalografisi alanı dikkate değer bir başlangıç yapmıştır. 1912-1913'te fizikçi William Lawrence Bragg ilk atomik çözünürlük yapısını belirlemiş ve Bragg yasasını ana hatlarıyla açıklamıştır. Kristallografiye mükemmel katkılarından dolayı 1915 yılında Nobel Fizik Ödülü'ne layık görülmüştür. Daha sonra, X-ışını kırınımı, her tür inorganik, organik ve biyolojik molekülün yanı sıra, minerallerin, metallerin, yarıiletkenlerin atomlarının düzenlenmesinin belirlenmesinde ana yöntem olarak kabul edilmiştir. 1960'larda, X-ışını radyografisi, kristal kırınım yoğunluğunun ölçülmesinde kullanılan tek araç olmuştur. Sonrasında bilimsel alanlardaki çok sayıda uygulamalarda kullanılarak popüler bir teknik haline gelmiştir. Son 100 yılda, X-ışını kırınım çalışmaları, metaller, kayalar, seramikler, çökeltiler ve hatta buz gibi çeşitli ortak materyallerde sunulan sıralı atomik yapılar hakkında bilgiler edinmemizi sağlamıştır. Malzeme yapılarının anlaşılmasıyla, bu malzemelerin uygulamaları güvenilir olmaya başlamış ve malzeme özellikleri ve yapısal özellikler hakkında bilimsel tartışmalar mümkün hale gelmiştir (Shih, 2013).

Katı kristal yapının analizinin yapılmasında ve kristalin karakteristik özelliklerin belirlenmesinde yaygın olarak X-ışınım kırınımı yöntemi kullanılmaktadır. X-ışınlarının 0,1-100 Å arasında kristallerin atomlar arası mesafesi ile kıyaslanabilecek boyutlarda dalga boyuna sahip olmaları kristal yapı analizinde kullanılmalara olanak sağlamaktadır. Periyodik tekrarlı ve düzenli dizilime sahip kristal yapı katıların üzerine X-ışınları geldiğinde kristallerin atomlarına çarparak yansır. Katı kristal atomlarından geometrik yapısına göre kırınıma uğramış X-ışınları demetinin oluşturduğu kırınım deseni ile kristal yapı belirlenir. Kırınım temel olarak Bragg Yasası ile incelenmektedir. Bragg yasası, X-ışını kırınımı ile, ışınların dalga boyu ve kristalin düzenli geometrik yapısı arasındaki bağlantıyı kurarak, ışınların, düzenli ardışık ve simetrik düzlemlerden yansması esasına dayanmaktadır (Cullity & Stock, 2001).

Bragg Yasası'na göre, Şekil 4.1'de görüldüğü üzere paralel örgü düzlemlerinin d aralıklarla sıralandığı ve bir X-ışını demetinin düzlemlerden birisi ile θ açısı yapacak biçimde geldiği varsayılır.



Şekil 4.1. X-ışınlarının kristal tarafından kırınımı

Kristal yapı üzerine X-ışınları θ açısıyla geldiğinde ışınların bazıları yüzey atomlarından yansıyarak saçılır. Simetrik komşu düzlemlerden de aynı anda saçılma meydana gelir. Yani ışın demeti hem üst hem de alt katmanlardaki atomlardan yansır. Üst katmandan yansıyan ışın, alt katmandan yansıyan ışına göre daha az yol kat edeceğinden, iki ışın demeti arasında bir yol farkı oluşur. İki ışın demeti arasında bir dikme çizilerek bu yol farkı Eşitlik 4.1 ile hesaplanır (Kittel, 1996).

$$|BC| + |CD| = d \sin \theta + d \sin \theta = 2d \sin \theta \quad (4.1)$$

Bragg Kırınımına göre meydana gelen yol farkı, yüzeye gönderilen ışının dalga boyunun (λ) tam katları şeklinde olduğunda yansıma gerçekleşir.

$$n\lambda = 2d \sin \theta_B \quad (4.2)$$

Burada; θ_B ; Bragg açısı, d ; düzlemler arası mesafeyi, n ; yansıma mertebesini göstermektedir. Yüzeye gönderilen ışının doğrultusu ile yansıyan ışın arasındaki kırınım açısı 2θ 'dir. Bragg Yasası ile belirlenmesi istenilen kristal yapı üzerine bilinen dalga boyunda gönderilen ışının kırınım açısı 2θ ölçülerek düzlemler arası d mesafesi bulur ve malzemenin X-ışını kırınım deseni elde edilir. Elde edilen kırınım desenleri incelendiğinde malzemelerin kristal yapıları hakkında bilgi edinebilmektedir.

Malzemenin kristal düzlemleri, düzlemlere ait pik şiddetleri ve yarı pik aralığı hesaplanarak kristalleşme bilgisi elde edilir. Düzlemlerin pik şiddeti büyük ve yarı pik aralığı küçük ise kristalleşme iyi demektir (Grosso & Parravicini, 2013).

Ortalama tane boyutu; kristalleşme hakkında bilgi veren bir diğer parametre olup Eşitlik 4.3'de gösterilen Scherrer Formülü ile hesaplanır.

$$D = \frac{0,9\lambda}{\beta \cos\theta_B} \quad (4.3)$$

Burada λ ; X-ışınlarının dalga boyu, β ; radyan cinsinden yarı pik genişliğidir. Tane boyutu değerlerinin artması, tane sınırlarının azalması anlamına gelir. Bu yüzden tane boyutu arttıkça kristalleşme iyileşir (Cullity & Stock, 2001).

4.1.1. ZnO İnce Filmlerinin Yapısal Karakterizasyonu

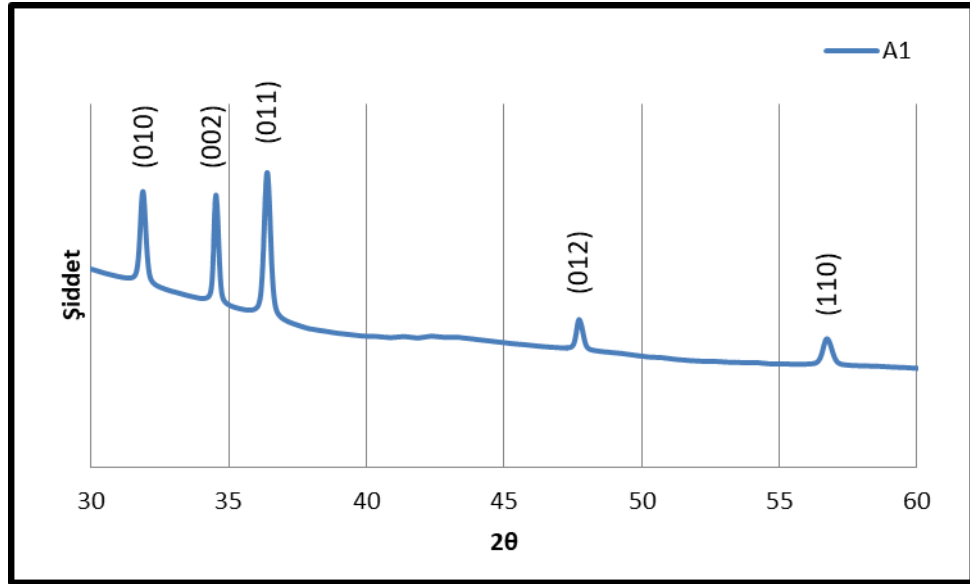
Elde edilen filmlerin yapısal özelliklerinin incelenmesi için Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan şekil 4.2'de gösterilen PANALYTICAL Emprean X-Işını Kırınımı (XRD) cihazı kullanılmıştır.



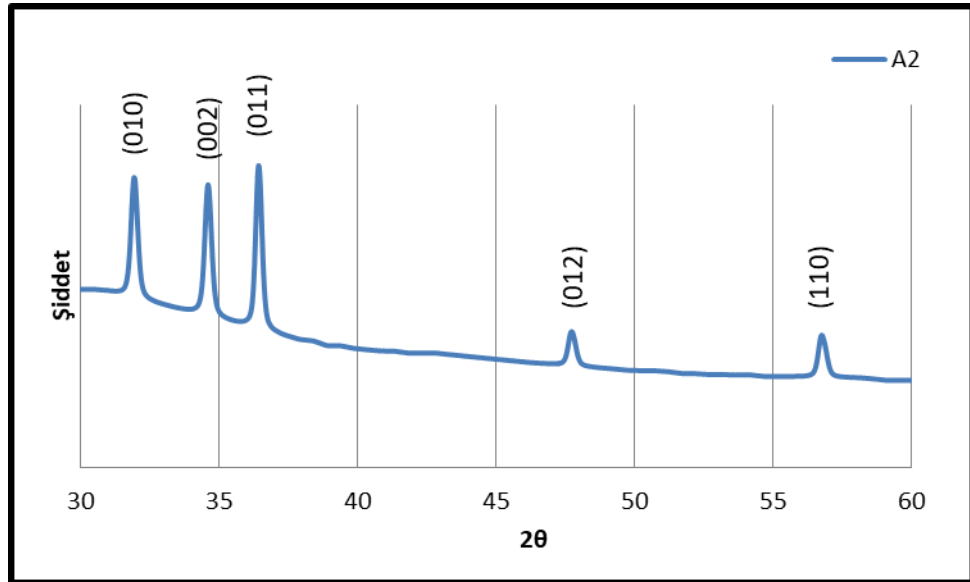
Şekil 4.2. X-Işını Kırınımı (XRD) cihazı

Cihazın çalışma şartları olarak 45 kV voltaj ve 40 mA akım uygulanmıştır. Tarama hızı 2 derece/dakika seçilmiş, dalgaboyu 1,5406 Å olan CuK_α ışını kullanılmış ve numuneler $30^\circ \leq 2\theta \leq 60^\circ$ sınır değerlerinde incelenmiştir. Bulunan yapılar; hegzagonal

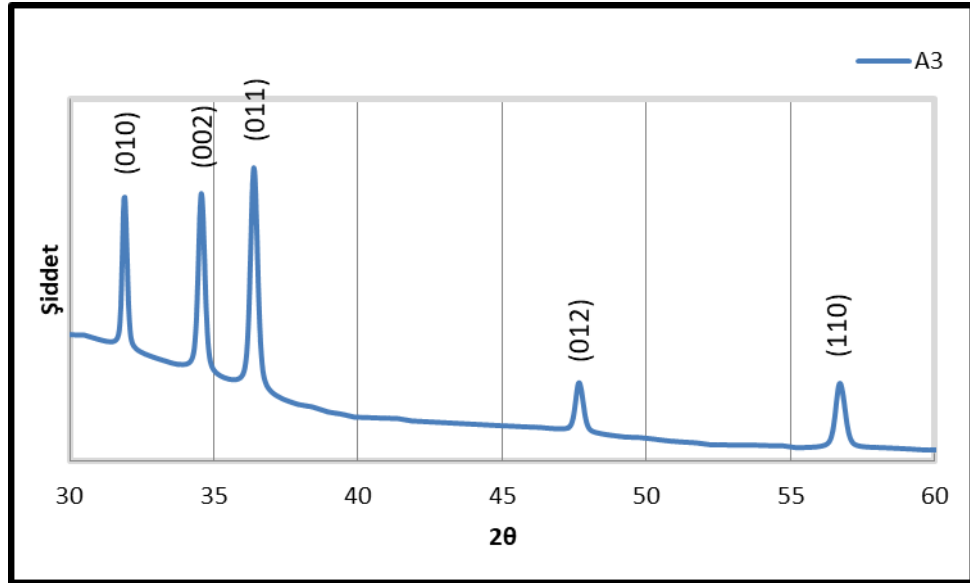
yapıda ZnO için ICDD (International Centre for Diffraction Data): 98-003-1052 ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te A serisi ZnO ince filmlere ait XRD analiz spektrumları ayrı ayrı verilmektedir. Ayrıca Şekil 4.6'da A serisi ZnO ince filmlerin XRD analiz spektrumları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



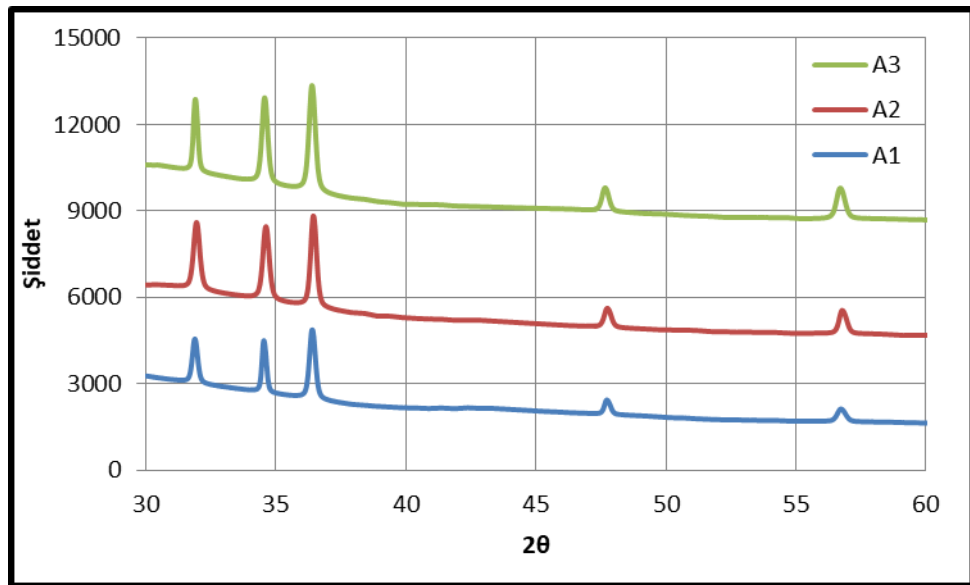
Şekil 4.3. A1 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu



Şekil 4.4. A2 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu



Şekil 4.5. A3 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu.



Şekil 4.6. A serisi ince filmlerin karşılaştırmalı XRD analiz spektrumu

XRD spektrumlarından da görüldüğü gibi, tüm seriler polikristal yapıdadır. Ayrıca A3 serisi ZnO ince filmlerin pik şiddetleri A1 ve A2 serisi ince filmlerin pik şiddetlerinden daha büyüktür. Tüm serilerde en şiddetli pik hekzagonal ZnO yapısına ait (011) pikidir. Ayrıca bu filmlerde sırasıyla (010), (002), (011), (012) ve (110) olmak üzere 5 adet pik gözlenmektedir.

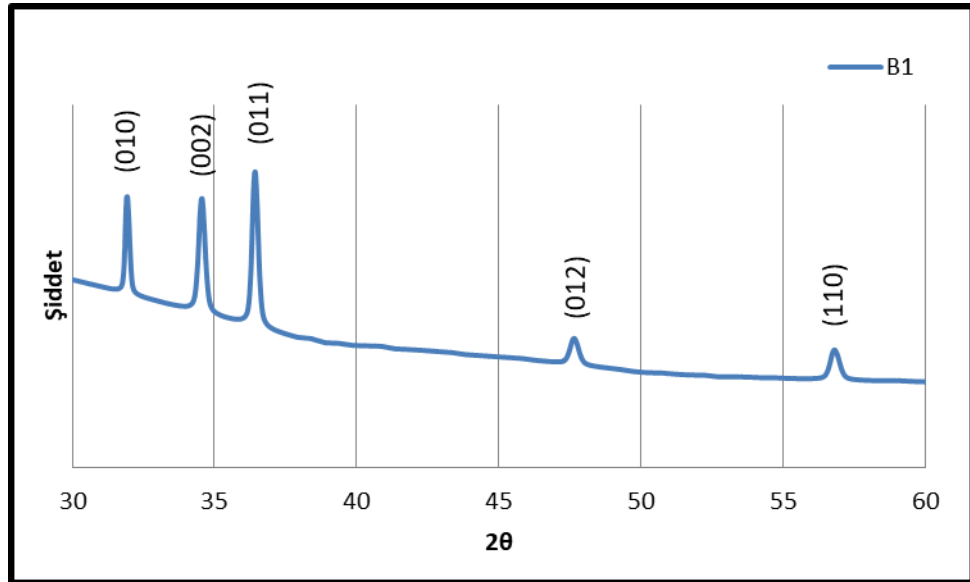
Çizelge 4.1 'de A serisi ZnO ince filmlerin XRD spektrumundan elde edilen yarı pik genişlikleri (FWHM) ve Scherrer Formülü ile hesaplanan tane boyutu değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. A serisi piklerine ait bilgiler.

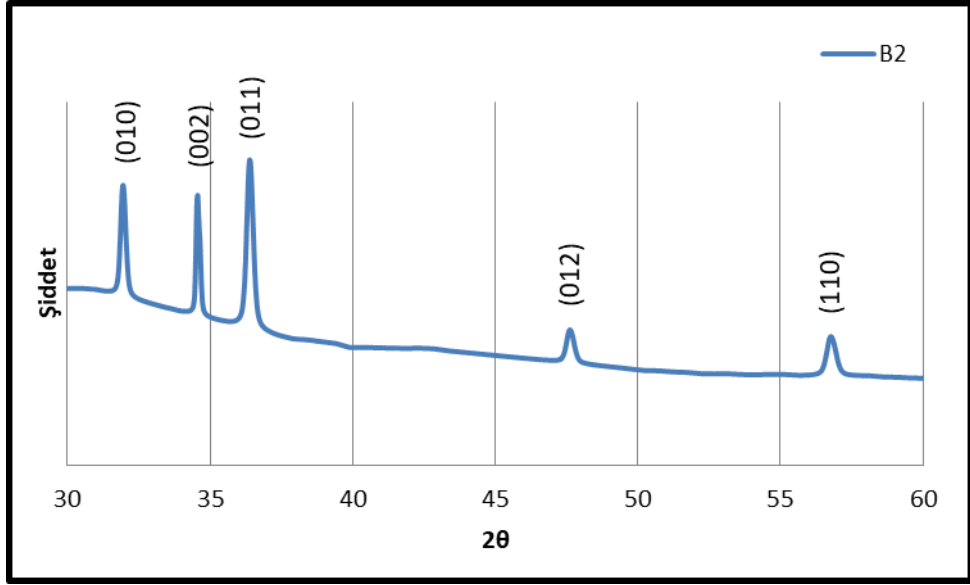
Seri	FWHM	D (nm)
A1	0,29	68
A2	0,28	70
A3	0,23	88

Bu veriler ve XRD spektrumları göz önüne alındığında, A serisi için en iyi kristalleşmeyi A3 serisi ince filmler göstermiştir.

