

**T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**CO GAZINA DUYARLI Cd(OH)₂ GAZ SENSÖRÜNÜN ÜRETİMİ
VE KARAKTERİZASYONU**

Esra Demet MÜEZZİNOĞLU

Danışman: Prof. Dr. M. Ali YILDIRIM

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**ERZİNCAN
2020**

Her Hakkı Saklıdır.

Kabul ve Onay Sayfası

Prof. Dr. M. Ali YILDIRIM danışmanlığında, Esra Demet MÜEZZİNOĞLU tarafından hazırlanan bu çalışma 28/01/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI

İmza: 

Üye : Prof. Dr. M. Ali YILDIRIM

İmza: 

Üye : Doç. Dr. Yunus AKALTUN

İmza: 

Bu tez Enstitü Yönetim Kurulunun 31/01/2020 tarih ve 5.../...7... sayılı kararı ile onaylanmıştır.


Prof. Dr. Mustafa Fatih ERTUGAY
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, şekil ve tabloların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

Bilimsel Etiğe Uygunluk Sayfası

“CO Gazına Duyarlı Cd(OH)₂ Gaz Sensörünün Üretimi ve Karakterizasyonu” isimli “Yüksek Lisans” tezim tarafımca intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiğı gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim.
28/01/2020


Esra Demet
MÜEZZİNOĞLU

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

CO GAZINA DUYARLI Cd(OH)₂ GAZ SENSÖRÜNÜN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Esra Demet MÜEZZİNOĞLU

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. M. Ali YILDIRIM

Cd(OH)₂ ince filmler oda sıcaklığında SILAR metodu ile cam taban malzemeler üzerine büyütüldü. SILAR tur sayısının ince filmlerin yapısal, morfolojik, elemental ve CO gazını algılama özellikleri üzerindeki etkisi sırasıyla XRD, SEM, EDAX ve gaz ölçüm sistemi ile incelendi. XRD ve SEM çalışmaları Cd(OH)₂ ince filmlerin polikristal yapıda olup hekzagonal fazda kristalleştiğini ve yapısal, morfolojik özelliklerin SILAR turuna bağlı olduğunu gösterdi. CO gazını algılama ölçümleri, sıcaklık ve gaz konsantrasyonlarının bir fonksiyonu olarak gerçekleştirildi. İnce filmlerin gaz algılama özellikleri sıcaklık ile beraber arttı ve 157 °C’ de maksimuma ulaştı. Cd(OH)₂ince film sensörler, 157 °C çalışma sıcaklığında 50-500 ppm CO gazı konsantrasyonuna maruz kaldığında yüksek algılama tepkileri sergilediler. Optimum çalışma sıcaklığında (157 °C) ve 50 ppm CO gaz konsantrasyonunda, 30, 40 ve 50 SILAR turuna sahip Cd(OH)₂ ince film sensörlerin algılama tepkileri sırasıyla %24, %40 ve %26 olarak hesaplandı. 40 SILAR turuna sahip ince filmin gaz algılama özelliğinin diğerlerinden daha iyi olduğu görüldü.

2020, 82 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Cd(OH)₂, Gaz sensörleri, SILAR, SILAR turu

ABSTRACT

Master Thesis

THE PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF Cd(OH)₂ GAS SENSOR SENSITIVE TO CO GAS

Esra Demet MÜEZZİNOĞLU

Erzincan Binali Yıldırım University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronic Engineering

Supervisor: Prof. Dr. M. Ali YILDIRIM

Cd(OH)₂ thin films were successfully grown on glass substrates by SILAR method at room temperature. The effect of SILAR cycle on the structural, morphological, compositional and CO gas sensing properties of the thin films were investigated by XRD, SEM, EDAX and gas measurement system, respectively. The XRD and SEM studies indicated that Cd(OH)₂ thin films had polycrystalline nature with hexagonal phase of Cd(OH)₂ and the structural and morphological properties of the thin films depended on the SILAR cycle. CO gas sensing measurements were carried out as a function of temperature and gas concentrations. The sensing responses of the thin film sensors increased with operating temperature and reached to the maximum at 157 °C. The Cd(OH)₂ thin film sensors exhibited high sensing responses when exposed to CO gas concentration in the range of 50-500 ppm at operating temperature of 157 °C. At the optimal operating temperature (157 °C) and 50 ppm CO gas concentration, the sensing responses of Cd(OH)₂ thin film sensors with 30, 40 and 50 SILAR cycle were calculated to be 24%, 40% and 26 %, respectively. It was seen that the gas sensing properties of the thin film with 40 SILAR cycle were better than others.

2020, 82 Pages

Keywords: Cd(OH)₂, Gas sensor, SILAR, SILAR cycle

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmamın hazırlanması ve yürütülmesi sırasında yardımını asla esirgemeyen, sabırla ilgilenen, bilgisini, tecburelerini ve desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen, daima yol gösteren çok kıymetli hocam Prof. Dr. M. Ali YILDIRIM'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

$\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince filmlerin büyütölme aşamasında yardımcı olan sayın Dr. Öğretim Üyesi Sümeyra Tuna YILDIRIM' a teşekkür ederim. Ayrıca $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince film gaz sensörlerinin gaz ölçüm çalışmalarını yapabilmem için Gazi Üniversitesi Fen Faköltesi Gaz Ölçüm Laboratuvarını kullanmama olanak sağlayan, laboratuvar becerisi ve fiziksel sonuçları yorumlamam konusunda bana tecrübe kazandıran sayın Prof. Dr. Selim ACAR' a teşekkürlerimi sunarım. Deney sistemleri kullanımında yardım gereken her anda destek veren, bilgi ve tecrübelerini eksik etmeyen Doktora öğrencisi Baktiyar SOLTABAYEV' e, değerli arkadaşım Banu HOROZ' a ve çalışmam sırasında küçük veya büyük yardımını esirgemeyen herkese teşekkür ederim.

Beni bu günlere getiren, her daim yanımda olan ve bana güvenen kıymetli aileme ve desteğini her zaman hissettiğim çok değerli eşime şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim.

Bu tez çalışmamı canım oğlum Ali' ye armağan ediyorum.

Esra Demet MÜEZZİNOĞLU

Ocak, 2020

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
2.1. Cd(OH) ₂ İnce Filmler	3
2.2. Gaz Algılama Uygulamaları	8
3. KURAMSAL TEMELLER.....	20
3.1. Karbonmonoksit (CO) Gazı.....	20
3.2. Gaz Sensörleri.....	21
3.3. Gaz Sensörlerinin Çalışma Prensibi.....	22
3.3.1. Adsorpsiyon ve desorpsiyon	23
3.3.2. Gaz algılama mekanizması	24
3.4. Gaz Sensörlerinin Karakteristikleri.....	27
3.5. Gaz Sensörlerinin Uygulama Alanları	28
3.6. Gaz Ölçüm Sistemleri	28
3.7. Gaz Sensörlerinin Çalışmasına Etki Eden Faktörler.....	29
3.7.1. Sıcaklık.....	29
3.7.2. Kontak konfigürasyonu	29
3.7.3. Katkılama	30
3.8. Gaz Sensörü Çeşitleri.....	30
3.8.1. Katalitik gaz sensörleri.....	30
3.8.2. Elektrokimyasal gaz sensörleri.....	30
3.8.3. Kızılötesi gaz sensörleri	31
3.8.4. Optik gaz sensörleri.....	32
3.8.5. Akustik gaz sensörleri	32

3.8.6. Yarıiletken gaz sensörleri.....	32
3.9. Metal Oksit Yarıiletken Gaz Sensörleri.....	33
3.9.1. Metal oksit yarıiletken gaz sensörlerinin çalışma prensibi	34
4. MATERYAL ve YÖNTEM.....	36
4.1. Materyal	36
4.1.1. Cd(OH) ₂ çözeltisinin hazırlanması	37
4.1.2. Cd(OH) ₂ numunelerin büyütülmesi	37
4.2. Yöntem.....	38
4.2.1. SILAR (Successive Ionic Layer Asorption and Reaction) metodu	39
4.2.2. X-ışını kırınım tekniği (XRD).....	40
4.2.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	43
4.2.4. Elektriksel karakterizasyon	45
4.2.4.1. Gaz ölçümü	45
4.2.4.2. Direnç ölçümü.....	46
5. ARAŞTIRMA BULGULARI	48
5.1. Yapısal Karakterizasyon	48
5.1.1. İnce filmlerin X-ışını kırınım ölçüleri.....	48
5.1.2. İnce filmlerin yüzey görüntüleri.....	50
5.1.3. İnce filmlerin elemental özellikleri	52
5.2. Elektriksel Karakterizasyon	54
5.2.1. İnce filmlerin akım-voltaj ölçüleri	54
5.3. Gaz Ölçüleri	56
5.3.1. Sıcaklığa bağlı gaz algılama ölçümleri	56
5.3.2. Konsantrasyona bağlı gaz algılama ölçümleri	57
6. SONUÇLAR.....	67
6.1. X-ışını Kırınımı (XRD) Sonuçlarının Değerlendirilmesi	68
6.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	68
6.3. Enerji Dağılımlı X-ışını Analizörü (EDAX) Sonuçlarının Değerlendirilmesi .	69
6.4. Cd(OH) ₂ İnce Filmlerin Gaz Algılama Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	69
6.4.1. Sıcaklığa bağlı gaz algılama ölçümlerinin sonuçlarının değerlendirilmesi	

6.4.2. Konsantrasyona bağlı gaz algılama ölçümlerinin sonuçlarının değerlendirilmesi	70
6.5. Sıcaklığa Bağlı Direnç Ölçümlerinin Değerlendirilmesi	71
KAYNAKLAR	75
EKLER.....	81
Ek-1. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar	81
ÖZGEÇMİŞ.....	82



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. İndirgeyici ve yükseltgeyici gaz reaksiyonları	25
Şekil 3.2. İndirgeyici gaz varlığındaki potansiyel bariyerdeki değişim.....	26
Şekil 3.3. Elektrokimyasal gaz sensörü.....	31
Şekil 3.4. Kızılötesi gaz sensörü	31
Şekil 4.1. Interdigital kontak üretimi için hazırlanan metal maskeler	36
Şekil 4.2. IDT ile üretilen sensör şeması	37
Şekil 4.3. Cd(OH) ₂ ince filmlerin SILAR metodu ile büyütülmesi	38
Şekil 4.4. X-ışınlarının bir kristal tarafından kırınımına uğratılması.....	42
Şekil 4.5. Panalytical Empyrean X-ışınları kırınımı cihazı	43
Şekil 4.6. Taramalı elektron mikroskobunun şematik yapısı	44
Şekil 4.7. EDAX dedektörüne sahip taramalı elektron mikroskobu (FESEM)	45
Şekil 4.8. Gaz sensör ölçüm sistemi.....	45
Şekil 4.9. İki nokta uç yöntemi ile direnç ölçme devresi	47
Şekil 5.1. 30 SILAR turuna sahip Cd(OH) ₂ ince filmin X-ışını kırınım deseni	48
Şekil 5.2. 40 SILAR turuna sahip Cd(OH) ₂ ince filmin X-ışını kırınım deseni	49
Şekil 5.3. 50 SILAR turuna sahip Cd(OH) ₂ ince filmin X-ışını kırınım deseni	50
Şekil 5.4. 30 SILAR turuna sahip Cd(OH) ₂ ince filmin SEM görüntüsü	51
Şekil 5.5. 40 SILAR turuna sahip Cd(OH) ₂ ince filmin SEM görüntüsü	51
Şekil 5.6. 50 SILAR turuna sahip Cd(OH) ₂ ince filmin SEM görüntüsü	52
Şekil 5.7. 30, 40 ve 50 SILAR turuna sahip Cd(OH) ₂ ince filmin EDAX analizleri	53
Şekil 5.8. 30 SILAR turuna sahip Cd(OH) ₂ ince filmin R-T ve lnR-1000/T grafikleri	55
Şekil 5.9. 40 SILAR turuna sahip Cd(OH) ₂ ince filmin R-T ve lnR-1000/T grafikleri	55
Şekil 5.10. 50 SILAR turuna sahip Cd(OH) ₂ ince filmin R-T ve lnR-1000/T grafikleri	56
Şekil 5.11. 30, 40 ve 50 SILAR turuna ait Cd(OH) ₂ ince film sensörlerin 50 ppm CO gaz konsantrasyonunda elde edilen duyarlılık-çalışma sıcaklığı grafiği	57
Şekil 5.12. 30 SILAR turuna ait Cd(OH) ₂ ince film sensörün 50 ppm ile 500 ppm aralığında CO gazına karşı elde edilen duyarlılık-zaman grafiği.....	58

Şekil 5.13. 40 SILAR turuna ait $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince film sensörün 50 ppm ile 500 ppm aralığında CO gazına karşı elde edilen duyarlılık-zaman grafiği.....	58
Şekil 5.14. 50 SILAR turuna ait $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince film sensörün 50 ppm ile 500 ppm aralığında CO gazına karşı elde edilen duyarlılık-zaman grafiği.....	59
Şekil 5.15. 30, 40 ve 50 SILAR turuna ait $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince film sensörlerin 157 °C çalışma sıcaklığında ve 50 ppm ile 500 ppm aralığında CO gazına karşı elde edilen duyarlılık-gaz konsantrasyonu grafiği	60
Şekil 5.16. 30 SILAR turuna ait $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince film sensörlerin gaz ölçümünden sonra çalışma sıcaklığıyla değişip CdO yapısına dönüşümüne ait X-ışını kırınım deseni.....	61
Şekil 5.17. 40 SILAR turuna ait $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince film sensörlerin gaz ölçümünden sonra çalışma sıcaklığıyla değişip CdO yapısına dönüşümüne ait X-ışını kırınım deseni.....	62
Şekil 5.18. 50 SILAR turuna ait $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince film sensörlerin gaz ölçümünden sonra çalışma sıcaklığıyla değişip CdO yapısına dönüşümüne ait X-ışını kırınım deseni.....	63
Şekil 5.19. 30 SILAR turuna ait $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince film sensörlerin gaz ölçümünden sonra çalışma sıcaklığıyla değişip CdO yapısına dönüşümüne ait SEM görüntüsü.....	64
Şekil 5.20. 40 SILAR turuna ait $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince film sensörlerin gaz ölçümünden sonra çalışma sıcaklığıyla değişip CdO yapısına dönüşümüne ait SEM görüntüsü.....	65
Şekil 5.21. 50 SILAR turuna ait $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince film sensörlerin gaz ölçümünden sonra çalışma sıcaklığıyla değişip CdO yapısına dönüşümüne ait SEM görüntüsü.....	66

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 6.1. Cd(OH) ₂ ince film sensörlerin 157 °C çalışma sıcaklığındaki gaz algılama ölçüm sonuçları	71
Tablo 6.2. Cd(OH) ₂ ince filmlerin 300 K-500 K sıcaklık aralığındaki direnç değerleri.....	72
Tablo 6.3. Cd(OH) ₂ ince filmlerin aktivasyon enerjileri.....	73



SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

%	Yüzde
Å	Angstrom
C	Karbon
Cd	Kadmiyum
Cl	Klor
Cu	Bakır
°C	Santigrat Derece
cm	Santimetre
Ea	Aktivasyon Enerjisi
Eg	Yasak Enerji Aralığı
eV	Elektron Volt
g	Gram
H	Hidrojen
Hb	Hemoglobin
I	Akım
I-V	Akım-Voltaj
K	Kelvin
l	Uzunluk
Ln	Logaritma
M	Molarite
N	Azot
n	Negatif
Ni	Nikel
nm	Nanometre
µm	Mikrometre
O	Oksijen
p	Pozitif
Pd	Paladyum
pH	Power of Hydrogen (Hidrojenin Gücü)
ppb	Milyarda bir
ppm	Milyonda bir
Pt	Platin
R	Direnç
S	Kükürt
Si	Silisyum
Sn	Kalay
T	Sıcaklık
Ti	Titanyum
V	Gerilim

V	Vanadyum
W	Watt
nW	Nanowatt
μW	Mikrowatt
Zn	Çinko
θ	X-ışını demetinin düzleme gelme açısı
Ω	Ohm (Direnç birimi)
λ	Dalga boyu

Kısaltmalar

CBD	Chemical Bath Deposition
CdO	Kadmiyumoksit
Cd(OH) ₂	Kadmiyumhidroksit
CH ₄	Metan
C ₂ H ₅ OH	Etanol
C ₃ H ₈	Propan
CO	Karbonmonoksit
CO ₂	Karbondioksit
COHb	Karboksihemoglobin
CuO	Bakır oksit
Cu(OH) ₂	Bakırhidroksit
CVD	Chemical Vapor Deposition (Kimyasal buhar biriktirme)
DRS	Diffuse Reflection Spectroscopy
ECD	Electrochemical Deposition (Elektrokimyasal biriktirme)
EDAX	Enerji Dağılımlı X-ışını Analizörü
FESEM	Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu
FR-IR	Fouier-Transform Infrared
IDT	Interdigital kontak
HRTEM	High Resolution Transmission Electron Microscopy
H ₂ S	Hidrojen Sülfür
MKS	Gaz akış kontrolcüsü
MO	Metal oksit
MOS	Metal Oksit Yarıiletken
MOCVD	Metalorganic Chemical Vapor Deposition
NH ₃	Amonyak
NH ₄	Amonyum
NO	Azot oksit
NO ₂	Azot dioksit
O ₃	Ozon
OH	Hidroksil
PVA	Polivinil Alkol
QCM	Kuartz Kristal Mikrobalans
RT	Room Temperature

SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SILAR	Ardışık İyonik Tabaka Adsorpsiyon ve Reaksiyonu
SnO	Kalay oksit
TEM	Geçirimli Elektron Mikroskobu
XPS	X-Ray Fotoelektron Spektroskopisi
XRD	X-ışını Kırınımı
UV	Ultraviyole, Morötesi
VIS	Visible Spectrofotometer
vb.	Ve benzeri
vd.	Ve diğerleri
V ₂ O ₅	Vanadyum pentaoksit
ZnO	Çinko oksit



1. GİRİŞ

İnsanoğlu zamanla göçebe hayattan yerleşik hayata geçmiş ve bu geçiş ile de kış aylarında ısınma ihtiyacı ortaya çıkmıştır. İlk başlarda bu ihtiyaçlarını odun gibi maddeler kullanarak, daha sonra kömürün bulunmasıyla birlikte kömürle karşılamaya başlamışlardır. Teknolojinin gelişmesiyle günümüzde birçok gelişmiş şehirlerde yakıt olarak doğal gaz kullanılmaya başlanmıştır. Bu yakıtların hepsinin ortak noktası ise yandıkları zaman oluşturdukları zehirli gazlardır. Bu gazlar güvenlik önlemi alınmadığı takdirde insan sağlığı açısından oldukça tehlikelidir.

Günümüzde endüstrinin gelişmesi sonucunda oluşan kirleticiler çevre sorunlarını da beraberinde getirmiştir. Bu kirleticiler çok çeşitlidir ve birçok kaynaktan meydana gelerek çevreyi kirletir. Dolayısıyla insan ve diğer canlılar bu kirlenmeden etkilenmektedir. Canlılar için oldukça zararlı ve hayati açıdan tehlike oluşturacak bir öneme sahip olan karbonmonoksit (CO) ve karbondioksit (CO₂) gazlarının kapalı bir ortamda varlığının belirlenmesi için yeni elektronik cihazlar geliştirilmektedir (Göpel vd, 1989). Kapalı ortamlarda havalandırma işlemine de dikkat edilmemesiyle bu gazlar insan sağlığını çok hızlı bir şekilde tehlikeye sokmaktadır. Bu nedenle çevre kirliliğinin derecesinin belirlenmesi ve olası bir gaz sızıntı durumunda gerekli önlemlerin alınması günümüzde önemli bir çalışma alanı olmuştur.

Gaz tespitinin önemli olduğu alanlardan bir başkası da sağlıktır. Örneğin birçok bakteri çoğalma aşamasında kendilerine özgü kokular yayar. Bu durumun insan nefesi incelenerek hastalıkların erken teşhis ve tedavisine olanak sağlaması ihtimali sağlık alanında kokuya duyarlı bir aygıtı gerektirmiştir.

Tüm bu gereksinimler sensör ve dedektör gibi cihazların üretimine zemin hazırlamıştır. Sensör ve dedektörlerin uzun bir tarihi vardır. 1860 yılında Wilhelm von Siemens ilk sensörü ortaya çıkarmıştır. Bunu yaparken bir bakır telin direncinin sıcaklığa bağlı değişimini kullanarak sıcaklık ölçümü yapmıştır. 1900' lerin başında ölçüm ve kontrol teknolojisinde ortaya çıkan problemler, yarıiletken teknolojisinin gelişmesi ile çözülmüş ve bu alandaki çalışmaların gelişmesine ve hız kazanmasına olanak sağlamıştır.

Teknolojideki hızlı gelişimler, bir yandan yaşam tarzımızı kolaylaştırırken diğeryandan, insan ve çevre sağlığına verdiği zararı önlemek amacıyla gaz algılama sistemleriyle

ilgili çalışmaları artırmıştır (Açıkbaş, 2006). Bu alışmalar sonucunda sensörler meydana çıkmıştır. Sensörler, bulundukları ortamdaki fiziksel ve kimyasal değişimleri ölçebilen, bu ölçümün sonucunu elektrik sinyaline dönüştürebilen ve dış ortamın algılanmasını sağlayan aygıtlardır. Gaz sensörleri ortamda bulunan gazların varlığını ve konsantrasyonunu ölçen ve gaz ortamında çalışan aygıtlardır.

Günümüzde ortamdaki farklı gazları belirleyen birçok sensör bulunmaktadır. Bu sensörlerde dikkat edilmesi gereken en önemli noktalar ortamdaki gaza karşı gösterdikleri hassasiyet ve maliyetidir. İyi bir sensör düşük maliyette yüksek hassasiyet sağlamalıdır.

Metal oksit gaz sensörleri yüksek sıcaklık ve basınç gibi zorlu şartlarda çalışabilme, düşük sıcaklıkta hassas duyarlılık gibi özellikleriyle diğer kimyasal gaz sensörlerinin gvenirlikleriyle ve dayanırlıklarıyla kıyaslandığında daha stndrleri. Metal oksit gaz sensörleri yüksek hassasiyet, düşük maliyet ve hızlı cevap verebilme gibi avantajlı özelliklere sahip oldukları için koku tanıma sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Fort vd., 2004). Bu sensörlerin çalışma prensibi hedef gaz ile oksijenin etkileşmesi sonucu oluşan reaksiyonlar ile (yüzey tarafından oksijenin tutulması ile yüzey elektronlarında artış ve azalış meydana gelir) elektriksel direncinin değişiminin belirlenmesi esasına dayanır. Bu değişimler sonucunda elektrik direnci ölçülüp hedef gazın konsantrasyon değişimi ve karakteriştiği belirlenebilmektedir.

Bu tez çalışması řu şekilde düzenlenmiştir; Bölüm 2' de tez çalışmasıyla alakalı araştırılan literatürün kısa özetlerinden bahsedilirken; Bölüm 3' te karbonmonoksit (CO) gazının özelliklerinden, gaz sensörlerinden, metal oksit gaz sensörlerinden bahsedilmiştir. Bölüm 4'te tez çalışmasında kullanılan zltilerin hazırlanması, ince film büyütmede kullanılan SILAR metodu, ince filmlerin yapısal, morfolojik, kimyasal bileşen ve elektriksel karakterizasyon ölçümlerini yapmamızı sağlayan XRD, SEM, EDAX gibi analiz teknikleri ve gaz ölçümlerinden bahsedilmiştir. Bölüm 5' te elde edilen bulgular gösterilmiş; Bölüm 6'da bu bulgular hakkında tartışma ve sonuç açıklanmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Cd(OH)₂ İnce Filmler

Cd(OH)₂, 146,43 molekül ağırlığına, 4,79 g/cm³ yoğunluğa sahip, erime sıcaklığı 130 °C, kaynama sıcaklığı 300 °C olan toz görünümlü bir bileşiktir.

Ristic vd. (2004), Cd(OH)₂ ve CdO parçacıklarının oluşumunu ve özelliklerini araştırmışlardır. Cd(OH)₂ ve CdO parçacıklarının oluşumu ve özellikleri, XRD, DTA, FT-IR spektroskopisi ve SEM ile incelendi. Trigonal, Cd(OH)₂ oda sıcaklığında (RT) sulu bir tetrametilamonyum hidroksit çözeltisi (TMAH), kadmiyum asetat çözeltisinin etanolik çözeltisine ilave edilerek tek bir faz halinde çökeltiştir. Cd(OH)₂' nin DTA eğrisi, CdO 'nun yeniden kristalleşmesi nedeniyle 245 °C' de ortalanan güçlü bir endotermik pik göstermiştir. Cd(OH)₂ süspansiyonunun 220 °C' de otoklavlanmasından sonra çökeltelerde CdO baskın faz olarak bulunmuştur. Bu çökelteler ayrıca, trigonal simetri ile Cd(OH)₂, monoklinik simetriye sahip ve bir tanımlanamayan faza sahip Cd(OH)₂ içermiştir. Yapraklı Cd(OH)₂ partikülleri 300 °C' de neredeyse küreselmonodispers CdO partiküllerine dönüşmüştür. Cd(OH)₂ süspansiyonunun otoklavlanmasıyla elde edilen parçacıklar, çok farklı boyut ve şekiller göstermiştir. Bu parçacıklar nanoteller veya uzun çubuk demetleri (kablo benzeri) şeklindedir.

Ghoshal vd. (2007), hegzagonal levha ve çubuk şeklinde olan Cd(OH)₂ ve CdO' nun nano ve mikro kristallerinin sentezini incelemiştir. Cd(OH)₂ ve CdO nano/mikro kristalleri solvotermal durumdaki bir kaynak olan kadmiyum folyo kullanılarak etanol-su ortamında sentezlenmiştir. Etanolün suya oranı, NaOH konsantrasyonu ve sentez sıcaklığı gibi deneysel parametrelerin tümü, ürünlerin boyutunun şeklinin ve kristal fazının belirlenmesinde önemli rol oynar. Ürünler XRD ve SEM ile analiz edilmiştir. CdO' nun nano/mikro kristalleri, Cd(OH)₂ kristallerinin farklı sıcaklıklarda hava ortamında ısı ile de elde edilmiştir.

Gujar vd. (2008), kimyasal olarak büyütülmüş Cd(OH)₂ ince filmlerden CdO ince filmlerin elde edilmesini araştırmışlardır. Basit bir kimyasal yöntem kullanarak sulu bir alkalın kadmiyum nitrat çözeltisinden cam alt tabakalara oda sıcaklığında kadmiyum hidroksit oluşumu ve bunun termal tavlama işlemiyle kadmiyum okside (CdO) dönüşümü incelenmiştir. Cd(OH)₂ ince filmlerin CdO filmlere dönüşümü için 2 saat

boyunca 450 °C' de oksijen ortamında termal tavlama işlemi uygulanmıştır. Yapısal, morfolojik ve optik çalışmalar büyütülen ve tavlanan ince filmler için yapılmıştır. Yapısal analizler, büyütülen filmlerin Cd(OH)₂ ve CdO fazlarına sahip olduğu, tavllanmış filmlerin ise CdO fazı sergilediğini ortaya koymuştur. Morfolojik analizler tavlama sonrası filmlerin yüzeyindeki kümelerin tanelere dönüştüğünü göstermiştir. Filmlerin optik band aralığının, tavlama işlemi ile 3,21 eV' tan 2,58 eV' a düştüğü gözlenmiştir. Tavllanmış filmlerin elemental analizinden filmlerin yapısında Cd ve O elementlerinin bulunduğu görülmüştür.

Ghoshal vd. (2009), Cd folyo üzerinde Cd(OH)₂ ve CdO mikro/nano kristallerin morfoloji kontrollü solvotermal sentezini incelemişlerdir. Kadmiyum hidroksit (Cd(OH)₂) ve kadmiyum oksit (CdO) nano mikro kristalleri solvotermal koşul altında hem kaynak hem de substrat olarak kadmiyum folyo kullanılarak etanol-su ortamında sentezlenmiştir. Ürünlerdeki yapısal ve morfolojik farklılıkları incelemek için farklı konsantrasyonlarda amonyum hidroksit, hidrazin hidrat, sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit eklenmiştir. Nano/mikro yapıların büyüme aşamalarını incelemek için farklı sıcaklıklarda sentez yapılmıştır. Bu yapılar XRD, FESEM ve TEM ile analiz edilmiştir. Hazırlanan Cd(OH)₂ ürünleri havada ısıtma işlemiyle CdO' ya dönüştürülmüştür. Farklı temel ortamlarda farklı morfolojilerin oluşumu için olası büyüme mekanizması önerilmiştir. CdO'nun bant aralığının değerlerini belirlemek için optik absorpsiyon ölçümü yapılmıştır.

Şahin vd. (2012), kimyasal banyo biriktirme metoduyla büyütülen Cd(OH)₂ ve CdO ince filmlerin özellikleri üzerinde ısıtma işlemin etkisini incelemişlerdir. Nano yapıları kadmiyum hidroksit Cd(OH)₂ ince filmler, kimyasal banyo biriktirme metoduyla büyütülmüş ve ısıtma işlemleri kadmiyum oksit (CdO) filmlerine dönüştürülmüştür. Filmlerin bazıları 150, 300 ve 450 ° C' de tavlama işlemi. Tavlama işleminin Cd(OH)₂ ve CdO filmlerin optik, yapısal ve morfolojik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Filmlerin bant aralıkları farklı tavlama sıcaklıkları için 2,74 eV ile 2,32 eV arasında değişmiştir. Yapısal, morfolojik ve optik özelliklerin, filmlerin tavlama sıcaklığına doğrudan bağlı olduğu görülmüştür. XRD ölçümlerinden tavlama işlemi ve 150 °C' de tavlama işlemi filmin tamamen Cd(OH)₂' den, 300 ve 450 °C'de tavlama işlemi filmlerin CdO nanoparçacıklarından oluştuğu gözlenmiştir. SEM ölçümlerinden nanoparçacıkların büyüklüğünün 460 ile 600 nm arasında olduğu bulunmuştur.

Prakash vd. (2015), $\text{Cd}(\text{OH})_2/\text{CdO}$ nanorodların mikrodalga destekli sentezine ışınlanma zamanının etkisini incelemişlerdir. Bir bio-şablon varlığında, mikrodalga ışıması ile desteklenen ıslak bir kimyasal yolla kadmiyum hidroksit/oksit nanorodları sentezlemenin basit bir yöntemi sunulmuştur. Farklı ışınlanma zamanlarında elde edilen ürünler, XRD, TEM, yaygın yansıma spektroskopisi (DRS) ve fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) ile karakterize edilmiştir. XRD analizi, sırasıyla monoklinik ve kübik kristal yapıda $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ve CdO fazlarının varlığını göstermiştir. Albümin bio-şablon plakası $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ve CdO kristalinin c eksenini boyunca büyümesini ele alarak, bazı mikrometrelerin uzun hiyerarşik nanoyapıları oluşturmak üzere bir araya gelerek yaklaşık 20-50 nm çapında ve 500 nm' ye kadar uzunluktaki nanorodlar üretilmiştir.

Bagal vd. (2016), sıralanmış $\text{Cd}(\text{OH})_2$ nano tabakalardan yüksek akım yoğunluğu ve düşük açma alanını incelemişlerdir. Hizalanmış $\text{Cd}(\text{OH})_2$ nano tabakalardan $4,1 \text{ V}/\mu\text{m}'$ lik bir uygulama alanında $9,8 \text{ mA}/\text{cm}^2$ lik yüksek akım yoğunluğu çekilmiştir ve $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ lik emisyon akım yoğunluğu için $1,4 \text{ V}/\mu\text{m}'$ lik düşük açılma alanı bulunmuştur. Hizalanmış $\text{Cd}(\text{OH})_2$ nano tabakaları kadmiyum folyo üzerinde CBD tekniği ile sentezlenmiştir. Bilindiği kadarıyla bu $\text{Cd}(\text{OH})_2$ nano tabakalarının alanemiyon çalışmaları ile ilgili ilk rapordur. Üstün alanemiyon özellikleriyle birleştirilmiş basit sentezrot, $\text{Cd}(\text{OH})_2$ nano tabakaların mikro/nanoelektronik cihazlar için kullanımının olası olduğunu göstermiştir.

