



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

**ZEHİRLİ ENDÜSTRİYEL MADDELERİN DÜŞÜK
GÜÇ TÜKETİMLİ SENSÖR DİZİLERİ İLE
İZLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SEVDE NUR ULU

İSTANBUL, 2023



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

**ZEHİRLİ ENDÜSTRİYEL MADDELERİN DÜŞÜK
GÜÇ TÜKETİMLİ SENSÖR DİZİLERİ İLE
İZLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SEVDE NUR ULU
(200231001)**

**Danışman
(Prof. Dr. Bahattin Karagözoğlu)
Eş Danışman
(Dr. Öğr. Üyesi Zafer Şen)**

İSTANBUL, 2023

26/07/2023

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı Biyomedikal Mühendisliği tezli yüksek lisans programı öğrencisi 200231001 numaralı *Sevde Nur ULU*'nun, hazırladığı, "*Zehirli Endüstriyel Maddelerin Düşük Güç Tüketimli Sensör Dizileri İle İzlenmesi*" konulu Yüksek Lisans tezi ile ilgili Tez Savunma Sınavı, 26.07.2023 Çarşamba günü saat 13.30'da yapılmış, sorulara alınan cevaplar sonunda adayın tezinin **Kabulüne Oy Çokluğu/Oy Birliği** ile karar verilmiştir.

Tez adı değişikliği yapılması halinde: Tez adının
.....
şeklinde değiştirilmesi uygundur.

Jüri Üyesi	Karar
1. (Danışman) Prof. Dr. Bahattin KARAGÖZOĞLU	Kabul
2. Dr. Öğr. Üyesi Fatih ÇİFTÇİ	Kabul
3. Doç. Dr. Sadullah ÖZTÜRK	Kabul
4. (İkinci Danışman)*Dr. Zafer ŞEN *2. Danışman varsa doldurulması gerekmektedir.	Kabul

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.

Sevde Nur Ulu

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitim hayatım boyunca kıymetli bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, tez sürecim boyunca ilgisini ve zamanını her ihtiyaç duyduğumda bana ayıran tez danışmanım ve değerli hocam Sayın Prof. Dr. Bahattin KARAGÖZOĞLU hocama çok teşekkür ediyorum.

Tez konusunun belirlenmesinden en son aşamasına kadar tüm süreçlerde bilgi, birikim ve tecrübeleriyle bana rehberlik eden; tez çalışmalarını boyunca ve tezimin yazımını esnasında desteklerini esirgemeyen, sorunlarımı sabırla dinleyip çözüm üretmemde elinden gelen her türlü yardımı sağlayan ve ikinci tez danışmanlığımı üstlenen hocam Sayın Dr. Zafer ŞEN'e ve bizimle birlikte tezimin tüm aşamalarında çalışmalarına destek olan, bu tezi yazmamda büyük emeği olan Sayın Dr. Mika Pettery HARBECK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez konusunun belirlenmesindeki büyük katkıları ile değerli bilgi ve deneyimleri ile beni yönlendiren, teşvik eden, gerek tez çalışmamın planlanması gerekse süreçlerin düzenli bir şekilde ilerlemesinde bana yardımcı olan hocam Sayın Doç. Dr. Sadullah ÖZTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca ve tez sürecimde manevi olarak destek olan ve her ihtiyacım olduğunda yanımda olan canım arkadaşlarım Aybüke ÜRKMEZ, Ayşe Dilara SAYIMLAR ve Fulya KARAMAN'a çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca hep desteklerini hissettiğim, çok sevdiğim aileme; canım babam Mehmet Mustafa ULU'ya canım annem Dilek ULU'ya, kardeşlerime ve eğer hayatta olsaydı benimle aynı heyecanı paylaşacağına emin olduğum biricik babannem Güner ULU'ya çok teşekkür ederim.

Sevde Nur Ulu

ZEHİRLİ ENDÜSTRİYEL MADDELERİN DÜŞÜK GÜÇ TÜKETİMLİ SENSÖR DİZİLERİ İLE İZLENMESİ

Sevde Nur ULU

ÖZET

Tez çalışması kapsamında toksik endüstriyel maddelerinin konsantrasyonları çeşitli gaz sensör modülleri kullanılarak ölçülmüştür. Bu ölçümlerde yapılan test konsantrasyonları planlanırken kısa süreli maruz kalma konsantrasyonları dikkate alınmıştır ve bu konsantrasyon değerlerindeki aralıklarda ölçümler yapılmıştır. Konsantrasyon ölçümlerini yapmak için elektrokimyasal gaz sensörleri kullanılmıştır. Ölçülen datalar sensör test hücresinden kablolu bağlantı ile Arduino'ya aktararak izlenmiştir. Geliştirilen cihazın ölçüm verileri için TÜBİTAK MAM KBRN Savunma Teknolojileri Araştırma Grubu ZEM Sensör Test Laboratuvarında çalışmaları yapılmıştır.

Yapılan test ölçümlerinde NH_3 , NO_2 , AsH_3 , CO , CO_2 , SO_2 gazlarına karşı sensörlerin tepkileri değerlendirilmiştir. Sensör tepkilerinden alınan veriler üzerinden kalibrasyon eğrileri elde edilmiştir ve sensör tepkileri yorumlanmıştır. Ek olarak sensörlerin nem karakteristikleri incelenmiştir. Sensörlerin aynı parametrelerde farklı zamanlarda ve farklı nem oranlarındaki gaz tepkileri ölçülmüştür. Sensörlerin %50 ve %85 bağıl nem ortamında gaz tepkileri ölçülmüş ve karakterizasyonu yapılmıştır.

Oluşturulan sensör test hücresinin bu gazlara karşı değişen tepkilerinden yararlanılarak Temel Bileşen Analizi yapıldı. Yapılan PCA işlemlerinden sonra toksik kimyasal gazların %50 ve %85 nemli ortamlarda birbirlerinden tamamen ayrıldıkları sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler; toksik endüstriyel kimyasallar, kimyasal sensörler, mikrodenetleyici, veri işleme, temel bileşenler analizi (PCA)

MONITORING OF TOXIC INDUSTRIAL CHEMICALS WITH LOW POWER CONSUMPTION SENSOR ARRAYS

Sevde Nur ULU

ABSTRACT

The scope of the thesis is to investigate, the concentrations of toxic industrial chemicals that have been measured using various gas sensor modules. Short-term exposure concentrations were considered as references when planning to determine the test concentrations and all measurements have been carried out in the ranges of these reference values. Electrochemical gas sensors were used for the measurements and the measured data were transferred from the sensor test cells to an Arduino-based mikrocontroller unit via wired connection and monitored.

The test studies were carried out in TIC Sensor Test Laboratory of TÜBİTAK MAM CBRN Defense Technologies Research Group verify the operation of the designed system and to collect data using it. In the testing process, the responses of the sensors to NH₃, NO₂, AsH₃, CO, CO₂, SO₂ gases were evaluated.

Sensor outcomes were described based on the calibration curves that were plotted using the data extracted from the sensor responses. In addition, the humidity characteristics of the sensors were analyzed. Responses of the sensors to gases at different time and humidity rates were measured. The responses were determined and characterized under 50% and 85% relative humidity conditions.

Principle component analyzes were performed by using the varying responses of the developed sensor test cell to these gases. After PCA, it was concluded that toxic chemical gases were completely separated from each other in 50% and 85% humid environments.

Keywords; toxic industrial chemicals, chemical sensors, mikrocontroller, data processing, principal components analysis (PCA)

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, yüksek teknoloji kimyasal gaz sensörlerinin kullanımıyla toksik endüstriyel kimyasal gazların konsantrasyon ölçümü ve analizi konusunu ele almaktadır. Bu tezin amacı, sağlık, güvenlik ve çevresel anlamda tehlikelere ve önlem alma eylemlerine karşılık tasarlanan yeni teknolojik sensörlerin etkinliğini ve doğruluğunu değerlendirmektir.

Kimyasal gaz sensörlerinin çalışma prensiplerini ve özelliklerini incelerken, özellikle toksik gazların tespitindeki başarılarını vurgulamaktadır. Sensörlerin hassasiyeti, seçiciliği ve tepki süresi gibi önemli özelliklerinin yanı sıra, sık kullanılan veri analizi tekniklerinden biri olan temel bileşenler analizi detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Gaz sensör teknolojisinin gelişimine ve endüstriyel güvenlik uygulamalarında kullanımının artmasına katkıda bulunmayı hedeflemektedir.

Çalışma kapsamında, farklı endüstriyel kimyasal gazlar üzerinde kapsamlı deneyler gerçekleştirilmiş, sensörlerin doğruluğu ve güvenilirliği test edilmiştir. Elde edilen verilere göre değerlendirilen bazı sensörlerin gaz konsantrasyonlarını hassas bir şekilde ölçebileceği ve sensörlerin güvenilir sonuçlar sağladığı gösterilmektedir.

Temmuz, 2023

Sevde Nur Ulu

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	5
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
TABLO LİSTESİ	xiii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR.....	xiv
GİRİŞ	1
BİRİNCİ BÖLÜM.....	3
1. TOKSİK ENDÜSTRİYEL KİMYASALLAR.....	3
1.1. TOKSİK KİMYASALLARA GENEL BİR BAKIŞ.....	3
1.2. TOKSİK ENDÜSTRİYEL KİMYASALLARIN TEHLİKE LİMİTLERİ.....	5
1.3. TOKSİK ENDÜSTRİYEL KİMYASALLARA MARUZİYET	9
1.4. TOKSİK DOZ TANIMLARI.....	11
1.5. ÖLÇÜMÜ YAPILACAK TOKSİK ENDÜSTRİYEL KİMYASAL GAZLAR	12
1.5.1. Kükürtdioksit (SO ₂).....	14
1.5.2. Amonyak (NH ₃).....	14
1.5.3. Arsin (AsH ₃)	15
1.5.4. Karbonmonoksit (CO).....	15
1.5.5. Karbondioksit (CO ₂).....	15
1.5.6. Azotdioksit (NO ₂):.....	15
1.6. KİMYASAL SENSÖRLER	17
1.6.1. Elektrokimyasal Sensörler	18
1.6.2. Elektrokimyasal Sensörler Çalışma Prensibi.....	19
1.6.3. Metal Oksit Rezistif Sensörler	22

İKİNCİ BÖLÜM	23
2. MATERYAL ve YÖNTEM	23
2.1. KULLANILAN SENSÖRLER	23
2.2. SENSÖR ÖLÇÜM PROSEDÜRÜ	29
2.3. MİKRODENETLEYİCİLER	33
2.4. TEMEL BİLEŞENLER ANALİZİ (PCA)	38
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM	41
3. SİSTEM TASARIMI	41
3.1. SENSÖR BİRİMİ	41
3.2. KONTROL BİRİMİ	43
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM	46
4. ÖLÇÜM ve ANALİZ	46
4.1. ENS160 SENSÖR ÖLÇÜMLERİ	46
4.2. CCS811 SENSÖR ÖLÇÜMLERİ	51
4.3. MICS-VZ-89TE SENSÖR ÖLÇÜMLERİ	54
4.4. MICS6814 SENSÖR ÖLÇÜMLERİ	58
4.5. SENSÖR PERFORMANSLARI	64
4.6. PCA SONUÇLARI	66
SONUÇ	69
KAYNAKÇA	71
EK-A: SENSÖR ÖLÇÜM VERİLERİ	74

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. 1: Kimyasal Sensör Bileşenlerinin Gösterimi	18
Şekil 1. 2: Bir elektrokimyasal sensörün gaz algılamasının gösterimi (Url-6)	19
Şekil 1. 3: Elektrokimyasal Sensör Dönüştürücü Birimi.....	20
Şekil 1. 4: Elektrokimyasal Sensörlerde Kullanılan Gaz Algılama Birimi Blok Diyagramı, (Note, 2010).....	21
Şekil 2. 1: BME680 Sensör Modülü (Url-8).....	24
Şekil 2. 2: Air Quality 3 Click Sensör Modülü	26
Şekil 2. 3: Fermion: Multifunction Environmental Sensör Modülü ENS160+BME280, (Url-11).....	27
Şekil 2. 4: MiCS 6814 Sensör Modülü (Url-12)	28
Şekil 2. 5: MiCS-VZ-89TE Sensör Modülü (Url-13).....	29
Şekil 2. 6: Sensör Dizisi Test Sistemi ve Analiz Şeması Örneği, (Muhammad Ali Akbar, 2016)	30
Şekil 2. 7: Gaz Karışım ve Sensör Test Sistemi	30
Şekil 2. 8: Sensör Ölçüm Hücresi ve Kartı (ELPAŞ Elektromekanik A.Ş.).....	31
Şekil 2. 9: Bir Mikro denetleyicinin Yapısında Bulunan Birimler.....	33
Şekil 2. 10: Arduino UNO (Url-16).....	34
Şekil 3. 1: PCB Üzerine Yerleştirilen Sensör Modülleri.....	41
Şekil 3. 2: Arduino ve Sensörlerin Şematik Bağlantısı	42
Şekil 4. 1: ENS160 Sensörünün %50 Nemli Ortamda CO Gazına Verdiği Tepki.....	47
Şekil 4. 2: ENS160 Sensörünün %85 Nemli Ortamda CO Gazına Verdiği Tepki....	47
Şekil 4. 3: ENS160 Sensörün Farklı Nem Ortamlarında CO Gazı Tepkilerinin Karşılaştırması	48
Şekil 4. 4: ENS160 Sensörünün %50 Nemli Ortamda AsH ₃ Gazına Verdiği Tepki. 49	
Şekil 4. 5: ENS160 Sensörün Aynı Nem Ortamlarında Farklı Zamanlarda AsH ₃ Gazı Tepkilerinin Karşılaştırması	49
Şekil 4. 6: ENS160 Sensörünün %50 Nemli Ortamda NH ₃ Gazına Verdiği Tepki . 50	
Şekil 4. 7: CCS811 Sensörünün %50 Nemli Ortamda CO Gazına Verdiği Tepki....	51
Şekil 4. 8: CCS811 Sensörünün %85 Nemli Ortamda CO Gazına Verdiği Tepki....	51
Şekil 4. 9: CCS811 Sensörün Farklı Nem Ortamlarında CO Gaz Tepkilerinin Karşılaştırması	52
Şekil 4. 10: CCS811 Sensörünün %50 Nemli Ortamda AsH ₃ Gazına Verdiği Tepki 52	

Şekil 4. 11: CCS811 Sensörünün %50 Nem Ortamında CO ₂ Gazına Karşı Tepkisi	53
Şekil 4. 12: CCS811 Sensörünün CO ₂ Gazı Konsantrasyon Eğrileri.....	53
Şekil 4. 13: MICS-VZ-89TE Sensörünün %50 Nemli Ortamda CO Gazına Verdiği Tepki	54
Şekil 4. 14: MICS-VZ-89TE Sensörünün %85 Nemli Ortamda CO Gazına Verdiği Tepki	55
Şekil 4. 15: MICS-VZ-89TE(CO ₂) sensörünün farklı nem ortamlarında CO tepkilerinin karşılaştırılması	55
Şekil 4. 16: MICS-VZ-89TE(TVOC) sensörünün farklı nem ortamlarında CO tepkilerinin karşılaştırılması	56
Şekil 4. 17: MICS-VZ-89TE Sensörünün %50 Nemli Ortamda AsH ₃ Gazına Verdiği Tepki	56
Şekil 4. 18: MICS-VZ-89TE (TVOC) Sensörünün Farklı Nem Koşulları Altında AsH ₃ Gazı Tepkileri.....	57
Şekil 4. 19: MICS-VZ-89TE sensörünün Farklı Nem Ortamlarında AsH ₃ Tepkilerinin Karşılaştırılması	57
Şekil 4. 20: MiCS6814 Sensörünün %85 Nemli Ortamda NH ₃ Gazına Karşı Tepkisi	58
Şekil 4. 21: MICS6814 Sensörünün %85 Nemli Ortamda NH ₃ Gazı Konsantrasyon Eğrileri	59
Şekil 4. 22: MiCS6814 Sensörünün %85 Nemli Ortamda AsH ₃ Gazına Karşı Tepkisi	59
Şekil 4. 23: MICS6814 Sensörünün %85 Nemli Ortamda AsH ₃ Gazı Konsantrasyon Eğrileri	60
Şekil 4. 24: MICS6814(CO) Sensörünün Farklı Nem Koşulları Altında Farklı Zamanlarda AsH ₃ Gazı Tepkileri	60
Şekil 4. 25: MICS6814 Sensörünün %85 Nemli Ortamda CO Gazı Konsantrasyon Eğrileri	61
Şekil 4. 26: MiCS6814 Sensörü %85 Nem Altında NO ₂ Gazına Karşı Tepkisi	61
Şekil 4. 27: MiCS6814 Sensörünün %50 Nem Ortamında NO ₂ Gazına Karşı Tepkisi	62
Şekil 4. 28: MICS6814 Sensörünün %50 Nemli Ortamda NO ₂ Gazı Konsantrasyon Eğrileri	62
Şekil 4. 29: NO ₂ Gazına Karşı Sensör Tepkileri	64
Şekil 4. 30: NH ₃ Gazına Karşı Sensör Tepkileri	64
Şekil 4. 31: AsH ₃ Gazına Karşı Sensör Tepkileri.....	65
Şekil 4. 32: CO Gazına Karşı Sensör Tepkileri.....	65
Şekil 4. 33: a) MiCS6814 Sensörünün NO ₂ Gazına Karşı Tepkisi, b) MiCS6814 Sensörünün NH ₃ Gazına Karşı Tepkisi, c) MiCS6814 Sensörünün AsH ₃ Gazına Karşı Tepkisi, d) MiCS6814 Sensörünün CO Gazına Karşı Tepkisi	66
Şekil 4. 34 %50 Nemli Ortamda Yapılan Ölçümün PCA Sonuçları	67