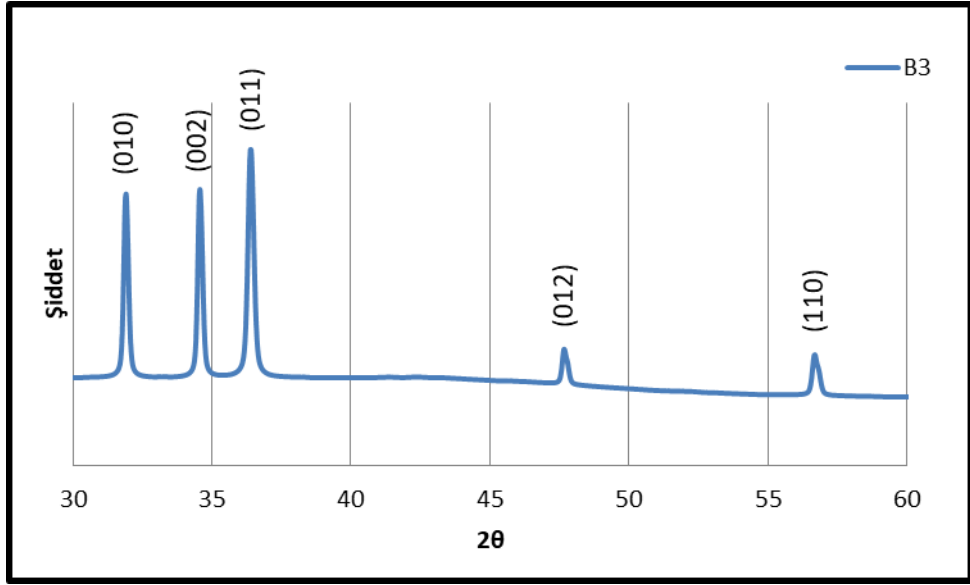
Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da B serisi ZnO ince filmlere ait XRD analiz spektrumları ayrı ayrı verilmektedir. Ayrıca Şekil 4.10 'da B serisi ZnO ince filmlerin XRD analiz spektrumları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



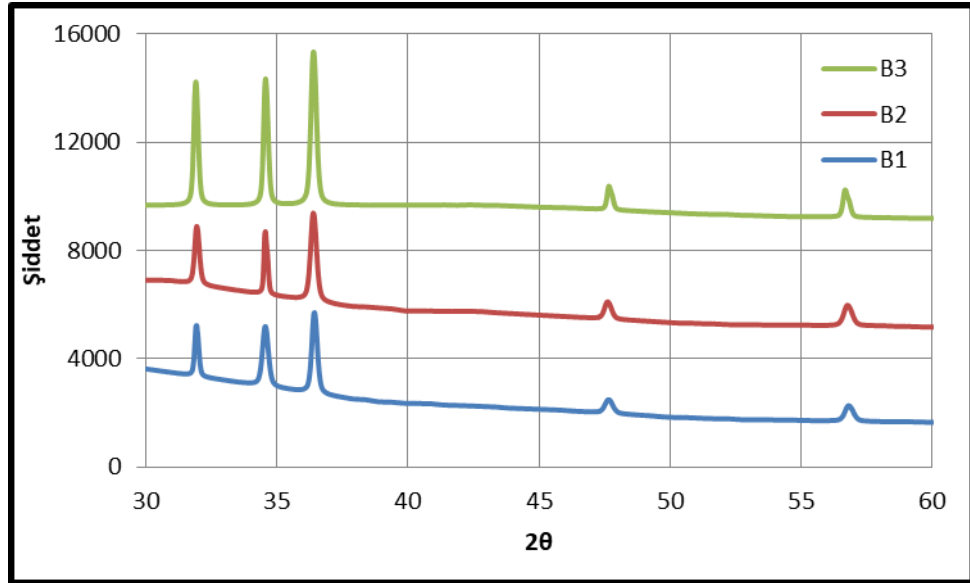
Şekil 4.7. B1 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu.



Şekil 4.8. B2 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu.



Şekil 4.9. B3 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu.



Şekil 4.10. B serisi ince filmlerin karşılaştırmalı XRD analiz spektrumu.

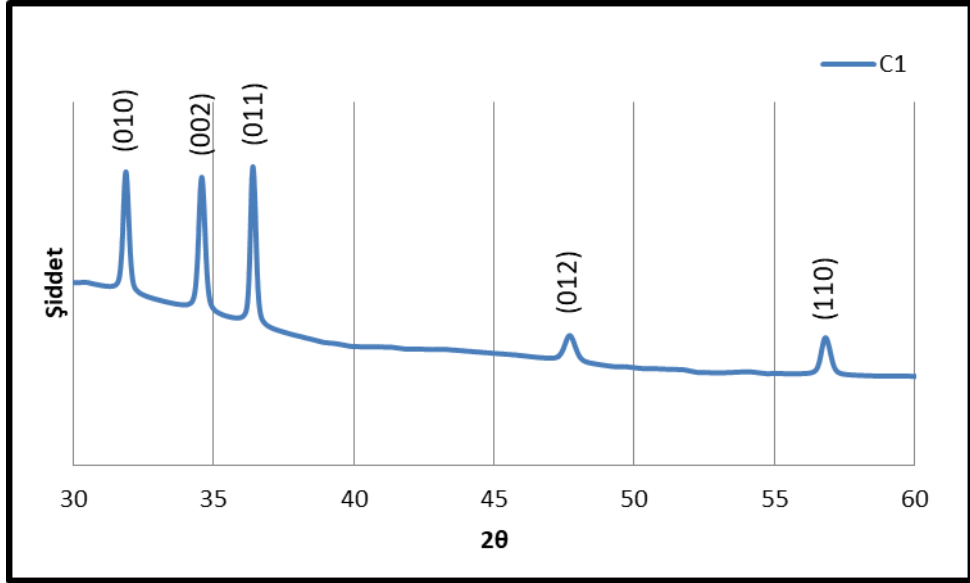
XRD spektrumlarından da görüldüğü gibi, tüm seriler polikristal yapıdadır. Ayrıca B3 serisi ZnO ince filmlerin pik şiddetleri, B1 ve B2 serisi ince filmlerin pik şiddetlerinden daha büyüktür. Tüm serilerde en şiddetli pik hekzagonal ZnO yapısına ait (011) pikidir. Ayrıca bu filmlerde sırasıyla (010), (002), (011), (012) ve (110) olmak üzere 5 adet pik gözlenmektedir. Çizelge 4.2’de B serisi ZnO ince filmlerin XRD spektrumundan elde edilen yarı pik genişlikleri (FWHM) ve Scherrer Formülü ile hesaplanan tane boyutu değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.2. B serisi piklerine ait bilgiler.

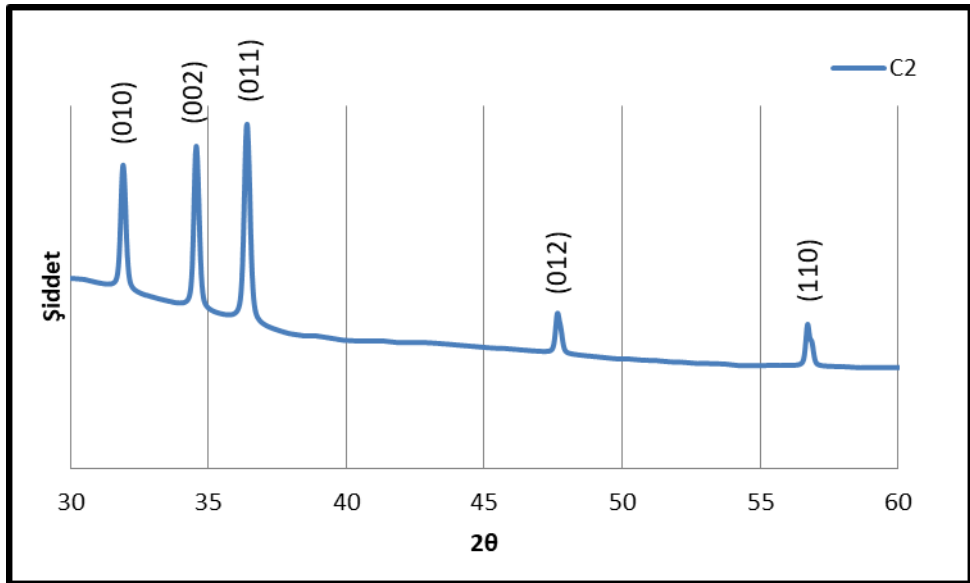
Seri	FWHM	D (nm)
B1	0,25	84
B2	0,23	86
B3	0,18	108

Yarı pik genişliği ve ortalama tane boyutu değerleri incelendiğinde ve XRD spektrumları göz önüne alındığında, B serisi için en iyi kristalleşmeyi B3 serisi ince filmler göstermiştir.

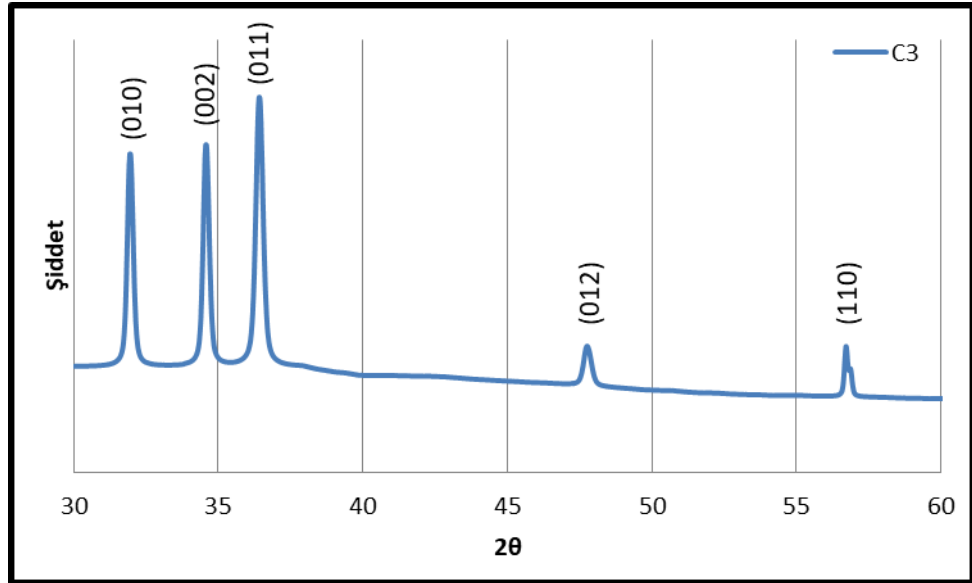
Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de C serisi ZnO ince filmlere ait XRD analiz spektrumları ayrı ayrı verilmektedir. Ayrıca Şekil 4.14’de C serisi ZnO ince filmlerin XRD analiz spektrumları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



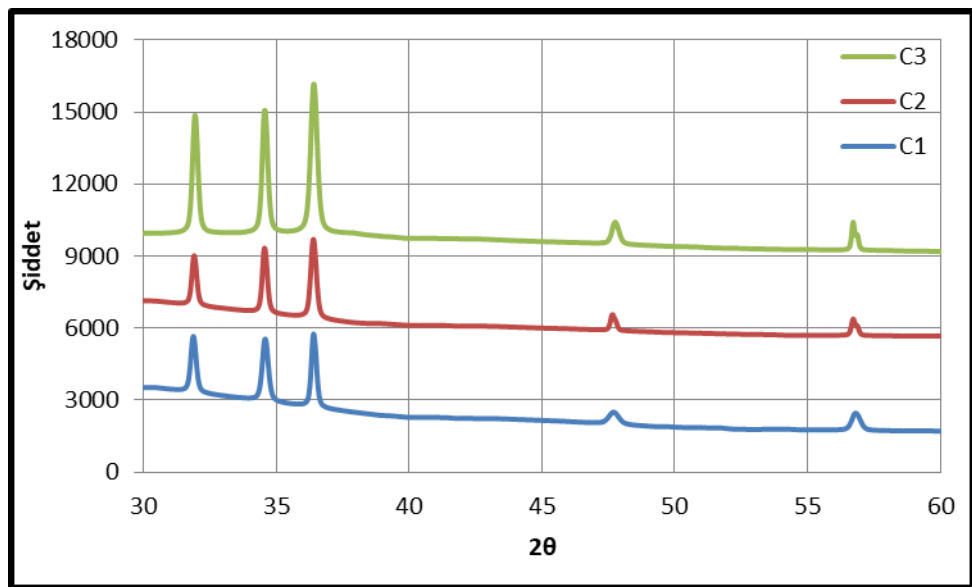
Şekil 4.11. C1 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu.



Şekil 4.12. C2 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu.



Şekil 4.13. C3 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu.



Şekil 4.14. C serisi ince filmlerin karşılaştırmalı XRD analiz spektrumu.

XRD spektrumlarından da görüldüğü gibi, tüm seriler polikristal yapıdadır. Ayrıca C3 serisi ZnO ince filmlerin pik şiddetleri, C1 ve C2 serisi ince filmlerin pik şiddetlerinden daha büyüktür. Tüm serilerde en şiddetli pik hekzagonal ZnO yapısına ait (011) pikidir. Ayrıca bu filmlerde sırasıyla (010), (002), (011), (012) ve (110) olmak üzere 5 adet pik gözlenmektedir. Çizelge 4.3'de C serisi ZnO ince filmlerin XRD

spektrumundan elde edilen yarı pik genişlikleri (FWHM) ve Scherrer Formülü ile hesaplanan tane boyutu değerleri verilmiştir.

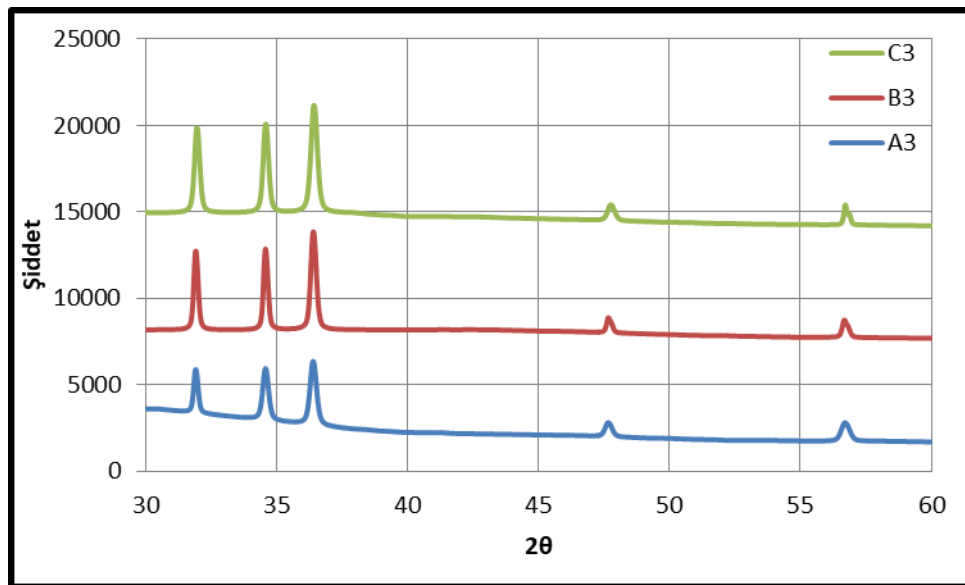
Çizelge 4.3. C serisi piklerine ait bilgiler.

Seri	FWHM	D (nm)
C1	0,25	82
C2	0,20	90
C3	0,17	112

Yarı pik genişliği ve ortalama tane boyutu değerleri incelendiğinde ve XRD spektrumları göz önüne alındığında, C serisi için en iyi kristalleşmeyi C3 serisi ince filmler göstermiştir.

A, B ve C serileri XRD spektrumları incelendiğinde her seride en iyi kristalleşmeyi gösteren filmlerin 500°C’de tavlanan A3, B3 ve C3 serileri olduğu görülmüştür. Tavlama sıcaklığı arttıkça kristalleşme iyileşmektedir.

Şekil 4.15’te de tüm seriler içinde en iyi kristalleşmeyi gösteren A3, B3 ve C3 ince filmlerin XRD analiz spektrumları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Çizelge 4.4’de de A3, B3 ve C3 serisi ZnO ince filmlerin XRD spektrumundan elde edilen yarı pik genişlikleri (FWHM) ve Scherrer Formülü ile hesaplanan tane boyutu değerleri verilmiştir.



Şekil 4.15. ZnO ince filmlerin karşılaştırmalı XRD analiz spektrumu.

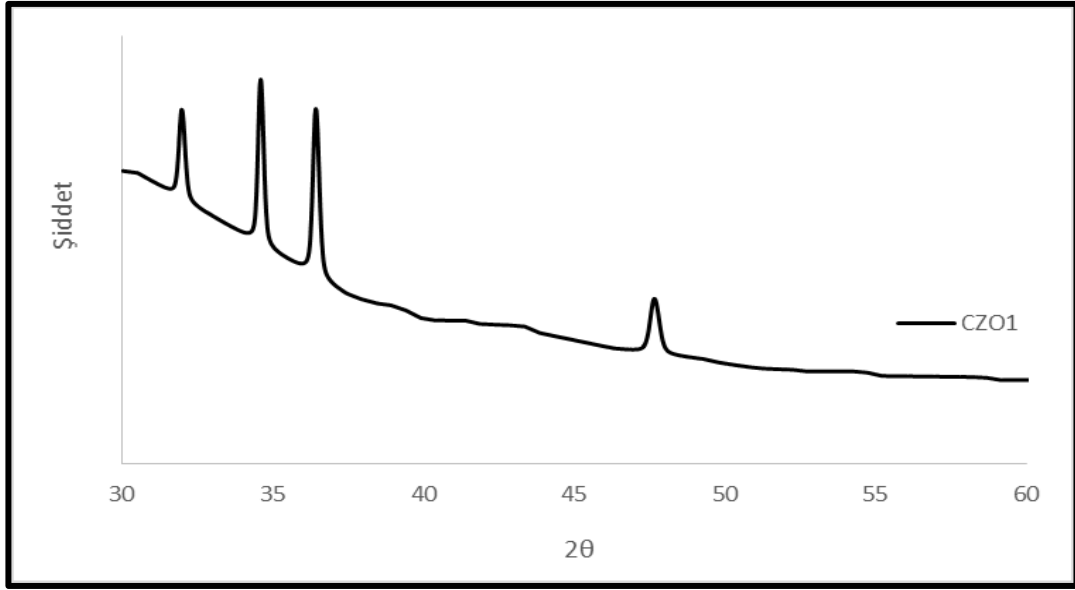
Çizelge 4.4. A3, B3 ve C3 serilerinin piklerine ait bilgiler.

Seri	FWHM	D (nm)
A3	0,23	88
B3	0,18	108
C3	0,17	112

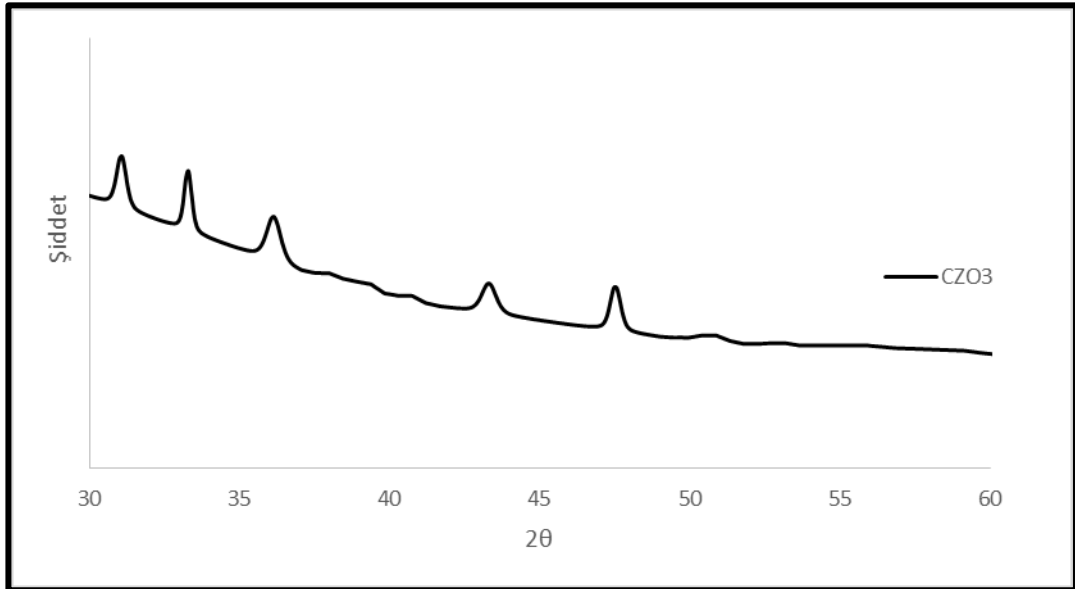
XRD spektrumları ve çizelge incelendiğinde döndürme hızı arttıkça kristalleşmenin iyileştiği görülmektedir. Bu sonuçlara göre, 3000 rpm döndürme hızında 9 katman olarak üretilen ve 500°C’de tavlanan C3 serisi tüm seriler içinde en iyi kristalleşmeyi gösteren ince film olarak öne çıkmıştır. ZnO ince filmlerin üretiminde elde edilen sonuçlar doğrultusunda, Al ve Cd katkılı ZnO ince filmlerin üretim şartları olarak 3000 rpm döndürme hızı ve 500°C tavlama sıcaklığı uygulanacaktır.

