



**SOL-JEL SPİN-KAPLAMA METOT İLE BÜYÜTÜLEN AI KATKILI ZnO
NUMUNELERDE CO GAZI İÇİN GAZ SENSÖR PARAMETRELERİNİN
VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Togzhan NURTAYEVA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2019

Togzhan NURTAYEVA tarafından hazırlanan “SOL-JEL SPİN-KAPLAMA METOT İLE BÜYÜTÜLEN Al KATKILI ZnO NUMUNELERDE CO GAZI İÇİN GAS SENSÖR PARAMETRELERİNİN VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Selim ACAR

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Nihat TUĞLUOĞLU

Yenilenebilir Enerji Ana Bilim Dalı, Giresun Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Prof. Dr. Haluk KORALAY

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 31/05/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Togzhan NURTAYEVA

31/05/2019

SOL-JEL SPİN-KAPLAMA METOT İLE BÜYÜTÜLEN Al KATKILI ZnO
NUMUNELERDE CO GAZI İÇİN GAZ SENSÖR PARAMETRELERİNİN VE
DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Togzhan NURTAYEVA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2019

ÖZET

Bu çalışmada, sol-jel spin-kaplama tekniği ile hazırlanan 500 °C' de N₂ ortamında tavllanmış Al-katkılı ZnO (ZA) ince filmlerinin başarılı sentezi ve karakterizasyonu yapıldı. Filmlerin üretilmesinde üç farklı dengeleyici ve iki farklı çözücü kullanılarak farklı dengeleyici-çözücü kombinasyonunda altı adet numune üretildi. Dengeleyici olarak Monoetanolamin (MEA), Dimetanolamin (DEA) ve Trimetanolamin (TEA) ile etanol ve 2-metoksietanol (2-MxyE) çözücüleri kullanıldı. Böylece dengeleyici-çözücü kombinasyonunun filmlerin yapısal, optik ve özellikle gaz algılama özellikleri üzerindeki etkileri sistematik olarak incelendi. XRD, AFM, SEM ve UV analizleri ile filmlerin yapısal ve optik özellikleri araştırıldı. Oda sıcaklığı ile 250 °C arasında CO gaz algılama ölçümleri yapıldı. ZA ince film sensör cevabı CO gazı varlığında ve yokluğunda filmin direncindeki değişim ile belirlendi. TEA-2MxyE kombinasyonuna sahip sensör optimal çalışma sıcaklığı 220 °C' de 25 ppm CO gazı için %77 maksimum duyarlılık gösterdi. Ayrıca, 300 K ve 520 K sıcaklık aralığında dielektrik ve empedans analizleri yapıldı. Buna ilaveten CO gaz algılama ve kontrolü için arduino sistemi proglamlanarak kullanılabilir bir cihaz geliştirildi.

Bilim Kodu : 20215
Anahtar Kelimeler : CO gaz, Al katkılı ZnO, gaz sensör
Sayfa Adedi : 98
Danışman : Prof. Dr. Selim ACAR

INVESTIGATION OF DIELECTRIC AND GAS SENSING PROPERTIES FOR CO
GAS OF Al DOPED ZnO GROWN BY SOL-GEL SPIN-COATING METHOD

(M. Sc. Thesis)

Togzhan NURTAYEVA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2019

ABSTRACT

In this study, we report the successful synthesis and characterization of Al-doped ZnO (ZA) thin films prepared using a sol-gel spin coating technique annealed at 500 °C in N₂ environment. Three different stabilizers and six different solvents were used in the fabrication of films. As a stabilizer Monoethanolamine (MEA), Dimethanolamine (DEA) and Trimethanolamine (TEA) and as a solvent ethanol and 2-methoxyethanol (2-MxyE) were applied. Thus, the effects of the stabilizer-solvent combination on the structural, optical and especially gas detection properties of the films were systematically investigated. XRD, AFM, SEM and UV analysis as well as structural and optical properties of the films were studied. CO gas level was measured between room temperature and 250 °C. The ZA thin film sensor response was determined by the change in the resistance of the film in the presence and absence of CO gas. The sensor with the TEA-2MxyE combination showed an optimal operating temperature at 220 °C and a maximum sensitivity at 77 % for 25 ppm CO gas. In addition, dielectric and impedance analyses were performed at the 300 K and 520 K temperature range. In addition, an arduino system was developed for the detection and control of CO gas.

Science Code : 20215
Key Words : CO gas, Al doping ZnO, Gas sensor
Page Number : 98
Supervisor : Prof. Dr. Selim ACAR

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma, Gazi üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İleri Teknolojiler Anabilim Dalında yapılmıştır. Sadece bu tez çalışmamda değil, tüm yüksek lisans eğitimim sırasında bana her konuda yardımcı olan, yol gösterici olan, sabrını, insani ilişkilerini, çalışkanlığını ve disiplinini örnek aldığım tez danışmanım ve değerli hocam Prof. Dr. Selim ACAR'a sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Tez çalışmam sırasında bilgilerini ve deneyimlerini paylaşan, deney sistemleri kullanımında ve tez yazım süresince yardımları ve fikirlerini esirgemeyen arkadaşlarım Baktiyar SOLTABAYEV'a, Özlem BARİN'e, Irmak KARADUMAN ER'e, Ali Orkun ÇAĞIRTEKİN'e teşekkür ederim. Numuneleri üreten Mohamed SBETA' ya ve Prof. Dr. Abdullah YILDIZ'a teşekkür ederim. SEM ve EDAX ölçümlerindeki yardımları için Doç. Dr. Memet Ali YILDIRIM'a teşekkür ederim. Her türlü desteklerinden dolayı sevgili annem Baktygul MYRZALIYEVA'ya, canım babam Yergali NURTAYULY'na, kardeşlerime ve Mustafa Fahmi RAJAB'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
2.1. Gaz Sensörlerinin Tarihçesi ve Yayılması	5
2.2. Gaz Sensörlerinin Tanımı ve Sınıflandırılması	5
2.2.1. Gaz sensörlerinin tanımı	5
2.2.2. Gaz sensörlerinin sınıflandırılması	6
2.3. Gaz Sensörlerinin Önemi	9
2.4. Gaz Algılama Özelliklerinin Önemli Faktörleri.....	10
2.4.1. Katkılama etkisi	10
2.4.2. Tanecik büyüklüğü etkisi.....	11
2.4.3. Diğer faktörler.....	12
2.5. Gaz Sensör Performansının Temel Özellikleri.....	12
2.6. Metal Oksit Gaz Sensörü.....	14
2.6.1. n-tipi metal oksit gaz sensörü	14
2.6.2. p-tipi metal oksit gaz sensörü	14
2.7. Yarıiletkenler.....	15
2.8. ZnO.....	16

	Sayfa
2.8.1. ZnO nano-yapılarının materyal özellikleri	18
2.8.2. Diğer metal oksitler	19
2.9. Nanoölçek Seviyelerdeki Metal Oksit Yarıiletken Nanoyapıların Katkılanması.....	19
2.9.1. ZnO ince filmleri üzerinde katkılama işlemleri ve etkileri.....	20
2.9.2. Katkılama türleri	21
2.9.3. Al katkılı çinko oksit ince filmleri.....	22
2.10. Tepki Mekanizması	23
2.11. Gaz Sensörü için Nanokristal Metal Oksit Sentezi	25
2.11.1. Serigrafi.....	25
2.11.2. Kimyasal buhar biriktirme (CVD)	25
2.11.3. Fiziksel buhar biriktirme (PVD)	25
2.12. Sol-Jel Tekniği	26
2.12.1. Sol-jel işlem uygulamaları.....	26
2.12.2. Sol-jel'in biriktirme teknikleri.....	27
2.13. Karbonmonoksit	30
2.13.1. Karbonmonoksidin tespit edilme sebepleri	30
2.13.2. Karbonmonoksit sensörlerindeki gelişmeler	31
2.13.3. Karbonmonoksit algılama mekanizması	33
2.14. Karakterizasyon Teknikleri	34
2.14.1. X-ışını difraksiyonu.....	34
2.14.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	35
2.14.3. Atomik güç mikroskobu (AFM).....	36
2.14.4. UV- VIS spektrokopisi	37
2.14.5. Elektriksel özellikler.....	38
2.14.6. Gaz algılama özellikleri.....	38
2.14.7. Dielektrik özellikleri.....	40

	Sayfa
2.14.8. Empedans çalışması.....	41
3. MATERYAL VE YÖNTEM	43
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	45
4.1. Yapısal, Morfolojik ve Optiksel Özellikler.....	45
4.2. Dielektrik Özellikleri.....	62
4.3. Empedans Çalışması	67
4.4. Gaz Algılama Özellikleri	70
5. ARDUINO GAZ SENSÖR SİSTEMİ	75
5.1. Giriş.....	75
5.2. Arduino IDE.....	76
5.3. Bileşenler.....	77
5.3.1. Arduino UNO R3.....	77
5.3.2. Gaz sensörü MQ-7.....	78
5.3.3. LCD ekran.....	79
5.3.4. Alarm zili	80
5.3.5. Devre tahtası	80
5.3.6. Işık yayan diyot.....	81
5.4. Sistemin Kurulması	81
6. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	83
KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	97

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Gaz sensör kullanım alanlarının örnekleri.....	10
Çizelge 2.2. n- ve p- tipi maddelerin indirgeyici ve oksitleyici gazlara algılama cevap davranışı.....	15
Çizelge 2.3. ZnO seçilmiş özellikleri.....	18
Çizelge 2.4. Belirli konsantrasyonlardaki karbonmonoksidin insan sağlığı üzerine etkileri.....	31
Çizelge 3.1. Kullanılan dengeleyici-çözücü kombinasyonuna bağlı olarak örneklerin gösterilmesi	44
Çizelge 4.1. XRD ölçümlerinden elde edilen parametreler	45
Çizelge 4.2. Üretilen ZA filmlerinin hesaplanan bazı parametreleri	61

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Yüklü türlerin kemisorpsiyonundan sonra bant bükülmesinin şematik gösterimi.....	7
Şekil 2.2. SnO ₂ yüzeyine absorbe edilen oksijen türlerinin deneysel sonuçları	7
Şekil 2.3. Hedef gaz (indirgeyici gaz) varlığında n- ve p- tip MOS için sensör direncindeki değişikliklerin şematik gösterimi	15
Şekil 2.4. ZnO kristali: vürtzit yapısı, tetrahedral deliklerde O atomlarının Zn ⁺² ile hegzagonal sıkı paketlenmiş düzenlemesi.....	17
Şekil 2.5. Katkılı metal oksit yüzeyinde oksijen yayılma işlemi.....	20
Şekil 2.6. Metal oksit yüzeyinde O ₂ kemisorpsiyonun şematik gösterimi.....	24
Şekil 2.7. Sol-jel sürecinin aşamaları.....	27
Şekil 2.8. Döndürerek kaplamanın dört aşaması	29
Şekil 2.9. (a) 350 °C optimal çalışma sıcaklığında 4 ppm CO gaz varlığında sensör tepkisi (b) 250 °C optimal çalışma sıcaklığında 200 ppm CO gaz varlığında sensör tepkisi.....	32
Şekil 2.10. Metal oksit yüzeyinde ütilen karbon dioksitin algılama mekanizmasının şematik gösterimi	34
Şekil 2.11. UV- VIS spektrokopisi'nin çalışma prensibi.....	37
Şekil 2.12. Ölçüm sisteminin şematik diyagramı	39
Şekil 2.13. Nyquist eğrisi (Cole-Cole eğrisi).....	42
Şekil 4.1. Üretilen ince filmlerin XRD örnekleri.....	46
Şekil 4.2. ZA-24 Filmin SEM görüntüleri	48
Şekil 4.3. ZA-25 Filmin SEM görüntüleri	49
Şekil 4.4. ZA-26 Filmin SEM görüntüleri	50
Şekil 4.5. ZA-27 Filmin SEM görüntüleri	51
Şekil 4.6. ZA-28 Filmin SEM görüntüleri	52
Şekil 4.7. ZA-29 Filmin SEM görüntüleri	53
Şekil 4.8. ZA-24 ve ZA-25 Filmlerin EDAX görüntüleri	54
Şekil 4.9. ZA-26 ve ZA-27 Filmlerin EDAX görüntüleri	55

Şekil	Sayfa
Şekil 4.10. ZA-28 ve ZA-29 Filmlerin EDAX görüntüleri	56
Şekil 4.11. ZA-24 filmin AFM görüntüsü	57
Şekil 4.12. ZA-25 ve ZA-26 filmlerinin AFM görüntüsü	58
Şekil 4.13. ZA-27 ve ZA-28 filmlerinin AFM görüntüsü	59
Şekil 4.14. ZA-29 filmin AFM görüntüleri	60
Şekil 4.15. Üretilen filmlerin geçirgenlik spektrumları	60
Şekil 4.16. Filmlerin UV-absorbance ölçümleri	62
Şekil 4.17. ZA-24 ve ZA-29 numuneleri için dielektrik sabitinin frekansa bağlı değişimi	63
Şekil 4.18. ZA-24 - ZA-27 numunelerinin dielektrik sabitinin sıcaklığa bağlı değişimi	64
Şekil 4.19. ZA-28 ve ZA-29 numunelerinin dielektrik sabitinin sıcaklığa bağlı değişimi	65
Şekil 4.20. ZA-24 - ZA-29 numuneleri için dielektrik kaybın frekansa bağlı değişimi	66
Şekil 4.21. ZA-24 - ZA-29 numuneleri için Cole-Cole eğrileri	68
Şekil 4.22. Numunelerin I-V eğrileri	69
Şekil 4.23. Numunelerin direnci	69
Şekil 4.24. Çalışma sıcaklığına bağlı olarak sensörlerin duyarlılıkları	71
Şekil 4.25. ZA-24 - ZA-29 için dinamik gaz algılama ölçümleri	72
Şekil 4.26. Farklı gaz konsantrasyonları için sensör duyarlılıkları.....	73
Şekil 4.27. 100 ppb CO gazında sensörlerin duyarlılıkları	74
Şekil 5.1. Akış şeması.....	81

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Genel uygulamalar için taşınabilir bir döndürme kaplayıcı	28
Resim 2.2. Oftalmik lensler üzerine çizilmelere karşı dirençli kaplamaların biriktirilmesi için özel olarak tasarlanmış bir döndürerek kaplama sistemi.....	29
Resim 2.3. Rigaku miniflex 600 masa üstü tüm toz X-ışını difraktometre	35
Resim 2.4. Taramalı elektron mikroskobu.....	36
Resim 2.5. Atomik güç mikroskobu	36
Resim 2.6. LakeShore 325 sıcaklık kontrol cihazı	39
Resim 2.7. Keithley 2400.....	40
Resim 2.8. Keysight E4990A.....	41
Resim 3.1. Al katkılı ZnO ince filmi	44
Resim 5.1. Arduino Uno mikrodenetleyicisi	76
Resim 5.2. Java tabanlı Arduino IDE'nin ekran görüntüsü.....	77
Resim 5.3. İnce uçlu Arduino UNO R3	78
Resim 5.4. MQ-7 gaz sensörü.....	78
Resim 5.5. I2C OLED LCD ekran.....	79
Resim 5.6. Piezo elektronik tonlu zil	80
Resim 5.7. Küçük devre tahtası	80
Resim 5.8. LED.....	81
Resim 5.9. CO gazını algılayan Arduino sistemi.....	82

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
°C	Santigrat Derece
°K	Kelvin
Å	Angstrom
cm ³	Santimetre küp
D	Numune kalınlığı
ε'	Dielektrik sabiti
f	Frekans
G	Gram
I	Akım
M	Molarite
mm	Milimetre
nm	Nanometre
R	Direnç
V	Voltaj
Z	Empedans
π	Pi
ρ	Özdirenç
τ	Teta
Ω	Ohm

Kısaltmalar	Açıklamalar
AFM	Atomik Güç Mikroskopu
CH ₄	Metan
CO	Karbonmonoksit
CO ₂	Karbondioksit
NO	Azot Monoksit

Kısaltmalar**Açıklmalar****NO₂**

Azot Dioksit

NO_x

Azot Oksitleri

O₂

Oksijen

OH

Hidroksit

ppb

Milyarda Bir

ppm

Milyonda Bir

SEM

Taramalı Elektron Mikroskobu

UV

Ultraviyole

vb

Ve benzeri

XRD

X-ışını Kırınımı

ZnO

Çinko Oksit

1. GİRİŞ

Taşıtların ve endüstriyel emisyonun artmasından dolayı hem yaşam hem de iş yerlerinde hava kalitesinin sürekli olarak izlenmesine güçlü bir ihtiyaç vardır. H₂S, NO₂ ve NO₃ gibi çeşitli zehirli gazların solunması insan sağlığı için anlık ve uzun süreli tehdit oluşturmaktadır. Bu gazlar belirli konsantrasyonların üzerinde olduğunda insan sağlığı için zararlı olabilmektedir. Bu sebeple insan yaşamının maksimum güvenliğini sağlamak adına hava kalitesini denetlemek ve ısıtma, havalandırma ve hava koşullarını (HVAC) kontrol etmek için akıllı bir izleme sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Karbonmonoksit (CO) tamamlanmamış yanma reaksiyonlarının bir yan ürünüdür. Yaklaşık 30 ppm konsantrasyonuna maruz kalmak kalp hastalıkları, el becerilerinin yapılma yeteneğinde azalma ve genel bir uyuşukluk ile sonuçlanabilmektedir. 35 ppm' den yüksek konsantrasyonlarda uzun süreli maruz kalındığında (>24 saat) CO maruziyeti baş ağrısı, asabiyet, bulanık görme, koordinasyon eksikliği, bulantı, baş dönmesi ve sonuçta ölüm ile sonuçlanabilmektedir.

Atmosferdeki zararlı maddelerin seviyesini tespit etmek için bilim insanları tarafından çoğunlukla gaz sensörleri olarak bilinen küçük ve de kullanışlı cihazlar geliştirilmektedir. Gaz sensörleri, analit bir gazın konsantrasyonunu elektronik bir sinyale dönüştürme yeteneğine sahip cihazlardır ve genellikle “elektronik burun” olarak bilinen cihazların önemli bir parçasıdır. Elektronik iletkenlik bu cihazın etrafını saran atmosferdeki gaz bileşimlerine göre farklılık göstermektedir. Bir gaz sensörünün performansı her şeyden önce alt algılama sınırı (LOD) ve hassasiyeti ile ölçülür. En düşük LOD seviyesine sahip olan sensör, bir analit gazın en düşük seviyede tespitini sağlamakta ve yüksek derecede seçici sensör ise muhtemel farklı gazlardan oluşan karışımın içinden tercih edilen gazın küçük miktarlarda bile tespitini yapmaktadır [1].

Geçtiğimiz on yılda bilim insanları, elektrokimyasal sensörler, katalitik yanma sensörleri, kızılötesi sensörler ve difüzyon yakıt hücre sensörleri gibi farklı “algılama” mekanizmalarına bağlı gaz sensörleri geliştirmişlerdir. Tüm bu cihazlar diğer sektörlerin arasında kimya mühendisliğinde, tarımda, tıpta ve inşaatla çeşitli uygulama alanlarına sahiptir. Son zamanlarda nanoölçek materyallerin sentezine önemli derecede ilgi ortaya çıkmıştır [2]. Fonksiyonel nanocihazlar için materyallerin en etkileyici sınıflarından biri ise

kolaylıkla ve kontrol edilebilir bir şekilde düşük boyutsallığa sahip farklı şekillere dönüştürebilen metal oksit yarıiletken (MOS)lerdir.

SnO₂, ZnO ve In₂O₃ gibi yarıiletken metal oksitler, gaz karışımlarına maruz kaldıktan sonra bu maddelerin elektriksel iletkenliğindeki değişimler kullanılarak, dirençli gaz sensörlerinde yaygın olarak çalıştırılmaktadır [3]. Gaz sensör uygulamasında bu metal oksitler arasından II-VI bileşenli bir yarıiletken olan ve H₂, NH₃, CH₄, O₂, etanol ve CO gibi birçok gazın tespiti için kemo-dirençli sensörlerde kullanılan ZnO kullanımı uzun bir geçmişe sahiptir [4, 5]. ZnO yarıiletken maddeler üzerindeki ilginin büyümesi, son 5 yıl içinde ZnO ince film oluşum ve özelliklerine dair 1500' den fazla yayınlanan bilimsel makalelerden anlaşılabilir. Bazı can alıcı noktalardaki heyecanlı yeni gelişmelerden dolayı, saf ya da katkılı ZnO filmler yeni ve ileri düzeyde fonksiyonel bir madde olma yolunda oldukça umut vadeci görülmektedir. Zehirli olmayışı, iyi elektriksel, optiksel ve pizoelektrik özelliği, bir hidrojen plazma atmosferindeki kararlılığı [6] ve günümüzde kullanılan şeffaf iletken oksit maddeleri (ITO, SnO₂) ile karşılaştırıldığında ZnO' yu daha ucuz bir madde yapan doğada bol miktarda bulunma özelliği gibi ilgi çekici özelliklerin özgün kombinasyonundan dolayı In₂O₃ ya da SnO₂ gibi diğer muhtemel maddelere göre bazı avantajlara sahiptir [7]. Aynı zamanda, en çok tercih edilen teknik olan sol-jel tekniği ile elde edilen çinko oksitin üretimi, teknik uygulamalar için düşük maliyette ZnO ince filmlerin küçük ve geniş alan kaplamasının hazırlanma ihtimalini sağlamaktadır [8].

Aslında, katkılama metal oksit yarıiletkenlerin algılama özelliğinin gelişmesi için önemli ve etkili bir yöntemdir [9]. Asal metallerle (Pt, Pd) ya da diğer katkı maddeleri (Al ve Cu gibi) ile katkılama gaz sensörlerinin duyarlılığını ve seçiciliğini artırmaktadır [10, 11]. Bu katkı maddeleri enerji bandı yapısı ve morfolojisini değiştirerek, yüzeyin hacime oranını artırarak ve metal oksit yarıiletkeninin yüzeyinde gaz etkileşimi için daha fazla merkez oluşturarak gaz algılama özelliğini artırır.

Son araştırmalarda, saf ZnO temelli sensörlerin, çeşitli gazlara karşı duyarlılık gösterdiği bulunmuştur, ancak Al katkısı ile bu duyarlılığın arttığı görülmüştür. Al Katkılama ile tepki ve daha düşük sıcaklık açısından daha iyi performanslar bildirildi, bu da havada düşük karbonmonoksit izlerinin izlenmesinde pratik dirençli cihazlarda kullanıldığını göstermektedir [12]. Al-katkısıyla ZnO filmlerinin elektriksel ve optiksel özellikleri değiştirilmektedir. Optiksel bant aralığı Al-katkılı konsantrasyonla orantılı olarak

genişletilmiştir [13]. Elektriksel iletkenlik, yük taşıyıcı yoğunluğu ve mobilite Al katkılı filmlerde önemli derecede geliştirilmektedir. En yüksek mobilite değerleri, % 2-3 oranında Al-katkılı konsantrasyonlarında bulunmuştur. Bu, Al' un ZnO kafesine sınırlı bir şekilde dahil edilmesi ile açıklanmaktadır. Al, ikame edici olarak çinko kafes bölgelerine dahil edilmişse donör görevi görür. Özellikle yüksek oksijen akış hızlarında Al atomlarının kimyasal olarak oksijene bağlandıkları ve taneciklerde veya tanecik sınırlarında çökeltiler oluşturduğu ne srlmştir [14].

Al, Zn^{+2} ile karşılaştırıldığında Al^{+3} iyonlarının daha küçük olmasından dolayı elektriksel iletkenliği geliştirir ($r_{Al^{+3}} = 0.054$ nm ve $r_{Zn^{+2}} = 0.074$ nm) [15]. Alüminyum ZnO gaz sensörlerinde önemli bir rol oynamaktadır, ancak spesifik algılama uygulamaları için ZA ince filmlerinin sentez ve karakterizasyonu ile ilgili literatürde yapılan çalışma sayısı çok azdır [16–18].

Bu tezde, ZA ince filmlerin CO gazını algılama özellikleri üzerindeki çözücülerin ve dengeleyicilerin etkisi üzerine daha önce bulunmayan kapsamlı bir sistematik çalışma yapılmıştır. CO algılama için en iyi koşulları tespit etmek üzere ve algılama katmanının formulasyonunu optimize etmek için ZA filmlerin iletkenlik ve algılama özellikleri üzerine bir çalışma sunulmaktadır. Burada ilk olarak üretilen altı adet film için, çeşitli çözücülerin (etanol ve 2-metoksietanol (2-ME)) ve dengeleyicilerin (monoethanolamin (MEA), dietanolamin (DEA) ve trietilamin (TEA)) filmlerin yapısal, optik ve elektriksel özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Daha sonra, çözücü-dengeleyici kombinasyonunun, CO gaz algılama performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Bu tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde tez çalışması hakkında genel bilgi verilmektedir. İkinci bölümde gaz sensörlerinin tarihçesi, önemi, metal oksit gaz sensörleri, yarıiletken, çinko oksit (ZnO), katkılama ve onun etkileri, sol-jel tekniği, karbonmonoksit (CO) ve filmlerin karakterizasyon teknikleri hakkında genel bilgilendirme yapılmaktadır. nc bölümde üretilen malzemelerin hazırlanması ve kullanılan deneysel ölçüm sisteminden bahsedilmektedir. Dördüncü bölümde deneysel sonuçlar ve elde edilen bulgular verilmektedir. Beşinci bölümde çalışma esnasında arduino kullanılarak programlanan carbonmonoksit (CO) ve duman algılama sistemi anlatılmaktadır. Altıncı bölümde ise tartışma ve sonuçlar verilmektedir.



2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Gaz Sensörlerinin Tarihçesi ve Yayılması

Günümüzde geliştirilmekte olan çok çeşitli gaz sensörleri vardır [19]. Bu sensörler spesifik gaz türlerinin tespiti için ya da bir gaz karışımının tanımlanması için tasarlanmıştır. Gazları tespit etmek için ilk yöntem, metan (CH_4) maruziyetini tespit etmek için bir mayın içine bir kanarya almaktı. Kanaryalar, insanlardan daha düşük oksijene (O_2), metan ve karbonmonoksite (CO) duyarlı olduklarından kullanılmıştır. Bir sonraki gaz algılama tipi, katalitik yanma sensörü idi. Birkaç yüz derecede çalışan sıcak bir platin tel kullanır. Sıcak tel katalitik platin filament, yanıcı gazları veya buharları normalde havada oksitleyebileceklerinden daha düşük seviyelerde okside eder. Oksitleyici gazlar veya buharlar sıcak tellerin sıcaklığında artışa neden olur ve bu da telin elektrik direncini artırır. “Gerçek” modern gaz sensörü, 1962’de gerçeğe dönüştü. Seiyama ve ark., tarafından ilk önce yarıiletken bir gaz sensörü rapor edildi [20]. Yarıiletken kataliz mekanizmasını, yani metal emiliminde (çinko oksit) gaz emilimi üzerine direnç değişiminin ölçülmesini kullanmışlardır. Yarıiletken gaz sensörünün icadından sonra, araştırmanın hedefleri günlük yaşamla yakından ilgilidir. Daha sonra yarıiletken yanıcı gaz sensörleri, katı elektrolit oksijen sensörleri ve nem sensörü 70’ li yıllarda halk kullanımı için geliştirildi ve ticarileştirildi. Günümüzde bu sensörlerin ilerlemesi ve ayrıca pazardaki yoğun talepten doğan çeşitli yeni gaz sensörlerinin geliştirilmesi için büyük çaba sarf edilmektedir.

2.2. Gaz Sensörlerinin Tanımı ve Sınıflandırılması

2.2.1. Gaz sensörlerinin tanımı

Bir gaz sensörü kimyasal bir sensör olarak sınıflandırılmaktadır. Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği (IUPAC)’ ne göre, bir gaz sensörü şu şekilde tanımlanmıştır: belirli bir örnek bileşenin konsantrasyonundan tüm bileşen analizine kadar değişen kimyasal bilgiyi analitik olarak yararlı bir sinyale dönüştüren bir cihazdır. Yukarıda bahsedilen kimyasal bilgi analitin kimyasal bir reaksiyonundan ya da incelenen sistemin fiziksel bir özelliğinden kaynaklanabilmektedir [21].

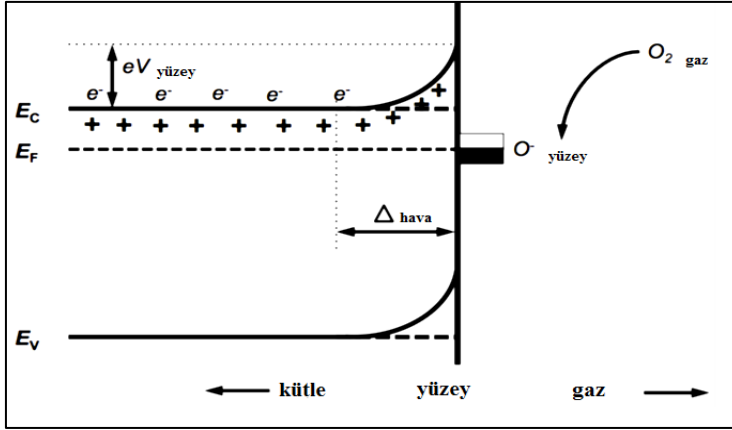
2.2.2. Gaz sensörlerinin sınıflandırılması

Gaz sensörleri birçok farklı yönleri ile sınıflandırılmaktadır. Gaz sensörleri algılanan maddeye, üretim teknolojilerine, uygulama alanına, tespit yöntemine göre ve daha birçok farklı durumlara bağlı olarak sınıflandırılabilir. Farklı sınıflandırma uygulamaları farklı sensör geliştirme aşamalarına yardımcı olabilir. Aşağıda bahsedilen gaz sensör çeşitleri gaz tespit prensiplerine göre sınıflandırılmıştır.

Yarıiletken gaz sensörleri (SGS)

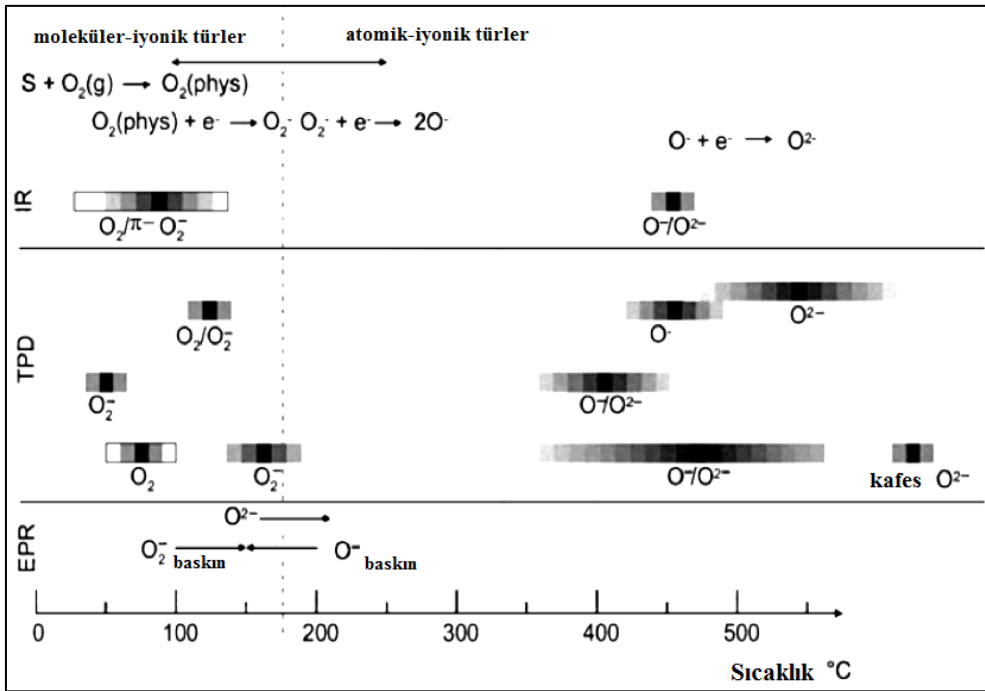
Bu tür gaz sensörü hedef gazlarla etkileşimi takiben algılama tabakalarının elektriksel direnç/iletkenlikteki farklılığa bağlı olarak çalıştırılmaktadır. Yarıiletken gaz sensörü genellikle SnO₂, TiO₂, In₂O₃, WO₃, NiO ve ZnO gibi metal oksitleri kullanmaktadır [22]. Yarıiletken bir gaz sensör elementi normal olarak 4 bölümden oluşmaktadır: algılama tabakaları, alttaş, elektrodlar ve ısıtıcı. Isıtıcı algılama tabakalarından ve elektrodlardan bir elektriksel yalıtkan bir tabaka ile ayrılmıştır. Bir gaz yanıtına sebep olan temel mekanizmaları hala tartışmalıdır, ancak yüzeye tutunmuş moleküllerdeki elektronların yakalanmasının ve bu yüklü moleküllerin bant bükülmesini artırmasının direnç/iletkenlikte bir değişime sebep olduğu düşünülmektedir. Moleküler oksijen, yarıiletkenin konduksiyon bağından bir elektronun yakalanması ile metal oksit yüzeyinde yüzeye tutunur (adsorblanır). Sonuç olarak, bir azaltma tabakası oluşturur ve enerji bandında bir bükülmeye sebep olur. Örneğin; negatif yüzey yükü yukarı doğru bir bant bükülmesine ve direncin artmasına neden olur.

Şekil 2.1, bant bükülmesinin şematik diyagramını göstermektedir. EC, EV ve EF sırasıyla iletkenlik bandını, valans bandını ve fermi seviyesini göstermektedir. Δ_{hava} azaltma tabakasının kalınlığını göstermektedir ve $eV_{\text{yüzey}}$ olası bariyeri göstermektedir. İletim elektronları e^- ve verici bölgeler $+$ ile gösterilmiştir [23]. Tükenme bölgesine ayrıca kalınlığı bant bükülme bölgesinin uzunluğu olan, alan yükü tabakaları adı verilmektedir.



Şekil 2.1. Yüklü türlerin kemisorpsiyonundan sonra bant bükülmesinin şematik gösterimi

Şekil 2.2, SnO₂ yüzeyine absorbe edilen oksijen türlerinin deneysel sonuçlarını göstermektedir [23]. Nispeten düşük bir sıcaklık aralığında molekül-iyon türleri (O₂⁻ ya da O₂⁻²) metal oksid yüzeyini baskıladıği bulunmuştur, oysa nispeten yüksek bir sıcaklık aralığında metal oksit yüzeyinde atomik iyon türleri baskındır. Yamazoe ve ark., SnO₂ yüzeyinde dört çeşit oksijen türü oluştuğunu rapor etmişlerdir. Bunlar; 80°C' de O₂, 150°C' de O₂⁻, 560°C' de O⁻ ya da O⁻² ve 600°C' nin altında örgü oksijenin bir kısmıdır [24]. O⁻ (300-500°C) gazlarla en reaktif oksijen türleri olduğu bulunmuştur. Bu yüzden çoğu metal oksit gaz sensörleri bu sıcaklık aralığında çalıştırılmaktadır.



Şekil 2.2. SnO₂ yüzeyine absorbe edilen oksijen türlerinin deneysel sonuçları [23]

Alan etki sensörler

Bu tür sensör hedef gazlar tarafından indüklenen çalışma fonksiyonundaki farklılıklara bağlı olarak çalıştırılmaktadır. Alan etki sensörler genel olarak metal/oksit/yarıiletken (MOS) tabakalardan oluşmaktadır. Alan etki sensörü farklı yapılarına bağlı olarak 3 önemli türe ayrılabilir: Schottky diyot tipi, MOS kondensatör tipi ve MOS alan transistör (MOSFET) tipi.

Pizoelektrik sensör

Bu sensör türü, hedef gazların açığa çıkması için pizoelektrik maddelerin akustik dalga özelliklerinin değişkenliğine bağlı olarak çalışmaktadır. Kütle ve yüzey akustik dalga (BAW, SAW) cihazlarının rezonans sıklığı algılanan madde yüzeyinde kütle birikmesine duyarlıdır. Bu yüzden bu cihazlar her zaman ortamdaki ya da sıvı koşullardaki yükleme maddesinin kütle konsantrasyonunu ölçmek ve çok yüksek hassasiyetle işlemek için kullanılmaktadır.

Fiber optik sensör

Bu sensör türü hedef gazlarla indüklenen algılama maddelerinin optiksel özelliklerinin değişkenliğine bağlı olarak kullanılmaktadır. Genel olarak, optik sensörler optik fiberlerin uçları ya da yan duvarları üzerindeki ince filmlerin kaplanmasıyla oluşmaktadır. Fiber optik sensörler optod ya da optrode (optik çubuk) olarak bilinmektedir [25].

Elektrokimyasal gaz sensörleri

Bu gaz sensörleri katı haldeki elektrokimyasal hücrelerdeki elektriksel akım ya da elektromotor gücün farklılığına bağlı olarak kullanılmaktadır. Elektrokimyasal gaz sensörleri aynı bileşimin iki ucu aracılığıyla çevresiyle etkileşimde olan kimyasal reaktiflerin bir koleksiyonunu içeren bir kutudan oluşan bir elektrokimyasal hücre kullanılmaktadır. Kutunun en tepesi gaz örneğinin nüfuz edebildiği bir membrana sahiptir. Oksidasyon ya da redüksiyon uçların birinde meydana gelmektedir. Pozitif iyonlar katoda doğru ve negatif iyonlar anoda doğru akarak bir akım oluşturur [26].

2.3. Gaz Sensörlerinin Önemi

Gaz sensörleri, uzun yıllar boyunca işlem kontrolü, çevresel izleme ve konut güvenliği gibi çeşitli alanlarda potansiyel kullanımları nedeniyle büyük ilgi görmüştür [27]. Bunlardan bazıları hava kalitesi izleme, duman alarmları, mayın ve tünel uyarı sistemleri, seralar, nefes analizörleri, araçlarda veya servis istasyonlarında ve depolama tankı ortamında tehlikeli LPG sızıntısı şeklindedir. Teknolojideki ilerlemeyle, duyarlı ve hassas gaz sensörlerine duyulan ihtiyaç artmaya devam etmektedir. Son birkaç yılda araştırmacılar, ileri teknoloji ve yeni materyallerin kullanımı ile bu talebi karşılayabilmişlerdir. Bu bağlamda, katı hal kimyasal sensörler popülerlik kazanmakta ve daha yüksek hassasiyetleri ve daha küçük boyutları için geniş kullanım alanı bulmaktadır. Ayrıca, nanoteknolojinin ortaya çıkmasıyla, bilim insanları gaz sensörleri alanında yeni ufuklar yakalamayı başarmışlardır. Nanoteknoloji, nano ölçekte işlevsel sistemlerin mühendisliği olarak tanımlanabilir. Bu ölçekte materyallerin sergilediği özellikler makro ölçekteki özelliklere benzememektedir. Nano ölçekte yapılan gaz sensörleri son derece hassastır, seçici ve duyarlıdır ve bu nedenle nanoteknolojinin gaz sensörleri üzerindeki etkisi oldukça büyüktür [28].

