



**FATİH SULTAN MEHMET VAKIF ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**AMELİYATHANE HAVA KALİTESİ İZLEME
SİSTEMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FULYA KARAMAN

İSTANBUL, 2022



**FATİH SULTAN MEHMET VAKIF ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**AMELİYATHANE HAVA KALİTESİ İZLEME
SİSTEMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FULYA KARAMAN
(200231002)**

**Danışman
(Doç. Dr. Sadullah Öztürk)**

İSTANBUL, 2022



FATİH SULTAN MEHMET VAKIF ÜNİVERSİTESİ
TEZ ONAY FORMU

18/07/2022

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı, Biyomedikal Mühendisliği Tezli yüksek lisans öğrencisi 200231002 Fulya KARAMAN'ın hazırladığı "Ameliyathane Hava Kalite İzleme Sistemi" konulu Yüksek Lisans tezi ile ilgili Tez Savunma Sınavı, 18/07/2022 Pazartesi günü saat 14:00' da yapılmış, sorulara alınan cevaplar sonunda adayın tezinin **Kabulüne Oy Birliği** ile karar verilmiştir.

Düzeltilme verilmesi halinde:

Adı geçen öğrencinin Tez Savunma Sınavı .../.../20... tarihinde, saat da yapılacaktır.

Tez adı değişikliği yapılması halinde: Tez adının

şeklinde değiştirilmesi uygundur.

Jüri Üyesi	Karar
1. Doç. Dr. Sadullah ÖZTÜRK (Danışman)	KABUL
2. Prof. Dr. Bahattin KARAGÖZOĞLU	KABUL
3. Dr. Öğr. Üyesi Fatih ÇİFTÇİ	KABUL

*2. Danışman varsa doldurulması gerekmektedir.

ETİK BİLDİRİM

Bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bağlı olduğum üniversite veya bir başka üniversitedeki başka bir çalışma olarak sunulmadığını beyan ederim.

Fulya Karaman

TEŐEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerini benimle paylaŐan Sayın Prof.Dr.Bahattin Karagözoğlu hocama ilgisi, zamanı, katkı sağlayıcı yorum ve önerinlerinden dolayı teŐekkür ediyorum.

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimleri ile beni yönlendiren, teŐvik eden, tez çalıŐmamın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aŐamalarında bilgi ve desteğini esirgemeyen çok saygı değer danışman hocam Sayın Doç. Dr. Sadullah ÖZTÜRK'e tüm içtenliğimle teŐekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez çalıŐmalarım esnasında beni destekleyen,sorunlara çözüm üretmemde yardımcı olan değerli hocam Sayın Dr. Zafer Şen'e teŐekkürlerimi sunarım.

Elektronik mühendisliği konusundaki teorik ve pratik desteklerinden dolayı Sayın Yük. Müh. Saddam Heyderov'a teŐekkür ederim.

Gaz ölçümlerinde gaz ölçüm laboratuvarlarını ve bünyelerinde bulunan sistem ve sarf malzemelerin kullanmam için imkan sağlayan SİSMİK A.Ő. firmasına ve Gaz Sensörlerinin temini konusunda maddi desteklerinden dolayı NOOR TEKNOLOJİ LTD. ŐTİ. ve firma yöneticisi Sayın Dr. Giuliano REGONESİ'ye teŐekkür ederim.

Bugünlere gelmemde büyük pay sahibi olan, sevgilerini, güvenlerini, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen haklarımı ödeyemeyeceğim babam ve annem baŐta olmak üzere canım aileme saygılarımı ve teŐekkürlerimi sunarım.

Fulya Karaman

AMELİYATHANE ORTAMINDA İÇ HAVA KALİTESİ İZLEME CİHAZI TASARIMI

Fulya Karaman

ÖZET

Bu tez çalışması kapsamında, ameliyathane ortamındaki kirleticilerin konsantrasyonlarının takibi için iç hava kalitesi cihazı geliştirilmiştir. Geliştirilen cihaz; iç ortamda bulunan kirleticilerin konsantrasyonlarını LoRa protokolü ile uzaktan izleme imkânı sunmaktadır.

Geliştirilen cihazda elektrokimyasal sensör ve metal oksit sensör grubu kullanılmıştır. Ortamda bulunan partiküllerin ölçümü için partikül sensörü, karbondioksit ölçümü için karbondioksit sensörü kullanılmıştır. Ölçülen dataların kablosuz olarak aktarılması için, LoRa haberleşme protokolü kullanıldı.

Geliştirilen cihazın ölçüm verileri için; Okmeydanı Perpa Ticaret Merkezinde bulunan Sismik A.Ş. firmasında gaz ölçüm laboratuvarında gaz ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sismik A.Ş. firmasında gaz ölçümlerinde sensörlerin CO (karbonmonoksit), NH₃ (amonyak), CH₄ (metan) C₃H₈ (propan), H₂ (hidrojen) gazlarına karşı tepkileri değerlendirilmiştir. Geliştirilen cihaz ile 2 saniyelik zaman aralığında veri toplanmaktadır. Firmada yapılan ölçümlere ek olarak Gebze'de bulunan TÜBİTAK-MAM-ME gaz ölçüm ve analiz laboratuvarlarında test çalışmaları yapılmıştır. Gaz testlerinde heptan (C₇H₁₆), ksilen (C₈H₁₀), toluen (C₇H₈), metanol (CH₃OH) ve trietilamin (C₆H₁₅N) gazlarına karşı sensörlerin tepkileri değerlendirilmiştir. Sensörlerin kalibrasyon eğrileri elde edilmiştir ve sensör tepkileri yorumlanmıştır.

İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa, Deneysel Tıp Araştırmaları Laboratuvarında (DETALAB) bir hayvan ameliyatı esnasında ameliyathane içerisindeki atmosfer koşulları geliştirilen cihaz ile izlenmiştir. Cihaz ortamda bulunan iç ortam hava

kirletici değerlerini sensörler aracılığı ile kaydetmiştir. LoRa kablosuz haberleşme sistemleri ile ameliyathane ortamında izlenen veriler uzakta bulunan bilgisayar alıcı-verici etkileşimi ile aktarılmıştır.

Anahtar kelimeler: İç ortam hava kalitesi, partikül madde, uçucu organik bileşikler, LoRa haberleşme protokolü.

MONITORING DEVICE DESIGN OF INDOOR AIR QUALITY IN SURGERY ROOM

Fulya Karaman

ABSTRACT

In the scope of this thesis, an indoor air quality device has been developed to observe the concentrations of contaminants in the surgery room environment. The device that developed in this study offers the opportunity to remotely monitoring the concentrations of contaminants in the indoor environment with the LoRa protocol.

Electrochemical sensor and metal oxide sensor group are used in the developed device. A particle sensor was used for the measurement of particles in the environment and a carbon dioxide sensor was used for carbon dioxide measurement. For the wireless transfer of the measured data, the LoRa communication protocol was used.

For the measurement data of the developed device; Gas measurements were carried out in the gas measurement laboratory at Sismik A.Ş. where located in Okmeydanı Perpa Trade Center. The reactions of the sensors to CO (carbon monoxide), NH₃ (ammonia), CH₄ (methane), C₃H₈ (propane), H₂ (hydrogen) gases were evaluated in gaz measurements at Sismik A.Ş. Data is collected with the developed device in a time interval of 2 seconds. In addition to the measurements made in the Sismik A.Ş., test studies were carried out in the TÜBİTAK-MAM-ME gas measurement and analysis laboratories at Gebze. Against heptane (C₇H₁₆), xylene (C₈H₁₀), toluene (C₇H₈), methanol (CH₃OH) and triethylamine (C₆ H₁₅N) gases in gas tests the responses of the sensors were evaluated. Calibration curves of the sensors were get resulted and sensor responses were interpreted.

During an animal surgery at Istanbul University Cerrahpaşa Experimental Medicine Research Laboratory (DETALAB), the atmospheric conditions in the surgery room were observed with the developed device. The device recorded the indoor air contaminant values in the environment mediated through sensors. The data

recorded in the surgery room environment with LoRa wireless communication systems were transferred by remote computer transceiver interaction.

Keywords: Indoor air quality, particulate matter, volatile organic compounds, LoRa communication protocol.

ÖNSÖZ

İç ortam hava kalitesi sağlık açısından önemli etkiler oluşturmaktadır.İç ortam hava kalitesi son zamanlarda kapalı mekanlarda geçirilen zamanın artmasıyla küresel bir önem taşımaktadır. İç ortam hava kalitesi , kapalı ortamda sıcaklık, nem ve kirletici maddelerin konsantrasyon koşulları altında havanın kalitesidir. Bu çalışmada çeşitli nem ve sıcaklık koşulları altında ameliyathane ortamında hava kalitesi analizi yapılmıştır.

Temmuz, 2022

Fulya Karaman

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	v
ABSTRACT	vii
ÖNSÖZ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xii
TABLolar LİSTESİ.....	xv
SEMBOLLER VE KISALTMALAR.....	xvi
GİRİŞ	1
BİRİNCİ BÖLÜM.....	3
1. İÇ ORTAM HAVA KALİTESİ.....	3
1.1. İÇ ORTAM KALİTESİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER.....	5
1.1.1. İç Ortam Hava Kirleticileri	5
1.2. HAVA KALİTESİ İNDEKSİ (HKİ).....	6
1.3. HAVA KALİTESİ İNDEKSİ NASIL HESAPLANIR?	7
İKİNCİ BÖLÜM	10
2. HAVA KALİTESİ ÖLÇÜM SİSTEMLERİ	10
2.1. GAZ ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ	10
2.1.1. Gaz Kromatografisi Yoluyla Konsantrasyon Belirlenmesi	10
2.1.2. Elektronik Gaz Algılayıcılar İle Konsantrasyon Belirlenmesi	11
2.1.3. Elektriksel Özelliklerin Değişimine Dayalı Yöntemler	12
2.1.3.1. Metal Oksit Yarı İletken Algılayıcılar	12
2.1.3.2. Polimer Algılayıcılar	14
2.1.3.3. Karbon Nanotüpler.....	15
2.1.3.4. Nem Emici Materyal Algılayıcılar.....	16
2.1.4. Akustik Yöntemler.....	16
2.1.5. Optik Yöntemler	17
2.1.6. Kalorimetrik Yöntemler.....	18

2.2. GAZ SENSÖRÜNÜN PARAMETRELERİ.....	19
2.3. LORA HABERLEŞME PROTOKOLÜ.....	21
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM	23
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	23
3.1. ELEKTROKİMYASAL SENSÖRLER.....	23
3.1.1. 3 Elektrotlu Elektrokimyasal Sensörler	24
3.1.2. 2 Elektrotlu Elektrokimyasal Sensörler	25
3.2. METAL OKSİT SENSÖRLER.....	26
3.3. KULLANILAN ELEKTROKİMYASAL VE METAL OKSİT GAZ SENSÖRLERİ.....	27
3.4. OPTİK YÖNTEMLE ÖLÇÜM YAPAN GAZ SENSÖRÜ.....	29
3.5. PARTİKÜL SENSÖRÜ	29
3.6. ÇOK KANALLI GAZ SENSÖRÜ	30
3.7. LORA MODÜLÜ.....	31
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM	34
4. SİSTEM TASARIMI	34
4.1. KONTROL BİRİMİ	34
4.2. ELEKTROKİMYASAL SENSÖR BİRİMİ	41
4.2.1. 3 Elektrotlu Sensörler için Devre Şematiği	42
4.2.2. Bias Akımı Gerektirmeyen Sensör Devresi	43
4.2.3. Bias Akımı Gerektiren Sensör Devresi	45
4.2.4. Tek Beslemeli Bias Akımlı Sensör Devresi.....	46
4.2.5. Operasyonel Amplifikatör Seçimi	47
4.3. METAL OKSİT GAZ SENSÖRLERİ BİRİMİ	50
BEŞİNCİ BÖLÜM	56
5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	56
ALTINCI BÖLÜM	81
6. TARTIŞMA	81
KAYNAKÇA	83

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Gaz Kromatografisinin Şematik Diyagramı (SHU, 2017)	11
Şekil 2.2 Gaz Sensör Dizisi Algılama Yapısı (Yalçın,2017).....	12
Şekil 2.3 N-tipi ve P-tipi MOS Sensörlerinin Dirençlerinin Değişimin Şematik Gösterimi (Choopun ve ark., 2012)	14
Şekil 2.4 İletken Polimer Tabanlı Bir Sensörün Konfigürasyonu (Bai ve Shi, 2007)15	
Şekil 2.5 QCM Sensör Yapısı (Şen,2010)	16
Şekil 2.6 Bir Optik Sensörün Şematik Gösterimi (Lobnik ve ark., 2012)	18
Şekil 2.7 Lora Teknolojisi (Url4,2022)	22
Şekil 3.1 Elektrokimyasal Gaz Sensörünün Temel Bileşenleri	23
Şekil 3.2 3 Elektrotlu Elektrokimyasal Sensörler İçin Elektronik Devrenin Şematik Diyagramı (Url1,2022).....	25
Şekil 3.3 2 Elektrotlu Sensör İçin Elektronik Devrenin Şematik Diyagramı (Url1,2022).....	25
Şekil 3.4 MH-Z19 CO2 Sensörü Şematik Bağlantısı	29
Şekil 3.5 HPMA115S0-XXX Parçacık Sensörü (Url7,2022).....	30
Şekil 3.6 HPMA115SO-XXX Partikül Sensörü Şematik Bağlantısı.....	30
Şekil 3.7 Groove Çok Kanallı Gaz Sensörü.....	31
Şekil 3.8 Groove Çok Kanallı Gaz Sensörü Şematik Bağlantısı	31
Şekil 3.9 LoRa E32-433T20DT Modeli (Url8,2022)	32
Şekil 3.10 Lora Modülü Şematik Bağlantısı.....	32
Şekil 3.11 LoRa Arayüzü.....	33
Şekil 4.1 Arduino Mega Mini 2560 Pro İşlemci Kartı (Url6,2022).....	34
Şekil 4.2 Arduino Mega Mini Kontrol Birimi Şematik Bağlantısı.....	35
Şekil 4.3 Arduino Kodlama Alanı Sensör Tanımlama	36
Şekil 4.4 Arduino Kodlama Alanı SetUp	37
Şekil 4.5 Arduino Kodlama Alanı Loop	38
Şekil 4.6 MeasureGasSensor() Fonksiyon Kodu	39
Şekil 4.7 PrintSensorVal() Fonksiyon Kodu	39
Şekil 4.8 ReadADC1() Fonksiyon Kodu	40
Şekil 4.9 ReadADC2() Kodu	40
Şekil 4.10 Elektrokimyasal Gaz Sensörü Kullanan Tipik Gaz Algılama Sisteminin Blok Şeması (Url5,2022)	42
Şekil 4.11 Bölünmüş Fazlı Unbiased Sensör (Url5,2022).....	43
Şekil 4.12 Bölünmüş Fazlı Bias Akımlı Sensör (Url5,2022)	46

Şekil 4.13 Tek Beslemeli Bias Sensör Devresi (Url5,2022).....	46
Şekil 4.14 SGXOx Elektrokimyasal Sensör Şematik Bağlantısı.....	48
Şekil 4.15 SGX-NO2 Elektrokimyasal Sensör Şematik Bağlantısı.....	48
Şekil 4.16 SGX-4NH ₃ Elektrokimyasal Sensör Şematik Bağlantısı	49
Şekil 4.17 SGX-4CO Elektrokimyasal Sensör Şematik Bağlantısı.....	49
Şekil 4.18 MOS Tipi Gaz Sensörü Devre Şematığı.....	50
Şekil 4.19 TGS2600 Metal Oksit Sensör Şematik Bağlantısı	50
Şekil 4.20 TGS2602 Metal Oksit Sensör Şematik Bağlantısı	51
Şekil 4.21 TGS2620 Metal Oksit Sensör Şematik Bağlantısı	51
Şekil 4.22 TGS2603 Metal Oksit Sensör Şematik Bağlantısı	51
Şekil 4.23 Ana kart Devre Şematığı	52
Şekil 4.24 Elektrokimyasal Sensör Devre Şematığı	53
Şekil 4.25 Metal Oksit Sensör Devre Şematığı	55
Şekil 5.1 Sismik A.Ş. Firmasının Gaz Ölçüm Test Laboratuvarı.....	56
Şekil 5.2 CO Gazına Karşı Elektrokimyasal Sensör Grubunun Tepkisi	57
Şekil 5.3 CO Gazına Karşı Groove Sensör Tepkisi.....	58
Şekil 5.4 CO Gazına Karşı Figaro Sensör Grubunun Tepkisi	58
Şekil 5.5 NH ₃ gazına karşı Elektrokimyasal Sensörlerin Tepkileri	59
Şekil 5.6 NH ₃ Gazına Karşı Figaro Sensör Grubunun Tepkileri	60
Şekil 5.7 NH ₃ Gazına Karşı Groove Sensör Tepkisi	60
Şekil 5.8 CH ₄ (metan) Gazına Karşı Elektrokimyasal Sensörlerin Tepkisi	61
Şekil 5.9 CH ₄ Gazına Karşı Figaro Sensör Grubunun Tepkileri	62
Şekil 5.10 CH ₄ (metan) Gazına Karşı Groove Sensör Tepkisi	62
Şekil 5.11 C ₃ H ₈ (propan) Gazına Karşı SGX-4NH ₃ Elektrokimyasal Sensörünün Tepkisi.....	63
Şekil 5.12 C ₃ H ₈ (propan) Gazına Karşı Groove Sensör Tepkisi.....	63
Şekil 5.13 C ₃ H ₈ (propan) Gazına Karşı Figaro Sensör Grubunun Tepkileri	64
Şekil 5.14 H ₂ Gazına Karşı Groove Sensör Grubunun Tepkisi	64
Şekil 5.15 H ₂ Gazına Karşı Figaro Sensör Grubunun Tepkisi	65
Şekil 5.16 Hidrojen Gazına Karşı Elektrokimyasal Sensör Yanıtları.....	66
Şekil 5.17 SGX-4CO Sensörünün CO Gazına Karşı Tepkisi.....	66
Şekil 5.18 SGX-4CO Kalibrasyon Eğrisi	67
Şekil 5.19 SGX-4NH ₃ Sensörünün NH ₃ Gazına Karşı Tepkisi.....	68
Şekil 5.20 SGX-4NH ₃ Kalibrasyon Eğrisi	68
Şekil 5.21 Groove Çok Kanallı Gaz Sensörünün CH ₄ Gazına Karşı Tepkisi.....	69
Şekil 5.22 Groove Sensör Kalibrasyon Eğrisi	69
Şekil 5.23 TGS2603 Sensörünün Propan Gazına Karşı Tepkisi	70
Şekil 5.24 TGS 2603 Kalibrasyon Eğrisi.....	70
Şekil 5.25 Groove Çok Kanallı 102B Gaz Sensörünün H ₂ Gazına Karşı Tepkisi.....	71
Şekil 5.26 Groove Çok Kanallı Gaz Sensörü Kalibrasyon Eğrisi	71
Şekil 5.27 Tübitak MAM-ME Gaz Ölçüm ve Analiz Laboratuvarı	72

Şekil 5.28 Tübitak Gaz Ölçüm Analiz Laboratuvarında Trietilamin Gazı İçin Groove Sensör Tepkisi (702B)	72
Şekil 5.29 Tübitak Gaz Ölçüm Analiz Laboratuvarında Eşit Konsantrasyonlar İçin Groove Sensör Tepkisi	73
Şekil 5.30 %50 Nemli Ortamda 702B Sensör Tepkisi	73
Şekil 5.31 Coolterm.exe Programının Arayüzü	74
Şekil 5.32 İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Deneysel Tıp Araştırmaları Laboratuvarında Ölçüm Esnasında Hayvan Ameliyatı	74
Şekil 5.33 Ameliyathaneden Bir Adet Görsel	75
Şekil 5.34 Ameliyat Esnasında Groove Çok Kanallı Sensör Tepkileri(102B)	75
Şekil 5.35 Ameliyat Esnasında Groove Çok Kanallı Sensör Tepkileri(302B)	76
Şekil 5.36 Ameliyat Esnasında Groove Çok Kanallı Sensör Tepkileri (702B)	76
Şekil 5.37 Ameliyat Esnasında SGX-4NH ₃ Sensör Tepkileri	77
Şekil 5.38 Ameliyat Esnasında SGX-4CO Sensör Tepkileri	77
Şekil 5.39 Ameliyat Esnasında TGS2600 Sensör Tepkileri	78
Şekil 5.40 Ameliyat Esnasında TGS2602 Sensör Tepkileri	78
Şekil 5.41 Ameliyat Esnasında TGS2603 Sensör Tepkileri	79
Şekil 5.42 Ameliyat Esnasında PM _{2,5} Parçacık Sensör Tepkileri	79
Şekil 5.43 Ameliyat Esnasında PM ₁₀ Parçacık Sensör Tepkileri	80

TABLULAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1 İç Hava Kalitesi Gelişim Süreci Tarihçesi	4
Tablo 1.2 Hava Kalitesi İndeksi Sınıflandırılması	7
Tablo 1.3 Ulusal Hava Kalitesi İndeksi Kırılma Noktaları (Karakuş,2019)	8
Tablo 2.1 Temel Gaz Ölçüm Yöntemleri (Liu ve ark.,2012).....	20
Tablo 2.2 İletişim Protokollerinin Karakteristikleri (Papadimitratos,2009)	21
Tablo 3.1 N tipi ve P tipi yarı iletken metal oksitlerin gazlara olan tepkileri (Dey, 2018c).....	27
Tablo 3.2 Elektrokimyasal Gaz Sensörlerinin Performans Verileri (Url2,2022).....	27
Tablo 3.3 Metal Oksit Gaz Sensör Performans Verileri (Url2,2022).....	28
Tablo 4.1 SGX Sensörler için Bias Potansiyelleri (Url5,2022)	44

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers -Amerikan Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Birliği
CO	Karbonmonoksit
CO ₂	Karbondioksit
HVAC	Heating, Ventilating and Air Conditioning -Isıtma, Soğutma ve Havalandırma
MOS	Metal Oxide Semiconductor - Metal Oksit Yarı İletken
N ₃	Azot
NH ₃	Amonyak
NO ₂	Azot dioksit
NO _x	Azot oksitler
O ₂	Oksijen
O ₃	Ozon
PM	Particulate Matter -Partikül Madde
QCM	Quartz Crystal Microbalance -Kuars Kristal Mikrobalans
RFID	Radio Frequency Identification, Radyo Frekansı ile Tanımlama
SAW	Surface Acoustic Wave -Yüzey Akustik Dalga
SO ₂	Kükürt dioksit
VOC	Volatile Organic Compound -Uçucu Organik Bileşik
WHO	World Health Organization -Dünya Sağlık Örgütü
HKİ	Hava Kalitesi İndeksi

GİRİŞ

İç hava kalitesi insanların bulunduğu ortamdaki havanın temizliği ile ilgilidir. Yaşamsal faaliyetler için iç hava kalitesi önemli bir faktördür. İç hava kalitesi, solunan havanın kalitesinin ne kadar iyi ya da kötü olduğunun göstergesidir. ASHRAE 62–1989, 2001 ve 2004 Standardında kabul edilebilir iç hava kalitesi “İçinde, bilinen kirleticilerin, yetkili kuruluşlar tarafından belirlenmiş zararlı konsantrasyonlar seviyelerinde bulunmadığı ve bu hava içinde bulunan insanların %80 veya daha üzerindeki oranın havanın kalitesiyle ilgili herhangi bir memnuniyetsizlik hissetmediği havadır” olarak açıklanmaktadır. Günümüzde insanlar zamanlarının büyük bir kısmını kapalı ortamlarda geçirmektedir. Ortamda bulunan çeşitli gazlar ve partikül maddeler insan sağlığını etkilemektedir. İç ortamdaki sıcaklık, nem, karbondioksit (CO₂), oksijen (O₂), zehirleyici kimyasallar uçucu organik bileşikler (VOCs), partikül maddeler (PM) gibi parametreler ölçülerek iç hava kalitesinin durumu hakkında değerlendirme yapılmaktadır. Hava kalitesini olumsuz etkileyecek gazların tespit edilmesinde gaz sensörleri kullanılmaktadır.

Bir gaz sensörü, ortamda bulunan gazı tespit edebilen algılayıcı katman, gaz ile algılayıcı katman arasındaki etkileşimi anlaşılabilir fiziksel büyüklüklere çevirebilen dönüştürücü kısım ve dönüştürücüden gelen sinyalleri işleyerek kullanıcıya görsel ya da işitsel uyarı verebilen kullanıcı ara yüzünden oluşmaktadır. Günümüzde çalışma prensibi farklı fiziksel ve kimyasal prensiplere dayanan çeşitli çalışan gaz sensör tipleri bulunmaktadır. Metal oksit malzemeler üretim kolaylığı, düşük maliyet ve farklı gazlara karşı yüksek duyarlılıklar gösterme özellikleri gibi özelliklerinden dolayı gaz sensörlerinde en çok kullanılan malzemelerdir. Gelişen teknoloji sayesinde gaz sensörlerinden alınan veriler uzak mesafelere düşük güç tüketimi ile iletilebilir hale gelmiştir.

Bu teknolojilerden yaygın olanlarından biri LoRa (Long Range) teknolojisidir. LoRa teknolojisi, uzak mesafelere düşük güç tüketimiyle veri aktarmaya yarayan bir teknolojidir. LoRa, Uzun Menzilli Radyo anlamına gelir ve esas olarak makineden makineye (M2M) ve nesnelerin interneti (IoT) ağlarını hedef alır. Tüm sensörler aldıkları verileri, LoRa ağ geçidi kullanılarak o sunucunun veri merkezine periyodik olarak gönderilir.

BİRİNCİ BÖLÜM

1. İÇ ORTAM HAVA KALİTESİ

İç ortam hava kalitesi (İOHK), kapalı bir ortamda bulunan kişilerin sağlığını ve konforunu etkileyen ısı koşulları ve kirleticilerin konsantrasyonu ile temsil edilen bina içindeki havanın kalitesini ifade etmektedir. İç ortam hava kalitesi ortamın sıcaklığı, nemi ve hava hızı ile ilişkilidir. EN ISO 7730'e göre ortam sıcaklığının 20-26 °C ve nemin %30-70 arasında olması gerekmektedir (Olesen, 2000). Yaşamsal faaliyetler için solunan hava önemli bir faktördür. İç ortam hava kalitesi terimi, 70'li yıllarda İskandinav ülkelerinde çıkan petrol krizi sonrasında artan önemle gündeme gelmiştir. İç ortam hava kalitesine yönelik gelişim süreci **Tablo 1.1**'de özetlenmiştir (Brooks ve Davis, 1991; Vaizoğlu ve ark., 2000; Parab, 2001; Ellis, 2010; Readygo, 2016; Bulgurcu, 2017).

İç ortam hava kalitesinin yetersizliği bireylerin çalışma düşürebilir ve çeşitli sağlık sorunlarına neden olabilir. İç ortam hava kalitesini etkileyen önemli kirletici kaynaklarından biri partikül maddelerdir. İç hava ortamında bulunan partikül madde (PM), boyutlarına göre (PM₁₀, PM_{2.5}) insan sağlığını etkileyen hava kirleticilerden biridir. İç ortam hava kirleticileri oranı binaya, yaşanan bölgeye ve mevsimsel dönemlere göre değişim göstermektedir. Partikül maddeye uzun süre maruz kalındığında göz, burun ve boğaz tahrişi, kaşınma, alerji, kanser, üst solunum yolu hastalıkları, kalp problemleri gibi ciddi sağlık sorunları ile karşılaşmaktadır (Güneş, G., Bozkurt, E., Sönmez, S., & Çakır, N. (2015).

Tablo 1.1 İç Hava Kalitesi Gelişim Süreci Tarihçesi

Zaman Dilimi	Neden	Sonuçlar
Antik Mısır	Basit taş aletlerinin yapılmaya başlanması	Açık havada çalışan taşçıların, kapalı ortamda çalışanlardan daha sağlıklı oldukları gözlenmiş. Pliny The Elder, taş ocakları ve asbest madencileri için maske kullanma tavsiyesinde bulundu.
1 yy	Asbestin zararlı etkileri	Yüksek binaların temiz hava depolanan bir tür rezerve olduğu ve kişi başına daha çok hava düştüğü görülmüş.
Orta Çağ	Havanın düşük katlı binalarda olduğu gibi yüksek katedrallerde daha iyi olduğunun fark edilmesi	Şehirlerin kurulurken dikkat edilmesi gereken hususlar belirlendi.
11 yy	İbn-i Haldun'un, hava kirliliğinin hastalıklara sebebiyet vereceğine işaret etmesi	Solunumun oksijen alıp CO ₂ vermeye bağlı olduğunu ve hava kalitesi üzerindeki etkisinin birçok insanın bulunduğu odalarda çabucak fark edilebileceği görüldü.
1777	Modern kimyanın kurucusu Antoine Laurent de Lavoisier'in soluma üzerine çalışması	Yetersiz havalandırma nedeniyle mikropların uygun yayılma ortamı bulduğunun anlaşılması
1853 Kırım Savaşı sırası	Yaralılarla dolup taşan İstanbul'daki hastanelerde, yaralıların iyileşmesinin uzun sürmesi	Pettenkofer ve bazı arkadaşları, havalandırılan bir oda için CO ₂ limitini 1000 ppm olarak önerdi.
1862	Max Josef Pettenkofer, Lavoisier'in CO ₂ teorisine bir iyileştirme önermesi	Mimarlar tarafından hacimsel hava ilkelerine dayalı yapılar tasarlanmaya başlandı.
1870'ler	Florence Nightingale'in, hasta sonuçları ile havalandırma arasındaki bağlantıyı bulması	Binaların içi için minimum havalandırma oranını önerdi.
1936	Yaglou'nun vücut kokusunu azaltmaya çalışması	Enerji tasarrufuna gidilmiş, pencereler devamlı kapalı tutulmuş, hasta bina
1970'ler, İskandinav Ülkeleri	Petrol krizi	ASHRAE 62 no'lu standardı yayınladı.
1989	İç ortam hava kirliliği için kriterlerin belirlenmesine duyulan ihtiyaç	

1.1. İÇ ORTAM KALİTESİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

İç ortamda bulunan CO₂, uçucu organik bileşikler (VOCs – Volatile Organic Compounds), partikül maddeler (PM₁₀ ve PM_{2.5}), kükürtdioksit (SO₂), ozon (O₃), azotdioksit (NO₂) konsantrasyonları ve sıcaklık ve bağıl nem iç ortam hava kalitesini etkiler. Kükürtdioksit (SO₂), azot dioksit (NO₂), CO(karbonmonoksit) gibi bazı iç ortam kirleticilerinin temel kaynağı dış ortamdır. Bunların yanında dış ortam hava kalitesini etkileyen CO₂(karbondioksit), su buharı, O₃(ozon), formaldehit (HCHO), VOC'ler gibi faktörler iç ortam havasını da etkilemektedir (Vaizoğlu ve ark., 2000).

1.1.1. İç Ortam Hava Kirleticileri

Karbondioksit (CO₂): CO₂ kokusuz,renksiz ve yanıcı olmayan bir gazdır. Yoğunluğu, 1,977 kg/m³ ve molekül ağırlığı, 44,01 g/mol'dür (Durşen ve Yasun, 2012). CO₂'in iç ortam havasındaki miktarı 1000 ppm (1938 mg/m³) ve altında ise iç ortam havası normal kabul edilmektedir (ASHRAE, 2001; Açıköz ve ark., 2013). CO₂ derişimi 3500 ppm'i geçtiğinde, merkezi sinir alıcılarında etkiler bırakır.Derişim arttıkça merkezi sinir sistemi işlevini yapamamaya başlar.Ofis binaları,okullar gibi kapalı alanlarda CO₂ konsantrasyonunun 400 ile 1500 ppm arasında ölçülmesi beklenir (Ashrae,2003).

Karbon monoksit (CO): Renksiz,kokusuz bir gazdır. Molekül ağırlığı 28,01 g/moldür.Çok kuvvetli bir gazdır.Hava ile karışımındaki konsantrasyon değeri %0,1'e ulaştığında öldürücü etkiye sahiptir.Hava içerisinde 10 ppm gibi az bir miktarda bulunsa dahi insan sağlığını olumsuz etkiler (Kırımhan, 2006).

Ozon (O₃): Mavi renkli, keskin kokuya sahip bir gazdır. Solunumu tehlikelidir. Trioksijen olarak da tanımlanır; oksijenin kimyasal bir bileşinidir. Ozon gazının 0,12 düzeyini aşması tehlikeli olarak kabul edilmektedir (Kırımhan, 2006). O₃ gazı 0,1 ppm üzerinde olduğunda solunum problemleri, baş ağrısı, astım krizleri yaşanabilir (Sandalcı, 2016).