Şekil 4. 35: %85 Nemli Ortamda Yapılan Ölçümün PCA Sonuçları 67

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. 1: Tehlike İndeksinin Hesaplanmasında Dikkate Alınan 4 Faktör	7
Tablo 1. 2: Toksik Endüstriyel Kimyasalların Yüksek, Orta ve Düşük Tehlike İndeksine Göre Sınıflandırılması	8
Tablo 1. 3: Ölçümü yapılacak olan gazların kimyasal yapısı ve kullanım alanları (Url-4)	13
Tablo 1. 4: Toksik Kimyasalların İzin Verilen Maruz Kalma Sınırları, (National Institute for Occupational Safety and Health, 2007)	16
Tablo 2. 1: Kullanılan Sensörlerin Performans Verileri.....	23
Tablo 2. 2: Ölçümü Yapılan Gazların Test Konsantrasyonları.....	32
Tablo 2. 3: Arduino UNO Pin Özellikleri	34
Tablo 3. 1: Projede Kullanılan Kodlama Komutları ve Fonksiyonları.....	43
Tablo 4. 1: Sensör Gaz Konsantrasyonu Ölçümlerinde Doğrusal Tepki Veren Sensörler.....	63
Tablo 4. 2: PCA Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	68

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

ADC	Analog Digital Converter
AsH ₃	Arsin
CPU	Central Process Unit
CO	Karbonmonoksit
CO ₂	Karbondioksit
dk	Dakika
GBF	Güvenlik Bilgi Formu
HI	Hazard Index
I ² C	Inter Integrated Circuit
In ₂ O ₃	Indiumoksit
ITF	International Task Force
IDLH	Immediately Dangerous To Life or Health
LD ₅₀	Lethal Dose
LC ₅₀	Lethal Concentration
MSDS	Material Safety Data Sheet
NH ₃	Amonyak
NO ₂	Azotdioksit
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
OSHA	Occupational Safety And Health Administration
PCA	Principle Component Analysis
PEL	Permitted Exposure Limit
ppm	parts per million
RAM	Random Access Memory
ROM	Read Only Memory
R	Direnç
SnO ₂	Kalaydioksit

SO ₂	Kükürtdioksit
SDA	Serial data
SCL	Serial clock
SPI	Serial Peripheral Interface
STEL	Short Term Exposure Level -Kısa Süreli Maruziyet Sınır
TICs	Toxic Industrial Chemicals
TLV	Threshold Limit Value -Ortalama Eşik değer
TVOC	Total Volatile Organic Compounds
TWA	Time Weighted Average -Zaman Ağırlıklı Ortalama
V	Volt
ZEM	Zehirli Endüstriyel Maddeler
TIC	Toxic Industrial Chemical

GİRİŞ

Günümüzde zararlı gazların konsantrasyonunu tespit etmenin en güvenilir yolu gaz kromatografi teknikleri ile ölçülerek yapılan laboratuvar analizleri olarak bilinmektedir. Bu yöntemlerle yapılan ölçümlerde örnek almak ve sonuçlara ulaşmak arasında bir gecikme olmaktadır. Anlık olarak ölçüm yapabilen gaz sensörleri bu standartları karşılayarak hızlı sonuçlara ulaşmamızı sağlamaktadır. Seçici, hassas ve güvenilir gaz sensörleri anında ve hızlı ölçüm tekniğine uygun, örnek toplama ve hazırlamayı gerektirmeden, minimum enerji harcamaları ve ucuz olmaları gibi nedenlerden dolayı bir çok alanda kullanımı tercih edilmektedir.

Toksik endüstriyel kimyasallara maruziyet önemli bir sağlık sorunu haline gelebilmektedir. Bu nedenle, endüstriyel alanlarda kullanılan kimyasalların etkisini izlemek için doğru ve güvenilir bir ölçüm yöntemi geliştirilebilir. Bu amaçla farklı sensörler kullanarak gaz ölçümleri yapılabilmektedir. Sensörlerle yapılan ölçümler, çalışanların maruziyet seviyelerini izlemek ve önleme tedbirleri almak için kullanılabilir. Bu yöntemlerin doğru bir şekilde kullanılması, endüstriyel alanlarda çalışanların sağlığını korumak için büyük önem taşımaktadır. Bu tez çalışması kapsamında toksik endüstriyel kimyasallara maruziyeti azaltmak ve çalışanların sağlığını korumak için sensör teknolojileri kullanarak bir ölçüm cihazı geliştirmek amaçlanmıştır.

Elektrokimyasal gaz sensörleri genellikle küçük boyutlu ve taşınabilir cihazlardır. Elektrotlara yerleştirilmiş özel bir polimer film, gazların kimyasal özellikleriyle etkileşime girerek bir elektrokimyasal tepki üretir. Bu tepki, ölçülen gazın konsantrasyonuna bağlı olarak değişen bir elektrik sinyali üretir. Elektrik sinyali daha sonra bir mikrodenetleyici tarafından işlenir ve sonuçlar izlenebilir. Elektrokimyasal gaz sensörleri, endüstriyel alanlarda gaz kaçaklarının tespiti ve havadaki toksik gazların ölçümü gibi birçok uygulama alanında kullanılır.

Elektrokimyasal gaz sensörleri, genellikle bir mikrodenetleyiciye veya bir veri toplama birimine bağlanarak veri çıktıları işlenir ve izlenir. Sensörler analog veya dijital çıkış sinyalleri üretir. Analog sinyalleri mikrodenetleyici veya veri toplama birimi için uygun hale getirmek için bir analog-dijital dönüştürücüye (ADC) ihtiyaç duyulabilir. Dijital sinyal üreten sensörler, mikrodenetleyiciler tarafından okunabilir ve işlenebilir. Bu tür sensörler, genellikle bir mikrodenetleyiciye veya başka bir dijital işlem birimine doğrudan bağlanarak, sinyalleri dijital olarak aktarır.

Mikrodenetleyiciler, genellikle programlanabilir bir yapıya sahip olduklarından, sensör verilerini işlemek ve izlemek için kullanılacak bir dizi işlem ve algoritma sunabilirler. Verileri anlık olarak görüntülemek, zaman içindeki değişimleri takip etmek, eşik değerlerinin üzerinde veya altında kalan verileri belirlemek ve kullanıcıya uyarılar göndermek gibi bir dizi işlev mikrodenetleyiciler tarafından sağlanabilir. Günümüzde Arduino ve Raspberry Pi popüler mikrodenetleyiciler arasındadır.

BİRİNCİ BÖLÜM

1. TOKSİK ENDÜSTRİYEL KİMYASALLAR

1.1. TOKSİK KİMYASALLARA GENEL BİR BAKIŞ

Organizmaya girdiğinde hayati değişikliklere neden olan maddelere toksik denir. Toksik maddeler, vücutta farklı etkiler gösterirken çeşitli şekillerde insan sağlığını etkileyebilir ve canlıyı ölüme kadar götürebilir (Güner, 2014). Toksik maddelerin canlı organizmalar üzerinde istenmeyen, zararlı ve olumsuz etkilerini araştırıp inceleyen bilim dalına toksikoloji denir. Toksikoloji kelime manası olarak zehir bilimini ifade etmektedir ve toksik kimyasalların zararsızlık sınırlarını belirleyen bilim dalıdır (Vural, 2005).

İnsanoğlunun toksik maddelerle olan ilişkisi neredeyse insanlık tarihi kadar eskiye dayanır. Çeşitli hayvansal, bitkisel ya da mineral kaynaklı toksikler ilk çağlardan beri saldırı veya savunma amacıyla ya da sağlık alanında veya politik konularda zarar vermek amacıyla kullanılmıştır. Toksikoloji ilgi alanı 16.yy'a kadar ilaç, besin, zehir olarak devam etmekteydi. 19.yy'da kimya, tıp ve fizyoloji alanında çalışmalar yapan Orfila (1787-1853) tarafından modern toksikolojinin temelleri atılmıştır (Vural, 2005).

20. yüzyılda toksikoloji hızla gelişme göstermiştir. Bu yüzyıla kadar zehir, besin, ilaç halinde varlığından bahsettiğimiz toksik maddeler 20. yüzyılda kimyasal maddeler olarak kullanılmaya devam etmiştir. I. Dünya Savaşı sonrası bilimsel çalışmalarla toksikolojinin kapsamı genişletilmiştir. 1920'li yıllardan sonra organik halojenli bileşiklerin insektisit (böcek ilacı) olarak kullanımları, 1930'lı yıllarda farmasötik endüstrideki büyük bir atılım görülmektedir. II. Dünya Savaşı yıllarında organik fosfat esterler savaş gazı olarak kullanılması ve insektisit olarak üretimleri toksikolojik araştırmaları hızlandırmıştır. Kısa ve uzun süreli zehirli maddenin sinir sisteminin anormal çalışmasına sebep olması, selektif toksisite etkileri gibi toksik etki mekanizmalarının araştırmaları başlamıştır. Böylece, 1940'lı yılların başından

itibaren toksik etkilerin moleküler düzeyde araştırılmalarında büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Kan ve idrar incelenmeleri ile ilaç ve kimyasal maddelerin tespiti bu maddelerin biyolojik etkilerinin araştırılmasına imkan sağlamıştır (Vural, 2005).

Sanayi Devrimi'nin başlangıcından bu yana, endüstriyel faaliyetlerin artmasıyla birlikte, toksik endüstriyel gazların yayılması da artmıştır. Endüstriyel gazların tarihçesi, çevre kirliliği ve insan sağlığı açısından önemli bir konudur (Nriago, 2011). Birinci Dünya Savaşı sırasında, kimyasal silahlar olarak kullanılmak üzere çok sayıda toksik gaz geliştirilmiştir. Bunlar, özellikle klor ve fosgen gazı gibi solunum yoluyla öldürücü etkiye sahip olan gazlardır. İkinci Dünya Savaşı'nda ise, Nazi Almanyası'nın gaz odalarında milyonlarca insanı öldürmek için zyklon B gazı kullandığı bilinmektedir. Sanayi Devrimi'nden bu yana, endüstriyel faaliyetlerin artması, birçok endüstriyel gazın üretiminde artışa neden olmuştur. Bu gazlar, kimyasal fabrikalar, petrokimya tesisleri, nükleer santraller, çelik fabrikaları, otomotiv endüstrisi, gemi inşaatı gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. Bu endüstriyel gazlar arasında, karbon monoksit, kükürt dioksit, azot oksitleri, hidrojen klorür, hidrojen siyanür ve amonyak gibi çevre kirliliğine neden olan gazlar yer almaktadır (Harrison, 2019).

Tarih boyunca, toksik endüstriyel gazlar insan sağlığına önemli zararlar vermiştir. Bu gazların yayılması, çevre kirliliği, su kaynaklarına zarar verme, doğal yaşamı tehdit etme ve insan sağlığını etkileme gibi birçok olumsuz etkiye neden olmaktadır. Bu nedenle, endüstriyel gazların kontrol altına alınması ve azaltılması için farklı yasal düzenlemeler getirilmiştir (Nriago, 2011).

Endüstriyel toksik gazlarla ilgili yasal düzenlemeler ülkeden ülkeye farklılık göstermektedir. Ancak, çoğu ülkede endüstriyel işletmelerin atık gaz emisyonları, özellikle toksik gazlar açısından, düzenli olarak izlenmekte ve çevre koruma yönetmeliklerine uygun olmaları gerekmektedir.

Avrupa Birliği'nde, endüstriyel atık gaz emisyonları, çevre koruma için çeşitli yasal düzenlemelere tabidir. Örneğin, 2010 yılında kabul edilen Endüstriyel Emisyonlar Direktifi, atık gaz emisyonları ile ilgili düzenlemeleri belirler. Endüstriyel Emisyonlar Direktifi, özellikle toksik gaz emisyonları için sıkı

gereksinimler içermektedir. Benzer şekilde, ABD'de de çevre koruma için çeşitli federal düzenlemeler bulunmaktadır. Örneğin, Temiz Hava Kanunu, çevre kirliliği ve insan sağlığı üzerindeki etkileri azaltmak için endüstriyel gaz emisyonlarına yönelik çeşitli düzenlemeler içermektedir (Url-1). ABD'de, OSHA (İş Sağlığı ve Güvenliği İdaresi) yasası, işyerlerinde toksik kimyasalların kullanımını düzenler. Bu yasa, işyerlerinin kimyasal kullanımıyla ilgili sağlık ve güvenlik standartlarını belirler ve çalışanların maruz kalabilecekleri riskleri azaltmaya yöneliktir (Url-2).

Bu yasal düzenlemeler, endüstriyel işletmelerin atık gaz emisyonlarını düzenli olarak izlemelerini, kaydetmelerini ve rapor etmelerini gerektirir. İşletmelerin belirli emisyon sınır değerlerine uymaları da gerekmektedir. Bu yasal düzenlemeler, toksik gazların çevreye ve insan sağlığına olan etkilerini en aza indirmeyi amaçlamaktadır.

1.2. TOKSİK ENDÜSTRİYEL KİMYASALLARIN TEHLİKE LİMİTLERİ

Kimyasal maddeler hayatımızda hemen her alanda karşımıza çıkmaktadır. Kimyasal maddeler hayatımızı kolaylaştırır da bu maddelerin uygunsuz kullanımları ve kontrolsüz yayılımları insanlar ve çevre için oldukça tehlikeli sonuçlara sebep olabilmektedir. Yaşadığımız, çalıştığımız veya zaman geçirdiğimiz yerlerde bu tür bir kimyasal madde kontrolsüz bir şekilde kullanılır veya çevreye yayılır ise bu ortamdaki insanları ve çevredekileri risk altında bırakır. Toksik endüstriyel kimyasallar ölüme, ciddi yaralanmalara, uzun vadeli sağlık sorunlarına neden olabilir (Url5).

Ülkemizde ve dünyada zehirli kimyasallar kullanan veya üreten bir dizi tesis ve rafineri bulunmaktadır. Kazara serbest bırakma veya patlama, çevredeki sakinleri çeşitli toksik kimyasallara maruz bırakabilir (Url1, 2022). Ayrıca toksik endüstriyel kimyasalları bir terör saldırısı ihtimali konusunda dünyada endişeler bulunmaktadır. Bu kimyasal maddeler oldukça toksik olabilir. Toksik Endüstriyel Kimyasallar, dünya çapında TICs (Toxic Industrial Chemicals) olarak adlandırılmaktadır. TICs, dünya çapında üretilen, depolanan, taşınan ve kullanılan

endüstriyel kimyasallardır. Zehirli endüstriyel maddeler gaz, sıvı veya katı halde olabilir. (Fatah, Jr., Ewing, Lattin, & Helinski, 2000)

Bu maddeler hayatımızda kimyasal tehlikelere neden olabilir. Örneğin kanserojenler, üremeye ilgili tehlikeler veya akciğerleri, kanı etkileyen maddeler insan hayatı için büyük tehlikeler oluşturur. Ayrıca fiziksel olarak da tehlikelere neden olmaktadır. Örneğin yanıcı, patlayıcı veya reaktiflere yol açarak bizleri tehlikeye atabilir. (Fatah, Jr., Ewing, Lattin, & Helinski, 2000)

TICs alanındaki önemli kaynaklardan biri Uluslararası Görev Gücü 25 (ITF-25) belgesidir. Bu belge, Amerika Birleşik Devletleri, Birleşik Krallık ve Kanada'nın kimyasal ve biyolojik savunma konulu toplantısında yayınlanan bir rapordur. ITF-25'in amacı, askeri operasyonlar sırasında TIC'in serbest bırakılmasından kaynaklanan bir tehlike olup olmadığını belirlemektir. Mart 1996'da yayınlanan nihai rapor, yasal ticaret maddeleri olan, yaygın olarak üretilen dünya çapında mevcut olan TIC'nin askeri bir durumda endüstriyel kimyasalların salınmasının bir tehlike olduğu sonucuna varmıştır. (Steumpfle, Armour, Howells, & Boulet, 1996)

ITF-25, toksik endüstriyel kimyasalları tek bir tesiste yılda 30 tonu aşan miktarlarda üretilen ve herhangi bir memeli türünde soluma yoluyla LC₅₀ değeri 100.000 mg.dak/m³'ün altında olan kimyasallar olarak tanımlamıştır. TIC'ler bu şekilde tanımlanarak çok sınırlı hacimlerde üretilen oldukça toksik diğer kimyasallardan ayrılmış olur. Ancak, hala binlerce potansiyel TIC vardır.