Nanoyapılı yarıiletken metal oksitler ve karbon nanotüpler (CNT'ler) gibi diğer nano yapıları algılama malzemeleri, çekici özellikleri ve çok yönlü kullanımları için ana ilgi konusu olmuştur. Bu nano malzemeler doğal olarak yüksek bir yüzey / hacim oranı sunar, böylece mevcut yüzey alanını artırır ve çok düşük analit konsantrasyonunu tespit etme kabiliyetine sahip yüksek hassasiyete sahip gaz sensörleri verir [10]. Ek olarak, bu nanoyapılar reaksiyonun çalışma sıcaklığının düşürülmesine yardımcı olur. Yeni nanoyapılı malzemelerin kullanılmasıyla çalışma sıcaklıklarındaki bu azalma, düşük güç tüketimine yol açar, böylece mikroişlemeli gaz sensörlerinin kullanılmasına ve diğer entegre devrelerle entegrasyona izin verir. Çizelge 2.1. insanların günlük yaşamdaki çeşitli ihtiyaçlarında kullanılan gaz sensörlerinin uygulamalarını göstermektedir.

Uluslararası temiz hava yasaları mevzuatı nedeniyle, gaz sensörleri, hava kalitesini ve belirli kimyasal türlerin emisyon oranını sürekli olarak izlemek için sıklıkla kullanılmaktadır. Bu nedenle, gaz sensörleri, gazların kontrol ve analizinin gerekli olduğu çeşitli modern teknolojik işlemlerde kritik elektronik bileşenlerdir [29].

Çizelge 2.1. Gaz sensör kullanım alanlarının örnekleri [29]

Uygulama alanı	Fonksiyonu	Algılanan gazlar
Çevre	Atmosferde bulunan zehirli gazların izlenmesi	CO, CH ₄ , nem, CO ₂ , O ₃ , NO _x , VOCs, SO _x , NCs, NH ₃ , H ₂ S
İş güvenliği	İç hava kalitesinin kontrolü	Zehirli gazlar, yanıcı gazlar, O ₂
Ev güvenliği / ev uygulaması	Evde zehirli gazların veya dumanın tespiti	CO, CH ₄ , nem, CO ₂ , VOCs
Araba güvenliği	Araba havalandırma kontrolü; benzin buharı tespiti; alkol nefes testleri	CO, CH ₄ , LPG, VOCs
Klinik / tıbbi	Teşhis (nefes analizi, hastalık tespiti); bakım noktası hasta izlemesi; ilaç takibi; yapay organlar ve protezler; yeni ilaç keşfi	O ₂ , NH ₃ , NO _x , CO ₂ , H ₂ S, H ₂ , Cl ₂ , anestezi gazları
Tarım	Bitki / hayvan teşhisi; toprak ve su testi; et / kümes hayvanları muayenesi; atık / kanalizasyon izleme	NH ₃ , aminler, nem, CO ₂
Gıda kalitesi kontrolü	Belirli moleküllerin tespiti	Nem, CO ₂
Endüstri: Petrokimya	Süreç izleme ve kontrol; kalite kontrol, işyeri izleme; atık akışı izleme; kaçak alarmları	HCS, geleneksel kirleticiler
Havacılık	Ortamdaki oksijen ve zehirli ve yanıcı gazların izlenmesi	H ₂ , O ₂ , CO ₂ , nem

2.4. Gaz Algılama Özelliklerinin Önemli Faktörleri

Yarıiletken sensörlerin emilim ve desorpsiyon modeline dayanarak, katkılayıcı ve tanecik büyüklüğü gibi yarıiletken gaz sensörlerinin gaz sensör performansını etkileyen faktörler burada kısaca tartışılacaktır.

2.4.1. Katkılama etkisi

Katkılama, metal oksit malzemelerde fiziksel ve elektriksel özelliklerini geliştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Fiziksel olarak, katkılayıcı atomları tanecik sınırlarına ayrılır ve sonraki tavlama tane büyümesini engeller ve ayrıca kararlılık ve seçicilik için faydalı olan metal oksitlerin kimyasal çeşitliliğini arttırmaktadır. Elektriksel olarak, yabancı atomlar kafes içine katılır ve iyonik ve elektronik bozukluklar üretir. Bu bozukluklar,

Fermi seviyesinin konumunu etkiler; bu da metal oksitlerin gaz tepkisini etkilemesi beklenir [30]. Katkılayıcının birçok farklı kompleks etkisi vardır. Katkılayıcının gaz algılama üzerindeki etkisini ortaya çıkaracak daha fazla araştırma beklenmektedir.

2.4.2. Tanecik büyüklüğü etkisi

Küçük kristal parçacıklardan oluşan sensörler, genellikle yüksek yüzey / hacim oranı nedeniyle yüksek algılama tepkisi gösterir. Gaz algılama uygulamaları için nanoyapılı malzemeler üzerine yapılan son raporlar, aktif parçacık olarak ince parçacıkların kullanılmasının sensör performansını önemli ölçüde artırabileceğini doğrulamaktadır [31].

Elektrik direncindeki değişim, tükenme tabakasının kalınlığının değişmesine bağlanabilir. Tükenme tabakası kalınlık (L_S), L_S ve yüzey potansiyeli (V_S) ile karakterize edilir. Schottky yaklaşımı şunlara yol açar:

$$V_S = \frac{2\pi Q_S^2}{\epsilon N_d} = \frac{2\pi(qN_S)^2}{\epsilon N_d} \quad (2.1)$$

Q_S , serbest yük yoğunluğu, ϵ dielektrik sabiti, N_d , donörün safsızlığının konsantrasyonu, q , yüzey durum yükü ve N_S , yüzey yüklü durumların konsantrasyonudur. Tükenme tabakasının kalınlığı şöyle ifade edilebilir:

$$L_S = L_D \sqrt{\frac{eV_S^2}{kT}} \quad (2.2)$$

k , Boltzmann'ın sabiti ve T ise sıcaklıktır. L_D , Debye uzunluğudur aşağıdakiler tarafından verilmiştir:

$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon kT}{2\pi e^2 N_d}} \quad (2.3)$$

Tükenme tabakasının kalınlığı genel olarak 1-100 nm arasındadır [32].

2.4.3. Diğer faktörler

Kristallografik düzlem, katalitik asil metallere, metal oksit gözenekliliği gibi diğer birçok faktör de gaz sensörlerinin performansını etkileyebilmektedir.

Kristal yüzey etkisi

Kristal yüzey etkileri aşağıdaki gibi özetlenebilir [33]:

- 1) Taneciklerin büyümesi, kristalitlerin büyüklüğü ve dış şekli ile tutarlıdır. İlk büyüme durumundaki bir kristalin dahi mikro düzlemleri ve yüzeyleri vardır.
- 2) Dış nanokristal düzlemleri, gaz-katı etkileşime girdiklerinde gaz algılama özelliklerini belirler.
- 3) Her kristalin kendi kristalografik düzlemlerin kombinasyonu vardır. Bu, yüzey durumu yoğunluğunu, enerji konumunu ve adsorpsiyon / desorpsiyon enerjisini belirler. Kristal yüzey biriktirme işleminde kontrol edilebilmektedir.

Gözeneklilik

Gözenekli bir malzeme yapısı gaz moleküllerinin metal oksidin içine veya dışına kolayca dağılmasına yardımcı olmakta ve ayrıca reaksiyon yüzey alanını arttırmaktadır. Bu nedenle, yüksek malzeme gözenekliliği sadece tepki hızını artırmakla kalmaz aynı zamanda hassasiyeti de artırır. [34, 35].

2.5. Gaz Sensör Performansının Temel Özellikleri

Pratik olarak, bir gaz sensörü, sensör çalışmasının amacına, konumuna ve durumuna bağlı olarak birçok gereksinimi yerine getirmelidir. Sensörlerin özellikleri, belirli bir uygulamada sensör performansının değerlendirilmesine yardımcı olabilir. Bu gereksinimler arasında en önemlisi duyarlılık, tepki, seçicilik, tepki süresi ve iyileşme süresi gibi sensör performansı olmaktadır. Bu terimler ölçülebilir parametrelere göre tanımlanabilir.

Bir sensörün *duyarlılığı*, algılanabilen bir gazın en düşük konsantrasyonunun bir ölçüsüdür. Metal oksit yarıiletkenleri için ölçülebilir parametre, metal oksidin direncidir, bu nedenle yarıiletkenin duyarlılığı şöyle tanımlanır:

$$R_{duyarlılık} = \frac{R_{gaz} - R_{hava}}{R_{hava}} = \frac{\Delta R}{R} \times 100 \quad (2.4)$$

R_{hava} , havadaki sensör direncidir ve R_{gaz} gaza maruz kalan sensör direncidir. Denklem indiregeyici gazlar için iken karşılıklı yerler oksitleyici gazlar içindir.

Seçicilik, gaz sensörlerinin bir gaz karışımı içindeki belirli bir gazı tanımlama kabiliyetini ifade eder. Metal oksit bazlı gaz sensörleri için seçiciliğin araştırılması kritik öneme sahiptir, çünkü metal oksitler normalde birden fazla kimyasal türe karşı hassastır ve genellikle çapraz duyarlılıklar gösterir. Bu nedenle, metal oksit kökenli gaz sensörleri araştırmacıları için temel zorluklardan biri yüksek seçiciliktir. Seçicilik aşağıda sunulmuştur:

$$Seçicilik(S_p) = \left| \frac{S_{gaz(a)} - S_{gaz(b)}}{S_{gaz(a)}} \right| \quad (2.5)$$

Tepki süresi (T), bir sensörün sıfırdan belirli bir konsantrasyon değerine kadar konsantrasyon değişikliğine yanıt vermesi için gereken süredir. Tepki süresi, sensör bir hedef gaza maruz kaldığında doyma değerinin belirli bir yüzdesine (%50, %70 veya %90) ulaşmak için geçen süre olarak tanımlanır. Küçük bir tepki süresi değeri hızlı bir sensörü gösterir.

Geri kazanım süresi, sensörün belirli bir gaza maruz kaldıktan sonra sensörlerin başlangıç durumuna dönme kabiliyetini tanımlar. Bir sensörün tersinirlik performansı zamana göre belirlenir [36].

Kararlılık, tespit sınırı, dinamik aralık, doğrusallık, çözünürlük ve yaşam döngüsü gibi *diğer parametreler* de farklı uygulama taleplerine göre önem kazanmaktadır.

Gaz sensörünün kararsızlığına yol açan birkaç faktör vardır [37]: (1) tasarım hataları, (2) tanecik büyüklüğü veya tanecik ağı arasındaki değişiklikler gibi yapısal değişiklikler, (3) genellikle algılayıcı malzemelerle katkılı katkı maddelerinin ayrılması olarak adlandırılan faz kaymaları (4) kimyasal reaksiyonlarla tetiklenen zehirlenmeler ve (5) çevreleyen ortamın değişmesi. Sensörü daha kararlı hale getirmek ve tepki süresini kısaltmak için,

aşağıdaki yöntemler göz önünde bulundurulmalıdır: (a) kimyasal ve ısıl kararlılığa sahip metallerin kullanılması, (b) element bileşiminin ve tane büyüklüğü algılama malzemelerinin optimize edilmesi ve (c) sensörlerin yüzey ön uygulaması sırasında özel teknoloji kullanılması.

2.6. Metal Oksit Gaz Sensörü

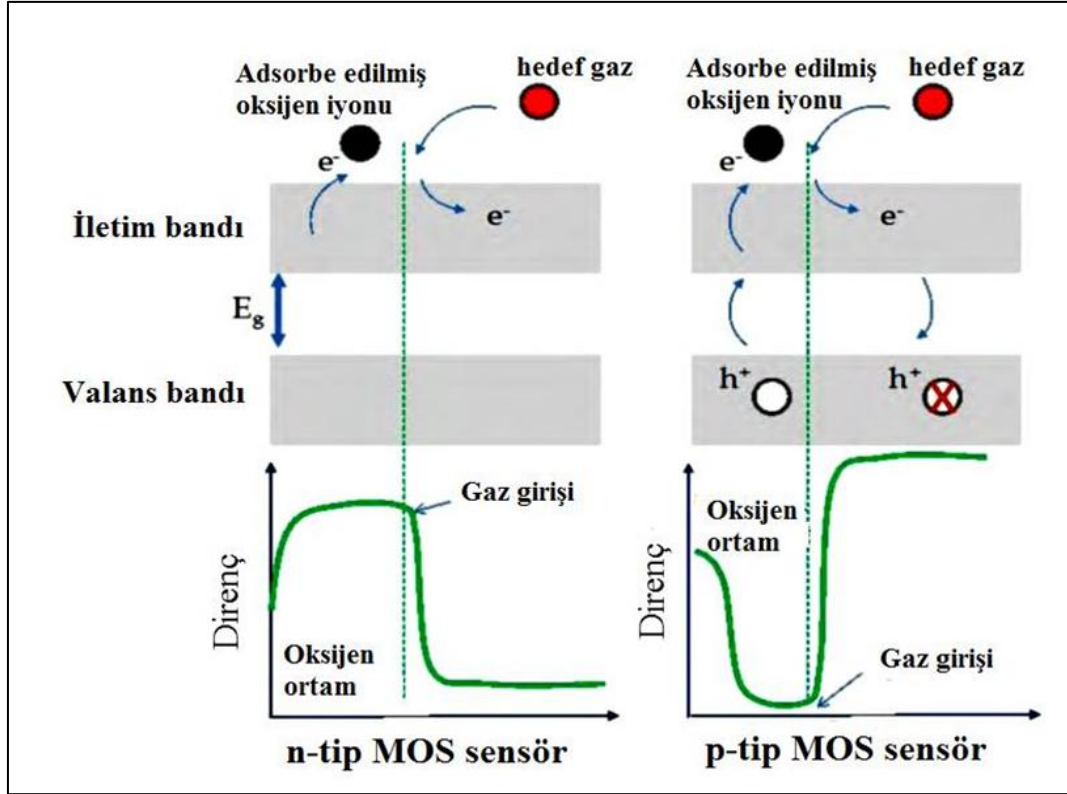
Kimyasal-dirençli gaz sensörleri olarak da bilinen yarıiletken gaz sensörleri, tipik olarak SnO_2 , TiO_2 , WO_3 , NiO , ZnO ve buna benzer metal oksit malzemelerine dayanmaktadır. Metal oksit yarıiletkenlerinin algılama malzemeleri olarak kullanılması, düşük maliyet ve yüksek duyarlılık gibi birçok avantaj sağlamaktadır.

2.6.1. n-tipi metal oksit gaz sensörü

n-tipi MOS'lardaki çoğunluk taşıyıcı elektron olduğu için, yarı-iletken özelliklerinden dolayı sıcaklık arttığında n-tipi MOS sensörünün direnci azalır. Bununla birlikte, oksijen ortam koşullarında, n-tipi MOS' un iletim bandındaki elektronlar adsorbe edilmiş oksijen iyonları tarafından uzaklaştırılır. Bu, taşıyıcı konsantrasyonunun düşmesine ve dolayısıyla n-tipi MOS sensörünün çalışma sıcaklığında direncinde bir artışa neden olur. n-tipi MOS sensörü hedef gaz ortamının altındayken (indirgeyici gaz), kimyasal reaksiyondan elde edilen elektronlar, sensör direncinde bir azalışa yol açan iletken bandına geri verilir [38].

2.6.2. p-tipi metal oksit gaz sensörü

Diğer taraftan, p-tipi MOS'lardaki ana taşıyıcılar deşiklerdir. n-tipi MOS'a benzer şekilde, p-tipi MOS'un sensör direnci sıcaklık arttıkça düşer. Bununla birlikte, oksijen ortam koşullarında, p-tipi MOS, oksijen iyonları değerlik bandından uyarılmış elektronlar vasıtasıyla yüzeyde adsorbe edildiğinde deşiklerdir üretir. Bu işlem, yük taşıyıcıların sayısında azalmayla sonuçlanır, bu da sensör direncinin azalmasına yol açar (n-tipinin aksine). p-tipi MOS sensörü hedef gaz ortamında (indirgeyici gaz) iken, elektronlar değerlik bandına enjekte edilir ve deşiklerle yeniden birleştirilir ve bu yöntem, sensör direncinin artmasına yol açan deşik sayısının azaltılmasına yol açar (n-tipinin aksine) [38]. Şekil 2.3'te indirgenmiş bir gaza maruz kaldığında hem n tipi hem de p tipi direnç değişikliğini göstermektedir.



Şekil 2.3. Hedef gaz (indirgeyici gaz) varlığında n- ve p- tip MOS için sensör direncindeki değişikliklerin şematik gösterimi [38]

Film tipi gaz sensörlerinin gaz performansı sadece yüzey reaksiyonlarıyla değil, aynı zamanda filmlerin morfolojisi ve mikro yapılarıyla da sınırlandırılabilir [39].

Çizelge 2.2. n- ve p- tipi maddelerin indirgeyici ve oksitleyici gazlara algılama cevap davranışı

Sensör cevap davranışı	n-tipi madde	p- tipi madde	Örnek gazlar
İndirgeyici gazlar	Direnç azalır	Direnç artar	H ₂ , H ₂ S, CO, NH ₄ , Etanol, Aseton, CH ₄
Oksitleyici gazlar	Direnç artar	Direnç azalır	O ₂ , O ₃ , NO _x , CO ₂
Baskın yük taşıyıcı	Elektronlar (e)	Deşikler (h)	

2.7. Yarıiletkenler

Maddeler, kendilerine voltaj uygulandığında elektrik verme şekillerine göre kategorize edilebilir [40]. İletkenliği $10^{-12}\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ 'den az veya dirençleri $10^{12}\Omega\text{cm}$ 'den büyük olan

malzemeler yalıtkan veya dielektrik olarak kabul edilir. İletkenliği $10^3\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ 'den büyük veya dirençleri $10^{-3}\Omega\cdot\text{cm}$ 'den az olan malzemeler iletken olarak kabul edilir. İletkenliği $10^3\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ 'den az ancak $10^{-12}\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ 'den büyük olan malzemeler yarıiletken olarak kabul edilir (Bunlar yaklaşık değer aralıklarıdır) [41].

İki tür yarıiletken vardır. İçsel bir yarıiletken malzeme kimyasal olarak çok saftır. Düşük iletkenliğe sahiptir. Aynı sayıda negatif ve pozitif yük taşıyıcısı taşır. Dışsal yarıiletkenler, içsel yarıiletkenlerdir. Katkılama işlemi ile az miktarda kirlilik eklenir. Yarıiletkenlerin elektriksel özelliklerini değiştirir. Aynı zamanda iletkenliği de artırır. Katkılama işlemi iki grup yarıiletken oluşturur.

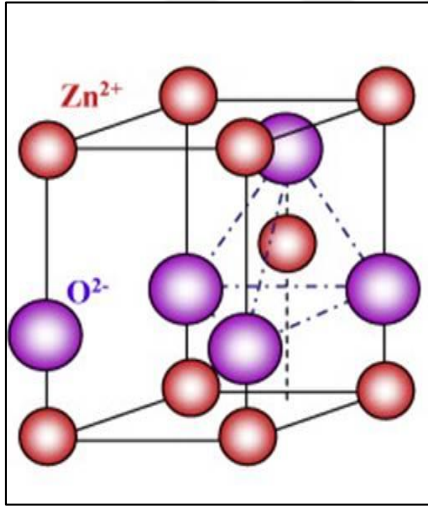
- a) Negatif yük iletkenleri veya (n tipi)
- b) Pozitif yük iletkenleri veya (p tipi).

2.8. ZnO

Son yıllarda, malzeme bilimlerindeki araştırmaların çoğu, geniş bant aralığına sahip yarıiletken malzemelere odaklanmaktadır. Bunlardan biri, lineer olmayan yeni optik özellikleri nedeniyle çok işlevsellik gösteren çinko oksittir (ZnO). ZnO ince filmlerin ve mikro ve nanoyapıların avantajları, ZnO malzemesinin bolluğu ve zehirli olmaması, düşük maliyet ve kuantum büyüklüğü etkisidir. Ek olarak, ZnO, 26 meV galyum nitür (GaN) ile karşılaştırıldığında 60 meV'luk çok daha büyük bir serbest bırakma bağlanma enerjisine sahiptir ve bu, oda sıcaklığına kadar etkili bir uyarılmış emisyon sağlar. Bu nedenle, ZnO, elektriksel, optoelektronik ve ilgi çeken özelliklerinden dolayı çok umut verici bir fonksiyonel elektronik malzeme olarak kabul edilir. Bunlar çok yakın zamanda yayınlanan çok sayıda makale ile gösterilmiştir. Çinko oksit, günümüzde nanoteknoloji alanında kullanılan ana malzemelerden biridir. Doğrudan 3.37 eV yasak enerji aralığına ve oda sıcaklığında (300K) 60meV'lik büyük bir dışlanma bağlanma enerjisine sahip geniş bant aralıklı bir yarıiletkendir. Polikristal ZnO, ultraviyole (UV) ışık yayıcılar, kısa dalga boylu nano-lazerler, pizoelektrik cihazlar, aşırı duyarlılık, spin elektronığı, alan etkili transistörler ve alan yayıcılar gibi benzersiz özellikleri ve çok yönlü uygulamaları için araştırmaları yoğun şekilde kendine doğru çekmiştir. Nanoyapılı ZnO, çevresel ve sağlıksal tehlikeleri olmayan optik, optoelektronik, spintronikler, sensörler, aktüatörler, enerji, biyomedikal

bilimler, vb. alanlarda geniş bir uygulama alanına sahip etkileyici bir çeşitlilikte morfoloji sergilemektedir [42].

ZnO, ZnS gibi, ortam koşullarında termodinamik olarak kararlı fazda olan vürtzit yapı tipine sahiptir. ZnO vürtzit yapısı, $a = 3.25 \text{ \AA}$ ve $c = 5.12 \text{ \AA}$ boyutlarında altıgen kapalı paketlenmiş ünite hücrelerine sahiptir. Yapı, altıgen bir kapalı paket kafesin tetrahedral deliklerinin yarısında Zn^{+2} iyonları olarak görselleştirilebilir; boyuna eksenli yapı (c eksenli) - Şekil 2.4. Bu kristal yapıda, hem çinko hem de oksijen iyonları güçlü iyonik bağlanma ile karşı yükün dört iyonu ile koordine edilir. İyonların boyut farklılığından dolayı, iyonlar bir ZnO kristalinde toplam hacmin yaklaşık %44' ünü doldurur ve nispeten büyük bir serbest hacim bırakır [43].



Şekil 2.4. ZnO kristali: vürtzit yapısı, tetrahedral deliklerde O atomlarının Zn^{+2} ile hegzagonal sıkı paketlenmiş düzenlemesi

Kusursuz ZnO tekli kristalleri sadece yüksek oksijen basınçları altında ve nispeten yüksek sıcaklıklarda sentezlenebilir. Ortam koşullarında, oksijen boşlukları ZnO kristallerinde büyük bir kusurdur. ZnO_{1-x} , ısıtma sonrası yapıda oksijen boşluklarının oluşmasından dolayı, stokiyometrik olmayan bir bileşiktir. Dolayısıyla, ZnO, değerlik bandındakideşiklerin yoğunluğunun, iletim bandındaki elektronların yoğunluğu ile aşıldığı, tipik bir n-tipi yarıiletkenidir; ZnO yarıiletkenlerindeki ana yük taşıyıcı, iletim bandındaki elektronlardır. Oksijen boşluklarının oluşmasıdaaha yüksek bir elektron yoğunluğuna yol açar; bant aralığındaki boşluklardan verici bantlar oksit iletkenliğinde önemli bir artışa yol açar.

ZnO 'nun tipik özellikleri Çizelge 2.3' de sunulmuştur.

Çizelge 2.3. ZnO seçilmiş özellikleri [43]

Kristal yapı	Hekzagonal, vürtzit
Moleküler ağırlık	81,38 g/mol
Kafes sabiti	a=3,246Å, c=5,207Å
Yoğunluk	5,67 g/cm ³ ya da 4,21 x 10 ¹⁹ molekül/mm ³
Kohesif enerji	1,89eV
Erime noktası	2250K basınç altında
Füzyon sıcaklığı	4,470 kal/mol
Oda sıcaklığında bant aralığı	3,37eV
Uyarılmış nükleon bağlanma enerjisi	60meV

2.8.1. ZnO nano-yapılarının materyal özellikleri

Yarıiletken bir metal oksit olan ZnO, sensörler, güneş pili elektrotları [44, 45], optik dalga kılavuzu cihazı [46], ve ışık yayan cihaz [47] gibi geniş uygulama yelpazesinde olası kullanımı nedeniyle yıllar boyunca büyük ilgi görmüştür. Çeşitli ZnO nano yapılarının ve ZnO bazlı ince filmlerin gaz algılama özellikleri, çeşitli analitlere duyarlılıkları bakımından geniş çapta araştırılmıştır [48-50]. Geçmişte, birçok araştırmacı ZnO tabanlı gaz sensörleri için yüksek çalışma sıcaklıklarını (200 °C – 500 °C) bildirmiştir [50]. Bu yüksek çalışma sıcaklıkları, yüksek güç tüketimi için gaz sensörlerinde yarıiletken metal oksitlerin kullanımını sınırlamıştır. Ancak, bu alandaki son gelişmelerle araştırmacılar metal oksit bazlı gaz sensörleri için çok daha düşük çalışma sıcaklıkları bildirmişlerdir.

ZnO nanoyapıları, ZnO partiküllerinin çözülmesi veya kimyasal banyo birikintileri gibi basit teknikler kullanılarak hazırlanabilir [51]. Bu sentezlenmiş nanoyapılar için çeşitli morfolojiler, işlem koşullarının değiştirilmesiyle gösterilmiştir. Sentezlenen nano yapının şekline ve boyutuna bağlı olarak, malzeme, çok yüksek veya düşük direnç gösterme açısından farklı elektriksel özellikler gösterebilir. Aynı zamanda, malzemenin mekanik özelliklerindeki değişiklik, açık adı MEMS bazlı basınç sensörleri gibi diğer yeni uygulamalarda kullanılmasını cazip hale getirmektedir [52]. Bu çok yönlü özellikler ve

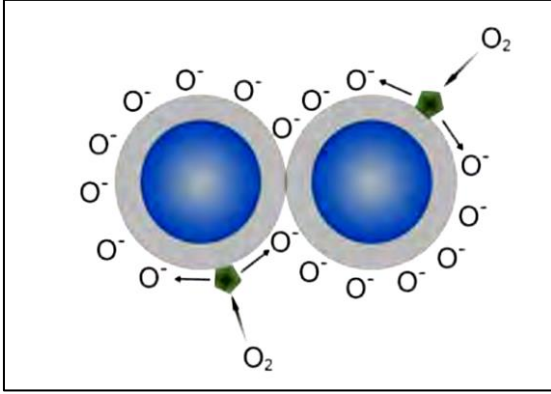
ZnO için basit sentez teknikleri, çeşitli uygulamalar ve yeni gaz sensörleri için kullanımıyla sonuçlanmıştır.

2.8.2. Diğer metal oksitler

SnO₂, Al₂O₃, CuO, In₂O₃, Cr₂O₃, NiO, WO₃ ve TiO₂ gibi metal oksitler, esas olarak hedef gazlara karşı direnç değişim tepkilerine dayanan sensörlerle yanıcı, indirgen veya oksitleyici gazları saptamak için kullanılabilir [53]. Örneğin, TiO₂ çok değerli özellikleri olan yaygın bir ticari malzemedir [54, 55]. TiO₂, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) [56], metan (CH₄) [57], karbonmonoksit (CO) [58], etanol [59] ve hidrojen sülfür (H₂S) gibi çok çeşitli gaz türlerine karşı duyarlıdır [60]. Yaygın olarak kullanılan bir başka metal oksit yarıiletken, tungsten trioksit'tir (WO₃) [61, 62]. WO₃, azot oksitlerin, yani NO₂ ve NO' ların tespiti için en yaygın kullanılan malzemelerdir. Minimum çapraz duyarlılığa sahip diğer metal oksit yarıiletken malzemelere kıyasla NO₂' ye en yüksek yanıtı sağlar ve birçok ticari üründe kullanılmaktadır.

2.9. Nanoölçek Seviyelerdeki Metal Oksit Yarıiletken Nanoyapıların Katkılanması

Metal oksit algılama filminin katkılanması gaz sensörleri için geleneksel bir teknolojidir. Katkı maddelerinin metal oksit yüzeyler üzerindeki etkisi esas olarak iki modelle açıklanmaktadır: 1) Katalitik etki ve 2) Yayılma etkisi. Bu modellerde, metal veya MOS katkı maddelerinin dağınık kümeler halinde algılayan oksit yüzeyinde bulunduğu varsayılmaktadır [63]. Geleneksel katkılayıcı kavramı, katalitik etkinliği arttırmak ve içsel metal oksidin elektriksel direncini ayarlamaktır [64]. Katkı maddesi genellikle oldukça aktiftir, bu da tercihen adsorbe edilmiş moleküllerle reaksiyona girmesini sağlar. Katkı maddesi genellikle metal oksit matrisi üzerinde dağılır, böylece tüm tanecikler arası temas noktalarına yakın bir yerde bulunurlar. Havada, oksijen molekülleri tercihen katkılayıcı oluşturan oksijen anyonları ile reaksiyona girer ve ardından metal oksit matrisine dökülür - Şekil 2.5. Hedef gazlar, katkılayıcının yüzeyine adsorbe edildiğinde ve daha sonra yüzey oksijen türleriyle reaksiyona girmesi için oksit yüzeyine taşınır ve böylece yüzey iletkenliği artar.



Şekil 2.5. Katkılı metal oksit yüzeyinde oksijen yayılma işlemi [65]

Gaz algılama özelliklerini geliştirmek için bir başka yöntem, n-tipi malzemelerden p-tipi olanlara elektron transferi nedeniyle tükenme bariyer yüksekliğini arttırabilen p-n birleşimleri oluşturmaktır [66]. Sensör, azaltılmış hedef gazlara maruz kaldığında, absorbe edilen oksijen türleri ve p tipi materyaller tarafından tutulan elektronlar, yüzey etkileşimleri yoluyla n-tipi malzemelere geri beslenir, bu da önemli ölçüde azalmış bir sensör direnci ile sonuçlanır. Bu nedenle, sensör tepkisi önemli ölçüde iyileştirilmektedir.

2.9.1. ZnO ince filmleri üzerinde katkılama işlemleri ve etkileri

Katkılı olmayan ZnO filmleri, düşük taşıyıcı konsantrasyonu nedeniyle [67] zayıf elektriksel özelliklere sahiptir ve havada kararlı değildir ve elektriksel özellikleri, O₂, CO₂, hidrokarbonlar, S içeren bileşikler ve suyun adsorpsiyonundan önemli ölçüde etkilenir. ZnO, çeşitli uygulama alanlarının taleplerini karşılamak için çok çeşitli iyonlarla katkılanabilir. Çinko oksitin tekli kristal ve polikristal filmleri, mekanik, elektriksel ve optik özelliklerini arttırmak için III B' den VII B grubuna ait Li, Ga, In, N, Al, Sn ve P gibi alkali metaller ile katkılanabilmektedir [68]. ZnO katkılanması, Zn⁺² atomlarını In⁺³, Al⁺³, Sn⁺⁴, Pb⁺⁴ gibi daha yüksek değerlikli elementlerin atomları ile değiştirerek elde edilir [69].

Pizelektrik transformatörler ve varistörler gibi elektronik bileşenlerin kullanımında, katkılayıcıların etkileri çok önemlidir. Tipik ZnO temelli varistör, Bi, Pr, Mn, Co, Cu, Sb, V, Cr ve Al gibi birkaç katkılayıcı içeren oldukça karmaşık bir kimyasal sistemdir. ZnO' in elektriksel özellikleri; bileşim ve mikro yapı ile yakından ilgilidir. Bu nedenle, bireysel katkı maddelerinin etkilerini temel bir şekilde anlamak önemlidir. ZnO varistöründe veya

ince filmde katkılama elementleri hakkında bazı çalışmalar mevcuttur, ancak bazı katkılama elementlerinin ZnO' in tanecik ve tanecik sınırı üzerindeki etkileri hala belirsizliğini korumaktadır, çünkü katkılama etkileri farklı deneysel sistemler altında oldukça farklı sistemlerde incelenmektedir ve temel bir yolla özgün katkılayıcının etkisi, ZnO' da çok bileşenli diğer katkılayıcılar tarafından karmaşık olabilmektedir. Bu nedenle, her bir katkılayıcının ZnO' in elektriksel özelliklerinde rolünü anlamak için çeşitli katkılayıcıları bağımsız olarak sistemik bir şekilde araştırmak gerekir [70].

Al, Ga ve In gibi grup III elementlerin uygun safsızlıklar olarak katkılanması, en uygun elemanlar olduğu tespit edildimiştir, ZnO ince filmlerin elektrik iletkenliğini ve optik özelliklerini önemli ölçüde artırabilmektedir [67].

ZnO ince filmlerinin elektro optik özellikleri, biriktirme ve biriktirme işleminden sonra (tavlama) koşullara büyük ölçüde bağlıdır, çünkü bu özellikler, çökeltme işlemi sırasında meydana gelen oksijenin adsorpsiyonu ve indirgeyici bir atmosferde tavlama işlemi sırasında desorpsiyonu ile seçilen katkılama elemanının doğası ile önemli ölçüde değişmektedir [71].

2.9.2. Katkılama türleri

İki tür katkılama vardır: n-tipi katkılama ve p- tipi katkılama.

n-tipi Katkılama

Negatif olarak yüklenen elektronlar, yarıiletken n-tipi katkılayıcılar tarafından eklenir. n-tipi katkılama için, Zn veya O' in, dış kabukta ikameleri değiştirdikleri atomdan daha fazla bir veya iki elektronu olan atomlarla değiştirilmesi seçilir. Bu nedenle, III veya IV grubu elementler Al, Ga, In, Sn ve Si, Zn katyon bölgelerinde aşağıdaki gibi sığ ve etkili vericilerdir:



D^0 nötral verici ve D^+ iyonize vericidir ve eşitlik oda sıcaklığındadır [72]. ZnO filmlerinin alüminyum, galyum veya indiyum tarafından katlanması, elektriksel özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu bildirmiştir [73-79]. ZnO filmlerinin katlanması sadece elektriksel özelliklerini değil aynı zamanda sağlamlıklarını da geliştirir. Örneğin, ağırlıkça % 3 In ile katlı ZnO filmlerinin [80] vakumda 650 K' e ve oksijen ortamında 450 K' e kadar termal kararlılık gösterdikleri bulunmuştur. Birçok araştırmacı [80-83] alüminyum katlı ZnO' in yüksek iletken filmlerini bildirmiştir.

p-tipi Katkılama

Grup I, Li, Na veya K elementlerinin Zn bölgesinde üstün alıcılar olması beklenmektedir [84-86]. Aslında Li, Na, K ve ayrıca Ib elementleri ve Cu ve Ag' nin alıcıları oluşturduğu tanımlanmıştır [87]. Birçok araştırmacı son zamanlarda Grup V' e ait N, P, As ve hatta Sb elementlerinin O bölgeleri üzerinde p-tip katkılama üzerinde odaklanmaktadır. Look ve ark., tarafından özetlenen çok sayıda yetersiz tekrarlanabilir sonuçlar ve diğer problemlerden sonra, ZnO' in N, As ya da P ile p-tip katkılaması üzerinde tutarlı çalışmalar bulunmaktadır [84, 88-90].

2.9.3. Al katlı çinko oksit ince filmleri

Düşük bir çalışma sıcaklığı ve yüksek performans elde etmenin bir yolu, ZnO'da safsızlık katkısı uygulamaktır. Bir katkılayıcı olarak alüminyum, ZnO gaz sensörlerinde çok önemli bir rol oynar. Nanto ve ark., Al katlı bir ZnO filminin bir koku sensörü olarak uygulanabileceğini bildirmişlerdir [91, 92]. Katkılanmamış ZnO ile karşılaştırıldığında, Al-katlı ZnO (ZnO: Al) filmleri daha düşük direnç ve daha iyi kararlılığa sahiptir. Çoğu cihaz uygulamasında, ZnO:Al film birikimi yüksek işlem sıcaklıklarında (500 °C) gerçekleştirilmiştir. Yüksek kalitede ZnO: Al' un düşük sıcaklıkta üretilmesi, polimer substratları ve sıcaklığa duyarlı bileşenler üzerinde cihazların ve kontakların üretilmesini sağlamaktadır [93].

Ayrıca ZnO ince filmlerinin, OLED'lerde anod olarak potansiyel kullanım için uygun yapan ITO filmlerine kıyasla azalmış ortamda daha kararlı, bol ve daha az pahalı olmasından dolayı ince ZA filmlerinin uygun anodlar olduğu düşünülmektedir [94]. Al-katlı ZnO (ZA) filmi, CIS ince film güneş hücrelerinde Standart ön elektrottur ve verimli

ışık tutması için kolayca dokulu yüzeyine sahip olan silikon ince film güneş hücreleri için bir pencere katmanı olarak çalışılmıştır [95].