Uçucu organik bileşikler (VOCs): Uçucu organik bileşiklerin birçok kaynağı bulunur. Sigara dumanı, yazıcılar, boya malzemeleri parfüm, deodorant, ofis makineleri başlıca VOC kaynaklarıdır. Toluen, benzen ve ksilen gibi bileşikler iç ortamda sık gözlenen bileşiklerdir. İç ortamda benzenin yüksek konsantrasyonlarda

bulunması insan üzerinde kansorejen etkilere sebep olmaktadır (Menteşe ve Güllü, 2009). Yapılan araştırmalar uçucu organik bileşiklerin yüksek konsantrasyonda solunması halinde kronik ve akut sağlık sorunlarına neden olduğunu göstermektedir. Düşük dozlarda solunan uçucu organik bileşikler solunum yolu hastalıklarına neden olabilir. Yapılan bir araştırmada, 20-45 yaş arasındaki 88 astım hastasının uçucu organik bileşiklere maruz kalması ile nefes almakta güçlük çektiği gözlenmiştir (Norback ve Ark., 1995).

Azot dioksit (NO₂): Azot dioksit insan sağlığı için son derece tehlikelidir, toksit özelliktedir. Azot dioksit konsantrasyonu 150 ppm (285 µg/m³) değerini geçtiğinde insan sağlığı üzerinde ölümcül etkilere sahiptir. Solunan azot dioksit konsantrasyonunun artması akciğerleri tahriş eder ve solunum enfeksiyonuna sebep olur (Öztürk, 2010).

Partikül madde (PM – Particulate Matter): Atmosferde partikül maddeler (PM₁₀ ve PM_{2.5}) 0,1 ile 100 µm arasında bulunur. Partikül maddelerin solunma riskleri fazladır. Bu yüzden aerosol kirleticiler arasında en tehlikeli olanıdır. Partikül maddelere maruziyet solunum yollarında ciddi sağlık problemlerine neden olabilmektedir (Wang, 2012). Partikül maddelerin büyüklüğü 2.5 µm'den küçük olanlar solunum yolu ile akciğerlere ulaşılır. PM_{2.5}, akciğerlere ulaşarak kanın içinde bulunan karbondioksitin oksijene dönüşümünü yavaşlatır. Bu yüzden oksijen kaybı oluşur. Partikül maddelere uzun süre maruz kalındığında partikül madde birikmesi olur ve akciğer ve kalp fonksiyonlarını olumsuz etkiler. PM₁₀ kirliliğine kısa süre maruz kalındığında da akciğer fonksiyonlarını olumsuz etkiler (Öztürk, 2008).

1.2. HAVA KALİTESİ İNDEKSİ (HKİ)

Hava kalitesi indeksi, günlük hava kalitesinin raporlanması için kullanılan bir indekstir. Bulduğumuz bölgede, havanın ne oranda kirli ya da temiz olduğu hakkına bilgi verir. Hava kirliliği indeksi, kirli havaya maruz kalındığında oluşabilecek sağlık etkilerini de belirtir. HKİ, 0-500 değerleri arasında hazırlanmış bir gösterge çizelgesidir. Çizelgede HKİ değeri büyüdükçe hava kirliliği artar. HKİ değerinin 300'ün üstünde olması hava kalitesinin kötü olduğunu ve sağlık açısından tehlikeli olduğunu gösterir. HKİ değerinin 100'ü göstermesi ulusal hava kalitesi standardına

karşılık gelir. HKİ değerinin 100'ün altında olduğunda hava kalitesinin iyi olduğu, 100'ü aştığında ise yaşamsal fonksiyonların etkilenme riski artar. **Tablo 1.2**'de hava kalitesi indeksinin sağlık seviyelerine göre karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 1.2 Hava Kalitesi İndeksi Sınıflandırılması

HAVA KALİTESİ İNDEKSİ (HKİ)	HAVA KALİTESİ	RENKLER
0-50 Arası	İyi	Yeşil
51-100 Arası	Orta	Sarı
101-150 Arası	Hassas gruplar için sağlıksız	Turuncu
151-200 Arası	Sağlıksız	Kırmızı
201-300 Arası	Çok Sağlıksız	Mor/Pembe
301-500 Arası	Tehlikeli	Kahverengi

1.3. HAVA KALİTESİ İNDEKSİ NASIL HESAPLANIR?

Hava kalitesi, kirletici konsantrasyonlarını kaydeden ölçüm cihazlarından oluşan ağ yardımı ile ölçülür. Elde edilen ölçüm değerleri standart formüller kullanılarak hava kalitesi indeksi değerine dönüştürülür. Hava kalitesi indeksi değeri, seçili alandaki her kirletici için ayrı ayrı hesaplanır. Farklı kirleticiler için, farklı HKİ değeri hesaplanır ve alınan en yüksek HKİ değeri, güne ait HKİ değerini oluşturur. Örneğin, ozon için HKİ değerinin 100 olması, 0,08 ppm (parts per million) ozon seviyesine karşılık gelir (8 saat üzerindeki ortalama). Taneciksel madde kirliliği için HKİ değerinin 100 olması tanecik çapı 2,5 µm (mikrometre) 'ye kadar olan tanecikler için 40 µg/m³ 'e (mikrogram/metre küp), tanecik çapı 10 µm¹ 'ye kadar olan tanecikler için ise 150 µg/m³ 'e karşılık gelir. CO₂ için HKİ değerinin 100 olması, 9 ppm (parts per million) konsantrasyon seviyesine karşılık gelmektedir. Hava indeksi hesaplanırken, kirlilik konsantrasyonu 0 ile 500 arasında bir sayıya dönüştürülmektedir. 0, 50, 100, 150...500 arasındaki HKİ değerleri “kesme noktası”

¹ 1µm=0.001 milimetre

olarak isimlendirilir. HKİ kırılma noktaları bir kirlilik konsantrasyonuna karşılık gelir. Hava kalitesi indeksi verilen formül ile hesaplanmaktadır (Fang ve Ark., 2015).

$$HKİ = \left[\frac{I_{hi} - I_{low}}{BP_{hi} - BP_{low}} \right] \times (Cp - BP_{low}) + I_{low} \quad \text{Denklem 1.1}$$

$$Nihai\ HKİ = \max (HKİ_1, HKİ_2, HKİ_3 \dots HKİ_{in}) \quad \text{Denklem 1.2}$$

Burada; HKİ=Hava Kalitesi İndeksi, BP_{LOW}: Kirletici konsantrasyondan küçük ya da kirletici konsantrasyonuna eşit kırılma noktası, C_P: Kirletici Konsantrasyonu, BP_{hi}: Kirletici konsantrasyonundan daha büyük veya kirletici konsantrasyonuna eşit kırılma noktası, I_{hi}: BP_{hi}'ye karşılık gelen HKİ, I_{low}: BP_{low}'a karşılık gelen HKİ'dir. **Tablo 1.3**'te hava kalitesi indeksinin farklı kirleticiler için kırılma noktaları gösterilmiştir.

Tablo 1.3 Ulusal Hava Kalitesi İndeksi Kırılma Noktaları (Karakuş,2019)

İndeks	HKİ	SO ₂ (µg/m ³) 1 Sa. Ort.	NO ₂ (µg/m ³) 1 Sa. Ort.	CO (µg/m ³) 8 Sa. Ort.	O ₃ (µg/m ³) 8 Sa. Ort.	PM ₁₀ (µg/m ³) 24Sa.Ort.
İyi	0-50	0-100	0-100	0-5500	0-120	0-50
Orta	51-100	101-250	101-200	5501- 10000	121-160	51-100
Hassas	101-150	251-500	201-500	10001- 16000	161-180	101-260
Sağlıksız	151-200	501-850	501-1000	16001- 24000	181-240	261-400
Kötü	201-300	851-1100	1001- 2000	24001- 32000	241-700	401-502
Tehlikeli	301-500	>1101	>2001	>32001	>701	>521

Ülkemizde belirlenen noktalarda kurulan istasyonlar ile T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın kontrolünde sürekli ölçümler alınmaktadır. Bu istasyonlara Ulusal Hava Kalitesi İzleme İstasyonları adı verilmektedir. Ulusal Hava Kalitesi İzleme İstasyonları (UHKİİ) aracılığıyla bulunan ortamdaki kirletici miktarları ölçülür ve hava kalitesi belirlenir. Türkiye'de hava kalitesi izleme çalışmaları 1982 Anayasası ve 1983 Çevre Kanunu'na dayanmaktadır. İlk defa 2004 yılında, Ankara'da 8 adet otomatik hava kalitesi ölçüm istasyonu kullanılmıştır. 2005 ve 2007 yılları arasında 81 ilde sürekli izlenebilen hava kalitesi ölçüm istasyonları kurulmuştur. 2005 yılında kurulan UHKİİ'na web üzerinden (www.havaizleme.gov.tr) erişim izni verilmiştir (Şişman,2019).

İKİNCİ BÖLÜM

2. HAVA KALİTESİ ÖLÇÜM SİSTEMLERİ

İç ortam hava kalitesini standartlara uygun değerlerde tutmak için ; ortamın nem ve sıcaklık değerleri standartlara uygun seviyelerde tutulmalı kirletici kaynakları kontrol edilmelidir. Ortamın standartlara uygun değerlerde tutulabilmesi için ve kirletici kaynaklarının miktarının ölçülebilmesi için hava kalitesi ölçüm sistemlerine ihtiyaç vardır.

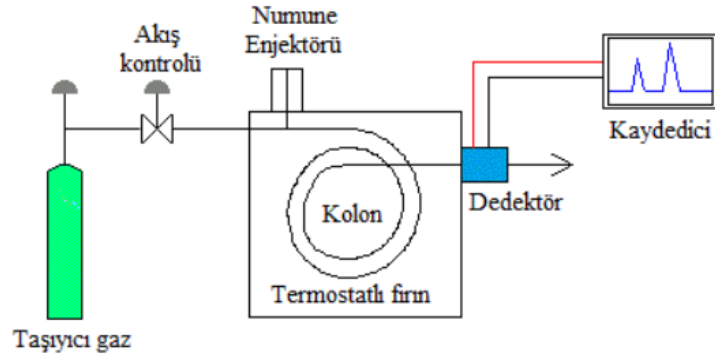
2.1. GAZ ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Gaz konsantrasyonu ölçümü için kimyasal süreçlerden veya algılayıcı malzemelerin elektriksel özelliklerinden yararlanır. Kimyasal yöntemlerle gaz konsantrasyonu ölçülmesi işlemlerine “gaz kromatografisi” veya “kütle spektrometresi” de denir. Son yıllarda gaz konsantrasyonunun ölçülmesinde elektronik gaz algılayıcılar yaygınlaşmıştır.

2.1.1. Gaz Kromatografisi Yoluyla Konsantrasyon Belirlenmesi

Bir karışımda gaz halinde bulunan bileşenlerin birbirinden ayrıştırılmasında kullanılan kimyasal bir yöntemdir. Karışım halinde olan gazın içindeki ölçülmek istenen gaz konsantrasyonunun belirlenmesi için kullanılır. Karışımların nitel ve nicel analizinde çok kullanılan bir separasyon yöntemidir (Shivaraj ve ark., 2015). Diğer yöntemlere göre numunenin ayrılması ve analizi için çok hızlıdır, yüksek hassasiyet ve doğruluk özelliklerine sahiptir. Pahalı bir yöntemdir, sadece uçucu numuneler veya uçucu hale getirilebilen numuneler bu yöntemle ayrılır.

Şekil 2.1'de gösterilen gaz kromatografisinin şematik diyagramında, kolonun başından enjekte edilen bir numune içindeki bileşikler, taşıyıcı gaz ile (azot, helyum gibi) ile kolondan farklı sürelerde taşınır ve ayrılır. Ayrılan bileşikler dedektör tarafından algılanır ve üretilen sinyal kaydedicide izlenir (SHU, 2022).



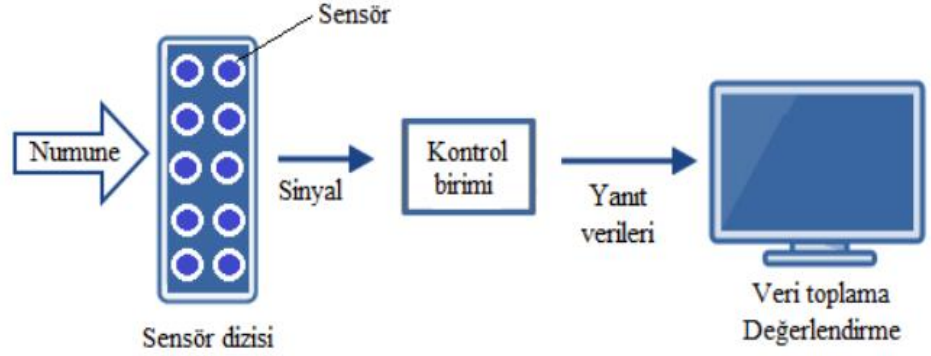
Şekil 2.1 Gaz Kromatografisinin Şematik Diyagramı (SHU, 2017)

2.1.2. Elektronik Gaz Algılayıcılar İle Konsantrasyon Belirlenmesi

Gaz kromatografisi yöntemi büyük düzenekler ve kimyasal süreçler gerektirdiğinden pahalı ve ölçüm sonuçları uzun süre gerektirdiğinden birçok gaz ölçüm uygulaması için uygun değildir. Algılayıcı malzemenin ortamdaki gaz derişimine bağılı olarak elektriksel özelliğinde değışim olduğunun bulunması elektronik gaz ölçüm sistemlerinde hızlı gelişmeler sağlamıştır. Bu sayede gaz ölçüm sonuçları daha kısa zamanda ve daha az maliyette elde edilmiştir.

Ortamdaki gaz derişimine bağılı olarak algılayıcı malzeme etkileşir ve malzemenin iletkenliğinde değışim meydana gelir. İletkenlikteki değışim; akım, gerilim ve frekans değışiminin ölçülmesi ile bulunur. Akım, gerilim, frekans şeklindeki elektriksel işaret değışimi mikrodenetleyici ile sayısal veriye dönüştürülür. Birçok sensörden alınan veriler çeşitli yöntemler ile işlenir ve değılendirilir. Hassas ölçüm gerektiren ya da birden fazla gaz türünün algılanması gereken durumlarda farklı algılayıcı malzemeler ile kaplanmış elektronik sensör dizileri kullanılmaktadır. Numune gazlara veya buhara maruz kalma süresince alınan sensörlerin yanıt verileri özel algoritmalar kullanılarak işlenir ve değılendirilir (Harberck ve ark., 2011).

Sensör dizisi sisteminin çalışma düzeni Şekil 2.2’de şematik olarak sunulmuştur.



Şekil 2.2 Gaz Sensör Dizisi Algılama Yapısı (Yalçın,2017)

Gazların tespiti üzerine yapılan araştırmalar, gaz algılama işleminin yüzey reaksiyonları ile güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu belirtmektedir (Wang ve ark., 2010).

2.1.3. Elektriksel Özelliklerin Değişimine Dayalı Yöntemler

Hedef gazın konsantrasyonunun ölçülmesinde malzemenin direnç, kapasitans veya frekansındaki değişimlere dayalı yöntemler dört grupta incelenir. Bunlar; metal oksit yarı iletken algılayıcılar, polimer algılayıcılar ve nem emici metaryal algılayıcılardır.

2.1.3.1. Metal Oksit Yarı İletken Algılayıcılar

Metal oksitler üretim kolaylığı, düşük maliyet ve farklı gazlara karşı yüksek duyarlılıklar gösterme özellikleri gibi özelliklerinden dolayı gaz sensörlerinde en çok kullanılan malzemelerdir. Metal oksit gaz sensörleri karbondioksit (CO_2), karbonmonoksit (CO), etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), metan (CH_4), hidrojen (H_2), amonyak (NH_3), hidrojen sülfür (H_2S), azot oksit (NO), azot dioksit (NO_2), dimethylamine ($\text{C}_2\text{H}_7\text{N}$) (DMA), oksijen (O_2), ozon (O_3), kükürt dioksit (SO_2), aseton ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$), sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), , trimethylamine ($\text{C}_3\text{H}_9\text{N}$), propan (C_3H_8), nem, duman ve diğer birçok gazı algılayabilmektedir (Eranna vd., 2004).

Metal oksit gaz algılayıcıların çalışma prensibi oksijen ile hedef gazın etkileşmesiyle gerçekleşecek olan yüzey reaksiyonları sonucunda elektrik direncinin

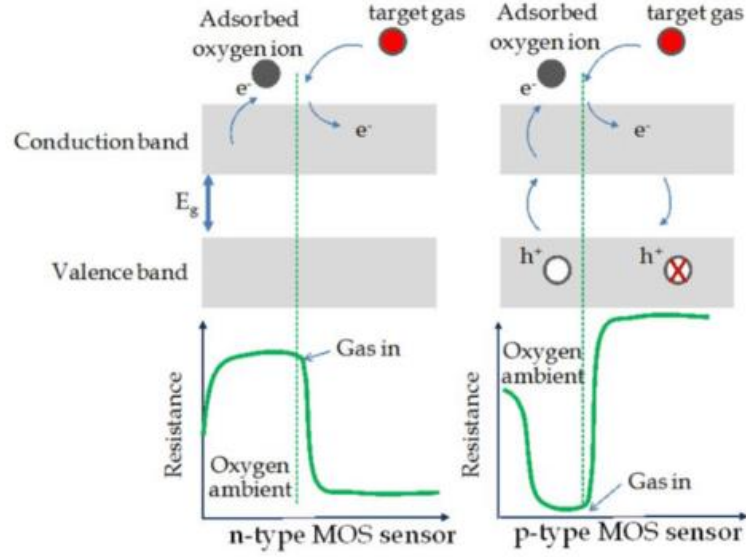
artması veya azalması esasına dayanmaktadır. Değişen elektrik direncinin ölçülmesi ile hedef gazın konsantrasyon değişimi belirlenmektedir (Cömert, 2015).

MOS tabanlı gaz sensörleri, indirgeme gazlarına maruz kalma nedeniyle iletkenlik değişimi yönüne göre n-tipi ve p-tipi olmak üzere iki sınıfa ayrılır (Işık, 2015). Eğer algılama malzemesi olarak kullanılan oksit (ZnO , CaO , Al_2O_3 , SnO_2 gibi) n-tipi yarıiletken ise oksidin oksitleyici bir gaz ile etkileşimi sonrası yüzeydeki elektron miktarı azalır ve n-tipi yarı iletken direnci artar. Algılama malzemesi metal oksit (Mn_2O_3 , NiO , Ag_2O gibi) p-tipi yarı iletken ise yüzey üzerindeki elektron miktarı azalır ve elde edilen elektronlar valans (değerlik) bandında üretim delikleri ile sonuçlandığı için p-tipi yarı iletken direnci azalır. Metal oksitin indirgeyici bir gaz ile etkileşiminde, gaz yüzeydeki oksijen iyonları ile reaksiyona girerek elektronları iletim bandına gönderir. Böylece yarı iletken yüzey üzerindeki elektron miktarı artar ve n-tipi yarı iletken direnci azalır. P-tipi yarı iletken durumunda ise üretilen elektronlar deliklerle birleştiği iletkenin direnci artar (Wetchakun ve ark., 2011; Akamatsu, 2013).

Metal oksidin yüzeyindeki oksijen ile hedef gazın molekülleri arasında yanma reaksiyonu oluşur ve reaksiyon sonucunda direnç değerinde değişim meydana gelir. Metal oksidin n tipi ya da p tipi olmasına bağlı olarak direnç değerinde meydana getirdiği artma ve azalma algılanan gazın yükseltgen bir gaz mı yada indirgen bir gaz mı olduğu hakkında bilgi verir. Algılanan gaz p-tipi bir yarıiletken ise yüzey üzerindeki elektron miktarı azalır ve elde edilen elektronlar valans bandında üretim delikleri ile sonuçlandığı için p-tipi yarıiletken direnci azalır.

N-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk taşıyıcılar serbest elektronlar, p-tipi yarıiletkenlerde ise boşluklardır. n-tipi yarıiletkenlerde malzeme, ortama fazladan iletkenlik elektronu sağlayacak atomlarla katkılanmıştır. P-tipi yarıiletkenlerde ise malzeme, ortama fazladan pozitif (p-tipi) yük taşıyıcılar sağlayacak atomlarla katkılanmıştır. n-tipi metal oksitlerin direncindeki azalma ortamda indirgeyici gazların (oksijen alıcı) bulunduğunu gösterirken, artma ise ortamda yükseltgen (oksitleyici) gazların bulunduğunu gösterecektir. p-tipi metal oksitlerin davranışı ise bunun tam tersi olacaktır (Berna, 2010). **Şekil 2.3** 'de n tipi ve p tipi metal oksit sensörlerin hedef gaz ile etkileşimlerinde direnç değişimleri şematik olarak gösterilmiştir.

Metal oksitler, basit çalışma prensiplerine ek olarak hassasiyet, kararlılık, sağlam ve ekonomik olma, değişik gazlara karşı yüksek duyarlılık özellikleri ile ön plana çıkmışlardır (Cömert, 2015).



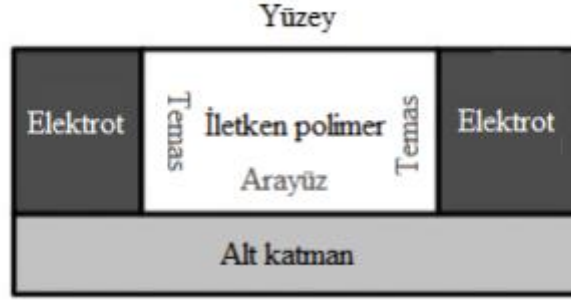
Şekil 2.3 N-tipi ve P-tipi MOS Sensörlerinin Dirençlerinin Değişiminin Şematik Gösterimi (Choopun ve ark., 2012)

2.1.3.2. Polimer Algılayıcılar

Bazı VOC'lerin belli bir eşik üzerindeki konsantrasyonları MOS tabanlı sensörler tarafından belirlenemediğinde olumsuz sağlık etkilerine sebep olabilir. Bu bileşiklerin konsantrasyonunu izlemek amacıyla algılama materyali olarak polimerlere ihtiyaç duyulur (Bagheri, 2017). Polimerler, uzun molekül zincirlerinden veya karbon içeren ağlardan oluşan organik maddelerdir (Aran, 2007).

Gaz algılama için kullanılan polimerler; iletken ve iletken olmayan polimerler olarak iki gruba ayrılabilir. Elektriksel iletkenliği, farklı organik ve inorganik gazlara maruz kalmasından etkilenen iletken polimerler (Bagheri,2017), asit bazlı veya oksitleyici özelliklere sahip gazları algılama uygulamalarında (Adhikari ve Majumdar,2004); iletken olmayan polimerler ise farklı sensör cihazlarında adsorbe edilebilir kaplamalar olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Bagheri, 2017).

Polimer tabanlı bir sensör, **şekil 2.4**'de gösterildiği gibi bir ya da birkaç elektrot ve bu elektrotlarla temas halindeki iletken bir polimer tabakasından oluşabilir.



Şekil 2.4 İletken Polimer Tabanlı Bir Sensörün Konfigürasyonu (Bai ve Shi, 2007)

Yüksek sıcaklıklarda çalışan MOS tabanlı sensörlere göre, polimer tabanlı sensörler çok düşük enerji tüketerek oda sıcaklığında çalışırlar. Pahalı araç gereçlere ihtiyaç duymazlar ve taşınabilirlerdir (Péres ve ark., 2012). Polimer tabanlı sensörler, yüksek hassasiyete ve kısa tepki süresine sahiptir. Benzen, tolüen gibi bazı önemli organik analitler ve diğer VOC'ler oda sıcaklığında ve ılıman şartlar altında reaktif olmadığından polimerle tespit edilmesi zordur (Bai ve Shi, 2007).

2.1.3.3. Karbon Nanotüpler

Karbon nanotüpler, oda sıcaklığındaki NO_x(nitrik oksit), CO₂ (karbondioksit), NH₃(amonyak) gibi gazların küçük konsantrasyonlarına karşı aşırı duyarlıdır. Ayrıca yüksek hassasiyet, hızlı tepki süresi, büyük emme kapasitesi ve yüzey alanı / hacim oranı nedeniyle eski tip sensörlerden daha iyi özelliklere sahiptir (Thai ve ark., 2011).

Karbon nanotüpler genellikle tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüpler olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır. Tek duvarlı nanotüpler, birkaç nanometre çapında kesintisiz bir silindir içine yuvarlanmış bir atom kalınlığında grafiti tabakası olarak düşünülebilir. Tek duvarlı nanotüplerin elektronik özellikleri kimyasal çevreye, özellikle oksijen maruziyetine karşı çok hassastır (Wang ve Yeow, 2009). Çift duvarlı karbon nanotüpler, birbiri içine sokulmuş iki tane tek duvarlı karbon nanotüpünden oluşmaktadır (Shen ve ark., 2011). İki katmanlı tüp yapısından dolayı tek duvarlı nanotüplere kıyasla gaz algılama mekanizması daha karmaşıktır. Ancak belirli gazlara karşı yüksek hassasiyet gösterirler (Wang ve Yeow, 2009).

2.1.3.4. Nem Emici Materyal Algılayıcılar

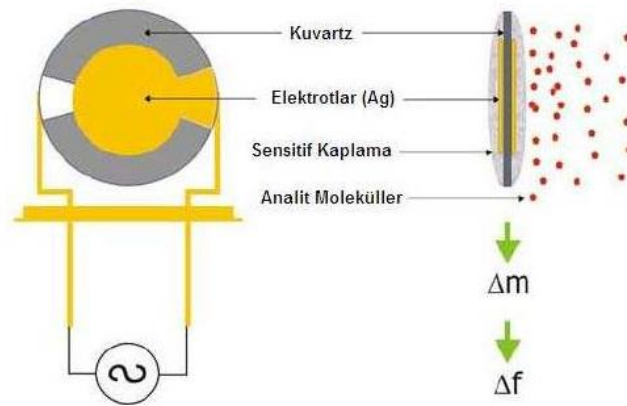
Nem emici materyaller , nem seviyesinin belirlenmesi için RFID (Radyo Frekans Tanımlama) etiketlerine yerleştirilebilir. RFID etiketleri nem emici malzemelerle kaplanır ise emilen su etiket anteni yakın alan omik yük kaybına neden olur ve RFID okuyucularında rezonans frekansı değişimine neden olur (Johan ve ark., 2007; Liu ve ark., 2012).

Kimyasal gaz arıtımında, kurutucularda, kağıt ve tekstil üretiminde, tahıl depolama, solunum ekipmanlarında, yaşam ortamlarında su buharı konsantrasyonu izleme gibi uygulamalarda kullanılırlar (Chen ve Lu, 2005).

2.1.4. Akustik Yöntemler

Kuvars Kristal Mikrobalans(Quartz Crystal Microbalance, QCM) ve yüzey akustik dalga(Surface Acoustic Wave, SAW) kütle duyarlıklı akustik sensörlerdir. SAW ve QCM sensörleri kütle duyarlıklı kimyasal sensörlerdir. Kristal yüzeyinden geçen moleküller algılayıcı moleküller ile kaplanmış sensör yüzeyinde tutunarak sensörün salınım frekansında değişikliklere neden olurlar. QCM sensörünün üzerinde biriken kütle miktarı arttıkça frekansı azalır. QCM, değişken gaz konsantrasyonlarına doğrusal tepkiler verdiği için gaz algılama sistemlerinde çok sık tercih edilmektedir.

QCM sensörü **şekil 2.5**'de görüldüğü gibi bir çift elektrot ve kuartz kristal ile kaplanmış bir iletken polimerden oluşmaktadır.



Şekil 2.5 QCM Sensör Yapısı (Şen,2010)

SAW sensörünün gaz algılama mekanizması: duyarlı katman ortamdaki gaz moleküllerini adsorbe ettiğinde, yayılma yüzeyi için sınır koşulları değiştirilir ve böylece dalganın hem hızı hem de zayıflaması değişir (Taşaltın ve ark., 2012).

SAW sensörleri, QCM sensörlerine göre daha yüksek frekanslarda çalışır, bu da alan ve güç tüketiminin azalmasına neden olur. Yüksek frekans, çözünürlüğü artırırken parazit, sinyal bozulması gibi problemlerle karşılaşılabilir (Özmen ve ark., 2016).

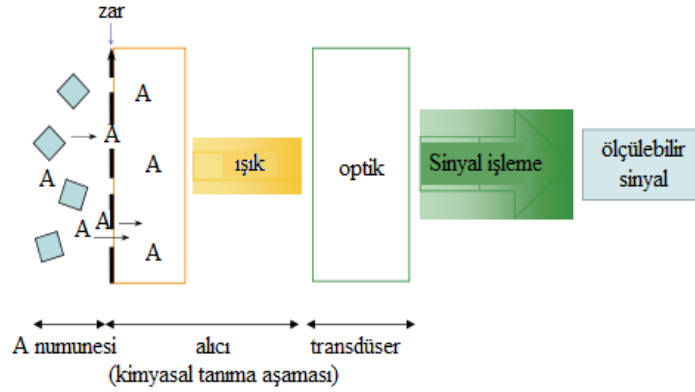
2.1.5. Optik Yöntemler

Belirli bir optik dalga boyundaki bir gaz türünün optik absorpsiyonunu, emisyonunu ve saçılmasını izler. Bu optik adsorpsiyonun veya emisyonun dalga boyuyla dağılımı gaz türünün konsantrasyonu gösterir (Shivaraj ve ark., 2015).

Optik yöntemler diğer gaz algılama yöntemlerine göre daha hassas, seçici ve kararlıdır. Gaz sensörleri üzerinde uygulamaları, zor küçültülme ve yüksek maliyet sebebi ile kısıtlanmıştır. Uzaktan hava kalitesi izlemede, yüksek doğruluk ve emniyetli gaz kaçağı tespit sistemlerinde, üst düzey pazar uygulamalarında kullanılmaktadır (Liu ve ark., 2012).

Optik sensörler, bir iletim elemanı ve bir algılama elemanından oluşur. Algılama elemanı verilen bileşiğin konsantrasyonunu tanımlar ve bu parametrenin büyüklüğü ile orantılı optik bir sinyal sağlar. **Şekil 2.6'**da gösterildiği gibi birçok durumda, numune bileşikler ile etkileşimde olabilen ince bir katman ile alıcının görevi yerine getirilebilir (Lobnik ve ark., 2012). Optik sensörlerin çalışma prensibi **şekil 2.6'**da şematize edilmiştir.

Optik gaz sensörleri; frekans, ışık şiddeti, faz farkı ve kutuplanma gibi niceliklerde oluşan değişikliklere göre ortamdaki kimyasal değişimi ölçerler. Buna dayanarak; optik sensörler bir iletim elemanı ve bir algılama elemanından oluşur. Alıcı kısım bir parametre tanımlar (örneğin verilen maddenin derişimi gibi) ve bu parametreni büyüklüğü ile orantılı optik bir sinyal sağlar (Lobnik ve ark., 2012).



Şekil 2.6 Bir Optik Sensörün Şematik Gösterimi (Lobnik ve ark., 2012)

2.1.6. Kalorimetrik Yöntemler

Termometrik (kalorimetrik) sensörler, kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan sıcaklık değişimlerini direnç, akım ve voltaj değişimi gibi elektrik sinyallerine dönüştürür. Kalorimetrik sensörler, hedef gazın yanmasını etkili bir şekilde destekleyecek bir katalizör gerektirirler. Yanıcı bir gaz veya buhar varlığında, sıcak katalizör yanmaya benzer bir kimyasal reaksiyonda oksidasyonun meydana gelmesine izin verir. Sıcaklıktaki bu artış dirençte değişikliğe neden olur. Direnç değişimi daha sonra doğrudan çevredeki atmosferdeki gaz konsantrasyonu ile ilgilidir. Kalorimetrik gaz sensörlerinin avantajı, yalnızca bir gaza olan yüksek seçiciliğidir.

Kalorimetrik sensör cihazları, kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan sıcaklık değişimlerini direnç, akım ve voltaj değişimi gibi elektrik sinyallerine dönüştürür. Katalitik sensörler, bu tür gaz sensörlerinin en çok kullanılan türüdür. Katalitik gaz algılayıcı, özel katalizör ile kaplanmış bir platin tel bobini içeren algılayıcı minik bir boncuk şeklindedir. Katalizör normal ortamdan daha düşük enerjide yanıcı gaz ile tepkimeye girerek platin bobinin ısınmasına ve direncinin değişmesini sağlar. Aktif boncuğun yanında katalizör içermeyen bir boncuk daha bulunur. Katalizör olmadığından bu boncuk içinde yer alan bobin direnci değişmeden kalır. Böylece aradaki direnç farkı kullanılarak ortamda gaz olup olmadığı veya hangi seviyede bulunduğu anlaşılabilir (Korotcenkov, 2013).

2.2. GAZ SENSÖRÜNÜN PARAMETRELERİ

İdeal bir gaz sensörünün performansını değerlendirmek için bazı parametreler kullanılmıştır. Parametrelerden önemli olanlar aşağıda listelenmiştir (Gründler 2007).

