



**GEÇİŞ METAL OKSİT TABANLI İNCE FİLM GAZ
SENSÖRLERİ**

Kübra YAMAN

Danışman: Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI

Yüksek Lisans Tezi

Katıhal Fiziği Ana Bilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KATİHAL FİZİĞİ ANA BİLİM DALI

GEÇİŞ METAL OKSİT TABANLI İNCE FİLM GAZ SENSÖRLERİ
(Transition Metal Oxide Based Thin Film Gas Sensors)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kübra YAMAN

Danışman: Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI

Erzurum
Temmuz, 2025

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Kübra YAMAN tarafından hazırlanan “Geçiş Metal Oksit Tabanlı İnce Film Gaz Sensörleri ” başlıklı çalışması 10 / 07 / 2025 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Katıhal Fiziği Ana Bilim Dalı, Fizik Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Abdulkerim KARABULUT <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Erdem ŞAKAR <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Alper NUHOĞLU

Enstitü Müdürü

Aslı ıslak imzalıdır

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

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI danışmanlığında sunulan “Geçiş Metal Oksit Tabanlı İnce Film Gaz Sensörleri” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	5	30
Kuramsal Temeller	6	30
Materyal ve Metot	2	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	2	20
Sonuçlar	4	20
Tezin Geneli	5	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Kübra YAMAN	Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI
10.7.2025	10.7.2025
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışması, Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) ve Fizik Bölümünde icra edilmiştir. Öncelikle, araştırmam boyunca ilgisini, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, bana yol gösteren ve gereken çalışma alanını/malzemelerini bana temin eden değerli hocam Sayın Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bana çalışmalarım sırasında laboratuvar ortamında teorik ve deneysel olarak yardım eden değerli hocam sayın Prof. Dr. Emre GÜR'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca laboratuvar çalışmalarında her türlü desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Betül CEVİZ ŞAKAR ve Doç. Dr. Erdem ŞAKAR hocalarıma teşekkür ederim.

Hayatımın her anında yanımda olan, sabrı, sevgisi ve desteğiyle bu süreci kolaylaştıran başta eşim Doç. Dr. Orhan YAMAN olmak üzere aileme teşekkür ederim.

Kübra YAMAN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ GEÇİŞ METAL OKSİT TABANLI İNCE FİLM GAZ SENSÖRLERİ

Kübra YAMAN

Danışman: Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI

Amaç: Bu tez çalışmasında, molibden trioksit (MoO_3) ince filmlere dayalı bir hidrojen gazı sensörü geliştirmeyi ve karakterize etmeyi amaçlamaktadır. MoO_3 'nin yarı iletken özelliklerini kullanarak, çalışma, malzemenin gaz algılama performansını (özellikle duyarlılığını, seçiciliğini ve hidrojen gazına karşı tepki davranışını) çeşitli çalışma koşulları altında değerlendirmeye odaklanmaktadır. Çalışmanın amacı, hidrojen gazı algılamada uygulama için molibden trioksit (MoO_3) bazlı ince filmler üretmek ve araştırmak, hassasiyetlerine, seçiciliklerine ve tepki özelliklerine odaklanmaktır.

Yöntem: Bu çalışmada, molibden trioksit (MoO_3) tabanlı ince filmler spin kaplama yöntemi kullanılarak üretildi. Öncelikle (MoO_3) çözeltisi hazırlanmasıyla başlandı. Tam çözünme ve homojenlik sağlamak için uygun miktarda molibden trioksit tozu, manyetik karıştırıcı altında etanol bazlı bir çözücüde çözüldü. Hazırlanan çözelti, ince film oluşturmak için kuartz altlıklar üzerine homojen bir şekilde dağıtıldı.

Bulgular: Uygulama sonucunda spin kaplama yöntemi kullanılarak elde edilen molibden trioksit (MoO_3) tabanlı ince filmlerin H_2 gazına karşı tepkileri gözlenmiştir.

Sonuç: Pd ile katkılanmış MoO_3 tabanlı H_2 gaz sensörleri, 200°C 'de ve 250°C 'de 100ppm, 500ppm ve 1000 ppm de H_2 gazına karşı tepkiler göstermiştir. Numune B için hesaplanan tepki sürelerinin hem 200°C 'de hem de 250°C 'de kararlı olduğu görülmektedir. Numune B için ppm değeri arttıkça tepki süreleri azalmıştır. Aynı şekilde 200°C sıcaklıkta Numune A ve Numune C'de de ppm değeri arttıkça tepki süreleri azalmıştır. 250°C sıcaklıkta tepki süreleri bakımından analiz edildiğinde ise numune A ve Numune C için bu kararlılık söz konusu değildir.

Anahtar Kelimeler: Spin kaplama yöntemi, MoO_3 , H_2 gaz sensör, İnce filmler

Temmuz 2025, 71 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

TRANSITION METAL OXIDE BASED THIN FILM GAS SENSORS

Kübra YAMAN

Supervisor: Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI

Purpose: This thesis aims to develop and characterize a hydrogen gas sensor based on molybdenum trioxide (MoO_3) thin films. Using the semiconductor properties of MoO_3 , the study focuses on evaluating the gas sensing performance of the material (especially its sensitivity, selectivity and response behavior towards hydrogen gas) under various operating conditions. The aim of the study is to fabricate and investigate molybdenum trioxide (MoO_3) based thin films for application in hydrogen gas sensing, focusing on their sensitivity, selectivity and response properties.

Method: In this study, molybdenum trioxide (MoO_3) based thin films were produced using the spin coating method. First, it was started by preparing the (MoO_3) solution. To ensure complete dissolution and homogeneity, an appropriate amount of molybdenum trioxide powder was dissolved in an ethanol-based solvent under a magnetic stirrer. The prepared solution was homogeneously distributed on quartz substrates to form thin films.

Findings: As a result of the application, the reactions of molybdenum trioxide (MoO_3) based thin films obtained using the spin coating method against H_2 gas were observed.

Results: Pd doped MoO_3 based H_2 gas sensors showed responses to 100ppm, 500ppm and 1000 ppm H_2 gas at 200°C and 250°C . It is seen that the response times calculated for Sample B are stable both at 200°C and 250°C . The response times decreased as the ppm value increased for Sample B. Similarly, the response times decreased as the ppm value increased at 200°C for Sample A and Sample C. When analyzed in terms of response times at 250°C , this stability is not the case for Sample A and Sample C.

Keywords: Spin coating method, MoO_3 , H_2 gas sensor, Thin films

July 2025, 71 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
GİRİŞ.....	1
Gaz Sensörlerinin Önemi	1
Yanıcı gazlar	2
Zehirleyici (toksik) gazlar	2
Boğucu (inert) gazlar.....	3
Gaz Sensörlerinin Tarihçesi	3
Gaz Sensörlerinin Kullanım Alanları	5
Tıp alanında gaz sensörlerinin kullanımı	5
Otomotiv alanında gaz sensörlerinin kullanımı	6
Akıllı şehirleşme alanında gaz sensörlerinin kullanımı	7
Güvenlik alanında gaz sensörlerinin kullanımı.....	8
Gaz Sensörlerinin Türleri.....	9
Elektrokimyasal gaz sensörü.....	9
Yarı iletken metal oksit gaz sensörü	10
Kapasitans tabanlı gaz sensörü.....	12
Optik gaz sensörü.....	13
Kızılötesi gaz sensörü	13
Katalitik sensörler	14
Akustik dalga gaz sensörleri	15
Kalorimetrik gaz sensörü	15
Termal iletkenlik gaz sensörü	15
KURAMSAL TEMELLER.....	18
Gaz Sensörlerinin Performans Parametreleri	18

Duyarlılık	18
Seçicilik.....	18
Tepki süresi	19
Geri dönüş süresi.....	19
Kararlılık	19
Kayma	19
Tespit sınırı	20
Çalışma koşulları.....	20
Kullanım ömrü	20
Hidrojen Gazı ve Özellikleri	20
Hidrojen Gazı Tespit Yöntemleri.....	23
Hidrojen Sensörleri	25
Geçiş Metal Oksitler ve Özellikleri	27
Molibden Oksit (MoO ₃) Yapısı Özellikleri ve Sensördeki Rolü.....	29
İnce Film Kaplama Yöntemleri.....	30
MATERYAL VE METOT.....	31
Materyal Özellikleri	31
Spin Kaplama Yöntemi	32
Spin kaplama prensibi	32
Spin kaplama işleminin adımları.....	33
Film kalitesini etkileyen parametreler.....	34
Spin kaplamanın avantajları	34
Gaz Sensörü Ölçüm Sistemi	34
ARAŞTIRMA BULGULARI	37
X-Işını Kırınımı (XRD) Ölçüm Sonuçları	38
Gaz Sensörü Ölçüm Sonuçları	40
Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Sonuçları.....	50
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	52
KAYNAKLAR.....	54
ÖZGEÇMİŞ.....	58

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Yanıcı Gazlar ve Uçucu Organik Bileşiklerin LEL ve UEL'si (standartlar: ISO 10156 ve EC 60079).....	2
Tablo 2. Çeşitli MOS Gaz Sensörleri ve Duyarlı Malzemelerin Performans Karşılaştırması.....	11
Tablo 3. Ticari Olarak Satılan Bazı Gaz Sensörleri Hakkında Bilgi	16
Tablo 4. Gaz Sensör Türlerinin Karşılaştırılması	16
Tablo 5. Hidrojen Gazının Özellikleri	23
Tablo 6. Spin Kaplama Kalitesini Etkileyen Faktörler	34

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Madenlerde kullanılan alev emniyet lambası	4
Şekil 2. Gaz sensörlerinin kullanım alanlarına örnekler	5
Şekil 3. Gaz sensör türleri	9
Şekil 4. Metal oksit gaz sensörlerinin temel yapısı	10
Şekil 5. Kızılötesi gaz sensörlerinin yapısı	13
Şekil 6. Pelistörün yapısı	14
Şekil 7. Standart bir gaz sensörünün test edilmesi sırasında elde edilebilecek yanıt eğrisi	19
Şekil 8. Hidrojenin yapısı.....	21
Şekil 9. Hidrojenin izotoplarının yapısı	22
Şekil 10. Gaz sensör uygulamalarında kullanılan metal oksit yüzdeleri.....	28
Şekil 11. Metal oksit sensörler kullanılarak belirlenen gaz yüzdeleri	29
Şekil 12. Numunelere ait örnek görüntüler	32
Şekil 13. Tez çalışmasında kullanılan spin kaplama cihazı	33
Şekil 14. Spin kaplama tekniğinin uygulama adımları.....	33
Şekil 15. Laboratuvarında kullanılan gaz sensörü ölçüm sistemi	35
Şekil 16. Laboratuvar ortamında kullanılan gaz sensörü ölçüm sisteminin şematik çizimi	36
Şekil 17. Gaz sensör ölçüm haznesinin laboratuvar görüntüsü.....	36
Şekil 18. Laboratuvarda bulunan Nikon Eclipse MA100 marka mikroskop ile numunelere ait kontak ölçüm görüntüleri.....	37
Şekil 19. Numune A, Numune B ve Numune C'ye ait örnek 5x mikroskop görüntüleri	38
Şekil 20. Numune A ya ait XRD grafiği	39
Şekil 21. Numune B ye ait XRD grafiği	39
Şekil 22. Numune C ye ait XRD grafiği	40
Şekil 23. A Numunesine ait 100,500 ve 1000 ppm gaz ölçüm grafikleri a) 200°C b) 250°C	41
Şekil 24. A Numunesine ait 1000ppm gaz döngüsü grafikleri a) 200°C b) 250°C	42
Şekil 25. A Numunesine ait tepki süresi grafikleri a) 200°C b) 250°C	42
Şekil 26. A Numunesine ait geri dönüş grafikleri a) 200°C b) 250°C.....	43
Şekil 27. B Numunesine ait 100,500 ve 1000 ppm gaz ölçüm grafikleri a) 200°C b) 250°C	44
Şekil 28. B Numunesine ait 1000 ppm gaz döngüsü grafikleri a) 200°C b) 250°C	44
Şekil 29. B Numunesine ait tepki süresi grafikleri a) 200°C b) 250°C	45

Şekil 30. B Numunesine ait geri dönüş grafikleri a) 200°C b) 250°C.....	45
Şekil 31. C Numunesine ait 100,500 ve 1000 ppm gaz ölçüm grafikleri a) 200°C b) 250°C	46
Şekil 32. C Numunesine ait 1000 ppm gaz döngüsü grafikleri a) 200°C b) 250°C	47
Şekil 33. C Numunesine ait tepki süresi grafikleri a) 200°C b) 250°C	47
Şekil 34. C Numunesine ait geri dönüş grafikleri a) 200°C b) 250°C.....	48
Şekil 35. Numunelere ait farklı sıcaklıklarda hesaplanan tepki süreleri a) 200°C b) 250°C	49
Şekil 36. Numunelere ait farklı sıcaklıklarda hesaplanan geri dönüş süreleri a) 200°C b) 250°C	49
Şekil 37. A, B ve C numunelerine ait SEM görüntüleri ve histogram grafikleri	50



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Amper
BT	: Bilgisayarlı Tomografi
CAN	: Denetleyici Alan Ağı
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
DAYTAM	: Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi
FET	: Alan Etkili Transistör
GC-MS	: Gaz Kromatografisi-Kütle Spektrometrisi
IHIEA	: Uluslararası Hidrojen Enerjisi Birliği
IR	: Kızılötesi
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Örgütü
KNN	: K En Yakın Komşu Algoritması
LEL	: Gaz İçeriği Alt
LOD	: Tespit Sınırı
LPG	: Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
MEMS	: Mikro Elektro Mekanik Sistemler
MOS	: Metal Oksit Yarı İletken
MR	: Manyetik Rezonans
PCA	: Temel Bileşen Analizi
PET	: Pozitron Emisyon Tomografisi
PhC	: Fotonik Kristal Boşluk
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
RFID	: Radyo Frekansı Tanımlama
SAW	: Yüzey Akustik Dalga
SVM	: Destek Vektör Makinesi
TCD	: Termal İletkenlik
THEME	: Hidrojen Ekonomisi Miami Enerji Konferansı
UAV	: İnsansız Hava Aracı
UEL	: Gaz İçeriği Üst
WHO	: Dünya Sağlık Örgütü
XRD	: Fiziksel Buhar Biriktirme

GİRİŞ

Gazlar, yüksek enerjiye sahip atomlarından dolayı sürekli hareket halindedir. Bu durum gazların birbiri ile kaotik olarak karışmasına ve bulundukları ortama yayılmasına neden olmaktadır. Gazların belirli bir şekli ve hacmi yoktur. Gazlar; kokulu-kokusuz, renkli-renksiz, havadan hafif-ağır veya aynı yoğunlukta olabilmektedir. Dünyayı saran gaz tabakası yani atmosfer yaklaşık olarak; %78'i azot, %21'i oksijen, %0,93 argon ve geriye kalan %1'lik kısmında su buharı, karbondioksit ve bazı gazların karışımından oluşmaktadır.

Gazlar canlılığın devamı için hayati öneme sahiptir. İnsanlar ve hayvanlar gibi bazı canlılar oksijen gazıyla solunum yaparak karbondioksit gazını açığa çıkarırlar. Bitki ve bazı tek hücreli canlılar ise bu karbondioksit gazıyla besin elde ederler. Canlılığın devamı dışında enerji üretimi, ısınma gibi faaliyetler için çeşitli gazlar endüstrinin pek çok alanında kullanılmaktadır.

İnsan nüfusunun artması ve gelişen endüstri ile tüketim alışkanlıkları daha da artmaktadır. Artan tüketim yüksek miktarda atık salınımı yapmaktadır. Bu atıklar katı ve sıvı olduğu gibi gaz halinde de olmaktadır. Özellikle insanların yoğun olduğu büyük şehirlerde veya fabrikalarda birçok kirli gazlar ortama yayılmaktadır. Bu gazların tespit edilmesi ve hava kalitesinin ölçülmesi oldukça önemlidir. Gaz sensörleri, hava kalitesinin ölçülmesi, laboratuvarlarda sızan zehirli gazların tespit edilmesi, fabrikalarda güvenlik amacı ile yanıcı ve patlayıcı gazların tespiti, madenlerde ve evlerde zehirli gazların algılanmasında görev almaktadır (Simonenko vd., 2022). Zehirli, yanıcı ve patlayıcı bu gazların tespit edilmesi, ölçülmesi için farklı türde gaz sensörleri geliştirilmiştir. Benzen, Etanol, Metan, Propanol, Amonyak, Karbondioksit, Karbonmonoksit, Hidrojen sülfür, Nitrojen ve Sülfürdioksit gibi gazların iş ve çevre güvenliği için belirli bir standartı vardır. Belirli bir eşik değerinin üzerinde bulunan gazlar insan sağlığı ve güvenliği bakımından tehdit oluşturmaktadır.

Gaz sensörleri günümüzde çevre, iş güvenliği, ev güvenliği, tıbbi uygulamalar, tarım, gıda kalite kontrolü, enerji santralleri, sanayi, su arıtma, savunma sanayisi ve havacılık uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Gaz Sensörlerinin Önemi

Gazlar her ne kadar canlılığın devamı için önemli olsa da bazı durumlarda canlılara ve etrafına zarar verebilmektedir. Gazların oluşturduğu tehlikeler: yanıcı, zehirleyici (toksik) ve boğucu (inert) olmak üzere 3 başlıkta toplanabilmektedir.

Yanıcı gazlar

Yanıcı gazlar bir kıvılcım, ısı kaynağı veya hava ile etkileşime girdiğinde yanma özelliği göstermektedir. Ayrıca ortama göre aniden yüksek enerjinin açığa çıkmasıyla büyük bir patlama gerçekleşerek canlılara ve çevreye zarar verebilmektedir. Yanıcı gazlara yaygın olarak bilinen Metan, Etan, Propan, Bütan, Hidrojen gazları örnek verilebilir.

Endüstriyel ve yerleşim alanlarında insan güvenliğini ve çevre üzerinde sürekli kontrolü sağlamak için havadaki yanıcı gazları tespit eden bir ölçüm cihazı olmalıdır. Gaz sensörleri, patlayıcı gazların sızıntı tespiti için etkili bir araç olarak kabul edilmiştir.

Yanıcı gazlar yalnızca havadaki gaz içeriği alt (LEL) ve üst (UEL) patlama limitleri arasında olduğunda patlamaktadır (Baranov & Osipova, 2022; Teker & Özhan, 2022). Yaygın olarak kullanılan kimyasallar için LEL ve UEL değerleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Yanıcı Gazlar ve Uçucu Organik Bileşiklerin LEL ve UEL'si (standartlar: ISO 10156 ve EC 60079). (Baranov & Osipova, 2022)

Madde	LEL (%)	UEL (%)
Hidrojen H ₂	4.0	75
Metan CH ₄	4.4	17.0
Etan C ₂ H ₆	2.5	15.5
Propan C ₃ H ₈	1.7	10.9
Bütan C ₄ H ₁₀	1.4	9.3
Pentan C ₅ H ₁₂	1.5	7.8
Heksan C ₆ H ₁₄	1.0	7.5
Aseton C ₃ H ₆ O	2.9	13.0
Benzen C ₆ H ₆	1.2	8.6
Gazyapı C ₁₂ H ₂₆	1.4	7.5
Toluen C ₆ H ₅ -CH ₃	1.1	7.8
Metanol CH ₃ OH	5.5	36

Yanıcı gazlardan oluşan yangın ve patlamaların % 28.7'si ekipman hatasından, %22.4'ü insan hatasından, %19.6'sı gaz sızıntısından, %14.3'ü elektrik arızasından ve %15'i ise diğer faktörlerden meydana gelmektedir (Hossain & Alasa, 2024).

Zehirleyici (toksik) gazlar

Toksik gazlar renksiz ve kokusuz olabileceği gibi çok ağır kokuya da sahip olabilmektedir. Bu gazlar solunum veya cilt yoluyla canlı vücuduna girerek çeşitli biyokimyasal reaksiyonlar sonucu zehirlenmelere yol açmaktadır. Ayrıca bu gazlara uzun süre maruz kalınması ölümlere neden olabilmektedir. Ancak bazı toksik gazlar çok düşük

konsantrasyonlarda bile ölümcül etkilere sahip olabilmektedir. Ayrıca bazı gazlar toksik olmanın yanı sıra yanıcı gaz da olabilmektedir. Toksik gazlara yaygın olarak bilinen hidrojen sülfür, nitrojen dioksit, amonyak, karbonmonoksit, klorin, LPG gazları örnek verilebilir (Saxena & Shukla, 2023a). Bu gazların belirli bir konsantrasyonuna insanların maruz kalması sonucunda; solunum yolu tahrişi, koku sinir felci, bilinç kaybı, solunum yetmezliği ve ölüme neden olmaktadır (Cope, 2025).

Boğucu (inert) gazlar

Boğucu gazların zehirli bir etkisi yoktur ve zarar vermeyen gazlardır. Bu gazlar havanın oksijen oranını düşürerek baskılsa boğucu bir etkiye sahip olurlar. Örneğin normal şartlarda havadaki oksijen oranı yaklaşık %21'dir. Bu oran azot gibi boğucu bir gaz sayesinde %16'lara düşerse o zaman canlıların oksijensiz kalmasına ve boğucu etkiye neden olabilir. Boğucu gazlara yaygın olarak bilinen azot, helyum, argon, karbondioksit gazları örnek verilebilir.

Ayrıca teknolojinin gelişmesi ve çoğalan nüfus sayesinde enerji ihtiyacı artmaktadır. Fabrikalardan çıkan gazlar, otomobil egzozları ve evrensel atıklar gibi atıkların neden olduğu NO_x , NH_3 , CH_4 , SO_x , CO ve florokarbon gibi zararlı gazların doğaya salınması; asit yağmuru, küresel ısınma ve ozon tabakasının incilmesi gibi birçok soruna yol açmaktadır. Aynı zamanda Dünya Sağlık Örgütü'ne (WHO) göre hava kirliliği; astım, solunum yolu hastalıkları, kanser gibi hastalıklara sebep olmaktadır.

Hava kirliliğine sebep olan birincil ve ikincil olmak üzere iki tür kirletici gaz vardır. Otomobil egzozlarından NO_x ve CO, fabrikalardan SO_x gibi zararlı gazların salınımı birincil kirleticilere örnek olarak verilebilir. İkincil kirleticiler ise birincil kirleticilerin salınımı sonrasında havada bulunan diğer gazlarla etkileşime girerek oluşturduğu gazlardır. (Dhall vd., 2021) (Saxena & Shukla, 2023b). Hava kirliliğinin sebep olduğu çevre hasarlarının ve sağlık sorunlarının önüne geçilmesi, yanıcı, toksik ve boğucu (inert) gazların tespit edilerek can ve mal kaybının önüne geçilmesi, yeni enerji kaynakları elde edilmesi, teknolojinin gelişmesi gibi birçok konuda gaz tespitinin önemi büyüktür. Bu nedenle gazları tespit edebilmek için zamanla gaz sensörleri geliştirilmiş ve geliştirilmeye de devam etmektedir.

Gaz Sensörlerinin Tarihçesi

İnsan burnu yaklaşık 10.000 farklı kokuyu ayırt edebilmektedir. Ancak yanıcı, zehirleyici (toksik) ve boğucu (inert) gazlar renksiz, kokusuz olabilmekte ve insan burnu belli bir süre geçtikten sonra kokuya alıştığı için sürekli bir koku tespiti yapamamaktadır. Bu gibi nedenlerden dolayı zararlı gazların tespiti ilerde olabilecek felaketlere karşı hayati önem taşımaktadır.

Gaz dedektörü olarak da bilinen gaz sensörlerinden önce ilk zararlı gaz tespiti çalışmaları madenlerde yapılmıştır. Kanaryalar insanlara göre daha hassas oldukları için madenciler kanaryaları kullanmışlardır. Ötmeyi seven kanaryalar şarkı söylemeyi bıraktığı zaman madenciler burada zararlı gazların olabileceğini anlayarak oradan hemen çıkmışlardır. Sanayi çağındaki ilk gaz dedektörü 1815 yılında, Humphry Davy tarafından yeraltı kömür madenlerinde metan varlığını tespit etmek için icat edilen alev emniyet lambasıdır (flame safety lamp). Bu alev emniyet lambaları ortamdaki havanın içerisine girmesini sağlayarak gazla tepkime sonucunda oluşan ateşin dışarı çıkmasını engelleyen bir yapıya sahiptir. Eğer alevin boyu yüksekse yanıcı gaz oranının çoğaldığı anlamına gelirken, az ise oradaki oksijenin az olduğu anlamına gelmekteydi. Madenciler bu lambanın faaliyetlerini inceleyerek gerekli önlemleri almış ve çalışmaya devam etmişlerdir. Bu lambalar hala daha bazı bölgelerde kullanılmaktadır. Şekil 1’de madenlerde kullanılan alev emniyet lambasının örneği verilmiştir.

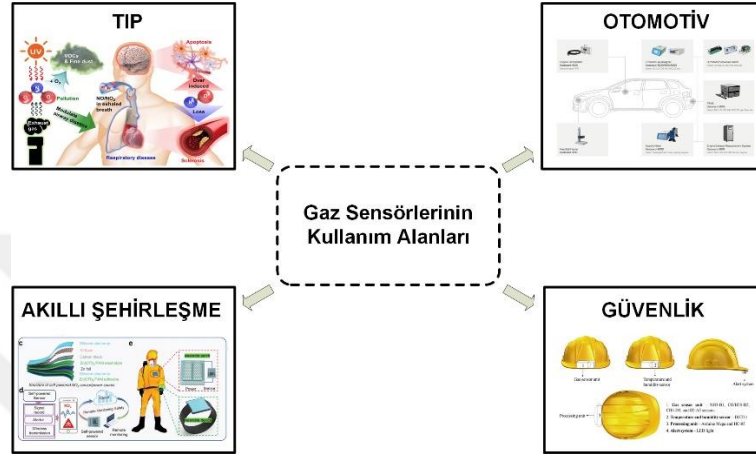


Şekil 1. Madenlerde kullanılan alev emniyet lambası (Morgan, 1936)

1926-1927 yıllarında Dr. Oliver Johnson tarafından katalitik yanma sensörü ile modern gaz sensörleri geliştirilmeye başlanmıştır (Zainab Yunusa vd., t.y.). Brattain ve Bardeen 1950’li yıllarda germanyum gibi yarı iletken malzemelerin gazlara maruz kaldığında oluşan elektrik dirençlerindeki değişikliği keşfederek kimyasal dirençli gaz sensörlerinin temelini atmışlardır. Seiyama ve Kato 1962 yılında çinko oksit (ZnO) kullanarak gazları tespit eden araçlar geliştirmiştir. 1960’ların sonlarında, Naoyoshi Taguchi kalay dioksit (SnO_2) tabanlı ilk ticari gaz sensörünü geliştirmiştir (Zainab Yunusa vd., t.y.).