Abbas vd. (2018), $\text{Cd}(\text{OH})_2/\text{Ag}$ çekirdek/ uydu ve CdO nanorodların hızlı, verimli sonokimyasal sentezi, karakterizasyonu ve manyetik özelliklerini incelemişlerdir. CdO, $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ve $\text{Cd}(\text{OH})_2/\text{Ag}/\text{çekirdek/uydu}$ nanorodlarının kolay sentezi için etkili ve doğrudan bir sonokimyasal yöntem tasarlamışlardır. Bir $\text{Cd}(\text{OH})_2$ nanorodu, tek kap ve çevre dostu sulu bir sonokimyasal reaksiyon ile sentezlenmiştir. Ardından CdO nanorodları üretmek için 500°C de kalsine edilmiştir. $\text{Cd}(\text{OH})_2/\text{Ag}/\text{çekirdek/uydu}$ nanorodlarını oluşturmak için Ag prekürsörünün içerisinde yeniden ultrasonikleştirilmiş CdO nanorodları, yüzeyde Ag nanorodların biriktirilmesiyle birlikte $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 'nin monoklinik kristal yapısına, CdO'nun kübik yapısından monoklinik kristal yapısına faz geçişi için 30 dakika yeterli olmuştur. X-ışını difraksiyonu, transmisyon elektron mikroskobu, yüksek çözünürlüklü transmisyon elektron mikroskobu, enerji dağılım spektroskopisi, N_2 -Brunauer-Emmett-Teller adsorpsiyon-desorpsiyon ve Fourier-

transform infrared spektroskopisi ölçümleri, nanorodların/uyduların çeşitli fazların ve eşsiz morfolojinin başarılı oluşumunu doğrulamıştır. Ayrıca oda sıcaklığında titreşimli bir numune manyetometresi kullanılarak manyetik özellikleri ölçülmüştür. Üretilen nanorodların sırasıyla CdO ve Cd(OH)₂/Ag nanorodları için 0,105 ve 0,076 emu/g manyetik moment değerlerine sahip zayıf doymamış ferromanyetik özellikler göstermiştir. Sonuç olarak tek pot, uygun maliyetli, sonokimyasal yaklaşımının, çeşitli oksitlerin ve çekirdek/uydu nanopartiküllerinin sentezi için uygun olduğu belirlenmiştir.

Patil vd. (2019), Cu(OH)₂@Cd(OH)₂ çekirdek-kabuk nanoyapısının süper kapasitör uygulaması sentezini incelemiştir. Cu(OH)₂@Cd(OH)₂ çekirdek-kabuk nanotel yapısı, kadmiyum hidroksitten bakır hidroksitine topotaktik dönüşüm yoluyla negatif serbest enerji oluşumuna dayanan kolay katyon değişim reaksiyonu ile başarıyla sentezlenmiştir. Bakırın kadmiyum hidroksit nanotellerine kapsüllenmesi, X-ışını difraksiyon çalışmaları, element analizi ve Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi ile doğrulanmıştır. Elektrokimyasal çalışma, bir sulu NaOH elektrolitinde Cu(OH)₂@Cd(OH)₂ çekirdek-kabuk nanotel yapısının 374 Fg⁻¹ yüksek özgül kapasiteye sahip olduğunu göstermiştir. Mevcut çalışma, Cu(OH)₂@Cd(OH)₂ nanotellerin, süper kapasitif elektrot olarak sentez ve kullanımını göstermiştir.

Dhawale vd. (2008), CdO ince filmler oda sıcaklığında kimyasal banyo biriktirme metodu ile cam taban malzemeler üzerine büyütülmüştür. Büyütülen filmlere 623 K' de tavlama işlemi yapılmıştır. Optik, elektriksel öz direnç, XRD ve SEM analizleri ile sırasıyla filmlerin optiksel, elektriksel, yapısal ve morfolojik özellikleri incelenmiştir. XRD analizleri sonucu büyütülen amorf filmin tavlama işlemi sonucu polikristal yapıya dönüştüğünü göstermiştir. Tavlanan filmlerin NaCl yapıda kristalleştiği belirlenmiştir. SEM analizleri ile tavllanmış filmlerin yapısının oldukça düz ve homojen olduğu gözlenmiştir. Tavlama ile 2,5 µm'den 3 µm' ye değişen uzunlukta ve 60-65 nm çapında CdO nanoçubuklar elde edilmiştir. Optik özellikler, filmin 2,42 eV enerjili direk, 2,04 eV enerjili endirek bant aralığına sahip olduğunu göstermiştir. Elektriksel öz direnç ölçümleri CdO filminin öz direnç değerinin tavlamadan önce 10⁷Ω-cm iken tavlamadan sonra 10⁻³Ω-cm'e düştüğünü göstermiştir. Tavlanmamış filmin öz direnç değerinin yüksek olmasının amorf Cd(OH)₂' den kaynaklandığı sonucu ortaya çıkmıştır. Öz direnç ölçüm sonuçları filmin yarıiletken davranış sergilediğini göstermiştir. Termal

elektromotor kuvveti ölçümü ile filmin n-tipi elektriksel iletkenliğe sahip olduğu belirlenmiştir.

Salunkhe vd. (2009), SILAR metodu ile büyütülen CdO ince filmler 623 K' de 2 saat hava ortamında tavlandıktan sonra yapısal, elektriksel ve optik özellikleri incelenmiştir. XRD ölçümleri büyütülen filmin $\text{Cd}(\text{O}_2)_{0,88}(\text{OH})_{0,24}$ (kadmiyum oksit-hidroksit) fazında olduğunu ve tavlamanın etkisiyle yapıdaki H_2O ' nun buharlaştığı görülmüştür. Buharlaşma sonucu yapı saf kübik CdO' ya dönüşmüştür. Filmin ortalama kristal boyutunun tavlamadan önce 20-25 nm, tavlamadan sonra 40-45 nm olduğu görülmüştür. SEM ölçümleri, tavlamanın filmde nanokristal tanelerin yüzey üzerine homojen dağıldığını göstermiştir. Tavlama işleminden sonra tane boyutunun arttığı fakat yüzey üzerinde çatlaklar oluştuğu gözlenmiştir. Elektriksel özdirenç ölçümlerinde yapının yarıiletken davranış sergilediği, tavlama ile özdirenç değerinin 10^{-2} den $10^{-3} \Omega\text{-cm}$ ' ye düştüğü gözlemlenmiştir. Optik ölçümler sonucunda filmin bant aralığının 3,3 eV' tan tavlama ile 2,7 eV' a azaldığı görülmüştür. Bu azalmanın sebebinin yapıdaki H_2O ' nun buharlaşması ve kusur seviyelerinin yok olması olarak açıklanmıştır.

M. Ali Yıldırım(2010), SILAR metodu ile cam altlıklar üzerine ZnO ve CdO ince filmler başarıyla büyütülmüştür. Daha sonra ince filmler sırasıyla 30 ve 60 dakika oksijen ortamında 200, 300, 400 ve 500 °C' de tavlannmıştır. Büyütülen filmlerin yapısal, morfolojik ve elektriksel özellikleri ve tavlamanın bu özellikler üzerine etkisi incelenmiştir. XRD ve SEM sonuçlarından filmlerin polikristal yapıda kristalleştiği ve altlıklar üzerine yoğun bir şekilde kaplandığını görülmüştür. Filmlere ait yasak enerji aralığı değerleri optik soğurma ölçümleriyle yapılmış ve tavlama sıcaklığı arttıkça yasak enerji aralığının azaldığı gözlenmiştir. İki nokta uç yöntemiyle filmlerin özdirenci ölçüldü. Özdirenç değerinin tavlama sıcaklığı ve ışık şiddeti ile azaldığı gözlenmiştir. Sonuç olarak, tavlama işleminin ince filmlerin karakteristik özellikleri üzerinde önemli değişimlere sebep olduğu belirlenmiştir.

Kadmiyum oksit (CdO) yarıiletken bileşiği periyodik tablonun II. grup elementlerinden olan kadmiyum (Cd) ve VI. grup elementlerinden olan oksijen (O) atomundan oluşmuş II-VI grup bileşiğidir. CdO yarıiletken filmi bir n-tipi yarıiletkenidir. Yasak enerji aralığı 2,2-2,8 eV arasındadır. Diğer geçirgen iletkenler (Transparent Conducting Oxides-TCO)' lar ile karşılaştırıldığında CdO daha dar yasak enerji aralığına, yüksek elektriksel iletkenliğe, yüksek elektron mobilitesine ve görünür bölgede yüksek optiksel

geçirgenliğe sahiptir. Yüksek elektriksel iletkenliğe ve taşıyıcı konsantrasyonuna sahip olması, doğasında var olan stokiometrik olmama özelliğinden kaynaklanmaktadır. Mobilitesi $64 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, özdirenci $4,87 \times 10^{-4} \text{ ohm-cm}$ 'dir (Li vd.2001; Wang vd. 2003).

2.2. Gaz Algılama Uygulamaları

Hasan Karami (2010), yeni bir CdO-ZnO nanokompozit, polivinil alkol (PVA) polimerik ağına dayanan bir sol-jel piroliz metodu ile sentezlenmiştir. Hazırlanan nanokompozitler, SEM, EDAX, ICP-atomik emisyon spektroskopisi ve XRD kullanılarak dikkatlice karakterize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, optimum koşullarda sentezlenen nanokompozitin, nano taneciklerden oluşan mükemmel lineer nano kümelerle sahip olduğunu göstermiştir. Her nanotane, tamamen ZnO katmanları ile kaplanan bir CdO çekirdeğinden oluşmuştur. Sentezlenen her nanokompozit, CO gazının algılayıcı maddesi olarak kullanılmıştır. Ağırlıkça % 2 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$, ağırlıkça % 2 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$, ağırlıkça % 9 PVA'da sentezlenmiş CdO-ZnO nanokompozitin, 600°C 'lik piroliz sıcaklığında 50:50 etanol-su çözelti karışımının 135°C 'de en yüksek hassasiyeti sergilemek üzere CO gaz algılama sensörü olarak kullanılabileceği bulunmuştur. Sensör 2 ppm ile 500 ppm aralığında algılama limiti göstermiştir.

Bulakhe ve Lokhande (2014), kadmiyum oksit (CdO) ince filmler kimyasal banyo biriktirme (CBD) metoduyla sentezlenmiştir. Biriktirme oda sıcaklığında (300 K) gerçekleştirilmiştir. CdO ince filmlerin yüzey morfolojisi birbirine bağlı prizma benzeri yapıdan oluşmuştur. CdO ince filmler kübik kristal yapıya sahip (111) düzlem boyunca yöneldiği belirlenmiştir. Nano yapıli CdO ince filmlerin gaz algılama özellikleri, 573 K çalışma sıcaklığında sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) için incelenmiştir. CdO ince filmler, 1040 ppm LPG'ye maruz kaldığında maksimum %44'lük gaz duyarlılığı sergilemiştir. Bu ölçümler CBD metodunun, LPG gaz sensörü olarak kullanılacak yüksek kaliteli CdO nanoyapıları oluşturmak için kolay bir metot olduğunu göstermiştir.

Nwanya vd. (2014), SILAR metodu kullanılarak ZnO-CdO ince filmlerin büyütülmesi gerçekleştirilmiştir. Büyütülen ZnO-CdO ince filmlerin yüzey özellikleri SEM ile incelenmiştir. ZnO-CdO'nun algılama mekanizması yarıiletken oksitlerin direnç modülasyonuna dayanır. İletken veya kimyasal dirençli gaz sensörleri olarak bilinen bu tür gaz sensörleri, düşük maliyetli, yüksek hassasiyet, basitlik ve sinyal dönüştürme elektronik tasarımı ile iyi uyumluluk avantajı sunar. ZnO-CdO kompozit ince filmlerin

gazını algılama mekanizması, ZnO-CdO yüzeyindeki kimyasal olarak emilmiş oksijen nedeniyle yüzey direncindeki değişikliği içerir. Kompozit ince film, havaya maruz kaldığında yüzeydeki oksijen atomlarını emer. Kimyasal olarak emilmiş oksijen, kompozit filmin iletken bandından bir elektron alır ve kompozit oksit filmi üzerine O^{-2} , O veya O^2 şeklinde adsorbe edilir. LPG, esas olarak CH_4 , C_3H_8 ve C_4H_{10} , C_4H_8 , vs.'den oluşur. Bu moleküllerdeki karbon-karbon ve karbon-hidrojen bağları, Vander Waals kuvvetleri nedeniyle güçlüdür. Bu nedenle LPG, yüksek sıcaklıklarda bileşenlerine daha kolay ayrışır. SILAR metodu ile büyütülen ZnO-CdO kompozit ince filmlerin yüzey morfolojisinin nanoboyutlarda pürüzsüz kilitli tabakalar olduğu belirlenmiştir. Enerji band aralığı, aktivasyon enerjisi ve filmlerin elektriksel direnci tavlama ile azalmıştır. 3,8 eV' luk band aralığı tavlandıktan sonra 2,9 eV'a düşmüştür. Filmin LPG'yi algılama özelliklerinin de sıcaklığa ve film büyütmede kullanılan Zn^{+2} ve Cd^{+2} 'nin hacim oranına bağlı olduğu bulunmuştur. ZnO-CdO kompozit ince filmin gaz duyarlılığı, 780 ppm LPG'ye maruz kaldığında 623 K'de maksimum (yaklaşık % 50) özellik göstermiştir.

Rajput vd. (2017), cam taban malzemeler üzerinde sol-gel spin kaplama metodu kullanılarak farklı molaritlerdeki CdO ince filmler hazırlanmıştır. X ışını kırınım desenleri, 0,5M CdO filmin 34 nm parçacık boyutunda kübik bir yapıya (111) sahip olduğunu göstermiştir. SEM ölçümleri ile konsantrasyona bağlı yüzey morfolojisini incelenmiştir. Oldukça şeffaf ince filmler için optik bant aralığı enerjisi, molarite 0,2 M'den 1,0 M 'ye yükseltildiğinde 1,9 eV' den 2,34 eV' ye yükseldiği gözlenmiştir. Filmlerin morfolojisinin çözeltinin molaritesine bağlı olduğu görülmüştür. Farklı molaritedeki CdO ince filmlerden birinin azot gazını algılaması test edilmiştir. Bir sensörün sensör tepkisi, iyi kristal kalitesine ve yüksek elektrik hassasiyetine bağlıdır. XRD ile farklı molaritedeki bütün ince filmlerin kristal kalitelerinin iyi olduğu ve kübik yapıda (111) kristalleştikleri görülmüştür. CdO ince filmi, iyi nanokristal yapıya sahiptir ve dar bant aralığı ile oldukça iletkenidir. Yanıt eğrisi, sensör tepkisi, tepki süresi ve iyileşme süresi gibi sensör karakteristikleri farklı çalışma sıcaklıklarında optimize edilmiş ince film için ölçülmüştür. Sensör yanıtı, oda sıcaklığında (32 ° C) yaklaşık %20 bulunmuştur. Sıcaklıkla orantılı olarak en hızlı yanıt süresi 10 sn ve oda sıcaklığına yakın sıcaklarda geri dönüş süresinin 20 sn olduğu gözlenmiştir. CdO ince filmlerin oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda daha hızlı tepki gösterdiği tespit edilmiştir.

Velusamy vd. (2017), kimyasal piroliz sprey metodu ile biriktirilen kobalt (Co) katkılı kadmiyum oksit (CdO) ince filmleriningaz algılama ve opto-elektronik özelliklerinin geliştirilmesi üzerine odaklanmıştır. XRD desenleri büyümenin (111) ve (200) düzlemleri arasında değiştiğini ortaya koymaktadır. SEM analizleri ile farklı kobalt (Co) konsantrasyonlarındaki yüzey özellikleri gözlenmiştir. Ağırlığına göre %0,5 kobalt katkılı CdO ince filmlerin formaldehit gazına karşı duyarlılığı %23 olarak ölçülmüştür. Elektriksel özellikler Van Der Pauw konfigürasyonunda Hall ölçümleriyle hesaplanmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ağırlıkça %0,5 oranında Co katkılı CdO ince filmin, katkısız ve diğer katkılı CdO ince filmlerle karşılaştırıldığında kristal kalitesinin arttığını göstermiştir.

Paliwal vd. (2017), ZnO ince film tabanlı karbonmonoksit optik gaz sensörlerini incelemiştir. Optik gaz sensörleri konvansiyonel iletken gaz sensörleri yerine bir alternatif olarak sunulmuştur. Karbonmonoksit (CO) gazı genellikle en tehlikeli hava kirleticilerden biri olarak kabul edilir, bu nedenle Au kaplanmış prizmalarda büyütülmüş ZnO algılayıcı film kullanan, oda sıcaklığında işletilen bir CO gaz sensörü, yerli olarak geliştirilen bir yüzey plazmon rezonans (SPR) ölçüm düzeneği kullanılarak geliştirilmiştir. Bu sistem oda sıcaklığında geniş bir konsantrasyon aralığında (0,5-100 ppm) CO gazına karşı çok hızlı tepki vermiş ve dolayısıyla etkili bir optik CO gaz sensörü için yüksek duyarlılığa sahip olduğu bulunmuştur.

Mirzaei vd. (2018), metal oksit nanoyapıları kullanan direnç bazlı H₂S gaz sensörlerinin son gelişmelerini incelemiştir. Gaz sensörleri, modern dünyadaki çoğu teknoloji alanında yadsınamaz bir rol oynamaktadır; genel olarak kamu güvenliği, kirlilik izleme, kalite kontrol, nefes analizi, akıllı evler ve otomobiller vb. için kullanılırlar. Düşük maliyet, yüksek hassasiyet, kompakt boyut, çevrimiçi algılama, kullanım kolaylığı, taşınabilirlik ve düşük güç tüketimi nedeniyle, metal oksit (MO) gaz sensörleri 150' den fazla gazı tespit etmek için olağanüstü bir potansiyele sahiptir. Bu makale, en son H₂S iletken MO gaz sensörlerini gözden geçirmektedir. MO' ler için H₂S algılama mekanizması ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur. Farklı MO' lerin H₂S algılama karakteristikleri, metal doping heterojunction kompozitleri ve algılama özelliklerini geliştirmek için uygulanan farklı morfolojiler gibi stratejilere yer verilmiştir. Genel olarak, CuO ve SnO₂; H₂S' e en yüksek duyarlılığı göstermiştir.

Feng Sun vd. (2012), metal oksit nanoyapıları ve gaz algılama özelliklerini incelemişlerdir. Metal oksit gaz sensörleri, düşük maliyet, kolay üretim ve kompakt boyut gibi birçok avantaja sahip olan, evsel, ticari ve endüstriyel uygulamalar için baskın katı hal gaz algılama cihazlarıdır. Bununla birlikte, bu tür sensörlerin performansı, algılama malzemelerinin morfolojisi ve yapısından önemli ölçüde etkilenmektedir. Hassasiyet, seçicilik, tepki hızı vb. gibi özelliklerini geliştirmek için çok sayıda metal oksit nanoyapısı geliştirilmiştir. Metal oksidin partikül boyutu, uzay yükü tabakasının iki katı kalınlığına yakın veya daha az olduğunda, sensörün hassasiyeti dikkate değer bir şekilde artacaktır, ki bu 'küçük boyutlu etki' olarak adlandırılacaktır. Ancak küçük boyutlu nanoparçacıklar gaz difüzyonu için dezavantaj olan film kaplama işlemi sırasında kompakt bir şekilde sinterlenecektir. Bunların doğrultusunda, gözenekli nanotüplerin, gözenekli nanosferlerin ve benzeri gibi birçok şekildeki nanoyapıların, sadece büyük yüzey alanına sahip ve nispeten kütle reaktif bölgeleri olmayan, ayrıca nispeten gevşek bir film oluşturduğu incelenmiştir.

Hun Kim vd. (2018), Au-fonksiyonelize ağ bağlantılı $\text{SnO}_2\text{-ZnO}$ çekirdek kabuk nanotellerine dayanan, kendinden ısıtılmalı bir CO gaz sensörünü rapor etmişlerdir. Uygulanan voltajın artırılması, özellikle sensör içindeki kendi kendine ısınma etkisinden dolayı algılama tepkisini artırmıştır ve sensörler harici ısıtıcıya ihtiyaç duyulmadan iyi bir performans sergilemişlerdir. 3 ve 20 V' daki güç tüketiminin 11,3 nW ve 8,3 μW olduğu tahmin edilmiştir. 80 nm optimum ZnO kabuk kalınlığına sahip bir sensörde, 50 ppm CO gazı için tepkiler 3 ve 20 V' da 1,17 ve 1,62 olduğu gözlenmiştir. Ayrıca ZnO-ZnO homojeksiyonlarının, sensörün kendi ısınmasındaki önemi, sensör tepkisinde bir artışa neden olan ZnO kabuk kalınlığının artırılmasıyla açıklanmıştır. Ayrıca optimize edilmiş sensör CO gazına karşı mükemmel bir seçicilik sergilemiştir. Au' nun katalitik etkisi ve optimize edilmiş ZnO kabuğu, düşük güç tüketimi ile CO gazına karşı seçiciliğe katkıda bulunmuştur. Düşük güç tüketimi, kablosuz sensörler ve sensör dizileri için temel bir gereksinim olduğu için, çok düşük güç tüketimi olan bu sensör bu tür uygulamalar için umut verici bir seçim olarak belirlenmiştir.

Zhou vd. (2017), Ni ve Zn katkılı SnO_2 nanomalzeme tabanlı son derece hassas karbonmonoksit (CO) gaz sensörünü incelemişlerdir. Burada Ni ve Zn katkılı SnO_2 , nanomalzemeler yani nanopartiküller ve nanosheetlerin sentezi için tek aşamalı bir

hidrotermal yöntem kullanılmıştır. Sentezlenen saf katkılı SnO₂ nanomalzemeler XRD, SEM ve XPS ile analiz edilmiştir. XRD analizinden gelen kırınım düzlemleri katkılı SnO₂'nin tetragonal rutil fazda kristalleştiği gözlenmiştir. Katkılı SnO₂ nanomalzemeleri için kırılma açıları saf SnO₂ ile karşılaştırıldığında hafif bir kayma, Sn⁴⁺ ün Ni²⁺ ve Zn²⁺ iyonları ile değiştirildiğini onaylamaktadır. SEM analizi, SnO₂ ve Ni katkılı SnO₂'nin nanoparçacık şekilli morfolojileresahipolduğunu ortaya çıkarırken, Zn katkılı SnO₂'nin tabaka benzeri yapılar sergilediğini ortaya koymuştur. Saf SnO₂, Ni ve Zn katkılı SnO₂ nanomalzemelerin bileşimleri SnO₂ nanomalzemelerin saflığını ve katkısını doğrulayan XPS çalışmaları ile tespit edilmiştir. Ayrıca sentezlenen Ni ve Zn katkılı SnO₂ nanomalzemelerin gaz sensörü uygulamaları, farklı çalışma sıcaklıklarında ve CO gazının konsantrasyonlarında değerlendirilmiştir. Saf SnO₂ ve katkılı SnO₂ nanomalzemelerine dayalı gaz sensörleri için optimize edilmiş sıcaklık sırasıyla 310 °C ve 280 °C olarak belirlenmiştir. 50µL/L'lik çok düşük bir konsantrasyon için, Ni ve Zn katkılı SnO₂ gaz sensörleri, 280 °C' de sırasıyla 7,28 ve 5,90 değerinde gaz tepkisi göstermişlerdir. Böylece yanıt ve geri dönüş süreleri Zn katkılı SnO₂ gaz sensörününkilerle karşılaştırılabilir olsa da Ni katkılı SnO₂ nanoparçacık bazlı gaz sensörü, saf SnO₂ esaslı gaz sensörlerine göre daha iyi gaz tepkisi göstermiştir.

Hou vd. (2018), metaloksit nanomalzemeler yüksek performanslı gaz sensörü uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Metal oksit yarıiletkenler için yüksek yüzey-hacim oranı ve maruz kalan kristal yüzeyler gaz algılama performanslarının belirlenmesindeki iki önemli faktördür. Bu çalışmada yüzey yapısının gaz algılama özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için iki tür bakır oksit (CuO) nanoyapısı, (111)'in açık yüzey düzlemine sahip CuO nanotüpler (CuO NT'ler) ve (110)'in açık yüzey düzlemine sahip CuO nanotüplerden (CuO NC'ler) sırasıyla Cu nanoteller (Cu NW'ler) ve Cu₂O nanoküplerden (Cu₂O NC'ler) elde edilmiştir. Morfolojileri, kristal ve yüzey yapıları HRTEM, XRD ve XPS ile analiz edilmiştir. Daha sonra CuO NT'lerin ve CuO NC'lerin gaz algılama performansları incelenmiştir. Sonuçlar göre CuO NC'lere kıyasla CuO NT'ler düşük optimum çalışma sıcaklığında CO gazını algılamak için daha yüksek hassasiyet göstermiştir. 175 °C çalışma sıcaklığında hazırlanan CuO NT'ler, CO gazına karşı yüksek hassasiyet, iyi seçicilik, hızlı tepki iyi bir geri dönüş süresi sergilemişlerdir. Bu çalışma aynı yarıiletken algılama malzemesi için yüzey kristal yapısının algılama performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir.

Murat Kabakçı (2003), sol-jel metoduyla hazırlanmış SnO_2 ince filmlerin karbonmonoksit (CO) gazına karşı hassasiyetleri, ve tepki süreleri iyileştirilmiştir. İnce filmler saf SnO_2 ve SnO_2 ' ye çinko (Zn) katkılanarak üretilmiştir. Döndürmeli kaplama sistemi ile 0,1 M ve 0,3 M saf SnO_2 ve %10 Zn katkılı 0,1 M SnO_2 karışımlarından üretilen ince filmlerin hassasiyet ve tepki sürelerinin belirlenmesi için oda sıcaklığında ölçümler yapılmıştır. Hazırlanan ince filmlerin tamamının ortamdaki CO gazını algıladıkları belirlenmiştir. Yapılan literatür çalışmalarında SnO_2 malzemelerin CO gazını algılaması için uygun çalışma sıcaklığı 400K – 450K aralığı olarak belirtilmesine rağmen, yapılan bu çalışmada SnO_2 malzemelerinin 300K' de ortamdaki karbonmonoksit gazını tespit edebildiği ortaya konulmuştur. Bundan başka, hazırlanan ince filmlerin yüksek CO gaz miktarı bulunan ortamlarda uzun süreler tutulmasının, ince filmlerin algılama mekanizmasına zarar verdiği tespit edilmiştir. İnce film üretiminde kullanılan çözeltinin molaritesi değiştirilerek molaritenin hassasiyet ve tepki süresi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Molaritenin sensörün hassasiyet ve tepki süresi üzerinde olumlu bir etkisi gözlemlenememiştir. Yapılan ölçümler sonucunda üretilen ince filmlerin karbonmonoksit gazına karşı sensör özelliklerinin olduğu, hazırlanan ince film ve eklem yapının CO gaz sensörü olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Sadullah Öztürk (2009), yüksek saflıktaki alüminyum malzemeye, ikili anodizasyon işlemi uygulayarak kontrollü bir şekilde yaklaşık 75nm çaplarında ve 10µm boylarında Anodik Alüminyum Oksit (AAO) nanokalıplar hazırlanmıştır. AAO nanokalıplara, katodik olarak indüklenmiş sol-jel yöntemiyle oda sıcaklığında ve 65°C sıcaklıkta ZnO ve Pd katkılı ZnO elektrodpozisyonu yapılmıştır. SEM ve EDAX analizleri yapılarak metal altlık üzerinde yüzeyde serbest duran, yaklaşık 70 nm çaplarında ve 10µm boylarında ZnO ve Pd katkılı ZnO nanotel dizilerinin elde edildiği gözlenmiştir. ZnO ve Pd katkılı ZnO nanotel dizilerinin gaz algılama özelliklerini incelemek amacıyla, azot dioksit ve etanol buharı ve mutlak nemi algılaması kontrollü gaz akış ünitesi kullanılarak farklı sıcaklıklarda farklı gaz konsantrasyonları için test edilmiştir. ZnO ve Pd katkılı ZnO nanotel dizilerinin bu gazlara kısa sürede duyarlık gösterdiği tespit edilmiştir.

Raj vd. (2009), gaz sensörleri için kendinden toplanmalı V_2O_5 nanorodları incelemiştir. Kendinden toplanmalı nano çubuklardan oluşan içi boş vanadyum pentaoksit küreleri solvotermal yöntemle başarılı bir şekilde hazırlanmıştır. Kalsine

edilmiş V_2O_5 nanorodların örnekleri, XRD analizi ile incelendiğinde ortombomik yapı sergilediği belirlenmiştir. Nano çubukların, SEM görüntülerinde açıkça görülebilen içi boş küre benzeri yapılara kendiliğinden toplandığı görülmüştür. İçi boş kürelerin çapı 2-3 μm civarındayken mikro küreleri oluşturan nanorodların çapı 100-200 μm arasında ve yüzlerce metre uzunluğundadır. V_2O_5 nanorod algılama elemanının test gazı konsantrasyonuna göre direncindeki değişiklik, her konsantrasyondaki direnci çeşitli zaman aralıkları için not ederek ölçülmüştür. Farklı etanol ve amonyak konsantrasyonu ile malzemenin hassasiyeti doğrusal olarak artmıştır. V_2O_5 nanorodların, etanol için amonyakla karşılaştırıldığında daha duyarlı bir cevabı olduğu açıkça görülmüştür.

Fevzi Sümer (2011), kaliksaren molekülleri ile modifiye edilmiş karbon nanotüp yapılarının karbonmonoksit gazına olan hassasiyeti ve seçiciliği kuartz kristal mikrobalsans metodu ile incelenmiştir. Kuartz kristal mikrobalsans metodunun kullanıldığı bu çalışmada bilgisayar kontrollü gaz akış ve gaz karışım sistemi ile nanogram mertebesinde kaliksarenlerin ve modifiye edilen karbon nanotüp yapılarının CO gazını tutma özelliklerinin incelendiği bir deney sistemi tasarlanmıştır. AT-kesim QCM altınelektrotlar, kaliksarenler ile modifiye edilmiş karbon nanotüpler ile damlatma metodu kullanılarak kaplanmıştır. Hazırlanan kaliksaren-karbon nanotüp ince filmleri değişken CO konsantrasyon oranlarına maruz bırakılarak hassasiyetleri, tekrarlanabilirliği ve algılama performansları ölçülmüştür. Ayrıca yapılar sensörün seçicilik özellikleri hakkında bilgi sahibi olmak için, CO gazının yanında karbondioksit (CO_2), oksijen (O_2) ve kuru hava gibi diğer gazlara olan tepkileri de incelenmiştir. Oluşturulan ince filmlerin SEM görüntüleri alınarak yüzey morfolojileri belirlenmiştir. Bu sayede daha homojen ve uniform bir film elde etmek mümkün olmuştur. Literatürde ilk olarak bu çalışmada karbon nanotüplerin farklı fonksiyonel gruplara sahip kaliksaren molekülleri ile modifiye edilmesi ve CO gazına karşı hassasiyetlerinin QCM metodu kullanılarak belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu anlamda ilerideki gaz sensörü çalışmalara temel teşkil etmesi bakımından çok önemlidir.

Handan Aydın (2013), katkısız ve Al, Cu ve Sn ile % 0,1, %0,5, %1, %2, %5 atomik oranlarda katkılандırılmış ZnO filmleri sol-jel metodu ile hazırlanmıştır. Filmler döndürme kaplama metodu kullanılarak büyütülmüştür. Filmlerin optik band aralıkları optik absorpsiyon metodu ile belirlenmiştir ve 3,024 eV-3,297 eV aralığında bulunmuştur. Amonyak gaz sensörleri katkısız ve metal katkılандırılmış ZnO filmler

kullanılarak hazırlanmıştır. Üretilen sensörlerin algılama özellikleri ZnO'e Al, Cu ve Sn katkılarlarına bağlı olarak incelenmiştir. Sensör algılama özellikleri kullanılan katkı metaline bağlı olarak değişmiştir. Sonuç olarak, yapılan çalışmadan elde edilen ölçüm sonuçları incelendiğinde hazırlanan ZnO filmlerinin kısa cevap süresi, iyi bir geri dönüşüm, kararlı yapı, iyi bir seviyede duyarlılık ayrıca ucuz ve kolay kaplanabilir özelliklere sahip olduğu söylenebilir. Yani katkısız, Al, Cu ve Sn katkılı ZnO ince filmleri ideal bir sensörün sahip olması gereken özellikleri taşıdıklarından dolayı, yüksek miktardaki amonyak gazlarının tespitinde kullanılabilirliğini göstermiştir. Elde edilen gaz ölçüm sonuçları hazırlanan gaz sensörlerinin amonyak gazının belirlenmesinde kullanılabileceğini göstermiştir.