- Hassasiyet (Sensitivity): Sensörün gaz ölçümünde ölçülen numunenin değişim miktarına göre ürettiği sinyal değerinin değişimidir.
- Seçicilik (Selectivity): Sensörün farklı kimyasal bileşenlerden oluşan bir atmosferde belirli bir analiti tanınmasına seçicilik denir.
- Algılama limiti (Limit of Detection): Belirli koşullar altında hedef gazlar için
- Tepki süresi (Response Time): Sensörün hedefteki gaz ilk etkileşiminden sonra ilk sinyalin oluşması arasında geçen zamandır. Tepki süresinin kısa olması sensörün ideale yakınlığını ifade eder.
- Dinamik aralık: Algılama alt limiti ile üst sınır konsantrasyonu arasındaki konsantrasyon aralığıdır.
- Yenilenme Süresi (Recovery Time): Gaz ortamdan uzaklaştığında çıkış sinyalinin eski tepkisine geri dönüşü için geçen süredir.
- Tekrarlanabilirlik (Repeatability): Ölçümde kullanılan bütün parametreler sabit kalmak koşuluyla tekrar ölçümde sonuçların aynı değerleri vermesi sensörün tekrarlanabilirlik özelliğinin olduğu anlamına gelir.
- Üretim Maliyeti: Bir ürünün üretilebilmesi için malzeme, işçilik, genel üretim giderleri toplamından oluşmaktadır.
- Ömür: Sensörün performansını değiştirmeksizin çalışabileceği minimum süredir.
- Hata: Sensörün verdiği değer ile gerçek değer arasındaki fark değeridir.

Bu parametreler çerçevesinde gaz ölçüm yöntemlerinin üstünlük ve zayıflıkları **Tablo 2.1**'de özetlenmiştir.

Tablo 2.4 Temel Gaz Ölçüm Yöntemleri (Liu ve ark.,2012)

METARYAL	ÜSTÜNLÜK	ZAYIFLIK
Metal Oksit Yarıiletken	Düşük maliyet	Nispeten düşük hassasiyet ve seçicilik
	Kısa tepki süresi	Çevresel faktörlere duyarlı
	Hedef gazlar	Yüksek enerji tüketimi
	Uzun ömür	Yüksek hassasiyet
Polimer	Kısa tepki süresi	Uzun süreli kararsızlık
	Düşük üretim maliyeti	Zayıf seçicilik
	Basit ve taşınabilir yapı	Tersinmezlik
	Düşük enerji tüketimi	
Karbon Nanotüpler	Ultra duyarlı	Üretimde zorluklar
	Mükemmel emici kapasite Geniş yüzey alanı/hacim oranı	Yüksek maliyet
	Hızlı tepki süresi	
	Düşük ağırlık	
Nem Emici Materyal	Düşük maliyet	Sürtünmeye karşı kolay yıpranma.
	Düşük ağırlık	Yüksek nemde potansiyel tersinmezlik
	Su buharına yüksek hassasiyet	
Optik Yöntemler	Yüksek hassasiyet, seçicilik ve kararlılık	Minyatürleştirmede zorluk
	Uzun ömür	Yüksek maliyet

	Çevresel değişime duyarsız	
Gaz Kromotografisi	Mükemmel ayırma performansı Yüksek hassasiyet ve seçicilik	Yüksek maliyet Taşınabilir uygulamalar için minyatürleştirmede zorluk
Akustik Yöntemler	Uzun ömür İkincil kirlilikten kaçınma	Düşük hassasiyet Çevresel değişime duyarlı

2.3. LORA HABERLEŞME PROTOKOLÜ

Son on yılda nesnelerin interneti uygulamalarının artması ile birlikte verilerin uzak mesafelere düşük güç tüketimi ile aktarılması önemli bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bu ihtiyaca istinaden birçok haberleşme protokolü geliştirildi; GPRS, Wifi, Bluetooth ve LoRa haberleşme protokolüdür. Wi-Fi, Bluetooth ve hücresele ağlar kullanılarak kablosuz haberleşme sağlanır. Ancak bu bantlar gürültü, parazit, ağ gecikmesi, kesinti ve verimsizlik gibi büyük sorunlara neden olabilmektedir.

LoRa haberleşme protokolü, bu sorunları ayrı bir ağa sahip olarak çözmek için tasarlanmıştır. LoRa haberleşme protokolünde radyo frekansları kullanıldığı için diğer haberleşme protokollerine göre daha az enerji tüketiyor ve daha uzak mesafelere veri aktarabiliyoruz fakat verinin boyutları da daha küçük oluyor (Url3,2022).

Tablo, farklı iletişim protokolleri arasındaki karşılaştırmayı gösterir.

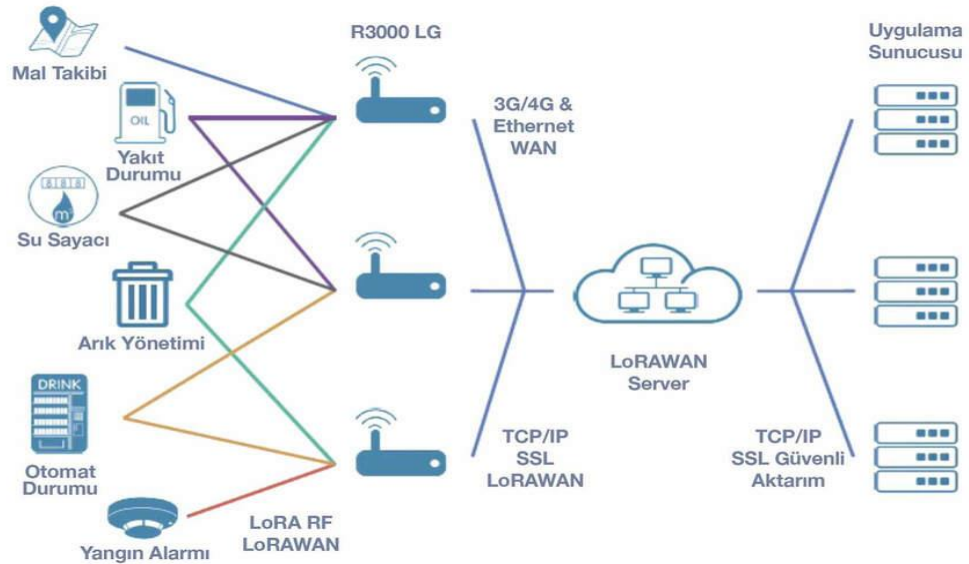
Tablo 2.5 İletişim Protokollerinin Karakteristikleri (Papadimitratos,2009)

Karakteristik	Bluetooth	Zigbee	Wi-Fi	LoRa
<i>Max uç cihazlar</i>	255(BLE'de 2 milyar)	64000'den fazla	IP adresine bağlı	5000'den fazla
<i>Tepe Akım Tüketimi</i>	30 mA	30 Ma	100 Ma	17 mA
<i>Aralık</i>	10 m	10-100 m	100 m	15 km'den fazla
<i>Veri Hızı</i>	1 Mbps	250 kpbs	11 Mbps ve 54 Mbps	290 bps-50 Kbps

Maliyet	Düşük	Düşük	Orta	Düşük
Topoloji	Yıldız	Yıldız ve Düğüm	Yıldız ve noktadan noktaya	Yıldız
İletim Tekniği	Frekans Atlamalı Spread Spektrum	Doğrudan yayılmış spektrum dizisi	Ortogonal frekans bölmeli çoğullama	Chirp yayılma spektrumu

LoRa haberleşme protokolünü temel alarak tasarlanan modüller ile karşılıklı haberleşirme yapılarak fabrikalardaki otonom üretimde, akıllı şehir uygulamalarında, konum takibinde ve sinyalizasyon sistemlerinde kullanılmaktadır.

LoRa-WAN, geniş alan ağları için bir medya erişim kontrolü (MAC) protokolüdür. Düşük güçlü cihazların, uzun menzilli kablosuz bağlantılar üzerinden İnternete bağlı uygulamalarla iletişimini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. LoRa-WAN kullanılarak oluşturulan IoT sistemlerinde, sensörlerden alınan veriler bir uç nokta üzerinden ağ geçidine ulaştırılır ve ağ geçitlerinden LoRa-WAN sunucularına (server) aktarılır ve veri internete servis edilir. **Şekil 2.7**'de Lora-Wan haberleşme protokolünün örnek şematiği bulunmaktadır (Url4,2022).



Şekil 2.7 Lora Teknolojisi (Url4,2022)

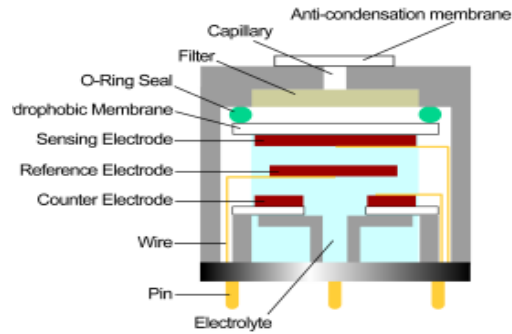
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, hava kalitesi ölçümü için elektrokimyasal gaz sensörleri metal oksit gaz sensörleri, optik yöntemle ölçüm yapan gaz sensörleri ve çok kanallı gaz sensörü kullanılmıştır.

3.1. ELEKTROKİMYASAL SENSÖRLER

Elektrokimyasal sensörler, analit ile reaksiyona girerek ve bir elektrik sinyali üreterek çalışır. Çoğu elektrokimyasal gaz sensörü, akım üreten amperometrik sensörlerdir. Gaz konsantrasyonu ile doğrusal olarak bir akım üretir. Amperometrik sensörlerin arkasındaki prensip, bir elektrokimyasal hücredeki akım-potansiyel ilişkisinin ölçülmesidir. Akım, potansiyeli genellikle başka bir elektrot (referans elektrot olarak adlandırılır) kullanılarak sabit tutulan algılama elektrodundaki (çalışma elektrodu olarak da bilinir) elektrolitik işlemin hızı ile kantitatif olarak ilişkilidir.



Şekil 3.1 Elektrokimyasal Gaz Sensörünün Temel Bileşenleri

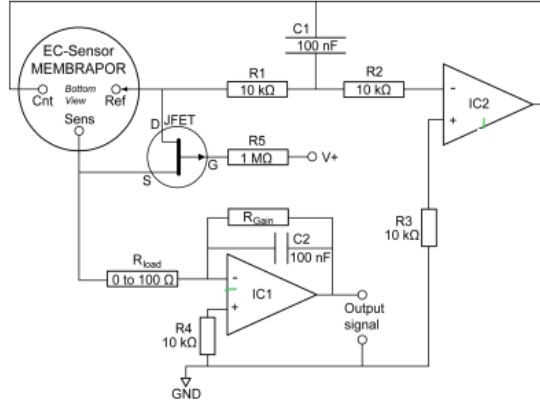
Şekil 3.1’de gösterilen elektrokimyasal sensörlerin çalışma prensibi; sensörle temas eden hedef gaz molekülleri önce toza karşı koruma görevi de gören yoğuşma önleyici bir membranı geçer. Daha sonra gaz molekülleri bir kılcal damardan, potansiyel olarak bir sonraki filtreden ve daha sonra algılama elektrodunun yüzeyine

ulaşmak için hidrofobik bir zardan yayılır. Orada moleküller hemen oksitlenir veya indirgenir, sonuç olarak elektronlar üretir veya tüketir ve böylece bir elektrik akımı üretir. Algılama elektrodunun tasarımı, hem hedef gaza karşı yüksek bir reaktivite elde etmek hem de müdahale eden gazlara istenmeyen tepkileri engellemek için çok önemlidir. Üç fazdan oluşan bir sistemi içerir: katı, sıvı ve gaz ve hepsi analit gazının kimyasal olarak tanınmasında rol oynar. Elektrokimyasal hücre, algılama elektrodundaki reaksiyonu dengeleyen karşı elektrot tarafından tamamlanır.

Sayaç ve algılama elektrodu arasındaki iyonik akım, sensör gövdesi içindeki elektrolit tarafından taşınırken, akım yolu, pim konnektörleri ile sonlandırılmış teller vasıtasıyla sağlanır. Genellikle, üçüncü bir elektrot bir elektrokimyasal sensöre (3-elektrot sensörü) dahil edilir. Referans elektrot olarak adlandırılan, algılama elektrodunun potansiyelini sabit bir değerde tutmaya yarar. Bu amaçla ve genel olarak bir elektrokimyasal sensörün çalışması için potansiyostatik bir devreye ihtiyaç vardır (Ur11,2022).

3.1.1. 3 Elektrotlu Elektrokimyasal Sensörler

3 Elektrotlu bir sensör için temel amaç, elektrokimyasal reaksiyonu kontrol etmek ve sensör tarafından üretilen akımla orantılı bir çıkış sinyali vermek için referans elektrot (Ref) ile algılama elektrodu (çalışma elektrodu olarak da bilinen Sens) arasında bir voltaj sağlamaktır. Çalışma elektrodu (Sens), gazı oksitleyen veya azaltan hedef gaza tepki verir ve gaz konsantrasyonu ile orantılı bir akım akışı oluşturur. Bu akım sensöre karşı elektrot (Cnt) vasıtasıyla verilmelidir. Cnt'de ters redoks reaksiyonu gerçekleşir ve devreyi çalışma elektrodu ile tamamlar. Gaz tespit edildiğinde, hücre akımı yükselir ve Cnt, Ref'e göre polarize olur. Devre, çalışma elektrodunun doğru potansiyelini korumak için yeterli voltaj ve akım sağlayabildiği sürece Cnt'nin potansiyeli önemli değildir. **Şekil 3.2'**de 3 elektrotlu elektrokimyasal sensörler için elektronik devre tasarımının şematiği yer almaktadır.

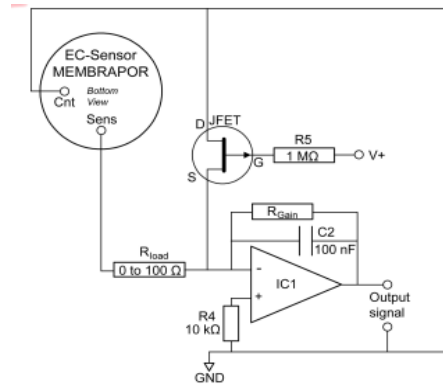


Şekil 3.2 3 Elektrotlu Elektrokimyasal Sensörler İçin Elektronik Devrenin Şematik Diyagramı (Url1,2022)

3.1.2. 2 Elektrotlu Elektrokimyasal Sensörler

2 Elektrotlu bir sensör, algılama elektrodunun potansiyelinin sabit tutulamaması gibi bir dezavantaja sahiptir. Bu, esas olarak hedef gaza maruz kaldığında meydana gelir. Bu nedenle sürekli ölçüm için 2 elektrotlu bir sensör kullanılması önerilmez. Diğer dezavantajlar, 3 veya 4 elektrotlu sensörlere kıyasla daha güçlü sıcaklık bağımlılığı ve daha düşük sinyal çıkışıdır.

Şekil 3.3’de 2 elektrotlu elektrokimyasal sensörler için elektronik devre tasarımının şematiği yer almaktadır.



Şekil 3.3 2 Elektrotlu Sensör İçin Elektronik Devrenin Şematik Diyagramı (Url1,2022)

3.2. METAL OKSİT SENSÖRLER

Metal oksit yarı iletken gaz sensörleri sanayide ve farklı uygulama alanlarında çok sık tercih edilmektedir. Farklı sensörlerle karşılaştırıldığında daha sağlam, uzun ömürlü, hafif, sağlam ve hızlı tepki sürelerine sahiptirler. Yarı iletken aktif element herhangi bir gaz ile etkileşime girdiğinde oksidasyona uğrar ve metal oksit yarı iletken sensörler hedef gaz ile elektron alışverişinde bulunarak sensörün direncinde bir değişim meydana gelmektedir. Direnç değişimi gaz konsantrasyonuyla orantılı olarak değişmektedir. Ancak çoğu zaman dirençteki değişim sadece gazın varlığıyla ya da miktarıyla açıklanamayabilir. Ölçüm yapılan ortamdaki bağıl nem ve sıcaklık sensör performansını etkilemektedir (Aksu, Sefa, 2018).

Algılama materyali ters tarafta bulunan ısıtıcı katman ile algılama yüzeyine temas eder. Algılama materyali ısıtıcı tarafında 300°C ısıtılabilir. Algılama materyalinin içindeki elektrik akışı, serbest elektron sayısı ile belirlenir.

Havadaki oksijen, algılama materyali tarafından emilir ve serbest elektronları çeker, bu da sensör direncinde artışa neden olur, algılama materyali içinde daha az elektron akışına neden olur. Metan (CH₄) veya propan (C₃H₈) gibi indirgeyici gazların varlığında, indirgeyici gaz adsorbe edilmiş oksijen ile reaksiyona girer ve adsorbe edilmiş oksijen tarafından tutulan elektronlar algılama materyaline salınır. Sonuç olarak sensör direnci azalır ve daha fazla akıma izin verir. İndirgeyici gazın konsantrasyonu arttıkça sensör direnci düşer ve daha büyük bir akıma izin verir.

Metal oksit gaz sensörleri düşük maliyetleri ve üretim kolaylığı nedeniyle sık tercih edilmektedir. Ancak yapılan araştırmalarda bu sensörlerin ortamda bulunan gaz konsantrasyonuna karşı verdikleri tepkilerin lineer olmadığı görülmektedir. Ortamın nem ve sıcaklık değerlerinin sensörün çıktı değerlerine etkileri olmaktadır (Gerboles ve Buzica, 2009). Metal oksit yarı iletkenler içerisinde bulunan yük taşıyıcının tipine göre p tipi metal oksit yarı iletkenler ve n tipi metal oksit yarı iletkenler olmak üzere 2 gruba ayrılır. **Tablo 3.1**'de indirgeyici ve oksitleyici gazlara sensör tepkileri değerlendirilmiştir.

Tablo 3.1 N tipi ve P tipi yarı iletken metal oksitlerin gazlara olan tepkileri (Dey, 2018c).

<i>Sensör Tepki Davranışı</i>	P Tipi Malzemeler	N Tipi Malzemeler	Örnek Gazlar
<i>İndirgeyici Gazlar</i>	Direnç artar.	Direnç azalır.	CH ₄ , H ₂ , CO, H ₂ S
<i>Oksitleyici gazlar</i>	Direnç azalır.	Direnç artar.	SO ₂ , O ₃ , NO _x , O ₂ , CO ₂

3.3. KULLANILAN ELEKTROKİMYASAL VE METAL OKSİT GAZ SENSÖRLERİ

Bu çalışmada, SGX Sensortech hava kalitesi sensörleri ve Figaro (Figaro Engineering, Inc., Mino, Japonya) gaz sensörleri kullanılmıştır. Sensörlerin farklı nem ve sıcaklık koşullarında verdikleri tepkilerin istatistiksel değerlendirilmesi yapılmıştır. SGX elektrokimyasal sensörler ile hedef gaz, mevcut gazın konsantrasyonuyla doğru orantılı bir akım üreten kimyasal bir reaksiyona girer. Sensörler çok az güç kullanır ve çok çeşitli ortam koşullarında çeşitli gaz konsantrasyonlarına iyi tepkiler verir.

Bu çalışmada SGX-4OX, SGX-NO₂, SGX-4NH₃, SGX-4CO sensörleri kullanılmıştır. **Tablo 3.2**'de kullanılan sensörlerin performans verileri bulunmaktadır.

Tablo 3.2 Elektrokimyasal Gaz Sensörlerinin Performans Verileri (Url2,2022)

Gaz Sensörü	SGX-4CO	SGX-4OX	SGX-NO₂	SGX-4NH₃
<i>Aralık</i>	0-2000 ppm	0 – 25% O ₂	0 – 30 ppm	0 – 100 ppm
<i>Çıkış Sinyali</i>	70 ± 20nA / ppm	70 - 130 µA	600±150 nA / ppm	100 ± 30 nA/ppm
<i>Tipik Temel Aralık</i>	±2 ppm CO eşdeğeri	-	±0.2ppm NO ₂ eşdeğeri	< ±1 ppm eşdeğeri
<i>Filtre Kapasitesi</i>	>20 000 ppm saat	-	-	-
<i>T₉₀ Cevap Süresi</i>	< 30 saniye	<15 saniye	< 30 s	< 40 s
<i>Maksimum Overload</i>	5000 ppm	30% O ₂	200 ppm	200 ppm

Lineerlik	2000 ppm'e kadar lineer	Lineer	Lineer	Lineer
Tekrarlanabilirlik	<±2CO eşdeğeri	-	<±2% NO ₂ eşdeğeri	±10%
Önerilen Yük Direnci	10 Ω	100 Ω	10 Ω	10 Ω
Çözünürlük	< 0.5 ppm	-	0.1 ppm	1 ppm

Gaz algılama platformu için, Figaro Inc tarafından üretilen ve ticarileştirilen ticari olarak temin edilebilen 4 adet metal oksit gaz sensörü kullanılmıştır. Sensör dizisinde TGS2600, TGS2603, TGS2620, TGS2602 olmak üzere dört tip sensör kullanılmıştır.

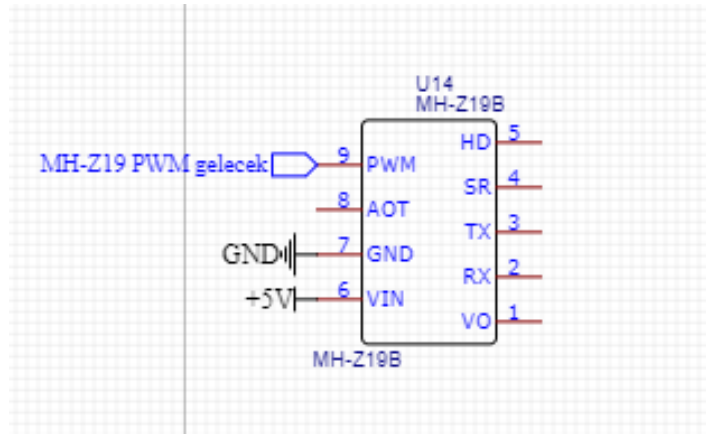
Tablo 3.3'te kullanılan metal oksit sensörlerin algılama prensibi, algılama aralığı verileri bulunmaktadır.

Tablo 3.3 Metal Oksit Gaz Sensör Performans Verileri (Url2,2022)

Model	Algılama Prensibi	Özellik	Hedef Gazlar	Algılama Aralığı
TGS2600	MOS	Hava kirleticilerine karşı yüksek hassasiyet	Hava kirleticiler	Hidrojen 1- 30 ppm
TGS2603	MOS	Amin ve kükürt serisi kokulara karşı yüksek hassasiyet	Hava kirleticiler	Etanol 1 -10ppm
TGS2620	MOS	Organik solvent buharlarına karşı yüksek hassasiyet	Alkol Çözücü buharları	50- 5,000 ppm
TGS2602	MOS	VOC, amonyak ve H ₂ S'ye karşı yüksek hassasiyet	Hava kirleticiler	Etanol 1 - 30 ppm

3.4. OPTİK YÖNTEMLE ÖLÇÜM YAPAN GAZ SENSÖRÜ

Bu çalışmada, CO₂ konsantrasyonunu ölçmek için MH-Z19 CO₂ sensörü kullanılmıştır. MH-Z19 CO₂ sensörünün çalışma prensibi NDIR teknolojisine dayanmaktadır. NDIR “dağılımsız kızılötesi” için bir endüstri terimidir. Sensör, bir hava örneği ile dolu bir tüp aracılığıyla ışık dalgalarını yönlendiren bir kızılötesi (IR) lamba ile çalışır. Bu hava, bir IR ışık dedektörünün önündeki optik filtreye doğru hareket eder. IR ışık dedektörü, optik filtreden geçen IR ışık miktarını ölçer. Lamba tarafından üretilen IR radyasyon bandı, CO₂'in 4.26 mikronluk absorpsiyon bandına çok yakındır. CO₂'in IR spektrumu benzersiz olduğundan, ışık kaynağı dalga boyunu eşleştirmek, CO₂ molekülünü tanımlamak için bir parmak izi işlevi görür. IR ışığı tüpün uzunluğu boyunca geçerken, CO₂ gaz molekülleri diğer dalga boylarındaki ışığın geçmesine izin verirken, belirli IR ışığı bandını emer. Dedektörün ucunda kalan ışık, hava numunesi tüpündeki CO₂ molekülleri tarafından emilen dalga boyu dışında ışığın her dalga boyunu emen bir optik filtreye çarpar. Son olarak, bir IR dalga dedektörü, CO₂ molekülleri veya optik filtre tarafından absorbe edilmeyen kalan ışık miktarını okur. **Şekil 3.4**'te MH-Z19 CO₂ sensörünün devre şematiği bulunmaktadır.



Şekil 3.4 MH-Z19 CO₂ Sensörü Şematik Bağlantısı

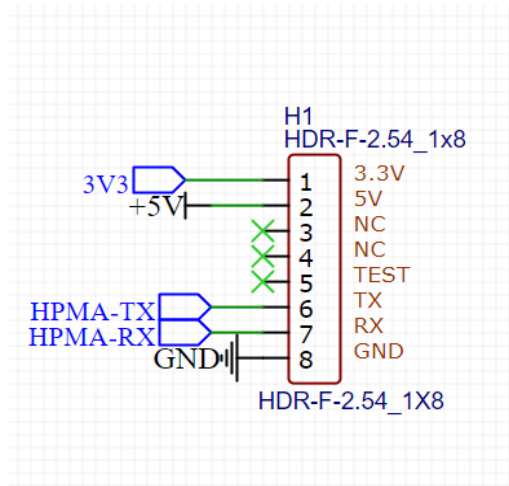
3.5. PARTİKÜL SENSÖRÜ

Bu çalışmada, 0 ila 1.000 µg/m³ konsantrasyonlarındaki partikülleri algılamak için HPM A115SO-XXX parçacık sensörü kullanılmıştır. HPM A115SO-XXX, UART çıkışlı bir HPM serisi PM_{2.5} partikül sensörüdür. HPM serisi partikül sensörü, belirli bir ortamda 0µg/m³ ila 1000µg/m³ konsantrasyon aralığındaki partikülleri tespit etmek ve saymak için ışık saçılım yöntemini kullanan lazer tabanlı bir sensördür. Bir lazer

ışık kaynağı, parçacığı algılama odasından çekilirken aydınlatır. Parçacıklar lazer ışınından geçerken ışık kaynağı kararır ve ışık dedektörüne kaydedilir. Işık daha sonra analiz edilir ve gerçek zamanlı olarak konsantrasyonları hesaplamak için partikül boyutu ve miktarı sağlayan bir elektrik sinyaline dönüştürülür. Partikül sensörü, belirli partikül konsantrasyon aralığı için partikül konsantrasyonu hakkında bilgi sağlar. HVAC (Isıtma, havalandırma ve iklimlendirme) gibi potansiyel endüstriyel uygulamalarda kullanılır. Şekil 3.5'te HPM115S0-XXX Parçacık Sensörünün görseli bulunmaktadır.



Şekil 3.5 HPM115S0-XXX Parçacık Sensörü (Url7,2022)

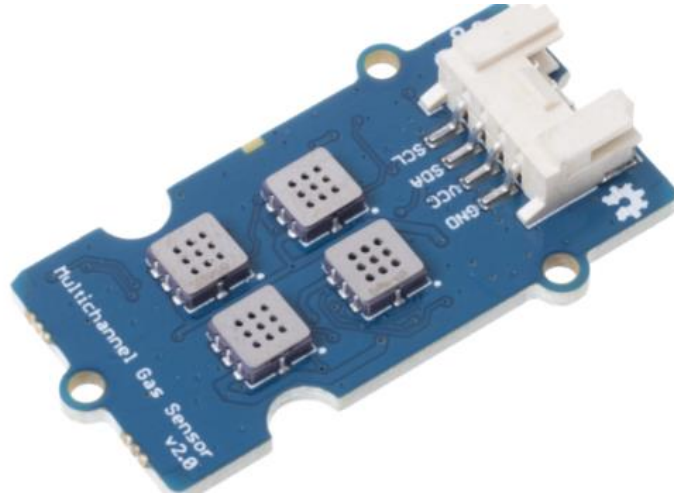


Şekil 3.6 HPM115S0-XXX Partikül Sensörü Şematik Bağlantısı

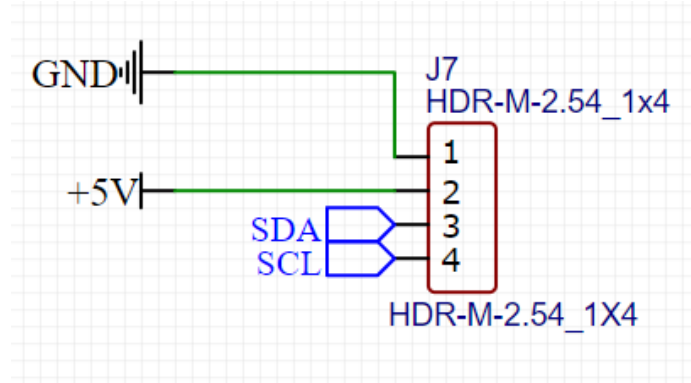
3.6. ÇOK KANALLI GAZ SENSÖRÜ

Bu çalışmada, karbonmonoksit (CO), azotdioksit (NO₂), etil alkol (C₂H₅CH), uçucu organik bileşiklerin (VOCs) ve çeşitli gazların tespit edilebilmesi için Groove-çok kanallı gaz sensörü kullanılmıştır. Her biri çeşitli gaz türlerine karşı hassas olan 4 ölçüm birimine sahiptir, bu da aynı anda dört veri seti alabilmemizi sağlamaktadır. Bu

dört veri seti ile farklı gaz türleri de değerlendirilebilir. Groove çok kanallı gaz sensörü üzerinde dört bağımsız sensör bulunmaktadır. Bu sensörler, 102B NO₂ sensörü, 302B C₂H₅CH sensörü, 502B VOC sensörü ve 702B CO sensörüdür. Kullanılan gaz sensörü MEMS teknolojisine dayanmaktadır ve önemli ölçüm kararlılığı ile küçük boyutta olma avantajına sahiptir. Sensörde 32-bit Value-line ARM® mikro denetleyici kullanılmıştır. **Şekil 3.7**'da Groove Çok Kanallı Gaz Sensörünün görseli bulunmaktadır.



Şekil 3.7 Groove Çok Kanallı Gaz Sensörü



Şekil 3.8 Groove Çok Kanallı Gaz Sensörü Şematik Bağlantısı

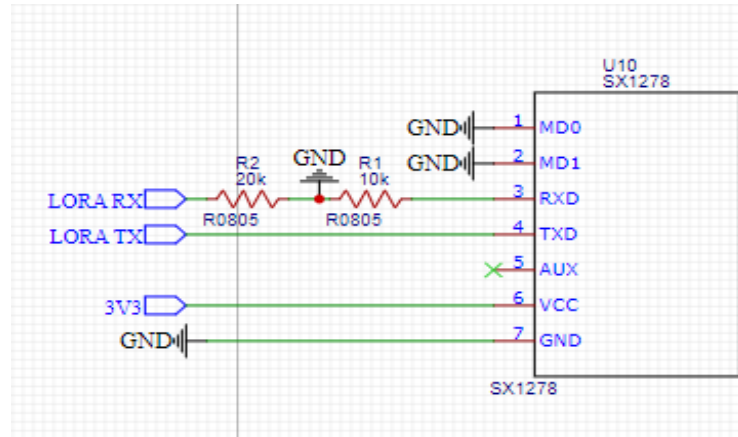
3.7. LORA MODÜLÜ

Ameliyathaneden alınan dataların kablosuz olarak aktarılması için, LoRa LoRa'nın E32-433T20DT modeli kullanılmıştır. Bu modül SEMTECH firmasının geliştirilmiş olduğu SX1278 modülü ile haberleşme sağlamaktadır. Bu modül 433 MHz'de çalışır, gönderim gücü 20 dB, 3000 m'ye kadar veri transferi yapabilmektedir.

Lora modülü, alıcı ve verici kısımdan oluşmaktadır. Alıcı kısmı ile ameliyathane ortamında bulunan gaz verilerini alarak verici kısmına gönderir. Bu model iletimde 100mA, alıcı konumunda ise 10mA çekim yaptığı için direk Arduino gibi modüller üstünden beslenebilmektedir. Referans aralığı 2.7 Volt ile 5.5 Volt olmasına rağmen genel tercih 3.3 Volt üstünden beslenilmesidir. **Şekil 3.10**'da Lora modülünün devre şematiği bulunmaktadır.



Şekil 3.9 LoRa E32-433T20DT Modeli (Url8,2022)



Şekil 3.10 Lora Modülü Şematik Bağlantısı

Şekil 3.11'de, LoRa haberleşme protokolünün verici ve alıcı noktalarının parametre ayarlarını ayarlamak için ara yüz kullanılmaktadır.



Şekil 3.11 LoRa Arayüzü

LoRa arayüzünde, alıcı ve verici için parametre ayarları yapılırken frekans ile kanal bağlantılı olmalıdır. 23 kanalında 433 Hz elde edilmektedir. Parametre ayarları Lora modülüne USB stick aracılığıyla arayüz üzerinden yüklenmektedir. Ayrıca LoRa modülü çeşitli haberleşme tiplerini de desteklemektedir. Transparent ve fixed mode olarak iki haberleşme tipi kullanılmaktadır. Transparent mode, radyo gibi bir merkezden her yere yayın yapabilmektedir. Fixed mode tercih edilirken, alıcı ve vericinin adresi bilinmelidir. Bu modda, adres ve kanallar sadece kullanıcı tarafından bilindiği için farklı bir kanaldan erişim sağlanamaz ve daha güvenlidir. Fixed mode kullanılırken, alıcı ve verici için kanal ve adresin aynı olmalıdır. Transparent mode kullanılırken, alıcı ve vericinin sadece kanalının aynı olması yeterlidir.