Toksisite kriterini karşılayan bin yüz altmış dört kimyasal belirlenmiştir. Bu sayı, yalnızca gaz veya sıvı veya katı olan, 20 °C'de kayda değer bir buhar basıncına sahip olan veya ABD Ulaştırma Bakanlığı Acil Müdahale Kılavuzunda listelenen kimyasallar dikkate alınarak düşürülmüştür. Üretilebilirlik kriteri dikkate alınarak sayı daha da azaltılmış ve 98'e düşürülmüştür.

ITF-25, IDLH değerini tehlike indeksi için en uygun toksisite değeri olarak değerlendirmiştir. Bu değer, bir kimyasalın İnsan Yaşamı ve Sağlığı için Aniden Tehlikeli (Immediately Dangerous to the Life and Health) olarak kabul edildiği konsantrasyonu gösterir. Bu değerlendirmeye göre Tehlike İndeksi (HI), dört

faktörün sonucudur ve TIC' lerin tehlikesine göre sıralamak için kullanılır. ITF-25, Tehlike İndeksini (HI), Tablo 1.1'de verilen sıralama şemasına göre her faktöre 1 ile 5 arasında bir sayı atanan dört faktörün ürünü olarak tanımlanmıştır.

$$HI=f\{(producers:üreticiler) \times (toxicity:toksosite) \times (state:durum) \times (distribution :dağılım)\}$$

Tablo 1. 1: Tehlike İndeksinin Hesaplanmasında Dikkate Alınan 4 Faktör

Continents ≥ 5	5	NP ≥ 100	5	IDLH < 1	5	Gas	5
Continents = 4	4	50 \leq NP \leq 99	4	1 \leq IDLH \leq 10	4	Liquid: VP \leq 400	4
Continents = 3	3	25 \leq NP \leq 49	3	11 \leq IDLH \leq 100	3	Liquid: 100 \leq VP < 400	3
Continents = 2	2	5 \leq NP \leq 24	2	101 \leq IDLH \leq 500	2	Liquid: 10 \leq VP < 100	2
Continents = 1	1	NP < 5	1	IDLH > 500	1	Liquid : vp < 10	1

** number of continents on which production occurs

Bu 98 toksik endüstriyel kimyasalı askeri bir durumdaki önemine göre sıralamak için bir Tehlike İndeksi geliştirilmiştir. 21 kimyasal "yüksek", 41 "orta" ve 36 "düşük" olarak derecelendirilmiştir. Bu derecelendirmeye göre sıralanmış kimyasallar Tablo 1.2'de gösterilmiştir.

Kimya endüstrisi ve ulusal düzenleyici kurumlar, endüstriyel kimyasalların güvenli bir şekilde taşınması ile ilgili veri tabanları ve yönetmelikler geliştirmiştir. ITF-25, bu topluluklarla iletişim kurarak yardım ve ek bilgi için mevcut kaynakların bir listesini geliştirmiştir. Endüstriyel Kimyasallardan Kaynaklanan Tehlikeyi Anlama Kılavuzu hazırlanmıştır ve bu tehlikelerle ilgili bilgiler vermektedir (Steumpfle, Armour, Howells, & Boulet, 1996).

Bir malzemenin kimyasal bileşimi, fiziksel ve toksikolojik özellikleri, potansiyel tehlike sembolleri, kullanım talimatları, koruyucu önlemler ve müdahale yöntemleri gibi bilgileri içeren dokümanlar Malzeme Güvenlik Formu (MSDS) olarak adlandırılır. MSDS, özellikle kimyasalların, yanıcı maddelerin, patlayıcı maddelerin, toksik maddelerin ve diğer tehlikeli maddelerin kullanıldığı endüstriyel ve ticari ortamlarda kullanılır. Bu belge, işçilerin ve işverenlerin malzemelerin

güvenli kullanımı, depolanması, nakliyesi ve atılması konularında bilinçli kararlar almalarına yardımcı olur (Rappaport, 1993).

Tablo 1. 2: Toksik Endüstriyel Kimyasalların Yüksek, Orta ve Düşük Tehlike İndeksine Göre Sınıflandırılması

HIGH	MEDIUM	LOW
ammonia	acetone cyanohydrin	allyl isothiocyanate
arsine	acrolein	arsenic trichloride
boron trichloride	acrylonitrile	bromine
boron trifluoride	allyl alcohol	bromine chloride
carbon disulfide	allyl amine	bromine pentafluoride
chlorine	allyl chlorocarbonate	bromine trifluoride
diborane	boron tribromide	carbonyl fluoride
ethylene oxide	carbon monoxide	chlorine pentafluoride
fluorine	carbonyl sulfide	chlorine trifluoride
formaldehyde	chloroacetone	chloroacetaldehyde
hydrogen bromide	chloroacetonitrile	chloroacetyl chloride
hydrogen chloride	chlorosulfonic acid	cyanogen
hydrogen cyanide	crotonaldehyde	diphenylmethane-4'-diisocyanate
hydrogen fluoride	diketene	ethyl chloroformate
hydrogen sulfide	1,2-dimethyl hydrazine	ethyl chlorothioformate
nitric acid, fuming	dimethyl sulfate	ethylene imine
phosgene	ethylene dibromide	ethyl phosphonothioicdichloride
phosphorus trichloride	hydrogen selenide	ethyl phosphonous dichloride
sulfur dioxide	iron pentacarbonyl	hexachlorocyclopentadiene
sulfuric acid	methanesulfonyl chloride	hydrogen iodide
tungsten hexafluoride	methyl bromide	isobutyl chloroformate
	methyl chloroformate	isopropyl chloroformate
	methyl chlorosilane	isopropyl isocyanate
	methyl hydrazine	n-butyl chloroformate
	methyl isocyanate	nitric oxide
	methyl mercaptan	n-propyl chloroformate
	n-butyl isocyanate	parathion
	nitrogen dioxide	perchloromethyl mercaptan
	phosphine	sec-butyl chloroformate
	phosphorus oxychloride	sulfuryl fluoride
	phosphorus pentafluoride	tert-butyl isocyanate
	selenium hexafluoride	tetraethyl lead
	silicon tetrafluoride	tetraethyl pyrophosphate
	stibine	tetramethyl lead
	sulfur trioxide	toluene 2,4-diisocyanate
	sulfuryl chloride	toluene 2,6-diisocyanate
	tellurium hexafluoride	
	tert-octyl mercaptan	
	titanium tetrachloride	
	trichloroacetyl chloride	
	trifluoroacetyl chloride	

MSDS, ilk olarak 1977 yılında ABD'de çıkarılan Tehlikeli Maddeler Yasası'nın bir parçası olarak oluşturulmuştur. Daha sonra, 1983 yılında Avrupa

Birliği tarafından kabul edilen REACH yönetmeliği kapsamında zorunlu hale getirilmiştir. Bugün, birçok ÷lke MSDS veya benzeri bir belgeyi zorunlu tutmaktadır (Rappaport, 1993). Daha önce "Malzeme Güvenlik Veri Formu" olarak adlandırılan bu belge, şu anda "Kimyasal Güvenlik Bilgi Formu" olarak bilinmektedir.

Güvenlik bilgi formlarında toksik gazların tehlike limitlerine yer verilmektedir. Bu limitler, her gaz için belirli bir değere sahip olan toksikolojik referans değerleri veya sınır değerleri olarak bilinir. Bu sınır değerleri, iş sağlığı ve güvenliği kuruluşları tarafından belirlenir ve çalışanların maruz kalabileceği gaz konsantrasyonlarının güvenli sınırlarını belirler. Bu sınır değerleri, işyerlerinde alınacak önlemleri belirlemek ve çalışanları korumak için önemlidir (OSHA, 1994).

1.3. TOKSİK ENDÜSTRİYEL KİMYASALLARA MARUZİYET

Toksik endüstriyel kimyasallara maruziyet, çalışma ortamında bulunan ve insan sağlığına zararlı olabilen kimyasal maddelere maruz kalınması durumunu ifade etmektedir. Endüstriyel işletmelerde kullanılan birçok kimyasal madde toksik etkiye sahip olabilir ve çalışanların maruziyetleri sonucu sağlık problemlerine neden olabilir. Bu sağlık problemleri arasında solunum yolu irritasyonu, astım, alerjik reaksiyonlar, zehirlenme, kanser, hormonal bozukluklar, üreme problemleri ve nörolojik bozukluklar yer alabilir. Toksik endüstriyel kimyasallara maruziyet, işyeri sağlığı ve güvenliği önlemlerinin yetersiz olduğu veya ihmal edildiği işletmelerde sıklıkla görülebilir. Bu nedenle, işyerlerinde kimyasal maddelerin doğru kullanımı ve işyeri sağlık ve güvenliği önlemlerinin alınması büyük önem taşımaktadır (Joseph LaDou, 2007).

Birçok işyerinde toksik endüstriyel kimyasallara maruziyet, ortamda bulunan insanlar için bir sağlık sorunu oluşturabilir. Bu kimyasallar, işyerlerinde kullanılan kimyasal maddeler, yan ürünler, yanıcı maddeler, solunabilir partiküller ve diğer kimyasal bileşenler olabilir. Toksik endüstriyel kimyasallara maruz kalmak, solunum yolu, deri, gözler ve sindirim yolu dahil olmak üzere vücudun birçok bölgesinde sağlık sorunlarına neden olabilir. Bu sağlık sorunları arasında baş ağrısı, yorgunluk, göz, burun ve boğazda tahriş, astım, kanser, nörolojik

bozukluklar ve üreme sorunları bulunabilir. Özellikle solunabilir kimyasal maddeler, solunum yolu hastalıklarına neden olabilir ve zaman içinde akciğer fonksiyonlarının bozulmasına yol açabilir. Deri ile temas halindeki kimyasal maddeler, deride tahriş, kaşıntı ve kızarıklık gibi semptomlara neden olabilir. Kimyasal maddelerin sindirilmesi de mide ağrısı, bulantı, kusma ve ishal gibi sindirim problemlerine yol açabilir. Ayrıca, bazı kimyasalların kanserojen olduğu ve uzun süreli maruziyetin kanser riskini artırabileceği bilinmektedir (IARC (International Agency for Research on Cancer), 2012).

Bu nedenle, işyerlerinde çalışanların toksik endüstriyel kimyasallara maruziyetini önlemek için uygun koruyucu ekipmanlar kullanılmalı, işyerindeki havanın düzenli olarak test edilmesi ve kimyasal maddelerin doğru şekilde saklanması ve kullanılması sağlanmalıdır. Ayrıca, işçilere bu kimyasal maddelerin sağlık etkileri ve koruyucu önlemler hakkında eğitim verilmelidir.

Toksik endüstriyel kimyasallara maruziyeti azaltmak için birçok farklı çalışma yapılmaktadır. Yapılan bazı çalışmalar şunlardır:

Alternatif kimyasalların kullanımı: Kimyasalların toksik etkilerini azaltmak için, daha az toksik alternatif kimyasalların kullanımı teşvik edilmektedir.

İşyeri güvenliği: İşyerlerinde toksik kimyasallarla çalışanların güvenliği için özel ekipmanlar ve prosedürler kullanılmalıdır. Bu, maruziyeti azaltabilir ve işyerindeki çalışanların sağlığını koruyabilir.

Eğitim ve bilinçlendirme: Çalışanların toksik kimyasalların potansiyel tehlikeleri hakkında bilgi sahibi olmaları önemlidir. Eğitimler ve farkındalık artırıcı etkinlikler, çalışanların kimyasal maddelerin güvenli kullanımı konusunda daha bilinçli olmalarına yardımcı olabilir.

İşyeri havasının izlenmesi: İşyerindeki havanın toksik kimyasallar açısından izlenmesi, maruziyeti azaltmak için önemlidir. Böylece, maruziyet düzeyleri izlenebilir ve gerekli önlemler alınabilir.

Yasal düzenlemeler: Ülkeler, toksik kimyasalların kullanımı ve maruziyeti konusunda yasal düzenlemeler yapmaktadır. Bu düzenlemeler, kimyasalların güvenli kullanımını sağlayarak maruziyeti azaltabilir (Url-3).

1.4. TOKSİK DOZ TANIMLARI

Çoğu kimyasal gaz, klasik bir doz yanıt eğrisi gösterir. Toksik doz, bir kimyasal maddenin vücuda alınmasının, etkilerinin şiddet ve süresinin belirlenmesinde önemli bir faktördür. Bir canlı üzerindeki etki derecesine göre toksik dozları tanımlamak için yaygın olarak çeşitli ölçüler kullanılmaktadır. Bu ölçüler özel olarak çeşitli yasalar veya kurumlar tarafından tanımlanır (Journal of the Royal Army Medical Corps, 2002).

Toksik doz tanımları aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir:

Akut Toksik Doz: Bir kimyasal maddenin kısa bir süre içinde yüksek bir miktarının alınması sonucunda ortaya çıkan zararlı etkilerdir. Bu etkiler genellikle birkaç saat içinde veya birkaç gün içinde ortaya çıkar. Akut toksik dozlar genellikle tek bir maruziyetten kaynaklanır.

Öldürücü Doz LD50: LD50 (Lethal Dose 50) bir kimyasalın yarısının öldürücü olacağı dozudur. Bu, bir canlı popülasyonunun yarısının belirli bir dozda öleceği anlamına gelir. LD50, bir kimyasalın toksisitesinin belirlenmesinde kullanılır. Birimi mg/kg'dır.

Öldürücü Konsantrasyon LC50: LC50 (Lethal Concentration 50) bir kimyasalın belirli bir süre boyunca havada veya suda ne kadar konsantrere olabileceğinin bir ölçüsüdür. Bu konsantrasyon, bir canlı popülasyonunun yarısının belirli bir süre boyunca maruz kaldığında öleceği anlamına gelir. LC50, bir kimyasalın havada veya suda yayılımının etkilerinin belirlenmesinde kullanılır. Birimi ppm veya mg/m³ havadır.

IDLH: IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health) bir kimyasalın anında öldürücü bir etki gösterdiği veya sağlık açısından ciddi zararlar verebilecek konsantrasyonudur. IDLH değeri, bir kimyasalın işyerinde kullanımına ilişkin sağlık ve güvenlik standartlarının belirlenmesinde kullanılır. Birimi ppm veya mg/m³ havadır.

PEL: İzin Verilen Maruz Kalma Sınırı, ABD OSHA düzenlemeleri kapsamında izin verilen en yüksek konsantrasyon değeridir.

STEL: Kısa Süreli Maruz Kalma Limiti, kısa süreler için izin verilen en yüksek konsantrasyon değeridir. Genel olarak 15-30 dakika olarak hesaplanır.

TWA: Zaman Ağırlıklı Ortalama, belirli bir süre boyunca bir gazın konsantrasyonunun ortalama miktarıdır. Genellikle 8 saat olarak hesaplanır (OSHA, 1994).

1.5. ÖLÇÜMÜ YAPILACAK TOKSİK ENDÜSTRİYEL KİMYASAL GAZLAR

Bu çalışmada konsantrasyon ölçümü yapılan gazlar, günlük hayatta birçok alanda kullanılan, insan sağlığını önemli ölçüde etkileyen ve endüstriyel alanda yaygın olarak üretilen dünya çapında mevcut olan gazlardır. Ayrıca konsantrasyon ölçümü yapılan gazlar dünya çapında tehlike indeksi yüksek ve orta olarak derecelendirmiş gazlardır.

Ölçümü yapılacak gazların yakın geçmişte savaşlarda ve terör saldırılarında kullanımları gittikçe artmıştır. NO₂ gazı I. Dünya Savaşı'nda Alman birlikleri tarafından Ypres Muharebesi'nde (1915) kullanıldığı bilinmektedir. Bu savaşta Almanlar, NO₂ gazı içeren gazları sis bombaları ve top mermileri kullanarak saldırı yapmışlardır. Bu olay, yakın geçmişteki modern kimyasal savaş tarihinde büyük etkisi olan ilk zehirli gaz saldırısı olarak kabul edilmektedir.

SO₂ gazı, I. Dünya Savaşı'nda kimyasal silah olarak kullanıldığı bilinmektedir. Özellikle Alman ordusu tarafından kullanılan "sülfür gazı" olarak bilinmektedir. Gaz maskelerinin henüz etkin olmadığı dönemlerde kullanılan bu gaz, solunum sisteminde zararlı etkilere neden olmuştur. NH₃ gazı da I. Dünya Savaşı'nda zehirleyici gaz olarak kullanılan gazlardan biridir. Özellikle bu gazın 1914 yılında Verdun Muharebesi'nde yine Alman birlikleri tarafından kullanıldığı bilinmektedir. AsH₃ gazı, I. Dünya Savaşı'nda kimyasal silah olarak kullanılmıştır. Alman birlikleri tarafından kullanılan "vomiting gazı" olarak bilinmektedir. CO gazı, I. Dünya Savaşı'nda kullanılmıştır. Almanlar, CO gazını tüplerden siperlere salarak düşman askerlerinin nefes almasını engellemeye çalıştıkları bilinmektedir. Bu gaz, oksijen taşıma kapasitesini azaltarak ciddi sağlık sorunlarına sebep olur. CO₂, I. Dünya Savaşı'nda kimyasal silah olarak kullanılmamıştır. Ancak, savunma

savaşlarında karbondioksit gazının solunum zorluğuna ve ölüme neden olabileceği bilinmektedir (Neumann, 1917-1918).