Irmak Karaduman (2013), Hummers metoduyla iki farklı grafen numune üretilmiştir. Öncelikle grafen numunelerinin sıcaklığa bağlı elektriksel karakterizasyonu yapılmıştır. Van der Pauw tekniği kullanılarak, 10 K adımlarla 30-300 K arasında 0,4 T magnetik alan altında Hall etkisi ölçümleri alınmıştır. Numunelerin sıcaklığa bağlı öz direnç, taşıyıcı yoğunluğu ve Hall mobiliteleri incelenmiştir. Öz dirençlerin sıcaklık arttıkça azaldığı, taşıyıcı yoğunlukları ve mobilitelerin ise sıcaklıktan hemen hemen bağımsız olduğu gözlenmiştir. Üretilen numunelerin karbon oksit gazlarına (karbonmonoksit-karbondioksit) karşı duyarlılıkları incelenmiştir. Grafen numunelerinin farklı sıcaklıklarda (300 K-320 K-350 K) ve farklı gaz konsantrasyonlarında (1000 ppm-500 ppm-250 ppm-125 ppm-50 ppm) zamana bağlı olarak elektriksel karakterizasyonu yapılmıştır. Numunelerin CO ve CO₂ gazlarına karşı duyarlılık gösterdiği tespit edilmiştir. Grafen numunelerin direncinde karbondioksitte azalma görülürken karbonmonoksitte artış görülmüştür.

M. Cihan Çakır (2014), sıçratma metodu ile ZnO ve SnO₂ metal oksit incefilmler elde edilmiştir. Amonyak ve metan gazlarının 500 ppm, 1000 ppm ve 2000 ppm konsantrasyonları için SnO₂ sensörlerin duyarlılıkları farklı çalışma sıcaklıklarında ölçülmüştür. Gaz konsantrasyonu ile sensör duyarlılıklarında artış gözlenmiştir. Sıcaklığa bağlı gaz ölçümlerinden, metan ve amonyak gazları için farklı duyarlılıklar gösterdiği belirlenmiştir. Etanol, aseton, ve izopropanol gazlarının bilinmeyen yüksek derişimleri için ZnO sensörün duyarlılıkları ölçülmüştür. ZnO sensörün bu gazlara karşı tepki verdiği ve bu sonuçların literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Buse Cömert (2015), RF saçtırma metodu ile TiO_2 ince filmlerin büyütülmüş ve bu yapılardan gaz sensörü geliştirilmiştir. Altlıkların döndürülmesi, altlık-hedef mesafesinin ayarlanması ve altlığa göre farklı açılarda hedef yönelimi ve RF gücü ile optimize edilerek RF saçtırma metoduyla nano parçacık boyutlarına sahip TiO_2 ince filmleri homojen olarak Si ve cam taban malzemeler üzerine büyütülmüştür. 100 °C sıcaklığında büyütülen ve 170 nm kalınlığı sahip ince filmler, 100 °C artışla 500-1000 °C aralığında hava ortamında 1 saat sürece tavlannmıştır. Üretilen filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri çeşitli analitik teknikler kullanılarak belirlenmiştir. TiO_2 ince film gaz sensörü, fotolitografik teknikle üretilmiştir. 3 mm x 3 mm boyutunda Si altlığın arka yüzeyine Pt hedef kullanılarak RF saçtırma metoduyla 1000 nm kalınlığında ısıtıcı fabrikasyonu gerçekleştirilmiştir. Ön yüzeyine ise 500 nm kalınlığında ve 50 μm çizgi genişliğine sahip inter dijital elektrotlar oluşturulmuştur. Elektrotlar üzerine 170 nm kalınlığında TiO_2 filmi büyütülerek sensör üretimi gerçekleştirilmiştir. Farklı sıcaklıklarda metan gazına maruz bırakılan sensörün duyarlılığı I-V ölçümleri ile belirlenmiştir. Genel olarak 200-500 °C arasındaki sıcaklıklarda duyarlılık gösteren gaz sensörlerinin düşük sıcaklıklarda algılamaya sahip olması önemlidir. TiO_2 ince film gaz sensörü 50°C sensör sıcaklığında metan gazına duyarlılık gösterdiği gözlenmiş ve sıcaklığa göre algılama performansının arttığı belirlenmiştir.

Hakan Sürel (2017), SILAR metodu ile cam altlıklar üzerine Ni katkılı $\text{Zn}_{1-x}\text{Ni}_x\text{O}$ ($x=0,05-0,1-0,15-0,2$) filmler azotmonoksit gazını algılamak için büyütülmüştür. Büyütülen ince filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri XRD, SEM ve optik soğurma ölçümleri ile incelenmiştir. XRD desenlerinden, filmlerin kristal yapıda olduğu belirlenmiştir. SEM görüntülerinden nikel konsantrasyonuna bağlı olarak filmlerin morfolojik özelliklerinin değiştiği gözlenmiştir. Ni katkılama arttıkça filmlerin yasak enerji aralığında artış olduğu belirlenmiştir. Ni katkılı ZnO ince film sensörlerinin çalışma sıcaklığının belirlenmesi için gaz algılama ölçümleri 30-135 °C sıcaklık aralığında yapılmıştır. 95°C’ de en yüksek duyarlılıklar elde edilmiştir. Tüm sensörler içerisinde $\text{Zn}_{0,90}\text{Ni}_{0,10}\text{O}$ en yüksek duyarlılık göstermiştir.

Karaduman vd. (2017), SILAR metoduyla sentezlenen NiO ince film nano yapıların hidrojen gazını algılama özelliklerini incelemiştir. Nano yapıları NiO ince filmler, kolay, SILAR metodu ile sentezlenmiş ve film kalınlığının hidrojen gazı algılama

özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Numuneler SEM, XRD analizi ve enerji dağıtıcı X-ışını analizi ile analiz edilmiştir. XRD sonuçları, filmlerin polikristal yapıda olduğunu ve artan film kalınlığı ile iyileştiğini ortaya koymuştur. SEM çalışmaları, tüm filmlerin cam taban malzemesi üzerine iyi kaplandığını göstermiştir. Optik absorpsiyon ölçümlerine göre, optik bant aralığı filmin artan kalınlığı ile azalmıştır. Nano yapı NiO ince filmlerin gaz algılama özellikleri çalışma sıcaklığının ve gaz konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak incelenmiştir. Numuneler H₂ gazına yüksek tepki vererek iyi algılama performansı göstermiştir. Maksimum cevap 40 ppm hidrojen gazı konsantrasyonu için 200 °C çalışma sıcaklığında %75 olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar SILAR metoduyla sentezlenen nano yapı NiO ince filmlerin, hidrojen gazını saptamada uygulama potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir.

Galioglu vd. (2018), zeolit A kaplamalı Zn_{1-x}Cu_xO MOS sensörlerin NO gazı için tespitini incelemişlerdir. Bu çalışmada NO gazının tespiti için yeni ve hassas bir gaz algılama materyali bildirilmiştir. Bakır kaplı çinko oksit nano yapıları (Zn_{1-x}Cu_xO, ki burada x=0,25 basamaklı), SILAR metodu kullanılarak yarı iletken bir sensör materyali büyütülmüştür. Nanoyapıların yapısal, morfolojik ve optik özellikleri XRD, SEM ve UV-VIS spektrometre ile incelenmiştir. Sıcaklık ve gaz konsantrasyonlarının bir fonksiyonu olarak NO gazı algılama ölçümleri yapılmıştır. Sensörler 55 °C çalışma sıcaklığında 50 ppb NO gazına karşı kabul edilebilir tepkiler göstermiştir. Sensörler optimize edilmiş ve Zn_{0,75}Cu_{0,25}O sensörü için %8' lik maksimum yanıt elde edilmiştir. Sensörlerin seçiciliğini artırmak için, filtre olarak kullanılan zeolit A (LTA) mikro gözenekli film, ikincil büyüme metodu kullanılarak optimize edilmiş Zn_{0,75}Cu_{0,25}O sensörü ile kaplanmıştır. Zeolit A kaplı Zn_{0,75}Cu_{0,25}O sensörü NO gazına karşı hem yüksek seçicilik hem de yüksek cevap sergilemiştir. Zeolit kaplı Zn_{0,75}Cu_{0,25}O sensörün algılama limiti, 25 °C çalışma sıcaklığında NO gazı için 20 ppb' ye değişmiştir.

Yıldırım vd. (2019), hidrotermal sentez yöntemi ile cam taban malzemeler üzerine V₂O₅ nanoyapılar 180 °C'de 4, 6, 8, 10 saat biriktirme sürelerinde büyütülmüştür. Biriktirme süresinin nanoyapıların yapısal, morfolojik, kimyasal bileşen ve H₂S gazı algılama özellikleri üzerindeki etkisi sırasıyla XRD, SEM, EDAX ve gaz ölçüm sistemi ile incelenmiştir. XRD ve SEM çalışmaları, nanoyapıların monoklinik fazda kristalleştiğini, nanoyapıların yapısal ve morfolojik özelliklerinin büyüme süresine bağlı olduğunu göstermiştir. Sensörlerin gaz algılama ölçümleri sıcaklık ve gaz

konsantrasyonuna göre yapılmıştır. Sensörler, 145 °C çalışma sıcaklığında, 50 ppm H₂S gaz konsantrasyonuna karşı yüksek tepkiler göstermiştir. Ek olarak sensörler 50 °C çalışma sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda kabul edilir tepkiler göstermiştir. 6 saat biriktirme süresi için biriktirilen nanoyapının diğerlerinden daha iyi gaz algılama özelliklerine sahip olduğu görülmüştür.

Soltabayev vd. (2019), SILAR metoduyla sentezlenen Zn_{1-x}Ni_xO ince filmlerin nitrik oksit gazı algılama özelliklerini incelemiştir. Zn_{1-x}Ni_xO ince filmleri (x=0;0,5;0,10;0,15 ve 0,20) SILAR metoduyla sistematik olarak sentezlenmiş ve 300 °C’ de tavlansmıştır. Nikel katkılamanın ve tavlama işleminin Zn_{1-x}Ni_xO ince filmlerin yapısal, morfolojik ve gaz algılama özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Filmlerin karakterizasyonunda XRD, SEM ve optik adsorpsiyon ölçümleri kullanılmıştır. Zn_{1-x}Ni_xO sensörlerin düşük nitrik oksit (NO) gaz konsantrasyonları için gaz algılama özellikleri çalışma sıcaklığının ve nikel konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak incelenmiştir. Gaz algılama sonuçları, katkılama işleminin ZnO sensörlerin tepkisini güçlü bir şekilde etkilediğini göstermiştir. Sensörlerin optimum çalışma sıcaklığı 95 °C olarak bulunmuştur. Tavlansmış Zn_{0,90}Ni_{0,10}O sensörün 25 ppm NO için tepkisi %63 değerinde maksimuma ulaşmıştır. Zn_{0,90}Ni_{0,10}O sensörü diğerlerinden daha yüksek tepki ve daha iyi tepki/geri dönüş süreleri sergilemiştir. Ni katkılama ve tavlama işleminin, ZnO filmlerin mikroyapısını, morfolojisini, bant aralığını değiştirerek sensörlerin gaz algılama özelliklerini geliştirdiği sonucuna varılmıştır.

Soltabayev vd. (2019), %0, %1, %3, %5 ve %7 In katkılı ZnO ince filmler, nitrik oksit (NO) gaz algılama uygulaması için SILAR metodu ile cam taban malzemeler üzerine büyütülmüştür. Filmlerin özellikleri üzerinde In katkısının etkisi XRD, SEM ve EDAX ile incelenmiştir. XRD çalışması, filmlerin polikristal yapısının varlığını açıkça göstermiştir. Morfolojik çalışma filmlerin yüzeyinde granül ve nano-çiçek yapıları gibi düzgün bir parçacık oluşumunu göstermiştir. En önemli morfolojik değişim nano-çiçek yapısına sahip %3 indiyum katkılı ince filmde gözlenmiştir. Farklı sıcaklık ve farklı NO gaz konsantrasyonları için gaz algılama ölçümleri yapılmıştır. Maksimum gaz hassasiyeti %3’ lük bir optimal indiyum doping konsantrasyonunda ortaya çıkmıştır. 167 °C’ de 50 ppm NO gazı için en yüksek hassasiyet değeri 22,4 olarak elde edilmiştir.

Mahajan ve Jagtap (2019), CO gazını algılamak için metal oksit yarıiletkenlerin incelemelerini derlemiştir. Seçicilik, yüksek hassasiyet ve çeşitli toksik gazların hızlı

tespiti için potansiyelleri nedeniyle, metal oksit yarı iletken (MOS) tabanlı gaz sensörlerinin geliştirilmesi, son birkaç on yılda ilgi çekici araştırma olmuştur. Bu toksik gazlardan biri de renksiz, kokusuz ve zehirli karbonmonoksit (CO) gazıdır. Bu derlemede, CO gaz sensörü için farklı MOS tabanlı nanoyapıların gelişimi ile ilgili son yıllardaki gelişmeler özetlenmiştir. Yaygın olarak araştırılan malzeme sınıfları metal oksit yarıiletkenlerdir (özellikle çinko oksit ve kalay oksit) ve itriyumla stabilize edilmiş zirkonyumdur. Son yıllarda kalay oksit, çinko oksit, titanyum oksit, indiyum oksit, tungsten oksit, bakır oksit, bileşik MOS vb. gibi birçok metal oksit yarıiletken, CO gazının algılanması için test edilmiştir. Temel odak noktası, kullanılan farklı malzemeler ve katalizörlerle seçicilik, duyarlılık, tepki ve geri dönüş süresi gibi algılama performansını geliştirmek için çeşitli araştırmacılar tarafından CO gaz sensörünün sentezi için yapılan yeni yaklaşımlardır.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Karbonmonoksit (CO) Gazı

Karbonmonoksit, bir karbon bir de oksijen atomundan oluşan, formülü CO, ağırlığı 28,01 g/mol olan bir moleküldür. Karbonmonoksit gazı yapısında karbon bulunan doğalgaz, gaz yağı, petrol, kömür gibi yakıtların yanması sırasında yanma bölümünde yeterli havanın olmadığı zamanlarda yani tam yanmama sonucunda ortaya çıkan, renksiz, kokusuz, tatsız, oldukça zehirli, ölümcül bir gazdır. Yanma sırasında yakıttaki karbon atomunun tam yanamayıp dolayısıyla tamamen karbondioksit yükseltgenemeyip bir bölümün karbonmonoksit dönüşmesiyle oluşur. Karbonmonoksit gazı suda az çözünür ve bu gazın normal şartlarda yoğunluğu havadan düşüktür. Tespit edilmesi beş duyu organımızla mümkün değildir.

Karbonmonoksit gazının atmosferde ki yoğunluğu ekstra ısınma ihtiyacına bağlı olarak kış aylarında artar. Karbonmonoksit gazı atmosferde bozunmadan yaklaşık 2,5 ay kalabilmektedir. (Strauss, Toros, 2000). Ayrıca şehirlerde bulunan araç yoğunluğu da atmosferdeki karbonmonoksit gazının yoğunluğunu etkileyen sebeplerdendir.

Bir başka başlıca karbonmonoksit kaynağı da içten yanmalı motorlardır. Kurum veya iş şeklinde olanlar gözle görülebilen kısmıdır. Sanayi çalışmaları, az da olsa orman yangınları da karbonmonoksit gazı üreterek kirliliğe yol açan başlıca nedenler arasındadır.

Karbonmonoksit gazı (CO), kanda oksijen atomunu taşıyan hemoglobine oksijenden yaklaşık 240 kat daha fazla reaksiyona girme kabiliyetine sahiptir(Strauss, Toros, 2000; Hübner vd., 2010).Solunan karbonmonoksit gazı, akciğer tarafından kolayca absorbe edilir. Akciğer tarafından absorbe edilen bu karbonmonoksit (CO) gazı kandaki hemoglobinle (Hb) yavaş yavaş tersinir reaksiyona girer. Bu reaksiyon neticesinde kanda karboksihemoglobin oluşur. Karboksihemoglobin kanda oksijen eksilmesine sebebiyet verir ve dolayısıyla kanın oksijen taşıma kapasitesi düşer. Oksijeni azalan kan tüm vücudu dolaştığı için dokularda ve organlarda hasar meydana getirir.

İnsan hayatını tehlikeye düşüren karbonmonoksit miktarı 1200 ppm (%0,12)' dir. Laboratuvar ortamında yapılan deneylerde 50 ppm karbonmonoksit gazına 30 dakika maruz kalan bir kişinin kanında bulunan karboksihemoglobinin miktarının %3 olduğu

görülmüştür. Devam eden deneylerde 1000 ppm (%0,1) karbonmonoksit bulunan ortamdabir kaç saat kalan kişinin kandaki karbosihemoglobin miktarının %50 ve 2100 ppm (%0,21) karbonmonoksit bulunan ortamda 34 dakika kalan bir kişinin kanındaki karbosihemoglobin düzeyinin %25 olduğu görülmüştür. Bu bilgiler bize karbonmonoksit gazını soluma zamanın oldukça önemli olduğunu göstermiştir. Çok yüksek karbonmonoksit içeren ortamlarda çok kısa bir süre bulunmak bile kandaki karbosihemoglobin (COHb) miktarının aşırı derecede artmasına neden olabilir (Ferri vd., 2006; Kabakcı, 2013).

Karbonmonoksitle zehirlenmenin ilk belirtileri grip belirtilerine benzer. Zehirlenen birçok kişi grip olduğunu düşünür. Ayrıca baş ağrısı, baş dönmesi, uyku hali, yorgunluk hissi, nefes darlığı, mide bulantısı şeklinde etkiler de ortaya çıkabilir. Karbonmonoksitin insan sağlığı üzerindeki en olumsuz etkisi; kalp ve beyin gibi organlarımıza oksijenin iletilme kapasitesini azaltmasıdır. Zehirlenmenin sonucu bilinç kaybı, solunum zorluğu ve ölümdür (Kabakcı, 2013).

Normal bir insanda karbosihemoglobin (COHb) düzeyi % 0,5 – 1,5, yenidoğanda % 3 – 7, sigara içenlerde % 4 – 9 civarındadır. Zehirlenmenin başlangıç bulguları % 15 seviyelerindeyken başlar. Toksik (zehirlenme) düzey % 20 – 50 iken öldürücü düzey %50 – 60 üzeridir (Ferri vd., 2006; Kabakcı, 2013).

Kanda COHb oluşması ciddi bir problemdir. Dünya Sağlık Teşkilatı karbonmonoksit sınır değerlerini, belirlenen maruz kalma süreleri içinde kanda oluşan karboksihemoglobin seviyesinin % 2,5'un üzerine çıkmamasını esas alarak belirlemiştir. Türkiye' de bu sınır değerler A.B. standartlarının yaklaşık 3 kat daha fazlasıdır. Bu standartların tekrar gözden geçirilmesi gereklidir (Strauss , Toros, 2000; Hübner vd., 2010).

3.2. Gaz Sensörleri

Sensörler gelişen teknolojiile birlikte hayatımızın önemli bir parçası olmuştur. Kullandığımız otomobiller, trafik ışıkları, alarmlar, çalışma ortamındaki ekipmanlar, ulaşım araçları ve günlük yaşantımızda kullandığımız daha birçok araçta gelişmiş sensörler kullanılmaktadır.

Birçok sensör tanımı olmasına rağmen “Instrument Society of America” tarafından sunulan tanım “Ölçülen sistemlerde kullanılabilir çıkış verisi veren aygıt” şeklindedir. Burada giriş verileri fiziksel miktar, özellik veya durum iken çıkış verileri ise elektriksel veya optik büyüklüklerdir.

Ortamda bulunan gazların konsantrasyonunu ölçmeyi sağlayan ve gaz ortamında çalışan aygıtlara ‘gaz sensörü’ denir. Bir gaz ölçüm cihazının en önemli bölümü sensör birimidir. Tespit edilecek gazın sensör malzemesinin yüzeyine teması ile sensör malzemesinin fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak gaz molekülleriyle etkileşir. Bu etkileşimin sonucu elektriksel veya optik değerlendirme birimine aktarılır. Bu birim fiziksel büyüklükleri optik veya elektriksel büyüklüklere çevirir ve ilgili gazın tespiti sağlanır (Karaduman, 2013).

3.3. Gaz Sensörlerinin Çalışma Prensibi

Gaz ölçüm sisteminde sensör malzemesinin dışındaki bileşenlerinin çalışması sensör malzemesinin verilerine bağlıdır. Ortamdaki gaz sensör malzemesiyle etkileştiğinde malzemenin kimyasal ve fiziksel özelliklerinde değişimler meydana gelir. Gaz sensörlerinin çalışma prensibi bu değişimlerin tespiti ile belirlenir. Gaz sensörleri, sensör malzemesinin elektriksel, optik ve kimyasal özelliklerindeki değişimlere bağlı olarak çalışmaktadırlar.

Sensör malzemesi ortamdaki gazla etkileştiği zaman malzemenin iletkenlik, direnç, empedans gibi elektriksel özelliklerinde değişiklik meydana gelir. Bu tür sensörlere elektriksel özelliklere göre çalışan gaz sensörleri denir.

Sensör malzemesi ortamdaki gazla etkileştiği zaman malzemenin kimyasal özelliklerindeki değişiklik meydana gelir. Bu tür sensörlere kimyasal özelliklere göre çalışan gaz sensörleri denir.

Sensör malzemesi ortamdaki gazla etkileştiği zaman malzemenin optiksel özelliklerinde değişiklik meydana gelir. Bu tür sensörlere optik özelliklere göre çalışan gaz sensörleri denir.

Farklı algılayıcı yüzeylerin kullanılması gaz sensörlerinin algılama duyarlılıklarında değişikliklere neden olur. Gaz sensörleri için, algılayıcı yüzeylerin üretilmesi ve karakterizasyon çalışmaları algılama ölçümlerinin temelini oluşturur. Gaz sensörlerinin seçicilik özellikleri, algılayıcı yüzeydeki reaksiyon kinetiklerine, yüzeydeki yük hareketliliğine, gaz adsorpsiyon ve desorpsiyon mekanizmaları gibi çeşitli parametrelere bağlıdır.

Sıcaklık ve kontak konfigürasyonunu gibi faktörler sensörlerin çalışmasına etki etmektedir. Sıcaklık faktörü, adsorpsiyonu hızını, algılayıcı yüzey içeriğini, kimyasal ayrışmayı ve diğer reaksiyonları etkiler. Eğer sıcaklık çok düşükse, oksijen iyonları ile gaz molekülleri arasında oluşan reaksiyonlar çok yavaş olur ve sensör yeterli algılama yapamaz. Eğer sıcaklık çok yüksek ise oksijen iyonları ile gaz molekülleri arasında oluşan reaksiyon çok hızlı bir şekilde gerçekleşebilir. Böylece, gaz moleküllerinin kazandığı yüksek kinetik enerjilerinden dolayı algılayıcı yüzeye gaz moleküllerinin difüzyonu yeterli miktarda olamaz (Çorlu, 2017).

Kontak, iki maddenin düşük dirençle temas ettirilmesidir. İdealde bu kontak direnci sıfır olmalıdır. Schottky kontaklar ve interdigital kontaklar gaz sensör üretiminde yaygın olarak kullanılan kontaklardır. Fakat, interdigital kontaklarda algılama yüzeyi büyük olduğundan dolayı duyarlılık daha yüksektir (Öztürk vd., 2014).

3.3.1. Adsorpsiyon ve desorpsiyon

Adsorpsiyon, sıvı veya gaz halde bulunan bir maddenin, katı bir adsorbent yüzeyine tutunması olayına denir. Yüzeyinde adsorpsiyon gerçekleşen maddeye adsorbent veya tutan madde, yüzeye tutunan maddelere ise adsorban denir. Katı yüzeyine tutunan maddelerin yüzeyden ayrılması olayına ise desorpsiyon denir. Adsorpsiyon sırasında ara yüzey olarak kullanılan algılayıcı malzeme yüzeyinde adsorplanan madde gaz halinde ise basınç, sıvı halinde ise konsantrasyon değişir. Adsorpsiyon işleminin kimyasal ve fiziksel olmak üzere iki çeşidi mevcuttur.

Fiziksel adsorpsiyon, bir yüzeydeki dengelenmemiş zayıf Van der Waals kuvvetleri ile meydana gelir. Bu olayda adsorbanları adsorbentlere bağlı tutan kuvvetler zayıf Van der Waals kuvvetleri ve Coulomb etkileşimleridir. Düşük sıcaklıklarda gerçekleşir. Dolayısıyla küçük enerjili bir süreçtir (5-12 kcal/mol, 0,217-0,521 eV) (Aydın,

2013).Az seçimseldir ve katının bütün yüzeyini ilgilendirir. Sıcaklık ile azalır, oda sıcaklığında tersinirdir yani dönüşümlüdür. Yüzey ve adsorplanan maddenin polar olduğu durumda gerçekleşen fiziksel adsorpsiyon, pozitif ve negatif yükler arasındaki elektriksel çekim kuvvetlerinden kaynaklanır. Polar olmayan durumda ise aralarındaki çekim kuvveti oldukça karmaşıktır. Pozitif ve negatif polar olmayan yüklerin sürekli değişmekte olması polar olmayan fiziksel adsorpsiyon gerçekleşmesine neden olmaktadır (Şennik, 2009).

Kimyasal adsorpsiyon, adsorban ve adsorbent arasındaki kimyasal bağların oluşumunu içerir. Fiziksel adsorpsiyona göre çok daha güçlüdür. Kimyasal bağ oluşumu algılayıcısı malzemenin özelliğini bozar. Tersinemezdir (dönüşümsüzdür). Yüksek enerjilidir. Genelde 10 kcal/mol daha fazla enerjilerle, elektron yoğunluğunun yeniden dağılımıyla ve 25-100 kcal/mol (1,086-4,346 eV) ve daha büyük enerjili kimyasal bağların oluşumuyla karakterize edilebilirler (Aydın,2013). Yani yüzeyden adsorplanan moleküllerin uzaklaştırılması zordur. Katının tüm yüzeyinde değil belirli merkezlerde kendini gösterir. Bu merkezlere aktif merkez denir. Kimyasal adsorpsiyonda tayin edilecek gaz molekülleri arasındaki kimyasal bağlar bozularak ara yüzey olarak kullanılan algılayıcı madde ile reaksiyona girebilir ve yeni bağlar oluşabilir. Bu durumda da ara yüzey olarak kullanılan algılayıcı madde özelliğini kaybedebilir (Aydın, 2013). Sıcaklıkla artar ve yüksek sıcaklıkta gerçekleşen kimyasal adsorpsiyon ile düşük sıcaklıkta gerçekleşen kimyasal adsorpsiyon arasında farklar vardır. Aktive edilmiş kimyasal adsorpsiyon yüksek sıcaklık adsorpsiyonu, Van der Waals adsorpsiyonu ise düşük sıcaklık adsorpsiyonu olarak tanımlanır (Şennik, 2009).

Özetleyecek olursak, fiziksel adsorpsiyonda adsorpsiyon sıcaklığı düşük, kimyasal adsorpsiyonda ise yüksektir. Fiziksel adsorpsiyonda adsorplanan moleküller yüzeyden kolayca uzaklaştırılabilirken, kimyasal adsorpsiyonda ise bu durum zordur. Uygun sıcaklık ve basınç altında fiziksel adsorpsiyonda adsorplanan moleküllerin çapının birkaç katı büyüklüğünde bir adsorplanmış tabaka oluşurken, kimyasal adsorpsiyonda ise oluşan tabaka monomoleküler yapıda olur (Aydın, 2013).

3.3.2. Gaz algılama mekanizması

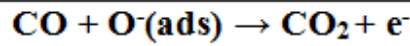
Bir sensörün gaz algılama mekanizmasında iki ana reaksiyon gerçekleşir. Algılayıcı oksit yüzeyi, havadaki oksijeni kimyasal olarak O_2^- (moleküler), O^- (atomik) ve OH^-

(hidroksil) olarak adsorbe etmesi ile ilk reaksiyon meydana gelir. İletkenlik bandındaki elektronlar algılayıcı oksit yüzey tarafından adsorbe edilmiş oksijenlere doğru transfer olurlar. Bu transfer sonucunda, oksijen atomu yüzeye tutunur. Böylece uzay yük bölgesi (bir azalma bölgesi) oluşur (Wang vd., 2010; Korotcenkov vd., 2007; Sürel, 2017). İkinci reaksiyon ise kirletici gaz molekülleri ile adsorbe olmuş oksijen atomları arasında gerçekleşir. Yükseltgeyici bir gaza algılayıcı oksit yüzeyimaruz kaldığında, bu gazlar ile O⁻iyonları reaksiyona girer. O⁻iyonları yardımıyla yüzeyden elektron koparan yükseltgeyici gaz molekülleri, yüzeydeki elektron konsantrasyonunu azaltır. Azalan konsantrasyon dirençte artış meydana getirir. İndirgeyici bir gaza algılayıcı oksit yüzeyimaruz kaldığında ise yine O⁻ ile reaksiyona giren bu gazlar iletkenlik bandına elektronları geri gönderir. Bunun sonucunda yüzeydeki elektron konsantrasyonu artar. Artan konsantrasyon dirençte azalış meydana getirir. (Karaduman, 2017)

CO, NO, SO₂, CH₄, OH vb. gazlar indirgeyici gazlara, CO₂, NO₂, O₃ (ozon) vb. gazlar yükseltgeyici gazlara örnek olarak verilebilir.

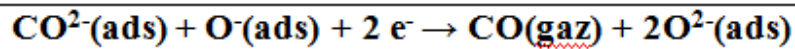
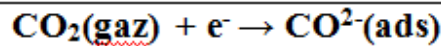
İNDİRGEYİCİ GAZLAR

- CO
- NO
- SO₂ vb.



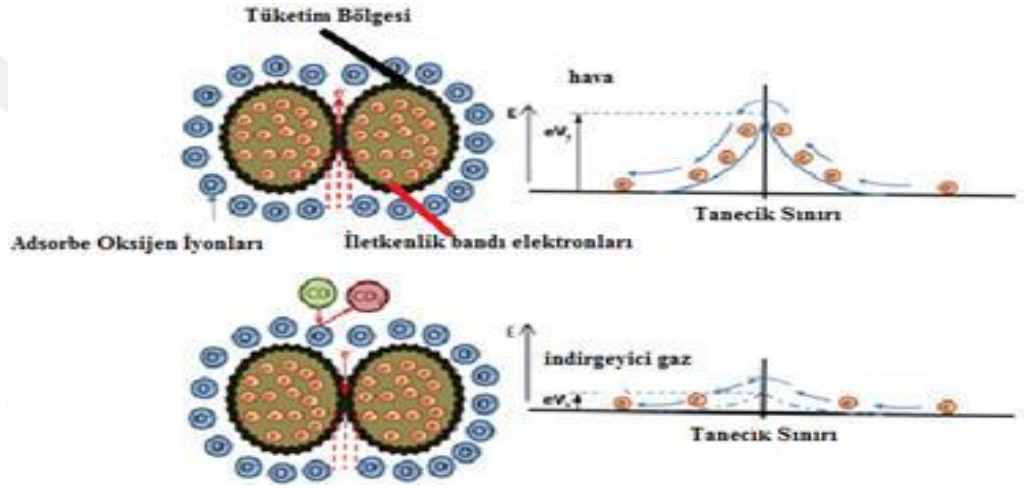
YÜKSELTGEYİCİ GAZLAR

- CO₂
- NO₂
- OZON vb.