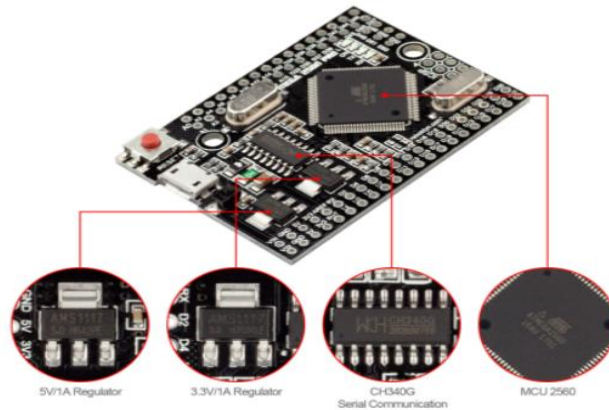
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

4. SİSTEM TASARIMI

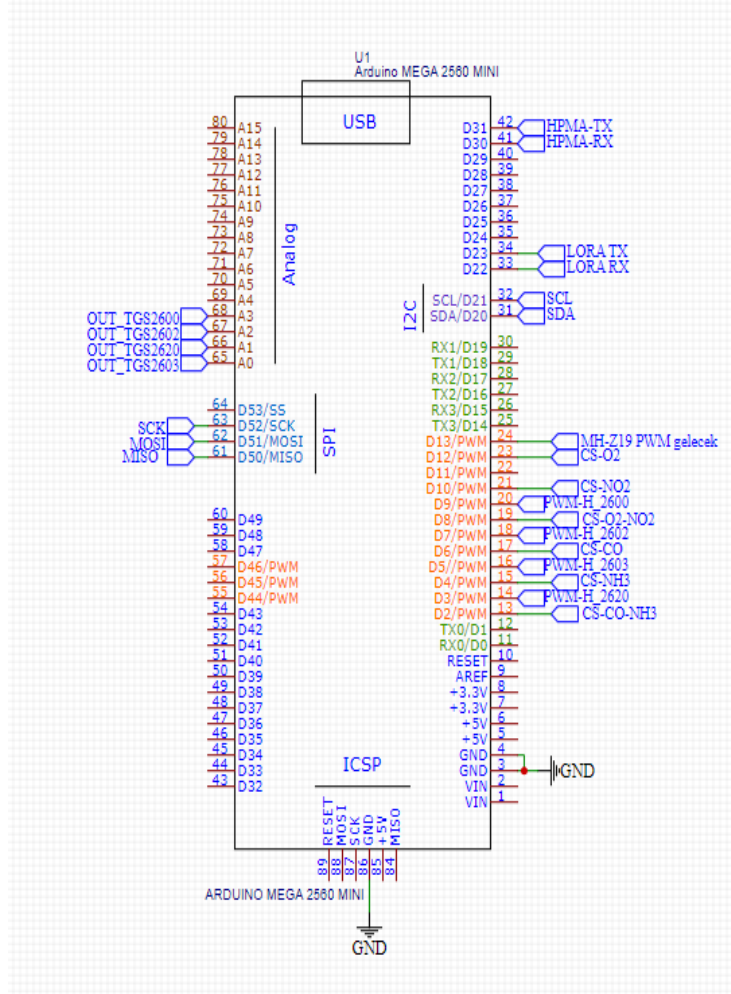
Söz konusu gaz sensörlerini ve sıcaklık/nem sensörlerini üzerinde barından Printed Circuit Board (PCB) üzerine yerleştirilmiştir. Gaz algılama platformunda mikroişlemci olarak Arduino Mega 2560 Pro Mini kullanılmıştır. SGX elektrokimyasal sensörler ortam havasındaki O₂, CO, NO₂, NH₃ ölçümü için kullanılmaktadır.

4.1. KONTROL BİRİMİ

Kontrol biriminde Mini Arduino Mega 2560 Pro kullanılmıştır. Mega Pro Embed CH340G / ATmega2560 kartı, ATmega2560 mikro denetleyicisine ve USB-UART adaptörü CH340'a dayanmaktadır. Kart, doğrudan Mikro USB konektörü veya kart üzerindeki ilgili kontak (V_{in}) aracılığıyla çalıştırılabilir. Kullanılan voltaj regülatörü 6 ila 9V DC aralığında çalışır. 5V üzerinde maksimum çıkış akımı yaklaşık 800mA iken, 3.3V üzerinde yaklaşık 800mA'dır.



Şekil 4.1 Arduino Mega Mini 2560 Pro İşlemci Kartı (Url6,2022)



Şekil 4.2 Arduino Mega Mini Kontrol Birimi Şematik Bağlantısı

Şekil 4.2’de bulunan Mini Arduino Mega 2560 Pro devre kartı tasarımı “EasyEDA” programında tasarlanmıştır. EasyEDA² isimli program internet üzerinden ücretsiz bir şekilde tüm kullanımlara sunulmaktadır.

Ameliyathanede açığa çıkan gaz konsantrasyonlarının saptanabilmesi için “Mini Arduino Mega 2560 Pro” mikro denetleyicisi kullanılmıştır. Bu kısımda, mikro denetleyici üzerinden sensörlerden gelen dataların okunabilmesi için kullanılan kodlar açıklanmıştır.

² <https://easyeda.com/>

```

#include <Wire.h>
#include "LoRa_E32.h"
#include <SPI.h>
#include <Arduino.h>

#include <Multichannel_Gas_GMXXX.h> // Multichannel Sensor Kütüphane

#include <hpm115s0.h>

#include <SoftwareSerial.h> // Remove if using HardwareSerial or non-uno library compatible device

GAS_GMXXX<TwoWire> gas;

bool my_status;
float p25;
float p10;

SoftwareSerial mySerial(23, 22); // LORA RX TX Serial
LoRa_E32 e32ttl(&mySerial);

SoftwareSerial mySerial2(12, 13); // HPMA 115S0 Particle detectors RX, TX
HPMA115S0 my_hpm(mySerial2);

int pinTGS2600 = A0; // Sensor Pini girelim
int pinTGS2602 = A1; // Sensor Pini girelim
int pinTGS2603 = A2; // Sensor Pini girelim
int outTGS2600 = 0; //int reading; // Sensör datası
int outTGS2602 = 0; //int reading; // Sensör datası
int outTGS2603 = 0; //int reading; // Sensör datası

int csADC1 = 2;
int csADC2 = 8;
int NH3 = 0;
int CO = 0;
int NO2 = 0;
int O2 = 0;

```

Şekil 4.3 Arduino Kodlama Alanı Sensör Tanımlama

```

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  pinMode(csADC1, OUTPUT);
  pinMode(csADC2, OUTPUT);

  SPI.begin();
  Serial.begin(9600);
  e32ttl.begin();
  gas.begin(Wire, 0x08); //Multichannel Start
  mySerial2.begin(9600);

  delay(100);

  // Stop autosend
  my_status = my_hpm.stop_autosend();
  if (my_status == 1) {
    //Serial.println("Autosend disabled");
  }
  else {
    p25=0.00;
    p10=0.00;
    //Serial.print("Error");
  }
  delay(500);

  // Start fan (and measurement mode)
  my_status = my_hpm.start_measurement();
  if (my_status == 1) {
    //Serial.println("Start Particle Measurement");
  }
  else {
    //Serial.print("Error");
    p25=0.00;
    p10=0.00;
  }
  delay(5000);
}

```

Şekil 4.4 Arduino Kodlama Alanı SetUp

Çalışmanın yazılım kısmında, haberleşme için “SPI.h” ve “arduino.h” kütüphanesi, seri haberleşme için “Wire.h” kütüphanesi kullanılmıştır. CO₂ (karbondioksit) ölçümü için “MHZ19.h” kütüphanesi kullanılmıştır. Geliştirilen cihaz içerisinde yer alan CO₂ (karbondioksit) sensörü ve parçacık sensörü sanal olarak R_x,

T_X üzerinden haberleşme yapmaktadır. Bu yüzden kod üzerinde R_X ve T_X pinleri ayarlanmıştır. Üç adet Figaro sensör tanımlanmış ve başlangıç pinleri sıfır olarak ayarlanmıştır.

Ana kart üzerinde elektrokimyasal sensörlerin haberleşmesi için bulunan MCP4922 dijital analog dönüştürücüler chipselect pinleri üzerinden dijital 2 ve dijital 8 pinleridir. Bu pinler sayesinde MCP4922 dönüştürücüleri okumaya çağırılır. 2 numaralı pinden bir lojik açılış datası gönderilmektedir. Chip pinlerin okumasını RealADC1() fonksiyonu ve RealADC2() fonksiyonu sağlamaktadır.

```
void loop() {
  //-----Read Electrochemical Sensors-----/
  measureGasSensors();
  //printSensorValue();
  Serial.print(NH3); Serial.print("*");
  //Serial.print(" CO: ");
  Serial.print(CO); Serial.print("*");
  //Serial.print(" NO2: ");
  Serial.print(NO2); Serial.print("*");
  //Serial.print(" O2: ");
  Serial.print(O2); Serial.print("*");
  //-----Read Groove Multichannel Gas Sensors (MEMS)-----/
  uint32_t val102B = 0;
  uint32_t val302B = 0;
  uint32_t val502B = 0;
  uint32_t val702B = 0;
  val102B = gas.getGM102B();
  val302B = gas.getGM302B();
  val502B = gas.getGM502B();
  val702B = gas.getGM702B();

  //-----Read Figaro Gas Sensors-----/

  outTGS2600 = analogRead(pinTGS2600);
  //Serial.print(outTGS2600); Serial.print("*");
  outTGS2602 = analogRead(pinTGS2602);
  //Serial.print(outTGS2602); Serial.print("*");
  outTGS2603 = analogRead(pinTGS2603);
  //Serial.print(outTGS2603);
  //Serial.print("*");

  //-----Read HPMA 115S0 Particle Detectors-----/
  my_status = my_hpm.read(sp25, sp10);
  if (my_status == 1) {

  }
  else {
    p25=0.00;
    p10=0.00;
  }
};
```

Şekil 4.5 Arduino Kodlama Alanı Loop

Şekil 4.5'de gösterilen Loop içinde, `measureGasSensor()` fonksiyonu çalışmaktadır. `PrintSensorValue()` fonksiyonu ile dört sensörden gelen datalar (NH_3 , CO, O_2 , NO_2 verileri). MHZ19 sensörü ile ortamda bulunan CO_2 datası okunmaktadır. 102B, 302B, 502B, 702B sensörleri konsantrasyon verisini almaktadır sonra alınan veri volta çevrilmektedir. Figaro sensörlerinden konsantrasyon verisi alınır ve 2 saniye sonra döngü tekrarlanmaktadır.

```
void measureGasSensors() {
    NO2 = readADC2(0);
    O2 = readADC2(2);
    NH3 = readADC1(0);
    CO = readADC1(2);
}
```

Şekil 4.6 MeasureGasSensor() Fonksiyon Kodu

```
void printSensorVal() {

    //Serial.print("NH3: ");
    Serial.print(NH3);Serial.print(" ");
    //Serial.print(" CO: ");
    Serial.print(CO);Serial.print(" ");
    //Serial.print(" NO2: ");
    Serial.print(NO2);Serial.print(" ");
    //Serial.print(" O2: ");
    Serial.print(O2);Serial.print(" ");
    //delay(1000);

}
```

Şekil 4.78 PrintSensorVal() Fonksiyon Kodu


```

int readADC1(int ch) {
    int adcValue = 0;
    byte adcPrimaryRegister = 0b00000110; // Sets default Primary ADC A
    byte adcPrimaryRegisterMask = 0b00000111; // b00000111 Isolates the thr
    byte adcPrimaryByteMask = 0b00001111; // b00001111 isolates the 4 L
    byte adcPrimaryConfig = adcPrimaryRegister & adcPrimaryRegisterMask; //
    byte adcSecondaryConfig = ch << 6;
    noInterrupts(); // disable interrupts to prepare to send address data to
    digitalWrite(csADC1, LOW); // take the Chip Select pin low to select the
    SPI.transfer(adcPrimaryConfig); // send in the primary configuration ad
    byte adcPrimaryByte = SPI.transfer(adcSecondaryConfig); // read the prim
    byte adcSecondaryByte = SPI.transfer(0x00); // read the secondary byte,
    digitalWrite(csADC1, HIGH); // take the Chip Select pin high to de-selec
    interrupts(); // Enable interrupts.
    adcPrimaryByte &= adcPrimaryByteMask; // Limits the value of the primary
    adcValue = (adcPrimaryByte << 8) | adcSecondaryByte; // Shifts the 4 LSB
    return adcValue; // Returns mA value
}

```

Şekil 4.8 ReadADC1() Fonksiyon Kodu

```

int readADC2(int ch) {
    int adcValue = 0;
    byte adcPrimaryRegister = 0b00000110; // Sets default Primary ADC i
    byte adcPrimaryRegisterMask = 0b00000111; // b00000111 Isolates the th
    byte adcPrimaryByteMask = 0b00001111; // b00001111 isolates the 4
    byte adcPrimaryConfig = adcPrimaryRegister & adcPrimaryRegisterMask; //
    byte adcSecondaryConfig = ch << 6;
    noInterrupts(); // disable interrupts to prepare to send address data to
    digitalWrite(csADC2, LOW); // take the Chip Select pin low to select the
    SPI.transfer(adcPrimaryConfig); // send in the primary configuration a
    byte adcPrimaryByte = SPI.transfer(adcSecondaryConfig); // read the pri
    byte adcSecondaryByte = SPI.transfer(0x00); // read the secondary byte,
    digitalWrite(csADC2, HIGH); // take the Chip Select pin high to de-sele
    interrupts(); // Enable interrupts.
    adcPrimaryByte &= adcPrimaryByteMask; // Limits the value of the primar
    adcValue = (adcPrimaryByte << 8) | adcSecondaryByte; // Shifts the 4 LSB
    return adcValue; // Returns mA value
}

```

Şekil 4.9 ReadADC2() Kodu

4.2. ELEKTROKİMYASAL SENSÖR BİRİMİ

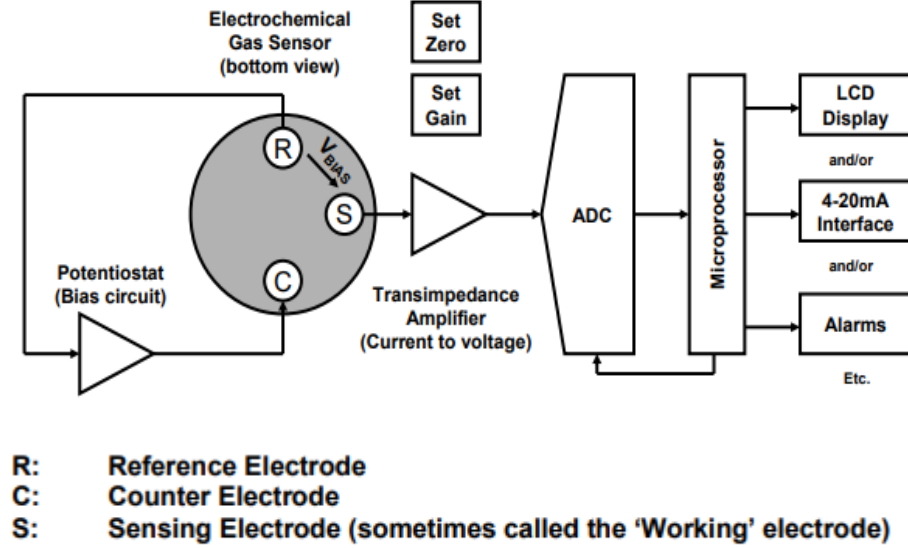
Bu çalışmada CO (karbonmonoksit), NO₂ (azotdioksit), NH₃ (amonyak) ve O₂ (oksijen) konsantrasyonunun ölçülmesi için SGX gaz sensörleri kullanılmıştır. Bu sensörlerin tümü için farklı ölçüm aralıkları ve farklı sensör hassasiyetleri için ayarlanmış kazanç ile aynı sinyal iyileştirme devresi kullanılmıştır.

SGX elektrokimyasal sensörler için elektronik devre dizaynları gereklidir. 3 tip devre vardır.

- ❖ 3 elektrotlu sensörler için (çoğunluk zehirli gazları algılamak için sensörler ve EC410 Oksijen sensörü) gerekli devre potansiyostatik devre olarak bilinmektedir. Bu devre, aynı potansiyelde (unbiased) algılama ve referans elektrotlarına veya farklı voltajlarda tutulan algılama ve referansa (bias sensör) sahip olabilir. Bu devreler **bölüm 4.2.1**'de açıklanmıştır.
- ❖ 4 elektrotlu ikili CO & H₂S sensörü için modifiye edilmiş 2 kanallı potansiyostatik devre kullanılmıştır. Bu, **bölüm 4.2.2.**'de açıklanmıştır.
- ❖ 2 elektrotlu, SGX 4OX ve 7OX oksijen sensörleri için daha basit bir devre gereklidir.

4.2.1. 3 Elektrotlu Sensörler için Devre Şematığı

Tipik bir gaz algılama sisteminin blok diagramı Şekil 4.10 'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Elektrokimyasal Gaz Sensörü Kullanan Tipik Gaz Algılama Sisteminin Blok Şeması (Url5,2022)

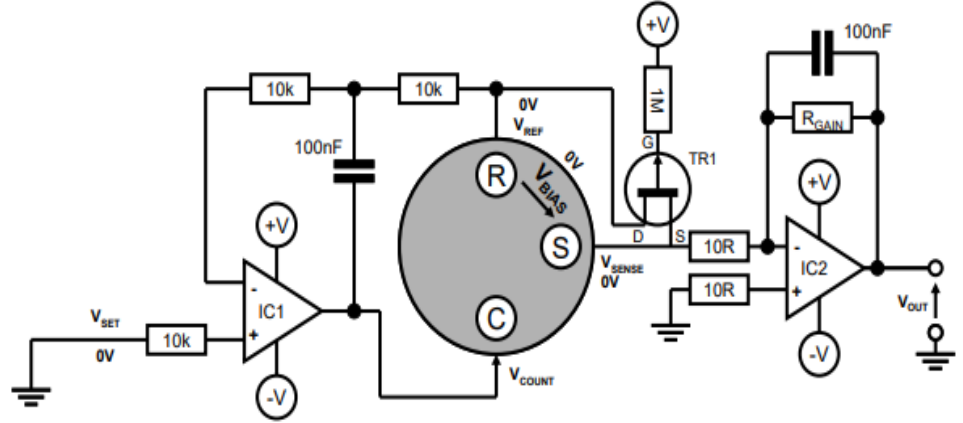
Gaz konsantrasyonu değiştiğinde, sensör yüzeyinde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar nedeniyle algılama elektrodundaki potansiyel değişir. Bu durum yanlış ölçümlerin alınmasına neden olabilir. Algılama elektrodunu referans elektroda göre sabit bir potansiyelde tutmak için temel bir potansiyostatik devre kullanılır. Opamp, algılama elektrodunun ihtiyaç duyduğu akımı dengelemektedir ve akımı karşı elektroda sağlamaktadır. Giriş kısmındaki dirençler amplifikatörü yüksek voltaj şoklarından korumaktadır. Değerleri yüksek olacak şekilde seçilir, böylece referans elektrottan çekilen akım miktarını sınırlar.

Gaz sensörü, gaz konsantrasyonu ile orantılı bir çıkış akımı üretmektedir. Elektrokimyasal hücreden gelen küçük akımları ölçüm için yararlı bir voltaja dönüştürmek için transimpedans yükselticisi olarak da bilinen bir akım-voltaj dönüştürücüsü gereklidir.

Analog-dijital dönüştürücü (ADC) transimpedans amplifikatörünün çıktısını örnekleyerek voltaj seviyesinin dijital bir okumasını üretmektedir. Bu, mikroişlemci tarafından gerçek gaz konsantrasyonunun hesaplanması için kullanılır. Sistemin bir noktasında sıfır ayarının ve kazanç ayarının ayarlanması gereklidir. Bu, transimpedans

yükselticisindeki donanımda veya mikroişlemci içindeki yazılımda uygulanabilir. Transimpedans amplifikatörünün voltaj çıkışı, doğrudan gaz konsantrasyonunun analog bir okumasını sağlamak için kullanılabilir.

4.2.2. Bias Akımı Gerektirmeyen Sensör Devresi



Şekil 4.11 Bölünmüş Fazlı Unbiased Sensör (Url5,2022)

Sensör bias devresinin (potansiyostat) amacı algılama elektrodunun potansiyelini referans elektroda göre sabit bir seviyede tutmaktır. Bu üçüncü bir elektrot (counter elektrot) kullanılarak yapılmaktadır. Gerekli bias seviyesi ($V_{sense} - V_{ref}$) sensör tipine göre değişir ve ilgili veri tablolarından bulunur. Bu çalışmada kullanılan sensörlerin gerekli bias seviyeleri **Tablo 4.1**'de özetlenmiştir. Elektrokimyasal sensörlerin çıkışı, gaz konsantrasyonu ile ilgili bir akımdır. Çoğu gaz için elektronlar algılama elektrodundan dışarı akar; bu da devreden pozitif bir çıkış voltajı ile sonuçlanır. Bununla birlikte hücrede bir azalmaya maruz kalan gazlar (NO_2 , O_2 , ClO_2 , Cl_2) için, elektronlar algılama elektroduna akar, bu da devreden negatif bir voltaj ile sonuçlanmaktadır.

Tablo 4.1 SGX Sensörler için Bias Potansiyelleri (Url5,2022)

Sensor	Applied Bias ($V_{\text{SENSE}} - V_{\text{REF}}$)	V_{OUT} Polarity
<i>SGX-4CO</i>	0 V	Pozitif
<i>SGX-4H2S</i>	0 V	Pozitif
<i>SGX-4CO-L</i>	0 V	Pozitif
<i>SGX-4DT</i>	0 V	Pozitif
<i>SGX-4NH₃</i>	0 V	Pozitif
<i>SGX-4OX</i>	0 V	Pozitif
<i>SGX-7CO</i>	0 V	Pozitif
<i>SGX-7H2S</i>	0 V	Pozitif
<i>SGX-7NH₃</i>	0 V	Pozitif
<i>SGX-7OX</i>	0 V	Pozitif
<i>SGX-SureCO</i>	0 V	Pozitif

Şekil 4.11, pozitif ve negatif besleme gerilimi kullanan tipik bir potansiyostat devresini göstermektedir. Operasyonel amplifikatör IC_1 potansiyelini izler. V_{REF} ve V_{REF} 'i V_{SET} 'e eşit tutmak için sayaç elektroduna uygun bir potansiyel V sayısı uygular. Bu potansiyel, gaz konsantrasyonu değiştikçe değişecektir, çünkü algılama elektrodundan çıkış akımını dengelemek için karşı elektrota akım beslemektedir.

Elektrokimyasal sensörlerin çoğunluğu unbiased sensördür yani bias akımına ihtiyaç duymamaktadır, bu nedenle $V_{\text{SET}} = 0$ olur. Algılama elektrodunun potansiyeli de çıkış devresinin bias etkisi ile 0V'da tutulur, böylece sonuç V_{SENSE} ve V_{REF} arasında sıfır bias akımıdır.

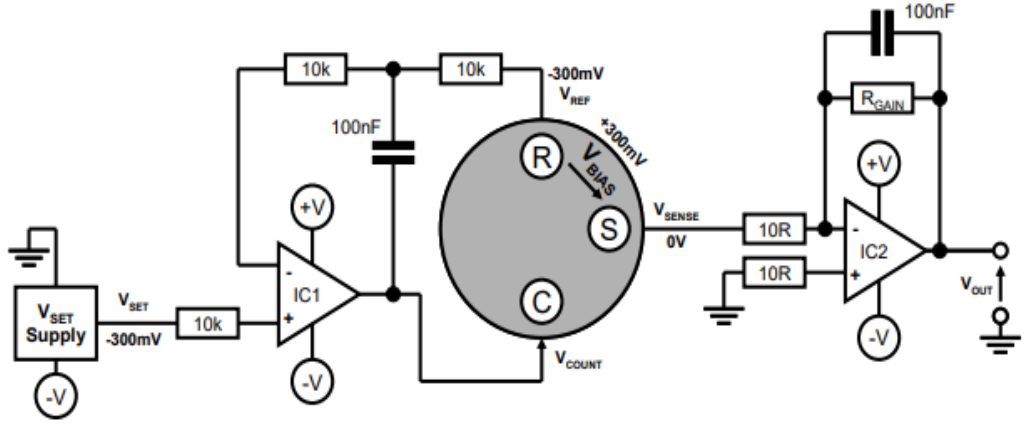
Bir P kanallı FET olan TR1, besleme voltajı kapatıldığında algılama ve referans voltajları arasındaki sıfır biası korur. Gatedeki düşük voltaj FET'in $V_{REF} = V_{SENSE}$ olacak şekilde iletilmesine neden olur. Güç kesilirken bu 0 V biası sabit tutmak, güç tekrar açıldığında sensörün çok hızlı bir şekilde dengelenmesini sağlar. Devre gücü yeniden bağlandığında, TR1 kapısındaki yüksek bir voltaj, op-amp'ın biası kontrol edebilmesi için ayakların iletmeyi durdurmasına neden olur.

Elektrokimyasal sensörün çıkış akımı, bir transempedans (akımdan voltaja) yükseltici kullanılarak bir voltaja dönüştürülmelidir. **Şekil 4.11**, bu modda bağlanan işlemsel yükseltici IC2'yi göstermektedir. Algılama elektrotlarıyla seri olarak bir 10Ω ($10R$) yük direnci önerilir. Bu direnç, içsel sensör kapasitansı ile bir RC yumuşatma filtresi oluşturur. Yük direncinin değerini azaltarak tepki süresini iyileştirmek mümkündür, fakat daha yüksek çıkış gürültüsüne neden olur. Devrede seçilen kazanç direnci, maksimum gaz konsantrasyonunda çıkışın doyuma gitmeyeceği şekilde seçilmelidir.

Çıkıştaki gürültüyü azaltmak için yüksek frekanslı bir kesim sağlamak için kazanç direncine paralel olarak bir kapasitör takılabilir.

4.2.3. Bias Akımı Gerektiren Sensör Devresi

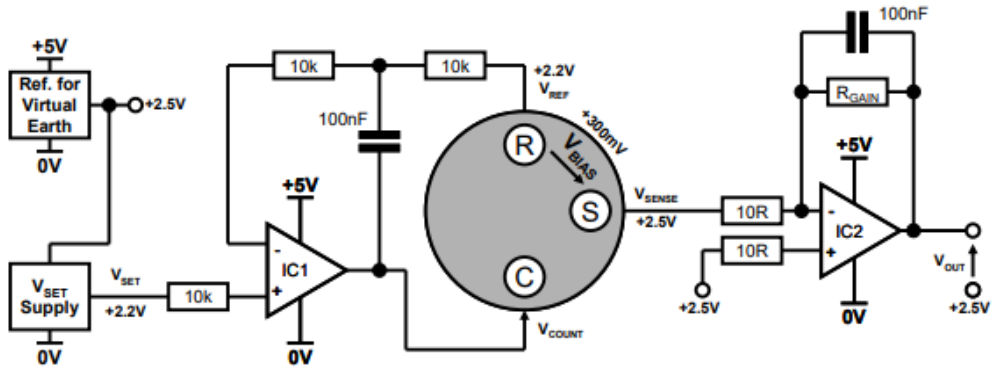
Şekil 4.12, bias akımlı bir sensör için bir potansiyostat devresini göstermektedir. Bu devre, -300 mV V_{SET} kaynağı kullanarak algılama ve referans elektrotları arasında $+300$ mV'luk bir bias sağlamak üzere tasarlanmıştır. İşlemsel yükseltici IC1, referans elektrot V_{REF} 'in potansiyelini izler ve V_{REF} 'i V_{SET} 'e (-300 mV) eşit tutmak için karşı elektrota uygun bir potansiyel V_{COUNT} uygular. Algılayıcı elektrotun potansiyeli, çıkış devresinin polarlama etkisi ile 0 Voltta tutulur, böylece sonuç, V_{SENSE} ve V_{REF} arasında $+300$ mV'luk bir sapma olur. Bu $+300$ mV bias düzenlemesi NO ve ETO sensörleri için uygundur. V_{SENSE} ve V_{REF} arasında -600 mV bias gerektiren oksijen sensörleri için $V_{SET} = +600$ mV kullanılması gerekir. Bu durumda V_{SET} beslemesi $+V$ ile toprak arasına bağlanacaktır.



Şekil 4.12 Bölünmüş Fazlı Bias Akımlı Sensör (Url5,2022)

4.2.4. Tek Beslemeli Bias Akımlı Sensör Devresi

Şekil 4.13, bias akımlı sensör için potansiyostat devresini gösterir, ancak bu sefer tek bir 5V besleme kullanılır. Tipik olarak besleme voltajının yarısında, bu durumda 2.5 V olan bir sanal toprak oluşturmak gereklidir. Sanal toprak oluşturmak için sabit bir voltaj referansı kullanılmalıdır. Sanal toprak, çıkış devresine bu şekilde referans vermek için kullanılır. Algılama elektrodu da 2,5 V'ta olacaktır. Bu nedenle $V_{SET} = 2200V$.



Şekil 4.13 Tek Beslemeli Bias Sensör Devresi (Url5,2022)

Devre, daha düşük besleme voltajları için bile uyarlanabilir, ancak yeterli voltaj salınımına izin vermek için sanal toprak voltajını değiştirmek gerekebilir. Örneğin: bir oksijen sensörü -600 mV bias akımı gerektirir, bu nedenle referans elektrot sanal voltajın 600 mV üzerinde olacaktır. Karşı elektrot, şu anda sanal voltajın 1,7 V

üzerinde olan referans elektrottan 1,1 V daha yüksek olabilir. Besleme gerilimi 3 V ise sanal topraklama için 1,25 V veya daha düşük bir referans kullanılması gerekir.

4.2.5. Operasyonel Amplifikatör Seçimi

Amplifikatör seçiminde birkaç parametre dikkate alınır.

Giriş Bias Akımı: İdeal olarak, potansiyostat işlemsel yükseltici, referans elektrottan herhangi bir akım çekmemelidir. Pratikte op-amp bir giriş bias akımına sahiptir ve bu çok büyükse, özellikle düşük gaz konsantrasyonlarında, algılama (çalışma) elektrotundan çıkış akımını etkileyecektir. Genel bir kural olarak giriş bias akımı 5 nA'dan az olan bir op-amp seçilmelidir.

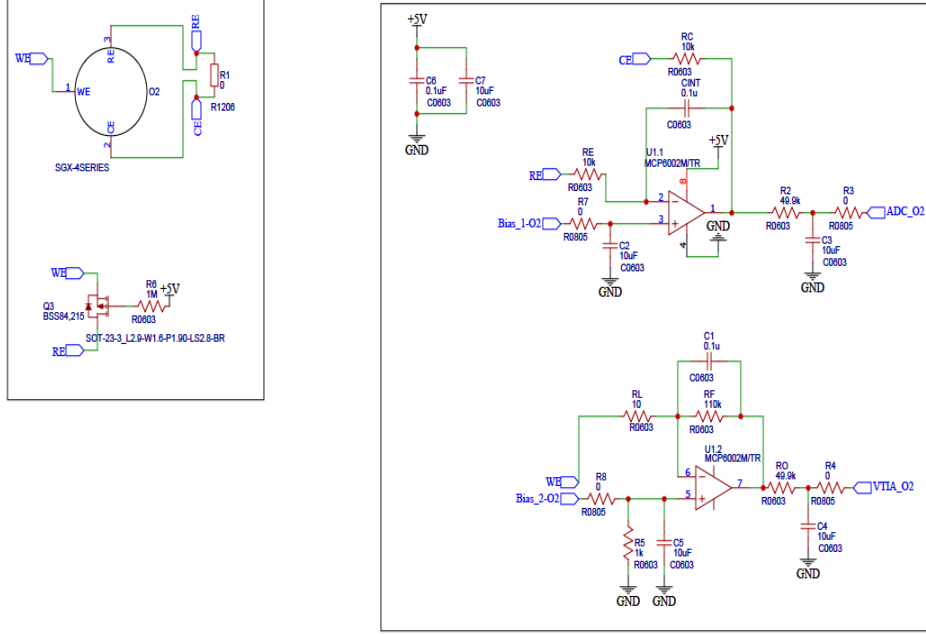
Giriş Offset Gerilimi: Güç kapalıyken sıfır bias TR1 transistörü tarafından tutulur. Bununla birlikte, güç açıldığında, sıfır bias potansiyostat devresi tarafından korunur. Op-amp IC1'deki önemli bir giriş ofset voltajı, sensördeki gerçek bias voltajında ani küçük bir akıma neden olur. Elektrokimyasal sensörler, sensörün büyük kapasitansı nedeniyle önemli akımların akmasına neden olabilen bias voltajındaki küçük değişikliklere bile duyarlıdır. Bias'taki bir değişiklikten sonra sensörün dengelenmesi birkaç saat sürebilir. Mümkünse, maksimum çalışma sıcaklığındaki offseti kontrol etmeye özellikle dikkat ederek, giriş ofset voltajı 100 μ V 'nin altında olan bir op-amp seçilmelidir.