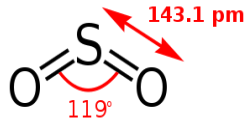
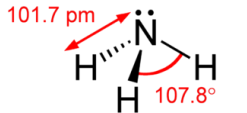
Bu toksik gazlar I. Dünya Savaşı dışında Kimyasal Savaşlar ve Terör Saldırılarında da kullanılmıştır. 1980-1988 yılları arasındaki İran-İrak savaş sırasında kimyasal silahlar kullanılmıştır. Özellikle Irak tarafından Kükürt Dioksit (SO_2) gazı yaygın olarak kullanılmıştır. 1988 yılındaki Halabja Katliamında Irak'ın Kürt nüfusa karşı gerçekleştirdiği kimyasal saldırıda, özellikle Sarin gazı (AsH_3) kullanılmıştır. 1995 yılında Tokyo Metrosunda Sarin Gazı Saldırısı gerçekleştirilmiştir. Aum Shinrikyo adlı terörist örgüt tarafından gerçekleştirilen saldırıda, Tokyo metrosuna AsH_3 gazı salınmıştır. Bu saldırı birçok insanın ölümüne ve etkilenmesine sebep olmuştur (Url-4).

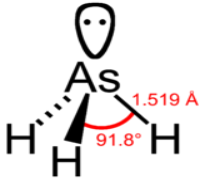

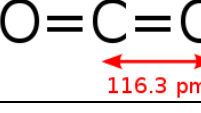
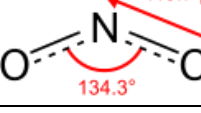
Bu gazların ölçümleri elektrokimyasal tepkime yöntemleri kullanılarak elektrokimyasal sensörlerle yapılacaktır.

Oksitleyici Gazlar: Nitrojen Dioksit (NO_2), Kükürt Dioksit (SO_2), Arsin (AsH_3)

İndirgeyici Gazlar: Amonyak (NH_3), Karbon Monoksit (CO), Karbon Dioksit (CO_2)

Tablo 1. 3: Ölçümü yapılacak olan gazların kimyasal yapısı ve kullanım alanları (Url-4)

Kimyasal Madde	Kimyasal Yapısı	Kullanım Alanları
Kükürt Dioksit (SO_2)		Enerji üretiminde, sanayide, kimya sektöründe ve petrol endüstrisinde
Amonyak (NH_3)		Gübre üretiminde ve endüstriyel temizleyicilerde

Arsin (AsH_3)		Sanayide ve elektronik, yarı iletken ve fotovoltaik endüstrilerinde
Karbonmonoksit (CO)		Gaz sobaları, araç egzozları ve endüstriyel tesislerde
Karbondioksit (CO_2)		Bitki büyütme işlemlerinde, içme suyu arıtımında
Azotdioksit (NO_2)		Enerji üretimi, kimyasal üretim ve metal işlemede

1.5.1. Kükürtdioksit (SO_2)

Keskin kokulu, renksiz, tahriş edici, yanıcı olmayan, zehirleyici bir gazdır. Hava kirliliğine ve asit yağmurlarına sebep olan bir gazdır. Kükürtdioksite maruz kalındığında gözlerde, burunda ve boğazda tahrişe neden olur. SO_2 konsantrasyonu sınır değerinin üzerine çıktığı zaman özellikle astımlı kalp ve akciğer hastalarının sağlığını olumsuz etkiler. Enerji santrallerinde, sülfirik asit üreten endüstrilerde, kâğıt üreten fabrikalarda, gıda koruma işlemi yapan firmalarda çalışanları kükürtdioksite maruz kalma riskini taşırlar. Kükürtdioksite uzun süreli maruziyet solunum hastalıklarına, akciğer fonksiyonlarında olumsuz değişikliklere ve mevcut kalp hastalıklarının ilerlemesine sebep olmaktadır (National Institute for Occupational Safety and Health, 2007).

1.5.2. Amonyak (NH_3)

Keskin ve boğucu bir kokuya sahip renksiz bir gazdır. Basınç altında kolayca sıvılaştırılır. Solunma, yutma, cilt veya göz teması ile maruz kalınabilir. Amonyak gazına maruz kalındığında burun, boğaz ve gözlerde tahriş, nefes alma güçlüğü, göğüs ağrısı akciğer ödemi, pembe köpüklü balgam cilt yanıkları gözlemlenir. Gözleri, cildi ve solunum sistemini etkiler (National Institute for Occupational Safety and Health, 2007).

1.5.3. Arsin (AsH₃)

Renksiz ve yanıcı bir gazdır. Solunma, cilt veya göz teması ile maruz kalınabilir. Arsin gazına maruz kalındığında baş ağrısı, halsizlik, bitkinlik, baş dönmesi, nefes alma zorluğu, karın, sırt ağrısı, bulantı, kusma, idrarda kan gözlemlenebilir. Kan, böbrekler ve karaciğeri etkiler (National Institute for Occupational Safety and Health, 2007).

1.5.4. Karbonmonoksit (CO)

Renksiz ve kokusuz bir gazdır. Karbonmonoksite maruz kalındığında baş ağrısı, bulantı, halsizlik, bitkinlik, baş dönmesi gözlemlenebilir. Kan zehirleyici bir gazdır. Vücuttaki sitokrom oksidaz enzimini bloke ederek kanın oksijeni kullanma ve taşıma kabiliyetini büyük ölçüde engeller. Hücreler arası oksijen iletimini engeller ve bu sebepten dolayı en çok beyin, kalp, karaciğer gibi yüksek miktarda oksijene ihtiyaç duyan organları olumsuz yönde etkiler. Felçlik, solunum yetmezliği ve kalp durmasına yol açar. (National Institute for Occupational Safety and Health, 2007) (Url-5)

1.5.5. Karbondioksit (CO₂)

Renksiz ve kokusuz bir gazdır. Karbondioksite maruz kalındığında baş ağrısı, baş dönmesi, huzursuzluk, nefes alma zorluğu, terleme, halsizlik hissedilir. Kalp hızında, kalp debisinde, kan basıncında artış gözlemlenir. Fazla maruziyet sonucunda Tip II (Hiperkapni) solunum yetmezliğine yol açar.

1.5.6. Azotdioksit (NO₂):

Atmosferde renksiz bir gaz olarak bulunmaktadır. Aynı zamanda, yüksek konsantrasyonlarda ve hava kirliliği durumlarında sarı-kahverengi bir renk alabilir. Çünkü, azot dioksit gazı atmosferde diğer gazlar ve partiküllerle etkileşime girerek daha karmaşık bileşikler oluşturma eğilimindedir.

NO₂ gazının kendine özgü bir kokusu vardır. Genellikle keskin ve tahriş edici bir kokuya sahiptir. Yüksek konsantrasyonlarda, NO₂ gazının kokusu daha belirgin hale gelebilir. NO₂ gazı, fosil yakıtların yanması, endüstriyel faaliyetler ve motorlu araçların emisyonları gibi birçok kaynaktan açığa çıkabilir. Bununla

birlikte azotdioksit gazı atmosferdeki diğer gazlarla reaksiyona girerek ozon oluşumuna sebep olur ve hava kalitesi sorunlarına yol açabilir. NO₂ gazına kısa süreli maruziyetlerde nefes darlığı, öksürük, boğazda tahriş ve hırıltı gibi solunum yolu sıkıntılarına neden olabilir. Uzun süreli maruziyetlerde ise solunum yolu hastalıklarını artırarak ciddi sıkıntılara sebep olabilir. Ayrıca NO₂ gazına uzun süreli maruziyeti, kalp hastalıkları riskini artırır. Özellikle kalp krizi, inme ve diğer kardiyovasküler sorunlarla sebep olabilir (National Institute for Occupational Safety and Health, 2007).

Tablo 1. 4: Toksik Kimyasalların İzin Verilen Maruz Kalma Sınırları, (National Institute for Occupational Safety and Health, 2007)

Kimyasal Madde	Zaman Ağırlıklı Ortalama(ppm)(TLV-TWA)	Kısa Dönem Maruziyet Sınırı (ppm)(TLV-STEEL)	Hayati Tehlike Sınırı (ppm)(IDLH)
Nitrojen Dioksit (NO ₂)	0,2	1	20
Kükürt Dioksit (SO ₃)	1	5	100
Amonyak (NH ₃)	25	35	300
Arsin (AsH ₃)	0,05	-	3
Karbon monoksit (CO)	35	200	1200
Karbon dioksit (CO ₂)	5000	30000	40000

Yapılan art arda sıralı ölçümlerin yanı sıra NO₂ gazının farklı zamanda tek halde ölçümleri yapılmıştır. NO₂ gazı diğer gazlara göre farklı tepkime özelliklerine sahip olabilir. NO₂ gazı CO, CO₂ veya AsH₃ gibi gazlarla birlikte var olduğunda, bu gazların etkileşimi sonucunda interferanslar oluşabilir. Bu interferanslar, ölçüm sonuçlarının yanlış veya yanıltıcı olmasına neden olabilir.

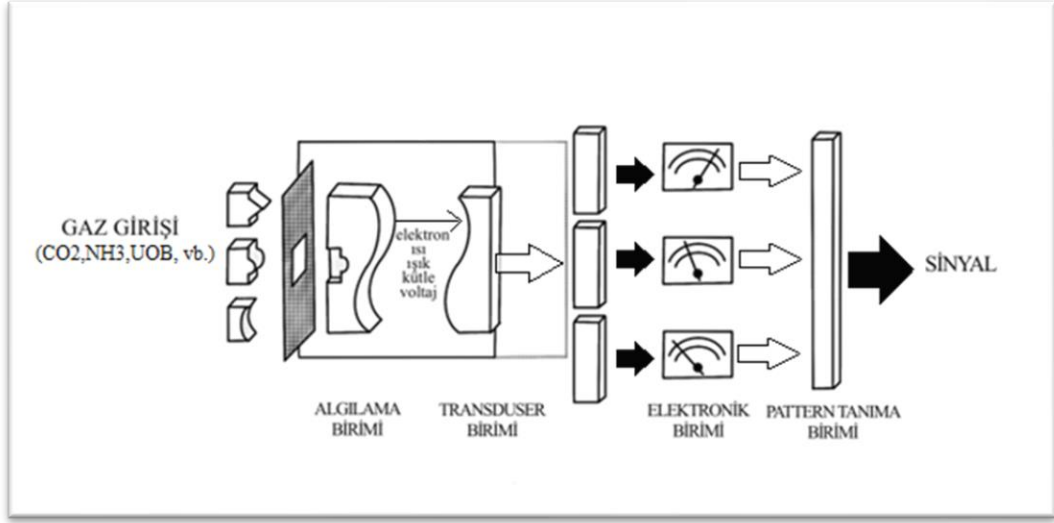
1.6. KİMYASAL SENSÖRLER

Kimyasal sensörler, bulunduğu ortam hakkında sürekli ve anlık bilgi sağlayan cihazlar olarak tanımlanmaktadır. Bir kimyasal sensör, belirli bir kimyasalın miktarıyla doğrudan ilişkili veya orantılı belirli bir tepki sağlayabilir. Tespit edilecek özelliğine göre elektriksel, optik, termal veya kütesel sensörler olarak sınıflandırılabilirler. Gaz, sıvı veya katı haldeki bir analiti algılamak ve tepki vermek üzere tasarlanmışlardır. Optik, kütle ve termal sensörlerle karşılaştırıldığında, elektrokimyasal sensörler olağanüstü saptanabilirlikleri, kolay kullanımı ve düşük maliyetleri nedeniyle özellikle daha çok tercih edilmektedir (Stradiotto, Yamanaka, & Zanoni, 2003).

Kimyasal sensörler, “ortamda bulunan gazların türünü veya miktarını kütle, frekans, iletkenlik gibi fiziksel değişkenlere bağlı olarak; ölçülebilir büyüklükte elektronik bilgiye dönüştüren aygıtlar” olarak tanımlanabilir. Bir kimyasal sensör algılama birimi, transdüser birimi ve elektronik birimden oluşur.

Algılama birimi, belirli bir ortamda bulunan ve algılanmak istenen hedef molekül ile etkileşim sonucu fiziksel özelliklerinde değişimler meydana gelen algılayıcı bir malzemeden oluşur. İdeal bir kimyasal sensörün algılama birimi “termal ve kimyasal olarak kararlı ve hedef molekül ile etkileşmesi seçici, hızlı ve geri dönüşebilir” olmalıdır. Etkileşim sonucunda fiziksel özelliklerindeki değişimin kolayca ölçülebilir bir büyüklükte olması gerekir (Altın, Hava Kirliliğine Neden Olan Gazların Algılanmasına Yönelik Sensörlerin Geliştirilmesi, 2015).

Transdüser birimi, algılama birimindeki fiziksel özelliklerin değişimini ölçülebilir bir sinyale dönüştüren kısımdır. Sensörlerde, elektrokimyasal (Amperometrik , Potansiyometrik vb.), optik, akustik, ısı transdüserler yaygın olarak kullanılmaktadır. Transdüser türünün seçiminde algılama biriminde elde edilen çıktı türü belirleyici etkindir. Seçilen transdüser, algılama biriminin fiziksel özelliklerindeki değişim aralığına uygun olarak ayarlanır. Bir kimyasal sensörün bileşenleri Şekil 1.1’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. 1: Kimyasal Sensör Bileşenlerinin Gösterimi

Kimyasal sensörler, kullanılan dönüştürücü tipine göre farklı türlere ayrılmaktadır. Optik, elektrokimyasal, kütle, manyetik, kalorimetrik sensörler bunlardan bazılarıdır.

1.6.1. Elektrokimyasal Sensörler

Elektrokimyasal sensörler, kimyasal olarak seçici bir algılama katmanının, elektrokimyasal dönüştürücüye bağlanarak bu sistemin birleşimi sonucu ortaya çıkan bilgileri gerçek zamanlı olarak üreten cihazlardır. Elektrokimyasal sensörler, oksijen ve zehirli gazları tespit etmek için kullanılır. Harici bir devre içindeki belirli bir gazın konsantrasyonunu ölçerler. Bu, oksidasyon veya indirgeme reaksiyonları yöntemiyle yapılır (B.R. Mehta, 2015).

Elektrokimyasal tepkimeler, elektrokimyasal hücrelerin içerisinde yer alan elektrotlar arasındaki reaksiyonlardır. Elektrokimyasal hücreler, genellikle iyonların bir elektrot üzerinde indirgenmesi (elektron alması) veya oksidasyonu (elektron kaybetmesi) sonucu gerçekleşen redoks (indirgeme-oksidasyon) tepkimelerini kullanır (Lutic, Manea, & Cretescu, 2017).

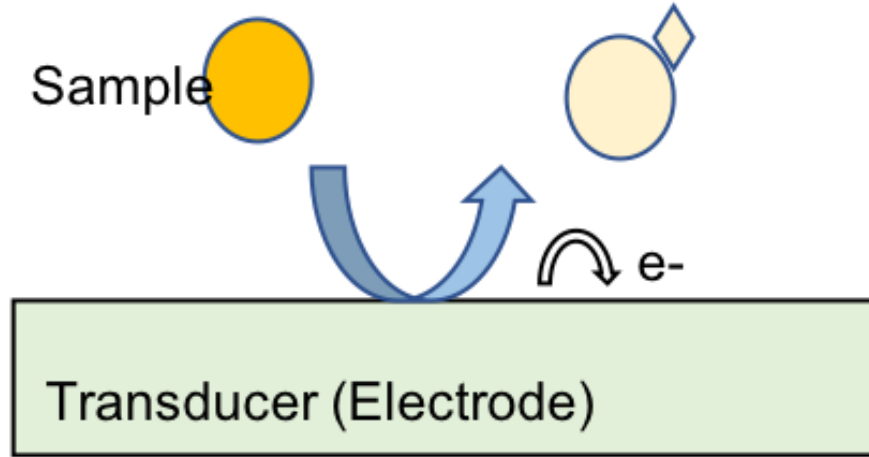
Elektrokimyasal gaz sensörleri, özellikle kirliliklerin kontrolü nedeniyle, atmosferin kalitesinin ve sağlıklı yaşamın izlenmesi için artık vazgeçilmez olmuştur

Bu gazların çoğu metal oksitler, zehirli gazlar, propan ve bazı uçucu organik maddeler gibi çevreyi olumsuz yönde etkiler. Asit yağmuru, toprak erozyonu, su kirliliği ve diğer doğrudan sağlık üzerindeki etkileri gazlardan ve metal oksitlerden kaynaklanan en yaygın sorunlardandır (Bagherzadeh, 2013).