4.1.2. Cd Katkılı ZnO İnce Filmlerin Yapısal Karakterizasyonu

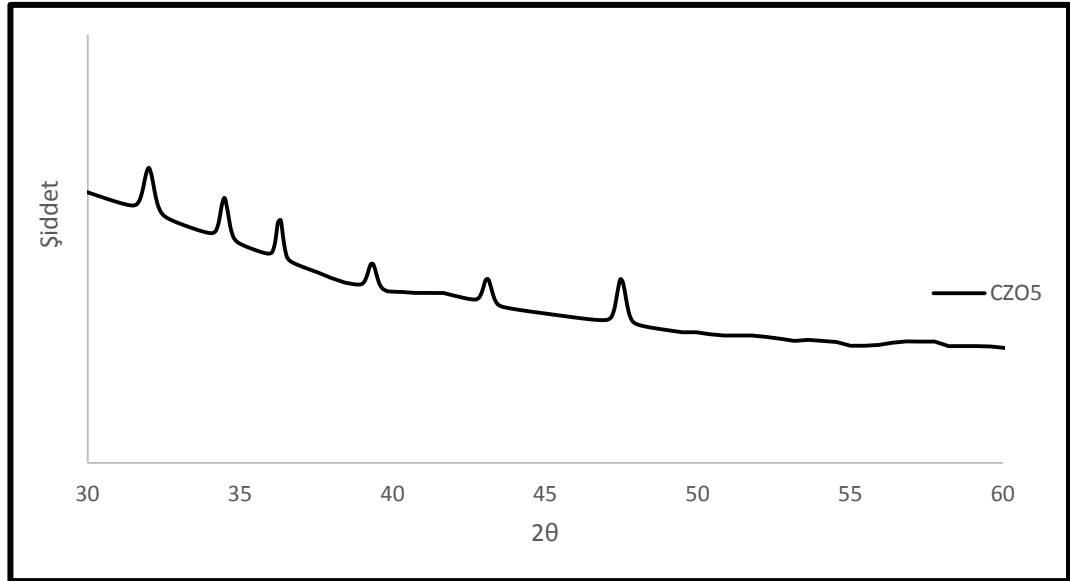
Elde edilen Cd katkılı ZnO ince filmlerin yapısal özelliklerinin incelenmesinde ZnO için uygulanan X-Işını Kırınımı (XRD) cihazı aynı çalışma şartlarında kullanılmıştır. Bulunan yapılar; hekzagonal yapıda ZnO için ICDD (International Centre for Diffraction Data): 98-003-1052 ve hekzagonal yapıda CdZn için 98-010-2090 kartları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’te CZO serisi ince filmlere ait XRD analiz spektrumları ayrı ayrı verilmektedir. Ayrıca Şekil 4.19’da ise katkısız ZnO ile katkılı CZO ince filmlerin XRD analiz spektrumları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



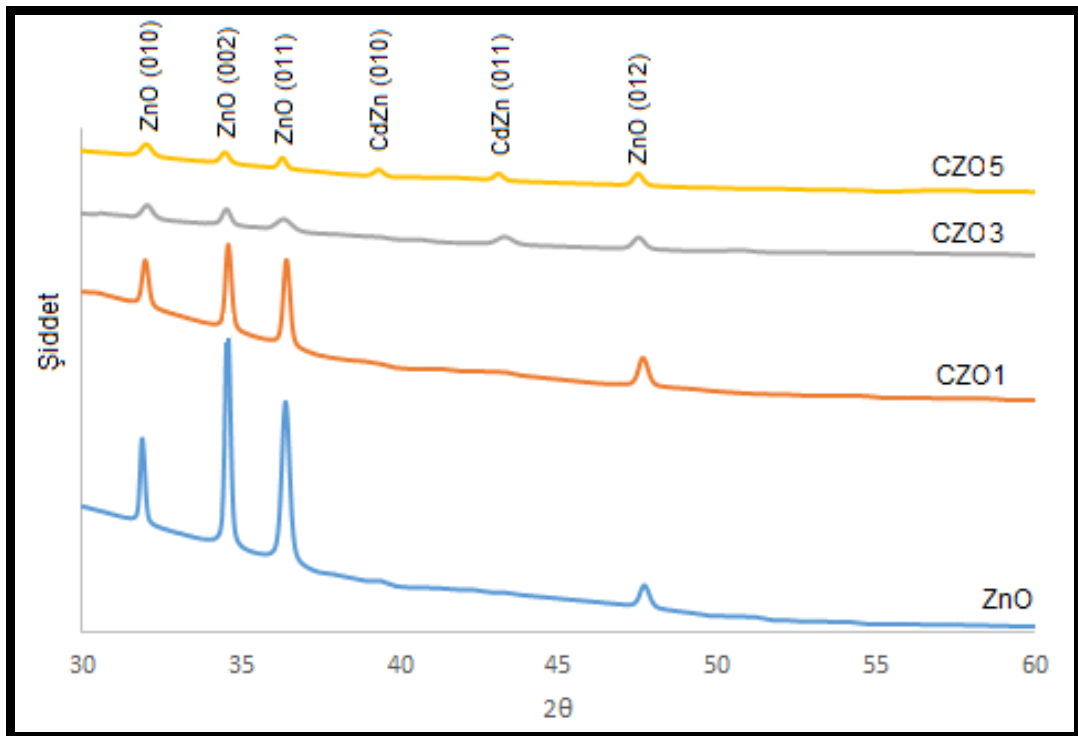
Şekil 4.16. CZO1 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu.



Şekil 4.17. CZO3 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu.



Şekil 4.18. CZO5 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu.



Şekil 4.19. Katkısız ZnO ile katkılı CZO ince filmlerin karşılaştırmalı XRD analiz spektrumu.

XRD spektrumlarından da görüldüğü gibi, tüm seriler polikristal yapıdadır. Katkısız ZnO serisi filmlerde hekzagonal ZnO yapısına ait (010), (002), (011) ve (012) olmak üzere 4 adet pik gözlenmektedir. CZO1 serisinden itibaren %1 olarak katkılanan

Cd'nin etkisiyle birlikte Cd yapısına ait herhangi bir pik gözlenirse de katkılanan Cd ile ZnO yapısına ait piklerin şiddetlerinde düşüş meydana gelmiştir. Katkı miktarının artmasıyla CZO3 serisinde ZnO serisine ait piklerin yanında hekzagonal CdZn yapısına ait (011) piki gözlenmeye başlanmıştır. CZO5 serisinde katkı miktarının %5'e çıkartılmasıyla birlikte ZnO serisine ait piklerin yanında hekzagonal CdZn yapısına ait sırasıyla (010) ve (011) pikleri gözlenmiştir. Ayrıca karşılaştırmalı XRD spektrumundan da açıkça görüldüğü gibi pik şiddetleri, katkılama oranı arttıkça bariz bir şekilde düşmüştür. Bu sonuçlardan ZnO yapısına katkılanan Cd oranı arttıkça kristalleşme seviyesinin düştüğü anlaşılmaktadır.

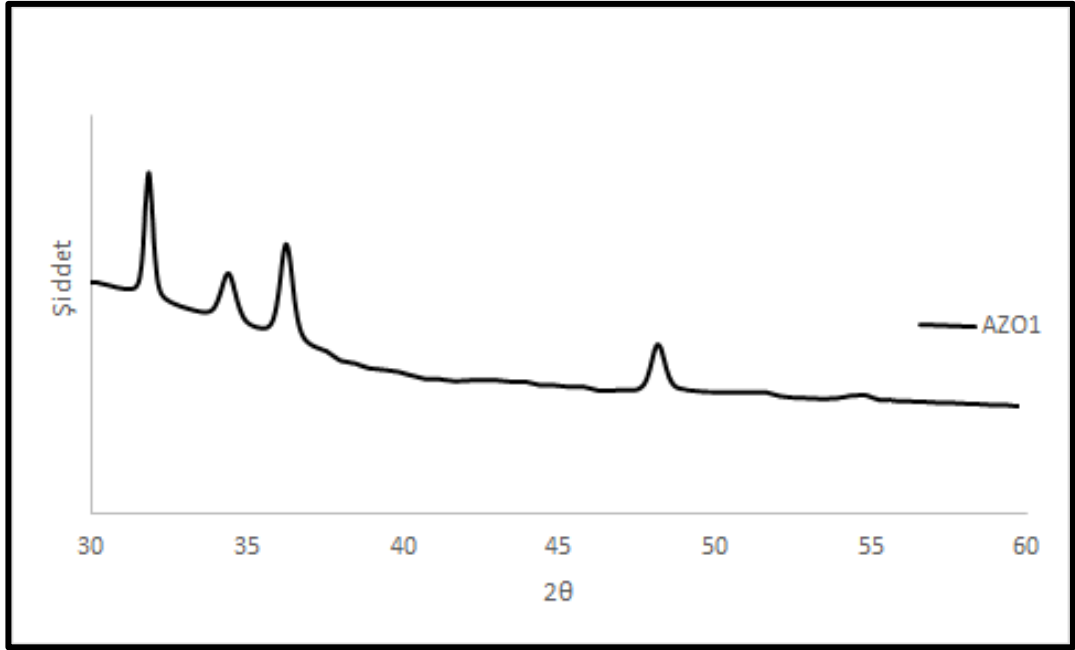
Çizelge 4.5'de katkısız ZnO ile katkılı CZO ince filmlerin Scherrer Formülü ile hesaplanan tane boyutu değerleri verilmiştir. Çizelgeden görüleceği gibi katkı miktarı arttıkça ortalama tane boyutu değerleri artmaktadır.

Çizelge 4.5. Katkısız ZnO ile katkılı CZO ince filmlerin tane boyutu değerleri.

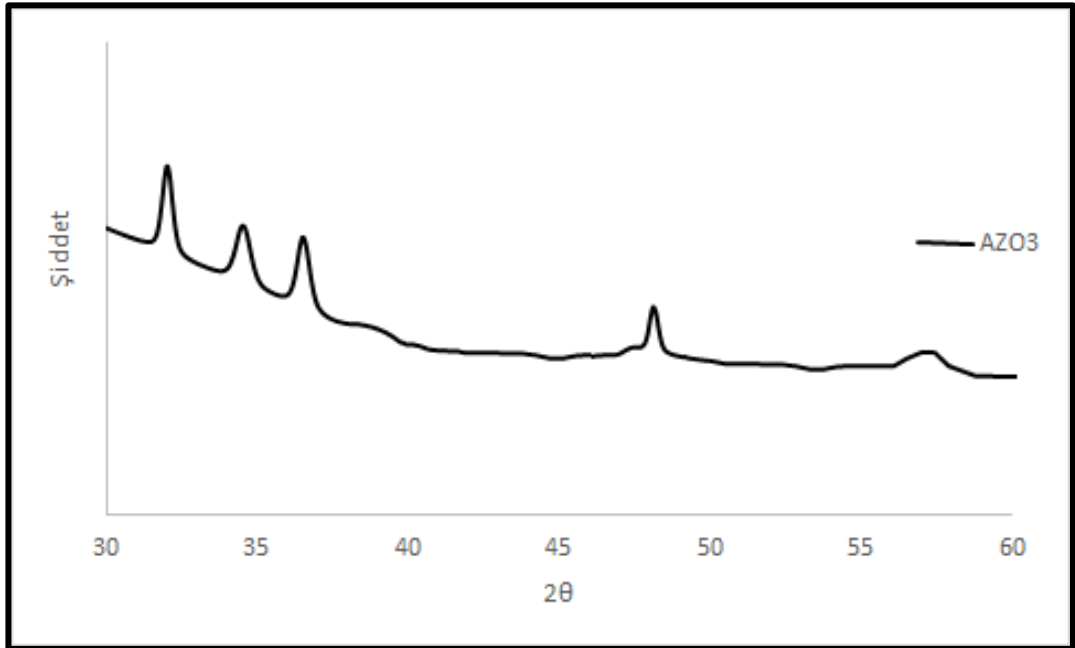
Seri	D (nm)
ZnO	112
CZO1	113
CZO3	130
CZO5	154

4.1.3. Al Katkılı ZnO İnce Filmlerin Yapısal Karakterizasyonu

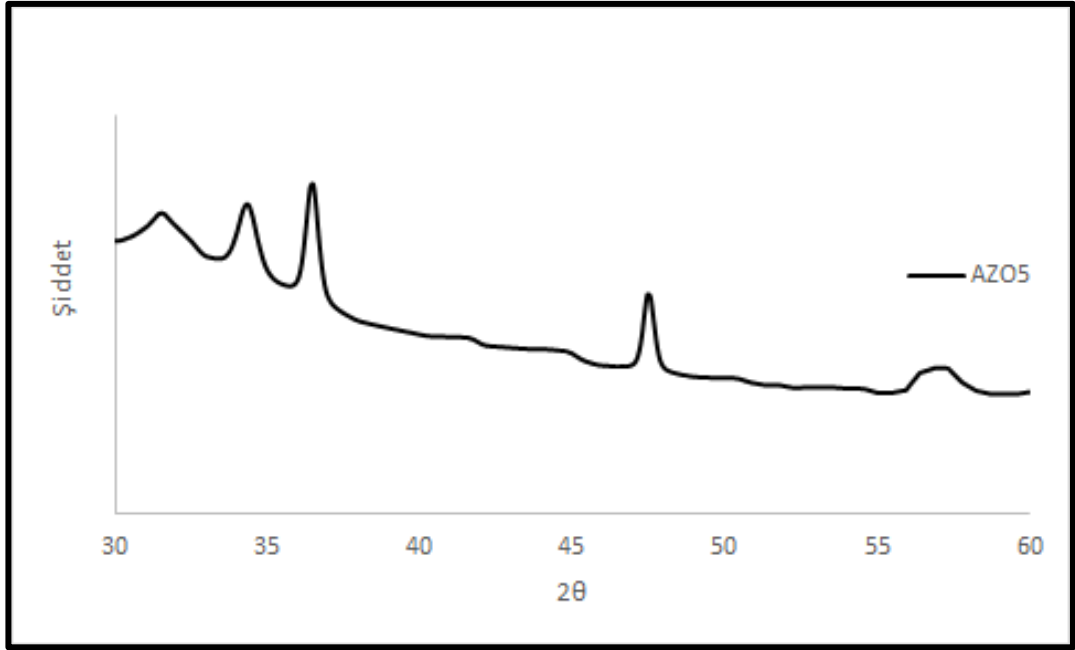
Elde edilen Al katkılı ZnO ince filmlerin yapısal özelliklerinin incelenmesinde ZnO için uygulanan X-Işını Kırınımı (XRD) cihazı aynı çalışma şartlarında kullanılmıştır. Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de AZO serisi ince filmlere ait XRD analiz spektrumları ayrı ayrı verilmektedir. Ayrıca Şekil 4.23'te ise katkısız ZnO ile katkılı AZO ince filmlerin XRD analiz spektrumları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



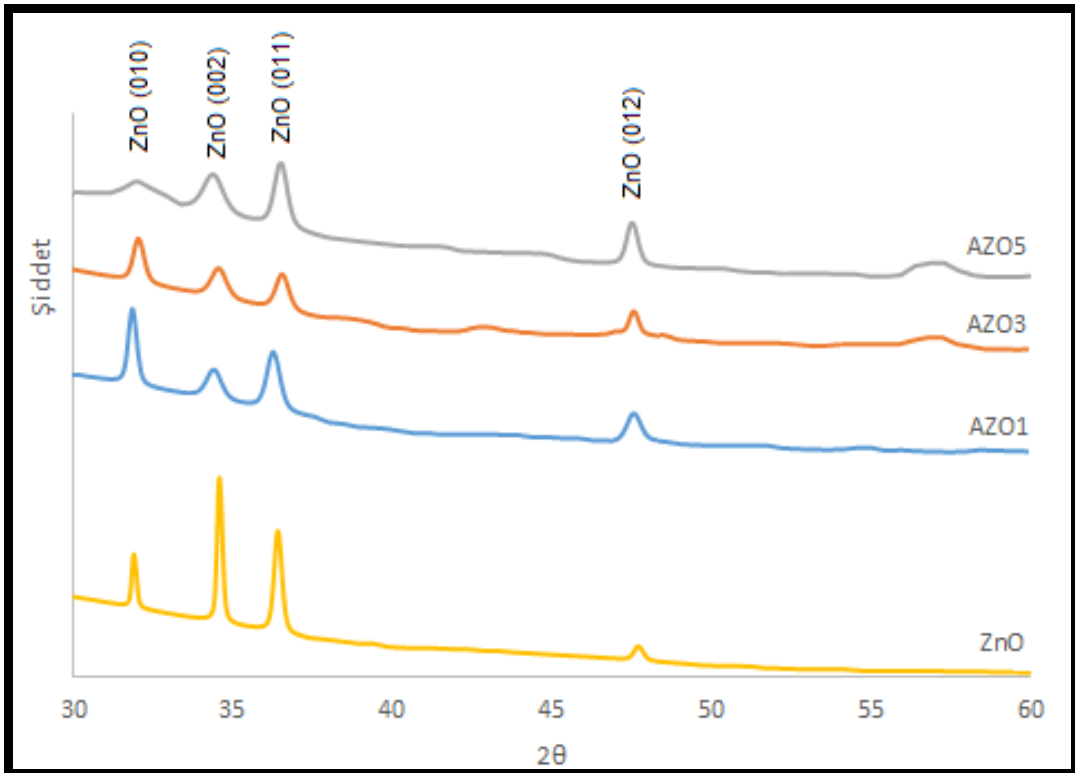
Şekil 4.20. AZO1 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu.



Şekil 4.21. AZO3 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu.



Şekil 4.22. AZO5 serisi ince filmlerin XRD analiz spektrumu.



Şekil 4.23. Katkısız ZnO ile katkılı AZO ince filmlerin karşılaştırmalı XRD analiz spektrumu.

XRD spektrumlarından da görüldüğü gibi, tüm seriler polikristal yapıdadır. Katkısız ZnO serisi filmlerde hekzagonal ZnO yapısına ait (010), (002), (011) ve (012) olmak üzere 4 adet pik gözlenmektedir. AZO1 serisinden itibaren %1 olarak katkılanan Al'nin etkisiyle birlikte %3 ve %5 katkılama oranlarında da Al yapısına ait herhangi bir pik gözlenmemektedir. Buna karşılık katkı miktarının artmasıyla pik şiddetleri, bariz bir şekilde düşmüştür. Bu sonuçlardan ZnO yapısına katkılanan Al oranı arttıkça kristalleşme seviyesinin düştüğü anlaşılmaktadır. Ayrıca katkısız ZnO yapısında tercihli yönelim (002) piki iken Al katkılama başlandıktan sonra tercihli yönelim de değişmeye başlamıştır. %1 ve %3 katkılanan AZO1 ve AZO3 serilerinde tercihli yönelim (010) piki olarak görülürken, %5 Al katkısı ile oluşan AZO5 serisinde tercihli yönelim (011) piki olarak gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara göre Al katkılama ile ZnO yapısının tercihli yönelimi değiştirilebilmektedir. Zn ve Al atomlarının iyonik yarıçaplarının birbirinden farklı olması ve katkı atomu olarak kullanılan Al ($r_{Al^{+3}} = 0,053$ nm) atomunun iyonik yarıçapının Zn ($r_{Zn^{+2}} = 0,074$ nm) atomunununkinden küçük olması sebebiyle Al yapıda bileşik oluşturmamıştır (Çağlar vd., 2012)

XRD spektrumlarından elde edilen bilgilerle Scherrer Formülü kullanılarak ortalama tane boyutu (D) değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 4.6'da katkısız ZnO ile katkılı AZO ince filmlerin hesaplanan tane boyutu değerleri verilmiştir. Çizelgeden görüleceği gibi katkı miktarı arttıkça ortalama tane boyutu değerleri artmaktadır.