Gaz Sensörlerinin Kullanım Alanları

Gaz sensörleri, can ve mal kaybının önüne geçilmesi ve teknolojinin sürekli gelişmesinde önemli rol oynamaktadır. Günümüzde tıp, otomotiv, akıllı şehirleşme, güvenlik, endüstri gibi birçok alanda kullanımı mevcuttur. Bu kullanım alanlarına etkin tazeliğinin değerlendirilmesi için kalite kontrolü, hava kalitesi kontrolü, akciğer hastalıklarının kontrolü, gaz kaçağı tespiti gibi daha somut örnekler verilebilir. Şekil 2’de gaz sensörlerinin kullanım alanlarına örnekler verilmiştir.



Şekil 2. Gaz sensörlerinin kullanım alanlarına örnekler

Tıp alanında gaz sensörlerinin kullanımı

İnsanlar yaşamak için nefes alıp vermektedir. Nefes alırken solunan hava akciğerlere gider ve oluşan metabolik atık nefes verilerek dışarı atılır. Eğer verilen nefeste bulunması gereken miktarlardan daha fazla gaz bulunursa bu durum o bireyin bir hastalığı olduğunu gösterir. Örneğin akciğer kanseri en yaygın görülen ve ölüm oranının en yüksek olduğu kanser türlerinden biridir. Akciğer kanserinin belirgin bir belirtisi olmadığından dolayı erken evrelerde tespiti çok zordur. Bronkoskopi, bilgisayarlı tomografi (BT), pozitron emisyon tomografisi (PET) ve manyetik rezonans (MR) görüntüleme gibi teknikler akciğer kanserini tespit etmek için kullanılan yaygın uygulamalardır. Bu yöntemler genellikle pahalı, karmaşık işlemlere sahip ve iyonlaştırıcı radyasyon riski taşıyabilmektedir. Ancak bu yöntemlerin yanı sıra elektronik burun teknolojisi kolay ve düşük maliyetlidir. Elektronik burun insan koku alma duyusunu taklit eden yapay bir sistemdir. Bu cihaz çeşitli gaz sensörleri ve örüntü tanıma algoritmalarını kullanarak kokuları tespit etmeye çalışır. Ayrıca dokulardaki (hipoksi) ve kandaki (hipoksemi) oksijen yetmezliği gibi hastalıkların tespiti de çeşitli gaz sensörleri kullanılarak yapılabilmektedir (TekiN, t.y.). Ek olarak kemirezistif sensörler kullanılarak akciğer ve meme kanserleri, astım, diyabet gibi birçok hastalık teşhis edilmektedir. Kemirezistif sensörler, gazın

varlığını ve yoğunluğunu algılayabilmek için belirli gazlarla etkileşim sonucunda elektriksel dirençleri değişen metal oksit yarı iletkenlere dayalı sensörlerdir (Nasiri & Clarke, 2019).

Wei ve diğ. çalışmalarında, diyabet hastalarının nefeslerindeki yüksek aseton miktarını tespit etmek için bir sensör sistemi geliştirmiştir. Bu aseton gaz sensör sistemi nano gaz duyarlı malzeme olarak titanyum dioksit ve veri toplama için STM32 kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışmada destek vektör makinesi ve geri yayılım sinir ağı tabanlı bir model kullanılarak aseton-etanol ve aseton-metanol karışık gazlar için %96 ve %97,5, üçlü aseton, etanol ve metanol karışık gazlar için ise %90 doğruluk elde edilmiştir (Wei vd., t.y.). Lau ve diğ. çalışmalarında, gaz kromatografisi-kütle spektrometrisi (GC-MS) ve gaz sensörleri kullanarak Alzheimer hastalarının nefeslerini analiz etmişlerdir. Yapılan çalışmanın sonunda Alzheimer, Parkinson ve sağlıklı bireylerin nefeslerinde farklılıklar olduğu tespit edilmiştir (Lau vd., 2017). Oliveira ve diğ. yaptıkları pilot çalışmada, elektronik burun ve GC-MS kullanarak bronşiektazi hastalarının nefeslerini analiz etmişlerdir. Çalışma sonucunda elektronik burun sayesinde Pseudomonas Aeruginosa enfeksiyonu olan ve olmayan hastalar %84 doğrulukla tespit edilebilmiştir (Oliveira vd., 2022).

Otomotiv alanında gaz sensörlerinin kullanımı

Otomotiv alanında gaz sensörleri, sağlık ve hava kalitesi üzerinde olumsuz etkileri olan ve küresel iklim değişikliğine katkıda bulunan zararlı emisyonları azaltmaya yönelik yasal gerekliliklerden dolayı araç yakıt ve emisyonlarını izlemek için kullanılmaktadır. Gaz sensörleri sayesinde gerçek dünya ve fabrikalarda üretilen araçların test ortamındaki emisyonları arasındaki tutarsızlıklar azalmaktadır (Wales vd., 2015). Gaz sensörlerinin otomotiv alanında bir diğer kullanımı ise otomobillerin ısıtma, havalandırma ve klimalarıdır. Arabanın iç hava kalitesini ölçmek için gaz sensör sistemi kullanılır. Bu sayede sigara dumanı, yiyecek kokusu veya biyolojik atıklar gibi birden fazla rahatsız edici gaz kaynağına karşı otomotik olarak havalandırma sistemi devreye girerek havayı temizleyebilir. Ek olarak bir arabanın elektronik kontrol ünitesinin (ECU), arabanın kaputunun altındaki hava emme manifoldunda ölçülen ortam gazı konsantrasyonuna bağlı olarak temiz hava kapaklarını otomatik olarak kapatıp açması için CO ve NO₂ duyarlı sensörler takılır. Çünkü burada izlenen tipik gazlar yanma ile ilgili bileşiklerdir (Nikolic vd., 2020).

Valenzuela ve diğ. çalışmalarında, araç içi hava kalitesini izlemek ve Denetleyici Alan Ağı (CAN) teknolojisi uygulaması için ek bir özellik sunmak amacıyla e-burun sistemlerini kullanmışlardır. Tasarlanan sistem elektronik burun, veri toplama ara yüzü ve mikroişlemciden oluşmaktadır. Kullanılan e-burun TG 2602, TG 822, TG 825, TG 813 ve TG 880 olmak üzere 5 tane gaz sensörü içermektedir. Önerilen sistem metan, etanol, propon, izobütan ve hidrojen

olmak üzere beş farklı gaz türünü yüksek verimlilikle tanımlayabilmektedir. Bu çalışmada, önerilen sistemin sürücü destek sistemlerine entegre edilerek araç içi güvenliğinin artırılması amaçlanmıştır (Technological University of the Philippines, Philippines & Ira C., 2019). Essl ve diğ. çalışmalarında, , termal kaçak esnasında ve öncesinde pil arızaları sonucu açığa çıkan gazları inceleyerek bu gibi pil olaylarında kullanılan farklı gaz sensörlerini test etmişlerdir. Yapılan çalışmada voltaj taşıyan parçaların istenmeyen elektrolizi, elektrolit buharı, hücrenin ilk havalandırılması ve TR olmak üzere dört pil arıza durumu ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlar gaz sensörlerinin pil güvenliğinin iyileştirilmesinde gaz sensörlerinin önemli katkısı olacağına katkıda bulunmaktadır (Essl vd., 2021). Steiner ve diğ. çalışmalarında, dizel motorların egzoz gazlarındaki oksijen stoikiyatrisi (λ) ve NO_x konsantrasyonunu ölçebilen çoklu gaz sensörü geliştirmişlerdir. Statik motor çalışmasıyla izole edilmiş bir sensör odasında sensör filmlerinin önceden karakterizasyonuna dayalı bir Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi sırasında dinamik koşullar altında çalışmanın sonuçları elde edilmiştir (Steiner vd., 2023).

Akıllı şehirleşme alanında gaz sensörlerinin kullanımı

Akıllı şehirleşme uygulamalarında gaz sensörleri genellikle hava kirliliğinin ve hava kalitesinin kontrolü amacıyla kullanılmaktadır (Shamsir vd., 2017). Bir diğer kullanımları ise bozulmuş yiyeceklerin tespittir. Bu sayede gıda güvenliğine katkı sağlanmaktadır (Ramírez-Moreno vd., 2021). Ayrıca, zararlı gaz üreten fabrikaların denetimi, çöplük alanlarının izlenimi, kaçak gazların tespiti, yangın tespiti, akıllı havalandırma sistemleri gibi alanlarda da kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak gaz sensörleri dronlara entegre edilerek deprem veya patlama gibi durumlarda hızlı müdahaleler edilebilmektedir (Nikolic vd., 2020).

Margaritis ve diğ. çalışmalarında, NO, NO₂, O₃ ve SO₂ gazlarını ölçen iki AQMesh cihazını sabit belediye istasyonuna kurarak 4 hafta boyunca test etmişlerdir. Yapılan çalışmada tek ve çok değişkenli doğrusal regresyon ve rastgele orman algoritmaları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda rastgele orman algoritmasının çoğunlukla O₃ ve SO₂ olmak üzere diğer tüm kirleticiler için de daha iyi tespit yaptığı gözlemlenmiştir (Margaritis vd., 2021). Lambey ve Prasad çalışmalarında, kentsel bir sanayi bölgesinde İnsansız Hava Aracı (UAV) ve ekonomik gaz sensörleri kullanarak gerçek zamanlı hava kirliliğini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, karbon monoksit (CO), azot dioksit (NO₂) ve metal oksit sensörleri kullanılarak bir aylık süre boyunca 0,8 m ve 10 m yüksekliklerde CO, NO₂ ve PM₁₀ gazları ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, yoğun trafik ve yakıt yakımı sayesinde yükseklik arttıkça ölçülen kirleticiler gazların konsantrasyonunda azalma gözlemlenmiştir (CO, NO₂ ve PM₁₀ gazlarının miktarları sırasıyla karşılaştırıldığında 0,8 metrenin 10 metreye göre %22,53, %42,90 ve %45,86 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir) (Lambey & Prasad, 2023).

Güvenlik alanında gaz sensörlerinin kullanımı

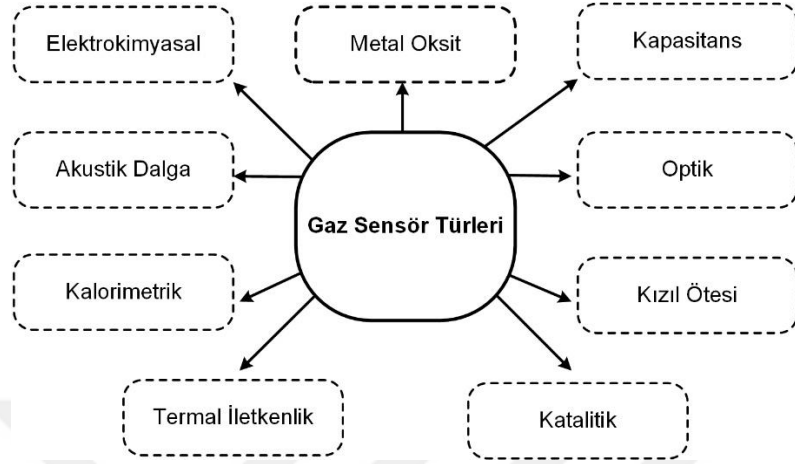
Tarihe bakıldığı zaman gaz sensörleri, kömür madenlerinde zararlı gazların tespit edilip güvenliğin sağlanılmaya çalışılmasıyla geliştirilmiştir. Bu nedenle gaz sensörlerinin temel amaçlarından biri güvenliği sağlamaktır. Gaz sensörleri sayesinde yangıcı, zehirleyici (toksik) ve boğucu (inert) gazlar tespit edilerek can ve mal kaybının azaltılması amaçlanmıştır. Gaz sensörlerinin güvenlik alanında kullanımına aşağıdaki gibi örnekler verilebilir (Nikolic vd., 2020) (Müller vd., 2016):

- Havalandırma sistemlerinde kullanılarak kapalı ortamda zehirli gazlara maruz kalınımı gibi durumlarda ortamdaki havanın temizlenmesinin sağlanması,
- Yangın alarmlarında kullanılarak erken yangın tespitiyle hızlı müdahalenin sağlanması,
- Kömür madenleri gibi yerlerde zararlı gazların tespitiyle güvenliğin sağlanması,
- Fabrikalarda, iş yerlerinde, evlerde gaz kaçağının tespit edilerek insan can ve mal güvenliğinin sağlanması,
- İnsanların araba kullanırken sarhoş olup olmadığının tespit edilebilmesi için alkolmetrelerde gaz sensörlerinin kullanılarak trafik güvenliğin sağlanması,
- Yüksek patlayıcıların ve mayınların, yasadışı uyuşturucuların tespiti için kullanılarak buhar algılama ve sinyal işleme gibi adımlarla askeri alanda güvenliğin sağlanması.

Xu ve diğ. çalışmalarında, hidrojen siyanür gibi kimyasal ajanları tespit edebilmek için 24 metal oksit yarı iletken (MOS) tabanlı MEMS sensöründen oluşan bir sensör sistemi geliştirmişlerdir. İlk olarak, kullanılan her sensörün beş farklı CWA'ya (AC, GB, GD, VX ve HD) göre gaz algılama performansı incelenmiştir. Daha sonra elde edilen verilere temel bileşen analizi (PCA) ve SVM, KNN ve NNN olmak üzere 3 farklı makine öğrenme algoritmaları gibi desen tanıma yöntemleri uygulanmıştır. Deneysel sonuçlar doğrultusunda, NNN algoritmasının %100 doğrulukla en iyi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca yapılan çalışma doğrultusunda gaz sensörleri kullanılarak oluşturulan sistemin taşınabilir bir cihaza entegre edilerek CWA'ların hızlı tespit edilebileceği öngörülmüştür (Xu vd., 2025). Matindoust ve diğ. çalışmalarında, gıda zehirlenmelerinin önüne geçebilmek için ambalajın içerisindeki çürümüş gıdalardan salınan gazları tespit eden, tüketiciye alarm çıkışı veren ve çeşitli radyo frekansı tanımlama (RFID) teknolojilerinden ve gaz sensörlerinden oluşan kullanımı kolay, uygun maliyetli, küçük bir sistem tasarlanabilmesi için literatür taraması / inceleme çalışması (review study) yapmışlardır (Matindoust vd., 2016).

Gaz Sensörlerinin Türleri

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde birçok yöntem kullanılarak gazların tespit edildiği görülmektedir. (Dhall vd., 2021) (Saxena & Shukla, 2023b) (Asri vd., 2021) (Liu vd., 2012) [29]. Gaz sensör türleri Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Gaz sensör türleri

Elektrokimyasal gaz sensörü

Elektrokimyasal gaz sensörü ilk olarak 1956 yılında Clark J. C. tarafından kandaki oksijen miktarını ölçmek için geliştirilmiştir. Ağır gaz dispersiyon sistemlerindeki gazları tespit ederek ortamdaki gazın kısmi basıncına orantılı bir sinyal oluşturan elektrokimyasal hücre, 1985 yılında M. J. Leck tarafından önerilmiştir.

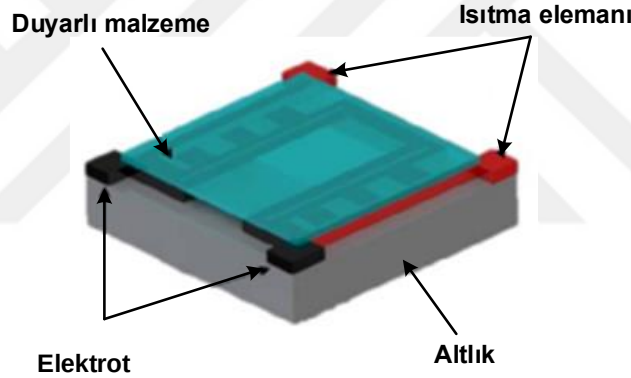
Elektrokimyasal gaz sensörler, CO, H₂, SO₂ gibi toksik gazların tespitinde kullanılmaktadır. Bu sensörler standart koşullar altında (25°C ve ortam basıncının %20'si içinde) bir yıl çalışabilmektedir. Daha az güç tüketimi, hızlı tepki gibi etmenler bu sensörlerin tercih edilmesinin başlıca sebeplerindendir. Ancak çapraz duyarlılık özellikleri istenmeyen durumdur. Bu özellikleri tespit edilmek istenen gaz dışındaki gazlara olan ilgisiyle alakalıdır. Örneğin ortamda bulunan tespit edilmek istenmeyen bir gazın kimyasal reaktivitesi tespit edilmek istenen gazın kimyasal reaktivitesinden daha yüksek olabilir veya bazı durumlarda tespit edilmek istenmeyen gaz tespit edilmek istenen gazı gizleyebilir. Bu nedenlerden dolayı bu özelliğin kontrol altına alınabilmesi için çeşitli filtreler ve voltaj uygulanabilir.

Bir elektrokimyasal gaz sensör, ince bir elektrolit tabakasıyla ayrılmış 1 algılama (çalışma), 1 referans ve 1 karşıt elektrottan oluşmaktadır. Ayrıca elektronik kimyasal sensörün yapısındaki gözenekli membran sayesinde gazın sensöre girmesi sağlanır, sıvı elektrolitin dışarı sızmasını önlenir ve algılama (çalışma) elektrotunda elektrik sinyali üretimi gerçekleştirilir. Elektrokimyasal gaz sensörlerin çalışma adımları aşağıda verilmiştir:

- Gaz gözenekli membrandan elektrotta difüze edilir.
- Difüze edildikten sonra gaz algılama (çalışma) elektrotuyla reaksiyona girer. Bu reaksiyon sonucu gazın türüne bağlı olarak oksidasyon veya redüksiyon gerçekleşir. Eğer elektronlar algılama (çalışma) elektrotundan karşıt elektrotta doğru giderse oksidasyondur. Ancak elektronlar karşıt elektrottan algılama (çalışma) elektrotta doğru giderse redüksiyondur. (Burada elektrolit iyonik yükleri elektrot boyunca taşımaktan sorumludur.)
- Elektron hareketleriyle oluşan akım seviyesine göre sinyaller üretilir.

Yarı iletken metal oksit gaz sensörü

İlk metal oksit gaz sensörü, 1960'ların başlarında karbondioksit gazını tespit edebilmek için (ZnO) filmler kullanılarak elde edilmiştir. Bu sensör temel olarak algılama katmanları, alt tabakalar, iki temas elektrodu ve alt tabaka ile algılama malzemesi arasında bir ısıtma elemanından oluşmaktadır. Şekil 4'te bir metal oksit gaz sensörünün temel yapısı verilmiştir.



Şekil 4. Metal oksit gaz sensörlerinin temel yapısı

Genel olarak Metal Oksit Sensör (MOS) tabanlı gaz sensörleri 100-450°C gibi yüksek sıcaklıklarda çalışmaktadır. Bu sensörler tespit edilmek istenen gazı ortamda var olduğu zaman absorbe edilmiş oksijen reaksiyonunun dengesindeki değişim sayesinde algılayabilmektedir. MOS sensörleri, kullanılan hassas malzemelerin türlerine göre tespit edilmek istenen aynı gazı farklı algılayan n-tipi ve p-tipi olmak üzere 2'ye ayrılmaktadır. Örneğin oksitleyici gazlar bir alıcı olarak hareket eder ve n-tipi yarı iletken için direnç artışına, p-tipi için ise dirençte azalmaya sebep olur. Bu durum indirgeyici gazlar için tam tersidir. Çünkü indirgeyici gazlar bir verici olarak hareket edip n-tipi yarı iletken için direnç azalmasına sebep olurken p-tipi yarı iletken için de direnç artışına sebep olmaktadır.

Genel olarak duyarlılık ve toparlanma süresi (son denge değerinin %90'ına ulaşmak için gereken süre olarak tanımlanır) olmak üzere 2 belirleyici faktör ile gaz sensörlerinin performansı değerlendirilir. Gaz sensörünün duyarlılığı n-tipi veya p-tipi olmak üzere malzeme

türlerine bağlı olarak 2'ye ayrılmaktadır. Böylece her ikisi de referans gazında gaz sensörleri için gereken dirence (Ra'ya) ve tespit edilmek istenen gazda gaz sensörünün direncine (Rg'ye) sahiptir. Duyarlılık seviyeleri Tablo 1'de verilmiştir. (Verilen tabloda n-tipi malzemelerde kullanılan indirgeyici gazlar için Ra/Rg, p-tipi malzemelerde kullanılan oksitleyici gazlar için Rg/Ra'yı kullanılmaktadır.)

Tablo 2. Çeşitli MOS Gaz Sensörleri ve Duyarlı Malzemelerin Performans Karşılaştırması (Asri vd., 2021).

Hassas Malzeme	Algılanan Gaz	Çalışma Sıcaklığı (°C)	Üretim Tekniği	Algılama Aralığı	Tepki Süresi (s)	İyileşme Süresi (s)	Duyarlılık
Polihedral ZIF-8 nanoyapılar	Azot dioksit (NO ₂)	350	Solvothermal yöntem	10–100 ppm	113,5	111,5	118.5 Ra/Rg
ZnO piramit	İzopren (C ₃ H ₈)	300-350	Solvothermal yöntem	1 ppm	N/a	1800	1371 Ra/Rg
SnO ₂ nanoparçacık	Etanol (C ₂ H ₅ OH)	400	PECVD	1–25 ppm	17,6	16,7	29.7 Rg/Ra
İndiyum katkılı ZnO	Azot dioksit (NO ₂)	167	SILAR yöntemi	0.1–100 ppm	180	N/a	24.2 Rg/Ra
PANI/Selüloz/WO	Aseton (C ₃ H ₆ O)	Oda Sıcaklığı	Damlatarak kaplama	10–100 ppm	N/a	N/a	N/a
CuO nanoribbon	Etanol (C ₂ H ₅ OH)	Oda Sıcaklığı	Islak kimyasal	100 ppm	2	N/a	N/a
İndiyum katkılı ZnO	Etanol (C ₂ H ₅ OH)	360	Sprey piroliz	100 ppm	15	60	75 Rg/Ra
Pt/(NiO)	Tropan	Oda Sıcaklığı	N/a	N/a	37,2	38,3	N/a
CuO nanotel	Etanol (C ₂ H ₅ OH)	Oda Sıcaklığı	Termal oksidasyon	10 ppm	202	198	N/a
In ₂ O ₃	Azot dioksit (NO ₂)	130	CVD	50 ppb	N/a	N/a	N/a
TiO ₂	Amonyak (NH ₃)	350	Hidrotermal işlem	56, 103, 156 ppm	N/a	N/a	1 Ra/Rg
Platin katkılı TiO ₂	Hidrojen (H ₂)	500-800	Daldırma yöntemi	N/a	40	N/a	N/a
Alüminyum katkılı titanyum dioksit (TiO ₂) nanoparçacık	Kobalt (Co)	600	Yanma yöntemi	100–500 ppm	N/a	N/a	N/a
TiO ₂ nanoparçacık	Kobalt (Co)	500	Damlatarak kaplama yöntemi	1–75 ppm	30-60	550	N/a
Platin (Pt) katkılı (SnO ₂) nanoparçacık	Kobalt (Co)	350	Yerinde çöktürme	8–50 ppm	N/a	N/a	N/a
TiO ₂ nanoparçacık	Metanol (CH ₃ OH)	375-475	Spin coating (dönel kaplama)	50 ppm	4	30	N/a

Yapılan çalışmalarda bazı araştırmacılar, MOS gaz sensörünün performansını arttırabilmek için algılama malzemelerine odaklanmıştır. Bunun için Çinko oksit (ZnO), titanyum dioksit (TiO₂), ferrik oksit (Fe₃O₂) ve kalay (IV) oksit (SnO₂) gibi hassas malzemeler bulunmaktadır. Alınan sonuçlar doğrultusunda SnO₂ hassas malzemesinin indirgeyici gazlara karşı kararlılığı MOS gaz sensörlerinde diğer hassas malzemelere göre daha çok kullanılmasını sağlamıştır. Ayrıca SnO₂ hassas malzemesi büyük yüzey alanı sağlaması ve MOS gaz sensörünün hassasiyetini arttırması gibi özelliklere de sahip olduğu için birkaç araştırmacı tarafından nanoyapı formunda sentezlenmiştir.

Son olarak MOS tabanlı sensörler; hızlı reaksiyon, basit yapı, düşük fiyat, yüksek algılama hassasiyeti gibi avantajlara sahiptir. Özellikle VOC gazlarının tespit edilmesinde kararlı, güvenli, düşük maliyetli ve hassastır. Bu nedenle ticari, evsel, endüstriyel vb. alanlarda kullanımı yaygındır. Ancak 100-450°C arasında yüksek sıcaklıkta çalışması yüksek güç tüketimi anlamına gelmektedir ve bu durum MOS gaz sensörlerinin en önemli dezavantajıdır.

Kapasitans tabanlı gaz sensörü

Kapasitif sensörler; basit, hızlı tepkili, küçük boyutlu ve düşük maliyetli sensörlerdir. Bu sensörler, dielektrik sabitindeki değişikliği veya tespit edilmek istenen gazlar tarafından tetiklenen aktif tabakanın kalınlığındaki değişiklikler sonucunda oluşan kapasitans değişimini ölçmektedir. Bu sensörlerden iyi sonuçlar elde edebilmek için değiştirilebilecek parametreler aşağıda verilmiştir:

- **Dielektrik Sabitinin Değişimi:** Kapasitans sensörler yapısı gereği hedef gazın teması halinde dielektrik sabiti değişmektedir. Örneğin, suyun yüksek dielektrik sabiti sayesinde nem sensörleri bu değişiklikten yararlanmaktadır.
- **Dielektrik Tabakanın Kalınlığının Değişimi:** Dielektrik malzemenin kalınlığına ve elektrotlar arasındaki mesafeye bağlı olarak 2 tür tespit vardır. Örneğin tespit edilmek istenen gaz moleküllerinin hassas malzeme ile etkileşimi sonucunda dielektrik kalınlığında değişim meydana gelecektir. Ancak bu gibi durumlarda kullanılan sensör sürekli olarak tespit edilmek istenen gaza maruz kaldığında duyarlılığı azalarak kaybolmaktadır. Bunun sonucunda sensörde normalden daha uzun bir toparlanma süresi olur. p-tipi ve n-tipi yarı iletkenler, metal oksit yarı iletken veya metal yarı iletken arasındaki temas nedeniyle bir indirgeme tabakasının oluşumu ise diğer tespit türü yöntemleri arasındadır. Burada dielektriğin kalınlığı tespit edilmek istenen gaz ile yarı iletkenler arasındaki etkileşim sayesinde değişmektedir. Bu yöntem sayesinde hızlı ve tekrarlanabilir sonuçlar alınır.