Giriş Offset Voltajı Sıcaklık Kayması: İşlemsel yükselticinin giriş ofset voltajı, bias voltajında hafif bir değişiklikle sonuçlanan sıcaklıkla değişecektir. Bu nedenle, düşük giriş ofset voltajı sıcaklık kaymasına sahip bir op-amp seçilmelidir.

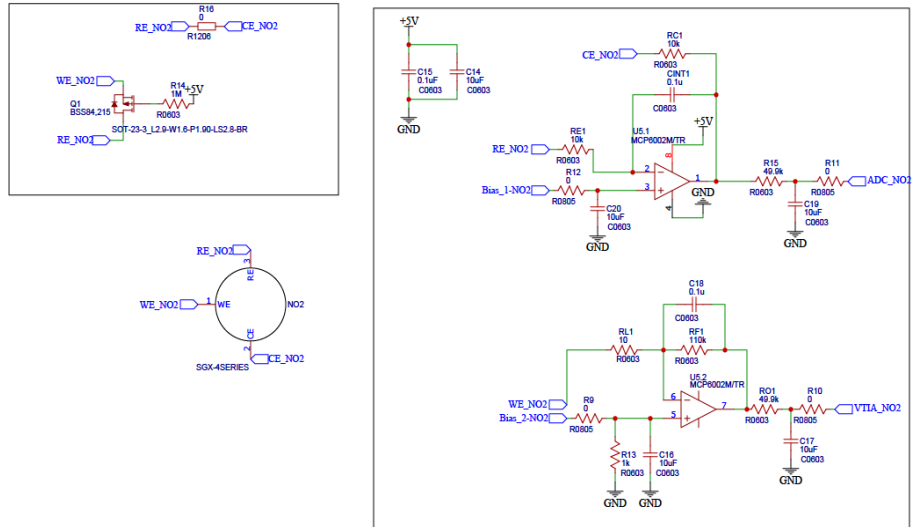
Çıkış Voltajı Salınımı: Özellikle alçak gerilim sistemlerinde işlemsel yükselteç için gerekli çıkış salınımına dikkat edilmelidir. Potansiyostat opamp'ın çıkışı, voltajı karşı elektrota besler. Bu gaz türüne ve konsantrasyonuna göre değişecektir. Op-amp'in Vset'i için her iki tarafında en az 1.1 V sürebilmesi önerilir.

Çıkış Akımı Sürücüsü: Potansiyostat op-amp çıkışı, algılama çıkış elektrodundan çıkan veya içine giren akımla eşleşen karşı elektrotun içine veya dışına bir akım sağlar. Uygulamanızdaki olası maksimum akımı ve akımın akış yönünü

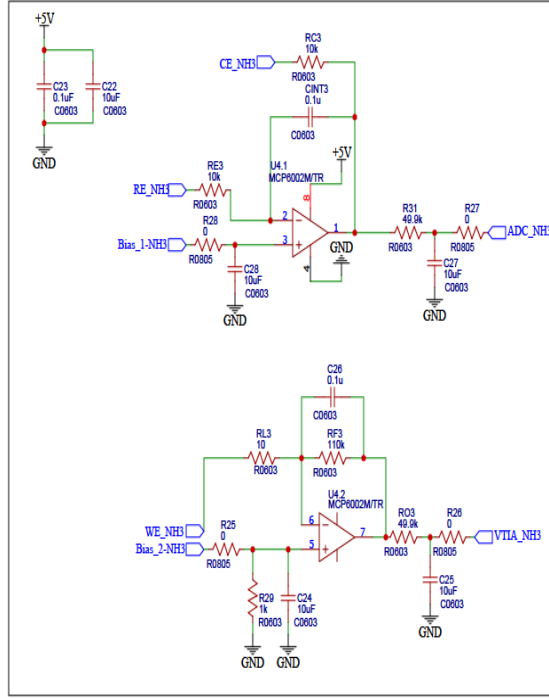
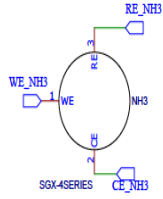
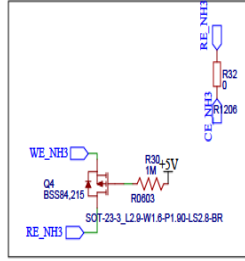
belirlenmelidir. Seçilen op-amp'ın gerekli akımı sağlayabildiğinden veya azaltabildiğinden emin olunmalıdır (Url5,2022).



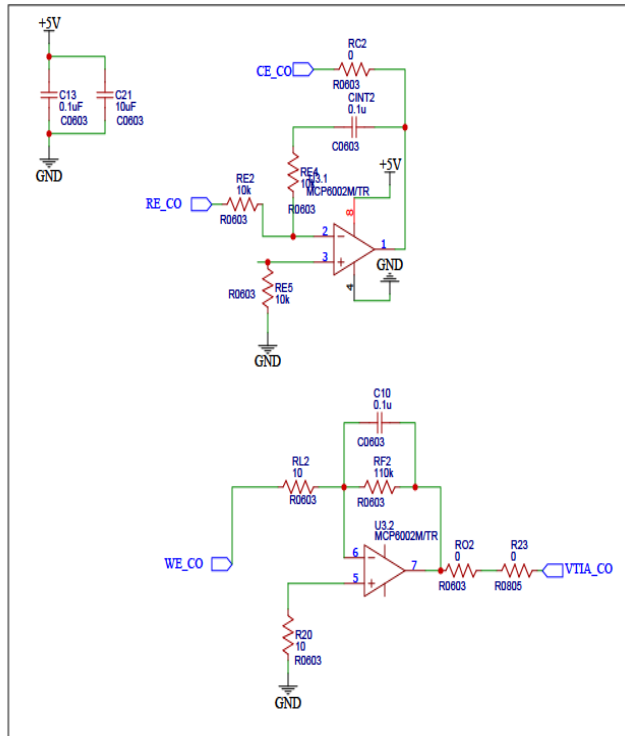
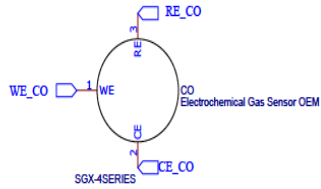
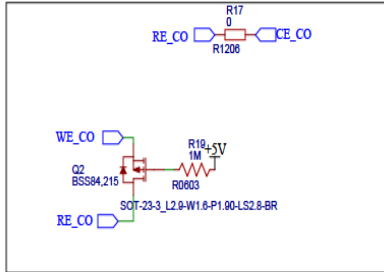
Şekil 4.14 SGXOx Elektrokimyasal Sensör Şematik Bağlantısı



Şekil 4.15 SGX-NO2 Elektrokimyasal Sensör Şematik Bağlantısı



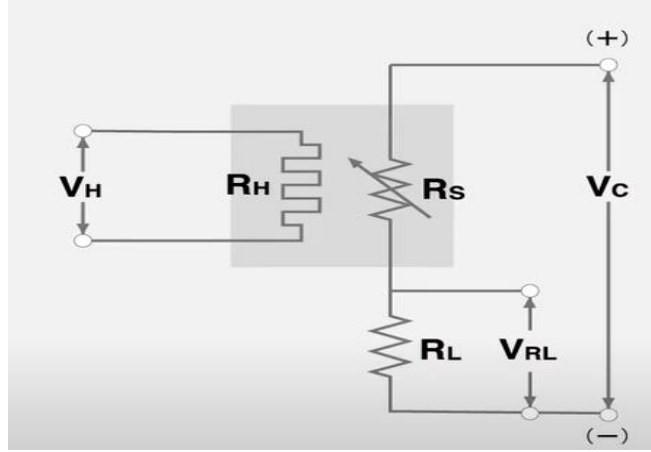
Şekil 4.16 SGX-4NH₃ Elektrokimyasal Sensör Şematik Bağlantısı



Şekil 4.17 SGX-4CO Elektrokimyasal Sensör Şematik Bağlantısı

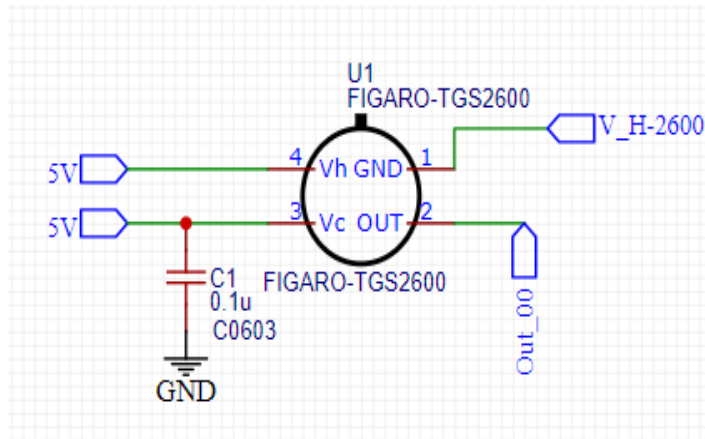
4.3. METAL OKSİT GAZ SENSÖRLERİ BİRİMİ

Çoğu gaz sensörü için bir ölçüm devresi gereklidir. Bir MOS tipi gaz sensörü devre şematığı **şekil 4.18**'de verilmiştir.

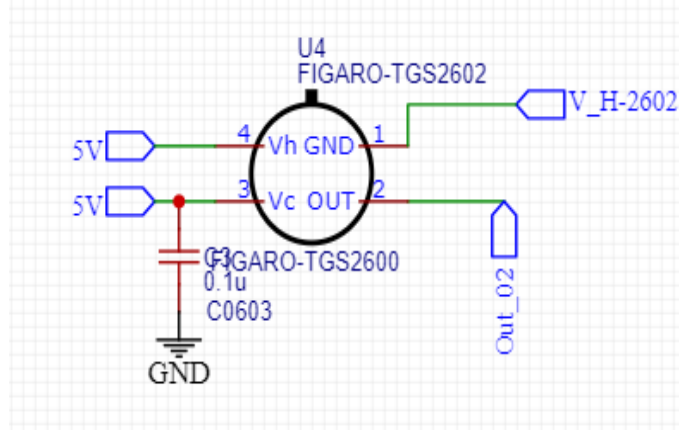


Şekil 4.18 MOS Tipi Gaz Sensörü Devre Şematığı

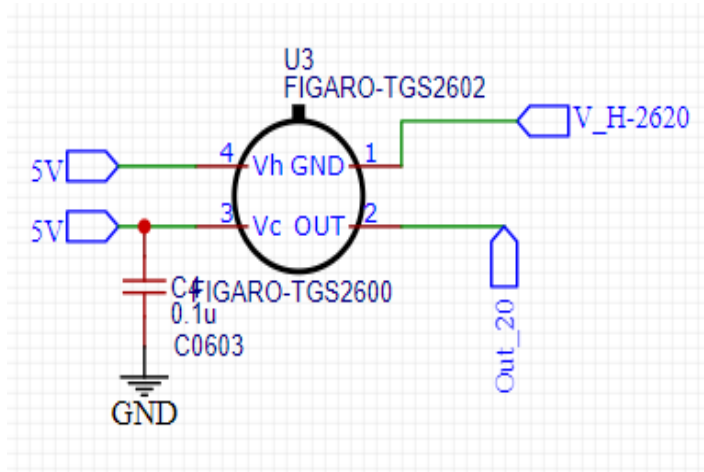
Gaz sensörünü etkinleştirmek için ısıtıcı katmanına ısıtıcı voltajı uygulanır. Sensör çıkış sinyali için sabit bir yük direnci ve voltajı gereklidir. Sensör çıkış sinyali, yük direnci boyunca olarak ölçülür. Sensör direnci (R_s), ölçülen voltaj değeri V_{RL} kullanılarak hesaplanarak elde edilir. **Şekil 4.19-22**'de devre kartında kullanılan metal oksit sensörlerin şematik bağlantıları bulunmaktadır.



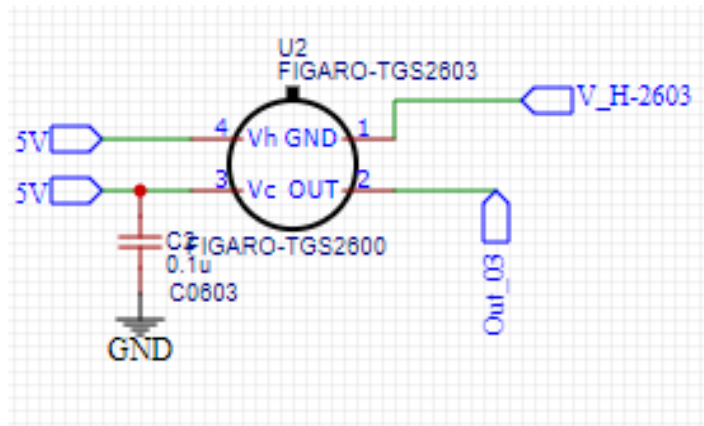
Şekil 4.19 TGS2600 Metal Oksit Sensör Şematik Bağlantısı



Şekil 4.20 TGS2602 Metal Oksit Sensör Şematik Bağlantısı



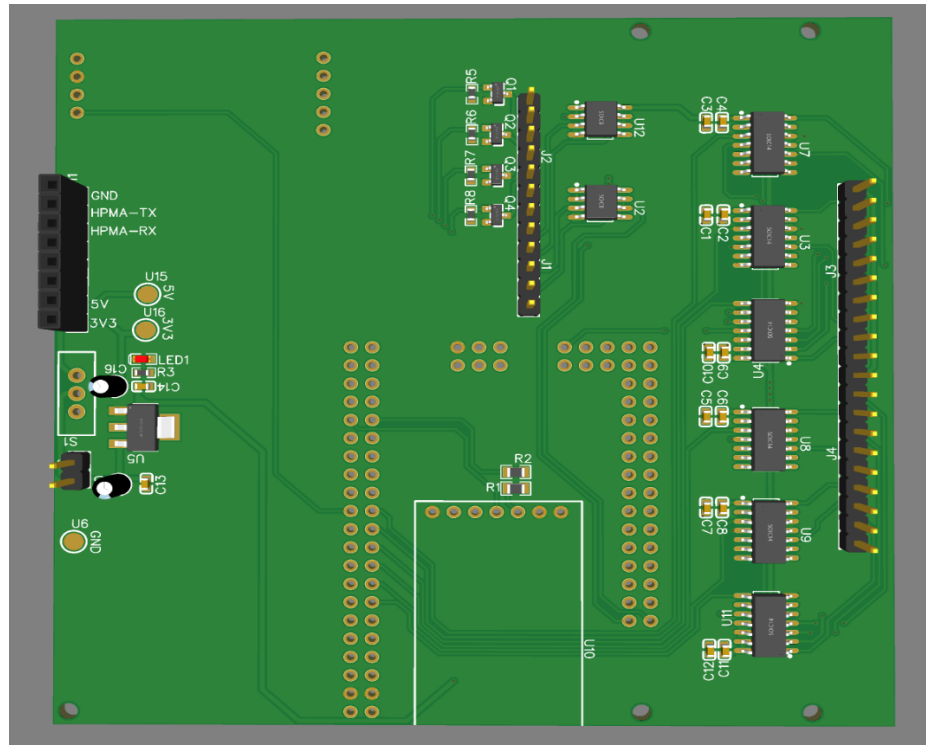
Şekil 4.21 TGS2620 Metal Oksit Sensör Şematik Bağlantısı



Şekil 4.22 TGS2603 Metal Oksit Sensör Şematik Bağlantısı

Şekil 4.23'deki devre kartı üç kısımdan oluşmaktadır. İlk kısım ;güç katı kısmıdır. Burada konnektörler aracılığıyla +5V harici elektrik girişi olmaktadır. Cihazı açma kapama işlemleri için on-off tuşu tasarlanmıştır. Devrede bazı elemanların 3.3 V'luk gerilime ihtiyacı olduğundan 3.3 V'luk doğrusal bir dönüştürücü olan LM1117 kullanılmıştır.

Devre kartımızda header yapısı kullanılmıştır. HPM1115 adlı parçacık dedektörünün Rx,Tx pinleri bu kısma yerleştirildi.



Şekil 4.23 Ana kart Devre Şematığı

Sol üst kısım MH-Z19 CO₂ sensör pinleri için hazırlanmıştır. Bu sensörün gerilim vermek için 5V bacağı, topraklamak için ground bacağı ve sinyal vermek için de Rx,Tx bacakları kullanılmıştır.

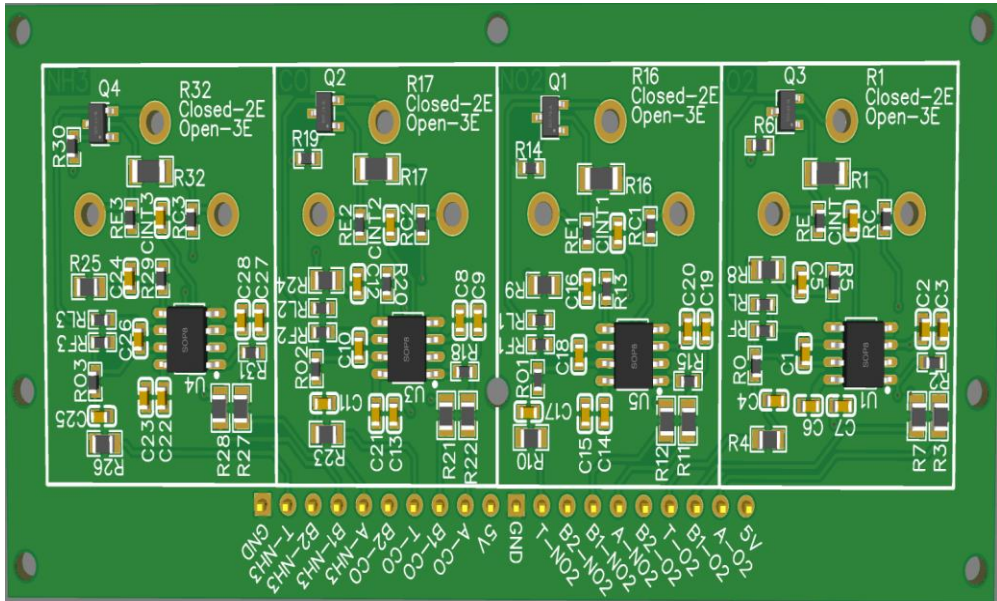
Metaloksit sensörlerinin çıkış empedanslarının çok yüksek olması sebebiyle mikroişlemciye giden verilerde kayıplar yaşanabilir. Bu sinyalleri yükseltebilmek için 2 adet U12 ve U2 olarak adlandırılan opamlardan yararlanılmıştır. Metaloksit sensörlerimiz anaşlemci kartımız üzerinde orta kısmında bulunan pinler aracılığıyla bağlanmaktadır. Metaloksit sensörler yüksek sıcaklıkta çalışmakta ve sıcaklığa bağlı olarak metaloksit sensörlerin algılama kabiliyetlerinde değişiklik olmaktadır.

Bu çalışmaya ilaveten bu metaloksit sensörleri farklı sıcaklıklarda çalıştırarak algılama özelliklerinin değişimlerini izlemek istediğimiz için burada Q1, Q2, Q3 ve Q4 olmak üzere 4 adet junction FET kullanılmaktadır. PWM sinyalinden yararlanılarak sensörün çalışma sıcaklığını değişimler izlenecektir ve algılama kabiliyetlerindeki değişim yorumlanacaktır.

Tasarlanan devre kartının sağında, elektrokimyasal sensörlerin bağlanacağı pinler bulunmaktadır. U11 VE U4 yapıları, elektrokimyasal sensörlerin üretmiş olduğu sinyalleri okumak için gerekli olan analog-dijital dönüştürücülerdir. U7, U3, U8 ve U9 yapıları dijital analog dönüştürücülerdir. Çalışmada kullanılan elektrokimyasal sensörler temel olarak herhangi bir bias voltajına ihtiyaç duymamaktadır. Bazı elektrokimyasal sensörler çalıştırılabilmesi için çalışma elektrotlarında bir gerilim uygulanması gerekir. Bunların sağlanabilmesi için MCP4922 dijital analog dönüştürücüler kullanılmıştır.

Alt kısımda mikroişlemci kart için gerekli pinler bulunmaktadır. İç kısma LoRa modülü bağlanmıştır. Bu sayede dataların uzaktan okunabilmesi sağlanmıştır.

Şekil 4.24'deki elektrokimyasal sensörlerin bulunduğu devre kartı yer almaktadır. Bu kart NH₃, CO, NO₂ ve O₂ sensörlerinden oluşmaktadır.



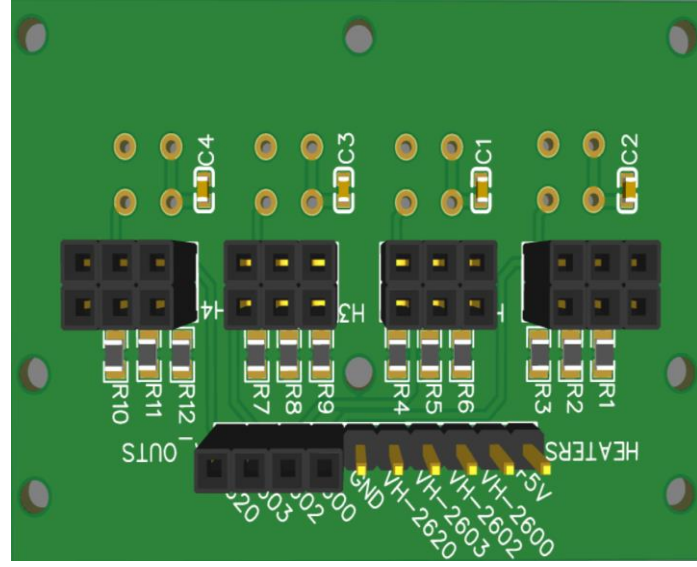
Şekil 4.24 Elektrokimyasal Sensör Devre Şematiği

Her bir sensör için opamplardan yararlanılarak transempedans devreleri oluşturulmuştur. Opamp yapısı MCP6002'dir. İçerisinde 2 adet op-amp bulunmaktadır. Kazanç bu opamplar üzerinden sağlanmaktadır. Burada kazanç değişimi sağlayan; R_f direncinin almış olduğu değerdir. R_f direncini değiştirilerek sensörden elde edilen sinyal yükseltilebilir ya da alçaltılabilir. Bu sayede düşük ve yüksek konsantrasyon bölgelerindeki sinyallerin okunabilmesi sağlanmıştır.

Devre kartı üzerinde Q4 ile gösterilen kısım JFET yapısıdır. Bu yapı BSS84 mosfetinden oluşmaktadır. Elektrokimyasal sensörler için elektrik kesildiğinde çalışma ve karşıt elektrotlarının birbirine kısa devre yapılması gerekir. Bu kısa devre yapılmadığında sensör kendini hiç çalışmamış gibi algılamaktadır ve uzun bir süre sensörün ısıtılması gerekmektedir. Kullanılan mosfet ; gerilim kesildiğinde iki bacağı birbirine kısa devre yapar.

R32 direnci sıfır ohm'luk bir dirençtir. R32 direnci kapatıldığında sensörleri 2 bacaklı hale getirir. Bu çalışmada kullanılan bazı sensörler working,counter,referans elektrot olmak üzere 3 bacaklı bir yapıdan oluşmaktadır. Örneğin çalışmada kullanılan O_2 sensörü 2 bacaklı bir yapıdan oluşmaktadır. Bu konfigürasyonu yapabilmek için dirençlerin kullanıldığı bir kısa devreye ihtiyaç duyulmuştur. Bu sayede farklı elektrokimyasal sensörler için de kullanılabilir; genel amaçlı bir devre kartı tasarlanmıştır.

Şekil 4.25'de, son sensör kartımız olan metaloksit sensörlerinin bulunduğu devre kartı bulunmaktadır.



Şekil 4.25 Metal Oksit Sensör Devre Şematiği

Metal oksit sensörler, bir algılayıcı katman, elektrotlar ve altında bir ısıtıcı katmandan oluşmaktadır. Sensörün ısıtıcı katmanının ısıtılabilmesi için ısıtıcı bacağına gerilim uygulanması gereklidir. Bu gerilimin şiddeti mikroişlemcinin PWM sinyali ile ayarlanabilir ya da VH2620, VH2603, VH2602 ve VH2600 pinlerinin hepsine 5V uygulanarak 300-350°C'ye kadar ısıtıcı bölgenin sıcaklığı yükseltilebilir.

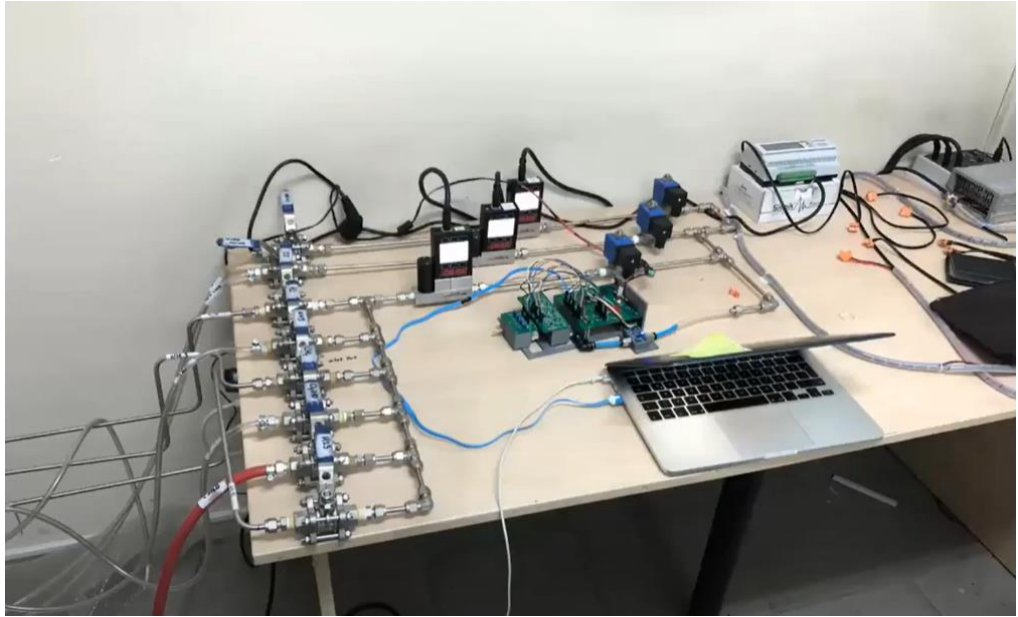
Metal oksit sensörlerin, datasheet tablosu incelendiğinde yük direncinden (R_L) bahsedilmektedir. R_L direnci, kullanılan sensörün algılama hassasiyetini değiştirebilen bir parametredir. Metal oksit sensörlerin ilgili bir test gazına karşı kullanılmaları durumunda iki parametreyi değiştirerek algılama hassasiyetini değiştirilebilir. R1-10 dirençleri yük dirençleridir.

R10 direnci 3.3 k Ω , R11 direnci 4.7 k Ω , R12 direnci 10 k Ω 'dur. Bu direnç seviyelerine datasheetten yararlanarak karar verilmiştir. Sinyallerdeki gürültüleri elimine etmek amacıyla C4, C3, C2 ve C1 kondansatörleri kullanılmıştır.

BEŞİNCİ BÖLÜM

5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

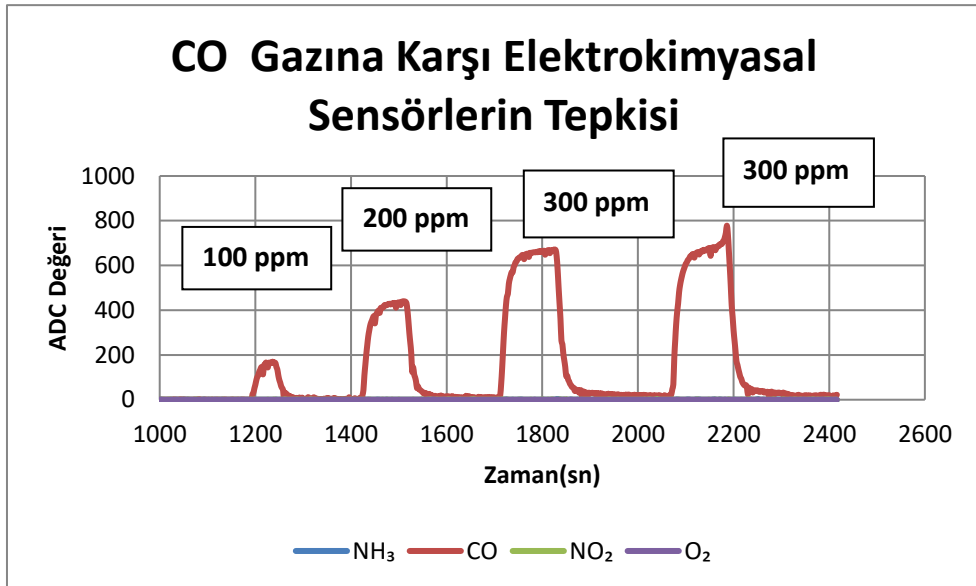
Okmeydanı Perpa Ticaret Merkezinde bulunan Sismik A.Ş. firmasında gaz ölçümleri gerçekleştirildi. **Şekil 5.1**'deki vanalardan gaz akışı gerçekleşmektedir, ölçüm yapılmak istenen gazın ilgili vanası açılır, ölçüm setinde bulunan ALICAT cihazları ölçüm esnasında borudan geçen gazın miktarını ayarlamaktadır, ek olarak kuru hava ile gaz seyreltilmesine yardımcı olmaktadır. Gaz ölçümlerinde sensörlerin CO(karbonmonoksit), NH₃(amonyak), CH₄(metan), C₃H₈(propan), H₂(hidrojen) tepkileri değerlendirilmiştir. Geliştirilen cihaz 2 saniyede bir data üretmektedir.



Şekil 5.1 Sismik A.Ş. Firmasının Gaz Ölçüm Test Laboratuvarı

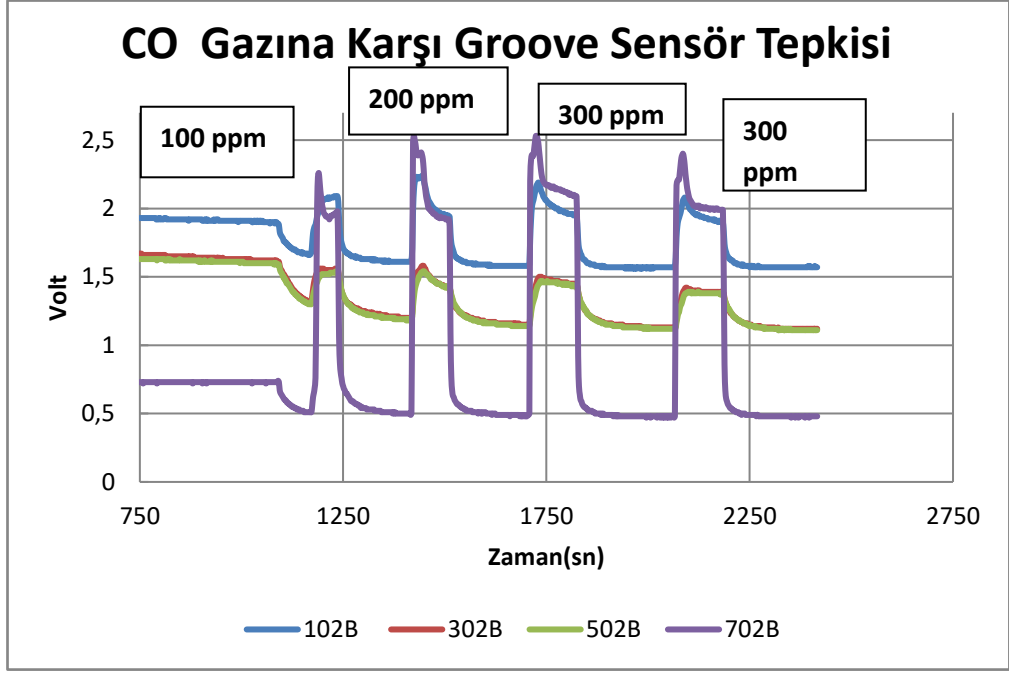
Gaz ölçümlerinde sensörlere gaz uygulama süresi 2 dakikadır, sensör yıkama süresi ise 4 dakikadır. CO gazı dört farklı konsantrasyonda verilmiştir. Bu konsantrasyonlar; 100 ppm, 200 ppm, 300 ppm, 300 ppm'dir. Farklı CO gazı konsantrasyonlarına karşı elektrokimyasal sensörlerin tepkisi incelenmiştir. SGX-4CO elektrokimyasal sensörü artan CO gazı konsantrasyonlarına karşı nitelikli datalar üretmiştir. **Şekil 5.2**'de görülmektedir. **Şekil 5.2**'de sensörün karbonmonoksit

tepkisinde farklı konsantrasyonlara karşı ADC değeri değişimi görülmektedir. Ön yıkama sonrasında iki dakikalık gaz uygulama ve dört dakikalık yıkama periyotları artan karbonmonoksit konsantrasyonları ile sensör üzerine uygulanmıştır. **Şekil 5.2**'deki elde edilen sonuç verilerinden yola çıkarak, SGX-4CO sensörünün karbonmonoksit tepkisi oldukça yüksektir, cevap süresi ile geri dönüşüm süresi de oldukça hızlıdır. Sensör verilen konsantrasyonlarda doyuma gelmiş ve doyum noktasından itibaren tepkisi sabit kalmıştır. Aynı şekilde karbonmonoksit akışı kesildiğinde sensör hızlı bir şekilde önceki doyuma geri dönmüştür.