2.10. Tepki Mekanizması

Algılama Mekanizma Fonksiyonu

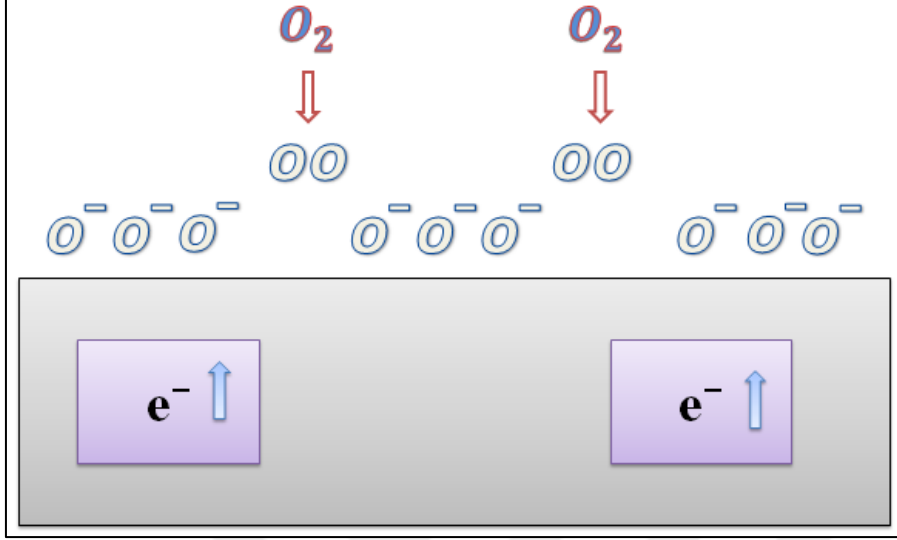
Yarıiletken oksitlerin iletkenlikleri genellikle stokiyometriden sapmalarından kaynaklanmaktadır. İnterstisyel katyon veya anyon boşluğu gibi hatalar da iletkenliklerinde önemli bir rol oynamaktadır. Hedef türler iki gruba ayrılabilir:

- a) n-tipi yarıiletken maddelerin iletkenliğinde bir düşüş (örneğin, elektronlar ZnO, SnO₂, In₂O₃ gibi ana taşıyıcılarıdır) ve p- iletkenliğinde bir artış meydana getiren NO₂ gibi *oksitleyici gazlar* veya elektron alıcıları tip yarıiletken malzemeler (yani deşikler CuO gibi ana taşıyıcılarıdır)
- b) Tersine etki eden, H₂S, CO, H₂ ve su buharı gibi *indirgeyici gazlar* veya elektron vericileri.

Bir sensörün algılama mekanizması, özelliklerinin çevresel değişikliklere bağlı olarak farklılık gösterdiği gerçeğine dayanmaktadır ve özelliklerinin değişimini izlenmesi gazların konsantrasyonundan daha kolaydır. Bir yarıiletken için, elektronik özellikler oksidasyonda ve indirgeyici gazlarda değişir. Bir metal oksit yarıiletken ile gaz algılama işlemi iki temel işlevi içerir: birincisi, hedef gazın, oksit yüzeyinin (genellikle *reseptör işlevi* olarak adlandırılır) elektronik değişimini içeren bir gaz-katı etkileşimi yoluyla tanınmasıdır; ikincisi ise, yüzey fenomeninin, *dönüştürücü işlevi* olarak adlandırılan sensörün elektriksel direnç değişimine dönüştürülmesidir. Takip eden tartışma nanokristal çinko oksidin algılama mekanizmasına odaklanmasına rağmen, gerçek mekanizma çok sayıda metal okside de uygulanabilmektedir.

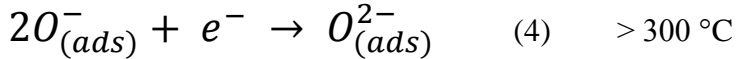
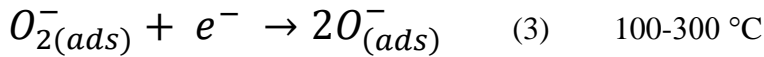
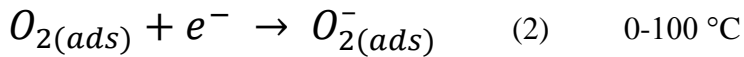
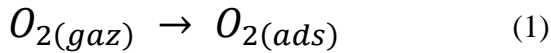
İlk çalışma, normal hava koşullarına maruz kalan ZnO yüzeyini kapsamaktadır. Oksijen havadaki en aktif bileşenlerden biridir ve ortam havasındaki oksijen miktarı her hacimde yaklaşık % 20,9' a ulaşmaktadır. Metal oksit yüzeylerindeki oksijen boşlukları kimyasal ve elektriksel olarak aktiftir. Metal oksitler, genellikle bu yüzey havaya maruz kaldığında her

zaman metal oksit yüzeyine adsorbe edilmiş oksijen olduğundan, oksijene karşı doğal olarak pasifleştirilmektedir.



Şekil 2.6. Metal oksit yüzeyinde O_2 kemisorbsiyonun şematik gösterimi [96]

Oksijen molekülü, metal oksit yüzeyindeki boşluk bölgelerine bağlanabilir ve Şekil 2.6' da gösterildiği gibi yüzeyden metal okside elektronları hapsedebilir. Daha sonra yüklü bir oksijen anyonu olarak sıkıca bağlı kalır. Sıkışmış elektron katı halde iletkenlik için artık mevcut değildir, böylece oksit yüzeyinin direncini artırır. Bu işlemler aşağıdaki reaksiyonlarla gösterilebilir [1-4]:



Bu reaksiyonlarda, (gaz) ve (ads), sırasıyla yüzeyde serbest gaz ve adsorbe edilmiş türlerin, ZnO' nun katkısı olan elektronların kısaltmasıdır. $O_{2^-(ads)}$, $O^-(ads)$, $O^{2-}_{(ads)}$ farklı fiziksel ve kimyasal olarak emilmiş yüzey oksijen türlerini ifade eder. Reaksiyonların (2-4) artan sıcaklıklarda sırayla tetiklendiği bilinmektedir: $O_{2^-(ads)}$, 100 °C' nin altındaki ana oksijen türleridir ve sıcaklık 300 °C' nin üzerinde olduğunda $O^{2-}_{(ads)}$ baskın hale gelir. Sıcaklık 100

°C ila 300 °C aralığında olduğunda, $O_{(ads)}^-$ ana rolü oynar [97]. Metal oksit gazı sensörleri, genellikle yukarıda tartışıldığı gibi, bu sıcaklıklarda oksijen anyonlarının oluşumu nedeniyle, sensör materyalleri ve analit gazları arasında daha yüksek kimyasal reaktivite elde etmek amacıyla, yüksek sıcaklıkta (250-500 °C) çalışmaktadır.

2.11. Gaz Sensörü için Nanokristal Metal Oksit Sentezi

Serigrafi ve kimyasal veya fiziksel buhar birikimi (CVD veya PVD) dahil olmak üzere metal oksit yarıiletken sensörlerini imal etmek için birçok teknik kullanılabilir. Uygun imalat yöntemlerini seçerken, farklı uygulama taleplerine dayanarak, maliyet, saflık, gözeneklilik gibi çeşitli hususlar göz önünde bulundurulmalıdır.

2.11.1. Serigrafi

Serigrafi (screenprinting), ticari olarak metal oksit yarıiletken gaz sensörleri üretmek için en yaygın kullanılan yöntemdir. Serigrafi baskı için kullanılan mürekkep, biriktirilecek materyali içerir. Alt tabakalarda gerekli düzeni sağlamak için mürekkep gözenekli bir tabaka veya ağdan geçirilir. Bir ısı işleminden sonra, belirli bir alanda bir katı madde tabakası biriktirilir [98].

2.11.2. Kimyasal buhar biriktirme (CVD)

Kimyasal buhar biriktirme, yüksek saflıkta katı malzemeler üretmek için alttaş üzerinde tepkimeye giren ve/veya ayrışan bir veya daha fazla uçucu bileşiğin işlemidir [99, 100]. CVD işlemi nispeten düşük sıcaklıkta yüksek bir biriktirme oranına sahiptir. Genellikle, CVD biriktirilmiş filmler iyi bir uyum kapsamı, homojenlik, yapışma ve yüksek saflık sergiler. CVD, gaz sensörü uygulamaları için bir dezavantaj olan yoğun filmler üretir [101].

2.11.3. Fiziksel buhar biriktirme (PVD)

Fiziksel buhar biriktirme, bir atomik seviyede malzemenin transferini içeren bir buharlaştırma kaplama tekniğidir. İşlem, biriktirilecek malzemenin genellikle katı halde olması dışında kimyasal buhar birikmesine benzemektedir [102-106].

2.12. Sol-Jel Tekniği

Fiziksel / kimyasal buhar biriktirme teknikleri, üretim maliyetlerini artıran pahalı buharlaşma/ püskürtme/yüzeysel erime ekipmanının yanı sıra, elde etmek ve sürdürmek için zaman alan vakum veya azaltılmış basınç koşullarını gerektirir. Sol-jel işlemi, basit prosedürü, film kalitesi kontrol edilebilirliği, maliyet etkinliği ve geniş alan kaplama kabiliyeti nedeniyle vakum biriktirme yöntemlerine güçlü bir alternatiftir [98]. Ayrıca, katkılayıcılar bir sol-jel işlemi kullanılarak kolayca sokulabilir.

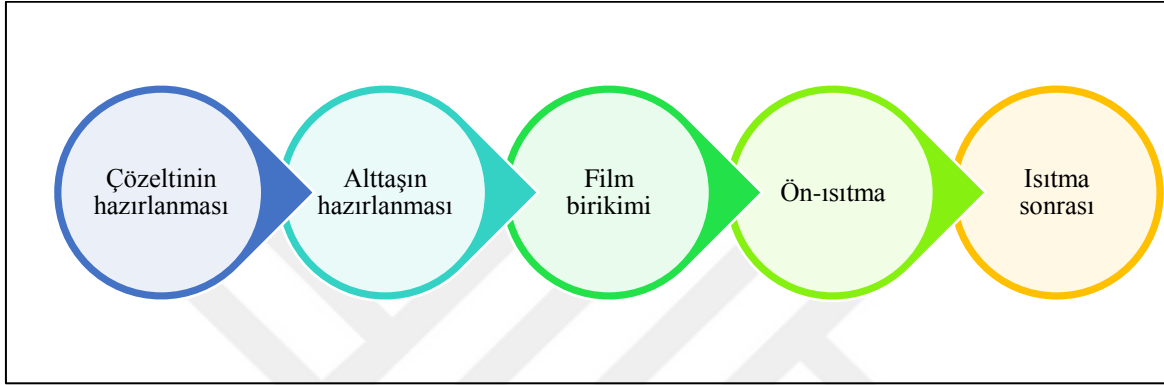
Sol-jel, yüzeylerin optik, elektrik, kimyasal ve mekanik özelliklerini geliştirmek için cam, seramik, metal ve polimerlere uygulanabilen bir kaplama tekniğidir. Sol-jel işlemi ile hazırlanan malzemelerin üretimi ve kullanımı üç ana kategoriye; dökme cam, kaplama ve elyaflar olarak ayrılabilir [107]. Geleneksel sol-jel işlemi, kolloidal bir süspansiyonun (sol) oluşumu yoluyla inorganik ağların gelişimini ve sürekli bir sıvı fazda (jel) bir ağ oluşturmak için solun jelleşmesini sağlar [108].

2.12.1. Sol-jel işlem uygulamaları

Sol-jel film mikroyapısını ve özelliklerini etkileyen ana faktörler ve özellikleri şunlardır: çözelti kimyasal dengesi (kimyasal bileşim, konsantrasyon, pH, reaktiflerin karışma sırası sıcaklığı), film biriktirme sırasında substrat-film etkileşimi (sol viskozite, eğirme-daldırma kaplama parametreleri) ve biriktirilmiş jel filminin ısı işlemi (her tabaka biriktirme arasındaki ön ısıtma süresi ve sıcaklığı, son ısıtma işleminin zaman-sıcaklık atmosferi, zaman, sıcaklık ve nihai tavlama atmosferi [109]). Sol-gel işlemi hemen hemen tüm tek veya çok bileşenli oksit kaplamayı imal etmek için kullanılabilir. Bu tür kaplamalar, renklenme, yansıma önleyici, seçici yansıma, elektrokromizm ve fotokromizm, seçici soğurma, dalga kılavuzluğu, azaltılmış sürtünme, kirlenmeyi önleyici yapışma, saydam iletkenler, elektro-optikler, Ferro-elektrikler, sensörler, ve boya lazerleri sağlamak için cam üzerine bırakılmaktadır [110].

İşlem, ardışık beş aşamadan oluşur, çözeltinin hazırlanması, substratların hazırlanması, film biriktirme, ön ısıtma ve ısıtma sonrası. Aşamalar Şekil 2.7' de gösterilmiştir. Çözelti aşamasını hazırlarken, gerekli tüm kimyasallar homojen, berrak ve şeffaf bir çözelti oluşturmak için tahmini oranlarda karıştırılır. Sonra hazırlanan çözelti belli bir süre için

bekletilir. İkinci aşamada, substratlar ultrasonik olarak aseton ve alkol ile temizlenir, ardından sırasıyla havada kurutulur. Film biriktirme aşaması, hazırlanan substratın hazırlanan çözeltide belirli bir süre, substrat tamamen ıslanana ve film kalınlığı tatmin edici seviyelere gelinceye kadar daldırılmasıyla başlar ve daha sonra substrat çözeltiden kontrollü bir oranda çekilerek tamamlanır. Ön ısıtmada organik artıklar buharlaştırılır. Güçlü radikallerin ayrışması ve kristal yapının oluşumu ısıtma sonrası gerçekleşir.



Şekil 2.7. Sol-jel sürecinin aşamaları

2.12.2. Sol-jel'in biriktirme teknikleri

Döndürerek kaplama (spin-coating), daldırmalı kaplama, akıtmalı kaplama, laminer kaplama, merdaneli kaplama ve püskürtmeli kaplama gibi pek çok sol-jel biriktirme tekniği vardır. Daldırmalı kaplama, kolay uygulama prosedürü ve düşük maliyeti nedeniyle en yaygın kullanılan sol-jel biriktirme tekniğidir.

Sol-jel işlemi ile sol-jel kaplamaları yapmak için çeşitli yöntemler kullanılabilir. Döndürerek kaplama ve daldırma kaplama, sol-jel kaplamaları biriktirmek için kullanılan iki temel tekniktir. Döndürerek kaplama tek taraflı bir kaplama sağlarken, daldırma kaplama çift taraflı bir kaplama verir. Her iki teknik de farklı kaplamalar ve ince filmler yapmak için imalatta kullanılmaktadır.

Merdaneli kaplama başka bir kaplama tekniğidir ve endüstriyel kaplamalar için, özellikle esnek yüzeylerde yaygın olarak kullanılır. Dakikada 200 ft hıza kadar kaplama yapabilmektedir.

Döndürerek Kaplama. Sol-jel döndürerek kaplama tekniği, düşük maliyetli, düşük tavlama sıcaklığı, geniş alan filminin büyümesi, basit çalışma prensibi ve kompozisyon modifikasyonları gibi ZnO ince film sentezi için çeşitli avantajlara sahiptir. Döndürerek kaplama, nispeten düz substratların veya nesnelerin ince malzeme katmanlarıyla kaplandığı birçok uygulama için kullanılmaktadır. Örneğin, birkaç katod ışını tüpü (CRT) üreticisi, parlama önleyici veya yansıma önleyici kaplamalar yapmak için sıkma kaplama yöntemini kullanmaktadır. Döndürerek kaplamada, kaplama içine yapılacak malzeme bir çözücü içinde eritilir veya dağıtılır ve bu kaplama çözeltisi daha sonra yüzeye bırakılır ve sonraki işlem aşamaları ve nihai kullanım için düzgün bir tabaka bırakacak şekilde döndürülür. Resim 2.1, genel uygulamalar için portatif bir döndürerek kaplayıcıyı göstermektedir.

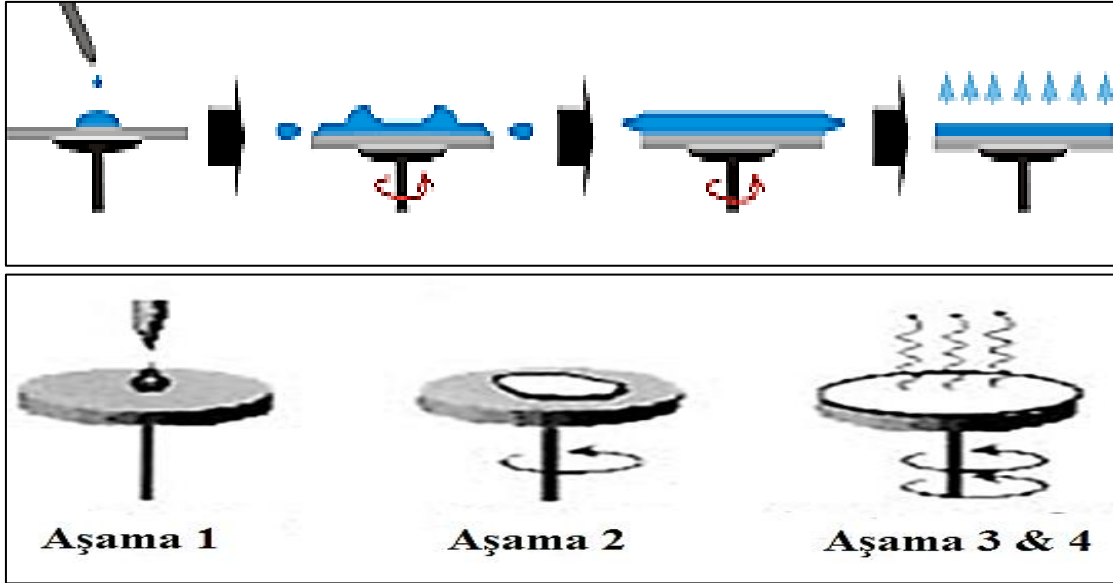


Resim 2.1. Genel uygulamalar için taşınabilir bir döndürme kaplayıcı

Spin kaplamada dört ana aşama vardır (Şekil 2.8):

- Aşama 1: Kaplama sıvısının alt tabakaya biriktirilmesi
- Aşama 2: Alt tabaka yüzeyinden dönme hareketi ile agresif sıvı atılması
- Aşama 3: Kademeli sıvı inceltme
- Aşama 4: Çözücü buharlaşmasıyla inceltme kaplama

Kaplama kalınlığı, dönme hızının karekökü ile ters orantılıdır: kalınlık $\sim [1 / \text{hız}]^{1/2}$. Ek olarak, kaplama çözeltisi özellikleri (viskozite ve sıvı konsantrasyonu gibi) da kaplama kalınlığını etkiler.



Şekil 2.8. Döndürerek kaplamanın dört aşaması [111]

Resim 2.2' de gösterilenler gibi bazı döndürerek kaplama sistemleri, oftalmik lenslerin üzerine çizilmeye dayanıklı kaplamaların bırakılması için özel olarak tasarlanmıştır. Bu sistemler temizleme, çözelti sağlama, döndürerek kaplama ve iyileştirme (termal veya ultraviyole) dahil olmak üzere birçok fonksiyona sahiptir. Oda ortamındaki sıcaklık ve atmosfer, yüksek kaliteli sonuçlar sağlamak için tam olarak kontrol edilebilir [111].



Resim 2.2. Oftalmik lensler üzerine çizilmelere karşı dirençli kaplamaların biriktirilmesi için özel olarak tasarlanmış bir döndürerek kaplama sistemi

2.13. Karbonmonoksit

2.13.1. Karbonmonoksitin tespit edilme sebepleri

Karbonmonoksit (CO) renksiz bir gazdır, kokusuzdur ve bu özellikleri CO' i insanlar için tespit edilemez kılmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki zehirlenmelerin önde gelen nedenidir ve birçok sanayi ülkesinde rapor edilen ölümcül zehirlenmelerin %50' sinden fazlasını oluşturabilir. Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Mesleki Güvenlik ve Sağlık Enstitüsü tarafından belirlenen azami zaman ağırlıklı ortalama maruz kalma değeri 8 saatlik bir süre boyunca 35 ppm' dir [98]. Gaz, esas olarak, benzin, yağ veya gaz gibi, kötü yanmış organik maddelerin bir ürünüdür. Karbonmonoksit sürekli olarak kamunun dikkatini çekmektedir, çünkü genellikle yıllık ölümlere yol açan hatalı gazla çalışan kazanlardan dolayı ev ortamı karbonmonoksit zehirlenmesi için oldukça hassas bir yerdir. Karbonmonoksit konsantrasyonları, fosil yakıtların enerji amaçlı kullanıldığı sanayi alanlarında ve yüksek trafik seviyesine sahip şehirlerde özellikle yüksektir. Mevcut sensörler evlerde tespit edilemeyen karbonmonoksit için bir uyarı sistemi olarak kullanılmaktadır.

Elektronik karbonmonoksit sensörleri iki ana tipe gelir: termistör tipi metal oksit dedektörleri; karbonmonoksit oksit üzerine düştüğünde ve reaksiyona girdiğinde sıcaklıkta bir değişimin tespiti, (alarmı yükselten sıcaklıktaki değişim) ve karbonmonoksit bir elektrot ile etkileşime girdiğinde, elektrolit çözeltideki yük değişimlerini algılayarak çalışan bir elektrolitik detektör cihazdır. Karbonmonoksit gazı sensörleri, sadece ev güvenliği için değil, aynı zamanda atmosferik konsantrasyonların ölçülmesinde, otomobillerin egzozunda ve endüstriyel tesislerde süreç takibi için sayısız uygulamaya sahiptir.

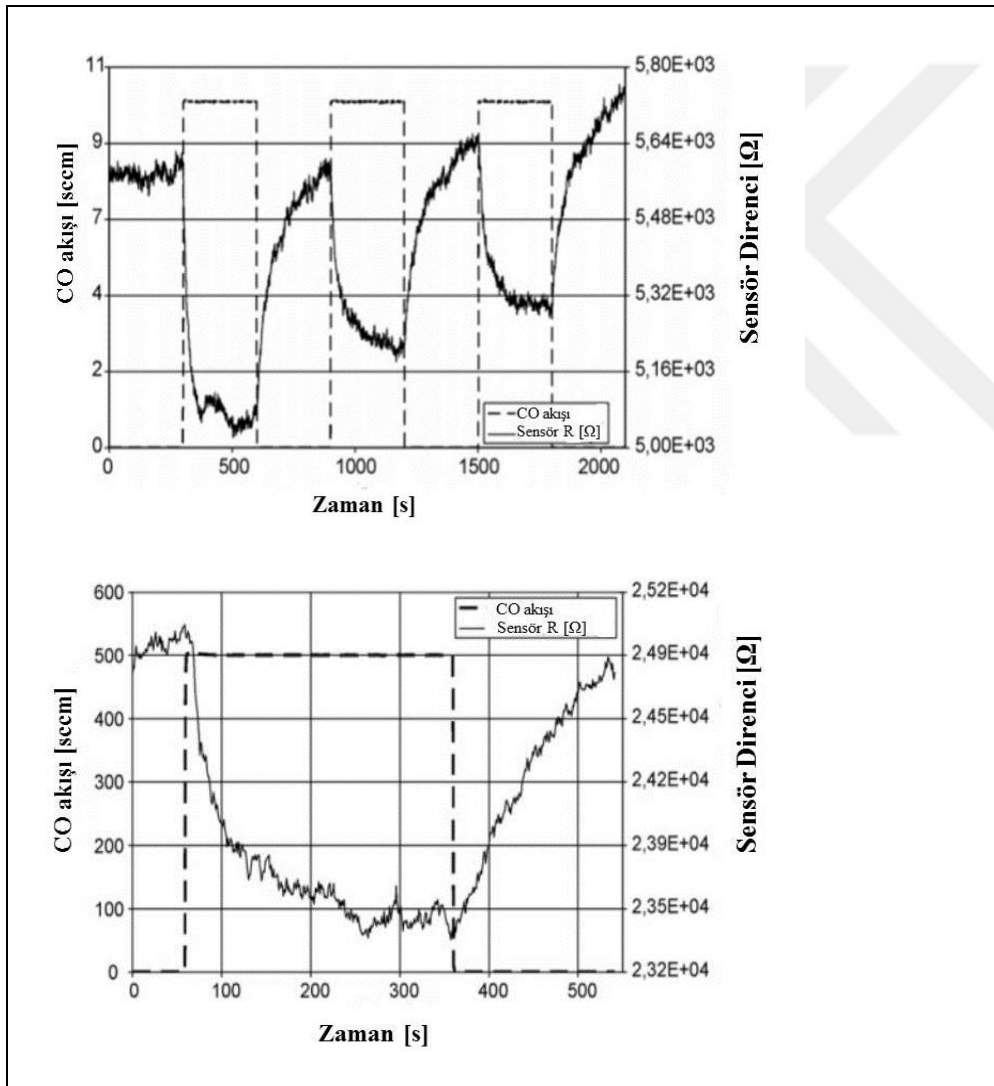
Çizelge 2.4. Belirli konsantrasyonlardaki karbonmonoksidin insan sağlığı üzerine etkileri [98]

Karbonmonoksit konsantrasyonu (ppm)	COHb seviyesi (%)	Bulgular ve Belirtiler
35	<10	6-8 saatlik maruziyet sonucu baş ağrısı ve baş dönmesi
100	>10	2-3 saat içinde hafif baş ağrısı
200	20	2-3 saat içinde hafif baş ağrısı; muhakeme kaybı
400	25	1-2 saat içinde çfrontal baş ağrısı
800	30	45 dakika içinde baş dönmesi, bulantı ve havale, 2 saat içinde bilinç kaybı
1600	40	20 dakika içinde baş ağrısı, taşikardi, baş dönmesi ve bulantı; 30 dakika içinde ölüm
3200	50	5-10 dakikada baş ağrısı, baş dönmesi ve bulantı; 30 dakika içinde ölüm
6400	60	1-2 dakikada baş ağrısı ve baş dönmesi; 20 dakikadan az sürede solunum tutulması, havale ve ölüm
12800	>70	3 dakikadan daha az sürede ölüm

2.13.2. Karbonmonoksit sensörlerindeki gelişmeler

Sensörler, çevrede değişen CO konsantrasyonunu aktif olarak ölçmek için araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır. Wiegleb ve Heitbaum [112], arabalarda NO ve CO gaz konsantrasyonlarını izlemek için detektör olarak metal oksit gazı sensörlerinin kullanıldığını ve uzun bir süre boyunca konsantrasyondaki değişimin çalışıldığını bildirmiştir. CO konsantrasyonunu tespit etmek için CO ve In₂O konsantrasyonundaki değişikliği saptamak için SnO₂ kullanılmıştır. Sensör, çalışmanın değişen aşamalarında monoksit konsantrasyonunu ölçmek için kullanılmıştır; konsantrasyondaki değişime hızlı tepki vermeleri nedeniyle metal oksitler kullanılmıştır. Barbi ve ark. 10 ppm ve üzeri konsantrasyonlarda CO gaz varlığına tepki gösteren bir SnO₂ tabanlı sensör geliştirmiştir [113]. İdeal çalışma sıcaklığının, yaklaşık 250 °C'de, tepkime (R₀ / R), 20 ppm'de 2.2 ve 100 ppm CO gazında 4.1 olacağı ve konsantrasyon ile sabit bir artış gösterdiği

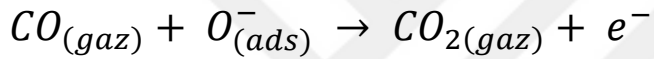
gösterilmiştir. 2008'de Tischner [114], 2008'de bir püskürtme piroliz yöntemi ile biriktirilen bir SnO₂ ince filminin (50 - 100 nm) geliştirildiğini bildirmiştir. Filmlerin en iyi şekilde 250 - 400 °C bölgesinde, ve normal bir evde olması beklenen 5 ppm konsantrasyonlarında CO konsantrasyonlarını algıladıkları tespit edildi. Test edildiğinde (Şekil 2.9), film sıcaklığa bağımlı tepkiler gösterdi: 250 °C' de, film 0-40 ppm arasında iyi tepkiler gösterirken, 400 °C 'de film tepki aralığını 0-100 ppm arasında arttırmıştır. Filmin, değişken nemin beklendiği alandaki uygulamalar için büyük bir problem olan neme karşı son derece hassas olduğu bulunmuştur [114].



Şekil 2.9. (a) 350 °C optimal çalışma sıcaklığında 4 ppm CO gaz varlığında sensör tepkisi
(b) 250 °C optimal çalışma sıcaklığında 200 ppm CO gaz varlığında sensör tepkisi [114]

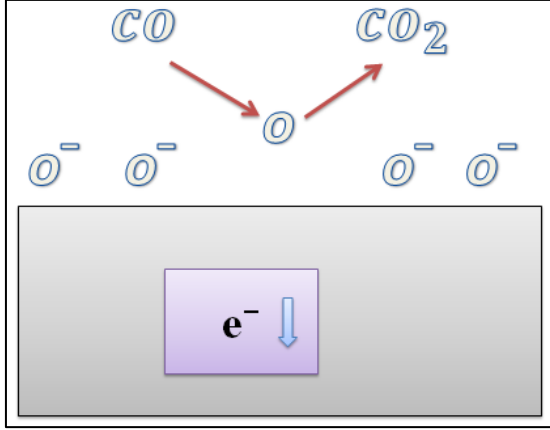
2.13.3. Karbonmonoksit algılama mekanizması

Karbonmonoksit (CO), hava kirliliğinde en tehlikeli ve ölümcül gazlardan biridir. CO, esas olarak yakıtların tamamlanmamış yanması ile oluşur ve çoğunlukla otomobil egzozlarının emisyonunda ve evsel yakıtların yakılmasında bulunmaktadır. Renksiz ve kokusuz olduğu için çok zehirli ve çok tehlikelidir. Bu nedenle, CO sensörleri, özellikle yanan dumanların tespiti için birçok yerde yasalarca zorunludur. ZnO yarıiletken gaz sensörlerinin CO gibi indirgeyici gazlara duyarlılığı, sensör yüzeyindeki oksijenin kimyasal olarak emilimine ve daha sonra adsorbe edilmiş oksijen anyon türleri ile analit gaz arasındaki reaksiyona bağlanır. Böylece bir ZnO sensörü bir karbonmonoksit gazı atmosferine yerleştirildiğinde, CO molekülleri önceden adsorbe edilmiş oksijen türleriyle reaksiyona girer. Reaksiyon aşağıdaki gibidir [115]:



Sonuç olarak, yüzey oksijen konsantrasyonu azalır ve başlangıçta oksijen anyonları tarafından tutulan elektronlar ZnO katısı içine geri salınır ve Şekil 2.10' da gösterildiği gibi sensörün iletkenliğinde bir artışa neden olur. Metal oksit sensörünün karbonmonoksit mekanizmasına verdiği tepki, hidrojen gibi diğer indirgeyici gazlara da uygulanabilir. Bu arada, ZnO sensörleri, oksijen anyonları üretmek için yüzeyde elektronları tutan ve malzemenin iletkenliğinde bir azalmaya yol açan ozon gibi oksitleyici gazları tespit etmek için de kullanılabilir. Bununla birlikte, genel olarak, iletkenlik değişimlerini doğru bir şekilde ölçmek, gazların konsantrasyonundaki azalmayı tespit etmekten daha kolaydır.

Tüm farklı CO₂ yüzey türlerinin oluşumu sırasında, dökme metal oksit sensörüne elektron transferi yoktur, dolayısıyla iletkenlik değişikliği yoktur. Bununla birlikte, CO₂' in desorpsiyonu, elektronların sensör katısına geri dönmesini sağlar. CO₂ desorpsiyonu yüksek sıcaklıklarda tercih edilirken, düşük sıcaklıklarda tercih edilmez.



Şekil 2.10. Metal oksit yüzeyinde ütilen karbon dioksitin algılama mekanizmasının şematik gösterimi

2.14. Karakterizasyon Teknikleri

2.14.1. X-ışını difraksiyonu

XRD, özellikle kristal ve kristal olmayan (amorf) materyalleri ayırt etmek için malzeme karakterizasyonu alanında son derece önemli bir tekniktir. Faz içeriğini birçok mineral ve malzemede belirlemek için de kullanılabilir. Ayrıntılı bir numune hazırlama gerektirmemesi ve tahribatsız muayene yöntemlerinden birisi olduğu için numunenin kristalografik yapısını belirlemede etkili bir metottür. Genel olarak, ince filmlerde kristal yapısı, oryantasyonu, kristalin büyüklüğü, bileşimi (standartların yardımıyla), kusurları ve gerilmeleri hakkında kapsamlı bilgi verir. Numunenin deneysel olarak elde edilen kırınım desenleri, XRD cihazının içinde bulunan (JCPDS) verileriyle karşılaştırılmıştır. Kristalografik fazlar ve tercih edilen yönelimler hakkında bilgi verir. En şiddetli pikin yarı pik genişliğinden (FWHM) kristalin tane büyüklüğü hesaplanabilir.

Düzlemlerarası uzaklık 'd' X-ışını difraksiyonu profilinden şu formül kullanılarak hesaplanır,

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (2.7)$$

θ - Bragg açısı ve λ – kullanılan X-ışınının dalga boyudur.

Bu çalışmada, filmlerin kristal yapısı Rigaku Miniflex 600 Masa Üstü Toz X-ışını difraktometresi ile araştırılmış ve dalga boyu 0,154059 nm olan dalga boyu Cu K α radyasyonu ile 40 kV ve 15 mA'da çalışan Cu anot malzemesi kullanılmıştır. Kırınım paternleri, 2Θ aralığında ve 25-75 ° arasında tarama hızı 0,02 ° ile yapıldı.



Resim 2.3. Rigaku miniflex 600 masa üstü tüm toz X-ışını difraktometre

2.14.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

SEM, yüzey topografyası, mikroyapı özellikleri, vb. araştırmalar için en kullanışlı ve çok yönlü araçlardan biridir. Elektronlar, ısıtılmış tungsten filamenti gibi bir termal emisyon kaynağı ile veya alan emisyonu katodu kullanılarak üretilir. SEM görüntüsü oluşturmak için, olay elektron ışını, numune yüzeyi boyunca bir tarama düzeninde taranır. İkincil elektronlar, birincil elektron ışınının etkileşimi nedeniyle üretilir. Yayılan elektronlar taranan alanda her pozisyonda bir elektron detektörü tarafından tespit edilir. Yayılan elektron sinyalinin yoğunluğu bir katod ışını tüpünde parlaklık olarak gösterilir. İki görüntüleme modu vardır; biri Sekonder Elektronları ve diğeri Backscattering Elektronları'nı kullanmaktadır. İkincil elektron görüntüleme, ince yüzey morfolojisinin yüksek çözünürlüklü görüntülemesini sağlar ve bunun için örnekler elektriksel olarak iletken olmalıdır.



Resim 2.4. Taramalı elektron mikroskobu

2.14.3. Atomik güç mikroskobu (AFM)

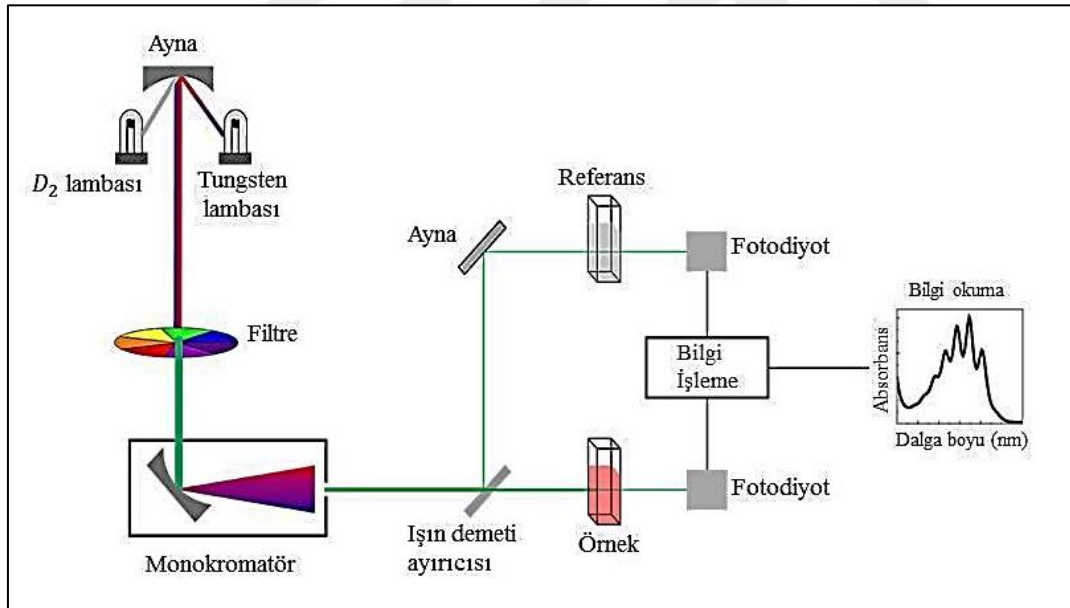
Yüzey morfolojisi ve pürüzlülüğü atomik güç mikroskobu (AFM) ile analiz edildi. Atomik güç mikroskobu (AFM), Tarama Probu Mikroskobu (SPM) teknikleri ailesine aittir. Uç ve yüzey arasındaki etkileşimi kullanarak yüzey özelliklerini ölçmek için ince bir uç kullanır. Atomik çözünürlüğe sahip yüzey topografyası hakkında bilgi veren, numune yüzeylerinin atomik ölçeğe kadar görüntülenmesinde bir araç olarak kabul edilmiştir. AFM ayrıca, tane büyüklüğünün ve filmlerin yüzey pürüzlülüğünün nicel ölçümlerini sağlayabilir.



Resim 2.5. Atomik güç mikroskobu

2.14.4. UV- VIS spektrokopisi

Ultraviyole görünür (UV-VIS) spektrofotometre, elektromanyetik spektrumun ultraviyole (UV) ve görünür (VIS) bölgelerindeki bileşikleri analiz eden laboratuvarında yaygın olarak kullanılan bir araçtır. Kızılötesi spektroskopinin aksine (titreşim hareketlerine bakar), ultraviyole görünür spektroskopisi elektronik geçişlere bakar. Bileşiklerin dalga boyu ve maksimum emilimini belirlenmesini sağlar. Absorbans bilgisinden ve Beer Yasası ($A = \epsilon bc$, burada $A =$ absorbans, $\epsilon =$ molar sönme katsayısı, $b =$ yol uzunluğu ve $c =$ konsantrasyon) olarak bilinen bir ilişkiyi kullanarak, molar sönme katsayısı biliniyorsa bir numunenin konsantrasyonunu belirleyebilir veya konsantrasyon biliniyorsa molar emilimi belirleyebilmektedir. Molar sönme katsayıları belirli bileşiklere özgüdür, bu nedenle UV-Vis spektroskopisi bilinmeyen bir bileşiğin kimliğini belirlemede yardımcı olabilir. Ayrıca, bir bileşiğin enerjisi $E = hc / \lambda$ (burada $E =$ enerji, $h =$ Planck sabiti, $c =$ ışık hızı ve $\lambda =$ dalga boyu) denklemi kullanılarak bu teknolojiye tespit edilebilir.