1.6.2. Elektrokimyasal Sensörler Çalışma Prensibi

Elektrokimyasal sensörler, algılanmak istenen gazın sensör üzerinde dağılımına dayalı olarak çalışır. Gaz, sensör yuvasının üzerindeki zarın üzerinde dağılır ve gaz elektroda ulaştığında bir elektrokimyasal reaksiyon meydana gelir. Sonuç olarak sensör ortamda yayılan gazın konsantrasyonuyla orantılı bir elektrik sinyali üretir.

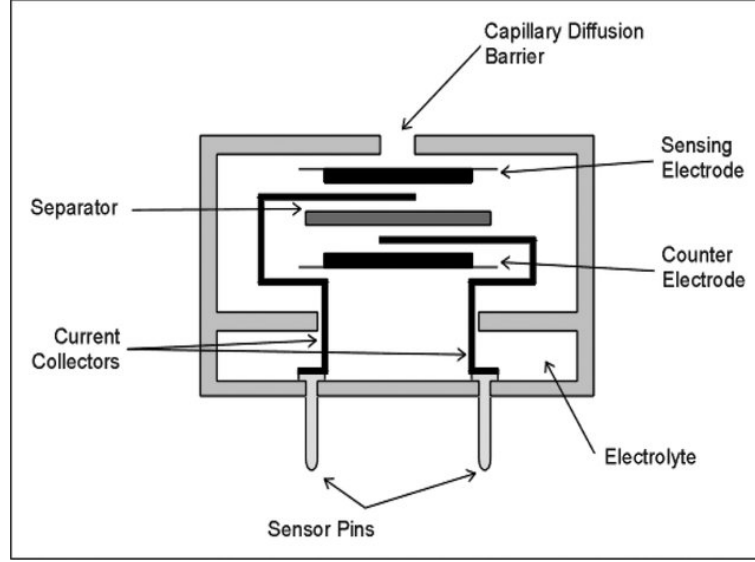
Elektrokimyasal sensörler üç temel bileşenden oluşur. Bu bileşenler analit, analiti bağlayan bir reseptör ve reaksiyonu ölçülebilir bir elektrik sinyaline dönüştüren bir transdüserdir. Elektrokimyasal sensörler söz konusu olduğunda, elektrot transdüser yani dönüştürücü görevini üstlenir.



Şekil 1. 2: Bir elektrokimyasal sensörün gaz algılamasının gösterimi (Url-6)

Elektrokimyasal sensörlerde, reaksiyon bölgesi olarak bir elektrot yüzeyi kullanılır. Elektrot yüzeyi gazı oksitleyerek veya indirgeyerek ve pozitif veya negatif bir akım akışı oluşturarak gazın konsantrasyonunu belirler. Bu gerçekleşen

reaksiyondan üretilen akım izlenir ve algılanan analitten konsantrasyon bilgisi gibi önemli veriler hesaplanabilir (Harper & Anderson, 2010).



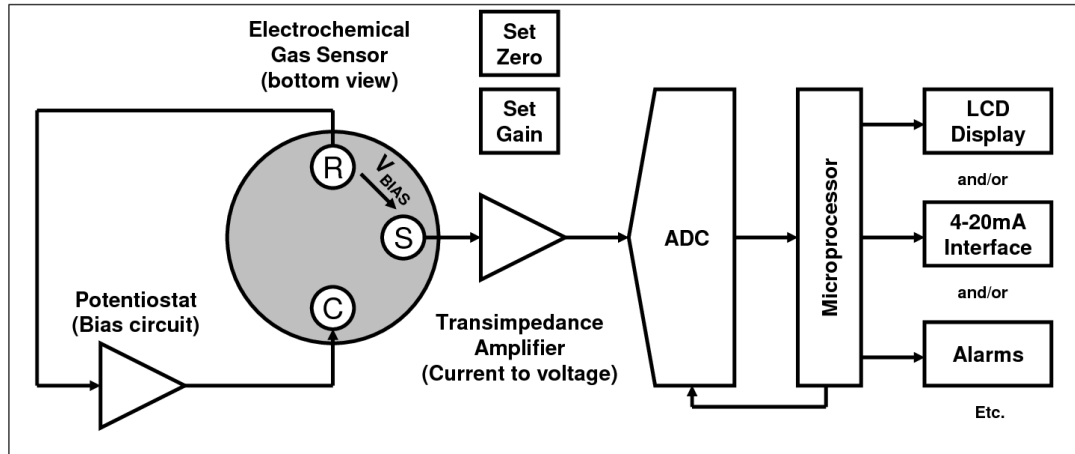
Şekil 1. 3: Elektrokimyasal Sensör Dönüştürücü Birimi

Elektrokimyasal sensörlerde kullanılan elektrotlar genellikle metal veya metal oksitlerinden yapılmıştır. Elektronik devre elemanlarından ziyade, bu elektrotlar kimyasal tepkimelerin gerçekleştiği ve elektron akışının sağlandığı bileşenlerdir. Gaz algılama sensörlerinde, iki temel elektrot bulunur. Bunlar algılama elektrodu ve sayaç elektrotlarıdır. Algılama elektrodu, gazın tespit edilerek tepki verdiği elektrottur. Bu elektrot, spesifik bir gaz türünün varlığını algılamak ve tepki vermek için tasarlanmış kısımdır. Gaz molekülleri, algılama elektrodu üzerindeki yüzey reaksiyonlarına veya adsorpsiyona girerek elektriksel bir sinyal üretir. Daha sonrasında üretilen bu sinyal, algılanan gazın konsantrasyonunu belirlemek için ölçülür. Sayaç elektrodunun algılama elektrodundan farklı bir işlevi vardır. Algılanacak gazın yanı sıra diğer gazların da tepkimeye girdiği veya etkileşime geçtiği bir yüzeye sahiptir. Bu elektrot, diğer gazların etkisini kontrol etmek ve algılama elektrodundan kaynaklanmayan yanıltıcı sinyalleri düzeltmek için kullanılır. Algılama elektrodu, spesifik bir gaz türünün tespitini gerçekleştirir, sayaç elektrodu ise diğer gazların etkisini

dengeleyerek doğru ölçüm yapılmasını sağlar. Her iki elektrot da sensörün seçiciliğini ve doğruluğunu etkileyen önemli bileşenlerdir. Sensör tasarımı ve uygulama gereksinimlerine bağlı olarak, farklı algılama ve sayaç elektrot malzemeleri kullanılabilir (Lutic, Manea, & Cretescu, 2017).

SnO_2 bir arayüz malzemesidir, toksik gaz algılama sensörlerinde genellikle algılama elektrodu olarak kullanılır. SnO_2 , hedeflenen gazın varlığında kimyasal bir tepkimeye girerek elektriksel değişiklikler üretebilir ve bu şekilde gazın algılanmasını sağlar. Algılama elektrodu, hedeflenen gazın konsantrasyonunu tespit etmek ve analiz etmek için kullanılan elektrottur. Sayaç elektrodu ise genellikle yanıtıcı gazların etkisini dengelemek ve doğru ölçüm yapmak için kullanılır. SnO_2 , algılama elektrodu olarak kullanıldığında gazın varlığına duyarlı bir tepki gösterir ve bu sayede toksik gazların tespit edilmesine yardımcı olur.

Elektrokimyasal gaz sensörleri, algılama ve sayaç elektrotlarından gelen akımı ölçer. Bu akım, transimpedans amplifikatörü tarafından ölçülür ve çıkışta bir voltaj seviyesine dönüştürülür. Bu voltaj seviyesi, mikrodenetleyici gibi bir dijital cihaz tarafından örnekleme yapılır.



Şekil 1. 4: Elektrokimyasal Sensörlerde Kullanılan Gaz Algılama Birimi Blok Diyagramı, (Note, 2010)

İşlem adımları şu şekilde gerçekleşir:

Algılama ve sayaç elektrotlarından gelen akım, bir transimpedans amplifikatörüne bağlanır. Transimpedans amplifikatörü, akımı bir gerilime dönüştürür.

Transimpedans amplifikatörünün çıkışı, mikrodnetleyici gibi bir dijital cihaza bağlı bir analog-dijital dönüştürücü (ADC) girişine yönlendirilir.

ADC, analog voltaj seviyesini örnekleme yaparak dijital bir değere dönüştürür. Bu dijital değer, mikrodnetleyicinin işlemcisine iletilir.

Dijital değer gönderilen işlemci bu değeri okur ve çeşitli hesaplamalar veya işlemler yapabilir. Örneğin, gaz konsantrasyonunu hesaplayabilir veya belirli bir eşik değeriyle karşılaştırabilir. Bu şekilde, algılama ve sayaç elektrotlarından gelen akımın ölçümü, transimpedans amplifikatörü, ADC ve mikrodnetleyici gibi dijital bir cihaz aracılığıyla gerçekleştirilmiş olur. Bu dijital cihazlar genellikle sensörün verilerini işleme, görselleştirme veya uygun bir çıktı sağlama amacıyla da kullanılabilir.

1.6.3. Metal Oksit Rezistif Sensörler

Metal oksit rezistif sensörler, bir metal oksit tabakasının üzerine belirli gazlarla etkileşime giren bir gaz ortamında çalışan dirençli tabanlı sensörlerdir. Bu sensörlerin çalışma prensibi, gazların varlığıyla metal oksit tabakasının elektriksel direncinin değişmesine dayanır.

Metal oksit rezistif sensörler genellikle iki elektrot arasında metal oksit tabakası yerleştirilerek oluşturulmuştur. Metal oksit tabakası, genellikle SnO₂ (Kalay Dioksit), ZnO (Çinko Oksit) gibi malzemelerden yapılır. Sensörün çalışma prensibi, gazların yüzeyde adsorbe olması ve metal oksit tabakasının elektriksel özelliklerini etkilemesidir.

Gazlarla etkileşim sonucu metal oksit tabakasının direnci değişir ve bu değişiklik, sensörün çıkışında bir direnç değişimi olarak görülür. Özellikle toksik veya yanıcı gazların tespitinde kullanılan metal oksit rezistif sensörler, gaz konsantrasyonunun belirlenmesine yardımcı olabilir.

İKİNCİ BÖLÜM

2. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada, toksik endüstriyel kimyasal gazların konsantrasyonu ölçümü yapabilmek için elektrokimyasal gaz sensörleri ve metal oksit rezistif sensörler kullanılmıştır.

2.1. KULLANILAN SENSÖRLER

Bu çalışmada BME680, CCS811, MiCS-6814, BME280, MICS-VZ-89TE kullanılmıştır. Aşağıdaki Tablo 2.1’de kullanılan sensörlerin performans verileri bulunmaktadır.

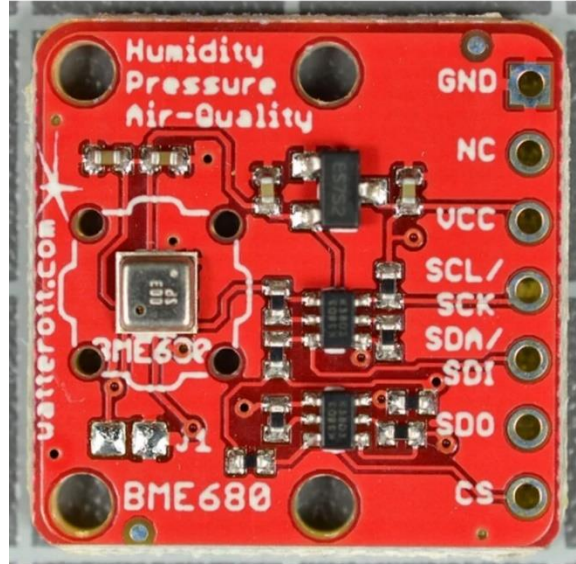
Tablo 2. 1: Kullanılan Sensörlerin Performans Verileri

Gaz Sensörü	Ölçüm Aralığı ve Çıkış Sinyali	Kullanılan Arayüz Malzemesi
ENS160	VOC: 0 – 65000 ppb eCO ₂ : 400 – 65000 ppm	SnO ₂
CCS811	TVOC: 0-1187 ppb CO ₂ : 400-8192 ppm	In ₂ O ₃
MiCS-6814	CO: 1-1000 ppm NH ₃ :1-500 ppm NO ₃ :0.05-10 ppm	SnO ₂
BME680	Hava kalitesi: 0-500 IAQ (İç Hava Kalitesi) derecesi Sıcaklık: -40 -85°C Nem: 0 - 100% RH Basınç: 300 - 1100 hPa	

MiCS-VZ-89TE	CO ₂ : 0-1000 ppb TVOC: 0-2000 ppm	SnO ₂
--------------	--	------------------

BME680: Bosch Sensortec tarafından üretilen bir sensör modülüdür. Bu modül, sıcaklık, nem, basınç ve hava kalitesi ölçümleri yapabilir. BME680 sensör modülü, havadaki farklı gazların tespitini yaparak konsantrasyonunu ölçebilir. BME680 modülü, I₂C veya SPI arayüzleri aracılığıyla mikrokontrolcülere bağlanabilir. Sensör, çevredeki ortam koşullarını ölçerek verileri dijital olarak işler ve sıcaklık, basınç, nem ve hava kalitesi gibi parametreleri hesaplar. (Url-7).

BME680 içerisindeki metal oksit filtresi sayesinde gazları algılar. Gazların sensör yüzeyiyle teması sonucu, gaz molekülleri yüzeydeki metal oksit parçacıklarıyla etkileşime girer ve burada oksitlerde redoks reaksiyonları oluşur. Bu reaksiyonlar sonucu sensörün yüzeyindeki direnç değişir ve bu değişim sensörün çıkış sinyaline yansır. Bu sayede sensör, gaz konsantrasyonlarını tespit edebilir.



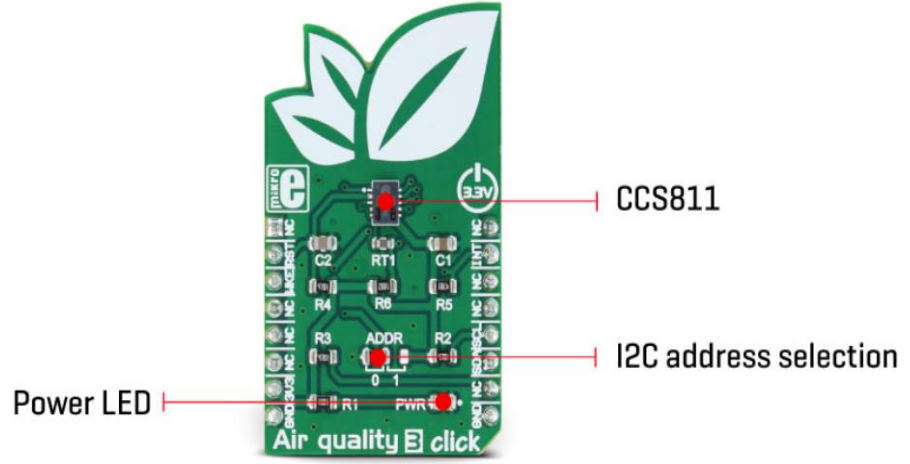
Şekil 2. 1: BME680 Sensör Modülü (Url-8)

CCS811: CCS811, AMS (Austrian Microsystems) firması tarafından geliştirilmiş, hava kalitesi ölçümü için kullanılan bir gaz sensördür. CCS811, hava kalitesi ölçümü için CO₂ ve TVOC konsantrasyonlarını ölçebilmektedir. CCS811, bir MEMS (Mikro Elektro Mekanik Sistemler) teknolojisine dayalı olarak tasarlanmış bir sensördür. Bir mikro çip içinde algılama elemanı, bir mikro işlemci ve gerekli arayüz devrelerini içerir. CCS811, ortamdaki havayı ölçer ve ölçülen verileri bir ADC aracılığıyla dijital veriye dönüştürür. CCS811 sensörü, I²C aracılığıyla haberleşir ve 1,8V-5V aralığında çalışır (Url-9).

CCS811 sensörü, hava kalitesi ölçümü amacıyla çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Örnek olarak, kapalı ortamlardaki CO₂ seviyelerinin kontrolü, havalandırma sistemlerinin kontrolü, hava kalitesi ölçümü için evlerde ve çalışma alanlarında kullanılabilir. Sensörün yüksek hassasiyeti ve düşük güç tüketimi, sensörün endüstriyel ve ev otomasyon sistemlerinde kullanılmasını kolaylaştırır.

Bu projede Air Quality 3 Click sensör modülü kullanılmıştır. Air Quality 3 Click sensör modülü, AMS'ye ait CCS811 gaz sensörü ve Renesas Electronics'e ait MCU RL78/G14 işlemcisini içerir. Mikrodenetleyici sistemlerle kullanılmak üzere tasarlanmış, I2C arayüzü aracılığıyla haberleşme sağlayan sensör modülüdür.

Air Quality 3 Click, özellikle kapalı ortamlardaki hava kalitesi ölçümü yapmak için ideal bir sensör modülüdür. Evlerde veya ofislerde havalandırmanın iyileştirilmesi veya hava kalitesi ölçümü için kullanılabilir (Url-10).