Şekil 5.2 CO Gazına Karşı Elektrokimyasal Sensör Grubunun Tepkisi

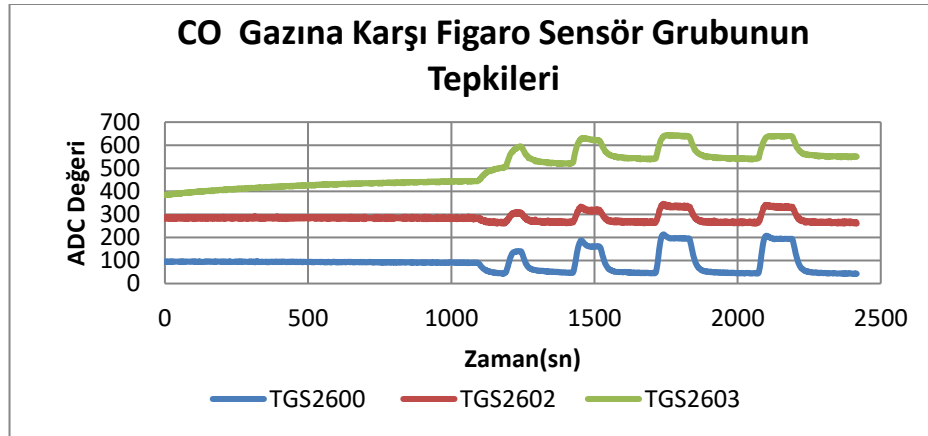
SGX-4NO₂, SGX-4NH₃, SGX-4CO ve SGX-4OX sensörleri CO gazına duyarlı olmadığı için tepki üretmemiştir. **Şekil 5.3**'da groove çok kanallı sensör dizisinin CO karşı tepkisi verilmiştir.



Şekil 5.3 CO Gazına Karşı Groove Sensör Tepkisi

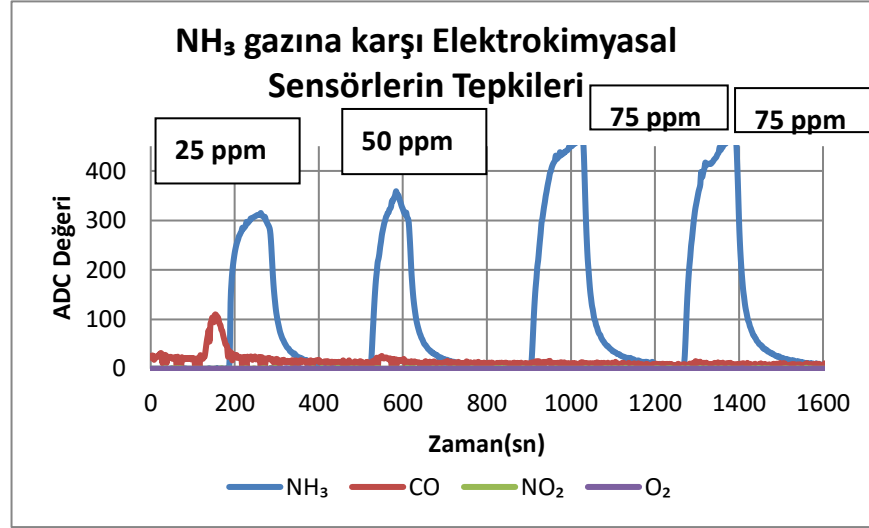
302B sensörü için, ilk gaz verildikten sonra iletkenlik seviyesi aşağıya doğru bir düşüş sergilemektedir ve daha sonra yükselme olmaktadır. 702B sensörü, gaz verildiğinde iletkenlik seviyesi değeri düşmüş ve sonra tekrar artmaya başlamıştır.

Şekil 5.4’de Figaro metaloksit sensör grubunun artan konsantrasyonlardaki CO gazına karşı tepkileri gözlemlenmektedir. CO gazı konsantrasyonları 100 ppm, 200 ppm, 300 ppm ve 300 ppm olarak ayarlanmıştır.



Şekil 5.4 CO Gazına Karşı Figaro Sensör Grubunun Tepkisi

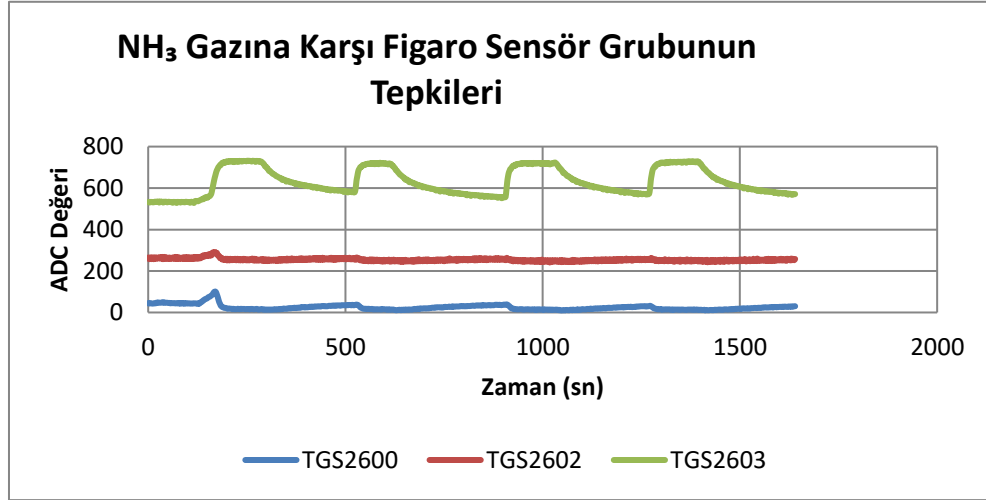
Geliştirilen cihaza NH_3 gazı dört farklı konsantrasyonda verilmiştir. Bu konsantrasyonlar; 25 ppm, 50 ppm, 75 ppm ve 75 ppm'dir. Şekil 5.5'deki sonuç verilerinden yola çıkarak,SGX-4 NH_3 sensörünün tepkisi incelendiğinde birinci ve ikinci tepki arasında artış vardır ve az da olsa bir lineerlik vardır, üçüncü ve dördüncü



Şekil 5.5 NH₃ gazına karşı Elektrokimyasal Sensörlerin Tepkileri

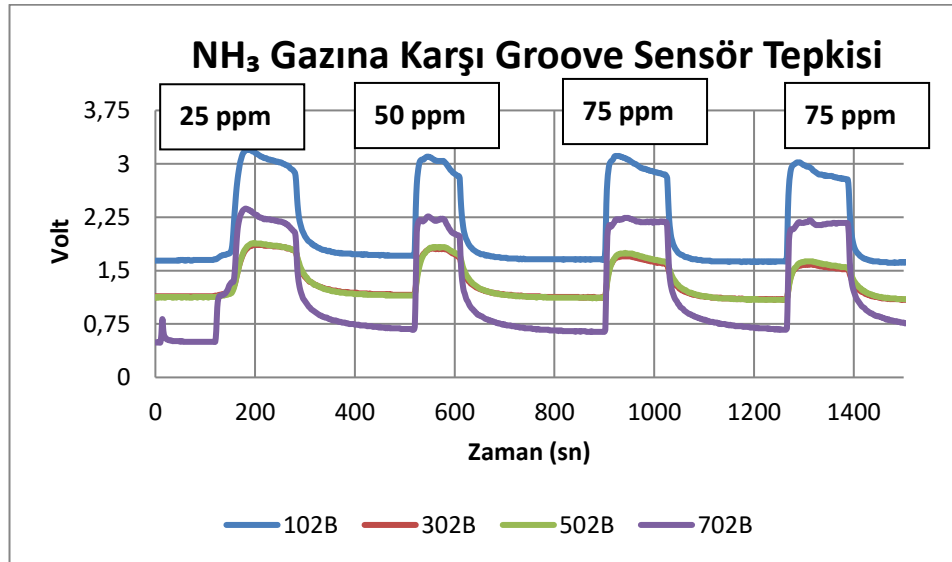
konsantrasyonlar aynı olduğu için tepki de aynıdır. SGX-4CO sensörünün tepkisi incelendiğinde NH_3 'e karşı nitelikli bir cevap üretmemiştir.

Şekil 5.6'da artan NH_3 gazı konsantrasyonlarına karşı Figaro sensör tepkileri verilmiştir. TGS2602, NH_3 gazına karşı gaz konsantrasyonlarının artmasına rağmen nitelikli cevap üretmemiştir, sensör birtakım cevaplar üretmeye çalışmış fakat başarılı değildir. TGS2603, NH_3 (amonyak) gazına karşı gaz konsantrasyonu arttıkça sensörün ADC değerinde yükselme, gaz konsantrasyonu azaldıkça değerde azalma meydana gelmektedir. TGS2603, burada gaz verdikten sonraki tepkiler farklı konsantrasyonlarda gaz verilmesine karşı aynı cevapları üretmiş, burada sensör amonyağın değişken konsantrasyonlarına karşı istenilen cevabı üretmemiştir. Dolayısıyla bu sensör, NH_3 (amonyak) ölçümü için başarılı değildir. TGS2600 sensöründe de farklı konsantrasyonlara karşı eşit miktarda tepkiler alınmıştır.



Şekil 5.6 NH₃ Gazına Karşı Figaro Sensör Grubunun Tepkileri

Şekil 5.7’de Groove çok kanallı sensör dizisinin NH₃ (amonyak) gazına karşı tepkisi verilmiştir. 702B sensörü NH₃ gazının artan konsantrasyonlarına karşı, artan volt çıkışı üretmiştir. 502B sensörü NH₃ değişen konsantrasyonlarına karşı, bir miktar azalan tepki üretmiştir. 302B ve 102B sensörleri de artan amonyak konsantrasyonuna nitelikli cevap üretmiştir.

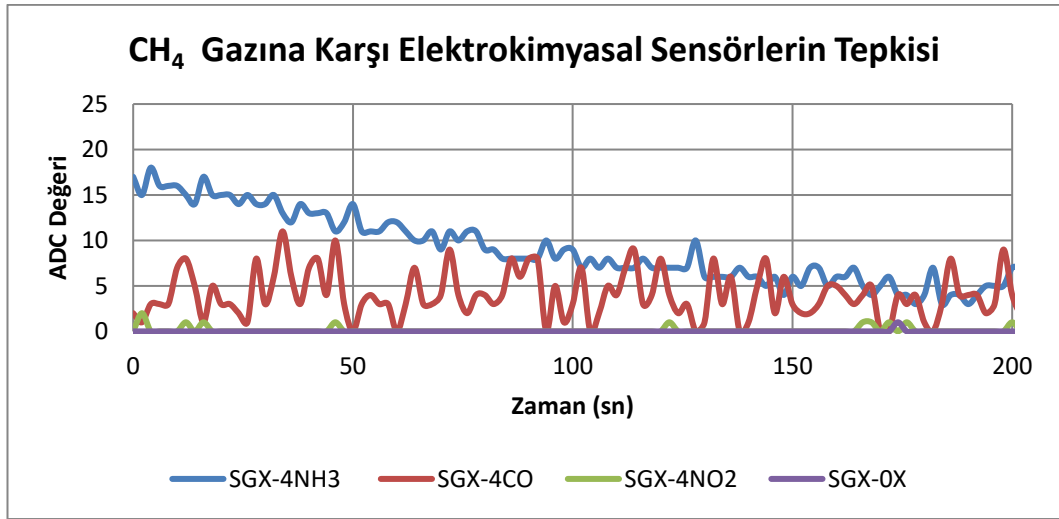


Şekil 5.7 NH₃ Gazına Karşı Groove Sensör Tepkisi

Sensör cevaplarına bakılarak; 4’lü çok kanallı groove sensör olan 102B, 302B, 502B, 702B ve Figaro sensörlerinden olan TGS2600, TGS2602 ve TGS2603 7 adet sensörün tamamı metaloksit katmanına sahiptir ve bu ölçümler sonucunda metaloksit

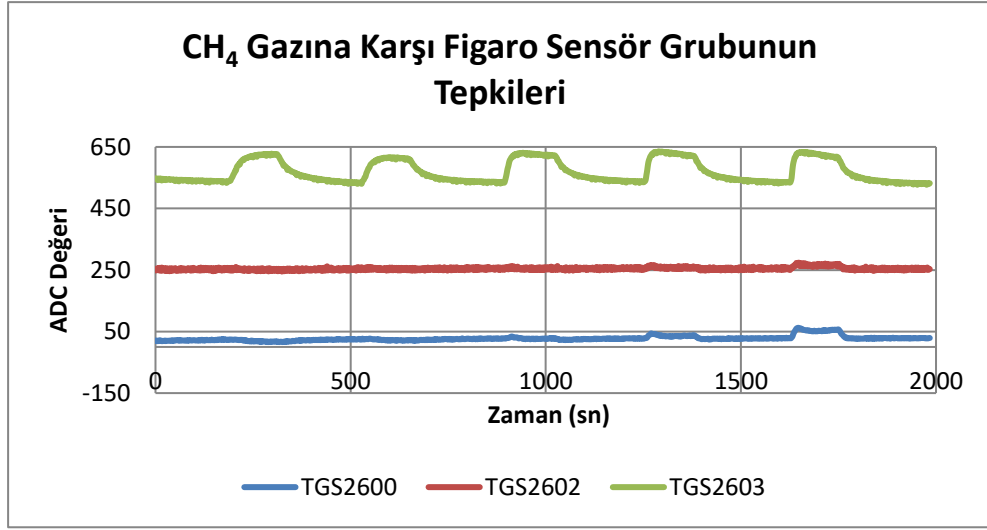
katmanının NH₃ ölçümü için nitelikli sensör değildir. Nitelikli sensörler, ortamdaki gaz varlığını ve konsantrasyonunu tespit etmeli ve bunlara değişen yanıtlar vermelidir.

Şekil 5.8'de CH₄ gazının değişen konsantrasyonlarına karşı elektrokimyasal sensörlerin tepkileri incelenmiştir. CH₄ gazı 200 ppm, 200 ppm, 500 ppm ve 1000 ppm konsantrasyonlarında verilmiştir. SGX-4NH₃ sensörü 0-10 arasında değerler üretmiştir. SGX-4CO sensörü ideal bir yanıt vererek NH₃ gazına tepki vermemiştir.

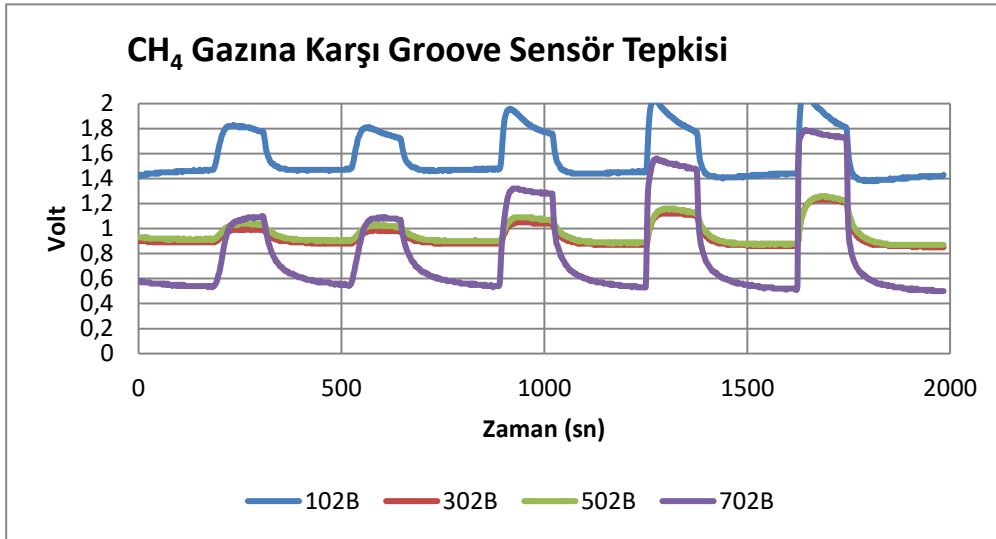


Şekil 5.8 CH₄ (metan) Gazına Karşı Elektrokimyasal Sensörlerin Tepkisi

CH₄ (metan) gazına karşı Figaro sensör tepkileri incelendiğinde, TGS2600 sensörü metan gazının düşük konsantrasyonlarında yeteri kadar sinyal üretememiştir. Fakat konsantrasyon arttıkça sensör cevap üretebilir hale gelmiştir. Bu nedenle, ölçüm sonucunda TGS2600 sensörünün metan gazının yüksek konsantrasyonlarına cevap verebilecek bir sensör olduğu sonucuna varılmıştır. TGS2602 sensörü bir data üretememiştir. TGS2603 sensöründe de net bir sensör verisi elde edilememiştir.



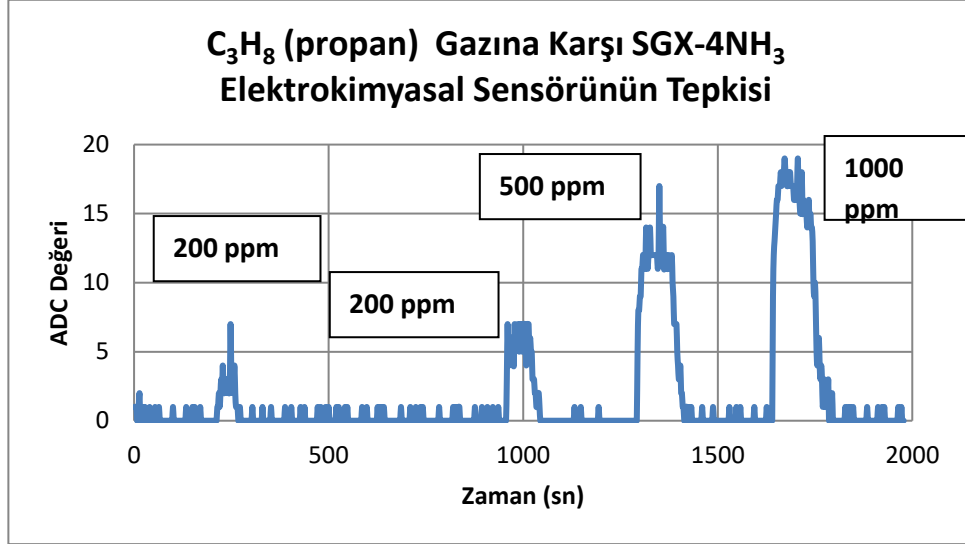
Şekil 5.9 CH₄ Gazına Karşı Figaro Sensör Grubunun Tepkileri



Şekil 5.10 CH₄ (metan) Gazına Karşı Groove Sensör Tepkisi

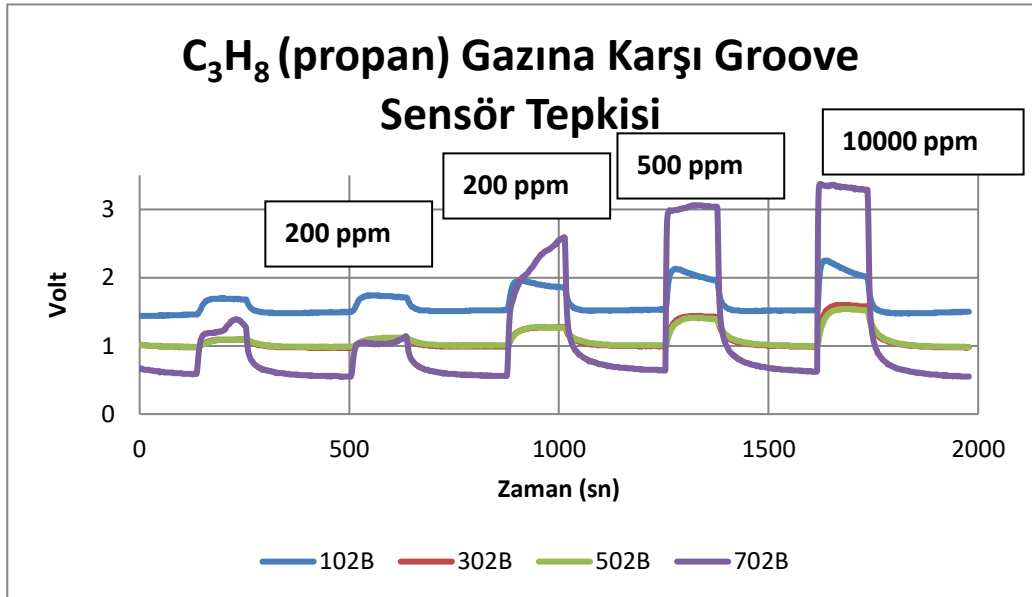
Şekil 5.10'da CH₄ (metan) gazının değişen konsantrasyonlarına karşı Groove multichannel gaz sensörlerin tepkileri incelendiğinde, 102B sensörü konsantrasyon arttıkça yükselen datalar vermiştir, 302B sensörünün yanıtı da nitelikli sensör sınıfındadır; ilk iki konsantrasyon aynı olduğu için 1. ve 2. ADC değeri de aynıdır, 3. ve 4. konsantrasyon değişiminde ADC değerlerinde de değişim olmuştur. 502B sensörü de benzer bir şekilde tepki vermiştir. İçerisinde en iyi sensör datası 702B sensöründen elde edilmiştir.

Şekil 5.11’de C_3H_8 (propan) gazının değişen konsantrasyonlarına karşı elektrokimyasal sensörlerin tepkileri incelenmiştir. SGX-4NH₃ sensörünün tepkisi incelendiğinde propan gazına karşı tepki vermiştir.



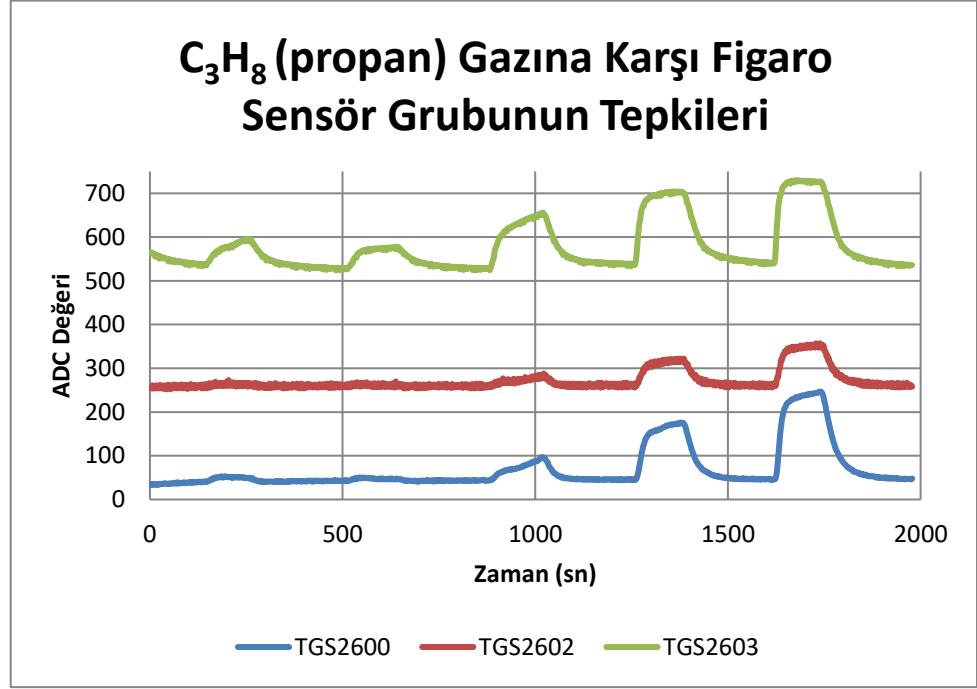
Şekil 5.11 C_3H_8 (propan) Gazına Karşı SGX-4NH₃ Elektrokimyasal Sensörünün Tepkisi

Şekil 5.12’de C_3H_8 (propan) gazının artan konsantrasyonlarına karşı Groove multichannel gaz sensörlerin tepkileri incelendiğinde 102B sensörü konsantrasyon arttıkça yükselen veriler vermiştir.



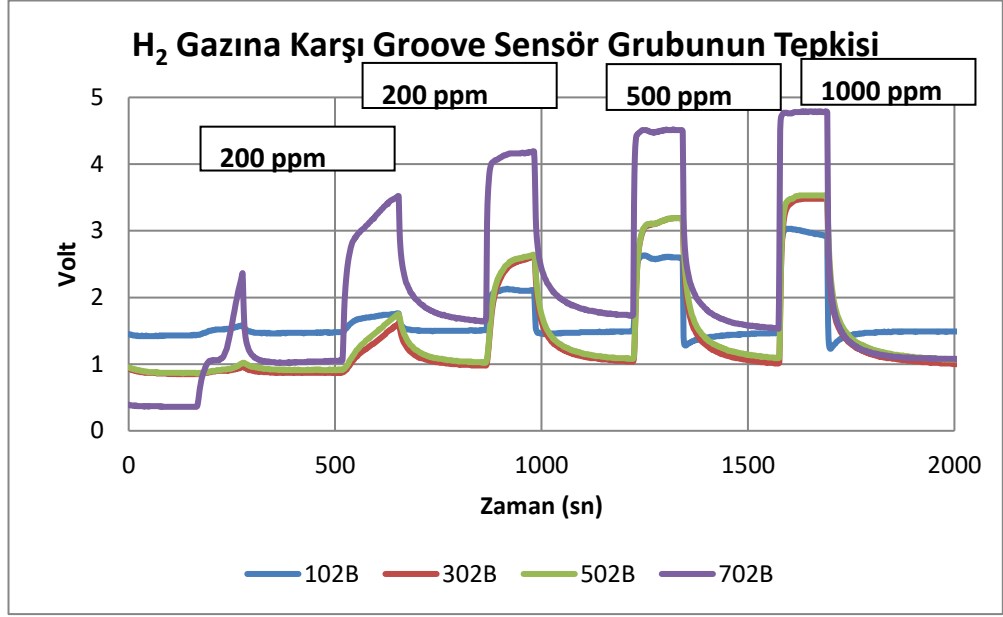
Şekil 5.12 C_3H_8 (propan) Gazına Karşı Groove Sensör Tepkisi

C_3H_8 gazına karşı Figaro sensör tepkileri incelendiğinde, TGS2600 düşük konsantrasyondaki gaza karşı az tepki vermiştir, artan konsantrasyonlarda iyi cevaplar üretmiştir. TGS2602 sensörü, verilen propan gazının konsantrasyonu arttıkça sensör verimli datalar üretmiştir. TGS2603 sensörünün ürettiği datalar diğer sensörlere göre daha iyidir.

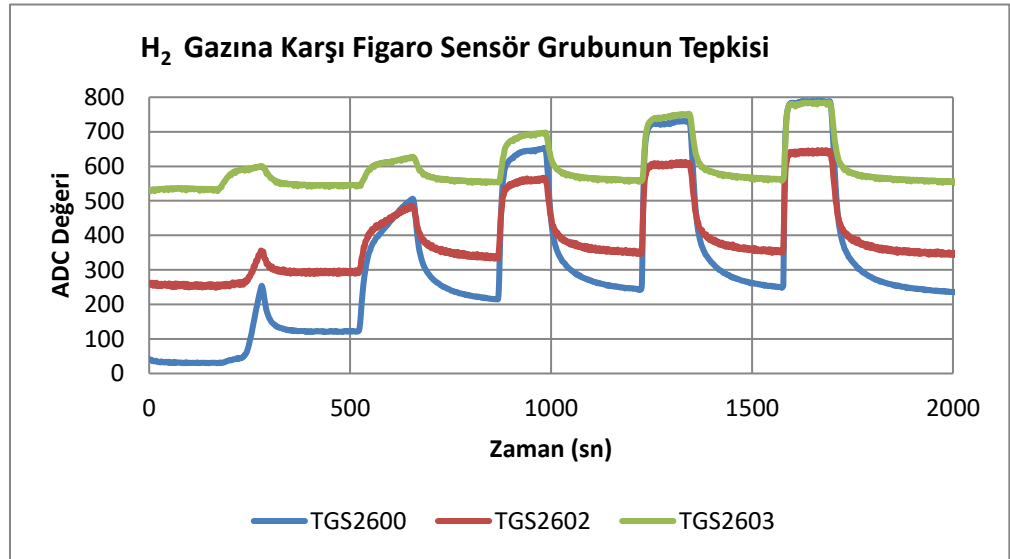


Şekil 5.13 C_3H_8 (propan) Gazına Karşı Figaro Sensör Grubunun Tepkileri

Son olarak, sensörlerin davranışlarını farklı hidrojen(H_2) gazı konsantrasyonlarında değerlendirilmiştir. Grove sensör grubunun gaza karşı davranışları incelendiğinde, grafikte 0-100 sn arasındaki düz çizgilerde sistemden kuru hava akar ve daha sonra sistemden gaz akışı olur. 102B sensörü, artan konsantrasyonlara karşı değişen tepkiler vermiştir. 302B ve 502B sensör cevapları birbirine benzer niteliktedir. 702B sensöründe, hidrojen gazı verildiğinde bu sensörde değişkenlik meydana gelmiştir.



Şekil 5.14 H₂ Gazına Karşı Groove Sensör Grubunun Tepkisi

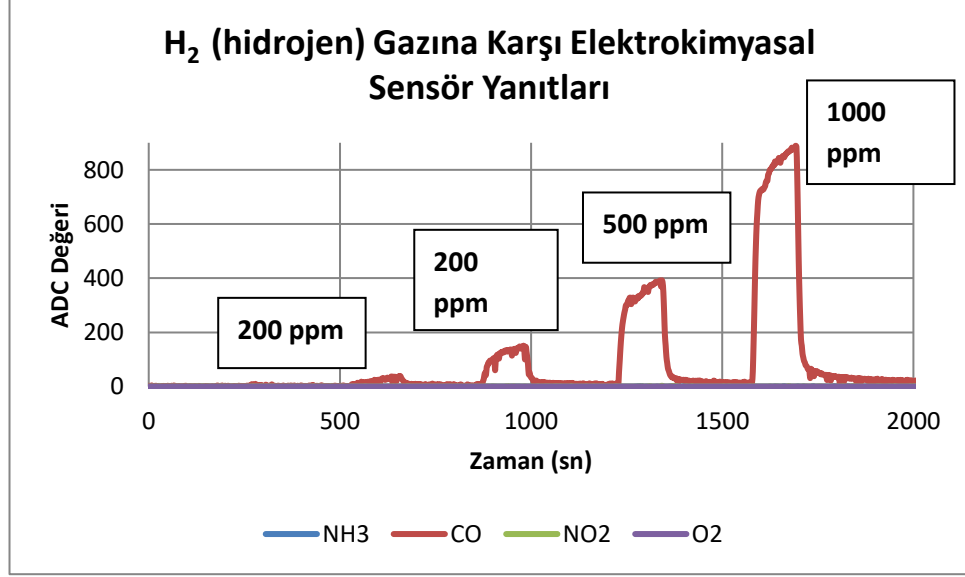


Şekil 5.15 H₂ Gazına Karşı Figaro Sensör Grubunun Tepkisi

Şekil 5.15’de, Figaro sensörlerin hidrojen gazına karşı davranışı incelendiğinde, en iyi sensör çıkış tepkisini TGS2603 sensörü vermiştir.

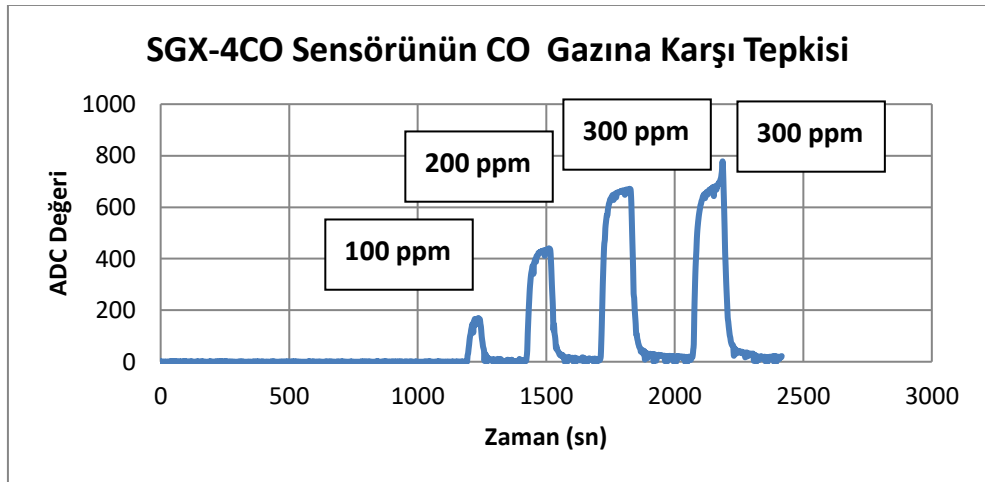
Hidrojen gazına karşı, elektrokimyasal sensörlerden sadece SGX-CO sensörü nitelikli datalar üretmiştir. SGX-4CO sensörü, hidrojen gazının yüksek konsantrasyonlarına karşı yükselen tepkiler vermiştir. 2000 ppm’lik hidrojen gazı verildiğinde 874 sensör çıkış değeri alınmıştır. Değerler incelendiğinde,

elektrokimyasal SGX-4CO sensörü hidrojen gazı olan bir ortama girdiğinde hatalı değerler üretebilir kanısına varılmıştır.