- Tespit edilmek istenen gazın metal oksit yarı iletken kapasitif sensörlerle teması sonucu indirgenme tabakası ve iş fonksiyonu değişmektedir. Bu durum karakteristik eğri ile tükenme tabakası kalınlığında değişikliklere neden olur.

Optik gaz sensörü

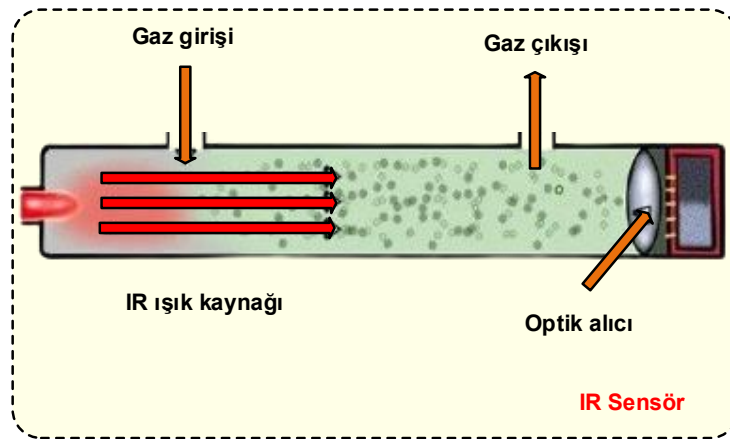
Optik gaz sensörleri, tespit edilmek istenen gazın belirli dalga boylarındaki emilim/emisyon özelliklerini kullanmaktadır. Bu sensörler ışık kaynağı, fotoalgılama elemanı, gaz algılama elemanı ve filtreden oluşmaktadır. Ek olarak bu sensörler optik yüzeylerdeki ortam ışığından veya kirden etkilenebilmektedir. Çoğu optik sensörler, genellikle paladyum veya kemokromik oksit filmlerle kaplı fiber optik yapılar kullanmaktadır. Bu tür fiber optik sensörler optod olarak isimlendirilir.

Optik sensörler hidrojen gibi yanıcı gazların tespiti için kullanılmaktadır. İlk optik hidrojen gazı sensörü 1984 yılında Paladyum ve Titanyum kaplamalı fiber optik yapı kullanılarak yapılmıştır.

Fotonik kristal boşluk (PhC) gaz sensörleri, fiber optik gaz sensörleri ve kızılötesi gaz sensörleri optik gaz sensörlerinin en yaygın türlerindendir.

Kızılötesi gaz sensörü

Kızılötesi gaz sensörleri gazların yaydığı kızılötesi ışınları tespit ederek çalışır. Bu sensörler kızılötesi ışık kaynağı ve kızılötesi ışık algılayıcısından oluşmaktadır. Şekil 5’de kızılötesi gaz sensörlerinin yapısı verilmiştir.



Şekil 5. Kızılötesi gaz sensörlerinin yapısı

Bu sensörler patlayıcı gazların özellikle de hidrokarbon gazlarının tespitinde kullanılır. Çünkü sensör yapısı gereği gazlardan yayılan Infrared ışınlarının dalga boyunu değiştirme özelliğinden yararlanarak gaz tespit işlemini yapmaktadır. Eğer ortamda hidrokarbon varsa sensörün içerisindeki IR ışık kaynağı optik alıcıya ışın gönderirken hidrokarbon gazından

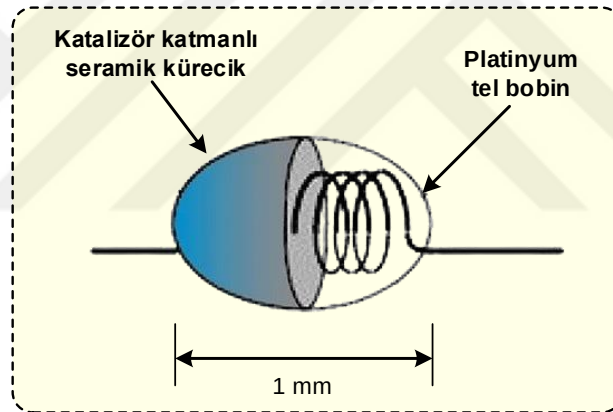
yayılan ışın ışık kaynağının gönderdiği ışını soğurur. Aradaki sönüm farkı belli bir noktaya geldiğinde sensör sinyal gönderir. Ayrıca metan, etan, propan, bütan, benzen toluen, ksilen ve metanol, etanol gibi farklı gazları tespit edebilmek için de kullanılmaktadır.

IR sensörler; sıcaklık değişimlerine, neme, yüksek patlayıcı gaz konsantrasyonuna ve hidrojen sülfür gibi engelleyici gazlara karşı dayanıklıdır ve kullanım ömürleri diğer sensörlere göre çok daha uzundur. Bu gibi sebeplerden dolayı tercih edilen modern sensörelere biridir.

Katalitik sensörler

Katalitik sensörler genellikle patlayıcı gazları ölçmek için kullanılmaktadır. Özellikle gaz üretim istasyonları ve gaz tesisleri gibi yerlerde çokça kullanılmaktadır.

Yapısında 2 tane pelistör isimli küçük seramik küreler bulunur. Pelistörler bobin şeklinde sarılı olan platinyum telden oluşmaktadır. Pelistörlerden birinin içerisinde katalizör katman bulunmaktadır. Diğer pelistör ise referans görevi görmektedir. Şekil 6'da katalizör katmanlı pelistörün yapısı verilmiştir.



Şekil 6. Pelistörün yapısı

Ortamda bulunan patlayıcı gaz, sensördeki katalizör katmanla reaksiyona girerek oksidasyon oluşturur. Oluşan oksidasyon sonucunda pelistörün ısısı artarak içerisindeki platinyum telden oluşan bobinin elektriksel direnci artar. Uzun süre yüksek gaz konsantrasyonlarına katalitik sensörlerin maruz kalması tavsiye edilmez. Çünkü böyle bir ortamda oksijen seviyesi düşer. Bu da pelistördeki oksidasyon işleminin olmamasına neden olur. Eğer oksidasyon işlemi olmazsa sensör hatalı tespit yapabilir. Standart çalışma koşullarında katalitik sensörlerin ömrü 5 yıldır ve her yıl %5-%10 arasında hassasiyet kaybı meydana gelir. Ancak sensör patlayıcı gaza sık sık ve uzun süre maruz kalırsa ömrü ve hassasiyeti daha erken azalabilir.

Akustik dalga gaz sensörleri

1964'te King tarafından ilk akustik gaz sensörü bulunmuştur. Akustik dalga gaz sensörleri isminden de anlaşılacağı gibi mekanik veya akustik dalgalarla çalışmaktadır (Zainab Yunusa vd., t.y.). Akustik dalga, malzemenin yüzeyinde veya içinden yayılırken ortamda meydana gelen herhangi bir değişiklik sayesinde dalga hızı veya genliği etkilenir. Hızda gerçekleşen değişiklikler sensörün frekans veya faz özellikleriyle ölçülür. Akustik dalga sensörleri reseptör ve dönüştürücüden (yanıtı elektrik sinyaline dönüştüren eleman) oluşmaktadır. Akustik sensörlerde, alıcı film analite maruz kaldığı zaman kütle ve kalınlığı değişmektedir. Bu değişim, dönüştürücünün titreşim frekansı, genliği ve fazını etkiler. Frekanstaki bu kayma, analit konsantrasyonu ile doğru orantılıdır. Akustik gaz sensörleri yüksek performansa sahiptir. Ancak yaygın kullanılan algılama malzemeleri sınırlıdır.

Kalorimetrik gaz sensörü

Kalorimetrik gaz sensörleri taşınabilir ilk gaz sensörlerinden biridir. Bu sensörler, 1950'lerde kömür madenlerindeki metan gazının güvenli bir şekilde tespit edilmesi amacıyla geliştirilmiştir. İlk geliştirilen kalorimetrik sensör 900–1000 °C'ye kadar ısıtılan Pt tel bobinidir. Yanıcı gazlar Pt yüzeyinde yanarak sıcaklığın artmasına sebep olur. Bu sayede teldeki direnç değişir. Bu direnç değişimi ölçülerek yanıcı gazların varlığı tespit edilmiştir. Ancak yüksek sıcaklık Pt'yi buharlaştırarak arızalara neden olmuştur. Bu nedenle oksit destekli katalizörler Pt telin etrafına sarılarak bu sensörlerin daha dayanıklı hale gelmesi sağlanmıştır. Kalorimetrik gaz sensörler; düşük sıcaklıkta çalışma, düşük maliyetli, esnek ve uzun ömürlü olma gibi özellikleriyle avantaj sağlamaktadır. Ancak bazı gazlar sayesinde katalizör zehirlenmesi yaşamaları en büyük dezavantajdır. Kalorimetrik gaz sensörleri güvenlik alanında kullanılmaktadır. Petrol ve gaz madenleri, ulaşım, yakıt türü ayırımı, otomobil yakıt ve egzozlarında sızıntı tespiti, kanalizasyon, çöp ve yanıcı gazları tespit etme gibi birçok uygulaması bulunmaktadır.

Termal iletkenlik gaz sensörü

Termal iletkenlik gaz sensörleri, ortamdaki gazın termal iletkenliğini ölçerek çalışır. Sensör içerisinde genellikle ısıtılmış bir tel (örneğin platinyum tel veya termistör) bulunur. Bu tel, sabit bir sıcaklıkta tutulur ve referans gaz (genellikle hava) ile karşılaştırmalı ölçüm yapılır. Ortamdaki tespit edilecek gazın termal iletkenliği referans gazdan yüksekse, ısıtılmış telden daha fazla ısı çeker (soğutur), bu da telin sıcaklığının düşmesine ve elektriksel direncinin değişmesine neden olur. Ters durumda (yani ortamdaki gazın termal iletkenliği daha düşükse), tel daha az ısı kaybeder ve sıcaklığı artar. Bu sıcaklık değişimi, telin direnci üzerinde etkili olur.

Telin direncindeki bu değişim, sensörün elektrik devresi tarafından ölçülerek gazın varlığı ve konsantrasyonunu tespit eder.

Gaz sensörlerinin türleriyle ilgili verilen açıklamalardan sonra Tablo 3’te ticari olarak satılan bazı gaz sensörleri hakkında bilgi verilmiştir.

Tablo 3. Ticari Olarak Satılan Bazı Gaz Sensörleri Hakkında Bilgi (Saxena & Shukla, 2023b).

Gazın Adı	Gaz Sensörünün Türü	Çalıştığı Sıcaklığı	Tespit Limiti	Güç Tüketimi	Markası
CO	Yarı iletken	(-10) – 50 °C	10–10,000 ppm	150 mA to 5 V	MQ Serisi
CO ₂	Kızılötesi	0 – 40 °C	0–3000 ppm	24 V-DC	Edinburgh Instruments Ltd., UK
H ₂ S	Elektrokimyasal	(-40) – 50 °C	0–20 ppm	4 Watt	Det-Tronics UK Ltd., UK
Nitro NOx	Oksit, Elektrokimyasal	(-25) – 50 °C	0–20 ppm	DC 3.7 V	FORENSICS DETECTORS, USA
Sülfür, SOx	Elektrokimyasal	(-30) – 50 °C	0–2000 ppm	DC 0.1 V	Alphasense, UK

Gaz sensörlerinin kullanım alanlarına göre avantaj ve dezavantajları vardır. Tablo 4’te gaz sensörü türlerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 4. Gaz Sensör Türlerinin Karşılaştırılması (Saxena & Shukla, 2023b; Zainab Yunusa vd., t.y.).

Sensör Türü	Avantajları	Dezavantajları
Katalitik	- Kullanımı kolay, geniş gaz tespit yelpazeli ve düşük maliyetlidir. - Çoğunlukla hidrojen gibi yanıcı gazları tespit eder. - Çalışabilmek için hava veya oksijen ortamına ihtiyaç duymaktadır.	Pb, Cl ve Si’nin varlığı nedeniyle zehirlenmeye karşı hassastır.
Termal	- Geniş bir gaz spektrumunu tespit edebilir. - Sağlam ve basit tasarıma sahiptir. Çalışması için oksijene gerek yoktur.	İçerisindeki platinyum telin ısınması sonucu istenmeyen tepkimeler oluşur.
Elektrokimyasal	- Diğer sensör türlerinden daha ucuzdur. - Diğer gazlar tarafından zehirlenmez. - Çok fazla gaz türünü tespit edebilir. - Yüksek doğruluğa sahiptir ve tekrarlanabilir. - Nispeten düşük konsantrasyonlarda (ppm seviyesi) toksik gazları ölçebilir.	- Sıcaklığa duyarlıdır. - Kullanım ömrü kısadır. - Çapraz duyarlılık özelliğine sahiptir.

Tablo 4. (devamı)

Optik	• Çalışmak için oksijene ihtiyaç duymaz. • Elektromanyetik girişimden etkilenmez. • Geniş gaz tespit yelpazesi vardır. • Son derece hassas, seçici ve kararlı bir sensördür.	• Ortam ışığının girişiminden etkilenir. • Aynı anda bir gaz tespit edilebilir.
Kızılötesi	• Hızlı tepkiye sahiptir. • İnert atmosferlerde kullanılabilir. • Sadece fiziksel teknikler kullanır. • Bakım çok azdır. • Yüksek gaz konsantrasyonlarına maruz kalmaktan etkilenmez. • IR sensörleri esas olarak gazları algılar ancak hidrokarbonları algılamaz.	• Maliyeti yüksektir. • Daha fazla uzmanlık gerektirir ve bu nedenle kolayca işlenemez. • Tüm gazların IR emilimi olmadığından belirli sayıda gazla sınırlıdır.
Yarı iletkenler	• Kullanımı kolaydır. • Kolay üretilir. • Maliyeti düşüktür. • Mekanik olarak sağlam bir sensördür. • Sürekli yüksek nem koşullarında iyi çalışabilir. • Zehirli ve yanıcı gazlar dahil olmak üzere çok çeşitli gazları tespit edebilir. • Pil gerektirmez.	• Kirlenici potansiyeli ve çevresel koşullara bağlı dalgalanmalar vardır. • Cihazın karmaşıklığını etkileyen doğrusal olmayan geri bildirim gösterir.
Yüzey akustik dalgası	• Kablosuz uygulamalar için kullanılabilir. • Sert ve dönmeli bölgelere yerleştirilebilir. • Son derece hassas, düşük maliyetli, kolayca üretilebilir. • Oda sıcaklığında çalışır.	• Küçük boyutu üretim süreci sırasında kullanımını zorlaştırır.

KURAMSAL TEMELLER

Gaz Sensörlerinin Performans Parametreleri

Gaz sensörleri birçok farklı yöntemle oluşturulmaktadır. Her sensörün kullanım amacına göre algıladığı gaz türleri ve değerleri farklıdır. Özellikle gaz sensörleri karşılaştırılırken belirli parametreler dikkate alınmaktadır. Gaz sensörlerinin performansları aşağıda verilen parametreler kullanılarak ölçülmektedir (Liu vd., 2012) (Dey, 2018) (Kang vd., 2021).

Duyarlılık

Duyarlılık, tespit edilmek istenen gazın en küçük hacim konsantrasyonu ifade etmektedir. Birimi yoktur. Ancak kullanılan sensörün türüne bağlı olarak ppm başına % değişiklik veya ppm başına Hz gibi ifadeler kullanılmaktadır. İndirgeyici gazlar için R_a/R_g ve oksitleyici gazlar için R_g/R_a olarak tanımlanmaktadır. % duyarlılığın formülü denklem 1’de verilmiştir.

$$\text{Duyarlılık} = \frac{R_a - R_g}{R_a} \times \%100 \quad (1)$$

R_a : Kullanılan gaz sensörünün ortam gaz direncidir. Çoğunlukla hava direncini temsil eder.

R_g : Kullanılan gaz sensörünün tespit edilmek istenen gazdaki direncini ifade etmektedir.

Seçicilik

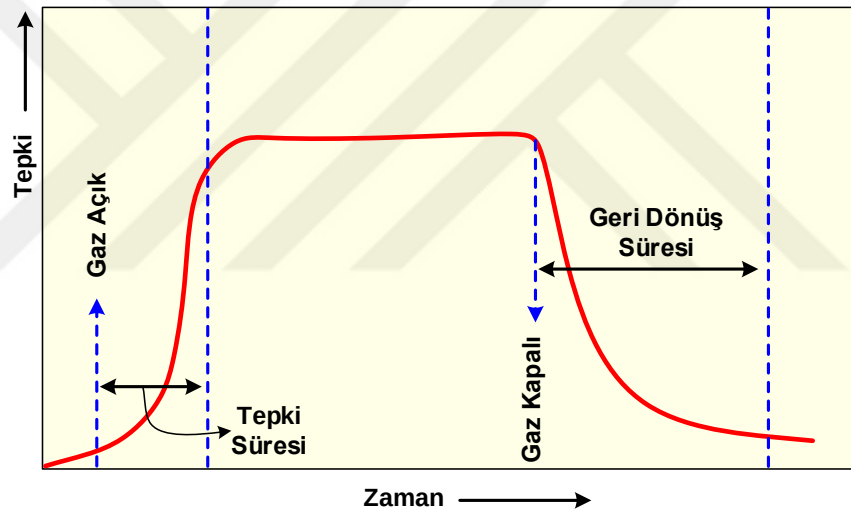
Seçicilik, bir gaz sensörünün ortamda bulunan gaz karışımı içerisinde tespit edilmek istenen gazı tanıyarak tespit edebilme yeteneğidir. Bu özellik gerçek dünya uygulamalarına karşı oldukça önemlidir. Çünkü gerçek dünya uygulamalarında genellikle birden fazla gaz karışımı mevcuttur. Örneğin standart ortam olan havada birden fazla çok çeşitli gazlar bulunmaktadır. Bundan dolayı bir gaz sensörünün seçiciliği ne kadar yüksekse, ortamda bulunan diğer gazlara karşı yüksek dirence sahip olur ve tespit edilmek istenen gazı daha doğru bir şekilde tanımlar. Seçiciliğin iyileştirilmesi için; seçici filtreler, katalizörler, desen tanıma, uygun ortam sıcaklığı gibi yöntemler kullanılmaktadır.

Tepki süresi

Tepki süresi, tespit edilmek istenen gazın konsantrasyonunun belli bir seviyeye geldiği andan sensörün onu algılayarak ürettiği sinyal anına kadar geçen süredir. Tepki sürelerinin hızlı olması özellikle güvenlik alanında oldukça önemlidir. Tepki süresi; gazın sensöre difüzyonu, sensör yüzeyindeki reaksiyon kinetiği ve sensörün dahili devreleri veya filtreleri gibi özelliklere bağlıdır.

Geri dönüş süresi

Geri dönüş süresi, ortamda bulunan tespit edilmek istenen gazın azaltılması sonucunda sensörde üretilen sinyalin başlangıç değerine dönmesi için gereken süredir. Geri dönüş süresinin kısa sürmesi o sensörün olası gaz artışı veya azalışında hızlı tepki vererek daha doğru gaz seviyesi tespiti yapabildiğini göstermektedir. Standart bir gaz sensörünün test edilmesi sırasında elde edilebilecek yanıt eğrisi Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Standart bir gaz sensörünün test edilmesi sırasında elde edilebilecek yanıt eğrisi (Mobtakeri, t.y.)

Kararlılık

Kararlılık, bir gaz sensörünün belirli bir süre boyunca sonuçları yeniden üretme yeteneğidir. Yani gaz sensörünün uzun süreler boyunca belirli bir gaz konsantrasyonu karşısında ne kadar tutarlı olduğunu göstermektedir. Kısaca bu özellik sayesinde duyarlık, seçicilik, tepki süresi ve kurtarma süresi korunmaktadır.

Kayma

Kayma, gaz sensörünün duyarlılığının; malzemelerin eskimesi, zehirlenme, ortamdaki sıcaklık veya nemin değişimi gibi durumlar karşısında zamanla değişimidir.

Tespit sınırı

Tespit sınırı, tespit edilmek istenen gazın tespit edilebilecek en düşük konsantrasyonudur. Duyarlılığı yüksek olan sensörler daha iyi tespit etme yeteneğine sahiptir. Bu nedenle duyarlılık ile doğru orantılıdır. Örneğin bir gaz sensörü tespit edilecek gazın 0,1 ppm değerini ayırt edebiliyorsa bu o sensörün tespit sınırıdır.

Çalışma koşulları

Çalışma koşulları, bir gaz sensörünün çalışabilmesi için gerekli sıcaklık, nem, güç tüketimi gibi durumları temsil eder. Örneğin bazı sensörler yüksek sıcaklıklarda çalışırken bazı sensörler de oda sıcaklığında çalışmaktadır.

Kullanım ömrü

Kullanım ömrü, bir gaz sensörünün standart koşullar altında ne kadar süre kullanılabileceğini temsil eder. Örneğin IR sensörleri diğer sensörlere göre çok daha uzun ömürlüdür. Ortamın değişimi (sıcaklık, nem gibi değişimler), zehirlenmeler, sensörün içerisindeki malzemelerin eskimesi gibi durumlar karşısında sensörün kullanımı ömrü değişerek daha da azalabilir.

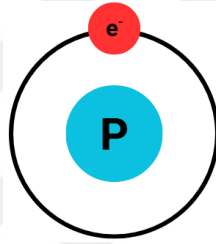
Tüm bu özelliklerden yola çıkılarak ideal bir gaz sensörünün yüksek duyarlılık, seçicilik, kararlılık ve kullanım ömrüne; düşük tespit sınırı, kayma, tespit ve kurtarma süresine sahip olması gerekmektedir.

Hidrojen Gazı ve Özellikleri

16. yüzyıldan itibaren bilim insanlarının katkılarıyla hidrojen gazı keşfedilerek yapısı anlaşılmıştır (Karabacak, t.y.) (Kotnala & Shah, 2018) (Gu vd., 2012) (Lozano-Martín vd., 2022). Paracelsus tarafından 16. yüzyılda demir sülfirik asit içerisinde çözülmüştür. Bu tepkime sonucu açığa çıkan gazın o zamanlarda hangi gaz olduğu bilinmese de bu çalışma hidrojen gazının keşfinin ilk adımlarından biridir. Yanabilen ancak yanmaya desteği olmayan hidrojen gazı Van Helmot tarafından özel bir gaz türü olarak tanımlanmıştır. Robert Boyle 1671 yılında demir tozu ile seyreltik asidi tepkimeye sokmuştur. Tepkime sonucu Hidrojen gazını elde etmiştir. Henry Cavendish 1766 yılında hidrojen gazının özelliklerini tanımlamıştır. Ancak hidrojen gazının asitlerdense metallerden elde edilebildiğini düşünerek yanlış bir genelleme yapmıştır. Tüm bunlara ek olarak suyun oksijen ve hidrojen den oluştuğunu keşfetmiştir. Hidrojen gazına ilk olarak 1783 yılında Lavoisier tarafından Hidrojen ismi verilmiştir. Lavoisier, hidrojen gazına ismini verirken bu gazın yanma esnasında su oluşturma özelliğinden yararlanarak Yunancada "su oluşturan" anlamına gelen ὕδρωγόνο'dan kelimesinden türetilen

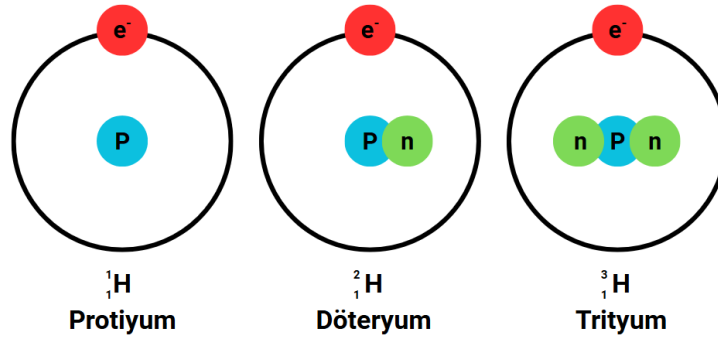
Hidrojen ismini vermiştir. 1820’lerde hidrojenin yenilenebilir bir enerji kaynağı ve yakıt olarak kullanılabileceği öne sürülmüştür. William Rober Grove 1839 yılında yakıt pilini keşfederek hidrojenden elektrik enerjisi üretmiştir. Şehir gazı adıyla bilinen ürün 1800’lü yılların başından 1900’lü yılların ortalarına kadar Amerika ve Avrupa’da kullanılarak ısı ve ışık ihtiyacı karşılanmıştır. Bu şehir gazları kömürden elde edilmektedir ve %50’si hidrojen, %3-%6’sı karbondioksit, bir miktarda metan gazından oluşmaktadır. Daha sonra doğalgaz keşfedilmiştir. Carl Bosh 1911 yılında hidrojen ve nitrojen gazlarından gübre elde etmiştir. 1970’lerde hidrojen enerji kaynağı olarak görülmeye başlanmıştır. 1974 yılında, Hidrojen Ekonomisi Miami Enerji Konferansında (THEME) dünyaya hidrojenin önemi ciddi olarak duyurulmuştur. Daha sonra Uluslararası Hidrojen Enerjisi Birliği (IHEA) kurulmuştur.

Hidrojen gazı doğadaki en basit atom yapısına sahiptir ve evrende %90 dan fazla bulunmaktadır. Periyodik cetvelin ilk elemanı olan Hidrojen bir proton ve onun çevresindeki bir elektrondan oluşmaktadır. Şekil 8’de hidrojenin yapısı verilmiştir.



Şekil 8. Hidrojenin yapısı

Hidrojenin; protiyum, döteryum ve trityum olmak üzere 3 tane izotopu (izotop, aynı atom numarasına sahip farklı nötron sayıları olan iki veya daha fazla atom türüdür) bulunmaktadır. En basit ve yaygın olanı protiyumdur. Protiumların yapısında bir proton bulunur ancak nötron bulunmaz. Doğada var olan her 5000 hidrojen 1’i çekirdeğinde bir protona ek olarak bir tane de nötron içermektedir. Bu durumdaki hidrojen atomuna döteryum denir. Döteryum kararlıdır ve zenginleştirilerek oksijenle birleştirildiğinde ağır su (D_2O) adı verilen su açığa çıkar. Elde edilen ağır su, reaktörlerde uranyumun parçalanması sırasında çıkan nötronların yavaşlatılması için ılımlayıcı olarak kullanılmaktadır. Hidrojenin nadir bulunan izotopu trityumun çekirdeğinde bir protonun yanı sıra iki nötron bulunmaktadır ve bu izotop hidrojen bombası yapımında kullanılır. Şekil 9’da hidrojenin izotoplarının yapısı verilmiştir.