Şekil 2. 2: Air Quality 3 Click Sensör Modülü

ENS160+BME280: Fermion ENS160+BME280 sensör modülü, çevresel koşulların izlenmesi için kullanılan çok fonksiyonlu bir sensördür. Bu modül, ENS160 ve BME280 iki sensörün birleştirilerek oluşturulmuş şeklidir. ENS160, TVOC seviyesi, CO₂ seviyesi ve sıcaklık ölçümleri yapabilen bir sensördür. BME280 ise sıcaklık, nem ve barometrik basınç ölçümleri yapabilir. Bu modül, bir I²C arayüzü üzerinden iletişim kurar ve kolayca mikrodenetleyici kartlarına bağlanarak kullanılabilir (Url-11).

ENS160+BME280 modülü, hava kalitesi ölçümü, iç mekan havalandırması, otomatik çevresel kontrol gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Bu sensör modülü, düşük güç tüketimi, yüksek doğruluk ve doğru ölçümler yapabilen hassas sensör özelliklere sahiptir.

Fermion ENS160+BME280 sensör modülü, gaz konsantrasyonunu ölçmek için gaz varlığına bağlı olarak bir direnç değişikliği kullanır. Bu sensör modülünde, gaz molekülleriyle temas eden algılama elemanı (genellikle bir yarıiletken) üzerinde gazın kimyasal etkileşimi gerçekleşir. Fermion ENS160+BME280 sensör modülünün çıkış sinyali, gaz varlığına bağlı olarak direnç değerinin değişimiyle

ilişkilidir. Bu değişim genellikle bir gerilim veya akım sinyali olarak çıkışta görülebilir. Örneğin, sensör modülü bir gerilim sinyali üretiyorsa, gaz konsantrasyonunun artması direnç değerinin artmasına ve dolayısıyla çıkış geriliminin yükselmesine neden olabilir. Bu şekilde çıkış sinyali gaz konsantrasyonuna bağlı olarak artar veya azalır.



Şekil 2. 3: Fermion: Multifunction Environmental Sensör Modülü
ENS160+BME280, (Url-11)

MiCS 6814: MICS-6814, karbon monoksit (CO), azot dioksit (NO₂) ve amonyak (NH₃) gibi gazların algılanması için kullanılan bir gaz sensörüdür. İşlevi, hava veya gaz karışımlarında bu gazların varlığını tespit etmektir. MiCS-6814, bağımsız ısıtıcılara ve hassas katmanlara sahip üç sensör yongası içerir. Bir sensör çipi oksitleyici gazları (OX) algılar, diğer sensör indirgeyici gazları (KIRMIZI) ve diğeri NH₃'ü algılar .

MICS-6814 sensörü, üzerinde, her bir gazın algılanması için ayrı ayrı elektrokimyasal hücreler bulunur. Bu hücrelerde, gaz molekülleri ile reaksiyona giren kimyasal bileşenler bulunur. Gazın varlığı, bu reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan elektriksel değişiklikler aracılığıyla algılanır.

MICS-6814 sensörünün temel özellikleri şunlardır: Çoklu gaz algılama: Sensör, karbon monoksit (CO), azot dioksit (NO₂) ve amonyak (NH₃) gazlarını algılayabilir. Sensör, düşük gaz konsantrasyonlarını bile tespit edebilen yüksek

hassasiyete sahiptir. Sensör, hem dijital (I^2C) hem de analog çıkış sağlar, bu sayede verileri mikrokontrolcülere veya diğer cihazlara iletebilir.

MICS-6814 sensörü, havada veya gaz karışımlarında CO, NO₂ ve NH₃ gazlarının varlığını tespit etmek için genellikle hava kalitesi izleme, endüstriyel uygulamalar, yanma prosesleri, havalandırma sistemleri ve güvenlik sistemleri gibi alanlarda kullanılır.



Şekil 2. 4: MiCS 6814 Sensör Modülü (Url-12)

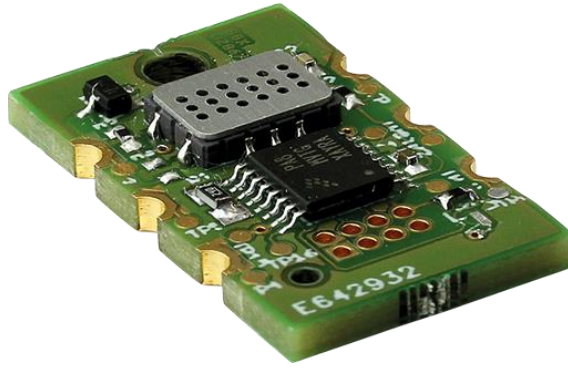
MiCS-VZ-89TE: MiCS-VZ-89TE sensör modülü, içerisinde gaz sensörü ve sıcaklık sensörünü bulunduran bir hava kalitesi sensördür. Bu sensör modülü, çeşitli gazların varlığını algılayarak hava kalitesi ölçümleri yapar.

MiCS-VZ-89TE sensöründeki elektrokimyasal hücreler, hedef gazların reaksiyonlarına karşı duyarlıdır ve gaz konsantrasyonundaki değişiklikleri elektriksel sinyallere dönüştürür. MiCS-VZ-89TE Sensör Modülü, gaz varlığına istinaden oluşturduğu reaksiyonda çıkış sinyali direnç değişimi üzerinden çalışır. Sensör modülünde bulunan gaz algılama elemanları, hedef gazın varlığına bağlı olarak direnç değerinde değişiklikler meydana getirir. Bu direnç değişimi, çıkış sinyalini etkiler. Sensör modülü, gazın varlığına bağlı olarak direnç değerinde artış veya azalış oluşturur. Bu direnç değişimi, genellikle analog bir çıkış sinyali olarak

temsil edilir. Sensörün çıkış sinyali, direnç değişimine bağlı olarak voltaj veya akım düzeyinde değişiklik gösterebilir.

MiCS-VZ-89TE sensör modülü, toluen, etanol, hidrojen, amonyak, karbondioksit (CO₂) ve karbon monoksit (CO) gibi çeşitli gazları algılayabilir.

Sensör modülü, farklı gazlar için belirlenmiş ölçüm aralıklarında çalışır. Örneğin, karbon monoksit (CO) için ölçüm aralığı genellikle 0 ila 1000 ppm.

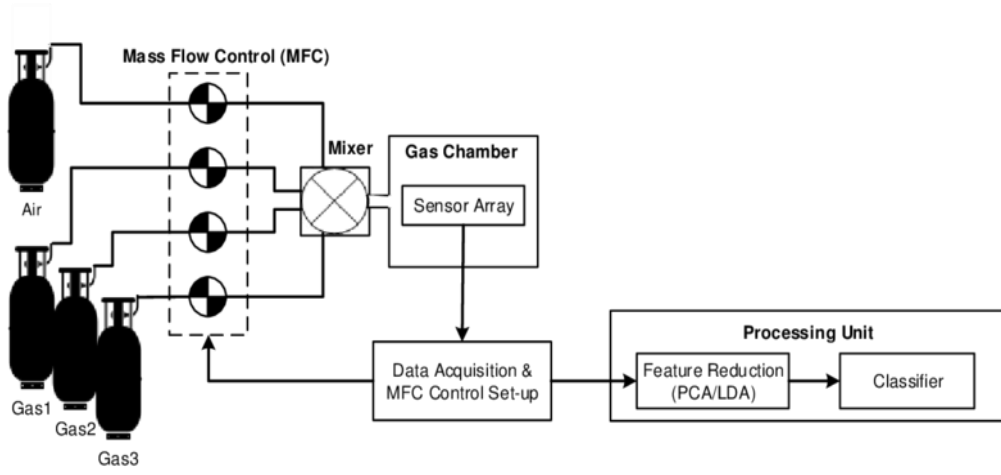


Şekil 2. 5: MiCS-VZ-89TE Sensör Modülü (Url-13)

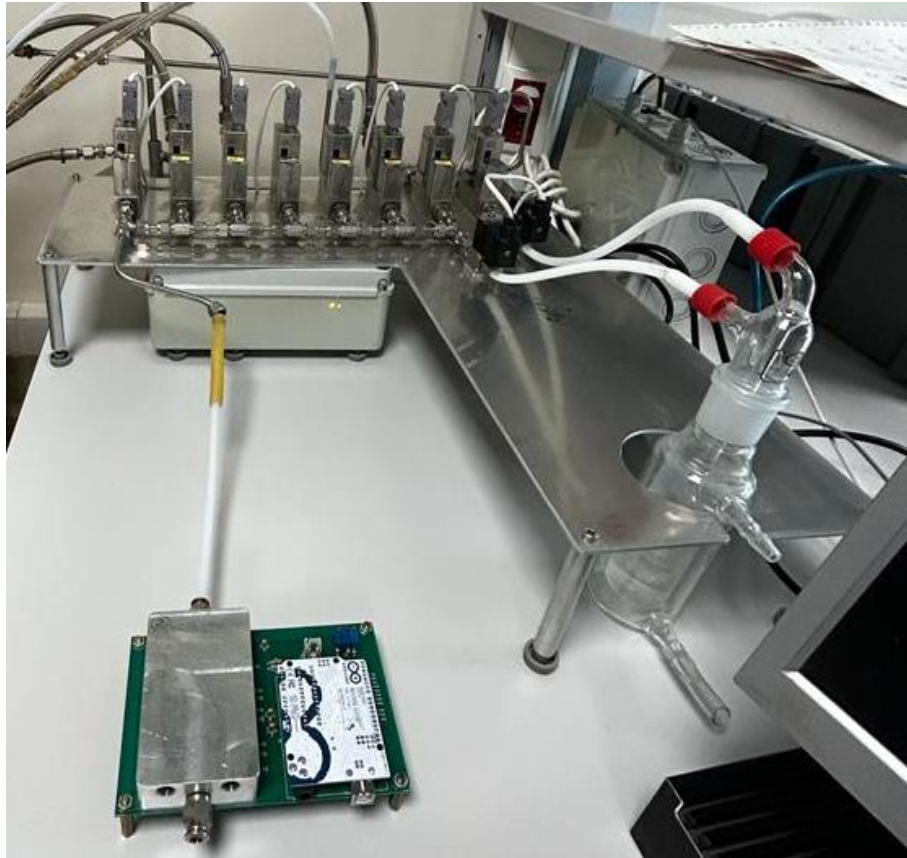
2.2. SENSÖR ÖLÇÜM PROSEDÜRÜ

Test Çalışmaları TÜBİTAK MAM KBRN Savunma Teknolojileri Araştırma Grubu Zem Sensör Test Laboratuvarında yapılmıştır. Gaz testlerinde NH₃, SO₂, AsH₃, NO₂, CO, CO₂ gazları kullanılmıştır.

Bu projede oluşturulan sistem şeması; belirli konsantrasyon aralığında verilen gaz akışı, sonrasında gaz sensörlerinin bu konsantrasyon verilerini alması, işlenmesi ve görselleştirilmesi sürecini temsil eder.



Şekil 2. 6: Sensör Dizisi Test Sistemi ve Analiz Şeması Örneği, (Muhammad Ali Akbar, 2016)



Şekil 2. 7: Gaz Karışım ve Sensör Test Sistemi



Şekil 2. 8: Sensör Ölçüm Hücresi ve Kartı (ELPAŞ Elektromekanik A.Ş.)

Gaz tüplerine bağlı vanalardan gaz akışı gerçekleşmektedir, ölçüm yapılmak istenen gazın ilgili vanası açılır, ölçüm setinde bulunan gaz kütle akış kontrol cihazları ölçüm esnasında borudan geçen gazın miktarını ayarlamaktadır, ek olarak kuru hava ile gazın seyreltilerek istenilen konsantrasyonda elde edilmesini sağlamaktadır.

Gaz akış kontrol ünitesindeki ayarlar şu şekilde yapılmıştır: her ölçüm öncesi yaklaşık 20 dk boyunca 200 ml/dk akış hızı ile kuru hava gönderilerek sensörler üzerinde bulunması muhtemel diğer analitler ve nem gibi istenmeyen etkilerin yok edilerek sensör yıkama işlemi yapılmıştır. Sonrasında kuru hava ile taşınan gazlar Tablo 2.1’de verilen ve kuru hava ile dönüşümlü olarak giderek artan konsantrasyonlarda sensörler üzerinden geçirilerek ölçümler yapılmıştır. Ardından tekrar yaklaşık 20 dk sensör yıkama yaparak sırasıyla diğer gazlar için de aynı adımlar yapılmış ve her bir gaz için sensörlerin tepkileri ayrı ayrı kaydedilmiştir.

Yapılan tez çalışması kapsamında ölçülen NH_3 , SO_2 , AsH_3 , NO_2 , CO , CO_2 gazlarının konsantrasyon değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 2. 2: Ölçümü Yapılan Gazların Test Konsantrasyonları

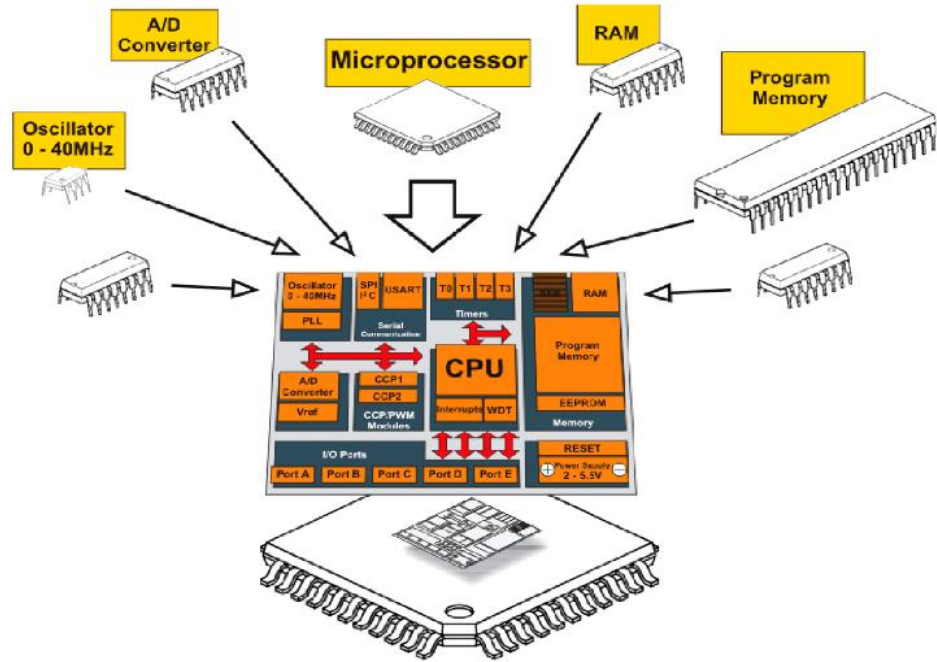
Test Konsantrasyonları						
	NH ₃ (ppm)	SO ₂ (ppm)	AsH ₃ (ppm)	NO ₂ (ppm)	CO (ppm)	CO ₂ (%)
C1	25	8,75	0,25	1,5	9	0,49
C2	50	17,5	0,5	3	18	0,97
C3	75	26,25	0,75	4,5	27	1,36
C4	100	35	1	6	36	1,9
C5	125	43,75	1,25	7,5	45	1,9

Gaz ölçümlerinde sensörlerin NH₃, SO₂, AsH₃, NO₂, CO, CO₂ gazlarına olan tepkileri değerlendirilmiştir.

Bu tekrarlı ölçümlerde %50 ve %85 bağıl nem ortamlarındaki sensör tepkileri değerlendirilmiştir. Sensörlerin farklı nem koşullarındaki farklı zamanlarda yapılan ölçüm sonuçlarının davranışları yorumlanmıştır.

2.3. MİKRODENETLEYİCİLER

Mikrodenetleyici, dışarıdan gelen verileri hafızasına alan, derleyen ve sonucunda da çıktı elde eden elektronik devre birimleri içeren küçük bir bilgisayardır. Mikrodenetleyiciler endüstriyel sistem tasarımlarında otomatik kontrol amacıyla kullanılmaktadır, maliyetinin ve güç tüketiminin düşük olması nedeniyle sıkça tercih edilmektedir. Mikrodenetleyicinin yapısında: CPU, RAM, ROM, I/O Portları, Seri ve Paralel Portlar, A/D ve D/A çeviriciler, Sayıcılar ve Kristal Osilatör bulunur (Url-14).