Şekil 2.11. UV- VIS spektrokopisi'nin çalışma prensibi [116]

Yarıiletkenlerin bant yapısını belirlemek için en doğrudan ve muhtemelen en basit yöntem optik absorpsiyon spektrumunu ölçmektir. Absorpsiyon denklemine göre enerji açığı E_g ile ilişkili olan bir katsayı ($\alpha h\nu$) cinsinden ifade edilir,

$$\alpha h\nu = A (h\nu - E_g)^n \quad (2.8)$$

α absorpsiyon katsayısı, h Planck sabiti, ϑ olay fotonun frekansdır. A 10^7 ile 10^8 m^{-1} arasında enerjiden bağımsız bir sabittir ve E_g ise optik bant aralığıdır. Absorpsiyon katsayısı, Lambert's formülü kullanılarak T filmlerinin kalınlığına, t ve geçirgenliğine bağlı olarak hesaplanabilir:

$$\alpha = \frac{1}{t} \ln \frac{1}{T} \quad (2.9)$$

ZnO filmlerinin optik bant aralığı değerleri, Tauc's kompo çizimi $(\alpha h\nu)^2$ ile $h\nu$ geçişi arasındaki iletim ölçümlerinden ve enerji eksenini bulmak için absorpsiyon kenarının lineer bölümü anlam çıkarma ile elde edildi. Tüm örneklerin iletim spektrumları UV-VIS spektrofotometresi kullanılarak kaydedildi.

Bu çalışmada, optik geçirgenlik ve absorpsiyon ölçümleri, 300-1100 nm dalga boyu aralığında bir çift ışın UV-görünür spektrofotometre (SHIMADZU 1700) kullanılarak yapıldı.

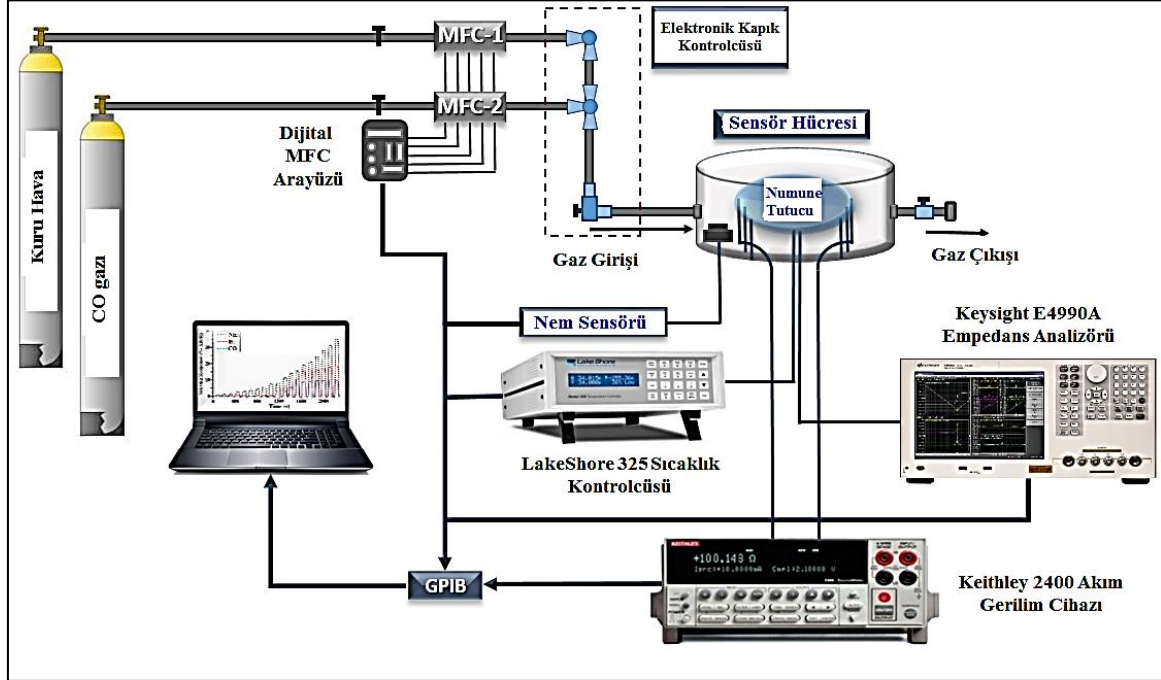
2.14.5. Elektriksel özellikler

ZnO filmlerin direnci, 'iki prob' yöntemi (KEITHLEY SourceMeter) kullanılarak ölçüldü. Elektriksel kontaklar, iki uçlu taşıyıcı şeklinde gümüş pastası kullanılarak aralarında 0,5 cm mesafe olacak şekilde yapıldı. Tüm ölçümlerden önce 0-10 V aralığında 11 adımla I-V ölçümleri yapılarak, kontakların Ohmik davranışları test edildi.

2.14.6. Gaz algılama özellikleri

Sensörlerin gaz algılama özellikleri, aşağıdaki şemada gösterildiği gibi bir gaz algılama karakterizasyon sistemi ile ölçülmüştür (Şekil 2.12). Gaz algılama deneyleri, sensör direncindeki değişiklikleri izleyerek 25–200 ppm konsantrasyon aralığında CO gazlı bir test odasında yapıldı. % 99,999 saflıktaki taşıyıcı gaz olarak kuru hava kullanıldı. Kuru hava, sensörü temizlemek için kullanılan "boş" gazdı. Ölçümlerde kuru havanın akış hızı, ölçümler sırasında 500 cm^3/dak' da sabitlenmiştir. Aynı koşullar altında farklı konsantrasyonların davranışını gözlemlemek için kuru hava akış hızı sabit tutulmalıdır. Gaz ve kuru hava akış hızları, bilgisayar kontrollü kütle akış kontrolörleri (MKS)

kullanılarak tam olarak kontrol edildi. Sabit bir sıcaklığı korumak için platin RTD' lere sahip bir LakeShore 325 sıcaklık kontrol cihazı kullanılmıştır.



Şekil 2.12. Ölçüm sisteminin şematik diyagramı

Gaz ölçümleri oda sıcaklığı ile 250 °C arasındaki sıcaklıklarda yapıldı. LakeShore 325 sıcaklık kontrol cihazı aşağıda verilmiştir.



Resim 2.6. LakeShore 325 sıcaklık kontrol cihazı

Numunelerin dirençleri, bir Keithley 2400 kaynak cihazı kullanılarak bilgisayar kontrollü bir sistemle sürekli olarak izlendi ve veriler, ilgili veri toplama donanımı ve yazılımı bulunan bir bilgisayar kullanılarak gerçek zamanlı olarak toplandı. Test edilen sensörler ölçüm hücresine sabitlendi ve sonra hava ile temizlendi. Başlangıçta kuru hava hücreden aktığında, temel sensör direnci kaydedilebildi. Kütle akış kontrolörleri (MKS Serisi) test hücresindeki gaz konsantrasyonunu kontrol etmiştir.



Resim 2.7. Keithley 2400

Ölçümler esnasında nem yaklaşık % 25 oranında sabit tutuldu ve bir Honeywell HIH-4000 nem sensörü tarafından izlendi. Algılama davranışları, sensör tepkisi, tepki süresi ve iyileşme süresi açısından analiz edildi. Sensör tepkisi, aşağıdaki ilişki kullanılarak hesaplandı:

$$S (\%) = \left(\frac{R_g - R_a}{R_a} \right) \times 100 \quad (2.10)$$

R_a ve R_g sırasıyla kuru havada ve kuru havadaki hedef gaz maruziyeti altında direnç [117, 118].

2.14.7. Dielektrik özellikleri

Dielektrik gevşeme çalışmaları, dielektrik kayıpların kaynağını ve yarıiletken malzemelerin elektriksel karakteristiğini anlamak için güçlü bir araçtır. Aslında, katı bir maddedeki dielektrik tepkisi, dielektrik sabitlerinin, farklı geçirgenliklerin (ϵ) aşağıda verildiği gibi çeşitli sıcaklıklarda frekans ile değişimi ile tanımlanabilir:

$$\epsilon (\omega) = \epsilon'(\omega) - i\epsilon''(\omega) \quad (2.11)$$

Gerçek (ϵ') ve sanal (ϵ'') geçirgenliği birleştiren ilişki dielektrik kaybı olarak aşağıda formüle edilmiştir [119]:

$$\tan \delta = \frac{Z'}{Z''} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2.12)$$

Dielektrik özellikleri, 20 - 10 MHz arasında 300-520 K sıcaklık aralığında Impedance Analyzer (Keysight E4990A) kullanılarak çalışılmıştır.



Resim 2.8. Keysight E4990A

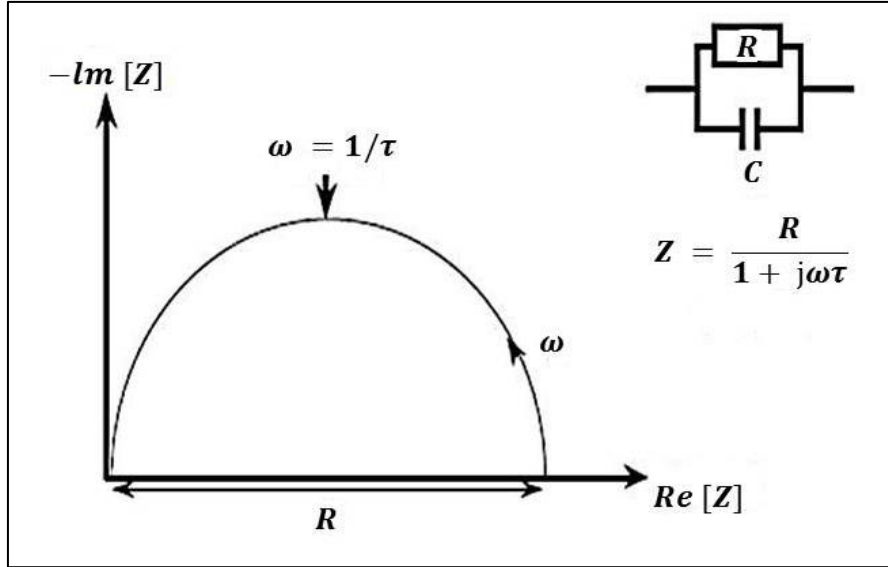
2.14.8. Empedans çalışması

Cihazların etkileşimli iletken elektrotlarının yanı sıra elektriksel özelliklerini incelemek için Kompleks empedans spektroskopisi (CIS) olarak bilinen bir ölçüm deneyi kullanılmaktadır. Bu araç, hareketli yüklü taşıyıcıları yarıiletken katı ve bağ dinamiği karışımlarında analiz etmek için kullanışlıdır. Bu yöntem için geliştirilen eşdeğer devre modeli, örnek içindeki fiziksel süreci iyi tanımlayabilir. CIS, tanecik, tanecik sınırı ve elektrotların çeşitli etkilerini düzgün bir şekilde ortaya koymaktadır [120]. Toplanan veriler, empedansın sanal Z'' bileşenini, Z' 'nin gerçek bileşeninin bir fonksiyonu olarak tanımlayan bir Nyquist veya Cole-Cole eğrisi olarak görülebilir. Filmlerin ölçülen kompleks empedansı $Z(\omega)$ şu şekilde ifade edilebilir [121]:

$$Z(j\omega) = Z'(\omega) + Z''(\omega) \quad (2.13)$$

$Z'(\omega)$ ve $Z''(\omega)$ frekans fonksiyonu olarak gerçek ve sanal empedans bileşenleridir.

Empedansın gerçek ve sanal bileşenlerini karmaşık düzlemde (Argand diyagramı) çizdiğimizde, her paralel RC Voigt ağı için yarım daire veya kısmi yarım daire elde edilebilir: Nyquist eğrisi ya da Cole-Cole eğrisi (Şekil 2.13) [122].



Şekil 2.13. Nyquist eğrisi (Cole-Cole eğrisi)

Çap R yani direnci göstermektedir.

90° pozisyonundaki frekans $\frac{1}{\tau} = \frac{1}{RC}$, ye karşılık gelmektedir.

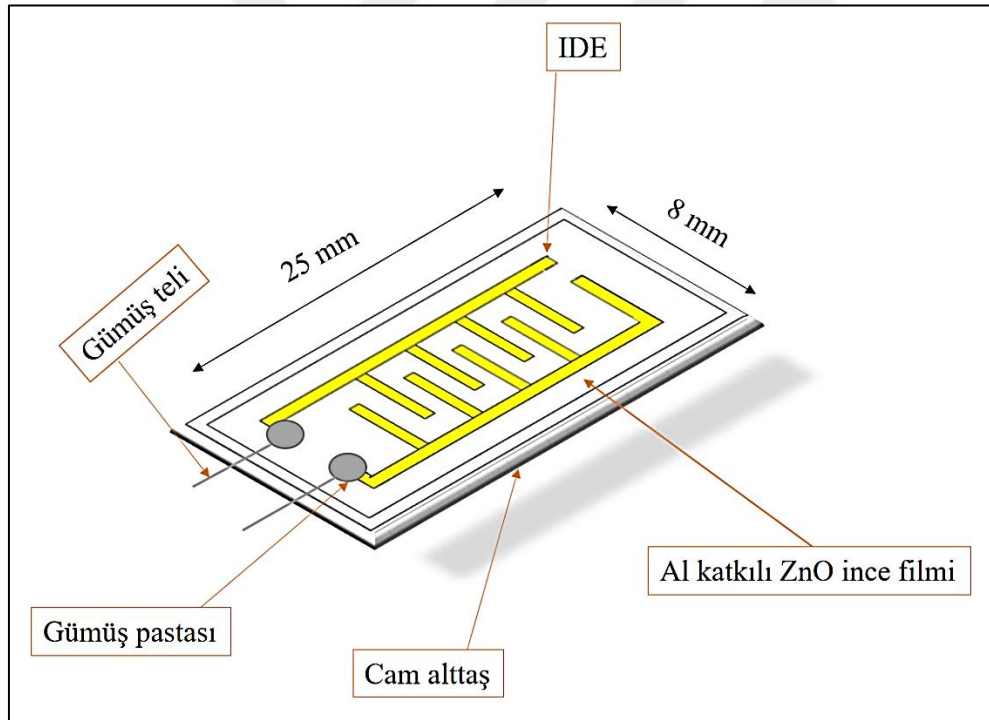
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Spin-kaplama tekniği kullanılarak Al-katkılı ZnO (ZA) ince filmlerin cam yüzeyler üzerine sentezlenmesi için sol-jel yöntemi uygulandı. Filmler, farklı çözücü ve dengeleyici kombinasyonu kullanılarak hazırlanan altı farklı kaplama çözeltilisinden türetilmiştir. Etanol ve 2-Metoksietanol çözücüler ile Monoetanolamin (MEA), Dimetanolamin (DEA) ve Trimetanolamin (TEA) dahil olmak üzere grup I, II ve III alifatik aminlerden üç dengeleyici içeren iki organik çözücü ile toplam altı çözücü-dengeleyici kombinasyonunu oluşturmak için kullanıldı. Farklı çözücü ve dengeleyici kombinasyonları, gaz sensörü uygulaması için ZA filmlerin kalitesini etkileyen ZA ince filmlerin yapısı, morfolojisi ve özellikleri üzerinde farklı etkilere sahiptir. Üretilen filmlerin kaplama solüsyonları, çinko asetat dihidrat, ZAD ($ZnC_4H_6O_2 \cdot 2H_2O$) ve alüminyum nitrat nonahidrat ($Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$) çözücüleriyle sentezlendi ve daha sonra dengeleyici karıştırılan solüsyona yerleştirildi. Katkılayıcı olarak $Al(NO_3)_3$ kullanıldı. Çözücü içindeki ZAD konsantrasyonu, 0,2 M / l idi ve dengeleyicinin ZAD'ye molar oranı, 1:1'de tutuldu. Al katkılayıcı konsantrasyonu ($[Al] / [Al + Zn]$)% 3 olarak hesaplandı.

Büyütülecek numunelerin alttaşı olarak lamel cam kullanıldı. Elde edilen karışımlar, berrak, saydam ve homojen bir çözelti elde etmek için manyetik bir karıştırıcı kullanarak 60 °C'de 2 saat karıştırıldı. Elde edilen çözeltiler, kaplama çözeltileri olarak kullanılmadan önce 48 saat oda sıcaklığında bekletildi. Kaplama çözeltilisini, alttaş yüzeyinin tüm alanına uygulamak için statik dağıtım yöntemi kullanıldı, daha sonra alttaş, 30 saniye boyunca 2000 rpm'lik nihai dönüş hızına kadar hızlandırıldı. Döndürerek kaplama işleminden sonra, çözücüü buharlaştırmak ve organik maddeleri uzaklaştırmak için film 5 dakika boyunca 500 °C'de tavlandı. Spin kaplama-ön ısıtma döngüleri beş kez tekrar edildi ve daha sonra, organik maddeleri ayrıştırmak ve polikristalin oksit filmi oluşturmak için film bir saat boyunca 500 °C'de bir açık hava mikroişlemci kontrollü fırında tavlandı. Bu parametreler ve süreler daha önceki yapılan çalışmalardan elde edilen veriler ve deneyimler dikkate alınarak belirlenmiştir [107, 108]. Çizelge 3.1'de verilen çözücü ve dengeleyiciler kullanılarak hazırlanan örnekler ZA-24, ZA-25, ZA-26, ZA-27, ZA-28 ve ZA-29 olarak adlandırıldı. Üretilen filmlerin orta bölgelerinden 8 mm genişlikte ve 25 mm uzunlukta parçalar kesildi. Filmlerin üzerine gümüş pastası ile IDE elektrotlar kaplandı (Resim 3.1).

Çizelge 3.1. Kullanılan dengeleyici-çözücü kombinasyonuna bağlı olarak örneklerin gösterilmesi

Numune Kodu	Al oranı %	Çözücü	Dengeleyici	Bekletme süresi (saat)	Kaplama döngüsü	Döndürme hızı (rpm)
ZA-24	3	Etanol	MEA	48	5	2000
ZA-25	3	Etanol	DEA	48	5	2000
ZA-26	3	Etanol	TEA	48	5	2000
ZA-27	3	2-MxyE	MEA	48	5	2000
ZA-28	3	2-MxyE	DEA	48	5	2000
ZA-29	3	2-MxyE	TEA	48	5	2000



Resim 3.1. Al katkılı ZnO ince filmi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Yapısal, Morfolojik ve Optiksel Özellikler

Cam alttaşlara büyütülen ZA filmlerin ölçülen XRD desenleri Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Sonuçlar, XRD desenlerine sahip filmlerin polikristal yapısının, ZnO malzemesinin altıgen wurtzite yapısının oluşumunu doğrulayan standart XRD ZnO kristali (JCPDS 036-1451) ile eşleştiğini göstermektedir. Genel olarak, tüm filmler, alttaşın [123] yüzeyine dik c eksenine boyunca (002) düzlemine tekabül eden, tercih edilen bir kristal yönelimi sergiler ve (100) ve (101) düzlemlerine karşılık gelen pikler mevcuttur. Filmlerin kristal kalitesinin dengeleyici-çözücü kombinasyonu değişimiyle değiştiği açıkça görülmektedir. Ölçülen XRD desenlerine bakıldığında, filmlerin XRD tepe noktalarının hem genişliği hem de pik şiddeti, kullanılan dengeleyici-çözücü kombinasyonundan önemli ölçüde etkilenir ve bu değişiklikler, kristal boyutunda, materyal kristallilik derecesinde ve tercih edilen kristal yöneliminin yapısında değişime neden olur. Filmlerin tercih edilen düzleminin tane büyüklüğü ve yapısı, Debye-Scherrer denklemi [124] ve yapı katsayısı (TC) [123] ile değerlendirilir.

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (4.1)$$

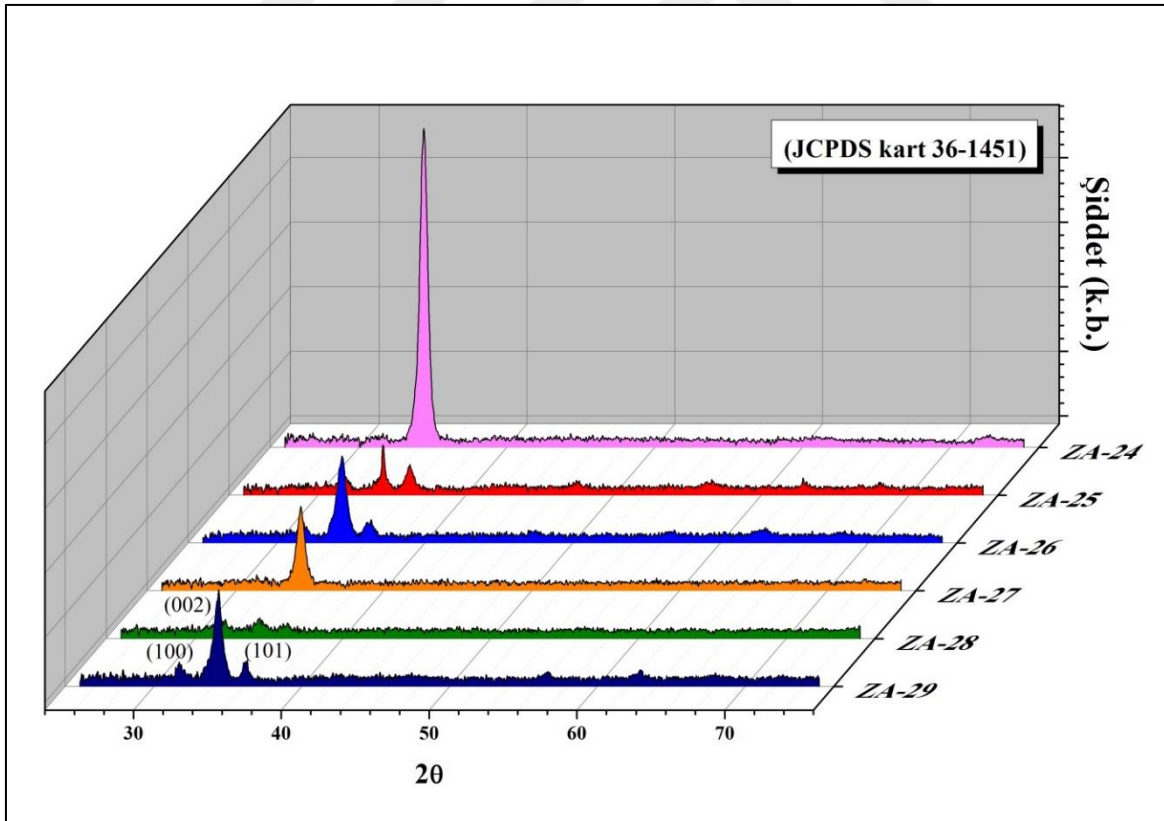
Burada D ; tane boyutu, β ; en şiddetli pikin yarı pik genişliği (FWHM), λ ; kullanılan X ışını kaynağının dalga boyu ve θ Bragg açısıdır. Böylece XRD parametrelerinin hesaplaması yapılmıştır ve sonucu aşağıda verilen Çizelge 4.1'de gösterilmektedir:

Çizelge 4.1. XRD ölçümlerinden elde edilen parametreler

Numuneler	hkl	2θ	β	Şiddet	d (nm)	D (nm)	c (Å)	ε_0 (%)
ZA-24	(002)	34,40	0,523	2254,66	0,26051	16,11	0,5210	0,09872
ZA-25	(002)	34,426	0,242	289,00	0,2603	35,845	0,5206	0,01971
ZA-26	(002)	34,39	0,625	552,95	0,2606	13,904	0,5212	0,12842
ZA-27	(002)	34,39	0,540	533,20	0,2605	16,075	0,5211	0,1182
ZA-28	(002)	34,37	0,611	69,196	0,2607	14,218	0,5214	0,1743
Za-29	(002)	34,33	0,584	584,870	0,2609	14,873	0,5219	0,2774

Tabloda görüldüğü gibi hkl, miller indeksi olarak tanımlanır. En yüksek şiddeti ZA-24 numunesi verdi, diğer numunelerde ise oldukça küçük değerler elde edildi. 2.7 denklemi ile d (düzlemlerarası aralık) değeri hesaplandı. Ardından c ve ϵ_0 örgü parametreleri hesaplandı. c, her numunede neredeyse aynı değere sahiptir. ϵ_0 'in en yüksek değeri ZA-26 numune için bulundu.

Buna karşılık, tüm filmler arasında, etanol-MEA (ZA-24) kombinasyonunun filmi, (002) düzleminde oldukça tercih edilen kristal yönelimli, iyi tercih edilen kristalimsi bir malzeme sergilerken, 2-metoksietanol-DEA (ZA-28) kombinasyon filmi çok zayıf kristallik sergiler. Öte yandan, tüm filmler arasında, etanol-DEA (ZA-25) kombinasyonunun filmin kristal büyüklüğü istisnai olarak daha büyüktür (Çizelge 4.1). MEA stabilize edilmiş ZA filmleri için malzeme kristallenmesinde gözlenen gelişme, P. H. Vajargah ve ark.[125] tarafından sol-jel yöntemi ile büyütülen ZnO filmleri için rapor edilmiştir. Bu çalışma, MEA dengeleyici kullanmanın avantajını doğrulamaktadır.



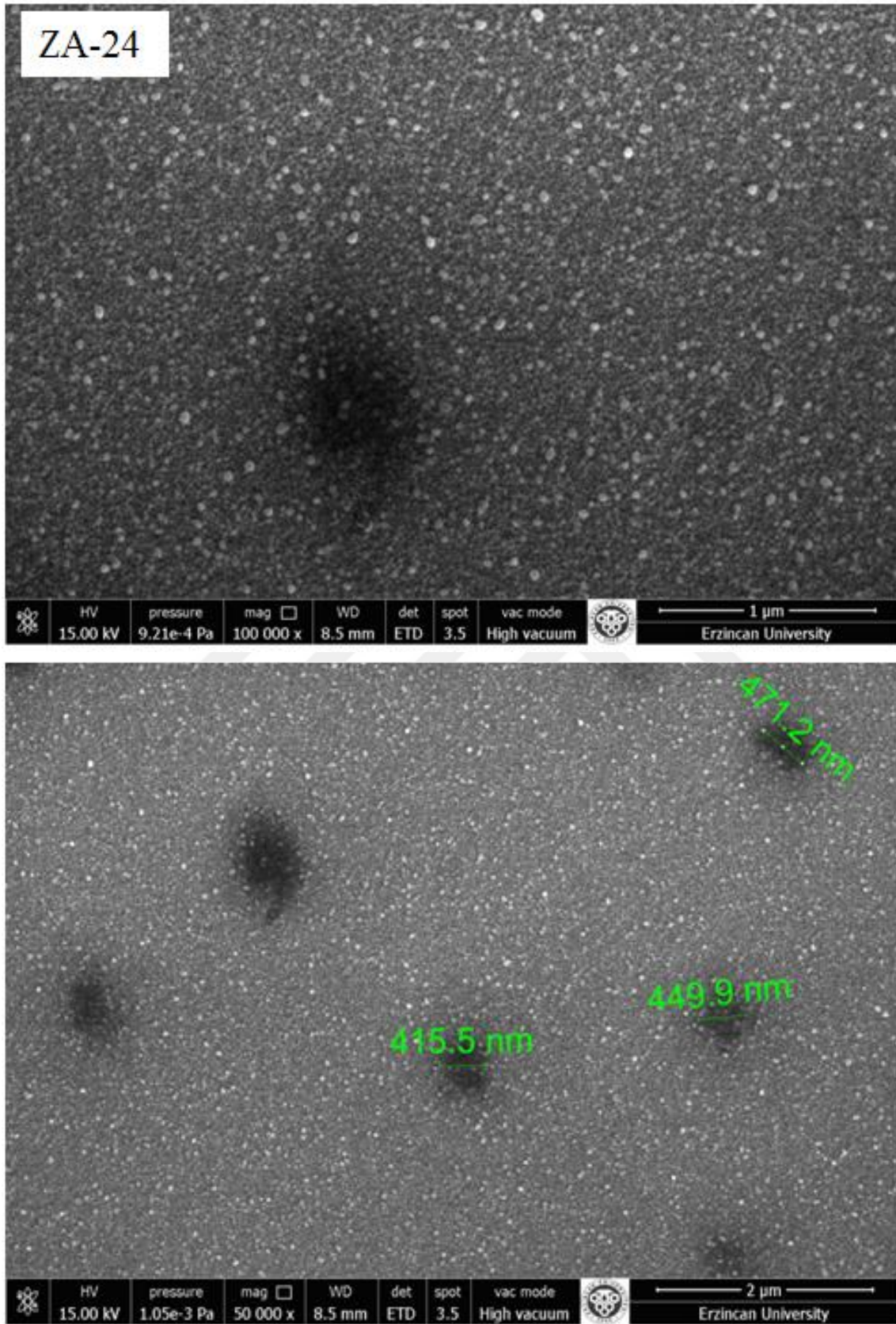
Şekil 4.1. Üretilen ince filmlerin XRD örnekleri

ZnO ince filmlerinin yüzey morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Sensörlerin SEM analizi ve EDAX analizi sonuçları aşağıda sırasıyla verildi. Ölçümler atmosferik sabit basınçta ve temassız (non-kontak) modunda yapıldı. Tüm sensörlerin SEM analizleri 1 ve 2 µm boyutunda yapıldı.

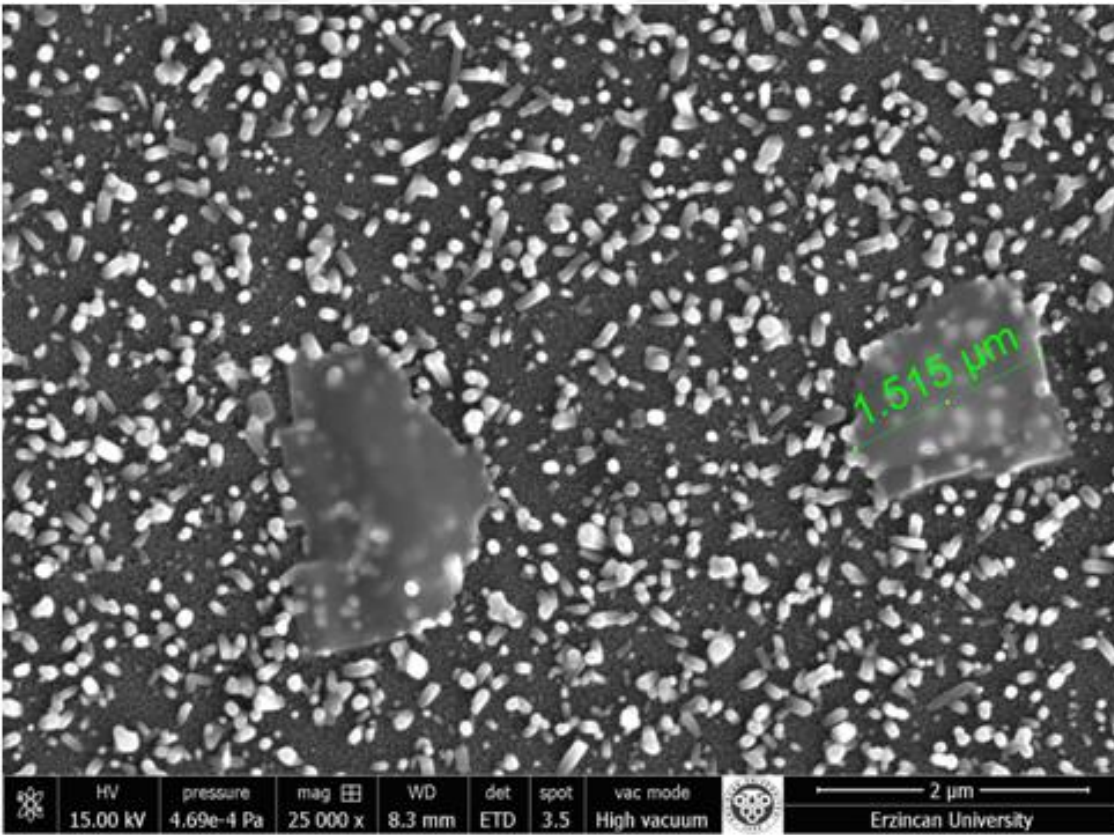
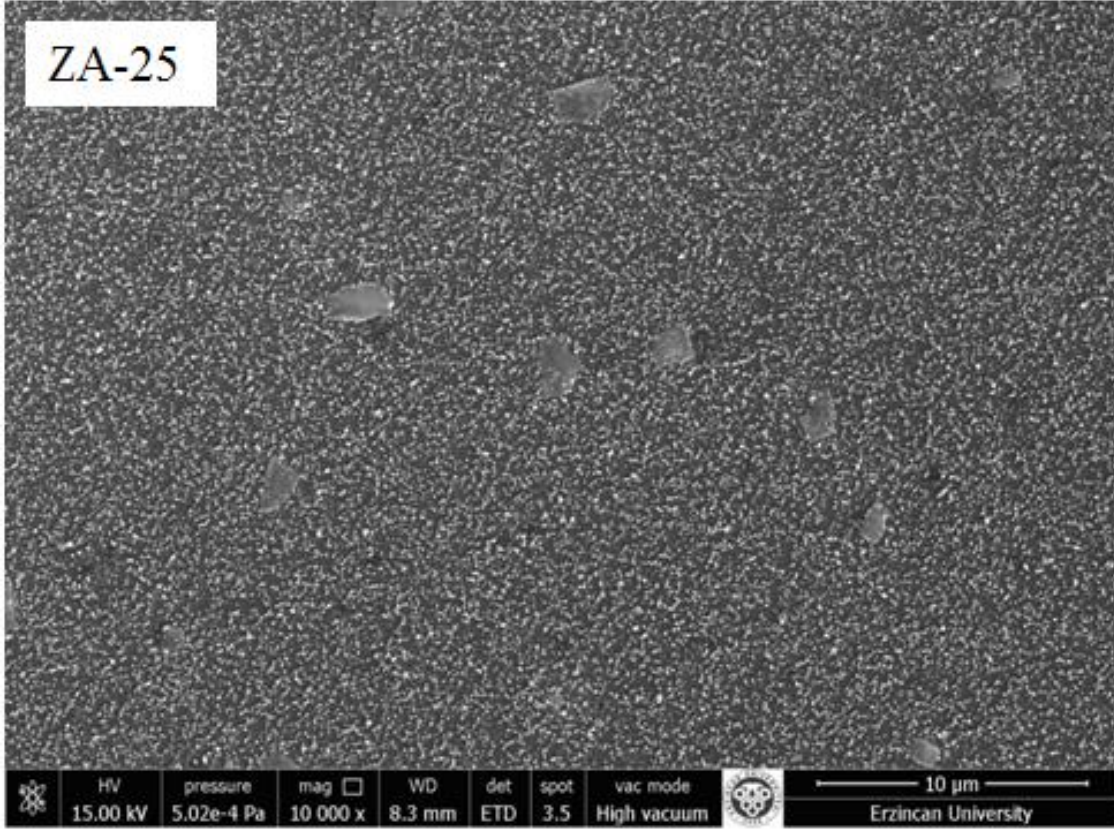
Aşağıdaki şekiller, farklı çözücülerle döndürerek-kaplama tekniği ile kaplanmış ZA ince filmlerin SEM görüntülerini göstermektedir (Şekil 4.2-4.7). SEM görüntüleri, filmlerin yüzey morfolojisinin esas olarak çözücülere bağlı olduğunu doğrulamaktadır. Film yüzeylerinden çatlak gözlenmez ve düzensiz şekilli taneler ile kaplanmış düz bir yüzeyin olduğu görülmektedir. Film, ısıtma işlemi sırasında çözücü buharlaşması ve kullanılan ajan nedeniyle gözenekli bir yapıya sahiptir [126]. Üretilen filmlerin tanecik büyüklüğü 196,4 nm ile 1,453 µm arasındadır. Filmde daha fazla tanecik sunulduğunda, daha az tanecik sınırı vardır. Bu nedenle, atomlar bir tanecikten diğer taneciye kolayca taşınır ve ayrıca elektriksel özellikler geliştirilir. Bu durum elektrik iletkenliğinin çözücüler tarafından değiştiği iki noktalı prob sonuçlarıyla aynı sonucu vermektedir. Taneciklerin değişimine bağlı olarak tane büyüklüğü artmaktadır. Bu, kristalleşmenin yükselmesinden kaynaklanabilmektedir [126].

Örneklerin yüzey morfolojilerinin değiştiği açıkça ortadadır. Özellikle, 2 MxyE çözücü ve TEA dengeleyicisine sahip örnek (ZA-29), küme yapısını gösterir. Ayrıca, (ZA-29) filminin pürüzlü bir yüzeye sahip olduğu ve küme boyutunun artmasına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür [127].