Şekil 9. Hidrojenin izotoplarının yapısı

Hidrojen gazı (H_2) renksiz, kokusuz, tatsızdır ve en hafif elementtir. Oksijen gazı ile birleşerek suyu oluşturur ve canlılığın devamını sağlar. Hidrojen gazının yoğunluğu havadan düşüktür bu sayede havada hızla yükselmektedir (yoğunluğu havanın 1/14'ü, doğal gazın ise 1/9'u kadardır). Bu nedenle hidrojen gazının tespitini sağlayan sensörler binalarda tavanlara veya daha yüksek yerlere takılmaktadır. Hidrojen gazı atmosfer basıncında $-253^{\circ}C$ 'ye soğutulduğunda sıvı hale gelmektedir. Sıvı hidrojenin yoğunluğu benzinin 1/10'u kadardır. Hidrojen gazının ısı değeri metreküp başına 12 milyon jule iken sıvı hidrojeninki 8400 milyon jule' dur (veya kg başına 120 milyon jule). Isı transferini ve kaynamayı minimize eden kaplar sayesinde sıvı hidrojen depolanmaktadır.

Hidrojen geniş yanma aralığına sahiptir (havada %4 - %75 arasında). Ayrıca minimum tutuşma enerjisi $\sim 0,02$ mJ kadardır ve bu oldukça düşük bir değerdir. Bu nedenle ufak bir kıvılcım alevlenmesine neden olabilmektedir. Hidrojen gazının alevleri görülmeyecek şekilde soluk mavi olduğundan olası yangın olaylarının tespiti zorlaşmaktadır. Tüm bunlara ek olarak hidrojen gazının hızlı yayılması sızıntı durumlarında büyük bir riske neden olur. Hidrojen gazı düşük konsantrasyonlarda vücuda zarar vermez ancak oksijeni dışarı atarak boğucu olabilir. Her ne kadar bazı durumlarda boğucu etkisi olsa da hidrojen gazı ile ilgili asıl sorun yanıcı ve patlayıcı olmasıdır. Çok hafif olduğundan dolayı enerjisi yüksektir. Hidrojen temiz yakıt ve enerjide kullanılabilir. Ancak sahip olduğu özelliklerden dolayı ciddi güvenlik önlemleri gerekmektedir. Bu nedenle ortamdaki hidrojeni tespit etmeye yarayan hidrojen sensörleri, genellikle hidrojen yakıt istasyonları, elektrolizörler, yakıt hücresi muhafazaları ve hidrojenin üretildiği veya kullanıldığı her yerde sızıntıları sürekli olarak izlemek için kullanılır.

Hidrojen gazının özellikleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Hidrojen Gazının Özellikleri (Karabacak, t.y.).

Özellikler	Değerler
Formül	H ₂
C/H Oranı	0
Mol ağırlığı, (g/molg)	2,02
Özgül Kütle:	
Sıvı:(kg/litre)	0,07
Gaz:(kg/litre)	0,84×10 ⁻⁴
Isıl Değer:	
Alt:(MJ/kg)	119,93
Üst:(MJ/kg)	141,86
Stokiyometrik Karışım İçin:	
Hava/Yakıt:(kütlesel) (kJ/l)	34,32
Hava/Yakıt:(hacimsel) (kJ/l)	2,38
Buharlaşma Isısı (MJ/kg)	0,447
Tutuşma Sınırları:	
Hacim %'si	4,1 - 74
Laminar Alev Hızı (m/s)	2,91
Adyabatik Alev Sıcaklığı (°C)	2110
Difüzyon Katsayısı (m ² /s)	0,61
Kaynama Noktası (°C)	-252,35
Donma Noktası (°C)	-259
Kendi Kendine Tutuşma (°C)	574 - 591

Hidrojen Gazı Tespit Yöntemleri

Hidrojen gazının tespiti için literatürde birçok yöntem geliştirilmiştir (Jia vd., 2023; Thomas Hübert vd., 2013). Katalitik yanma sensörleri, termal iletkenlik (TCD) sensörleri, yarı iletken (kimyasal dirençli) sensörler, elektrokimyasal yakıt hücresi sensörleri, metal hidrit sensörler (direnç veya gerilime dayalı), optik hidrojen sensörleri, akustik sensörler ve alan etkili transistör (FET) sensörleri tabanlı yöntemler vardır.

Katalitik Yanma Sensörleri: Bu sensor türleri özellikle güvenlik alanında hidrojen gazının tespiti için yaygın olarak kullanılmaktadır. Katalitik sensörler bir bobbin üzerinde ısıtılan genellikle platin veya paladyum katalizör üzerinde hidrojeni oksitlemektedir. Hidrojen katalitik sensörleri sağlamdır ve yanıcı konsantrasyonun doğrudan bir göstergesini vermektedir (Jia vd., 2023). Katalitik H₂ sensörleri, basitlikleri ve nispeten düşük maliyetleri nedeniyle endüstriyel dedektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat hidrojen yakarlar ve bu nedenle

inert atmosferlerde ölçüm yapmak veya çok düşük konsantrasyonları (ppm seviyesi) ölçmek için uygun değildir.

Termal İletkenlik (TCD) Sensörleri: Hidrojenin termal iletkenliği havadan yaklaşık yedi kat daha yüksektir. Termal iletkenlik dedektörleri, ısıtılmış bir elemanın üzerinden akan gazın termal iletkenliğindeki değişiklikleri ölçmektedir. Genellikle proses izlemede kullanılırlar. (örneğin, gaz karışımlarındaki veya gaz kromatografisi dedektörlerindeki hidrojeni izleme). Basit ve sağlamdırlar ancak genellikle seçicilikten yoksundurlar. Havadan farklı termal iletkenliğe sahip herhangi bir gaz bir tepkiye neden olur, bu nedenle TCD'ler bilinen ikili karışımlar için veya hidrojen birincil değişken olduğunda en iyisidir.

Yarı İletken (Kimyasal Dirençli) Sensörler: Birçok metal oksit yarı iletken (MOS) sensörü hidrojene karşı duyarlıdır. Katalizörlerle (Pd veya Pt gibi) katkılanmış kalay dioksit (SnO_2) sensörleri, H_2 tespiti için klasik seçimlerdir (T. P. Chen vd., 2012; Jia vd., 2023; Thomas Hübert vd., 2013). Hidrojen mevcut olduğunda, sensör yüzeyinde oksitlenir (veya bir katalizör üzerinde ayrışır ve oksit üzerine dökülür), yüzey oksijen türlerini giderir ve böylece oksidin iletkenliğini artırır (SnO_2 , ZnO veya MoO_3 gibi n tipi oksitler için). Bu sensörler, tasarıma bağlı olarak düşük ppm aralığından yüksek yüzdelere kadar hidrojeni tespit edebilir. Genellikle yüksek sıcaklıklarda ($\sim 150\text{--}350\text{ }^\circ\text{C}$) çalışırlar. Araştırmacılar genellikle, H_2 için duyarlılığı ve seçiciliği arttırmak amacıyla hidrojen reaksiyonlarını özel olarak katalize eden soy metalleri (Pd, Pt) dahil ederler (Jia vd., 2023). Örneğin, paladyum katalizörlü bir SnO_2 sensörü, Pd'nin H_2 'yi ayrıştırma ve yüzey oksijeniyle reaksiyonunu kolaylaştırma yeteneğinden yararlanarak orta sıcaklıklarda ppm seviyesinde hidrojeni tespit edebilir.

Elektrokimyasal Yakıt Hücresi Sensörleri: Hidrojen, H_2 'nin bir anotta oksitlenerek proton ve elektron ürettiği ve konsantrasyona orantılı bir akım oluşturduğu elektrokimyasal hücreler tarafından tespit edilebilir. Bu sensörler hidrojene karşı oldukça seçicidir ve tasarıma bağlı olarak düşük ppm'den yüksek % seviyelerine kadar ölçüm yapabilir (Thomas Hübert vd., 2013).

Metal Hidrit Sensörler (Direnç veya Gerilime Dayalı): Hidrojenin paladyum gibi metaller tarafından algılama yeteneği çeşitli sensör tiplerinde kullanılır. Bu sensörler hidrojen için oldukça seçici olabilir. Çünkü diğer birkaç gaz Pd'da benzer etkilere neden olur. Genellikle oda sıcaklığında çalışırlar. Dezavantajları arasında uzun vadeli kararlılık sorunları (tekrarlanan hidrit oluşumu metal yorgunluğuna neden olabilir) ve bazen belirli hidrojen konsantrasyonlarında doygunluk (Pd tamamen hidritlendiğinde) bulunur.

Optik Hidrojen Sensörleri: Bu sensörler, bir malzemeye maruz bırakıldığında optik değişiklikler yoluyla hidrojeni algılar. Bir yaklaşım, hidrojen mevcut olduğunda bir

malzemenin rengini veya optik özelliklerini değiştirdiği sensörlerdir. Küçük bir katalizörün (Pt gibi) varlığında tungsten trioksit (WO_3), hidrojene maruz kaldığında maviye döner (tungsten bronz olan H_xWO_3 oluşturur) ve ölçülebilir bir optik emilim değişikliğine neden olur. Optik sensörler fiber optik yapılabilir (algılama noktasında elektrik gücü olmayan patlayıcı atmosferlerde uzaktan algılama için) ve kimya H_2 'ye özgülse oldukça seçici olabilir. Örneğin, Pd başlıklı fiber Bragg kafesleri, Pd kafesi hidrojenle genişlediğinde yansıyan dalga boyunu değiştirir.

Akustik Sensörler: Hidrojen için Yüzey Akustik Dalga (SAW) sensörleri genellikle bir SAW cihazının H_2 maruziyeti üzerine kütle veya iletkenliği değiştiren bir katmanla kaplanmasını içerir. Örneğin, paladyum filmle kaplanmış bir SAW çipi, paladyum hidrojeni emdiğinde (kütle yüklemesi ve elastik özellik değişimi nedeniyle) bir frekans kayması sergileyecektir (Thomas Hübert vd., 2013). SAW sensörleri çok düşük algılama sınırlarına (ppm altı) ulaşabilir ve hızlıdır (saniyelerce tepki süresi). QCM (kuartz kristal mikro terazisi) sensörleri benzer bir kütle değişimi ilkesiyle çalışır. Bunlar dikkatli sıcaklık kontrolü gerektirir ve genellikle laboratuvarlarda veya sabit kurulumlarda kullanılır.

Alan Etkili Transistör (FET) Sensörleri: Paladyum kapılı MOSFET gibi hidrojene duyarlı FET'ler özel bir kategoridir. Burada, bir MOS transistöründeki bir Pd kapısı H_2 'yi ayırtıracak ve hidrojen atomlarının kapı oksit arayüzüne yayılmasına izin vererek, transistörün çalışma fonksiyonunu ve dolayısıyla eşik voltajını değiştirecektir. Bu cihazlar (bazen GasFET'ler veya MOS kapasitör sensörleri olarak adlandırılır) hidrojene karşı oldukça seçicidir ve oda sıcaklığında çalışabilir. (Thomas Hübert vd., 2013).

Hidrojen Sensörleri

Hidrojen sensörleri onlarca yıldır kapsamlı araştırmaların konusu olmuştur ve çeşitli bağlamlarda hidrojen tespitinin ihtiyaçlarını karşılamak için çok sayıda teknoloji ticarileştirilmiştir (Thomas Hübert vd., 2013). Tartışıldığı üzere, her sensör tipinin kendine özgü güçlü ve zayıf yönleri vardır. Burada hidrojen sensörü teknolojilerine genel durumlarına, alandaki son deneysel çalışmalarına ve gelişmelerine değiniyoruz.

Uygulamada Katalitik Boncuk Sensörleri: H_2 için katalitik yanma sensörleri endüstriyel ortamlarda yaygın olarak kullanılır (sabit kurulumlu çoklu gaz kaçak dedektörleri gibi). Modern katalitik H_2 sensörlerinin, ömürlerini uzatmak için zehire dayanıklı katalizörler ve filtre membranları içerir. Örneğin, araştırmacılar, H_2 'nin içeri girmesine izin veren ancak daha büyük silikon içeren molekülleri dışarıda tutan gözenekli membranlı pelistörler geliştirdiler (yarı iletken fabrikaları gibi yerlerde siloksan zehirlenmesine karşı koruma

sağlamak için). Temel pelistör tasarımı büyük ölçüde değişmemiş olsa da, dayanıklılıklarını artırmak ve güç tüketimini azaltmak için kademeli olarak iyileştirmeye devam etmektedir (örneğin, daha az ısıtma gücü gerektiren silikon alt tabakalarda mikrofabiye pelistörler kullanmak). Son trendlerden biri, yedeklilik veya genişletilmiş aralık için aynı paketdeki başka bir sensörle bir pelistörü birleştirmektir; örneğin, bir termal iletkenlik sensörüyle eşleştirilmiş bir katalitik sensör, %0-100 H₂'yi kapsayabilir (katalitik kısım, yüksek hassasiyetle alt aralığı kapsar ve TCD, az oksijenin mevcut olduğu %100'e yakın hidrojeni kapsar) (Thomas Hübert vd., 2013).

Metal Oksit Yarı İletken (MOS) Hidrojen Sensörleri: Bu sensörler sürekli yenilikler görmüştür. Klasik bir örnek, 1970'lerden beri H₂ tespiti için kullanılan paladyum katkılı kalay oksittir. Son çalışmalar, daha yüksek yüzey alanları ve genellikle daha düşük çalışma sıcaklıklarında iyileştirilmiş hassasiyet sunan nanoyapılı oksitlere odaklanmaktadır. Örneğin, araştırmacılar oda sıcaklığında veya minimum ısıtma ile hidrojeni tespit edebilen Pd nanopartikülleriyle süslenmiş SnO₂ nanotelleri ve nanoçubuklar üretmişlerdir (Thomas Hübert vd., 2013). Bir çalışmada, yoğun bir çubuk dizisinden (yüzey reaksiyon yerlerini artıran) yararlanarak SnO₂ nanoçubuk sensörlerinin oda sıcaklığında bile 100 ppm H₂'ye yanıt verdiği bildirilmiştir. Başka bir gelişme ise alternatif oksitlerin kullanılmasıdır: Örneğin, Pt/Pd ile kaplanmış nanotel formundaki ZnO, 5-500 ppm aralığında iyi bir H₂ hassasiyeti göstermektedir (Thomas Hübert vd., 2013). Çalışmamızın odak noktası olan molibden trioksit (MoO₃), özellikle asil metallerle katkıldığında veya hetero yapılarda birleştirildiğinde H₂ algılama için bir diğer umut verici oksittir. (Thomas Hübert vd., 2013)

Paladyum Tabanlı Sensörler ve FET'ler: Paladyumun hidrojenle özel etkileşimi (PdH_x oluşturma) kapsamlı bir şekilde kullanılmıştır. Araştırma, H₂ varlığında direnç değişimleri olan ancak saf Pd'dan daha iyi çatlama direncine sahip paladyum-nikel alaşımlı ince film dirençleri gibi sensörlere yol açmıştır. Uzun vadeli kararlılığı ele almak için bazı araştırmacılar, kafes genişlemesini daha geri dönüşümlü bir şekilde karşılayabilen nano gözenekli paladyum veya Pd nanopartikülleri kullanırlar. Paladyumun silikon FET yapılarına (Pd-kaplı MOSFET'ler) dahil edilmesi, laboratuvar aletleri için ticarileştirmeyi de ilerletmiştir.

Hidrojen için Elektrokimyasal Sensörler: CO veya O₂ gibi diğer gazlara göre daha az yaygın olsa da, elektrokimyasal H₂ sensörleri (proton ileten elektrolitler veya katı oksit elektrolitler ile) geliştirilmiştir. Bir örnekte, oldukça seçici olan oda sıcaklığında bir H₂ yakıt hücresi sensörü yapmak için katı asit elektrolit (Nafion polimeri veya fosforik asit katkılı polibenzimidazol gibi) kullanılır. Son deneysel çalışmalar, sıcaklık aralığını ve kararlılığı genişletmek için hidrojen sensörlerinde elektrolit olarak iyonik sıvılara bakmıştır. Başka bir

değişken, yüksek sıcaklıkta (ör. 150–200 °C) amperometrik sensörlerde katı hal proton iletkenlerinin (belirli perovskit veya NASICON tipi malzemeler gibi) kullanılmasıdır ve bu, yüzde aralığında hidrojeni iyi seçicilikle tespit edebilir (çünkü diğer gazların çok azı proton üretir). Bu gelişmeler, polimer bazlı sensörlerin başarısız olacağı zorlu ortamlar (yüksek sıcaklıklı işlem akışları gibi) için sağlam H₂ sensörleri sağlamayı amaçlamaktadır.

Geçiş Metal Oksitler ve Özellikleri

Metal oksitler, bir metal elementinin oksijenle birleşerek oluşan kimyasal bileşiklerdir. Genellikle, bir metalin havadaki oksijenle tepkimeye girmesiyle meydana gelirler; ayrıca kimyasal sentez yöntemleriyle de üretilirler. Metal oksitler, kendilerine özgü özellikleri sayesinde pek çok farklı alanda kullanılır. Örneğin, bazı metal oksitler kimyasal reaksiyonları hızlandıran katalizörler olarak görev yaparken, diğerleri aşındırıcı veya pigment olarak işlev görmektedir. Ayrıca, metal oksitler seramik, cam ve emaye üretiminde de kullanılır. Metal oksidin özellikleri, kullanılan metalin türüne ve metalin bileşikteki oksidasyon durumuna bağlı olarak değişmektedir.

Geçiş metal oksitler, periyodik tablonun geçiş metallerinin oksijenle oluşturduğu bileşiklerdir. Bu bileşikler, kimyasal, fiziksel ve elektronik özellikleri nedeniyle geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır. Geçiş metallerinin d-orbitallerindeki elektron yapılandırmaları ve çoklu oksidasyon durumları, bu oksitlerin benzersiz özellikler sergilemesine neden olur.

Nanomalzemelerin üstün özelliklerini kullanan yeni elektrokimyasal sensörlerin geliştirilmesi araştırma alanlarında çok fazla ilgi görmüştür. Bu nanomalzemeler, dökme malzemelerle karşılaştırıldığında olağanüstü fiziksel, kimyasal, optik ve elektronik özellikleri nedeniyle önemli bir ilgi görmüştür (Agnihotri vd., 2021). Farklı şekil ve yapıdaki geçiş metali oksit nanopartikülleri çeşitli teknikler kullanılarak sentezlenmiştir. Bu metal oksit nanopartikülleri, boyutları, şekilleri, kararlılıkları ve daha büyük yüzey alanları nedeniyle iyi elektriksel ve fotokatalitik özelliklere sahiptir. Biyouyumlu geçiş metali oksit nanopartikülleri genellikle immünosensörler, DNA ve enzim sensörleri üretmek için biyomolekülleri hareketsizleştirmek için kullanılır ancak yarı iletken metal oksit nanopartikülleri genellikle elektrokimyasal analizde izleyiciler ve işaretleyiciler olarak kullanılır (Agnihotri vd., 2021). Çalışma elektrot yüzeyleri, fiziksel adsorpsiyon, elektropolimerizasyon, kovalent bağlama ve elektrokaplama teknikleri kullanılarak metal oksit nanopartikülleri ile etkili bir şekilde modifiye edilebilir (Agnihotri vd., 2021).

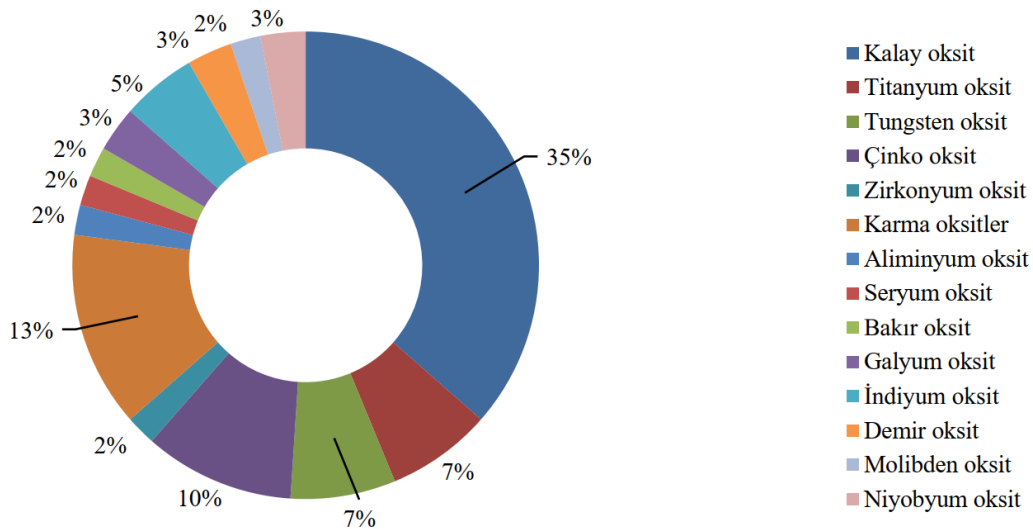
Mirzaei ve diğ. (Mirzaei vd., 2018) mevcut en son teknolojiye sahip H₂S kondüktometrik metal oksit gaz sensörlerini gözden geçirmişlerdir. Metal oksit sensörler için H₂S algılama mekanizması açıklanmıştır.

Fazio ve diğ. (Fazio vd., 2021) toksik gazları (H₂, CO, NO₂) ve uçucu organik bileşikleri (örn. aseton) tespit etmek için kullanılan katkılı SnO₂, RhO, ZnO-Ca, Smx-CoFe₂-xO₄ yarı iletkenlerine dayanan yüksek hassasiyetli kemorezistif tip sensörlere odaklanmışlardır.

Tereshkov ve diğ. (Tereshkov vd., 2024) metal oksit bazlı sensörler kullanılarak çevresel izlemeyle ilgili son gelişmelerin geniş bir kapsamını sunmuşlardır. H₂, CO_x, SO_x, NO_x ve CH₄ gibi gazların tespiti ile ilgili çalışmaları incelemişlerdir. Sensör tasarımı ve metal oksit algılama malzemelerinin çeşitlerine ilişkin gelişmeler ve analizler yapmışlardır.

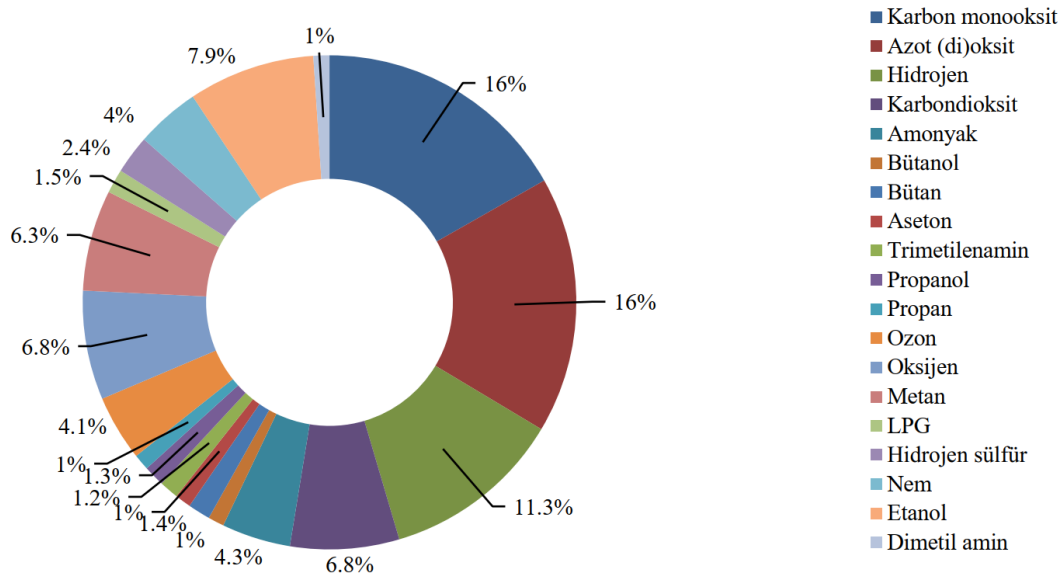
Chen ve diğ. (H.-I. Chen vd., 2018) Pd/HfO₂/GaN bazlı metal oksit yarı iletken (MOS) tipi Schottky diyot üretmek için püskürtme yaklaşımı kullanılarak hazırlanan bir hafniyum oksit (HfO₂) katmanı kullanmışlardır. Bu MOS diyotun hidrojen algılama özellikleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Deneysel olarak, 300 K'de %1 H₂/hava gazına maruz bırakıldığında, incelenen cihaz, uygulanan 0,5 V(-2 V) ileri (geri) voltaj altında $4,9 \times 10^5$ (139) değerinde daha yüksek bir algılama tepkisi göstermiştir. 5 ppm H₂/hava'lık daha düşük bir tespit limiti elde edilmiştir.

Literatürde yapılan araştırmalar incelendiğinde gaz sensör uygulamalarında metal oksitlerin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir (İncegöl vd., 2022). Şekil 10'da gaz sensör uygulamalarında kullanılan metal oksit yüzdeleri verilmiştir.



Şekil 10. Gaz sensör uygulamalarında kullanılan metal oksit yüzdeleri (İncegöl vd., 2022)

Metal oksit sensörler kullanılarak belirlenen gaz yüzdeleri Şekil 11'de gösterilmiştir (İncegöl vd., 2022).



Şekil 11. Metal oksit sensörler kullanılarak belirlenen gaz yüzdeleri (İncegöl vd., 2022)

Molibden Oksit (MoO₃) Yapısı Özellikleri ve Sensördeki Rolü

MoO₃'nin Yapısı ve Fazları: Molibden trioksit, bir geçiş metali oksittir. Ortam koşullarında MoO₃'nin en kararlı formu, ortorombik bir kristal yapıya sahip olan α -MoO₃ fazıdır. α -MoO₃, iki boyutlu tabakalar oluşturmak için kenarları ve köşeleri paylaşan MoO₆ oktahedra katmanlarından oluşur. Bu tabakalar, katmanlar arasında yalnızca zayıf van der Waals kuvvetleriyle kristalin c ekseni boyunca istiflenir (Malik vd., 2021). Bu katmanlı yapı, α -MoO₃ kristalitlerinde belirgin bir pul veya plaka benzeri morfoloji oluşturur. Ayrıca MoO₃'nin katmanlar arasında küçük moleküllerin veya iyonların yerleştirilmesine olanak sağlayabileceği anlamına gelir (elektrokromikte ve pillerde kullanılan bir özellik). MoO₃'nin diğer fazları arasında β -MoO₃ (monoklinik, metastabil) ve h-MoO₃ (hekzagonal, genellikle bir hidrat) bulunur. β -MoO₃ daha az yaygındır. Ancak belirli biriktirme koşulları altında oluşabilir. MoO₃ üçgen prizmalarından oluşur. Genellikle ince film birikintilerinde veya bir ara madde olarak oluşur. Sensör çalışmalarında, kesin faz önemlidir. Çünkü α -MoO₃ ve β -MoO₃ farklı yüzey yönelimlerine ve algılama davranışını etkileyebilecek kusurlu yapılara sahiptir. Tipik olarak, α -MoO₃ istenir ve genellikle (0k0) düzlemlerine karşılık gelen X-ışını kırınımı tepeleriyle doğrulanır (Cebisli vd., t.y.).