Şekil 3.1.İndirgeyici ve yükseltgeyici gaz reaksiyonları

n-tipi yarıiletken oksit malzeme kullanılarak yapılmış gaz sensörlerinde, oksit yüzeyin NO_2 gibi yükseltgeyici gazlarla reaksiyonu sonucunda direnç değerindeki değişim artış yönünde olurken, CO gibi indirgeyici gazlarla reaksiyonu sonucunda direncindeki değişim azalış yönünde olmuştur. p-tipi yarıiletken oksit malzeme kullanılarak yapılan gaz sensörlerinde ise bu olaya benzer fakat tam tersi özellik gözlenmiştir (Li vd., 2015). Şekil 3.2’ de gaz sensörünün etkileştiği hedef gazın özelliğine bağlı olarak bariyer yüksekliğinde meydana gelen değişim gösterilmiştir. Yüzey CO gibi indirgeyici bir gaz ile karşılaştığı zaman bariyer yüksekliği azalmıştır akım artmıştır (Nause, 1999; Li vd., 2015).



Şekil 3.2. İndirgeyici gaz varlığındaki potansiyel bariyerdeki değişim (Li vd., 2015).

NO_2 gibi yükseltgeyici bir gazla karşılaşacak olsaydı bariyer yüksekliği artacak böylece akım azalacaktı. (Nause, 1999; Li vd., 2015).

Bir sensörün algılama performansına algılama mekanizması, dönüştürme mekanizması ve yararlılık olmak üzere 3 faktör etki eder (Günkaya, 2008; Korotcenkov, 2008).

Algılama Mekanizması (yüzey özellikleri): Redoks özellikleri, asit-baz özellikleri ve karakteristik gaz algılamasına bağlıdır. Hedef gazın yüzeydeki oksit tabaka ile girdiği kimyasal reaksiyona bağlıdır (Günkaya, 2008; Korotcenkov, 2008).

Dönüştürme Mekanizması (tanecikler arası özellikler): Kimyasal reaksiyon sonucunda meydana gelen değişimi elektriksel sinyale çevirir. Tanecik büyüklüğü, katkılama ve yüklerin mobilitesi bu mekanizmaya etki eder (Günkaya, 2008).

Yararlılık (yüzey ve difüzyon reaksiyonları arasındaki kinetik faktör): Doğru bir ölçüm için kinetik enerjinin etkisi dikkate alınmalıdır. Bu faktör hedef gazın yüzeyin içine nüfus etmesiyle ilgilidir ve materyalin katkılanması, hedef gazın konsantrasyonu, film kalınlığı, bariyer yüksekliği, algılama mekanizmasındaki deliklerin boyutları ve difüzyon derinliğine bağlıdır. Reaksiyon oranı ile difüzyon oranı karşılaştırılır. Reaksiyon oranı difüzyon oranından büyükse hedef gaz yüzey içine nüfus edemez ve sensörün gaza yanıt verme oranı düşer (Günkaya, 2008; Korotcenkov, 2008).

3.4. Gaz Sensörlerinin Karakteristikleri

Sensörler, üretimlerine ve çalışma prensiplerine göre bazı parametrelere sahip olmalıdırlar. Bu parametrelerin önemlileri aşağıda verilmiştir:

Duyarlılık-Tepkisellik:Farklı konsantrasyonlara sahip bir tür analite sensör maruz kaldığında ölçülen sensör sinyalindeki değişimdir.Duyarlılık yüzeydeki reaksiyon kinetikleri, algılayıcı yüzey ile gaz molekülleri arasındaki etkileşimler, iletim bandındaki elektronların lokasyonları veya kinetiği gibi parametrelere bağlıdır.

Seçicilik:Bir analit veya bir grup analit için sensörün tepki verebilme kabiliyetidir.

Stabilite:Belirli bir süre için sensörün tekrar edilebilir sonuç verebilme yeteneğidir.

Deteksiyon Limiti:Belirli koşullar altında sensörün tepki verebildiği minimum analit konsantrasyonunun bir ölçüsüdür.

Dinamik deteksiyon aralığı:Ölçebildiği maksimum konsantrasyon ile deteksiyon limit değeri arasındaki analit yoğunluğunun ölçüsüdür.

Çözünürlük: Sensör tarafından algılanabilen en düşük konsantrasyon değişiminin ölçüsüdür.

Tepki Süresi:Analitin sıfır konsantrasyonu referans alınarak sensörün analitin herhangi bir konsantrasyonuna karşı verdiği yanıt süresidir.

Geri dönüş süresi:Sensörün analitin herhangi bir konsantrasyonunda verdiği sinyal süresi ile analit konsantrasyonunun sıfır değerine düşmesi durumunda sensörün de başlangıçtaki sıfır konsantrasyon için verdiği sinyali süresi arasındaki farktır.

Çalışma sıcaklığı:Sensörün, analite karşı en yüksek duyarlılık gösterdiği sıcaklıktır.

Ömür: Sensörün analite karşı çalışabileceği zaman dilimidir.

3.5. Gaz Sensörlerinin Uygulama Alanları

İdeal bir sensörün sahip olduğu özellikleri aynı anda tek bir sensörde toplamak uygulamada mümkün değildir. Ayrıca uygulamada ideal bir sensörün sahip olduğu tüm özelliklerin bir arada olmasına gerek de duyulmamaktadır. Genellikle sensörün sahip olacağı özellikler uygulama alanına ve şartlarına göre seçilir ve bu özelliklerin iyileştirilmesi yönünde çalışmalar yürütülür. Örneğin endüstri alanında çalışacak bir gaz sensöründe tepki süresinin saniyeler mertebesinde çok kısa olması beklenirken, hassasiyetinin milyarda bir (ppb) seviyelerine sahip olmasına ihtiyaç yoktur. Çevre uygulamalarında çalışacak gaz sensörlerinde analitler için deteksiyon limitinin düşük olması beklenirken, bu uygulamalarda analit konsantrasyon değişimi uzun sürdüğü için düşük tepki süresine sahip olmalarına ihtiyaç yoktur (Bochenkov ve Sergeev, 2010).Gaz sensörleri yangın ve güvenlik alarm sistemlerinde; yaşam alanlarımızdaki patlayıcı, yanıcı ve zehirli gazların tespitinde; anestezi ve klinik teşhis gibi tıbbi uygulamalarda; hava kirliliği tespiti ve raporlamada; fabrika, maden ocakları ve rafinerilerde işlem kontrolünde ve çalışma alanları güvenliğinde; askeri alanda kimyasal ve zararlı gazlardan korunmak amacıyla; kimyasal ve biyokimyasal analizlerde kullanılırlar (Açıkbaş, 2006).

3.6. Gaz Ölçüm Sistemleri

Bir gaz ölçüm sistemi; gaz sensörü, elektronik kontrol panosu, uyarı düzeneği ve otomatik gaz kesme vanasından oluşmaktadır.

Gaz sensör birimi (Algılayıcı):Gaz kaçağının meydana gelebileceği bölgeye yerleştirilerek kaçak halinde gaz sensöründeki elektriksel, optik, yapısal gibi fiziksel ya da kimyasal değişimlerin elektronik değerlendirme birimi tarafından algılanmasını sağlamaktadır. Burada önemli olan sensörün tespit edilmesi gereken gazla etkileşebilmesidir.

Elektronik kontrol birimi:Gaz sensöründen gelen bilgiyi uyarı sistemine ileten birimdir ve otomatik gaz kesme işlemini yapar. Alarm cihazlarının fonksiyonlu olan tiplerinde,

harici sesli uyarı sistemi ve otomatik gaz kesme için kontak röle çıkışları bulunmaktadır.

Uyarı birimi (sesli/ışıklı):Uyarı devresi sesli, ışıklı ya da her ikisinin de mevcut olduğu bir sistemdir. Genellikle ikili sistem tercih edilir ki, herhangi bir uyarı elemanındaki hata da diğeri devreye girebilmektedir.

Otomatik gaz kesme vanası:Sıvı ve gazların akışını kontrol için kullanılan, genellikle solenoid olarak adlandırılan elektromekanik gaz kesme vanalarıdır.

3.7. Gaz Sensörlerinin Çalışmasına Etki Eden Faktörler

3.7.1. Sıcaklık

Sıcaklığa bağlı olarak sensörlerin çalışması değişiklik göstermektedir. Sıcaklığın çok düşük olması durumunda oksijen iyonları ile gaz molekülleri arasındaki etkileşim çok yavaş gerçekleşir. Algılama yeterli miktarda gerçekleşemez. Sıcaklığın çok yüksek olması durumunda ise oksijen iyonları ile gaz molekülleri arasındaki etkileşim çok hızlı gerçekleşir. Sıcaklığın yüksek ve etkileşmenin hızlı olması nedeniyle gaz moleküllerinin algılayıcı numune yüzeyine difüzyonu yeterli miktarda olmaz. Algılamada ve hassasiyette azalma gözlenir. Bu nedenle gaz sensörlerinde çalışma sıcaklığı önemli bir parametre olup, bu sensörler için en uygun çalışma sıcaklığı seçilmelidir (Kita vd.,2015).

3.7.2. Kontak Konfigürasyonu

Kontak, iki maddenin düşük dirençle temas ettirilmesidir. Kontak halinde olan iki madde arasında yük alışverişi olur. Metal-yarıiletken veya metal-metal arasında kontak yapılabilir. Schottky kontaklar ve interdigital kontaklar gaz sensör üretiminde yaygın olarak kullanılan kontaklardır. İdeal bir kontakta kontak direnci sıfırdır. Bir ideal kontak yüzeylerin temiz, pürüzsüz ve parlak olmasına bağlıdır (Durrani vd., 2008).

3.7.3. Katkılama

Metal oksit tabanlı gaz sensörlerinin duyarlılığı, metal oksitin altın (Au), paladyum (Pd), platin (Pt), bakır (Cu), gümüş (Ag), kobalt (Co) gibi metaller ile katkılanarak

artırılabilir. Katkılama hem hacimsel hem de yüzeysel olabilir. Oksijenin algılayıcı yüzeye adsorplanmasını veya yüzeyden desorplanmasını belirleyen kinetik katkılamada iletkenlik değişimini kontrol eden mekanizmadır. Katalitik bir metal ile metal oksit gaz sensörü katkılıandığında, katkılama oksijenin yüzeye adsorplanma aktivasyon enerjisini düşürerek gaz tepkiselliğinin artmasını sağlar (Korotcenkov vd., 2007).

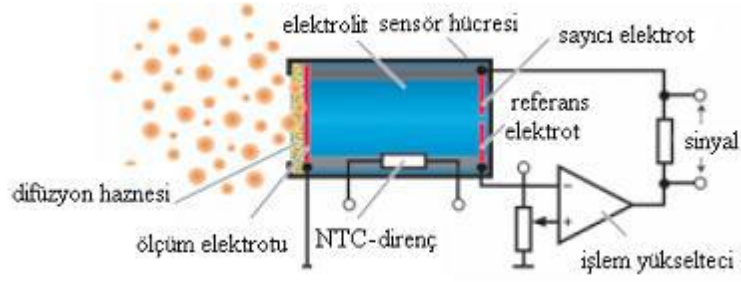
3.8. Gaz Sensörü Çeşitleri

3.8.1. Katalitik gaz sensörleri

Katalitik gaz sensörleri gaz moleküllerinin geçişini sağlayan geçirgen seramik bir taşıyıcı üzerine platin ısıtıcı bir tel yerleştirilerek elde edilmiştir. Bu taşıyıcının üzeri, katalizör platin veya paladyum ile kaplanarak gaz örneğinin yanmasını kolaylaştırılmıştır. Platin ısıtıcıya sürekli bir gerilim uygulanarak algılayıcının sıcaklığı yüzeye gelen gaz örneğini yakabilecek seviyede tutulur. Gaz örneğinin yanması esnasında ortaya çıkan enerji algılayıcının sıcaklığını artırır. Dolayısıyla platin ısıtıcının direncini artırır. Bu tip sensörlerde gaz tespiti, dirençte meydana gelen değişimlerin gözlenmesiyle sağlanır (Karaduman, 2013). Bu tip sensörler genellikle hidrokarbon kökenli yanıcı gazlara karşı hassastır (Taşaltın vd., 2010).

3.8.2. Elektrokimyasal gaz sensörleri

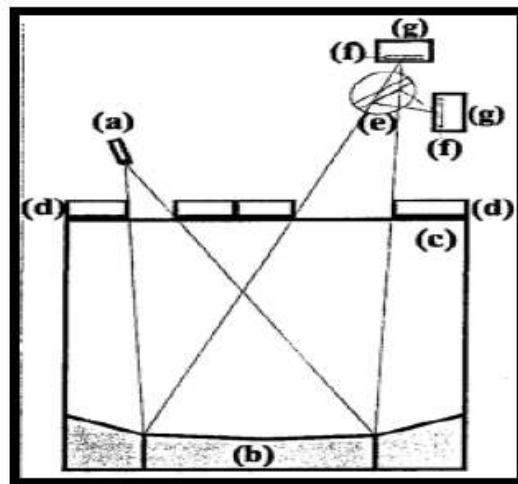
Karbonmonoksit, azotdioksit, amonyak gibi çevreye ve insan sağlığına zarar veren gazların tespitinde elektrokimyasal gaz sensörleri yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu gaz sensörlerin çalışma prensibi, sensör maddesi ile zararlı gazın kimyasal etkileşmesi sonucu sensör maddesinin elektrik akımı üretmesi esasına dayanır. Üretilen bu elektrik akımının değeri gaz yoğunluğu ile orantılıdır. Bu akımkatoda akan pozitif iyonlar ve anoda akan negatif iyonlar olarak oluşur. Bu geri dönüşümlü bir reaksiyondur. Bu sensörlerin ömrü genel olarak 1 veya 2 yıl civarındadır (Şennik, 2009). Şekil 3.3' te, bir elektrokimyasal gaz sensörünün yapısı gösterilmiştir (Karaduman, 2013).



Şekil 3.3. Elektrokimyasal gaz sensörü

3.8.3. Kızılötesi gaz sensörleri

Kızılötesi gaz sensörleri, gazları tespit etmede sensör maddesinin optik özelliklerinden yararlanmaktadır. Dalga boyu kızılötesi bölgeye düşen ışığı soğuran karbon dioksit, karbon monoksit ve hidrokarbonların tespitinde bu sensörler kullanılmaktadır. Difüzyon ve pompalama yolu ile küvete gaz gönderilir. Küvetin içi kızılötesi ışık kaynağı ile aydınlatılır. Küvette ayna bulunur. Bu aynadan ışığın bir kısmı piezoelektrik ölçüm dedektörüne, bir kısmı ise referans sinyali olarak diğer dedektöre yansır. Ortamdaki gazın yoğunluğuna bağlı olarak ışık şiddetlerinde meydana gelen değişimin elektronik devre tarafından kontrol edilmesiyle yapılan gaz tespiti kızılötesi gaz sensörlerinin çalışma prensibini oluşturmaktadır (Li ve Yin, 2010; Zhang vd., 2010; Melendez vd., 1995). Şekil 3.4' te kızılötesi gaz sensörünün şekli gösterilmiştir (Karaduman, 2013).



Şekil 3.4. Kızılötesi gaz sensörü

3.8.4. Optik gaz sensörleri

Çeşitli optik sistemler yardımıyla bir ortamdaki gazların varlığı algılanabilmektedir. İnce filmlerin soğurmasını ölçebilen bir optik fiber yardımıyla gaz algılanması yapılabilmektedir. Işının numune üzerinden saçılması ve çıkan dalgalar sonucu numunenin soğurma karakteristiklerine ulaşılabilir (Şen, 2008; Taşaltın, 2010).

3.8.5. Akustik gaz sensörleri

Herhangi bir maddenin titreşen bir hacminden belli bir miktar madde uzaklaştırıldığında ya da eklendiğinde, rezonans frekansında değişme meydana gelir. Burada özel bir kesilişe veya kristalografik düzenlenime sahip piezoelektrik kuartz kullanılmaktadır. Kuartz yüzeyi üzerine fiziksel baskı uygulayan gaz moleküllerinin varlığı bu yöntem ile tespit edilebilir (Karaduman, 2013).

3.8.6. Yarıiletken gaz sensörleri

Yarıiletken gaz sensörleri elektriksel özelliklerin değişimine göre çalışan gaz sensörlerdir. Yarıiletken malzeme üzerinde hedef gaz molekülleri ile serbest elektronların etkileşmesi sonucu yarıiletkenin elektriksel parametrelerinin değişimi bu tip sensörlerin algılama şeklini oluşturur.

Diğer gaz sensörlerinden farklı olarak yarıiletken sensörlerde elektrik direncinin direkt ölçülmesi ile hedef gaz konsantrasyon değişimi nicel bir şekilde yapılabilir (Kim vd., 2016).

Yarıiletken malzemenin yüzeyinde elektrik akımı iletimini serbest elektronlar sağlamaktadır. Yarıiletken malzeme yüzeyi kuru havaya maruz kaldığında, oksijen atomları yarıiletkenin yüzeyi tarafından tutulur ve serbest elektronlar oksijen atomlarına bağlanırlar. Sonuç olarak, yarıiletkendeki serbest elektronlar oksijen atomlarına bağlanması ile yarıiletken malzemenin elektriksel direncinde artış ve iletkenlikte bir azalış gözlenir. Yarıiletken malzemenin yüzeyi gaz moleküllerine maruz kaldığında oksijen atomları serbest kalır. Dolayısıyla yarıiletken elektronları da serbest konuma geçeceğinden elektriksel iletkenlik tekrar yükselir, elektriksel direnç tekrar azalır (Baytöre, 2013).

Bu sensörlerin çalışma prensipleri nedeni dikkat edilmesi gereken en önemli özelliği herhangi bir gazı karşı tam seçici olamamalarıdır (Açıkbaş, 2006).

Metal oksitler üretim kolaylığı, düşük maliyet ve farklı gazlara karşı yüksek duyarlılıklar gösterme özellikleri ile yarıiletken gaz sensörlerinde en çok kullanılan malzemelerdir.

Metal oksit gaz sensörleri karbondioksit (CO_2), karbonmonoksit (CO), etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), metan (CH_4), hidrojen (H_2), propan (C_3H_8), hidrojen sülfür (H_2S), azot oksit (NO), azot dioksit (NO_2), amonyak (NH_3), oksijen (O_2), ozon (O_3), kükürt dioksit (SO_2), aseton ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$), sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), dimethylamine ($\text{C}_2\text{H}_7\text{N}$) (DMA), trimethylamine ($\text{C}_3\text{H}_9\text{N}$), nem, duman ve diğer birçok gazı algılayabilmektedir (Eranna vd., 2004).

3.9. Metal Oksit Yarıiletken Gaz Sensörleri

1962'den beri pek çok araştırmacı toksik kirleticilerin ve yanıcı gazların tespiti konusunda çalışmışlardır (Aydın, 2013). Genellikle bir metal ile oksijen atomunun birleşmesi şeklinde oluşan metal oksit yarıiletkenler, yüksek bant aralığına sahip malzemelerdir. Yarıiletken gaz sensörlerinden olan metal oksit gaz sensörleri, taban malzeme üzerine metal oksit yarıiletkenlerin büyütülmesiyle oluşturulmuş, sensörün algılama özelliğine göre bulunduğu ortamdaki gazların varlığını saptamaya yarayan cihazlardır. Metal oksitlerin gaz algılama mekanizması, algılanması istenen gaz molekülünün yüzeye iyonik tutunmuş oksijen ile arasındaki reaksiyonuna bağlıdır (Cömert, 2015). Metal oksitler gerek kimyasal ortamlarda gösterdikleri hassasiyet ile gerekse yüksek sıcaklık ve basınç gibi zorlu şartlar altında çalışabilmeleriyle, diğer kimyasal gaz sensörlerinden güvenilirlik ve dayanıklılık bakımından ayrılmaktadır. Bir boyutlu metal oksit nanoyapılar kimyasal algılamada oldukça üstünlerdir (Shishiyanu ve Lupan, 2005). Metal oksit malzemelerin sensör malzemesi olarak tercih edilmesinin önemli sebebi düşük maliyet ve yüksek duyarlılık gibi avantajlı özellikleridir.

Metal oksit yarıiletkenler ortamda bulunan gaz konsantrasyonunun düşük olması durumunda da elektrik direncindeki değişimleri gösterebilir. Gaz sensör teknolojisinin geliştirilmesinde yarıiletken malzemelerin önemi büyüktür. Yarıiletken malzemelerin geliştirilen özellikleri sayesinde nano boyutta malzemeler üretilmektedir. Böylece hem

daha küçük boyutta gaz saptama aygıtları üretilebilirken hem de küçük boyutlarda olduğu için aygıtların çalışma hızı çok hızlı olabilmektedir (Supothina, 2003).

3.9.1. Metal oksit yarıiletken gaz sensörlerinin çalışma prensibi

İnce film gaz sensörünün çalışma prensibi ortamdaki gaz miktarına göre yüzeydeki taşıyıcı elektron miktarının değişimi ve bunun sonucunda elektriksel karakterizasyonda meydana gelen değişiminin ölçülmesi şeklinde açıklanabilir. Yarıiletken oksit ve çevresindeki oksit ya da redükleyici atmosfer ile kimyasal ya da elektronik etkileşimin sonucu ortaya çıkan değişimin tespiti şeklindedir. Belirtilen etkileşimler yarıiletken yüzeyinde elektriksel dirençte değişiklik meydana getirir (Günkaya, 2008).

Bir başka şekilde açıklanacak olursa metal oksit gaz sensörlerinin çalışma prensibi oksijen ile hedef gazın etkileşmesiyle gerçekleşecek olan yüzey reaksiyonları sonucunda elektrik direncinin artması veya azalması esasına dayanır denilebilir. Değişen elektrik direncinin ölçülmesi ile hedef gazın konsantrasyon değişimi belirlenebilmektedir (Cömert, 2015).

Metal oksitin yüzeyindeki oksijen ile hedef gazın molekülleri arasında bir yanma reaksiyonu oluşmakta ve bunun sonucunda dirençte değişim meydana gelmektedir. Metal oksitin p ya da n tipi bir yarıiletken olmasına bağlı olarak dirençteki değişimin karakteri (artma ya da azalma), algılanan gazın da yükseltgen (oksitleyici) bir gaz mı veya indirgeyici (oksijen alıcı) bir gaz mı olduğu hakkında bilgi vermektedir. Bilindiği üzere n-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk taşıyıcılar serbest elektronlar, p-tipi yarıiletkenlerde ise boşluklardır. n-tipi yarıiletkenlerde malzeme, ortama fazladan iletkenlik elektronu sağlayacak atomlarla katkılanmıştır. p-tipi yarıiletkenlerde ise malzeme, ortama fazladan pozitif (p-tipi) yük taşıyıcılar sağlayacak atomlarla katkılanmıştır. n-tipi metal oksitlerin direncindeki azalma ortamda indirgeyici gazların (oksijen alıcı) bulunduğunu gösterirken, artma ise ortamda yükseltgen (oksitleyici) gazların bulunduğunu gösterecektir. p-tipi metal oksitlerin davranışı ise bunun tam tersi olacaktır (Berna, 2010). Bu basit çalışma prensiplerinin yanı sıra hassasiyet, kararlılık, sağlam ve ucuz olma, değişik gazlara karşı yüksek duyarlılık gibi özelliklerine ek olarak nanoboyutlu malzeme kullanımı ile düşük sıcaklıklarda hassas algılama göstermeleri ve yüksek sıcaklıklarda da çalışabilme özellikleri (Cömert, 2015) sayesinde ön plana çıkmışlardır. Filmin algılama karakteristiğini yüzeyde oluşan reaksiyonlar sonucu

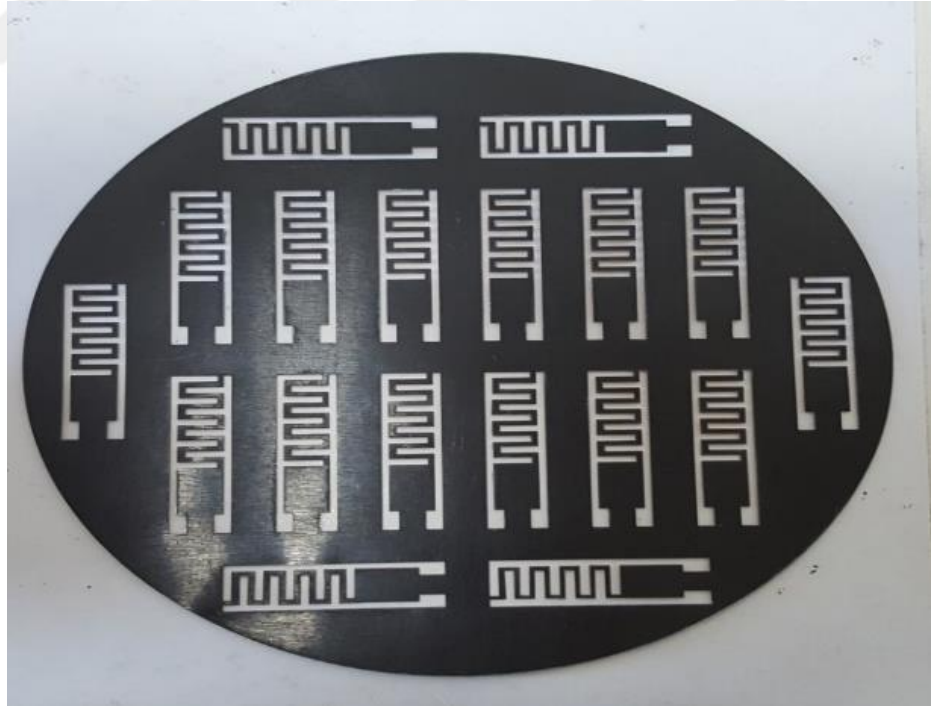
meydana gelen direnç değişimi belirler. Metal oksit gaz sensörleri elektrik direncindeki değişim sayesinde hava ortamında bulunan oksitleyici ya da yanıcı gazların tespitinde kullanılmaktadır (Günkaya, 2008).



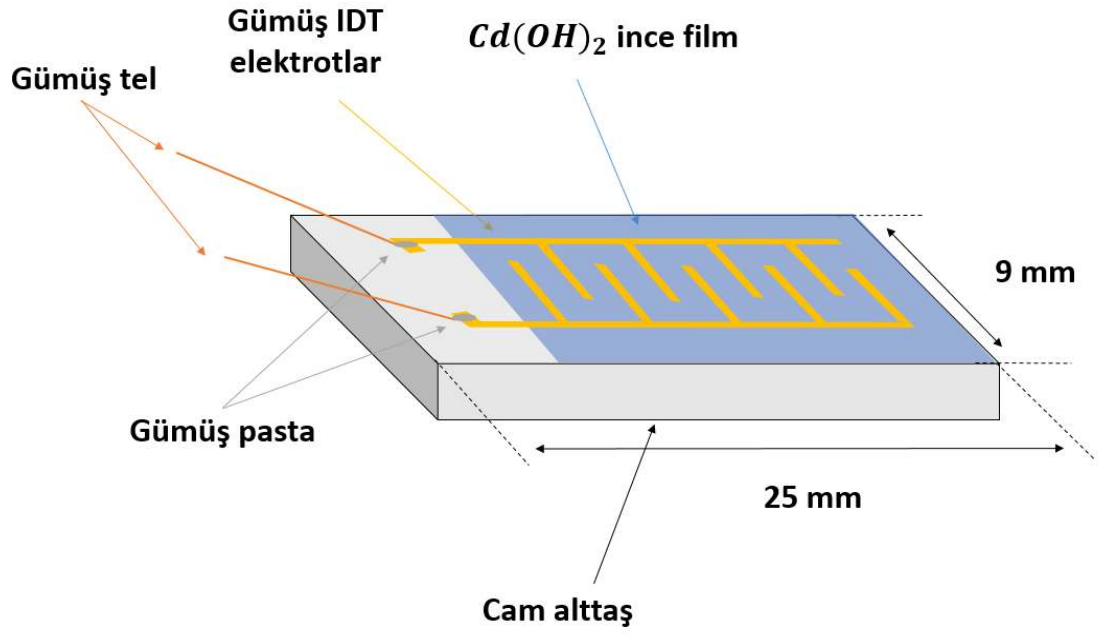
4. MATERYAL ve YÖNTEM

4.1. Materyal

Büyütülecek ince filmler için taban malzemesi olarak cam altlıklar kullanıldı. Cam taban malzemeler 9 mm genişlikte ve 25 mm uzunlukta olacak şekilde kesildi. Daha sonra kesilen cam taban malzemeler kirlerinden arındırılmak için önce sabunlu suda iyice yıkandıktan sonra aseton içerisinde 10 dakika ultrasonik olarak temizlendi. Sonra (1:1) etanol su karışımı içerisinde 10 dakika ultrasonik olarak temizlendi. Deiyonize su içerisinde de iyice yıkandıktan sonra kurutuldu. Cam taban malzemeler numune büyütme işlemi için hazır hale getirildi. Daha sonra cam taban malzemelerin üzerine Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR) metodu ile $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince filmler büyütüldü. İnce filmler büyütüldükten sonra sensör üretimi için metal levhalar üzerine hazırlanmış olan maske yardımıyla gümüş IDT (Interdigital kontak) kontak yapıldı. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2.'de sırasıyla kullanılan maske ve IDT kontak yapılarak üretilen sensörümüzün şeması verilmektedir.



Şekil 4.1. Interdigital kontak üretimi için hazırlanan metal maskeler



Şekil 4.2. IDT ile üretilen sensör şeması

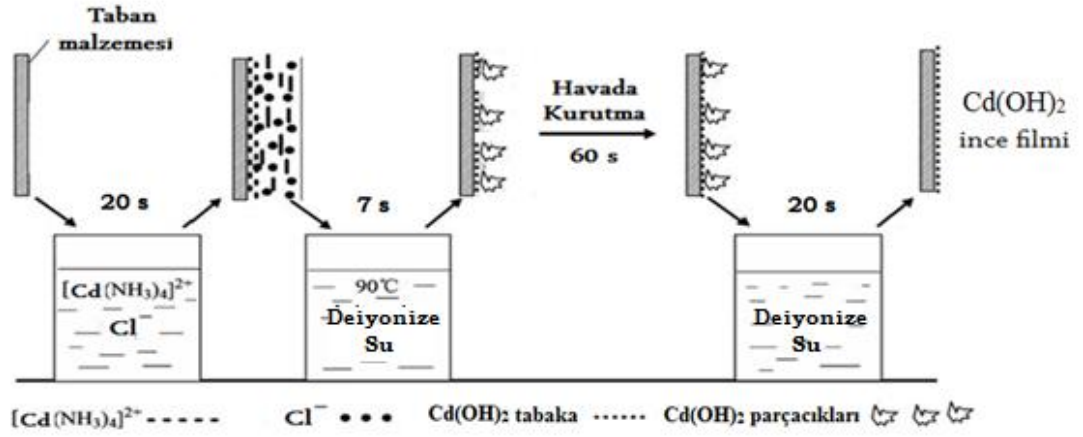
4.1.1. $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince filmleri için kimyasalların hazırlanması

$\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince filmlerinin üretimi için kadmiyum-amonyak ($[\text{Cd}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$) çözeltisi kullanılır. Kadmiyum-amonyak çözeltisini hazırlamak için 0,1M CdCl_2 ($\text{pH} \approx 5,5$) ve %25-28 NH_3 çözeltileri 1:10 molar oranında karıştırılır. Bu çözeltiler karıştırıldığında $[\text{Cd}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ ($\text{pH} \approx 10$) çözeltisi oluşur.

4.1.2. $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince filmlerin büyütülmesi

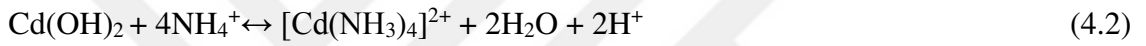
$\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince filmlerin SILAR metodu ile büyütülmesi yöntemi Şekil 4.3' te gösterildi. Taban malzeme olarak cam kullanıldı.

Temizlenen cam taban malzemeler sırasıyla önce hazırlamış olduğumuz $[\text{Cd}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ çözeltisine daldırıldı ve 20 saniye tutuldu. Sonra 90 °C'deki sıcak suya daldırıldı ve 7 saniye tutuldu. Daha sonra 60 saniye hava ortamında bekletilen numuneler son olarak oda sıcaklığındaki deiyonize suya daldırılarak 20 saniye bekletildi. Bu döngü 3 ayrı numune için 30 tur, 40 tur ve 50 tur olmak üzere tekrarlandı. Böylece tüm numunelerde büyütme işlemi gerçekleştirilmiş oldu.