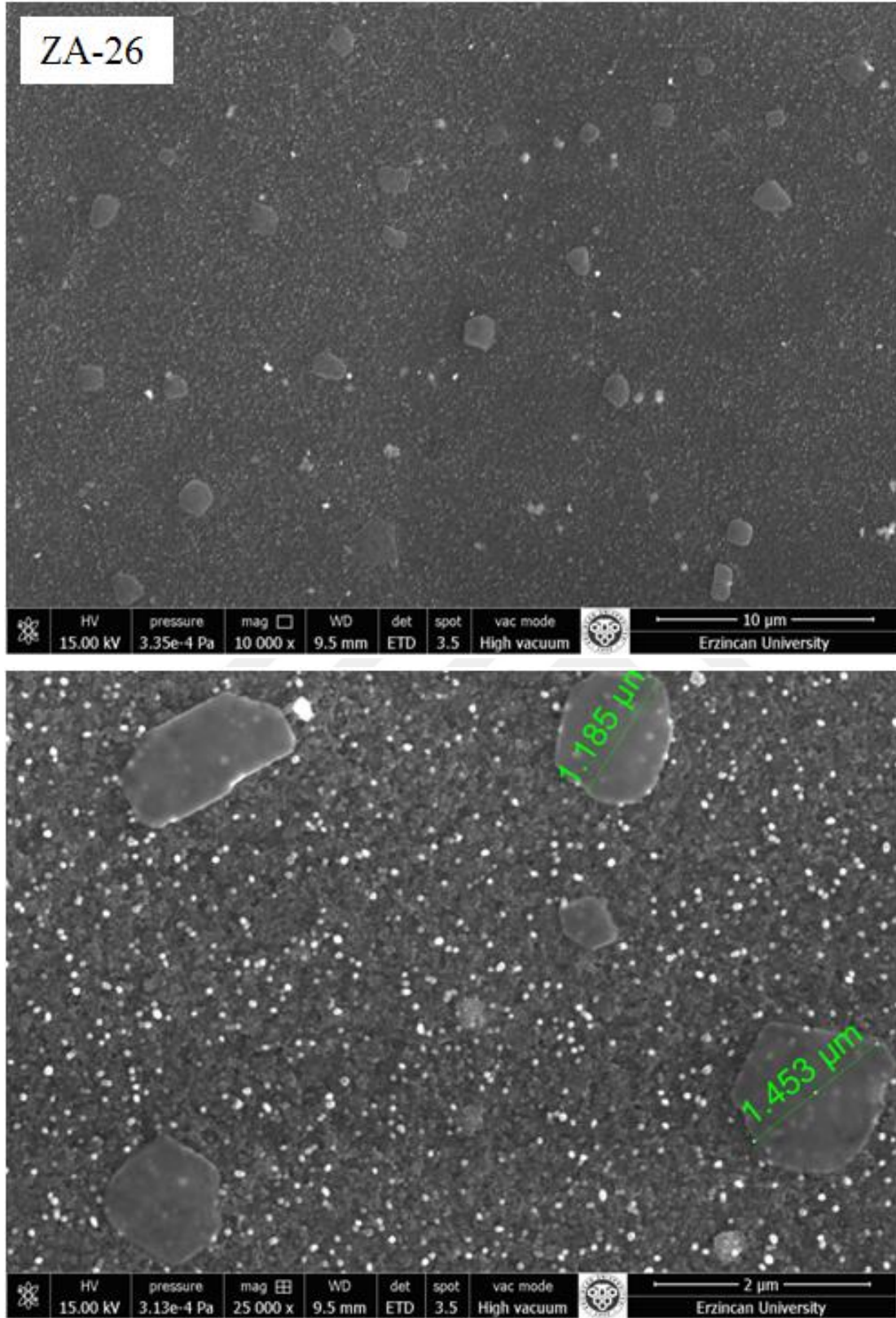
Sensörlere ait EDAX spektrumları Şekil 4.8 – Şekil 4.10’ da verildi. Sensörlerin yüzeyinden alınan EDAX spektrumlarından Al, Zn ve O elementlerinin varlığı görülmektedir. Spektrumlardaki Ca ve Si elementlerinin varlığı, sentez işlemindeki öncü materyallerden ve cam alttaştan kaynaklanmaktadır.



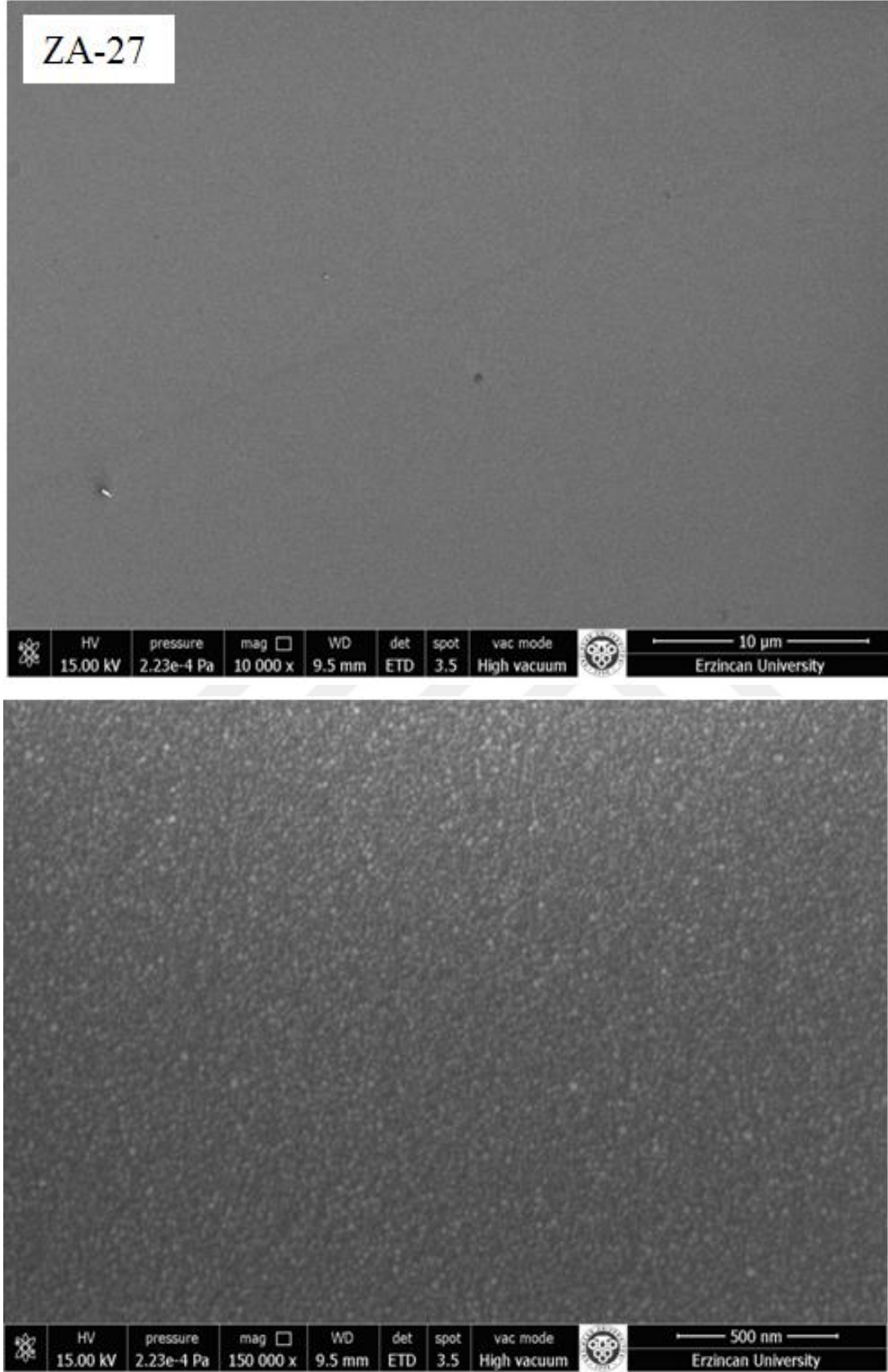
Şekil 4.2. ZA-24 Filmin SEM görüntüleri



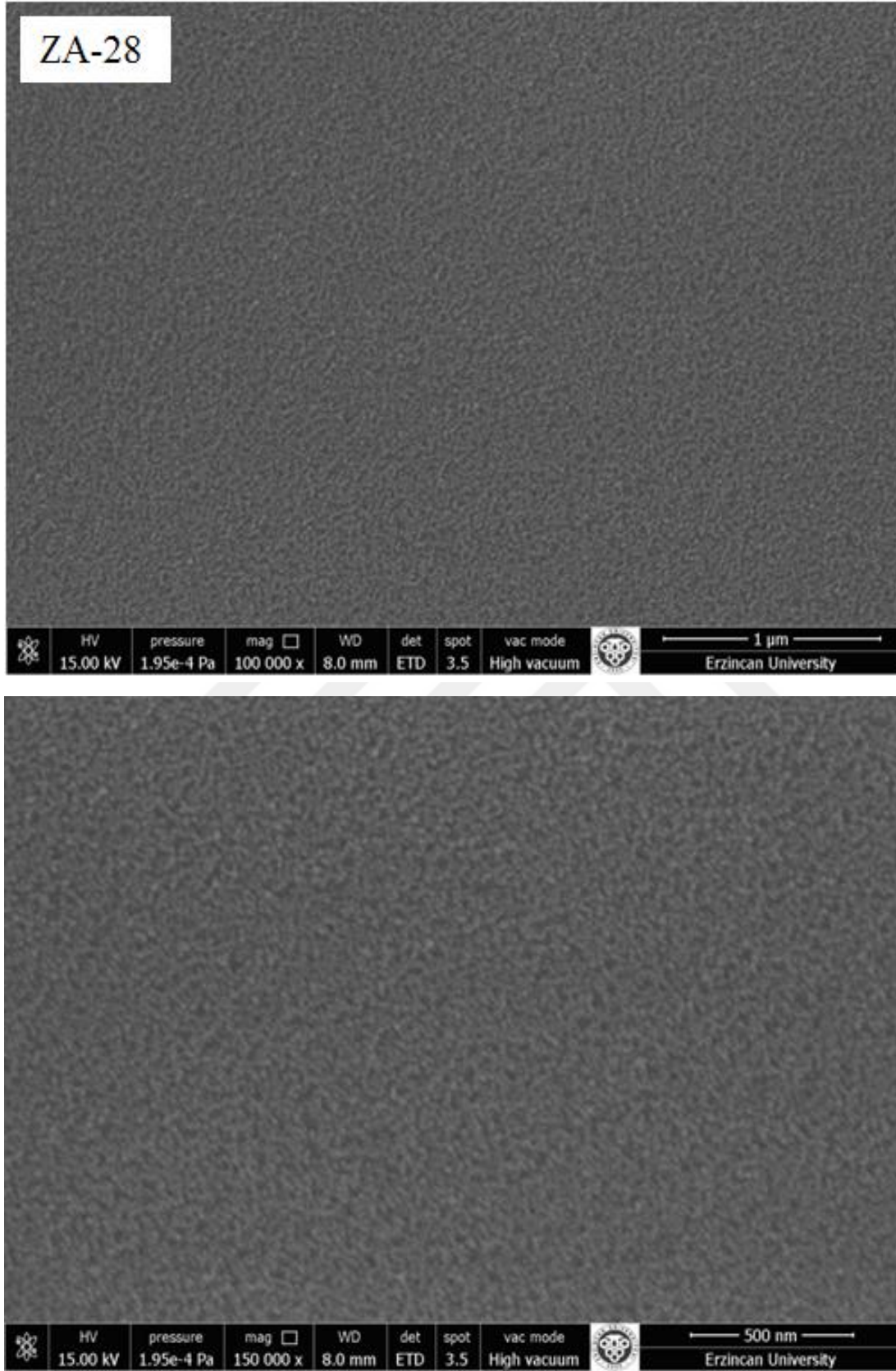
Şekil 4.3. ZA-25 Filmin SEM görüntüleri



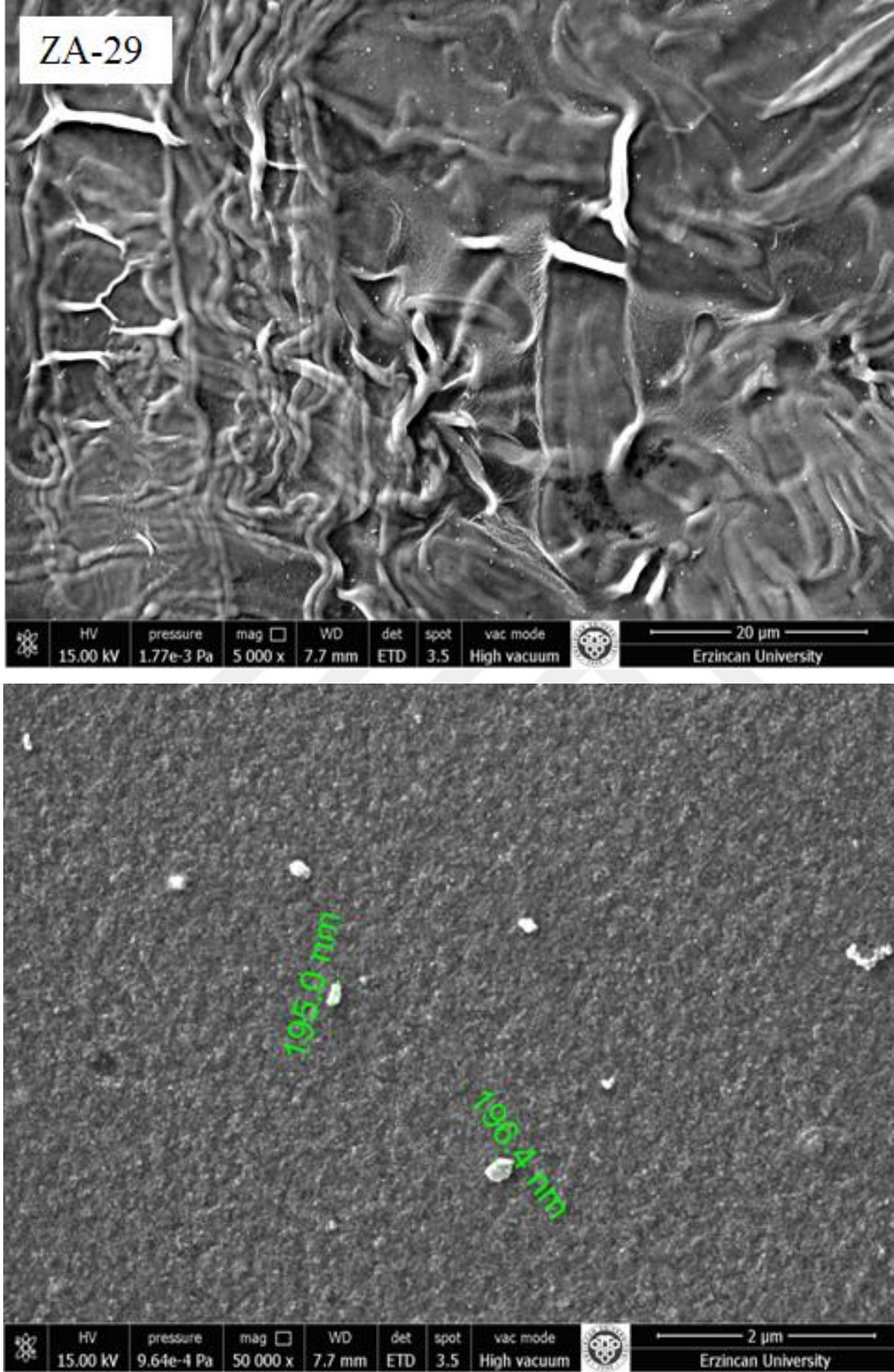
Şekil 4.4. ZA-26 Filmin SEM görüntüleri



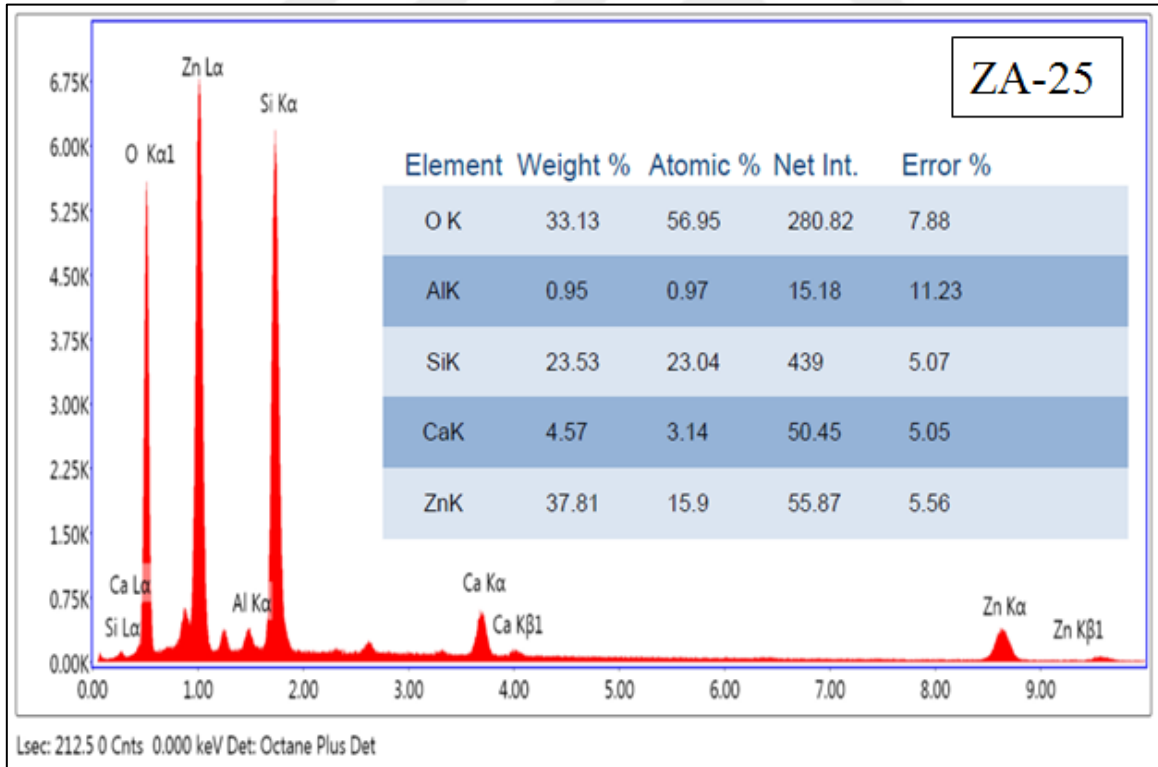
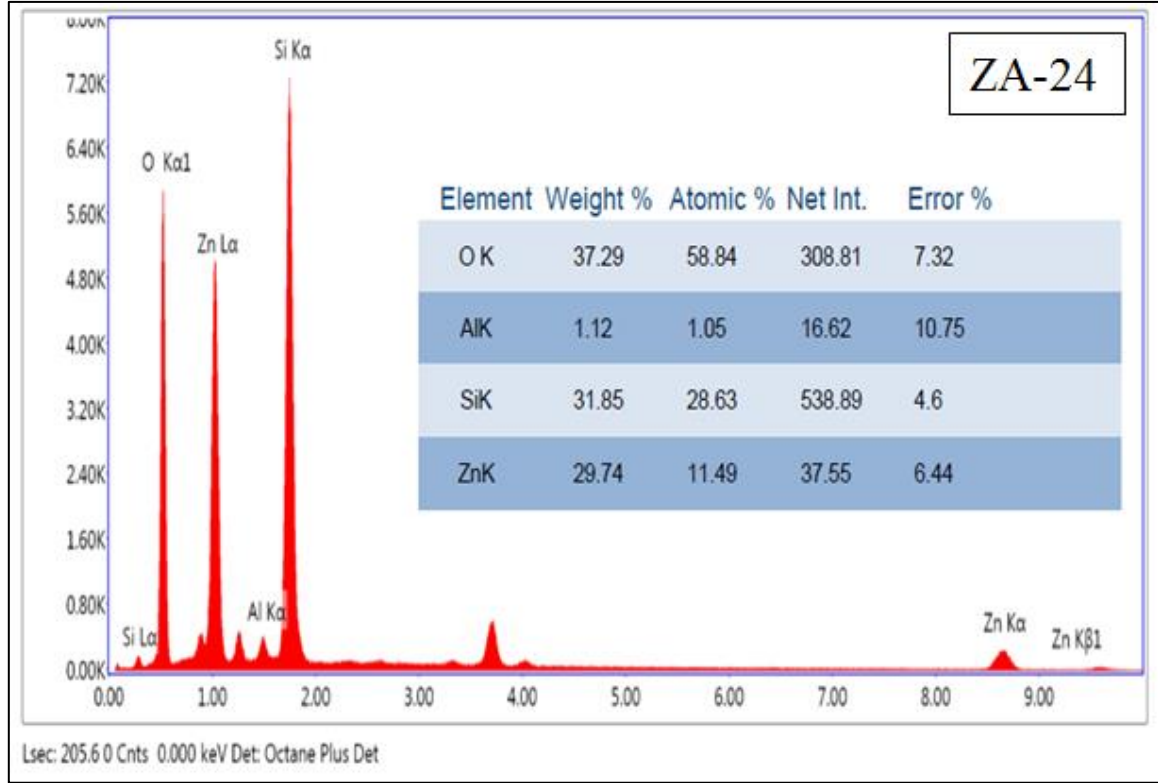
Şekil 4.5. ZA-27 Filmin SEM görüntüleri



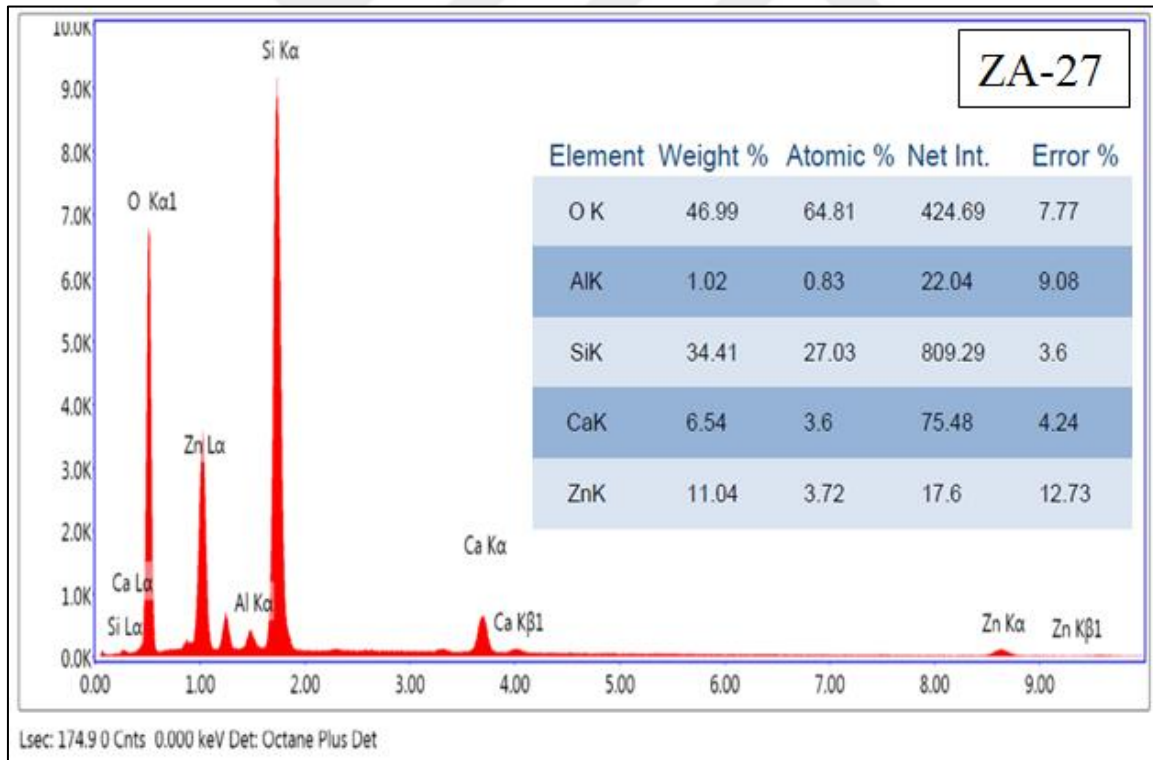
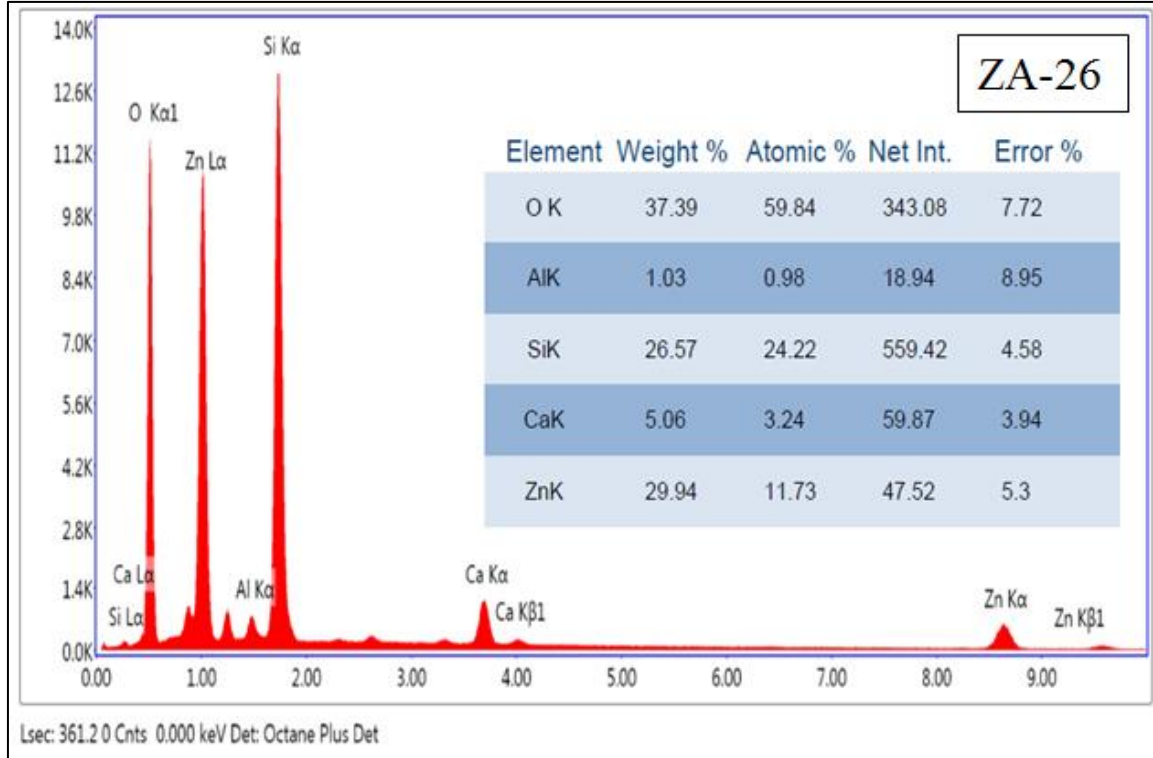
Şekil 4.6. ZA-28 Filmin SEM görüntüleri



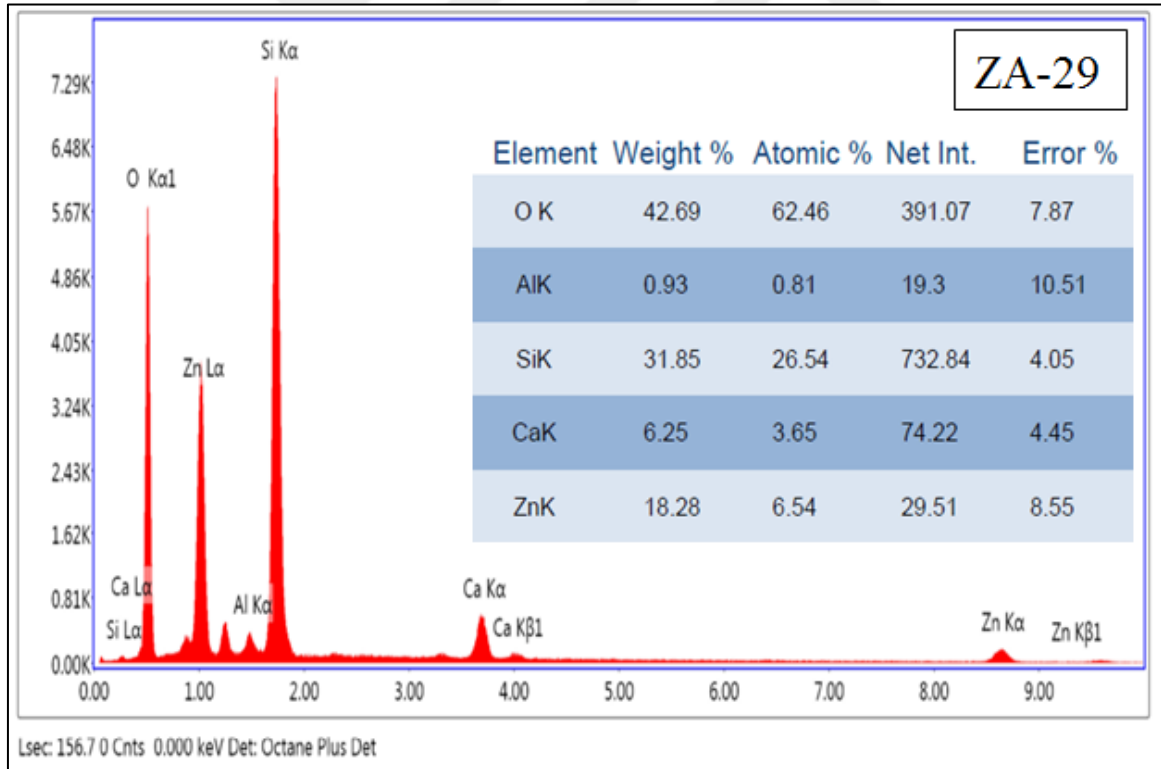
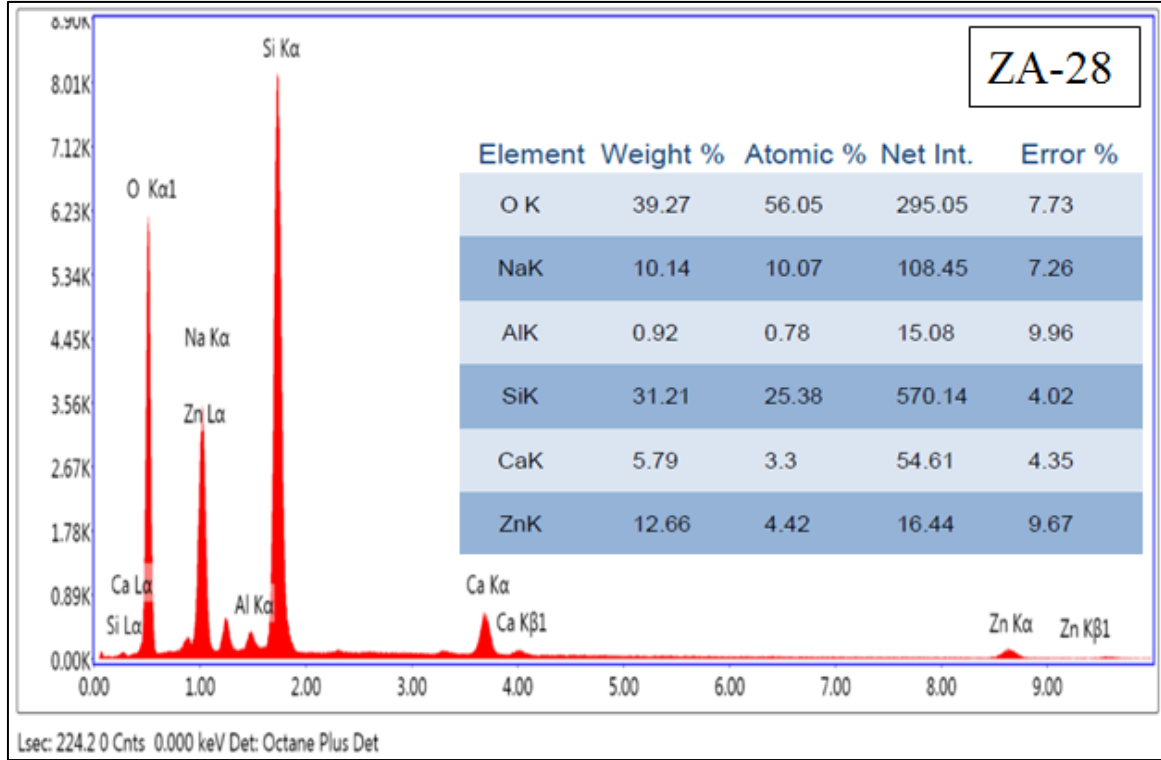
Şekil 4.7. ZA-29 Filmin SEM görüntüleri



Şekil 4.8. ZA-24 ve ZA-25 Filmlerin EDAX görüntüleri



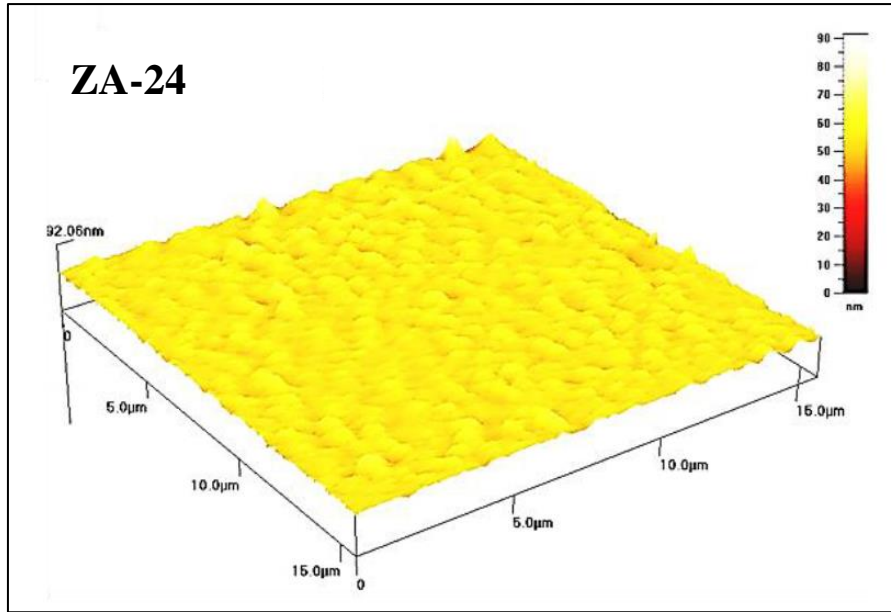
Şekil 4.9. ZA-26 ve ZA-27 Filmlerin EDAX görüntüleri



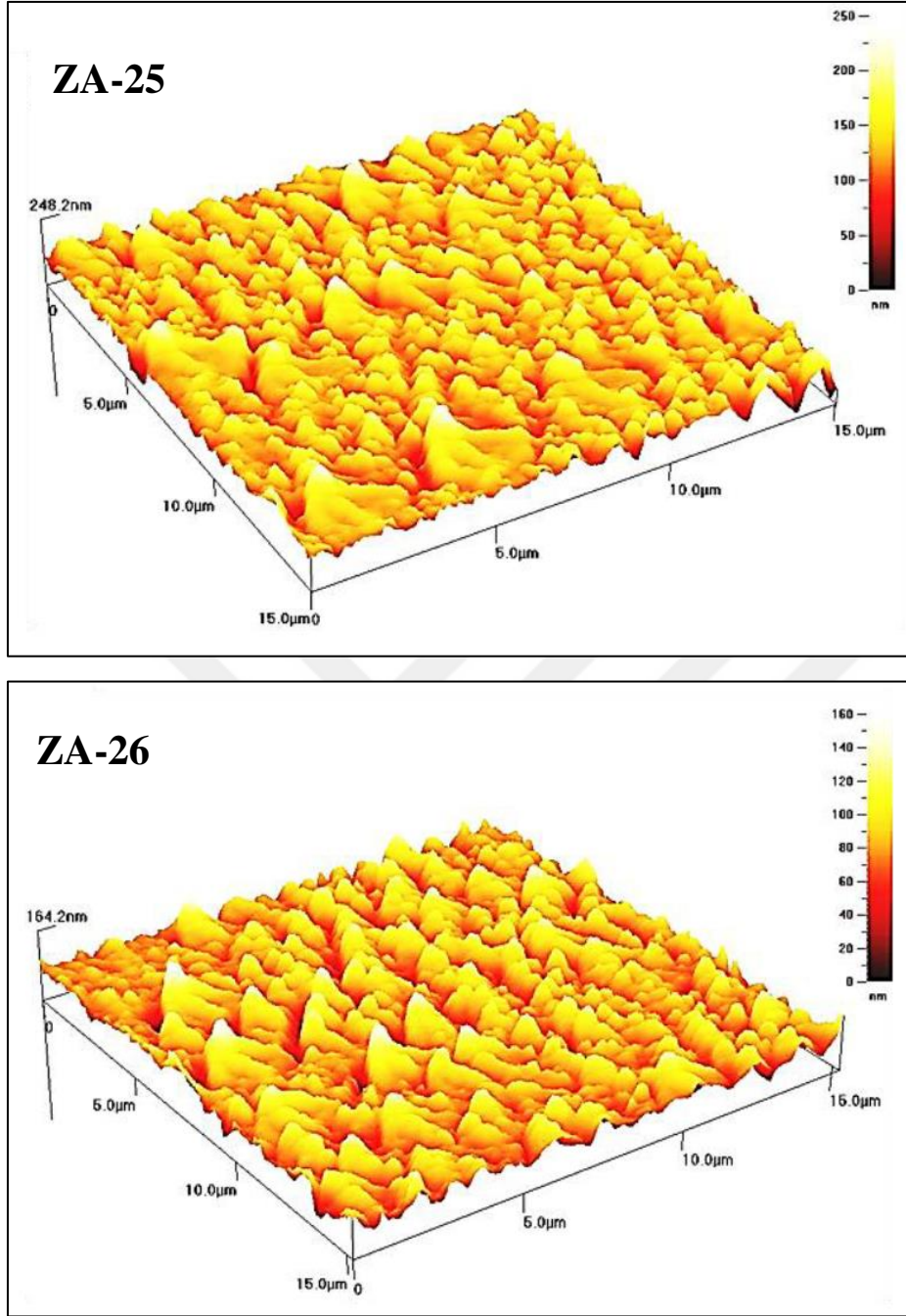
Şekil 4.10. ZA-28 ve ZA-29 Filmlerin EDAX görüntüleri

ZA filmlerin AFM görüntüleri Şekil 4.11 – Şekil 4.14'te gösterilmektedir. Kristal yapısına benzer şekilde, filmlerin yüzey morfolojisi de kullanılan dengeleyici-çözücü kombinasyonundan etkilenmiştir. TEA dengeleyicisi hariç, 2-metoksietanol-çözülmüş

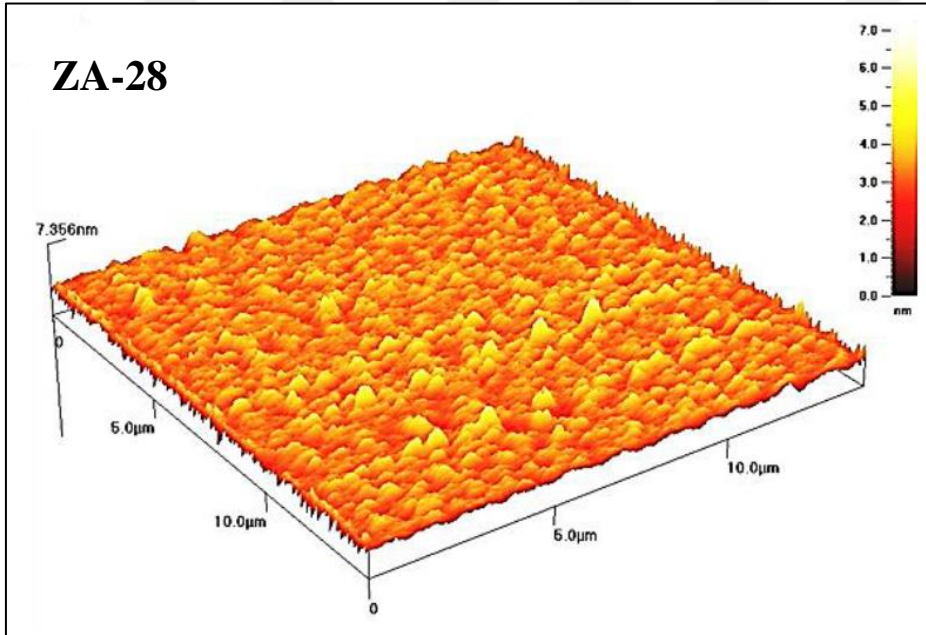
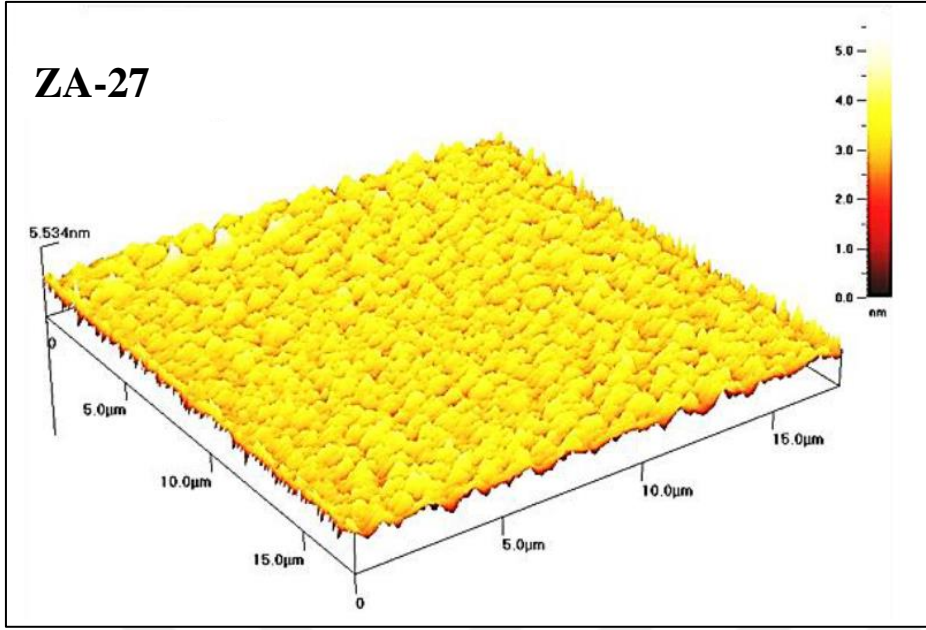
filmler genellikle daha pürüzsüz yüzeylere sahiptir ve bu, 2-metoksietanol çözücünün etanol çözücüyle karşılaştırıldığında çok daha düşük uçuculuğa sahip olması ile ilişkilendirilebilir. Bu sonuç, düşük yüzey pürüzlülüğü gerektiğinde 2-metoksietanol çözücünün tercih edildiğini göstermektedir. Filmlerin yüzey pürüzlülüğünün ortalama karekök (RMS) değerleri Çizelge 4.1' de gösterilmiştir. En düşük değer 2-metoksietanol-MEA (ZA-27) kombinasyonu ile elde edilirken, en yüksek değer 2-metoksietanol- TEA kombinasyonu (ZA-29) ile elde edilmiştir. Genel olarak, hem çözücülerin hem de dengeleyicilerin etkileri birbiriyle ilişkilidir ve üretilen filmlerin yapısal özellikleri, tek tek etkilenmek yerine kombinasyonlarından etkilenir.