Şekil 5.16 Hidrojen Gazına Karşı Elektrokimyasal Sensör Yanıtları

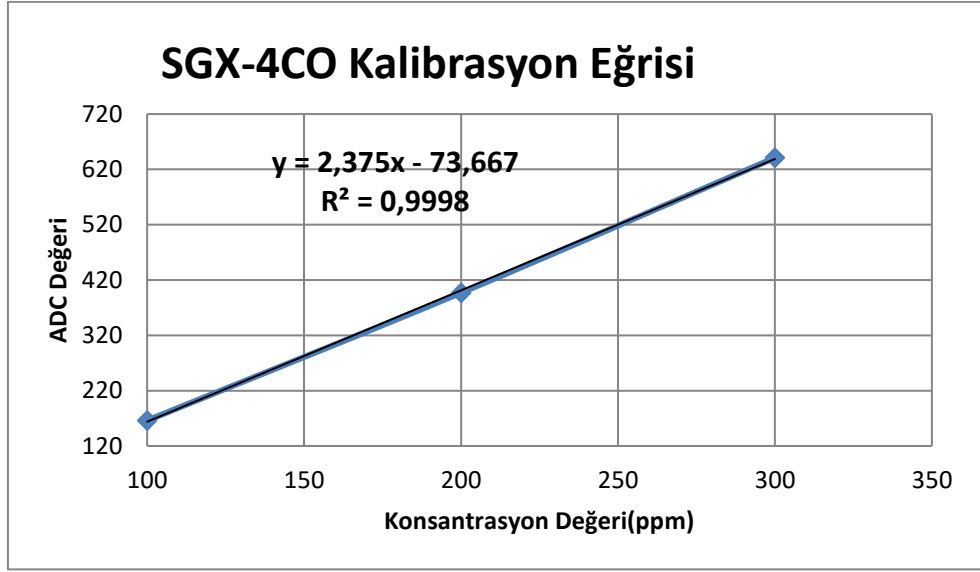
Karbonmonoksit gazının değişen konsantrasyonlarına karşı (100 ppm, 200 ppm, 300 ppm), SGX-4CO elektrokimyasal sensörünün gaz verildiği andaki çıkış değerleri karşılaştırılmıştır. Örneğin; 100 ppm karbonmonoksit gazı verildiğinde 166 sensör çıkış değeri (ADC değeri) elde edilmiştir.



Şekil 5.17 SGX-4CO Sensörünün CO Gazına Karşı Tepkisi

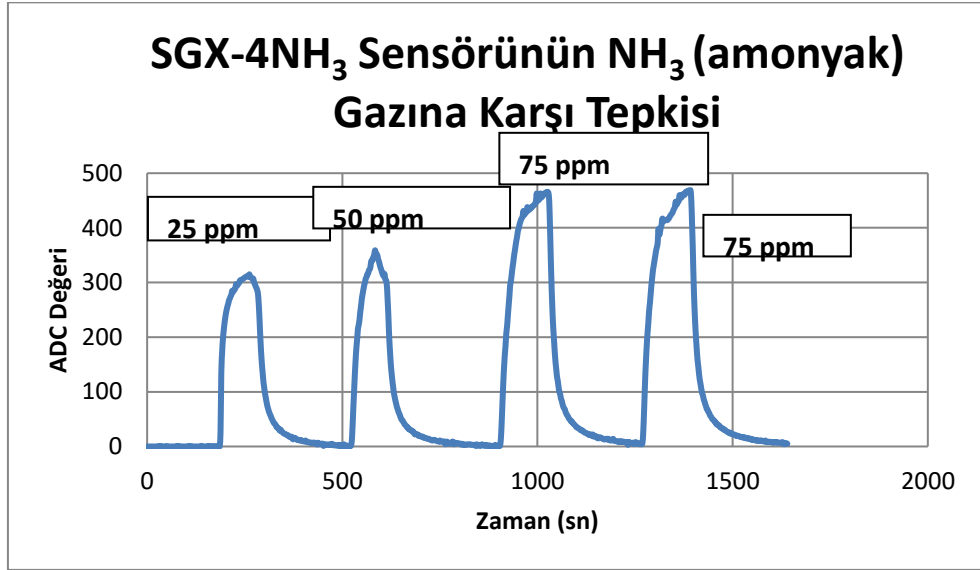
Şekil 5.17'deki verilerden yola çıkarak sensörün kalibrasyon eğrisi çizilmiştir. R^2 değeri, deneysel verilerin doğrusal bir eğriye ne kadar uyduğu hakkında

bilgi verir. R^2 değeri 1'e çok yakın çıkmıştır. Bu değerin 1'e yakınlığı ,deneysel verilerin doğrusal olduğunu gösterir. Bu çalışmada her ölçüm için aynı konsantrasyon değerini iki kere ölçtük; ölçümlerimiz sonucunda sensöre aynı konsantrasyon değerleri uygulandığında **Şekil 5.17**'de görüldüğü gibi yaklaşık olarak aynı ADC değerleri alınmıştır. Tekrarlı ppm değerlerine ithafen standart sapma yüzde 5 mertebesinde kalmıştır.



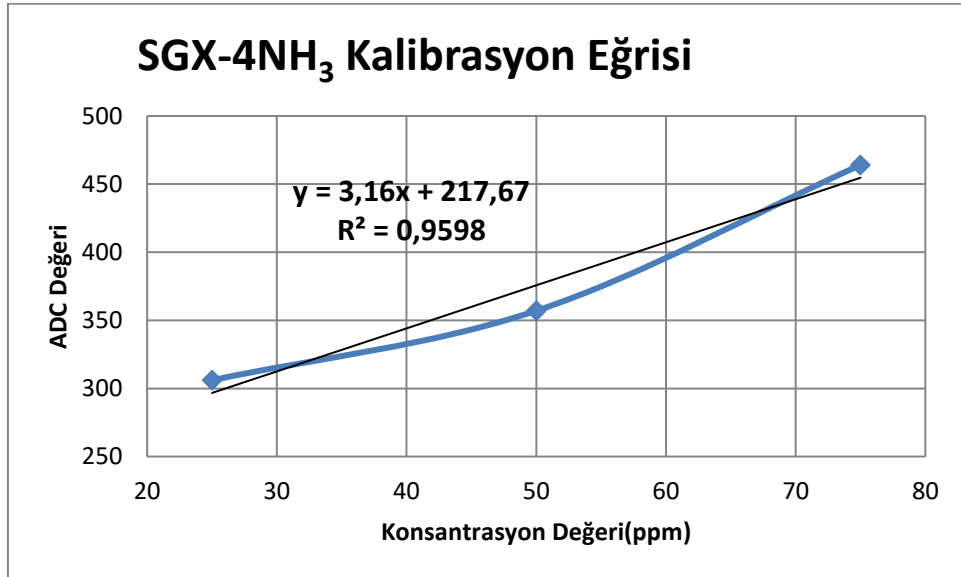
Şekil 5.18 SGX-4CO Kalibrasyon Eğrisi

Amonyak gazının değişen konsantrasyonlarına karşı (25 ppm,75 ppm,75 ppm), SGX-4NH₃ elektrokimyasal sensörünün gaz verildiği andaki çıkış değerleri karşılaştırılmıştır. Örneğin; 25 ppm karbonmonoksit gazı verildiğinde 306 sensör çıkış değeri (ADC değeri) elde edilmiştir.



Şekil 5.19 SGX-4NH₃ Sensörünün NH₃ Gazına Karşı Tepkisi

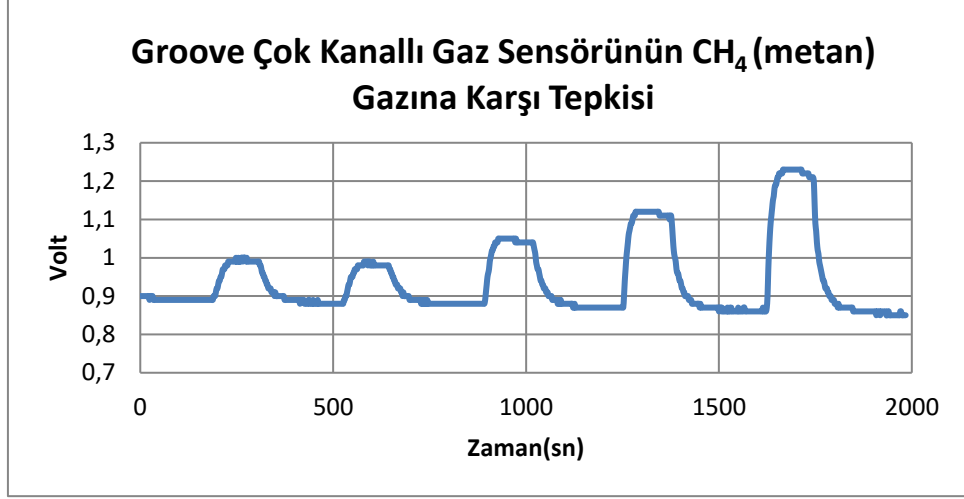
Şekil 5.20’de, SGX-4NH₃ sensörünün, amonyak gazının değişen konsantrasyonlarına karşı çıkış değerleri karşılaştırılarak kalibrasyon eğrisi elde edilmiştir.



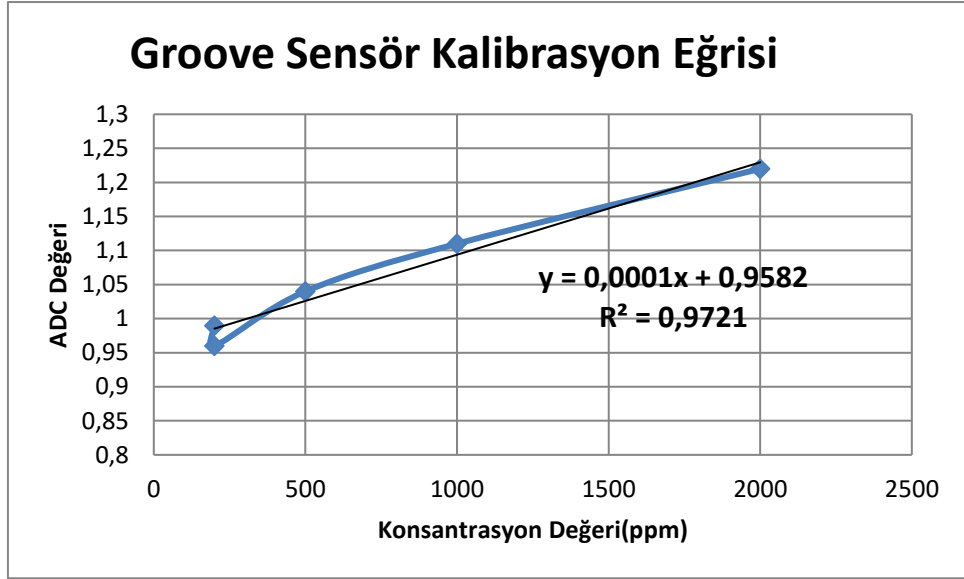
Şekil 5.20 SGX-4NH₃ Kalibrasyon Eğrisi

Metan (CH₄) gazının değişen konsantrasyonlarına karşı (200 ppm, 200 ppm, 500 ppm, 1000 ppm ve 2000 ppm), Grove çok kanallı gaz sensörünün 302B sensör kısmının gaz verildiği andaki çıkış değerleri karşılaştırılmıştır. Örneğin; 25 ppm

karbonmonoksit gazı verildiğinde 306 sensör çıkış değeri (ADC değeri) elde edilmiştir.

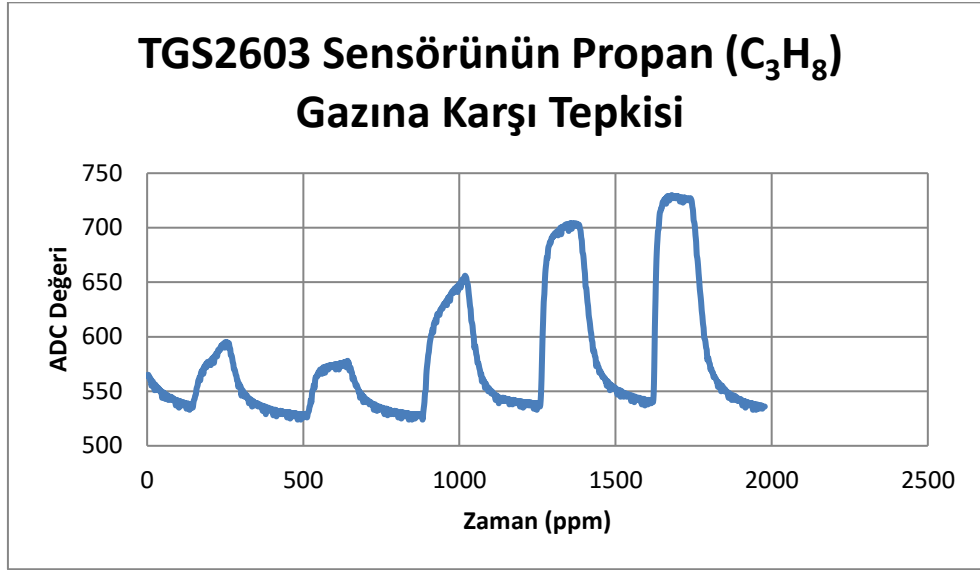


Şekil 5.21 Groove Çok Kanallı Gaz Sensörünün CH₄ Gazına Karşı Tepkisi

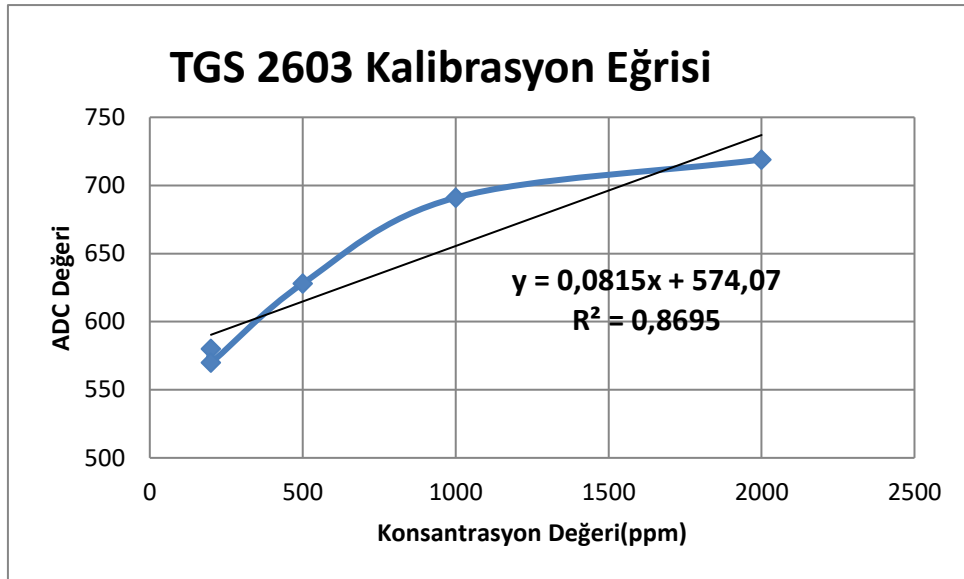


Şekil 5.22 Groove Sensör Kalibrasyon Eğrisi

Propan(C₃H₈) gazının değişen konsantrasyonlarına karşı TGS2603 metaloksit sensörünün verdiği çıkış değerleri incelenmiştir, bu çıkış değerlerine bağlı olarak sensörün kalibrasyon eğrisi gösterilmektedir. Örneğin 200 ppm propan gazına karşı, 580 sensör çıkış değeri (ADC değeri) elde edilmiştir.

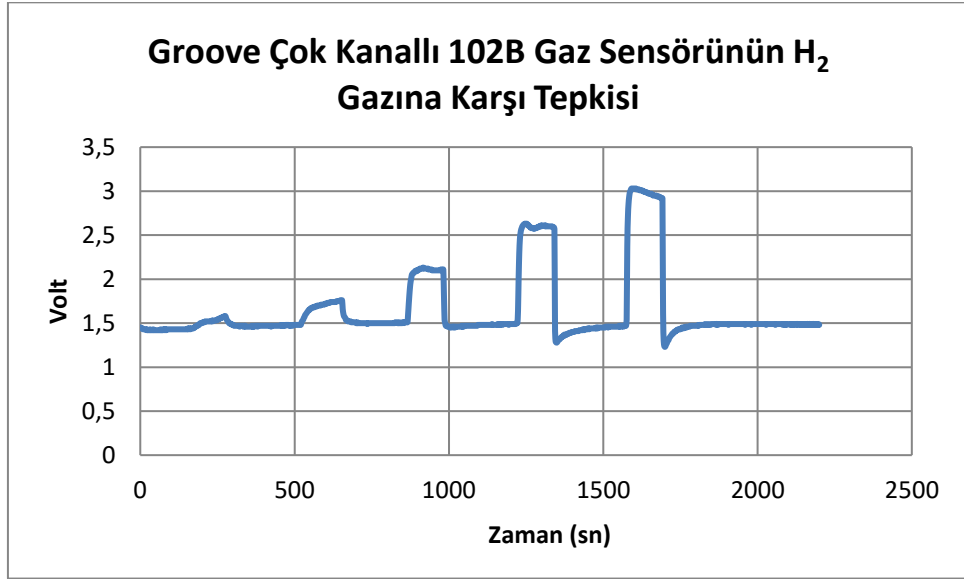


Şekil 5.23 TGS2603 Sensörünün Propan Gazına Karşı Tepkisi

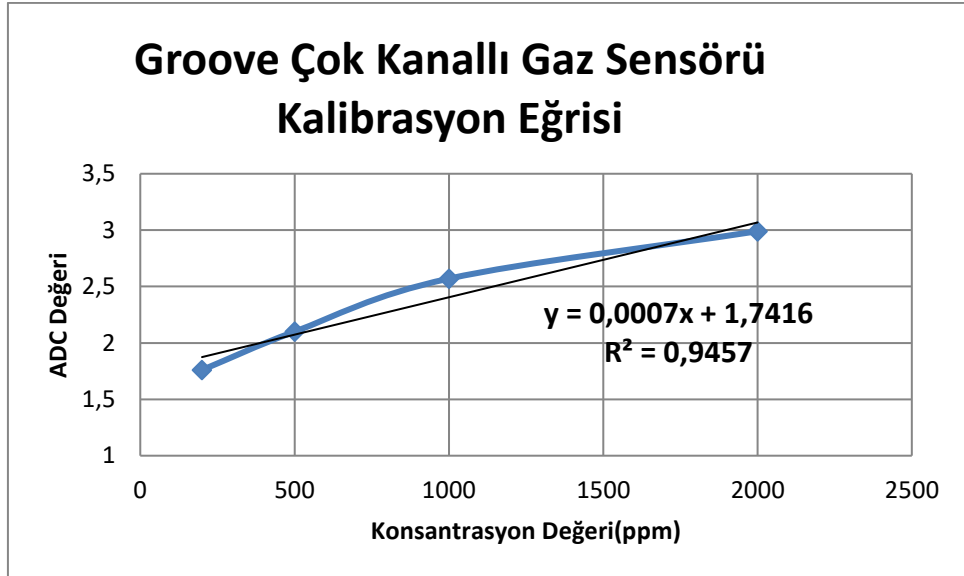


Şekil 5.24 TGS 2603 Kalibrasyon Eğrisi

Hidrojen(H₂) gazının değişen konsantrasyonlarına karşı Groove çok kanallı gaz sensörünün içerisinde yer alan 102B sensörünün ürettiği cevaplar Şekil 5.25'te incelenmiştir. Artan konsantrasyonlara karşı değişen cevaplar üretmiştir. Konsantrasyonlar ve sensörün ürettiği datalar karşılaştırılıp kalibrasyon eğrisi grafiği elde edilmiştir.



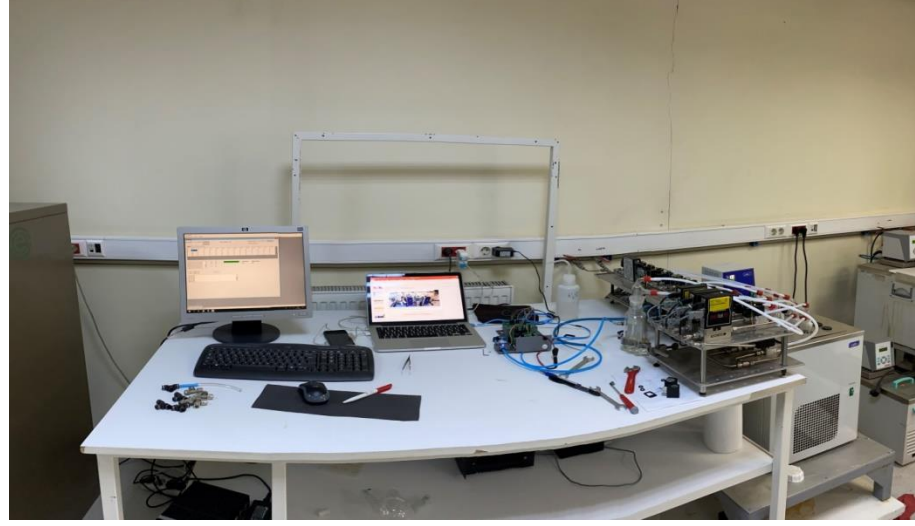
Şekil 5.25 Groove Çok Kanallı 102B Gaz Sensörünün H₂ Gazına Karşı Tepkisi



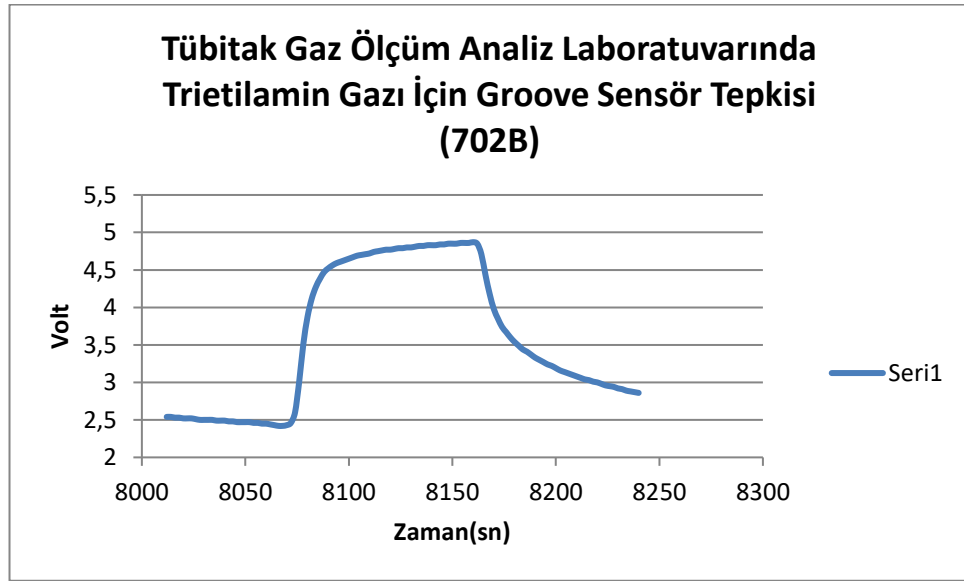
Şekil 5.26 Groove Çok Kanallı Gaz Sensörü Kalibrasyon Eğrisi

Firmada yapılan ölçümlere ek olarak Gebze’de bulunan TÜBİTAK Malzeme Araştırma Merkezi Malzeme Enstitüsü gaz ölçüm ve analiz laboratuvarlarında test çalışmaları yapılmıştır. Gaz testlerinde heptan,ksilen,toluen,metanol ve trietilamin gazları verilmiştir. Farklı gaz ölçümlerine başlamadan önce 26 dk sensör yıkama yapılmıştır. Aynı gaz için; 2 dk gaz konsantrasyonu verilmiştir, sonrasında 4 dk

yıkama işlemi gerçekleşmiştir. Bu adım bittikten sonra gazın 2. konsantrasyonu verilmiştir ve aynı adımlar tekrar edilmiştir.

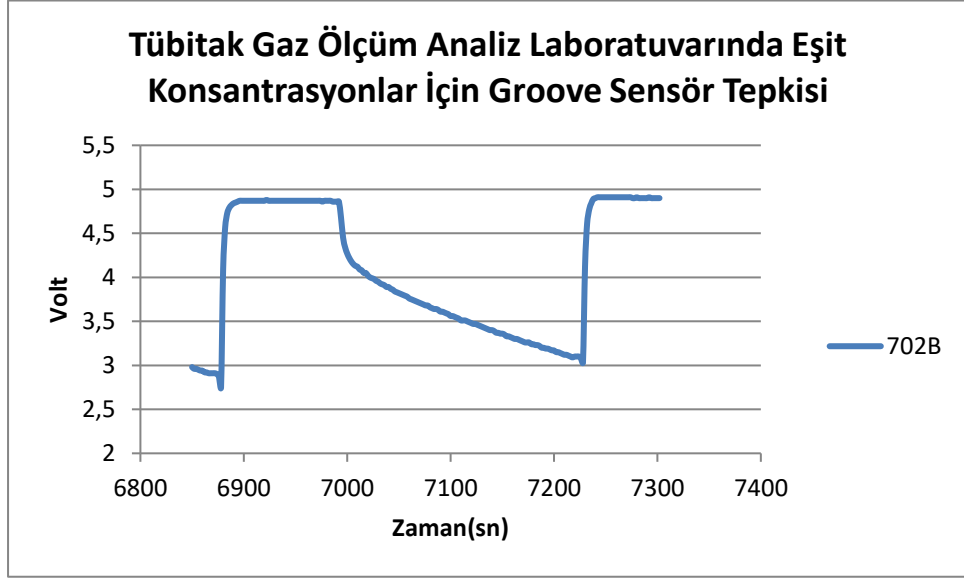


Şekil 5.27 Tübitak MAM-ME Gaz Ölçüm ve Analiz Laboratuvarı



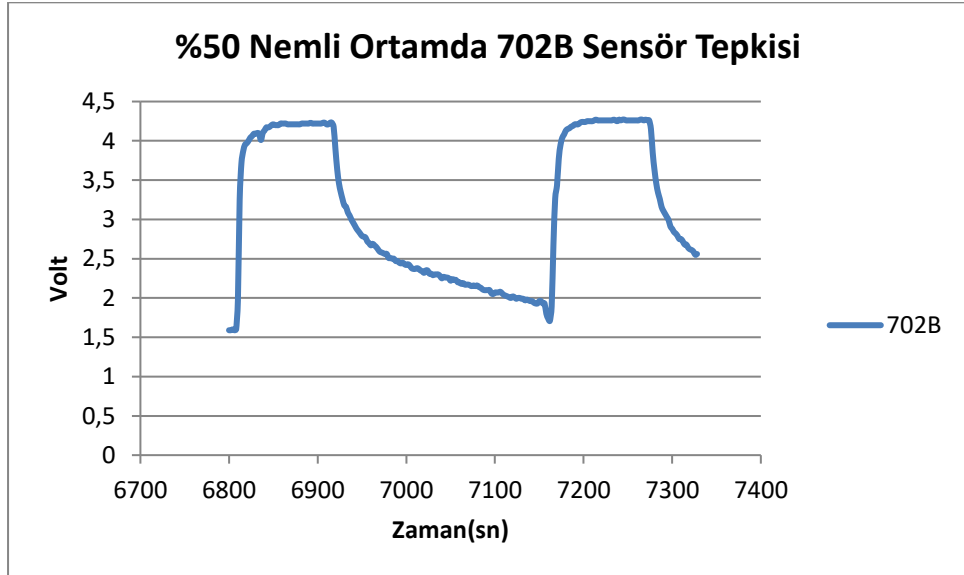
Şekil 5.28 Tübitak Gaz Ölçüm Analiz Laboratuvarında Trietilamin Gazı İçin Groove Sensör Tepkisi (702B)

Şekil 5.28’de sensörün yıkama anında çıkış değerinin düşüşü ve 2 dakika gaz uygulama anında sensör çıkış değerinin yükselme anı görülmektedir.



Şekil 5.29 Tübitak Gaz Ölçüm Analiz Laboratuvarında Eşit Konsantrasyonlar İçin Groove Sensör Tepkisi

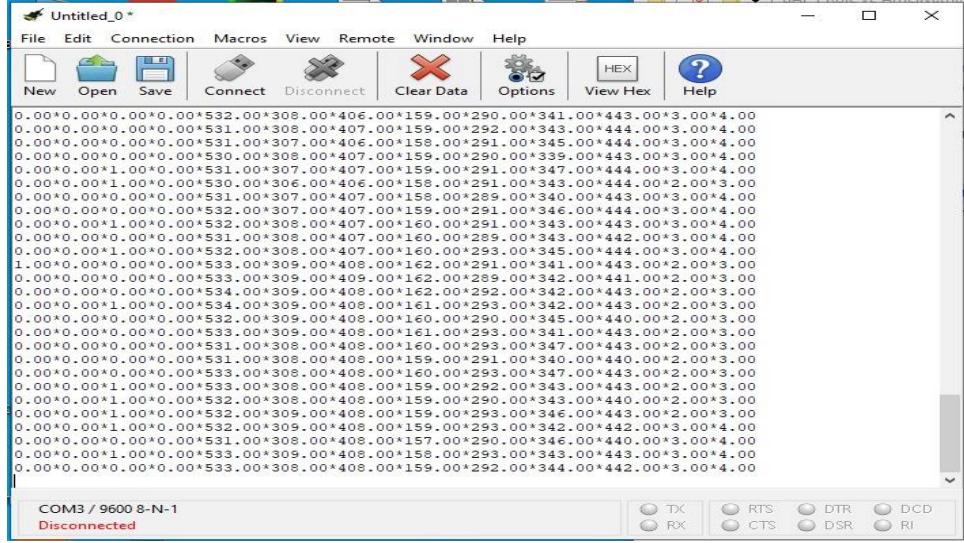
Şekil 5.29’de sensöre gaz uygulanmıştır,sensörün volt değerinde yükselme meydana gelmiştir ve sensör yıkandığında sensörün çıkış değerinde azalma meydana gelmiştir, eşit konsantrasyonda gaz uygulandığında yakın çıkış değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5.30 %50 Nemli Ortamda 702B Sensör Tepkisi

Şekil 5.30’da geliştirilmek istenen sensör dizisi için %50 nemli ortama karşı sensörün farklı konsantrasyonlara karşı tepkisi incelenmiştir.

Bu çalışmada, İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Deneysel Tıp Araştırmaları Laboratuvarında (DETALAB) bir hayvan ameliyatı esnasında ölçüm yapılmıştır. Cihaz ortamda bulunan iç ortam hava kirletici değerlerini sensörler aracılığı ile kaydetmiştir, LoRa alıcı verici modülü ile ameliyathaneden alınan veriler aktarılmıştır. Uzaktan aktarılan dataları bilgisayar da okurken “Coolterm.exe” programı kullanıldı.