Çizelge 4.6. Katkısız ZnO ile katkılı AZO ince filmlerin tane boyutu değerleri.

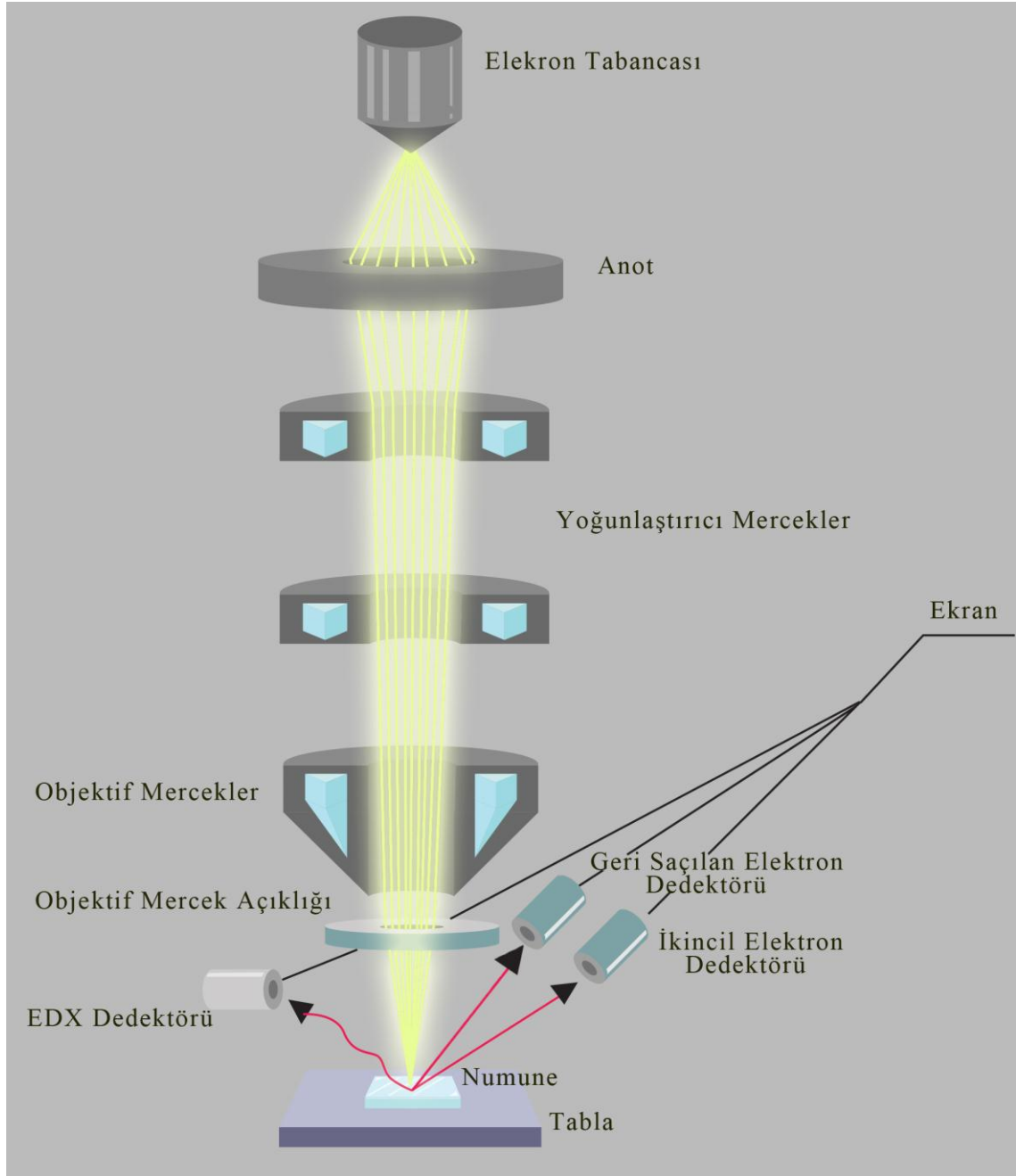
Seri	D (nm)
ZnO	112
AZO1	132
AZO3	155
AZO5	186

4.2. İnce Filmlerin Yüzeysel Karakterizasyonu

Morfolojik çalışmalar fiziksel nesnelere şekil, doku, ve yapısının belirlenmesini amaçlamaktadır. Nano boyuttaki malzemelerin morfolojisini görüntülemek için ışık kullanılamaz, çünkü ışığın çözünürlüğü dalga boyu ile sınırlıdır ve optik mikroskopik çalışmalar morfolojik özellikleri analiz için yeterli değildir. Morfolojik özellikler elektron mikroskopları ile incelenir. Elektron mikroskoplarında, dalga boyları

fotonlarınkinden çok daha kısa olan elektronlar kullanılır. Maddelerin atomik olarak çözümlenip gözlenmesinde bu mikroskoplardan faydalanılır. Taramalı elektron mikroskobu, numunenin bir görüntüsünü, odaklanmış bir elektron demeti ile tarayarak görüntüler. Elektronlar, yüzey morfolojisi ve bileşimlerinin bilgisini içeren çeşitli sinyaller üreten numunedeki bir atomla etkileşime girer.

Taramalı elektron mikroskobunun şekil 4.24’de görüldüğü gibi temel bileşenleri, elektron tabancası, mercekler, numune tablası ve detektörlerdir. Elektron tabancası, esasen SEM'in çalıştırılması için bir elektron ışını demeti üretmektedir. Termiyonik tabanca ve alan emisyon tabancası olarak iki tip elektron tabancası vardır. Elektronlar, tabancayla potansiyel fark uygulanarak, ısıtılan tungsten filamanına doğru elektron tabancasından dışarı çıkarlar. Mercekler ayrıntılı ve net bir görüntü üretebilmek için optik mercek gibi işlev görürler. Elektron ışını 0.2 keV ila 40 keV arasında değişen bir enerjiye sahiptir ve bir veya iki yoğunlaştırıcı mercekle yaklaşık 0.4 nm ila 5 nm çapındaki bir noktaya odaklanır. Işın, x ve y ekseni boyunca yönlendiren son bir mercekten geçer. SEM’lerde atmosferdeki hava moleküllerinden kaynaklanan paraziti engellemek için vakum gereklidir (Saravanan, 2016).



Şekil 4.24. Taramalı elektron mikroskobu

Taramalı Elektron Mikroskobunda elektron ışını yoğun olarak odaklanır ve katı bir yüzey üzerinde taranır. Işının numune materyali ile etkileşimi elemental analiz için kullanılacak floresan emisyonu içeren çeşitli tepkiler üretir. En büyük tepkimelerden biri malzemenin yüzeyinden saçılan yüksek miktarda düşük enerjili ikincil elektronlardır. İkincil elektron verimi, prob ışını ve lokal yüzey topografyası arasındaki etki açısına güçlü olarak bağlıdır ve bu yüzden ışının yüzey boyunca rasterlenmesi,

topografyanın değişmesi ile değişen bir yoğunluğa yol açar. İkincil elektron emisyon yoğunluğundaki bu değişiklikler, senkronize olarak taranmış bir katod ışını tütün parlaklığını modüle etmek ve bir görüntü oluşturmak için kullanılır. Görüntü, prob ışınının çapı tarafından belirlenen bir yanal çözünürlük ile 500 KX'e kadar yüksek oranda büyütülebilir ve optik bir görüntüye sahip olabilir. İkincil elektronlara ek olarak, çok daha küçük miktarda geri saçılmış primer elektron üretilir. Primer elektronlar yoğunlukla malzemeye kuvvetli bir şekilde bağlanırlar ve bu nedenle görüntü bir miktar Z kontrastı içerir. Düşük enerjili ikincileri filtrelemek bu kontrastı artırır ve topoğrafya görüntüsü yerine bir ortalama Z bağımlı görüntü oluşturur (Wachs & Fitzpatrick, 1992).

SEM genellikle incelenecek numunenin bir alanının büyütölmüş bir görüntüsünü sağlamak için kullanılan bir tekniktir ve elemental analiz kabiliyeti sağlamak için EDS gibi yardımcı bir analitik teknikle birlikte kullanılır.

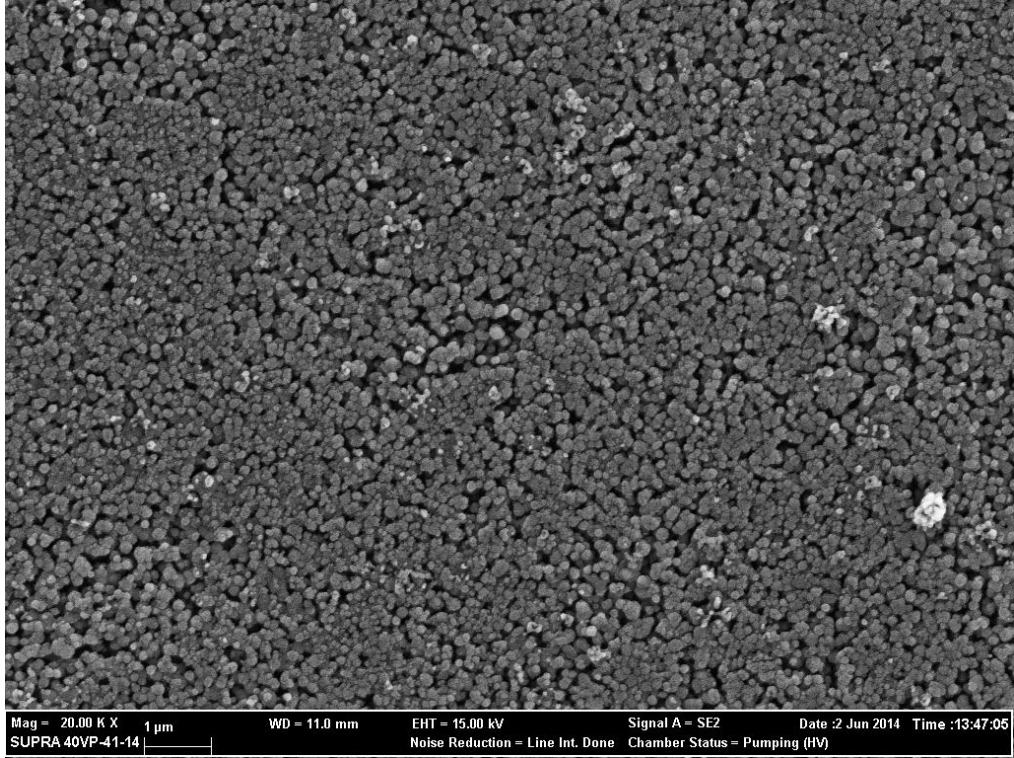
4.2.1. ZnO İnce Filmlerin Yüzeysel Karakterizasyonu

Elde edilen filmlerin yüzey özelliklerinin incelenmesi için Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan Şekil 4.25'te gösterilen ZEISS Supra 40VP Alan Emisyonu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) kullanılmıştır.

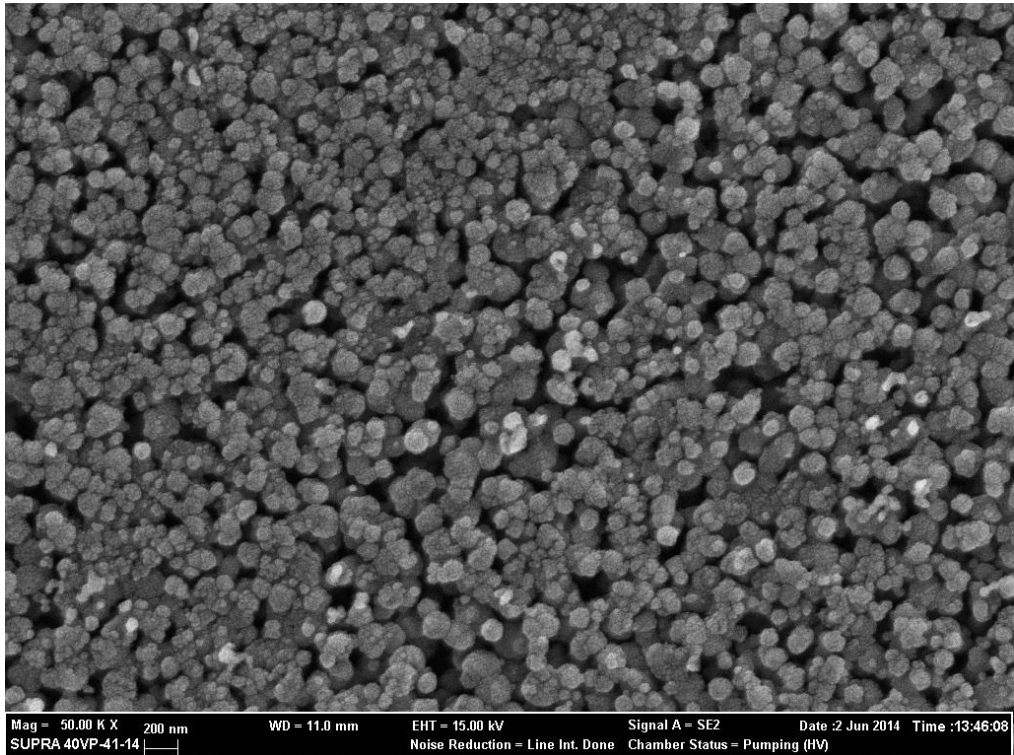


Şekil 4.25. Alan Emisyonu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM)

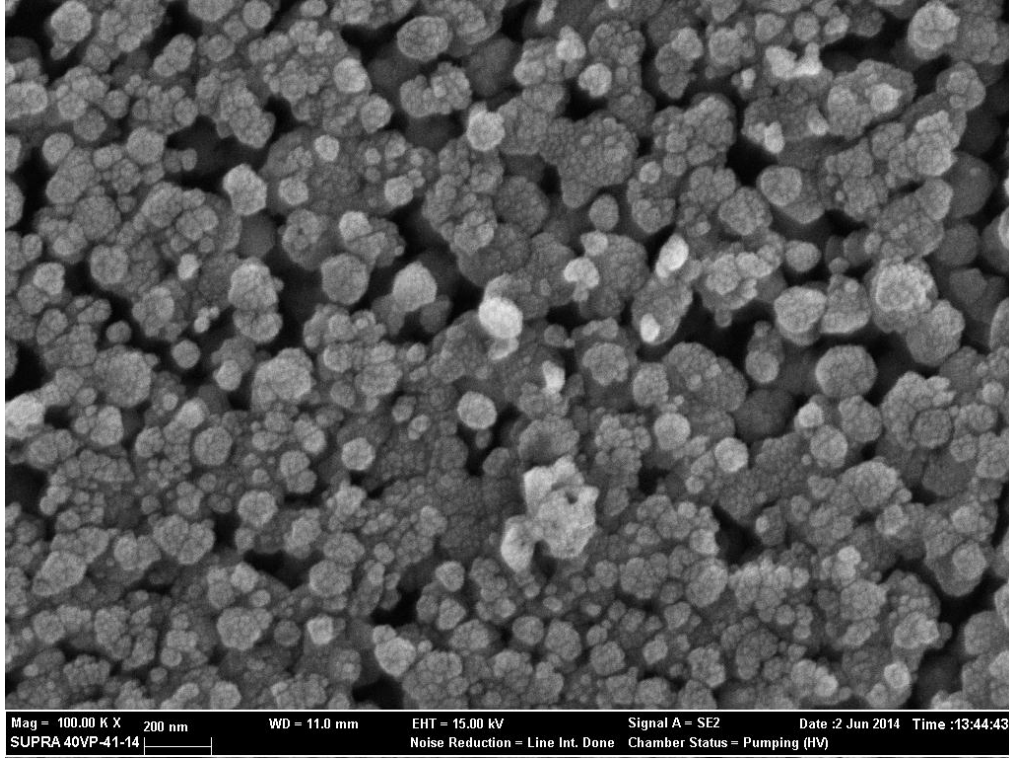
Şekil 4.26 – Şekil 4.28’de, XRD sonuçlarına göre en iyi kristalleşmeyi gösteren C3 serisi ZnO ince filmlere ait 20kx, 50kx ve 100kx büyütmeli FESEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 4.26. C3 serisi ZnO ince filmlerin 20kx büyütmeli FESEM görüntüleri.



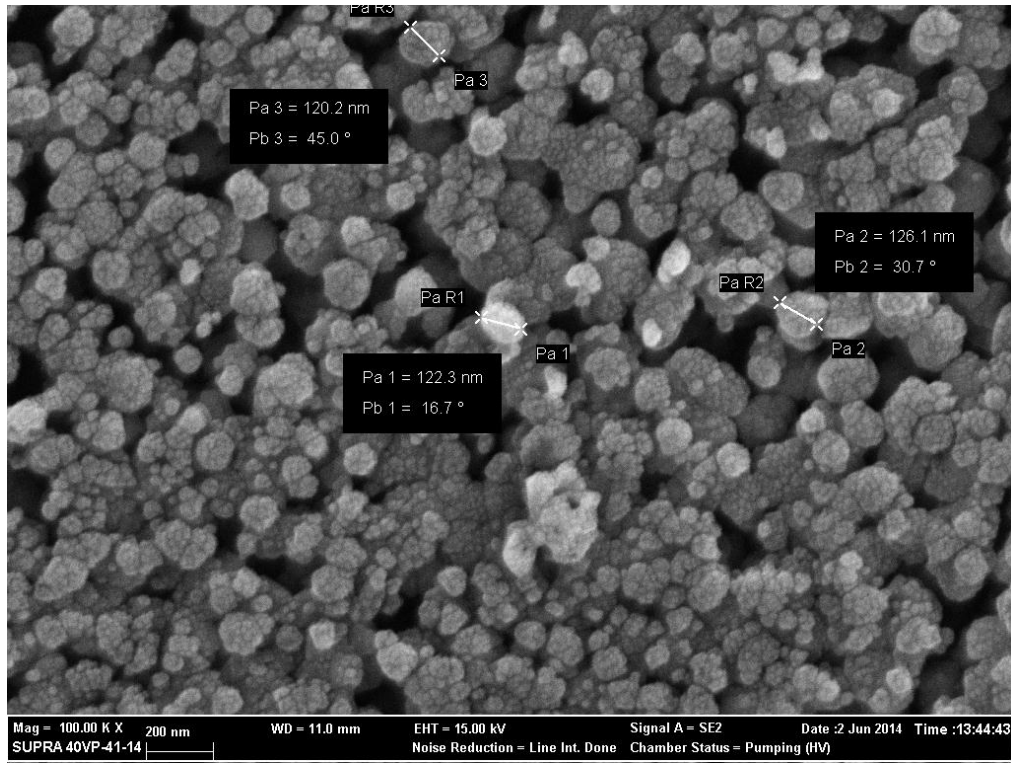
Şekil 4.27. C3 serisi ZnO ince filmlerin 50kx büyütmeli FESEM görüntüleri.



Şekil 4.28. C3 serisi ZnO ince filmlerin 100kx büyütmeli FESEM görüntüleri

FESEM görüntüleri incelendiğinde, filmin tüm yüzeyine hemen hemen homojen dağılmış nanoboyutta taneciklerden meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca yığılma şeklinde oluşumların bulunmadığı ve yüzeyde boşluklar olmadığı, böylece tanelerin birbirine daha iyi tutunduğu görülmektedir.

Şekil 4.29'de ise 100kx büyütülmüş FESEM görüntüsü üzerinde belirlenen tane boyutu değerleri verilmektedir. Görüntülerden belirlenen tane boyutu değerleri yaklaşık 120 nm'dir. Bu tane FESEM görüntülerinden belirlenen tane boyutu değerleri XRD spektrumundan hesaplanan tane boyutu değerleri ile çok yakındır ve birbirini destekler niteliktedir.