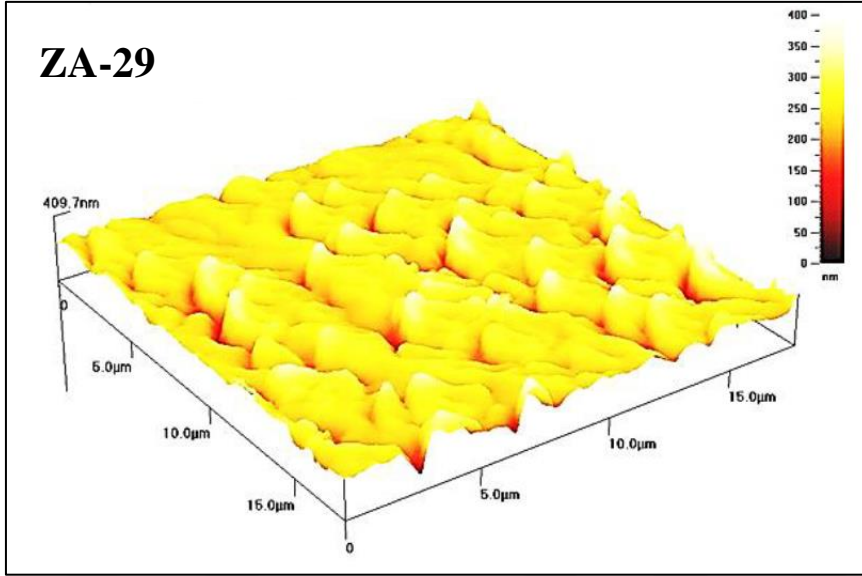
Şekil 4.11. ZA-24 filmin AFM görüntüsü



Şekil 4.12. ZA-25 ve ZA-26 filmlerinin AFM görüntüsü

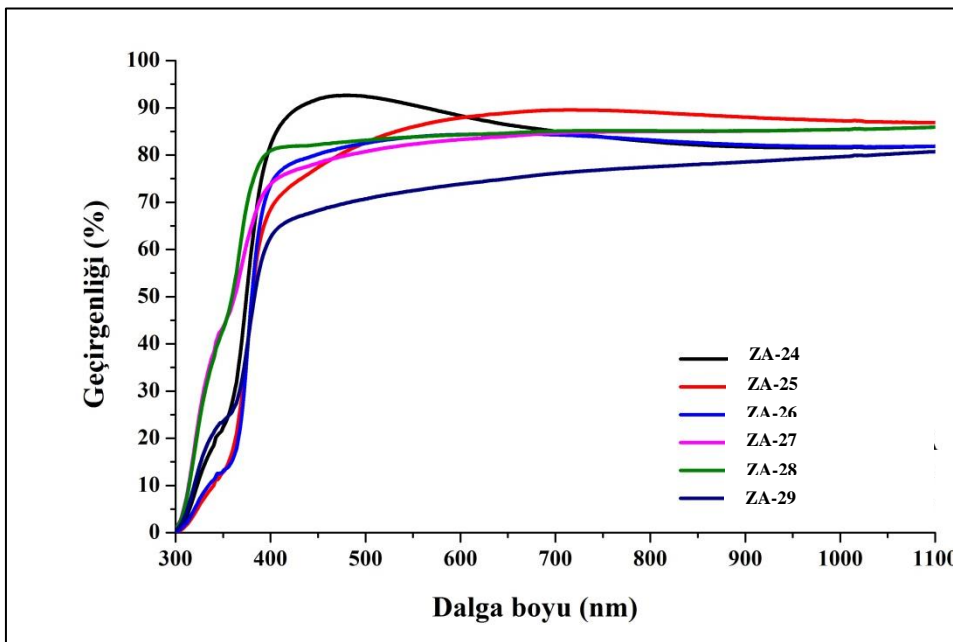


Şekil 4.13. ZA-27 ve ZA-28 filmlerinin AFM görüntüsü



Şekil 4.14. ZA-29 filmin AFM görüntüleri

Şekil 4.15'te gösterildiği gibi, 2-metoksietanol-TEA kombinasyonunun filmi hariç, tüm filmler, 400 ile 1100 nm arasındaki dalga boyu aralığında ortalama % 82'nin üzerinde bir ortalama değere sahip iyi optik geçirgenlik gösterir (Çizelge 4.1). Etanol ile çözülen filmler grubunu 2-metoksietanol ile çözülen filmler grubu ile karşılaştırıldığında, optik geçirgenlik genellikle ilk grupta daha yüksektir. Buna göre, etanol çözücünün bu açıdan 2-metoksietanol üzerinde bir avantaja sahip olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 4.15. Üretilen filmlerin geçirgenlik spektrumları

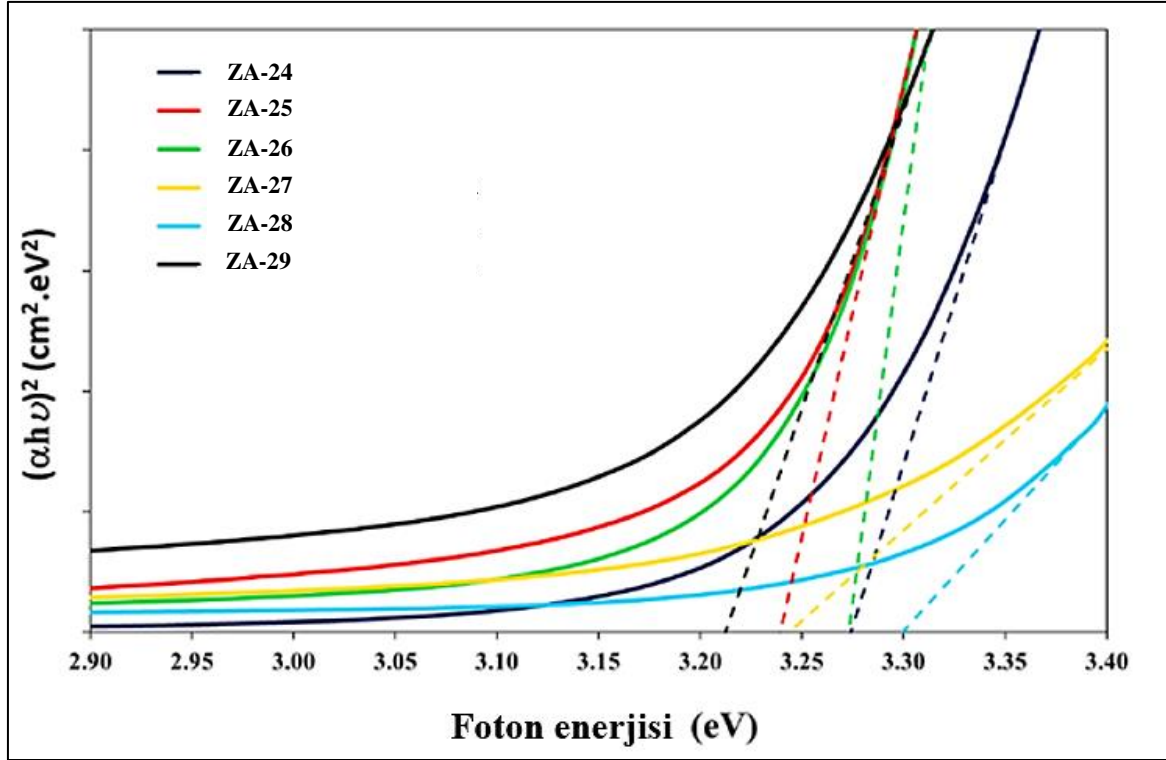
Ek olarak, P. H. Vajargah ve ark. [125] hem MEA hem de DEA içeren oldukça kararlı olduğunu ve TEA içeren sol yarı saydam hale gelirken hazırlanan sol'un saydamlığını koruduğunu ve ısıtma ile netleşmediğini rapor etmişlerdir. Yine, üretilen filmlerin optik özellikleri, çözücü maddelerden ve dengeleyicilerden tek tek etkilenmek yerine kombinasyon halinde etkilenir. Geçirgenlik ölçümlerinden elde edilen veriler kullanılarak filmler için optik bant aralığı enerjilerini (E_g) hesaplamak için Tauc modeli [123] uygulandı ve elde edilen Tauc eğrileri, Şekil 4.16'da gösterildi. Çizelge 4.1'de gösterildiği gibi, farklı çözücü-dengeleyici kombinasyonların filmleri için E_g 'nin tahmini değerlerinde gözlenebilir bir dalgalanma mevcuttur. Zaiour ve ark. ile Mahdavi ve ark., % 3 Al katkılı ZnO numuneleri sol-jel yöntemi ile büyüttüler. Yaptıkları bu çalışmalarda sırasıyla E_g 'yi 3,30 eV ile 3,22 eV olarak hesapladılar [128, 129]. Bu tez çalışmasında hesaplanan E_g 'in değerleri literatür ile uyum sağlamıştır. En yüksek ve en düşük E_g değerlerimiz, sırasıyla 2-metoksietanol-DEA (ZA-28) ve 2-metoksietanol-TEA (ZA-29) kombinasyonları için 3,299 eV ve 3,212 eV'dir. Burada en yüksek E_g değerinin en düşük kristallilik kalitesine sahip filme ait olduğu görülmektedir. Direkt geçişlerde eksiton oluşumu veya elektron-hol etkileşimi dikkate alınmazsa absorpsiyon katsayısı α , gelen fotonun enerjisine ifadesiyle bağlıdır. Filmlerin optik bant aralığı aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır:

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^n \quad (4.2)$$

Bu formülde $h\nu$, foton enerjisi, A sabit ve $n=1/2$ (direk geçişler için)' dir. Filmlerin UV-absorbance ölçümleri UV-VIS 1800 Shimadzu 523 nm dalgaboylu cihazı ile yapıldı.

Çizelge 4.2. Üretilen ZA filmlerinin hesaplanan bazı parametreleri

Parametreler	Örnekler					
	ZA-24	ZA-25	ZA-26	ZA-27	ZA-28	ZA-29
Kristal büyüklüğü (nm)	16,61	35,85	13,90	16,08	14,22	14,88
Tercih edilen kristal yönelimi	(002)	(002)	(002)	(002)	(002)	(002)
(002) pikinin şiddeti	2255	289	553	533	69	585
Yüzey pürüzlülüğü, RMS (nm)	2,85	23,91	18,21	0,47	0,52	34,75
Ortalama geçirgenlik (%)	87,85	85,22	82,90	82,28	83,96	73,04
Yasak enerji aralığı, E_g (eV)	3,274	3,239	3,273	3,244	3,299	3,212



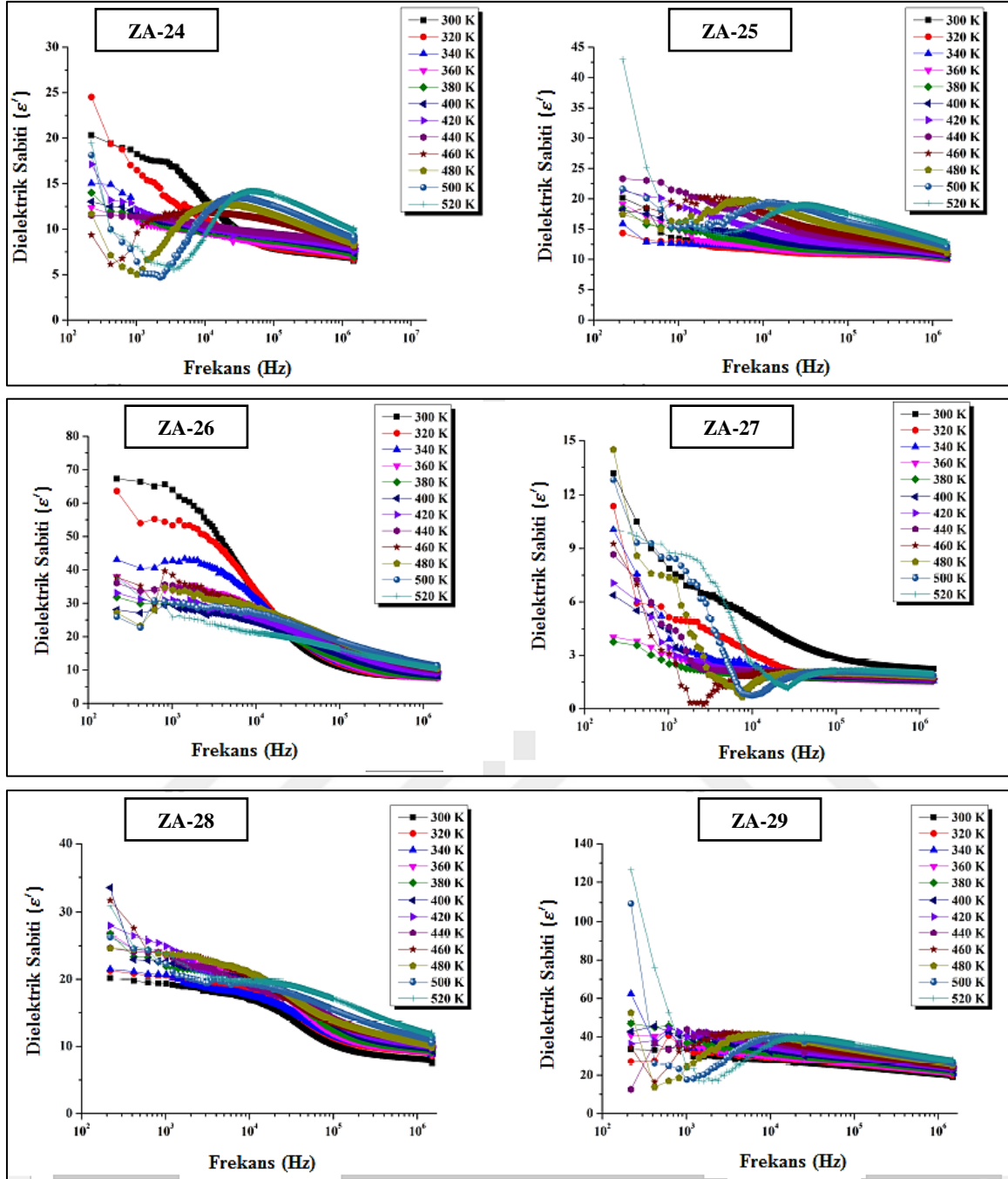
Şekil 4.16. Filmlerin UV-absorbance ölçümleri

4.2. Dielektrik Özellikleri

Filmlerin dielektrik özelliklerini tespit etmek için, kapasitans ve dielektrik (ϵ^l) direnci arasındaki ilişkiyi gösteren aşağıdaki formül kullanılmaktadır [130]:

$$\epsilon^l = \frac{C_p \cdot t}{\epsilon_0 \cdot A} \quad (4.3)$$

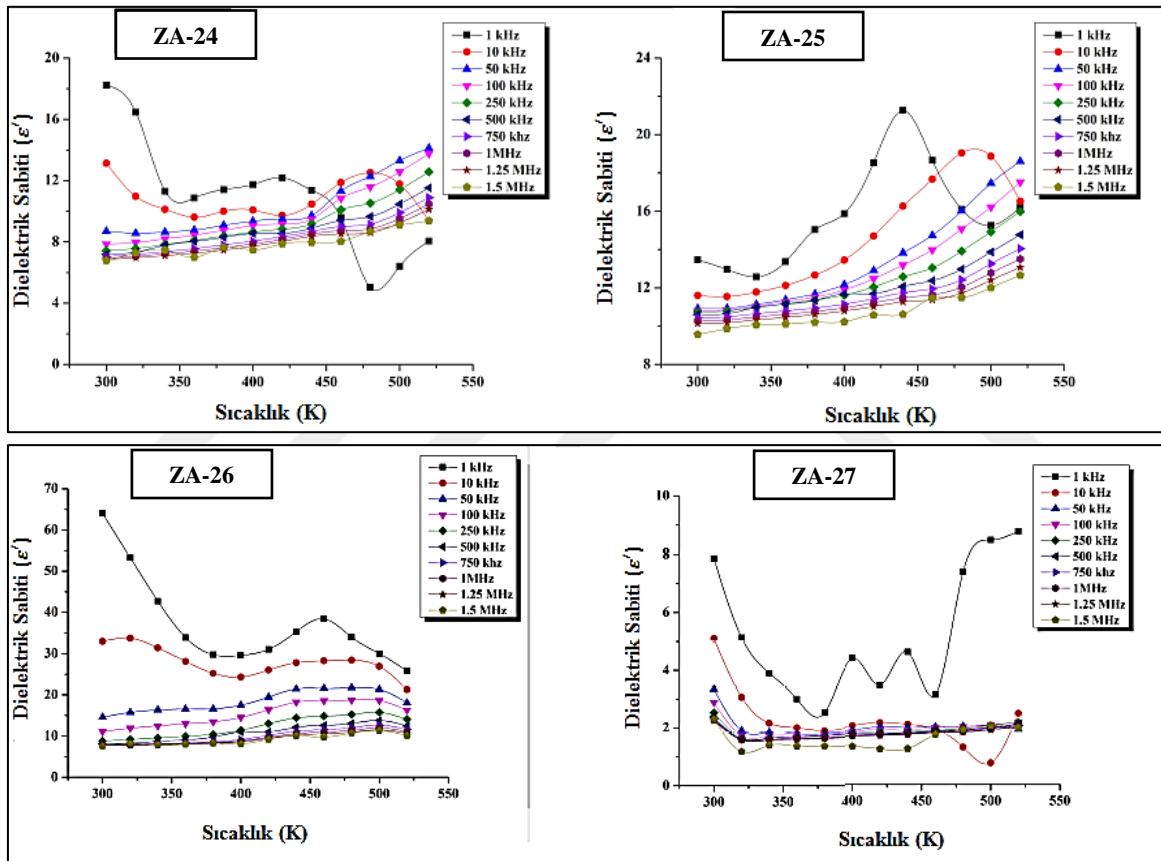
Farad (F) ile verilen filmlerin kapasitansı C_p olarak gösterilmiştir. Boşluğun elektriksel geçirgenliği ϵ_0 , kalınlık t ve filmlerin etkili alanı A ile verilmiştir [130]. Frekans fonksiyonu olarak ince filmlerin dielektrik sabiti farklı sıcaklıklarda empedans spektroskopisi ile tespit edilmiştir. Frekansla dielektrik sabitinin gerçek kısmının dağılımları (ϵ^l) Şekil 4.17 ve Şekil 4.18' de gösterilmiştir.



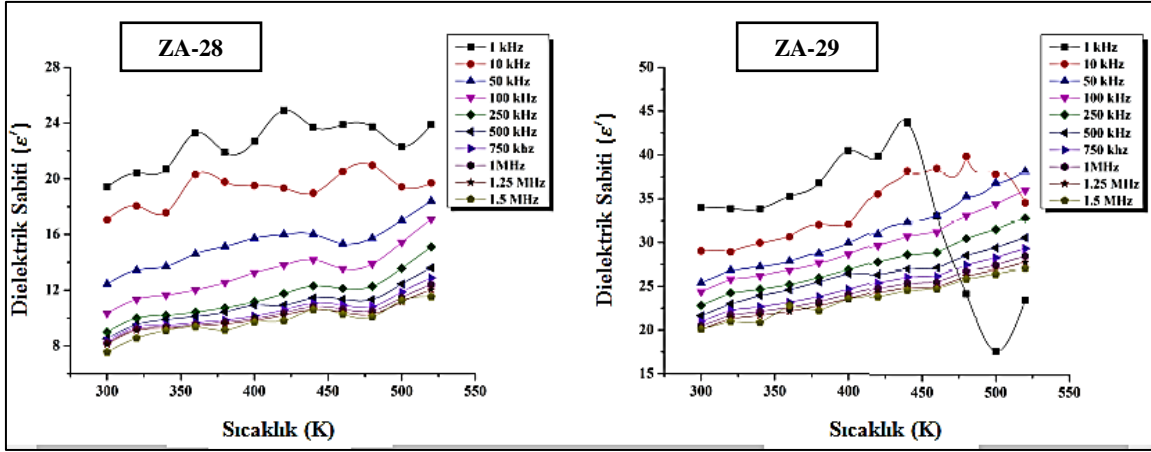
Şekil 4.17. ZA-24 ve ZA-29 numuneleri için dielektrik sabitinin frekansa bağlı değişimi

Dielektrik sabiti düşük frekanslarda düşerken, yüksek frekanslarda frekans bağımsız davranışına yaklaşmaktadır [131]. Tüm filmler 10^4 Hz frekansın altında dielektrik sabitinin büyük dağılımını göstermektedir. Dielektrik dağılım eğrisinin netleştirilmesi Koop's Maxwell-Weigner modeline dayanan teorisi ile vurgulanmıştır [132]. Modelde belirtildiği gibi, dielektrik ortamın zayıf iletken (veya dirençli) tanecik sınırları ile ayrılan iyi iletken taneciklerden üretildiği düşünülmektedir. Harici bir elektrik alanı uygulandığında, yük taşıyıcıları taneleri kolayca geçirebilir. Bu işlemle büyük polarizasyon

ve yüksek dielektrik sabiti üretilebilir [133]. Dielektrik sabitinin düşük frekansta değerinin yüksek olduğunu görmek, aynı zamanda tane sınırlarının küçük iletkenliğinin ve homojen olmayan dielektrik yapı nedeniyle arayüzey / uzay yükü polarizasyonunun katkısıyla da açıklanabilir. Frekanstaki artış, polarizasyonun azalmasına neden olur ve daha sonra sabit bir değerle sona erer ve bunun sonucunda farklı metal iyonları (Zn^{+2} , Al^{+3}) arasındaki belirli bir harici alan frekansının ötesindeki sıçramanın dönüşümlü alanı takip edememesiyle sonuçlanır [134]. Dielektrik sabitin gerçekte kısmının, tüm filmler için farklı frekanslarda sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 4.19' da gösterilmektedir.



Şekil 4.18. ZA-24 - ZA-27 numunelerinin dielektrik sabitinin sıcaklığa bağlı değişimi



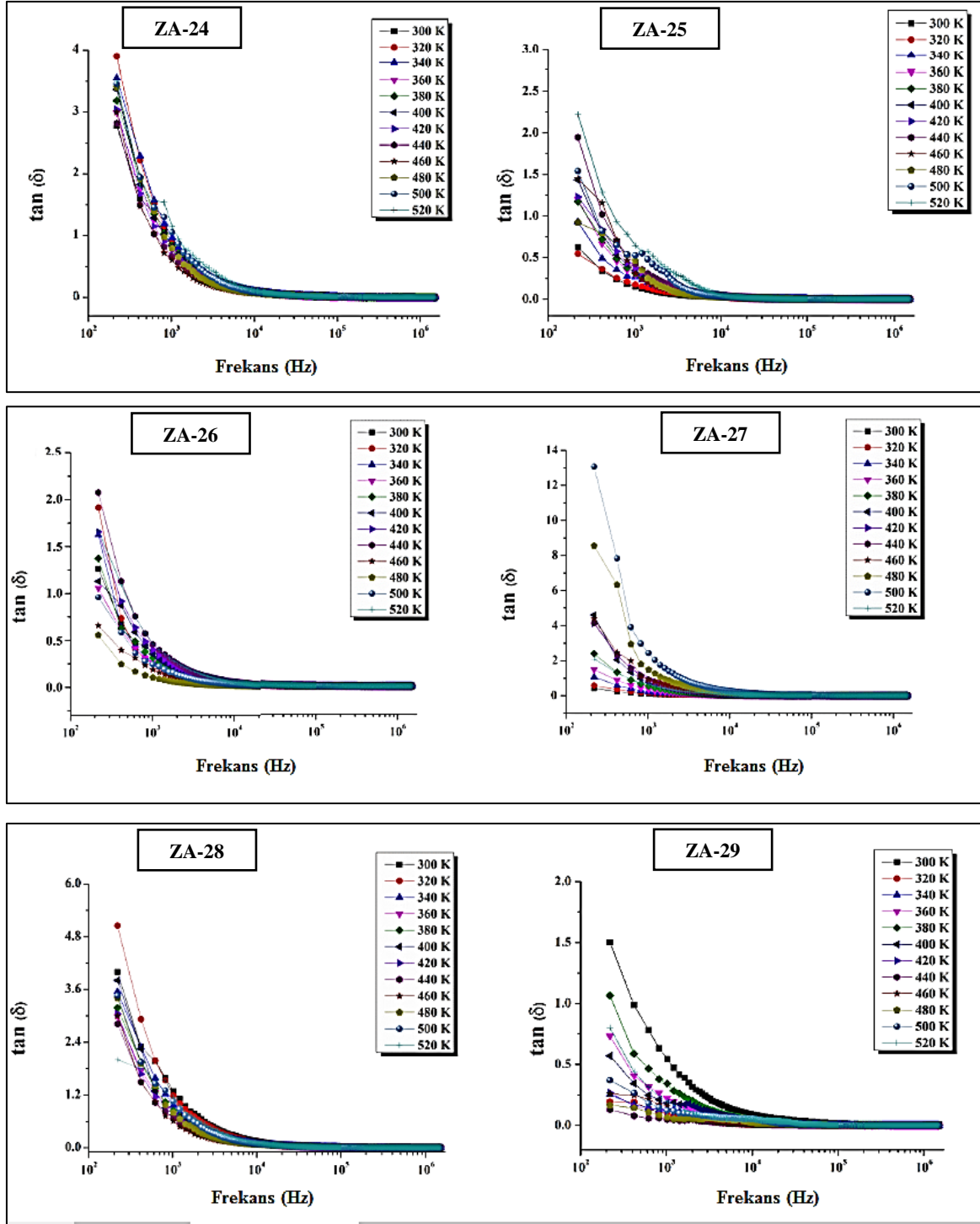
Şekil 4.19. ZA-28 ve ZA-29 numunelerinin dielektrik sabitinin sıcaklığa bağlı değişimi

Yüksek frekanslarda, dielektrik sabitinde sıcaklıkla birlikte bir artış açıkça görülmektedir. Bağıl dielektrik sabitindeki artış dipollerin hareketi olarak işaretlenebilir. Dipollerin polarizasyona ve dielektrik sabitine olan katkısı zayıftır, çünkü dipollerin çoğu düşük sıcaklıklarda harici olarak uygulanan alanın yönü ile aynı hizada olamaz. Sıcaklık arttıkça, bağlı yük taşıyıcılar, dış alanda daha kolay bir değişim izleyebilmek için yeterli termal enerji alırlar. Aynı şekilde, bu onların dielektrik sabitinde artışa yol açan kutuplaşmaya katkılarını artırır [135].

Filmlerin dielektrik kayıp tanjantı ($\tan \delta$) aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanmaktadır [136]:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (4.4)$$

$\tan \delta$ dielektrik kayıp tanjantı olup filme uygulanan elektrik alanından dolayı enerji kaybı ile orantılıdır [137]. Dielektrik kayıp tanjantı, dielektrik kayıp sistemdeki enerji dağılımını temsil eder [138]. İnce filmler için farklı sıcaklıklarda frekans ile dielektrik kayıp değişimi Şekil 4.20' de verilmiştir. Filmlerin $\tan \delta$ değerinin, uzay yükü polarizasyonundan kaynaklanabilecek frekans artışıyla azaldığı açıktır [139]. Bu çalışma için seçilen dengeleyiciler, sırasıyla I, II ve III grup alifatik aminlere ait MEA, DEA ve TEA' dır. Bu aminlerin moleküler yapısı, kimyasal ve fiziksel özelliklerinin, özellikle de reaktivite, viskozite ve kutupluluklarının ana belirleyicisi olarak tanımlanmaktadır. Bu özellikler, her bir aminin sol-jel prosesinde davranışını ortaya koymaktadır ki bu, ince filmin özellikleri üzerinde büyük bir etkiye neden olmaktadır.



Şekil 4.20. ZA-24 - ZA-29 numuneleri için dielektrik kaybın frekansa bağlı değişimi

Sonuç olarak, bu koleksiyon etilenimin, amino-alkol ve etilamin dahil olmak üzere çok çeşitli alifatik aminleri temsil edebilir ve aminlerin farklı özellikleri bağlamında bir karşılaştırma sağlar. Farklı çözücüler, çözücü moleküller ile birincil parçacıkların yüzeyi arasındaki farklı etkileşimleri ifade eder [125]. Bununla birlikte, sonuçlarımızda, 2-

metoksietanol-TEA kombinasyonunun (ZA-29), diğer ince filmlere kıyasla en yüksek dielektrik sabiti ve en düşük dielektrik kaybı gösterdiği görülmektedir.

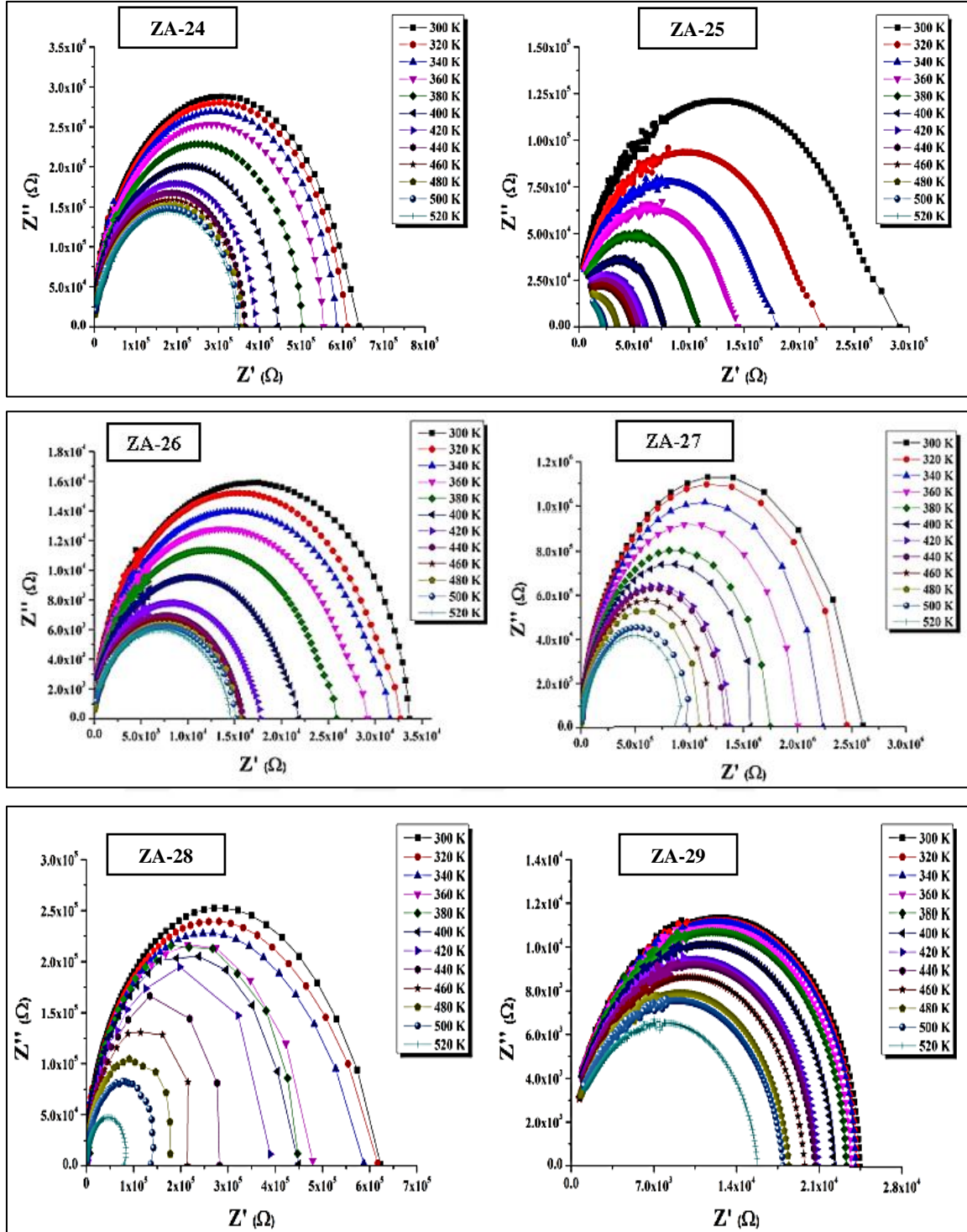
4.3. Empedans Çalışması

Filmlerin farklı sıcaklıklardaki Cole-Cole eğrileri Şekil 4.21' de gösterilmiştir.

Empedans ölçümü aşağıdaki denklemi kullanarak hesaplandı.

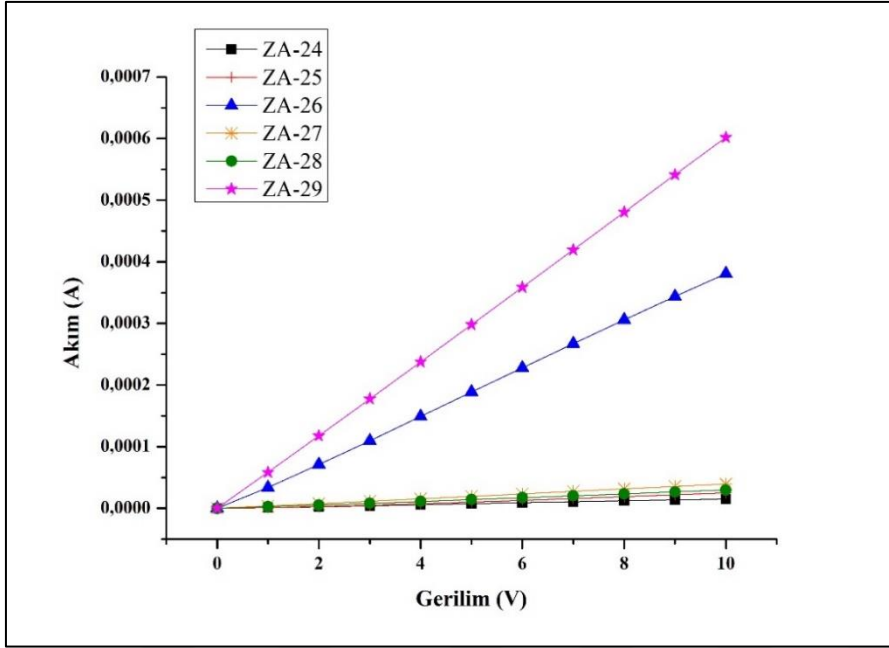
$$Z^*(\omega) = Z'(\omega) + i Z''(\omega) \quad (4.5)$$

Elde edilen yarım daire yayları, sistemde sunulan gevşeme mekanizmalarının (Debye veya Debye dışı) tipini belirler. Tanecik büyümesinde homojenliği ve malzemede tekli durulma zamanının varlığını belirleyen Debye gevşeme mekanizması, mükemmel yarım daire biçimli yay oluşumunu açıklar (Z' ekseninde ortalanmıştır) [120]. Malzemedeki tane etkisini temsil eden, incelenen sıcaklık aralığında tek bir yarım daire gözlenir. Cole-Cole eğrilerindeki yarım dairelerin çapı, empedansın büyüklüğünü gösterir. Tanecik ve tanecik sınırları, Cole-Cole eğrilerinde yarım daire büyüklüğünü etkileyen iletim işlemlerine katkıda bulunur. Elde edilen sonuçlardan, yarı dairelerin yarıçapının sıcaklık artışıyla birlikte azaldığı görülmektedir. Dirençli sıcaklıktaki bu azalma pratik olarak, katkılı numunenin yarı-iletken davranışını ortaya çıkaran negatif sıcaklık direnç katsayısına (NTCR) sahip olduğu görülür [120].