Şekil 4.3. Cd(OH)₂ ince filmlerin SILAR metodu ile büyütülmesi

Büyüme aşamasında gerçekleşen reaksiyonlar aşağıda verildi:



90 derece su içerisinde;



4.2. Yöntem

İnce film üretim metotları iki ana başlık altında incelenebilir. Bunlardan birincisi fiziksel metotlardır. Bu metotta filmi oluşturacak malzeme bir hedef kaynaktan taban malzeme yüzeyine hareket eder. Fiziksel metotlar hem buharlaştırma hem de bir etki işlemiyle gaz halinde çökelmenin yapıldığı vakum buharlaştırma ve püskürtme metotlarını içermektedir. İkincisi kimyasal reaksiyonları içeren kimyasal tekniklerde ise çoğunlukla bileşenler taban malzemenin yüzeyinde veya çevresinde bir reaksiyona maruz kalmaktadır. Kimyasal metotlarda, Chemical Vapor Deposition (CVD), lazer CVD, Metalorganic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) gibi gaz fazı kimyasal metotları ve Electrochemical Deposition (ECD), Chemical Bath Deposition (CBD), Sol-gel, Successive Ionic Layer Adsorption And Reaction (SILAR) gibi sıvı faz kimyasal metotlarıdır (Yıldırım, 2010). Yöntem seçimi vakum gerekliliği, teknik ve ekonomik özelliklere göre yapılır. Bu tez çalışmasında pratik olması, fazla zaman kaybı olmaması, pahalı donanımlar gerektirmediğinden maliyetinin düşük olması, uygulanabilirliğinin kolay olması, oda sıcaklığında çalışma imkânı sağlaması, büyüme boyunca çözelti

konsantrasyonunun, sıcaklık ve film kalınlığı gibi parametrelerin kontrolüne imkan vermesi sebebiyle SILAR metodu tercih edildi.

4.2.1. Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR) metodu

İnce film büyütme metotları arasında en iyilerden biri SILAR metodudur. SILAR, taban malzeme-çözelti ara yüzeyindeki ardışık reaksiyonları içeren sulu çözelti metodudur. İnce filmlerin, her bir türün iyonlarını içeren sulu çözeltiler içerisinde taban malzemenin belli bir sıra ile batırılarak, taban malzeme üzerinde çökmesi ile oluşmasını sağlayan basit bir metottur. Bu metotta reaksiyonlar oda sıcaklığında veya ona yakın sıcaklıklarda ve çözeltileri kaplayan basınç altında gerçekleştiği için taban malzemesi olarak yalıtkan, yarıiletken, metal ve sıcaklığa dayanıklı olan birçok malzeme kullanılabilir (Yıldırım, 2010).

İnce film oluşumu için kullanılan metotlardan olan SILAR kolay olmasına rağmen birçok avantaj sağlamaktadır. Bunlar (i) Filmi, herhangi bir elementin herhangi bir oranında katkılama için, sadece onu katyonik çözeltinin bazı formlarına katmak yeterlidir ve bu oldukça kolay bir yoldur. (ii) Vakum altında buharlaştırma metotlarından farklı olarak SILAR, ne yüksek kalitede hedef veya altlık, ne de herhangi bir aşamada vakum gerektirmemektedir ki bu durum metodun endüstriyel uygulamalarda kullanılması halinde büyük avantaj sağlar. (iii) Çökeltme oranı ve filmin kalınlığı, çökeltme döngüsünü değiştirmek suretiyle geniş bir aralıkta kolaylıkla kontrol edilebilir. (iv) Oda sıcaklığında yapılan işlemlerle, daha sağlıklı malzemeler üzerine film büyütülebilir. (v) Yüksek enerjili metotlardan farklı olarak çökeltilecek materyal için zararlı olabilecek ısınmalara yol açmaz ve (vi) altlık malzeme, boyutlar ve yüzey profili ile ilgili neredeyse hiçbir sınırlama yoktur. Bundan başka diğerlerine göre ucuz, kolay ve geniş alanda çökeltme yapmak için kullanışlıdır. Cam beherler içerisinde gerçekleştirilebilir. Başlangıç malzemeleri çoğunlukla kolay elde edilebilir ve ucuz malzemelerdir. Kimyasal bir yöntem olmasından dolayı çok çeşitli altlıklar kullanılabilir. Böylece çözeltinin kolaylıkla ulaşabileceği herhangi bir çözünmez yüzey çökeltme için uygun altlık olacaktır. Stokiyometrik çökeltme kolaylıkla elde edilebilir. Temel yapı malzemeleri atomlar yerine iyonlar olduğu için, hazırlık parametreleri kolaylıkla kontrol edilebilir, en iyi yönelim ve tanecik yapısı elde edilebilir (Pathan, 2004). Bu avantajlar SILAR metodunu cazip hale getirmektedir.

SILAR metodunda taban malzeme üzerine büyütülecek ince filmin kalınlığının kontrolü tur sayısına bağlıdır. Tur sayısını belirlemek bizim elimizde olan bir durumdur ve bu durum SILAR metodunu cazip kılan en önemli parametrelerdendir. Tur sayısını artırdıkça taban malzeme üzerine büyüttüğümüz ince filmin kalınlığı da artmaktadır. Kalınlık arttıkça yapının kararlılığı artar. Fakat SILAR tur sayısının çok fazla olması da uygun değildir. Çünkü ince filmin kalınlığı belli bir değerin üzerine çıktığında artık iyonlar tortu şeklinde yüzeyde birikecektir. Bu birikmelerin sonucunda hatta yapıda kopmalar meydana gelecek ve ince filmin kalitesi düşecektir.

SILAR metodunda ince film kalınlığının tur sayısına bölümü ile döngü başına düşen büyüme oranı elde edilebilmektedir (Nicolau and Menard, 1988).

SILAR metodunda, kullanılan çözeltilerin konsantrasyonları (molarite), pH değerleri, SILAR tur sayısı, daldırma ve çalkalama süresi şeklinde ince film büyümesine etki eden bazı önemli parametreler bulunmaktadır.

4.2.2. X-Işını kırınım tekniği (XRD)

X-ışınları 1895 yılında Alman fizikçi Röntgen tarafından keşfedilmiştir. Atomların iç yörüngelerindeki elektron geçişleriyle doğal yolla ya da yapay olarak kapalı tüp içerisinde katottan salınan elektronların hızlandırılıp anottaki metalin bombardıman edilmesiyle oluşurlar. Elektrik alanda hızlandırılan yüksek kinetik enerjili elektronlar hedefteki metal içerisindeki atomlarla çarpıştırılarak yüksek ivmeyle yavaşlamak zorunda kaldıklarından enerjilerini foton yayımlayarak atarlar. Bu olay zincirleme olarak devam eder ve bu fotonlardan x-ışınları oluşur. Üretilen x-ışınlarından karakteristik olanları seçilir. Bu karakteristik x-ışınları kullanarak gerçekleştirilen XRD tekniği ile alaşımların analizleri yapılır (Cömert, 2015).

XRD tekniği malzemelerin örgü parametrelerini yani ince filmlerin kristal yapılarını incelemek için kullanılan bir tekniktir. XRD, malzemenin kristal dizilişe sahip olup olmadığı, kristal yönelimleri, ortalama tanecik büyüklüğü gibi verilere ulaşmayı sağlayan bir yöntemdir. Her bir malzemenin fazın kendine özgü atomik dizilişlerine bağlı olarak, X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanarak çalışır. Kullanılacak malzemenin çok küçük bir parçası XRD ile analiz için yeterli olacaktır. Bu analiz tekniği malzemeyi tahrip etmez. XRD ile elde edilen, malzemenin karakteristiğini

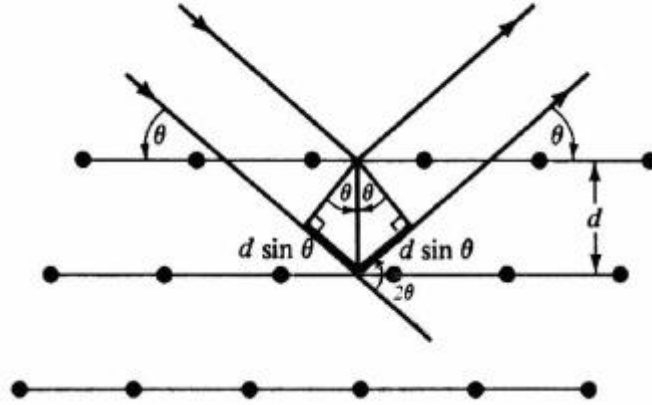
belirleyen desenler tıpkı insanların parmak izinde olduğu gibi her malzeme için farklıdır. Desenlerde ki piklerin şiddetleri ve genişlikleri dikkate alınarak ince filmlerin kristalleşme seviyeleri ve tanecik boyutları belirlenir. Numunelerin kırınım spektrumları incelendiğinde pik şiddetleri ve genişlikleri arasında farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Şiddetleri büyük ve genişlikleri dar olan pikler kristalleşmenin iyi olduğunu, şiddetleri küçük ve genişlikleri büyük olan piklerde kristalleşmenin iyi olmadığını göstermektedir (Aydın, 2013).

Katıların kristal yapıları, katıyı oluşturan atom, atom grupları ve moleküllerin üç boyutlu uzayda belirli bir geometrik düzende sıralanarak bir araya gelmesiyle oluşur. X-ışınlarının kırınımı yardımıyla kristal yapı analizi yapılır. Uygun şartlarda kristal içerisinde X-ışınları kırınımına uğrarlar. Kristalin birim hücresinin şekli ve boyutları hakkında kırınımına uğrayan ışınların doğrultusu bilgi verirken, birim hücredeki atomların konumları hakkında ise bu ışınların şiddeti bilgi vermektedir (Yıldırım, 2010).

Kırınım deneyleri Bragg kanununa dayanır.

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (n=1,2,3,4\dots) \quad (4.4)$$

Burada λ kullanılan X-ışınının dalga boyu, n kırınım mertebesi, θ yansıma veya gelme açısı ve d kristal düzlemleri arasındaki mesafedir. Bir kristalde kırınım olayını W.L. Bragg tarafından açıklanmıştır. Bu yasayı açıklamak için Şekil 4.4' ü dikkate alalım. Aralarındaki mesafe d olan iki paralel düzleme λ dalga boylu X-ışınları θ açısı ile gelsin. X-ışınlarının kırılmadığını kabul edersek her iki düzlemden düzlemle θ açısı yapacak şekilde Snell yasasına (gelis açısı yansıma açısına eşit olarak) göre yansıyacaktır. Bu ışınlar yol farkından dolayı birbirlerine kuvvetlendirici ya da zayıflatıcı etki göstereceklerdir. Kuvvetlendirici etkiyi düzlemden yansıyan aynı fazdaki ışınlar meydana getirir. Bu şartın sağlanabilmesi için Şekil 4.4' ten de görüldüğü gibi gelen ışınlar arasındaki yol farkının λ dalga boyunun tam katları olması gerekmektedir (Yıldırım, 2010).



Şekil 4.4. X-ışınlarının bir kristal tarafından kırınıma uğratılması (Yıldırım, 2010)

Kısaca XRD'nin temel çalışma prensibini kristaldeki örgü parametreleri ile aynı mertebede dalgaboyuna sahip X-ışınlarının kristal ile etkileşerek kırınıma uğraması şeklinde ifade edebiliriz. Eşit aralıklarla sıralanmış kristal örgü düzlemleri üzerine gönderilen X-ışınları bu düzlemlerden saçılacaktır. Bu iki düzlem arasındaki mesafe d ve X-ışınının dalga boyu λ olmak üzere bu iki düzlemden yansıyan ışınlar arasındaki yol farkı $2d\sin\theta$ olarak bulunacaktır.

DeneySEL bakımdan Bragg yasasından iki şekilde faydalanılır. λ dalgaboyu bilinen X-ışını kullanarak, Bragg açısı θ 'nın ölçülmesiyle kristal içindeki paralel düzlemler arası mesafe ' d ' bulunabilir. Buna ilave olarak, kristal içindeki atom koordinatlarını veren Bragg yansımalarının şiddeti ölçülerek kristal yapı analizi gerçekleştirilir. Buna, X-ışınları kristal yapı analizi denir (Yıldırım, 2010).

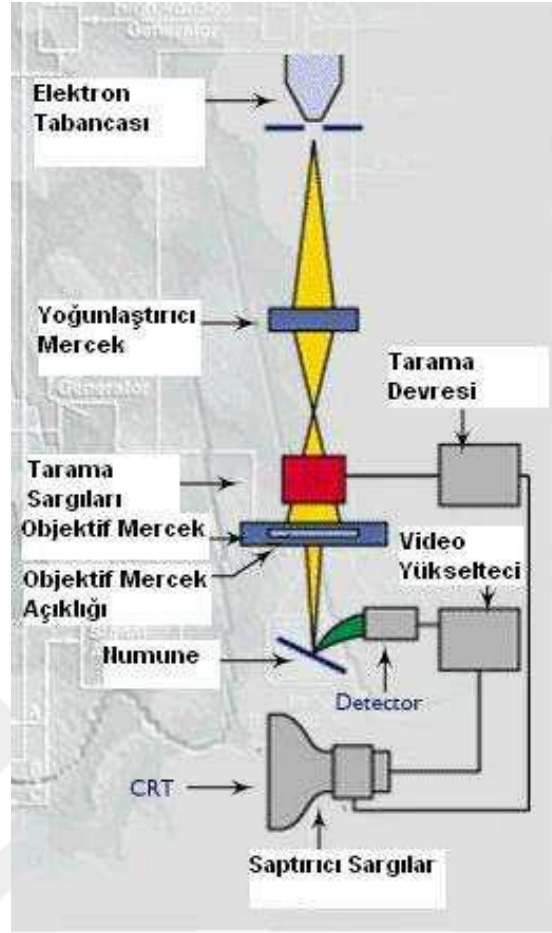
Bu tez çalışmasında üretilen ince filmlerin XRD analizleri Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Temel Bilimler Uygulama ve Araştırma Merkezi laboratuvarında bulunan ve Şekil 4.5' te verilen Panalytical Empyrean X-Ray Difraktometre cihazı ($\lambda=1,5405 \text{ \AA}$ dalgaboylu Cu-K α ışını kullanan) kullanılarak yapıldı.



Şekil 4.5.Panalytical Empyrean X-Işınları kırınımı cihazı

4.2.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

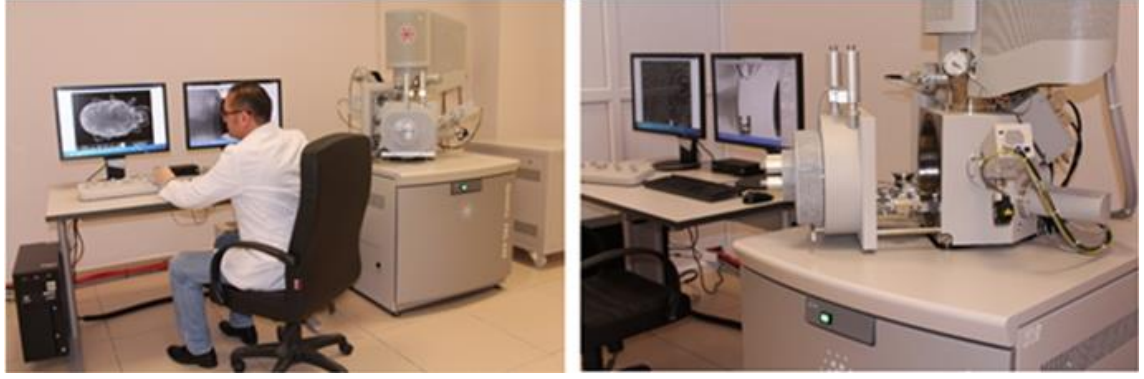
Taramalı elektron mikroskobu, odaklanmış bir elektron demetinin numuneye çarpması ile bu numuneden saçılan ikincil elektronların algılanıp görüntü haline getirilmesi esasına dayanan, numunelerin yüzey görüntülerini elde etmeyi sağlayan topografik bir inceleme mekanizmasıdır. Taramalı elektron mikroskobunun şeması Şekil 4.6’ da verilmiştir. Elektron tabancasının V-şeklindeki tungsten filamanı vakum içerisinde yaklaşık 2800 °C’ lik sıcaklığa kadar ısıtılır. Termoiyonik olayla tungstenden elektronlar salınır ve bunlar 200 V-30 kV’ luk arasında negatif bir potansiyel yardımıyla filamandan itilirler. Havası boşaltılmış tüp içerisinde geçen elektronlar, tüpün etrafına yerleştirilmiş olan elektromanyetik mercekler (2 veya 3 tane) yardımıyla numune üzerine odaklanırlar. Tarayıcı bobinler odaklanmış elektron demetinin, numuneyi baştanbaşataramasını sağlar. Numuneden yayınlanan elektronlar detektörler tarafından toplanarak, gelen demet ile eş zamanlı olarak taranan, katot ışınları tüpü üzerinde görüntü oluştururlar. Görüntü kontrastı, elektronik kontrol düğmelerinin ayarlanması ile geniş ölçüde değiştirilebilir (Yıldırım, 2010).



Şekil 4.6.Taramalı elektron mikroskobunun şematik yapısı

Herhangi bir numune veya numune üzerinde elemental kompozisyonu tanımlamak için kullanılan tekniğe Enerji yayımlımlı X-ışını analizi (EDAX) denir. Bu teknik genel olarak SEM cihazında kullanılır. Numune üzerine taramalı elektron demeti gönderilerek yapının elemental analizleri gerçekleştirilir.

Bu tez çalışmasının SEM ve EDAX ölçümlerinde Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Temel Bilimler Uygulama ve Araştırma Merkezilaboratuvarında bulunan, Şekil 4.7' de gösterilen FEI Quanta 450 FEG model Environmental Scanning Electron Microscope (FESEM) cihazı kullanılmıştır.



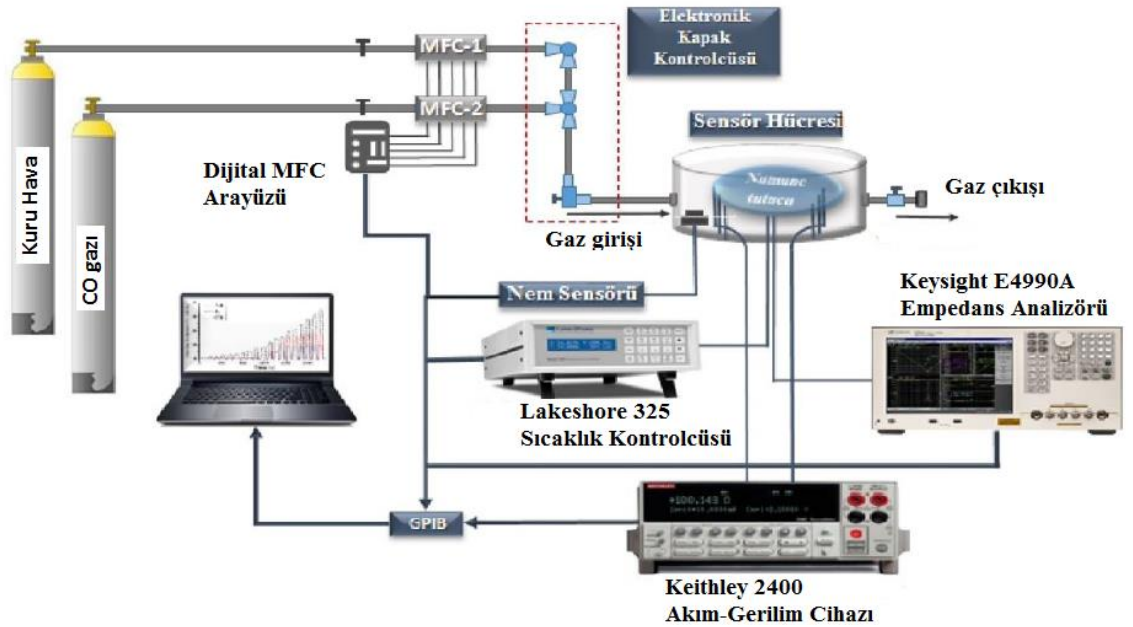
Şekil 4.7. EDAX dedektörüne sahip taramalı elektron mikroskobu (FESEM)

4.2.4. Elektriksel karakterizasyon

Üretilen her bir numunenin elektriksel karakterizasyonu için sıcaklığa bağlı direnç değişim ölçümleri ve gaz ölçümleri yapıldı.

4.2.4.1. Gaz ölçümü

Gaz algılama ölçüm sisteminin şematik gösterimi Şekil 4.8’ de verilmiştir.



Şekil 4.8. Gaz sensör ölçüm sistemi

Gaz sensör ölçüm sistemi, Keithley 2400 sourcemeter(voltaj-akım ölçümleri için), gaz ölçümleri için vakumlanabilir hücre, gaz akış kontrolcüsü (MKS), sıcaklık kontrol

cihazı LakeShore 325, yüksek saflıkta kuru hava, CO gazı, vakum pompası, tüm sistemi kontrol eden bir bilgisayar ve yazılımından oluşmaktadır. Bilgisayar kontrolü ile ölçüm sonuçları ekrandan takip edilebilir ve kayıt altına alınır.

Öncelikle numune, cihazın ölçüm hücresine dikkatlice yerleştirilir. Sıcaklık kontrol cihazına istenilen değer girilir ve sıcaklığın bu değere gelmesi beklenir. Cihaz istenilen sıcaklığa ulaştığında kendisini sabitler. Gaz akış kontrolcülerini ile numunenin bulunduğu hücreye gaz akışı sağlanır. Sistem verileri anlık olarak veri kablosu üzerinden bilgisayara aktarılır.

Numune ile hedef gaz etkileştiğinde numune direncindeki değişimi ölçülebilmek gaz ölçüm sistemlerinde esas önemli noktadır.

Deney sisteminde ölçüm hücresine ulaşacak olan gazın konsantrasyonu bilgisayar kontrollü olarak istenilen periyotlarda akış kontrolcüler tarafından kontrollü bir şekilde verilmektedir.

Bu tez çalışmasında sabit 50 ppm CO gaz konsantrasyonu altında 30, 40 ve 50 SILAR turuna sahip her ince filmler için oda sıcaklığından başlayarak 180 °C' ye kadar sıcaklık artışı yapıldı. Bunun sonucunda tüm ince filmlerin çalışma sıcaklıkları belirlendi. Daha sonra belirlenen çalışma sıcaklığı altında 50 ppm ile 500 ppm aralığında CO gazı verilerek her bir ince filmin duyarlılık ölçümleri yapıldı.

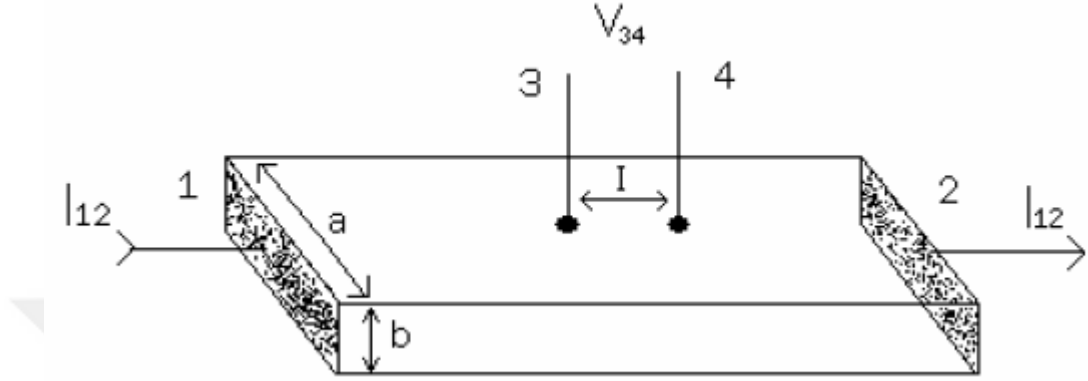
4.2.4.2. Direnç ölçümü

Gaz ölçüm sisteminde aynı anda akım-voltaj (I-V) ölçüm sistemi ile sıcaklığa bağlı akım değişimleri anlık ölçülebilmekte ve eş zamanlı ekranda görülebilmektedir. Elde edilen bu akım-voltaj değerleri ile ince filmlerin direnci bulunabilmektedir.

Bu tez çalışmamızda 30, 40 ve 50 SILAR döngüsüne sahip her film için 300 K den başlayarak belirli aralıklarla 500 K'e kadar sıcaklık ayarı yapıldı. Her bir sıcaklık değerinde iki nokta uç yöntemi ile ölçülen akım-voltaj değerlerinden direnç hesabı yapıldı.

İki nokta uç yöntemi ile akım-voltaj ölçümü: Bu yöntemin temeli numuneden akım geçerken belli bir noktada ki elektriksel potansiyel farkın ölçülmesi esasına dayanır.

Yarıiletken malzemelerin direnç ölçümlerinde iki nokta uç dışında dört nokta uç ve Wan der Pauw yöntemleri de vardır. İki nokta uç yönteminde numunenin şeklinin düzgün dikdörtgen geometrik şekil ve sabit kesit alanına sahip olmak üzere tam belli olması gerekir. Diğer yöntemlerde şekil serbest olabilir.



Şekil 4.9. İki nokta uç yöntemi ile direnç ölçme devresi

Gerilim ölçümü (V_{34}) için aralarındaki mesafe l kadar olan, 3 ve 4 küçük alanlı omik kontaklar yapılır. Homojen bir numune için direncin değerini aşağıdaki formül verir;

$$R = \frac{V_{34}}{I_{12}} \quad (4.5)$$

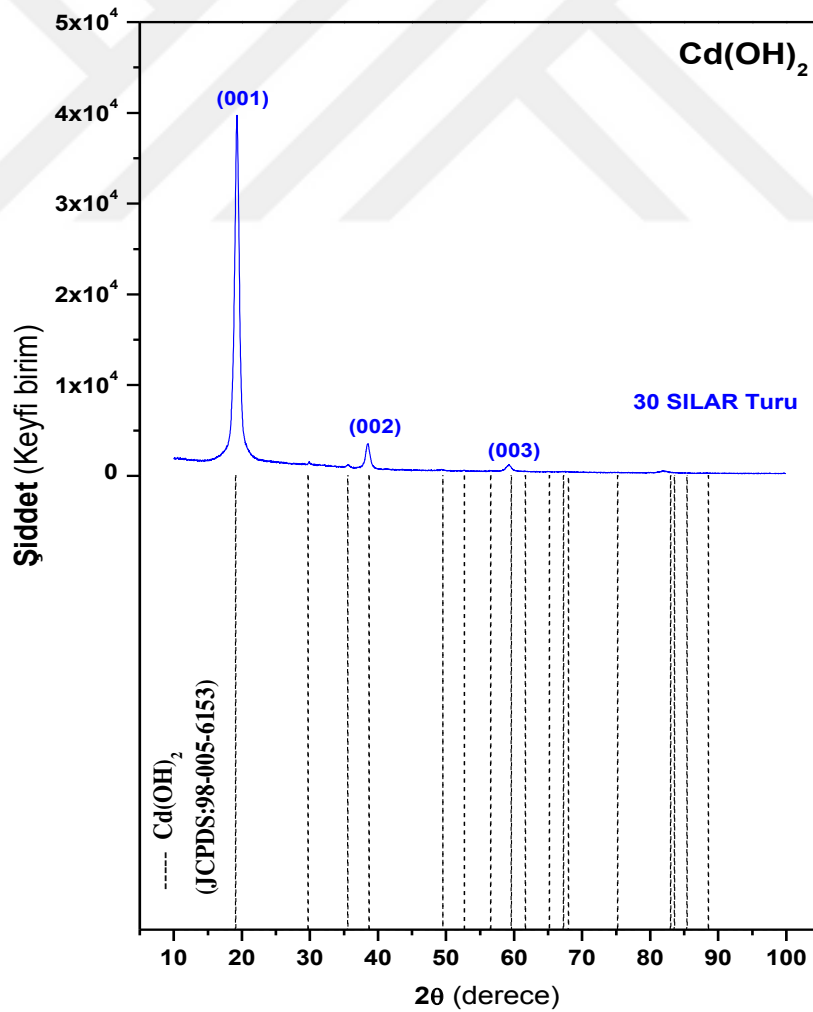
Burada V_{34} 3 ve 4 kontakları arasındaki gerilim değeri, I_{12} ise 1 ve 2 numaralı kontaklardan geçen sabit akım değeridir. Direncin birimi ohm' dur.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

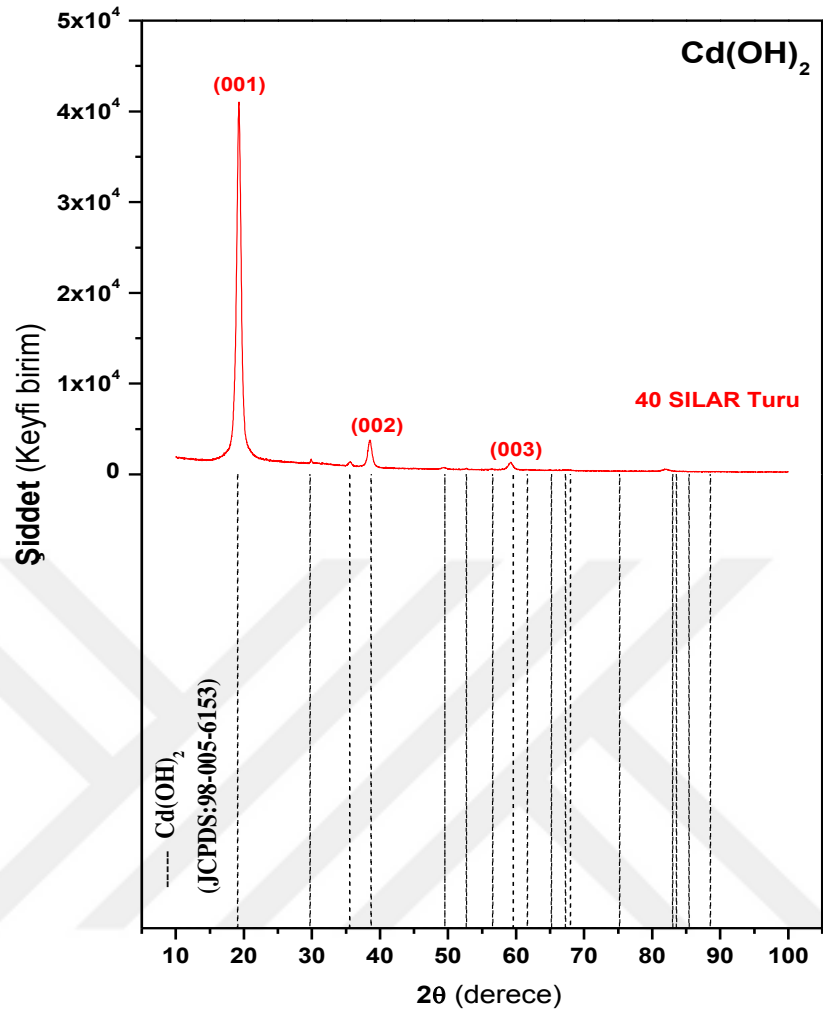
5.1. Yapısal Karakterizasyon

5.1.1. İnce filmlerin X-ışını kırınım ölçüleri

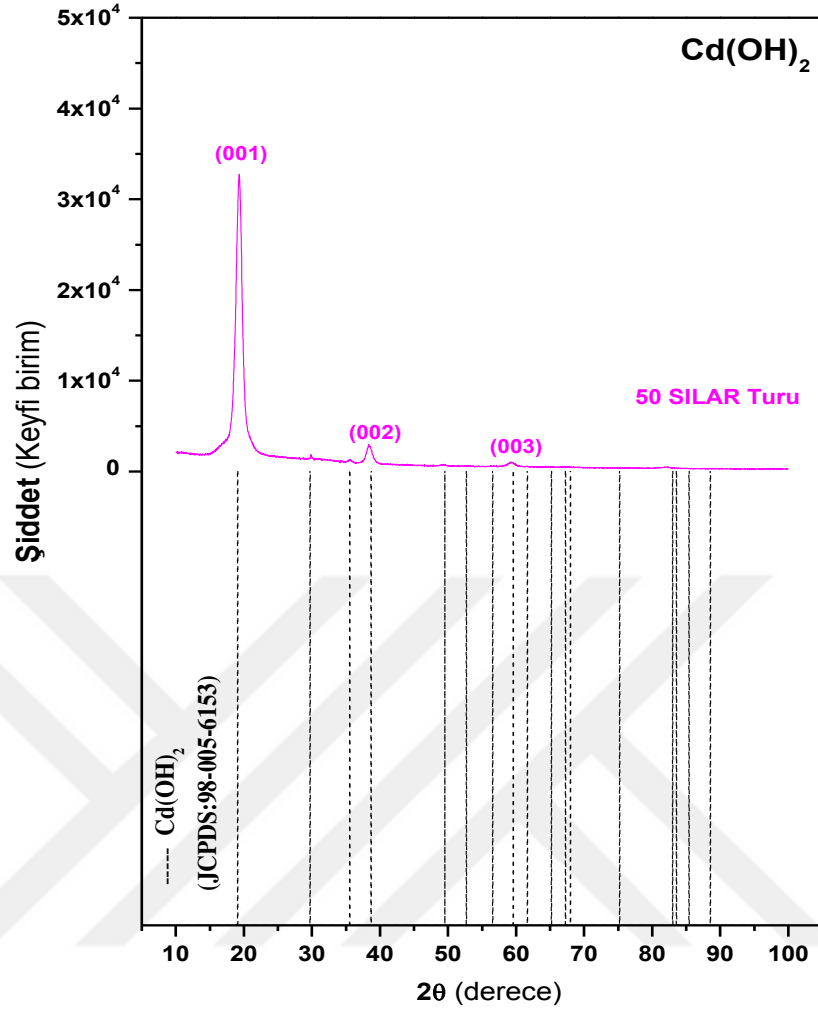
SILAR metodu ile büyütülen $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince filmlerinin yapısal özelliklerini incelemek amacıyla filmlerin XRD desenleri Panalytical Empyrean X-Ray Difraktometre cihazı ($\lambda=1,5405 \text{ \AA}$ dalgaboylu $\text{Cu-K}\alpha$ ışını kullanan) kullanılarak $2\theta=10-100^\circ$ aralığında $0,1^\circ$ lik adımlarla alındı. Bu desenler yardımı ile filmlerin yapısal özellikleri analiz edildi. $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince filmlerin, polikristal yapıda olup hekzagonal fazda kristalleştiği belirlendi. SILAR tekniği ile cam taban malzeme üzerine büyütülen 30, 40 ve 50 SILAR turuna sahip $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince filmlerin XRD desenleri sırasıyla Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.1. 30 SILAR turuna sahip $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince filmin X-ışını kırınım deseni