Elektronik Özellikler: MoO₃ geniş bant aralıklı n-tipi yarı iletkenidir (α -MoO₃ için bant aralığı ~2,9–3,2 eV) (Malik vd., 2021). MoO₃ aslında bir yalıtkandır, ancak genellikle oksijen boşlukları veya hafif alt-stokiyometrik (genellikle MoO_{3-x} olarak yazılır) nedeniyle n-tipi iletkenlik sergiler. MoO₃'deki oksijen boşlukları donör bölgeleri olarak işlev görür (O eksik olduğunda etkili bir şekilde Mo⁵⁺ merkezleri oluşur). Stokiyometriden küçük bir sapma bile donör seviyeleri ve serbest elektronlar getirerek malzemeyi yarı iletken hale getirebilir. Ek

olarak, MoO_3 kısmen indirgendığında veya katyonlar ara katıldığında (H_xMoO_3 , Li_xMoO_3 , vb.) daha yüksek iletkenliğe sahip Magnéli fazları veya "molibden bronzları" oluşturabilir. Bu, MoO_3 'nin iletkenliğinin oksijen içeriğine ve herhangi bir katkı maddesine veya ara türe karşı oldukça hassas olduğu anlamına gelir.

MoO_3 ile Gaz Algılama: Bir gaz sensörü olarak MoO_3 , özellikle hidrojen, amonyak ve bazı uçucu organik bileşikler algılama hasasiyeti ile ilgi görmüştür. Mekanizmaları diğer n tipi metal oksitlere benzerdir.

İnce Film Kaplama Yöntemleri

İnce film kaplama yöntemleri, malzemelerin düzgün katmanlarını (nanometreden birkaç mikrometre kalınlığa kadar) alt tabakalara biriktirmek için kullanılan tekniklerdir. Gaz sensörleri (MoO_3 ince film sensörleri gibi) üretme bağlamında, uygun bir ince film biriktirme yöntemi seçmek çok önemlidir. Çünkü filmin bileşimini, mikro yapısını etkiler ve bu da sensör performansını etkiler. İnce film üretim teknikleri genel olarak iki kategoriye ayrılır: fiziksel biriktirme ve kimyasal biriktirme (Sakthinathan vd., 2025). Aşağıda, geçiş metal oksit filmleriyle ilgili kaplama yöntemlerinin isimlerinden bahsediyoruz.

Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD): PVD işlemleri, bir kaynaktan fiziksel olarak malzemeyi dışarı atmayı ve bunun ince bir film olarak alt tabaka üzerinde yoğunlaşmasını içerir (Sakthinathan vd., 2025).

Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD): CVD, istenen katı filmi oluşturmak için alt tabakadaki buhar fazı öncüllerinin kimyasal reaksiyonlarını içerir (Sakthinathan vd., 2025).

Sol-Jel ve Spin Kaplama: Sol-jelde, metali içeren sıvı bir öncül çözelti (bir molibdat tuzu gibi) alt tabaka üzerine biriktirilir (genellikle spin kaplama veya daldırma kaplama ile) ve ardından oksit filmi oluşturmak için ısıtılma işlemi tabi tutulur (Gothe & Sutrave, 2019; Jain vd., 2021). MoO_3 için, yaygın bir sol-jel yolu, bazen katkı maddeleriyle birlikte, su veya etanolde çözülmüş amonyum molibdat ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) kullanır, bir alt tabaka üzerine biriktirilir ve ardından MoO_3 'ye dönüştürmek için kalsine edilir (Arasu & Williams, 2017). Spin kaplama, çözeltiyi alt tabaka üzerine damlatmayı ve ince yaymak için yüksek hızda döndürmeyi içerir; kurutma ve pişirme işleminden sonra bir film oluşur. Bu yöntem nispeten basittir ve geniş alanları kaplayabilir. Filmlerin yoğunlaşması ve kristalleşmesi için genellikle birkaç yüz °C'de tavlama gerekir. Sol-jel türevi MoO_3 filmleri gözenekli veya nanokristalin mikro yapılar üretebilir (sol ve tavlama bağlı olarak) ve bu da algılama için avantajlı olabilir (daha fazla yüzey alanı). Ancak, hassas kalınlık kontrolü ve tekdüzelik elde etmek PVD/CVD'den daha zor olabilir; daha kalın filmler için birden fazla kat gerekebilir.

MATERYAL VE METOT

Bu tezde PdCl_2 aşılı MoO_3 çözeltileri hazırlanmış ve kuartz altlık üzerine spin kaplama tekniği ile ince film oluşturulmuştur. Oluşturulan ince film üzerine Ag IDE elektrot uygulaması termal buharlaştırma sisteminde yapılmıştır. Elde edilen ince filmlere 460°C derecede 3 dakika süreyle tavlama işlemine uygulanmıştır.

Materyal Özellikleri

Bu çalışmada, hidrojen gazını algılama hassasiyetini arttırmak amacıyla farklı oranlarda PdCl_2 aşılı MoO_3 çözeltileri hazırlanmıştır. İlk aşamada, 1 molar konsantrasyonda molibden trioksit MoO_3 çözeltisi hazırlanmıştır. MoO_3 tozu, çözücü olarak %100 saf etanol içerisinde manyetik karıştırıcı yardımıyla homojen bir çözelti elde edilene kadar karıştırılmıştır. Aynı şekilde, 1 molar konsantrasyonda paladyum klorür (PdCl_2) çözeltisi de etanol içerisinde hazırlanmıştır.

Hazırlanan MoO_3 çözeltisi sabit tutulup, 10 ml olarak ayarlanmıştır. Çözeltiye sırasıyla 0.3 ml, 0.5 ml ve 0.7 ml hacimlerinde PdCl_2 çözeltisi eklenerek üç farklı Pd katkı oranına sahip çözeltiler elde edilmiştir. Elde edilen çözeltiler, önceden temizliği gerçekleştirilen kuartz yüzeyler üzerine spin kaplama yöntemi ile ince film uygulanmıştır. Kuartz yüzeyler ultrasonik temizleyici içinde önce 10 dakika boyunca ispropanol ile karıştırılmıştır. Daha sonra bu işlemten sonra 10 dakika etanolde temizlenerek azot gazıyla kurutularak temizleme işlemi tamamlanmıştır. Temizlenmiş uygun altlıklar üzerine spin kaplama (spin coating) yöntemi ile kaplanmıştır. Spin kaplama işlemi sırasında her numune için altlık üzerine toplamda beş damlatma uygulanmıştır. Her damlatmadan sonra 1000 rpm dönüş hızında 5 dakika süreyle spin kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Spin kaplama yöntemi uygulanan her numunede kaplama parametreleri sabit tutulup, sadece çözelti bileşimleri farklılık göstermiştir. Bu şekilde uygulanan yöntemle homojen ve tekrarlanabilir ince film elde edilmesi amaçlanmıştır. Kimyasal aşılama yöntemiyle elde edilen çözelti, spin kaplama tekniği ile kuartz altlık üzerine kaplanmıştır. Elde edilen ince filmler 500°C derecede 20 dakika süreyle tavlama işlemine uygulanmıştır ve sonrasında Ag IDE elektrot uygulaması termal buharlaştırma sisteminde yapılmıştır. Elektrot işlemi tamamlandıktan sonra ince filmin yapısal bütünlüğünü sağlamak ve atomlar daha düzenli hale getirip, kristallik artar. Bu da daha kararlı ve tepkisel yüzeyler oluşturur. Elde edilen numuneler A, B ve C sırasıyla 0.3 ml, 0.5 ml ve 0.7 ml hacimlerinde PdCl_2 çözeltisi ile katkılanmıştır. Bu numunelere ait örnek görseller Şekil 12’de verilmiştir.



Numune A
(0.3 ml PdCl₂ aşılı)



Numune B
(0.5 ml PdCl₂ aşılı)



Numune C
(0.7 ml PdCl₂ aşılı)

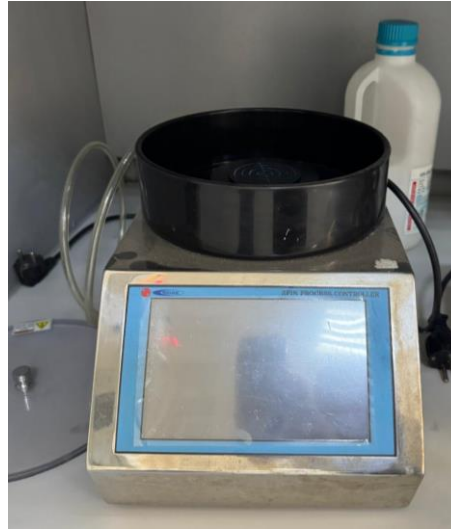
Şekil 12. Numunelere ait örnek görüntüler

Spin Kaplama Yöntemi

Spin kaplama, düz alt tabakalar üzerinde düzgün ince filmler üretmek için malzeme bilimi ve mikrofabrikasyonda yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Özellikle metal oksitler, polimerler ve nanomalzemeler gibi çözelti bazlı malzemelerin biriktirilmesi için uygundur ve basitliği, düşük maliyeti ve yüksek tekrarlanabilirliği nedeniyle değerlidir.

Spin kaplama prensibi

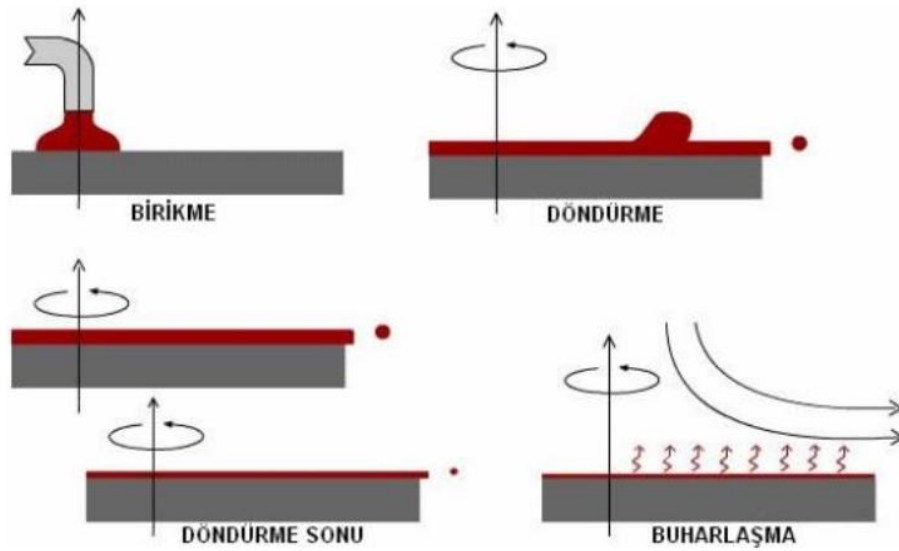
Spin kaplama işlemi, sıvı öncül solüsyonunu yüzeyine eşit şekilde yaymak için dönen bir substrat tarafından oluşturulan santrifüj kuvvetine dayanır. Substrat dönerken, sıvı radyal olarak yayılır ve hem santrifüj kuvvetleri hem de çözücü buharlaşması nedeniyle inceler. Bu, tekdüze, kontrol edilebilir ince bir filmin oluşumuyla sonuçlanır. Tez çalışmasında kullanılan Spin kaplama cihazı Şekil 13'te görsel olarak verilmiştir.



Şekil 13. Tez çalışmasında kullanılan spin kaplama cihazı

Spin kaplama işleminin adımları

Spin kaplama yönteminin temel adımları Şekil 14’te gösterilmiştir.



Şekil 14. Spin kaplama tekniğinin uygulama adımları (Akkoyunlu, t.y.)

Alt Tabaka Hazırlama: Alt tabaka (örn. kuartz, silikon, cam) önce kirleticileri gidermek için çözücüler (örn. aseton, etanol) veya plazma/UV-ozon işlemi kullanılarak temizlenir. Bu, filmin iyi yapışmasını sağlar ve kusurları önler.

Çözelti Dağıtımı: Küçük bir hacimde kaplama çözeltisi (örn. molibden oksit öncüsü) alt tabakanın merkezine damlatılır veya pipetlenir. Çözelti miktarı, istenen film kalınlığına ve alt tabaka boyutuna bağlıdır.

Döndürme: Alt tabaka, genellikle birkaç saniye boyunca (genellikle 30-60 saniye) 1000 ila 8000 rpm arasında değişen hızlarda hızla döndürülür. Spin profili bir veya daha fazla adımdan oluşabilir:

Daha düşük rpm'de ilk yayılma (örn. 500–1000 rpm)

Daha yüksek rpm'de son inceltme ve kurutma (örn. 3000–6000 rpm)

Çözücü Buharlaşması ve Film Oluşumu: Eğirme sırasında, çözeltideki çözücü buharlaşır ve katı ince bir filmin birikmesine yol açar. Buharlaşma hızı, ortam sıcaklığı, nem ve çözücü uçuculuğu gibi faktörlere bağlıdır.

Biriktirme Sonrası İşlem (Tavlama): Spin kaplamadan sonra, film genellikle kristallliği iyileştirmek, organik kalıntıları gidermek veya oksit oluşumunu desteklemek için termal tavlama gerektirir (örn. bir sol-jel öncüsünden MoO_3).

Film kalitesini etkileyen parametreler

Birkaç faktör, spin kaplamalı filmin son kalınlığını, düzgünlüğünü ve morfolojisini etkilemektedir. Tablo 6’da spin kaplama kalitesini etkileyen faktörler açıklanmıştır.

Tablo 6. Spin Kaplama Kalitesini Etkileyen Faktörler

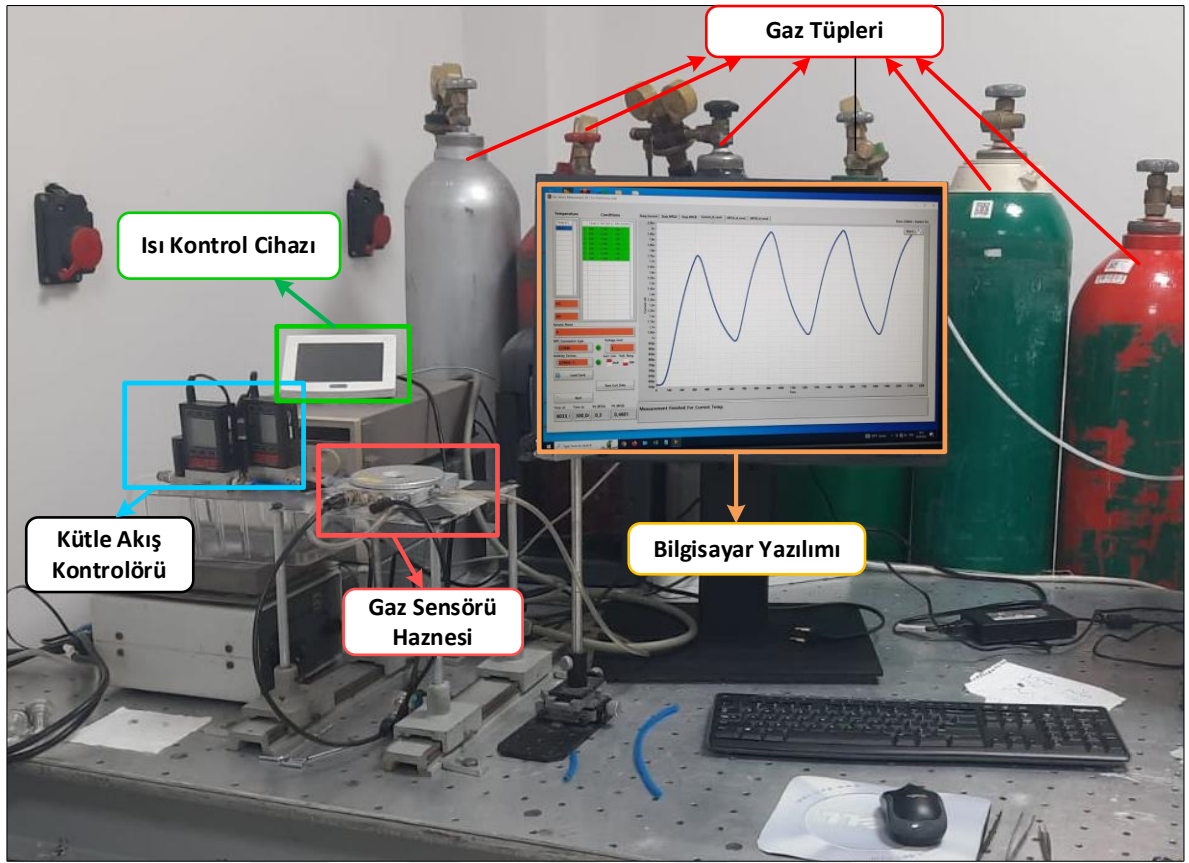
Parametre	Etkisi
Dönme hızı (rpm)	Daha yüksek hızlar daha ince filmlerin elde edilmesini sağlar.
Dönme zamanı	Daha uzun süreler daha fazla çözücünün buharlaşmasına ve daha iyi homojenliğe olanak sağlar.
Çözelti Viskozitesi	Daha viskoz çözeltiler daha kalın filmler üretir.
Çözücü Volatilitesi	Hızlı buharlaşan çözücüler kuruma süresini kısaltır ancak kenar etkilerine neden olabilir.
Çevre Koşulları	Sıcaklık ve nem buharlaşma hızını ve film gerilimini etkiler.

Spin kaplamanın avantajları

Düz yüzeyler üzerinde oldukça düzgün filmler üretir. Basit ve uygun maliyetli bir işlemdir. Kolayca kontrol edilen film kalınlığı (genellikle nanometre ile mikrometre aralığında). Araştırma ve endüstriyel uygulamalar için ölçeklenebilir. Sensör aygıtlarında kullanılan oksit ince filmler için uygundur.

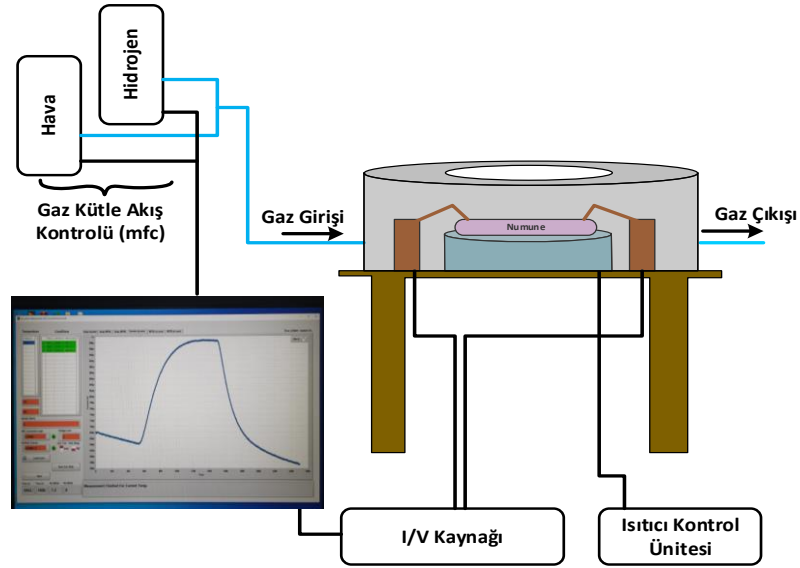
Gaz Sensörü Ölçüm Sistemi

Tez kapsamında kuartz altlık üzerine oluşturulan MoO_3 sensörleri laboratuvar ortamında gaz ölçümleri test edilmiştir. Gaz ölçüm sistemi iki adet kütle akış kontrolü, gaz sensör haznesi, ısı kontrol cihazı ve bilgisayar yazılımından oluşmaktadır. Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü laboratuvarında kullanılan gaz sensörü ölçüm sistemi Şekil 15’te açıklanmıştır.



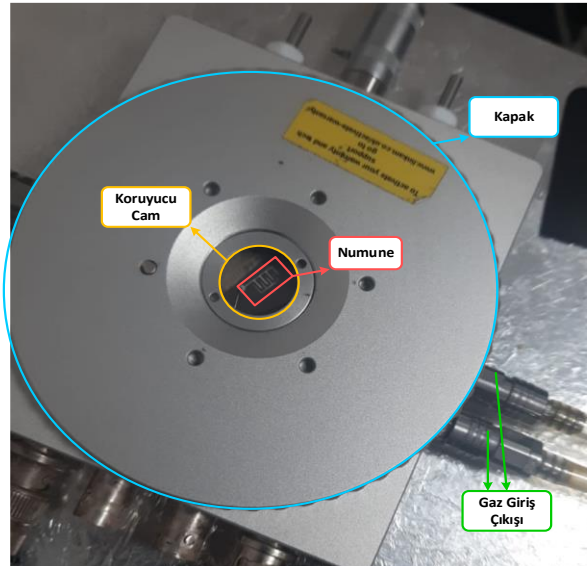
Şekil 15. Laboratuvarında kullanılan gaz sensörü ölçüm sistemi

Şekil 15'te verilen gaz sensör ölçüm sisteminde MoO_3 tabanlı hidrojen gaz tespit sensörlerinin davranışları test edilmiştir. Tez kapsamında toplamda 3 adet numune için istenilen değerlerde ölçümler elde edilmiştir. Bu numuneler A, B ve C numuneleridir. Her numune için $200\text{ }^\circ\text{C}$ ve $250\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta 100, 500 ve 1000 ppm için ölçülmüştür. Öncelikle numunelerin hidrojen gazına olan tepkilerini ölçmek için kuru hava ve hidrojen gazları belirli bir oranda ve zaman boyunca verilmesi gerekmektedir. Bu işlemin periyodik olarak yapılması sırasında oluşacak akım değişimi sensörün hidrojen gazına olan tepkisini ifade etmektedir. Laboratuvar ortamında kullanılan gaz sensörü ölçüm sisteminin şematik çizimi Şekil 16'da sunulmuştur.



Şekil 16. Laboratuvar ortamında kullanılan gaz sensörü ölçüm sisteminin şematik çizimi

Şekil 16’da görüldüğü gibi örnek sensör numuneleri gaz sensörü haznesine yerleştirilmektedir. Daha sonra bilgisayar yazılımı üzerinden sensörl kaç saniye kuru hava ve kaç saniye hidrojen gazı verileceği belirlenmektedir. Aynı zamanda gaz sensör haznesinin sıcaklık değeri ve hidrojen gazının ppm değerleri belirlenerek sistem çalıştırılmaktadır. Belirtilen zaman içerisinde sensöre etki ettirilen hidrojen gazı ve kuru hava oranına göre sensör üzerindeki akım değişimleri ölçülmektedir. Böylece sensörün hidrojen gazına olan tepkisi ölçülmektedir. Gaz sensör ölçüm haznesinin laboratuvar görüntüsü Şekil 17’de verilmiştir.



Şekil 17. Gaz sensör ölçüm haznesinin laboratuvar görüntüsü

Tez kapsamında oluşturulan MoO_3 tabanlı hidrojen sensör numuneleri Şekil 16’da gösterilen gaz sensör ölçüm haznesi içerisine bırakılmaktadır. Numunelerin kontak uçlarına ölçüm cihazının pinleri temas ettirilmekte ve vakumlu ölçüm kapağı kapatılmaktadır. Bilgisayar yazılımında belirtilen süre ve ppm değerlerine göre sistem çalıştırılmaktadır.

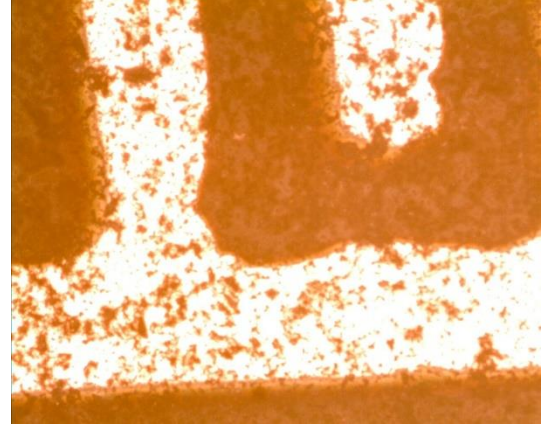
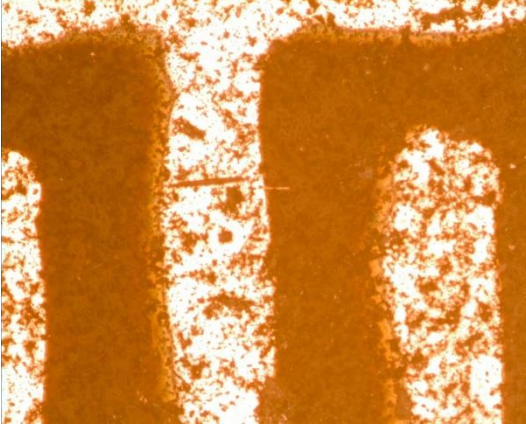
ARAşTIRMA BULGULARI

Tez kapsamında oluşturulan A, B ve C numunelerinin kontak görselleri, XRD sonuçları ve gaz sensör ölçüm grafikleri elde edilmiştir. Öncelikle numunelerin kontaklarının doğru bir şekilde yapıldığı incelenmiştir. Bunun için Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Laboratuvarlarında bulunan Nikon Eclipse MA100 marka mikroskop ile yapılan kontakların yapısı incelenmiştir. Laboratuvarda bulunan Nikon Eclipse MA100 marka mikroskop ile numunelere ait kontak ölçüm görüntüleri şekil 18’de verilmiştir.