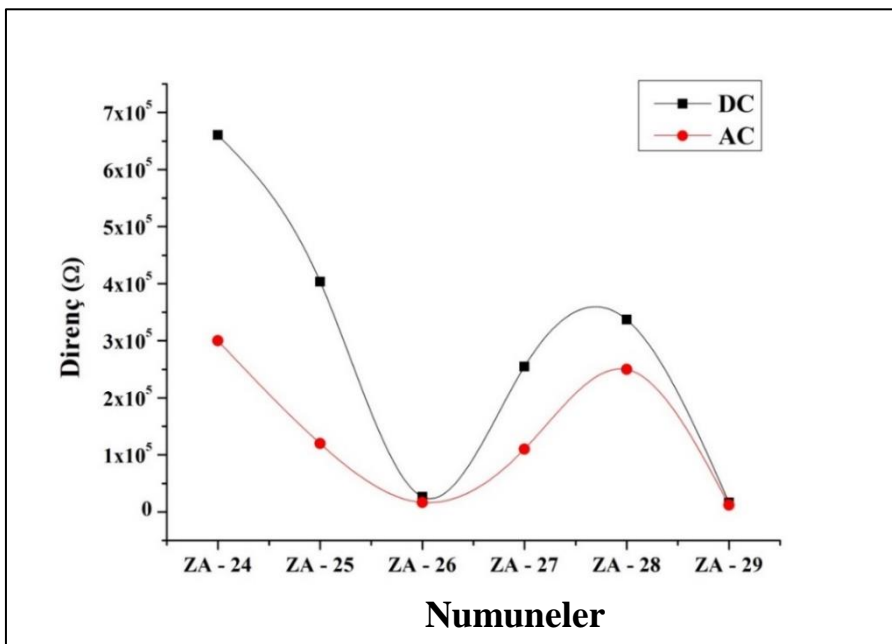
Şekil 4.21. ZA-24 - ZA-29 numuneleri için Cole-Cole eğrileri

Kontaklar arasındaki direnç, akım-gerilim ölçümleri ile belirlenmiştir. 0 V ile +10 V aralığında 11 adımda bu ölçümler oda sıcaklığında yapılmıştır. Her bir sensor için elde edilen I-V grafiği Şekil 4.22'de verilmiştir.



Şekil 4.22. Numunelerin I-V eğrileri

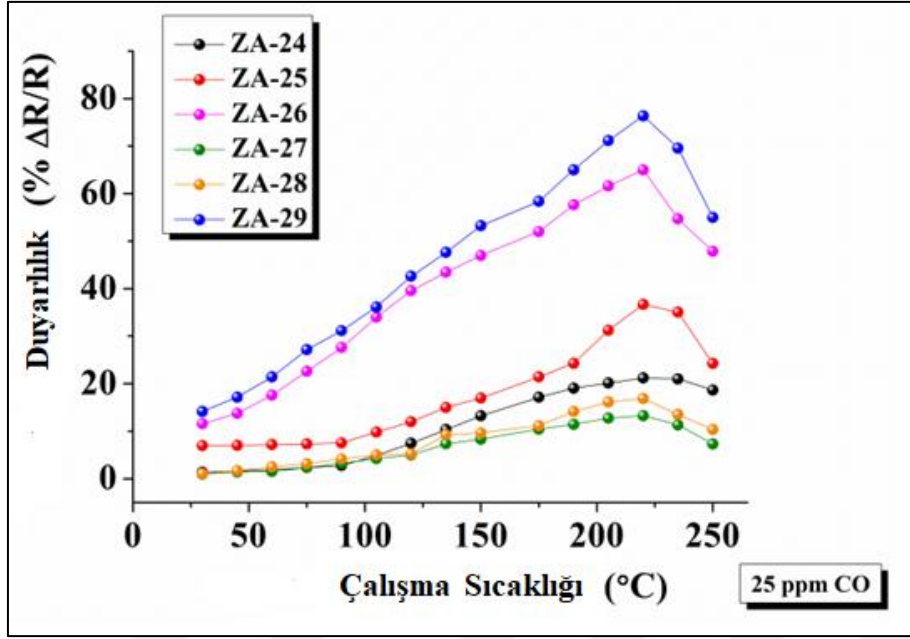
Şekil 4.23, ac (Cole-Cole eğrileri) 'den elde edilen tüm numunelerin dirençlerini ve oda sıcaklığında dc ölçümlerini göstermektedir. İki farklı ölçümden elde edilen direnç değerlerinin uyum içinde olduğu görülmüştür. ZA-26 ve ZA-29 örneklerinin diğer örneklere göre direncin daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca, TEA dengeleyicinin numunelerin daha düşük direnç göstermesine neden olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 4.23. Numunelerin direnci

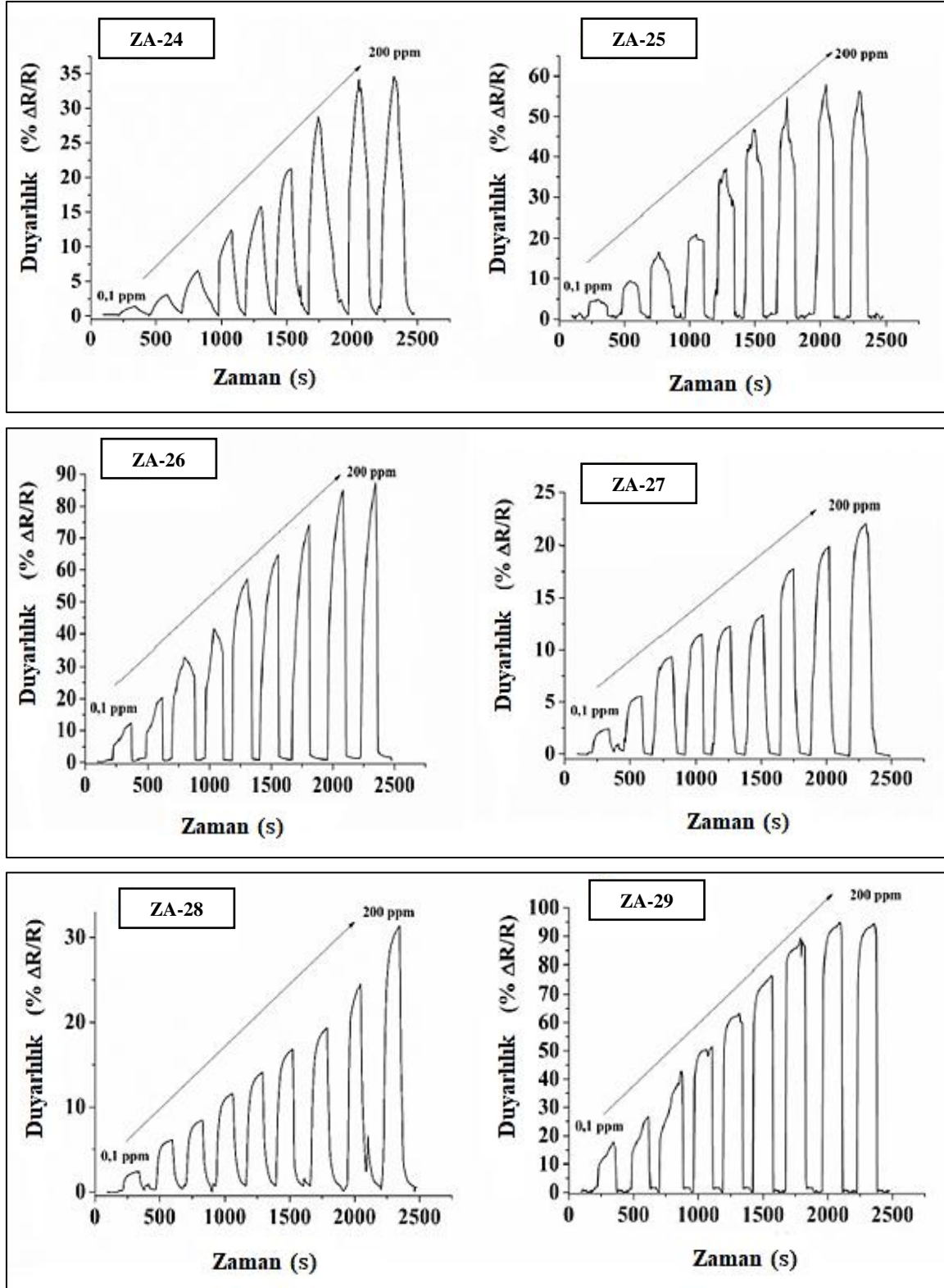
4.4. Gaz Algılama Özellikleri

Algılama malzemesinin yüzey sıcaklığı, reaksiyon kinetiğini ve gaz adsorpsiyon ve desorpsiyon işlemlerini büyük ölçüde etkilemektedir [140]. Şekil 4.24, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak numunelerin 25 ppm CO gazına karşı duyarlılıkları göstermektedir. Bu sıcaklığa bağlı elde edilen duyarlılık davranışı, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak maksimum bir duyarlılığa sahip olan iyi bilinen genel sensör davranışını gösterir. Çalışma sıcaklığının ZnO bazlı gaz sensörlerinin gaz algılama performansı için ana rol oynadığı açıktır [141]. İlk başta, sensör sıcaklığı arttıkça duyarlılık artarken belirli bir sıcaklıktan sonra, azalmaya başlar. En yüksek duyarlılığın elde edildiği sıcaklık noktası optimal çalışma sıcaklığı olarak isimlendirilir. Sensörlerin maksimum duyarlılık değerleri ZA-24, ZA-25, ZA-26, ZA-27, ZA-28 ve ZA-29 için sırasıyla %21, %47, % 62, % 14, %16 ve %77 olarak hesaplanmıştır. ZA-29 sensörünün maksimum duyarlılığı optimal çalışma sıcaklığı 220 °C' de %77 olarak gözlenmiştir. Aynı zamanda, TEA dengeleyicisi kullanılarak hazırlanan sensörlerin, aynı CO konsantrasyonu altında MEA ve DEA dengeleyicileri kullanılarak hazırlanan sensörlerden daha yüksek bir tepki gösterdiği de gözlenmiştir. Bu durum, metal oksitlerin hidroliz oranını kontrol ederken oksitler için çok kararlı çözeltilerin elde edilebildiği etilaminin etkisine bağlanabilir [142]. Trietilamin (TEA), nitrojen atomu üzerinde genellikle zayıf bir baz görevi gördüğü için tek bir çift elektron içerir. Zn^{+2} ve TEA arasındaki sulu reaksiyon her zaman vürtzit ZnO üretir [143]. ZnO' in çökeltilmesi, sıcaklık, pH ve sentetik yöntemler gibi reaksiyon parametrelerine bağlı olarak $Zn(OH)^2$ veya $Zn(OH)^{-2}$ olabilmektedir. TEA, bir ajan olarak çinko iyonlarına koordine eder ve çinko hidroksitini çinko okside dönüşümünü artırır. TEA, ZnO kristalinin morfolojisi üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. TEA, Zn^{+2} ile kompleks oluşturur ve ZnO yüzeyinde tutunur ve bu, ZnO kristal büyümesinin artırılması ile sonuçlanır. Ek olarak, Çizelge 5.1' den TEA dengeleyicisinin yüksek yüzey pürüzlülüğüne neden olduğu açıkça gösterilmiştir ve bu, yüksek gaz algılama özelliklerinin nedeni olabilmektedir.



Şekil 4.24. Çalışma sıcaklığına bağlı olarak sensörlerin duyarlılıkları

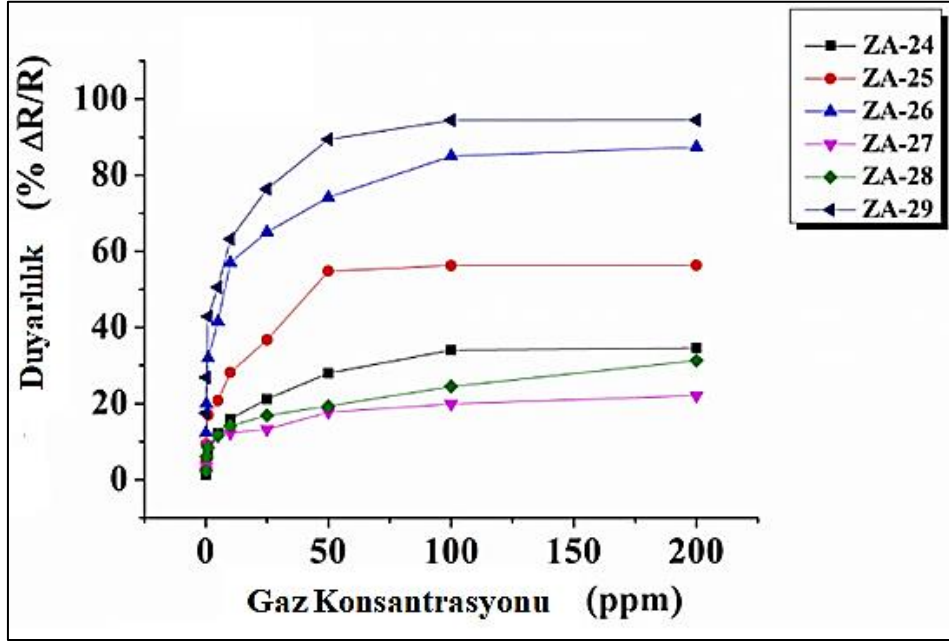
Şekil 4.25, 100 ile 200 ppm arası CO gaz konsantrasyonlarının bir fonksiyonu olarak sensörlerin tepkisini göstermektedir. Tepki, gaz konsantrasyonlarının artmasıyla artar. Aslında, filmlerin yüzey kusurları hızlı tepki çevrimleriyle sonuçlanan hızlı adsorpsiyon ve desorpsiyon işlemlerinde önemli bir rol oynayabilmektedirler [144].



Şekil 4.25. ZA-24 - ZA-29 için dinamik gaz algılama ölçümleri

Gaz konsantrasyonunun, gaz tepkisi genliğini açıkça belirlediği gözlenmiştir [145]. Sensör tepkisi, tutunma olayları boyunca gaz molekülleri ve sensör yüzeyi arasındaki etkileşime bağlıdır. Bir numunenin sabit bir yüzey alanı ve düşük gaz konsantrasyon seviyesinde,

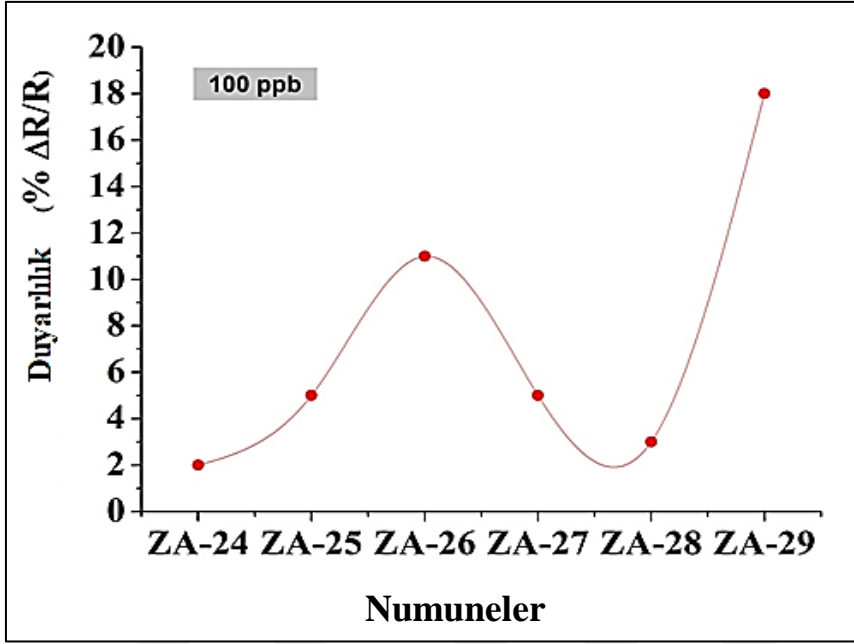
yüzeyde daha düşük bir gaz molekülü kapsama alanı olacaktır ve daha sonra, daha düşük yüzey reaksiyonu meydana gelebilmektedir. Yüzey reaksiyonu, daha büyük bir yüzey kaplaması nedeniyle gaz konsantrasyonunun artmasıyla artmaktadır.



Şekil 4.26. Farklı gaz konsantrasyonları için sensör duyarlılıkları

Gaz konsantrasyonunun artırılmasıyla, moleküler doyma noktasına ulaşılmadığı sürece yüzey reaksiyonunda bir artış olacaktır (Şekil 4.26 ve Şekil 4.27) [146].

Gaz algılama mekanizması yüzey kontrollü bir mekanizma olarak tanımlandığı için, oksijen adsorpsiyonu, tane büyüklüğü, kafes kusurları ve yüzey yapısı önemli bir rol oynar. Şekil 4.24-4.26 topluca incelendiğinde tüm sensörler arasında, 2-metoksietanol-TEA kombinasyonunun (ZA-29) sensörü en yüksek gaz tepkisini gösterdiği açıkça görülmüştür. Burada, gaz difüzyon aktivitesi için artan aktif alan ve daha büyük yüzey alanı filmin gözenekli yapısının bir sonucudur. Diğer örneklerin yapısı nispeten daha yoğundur ve gaz moleküllerinin derin seviyelere ulaşması zordur [147]. 100 ppb CO gaz konsantrasyonu için tüm numunelerin duyarlılıkları Şekil 4.27'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi ZA-29 sensörü en yüksek duyarlılığı göstermiştir.



Şekil 4.27. 100 ppb CO gazında sensörlerin duyarlılıkları

Metal oksit gaz sensörlerinin gaz algılama mekanizması, önceki araştırmalarda belirtilen yüzey bozulması modeli ile karakterize edilebilir. Bu, esas olarak, gaz moleküllerinin algılayıcı maddelerin yüzeyindeki tutunma ve bırakma işlemlerinden kaynaklanan iletkenlikteki değişiklik nedeniyledir. Sensör atmosfere maruz kaldığı anda, oksijen molekülleri yüzeyinde adsorbe edilebilir ve daha sonra iletim bandından serbest elektronlar yakalanır. Daha sonra, tutunan oksijen, yüzeydeki elektron tükenme tabakasına dönüşen ve potansiyel bariyeri oluşturan kimyasal olarak tutunan oksijen türü O^- 'yu oluşturur [148]. Sensör indirgeyici gazlara maruz kaldığında, tutunmuş oksijen türleri ve gaz molekülleri arasında yüzey reaksiyonu oluşur [149]. Bilindiği gibi, dirençteki değişiklik, tutunan oksijen türlerinin, yarıiletken oksitlerin yüzeyindeki test gazı molekülleri ile reaksiyona girmesinden kaynaklanır [150].

5. ARDUINO GAZ SENSÖR SİSTEMİ

5.1. Giriş

Günlük yaşamımızda, insanlar için yaşam kalitesini etkileyeceğinden, sağlığımız için çevre ve şartlar çok önemlidir. Sonuç olarak, çevre ve sanayi alanındaki hava kalitesinden kaynaklanan sorunlar, çevreye ilişkin kamu ve işçi sağlığına yönelik uyanıklığı ve sorumluluğu arttırmak için tartışılmaktadır. CO gibi tehlikeli gazlar, birçok endüstriyel alanda patlamalara ve CO zehirlenmesi kazalarına neden olabileceğinden insana zararlı etkide bulunmaktadır.

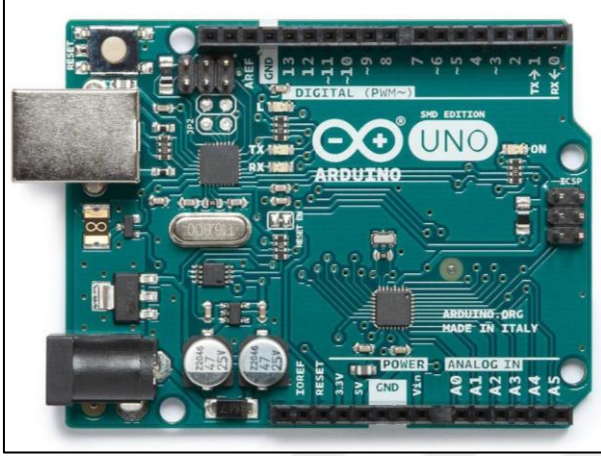
Sanayi bölgesinde gaz kaçağı birçok sağlık sorununa neden olmaktadır. Bu nedenle, bu tür felaketlerin meydana gelmesini önlemek için, temiz hava ortamını korumak için bir işyerinin atmosferi düzenli olarak izlenmeli ve kontrol edilmelidir. Bununla birlikte, endüstriyel hava kalitesi kontrolündeki çabalar, atmosfer havasının kalitesini ve tehlikeli gaz seviyesini tanımlamak ve değerlendirmek için bilime dayalı yaklaşımların eksikliği nedeniyle sınırlı kalmıştır. Bu nedenle, gaz kaçağı tespiti için bir izleme sistemi geliştirilmelidir. Bu sistemin gelişimi için, karbonmonoksit gazının (CO) mevcut olduğunu tespit etmek için gaz sensörü (MQ 7) kullanıldı. Bu sensör, gazın konsantrasyonunu sensörün voltaj çıkışına göre algılar ve alarm sistemi, otonom kontrol sistemi ve izleme sisteminde çalıştırılır ve tüm sistem için mikrodenetleyici olarak Arduino UNO kullanılır.

Bu bölümde, arduino bazlı gaz sensör sistemi laboratuvar ortamını izlemek için tasarlanmıştır. Sistemi tasarlamamanın temel unsurları basit kullanım ve düşük üretim maliyetidir. Kullanıcı arayüzü, önceden bilgisayar bilgisi olmayan kişiler tarafından kullanılmak üzere tasarlanmıştır.

Arduino, mümkün olduğunca kolay kullanımlı olmayı hedefleyen İtalya merkezli popüler elektronik platformunun adıdır. Hem donanım hem de yazılım tamamen açık kaynaklıdır. Kolay ve hızlı prototipleme için tasarlanmıştır [151].

Bu tek çipli mikroişlemcinin, Atmel adlı bir şirketten gelen bir mikroişlemcisi kullanır. Çip, bir mikrodenetleyici olarak bilinir. Mikrodenetleyiciyongası 8 bit çekirdekli yalnızca 16 MHz hızında çalışmakta ve 32 kilobayt depolama alanı ve 2 kilobayt rastgele erişim

belleği ile çok sınırlı miktarda kullanılabilir belleğe sahiptir. Arduino'nun temel modeli Resim 5.1'de gösterilmektedir. Arduino kurulumu, Atmel mikroişlemcisi etrafında kurulur ve her çeşit DIY projesinde kullanılmasının kolay ve popüler olmasını sağlar [152]. Arduino bu proje için seçilmiştir, çünkü geliştirmesi kolay ve çevrimiçi örnekler ve öğreticilerden oluşan bir servise sahiptir.



Resim 5.1. Arduino Uno mikrodenetleyicisi

5.2. Arduino IDE

Arduino IDE, kullanıcının farklı tür programlar hazırlamasını ve bunları Arduino mikrokontrolörüne yüklemesini sağlayan programlama ortamıdır. Arduino, “İşleme” adlı programlama dilini temel alan kullanıcı dostu bir programlama dili kullanır. Kullanıcı kodunu yazdıktan sonra IDE kodu sıralar ve çeviri diline çevirir. Kodu çevirdikten sonra, IDE programı Arduino mikrokontrolörüne yükler. Arduino IDE, kullanıcı tarafından yazılan kodu Arduino'ya göndermeden önce kontrol edecek yerleşik bir kod ayrıştırıcısına sahiptir. IDE yazılımı, cihazda test edilmeye hazır olan farklı program türlerini içerir. Programı test ettikten sonra Arduino'ya farklı modellerde değişen USB kablosu ile yüklenebilir [153]. Resim 5.2'de java tabanlı Arduino IDE'nin ekran görüntüsünü göstermektedir. Aşağıdaki, temel bir Arduino programına bir örnektir:

```

1 void setup() {
2   // put your setup code here, to run once:
3
4 }
5
6 void loop() {
7   // put your main code here, to run repeatedly:
8
9 }

```

Resim 5.2. Java tabanlı Arduino IDE'nin ekran görüntüsü

Kurulum ve döngü işlevleri, her zaman geçerli bir Arduino programında bulunması gereken yalnızca iki gerekli işlemdir. Programın başında, mikrodenetleyici ilk çalıştırıldığında kurulum işlevi bir kez çağrılır. Program daha sonra döngü adı verilen fonksiyonun içinde sonsuza dek çalışmaya devam eder.

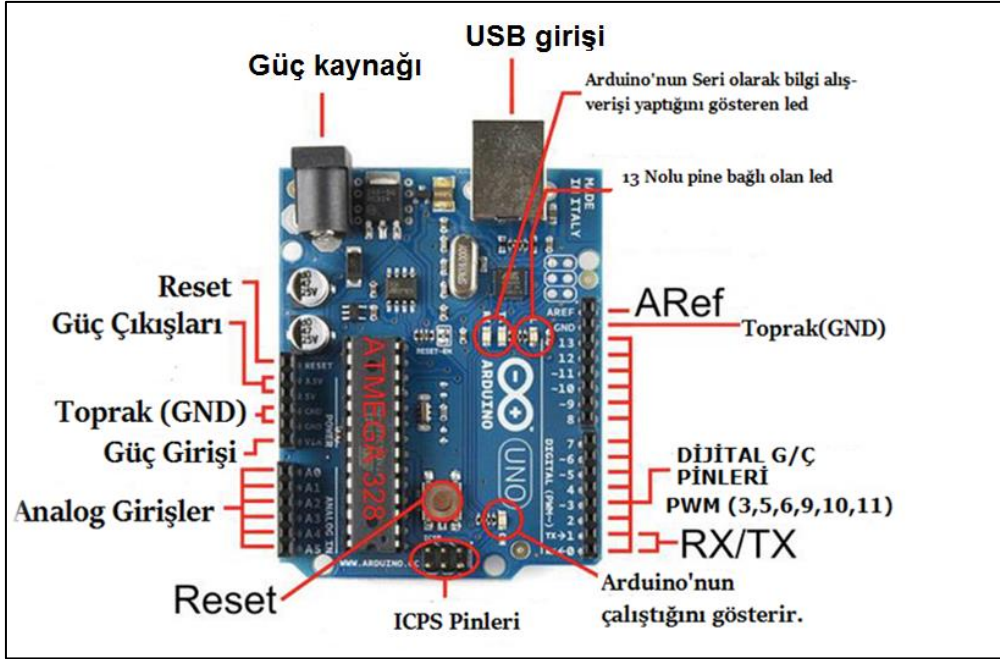
5.3. Bileşenler

Kuruluma başlamadan önce kullanılan tüm bileşenler hakkında fikri sahibi olmak önemlidir. Hem donanım hem de yazılım özellikleriyle ilgili tüm bilgileri bilmek çok önemlidir. Kullanılan bileşenler aşağıdaki gibidir:

- Arduino Uno R3
- Gaz Sensörü MQ-7
- LCD ekran
- Devre tahtası
- Pizo Alarm zili
- LED

5.3.1. Arduino UNO R3

Arduino UNO'ya 'stok' Arduino adı verilmektedir. Tüm programlama cihazlarına kolayca uyarlanabilir. Diğer tüm Arduino panoları UNO panosunun farklı versiyonlarıdır. Neredeyse tüm özelliklere sahip, daha az pin çıkışı olan Arduino MEGA'ya benzemektedir.



Resim 5.3. İnce uçlu Arduino UNO R3

5.3.2. Gaz sensörü MQ-7

Bunlar genellikle iç CO gaz kaçağı alarm maddeleri CO gaz alarmı ve taşınabilir CO gaz detektöründe kullanılır.

- Karbonmonoksitlere karşı yüksek duyarlılık
- Uzun ömür
- Düşük maliyetli
- Basit tahrik devresi

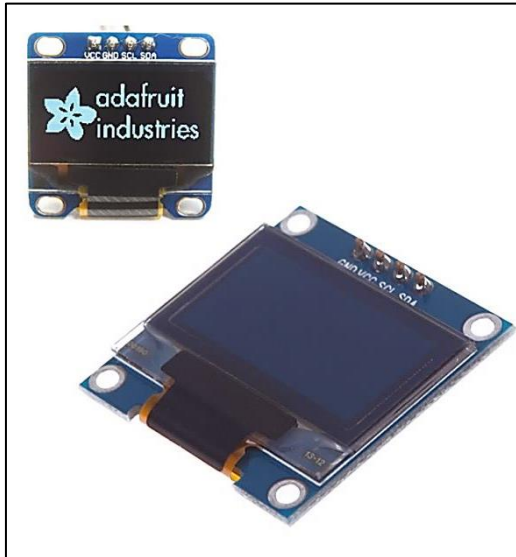


Resim 5.4. MQ-7 gaz sensörü

5.3.3. LCD ekran

Boyutları aşağıda verilen bu ekranlar oldukça küçüktür, ancak OLED ekranın yüksek kontrastı nedeniyle çok okunabilir. Bu ekran 128x64 ayrı beyaz OLED piksellerden oluşur, her biri denetleyici yongası tarafından açılır veya kapatılır. Kendi ışığını oluşturduğu için arka ışığa gerek duymaz, bu OLED'i çalıştırmak için gereken gücü azaltır ve ekranın bu kadar yüksek kontrasta sahip olmasının nedenidir.

- PCB: 38mm x 29mm (1.5" x 1")
- Ekran: 25mm x 14mm
- Kalınlık: 4mm
- Ağırlık: 8.5g
- Geçerli akım gösterimi tamamen kullanıma bağlıdır: açık olduğunda her bir OLED LED'i yanar, böylece ne kadar çok piksel yakılırsa o kadar fazla akım kullanılır. Pratikte ~ 20mA veya daha fazla çizme eğilimindedirler, ancak kesin sayılar için kullanım devresindeki akımı ölçmek gerekir.
- Bu anakart/yonga, 0x3C-0x3D arasında, atlama telleriyle seçilebilen I2C 7-bit adresini kullanır.



Resim 5.5. I2C OLED LCD ekran

5.3.4. Alarm zili

Bu modül Piezo Buzzer adı verilen düşük maliyetli bir alarm zilidir. Bu cihaz bu sistemin alarmıdır. CO konsantrasyonu çok yükseldiğinde ve duman algılandığında çalmaya başlar. Ayrıca MQ-7 sensörü tarafından algılanan gaz konsantrasyonu yüksek olduğunda çalmaya başlar.



Resim 5.6. Piezo elektronik tonlu zil

5.3.5. Devre tahtası

Bir devre tahtası elektronik prototipleme için bir yapı tabanıdır. Elektronik bir devre tahtası aslında bir Lehimsiz devre tahtasıdır. Bunlar geçici devreler ve prototip yapımı için harika ünitelerdir ve kesinlikle lehim gerektirmezler.



Resim 5.7. Küçük devre tahtası

5.3.6. Işık yayan diyot

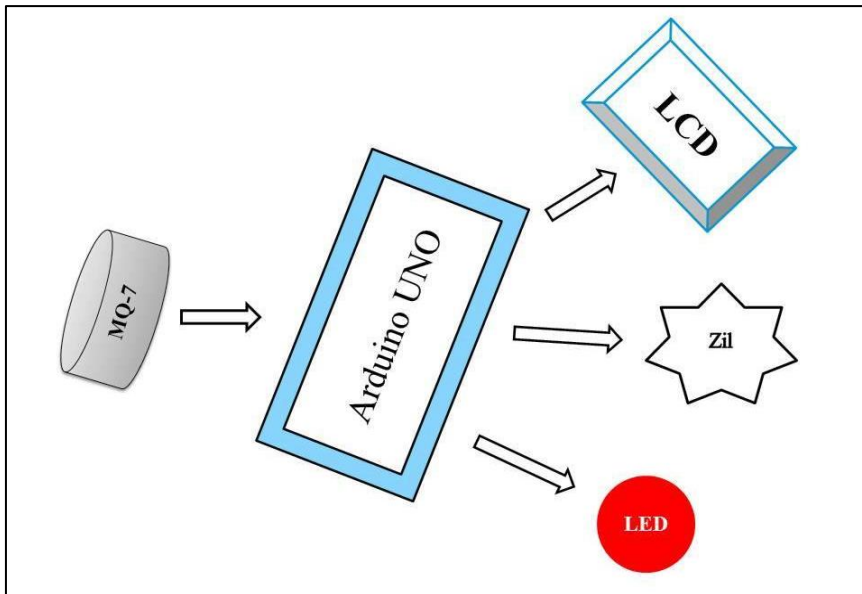
Bir ışık yayan diyot, iki uçlu yarıiletken bir ışık kaynağıdır. Aktifleştiğinde ışık yayan bir p-n bağlantı diyodudur. Elektrotlara uygun bir akım uygulandığında, elektronlar cihazın içindeki elektron boşluklarıyla yeniden birleşerek enerjiyi fotonlar şeklinde serbest bırakırlar.



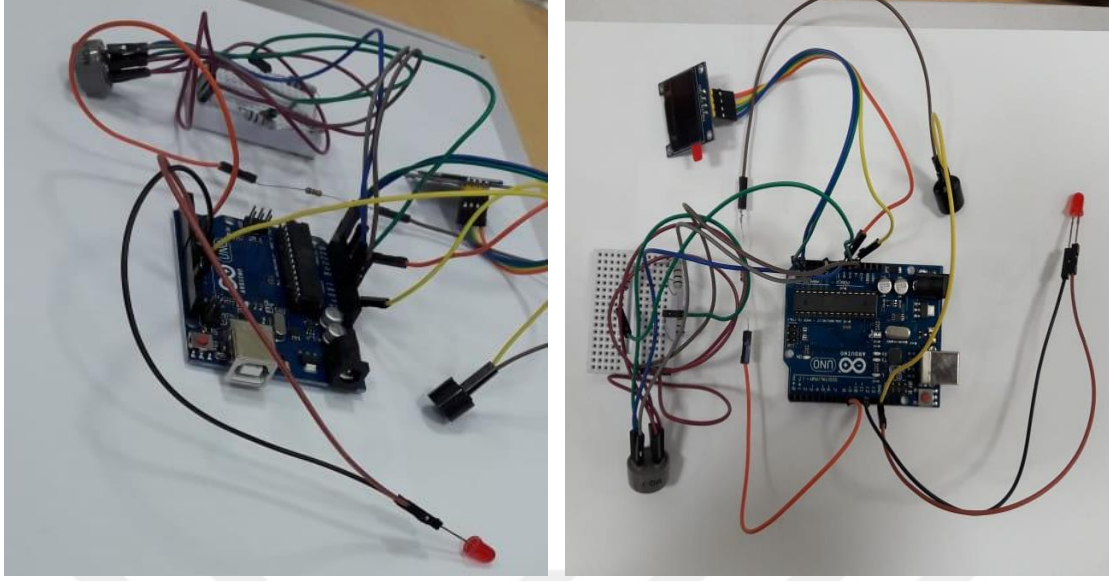
Resim 5.8. LED

5.4. Sistemin Kurulması

Tüm bileşenler bağladıktan ve programladıktan sonra deney yapılmıştır. Tüm bileşenler önerilen sisteme göre çalıştırıldı. Tüm modül ve mikrodenetleyiciler tellerle birlikte tutturuldu.



Şekil 5.1. Akış şeması



Resim 5.9. CO gazını algılayan Arduino sistemi

Sensördaki algılanan gaz yüksek olduğunda piezo buzzer zil başlar. Işık, sensör komutunu kullanarak AÇIK ve KAPALI duruma getirilir. LCD ekran, duman veya zararlı gaz algılandığında ppm cinsinden CO gazı konsantrasyonunu gösterir. Bütün sistem Arduino IDE platformunda yazıldı.

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Motorlu araçların ve fabrikaların artışı ile birlikte havaya çeşitli zararlı gazlar salınmaktadır. Bu nedenle yaşama alanlarında ve iş yerlerinde hava kalitesinin kontrol edebilmesi gerekmektedir. H_2S , CO , NO_2 ve NO_3 gibi çeşitli zehirli gazların solunması insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiye neden olmaktadır. Bu gazlar belirli bir konsantrasyon üzerinde olduğunda insan sağlığı üzerinde çok ciddi zararlara yol açabilir. İnsan hayatının güvenliği için akıllı görüntüleme sistemlere hava kalitesinin sürekli takip edilmesi ve kontrol edilmesine ihtiyaç vardır. Bu tez çalışması, Al katkılı ZnO numunelerinin CO gazı için gaz sensör parametrelerinin ve dielektrik özelliklerinin incelenmesini sağlamaktadır.