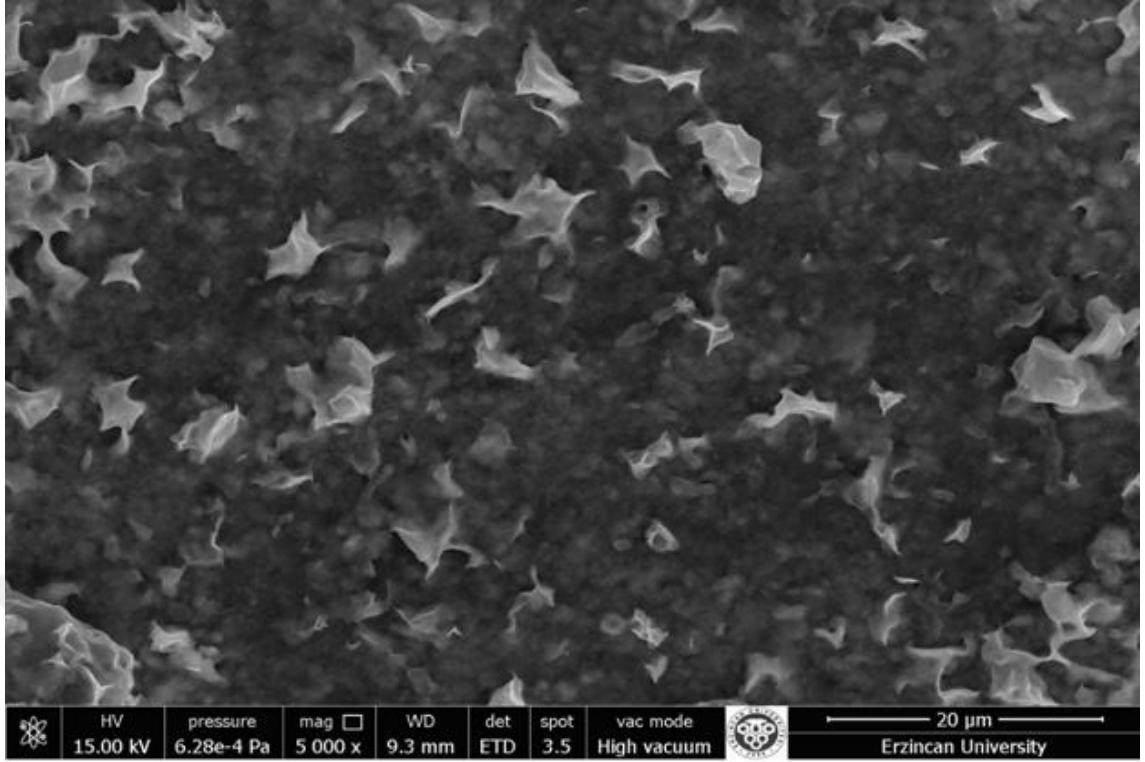
Şekil 5.2. 40 SILAR turuna sahip $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince filmin X-ışını kırınım deseni



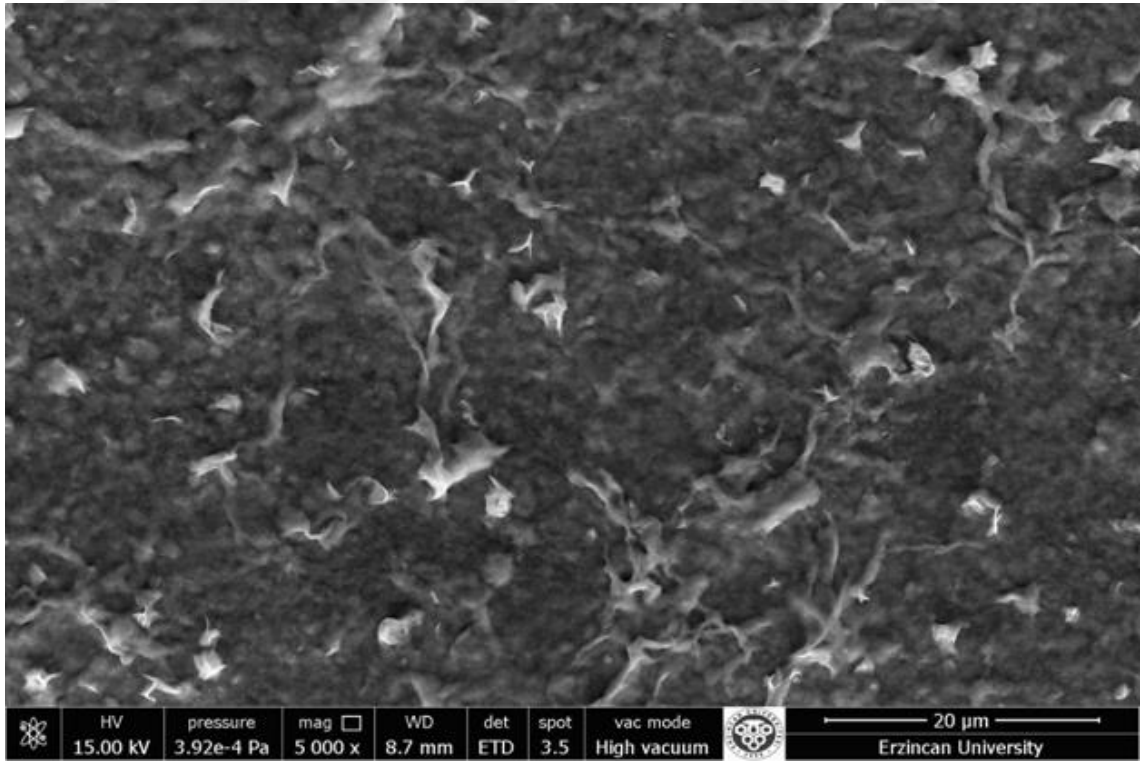
Şekil 5.3. 50 SILAR turuna sahip $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince filmin X-ışını kırınım deseni

5.1.2. İnce filmlerin yüzey görüntüleri

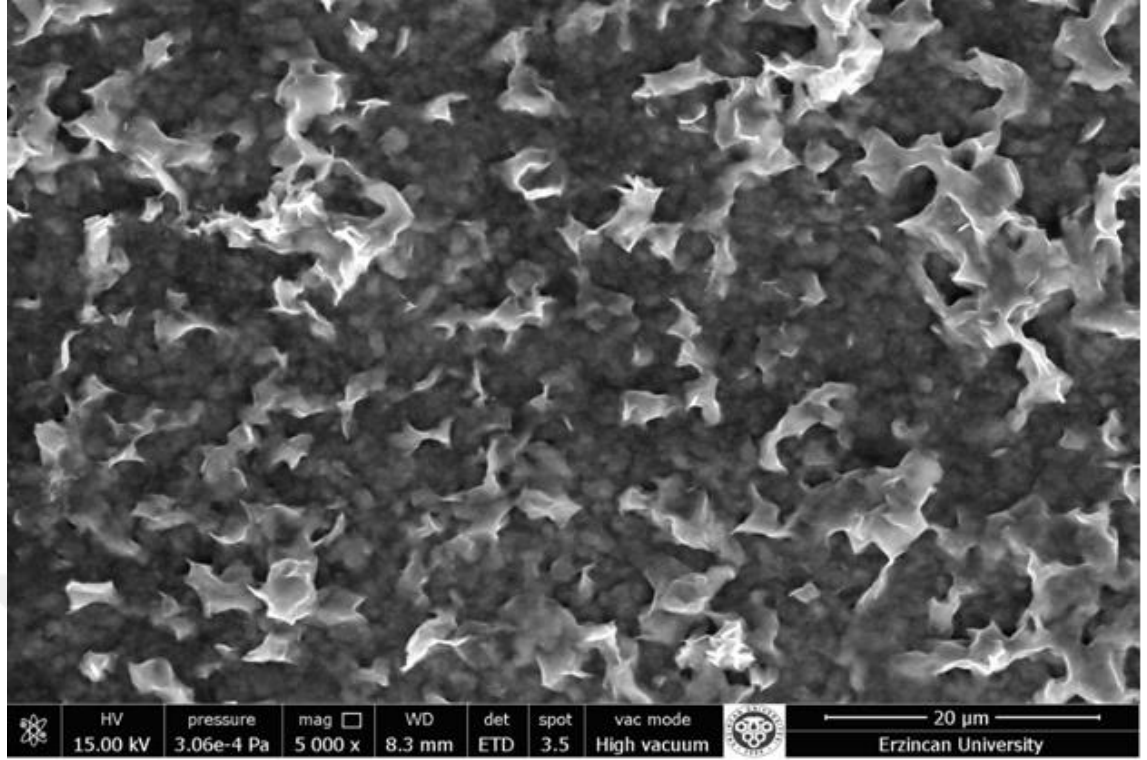
İnce filmlerin yüzey özellikleri elektriksel parametreleri önemli ölçüde etkilemektedir. Yüzey özelliklerini incelemek için kullanılan en önemli tekniklerden biri taramalı elektron mikroskopudur (SEM). SEM analizi sonucunda filmin pürüzlülüğü, homojenliği, yüzeye tutunması ve yüzey kusurları hakkında bilgi sahibi olunabilir. $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince filmlerin yüzey özelliklerini görüntülemek için FEI Quanta 450 FEG model Environmental Scanning Electron Microscope (FESEM) cihazı kullanılmıştır. Tüm ince filmlerin SEM analizleri 15.00 kV gerilimde ve 5.000 büyütmede yapılmıştır. 30, 40 ve 50 SILAR turuna sahip ince filmler için SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da verilmiştir.



Şekil 5.4. 30 SILAR turuna sahip Cd(OH)₂ ince filmin SEM görüntüsü



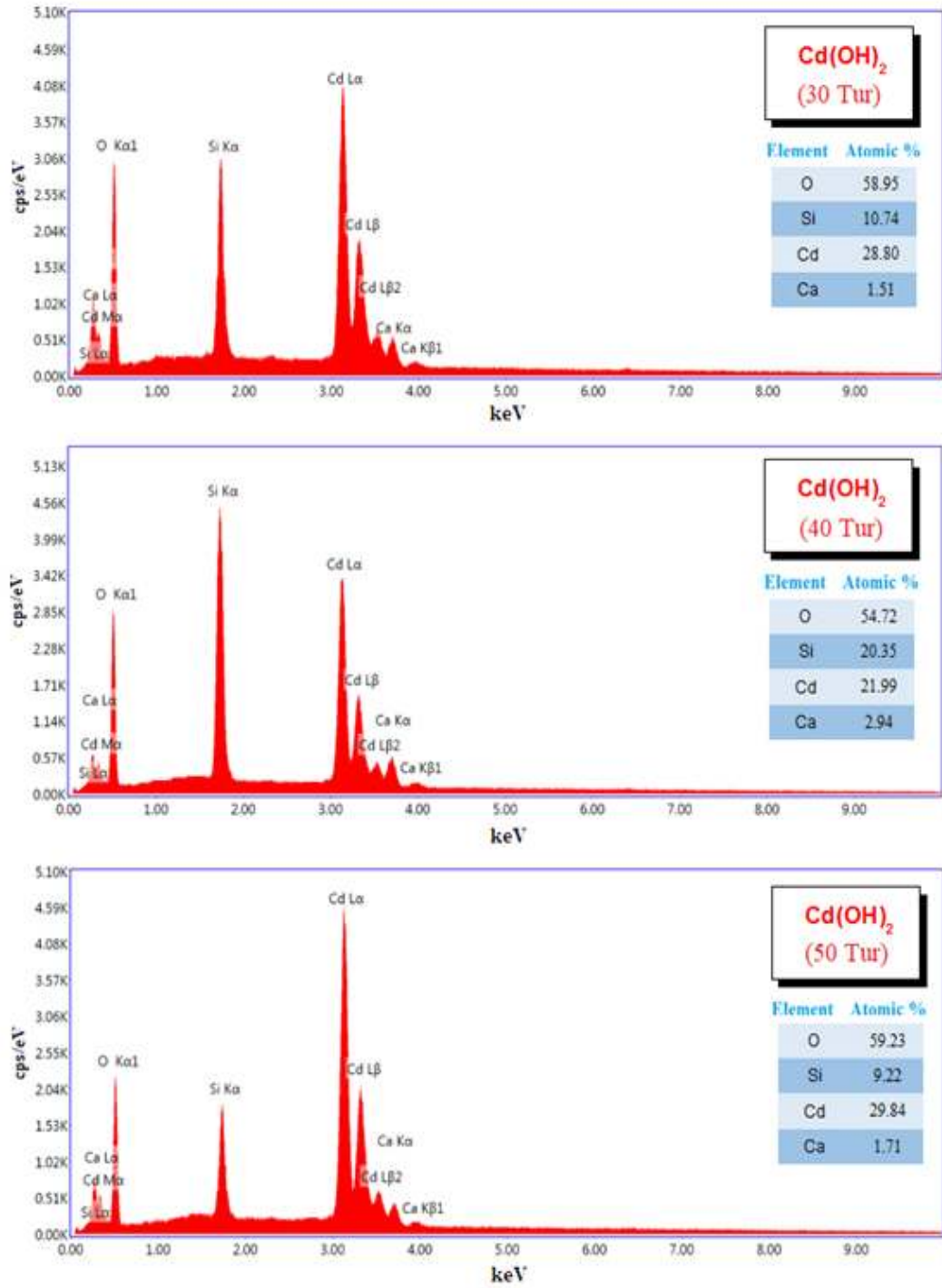
Şekil 5.5. 40 SILAR turuna sahip Cd(OH)₂ ince filmin SEM görüntüsü



Şekil 5.6. 50 SILAR turuna sahip Cd(OH)₂ ince filmin SEM görüntüsü

5.1.3. İnce filmlerin elemental özellikleri

Cd(OH)₂ ince filmlerin elemental özelliklerini belirlemek için EDAX analizi yapan ve FEI Quanta 450 FEG model Environmental Scanning Electron Microscope (FESEM) cihazında bulunan AMETEK marka enerji dağılım X-ışını spektroskopisi (EDAX) analizörü kullanılmıştır. 30, 40 ve 50 SILAR turuna sahip Cd(OH)₂ ince filmlerin EDAX analizleri Şekil 5.7' de verilmiştir.

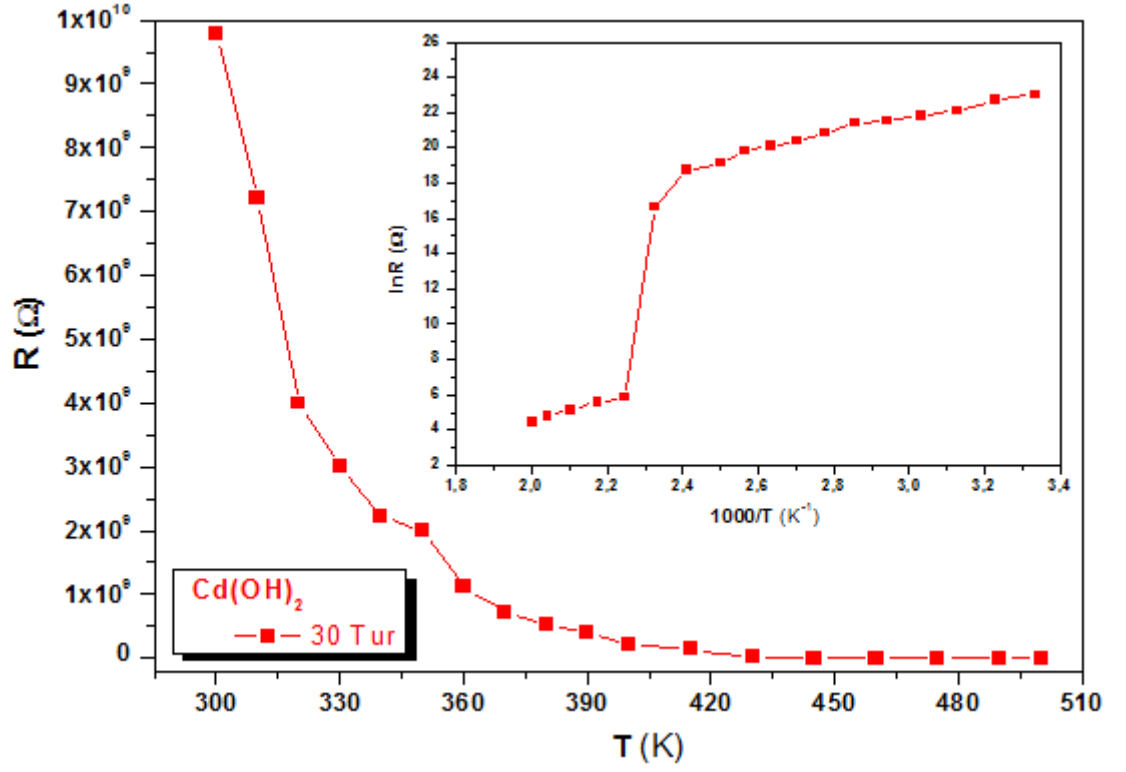


Şekil 5.7. 30, 40 ve 50 SILAR turuna sahip Cd(OH)₂ ince filmlerin EDAX analizleri

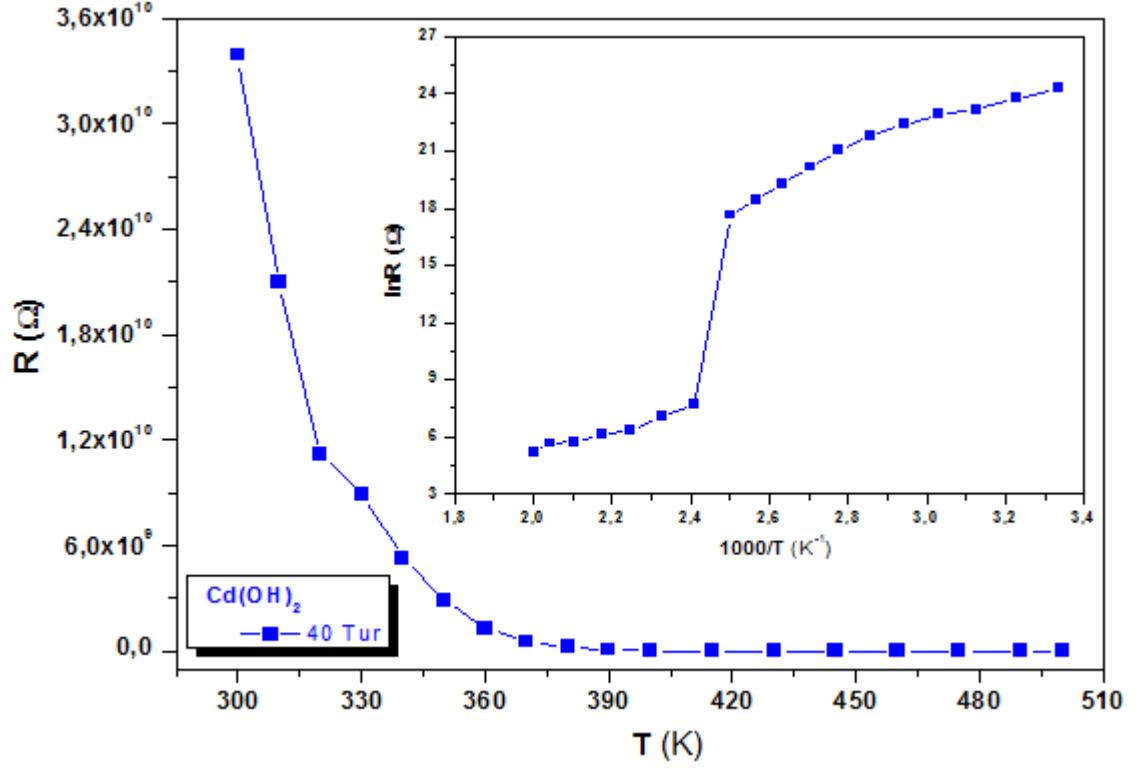
5.2. Elektriksel Karakterizasyon

5.2.1. İnce filmlerin akım-voltaj ölçüleri

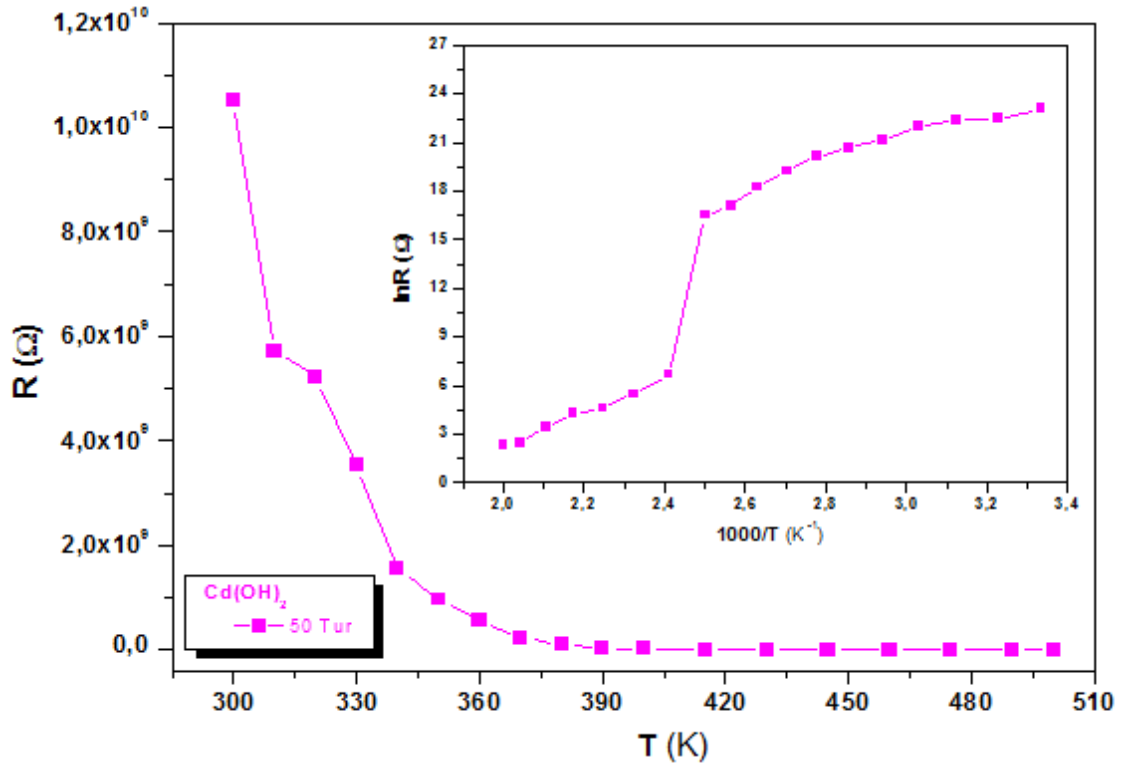
SILAR metodu ile büyütülen ince filmlerin direnç değerleri üzerinde sıcaklığın etkisini araştırmak için iki nokta uç yöntemi kullanılarak akım-voltaj (I-V) ölçüleri alınmıştır. Akım ölçme işlemi Keithley 2400 akım-gerilim cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 300 K'den başlayarak 500 K'e kadar belirli sıcaklık aralıklarında ölçümler alınmıştır. Her bir sıcaklık değerinde sistemin dengeye gelmesi için birkaç dakika beklenmiştir. Ölçülen akım-voltaj değerlerinden yararlanarak her sıcaklıkta 30, 40 ve 50 SILAR turuna ait $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince filmler için direnç hesabı yapılmıştır. Direnç değişim grafikleri sırasıyla Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da verilen şekilde elde edilmiştir. $\ln(R)-1000/T$ grafiklerindeki eğimlerden yararlanarak ince filmlerin aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır.



Şekil 5.8. 30 SILAR turuna sahip $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince filmin R-T ve $\ln R$ -1000/T grafikleri



Şekil 5.9. 40 SILAR turuna sahip $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince filmin R-T ve $\ln R$ -1000/T grafikler



Şekil 5.10. 50 SILAR turuna sahip $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince filmin R-T ve $\ln R$ -1000/T grafikleri

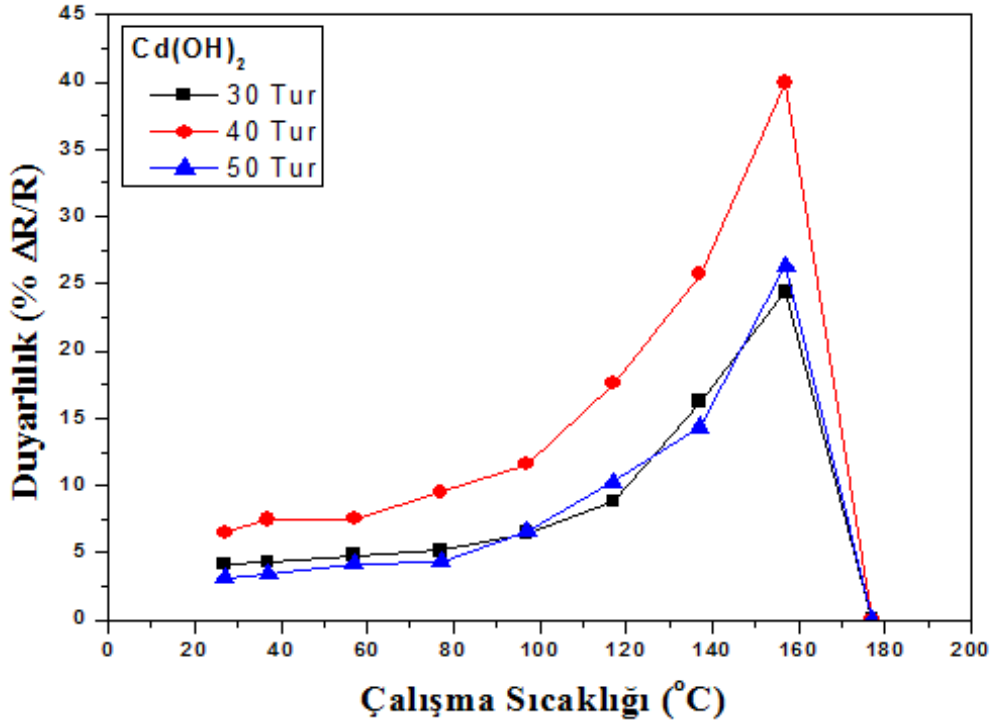
5.3. Gaz Ölçümleri

Bir gaz sensörünün duyarlılığı için gereken en önemli parametrelerden biri uygun çalışma sıcaklığıdır. En uygun çalışma sıcaklığının bulunması için geniş sıcaklık aralığında ölçümler yapılmıştır. Sıcaklığın artırılması yüzey reaksiyonları ve iyi bir duyarlılık elde etmek için gerekliken, çok fazla artışında ise malzeme yapısı bozulabilmekte ve sensörün çalışması etkilenebilmektedir (Gomez vd., 2016). Bu sebeple sensörlerin uygun çalışma sıcaklığının belirlenmesi önemlidir.

5.3.1. Sıcaklığa bağlı gaz algılama ölçümleri

Üretilen ince filmlerin gaz algılama özelliklerinin incelenebilmesi için uygun çalışma sıcaklığının belirlenmesi gereklidir. Bu sebeple 30, 40 ve 50 SILAR turuna sahip ince film sensörler için 50 ppm CO gazı konsantrasyonu altında yaklaşık oda sıcaklığı ile 180 °C aralığında 10 °C adımlarla gaz algılama ölçümleri yapıldı. Tüm ince film sensörlerin uygun çalışma sıcaklığı 157 °C olarak belirlendi. Sıcaklığın artışı ile tüm sensörlerin duyarlılığında artış gözlemlendi. Uygun çalışma sıcaklığının üzerindeki sıcaklık

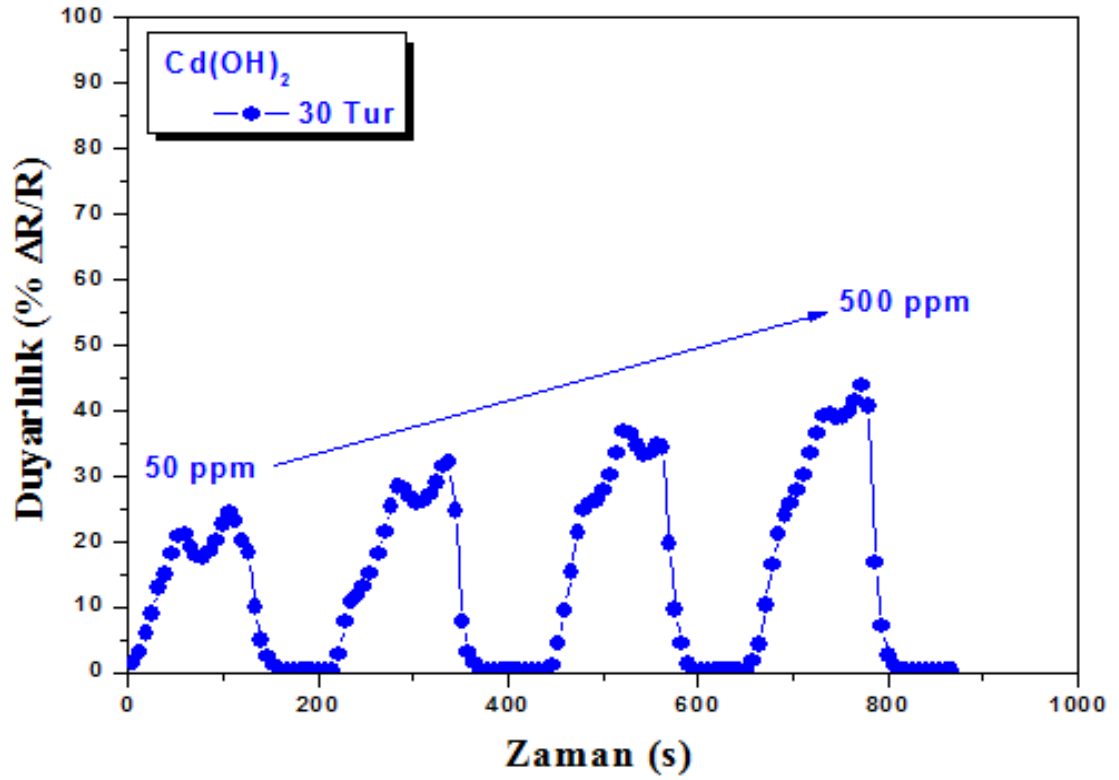
artışında ise duyarlılığın düştüğü gözlemlendi. Şekil 5.11’ de ince film sensörlerin 50 ppm CO konsantrasyonunda sıcaklığa bağlı olarak yapılan statik ölçümleri verilmiştir.