Şekil 5.31 Coolterm.exe Programının Arayüzü



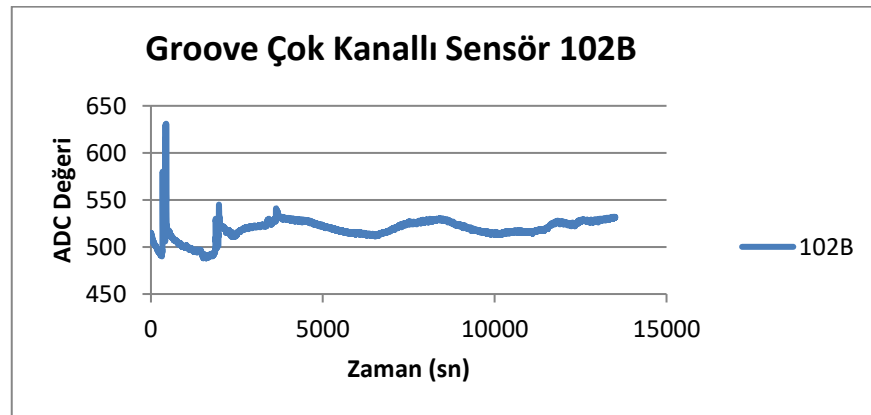
Şekil 5.32 İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Deneysel Tıp Araştırmaları Laboratuvarında Ölçüm Esnasında Hayvan Ameliyatı



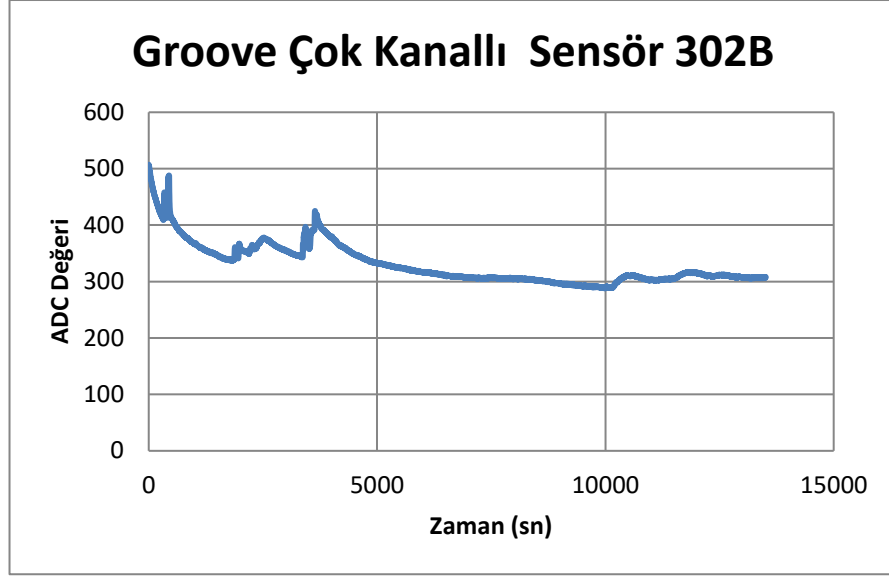
Şekil 5.33 Ameliyathaneden Bir Adet Görsel

Ameliyathane içerisinde operasyona bağlı olarak, zamana bağlı gaz konsantrasyonlarında ya da ameliyathanedeki koku dağılımında değişimler meydana gelmektedir. Bu sistem sayesinde ameliyathane ortamındaki veriler aktif bir şekilde görüntülenmektedir.

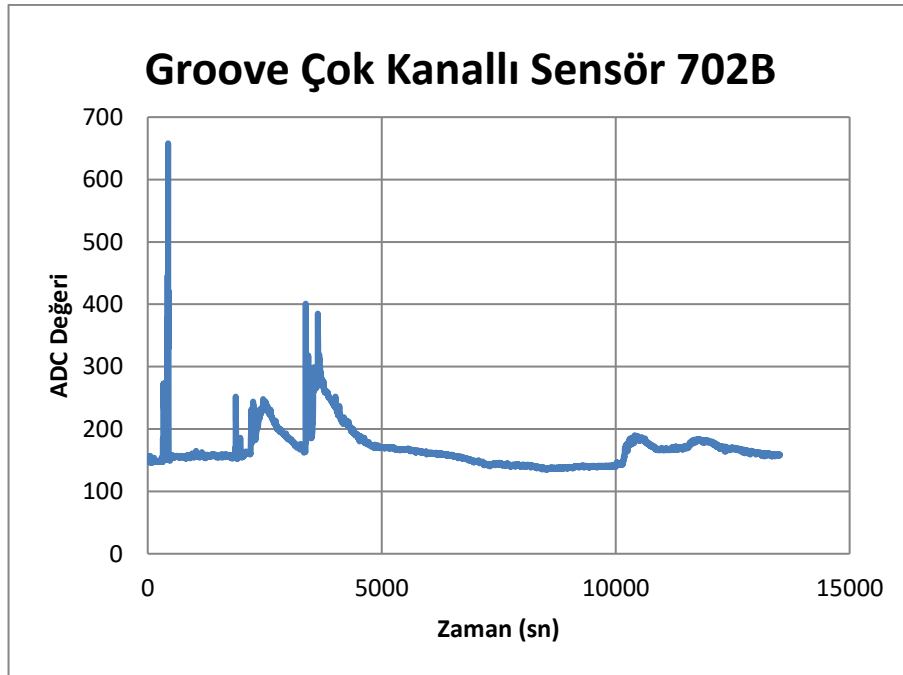
Şekil 5.34, Şekil 5.35, Şekil 5.36 incelendiğinde; ameliyathanede değişen gaz konsantrasyonlarına karşı Groove çok kanallı gaz sensörlerin tepkileri incelendiğinde, 102B sensörü yükselen tepkiler vermiştir.



Şekil 5.34 Ameliyat Esnasında Groove Çok Kanallı Sensör Tepkileri(102B)

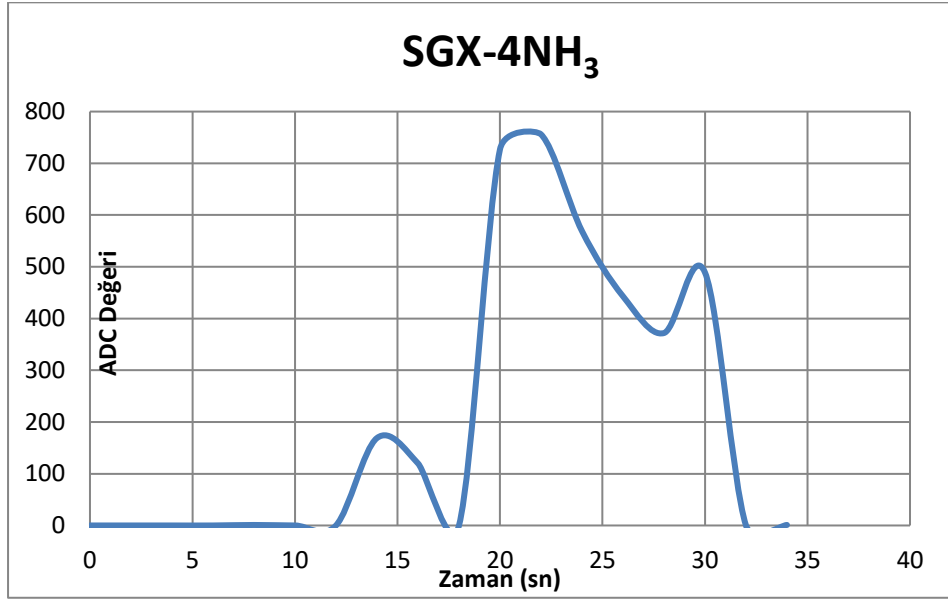


Şekil 5.35 Ameliyat Esnasında Groove Çok Kanallı Sensör Tepkileri(302B)



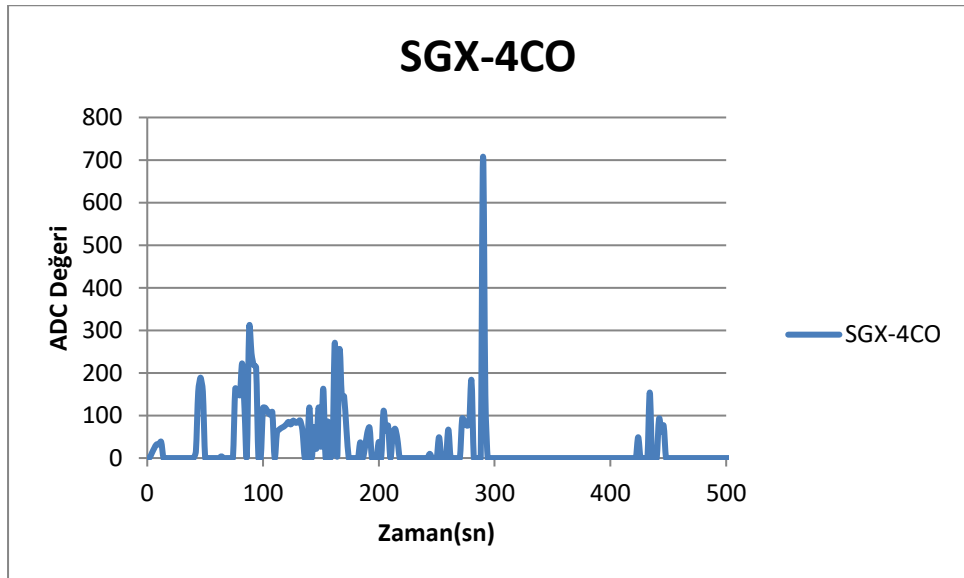
Şekil 5.36 Ameliyat Esnasında Groove Çok Kanallı Sensör Tepkileri (702B)

Ameliyathanede, ameliyat esnasında açığan çıkan gaz konsantrasyonlarına karşı elektrokimyasal sensörlerden SGX-4NH₃ sensörünün çıkış tepkileri **şekil 5.37**'deki gibidir.



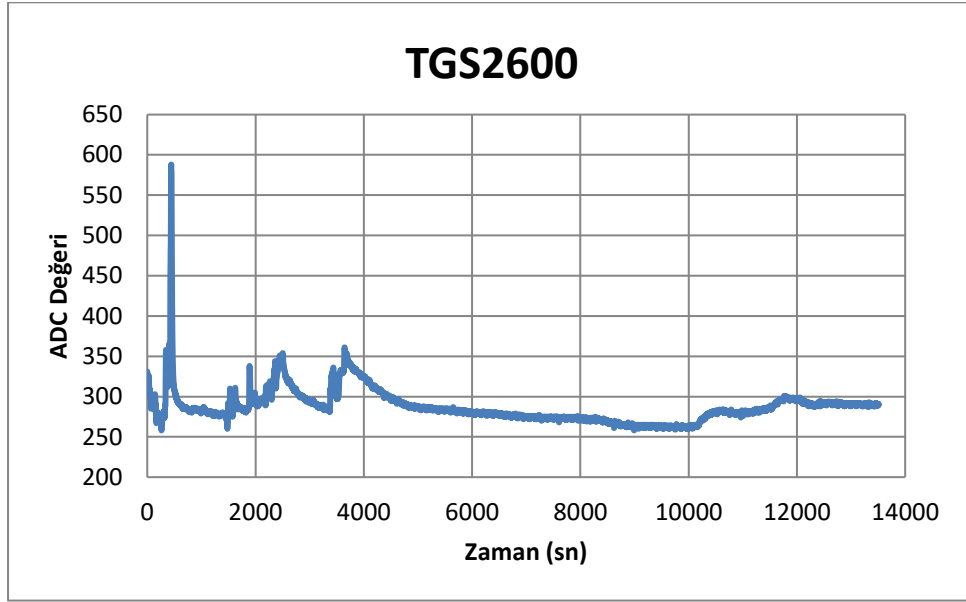
Şekil 5.37 Ameliyat Esnasında SGX-4NH₃ Sensör Tepkileri

Şekil 5.38’de ameliyat esnasında SGX-4CO elektrokimyasal sensörünün aldığı ölçüm dataları bulunmaktadır.

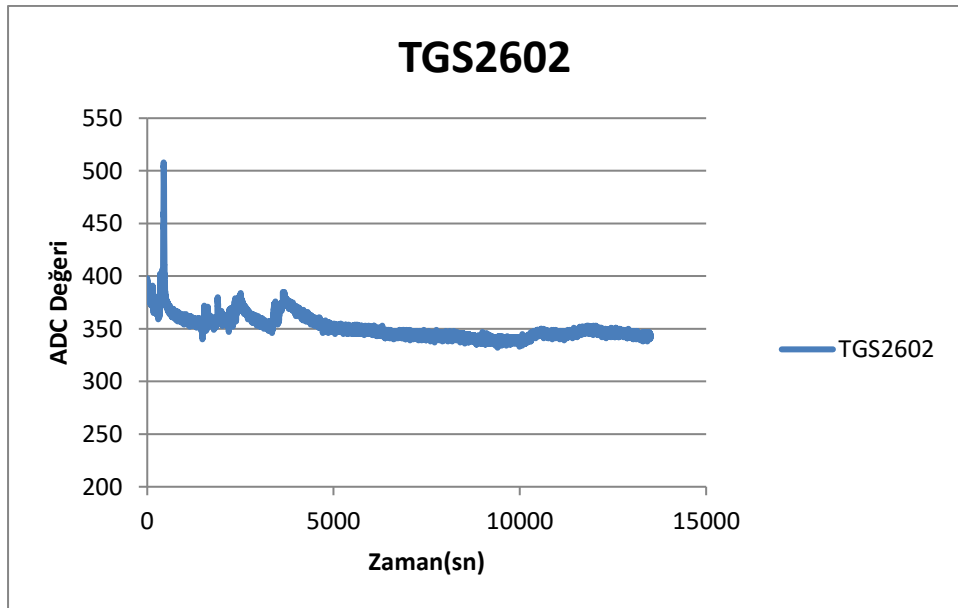


Şekil 5.38 Ameliyat Esnasında SGX-4CO Sensör Tepkileri

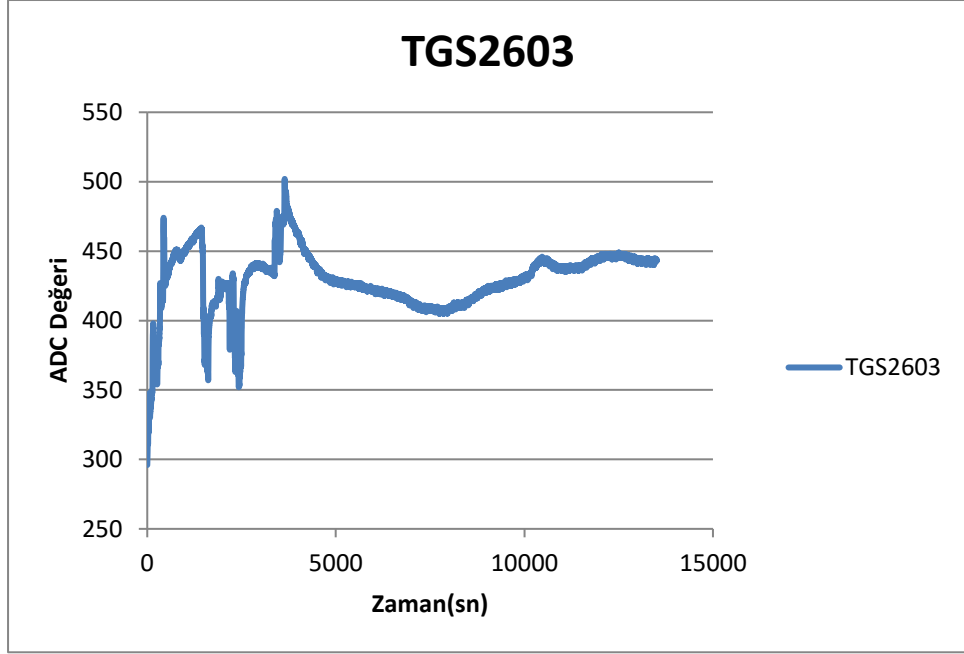
Şekil 5.39, şekil 5.40, şekil 5.41’de ameliyat esnasında TGS sensörlerinin aldığı ölçüm dataları bulunmaktadır.



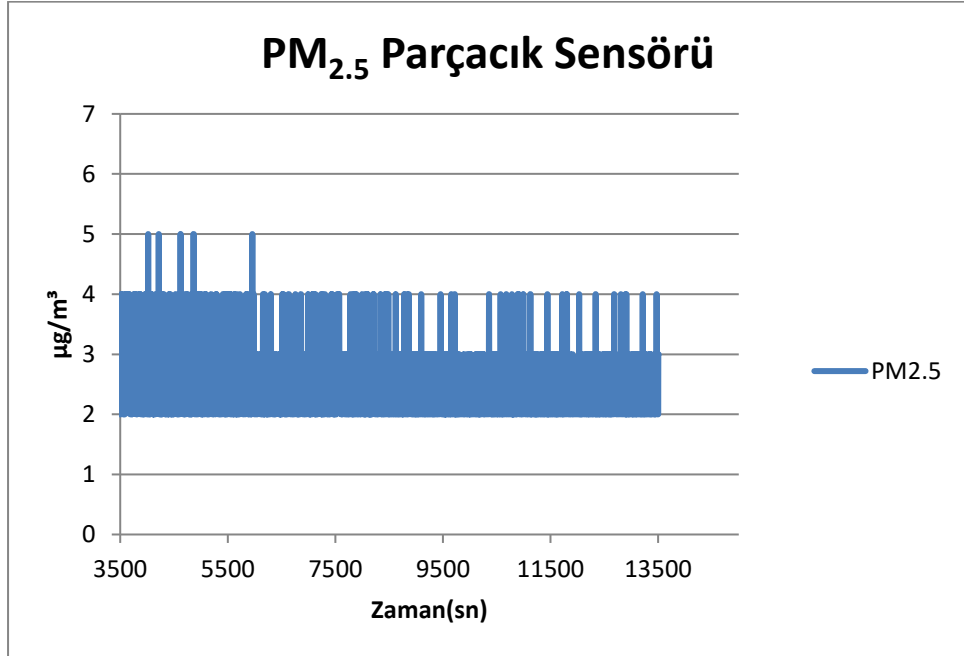
Şekil 5.39 Ameliyat Esnasında TGS2600 Sensör Tepkileri



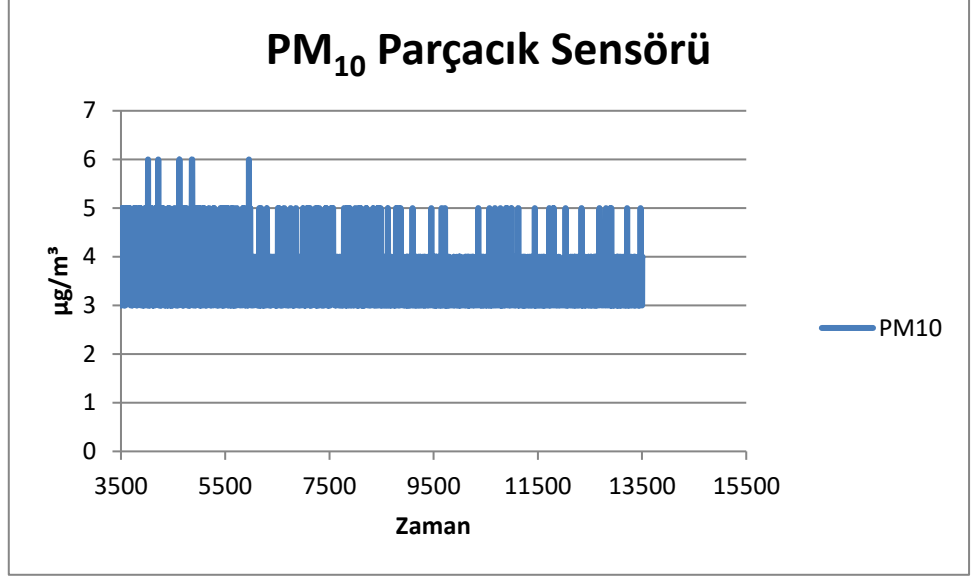
Şekil 5.40 Ameliyat Esnasında TGS2602 Sensör Tepkileri



Şekil 5.41 Ameliyat Esnasında TGS2603 Sensör Tepkileri



Şekil 5.42 Ameliyat Esnasında PM_{2.5} Parçacık Sensör Tepkileri



Şekil 5.43 Ameliyat Esnasında PM₁₀ Paracak Sensör Tepkileri

Şekil 5.42 ve şekil 5.43'te ameliyat esnasında HPMA paracak sensörünün verdiği tepkiler verilmiştir.

ALTINCI BÖLÜM

6. TARTIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında tasarlanan ve geliştirilen cihaz, iç ortamdaki kirletici konsantrasyonlarını sensörler aracılığı ile ölçmektedir. Böylelikle ameliyathane esnasında hekimin ve hastanın hangi kirletici gazlara maruz kaldığı saptanabilmektedir. Alınan sensör verileri LoRa protokolü aracılığıyla uzaktan takip edilebilmektedir. Ayrıca bu çalışmayı gelecekte nefesten gelen gazları analiz etmek için geliştireceğimiz cihaz çalışmasının ilk basamağı olarak düşünmekteyiz. Bu çalışma farklı sensörler eklenerek daha farklı alanlarda ve farklı kitlelere hitap edebilecek şekilde geliştirilebilir özelliktedir.

Yalçın (2017), yaptığı çalışmada CO₂ (karbondioksit) gazının ortamdaki konsantrasyonunu, kapalı ortam boyutlarına, ortamdaki kişi sayısına, karakteristik özelliklerine ve aktivite seviyesine bağlı olarak doğru tahmin etmek amacıyla matematiksel bir model geliştirilmiştir. Bu çalışmada hava sıcaklığı ve bağıl nem miktarı, CO₂ /Temp. / RH meter cihazının ara yüzü kullanılarak elde edilmiştir. CO₂ gazı ölçümleri için AZ 77535 CO₂/Temp./RH Meter cihazı kullanılmıştır. Bizim çalışmamızda ölçümler için hazır bir cihaz kullanmak yerine ilgili gazları algılayıcı sensörler kullanılmıştır ve cihaz tasarlanmıştır. Üçgün ve arkadaşları (2020), yaptıkları çalışmada IoT tabanlı platform ile gerçek zamanlı iç ortam hava kalitesi izleme sistemi tasarlamışlardır. Tasarlanan sistem içerisinde Raspberry Pi 3 kontrol kartı, sıcaklık, nem, gaz ve ışık sensörleri kullanılmıştır. Sensörler aracılığı ile alınan iç ortam verileri, kontrol kartı aracılığıyla işlenerek elde edilmiş ve veri tabanına kaydedilmiştir. Hazırlanan web ara yüzü ile veriler anlık olarak takip edilmiştir. IAQ'nın belirlenmesi için, çalışma kapsamında bir hava kalitesi formülü oluşturulmuş ve sensörlerden elde edilen parametre değerleri formülde kullanılarak iç ortam hava kalitesi oranı hesaplanmıştır. Bu çalışmada düşük maliyetli, basit yapıları komponentler

kullanılmıştır. Bizim çalışmamızda ticari olarak sık tercih edilen sensörler kullanılmıştır.

Fonollosa ve arkadaşları (2015), yaptıkları çalışmada kimyasal algılamadaki sapmayı ele almak için üç yıllık bir süre boyunca kapsamlı bir veri seti toplanmıştır. Çalışmada 16 adet metal oksit gaz sensörü (TGS2600, TGS2602, TGS2610, TGS2620) kullanılmıştır. Bu sensörler, altı farklı uçucu organik bileşiğe maruz bırakılmıştır. Biz çalışmamızda ek olarak elektrokimyasal sensörler de kullandık; bu sayede daha fazla gaz tespit edebildik.

KAYNAKÇA

- Açıköz, A., Baykara, B., Uysal, N. 2013. Bir Üniversitedeki Adölesan ve Erişkinlerde Hasta Bina Sendromu Belirtilerinin CO₂ ile İlişkinin İncelenmesi. Hava Kirliliği Araştırmaları Dergisi, 2: 21-27.
- Adhikari, B., Majumdar, S. 2004. Polymers in Sensor Applications. Prog. Polym. Sci., 29(7): 699-766.
- Aksu, S., & Kızıllı, Ü. (2018). Hava Kalitesi Ölçüm Amaçlı Kullanılan Metal-oksit Gaz Sensörlerinin Sıcaklık ve Nem Etkileşimlerinin Belirlenmesi.
- Aran, A. 2007. Manufacturing Properties of Engineering Materials. ITU Department of Computer Enginnerig, Lecture Notes, 2.
- ASHRAE, "ASHRAE HandbookCD, 2001 Fundamentals", Chapter 9: Indoor Environmental Health, Atlanta, USA, 2003.
- Bai, H., Shi, G. 2007. Gas Sensors Based on Conducting Polymers. Sensors, 7: 267-307.
- Bagheri, F. 2017. Gas Sensors. <http://slideplayer.com/slide/5305869/>, Erişim Tarihi: 30.01.2022
- Berna, A. (2010) "Metal Oxide Sensors for Electronic Noses and Their Application to Food Analysis" Sensors, 10, 3882-3910
- Brooks, B. O., Davis, W. F. 1991. Understanding Indoor Air Quality. CRC Press, US, 39.
- Bulgurcu, H. 2017. Bölüm-1 Havalandırma ve İç Hava Kalitesi. http://deneysan.com/Content/images/documents/havalandirma-1_46167331.pdf, Erişim Tarihi: 12.05.2017
- Chen, Z., Lu, C. 2005. Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms. Sensor Letters, 3: 274-295.
- Choopun, S., Hongstith, N. and Wongrat, E, (2012). Metal-Oxide Nanowires for Gas Sensors, Nanowires-Recent Advances, Prof. Xihong Peng (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/54385.
- Cömert, B. (2015) "TiO₂ İnce Film Sensörlerin Geliştirilmesi" Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 13-17, 20-22.

- Dey, A. (2018c). Semiconductor metal oxide gas sensors: A review. *Çinde Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology* (C. 229, ss. 206–217). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2017.12.036>
- Fang, C., Liu, H., Li, G., Sun, D., & Miao, Z. (2015). Estimating the impact of urbanization on air quality in China using spatial regression models. *Sustainability*, 7(11), 15570-15592.
- Ellis, J. 2010. Indoor Air Quality in Lecture Theatres and Large Enclosed Public Spaces. University of Brighton, England, PhD Thesis.
- Eranna G., Joshi, B. C., Runthala, D.p., Gupta, R. P. (2004) “Oxide Materials for Development of Integrated Gas Sensors-A Comprehensive Rewiev”, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 29, 111-188
- Gerboles, M., Buzica, D., 2009. Evaluation of micro-sensors to monitor ozone in ambient air. Joint Research Center for Environment and Sustainability, EUR 23676 EN, DOI 10.2788/5978.
- Gründler, P. 2007. Characteristics of Chemical Sensors. Edit. Hardcover. *Chemical Sensors and Introduction for Scientists and Engineers*. Springer, 274. Berlin
- Harbeck, M., Şen, Z., Gürol, İ., Gümüş, G., Muşluoğlu, E., Ahsen, V., Öztürk, Z. Z. 2011. Vic-dioximes: A New Class of Sensitive Materials for Chemical Gas Sensing. *Sensor. Actuat. B: Chem.*, 156(2): 673-679.
- Johan, S., Xuezhi, Z., Unander, T., Koptuyug, A., Nilsson, H. 2007. Remote Moisture Sensing Utilizing Ordinary RFID Tags. in *Proceedings of 2007 IEEE Sensors*, Atlanta, USA, 308-311.
- Karakuş, C. B., & Yıldız, S. (2019). Hava Kalite İndeksi İle Meteorolojik Parametreler Arasındaki İlişkinin Çoklu Regresyon Yöntemi İle Belirlenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(2), 698-711.
- Kırımhan, S. 2006. Hava Kirliliği ve Kontrolü. *Çevre Yönetimi Dizisi*, Turhan Kitabevi, Ankara, 3(1).
- Korotcenkov, G. 2013. Chapter 11 Catalysts Used in Calorimetric (CombustionType) Gas Sensors. *Handbook of Gas Sensor Materials: Properties, Advantages and Shortcomings for Applications Volume 1: Conventional Approaches*, Springer Science & Business Media, 287.

- Güneş, G., Bozkurt, E., Sönmez, S., & Çakır, N. (2015). Kütüphanelerde iç hava kalitesinin incelenmesi: Marmara Üniversitesi Merkez Kütüphanesi. *Bilgi Dünyası*, 16(2), 222-241.
- Lobnik, A., Turel, M., Urek, S. K. 2012. Optical Chemical Sensors: Design and Applications. *Advances in Chemical Sensors*, 3-28.
- Liu, X., Cheng, S., Liu, H., Hu, S., Zhang, D., Ning, H. 2012. A Survey on Gas Sensing Technology. *Sensors*, 12: 9635-9665.
- Menteşe, S., Güllü, G. 2009. Organik Bileşiklerin Farklı İç Ortamlardaki Seviyeleri. IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, 673-679.
- Olesen, B.W. 2000. Guidelines for Comfort, *ASHRAE Journal*, 40-45.
- Özmen, A., Ebeoğlu, M. A., Mumyalmaz, B., Balta, D. 2016. Determination of Volatile Organic Compounds in Air by a Surface Acoustic Wave Array. *Instrum. Sci. Technol.*, 44(1): 54-64
- ÖZTÜRK, M., 2008, Hava kirliliğinin halk sağlığı üzerine etkisi, Çevre ve Orman Bakanlığı, 2008
- Öztürk, M. 2010. Azot Oksitlerin Sağlık Üzerine Etkileri. <http://gnc6nts.wordpress.com/2010/04/10/azot-oksitlerin-saglik-uzerine-etkileri/>, Erişim Tarihi: 10.01.2022.
- Papadimitratos, P., De La Fortelle, A., Evenssen, K., Brignolo, R., & Cosenza, S. (2009). Vehicular communication systems: Enabling technologies, applications, and future outlook on intelligent transportation. *IEEE communications magazine*, 47(11), 84-95.
- Parab, R. 2001. Introduction to Indoor Air Quality (IAQ). The University of Toledo. www.eng.utoledo.edu/~akumar/IAQ/TEXT/introduction.ppt, Erişim Tarihi: 25.11.2021
- Readygo. 2016. Indoor Air Quality - History. <http://www.readygo.com/rgsample/cleanair/ind01/01ind01.htm>, Erişim Tarihi: 01.01.2022
- Sandalcı, T. 2016. Kirleticilerin İnsan Sağlığı ve Çevre Üzerinde Etkileri, Yıldız Teknik Üniversitesi, Taşıt ve Çevre Ders Notları.
- Shen, C., Brozena, A. H., Wang, Y. 2011. Double-walled Carbon Nanotubes: Challenges and Opportunities. *Nanoscale*, 3: 503-518.
- Shivaraj, Naduvinamani, S., Soumya, P., Shriya, D., Sourabh. 2015. Design and Development of Gas Analyzer for Detecting Ammonia, NO₂, CO and

CO₂. International Journal on Emerging Technologies (Special Issue on NCRIET2015), 6(2): 144-149.

SHU (Sheffield Hallam University). 2017. Gas Chromatography. Faculty of Health and Biosciences Division, On-Line <http://teaching.shu.ac.uk/hwb/chemistry/tutorials/chrom/gaschr.htm>. Erişim Tarihi: 03.04.2022.

Şen, Z. Petrol Kaynaklı Hidrokarbonlardan Btex Kompleks Gaz Karışımlarının Sınıflandırılması İçin Qcm Gaz Sensör Dizisi Geliştirilmesi.

Şişman, E. (2019). Türkiye’de seçilen hava kalitesi izleme istasyonları için eğilim (trend) değerlendirmeleri. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 5(1), 134-152.

Taşaltın, C., Ebeoğlu, M. A., Öztürk, Z. Z. 2012. Acoustoelectric Effect on the Responses of SAW Sensors Coated with Electrospun ZnO Nanostructured Thin Film. Sensors, 12: 12006-12015.

Thai, T. T., Yang, L., DeJean, G. R., Tentzeris, M. M. 2011. Nanotechnology Enables Wireless Gas Sensing. IEEE Microw. Mag., 12: 84-95.

Url-1 , Membrapor, “<https://www.membrapor.ch/electrochemical-gas-sensors/>” Erişim Tarihi:25.01.2022

Url-2, FigaroSensor, “<https://www.figarosensor.com/product/sensor/>” Erişim Tarihi:25.01.2022

Url-3, Wikipedia, “ <https://tr.wikipedia.org/wiki/LoRa>” Erişim Tarihi:28.05.2022

Url-4, LinkedIn, “<https://tr.linkedin.com/pulse/rf-haberle%C5%9Fme-sistemleri-lora-lorawan-m-furkan-sariguney>” Erişim Tarihi:28.05.2022

Url5, Pdf, “chromeextension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://www.aepint.nl/wp-content/uploads/2015/05/A1A-EC_SENSORS_AN2-Design-of-Electronics-for-EC-Sensors-V3.pdf” Erişim Tarihi:8.02.2022

Url-6, Robotistan, “<https://www.robotistan.com/mini-arduino-mega-2560-pro-ch340>”, Erişim Tarihi:03.01.2022

Url-7, “<https://tr.farnell.com/honeywell/hpma115s0-xxx/particle-sensor-laser-uart-5v/dp/2770767>”, Erişim Tarihi:01.01.2022

Url-8, “<https://fixaj.com/e32-433t20d/>” Erişim Tarihi:11.01.2022

- Vaizoğlu, S. A., Tekbaş, F., Evcı, D. 2000. Kapalı Ortam Hava Kalitesi, Sağlığa Etkisi. *sted-Sürekli Tıp Eğitimi Dergisi*, 9(11).
- Yalçın, N. (2017). Gaz sensörleri ile ölçüm sistemleri için ortam modelleme ve simülatör geliştirilmesi.
- Wang, S. 2012. Effects of Surface Roughness on the Indoor Particle Deposition Rate Constant. *Mechanical and Aerospace Engineering - Dissertations*, Paper 68.
- Wang, Y., Yeow, J. T. W. 2009. A Review of Carbon Nanotubes-Based Gas Sensors. *Journal of Sensors*, 2009: 1-2.