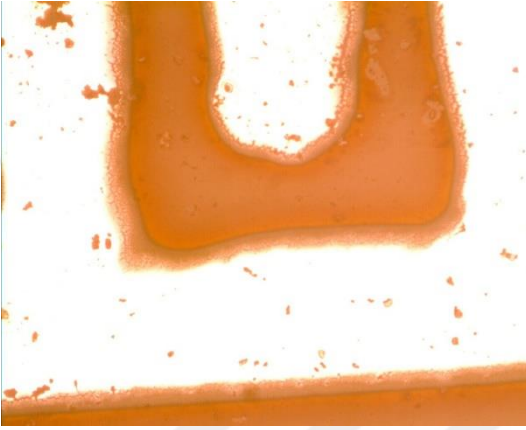


şekil 18. Laboratuvarda bulunan Nikon Eclipse MA100 marka mikroskop ile numunelere ait kontak ölçüm görüntüleri

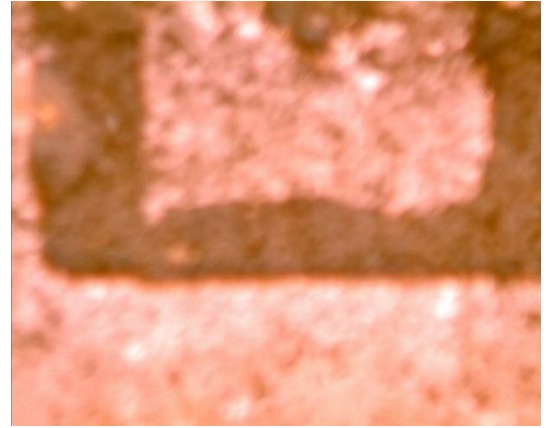
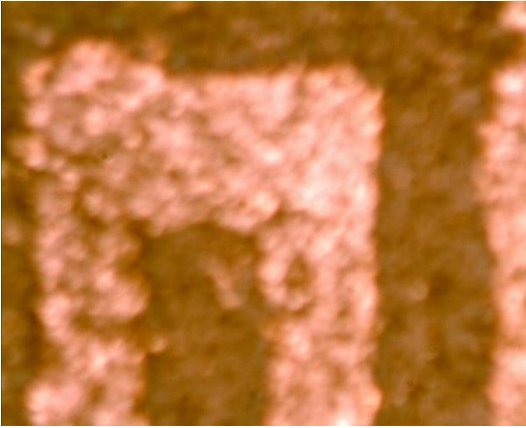
şekil 18’de verilen Laboratuvarda bulunan Nikon Eclipse MA100 marka mikroskop ile numunelere ait kontak ölçümü yapılmıştır. Numune A, Numune B ve Numune C’ye ait örnek 5x mikroskop görüntüleri şekil 19’da verilmiştir.



Numune A



Numune B



Numune C

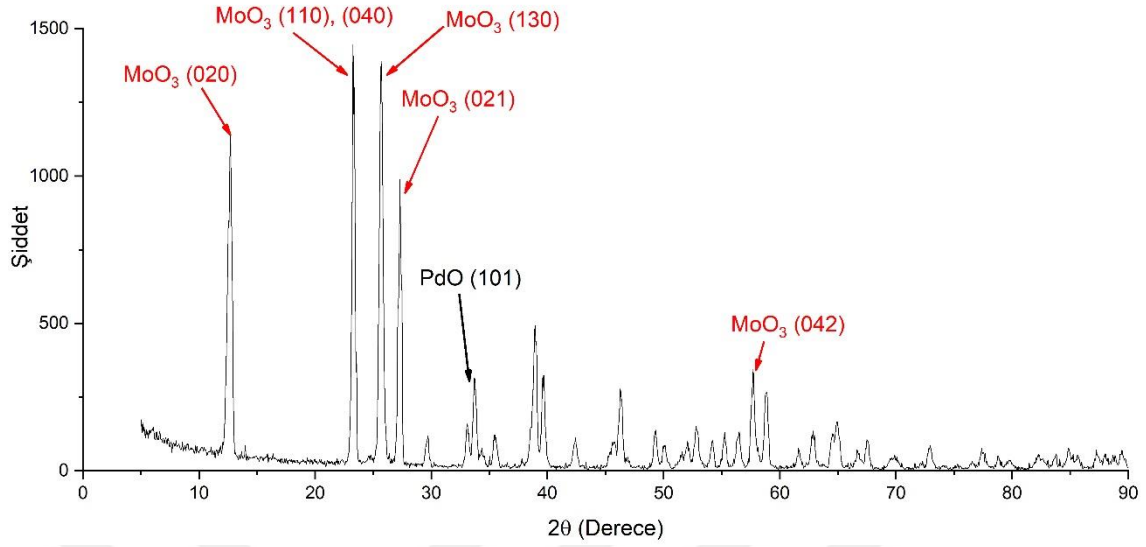
Şekil 19. Numune A, Numune B ve Numune C'ye ait örnek 5x mikroskop görüntüleri

Şekil 19'da örnek görsellerdeki gibi numunelerin kontak yapıları detaylı bir şekilde incelenmiş herhangi bir sorun olmadığı, gaz ölçümleri için uygun olduğu görülmüştür.

X-Işını Kırınımı (XRD) Ölçüm Sonuçları

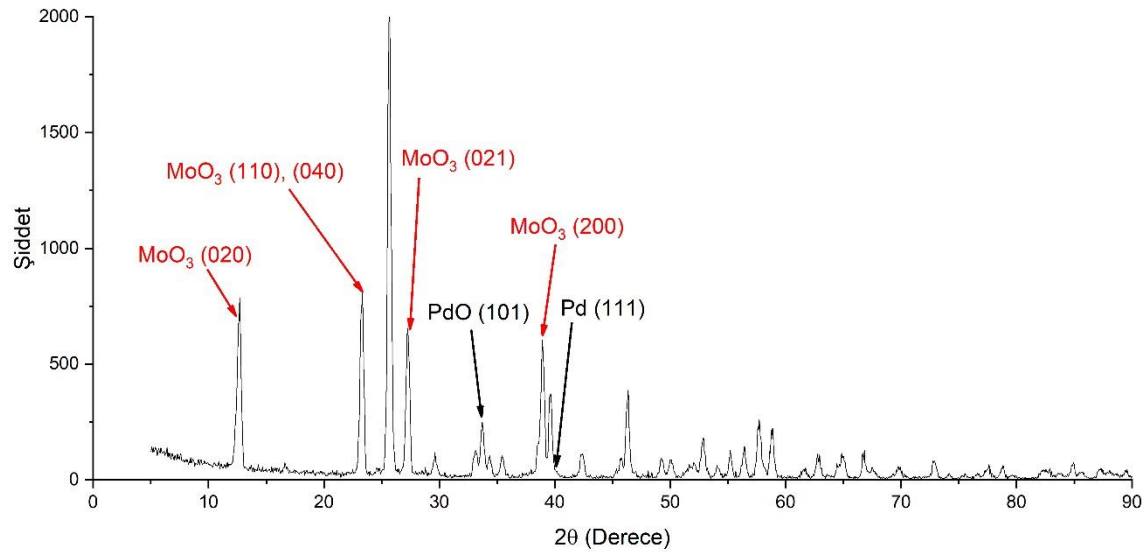
Numunelerin kristal yapısal özellikleri hakkında bilgi sahibi olmak için XRD ölçümleri alınmıştır. Bu işlem DAYTAM'da bulunan (Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve

Araştırma Merkezi) PANalytical Empyrean XRD cihazı ile ölçülmüştür. Numune A'ya ait ölçülen XRD grafiği Şekil 20'de verilmiştir.



Şekil 20. Numune A ya ait XRD grafiği

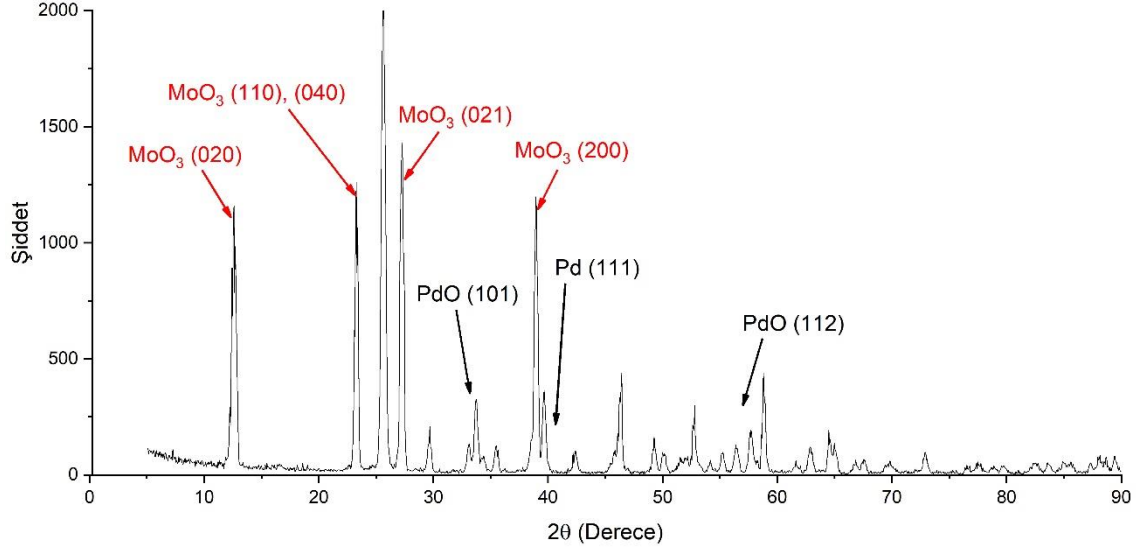
Şekil 20'de verilen A numunesine ait XRD grafiği incelendiğinde MoO₃, Pd ve PdO katkılarına ait fazları görülmüştür. 12.9°'de MoO₃ (020) fazı, 23.3°'de MoO₃ (110), (040) fazı, 25.6°'de MoO₃ (130) fazı, 27.3°'de MoO₃ (021) fazı ve 57.71°'de MoO₃ (042) fazı ölçülmüştür. Ayrıca 33.2°'de PdO (101) fazı görülmüştür. Bu kırınımalar, JCPDS 05-0508 (MoO₃) (α -Ortorombik) ve 41-1107 (PdO) kartlarıyla uyumlu olup, sentezlenen yapının yüksek kristallığe sahip çok fazlı bir yapıda olduğunu göstermektedir. Aynı şekilde Numune B'ye ait XRD grafiği Şekil 21'de, Numune C'ye ait XRD grafiği Şekil 22'de verilmiştir.



Şekil 21. Numune B ye ait XRD grafiği

Şekil 21'de görüldüğü gibi yüksek şiddetli kırınım piklerine dayalı analizde, sentezlenen numunenin kristal yapısında α -MoO₃, Pd ve PdO fazlarının birlikte bulunduğu görülmektedir.

α -MoO₃'ün (020), (110)/(040), (021) gibi güçlü pikleri, ortorombik yapıyı doğrulamaktadır. Pd (111) ve PdO (101) pikleri ise platin grubu bileşenlerin hem metalik hem de oksit formda bulunduğunu göstermektedir. Analiz edilen B numunesinin α -MoO₃ (JCPDS 05-0508), Pd (JCPDS 05-0681) ve PdO (JCPDS 41-1107) fazlarını içermektedir.

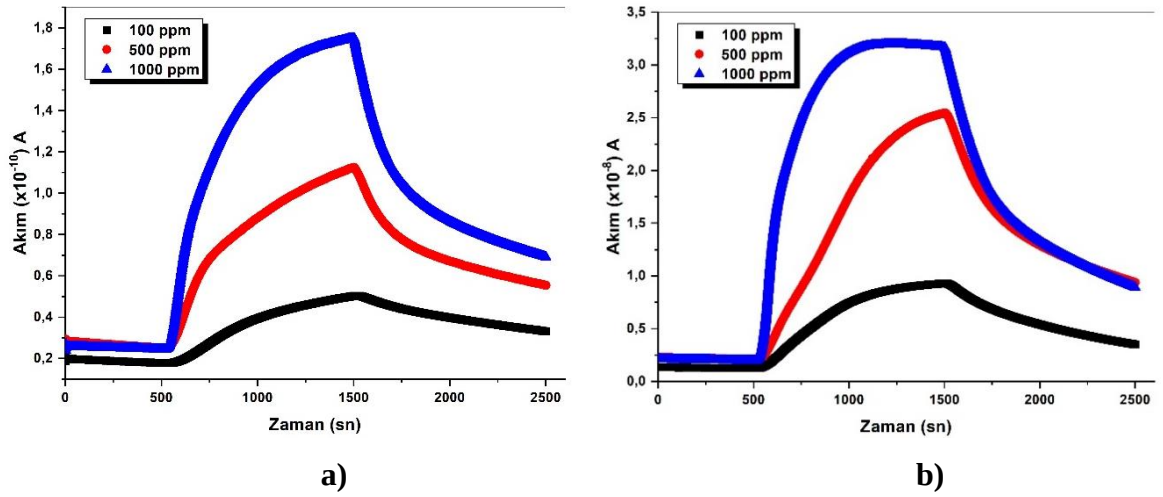


Şekil 22. Numune C ye ait XRD grafiği

Şekil 22’de Bu XRD deseninde şiddeti yüksek olan pikler dikkate alındığında, analiz edilen malzemenin ağırlıklı olarak α -MoO₃, Pd ve PdO fazlarını içerdiği görülmektedir. C numunesinin α -MoO₃ (JCPDS 05-0508), Pd (JCPDS 05-0681) ve PdO (JCPDS 41-1107) fazlarını içermektedir.

Gaz Sensörü Ölçüm Sonuçları

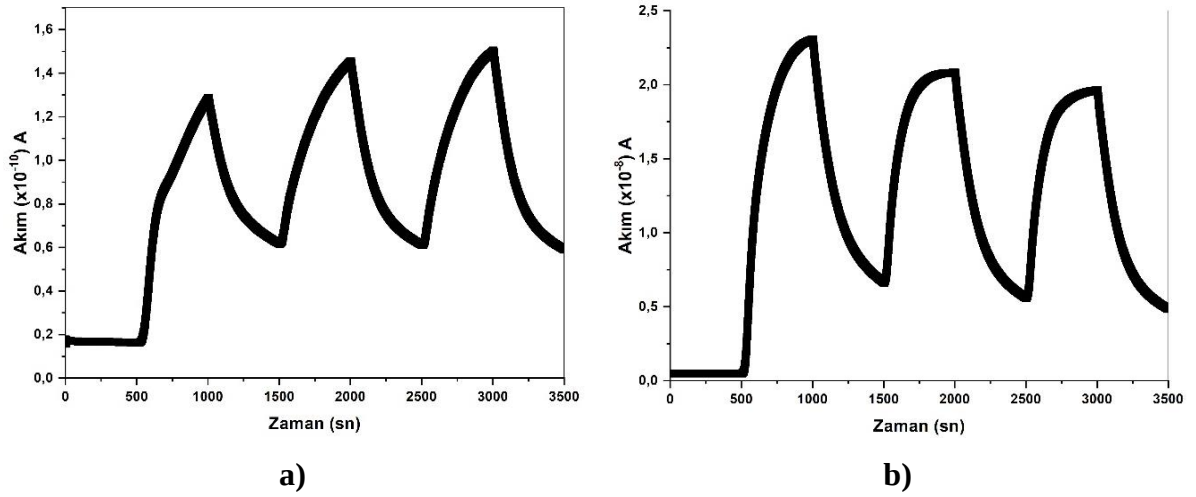
Numunelerin hidrojen gazına vermiş oldukları tepkileri ölçmek için gaz sensör ölçüm cihazı kullanılmıştır. Cihaz üzerine kontaklar aracılığıyla sabitlenen numuneler için 2500 saniyelik bir senaryo oluşturulmuştur. 0-500 saniye arasında numunelere kuru hava verilmiştir. 500-1500 saniye arasında numunelere 100ppm, 500ppm ve 1000ppm’lik hidrojen gazı-kuru hava verilmiştir. 1500-2500 saniye aralığında ise tekrardan kuru hava verilmiştir. Bu işlem 200°C ve 250°C için tekrarlanmıştır. A Numunesine ait 100,500 ve 1000ppm gaz ölçüm grafikleri Şekil 23’te verilmiştir.



Şekil 23. A Numunesine ait 100,500 ve 1000 ppm gaz ölçüm grafikleri **a)** 200°C **b)** 250°C

Şekil 23'te görüldüğü gibi 200°C ve 250°C sıcaklıklar için farklı H_2 konsantrasyonuna maruz kaldığında 100ppm, 500ppm ve 1000ppm değerleri için sonuçlarının birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Sensör, daha yüksek H_2 konsantrasyonuna maruz kaldığında daha fazla yük taşıyıcısı (elektron/iyon) üretilir veya iletkenliği artar. Bu da akımda gözle görülür bir artışa neden olur. 200°C'de numunenin akım değerleri 100ppm, 500ppm ve 1000ppm için 0.2×10^{-10} A ile 1.8×10^{-10} A arasında değişmektedir. 250°C'de numunenin akım değerleri ise 0.1×10^{-8} A ile 3.5×10^{-8} A arasında değişmektedir. 250°C'de elde edilen akım değerleri 200°C'deki ölçüm ile kıyaslandığında daha yüksek akım değerine sahip olduğu görülmektedir. Numunenin 200°C'deki ölçümünde 100ppm, 500ppm ve 1000ppm değerleri için sırasıyla 776, 761 ve 581 saniye tepki süreleri hesaplanmıştır. 250°C'deki ölçümünde ise sırasıyla 668, 731 ve 358 saniye tepki süreleri hesaplanmıştır. Tepki süreleri bakımında ölçümler kıyaslandığında 200°C'deki ölçüm ile daha kararlı bir tepki süresi hesaplanmıştır. En düşük tepki süreleri 1000ppm ile hesaplanmıştır.

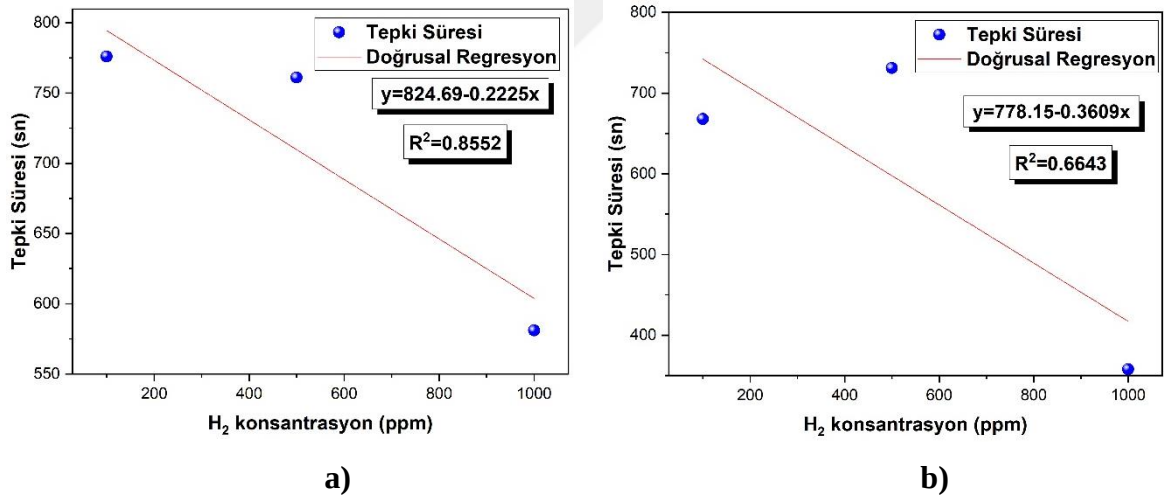
Numunelerin periyodik olarak test edilmesi ve döngü grafiğinin elde edilebilmesi için sırasıyla 500 saniye hidrojen gazı-kuru hava ve 500 saniye ise sadece kuru hava verilerek ölçüm yapılmıştır. A Numunesine ait 1000ppm gaz döngüsü grafikleri Şekil 24'te sunulmuştur.



Şekil 24. A Numunesine ait 1000ppm gaz döngüsü grafikleri **a)** 200°C **b)** 250°C

Şekil 24'te görüldüğü gibi numunelere 0-500 saniye sadece kuru hava verilmiştir. Daha sonra sırasıyla 500 saniye hidrojen gazı-kuru hava ve 500 saniye ise sadece kuru hava verilerek 3 döngü halinde uygulanmıştır. Elde edilen ölçümler kıyaslandığında döngülerin kararlı bir yapıda olduğu görülmektedir.

Numunelerin 100ppm, 500ppm ve 1000ppm için tepki süreleri hesaplanarak aralarındaki ilişki incelenmiştir. A Numunesine ait tepki süresi grafikleri Şekil 25'te verilmiştir.

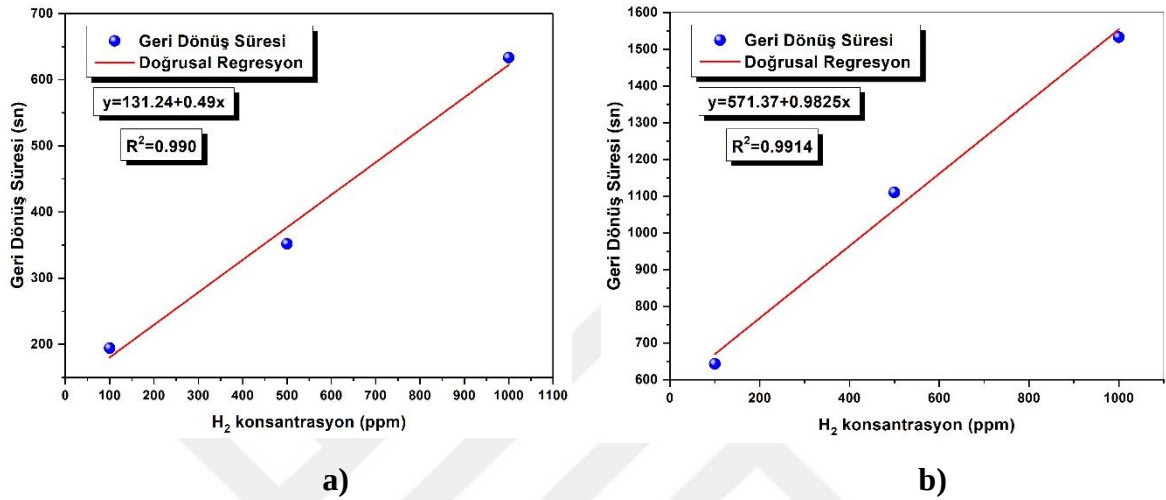


Şekil 25. A Numunesine ait tepki süresi grafikleri **a)** 200°C **b)** 250°C

Şekil 25'te görüldüğü gibi 200°C ve 250°C sıcaklık değerlerinde alınan ölçüm sonuçları kullanılarak tepki süreleri arasındaki ilişki analiz edilmiştir. 200°C sıcaklık için ölçülen tepki süreleri dikkate alınarak lineer bir doğru elde edilebileceği gösterilmiştir. Oluşturulan lineer doğrunun R^2 değeri ise 0.8552 olarak hesaplanmıştır. 250°C sıcaklık ile ölçülen tepki sürelerinde ise oluşturulan lineer doğrunun R^2 değeri ise 0.6643 olarak hesaplanmıştır. 200°C'de elde edilen ölçüm için tepki süreleri dikkate alındığında LOD (Limit of Detection) değeri yaklaşık 33.70 ppm olarak hesaplanmıştır. LOD değeri hedef gazı ayırt edilebilir

düzeyde tespit edebildiği en düşük konsantrasyon seviyesidir. Bu sonuç, sensörün 33.70 ppm üzerindeki H₂ konsantrasyonlarını güvenilir şekilde algılayabildiğini göstermektedir. 250°C’de elde edilen ölçüm için tepki süreleri dikkate alındığında LOD değeri yaklaşık 20.78 ppm olarak hesaplanmıştır.

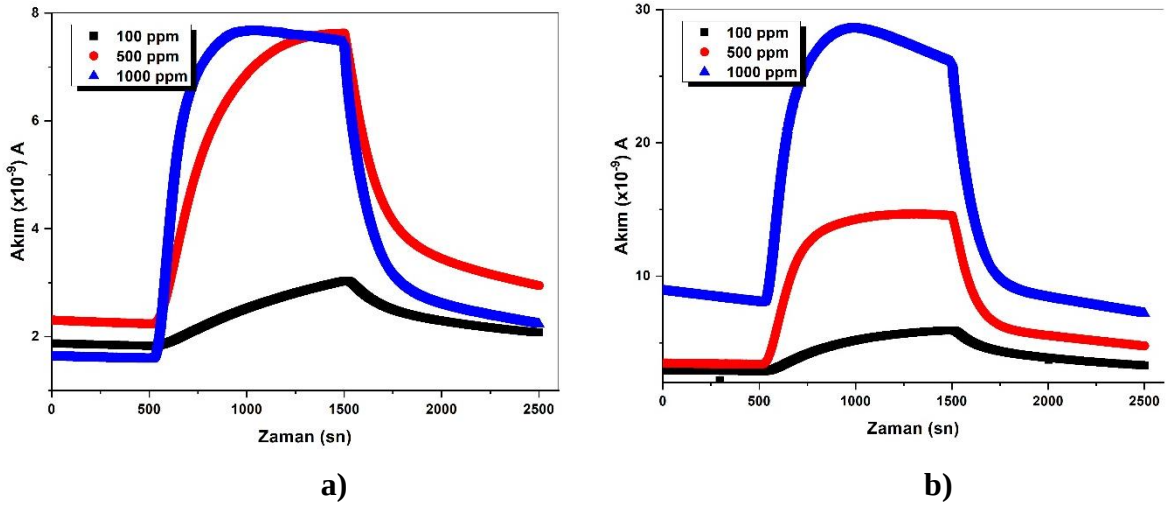
Numunelerin 100ppm, 500ppm ve 1000ppm için geri dönüş süreleri hesaplanarak aralarındaki ilişki incelenmiştir. A Numunesine ait geri dönüş grafikleri Şekil 26’da verilmiştir.