Bu çalışmada, etanol ve 2-metoksietanol ve monoetanolamin (MEA), dietanolamin (DEA) ve trietilamin (TEA) içeren çeşitli amino katkı maddeleri, sol-jel tekniğinde Al katkılı ZnO (ZA) ince filmlerinin büyütülmesi için kullanıldı. Kullanılan çözücülerin ve dengeleyicilerin etkilerini incelemek için bu ince filmlerin yapısı, dielektrik ve gaz algılama özellikleri incelenmiştir. Numunelerin yapısal ve elektriksel özelliklerini önemli ölçüde değiştiren çözücü ve dengeleyici tipi bulunmuştur. Çözücü-dengeleyici kombinasyonunun kullanılması, malzemelerin kristal yapısı ve yüzey morfolojisi üzerinde büyük etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. XRD sonuçlarından MEA ve TEA dengeleyicileri kullanarak ZA ince kristalli yüksek filmlerin elde edilebileceğini göstermiştir. AFM sonuçları, 2-metoksietanolle çözülen filmlerin, TEA reaktifinin örnekleri hariç, genellikle daha pürüzsüz yüzeylere sahip olduğunu ortaya koymuştur. Optik geçirgenliğin, etanol içeren filmler için genellikle daha yüksek olduğu doğrulanmıştır. Ayrıca, bir gaz sensörü olarak, 2-metoksietanol-TEA kombinasyonundaki ZA-29 sensörü, diğer sensörlere kıyasla en yüksek CO gazı tepkisini sergilemiştir. ZA gaz sensörlerinin CO gazına karşı artırılmış duyarlılığı, hem Al^{+3} katkısından dolayı oksijen boşluğu hem de TEA dengeleyicisi kullanımının neden olduğu yüksek yüzey pürüzlülüğünün kombinasyonuna bağlanabilmektedir.

Çalışma sırasında yaşama ortamlarında, özellikle laboratuvar ortamında kullanma amacıyla CO gaz kaçağı izleme sistemi başarılı bir şekilde geliştirilmiştir ve iyi çalışmaktadır. Sistem Arduino UNO kullanılarak oluşturulmuştur. Sensörlerin duyarlılığı kullanıcının ihtiyacına göre değişebilmektedir. Programın tamamı tek bir Arduino IDE ile yazılmıştır,

dolayısıyla kullanıcının her türlü işlevi değiştirmesi mümkündür. Genel olarak bu otomasyon sisteminin kullanımı kolay, esnek ve güvenilirdir. Sistem ile ekstra özellikler eklenebilmektedir.

Bu gaz sensör sisteminin temel bir yapısıdır. Bir gaz sensörü laboratuvarında olası gaz kaçaklarında hem çalışanların can güvenliği hem de çevre kirliliğini engellemek için tüm gereksinimleri yapıldı. Gaz konsantrasyonunu, LCD ekranlı gaz dedektörü, çalışanları uyarmak için zil kullanılarak oluşturulan alarm sistemi izlemek için bu sistem kullanıldı. Sonucu ve oldukça önemli olarak, bu sistem, birçok sektördeki birçok insanın, onları patlayıcı veya tehlikeli bir atmosfere karşı uyarmak ve felaketlerin olmasını önlemek için güvenerek, hayat kurtaracak şekilde meydana getirilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Sharma, S., and Madou, M. (2012). A new approach to gas sensing with nanotechnology. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370, 2448-2473.
2. Heo, Y., Norton, D., Tien, L., Kwon, Y., Kang, B., Ren, F., Pearton, S., and LaRoche, J. (2004). ZnO nanowire growth and devices. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 47, 1-47.
3. Hjiri, M., El Mir, L., Leonardi, S., Pistone, A., Mavilia, L., and Neri, G. (2014). Al-doped ZnO for highly sensitive CO gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 196, 413-420.
4. Bott, B., Jones, T., and Mann, B. (1984). The detection and measurement of CO using ZnO single crystals. *Sensors and Actuators*, 5, 65-73.
5. Nanto, H., Minami, T., and Takata, S. (1986). Zinc-oxide thin-film ammonia gas sensors with high sensitivity and excellent selectivity. *Journal of Applied Physics*, 60, 482-484.
6. Lee, J.-H., Yeo, B.-W., and Park, B.-O. (2004). Effects of the annealing treatment on electrical and optical properties of ZnO transparent conduction films by ultrasonic spraying pyrolysis. *Thin Solid Films*, 457, 333-337.
7. Nunes, P., Fortunato, E., Tonello, P., Fernandes, F.B., Vilarinho, P., and Martins, R. (2002). Effect of different dopant elements on the properties of ZnO thin films. *Vacuum*, 64, 281-285.
8. Xu, Z., Deng, H., Li, Y., Guo, Q., and Li, Y. (2006). Characteristics of Al-doped c-axis orientation ZnO thin films prepared by the sol-gel method. *Materials Research Bulletin*, 41, 354-358.
9. Kohl, D. (1990). The role of noble metals in the chemistry of solid-state gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 1, 158-165.
10. Rao, G.T., and Rao, D.T. (1999). Gas sensitivity of ZnO based thick film sensor to NH₃ at room temperature. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 55, 166-169.
11. Yang, Z., Huang, Y., Chen, G., Guo, Z., Cheng, S., and Huang, S. (2009). Ethanol gas sensor based on Al-doped ZnO nanomaterial with many gas diffusing channels. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 140, 549-556.
12. Hjiri, M., Dhahri, R., El Mir, L., Donato, N., Bonavita, A., Latino, M., and Neri, G. (2014). Development of doped ZnO nanoparticles for gas sensing application. *IEEE*, 104-107.

13. Yoo, J., Lee, J., Kim, S., Yoon, K., Park, I.J., Dhungel, S., Karunagaran, B., Mangalaraj, D., and Yi, J. (2005). High transmittance and low resistive ZnO: Al films for thin film solar cells. *Thin Solid Films*, 480, 213-217.
14. Sieber, I., Wanderka, N., Urban, I., Dörfel, I., Schierhorn, E., Fenske, F., and Fuhs, W. (1998). Electron microscopic characterization of reactively sputtered ZnO films with different Al-doping levels. *Thin Solid Films*, 330, 108-113.
15. Sahay, P., and Nath, R. (2008). Al-doped ZnO thin films as methanol sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 134, 654-659.
16. Nanto, H., Sokooshi, H., and Kawai, T. (1993). Aluminum-doped ZnO thin film gas sensor capable of detecting freshness of sea foods. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 14, 715-717.
17. Chou, S., Teoh, L., Lai, W., Su, Y., and Hon, M. (2006). ZnO: Al thin film gas sensor for detection of ethanol vapor. *Sensors*, 6, 1420-1427.
18. Hou, Y., Soleimanpour, A.M., and Jayatissa, A.H. (2013). Low resistive aluminum doped nanocrystalline zinc oxide for reducing gas sensor application via sol-gel process. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 177, 761-769.
19. Soleimanpour, A.M., Jayatissa, A.H., and Sumanasekera, G. (2013). Surface and gas sensing properties of nanocrystalline nickel oxide thin films. *Applied Surface Science*, 276, 291-297.
20. Seiyama, T., Kato, A., Fujiishi, K., and Nagatani, M. (1962). A new detector for gaseous components using semiconductive thin films. *Analytical Chemistry*, 34, 1502-1503.
21. Hulanicki, A., Glab, S., and Ingman, F. (1991). Chemical sensors: definitions and classification. *Pure and Applied Chemistry*, 63, 1247-1250.
22. Soleimanpour, A.M., Hou, Y., and Jayatissa, A.H. (2013). Evolution of hydrogen gas sensing properties of sol-gel derived nickel oxide thin film. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 182, 125-133.
23. Barsan, N., and Weimar, U. (2001). Conduction model of metal oxide gas sensors. *Journal of Electroceramics*, 7, 143-167.
24. Yamazoe, N., Fuchigami, J., Kishikawa, M., and Seiyama, T. (1979). Interactions of tin oxide surface with O₂, H₂O and H₂. *Surface Science*, 86, 335-344.
25. Ando, M. (2006). Recent advances in optochemical sensors for the detection of H₂, O₂, O₃, CO, CO₂ and H₂O in air. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 25, 937-948.
26. Capone, S., Forleo, A., Francioso, L., Rella, R., Siciliano, P., Spadavecchia, J., Presicce, D., and Taurino, A. (2003). Solid state gas sensors: state of the art and future activities. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 5, 1335-1348.

27. Lv, Y., Guo, L., Xu, H., and Chu, X. (2007). Gas-sensing properties of well-crystalline ZnO nanorods grown by a simple route. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 36, 102-105.
28. Basu, S., and Dutta, A. (1997). Room-temperature hydrogen sensors based on ZnO. *Materials chemistry and physics*, 47, 93-96.
29. Korotcenkov, G. (2013). *Materials for Thick Film Technology*. In *Handbook of Gas Sensor Materials*. Springer, 249-254.
30. Norton, D.P., Heo, Y., Ivill, M., Ip, K., Pearton, S., Chisholm, M.F., and Steiner, T. (2004). ZnO: growth, doping & processing. *Materials today*, 7, 34-40.
31. Ogawa, H., Nishikawa, M., and Abe, A. (1982). Hall measurement studies and an electrical conduction model of tin oxide ultrafine particle films. *Journal of Applied Physics*, 53, 4448-4455.
32. Bochenkov, V., and Sergeev, G. (2005). Preparation and chemiresistive properties of nanostructured materials. *Advances in colloid and interface science*, 116, 245-254.
33. Park, J. (2010). Nanostructured semiconducting metal oxides for use in gas sensors. *Theses*, 3441
34. Scott, R.W., Yang, S., Chabanis, G., Coombs, N., Williams, D., and Ozin, G. (2001). Tin Dioxide Opals and Inverted Opals: Near-Ideal Microstructures for Gas Sensors. *Advanced Materials*, 13, 1468-1472.
35. Panchapakesan, B., Cavicchi, R., Semancik, S., and DeVoe, D.L. (2005). Sensitivity, selectivity and stability of tin oxide nanostructures on large area arrays of microhotplates. *Nanotechnology*, 17, 415.
36. Williams, D.E. (1999). Semiconducting oxides as gas-sensitive resistors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 57, 1-16.
37. Korotcenkov, G., and Cho, B. (2011). Instability of metal oxide-based conductometric gas sensors and approaches to stability improvement (short survey). *Sensors and Actuators B: Chemical*, 156, 527-538.
38. Choopun, S., Hongsith, N., and Wongrat, E. (2012). *Metal-oxide nanowires for gas sensors*. In *Nanowires-Recent Advances*. InTech, DOI: 10.5772/54385.
39. Feng, P., Wan, Q., and Wang, T. (2005). Contact-controlled sensing properties of flowerlike ZnO nanostructures. *Applied Physics Letters*, 87, 213111.
40. Harper, C.A., and Sampson, R.N. (2004). *Electronic materials and processes handbook*. McGraw-Hill New York, 1-76.
41. Askeland, D.R., and Phulé, P.P. (2003). *The science and engineering of materials*. Springer, 204-217.

42. Yi, G.-C., Wang, C., and Park, W.I. (2005). ZnO nanorods: synthesis, characterization and applications. *Semiconductor Science and Technology*, 20, S22.
43. Wang, Z. L. (2004). Zinc oxide nanostructures: growth, properties and applications. *Journal of physics: condensed matter*, 16(25), R829.
44. Baxter, J.B., and Aydil, E.S. (2006). Dye-sensitized solar cells based on semiconductor morphologies with ZnO nanowires. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90, 607-622.
45. Altamirano-Juárez, D.C., Torres-Delgado, G., Jiménez-Sandoval, S., Jiménez-Sandoval, O., and Castanedo-Pérez, R. (2004). Low-resistivity ZnO: F: Al transparent thin films. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 82, 35-43.
46. Ibanga, E., Le Luyer, C., and Mugnier, J. (2003). Zinc oxide waveguide produced by thermal oxidation of chemical bath deposited zinc sulphide thin films. *Materials chemistry and physics*, 80, 490-495.
47. Chiou, W.-T., Wu, W.-Y., and Ting, J.-M. (2003). Growth of single crystal ZnO nanowires using sputter deposition. *Diamond and Related Materials*, 12, 1841-1844.
48. Dikovska, A.O., Atanasov, P., Andreev, A.T., Zafirova, B., Karakoleva, E., and Stoyanchoy, T. (2007). ZnO thin film on side polished optical fiber for gas sensing applications. *Applied Surface Science*, 254, 1087-1090.
49. Bhattacharyya, P., Basu, P., Saha, H., and Basu, S. (2007). Fast response methane sensor using nanocrystalline zinc oxide thin films derived by sol-gel method. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 124, 62-67.
50. Kar, S., Pal, B.N., Chaudhuri, S., and Chakravorty, D. (2006). One-dimensional ZnO nanostructure arrays: Synthesis and characterization. *The Journal of Physical Chemistry B*, 110, 4605-4611.
51. Hari, P., Baumer, M., Tennyson, W., and Bumm, L. (2008). ZnO nanorod growth by chemical bath method. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 354, 2843-2848.
52. Arora, A., Arora, A., Dwivedi, V., George, P., Sreenivas, K., and Gupta, V. (2008). Zinc oxide thin film-based MEMS acoustic sensor with tunnel for pressure compensation. *Sensors and Actuators A: Physical*, 141, 256-261.
53. Batzill, M., and Diebold, U. (2005). The surface and materials science of tin oxide. *Progress in surface science*, 79, 47-154.
54. Ren, K., Gan, Y.X., Young, T.J., Moutassem, Z.M., and Zhang, L. (2013). Photoelectrochemical responses of doped and coated titanium dioxide composite nanotube anodes. *Composites Part B: Engineering*, 52, 292-302.
55. Nisar, J., Topalian, Z., De Sarkar, A., Österlund, L., and Ahuja, R. (2013). TiO₂-based gas sensor: a possible application to SO₂. *ACS applied materials & interfaces*, 5, 8516-8522.

56. Ding, W., Hayashi, R., Suehiro, J., Imasaka, K., and Hara, M. (2005). Observation of dynamic behavior of PD-generated SF₆/decompositions using carbon nanotube gas sensor. *IEEE*, 561-564.
57. Rubio, R., Santander, J., Fonseca, L., Sabate, N., Gracia, I., Cane, C., Udina, S., and Marco, S. (2007). Non-selective NDIR array for gas detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 127, 69-73.
58. Hagleitner, C., Lange, D., Hierlemann, A., Brand, O., and Baltes, H. (2002). CMOS single-chip gas detection system comprising capacitive, calorimetric and mass-sensitive microsensors. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 37, 1867-1878.
59. McNaghten, E., Parkes, A., Griffiths, B., Whitehouse, A., and Palanco, S. (2009). Detection of trace concentrations of helium and argon in gas mixtures by laser-induced breakdown spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 64, 1111-1118.
60. Kulinyi, S., Brandszajsz, D., Amine, H., Adam, M., Furjes, P., Barsony, I., and Ducso, C. (2005). Olfactory detection of methane, propane, butane and hexane using conventional transmitter norms. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 111, 286-292.
61. Jayatissa, A.H., Dadi, A., and Aoki, T. (2005). Nanocrystalline WO₃ films prepared by two-step annealing. *Applied Surface Science*, 244, 453-457.
62. Jayatissa, A.H., Cheng, S.-T., and Gupta, T. (2004). Annealing effect on the formation of nanocrystals in thermally evaporated tungsten oxide thin films. *Materials Science and Engineering: B*, 109, 269-275.
63. Wu, Q.-H., Li, J., and Sun, S.-G. (2010). Nano SnO₂ gas sensors. *Current Nanoscience*, 6, 525-538.
64. Korotcenkov, G. (2005). Gas response control through structural and chemical modification of metal oxide films: state of the art and approaches. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 107, 209-232.
65. Wang, Y. (2016). Room Temperature Gas Sensing Using Pure and Modified Metal Oxide Nanowires. *Theses and Dissertation*, 1223.
66. Diao, K., Huang, Y., Zhou, M., Zhang, J., Tang, Y., Wang, S., Liu, T., and Cui, X. (2016). Selectively enhanced sensing performance for oxidizing gases based on ZnO nanoparticle-loaded electrospun SnO₂ nanotube heterostructures. *RSC Advances*, 6, 28419-28427.
67. Sim, K.U., Shin, S.W., Moholkar, A., Yun, J.H., Moon, J.H., and Kim, J.H. (2010). Effects of dopant (Al, Ga, and In) on the characteristics of ZnO thin films prepared by RF magnetron sputtering system. *Current Applied Physics*, 10, S463-S467.
68. Lotus, A., Kang, Y., Walker, J., Ramsier, R., and Chase, G. (2010). Effect of aluminum oxide doping on the structural, electrical, and optical properties of zinc

- oxide (AOZO) nanofibers synthesized by electrospinning. *Materials Science and Engineering: B*, 166, 61-66.
69. Caglar, Y., Ilican, S., Caglar, M., and Yakuphanoglu, F. (2007). Effects of In, Al and Sn dopants on the structural and optical properties of ZnO thin films. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 67, 1113-1119.
 70. Zhou, Z., Kato, K., Komaki, T., Yoshino, M., Yukawa, H., Morinaga, M., and Morita, K. (2004). Effects of dopants and hydrogen on the electrical conductivity of ZnO. *Journal of the European Ceramic Society*, 24, 139-146.
 71. Nunes, P., Malik, A., Fernandes, B., Fortunato, E., Vilarinho, P., and Martins, R. (1999). Influence of the doping and annealing atmosphere on zinc oxide thin films deposited by spray pyrolysis. *Vacuum*, 52, 45-49.
 72. Klingshirn, C. (2007). ZnO: From basics towards applications. *Physica Status Solidi (b)*, 244, 3027-3073.
 73. Agura, H., Suzuki, A., Matsushita, T., Aoki, T., and Okuda, M. (2003). Low resistivity transparent conducting Al-doped ZnO films prepared by pulsed laser deposition. *Thin solid films*, 445, 263-267.
 74. Holmelund, E., Schou, J., Tougaard, S., and Larsen, N. (2002). Pure and Sn-doped ZnO films produced by pulsed laser deposition. *Applied Surface Science*, 197, 467-471.
 75. Kim, H., Horwitz, J., Qadri, S., and Chrisey, D. (2002). Epitaxial growth of Al-doped ZnO thin films grown by pulsed laser deposition. *Thin solid films*, 420, 107-111.
 76. Mass, J., Bhattacharya, P., and Katiyar, R. (2003). Effect of high substrate temperature on Al-doped ZnO thin films grown by pulsed laser deposition. *Materials Science and Engineering: B*, 103, 9-15.
 77. Park, S.-M., Ikegami, T., and Ebihara, K. (2006). Effects of substrate temperature on the properties of Ga-doped ZnO by pulsed laser deposition. *Thin solid films*, 513, 90-94.
 78. Venkatachalam, S., Iida, Y., and Kanno, Y. (2008). Preparation and characterization of Al doped ZnO thin films by PLD. *Superlattices and Microstructures*, 44, 127-135.
 79. Chen, K., Hung, F.-Y., and Chang, S.-J. (2009). Structural characteristic, Raman analysis and optical properties of indium-doped ZnO nanoparticles prepared by sol-gel method. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 9, 3325-3329.
 80. Igasaki, Y., and Saito, H. (1991). The effects of deposition rate on the structural and electrical properties of ZnO: Al films deposited on (1120) oriented sapphire substrates. *Journal of Applied Physics*, 70, 3613-3619.

81. Majumder, S., Jain, M., Dobal, P., and Katiyar, R. (2003). Investigations on solution derived aluminium doped zinc oxide thin films. *Materials Science and Engineering: B*, 103, 16-25.
82. Aktaruzzaman, A., Sharma, G., and Malhotra, L. (1991). Electrical, optical and annealing characteristics of ZnO: Al films prepared by spray pyrolysis. *Thin solid films*, 198, 67-74.
83. Kumar, M., Mehra, R., and Choi, S.-Y. (2009). Effect of oxygen ambient on structural, optical and electrical properties of epitaxial Al-doped ZnO thin films on r-plane sapphire by pulsed laser deposition. *Current Applied Physics*, 9, 737-741.
84. Look, D.C., Reynolds, D., Litton, C., Jones, R., Eason, D., and Cantwell, G. (2002). Characterization of homoepitaxial p-type ZnO grown by molecular beam epitaxy. *Applied Physics Letters*, 81, 1830-1832.
85. Epurescu, G., Dinescu, G., Moldovan, A., Birjega, R., Dipietrantonio, F., Verona, E., Verardi, P., Nistor, L., Ghica, C., and Van Tendeloo, G. (2007). p-Type ZnO thin films grown by RF plasma beam assisted pulsed laser deposition. *Superlattices and Microstructures*, 42, 79-84.
86. Kim, H., Cepler, A., Cetina, C., Knies, D., Osofsky, M., Auyeung, R., and Piqué, A. (2008). Pulsed laser deposition of Zr-N codoped p-type ZnO thin films. *Applied Physics A*, 93, 593-598.
87. Kawazoe, H., Yasukawa, M., Hyodo, H., Kurita, M., Yanagi, H., and Hosono, H. (1997). P-type electrical conduction in transparent thin films of CuAlO₂. *Nature*, 389, 939.
88. Look, D.C., Claflin, B., Alivov, Y.I., and Park, S.-J. (2004). The future of ZnO light emitters. *Physica Status Solidi (a)*, 201, 2203-2212.
89. Look, D.C., Renlund, G., Burgener, R., and Szelove, J. (2004). As-doped p-type ZnO produced by an evaporation/ sputtering process. *Applied Physics Letters*, 85, 5269-5271.
90. Krtshil, A., Look, D.C., Fang, Z.-Q., Dadgar, A., Diez, A., and Krost, A. (2006). Local p-type conductivity in n-GaN and n-ZnO layers due to inhomogeneous dopant incorporation. *Physica B: Condensed Matter*, 376, 703-706.
91. Lupan, O., Chai, G., and Chow, L. (2008). Novel hydrogen gas sensor based on single ZnO nanorod. *Microelectronic Engineering*, 85, 2220-2225.
92. Baratto, C., Sberveglieri, G., Onischuk, A., Caruso, B., and Di Stasio, S. (2004). Low temperature selective NO₂ sensors by nanostructured fibres of ZnO. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 100, 261-265.
93. Lee, J., Lee, D., Lim, D., and Yang, K. (2007). Structural, electrical and optical properties of ZnO: Al films deposited on flexible organic substrates for solar cell applications. *Thin solid films*, 515, 6094-6098.

94. Kuo, S.-Y., Chen, W.-C., Lai, F.-I., Cheng, C.-P., Kuo, H.-C., Wang, S.-C., and Hsieh, W.-F. (2006). Effects of doping concentration and annealing temperature on properties of highly-oriented Al-doped ZnO films. *Journal of crystal growth*, 287, 78-84.
95. Lin, K.-m., and Tsai, P. (2007). Parametric study on preparation and characterization of ZnO: Al films by sol-gel method for solar cells. *Materials Science and Engineering: B*, 139, 81-87.
96. Kohl, D. (1989). Surface processes in the detection of reducing gases with SnO₂-based devices. *Sensors and Actuators*, 18, 71-113.
97. Kolmakov, A., Zhang, Y., Cheng, G., and Moskovits, M. (2003). Detection of CO and O₂ using tin oxide nanowire sensors. *Advanced Materials*, 15, 997-1000.
98. Fine, G.F., Cavanagh, L.M., Afonja, A., and Binions, R. (2010). Metal oxide semiconductor gas sensors in environmental monitoring. *Sensors*, 10, 5469-5502.
99. Hou, Y. (2014). Enhancement of nanocrystalline zinc oxide based electronic gas sensor by surface modification. *Theses and Dissertation*, 1223.
100. Gautam, M., Jayatissa, A., and Sumanasekera, G. (2010). Synthesis and characterization of transferable graphene by CVD method. *IEEE*, 1-5.
101. Parkin, I.P., Binions, R., Piccirillo, C., Blackman, C.S., and Manning, T.D. (2008). Thermochromic coatings for intelligent architectural glazing. *Journal of Nano research*, 2, 1-20.
102. Jayatissa, A., and Wen, T. (2012). Microstructure and optical properties of zinc nitride films deposited by magnetron sputtering method. *Surface and Coatings Technology*, 211, 163-166.
103. Jiang, N., Georgiev, D.G., and Jayatissa, A.H. (2013). The effects of the pressure and the oxygen content of the sputtering gas on the structure and the properties of zinc oxy-nitride thin films deposited by reactive sputtering of zinc. *Semiconductor Science and Technology*, 28, 025009.
104. Jayatissa, A.H., Wen, T., and Gautam, M. (2012). Optical properties of zinc nitride films deposited by the rf magnetron sputtering method. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45, 045402.
105. Jiang, N., Georgiev, D.G., Jayatissa, A.H., Collins, R.W., Chen, J., and McCullen, E. (2012). Zinc nitride films prepared by reactive RF magnetron sputtering of zinc in nitrogen containing atmosphere. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45, 135101.
106. Jiang, N., Georgiev, D.G., Wen, T., and Jayatissa, A.H. (2012). Reactive radio frequency sputtering deposition and characterization of zinc nitride and oxynitride thin films. *Thin solid films*, 520, 1698-1704.

107. Brook, R. (1989). Sol-gel Technology for Thin Films, Fibers, Preforms, Electronics and Specialty Shapes. *Angewandte Chemie*, 101, 1163-1163.
108. Exarhos, G.J., and Zhou, X.-D. (2007). Discovery-based design of transparent conducting oxide films. *Thin solid films*, 515, 7025-7052.
109. Musat, V., Teixeira, B., Fortunato, E., Monteiro, R., and Vilarinho, P. (2004). Al-doped ZnO thin films by sol-gel method. *Surface and Coatings Technology*, 180, 659-662.
110. Uhlmann, D., Suratwala, T., Davidson, K., Boulton, J., and Teowee, G. (1997). Sol-gel derived coatings on glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 218, 113-122.
111. Internet: Advances in Sol-Gel Technology URL: <https://www.ceramicindustry.com/articles/83256-advances-in-sol-gel-technology>, (2001).
112. Wiegleb, G., and Heitbaum, J. (1994). Semiconductor gas sensor for detecting NO and CO traces in ambient air of road traffic. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 17, 93-99.
113. Barbi, G., Santos, J., Serrini, P., Gibson, P., Horrillo, M., and Manes, L. (1995). Ultrafine grain-size tin-oxide films for carbon monoxide monitoring in urban environments. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 25, 559-563.
114. Tischner, A., Maier, T., Stepper, C., and Köck, A. (2008). Ultrathin SnO₂ gas sensors fabricated by spray pyrolysis for the detection of humidity and carbon monoxide. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 134, 796-802.
115. Gong, H., Hu, J., Wang, J., Ong, C., and Zhu, F. (2006). Nano-crystalline Cu-doped ZnO thin film gas sensor for CO. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 115, 247-251.
116. Internet: UV – VIS-spectrometry URL: <https://aavos.eu/glossary/uv-vis-spectrometry/>, (2017).
117. Karaduman, I., Er, E., Çelikkan, H., Acar, S. (2015). A new generation gas sensing material based on high-quality graphene. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 221, 1188-1194.
118. Karaduman, I., Demir, M., Yıldız, D.E., and Acar. (2015). CO₂ gas detection properties of a TiO₂/Al₂O₃ heterostructure under UV light irradiation. *Physica Scripta*, 90, 055802.
119. Mhamdi, A., Labidi, A., Souissi, B., Kahlaoui, M., Yumak, A., Boubaker, K., Amlouk, A., Amlouk, M. (2015). Impedance spectroscopy and sensors under ethanol vapors application of sprayed vanadium-doped ZnO compounds. *Journal of Alloys and Compounds*, 639, 648-658.
120. Hajra, S., Sahoo, S., Das, R., and Choudhary, R. (2018). Structural, dielectric and impedance characteristics of (Bi_{0.5}Na_{0.5})TiO₃-BaTiO₃ electronic system. *Journal of Alloys and Compounds*, 750, 507-514.

121. Akermi, M., Sakly, N., Chaabane, R.B., and Ouada, H.B. (2013). Effect of PEG-400 on the morphology and electrical properties of ZnO nanoparticles application for gas sensor. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 16, 807-817.
122. Internet: Electrochemistry MAE-295 URL: <https://slideplayer.com/slide/4661968/>, (2012).
123. Sbeta, M., Atilgan, A., Atli, A., and Yildiz, A. (2018). Influence of the spin acceleration time on the properties of ZnO: Ga thin films deposited by sol-gel method. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 86, 513-520.
124. Sbeta, M., Serin, T., and Yildiz, A. (2018). Determination of the critical carrier concentration for the metal-insulator transition in Ga-doped ZnO. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29, 14111-14115.
125. Vajargah, P.H., Abdizadeh, H., Ebrahimifard, R., and Golobostanfard, M. (2013). Sol-gel derived ZnO thin films: effect of amino-additives. *Applied Surface Science*, 285, 732-743.
126. Kumar, K. D. A., Valanarasu, S., Kathalingam, A., Ganesh, V., Shkir, M., & AlFaify, S. (2017). Effect of solvents on sol-gel spin-coated nanostructured Al-doped ZnO thin films: a film for key optoelectronic applications. *Applied Physics A*, 123, 801.
127. Aydın, H., Yakuphanoglu, F., & Aydın, C. (2019). Al-doped ZnO as a multifunctional nanomaterial: Structural, morphological, optical and low-temperature gas sensing properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 773, 802-811.
128. Zaiour, A., Benhaya, A., and Bentrucia, T. (2019). Impact of deposition methods and doping on structural, optical and electrical properties of ZnO-Al thin films. *Optik*, 186, 293-299.
129. Mahdavi, R., and Talesh, S.S.A. (2017). Sol-gel synthesis, structural and enhanced photocatalytic performance of Al doped ZnO nanoparticles. *Advanced Powder Technology*, 28, 1418-1425.
130. Goel, S., Sinha, N., Yadav, H., Joseph, A.J., and Kumar, B. (2017). Experimental investigation on the structural, dielectric, ferroelectric and piezoelectric properties of La doped ZnO nanoparticles and their application in dye-sensitized solar cells. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 91, 72-81.
131. Arsalan, M., and Rafiuddin (2014). Synthesis, structural characterization, electrochemical, and electrical study of polystyrene-based manganous tungstate composite cation exchange membrane. *Desalination and Water Treatment*, 52, 7531-7542.
132. Savaliya, C., Kundalia, H., Vyas, B., Udeshi, M., Jethva, S., Katba, S., Marakna, J., Pandya, D., Shah, N., and Kuberkar, D. (2017). Modification in the dielectric behavior of cobalt doped ZnO synthesized by co-precipitation method. *AIP Publishing*, 1837, 040049.

133. Krishnakumar, V., Boobas, S., Jayaprakash, J., Rajaboopathi, M., Han, B., and Louhi-Kultanen, M. (2016). Effect of Cu doping on TiO₂ nanoparticles and its photocatalytic activity under visible light. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27, 7438-7447.
134. Zamiri, R., Kaushal, A., Rebelo, A., and Ferreira, J. (2014). Er doped ZnO nanoplates: synthesis, optical and dielectric properties. *Ceramics International*, 40, 1635-1639.
135. Oruç, Ç., and Altındal, A. (2017). Structural and dielectric properties of CuO nanoparticles. *Ceramics International*, 43, 10708-10714.
136. Debnath, T., Saha, P., Patra, N., Das, S., and Sutradhar, S. (2018). Hydrothermal process assists undoped and Cr-doped semiconducting ZnO nanorods: Frontier of dielectric property. *Journal of Applied Physics*, 123, 194101.
137. Mondal, D., Paul, B.K., Das, S., Bhattacharya, D., Ghoshal, D., Nandy, P., Das, K., and Das, S. (2018). Synthesis and Property of Copper Impregnated α -MnO₂ Semiconductor Quantum Dots. *Langmuir*, 34(43), 12702-12712.
138. Debnath, T., Das, S., Das, D., and Sutradhar, S. (2017). Optical, magnetic and dielectric properties of ZnO: Y nanoparticles synthesized by hydrothermal method. *Journal of Alloys and Compounds*, 696, 670-681.
139. Khan, M.A., Ishrat, U., Dar, A.M., and Ahmad, A. (2015). Structural, electrical, optical and analytical applications of newly synthesized polyaniline based nickel molybdate composite. *Journal of Alloys and Compounds*, 636, 124-130.
140. Wang, X.-F., Ma, W., Jiang, F., Cao, E.-S., Sun, K.-M., Cheng, L., and Song, X.-Z. (2018). Prussian Blue analogue derived porous NiFe₂O₄ nanocubes for low-concentration acetone sensing at low working temperature. *Chemical Engineering Journal*, 338, 504-512.
141. Zhu, L., and Zeng, W. (2017). Room-temperature gas sensing of ZnO-based gas sensor: A review. *Sensors and Actuators A: Physical*, 267, 242-261.
142. Verma, A., Kar, M., and Agnihotry, S. (2007). Aging effect of diethanolamine stabilized sol on different properties of TiO₂ films: Electrochromic applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91, 1305-1312.
143. Rajbongshi, H., Bhattacharjee, S., and Datta, P. (2017). Photocatalytic activity of Ag/ZnO core-shell nanoparticles with shell thickness as controlling parameter under green environment. *Materials Research Express*, 4, 025501.
144. Sowti khiabani, P., Marzbanrad, E., Hassani, H., and Raissi, B. (2013). Fast Response NO₂ Gas Sensor Based on In₂O₃ Nanoparticles. *Journal of the American Ceramic Society*, 96, 2493-2498.
145. Fang, W., Yang, Y., Yu, H., Dong, X., Wang, R., Wang, T., Wang, J., Liu, Z., Zhao, B., and Wang, X. (2017). An In₂O₃ nanorod-decorated reduced graphene oxide

- composite as a high-response NO_x gas sensor at room temperature. *New Journal of Chemistry*, 41, 7517-7523.
146. Mene, R.U., Mahabole, M.P., Mohite, K., and Khairnar, R.S. (2014). Improved gas sensing and dielectric properties of Fe doped hydroxyapatite thick films: Effect of molar concentrations. *Materials Research Bulletin*, 50, 227-234.
 147. Gawali, S.R., Patil, V.L., Deonikar, V.G., Patil, S.S., Patil, D.R., Patil, P.S., and Pant, J. (2018). Ce doped NiO nanoparticles as selective NO₂ gas sensor. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 114, 28-35.
 148. Hunge, Y., Yadav, A., Kulkarni, S., and Mathe, V. (2018). A multifunctional ZnO thin film based devices for photoelectrocatalytic degradation of terephthalic acid and CO₂ gas sensing applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 274, 1-9.
 149. Fazio, E., Hjiri, M., Dhahri, R., El Mir, L., Sabatino, G., Barreca, F., Neri, F., Leonardi, S., Pistone, A., and Neri, G. (2015). Ammonia sensing properties of V-doped ZnO: Ca nanopowders prepared by sol-gel synthesis. *Journal of Solid State Chemistry*, 226, 192-200.
 150. Sun, P., Wang, C., Zhou, X., Cheng, P., Shimanoe, K., Lu, G., and Yamazoe, N. (2014). Cu-doped α -Fe₂O₃ hierarchical microcubes: Synthesis and gas sensing properties. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 193, 616-622.
 151. McRoberts, M. (2013). *Beginning Arduino*. Apress, 4-6.
 152. Evans, B. (2011). *Beginning Arduino Programming*. Apress, 3-4.
 153. Severance, C. (2014). Massimo Banzi: building arduino. *Computer*, 47, 11-12.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : Togzhan NURTAYEVA
 Uyuğu : Kazakistan
 Doğum tarihi ve yeri : 14.07.1994, Kazakistan
 Telefon : 0 (537) 372 94 14
 E-mail : togzhan.nurtayeva@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / İleri Teknolojiler	Devam Ediyor
Lisans	IITU/ Bilgi sistemleri	2015
Lise	O. Zhautykov adlı üstün yetenekli çocuklar için Cumhuriyet Fizik ve Matematik yatılı okulu	2011

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2016	CAC Kazakhstan	Satış Departmanı Mem. ve IT Uzmanı
2015	StudyRoom Eğitim Merkezi	İngilizce, SAT, Matematik Öğr.
2014-2015	Intarget Solutions	SAP Lojistik (MM / SD) Danışmanı

Yabancı Dil

Kazakça, Rusça, İngilizce, İspanyolca

SCI Kapsamında Taranan Dergilerde Yapılan Yayınlar

1. I. Karaduman Er., T. Nurtayeva., M. Sbeta., A. O. Cagirtekin., S. Acar. and A. Yildiz. (2019). Carbon monoxide gas sensing performance of ZnO:Al thin films prepared using different solvent–stabilizer combinations. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, doi.org/10.1007/s10854-019-01400-2.

Bildiriler

1. Mohamed Sbeta, Togzhan Nurtayeva, Ali Orkun Çağırtekin, Baktiyar Soltabayev, Irmak Karaduman, Abdullah Yıldız, Selim Acar (2018). Study of the solvent influence on the structural, morphological and optical properties of ZnO thin films coated sol-gel method. *1st International Symposium on Graduate Research in Science Focus on Entrepreneurship and Innovation (ISGRS 2018)*, İstanbul.
2. Baktiyar Soltabayev, Mohamed Sbeta, Togzhan Nurtayeva, Ali Orkun Çağırtekin, Irmak Karaduman, Abdullah Yıldız, Selim Acar (2018). Temperature dependence complex impedance analyzes of Al doped ZnO. *1st International Symposium on Graduate Research in Science Focus on Entrepreneurship and Innovation (ISGRS 2018)*, İstanbul.
3. Ali Orkun Çağırtekin, Baktiyar Soltabayev, Mohamed Sbeta, Togzhan Nurtayeva, Irmak Karaduman, Abdullah Yıldız, Selim Acar (2018). Al doped ZnO thin film gas sensor for CO gas. *1st International Symposium on Graduate Research in Science Focus on Entrepreneurship and Innovation (ISGRS 2018)*, İstanbul.
4. Togzhan Nurtayeva, Baktiyar Soltabayev, Mohamed Sbeta, Abdullah Yıldız, Selim Acar (2019). Investigation of electrical properties of Al-doped ZnO thin films with different solvents. *ICELIS 2019 – 2nd International Congress on Engineering and Life Science*, Kastamonu.
5. Baktiyar Soltabayev, Togzhan Nurtayeva, Ali Orkun Çağırtekin, Memet Ali Yıldırım, Selim Acar (2019). Enhanced gas sensing properties of Indium doped ZnO thin films by fabricated SILAR method. *ICELIS 2019 – 2nd International Congress on Engineering and Life Science*, Kastamonu.

Hobiler

Yüzme, dil öğrenme, kitap okuma, programlama



GAZİ GELECEKTİR..