Şekil 4.29. C3 serisi ZnO ince filmlerin tane boyutu değerleri.

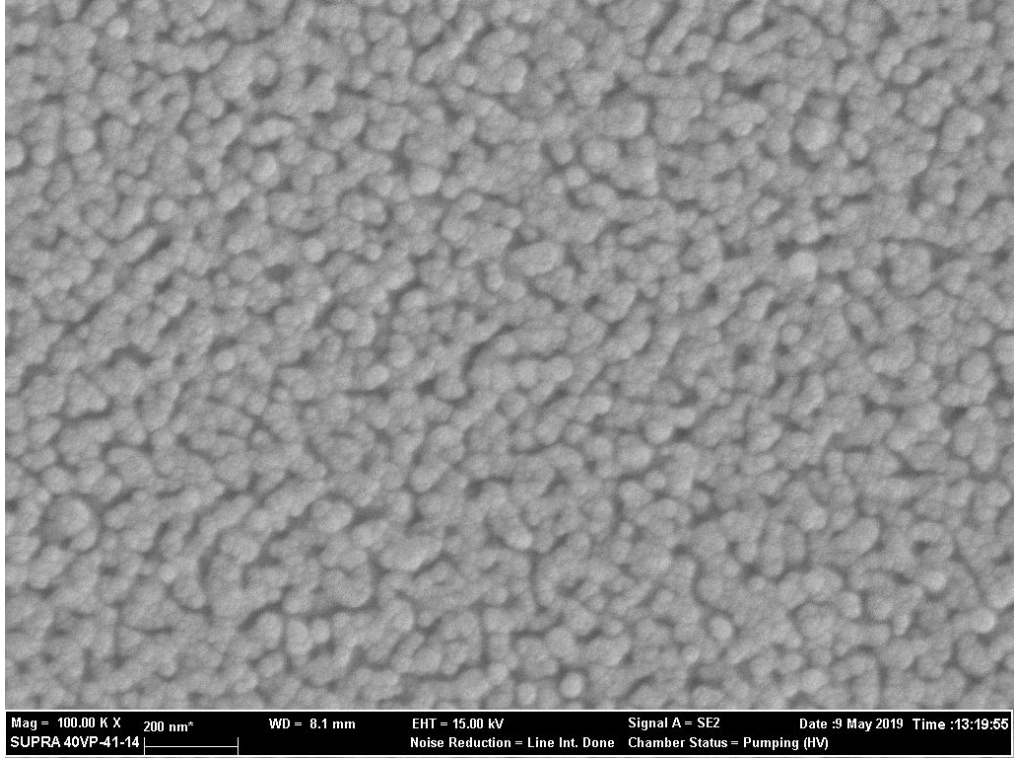
Yüzey özellikleri incelenen ince filmlerin aynı zamanda taramalı elektron mikroskobuna bağlı BRUKER marka Enerji Dağılımlı X-Işını Spektrometresi (EDX) dedektörü kullanılarak kimyasal bileşimleri de elde edilmiştir. Çizelge 4.7’de C3 serisi ZnO ince filmlere ait EDX sonuçları verilmiştir. Alttaş üzerinde ZnO yapısı olduğu EDX sonuçlarında da belirlenmiştir.

Çizelge 4.7. C3 serisi ZnO ince filmlere ait EDX sonuçları.

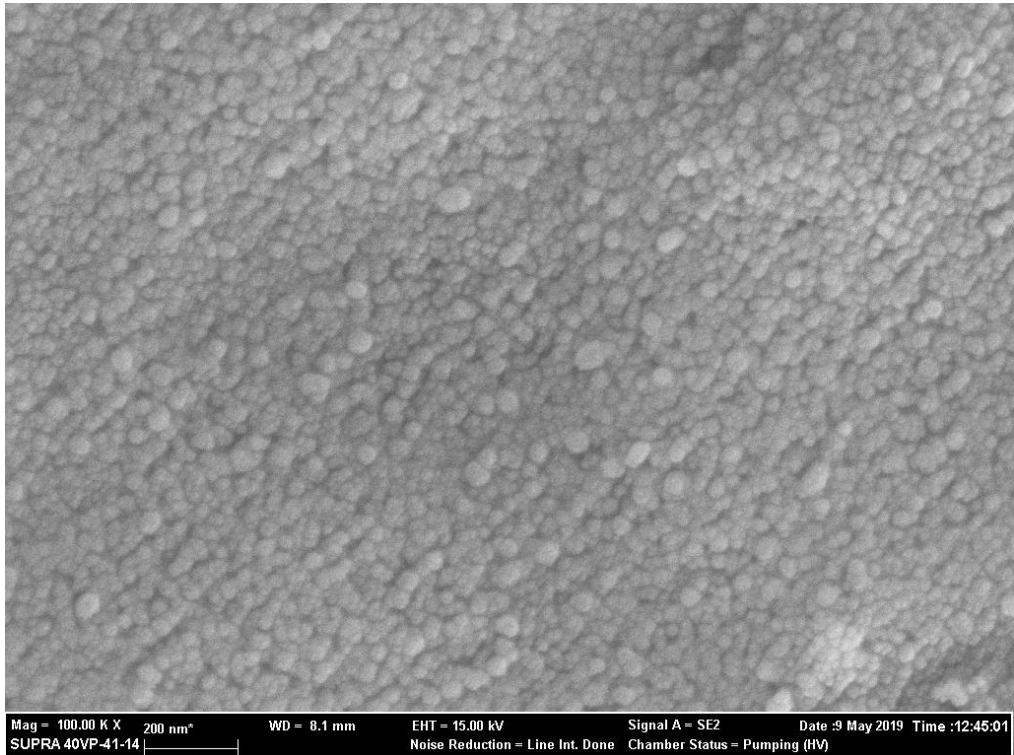
Element	Atomik Yüzde (%)
Çinko (Zn)	62
Oksijen (O)	38

4.2.2. Cd Katkılı ZnO İnce Filmlerin Yüzeysel Karakterizasyonu

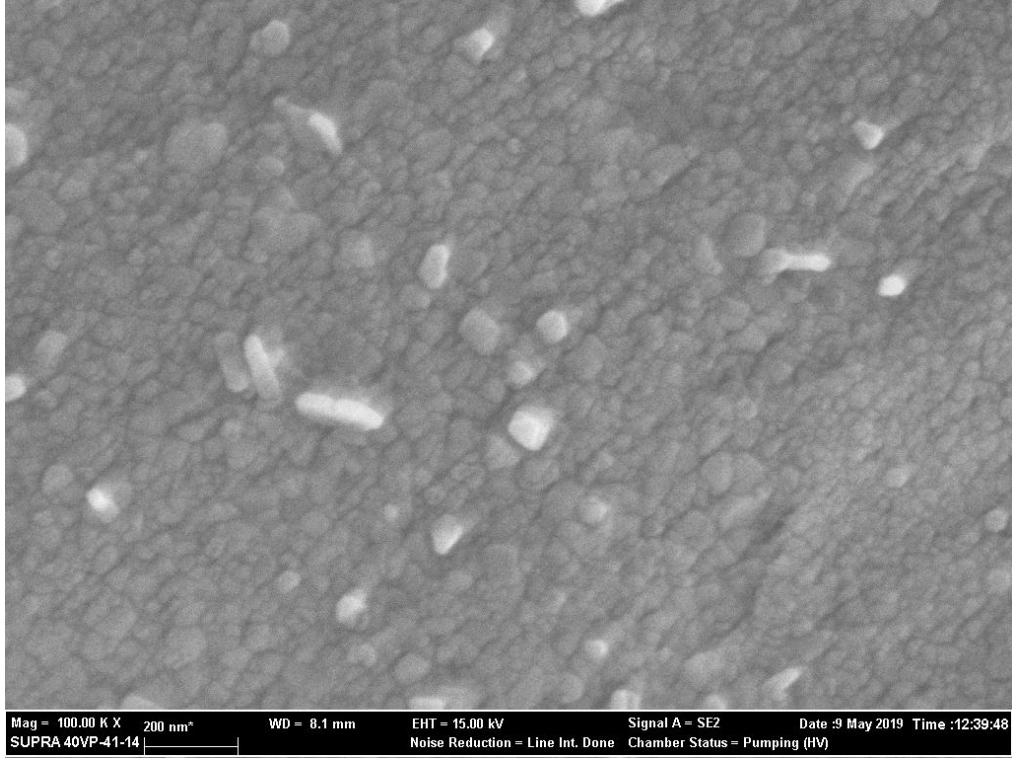
Elde edilen Cd katkılı ZnO ince filmlerin yüzey özelliklerinin incelenmesi için ZnO için uygulanan Alan Emisyonu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) kullanılmıştır. Şekil 4.30 – Şekil 4.34’de, katkısız ZnO ile katkılı CZO ince filmlere ait 100kx büyütme FESEM görüntüleri verilmektedir.



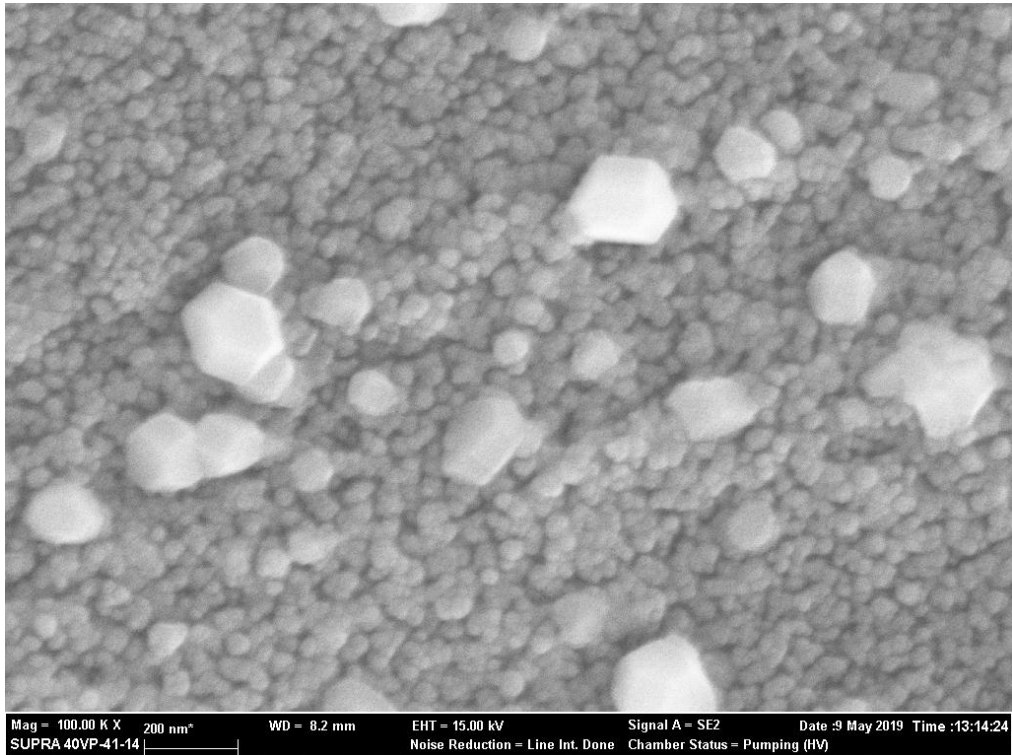
Şekil 4.30. ZnO serisi ince filmlerin FESEM görüntüleri.



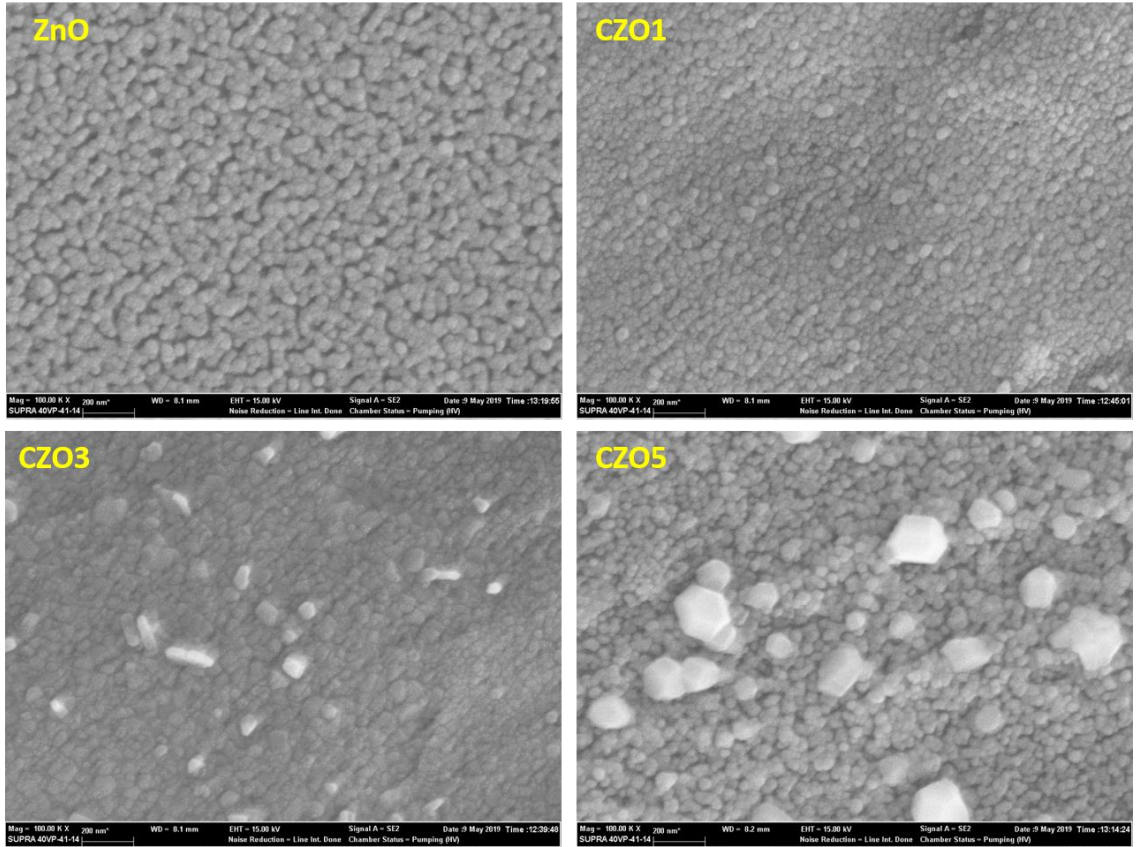
Şekil 4.31. CZO1 serisi ince filmlerin FESEM görüntüleri.



Şekil 4.32. CZO3 serisi ince filmlerin FESEM görüntüleri.



Şekil 4.33. CZO5 serisi ince filmlerin FESEM görüntüleri.



Şekil 4.34. Katkisız ZnO ile katkılı CZO ince filmlerin karşılaştırmalı FESEM görüntüleri.

FESEM görüntüleri incelendiğinde, filmin tüm yüzeyine hemen hemen homojen dağılmış nanoboyutta taneciklerden meydana geldiği ve yüzeyde boşluklar olmadığı, böylece tanelerin birbirine daha iyi tutunduğu görülmektedir. Ayrıca Cd katkısı ile birlikte yüzeyde Cd tanelerinin görülmeye başladığı ve katkı miktarı arttıkça bu tanelerin de arttığı gözlemlenmiştir.

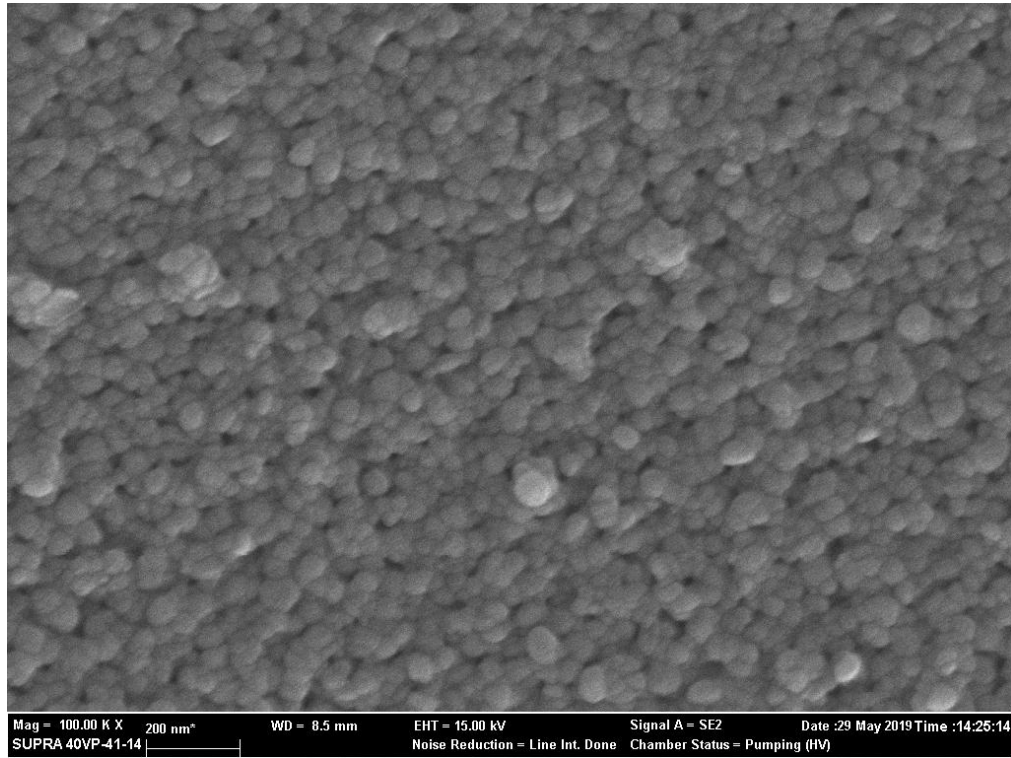
Yüzey özellikleri incelenen Cd katkılı ZnO ince filmlerin, ZnO ince filmler için uygulanan EDX dedektörü kullanılarak kimyasal bileşimleri de elde edilmiştir. Çizelge 4.8’de CZO ince filmlere ait EDX sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.8. CZO ince filmlere ait EDX sonuçları

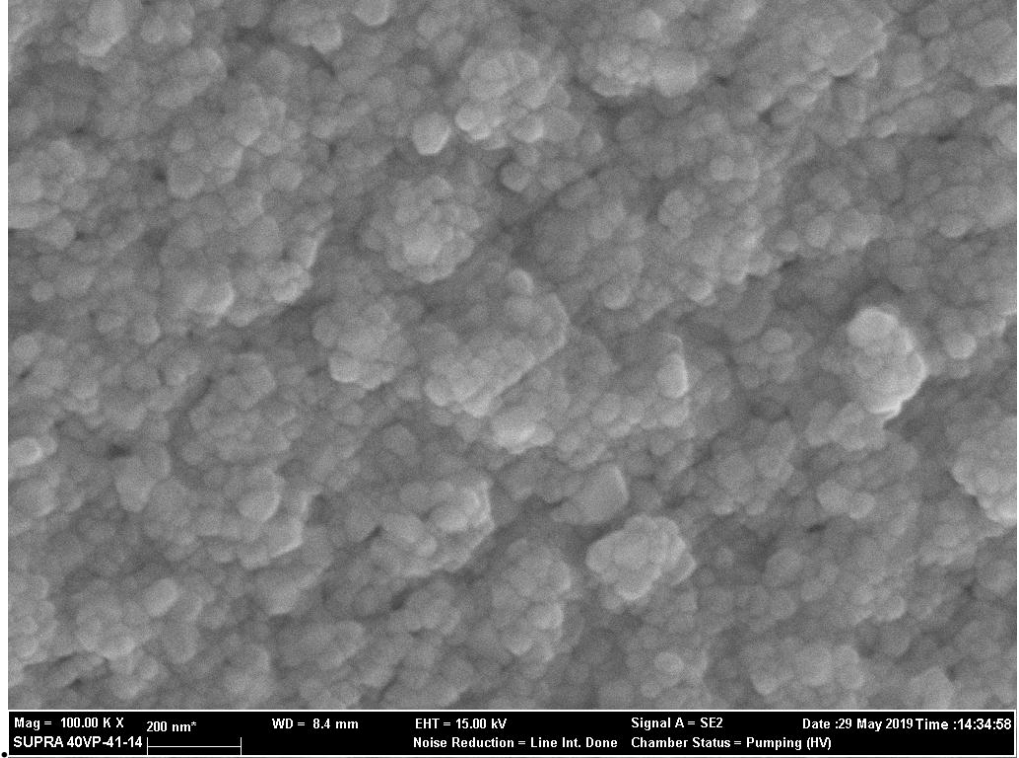
Seri	Çinko (Zn) Atomik Yüzde (%)	Oksijen (O) Atomik Yüzde (%)	Kadmiyum (Cd) Atomik Yüzde (%)
ZnO	62	38	-
CZO1	61.28	37.83	0.89
CZO3	60.92	37.15	1.93
CZO5	59	36.88	4.12