Şekil 26. A Numunesine ait geri dönüş grafikleri a) 200°C b) 250°C

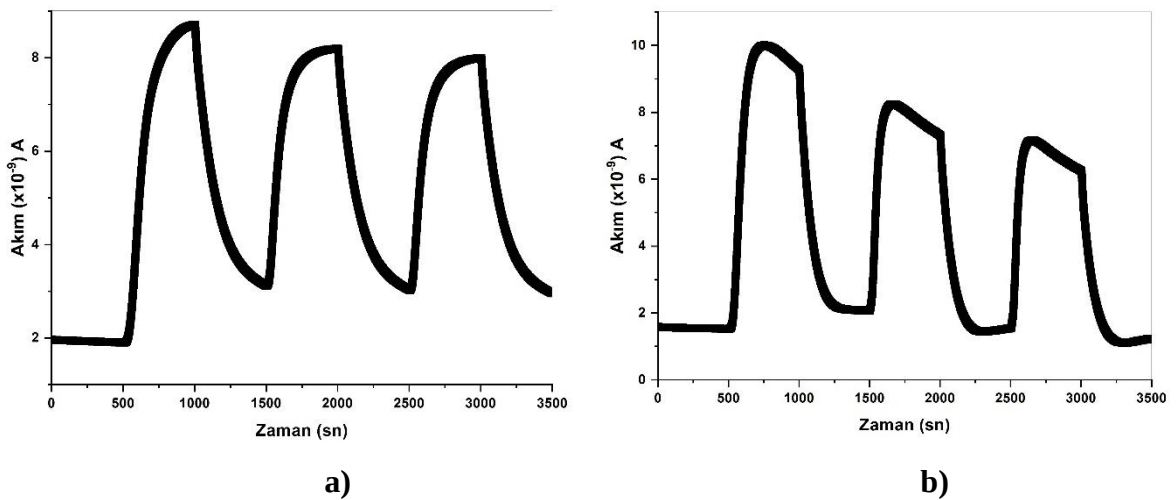
Şekil 26’da görüldüğü gibi 200°C ve 250°C sıcaklık değerlerinde alınan ölçüm sonuçları kullanılarak geri dönüş süreleri arasındaki ilişki analiz edilmiştir. 200°C sıcaklık için ölçülen geri dönüş süreleri dikkate alınarak lineer bir doğru elde edilebileceği gösterilmiştir. Oluşturulan lineer doğrunun denklemi $y = 131.24 + 0.49x$ şeklindedir. Aynı zamanda R² değeri ise 0.99 olarak hesaplanmıştır. 250°C sıcaklık ile ölçülen geri dönüş sürelerinde ise oluşturulan lineer doğrunun denklemi $y = 571.37 + 0.9825x$ şeklindedir. Aynı zamanda R² değeri ise 0.9914 olarak hesaplanmıştır. Numune A’ya ait geri dönüş süreleri ile hesaplanan R² değerinin yüksek olduğu ve bu durumda sensörlerin geri dönüş sürelerinin kararlı olduğunu göstermektedir.

B Numunesine ait 100,500 ve 1000ppm gaz ölçüm grafikleri Şekil 27’de verilmiştir.



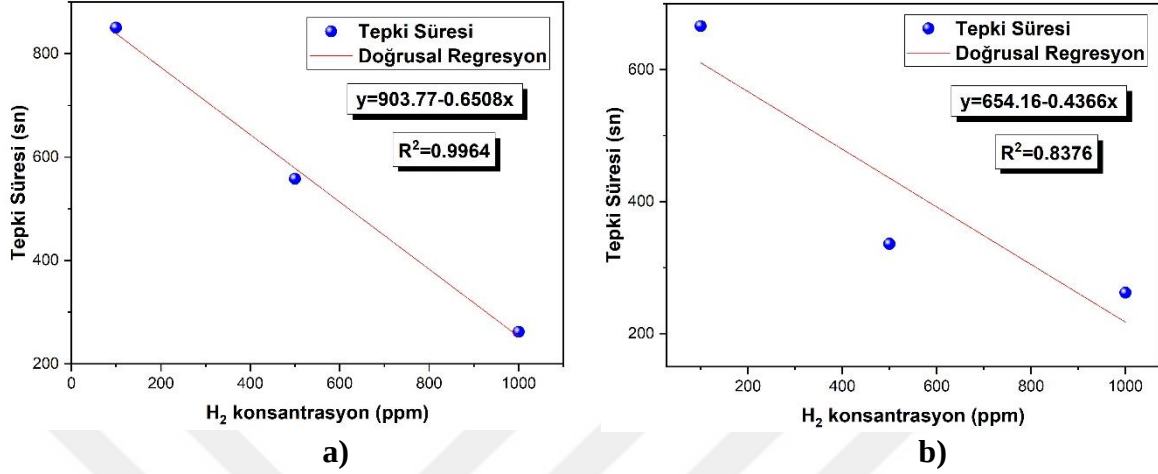
Şekil 27. B Numunesine ait 100,500 ve 1000 ppm gaz ölçüm grafikleri **a)** 200°C **b)** 250°C

Şekil 27’de görüldüğü gibi 200°C ve 250°C sıcaklıklar için farklı H₂ konsantrasyonuna maruz kaldığında 100ppm, 500ppm ve 1000ppm değerleri için sonuçlar hesaplanmıştır. 200°C sıcaklıkta elde edilen ölçümde 500ppm ile 1000ppm H₂ konsantrasyonuna maruz kaldığında benzer iletkenlik değerlerine sahip olduğu görülmektedir. 250°C sıcaklıklar için farklı H₂ konsantrasyonuna maruz kaldığında 100ppm, 500ppm ve 1000ppm değerlerinin birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir. 200°C’de numunenin akım değerleri 100ppm, 500ppm ve 1000ppm için $1 \times 10^{-9} \text{A}$ ile $12 \times 10^{-9} \text{A}$ arasında değişmektedir. 250°C’de numunenin akım değerleri ise $1 \times 10^{-9} \text{A}$ ile $30 \times 10^{-9} \text{A}$ arasında değişmektedir. Numunenin 200°C’deki ölçümünde 100ppm, 500ppm ve 1000ppm değerleri için sırasıyla 850, 558 ve 262 saniye tepki süreleri hesaplanmıştır. 250°C’deki ölçümünde ise sırasıyla 666, 336 ve 262 saniye tepki süreleri hesaplanmıştır. Tepki süreleri bakımından kıyaslandığında hem 200°C hem de 250°C ’deki ölçümlerin kararlı olduğu görülmektedir. B Numunesine ait 1000ppm gaz döngüsü grafikleri Şekil 28’de sunulmuştur.



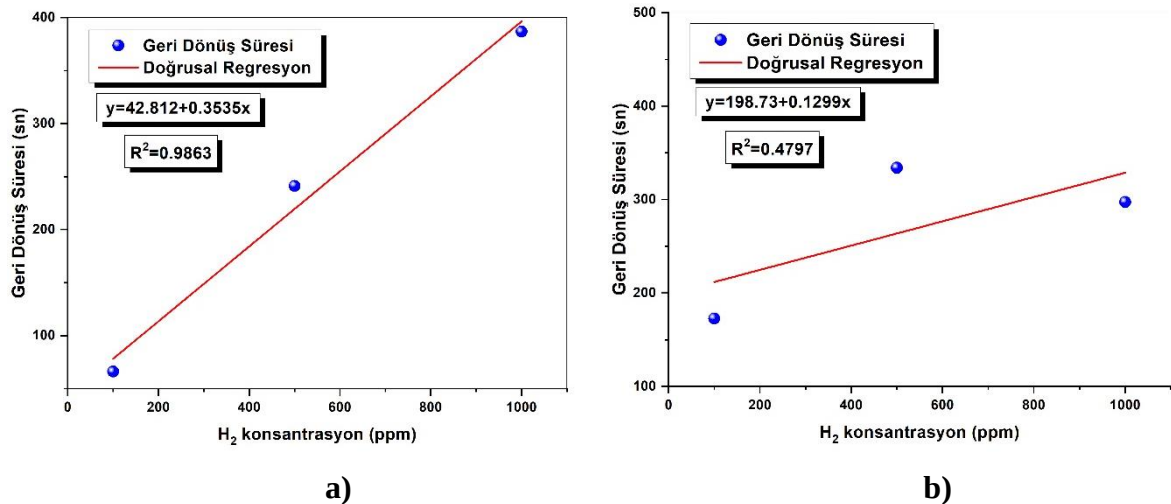
Şekil 28. B Numunesine ait 1000 ppm gaz döngüsü grafikleri **a)** 200°C **b)** 250°C

Şekil 28’de görüldüğü gibi elde edilen ölçümler kıyaslandığında döngülerin kararlı bir yapıda olduğu görülmektedir. Numunelerin 100ppm, 500ppm ve 1000ppm için tepki süreleri hesaplanarak aralarındaki ilişki incelenmiştir. B Numunesine ait tepki süresi grafikleri Şekil 29’da verilmiştir.



Şekil 29. B Numunesine ait tepki süresi grafikleri a) 200°C b) 250°C

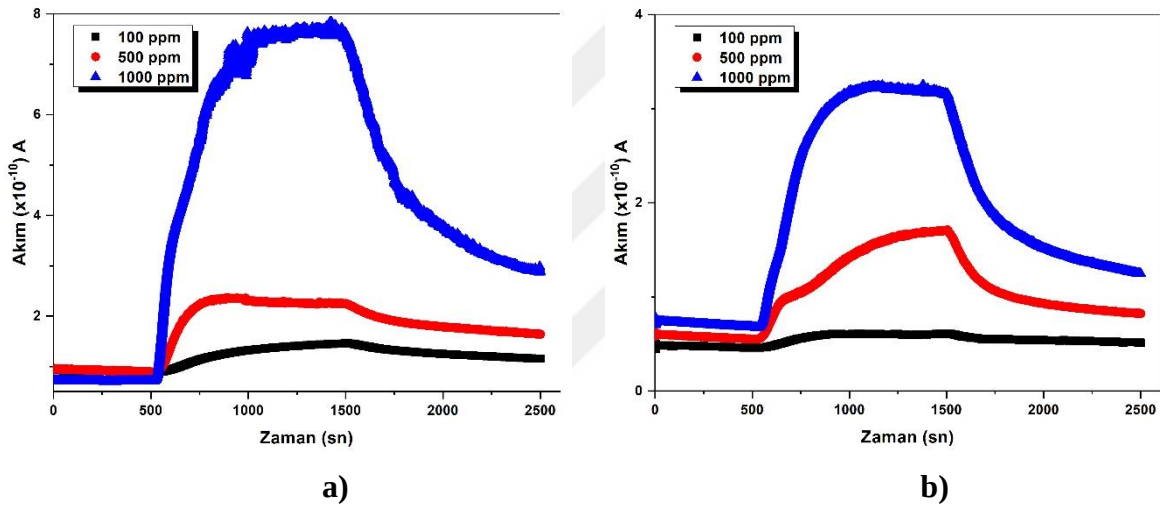
Şekil 29’da görüldüğü gibi 200°C ve 250°C sıcaklık değerlerinde alınan ölçüm sonuçları kullanılarak tepki süreleri arasındaki ilişki analiz edilmiştir. 200°C sıcaklık için ölçülen tepki süreleri dikkate alınarak lineer bir doğru elde edilebileceği gösterilmiştir. Oluşturulan lineer doğrunun R^2 değeri ise 0.9964 olarak hesaplanmıştır. 250°C sıcaklık ile ölçülen tepki sürelerinde ise oluşturulan lineer doğrunun R^2 değeri ise 0.8376 olarak hesaplanmıştır. 200°C’de elde edilen ölçüm için tepki süreleri dikkate alındığında LOD değeri yaklaşık 11.52 ppm olarak hesaplanmıştır. 250°C’de elde edilen ölçüm için tepki süreleri dikkate alındığında LOD değeri yaklaşık 17.18 ppm olarak hesaplanmıştır. Numunelerin 100ppm, 500ppm ve 1000ppm için geri dönüş süreleri hesaplanarak aralarındaki ilişki incelenmiştir. B Numunesine ait geri dönüş grafikleri Şekil 30’da verilmiştir.



Şekil 30. B Numunesine ait geri dönüş grafikleri a) 200°C b) 250°C

Şekil 30’da görüldüğü gibi 200°C ve 250°C sıcaklık değerlerinde alınan ölçüm sonuçları kullanılarak geri dönüş süreleri arasındaki ilişki analiz edilmiştir. 200°C sıcaklık için ölçülen geri dönüş süreleri dikkate alınarak lineer bir doğru elde edilebileceği gösterilmiştir. Oluşturulan lineer doğrunun denklemi $y = 82.227 + 0.1912x$ şeklindedir. Aynı zamanda R^2 değeri ise 0.7105 olarak hesaplanmıştır. 250°C sıcaklık ile ölçülen geri dönüş sürelerinde ise oluşturulan lineer doğrunun denklemi $y = 198.73 + 0.1299x$ şeklindedir. Aynı zamanda R^2 değeri ise 0.4797 olarak hesaplanmıştır. Numune B’ye ait 200°C sıcaklıktaki geri dönüş süreleri ile hesaplanan R^2 değerinin yüksek olduğu görülmüştür. Fakat 250°C sıcaklıktaki geri dönüş süreleri ile hesaplanan R^2 değerinin düşük olduğu görülmektedir. Bu durumda 250°C için hesaplanan geri dönüş sürelerinin birbiri ile uyumlu olmadığı görülmektedir.

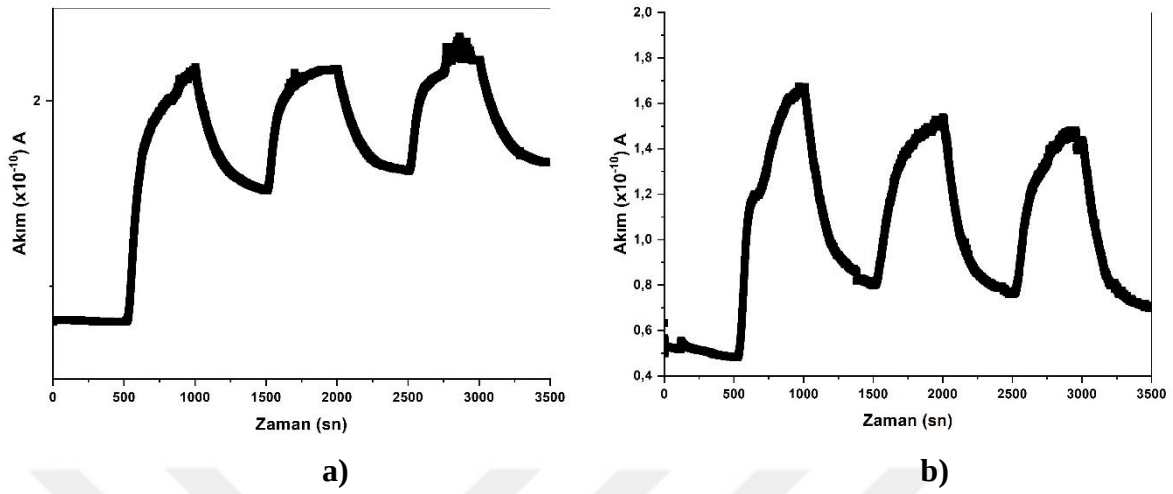
C Numunesine ait 100,500 ve 1000ppm gaz ölçüm grafikleri Şekil 31’de verilmiştir.



Şekil 31. C Numunesine ait 100,500 ve 1000 ppm gaz ölçüm grafikleri a) 200°C b) 250°C

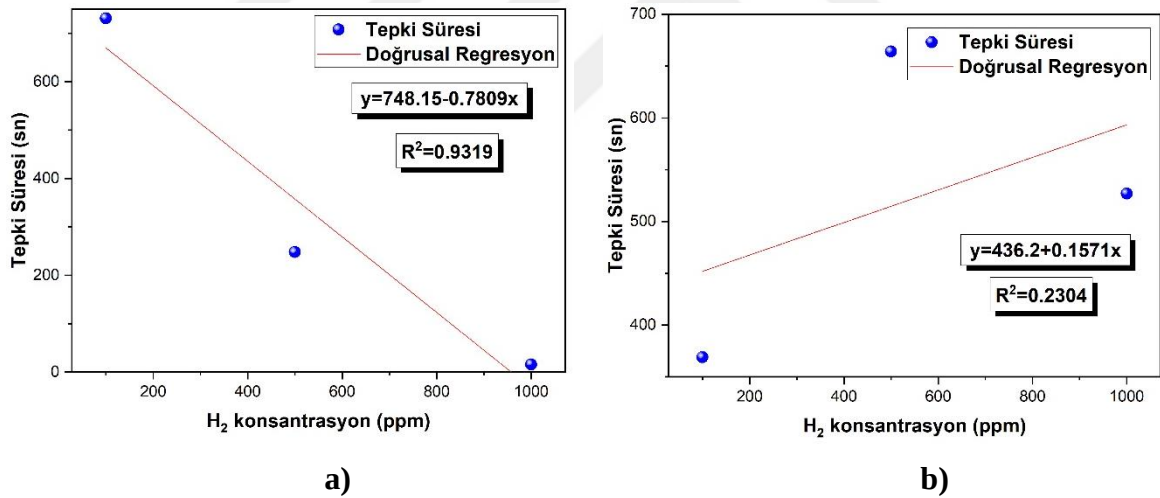
Şekil 31’de görüldüğü gibi 200°C ve 250°C sıcaklıklar için farklı H₂ konsantrasyonuna maruz kaldığında 100ppm, 500ppm ve 1000ppm değerleri için sonuçlarının birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Fakat 100ppm için hesaplanan akım grafiğinin diğer ppm ölçümlerine oranla kötü olduğu görülmektedir. 200°C’de numunenin akım değerleri 100ppm, 500ppm ve 1000ppm için $0.05 \times 10^{-10}A$ ile $8 \times 10^{-10}A$ arasında değişmektedir. 250°C’de numunenin akım değerleri ise $0.05 \times 10^{-10}A$ ile $4 \times 10^{-10}A$ arasında değişmektedir. 200°C’de elde edilen akım değerleri 250°C’deki ölçüm ile kıyaslandığında daha yüksek akım değerine sahip olduğu görülmektedir. Numunenin 200°C’deki ölçümünde 100ppm, 500ppm ve 1000ppm değerleri için sırasıyla 731, 248 ve 16 saniye tepki süreleri hesaplanmıştır. 250°C’deki ölçümünde ise sırasıyla 369, 664 ve 527 saniye tepki süreleri hesaplanmıştır. Tepki süreleri bakımında ölçümler kıyaslandığında 200°C’deki ölçüm ile daha kararlı bir tepki süresi hesaplanmıştır. En düşük tepki süreleri 1000ppm ile hesaplanmıştır.

Numunelerin periyodik olarak test edilmesi ve döngü grafiğinin elde edilebilmesi için sırasıyla 500 saniye hidrojen gazı-kuru hava ve 500 saniye ise sadece kuru hava verilerek ölçüm yapılmıştır. C Numunesine ait 1000ppm gaz döngüsü grafikleri Şekil 32’de sunulmuştur.



Şekil 32. C Numunesine ait 1000 ppm gaz döngüsü grafikleri a) 200°C b) 250°C

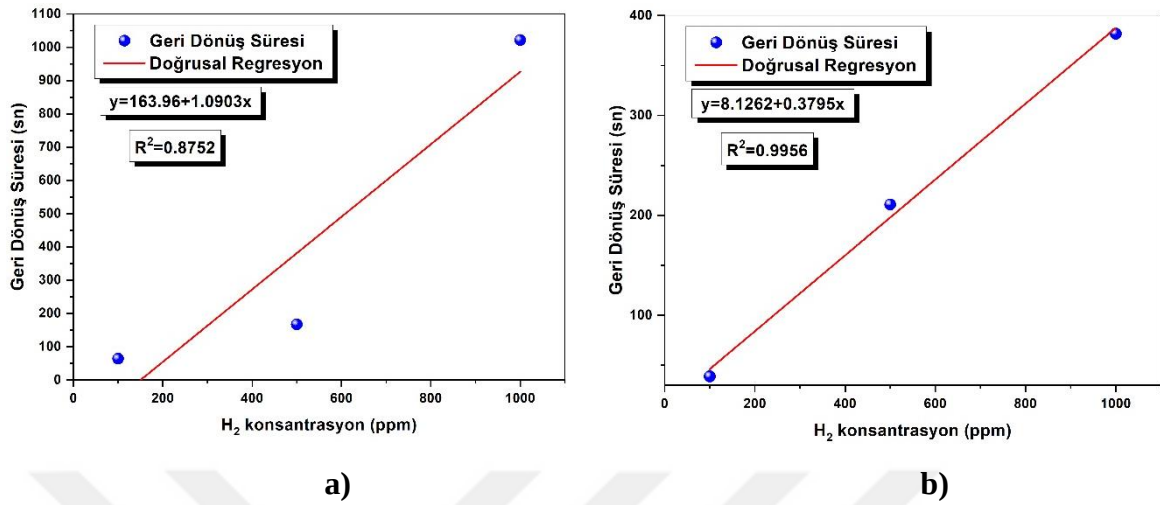
Şekil 32’de görüldüğü gibi elde edilen ölçümler kıyaslandığında döngülerin kararlı bir yapıda olduğu görülmektedir. C Numunesine ait tepki süresi grafikleri Şekil 33’te verilmiştir.



Şekil 33. C Numunesine ait tepki süresi grafikleri a) 200°C b) 250°C

Şekil 33’te görüldüğü gibi 200°C ve 250°C sıcaklık değerlerinde alınan ölçüm sonuçları kullanılarak tepki süreleri arasındaki ilişki analiz edilmiştir. 200°C sıcaklık için ölçülen tepki süreleri dikkate alınarak lineer bir doğru elde edilebileceği gösterilmiştir. Oluşturulan lineer doğrunun R² değeri ise 0.9319 olarak hesaplanmıştır. 250°C sıcaklık ile ölçülen tepki sürelerinde ise oluşturulan lineer doğrunun R² değeri ise 0.2304 olarak hesaplanmıştır. Bu değer düşük lineer doğru olduğu görülmektedir. 200°C’de elde edilen ölçüm için tepki süreleri dikkate alındığında LOD değeri yaklaşık 9.60 ppm olarak hesaplanmıştır. 250°C’de elde edilen ölçüm için tepki süreleri dikkate alındığında LOD değeri yaklaşık 47.73 ppm olarak

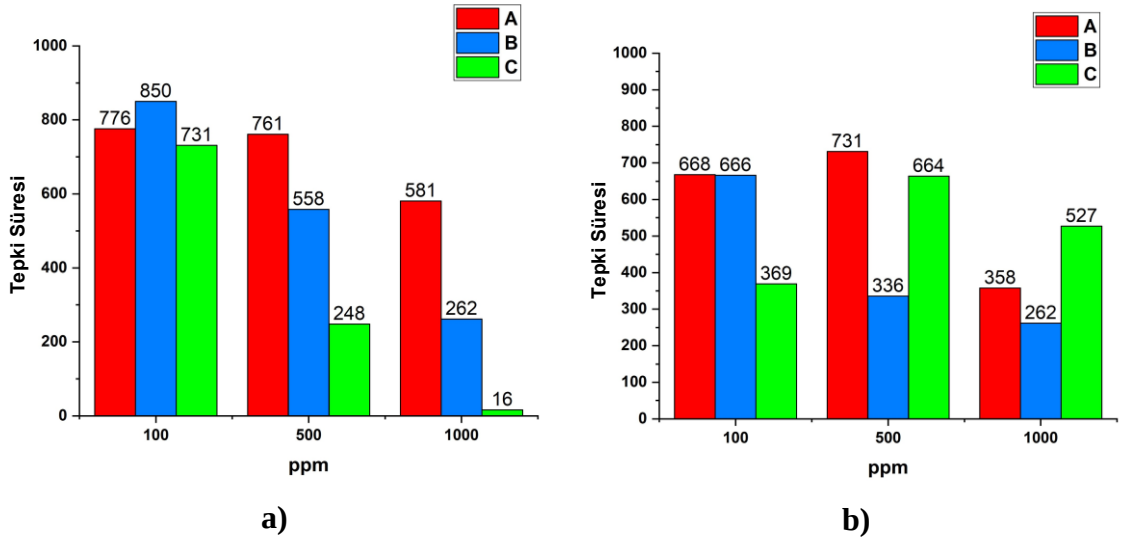
hesaplanmıştır. Numunelerin 100ppm, 500ppm ve 1000ppm için geri dönüş süreleri hesaplanarak aralarındaki ilişki incelenmiştir. C Numunesine ait geri dönüş grafikleri Şekil 34’te verilmiştir.



Şekil 34. C Numunesine ait geri dönüş grafikleri **a) 200°C b) 250°C**

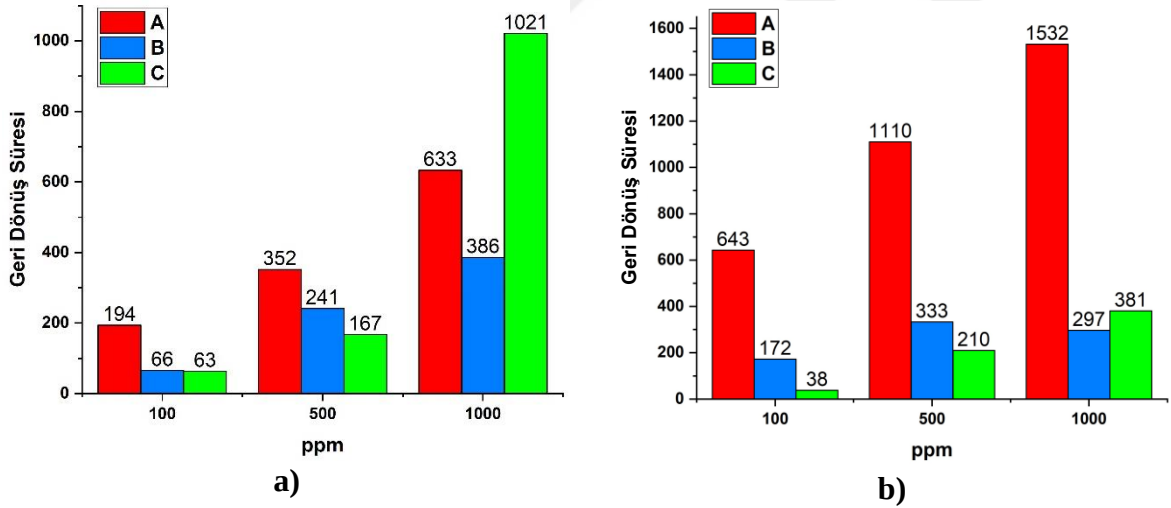
Şekil 34’te görüldüğü gibi 200°C ve 250°C sıcaklık değerlerinde alınan ölçüm sonuçları kullanılarak geri dönüş süreleri arasındaki ilişki analiz edilmiştir. 200°C sıcaklık için ölçülen geri dönüş süreleri dikkate alınarak lineer bir doğru elde edilebileceği gösterilmiştir. Oluşturulan lineer doğrunun denklemi $y = 163.96 + 0.0903x$ şeklindedir. Aynı zamanda R^2 değeri ise 0.8752 olarak hesaplanmıştır. 250°C sıcaklık ile ölçülen geri dönüş sürelerinde ise oluşturulan lineer doğrunun denklemi $y = 8.122 + 0.3795x$ şeklindedir. Aynı zamanda R^2 değeri ise 0.9956 olarak hesaplanmıştır. Numune C’ye ait 250°C sıcaklıktaki geri dönüş süreleri ile hesaplanan R^2 değerinin yüksek olduğu görülmüştür. Fakat 200°C sıcaklıktaki geri dönüş süreleri ile hesaplanan R^2 değerinin 250°C sıcaklıkta alınan ölçümlere göre düşük olduğu görülmektedir. Bu durumda 250°C için hesaplanan geri dönüş sürelerinin 250°C’ye göre daha uyumlu olduğu görülmektedir.