Şekil 2. 9: Bir Mikro denetleyicinin Yapısında Bulunan Birimler

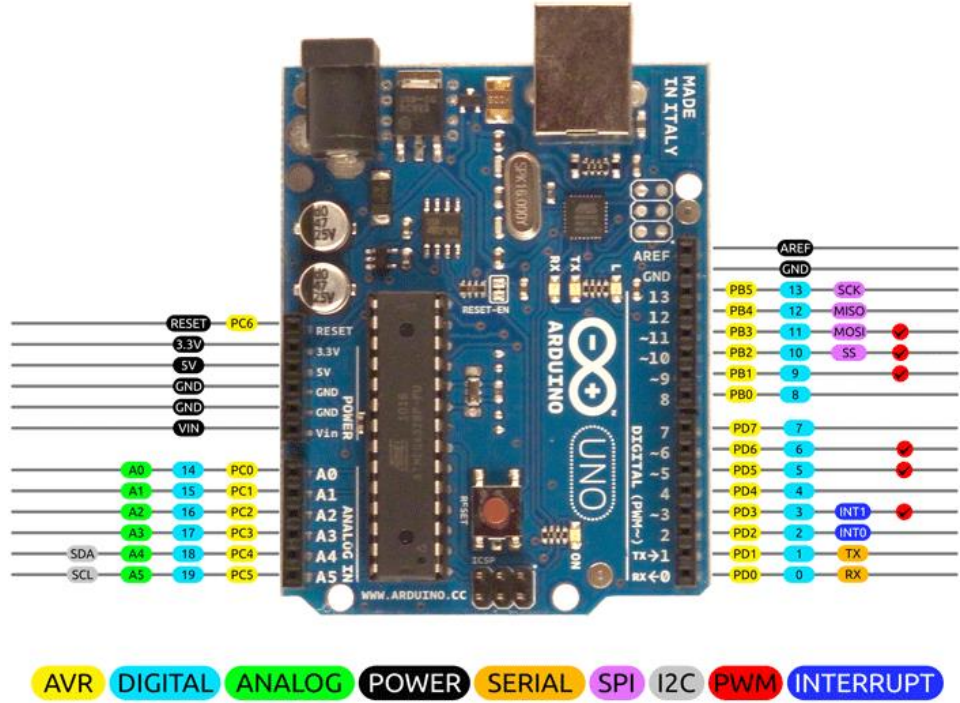
(Sanjeev Kumar Mishra, 2011)

Arduino Uno, popüler bir mikrodenetleyici geliştirme platformudur. Arduino, kullanıcıların elektronik projeler geliştirmesini, prototipler oluşturmasını ve interaktif sistemler tasarlamasını sağlayan bir donanım ve yazılım platformudur.

Arduino Uno, Arduino'nun en temel ve yaygın kullanılan modelidir. Arduino Uno, Atmel AVR mikrodenetleyicisi olan ATmega328P'yi temel alır. Bu mikrodenetleyici, 16 MHz çalışma frekansına sahip, 32 KB flaş belleğe ve 2 KB

SRAM'e sahiptir. Arduino Uno, 14 adet dijital giriş/çıkış pini ve 6 adet analog giriş pini sunar. Bu pinler, sensörlerin, düğmelerin, LED'lerin ve diğer harici bileşenlerin bağlanması için kullanılabilir.

Arduino Uno, USB bağlantısı aracılığıyla bilgisayara programlama yapmak ve seri iletişim sağlamak için kullanılabilir. Arduino Uno, USB bağlantısı veya harici bir güç kaynağı aracılığıyla beslenebilir. Arduino IDE bir yazılım ortamı kullanılarak programlanır. Arduino IDE, C++ tabanlı programlama dili ve Arduino kütüphanelerini içerir (Url-15).



Şekil 2. 10: Arduino UNO (Url-16)

Tablo 2. 3: Arduino UNO Pin Özellikleri

Pin Kategorisi	Pin Adı	Açıklama

Power	V_{in} , 3,3V, 5V, GND	<p>V_{in}: Harici bir güç kaynağı kullanırken Arduino'ya giriş voltajı sağlar.</p> <p>5V: Kart üzerindeki mikrodenetleyici ve diğer bileşenlere güç sağlamak için kullanılan düzenlenmiş güç kaynağıdır.</p> <p>3,3V: Voltaj regülatörü tarafından üretilen 3,3V besleme pinidir. Maksimum akım çekimi 50mA'dır.</p> <p>GND: topraklama pinleridir.</p>
Reset	Reset	Mikrodenetleyiciyi sıfırlar.
Analog Pinler	A0 – A5	0-5V aralığında analog giriş sağlamak için kullanılır.
Giriş/Çıkış Pinleri	Dijital Pimler 0 - 13	Giriş veya çıkış pini olarak kullanılabilir.
Seri	0(Rx), 1(Tx)	TTL seri verilerini almak ve iletmek için kullanılır.
Harici Kesintiler	2, 3	Bir kesmeyi tetiklemek için.
PWM	3, 5, 6, 9, 11	8 bit PWM çıkışını sağlar.

SPI	10,11, 12, 13	SPI iletişimi için kullanılır.
TWI	A4 (SDA), A5 (SCA)	TWI iletişimi için kullanılır.
AREF	AREF	Giriş voltajı için referans voltajı sağlar.

Bir Mikrodenetleyici, sensör verilerini algılamak ve iletmek için SPI veya I²C protokollerini kullanabilir (Url-17).

Projede kullandığımız sensörler, harici denetleyicilerle I²C protokolleri üzerinden iletişim kurarak sensör çıkış verilerinin aktarılmasını sağlar. Bu proje için, sensöre bağlanmak için Arduino I²C portu SDA/SCL pinleri kullanılacaktır.

Inter-Integrated Circuit veya I²C bağlantısı genel olarak "iki kablolu arayüz" olarak adlandırılır. Düşük hızlı dış bağlantılı bilgi işlem cihazlarına bağlamak için yaygın olarak kullanılır (Maclean, 2020).

I²C, SCL ve SDA olarak adlandırılan iki veri kablosuna sahip bir veri yolu aracılığıyla 127 ayrı çıkış noktasına kadar bağlanmak için kullanılabilir. SCL, I²C veri yolu üzerinden tüm veri transferlerini senkronize etmek için kullanılan Seri CL kilit hattıdır. SDA, Seri DATA hattıdır. I²C veriyolu, bu durumda Master'ın Raspberry Pi olduğu bir 'Master - Slave' sistemi üzerinde çalışır. Slave'ler, sensörler veya mikro denetleyiciler gibi entegre devreler olabilir (Maclean, 2020).

Master, bir Slave ile iletişim kurmak istediğinde, SDA ve SCL hatlarına bir dizi darbe gönderir. Gönderilen veriler, Master'ın etkileşime girmesi gereken Slave'i tanımlayan benzersiz bir adres içerir. Veriler SDA hattında gönderilirken, Master ve Slave'i senkronize tutmak için SCL hattında saat darbeleri gönderilir (Maclean, 2020).

Sensörlerin I²C adresleri üreticinin belirttiği şekilde farklılık gösterir. Genellikle, sensörlerin I²C adresleri sabit olarak belirlenir. Projede kullanılan sensörlerin I²C adresleri:

BME680: I²C adresi 0x76 veya 0x77.

CCS811: I²C adresi 0x5A veya 0x5B.

MiCS-6814: I²C adresi 0x50.

BME280: I²C adresi 0x76 veya 0x77.

MiCS89: I²C adresi 0x68 veya 0x69.

2.4. TEMEL BİLEŞENLER ANALİZİ (PCA)

Temel Bileşenler Analizi (PCA), verilerin boyutunu azaltmak ve temel bileşenleri belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. PCA'de elde edilen sonuçlar, verilerin özelliklerine göre farklı şekillerde yorumlanabilir. Yüksek boyutlu veri setlerindeki örüntüleri grafik üzerinde gösterebilme imkanı olmadığından PCA, bu çok boyutlu verileri analiz etmek için güçlü bir araç olarak kullanılır (Smith, 2002).

Temel Bileşen Analizi, çok değişkenli veri setlerinin analizinde kullanılan istatistiksel veri dönüştürme yöntemidir (Dunteman, 1989). Bu yöntemle çalışılan veri seti gerçek değişkenlere bağlı olarak tanımlanan temel bileşenlerle tanımlanır ve temel bileşenler birbirine dik 2 veya 3 boyutlu düzlemler ile gerçek değişkenlerin doğrusal kombinasyonlarına karşılık gelir. Mevcuttaki asıl değişkenlerin yeni değişkenlere dönüştürülmesi işlemi varyans hesaplaması olup temel bileşenler, gerçek değişkenlere ait kovaryans matrisinin birbirine dik özvektörlerinden oluşturulur. Temel bileşenler önem derecesine göre adlandırılmaktadır ve birinci dereceden temel bileşen; gerçek değişkenlerin sahip olduğu ilişkiyi en büyük varyans değerine bağlı olarak açıklar; daha yüksek dereceli temel bileşenler ise azalan varyans değerlerine göre sıralanırlar (Smith, 2002)

Temel bileşenler analizi, asıl değişkenlere bağlı olarak hesaplanarak üretilen birbirinden bağımsız yapay değişkenleri oluşturarak yapılan bir analizdir. Birinci derece temel bileşen, en büyük varyans değerine sahip olan bileşendir ve gerçek veriler arasındaki ilişkiyi en yüksek derecede açıklar (Dunteman, 1989).

Teknik olarak temel bileşenler, n ölçümündeki p değişkenin doğrusal birleşimlerinden oluşmaktadır. Geometrik olarak ise; orijinal koordinat eksenlerini oluşturan p değişkenin temel bileşenlerin her biri yeni eksenleri meydana getirmesi amacıyla döndürülmüş yeni bir uzay sistemini göstermektedir. Maksimum varyansın yönünü gösterir ve birbirinden bağımsız olacak şekilde döndürülerek oluşturulan yeni uzay sistemi, değişkenler arası korelasyon (ilişki) yapısını son derece benzer bir şekilde temsil etmektedir. Temel Bileşenler Analizi ile ulaşılması istenilen ilk sonuç; p tane değişkeni, önemli bir bilgi kaybına neden olmadan, bu değişkenleri temsil edebilen daha az sayıda değişkene indirgemektir. PCA'nin

temel amacı da bu indirgenmiş yeni değişkenler ile ilgili çalışmanın amacı doğrultusunda tahminleme ve sınıflandırma yapmak veya veri setini ile ilgili bazı analizler için görüntülemektir. Uygulamalarda ilk iki veya üç temel bileşen, toplam değişkenliğin %80' inden büyük bir oranını açıklayabiliyorsa, bu bileşenler büyük bir bilgi kaybına neden olmadan orijinal p değişkenin yerini alabilmektedir yorumunu yapmak mümkündür (Smith, 2002)

PCA analizinden elde edilen bir grafikte PCA1 ve PCA2 eksenleri, verilerin en çok değişkenlik gösteren iki boyutunu temsil eder. Bu iki bileşen, verilerin % varyansının en fazla olduğu iki boyuttur. Bu eksenler, verilerin değişkenliklerini en iyi şekilde ayırt etmek için seçilir. PCA1 ve PCA2 eksenleri, verilerin boyutlarını azaltığımızda bile, verilerin en çok değişkenlik gösteren boyutlarını korumamıza izin verir (Dunteman, 1989).

PCA standart sapma, kovaryans, özvektör, özdeğer bulma işlemlerinden meydana gelmektedir. Temel Bileşenler Analizi yapabilmek için aşağıdaki adımlar takip edilmektedir:

- İstatistiksel veriler toplanır,

- Standardizasyon veya normalizasyon işlemleri yapılır. Normalizasyon ve standardizasyon, veri ölçeklendirme yöntemleridir ve istatistiksel analiz, makine öğrenmesi gibi alanlarda kullanılırlar.

Standardizasyon, veri değerlerini ortalama ve standart sapma kullanarak dönüştürme işlemidir. Veriler, ortalama değerden çıkarılır ve standart sapmaya bölünerek standart bir dağılım elde edilir. Bu yöntemde veriler genellikle 0 ortalama ve 1 standart sapma değerine sahip olacak şekilde ölçeklendirilir.

Normalizasyon, veri değerlerini belirli bir aralığa sıkıştırma işlemidir. Genellikle verileri [0, 1] veya [-1, 1] aralığına dönüştürmek için kullanılır. Bu işlem, veri dağılımının orijinal aralığına bağlı olarak her veri noktasının orantılı bir şekilde ölçeklendirilmesini sağlar. Her iki yöntem de veri ölçeklendirme işlemleridir, ancak normalizasyon verilerin belirli bir aralığa sıkıştırılmasını sağlarken, standardizasyon verilerin standart bir dağılıma dönüştürülmesini sağlar. Hangi

yöntemin tercih edileceği, veri setinin özelliklerine ve kullanılacağı analiz veya modelleme yöntemine bağlıdır.

- Yüksek boyutlu datalar için Kovaryans hesaplanır. Bu adımın amacı, giriş veri setindeki değişkenlerin birbirlerine göre ortalamayla olan farklılığını anlamak, yani aralarında herhangi bir ilişki olup olmadığını görmektir. Bazı değişkenler, etkisiz bilgiler içerecek şekilde yüksek oranda ilişkilidir. Bu yüzden, bu ilişkilerin belirlenmesi için kovaryans matrisi hesaplanır.

- Temel bileşenleri belirlemek için kovaryans matrisinin özvektör ve özdeğerleri hesaplanır. Özdeğerler, her Temel Bileşende taşınan varyans miktarını veren özvektörlerin katsayılarıdır. Özvektörleri özdeğerlerine göre en yüksekte en düşüğe doğru sıralayarak, temel bileşenleri önem sırasına göre elde edilir ve Temel Bileşenler (Principal Components) seçilir.

- Yeni veriseti hesaplanır.

Temel bileşen matrisi sadece değişkenlerin temel bileşenlerdeki ağırlıklarını değil, aynı zamanda bu ağırlıkların yönünü de belirtmektedir. Temel bileşen negatif değer almış ise, zıt yönde bir ilişki; pozitif değer almış ise, aynı yönde bir ilişki söz konusudur. Bu ilişki, temel bileşenlerin açıkladığı boyut ile değişkenler arasında görünen istatistiksel bağıntı yapısıdır (Smith, 2002).

Geometrik olarak, temel bileşenler, verilerin maksimum miktarda varyansı açıklayan yönlerini temsil eder. Buradaki varyans ve bilgi arasındaki ilişki, bir doğrunun taşıdığı varyans ne kadar büyükse, veri noktalarının doğru boyunca dağılımı o kadar büyük ve bir çizgi boyunca dağılım ne kadar büyükse, o kadar fazla bilgiye sahiptir. Temel bileşenler, gözlemler arasındaki farkları daha iyi görebilmek için ve değerlendirmek için en iyi ve doğru açıyı sağlayan yeni eksenler olarak düşünülebilir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. SİSTEM TASARIMI

Söz konusu gaz sensörleri ve sıcaklık/nem sensörleri Printed Circuit Board (PCB) üzerine yerleştirilmiştir. Gaz algılama platformunda mikrodenetleyici olarak Arduino kullanılması planlanmıştır.

Gaz akış kontrol ünitesinden gönderilen gaz örnekleri, BME680, CCS811, MiCS-6814, ENS160, MiCS89 sensör dizisine yönlendirilir. Sensörlerden gelen çıkışlar, mikroişlemci ile sayısal veriye dönüştürülerek bilgisayara aktarılır.

Bilgisayara kaydedilen veri, PCA gibi veri indirgeme teknikleri kullanılarak önceden işlenebilir ve gazların sınıflandırılması yapılabilir. Sınıflandırıcı, gazların doğru tanımlanmasına karar verir ve bir sonuç çıktısı üretir. Sonuçlar daha sonra kullanıcıya sunulur. Bu sistem aşamalarını gösterir bir şematik aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

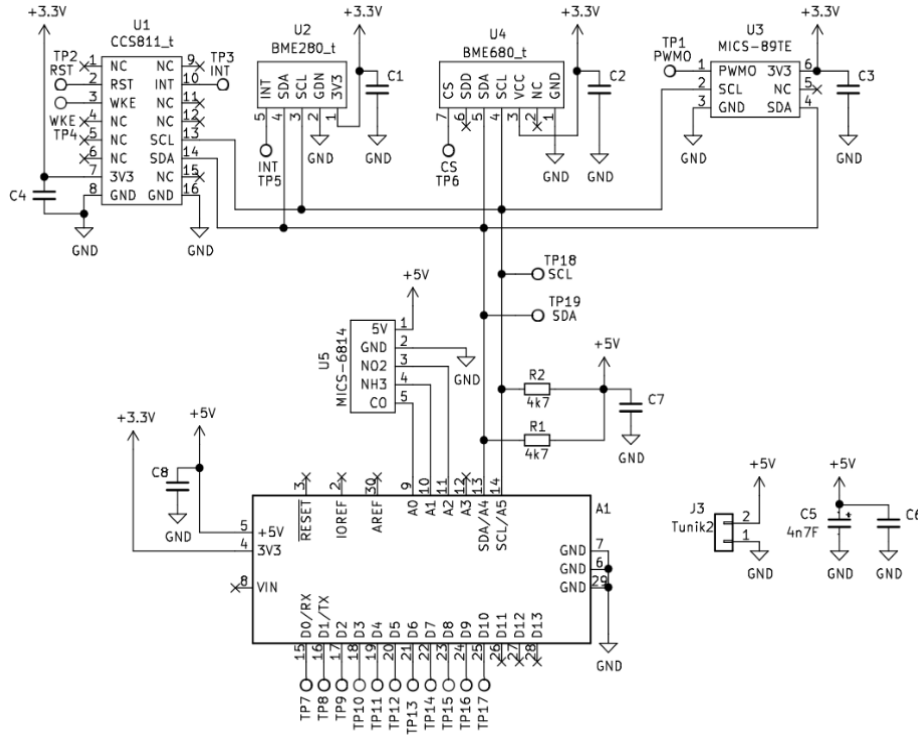
3.1. SENSÖR BİRİMİ

Sensör biriminde gaz sensör modülleri PCB üzerine yerleştirilerek gerekli elektronik bağlantılar yapılarak Arduino UNO ile bağlantıları sağlanmıştır.