4.2.3. Al Katkılı ZnO İnce Filmlerin Yüzeysel Karakterizasyonu

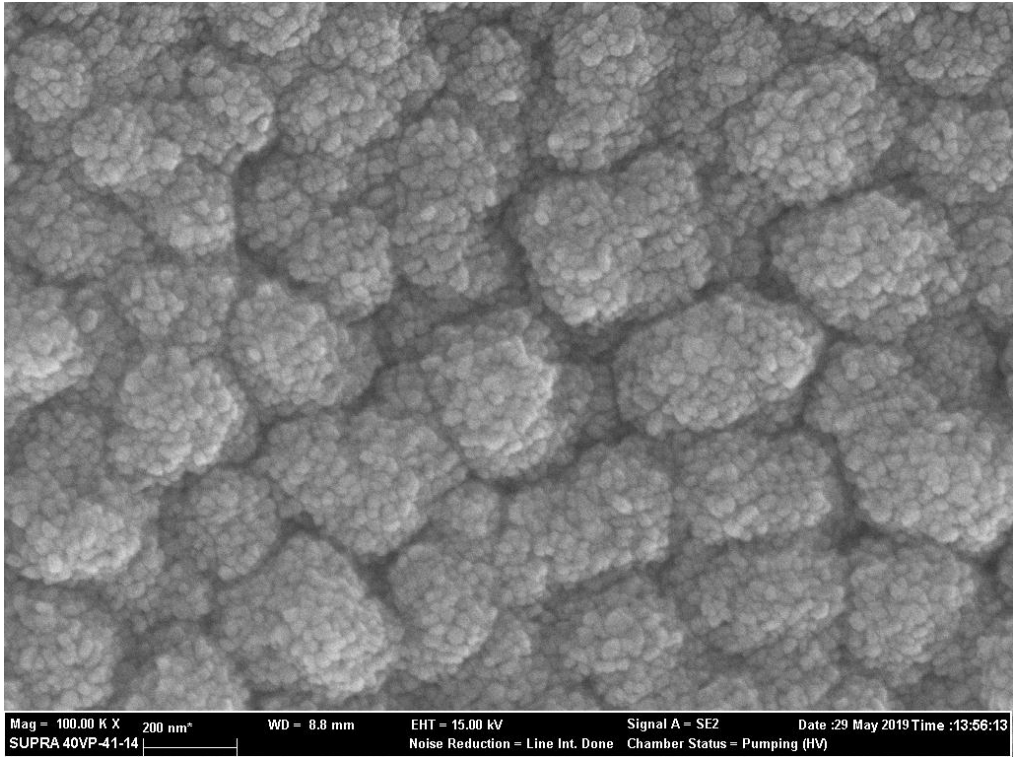
Elde edilen Al katkılı ZnO ince filmlerin yüzey özelliklerinin incelenmesi için ZnO için uygulanan Alan Emisyonu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) kullanılmıştır. Şekil 4.35 – Şekil 4.38’de, katkılı AZO ince filmlere ait 100kx büyütme FESEM görüntüleri verilmektedir.



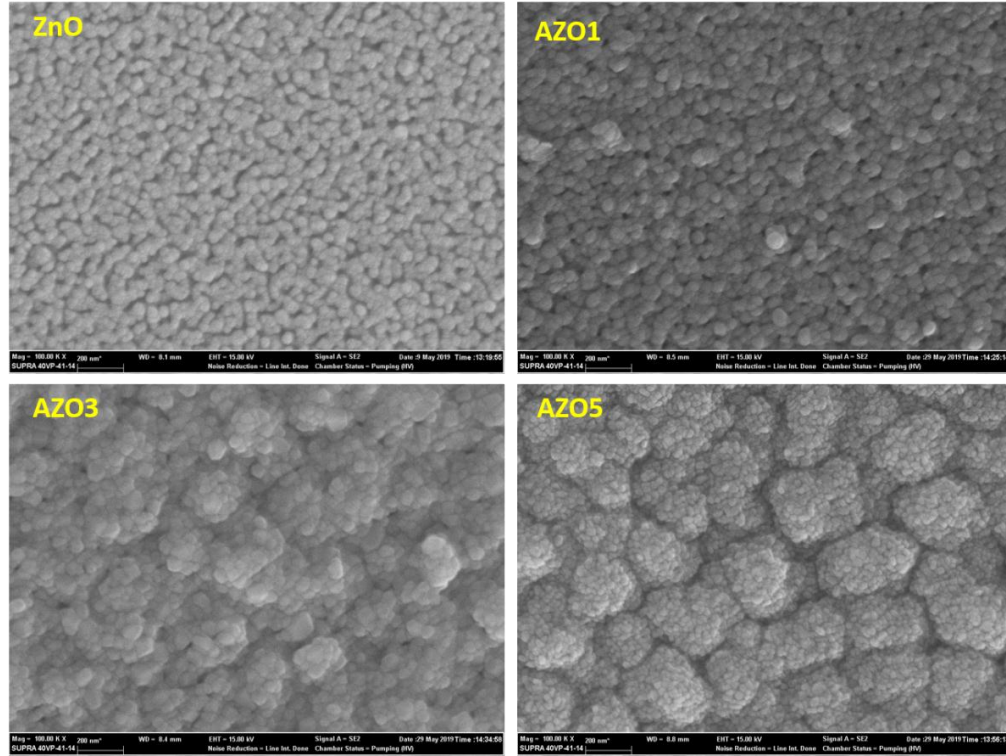
Şekil 4.35. AZO1 serisi ince filmlerin FESEM görüntüleri



Şekil 4.36. AZO3 serisi ince filmlerin FESEM görüntüleri.



Şekil 4.37. AZO5 serisi ince filmlerin FESEM görüntüleri.



Şekil 4.38. Katkısız ZnO ile katkılı AZO ince filmlerin karşılaştırmalı FESEM görüntüleri.

FESEM görüntüleri incelendiğinde, filmin tüm yüzeyine hemen hemen homojen dağılmış nanoboyutta taneciklerden meydana geldiği ve yüzeyde boşluklar olmadığı, böylece tanelerin birbirine daha iyi tutunduğu görülmektedir. Ayrıca Al katkısı ile birlikte tane boyutu değerlerinin artmaya başladığı ve katkı miktarı arttıkça bu tanelerin de arttığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar XRD spektrumundan elde edilen tane boyutu değerlerinin sonuçları ile uyum içerisindedir.

Yüzey özellikleri incelenen Al katkılı ZO ince filmlerin, ZnO ince filmler için uygulanan EDX dedektörü kullanılarak kimyasal bileşimleri de elde edilmiştir. Çizelge 4.9 'de AZO ince filmlere ait EDX sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.9. AZO ince filmlere ait EDX sonuçları

Seri	Çinko (Zn) Atomik Yüzde (%)	Oksijen (O) Atomik Yüzde (%)	Alüminyum (Al) Atomik Yüzde (%)
ZnO	62	38	-
AZO1	61.30	37.52	1.18
AZO3	59.58	36.98	3.44
AZO5	57.81	36.14	6.05

4.3. İnce Filmlerin Optik Karakterizasyonu

Malzemelerin ışık geçirgenlikleri ve absorpsiyon ölçümleri yapılarak bant yapılarının nasıl olduğu gözlemlenebilir. Dalga boyu aralıkları geniş tutularak absorpsiyon ölçümleri yapıldığında, dalga boyları ile ortamdan geçen ışınların şiddetleri arasında kurulan bağıntı absorpsiyon spektrumunu verir. Her malzemenin kendine özgü optik özellikleri olduğundan, üzerlerine gönderilen ışınlar malzemenin yükleri ile etkileşime girer ve malzemedan geçerken enerjileri değişir. Malzeme ile etkileşim sonucunda enerjinin kısmi olarak kaybolması absorpsiyon olarak tanımlanır. Malzemelerin absorblayacakları dalga boyları farklı olacaktır. Absorpsiyon spektrumları kullanılarak yarıiletken malzemelerin bant yapıları incelenebilir ve bant yapılarından yasak enerji aralıkları bulunabilir. Yarıiletkenlerin, katkılama ile oluşan valans bantlarındaki boşluklar ve iletim bantlarındaki serbest elektronlar, kristal yapılarındaki kusurlar ve kusurların meydana getirdiği enerji seviyelerindeki değişiklikler optik özelliklerini etkiler. Yarıiletken malzemelerin optik özellikleri incelendiğinde bant yapılarının yanı sıra elektron ve boşlukların nasıl davrandıkları tespit edilebilir.

Yarıiletkenlerin bant yapıları ve yasak enerji aralıklarının hesaplanmasındaki ideal yol optik absorpsiyon spektrumunu incelemektir. Absorpsiyon işleminde belirli enerji seviyesi ile gönderilen foton, yarıiletkende düşük enerji seviyesinde olan elektronu daha yüksek enerji seviyesine uyarır. Fotonların, yarıiletkendeki elektronları uyarması ile oluşturdukları bant geçişleri ve enerji seviyelerindeki dağılımları gözlemlenir. Bu gözlem sonucunda yarıiletkenlerin optik absorpsiyon katsayıları ve optik geçirgenlikleri hesaplanabilir.

Yarıiletkenler üzerine foton gönderildiğinde, fotonlar ve yarıiletkenin elektronları birbirlerini etkiler. Fotonların yarıiletken malzemeyle etkileşimi sonucunda absorblanma, yansımaya ve kırılma gibi optik olaylar oluşur. Valans bandında bulunan

elektronlar optik yolla iletim bandına uyarılabilirler. Uyarılmanın oluşabilmesi için fotonun enerjisi yarıiletkenlerin yasak enerji aralığına denk veya daha fazla olmalıdır. Fotonunun enerjisi Eşitlik 4.4 ile tanımlanır.

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (4.4)$$

Burada Planck sabiti h , ışık hızı c , ν fotonun frekansı, λ dalga boyu ve işlem foto iletkenlik olarak tanımlanır. Uygun dalga boylu ışık, iletkenlik elektronu ve boşluk oluşturarak iletkenliği artırır. Yani foton ile uyarılan valans bandındaki elektron iletim bandına geçebilir veya iletim bandındaki elektron enerjisini foton saçtılarak dışarı verip boşluklarla birleşebilir. Uyarılan elektron valans bandından iletim bandına geçtiğinde valans bandında bir boşluk oluşturur. $h\nu \geq E_g$ olduğunda elektron boşluk çifti meydana gelir.

Gelen farklı dalga boylarındaki ışının absorpsiyon katsayısı, gelen ışının şiddetine ışığın yarıiletken malzemedeki geçtikten sonraki şiddeti ve ışığın malzeme içerisinde kat ettiği mesafe yani malzemenin kalınlığı ile hesaplanır. Absorpsiyon katsayısı (α) ile gelen fotonun enerjisi ($h\nu$) arasındaki ilişki;

$$(\alpha h\nu) = B (h\nu - E_g)^p \quad (4.5)$$

Eşitlik 4.5’de gösterilen bağlantı ile saptanabilir (Jarosiński vd., 2019).

p doğrudan geçişler için 0,5, dolaylı geçişler için 2 olan bir sabit ve B enerji seviyeleri arasında geçiş olasılığını ifade eden bir sabittir.

4.3.1. ZnO İnce Filmlerinin Optik Karakterizasyonu

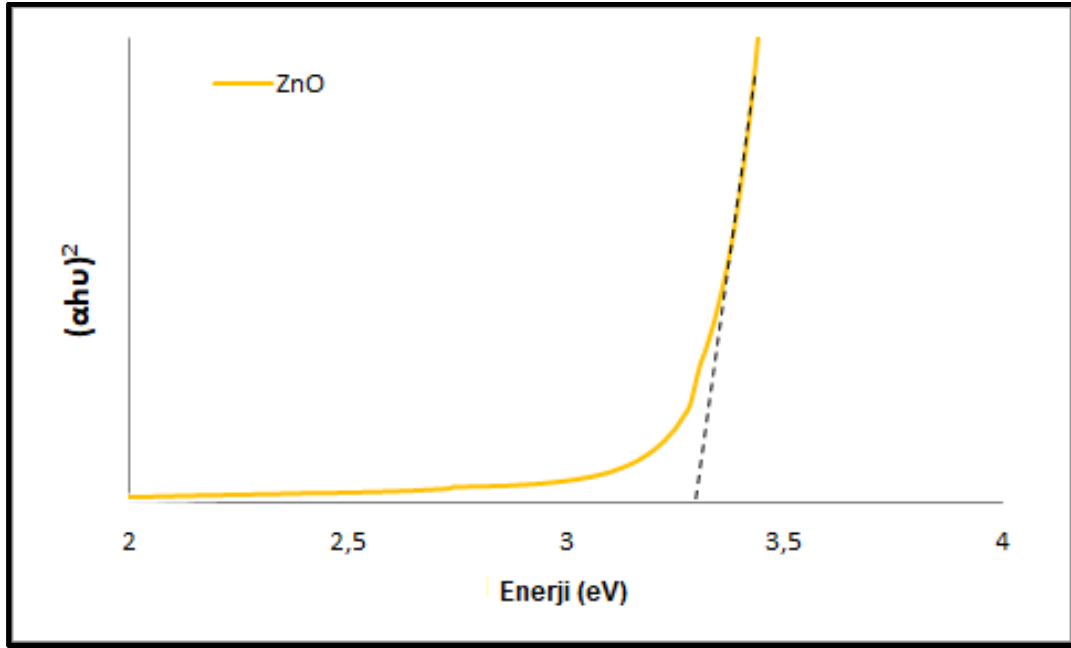
Bu tez çalışması kapsamında elde edilen filmlerin optik özelliklerinin incelenmesi için UV-Vis Spektroskopisi ölçümleri, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı’nda bulunan PERKIN ELMER LAMBDA 25 cihazında 300-1100 nm dalga boyu aralığında alınmıştır. Şekil 4.39’da ölçüm alınan UV-Vis.Spektrofotometresi gösterilmektedir



Şekil 4.39. UV-Vis. Spektrofotometresi

UV-Vis Spektroskopisi ölçümlerinden elde edilen temel absorpsiyon spektrumu verilerinden yararlanarak öncelikle filmlerin direkt bant yapılı mı, indirekt bant yapılı mı olduğu belirlenmiştir. Bunun için, $n=1/2$ (direkt-izinli), $3/2$ (direkt-izinsiz), 2 (indirekt-izinli) ve 3 (indirekt-izinsiz) değerleri kullanılarak tüm filmlerde ayrı ayrı $(\alpha h\nu)^{1/n} - h\nu$ grafikleri çizilmiş ve grafiklerde doğrusal bölgelere bakılmıştır. En iyi doğrusallığın $n=1/2$ değeri için elde edildiği görülmüştür. $n=1/2$ olması, yarıiletken filmlerin direkt ve izinli bant geçişine sahip olduğunu göstermektedir.

Elde edilen filmlerin direkt ve izinli bant geçişine sahip olduğunu belirledikten sonra $(\alpha h\nu)^{1/n}$ ifadesi $n=1/2$ için $(\alpha h\nu)^2$ olur. Filmlerin yasak enerji aralıklarının belirlenebilmesi için her bir filmin ayrı ayrı $(\alpha h\nu)^2$ 'nin $h\nu$ 'ye göre değişim grafikleri çizilir. Bu grafiklerin lineer kısımlarının doğrultusunun $h\nu$ eksenini, $(\alpha h\nu)^2 = 0$ 'da kestiği noktanın enerji değerleri, filmlerin yasak enerji aralıkları olarak belirlenir. Bu metot Tauc Metodu olarak bilinir (Tauc, 1974).

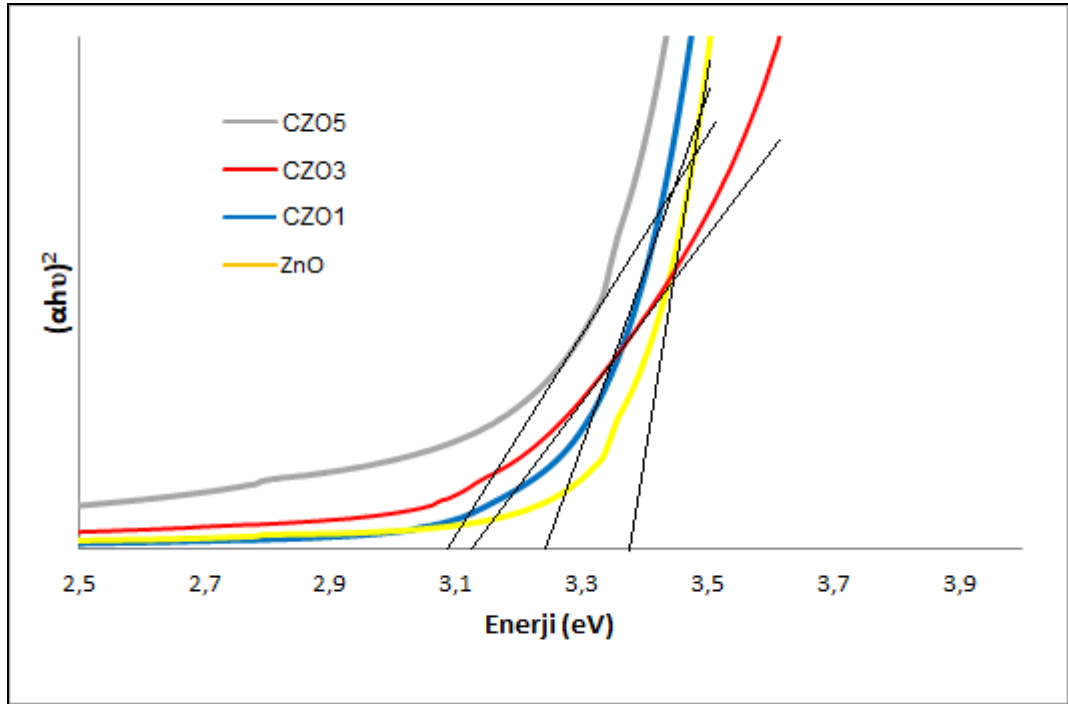


Şekil 4.40. ZnO yasak enerji aralığı grafiği

Üretilen ZnO filmler için Şekil 4.40' da gösterilen $(\alpha h\nu)^2$ ' nin $h\nu$ 'ye göre değişim grafiklerine göre katkısız ZnO filmin yasak enerji aralığı 3,31 eV olarak hesaplanmıştır.

4.3.2. Cd katkılı ZnO İnce Filmlerinin Optik Karakterizasyonu

UV-Vis Spektrofotometresi ile elde edilen Cd katkılı ZnO ince filmlerin temel absorpsiyon spektrumları incelenmiştir. Bu temel absorpsiyon spektrumu verilerinden yararlanarak filmlerin yasak enerji aralıkları Tauc Metodu kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 4.41 'de $(\alpha h\nu)^2$ 'nin $h\nu$ 'ye göre değişimi karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Çizelge 4.10'de ince filmlerin yasak enerji aralığı değerleri verilmiştir.