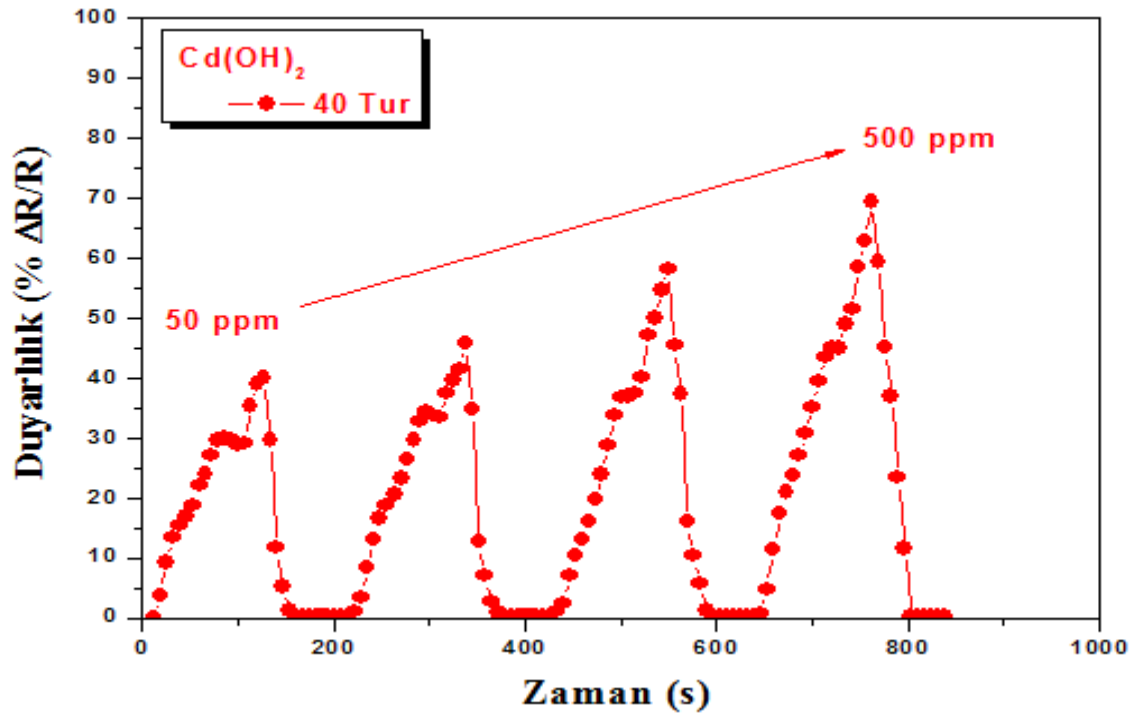
Şekil 5.11. 30, 40 ve 50 SILAR turuna ait Cd(OH)₂ ince film sensörlerin 50 ppm CO gazı konsantrasyonunda elde edilen duyarlılık-çalışma sıcaklığı grafiği

5.3.2. Konsantrasyona bağlı gaz algılama ölçümleri

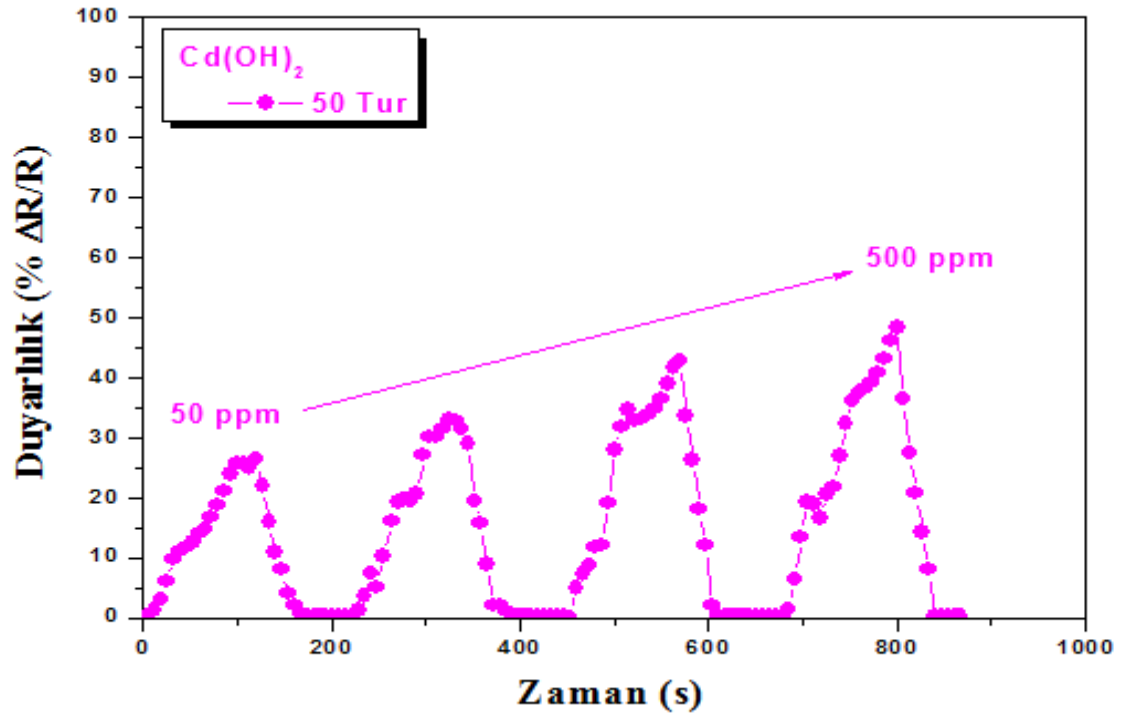
Sıcaklığa bağlı gaz algılama ölçümlerinin sonucunda uygun çalışma sıcaklığı tüm ince film sensörler için 157 °C olarak bulundu. Bulunan bu sıcaklık değerinden sonra 157 °C’ de ince film sensörlerin CO gazına karşı 50 ppm ile 500 ppm gaz konsantrasyonu aralığında dinamik gaz ölçümleri yapıldı. 30, 40 ve 50 SILAR turuna sahip Cd(OH)₂ ince film sensörleri için dinamik gaz ölçüm grafikleri sırasıyla Şekil 5.12, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’ te verilmiştir. Ayrıca Şekil 5.15’te tüm ince film sensörlere ait duyarlılık-gaz konsantrasyonu grafiği verilmiştir.



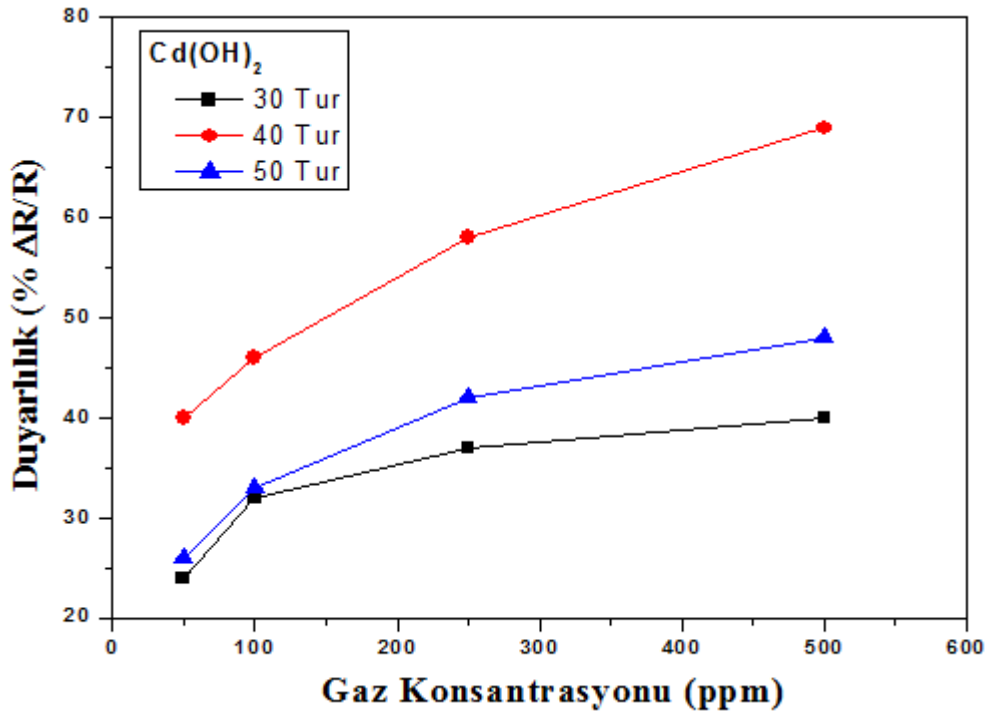
Şekil 5.12. 30 SILAR turuna ait Cd(OH)_2 ince film sensörün 50 ppm ile 500 ppm aralığında CO gazına karşı elde edilen duyarlılık-zaman grafiği



Şekil 5.13. 40 SILAR turuna ait Cd(OH)_2 ince film sensörün 50 ppm ile 500 ppm aralığında CO gazına karşı elde edilen duyarlılık-zaman grafiği

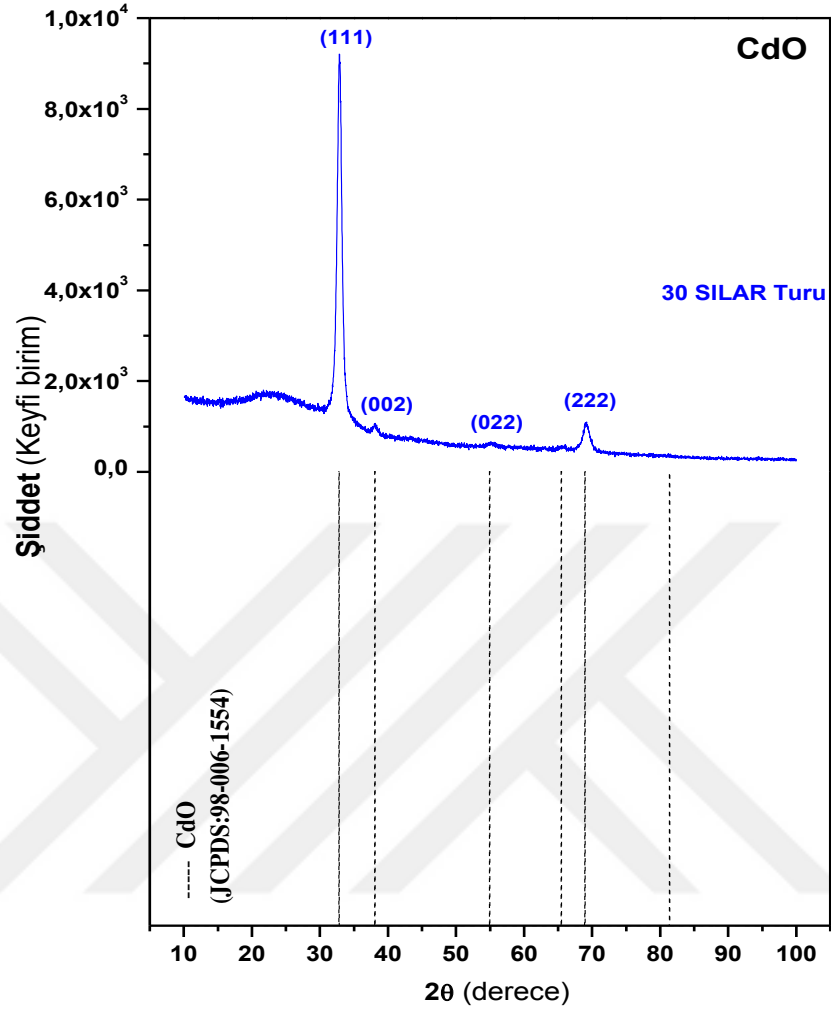


Şekil 5.14. 50 SILAR turuna ait $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince film sensörün 50 ppm ile 500 ppm aralığında CO gazına karşı elde edilen duyarlılık-zaman grafiği

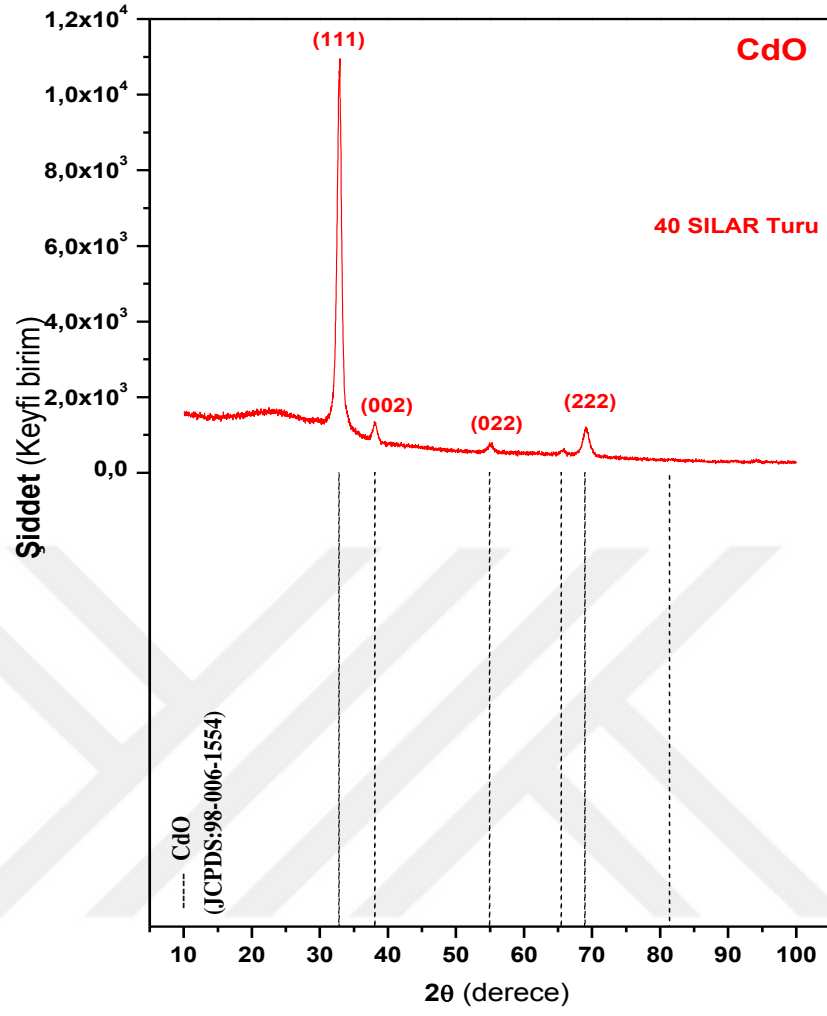


Şekil 5.15. 30, 40 ve 50 SILAR turuna ait $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince film sensörlerin 157 °C çalışma sıcaklığında ve 50 ppm ile 500 ppm aralığında CO gazına karşı elde edilen duyarlılık-gaz konsantrasyonu grafiği

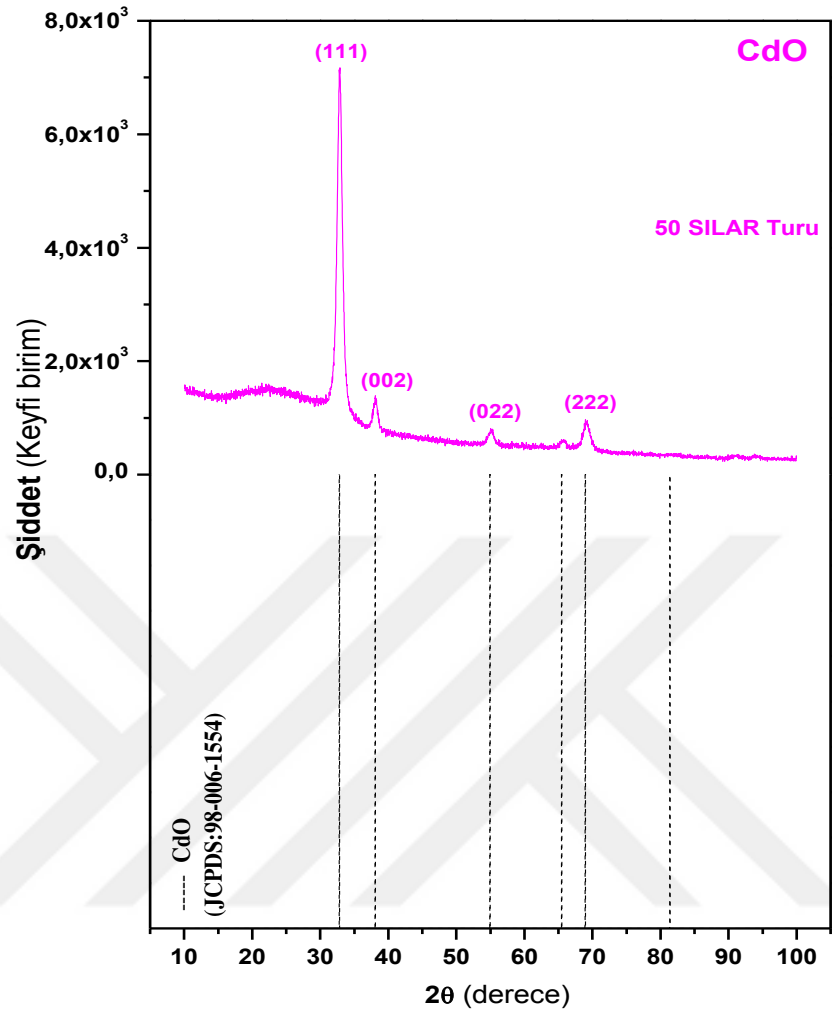
Gaz ölçümleri yapıldıktan sonra XRD ve SEM ölçümleri tekrar yapılarak çalışma sıcaklığının filmlerin yapısal ve morfolojik özellikleri üzerinde etkisi incelendi. Gaz ölçümleri yapıldıktan sonra ince filmlerin XRD ölçüm sonuçları Şekil 5.16-18’ de, SEM ölçüm sonuçları ise Şekil 5.19-21’de verilmiştir. Alınan XRD ve SEM ölçümlerinden görüldüğü gibi gaz ölçümleri yapıldıktan sonra çalışma sıcaklığının etkisi ile (yaklaşık 415 K sıcaklığından sonra) hekzagonal yapıdaki $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince filmleri kübik yapıdaki CdO ince filmlere dönüşmüş ve filmlerin morfolojik özelliklerinde önemli iyileşmeler gözlenmiştir (Bulakhe vd, 2014; Rajput vd, 2017).



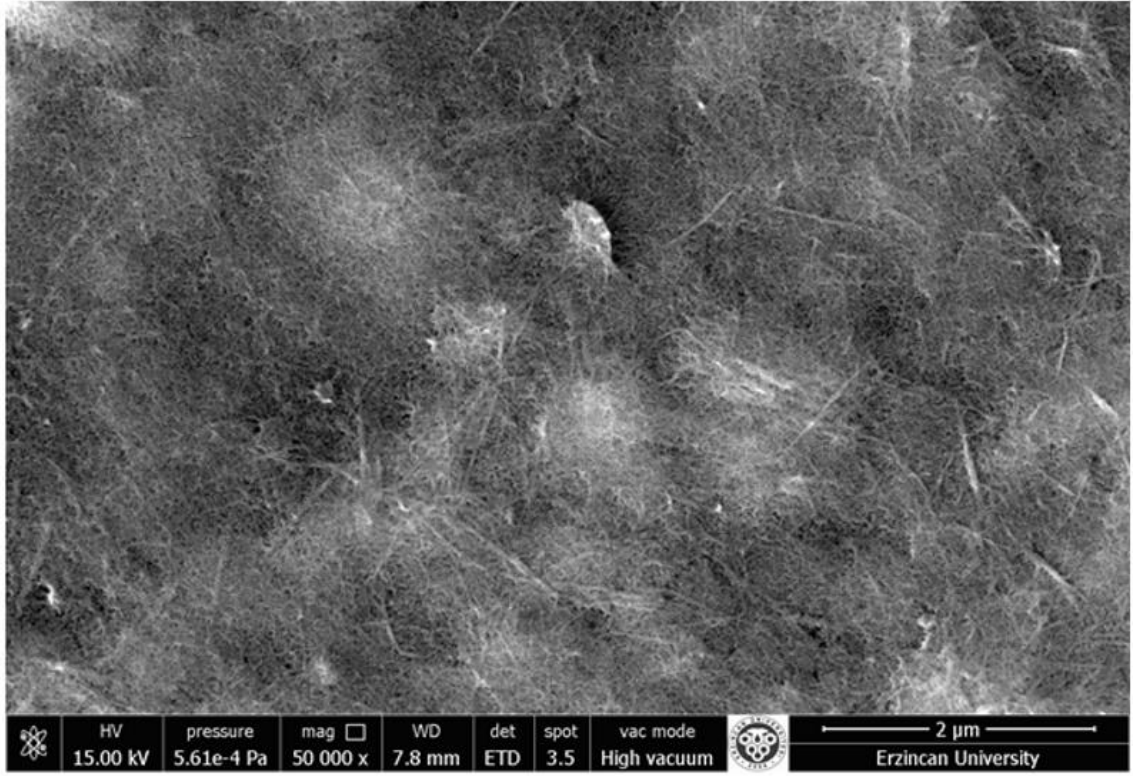
Şekil 5.16. 30 SILAR turuna ait $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince film sensörün gaz ölçümlerinden sonra çalışma sıcaklığıyla değişip CdO yapısına dönüşmesine ait X-ışını kırınım deseni



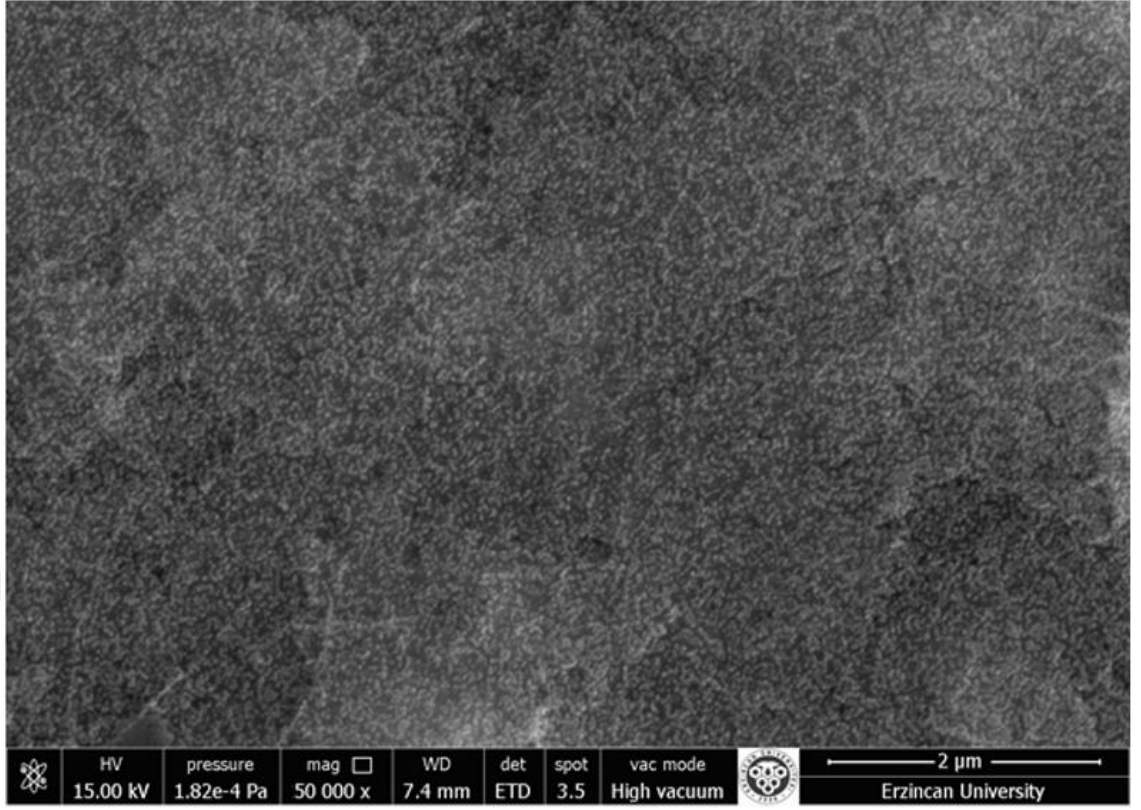
Şekil 5.17. 40 SILAR turuna ait $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince film sensörün gaz ölçümlerinden sonra çalışma sıcaklığıyla değişip CdO yapısına dönüşmesine ait X-ışını kırınım deseni



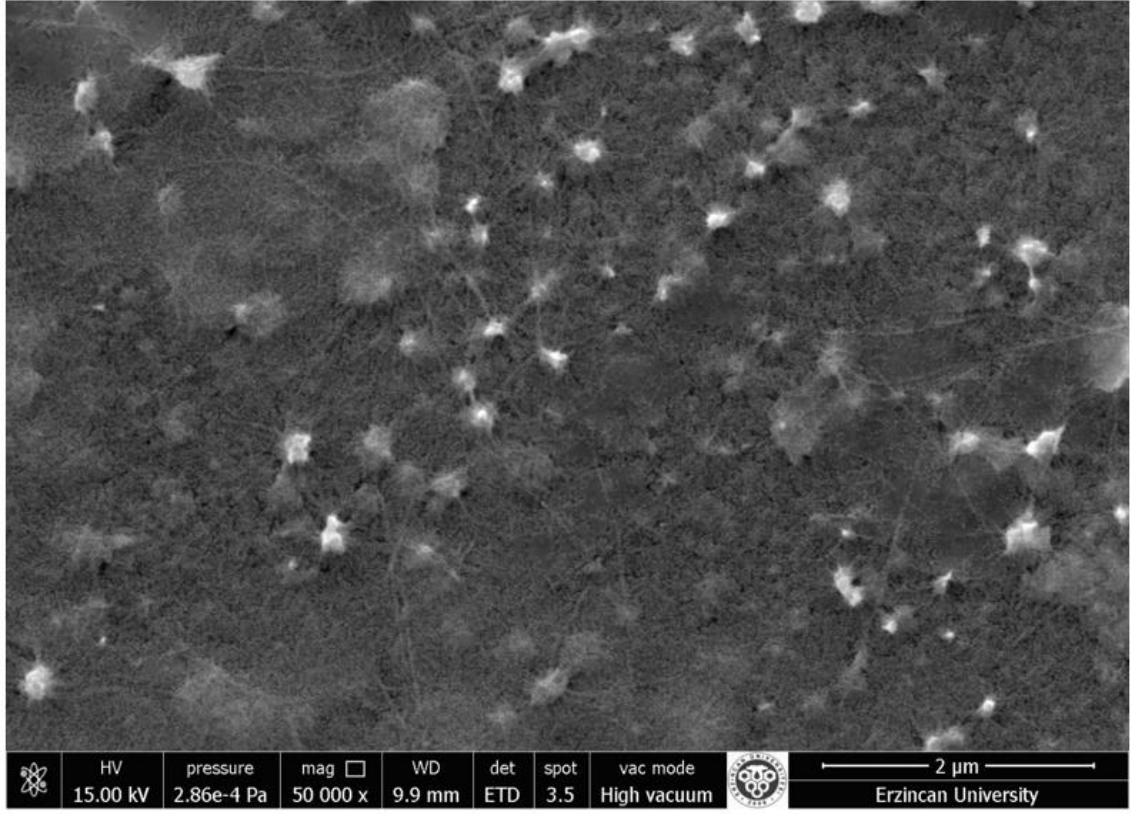
Şekil 5.18. 50 SILAR turuna ait Cd(OH)₂ ince film sensörün gaz ölçümlerinden sonra çalışma sıcaklığıyla değişip CdO yapısına dönüşmesine ait X-ışını kırınım deseni



Şekil 5.19.30 SILAR turuna ait $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince film sensörün gaz ölçümlerinden sonra çalışma sıcaklığıyla değişip CdO yapısına dönüşümüne ait SEM görüntüsü



Şekil 5.20.40 SILAR turuna ait $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince film sensörün gaz ölçümlerinden sonra çalışma sıcaklığıyla değişip CdO yapısına dönüşümüne ait SEM görüntüsü



Şekil 5.21.50 SILAR turuna ait $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince film sensörün gaz ölçümlerinden sonra çalışma sıcaklığıyla değişip CdO yapısına dönüşümüne ait SEM görüntüsü

6. SONUÇLAR

Teknolojinin gelişmesi, yeni endüstriyel çalışmalar, sağlık sektöründeki gelişmeler, ısınma gibi yaşamsal faaliyetler ve bunlara bağlı olarak meydana çıkan zehirli gazların oluşturduğu hava kirlilikleri insan sağlığı ve çevre için tehdit oluşturmaktadır. Meydana çıkan CO, CO₂ gibi zehirli gazların tespiti gaz sensörleri tarafından yapılmaktadır.

Günümüzde ortamdaki farklı gazları algılayabilen birçok sensör bulunmaktadır. Bu sensörlerde ayırt edici özelliklerin en önemlileri ortamda bulunan gaza karşı gösterdikleri yüksek hassasiyet ve düşük maliyettir. Bu iki önemli özellik dışında seçicilik, stabilite, tepki süresi, geri dönüş süresi, çalışma sıcaklığı ve ömür gibi özelliklerde gaz sensörleri için olması gereken parametrelerdir. Yüksek sıcaklık ve basınç gibi zorlu şartlarda çalışabilme, düşük sıcaklıkta hassas duyarlılık, düşük maliyet gibi özellikleriyle diğer kimyasal sensörlerle kıyaslandığında metal oksit gaz sensörleri daha üstündürler.

Gaz sensörlerinin çalışma prensibi oksijen ile ortamda bulunan hedef gazın etkileşmesi sonucu sensör maddesinde meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişimlerin verilerine dayanır. Hedef gaz ile oksijen adsorblanır, yüzey elektronlarında artış veya azalış meydana gelir. Elektrik direnci ölçülerek hedef gazın konsantrasyon değişimi ve karakteristiği belirlenebilmektedir.

Gaz sensörlerinin çalışmasına etki eden bazı faktörler vardır. Bunlara sıcaklık ve kontak konfigürasyonunu örnek verilebilir. Sensörün yüzey içeriği, adsorpsiyonu hızlandıran faktörler, kimyasal ayrışma ve diğer reaksiyonlar sıcaklıktan etkilenir.

Katalitik, elektrokimyasal, kızılötesi, optik, akustik ve yarıiletken olmak üzere birçok gaz sensörü çeşidi bulunmaktadır. Bunlardan yarıiletken gaz sensörleri içerisinde yer alan metal oksit yarı iletken gaz sensörleri kolay üretim, maliyet düşüklüğü ve birçok gaza karşı yüksek duyarlılık gösterme özellikleri ile en çok tercih edilmektedir.

Bu tez çalışmasında SILAR metodu ile 30,40 ve 50 tur olmak üzere büyütülen Cd(OH)₂ ince filmlerin CO gazına karşı gösterdikleri duyarlılık incelenmiştir. Bu ince filmler vakum gerektirmeyen, kolay uygulanabilen ve kontrol edilebilen SILAR metodu ile cam taban malzeme üzerine büyütüldü. Büyütme sırasında cam taban malzeme birçok deneysel çalışmayla belirlenen değerlere göre sırasıyla [Cd(NH₃)₄]²⁺ bileşiminden

oluşan sulu çözelti içerisinde 20 sn, 90 °C deki sıcak su içerisinde 7sn, havada 60 sn ve saf su içerisinde 20 sn bekletildi. Bu işlem 3 ayrı cam taban malzeme üzerine sırasıyla 30, 40 ve 50 tur olmak üzere tekrarlanarak Cd(OH)₂ ince filmler elde edildi. Büyütülen Cd(OH)₂ ince filmlerin ilk olarak XRD ile yapısal, SEM ile morfolojik, EDAX ile elemental analizleri yapıldı. Daha sonra bu ince filmlerin CO gazını algılama özellikleri incelendi.