Numunelere ait farklı sıcaklıklarda hesaplanan tepki süresi değerleri Şekil 35’de gösterilmiştir.



Şekil 35. Numunelere ait farklı sıcaklıklarda hesaplanan tepki süreleri **a) 200°C b) 250°C**

Şekil 35'te görüldüğü gibi Numune B için hesaplanan tepki sürelerinin hem 200°C'de hem de 250°C'de kararlı olduğu görülmektedir. Numune B için ppm değeri arttıkça tepki süreleri azalmıştır. Aynı şekilde 200°C sıcaklıkta Numune A ve Numune C'de de ppm değeri arttıkça tepki süreleri azalmıştır. 250°C sıcaklıkta tepki süreleri bakımından analiz edildiğinde ise numune A ve Numune C için bu kararlılık söz konusu değildir. Numunelere ait farklı sıcaklıklarda hesaplanan geri dönüş süresi değerleri Şekil 36'da gösterilmiştir.

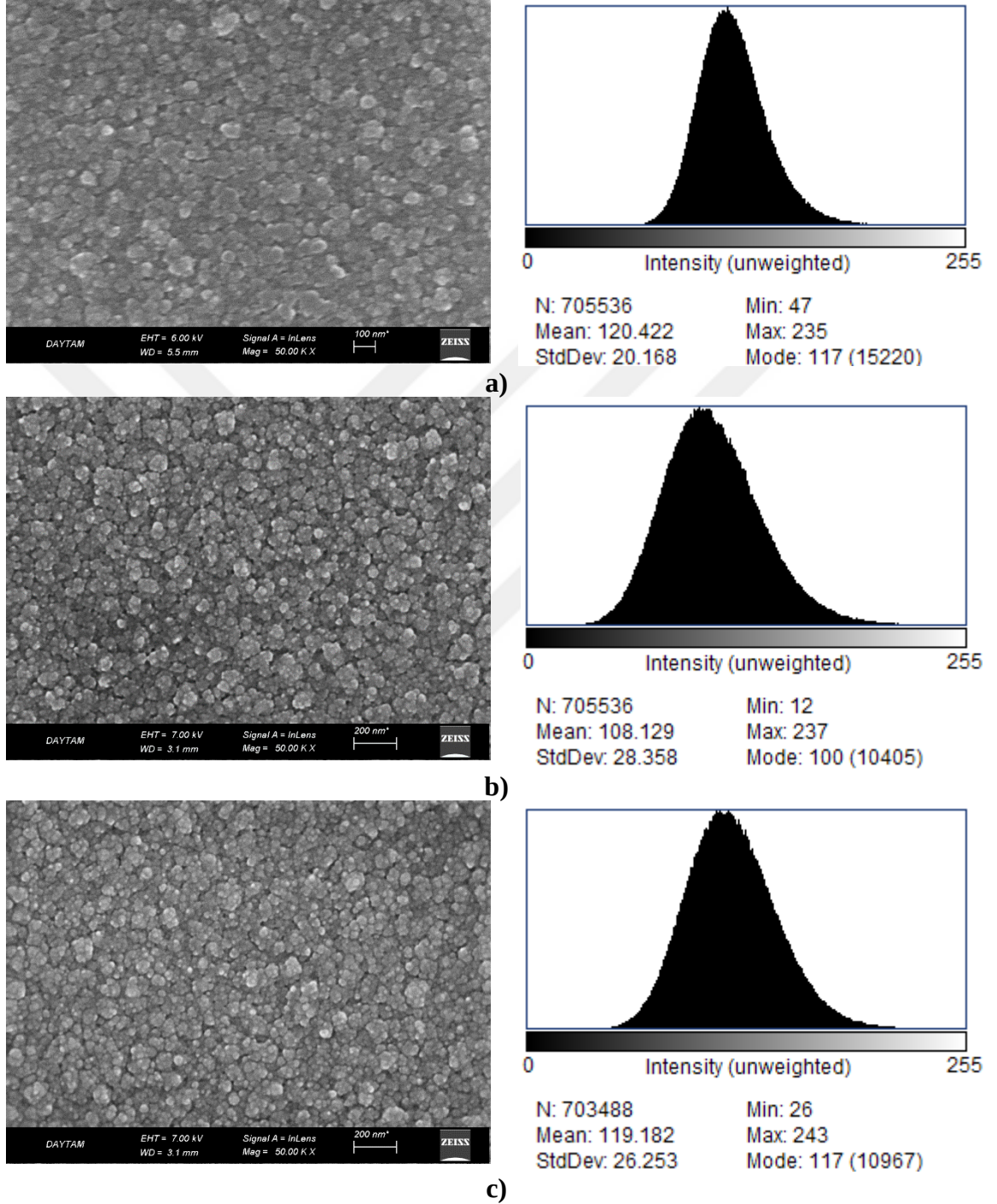


Şekil 36. Numunelere ait farklı sıcaklıklarda hesaplanan geri dönüş süreleri **a) 200°C b) 250°C**

Şekil 36'da görüldüğü gibi Numune A ve Numune C için hesaplanan geri dönüş sürelerinin hem 200°C'de hem de 250°C'de kararlı olduğu görülmektedir. Numune B de 200°C için ppm değeri arttıkça bir artış görmüştür.

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Sonuçları

Tez kapsamında A, B ve C numuneleri sırasıyla 0.3 ml, 0.5 ml ve 0.7 ml Pd katkılanmıştır. Bu numunelere ait 5000x SEM görüntüleri ve histogram grafikleri Şekil 37’de verilmiştir.



Şekil 37. A, B ve C numunelerine ait SEM görüntüleri ve histogram grafikleri

Şekil 37.a’da verilen A numunesine ait SEM görüntüsü morfolojik olarak incelenmiştir. Parçacıklar homojen dağılmış görünmekte olup, nispeten düzgün bir yüzey yapısına sahip olduğu görülmektedir. Tanecik boyutu bakımından incelendiğinde ortalama tane boyutunun

büyük olduğu görülmektedir. Gözenekli yapısının az olmasından dolayı sıkı bir kristal oluşumu mevcuttur. 0.5 ml Pd aşılı B numunesinin morfolojik yapısı A numunesi ile kıyaslandığında daha dağınık ve küçük taneler içermektedir. A numunesine göre tane boyutlarında küçülme başlamıştır. Bu durum katkı maddesinin kristal büyümesini baskılayarak daha ince ve yoğun yapı oluşturduğunu göstermektedir. B numunesinin yüzeyi daha pürüzlü hale gelmiştir. Böylece yüzey alanının arttığını ve sensör ya da katalitik uygulamalar için avantaj sağlayabileceğini gösterir. 0.7 ml Pd aşılı C numunesinde ise daha fazla gözenek olduğu ve karmaşık hale geldiği görülmektedir. Katkı maddesinin yüksek olması nedeniyle düzensizlik söz konusudur. En küçük ve dağınık partiküller C numunesinde gözlemlenmiştir. Katkı miktarının artışıyla birlikte kristalleşme zorlaşmış, parçalanma ve yoğun yüzey düzensizliği oluşmuştur. Yüzey alanı oldukça artmıştır. SEM görüntüleri incelendiğinde ince filmlerin kristal tanecik boyutları belirgin bir şekilde görülmektedir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yüksek lisans tezi kapsamında yapılan çalışmaların araştırma bulgularında, spin kaplama yöntemiyle molibden trioksit (MoO_3) tabanlı ince filmler geliştirilmiş ve bu filmlerin duyarlılığını arttırmak amacıyla farklı oranlarda paladyum klorür (PdCl_2) katkısı gözlenmiştir. Hazırlanan üç farklı Pd aşılı MoO_3 çözeltisi (0.3 ml, 0.5 ml ve 0.7 ml PdCl_2) spin kaplama yöntemi ile kuartz altlıklar üzerine uygulanmıştır. Elde edilen ince filmler, termal buharlaştırma yöntemi ile yöntemiyle Ag IDE elektrotları eklenerek sensör yapısına dönüştürülmüş ve 460°C sıcaklıkta 3 dakika süreyle tavlanaarak kristal yapı kazandırılmıştır.

PdCl_2 katkısı, MoO_3 tabanlı ince filmlerin hidrojen gazına karşı duyarlılığını olumlu bir şekilde etkilemiştir. Katkı oranı arttıkça filmlerin H_2 gazına verdiği tepki sürelerinde değişim gözlemlenmiştir. Ayrıca yapılan kontaklardan sonra ki tavlama işlemi, filmlerin kristal yapı kazanmasına ve yüzey morfolojisinin iyileşmesine katkı sağlamış, bu işlemde ince filmlerin gaz algılama performansını doğrudan etkilemektedir.

Spin kaplama parametrelerinin sabit tutulması sayesinde, her numune için karşılaştırılabilir ve tekrarlanabilir sonuçlar elde edilmiştir. Uygulanan spin kaplama yöntemiyle elde edilen filmler homojen bir yapıya sahip olması gaz sensör sonuçlarını olumlu etkilemiştir.

Pd katkı oranının daha geniş aralıklarla artırılması, hidrojen algılama performansının daha hassa belirlenmesini sağlayabilir. Ayrıca tavlama süresi ve sıcaklık parametrelerini değiştirerek, kristal yapının gaz algılama hassasiyetinin nasıl etkilendiği araştırılabilir. Kullanılan kuartz altlık yerine farklı altlık türleri kullanılarak MoO_3/Pd yapıların altlık etkisine karşı duyarlılığı araştırılabilir.

Bu tezde, Pd katkılı molibden trioksit (MoO_3) tabanlı ince film gaz sensörlerinin hidrojen (H_2) gazına karşı gösterdiği algılama performansları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Spin kaplama yöntemiyle üretilen numuneler, farklı şartlar altında ölçülerek duyarlılık, tepki süreleri ve geri dönüş süreleri değerlendirilmiştir. Tüm numuneler (A, B, C) 100 ppm, 500 ppm ve 1000 ppm H_2 gazına maruz bırakılmış ve gaz algılama davranışları hem 200 °C hem de 250 °C sıcaklıklarda incelenmiştir. Numune B, her iki sıcaklıkta da en kararlı tepki sürelerine sahip olmuş ve en iyi performansı göstermiştir. Numune B için tepki sürelerinin ppm artışı ile azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, artan gaz konsantrasyonunun algılamayı hızlandırdığını göstermektedir. Numune A ve C için 200 °C'de benzer bir azalma söz konusuysen, 250 °C'de

kararlılık gözlemlenememiştir. Özellikle 200 °C'de B numunesi için geri dönüş sürelerinin kısa ve istikrarlı olduğu görülmüştür. Bu da sensörün çalışma sıcaklığının bu değerde optimum olduğuna işaret etmektedir. XRD ve SEM analizleri sonucunda üretilen ince filmlerin kristal yapısının ve yüzey morfolojisinin gaz algılama performansını etkilediği belirlenmiştir. Özellikle B numunesindeki homojen yüzey yapısı, gözeneklilik ve tanecik boyutu, duyarlılık performansını artırmıştır. Pd katkısının MoO₃ sensör yapısına entegrasyonu ile hidrojen gazına karşı artan bir duyarlılık ve daha hızlı tepki süreleri elde edilmiştir. Bu katkı, hidrojenin ayrışmasında katalitik bir rol oynamış ve algılama mekanizmasını hızlandırmıştır.

Tez kapsamında yapılan öneriler; Pd katkılı MoO₃ sensörler için 200 °C sıcaklığında ve 500-1000 ppm aralığında en iyi performans gözlemlenmiştir. Bu nedenle uygulama alanlarında bu şartlar tercih edilmelidir. Spin kaplama sürecinde çözelti homojenliği ve dönme hızı gibi parametrelerin optimize edilmesi, film kalitesini artırarak sensör performansını iyileştirebilir. Uzun dönemli stabilite testleri yapılarak sensörlerin zaman içindeki performanslarının korunup korunmadığı gözlemlenmelidir. Bu, endüstriyel uygulamalar için kritik bir gerekliliktir. Pd dışında farklı metal katkılılar (Pt, Au vb.) ile çalışarak en uygun kombinasyonlar belirlenebilir. Elde edilen deneysel veriler doğrultusunda matematiksel modeller geliştirilerek sensör davranışının teorik altyapısı güçlendirilebilir. Kuartz altlık dışında farklı altlık malzemeleri ve elektrot geometrileri incelenerek sensör çıktıları optimize edilebilir.

Bu tezde, Pd aşılı MoO₃ ince film gaz sensörlerinin hidrojen algılama uygulamalarında potansiyelini ortaya koymuş ve gelecekteki çalışmalara ışık tutacak önemli bulgular sunmuştur.

KAYNAKLAR

- Agnihotri, A. S., Varghese, A., & M, N. (2021). Transition metal oxides in electrochemical and bio sensing: A state-of-art review. *Applied Surface Science Advances*, 4, 100072. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100072>
- Akkoyunlu, C. (t.y.). Spin Kaplama Tekniği İle Üretilen İnce Filmlerin Organik Buhar Duyarlılığı.
- Arasu, P. A., & Williams, R. V. (2017). The dielectric studies on sol–gel routed molybdenum oxide thin film. *Journal of Advanced Dielectrics*, 07(02), 1750011. <https://doi.org/10.1142/S2010135X17500114>
- Asri, M. I. A., Hasan, Md. N., Fuaad, M. R. A., Yunos, Y. Md., & Ali, M. S. M. (2021). MEMS Gas Sensors: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 21(17), 18381-18397. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3091854>
- Baranov, A. M., & Osipova, T. V. (2022). Latest Progress in Sensors for Pre-explosive Detection of Flammable Gases: A Review. *Sensors and Materials*, 34(10), 3707. <https://doi.org/10.18494/SAM4005>
- Cebisli, G., Asubay, S., & Ocak, Y. S. (t.y.). *Reactively Sputtered Moo3 Thin Films and Temperature Dependence of Electrical Properties of an Ag/MoO3/n-Si Diode*.
- Chen, H.-I., Chang, C.-H., Lu, H.-H., Liu, I.-P., Chen, W.-C., Ke, B.-Y., & Liu, W.-C. (2018). Hydrogen sensing performance of a Pd/HfO2/GaN metal-oxide-semiconductor (MOS) Schottky diode. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 262, 852-859. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.02.077>
- Chen, T. P., Shih, H. Y., Lian, J. T., Chen, J. H., Lin, P. S., Lin, T. Y., Gong, J. R., & Chen, Y. F. (2012). Electro-colorimetric hydrogen gas sensor based on Pt-functionalized In₂ O₃ nanopushpins and InGaN/GaN multiple quantum wells. *Optics Express*, 20(15), 17136. <https://doi.org/10.1364/OE.20.017136>
- Cope, R. B. (2025). Toxic gases and vapors. İçinde *Veterinary Toxicology* (ss. 631-648). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-29007-7.00072-8>
- Dey, A. (2018). Semiconductor metal oxide gas sensors: A review. *Materials Science and Engineering: B*, 229, 206-217. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2017.12.036>
- Dhall, S., Mehta, B. R., Tyagi, A. K., & Sood, K. (2021). A review on environmental gas sensors: Materials and technologies. *Sensors International*, 2, 100116. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100116>
- Essl, C., Seifert, L., Rabe, M., & Fuchs, A. (2021). Early Detection of Failing Automotive Batteries Using Gas Sensors. *Batteries*, 7(2), 25. <https://doi.org/10.3390/batteries7020025>
- Fazio, E., Spadaro, S., Corsaro, C., Neri, G., Leonardi, S. G., Neri, F., Lavanya, N., Sekar, C., Donato, N., & Neri, G. (2021). Metal-Oxide Based Nanomaterials: Synthesis, Characterization and Their Applications in Electrical and Electrochemical Sensors. *Sensors*, 21(7), 2494. <https://doi.org/10.3390/s21072494>

- Gothe, S. D., & Sutrave, D. S. (2019). Physical Characterization and Electrochemical Properties of Molybdenum Oxide Thin film. *International Journal of ChemTech Research*, 12(01), 49-55. <https://doi.org/10.20902/IJCTR.2019.120104>
- Gu, H., Wang, Z., & Hu, Y. (2012). Hydrogen Gas Sensors Based on Semiconductor Oxide Nanostructures. *Sensors*, 12(5), 5517-5550. <https://doi.org/10.3390/s120505517>
- Hossain, D., & Alasa, D. K. (2024). Fire Detection in Gas-to-Liquids Processing Facilities: Challenges and Innovations in Early Warning Systems. *International Journal of Biological, Physical and Chemical Studies*, 6(2), 07-13. <https://doi.org/10.32996/ijbpcs.2024.6.2.2>
- İncegöl, Y., Özkan, G., İncegöl, A. C., & Taşdelen, K. (2022). Elektronik Burun Metal Oksit Yarı İletken Sensörlerin Gıda Analizlerinde Kullanımı. *Akademik Gıda*, 20(4), 454-473. <https://doi.org/10.24323/akademik-gida.1224839>
- Jain, V., Patel, S., Patel, P., Patel, K., & Shah, D. (2021). Study of molybdenum trioxide thin film deposited using dip coating method. *Materials Today: Proceedings*, 42, 1700-1703. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.209>
- Jia, C., Zhao, L., Huang, G., Liu, L., Wang, W., Yang, Y., & Miao, Y. (2023). A Review of Hydrogen Sensors for ECLSS: Fundamentals, Recent Advances, and Challenges. *Applied Sciences*, 13(12), 6869. <https://doi.org/10.3390/app13126869>
- Kang, X., Yip, S., Meng, Y., Wang, W., Li, D., Liu, C., & Ho, J. C. (2021). High-performance electrically transduced hazardous gas sensors based on low-dimensional nanomaterials. *Nanoscale Advances*, 3(22), 6254-6270. <https://doi.org/10.1039/D1NA00433F>
- Karabacak, D. R. (t.y.). *Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı*.
- Kotnala, R. K., & Shah, J. (2018). 2.8 Magnetic Materials. İçinde *Comprehensive Energy Systems* (ss. 204-234). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00219-4>
- Lambey, V., & Prasad, A. D. (2023). Sensor based real time air pollutants monitoring for an urban industrial area. *Journal of Air Pollution and Health*. <https://doi.org/10.18502/japh.v8i2.12915>
- Lau, H.-C., Yu, J.-B., Lee, H.-W., Huh, J.-S., & Lim, J.-O. (2017). Investigation of Exhaled Breath Samples from Patients with Alzheimer's Disease Using Gas Chromatography-Mass Spectrometry and an Exhaled Breath Sensor System. *Sensors*, 17(8), 1783. <https://doi.org/10.3390/s17081783>
- Liu, X., Cheng, S., Liu, H., Hu, S., Zhang, D., & Ning, H. (2012). A Survey on Gas Sensing Technology. *Sensors*, 12(7), 9635-9665. <https://doi.org/10.3390/s120709635>
- Lozano-Martín, D., Moreau, A., & Chamorro, C. R. (2022). Thermophysical properties of hydrogen mixtures relevant for the development of the hydrogen economy: Review of available experimental data and thermodynamic models. *Renewable Energy*, 198, 1398-1429. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.096>
- Malik, R., Joshi, N., & Tomer, V. K. (2021). Advances in the designs and mechanisms of MoO₃ nanostructures for gas sensors: A holistic review. *Materials Advances*, 2(13), 4190-4227. <https://doi.org/10.1039/D1MA00374G>
- Margaritis, D., Keramydas, C., Papachristos, I., & Lambropoulou, D. (2021). Calibration of Low-cost Gas Sensors for Air Quality Monitoring. *Aerosol and Air Quality Research*, 21(11), 210073. <https://doi.org/10.4209/aaqr.210073>

- Matindoust, S., Baghaei-Nejad, M., Shahrokh Abadi, M. H., Zou, Z., & Zheng, L.-R. (2016). Food quality and safety monitoring using gas sensor array in intelligent packaging. *Sensor Review*, 36(2), 169-183. <https://doi.org/10.1108/SR-07-2015-0115>
- Mirzaei, A., Kim, S. S., & Kim, H. W. (2018). Resistance-based H₂S gas sensors using metal oxide nanostructures: A review of recent advances. *Journal of Hazardous Materials*, 357, 314-331. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.06.015>
- Mobtakeri, S. (t.y.). RF-Magnetron İle Saçtılmış Mos2filmlerin Termal Oksidasyonu İle Elde Edilen α - MoO₃ Tabanlı Yüksek Performanslı H₂ Gaz Sensörleri; Kimyasal Direnç Tabanlı Ve Gazokromik Sensörler.
- Morgan, J. R. (1936). The search for a safety-lamp in mines. *Annals of Science*, 1(3), 302-329. <https://doi.org/10.1080/00033793600200261>
- Müller, G., Hackner, A., Beer, S., & Göbel, J. (2016). Solid-State Gas Sensors: Sensor System Challenges in the Civil Security Domain. *Materials*, 9(1), 65. <https://doi.org/10.3390/ma9010065>
- Nasiri, N., & Clarke, C. (2019). Nanostructured Chemiresistive Gas Sensors for Medical Applications. *Sensors*, 19(3), 462. <https://doi.org/10.3390/s19030462>
- Nikolic, M. V., Milovanovic, V., Vasiljevic, Z. Z., & Stamenkovic, Z. (2020). Semiconductor Gas Sensors: Materials, Technology, Design, and Application. *Sensors*, 20(22), 6694. <https://doi.org/10.3390/s20226694>
- Oliveira, L. F. D., Mallafré-Muro, C., Giner, J., Perea, L., Sibila, O., Pardo, A., & Marco, S. (2022). Breath analysis using electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry: A pilot study on bronchial infections in bronchiectasis. *Clinica Chimica Acta*, 526, 6-13. <https://doi.org/10.1016/j.cca.2021.12.019>
- Ramírez-Moreno, M. A., Keshtkar, S., Padilla-Reyes, D. A., Ramos-López, E., García-Martínez, M., Hernández-Luna, M. C., Mogro, A. E., Mahlknecht, J., Huertas, J. I., Peimbert-García, R. E., Ramírez-Mendoza, R. A., Mangini, A. M., Roccotelli, M., Pérez-Henríquez, B. L., Mukhopadhyay, S. C., & Lozoya-Santos, J. D. J. (2021). Sensors for Sustainable Smart Cities: A Review. *Applied Sciences*, 11(17), 8198. <https://doi.org/10.3390/app11178198>
- Sakthinathan, S., Meenakshi, G. A., Vinothini, S., Yu, C.-L., Chen, C.-L., Chiu, T.-W., & Vittayakorn, N. (2025). A Review of Thin-Film Growth, Properties, Applications, and Future Prospects. *Processes*, 13(2), 587. <https://doi.org/10.3390/pr13020587>
- Saxena, P., & Shukla, P. (2023a). A review on recent developments and advances in environmental gas sensors to monitor toxic gas pollutants. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 42(5), e14126. <https://doi.org/10.1002/ep.14126>
- Saxena, P., & Shukla, P. (2023b). A review on recent developments and advances in environmental gas sensors to monitor toxic gas pollutants. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 42(5). <https://doi.org/10.1002/ep.14126>
- Shamsir, S., Mahbub, I., Islam, S. K., & Rahman, A. (2017). Applications of sensing technology for smart cities. *2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, 1150-1153. <https://doi.org/10.1109/MWSCAS.2017.8053132>
- Simonenko, N. P., Fisenko, N. A., Fedorov, F. S., Simonenko, T. L., Mokrushin, A. S., Simonenko, E. P., Korotcenkov, G., Sysoev, V. V., Sevastyanov, V. G., & Kuznetsov, N. T. (2022). Printing Technologies as an Emerging Approach in Gas Sensors: Survey of Literature. *Sensors*, 22(9), 3473. <https://doi.org/10.3390/s22093473>

- Steiner, C., Wöhr, T., Steiner, M., Kita, J., Müller, A., Eisazadeh, H., Moos, R., & Hagen, G. (2023). Resistive Multi-Gas Sensor for Simultaneously Measuring the Oxygen Stoichiometry (λ) and the NO_x Concentration in Exhausts: Engine Tests under Dynamic Conditions. *Sensors*, 23(12), 5612. <https://doi.org/10.3390/s23125612>
- Technological University of the Philippines, Philippines, & Ira C., V. (2019). Utilization of e-Nose Sensory Modality as Add-On Feature for Advanced Driver Assistance System. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 6(4), 1783-1788. <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2019/109842019>
- Teker, M., & Özhan, Ü. (2022). Yanıcı Kimyasalların Lel Hacimlerinde Patlayıcı Atmosferinin Belirlenmesi. *Uluslararası Yakıtlar Yanma Ve Yangın Dergisi*, 10(1), 60-65. <https://doi.org/10.52702/fce.1072953>
- Tekin, S. (t.y.). Akciğer Hastalıklarının, Uyku Bozukluklarının Ve Hipoksiyle İlişkili Durumların Gaz Sensörleri İle Teşhisi.
- Tereshkov, M., Dontsova, T., Saruhan, B., & Krüger, S. (2024). Metal Oxide-Based Sensors for Ecological Monitoring: Progress and Perspectives. *Chemosensors*, 12(3), 42. <https://doi.org/10.3390/chemosensors12030042>
- Thomas Hübert, L. Boon-Brett, Valerio Palmisano, G. Frigo, Å. Hellstrand, O. Kiesewetter, & M. May. (2013). *Trends in Gas Sensor Development for Hydrogen Safety*.
- Wales, D. J., Grand, J., Ting, V. P., Burke, R. D., Edler, K. J., Bowen, C. R., Mintova, S., & Burrows, A. D. (2015). Gas sensing using porous materials for automotive applications. *Chemical Society Reviews*, 44(13), 4290-4321. <https://doi.org/10.1039/C5CS00040H>
- Wei, J., Liu, T., Huang, J., Li, X., Qi, Y., & Luo, G. (t.y.). *Detection of Acetone as a Gas Biomarker for Diabetes Based on Gas Sensor Technology*.
- Xu, M., Hu, X., Zhang, H., Miao, T., Ma, L., Liang, J., Zhu, Y., Zhu, H., Cheng, Z., & Sun, X. (2025). Detection and Pattern Recognition of Chemical Warfare Agents by MOS-Based MEMS Gas Sensor Array. *Sensors*, 25(8), 2633. <https://doi.org/10.3390/s25082633>
- Zainab Yunusa, Mohd. Nizar Hamidon, Ahsanul Kaiser, & Zaiki Awang. (t.y.). *Gas Sensors: A Review*. Sensors & Transducers.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı :	Kübra YAMAN
Eğitim	
Lise:	Balakgazi Lisesi ELAZIĞ
Lisans:	Fırat Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü
Doktora:	
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	