Şekil 4.41. Cd katkılı ZnO yasak enerji aralığı grafiği

Çizelge 4.10. Yasak enerji aralığı değerleri

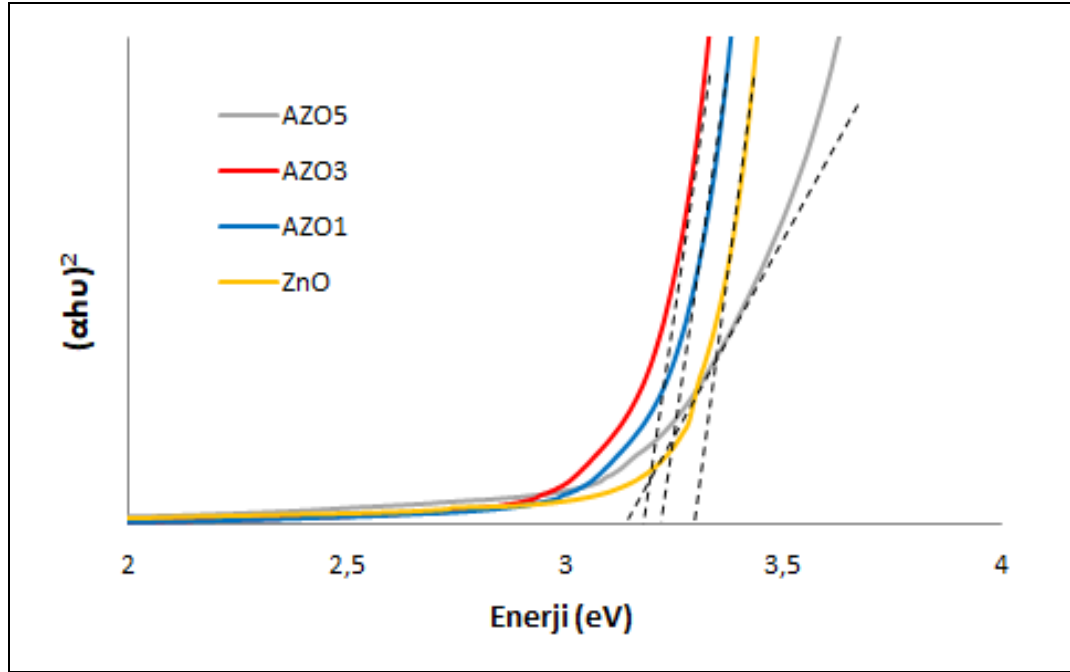
Series	Energy Band Gap (eV)
ZnO	3,31
CZO-1%	3,17
CZO-3%	3,10
CZO-5%	3,03

Çizelgeden görüleceği gibi katkısız ZnO serisinde yasak enerji aralığı 3,31 eV iken, Cd katkılama miktarı arttıkça bu değer 3,03 eV'a kadar düşmüştür. Yasak enerji aralığı değerindeki bu düşüş literatürde daha önce Cd katkılı ZnO ince filmler için bulunan sonuçlar ile uyum içerisindedir.

4.3.3. Al katkılı ZnO İnce Filmlerinin Optik Karakterizasyonu

UV-Vis Spektrofotometresi ile elde edilen Al katkılı ZnO ince filmlerin temel absorpsiyon spektrumları incelenmiştir. Bu temel absorpsiyon spektrumu verilerinden yararlanarak filmlerin yasak enerji aralıkları Tauc Metodu kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 4.42 'de $(\alpha h\nu)^2$ 'nin $h\nu$ 'ye göre değişimi karşılaştırmalı olarak görülmektedir.

Ayrıca Çizelge 4.11’de ince filmlerin belirlenen yasak enerji aralığı değerleri verilmiştir.



Şekil 4.42. Al katkılı ZnO yasak enerji aralığı grafiği.

Çizelge 4.11. İnce filmlerin yasak enerji aralığı değerleri

Seri	Yasak Enerji Aralığı (eV)
ZnO	3,31
AZO1	3,25
AZO3	3,18
AZO5	3,10

Çizelgeden görüleceği gibi katkısız ZnO serisinde yasak enerji aralığı 3,31 eV iken, Al katkılama ile bu değer düşmeye başlamıştır. Katkılama miktarı arttıkça yasak enerji aralığı değeri düşmektedir. Bu düşüş katkılama miktarı arttıkça tane boyutu değerlerinin de artmasından kaynaklanmaktadır. Bu sonuçlar literatürde daha önce Al katkılı ZnO ince filmler için bulunan değerler ile uyum içerisindedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında katkısız ZnO, Al katkılı ve Cd katkılı ZnO ince filmler literatürde ilk defa kullanılan, ileri teknoloji ve maliyetli cihaz kullanımı gerektiren ince film üretim tekniklerine alternatif olarak geliştirilen, çok daha basit ve ucuz bir teknik olan "Sol-Gel Manyetik Döndürerek Kaplama Tekniği" ile üretilmiştir. Al ve Cd katkı konsantrasyonları ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarında değiştirilerek katkılama yapılarak oluşturulan ZnO ince filmler, cam altlıklar üzerine biriktirilmiştir.

Katkısız ZnO ince filmler için hazırlanan sol-gel çözeltisinin miktarı 15 µl, döndürme süresi 30 s ve film kat sayısı 9 kat sabit alınarak, döndürme hızı ve tavlama sıcaklığı parametreleri değiştirilerek 3 farklı seri oluşturulmuştur. ZnO kaplama için oluşturulan seriler A, B ve C olarak isimlendirilmiştir. A serisi için sabit 1000 rpm döndürme hızında, 300 °C, 400 °C ve 500 °C de tavlama sıcaklıklarında ince film kaplamaları, B serisi için sabit 2000 rpm döndürme hızında, 300 °C, 400 °C ve 500 °C de tavlama sıcaklıklarında ince film kaplamaları, C serisi için sabit 3000 rpm döndürme hızında, 300 °C, 400 °C ve 500 °C de tavlama sıcaklıklarında sol-gel Manyetik Döndürerek Kaplama Tekniği ile ince film biriktirme işlemi yapılmıştır. Her 3 seriden elde edilen ZnO ince filmlerin yapısal, yüzeysel ve optik özellikleri incelenmiştir.

Tüm ZnO serileri için denemeleri yapılan parametreler ile üretilen ince filmlerin XRD spektrumları incelenerek karşılaştırma yapılmıştır. XRD spektrumlarından tüm serilerin polikristal yapıda oldukları gözlenmiştir. A3 serisi ZnO ince filmlerin pik şiddetleri A1 ve A2 serisi ince filmlerin pik şiddetlerinden daha büyüktür. Tüm serilerde hekzagonal ZnO yapısına ait 5 adet pik gözlenmektedir. A serisi için en iyi kristalleşmeyi A3 serisi ince filmlerin XRD spektrumundan elde edilen yarı pik genişliklerine göre Scherrer Formülü ile hesaplanan tane boyutu değerleri 88 nm olarak bulunmuştur. B serisi ZnO ince filmlerine ait XRD spektrumu incelendiğinde B3 serisinin pik şiddetinin en yüksek ve kristalleşmenin en iyi bu seride meydana geldiği, elde edilen yarı pik genişliklerinden hesaplanan tane boyutu değerlerinin 108 nm olduğu bulunmuştur. XRD spektrumu C serisi için incelendiğinde; en iyi kristalleşme ve polikristal yapının C3 serisinde meydana geldiği, oluşan tane boyutu değerlerinin 112 nm olduğu belirlenmiştir. Bu karşılaştırma sonucunda döndürme hızı arttıkça kristalleşmenin iyileştiği gözlemlenmiştir.

XRD sonuçlarına göre en iyi kristalleşmeyi gösteren C3 serisi ZnO ince filmlere ait 20kx, 50kx ve 100kx büyütme FESEM görüntüleri incelendiğinde, filmin tüm yüzeyine hemen hemen homojen dağılmış nanoboyutta taneciklerden meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca yığılma şeklinde oluşumların bulunmadığı ve yüzeyde boşluklar olmadığı, böylece tanelerin birbirine daha iyi tutunduğu görülmektedir. 100kx büyütülmüş FESEM görüntüsünden belirlenen tane boyutu değerleri yaklaşık 120 nm'dir. FESEM görüntülerinden belirlenen tane boyutu değerleri, XRD spektrumundan hesaplanan tane boyutu değerleri ile çok yakındır ve birbirini destekler niteliktedir. C3 serisi ZnO ince filmlere ait alttaş üzerinde ZnO yapısı olduğu EDX sonuçları % 62 Çinko ve % 38 Oksijen olarak görülmüştür. UV-Vis Spektroskopisi ölçümlerinden elde edilen temel absorpsiyon spektrumu verilerinden yararlanarak C3 serisi için yasak enerji aralığı grafiği çizilmiş ve Tauc metodu ile yasak enerji aralığı 3.31 eV olarak bulunmuştur.

Bu sonuçlara göre, 3000 rpm döndürme hızında 9 katman olarak üretilen ve 500°C'de tavlanan C3 serisinin tüm seriler içinde en iyi kristalleşmeyi gösteren ince film olduğu saptanmıştır. FESEM görüntülerinden belirlenen tane boyutu değerleri XRD spektrumundan hesaplanan tane boyutu değerleri ile çok yakındır ve birbirini destekler niteliktedir. Katkılı ZnO filmlerin 3000 rpm hızında manyetik olarak döndürülerek ve 500°C'de tavlansınarak 9 katlı olarak üretilmesine karar verilmiştir.

Cd katkılı ZnO ince filmleri Sol-Gel Manyetik Döndürerek Kaplama Tekniği ile üretmek için 3 farklı katkılama oranı belirlenerek CZO serileri oluşturulmuştur. %1 Cd katkılı seri CZO1, %3 Cd katkılı seri CZO3, %5 Cd katkılı seri CZO5 olarak isimlendirilmiştir. XRD spektrumları CZO serileri için incelendiğinde CZO1 serisinden itibaren %1 olarak katılan Cd'nin etkisiyle birlikte Cd yapısına ait herhangi bir pik gözlenmemiş ve katılan Cd ile ZnO yapısına ait piklerin şiddetlerinde düşüş meydana gelmiştir. CZO5 serisinde katkı miktarının %5'e çıkartılmasıyla birlikte ZnO serisine ait piklerin yanında hegzagonal CdZn yapısına ait pikler gözlenmiştir. Karşılaştırmalı XRD spektrumundan da açıkça görüldüğü gibi pik şiddetleri, katkılama oranı arttıkça bariz bir şekilde düşmüştür. Bu sonuçlardan ZnO yapısına katılan Cd oranı arttıkça kristalleşme seviyesinin düştüğü anlaşılmaktadır. CZO ince filmlerin Scherrer Formülü ile hesaplanan tane boyutu değerleri CZO1 için 113 nm, CZO3 için 130 nm, CZO5 için 154 nm olarak bulunmuştur. CZO serileri için FESEM görüntüleri

incelendiğinde Cd katkısı ile birlikte yüzeyde Cd tanelerinin görülmeye başladığı ve katkı miktarı arttıkça bu tanelerin de arttığı gözlemlenmiştir. Oluşan filmin tüm yüzeyine hemen hemen homojen dağılmış nanoboyutta taneciklerden meydana geldiği ve yüzeyde boşluklar olmadığı, böylece tanelerin birbirine daha iyi tutunduğu görülmüştür. EDX sonuçları CZO1 için % 61,28 Çinko, % 37,83 Oksijen ve % 0,89 Kadmiyum CZO3 için % 60,92 Çinko, % 37,15 Oksijen ve % 1,93 Kadmiyum ve CZO5 için % 59 Çinko, % 36,88 Oksijen ve % 4,12 Kadmiyum olarak saptanmıştır. Absorbsiyon spektrumu verilerinden yararlanarak filmlerin $\alpha(h\nu)^2$ 'nin $h\nu$ 'ye göre değişimi grafiği çizilerek yasak enerji aralıkları hesaplanmıştır. Katkısız ZnO serisinde yasak enerji aralığı 3.31 eV iken, Cd katkılama miktarı arttıkça bu değer 3,03 eV'a kadar düşmüştür. Yasak enerji aralığı değerindeki bu düşüşün literatürde daha önce Cd katkılı ZnO ince filmler için bulunan sonuçlar ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Sol-Gel Manyetik Döndürerek Kaplama Tekniği ile cam altlıklar üzerine 9 katlı Al katkılı ZnO ince filmler biriktirilmiştir. Al katkılama 3 Seride yapılmış seriler % 1 katkılama AZO1, % 3 katkılama AZO3 ve % 5 katkılama AZO5 olarak isimlendirilmiştir. AZO serisine ait XRD spektrumları incelendiğinde AZO1 serisinden itibaren % 1 olarak katkılanan Al etkisiyle birlikte % 3 ve % 5 katkılama oranlarında da Al yapısına ait herhangi bir pik gözlenmemiştir ve katkı miktarının artmasıyla pik şiddetleri, bariz bir şekilde düşmüştür. Bu sonuçlardan ZnO yapısına katkılanan Al oranı arttıkça kristalleşme seviyesinin düştüğü anlaşılmaktadır. Ayrıca katkısız ZnO yapısında tercihli yönelim (002) piki iken Al katkılama başlandıktan sonra tercihli yönelim de değişmeye başlamış ve % 1 ve % 3 katkılanan AZO1 ve AZO3 serilerinde tercihli yönelim (010) piki olarak görülürken, % 5 Al katkısı ile oluşan AZO5 serisinde tercihli yönelim (011) piki olarak gözlemlenmiştir. XRD spektrumlarından elde edilen bilgilerle AZO ince filmlerin hesaplanan tane boyutu değerleri AZO1 için 132 nm, AZO3 için 155 nm ve AZO5 için 186 nm olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalardan görüleceği gibi katkı miktarı arttıkça ortalama tane boyutu değerleri artmaktadır. FESEM görüntüleri AZO serisinde 100kx büyütme olarak incelendiğinde, Al katkılı ZnO filmin, tüm yüzeyine hemen hemen homojen dağılmış nanoboyutta taneciklerden meydana geldiği ve yüzeyde boşluklar olmadığı, böylece tanelerin birbirine daha iyi tutunduğu görülmüştür. Ayrıca Al katkısı ile birlikte tane boyutu değerlerinin artmaya başladığı ve katkı miktarı arttıkça bu tanelerin de arttığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar

XRD spektrumundan elde edilen tane boyutu değerlerinin sonuçları ile uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. EDX sonuçları AZO1 için % 61,30 Çinko, % 37,52 Oksijen %1,18 Alüminyum, AZO3 için % 59,58 Çinko, % 36,98 Oksijen % 3,44 Alüminyum ve AZO5 için % 57,81 Çinko, % 36,14 Oksijen % 6,05 Alüminyum olarak bulunmuştur. UV-Vis Spektroskopisi ölçümleri sonucunda ise $(\alpha h\nu)^2$ 'nin $h\nu$ 'ye göre değişimi grafikleri çizilerek Tauc metodu ile yasak enerji aralıkları hesaplanmış ve AZO1 serisi için 3.25 eV, AZO3 serisi için 3.18 eV, AZO5 serisi için 3.10 eV olarak bulunmuşlardır. Sonuçlar incelendiğinde Al katkılama ile ZnO ince filmlerin yasak enerji aralıklarının düştüğü ve katkılama miktarı artıkça düşüşün arttığı görülmüştür.

Yapılan çalışmalar ve incelemeler sonucunda literatürde ilk defa kullanılan, "Sol-Gel Manyetik Döndürerek Kaplama Tekniği" ile katkılı ve katkısız ince filmlerin daha basit ve ekonomik bir şekilde rahatlıkla üretilebildiği görülmüştür. Katkı miktarı ve çeşidi değiştirilerek kaplanan filmlerin yasak enerji aralıklarını, dolayısıyla elektriksel iletkenliği ve özdirenci değiştirilebildiği belirlenmiştir. ZnO ince filmlere kadmiyum ve alüminyum elementi ile katkılama işlemi yapılarak kristal yapı kalitesinin artırılması, ışık emme katsayısının geliştirilmesi, bant boşluğunun azaltılması gibi yapısal, elektriksel ve optik özellikleri iyileştirilebilecek aynı zamanda molekülün yüzey morfolojisinin ve absorpsiyon enerjisinin de değiştirilebileceği düşünülmektedir. Kolay uygulanabilir, tekrarlanabilir, maliyeti diğer ince film üretim tekniklerine göre daha ucuz ve basit olan ve literatürde ilk defa bu tez çalışmasında kullanılan bu teknikle üretilen metal oksit filmlerin; gaz sensörleri, organik atık su arıtımı, fotovoltaik cihazlar, optoelektronik cihazlar, biyosensörler, esnek veya giyilebilir UV ışık sensörleri ve biyomedikal uygulamalar gibi birçok alanda kullanılabilmesi mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

- Abegunde, O. O., Akinlabi, E. T., Oladijo, O. P., Akinlabi, S., & Ude, A. U. (2019). Overview of thin film deposition techniques. *AIMS Materials Science*. AIMS Press. <https://doi.org/10.3934/MATERSCI.2019.2.174>
- Addonizio, M. L., Aronne, A., Daliento, S., Tari, O., Fanelli, E., & Pernice, P. (2014). Sol-gel synthesis of ZnO transparent conductive films: The role of pH. *Applied Surface Science*, 305, 194–202. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.03.037>
- Aegerter, M. A., & Mennig, M. (2004). *Sol-Gel Technologies for Glass Producers and Users*. Springer US.
- Ali, D. vd. (2019). Synthesis and characterization of sol-gel derived La and Sm doped ZnO thin films: A solar light photo catalyst for methylene blue. *Thin Solid Films*. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.04.017>
- Ameen, B. A. H., Yildiz, A., Farooq, W. A., & Yakuphanoglu, F. (2019). Solar Light Photodetectors Based on Nanocrystalline Zinc Oxide Cadmium Doped/p-Si Heterojunctions. *Silicon*. <https://doi.org/10.1007/s12633-017-9656-4>
- Azhar, N.E.A. Shariffudin, S.S. Rani, R. Abdul Zoolfakar, A.S. Malek, M.F. Alrokayan, Salman Khan, Haseeb A. Rusop, M. (2018). Effect of ZnO Composition on the Electrical Properties of MEH-PPV: ZnO Nanocomposites Thin film via Spin Coating. In *2018 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE)* (pp. 136–139). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SMELEC.2018.8481297>
- Bai, L. N., Zheng, B. J., Lian, J. S., & Jiang, Q. (2012). First-principles calculations of Cd-doped ZnO thin films deposited by pulse laser deposition. *Solid State Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2012.03.018>
- Baptista, A., Silva, F., Porteiro, J., Míguez, J., & Pinto, G. (2018). Sputtering Physical Vapour Deposition (PVD) Coatings: A Critical Review on Process Improvement and Market Trend Demands. *Coatings*, 8(11), 402. <https://doi.org/10.3390/coatings8110402>
- Bard, A. J., Faulkner, L. R., & Wiley, J. (2001). *ELECTROCHEMICAL METHODS Fundamentals and Applications*.
- Bhowmick, T., Banerjee, A., Nag, S., & Majumder, S. B. (2018). Gas Sensing Characteristics in ZnO Thin Film Explicated Through the Analysis of Conductance Transients and the Concept of Activation Energy. In *2018 IEEE SENSORS* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2018.8589612>
- Bilgin, V. (2003). *ZnO filmlerinin elektrik, optik, yapısal ve yüzeySEL özellikleri üzerine kalay katkısının etkisi*. Doktora Tezi. Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.

KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Caglar, Y., Caglar, M., & Ilican, S. (2012). Microstructural, optical and electrical studies on sol gel derived ZnO and ZnO:Al films. *Current Applied Physics*, 12(3), 963–968. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2011.12.017>
- Carballeda-Galicia, D. ., Castanedo-Pérez, R., Jiménez-Sandoval, O., Jiménez-Sandoval, S., Torres-Delgado, G., & Zúñiga-Romero, C. . (2000). High transmittance CdO thin films obtained by the sol-gel method. *Thin Solid Films*, 371(1–2), 105–108. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(00\)00987-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(00)00987-1)
- Chakraborty, B., Chakrabarty, S., Ghosh, S., & Chaudhuri, C. R. (2018). High Performance Biosensor Based on RGO/ZnO Thin Film Transistor. In *2018 IEEE SENSORS* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2018.8589592>
- Charlesbabu, J., Gopalakrishnan, K., Elango, M., & Vasudevan, K. (2017). Preparation and characterization of Cd-doped ZnO thin films by spin coating method. *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*. <https://doi.org/10.1080/24701556.2016.1242627>
- Claypoole, J., Altwerger, M., Flottman, S., & Efstathiadis, H. (2018). Characterization of N type Si doped ZnO and ZnO thin films deposited by RF magnetron sputtering. In *2018 IEEE Nanotechnology Symposium (ANTS)* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/NANOTECH.2018.8653571>
- Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2001). *Elements of x-ray diffraction. Published in 2001 in Upper Saddle River NJ London by Prentice Hall Prentice-Hall International*. Prentice Hall. Retrieved from <https://lib.ugent.be/en/catalog/rug01:002082751>
- Dao, H. T., & Makino, H. (2019). Enhancement in optoelectrical properties of polycrystalline ZnO thin films by Ar plasma. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 96, 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2019.02.026>
- Debbichi, M., Souissi, M., Fouzri, A., Schmerber, G., Said, M., & Alouani, M. (2014). Room temperature ferromagnetism in Cd-doped ZnO thin films through defect engineering. *Journal of Alloys and Compounds*. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.01.247>
- Dikici, M. (2012). *Katıhal fiziği*. Seçkin Yayıncılık.
- Dobkin, D. M., & Zuraw, M. K. (2003). *Principles of Chemical Vapor Deposition*. Springer Netherlands.

KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Donaldson, O. K., Hattar, K., & Trelewicz, J. R. (2016). Metastable Tantalum Oxide Formation During the Devitrification of Amorphous Tantalum Thin Films. *Journal of the American Ceramic Society*, 99(11), 3775–3783. <https://doi.org/10.1111/jace.14384>
- Eckertová, L. (1986). *Physics of thin films*. Newyork: Plenum Press.
- Elmas, Saliha Pat, Suat Mohammadigharehbagh, Reza Musaoğlu, Caner Özgür, Mustafa Demirkol, Uğur Özen, Soner Korkmaz, Şadan (2019). Determination of physical properties of graphene doped ZnO (ZnO:Gr) nanocomposite thin films deposited by a thermionic vacuum arc technique. *Physica B: Condensed Matter*. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2018.12.039>
- Farag, A. A. M., Cavas, M., Yakuphanoglu, F., & Amanullah, F. M. (2011). Photoluminescence and optical properties of nanostructure Ni doped ZnO thin films prepared by sol-gel spin coating technique. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(30), 7900–7908. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.05.009>
- Fen, T. X., Legowo, A., Shaitir, A., & Edy Sutjipto, A. G. (2019). Study on the Effect of Mg Dopant on the Properties of ZnO Thin Film Prepared by Sol Gel. In *2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)* (pp. 1–8). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICASET.2019.8714394>
- Fiaz Khan, M. Siraj, K. Sattar, A. Majeed, S. Faiz, H. Khan, M.I. Raisanen, J. Mizohata, K. Kemell, M. (2018). Effect of Au ion beam on structural, surface, optical and electrical properties of ZnO thin films prepared by RF sputtering. *Ceramics International*, 44(14), 16464–16469. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.06.061>
- Grosso, G., & Parravicini, G. P. (2013). *Solid State Physics: Second Edition. Solid State Physics: Second Edition*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-66724-1>
- Guerrero de León, J. A., Pérez-Centeno, A., Gómez-Rosas, G., Mariscal, A., Serna, R., Santana-Aranda, M. A., & Quiñones-Galván, J. G. (2019). Influence of the Zn plasma kinetics on the structural and optical properties of ZnO thin films grown by PLD. *SN Applied Sciences*, 1(5), 475. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0497-1>
- Hasan, S. A., Torun, H., Gibson, D., Wu, Q., Cooke, M. D., & Fu, Y. (2019). Flexible UV sensor based on nanostructured ZnO thin film SAW device. In *2019 IEEE Jordan International Joint Conference on Electrical Engineering and Information Technology (JEEIT)* (pp. 85–90). IEEE. <https://doi.org/10.1109/JEEIT.2019.8717373>

KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Hass, G., Francombe, M. H., & Hoffman, R. W. (1973). *Physics of thin films. Volume 7: advances in research and development*.
- Hunge, Y. M., Yadav, A. A., Kulkarni, S. B., & Mathe, V. L. (2018). A multifunctional ZnO thin film based devices for photoelectrocatalytic degradation of terephthalic acid and CO₂ gas sensing applications. *Sensors and Actuators, B: Chemical*. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.07.117>
- Iechi, H., Sakai, M., Nakamura, K., Iizuka, M., Nakamura, M., & Kudo, K. (2005). Vertical type organic light emitting device using thin-film ZnO electrode. In *Synthetic Metals* (Vol. 154, pp. 149–152). <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2005.07.038>
- Ishak, S., Johari, S., Ramli, M. M., Ibrahim, A., Arbae, A., Jaafar, M. S., & Azlan, A. S. (2018). Characteristic study of doped ZnO thin film. In *IEEE International Conference on Semiconductor Electronics, Proceedings, ICSE*. <https://doi.org/10.1109/SMELEC.2018.8481329>
- Ivanovskaya, A. N. vd. (2018). Electrochemical roughening of thin-film platinum for neural probe arrays and biosensing applications. *Journal of the Electrochemical Society*, 165(12), G3125–G3132. <https://doi.org/10.1149/2.0171812jes>
- Jarosiński, Pawlak, J., & Al-Ani, S. K. J. (2019). Inverse logarithmic derivative method for determining the energy gap and the type of electron transitions as an alternative to the Tauc method. *Optical Materials*, 88, 667–673 . <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.12.041>
- Kanmani, P., & Rhim, J.-W. (2014). Properties and characterization of bionanocomposite films prepared with various biopolymers and ZnO nanoparticles. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.02.007>
- Kim, K. T., Kim, G. H., Woo, J. C., & Kim, C. Il. (2008). Characteristics of Nickel-doped Zinc Oxide thin films prepared by sol-gel method. *Surface and Coatings Technology*, 202(22–23), 5650–5653. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.06.078>
- Kittel, C. (1996). *Introduction to Solid State Physics*. New York.
- Kumar, A. G. S., Obulapathi, L., Sarmash, T. S., Rani, D. J., Maddaiah, M., Rao, T. S., & Asokan, K. (2015). Structural, Electrical and Optical Properties of Cd Doped ZnO Thin Films by Reactive dc Magnetron Sputtering. *JOM*. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1344-5>

KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Lee, M. I., Huang, M. C., Legrand, D., Lerondel, G., & Lin, J. C. (2014). Structure and characterization of Sn, Al co-doped zinc oxide thin films prepared by sol-gel dip-coating process. *Thin Solid Films*, 570(PB), 516–526.
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.04.051>
- Li, B. B. Xiu, X. Q. Zhang, R. Tao, Z. K. Chen, L. Xie, Z. L. Zheng, Y. D. Xie, Z. (2006). Study of structure and magnetic properties of Ni-doped ZnO-based DMSs. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 9(1–3), 141–145.
<https://doi.org/10.1016/j.mssp.2006.01.074>
- Li, H., Han, D., Yi, Z., Dong, J., Zhang, S., Zhang, X., & Wang, Y. (2019). High-Performance ZnO Thin-Film Transistors Prepared by Atomic Layer Deposition. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 66(7), 2965–2970.
<https://doi.org/10.1109/TED.2019.2915625>
- Li, Q., Bian, J., Sun, J., Wang, J., Luo, Y., Sun, K., & Yu, D. (2010). Controllable growth of well-aligned ZnO nanorod arrays by low-temperature wet chemical bath deposition method. *Applied Surface Science*, 256(6), 1698–1702.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.09.097>
- Li, Z. H., Cho, E. S., & Kwon, S. J. (2014). Mg-doped ZnO thin films deposited by the atomic layer chemical vapor deposition for the buffer layer of CIGS solar cell. *Applied Surface Science*. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.06.136>
- Lincot, D. (Daniel), Hodes, G., & Electrochemical Society. Electrodeposition Division. (2006). *Chemical solution deposition of semiconducting and non-metallic films : proceedings of the international symposium*. Electrochemical Society.
- Matthews, J. W. (1975). *Epitaxial growth. Part A*. Academic Press.
- Mattox, D. M. (2010). *Deposition (PVD) Processing. William Andrew*. William Andrew. <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-2037-5.00025-3>
- Md Ralib, A. A., & Nordin, A. N. (2019). Application of Taguchi Signal to Noise Ratio Design Method to ZnO Thin Film CMOS SAW Resonators. *IEEE Access*, 7, 27993–28000. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2900590>
- Meng, L., Yang, X., & Yang, T. (2018). Self-flattened ZnO:Al transparent conductive thin films derived by sol-gel process. *IEEE Journal of Photovoltaics*. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2836419>

KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Nandita, B., Sharmin, M., & Podder, J. (2018). Sol-gel Spin Coating: A Promising Technique for Preparation of Multilayer Metal Oxide Thin Films for Optoelectronic Applications. *International Conference on Physics*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/324006051_Sol-gel_Spin_Coating_A_Promising_Technique_for_Preparation_of_Multilayer_Metal_Oxide_Thin_Films_for_Optoelectronic_Applications
- Omar, M. A. (1975). *Elementary solid state physics*. California, ABD: Addison-Wesley.
- Pan, Zhanchang Luo, Junming Tian, Xinlong Wu, Shoukun Chen, Chun Deng, Jianfeng Xiao, Chumin Hu, Guanghui Wei, Zhigang (2014). Highly transparent and conductive Sn/F and Al co-doped ZnO thin films prepared by sol-gel method. *Journal of Alloys and Compounds*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.06.192>
- Pankove, J. I. (1975). *Optical processes in semiconductors*. Dover Publications.
- Phillips, J. (2010). *Bonds and Bands in Semiconductors*. (2nd.). Newyork: Momentum Press.
- Pierre, A. C. (1998). *Introduction to Sol-Gel Processing*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5659-6>
- Potlog, Tamara Gorceac, Leonid Taku, Miyake Lungu, Ion Raevschi, Simion Worasawat, Suchada Botnariuc, Vasile Mimura, Hidenori (2019). Synthesis and Properties of Al-doped ZnO Thin Films for Photovoltaics. In *4th International Conference on Nano Electronics Research and Education: Toward Advanced Imaging Science Creation, ICNERE 2018*. <https://doi.org/10.1109/ICNERE.2018.8642595>
- Qian, L., Xifeng, L., & Zhang, J. (2013). Microstructure, optical and electrical properties of gallium-doped ZnO films prepared by sol-gel method. *Journal of Alloys and Compounds*, 572, 175–179. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.03.288>
- Rahal, B., Boudine, B., Khantoul, A. R., Sebais, M., & Halimi, O. (2016). Colloidal synthesis of nanostructured pure ZnO and Cd doped ZnO thin films and their characterization. *Optik*. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.05.006>
- Rahal, B., Boudine, B., Larbah, Y., Guerbous, L., Sebais, M., Halimi, O., & Siad, M. (2018). Sol-gel synthesis and nanostructured semiconductor analysis of undoped and Cd-doped ZnO thin films. *Optik*. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.05.070>

KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Rahman, R. A., Zulkefle, M. A., Nasir, N. M., Herman, S. H., & Alip, R. I. (2018). Influence of Phase Change Material Concentration towards ZnO Thin Film for Solar Cell. In *2018 8th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE)* (pp. 146–149). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ICCSCE.2018.8685008>
- Sailor, M. J. (2012). *Porous silicon in practice : preparation, characterization and applications*. Wiley-VCH.
- Salam, S., Islam, M., & Akram, A. (2013). Sol-gel synthesis of intrinsic and aluminum-doped zinc oxide thin films as transparent conducting oxides for thin film solar cells. *Thin Solid Films*, 529, 242–247. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.10.079>
- Saravanan, R. (2016). *Nano semiconducting materials*. Materials Research Forum LLC.
- Schuler, T., & Aegerter, M. . (1999). Optical, electrical and structural properties of sol gel ZnO:Al coatings. *Thin Solid Films*, 351(1–2), 125–131.
[https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(99\)00211-4](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(99)00211-4)
- Shabannia, R., & Selman, A. M. (2017). Effects of growth temperature on structural and optical properties of ZnO thin films grown chemically on porous silicon substrate. *Chinese Journal of Physics*. <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2017.09.008>
- Shaoqiang, Chen Jian, Zhang Xiao, Feng Xiaohua, Wang Laiqiang, Luo Yanling, Shi Qingsong, Xue Chang, Wang Jianzhong, Zhu Ziqiang, Zhu (2005). Nanocrystalline ZnO thin films on porous silicon/silicon substrates obtained by sol-gel technique. *Applied Surface Science*, 241(3–4), 384–391.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.07.040>
- Shih, K. (2013). *X-ray diffraction : structure, principles, and applications*. Nova Science Publishers, Inc.
- Söğüt, Ö., Apaydın, G., Cengiz, E., & Kerli, S. (2018). Bor ve Flor Katkılanmış ZnO İnce Filmlerinde K tabakası Flüoresans Verimlerinin XRF Tekniği ile Ölçülmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(3), 209–216. <https://doi.org/10.17780/ksujes.430381>
- Sun, X. W. Zhao, J. L. Tan, S. T. Tan, L. H. Tung, C. H. Lo, G. Q. Kwong, D. L. Zhang, Y. W. Li, X. M. Teo, K. L. (2008). Epitaxially grown n-ZnO/MgO/TiN/ n+-Si heterostructured light-emitting diode. *Applied Physics Letters*, 92(11).
<https://doi.org/10.1063/1.2896611>

KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Suryanarayana, C. (2019). Mechanical Alloying of Nanocrystalline Materials and Nanocomposites. *Madridge Journal of Nanotechnology & Nanoscience*, 4(1), 127–134. <https://doi.org/10.18689/mjnn-1000126>
- Taktakoğlu, R., & Kavak, H. (2016). Elektrokimyasal Yöntemle ZnO İnce Film Üretimi Ve Karakterizasyonu. *Ç.Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 34–3.
- Tauc, J. (Ed.). (1974). *Amorphous and Liquid Semiconductors*. Boston, MA: Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-8705-7>
- Tsay, C. Y., Fan, K. S., Chen, S. H., & Tsai, C. H. (2010). Preparation and characterization of ZnO transparent semiconductor thin films by sol-gel method. *Journal of Alloys and Compounds*, 495(1), 126–130. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.01.100>
- Uhlmann, D. R., Suratwala, T., Davidson, K., Boulton, J. M., & Teowee, G. (1997). *Sol-gel derived coatings on glass*. *Journal of Non-Crystalline Solids* (Vol. 218).
- Umar, A., Suh, E. K., & Hahn, Y. B. (2006). Non-catalytic growth of high aspect-ratio ZnO nanowires by thermal evaporation. *Solid State Communications*, 139(9), 447–451. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2006.07.014>
- Vestel, M. J., Grummon, D. S., Gronsky, R., & Pisano, A. P. (2003). Effect of temperature on the devitrification kinetics of NiTi films. *Acta Materialia*, 51(18), 5309–5318. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00389-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00389-6)
- Vinoth, E., Gowrishankar, S., & Gopalakrishnan, N. (2017). RF magnetron sputtered Cd doped ZnO thin films for gas-sensing applications. *Materials and Manufacturing Processes*. <https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1244834>
- Wachs, I. E., & Fitzpatrick, L. E. (1992). *Characterization of catalytic materials*. Butterworth-Heinemann.
- Wright, J. D. (John D., & Sommerdijk, N. A. J. M. (2001). *Sol-gel materials : chemistry and applications*. Gordon and Breach Science Publishers.
- Xia, Zhihe Lu, Lei Li, Jiapeng Feng, Zhuoqun Deng, Sunbin Wang, Sisi Kwok, Hoi Sing Wong, Man (2017). Characteristics of elevated-metal metal-oxide thin-film transistors based on indium-tin-zinc oxide. *IEEE Electron Device Letters*, 38(7), 894–897. <https://doi.org/10.1109/LED.2017.2707090>

KAYNAKLAR (Devam ediyor)

- Xu, Linhua Miao, Juhong Chen, Yulin Su, Jing Yang, Mingzhu Zhang, Lei Zhao, Lan Ding, Shuchen (2018). Characterization of Ag-doped ZnO thin film for its potential applications in optoelectronic devices. *Optik*.
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.06.016>
- Xu, L., Xian, F., Zhang, Y., & Zhang, L. (2019). Surface segregation of Ag and its effect on the microstructure, optical properties and conduction type of ZnO thin films. *Physica B: Condensed Matter*, 566, 103–115.
<https://doi.org/10.1016/j.physb.2019.05.007>
- Xu, L., Zheng, G., Xian, F., & Su, J. (2019). The morphological evolution of ZnO thin films by Sn ions doping and its influence on the surface energy and photocatalytic activity. *Materials Chemistry and Physics*, 229, 215–225.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.03.011>
- Zhu, H., Niu, X., Wan, M., & Mai, Y. (2019). A study of ZnO:Al thin films reactively sputtered under the control of target voltage for application in Cu(In,Ga)Se₂ thin film solar cells. *Vacuum*, 161, 297–305.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.12.053>

ÖZ GEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Mehmet Fatih Gözükızıl
Doğum Yeri ve Tarihi : Konya – 18.07.1983

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Uludağ Üniv. Tekstil Müh. (2005)
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce
Bilimsel Faaliyetleri :

İş Deneyimi

Stajlar :
Projeler :
Çalıştığı Kurumlar : Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

İletişim

Adres : Kayhan Mah. Alptekin Sok. No:22 Söğüt/Bilecik
E-Posta Adresi : fatih.gozukizil@bilecik.edu.tr

Akademik Çalışmaları

Gözükızıl, M. F., Temel, S., & Özbay, N. (2020). Production And Characterization Of Al-Doped ZnO Thin Films With Sol-Gel Magnetic Spin Coating Technique. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 24(1), 172-177.

Gözükızıl, M. F., Temel, S., & Özbay, N. Deposition of ZnO Thin Films by Using a Novel Technique:magnetic Spin Coating Adım Fizik Günleri VIII 12-15 Eylül 2019 Bilecik

Katkılı Metal Oksit İnce Filmlerin Sol-Gel Manyetik Döndürerek Kaplama Tekniği ile Üretimi ve Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi Araştırılması, Bap, Araştırmacı, 2018-2019 (Ulusal)

Özbay, N., Gözükızıl, F., Eren, E., Myo, B. Ş. E. Ü. P., & Fen-Edebiyat, B. Ş. E. Ü. (2012). Sulu Çözeltilerden Remazol Red Boyarmaddesinin Biyosorpsiyon Yöntemi İle Giderimi. Ulusal Kimya Kongresi.

Özbay Nurgül, Gözükızıl Fatih (2013). Removal Of Reactive Dyes From Textile Dyeing Using Fenton Anf Photo Fenton Processes. 8.Conference On Sustainable Development Of Energy, Water And Environment System (Yayın No:331665)

Adsorpsiyon Ve Fenton Prosesi Kullanarak Tekstil Endüstrisi Atıksularından Boyarmadde Gideriminin. Arastırılması, Bap, Arastırmacı, 2010-2012 (Ulusal)

Tarih:28/02/2020