6.1. X-ışını Kırınımı (XRD) Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Büyütme işleminde kullanılan çözeltilerin türleri ve molarite değerleri kaliteli ince film elde etmek için çok önemli parametredir. Kullanılan çözeltilerin yoğunlukları yetersiz olursa ince filmler amorf yapıda oluşur (Salunkhe vd., 2008). Çözeltilerin yoğunluğu artarsa yapı daha kararlı olacaktır ve yapıya dışarıdan madde girmesi zorlaşacaktır. Eğer kullanılan çözeltilerin yoğunlukları çok fazla olursa ince filmin kalınlığı çok artmakta ve bozuk bir yapı oluşmasına sebep olmaktadır. Hatta yapıdan kopmalar meydana gelebilmektedir. Büyütülen Cd(OH)₂ ince filmlerin X-ışını kırınım ölçüleri XRD cihazı ile incelendi. XRD ölçümlerinde büyük ve yarı pik genişlikleri dar olan pikler kristalleşmenin iyi olduğunu gösterirken, küçük ve yarı pik genişlikleri geniş olan pikler kristalleşmenin iyi olmadığını gösterir (Karaduman, 2017). Elde ettiğimiz Cd(OH)₂ ince filmlerin XRD desenleri tur sayılarına göre ayrı ayrı olmak üzere Şekil 5.1, Şekil 5.2' de ve Şekil 5.3' te verilmiştir. Bu ölçümler sonucunda ince filmlerin farklı şiddet ve yönelimdeki piklerle polikristal yapıda olduğu hekzagonal fazda kristalleştiği, yapısal özelliklerinin SILAR tur sayısına bağlı olarak değiştiği gözlemlendi. Tur sayısı 40 SILAR turuna kadar arttıkça piklerin şiddetleri artmakta yarı pik genişlikleri azalmaktadır. Tur sayısı 40 turdan 50 tura artarken pik şiddeti azalmakta ve yarı pik genişliği artmaktadır. Bu sonuç, SILAR metodu ile büyütülen Cd(OH)₂ ince filmler için tur sayısının en uygun değeri 40 tur olarak belirlenmiştir.

6.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Sonuçlarının Değerlendirilmesi

SILAR yöntemiyle 30, 40 ve 50 tur olmak üzere büyütülen Cd(OH)₂ ince filmlerin SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 5.4, Şekil 5.5' te ve Şekil 5.6' da verilmiştir. Görüntüler 5.000 büyütmede alınmıştır. SEM görüntülerinden, filmlerin cam taban malzeme yüzeyine yoğun bir şekilde kaplandığı, filmlerin yüzeyinde bölgesel yığılmaların olduğu görülmüştür. Bu bölgesel yığılmalar 40 SILAR turunda büyütülen filmde azalmış, 50

SILAR turunda büyütülen filmde ise daha fazla artmıştır. 40 SILAR turundan sonra filmlerin yüzey morfolojisinin bozulduğu belirlenmiştir. Analizlerden, en iyi yüzey görüntüsünün 40 SILAR turuna sahip $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince filme ait olduğu görülmüştür. Bu sonuç, XRD ölçüm sonuçlarını desteklemektedir.

6.3. Enerji Dağılımlı X-ışını Analizörü (EDAX) Sonuçlarının Değerlendirilmesi

SILAR metoduyla 30, 40 ve 50 tur olmak üzere büyütülen $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince filmlerin kimyasal bileşen analizleri için alınan EDAX ölçüleri Şekil 5.7’ de verilmiştir. Bu ölçümler, $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince filmlerin stikiyometrik olarak büyüdüğünü göstermiştir. EDAX analizlerindeki Si ve Ca piklerinin kullanılan cam taban malzemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Yıldırım vd., 2019; Soltabayev vd., 2019).

6.4. $\text{Cd}(\text{OH})_2$ İnce Filmlerin Gaz Algılama Sonuçlarının Değerlendirilmesi

$\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince filmlerin CO gazına karşı duyarlılıklarını ölçmek için Şekil 4.1’ de gösterilen metal levha üzerine lazer sistemiyle uygun maskeler kullanılarak hazırlanmış Inter Digital Transduser (IDT) gümüş elektrotlar ince filmlerin üzerine kaplandı. $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince film sensörler elde edildi.

Sıcaklığa ve gaz konsantrasyonuna bağlı olarak 30, 40 ve 50 SILAR turuna sahip $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince film sensörlerin gaz ölçümleri yapıldı.

6.4.1. Sıcaklığa bağlı gaz algılama ölçümlerinin sonuçlarının değerlendirilmesi

Gaz algılama özelliklerinin incelenebilmesi için öncelikle önemli bir sensör parametresi olan uygun çalışma sıcaklığının belirlenmesi gerekir. Bu sebeple SILAR metoduyla büyütülen 30, 40 ve 50 SILAR turuna sahip ince film sensörlere sabit 50 ppm CO gazı konsantrasyonu altında oda sıcaklığından başlanarak belirli aralıklarla 180 °C’ ye kadar statik gaz algılama ölçümleri yapıldı. Yapılan ölçümler Şekil 5.11’ de verilmiştir. Duyarlılığın en yüksek olduğu sıcaklık çalışma sıcaklığı olarak belirlendi. Bu sıcaklık değerinin tüm sensörler için 157 °C olduğu görüldü. Sensörlerinin duyarlılığı 157 °C ‘ye kadar artarken bu sıcaklığın üzerine çıkıldığında azaldığı gözlemlendi. Bunun sebebi elektriksel kararsızlıktır. Elektriksel kararsızlık, ortamdaki karışık oksit fazlarından kaynaklanmaktadır. Buna bağlı olarak çalışma sıcaklığının etkisiyle algılayıcı yüzey tarafından kimyasal olarak adsorplanan oksijen molekülleri O^{2-} , O^- , O_2^{2-} şeklinde

gerçekleşip algılayıcı yüzeydeki elektron sayısını değiştirmektedir. Karışık oksit fazların sıcaklıkla azalması sonucu kararsızlık azalmaktadır (Gomez vd., 2016). Yüzey özelliği, adsorpsiyonu hızlandıran faktörler, kimyasal ayrışma ve diğer reaksiyonlar sıcaklığa bağlı olarak değişen parametreler olduğu için sensör duyarlılıkları da sıcaklık ile değişmektedir. Sıcaklıktaki daha fazla artış algılayıcı yüzeyde meydana gelen reaksiyonlar daha hızlı olacağından gaz moleküllerinin yüzeye difüzyonu yeterli miktarda olamaz. Böylece çalışma sıcaklığından daha büyük sıcaklıklarda gaz algılama duyarlılığı azalmaktadır (Karaduman, 2017).

6.4.2. Konsantrasyona bağlı gaz algılama ölçümlerinin sonuçlarının değerlendirilmesi

Sıcaklığa bağlı gaz ölçümlerinin sonunda belirlenen 157 °C uygun çalışma sıcaklığı altında sensörlerin 50 ppm ile 500 ppm CO gazı konsantrasyonu aralığında dinamik ölçümleri yapılarak duyarlılık değerleri belirlendi. 30, 40 ve 50 SILAR turuna sahip Cd(OH)₂ ince film sensörlerin ölçüm sonuçları sırasıyla Şekil 5.12’de, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’ te verilmiştir. Şekil 5.12’de, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’ te görüldüğü gibi CO gaz konsantrasyonu arttıkça tüm sensörlerde duyarlılığın arttığı gözlemlendi. Bunun nedeni yüzeyin daha fazla hedef gazla etkileşime girmesidir. Tüm Cd(OH)₂ ince film sensörlerin hedef gaza (CO gazı) maruz bırakıldığında sensör duyarlılığının giderek arttığı, sensör yüzeyinin kuru havaya maruz bırakıldığında ise tüm sensörlerde duyarlılığın başlangıç değerlerine geri döndüğü tespit edildi.

Şekil 5.15’ te tüm sensörlere ait duyarlılık grafiği verilmiştir. Şekil 5.15’te de görüldüğü gibi 40 SILAR turuna sahip Cd(OH)₂ ince film sensörün gaz algılama özelliğinin diğer ince film sensörlerden daha iyi olduğu gözlemlendi. Tablo 6.3’ te 30, 40 ve 50 SILAR turuna sahip Cd(OH)₂ ince film sensörlerin 50, 100, 250 ve 500 ppm CO gaz konsantrasyonu altında elde edilen duyarlılık değerleri verilmiştir.

Tablo 6.1. Cd(OH)₂ ince film sensörlerin 157 °C çalışma sıcaklığındaki gaz algılama ölçüm sonuçları

Cd(OH) ₂ İNCE FİLM SENSÖRLERİ	SENSÖR YANITI			
	CO Gaz Konsantrasyonu			
	50 ppm	100 ppm	250 ppm	500 ppm
30 SILAR TURU	%24	%32	%37	%40
40 SILAR TURU	%40	%46	%58	%69
50 SILAR TURU	%26	%33	%42	%48

Gaz ölçümlerinden sonra çalışma sıcaklığının filmlerin yapısı üzerinde meydana getirdiği değişimi görmek için yapılan XRD ve SEM ölçümleri 30, 40 ve 50 SILAR turuna ait Cd(OH)₂ ince filmler için sırasıyla Şekil 5.16-18 ve Şekil 5.19-21’de verilmiştir. XRD ölçüm sonuçlarından hekzagonal fazda bulunan Cd(OH)₂ ince filmlerin yaklaşık 415 K sıcaklığından sonra kübik faza sahip CdO ince film yapısına dönüştüğü gözlemlendi. Bu ölçümler filmlerin yapısındaki suyun çalışma sıcaklığı ile atıldığını göstermektedir (Bulakhe vd, 2014; Rajput vd, 2017). SEM ölçüm sonuçlarından, çalışma sıcaklığı ile filmlerin yüzeyindeki bölgesel yığılmaların azaldığı daha yoğun, homojen ve taban malzeme yüzeyinde tabakalaşmanın daha iyi olduğu görülmektedir. Özellikle 40 SILAR turuna ait filmin yüzeyinde bölgesel yığılmaların tamamen kalktığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, çalışma sıcaklığının filmlerin yapısal ve morfolojik özelliklerini önemli derecede değiştirdiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, elektriksel ölçümlerle de uyum içindedir.

6.5. Sıcaklığa Bağlı Direnç Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

SILAR metodu ile büyütülen 30, 40 ve 50 SILAR turuna sahip Cd(OH)₂ ince film sensörlerin direnç değerleri üzerine sıcaklığın etkisini belirlemek için iki nokta uç yöntemi kullanılarak akım-voltaj ölçümleri yapıldı. 300 K’den başlayarak 500 K’e kadar belirli aralıklarla ölçümler alındı. 30, 40 ve 50 SILAR turlarına ait Cd(OH)₂ ince filmlerin sıcaklığa bağlı direnç değişim grafikleri (R-T ve InR- 1000/T) sırasıyla Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da verilmiştir. Sıcaklık arttıkça direnç değerinin azaldığı görüldü. Bu sonuç, büyütülen ince filmlerin yarıiletken davranışı sergilediğini göstermiştir (Yıldırım 2010; Çorlu 2017). Elde edilen sonuçlar Tablo 6.2’ de verilmiştir.

Tablo 6.2. Cd(OH)₂ ince filmlerin 300 K-500 K sıcaklık aralığındaki direnç değerleri

Cd(OH)₂ İNCE FİMLERİN DİRENÇ DEĞERLERİ			
SICAKLIK (K)	30 TUR	40 TUR	50 TUR
300	9,78x10 ⁹	3,39x10 ¹⁰	1,05x10 ¹⁰
310	7,21x10 ⁹	1,2x10 ¹⁰	5,72x10 ⁹
320	3,99x10 ⁹	1,12x10 ¹⁰	5,21x10 ⁹
330	3,01x10 ⁹	8,95x10 ⁹	3,52x10 ⁹
340	2,21x10 ⁹	5,3x10 ⁹	1,54x10 ⁹
350	2,01x10 ⁹	2,93x10 ⁹	9,54x10 ⁸
360	1,12x10 ⁹	1,33x10 ⁹	5,58x10 ⁸
370	7,25x10 ⁸	5,57x10 ⁸	2,24x10 ⁸
380	5,25x10 ⁸	2,29x10 ⁸	8,54x10 ⁷
390	4,12x10 ⁸	1,01x10 ⁸	2,54x10 ⁷
400	2,09x10 ⁸	4,5x10 ⁷	1,54x10 ⁷
415	3,39x10 ⁷	2150	802
430	1,74x10 ⁷	1160	242
445	344,38	581,88	101
460	264,37	451,687	76,06
475	169,35	321,056	32,11
490	119,919	288,08	12,11
500	83,175	188,808	10,4

Ayrıca Şekil 5.8-10’ da verilen $\ln R-1000/T$ grafiklerinden yararlanarak 30, 40 ve 50 SILAR turlarına ait ince filmlerin aktivasyon enerjileri (E_a) hesaplanıp Tablo 6.3’ te verilmiştir.

Tablo 6.3. $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ince filmlerin ince filmlerin aktivasyon enerjileri

$\text{Cd}(\text{OH})_2$	E_a (eV)	
	Düşük Sıcaklık Bölgesi	Yüksek Sıcaklık Bölgesi
30 TUR	0,396	0,495
40 TUR	0,684	0,511
50 TUR	0,673	0,912

KAYNAKLAR

- Abbas, M., Tawfik, W. and Chen, J. (2018) “CdO Nanorods and Cd(OH)₂/Ag Core/Satellite Nanorods: Rapid and Efficient Sonochemical Synthesis, Characterization and Their Magnetic Properties”, *Ultrasonics-Sonochemistry*, 40, 577-582.
- Açıkbaş, Y. (2006) “1,3-Bis-(4-İmino-3-Hidroksi-Benzoikası) İndan Maddesinin Langmuir-Blodgett İnce Film Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir.
- Aydın, H. (2013) “ZnO Esaslı Nanoyapılı Yarıiletken İnce Filmlerin Büyütülmesi ve Gaz Sensörlerinin Üretilmesi”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 23-25, 32-48.
- Bagal, V.S., Patil, G.P., Deore, A.B., Baviskar, P.K., Suryawanshi, S.R., More, M.A. and Chavan, P.G. (2016) “High Current Density and Low Turn-On Field From Aligned Cd(OH)₂ Nanosheets”, *Chemical Physics Letters*, 650, 7-10.
- Baytöre, C. (2013) “ Değişik Fonksiyonel Gruplara Sahip Kaliksaren Molekülleri Kullanılarak Organik Uçucu Gaz Sensörlerinin Geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 16-21.
- Berna, A. (2010) “Metal Oxide Sensors for Electronic Noses and Their Application to Food Analysis” *Sensors*, 10, 3882-3910.
- Bochenkov, V.E. and Sergeev, G.B. (2010) “Sensitivity, Selectivity and Stability of Gas-Sensitive Metal-Oxide Nanostructures”, *American Scientific Publishers*, V:3, 31-52.
- Bulakhe, R.N. and Lokhande, C.D. (2014) “Chemically Deposited Cubic Structured CdO Thin Films: Use in Liquefied Petroleum Gas Sensor”, *Sensors and Actuators*, B 200, 245-250.
- Cömert, B. (2015) “TiO₂ İnce Film Sensörlerin Geliştirilmesi” Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 13-17, 20-22.
- Çakır, C. (2014) “Metal Oksit İnce Filmlerin Gaz Sensörü Uygulamalarının Araştırılması” Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 5-18, 36-38.
- Çorlu, T. (2017) “Zu_{1-x}Cu_xO Kompleks MOS Sensörlerinde Sıcaklığa Bağlı Gaz Algılama Özelliklerinin İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 12-20, 29-35, 43-57.
- Dhawale, D.S., More, A.M., Latthe, S.S., Rajpure, K.Y. and Lokhande, C.D. (2008) “Room Temperature Synthesis and Characterization of CdO Nanowires By Chemical Bath Deposition (CBD) Method”, *Applied Surface Science*, 254, 3269-3273.

- Durrani, S.M.A. and Al-Kuhaili, M.F. (2008) "Effect of Biasing Voltages and Electrode Metals and Materials on The Sensitivity of Electron Beam Evaporated HfO_2 Thin CO Sensor", *Materials Chemistry and Physics*, 109(2), 56-60.
- Eranna G., Joshi, B. C., Runthala, D.p., Gupta, R. P. (2004) "Oxide Materials for Development of Integrated Gas Sensors-A Comprehensive Review", *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 29, 111-188.
- Ferri, F.F., Marx, J.A., Heikki, E.N. and Runyon, M.S. (2006) "Carbon Monoxide Poisoning", In: Ferri FF. Editor. First Consult, Elsevier.
- Fort A., Serrano-Santos, M.B., Spinicci R., Olivieri N., Vigroli, V. (2004) "Electronic Noses Based on Metal Oxide Gas Sensors: The Problem of Selectivity Enhancement", *Proceedings of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Como, Italy.
- Galioglu S., Karaduman, I., Çorlu, T., Akata, B., Yıldırım, M.A., Ateş, A. and Acar, S. (2018) "Zeolite A Coated $\text{Zn}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}$ MOS Sensors For NO Gas Detection", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29, 1356-1368.
- Ghoshal, T., Kar, S. and Chaudhuri, S. (2007) "Synthesis of Nano and Micro Crystals of $\text{Cd}(\text{OH})_2$ and CdO in The Shape of Hexagonal Sheets and Rods", *Applied Surface Science*, 253, 7578-7584.
- Ghoshal, T., Kar, S. and De, S.K. (2009) "Morphology Controlled Solvothermal Synthesis of $\text{Cd}(\text{OH})_2$ and CdO Micro/Nanocrystals on Cd Foil", *Applied Surface Science*, 255, 8091-8097.
- Gómez-Pozos, H., Arredondo, E. J. L., Álvarez, A. M., Biswal, R., Kudriavtsev, Y., Pérez, J.V., Casallas-Moreno, Y. L. and Amador, M. L. O. (2016) "Cu-doped ZnO Thin Films Deposited by a Sol-Gel process Using Two Copper Precursors: Gas-Sensing Performance in a Propane Atmosphere", *Materials*, 9, 1-16.
- Göpel W., Hesse, J., Zennel, J. N. (1989) *Sensors A Comprehensive Survey*, New York, 641s.
- Gujar, T.P., Shinde, V.R., Kim, W.Y., Jung, K.D., Lokhande, C.D. and Joo, O.S. (2008) "Formation of CdO Films From Chemically Deposited $\text{Cd}(\text{OH})_2$ Films as a Precursor", *Applied Surface Science*, 254, 3813-3818.
- Günkaya, G., (2008) "Nanokristalin SnO_2 sentezlemesi ve elektroforez kaplama yöntemiyle sensör üretimi", Yüksek Lisans Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 33-34.
- Günkaya, G., (2008) "Nanokristalin SnO_2 sentezlemesi ve elektroforez kaplama yöntemiyle sensör üretimi", Doktora Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir.

- Hou, L., Zhang, C., Li, L., Du, C., Li, X., Kang, X. F. and Chen, W. (2018) “CO Gas Sensors Based on P-Type CuO Nanotubes and CuO nanocubes: Morphology and Surface Structure Effects on The Sensing Performance”, *Talanta*, 188, 41-49.
- Hübner, M., Simion, C.E., Haensch, A., Barsani, N., Weimar, U. (2010) “CO Sensing Mechanism With WO₃ Based Gas Sensors”, *Sensors and Actuators*, B:153, 103-106.
- Kabakcı, M. (2013) “SnO₂ Karbonmonoksit Gaz Sensörlerinin Üretimi ve Elektriksel Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Muğla Sıtkı Kocaman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Muğla, 9-12.
- Karaduman, I. (2013) “Grafen Yapıların Karbon Oksit Ortamda Elektriksel Karakterizasyonu” Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 17-24, 27-30.
- Karaduman, I., Çorlu, T., Yıldırım, M.A., Ateş, A. and Acar, S. (2017) “Hydrogen Gas Sensing Characteristics of Nanostructured NiO Thin Films Synthesized By SILAR Method”, *Journal of Electronic Materials*, Vol.46, No.7.
- Karaduman, I. (2017) “Kompakt Zeolite Modifiyeli Gaz Sensörünün Tasarımı Üretimi ve Karakterizasyonu”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Karami H. (2010) “Investigation of Sol-Gel Synthesized CdO-ZnO Nanocomposite for CO Gas Sensing”, *International Journal of Electrochemical Science*, 5, 720-730.
- Kim, W., Baek, M. and Yong, K. (2016) “Fabrication of ZnO/CdS, ZnO/CdO Core/Shell Nanorod Arrays and Investigation of Their Ethanol Gas Sensing Properties” *Sensors and Actuators*, 223(2), 599-605.
- Kim, J. H., Mirzaei, A., Kim, H. W. and Kim, S.S. (2018) “Low Power-Consumption CO Gas Sensors Based on Au-Functionalized SnO₂-ZnO Core-Shell Nanowires”, *Sensors and Actuators*, B 267, 597-607.
- Kita, J., Engelbrecht, A., Schubert, F., Grob, A., Rettig, F. and Moos, R. (2015) “Some Practical Points to Consider With Respect to Thermal Conductivity and Electrical Resistivity of Ceramic Substrates for High Temperature Gas Sensors” *Sensors and Actuators B*, 213(2), 541-546.
- Korotcenkov, G., (2007) “Metal Oxides for Solid-State Gas Sensors: What Determines Our Choice?”, *Materials Science and Engineering*, B 139, 1-23.
- Korotcenkov, G., (2008) “The Role of Morphology and Crystallographic Structure of Metal Oxide in Response of Conductometric-type Gas Sensors”, *Materials Science and Engineering*, R 61, 1-39.
- Li, C. and Yin, Z. (July 29-31 2010) “Infrared Gas Sensors”, *ISECS'10*, 101-104.

- Li, H. Y.; Cai, X. Z., Ding, C. J. and Guo, X. (2015) "Gigantically Enhanced NO Sensing Properties of WO₃/SnO₂ Double Layer Sensors With Pd Decoration" *Sensors and Actuators B: Chemical*, 220(2), 398-405.
- Mahajan, S. and Jagtap, S. (2019) "Metal-Oxide Semiconductors For Carbon Monoxide (CO) Gas Sensing: A Review", *Applied Materials Today*.
- Melendez, J., Castro, A.J., Lopez, F. and Meneses, J. (1995) "Spectrally Selective Gas Cell for Electrooptical Infrared Compact Multi Gas Sensor", *Sensors and Actuators A*, 46-47, 417-421.
- Mirzaei, A., Kim, S. S. and Kim, H. W. (2018) "Resistance-based H₂S Gas Sensors Using Metal Oxide Nanostuctures: A Review of Recent Advances", *Journal of Hazardous Materials*, 357, 314-331.
- Nause, J. (1999) "ZnO Broadens The Spectrum", *III-Vs Review*, 12, 28.
- Nicolau, Y. F., and Menard J. C. (1988) "Solution Growth of ZnS, CdS and Zn_{1-x}Cd_xS Thin Films By The Successive Ionic-Layer Adsorption and Reaction Process; Growth Mechanism", *Journal of Crystal Growth*, 92, 128-142.
- Nwanya, A.C., Deshmukh, P.R., Osuji, R.U., Malik, M., Lokhande, C. D. and Ezema, F.I. (2015) "Synthesis, Characterization and Gas-Sensing Properties of SILAR Deposited ZnO-CdO Nano-Composite Thin Film", *Sensors and Actuators*, B 206, 671-678.
- Öztürk, S. (2009) "Gaz Sensörü Uygulamaları İçin ZnO ve Katkılı ZnO Nanotellerin Üretilmesi" Yüksek Lisans Tezi, *Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gebze.
- Öztürk, Z.Z., Şahin, Y., Kösemen, A., Torun, İ., Kılınç, N. and Öztürk, S. (2014) "Hydrogen Sensing Properties of ZnO nanorods Effect of Annealing, Temperature and Electrode Structure" *International Journal Of Hydrogen Energy*, 39(2), 5194-5201.
- Paliwal, A., Sharma, A., Tomar, M. and Gupta, V. (2017) "Carbon Monoxide (CO) Optical Gas Sensor Based on ZnO Thin Films", *Sensors and Actuators*, B 205, 679-685.
- Pathan, H. M. and Lokhande, C. D. (2004) " Deposition of Metal Chalconide Thin Films By Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR) Method" *Bulletin of Material Science*, 27(2), 85-111.
- Patil, S.L., Raut, S.S. and Sankapal, B.R. (2019) "Cu(OH)₂@Cd(OH)₂ Core-Shell Nanostructure: Synthesis to Supercapacitor Application", *Thin Solid Films*, 692, 137584.
- Prakash, T., Bonavita, A., Neri, G. and Kumar, E.R. (2016) "Microwave-Assisted Synthesis of Cd(OH)₂/CdO Nanorods: Effect of Irradiation Time", *Superlattices and Microstructures*, 9, 117-123.

- Raj, A.D., Pazhanivel, T., Kumar, P.S., Mangalaraj, D., Nataraj, D. and Ponpandian, N. (2010) "Self Assembled V_2O_5 Nanorods For Gas Sensors", *Current Applied Physics*, 10, 531-537.
- Rajput, J.K., Pathak, T.K., Kumar, V. and Purohit, L.P. (2017) "Influence of Sol-Gel Concentration on CdO Nanostructure With Gas Sensing Application", *Applied Surface Science*, 409, 8-16.
- Ristic, M., Popović, S. and Musić, S. (2004) "Formation and Properties of $Cd(OH)_2$ and CdO Particles", *Materials Letters*, 58, 2494-2499.
- Salunkhe, R.R., Dhawale, D.S., Dubal, D.P. and Lokhande, C.D. (2009) "Sprayed CdO Thin Films for Liquefied Petroleum Gas (LPG) Detection", *Sensors and Actuators*, B 140, 86-91.
- Shishiyanu, S.T., Shishiyanu, T.S. and Lupan, Q.I. (2005) "Sensing Characteristics of Tin-Doped ZnO Thin Films as NO_2 Gas Sensor", *Sensors and Actuators B: Chemical*, 107, 379-386.
- Soltabayev, B., Yıldırım, M.A., Ateş, A. and Acar, S. (2019) "The Effect of Indium Doping Concentration on Structural, Morphological and Gas Sensing Properties of IZO Thin Films Deposited SILAR Method", *Materials Science in Semiconductor Processing*, 101, 28-36.
- Soltabayev, B., Karaduman Er, I., Sürel, H., Coşkun, A., Yıldırım, M.A., Ateş, A. and Acar, S. (2019) "Influence of Ni Doping on The Nitric Oxide Gas Sensing Properties Of $Zn_{1-x}Ni_xO$ Thin Films Synthesized By SILAR Method", *Materials Research Express* 6, 086419, <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab1dce>.
- Strauss, W., Air Pollution Control Part:II, *Wiley-Interscience*, New York.
- Sun, Y.F., Liu S.B, Meng, F. L., Liu J. Y., Jin Z., Kong L. T. and Liu, J. H. (2012) "Metal Oxide Nanostructures and Their Gas Sensing Properties: A Review", *Sensors*, 12, 2610-2631.
- Supothina, S. (2003) "Gas Sensing Properties of Nanocrystalline SnO_2 Thin Films Prepared By Liquid Flow Deposition", *Sensors and Actuators B*, 93, 526-530.
- Sümer, F. (2011) " QCM (Quartz Crystal Microbalance) Tekniği ile Farklı Kaliksaren Molekülleri ile Modifiye Olmuş Karbon Nanotüp (CNT) Yapılarının Karbon Monoksit (CO) Gaz Sensörü Olarak Geliştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.
- Sürel, H. (2017) "Ni Katkılı ZnO Metal Oksit Yarıiletkenlerde Gaz Sensör Parametrelerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 7-13,19-24.
- Şahin, B., Bayansal, F., Çakmak, H.M., Kahraman, S. and Çetinkara, H.A. (2013) "Effect of Heat Treatment on The Properties of $Cd(OH)_2$ and CdO Films

- Grown By Chemical Bath Deposition”, *Philosophical Magazine Letters*, 93:2, 101-108.
- Şen, S. (2008) “Seçilmiş Organik Malzemelerin İnce Film ve Organik Buhar Sensörü Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, **Çanakkale Onsekiz Mart Üniveristesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Çanakkale, 28-30.
- Şennik, E. (2009) “ Yüksek yönelim pirolitik grafit (HOPG) kullanarak paladyum nanotel dizilerinin üretilmesi ve hidrojen gazını algılama özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü**, Gebze,22.
- Taşaltın, N., (2010) “Palladyum, Niobyum, Tantalyum nanotellerin üretilmesi ve hidrojen gazını algılama özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, **Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kocaeli 7-9.
- Toros, H. (2000) “İstanbul’da Asit Yağışları, Kaynakları ve Etkileri”, Doktora Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Meteoroloji Mühendisliği Anabilim Dalı**, İstanbul.
- Velusamy, P., Babu, R. R., Ramamurthi, K., Elangovan, E., Viegas, J. and Sridharan, M. (2018) “Gas sensing and Opto-Electronic Properties of Spray Deposited Cobalt Doped Cdo Thin Films”, *Sensors and Actuators*, B 255, 871-883.
- Wang, C.,Yin, L., Zhang, L., Xiang, D. and Gao, R., (2010) “Metal Oxide Gas Sensors: Sensitivity and Influencing Factors”, *Sensors*, 10, 2088-2106.
- Yıldırım, M.A. (2010) “SILAR Tekniği ile Büyütülen ZnO ve CdO İnce Filmlerinin Karakterizasyonu ve Sandviç Yapılarda Kullanılması”, Doktora Tezi, **Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Erzurum, 73.
- Yıldırım, M.A.,Yıldırım, S.T., Çağırtekin, A.O., Karademir, M., Karaduman Er, I., Coşkun, A., Ateş, A. and Acar, S. (2019) “The effect of Deposition Time on The Structural, Morphological and H₂S Gas Sensing Properties of The V₂O₅ Nanostructures Deposited by Hydrothermal Method”, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 12215-12223.
- Zhang, G., Li, Y. and Li, Q. (2010) “A miniaturized Carbon Dioxide Gas Sensor Based on Infrared Absorption”, *Optics and Lasers in Enngineering*, 48, 1206-1212.
- Zhou, Q., Chen, W., Xu, L., Kumar, R., Gui, Y., Zhao, Z., Tang, C. and Zhu, S. (2018) “Highly Sensitive Carbon Monoxide (CO) Gas Sensors Based on Ni and Zn Doped SnO₂ Nanomaterials”, *Ceramics International*, 44, 4392-4399.



EKLER

Ek-1. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar

Müezzinoğlu, E.D., Yıldırım, M.A., Yıldırım, S.T., Çağırtekin, A.O., Acar, S. and Ateş, A. (2019) “CO gas sensing properties of Cd(OH)₂ thin films synthesized by SILAR method”, *MAS 4. Uluslar Arası Matematik-Mühendislik-Fen ve Sağlık Bilimleri Kongresi*, Erzurum, 2-5 Mayıs 2019.



ÖZGEÇMİŞ

01.10.1992 yılında Erzincan’ da doğan Esra Demet MÜEZZİNOĞLU, ilk, orta ve lise öğrenimini Erzincan’ da tamamladı. 2011 yılında Erzurum Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nü (%30 İngilizce) kazandı ve 2015 yılında aynı bölümden mezun oldu. 2015 yılında Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisansa başladı ve eğitimine halen devam etmektedir.

İş Tecrübesi, 2017-2018 yılları arasında Yelter Elektrik İnş. Tem. Loj. Gıda San. ve Tic. Ltd. Şti. ve 2018 yılında Eflatun Yapı Denetim Ltd. Şti bünyesinde Elektrik Mühendisi olarak görev aldı. 2019 yılı Ağustos ayında Erzincan 112 Acil Çağrı Merkezi Müdürlüğünde Elektrik Elektronik Mühendisi olarak görev aldı ve halen devam etmektedir.