Şekil 3. 1: PCB Üzerine Yerleştirilen Sensör Modülleri

Bu proje için seçilen sensör modüllerinin gerekli beslemeleri ve elektronik bağlantıları yapmıştır.



Şekil 3. 2: Arduino ve Sensörlerin Şematik Bağlantısı

PCB üzerinde U1, U2, U3, U4 ile temsil edilen 4 sensör SDA/SCL pinlerine bağlanmıştır. U5 ile temsil edilen sensör Arduino'nun analog pinlerine bağlanmıştır.

Gaz sensöründe SDA ve SCL pinleri, I²C iletişim protokolünü kullanarak sensörün Arduino ile iletişim kurmasını sağlar.

4.7k dirençler, SDA ve SCL hatlarında kullanılan pull-up dirençleridir. I²C protokolü, SDA ve SCL hatlarının yüksek seviyeye çekilmesiyle çalışır. Pull-up dirençler, hatların yüksek seviyeye çekilmesini sağlar ve hatlardaki gerilimi stabilize eder. Ayrıca, veri hattındaki gürültüyü azaltmaya yardımcı olur ve doğru iletişim sağlar.

Bu dirençler, sensör ile Arduino arasında iletişim sırasında veri hatlarının doğru çalışmasını sağlar ve veri bütünlüğünü korur. I²C protokolünün çalışabilmesi için pull-up dirençlerinin uygun değerlere sahip olması önemlidir, ve 4.7k değeri yaygın olarak tercih edilen bir değerdir.

Bu şekilde, SDA ve SCL hatlarına bağlanan 4.7k dirençler, gaz sensörünün I²C iletişim protokolüyle stabil ve doğru iletişim kurabilmesini sağlar.

Bu okunan verileri analiz edilerek gaz konsantrasyon eğri grafikleri hesaplanmıştır. Bu konsantrasyon eğrilerine göre sensörün sağladığı veri yapısına göre, alınan veriler uygun bir formülizasyon ile gaz konsantrasyonuna dönüştürülebilir.

3.2. KONTROL BİRİMİ

Sensör modülleri Arduino'ya doğru şekilde bağlantılarını sağladıktan sonra Arduino üzerindeki uygun kütüphaneleri kullanarak sensör modülleri tanımlanmıştır. Daha sonra haberleşme bağlantıları kurulmuştur.

Sensör modülünden veri okumak için uygun komutları kullanılmıştır. Kullanılan komutlar aşağıda listelenmiştir:

Tablo 3. 1: Projede Kullanılan Kodlama Komutları ve Fonksiyonları

Kullanılan Kütüphaneler	Bağlantı Pinleri	Sensör Çalıştırma ve Data Okuma Komutu	Data Getirme Komutu
#include <sSense-CCS811.h>	SDA/SCL	ccs.readData()	ccs.getCO2() ccs.getVOC()
#include <DFRobot_ENS160.h>	SDA/SCL	ENS160.getENS160 Status()	ENS160.getECO2() ENS160.getTVOC()
#include <MICS-VZ-89TE.h>	SDA/SCL	CO2SENSOR.read Sensor ()	CO2SENSOR.getCO2() CO2SENSOR.getVOC()
#include <DFRobot_BME680.h>	SDA/SCL	bme.begin()	bme.getTemperature() bme.getPressure() bme.calAltitude() bme.getHumidity()

MiCS6814 AnalogRead	#define CO A0 #define NH3 A1 #define NO2 A2	a0 = analogRead(CO) a1 = analogRead(NH3) a2 = analogRead(NO2)	float co = (5.0 / 1024) * a0; float nh3 = (5.0 / 1024) * a1; float no2 = (5.0 / 1024) * a2;
------------------------	--	---	--

İlk olarak yüksek teknoloji sensörlerin sağladığı kütüphaneler Arduino projesine dahil edilerek sensörlerle iletişim kurulması sağlanmış ve daha sonra gerekli komutlar yazılarak sensör verileri okunmuştur.

DFRobot_BME680 kütüphanesini Arduino projenize dahil etmenizi sağlar. Bu kütüphane, BME680 sensörü ile iletişim kurmanızı ve sensörün verilerini okumanızı sağlar.

Ccs.readData() fonksiyonu, CCS811 sensöründen yeni verilerin okunup okunmadığını kontrol eder. Eğer yeni veri okunursa, readData() fonksiyonu true değerini döndürür. Ancak, sensörde kesinti, hata olduğunda veya sensör verileri okunamadığında, readData() fonksiyonu false değerini döndürür. Ccs.geteCO2() ve ccs.getTVOC() fonksiyonu, sensörden anlık eCO2 ve TVOC değerini getirir.

ENS160.getENS160Status() komutu, ENS160 sensör modülü durumun bilgisini alarak sensör modülünün çalışma durumunu kontrol etmek için kullanılır. getENS160Status() fonksiyonu, ENS160 sensöründeki dahili durum registerını okur ve bu registerda depolanan bilgiyi döndürür. ENS160.getTVOC() ve ENS160.geteCO2() komutları, ENS160 sensöründen TVOC ve CO2 değerlerini okumak için kullanılan komutlarıdır.

MICS-VZ-89TE kütüphanesi eklenerek tanımlanan "CO2SENSOR" değişkeni readSensor() komutu ile sensörden gelen CO2 ve TVOC değerini okumak için kullanılır. CO2SENSOR.getCO2() ve CO2SENSOR.getVOC() komutu ile ölçülen CO2 ve TVOC değerleri okunur.

bme.begin() komutu BME680 sensörü iletişim kanallarını ayarlar ve sensör ile iletişime geçer. bme.getTemperature() sensörden gelen sıcaklık değerini okur. bme.getPressure(): sensörden gelen basınç değerini okur. bme.calAltitude():

sensörü kullanılarak deniz seviyesine göre yüksekliği hesaplar. `bme.getHumidity()`: sensörden gelen nem değerini okur.

Son olarak Arduino kodunda `analogRead()` fonksiyonunu kullanarak analog giriş pininden sensör verisini okunmaktadır. MiCS6814 sensörü analog bir sensördür. Bu kodlar, Arduino'da bağlı olan CO, NH₃ ve NO₂ sensörlerinden analog veri okumayı ve bu değerleri gerilim değerlerine dönüştürmeyi sağlar. A0, A1 ve A2 analog girişleri ile sırasıyla CO, NH₃, NO₂ tanımlanmıştır. Bu gaz çıktıları analog giriş pinlerini temsil etmektedir. Daha sonra bu analog pinlerden gelen değerler `a0`, `a1`, `a2` değerine atanmıştır. Bu değerlere atanan değerler gerekli hesaplamalar yapılarak bir gerilim değerine dönüştürülmüştür.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

4. ÖLÇÜM ve ANALİZ

Yapılan test ölçümünde ilk olarak tüplerden NH₃ gazı sensör hücresine gönderilmiştir. NH₃ gazı 5 farklı konsantrasyonda verilmiştir. Ardından sensör yıkama işlemi yapılarak sırasıyla diğer gazlar da aynı prosedürde sensör hücresine gönderilmiştir. Diğer gazlar için de aynı işlemler yapılmıştır. İlk yapılan test ölçümünün ardından SO₂ gazına hiçbir sensörün tepki vermediği anlaşıldığından diğer ölçümlerde bu gaza yer verilmemiştir.

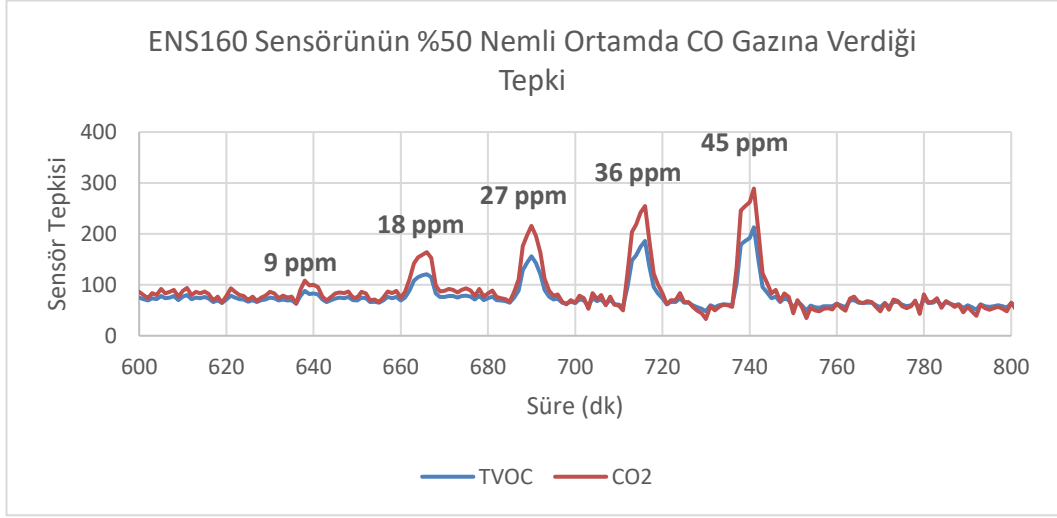
İlk test ölçümü %50 nemli ortamda ve ortalama 22 °C’de gerçekleştirilmiştir. Bu koşullar altında yapılan test ölçümlerine şu şekilde devam edilmiştir:

Tekrarlı ölçümler yapılarak sensörlerin tepkileri incelenmiştir. Bu incelemelere göre;

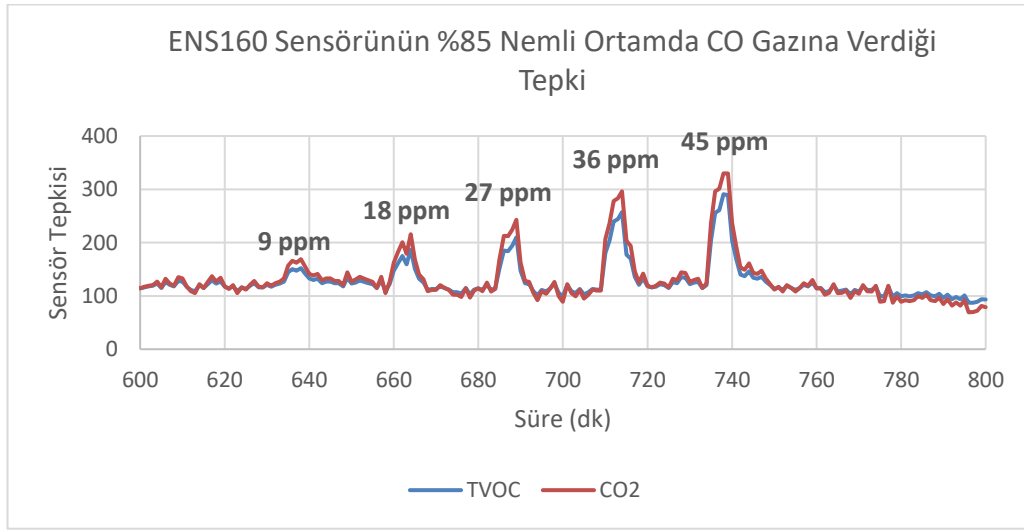
- Farklı zamanlarda yapılan aynı nem şartları altındaki ölçümlerin tekrarlanabilirlik ve doğruluk özellikleri hakkında bilgiler edinilmiştir.
- Farklı zamanlarda yapılan farklı nem şartları altındaki ölçümlerin tekrarlanabilirlik ve doğruluk özellikleri hakkında bilgiler edinilmiştir.

4.1. ENS160 SENSÖR ÖLÇÜMLERİ

Yapılan farklı gaz ölçümlerinde en yüksek ve anlamlandırabilir tepkileri CO gazına karşı verdiği gözlemlenmiştir. ENS160 Sensörü 2 ayrı ölçüm sonucu vermektedir. TVOC ve CO₂ çıktıları, CO gazı için çok benzerdir. ENS160 Sensörü, CO gazına karşı %50 ve %85 nemli ortam koşullarında farklı zamanlarda yapılan 4 ayrı ölçümde artan konsantrasyona bağlı olarak artan sensör tepkileri vermiştir. Bu ölçümler ve sensör tepkileri EK tablolarında verilmiştir.

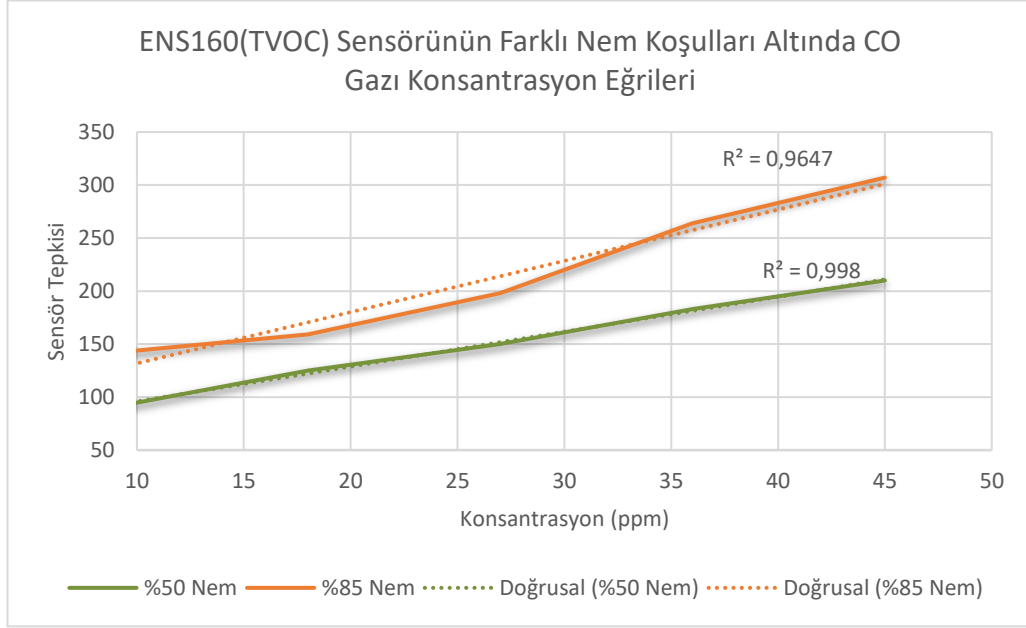


Şekil 4. 1: ENS160 Sensörünün %50 Nemli Ortamda CO Gazına Verdiği Tepki



Şekil 4. 2: ENS160 Sensörünün %85 Nemli Ortamda CO Gazına Verdiği Tepki

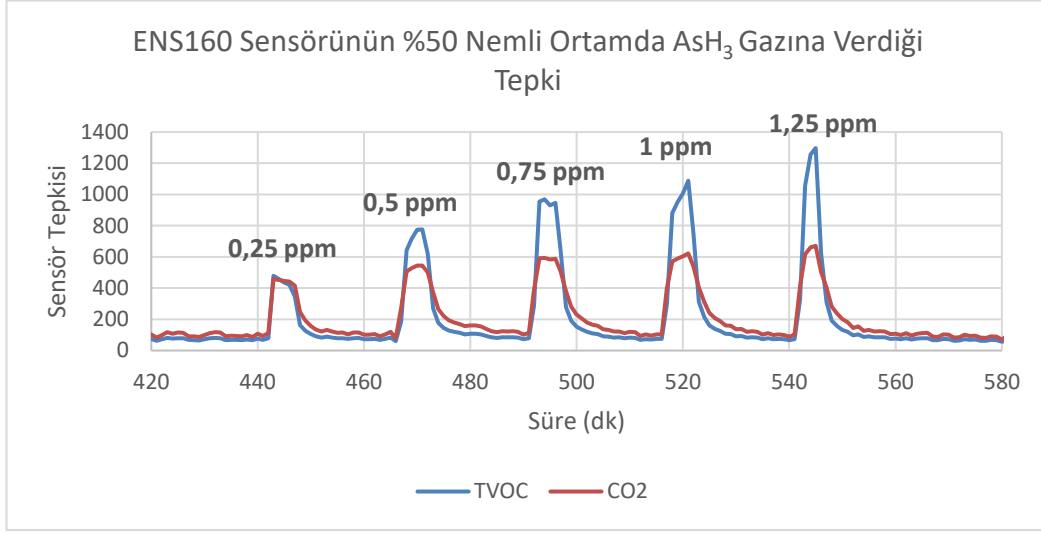
Yukarıdaki ENS160 sensörünün tepki grafikleri incelendiğinde artan konsantrasyon değerine karşılık sensör tepkisinin de doğrusal bir şekilde arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlardan yola çıkarak sensörün konsantrasyon eğrisi çizilmiştir. R değeri, deneysel bir verinin doğrusal bir eğriye ne kadar uyumlu olduğu hakkında bilgi verir. R değeri 1'e çok yakın çıkmıştır. Bu değerinin 1'e yakınlığı arttıkça deneysel verinin doğrusallığının da arttığını gösterir.



Şekil 4. 3: ENS160 Sensörün Farklı Nem Ortamlarında CO Gazı Tepkilerinin Karşılaştırması

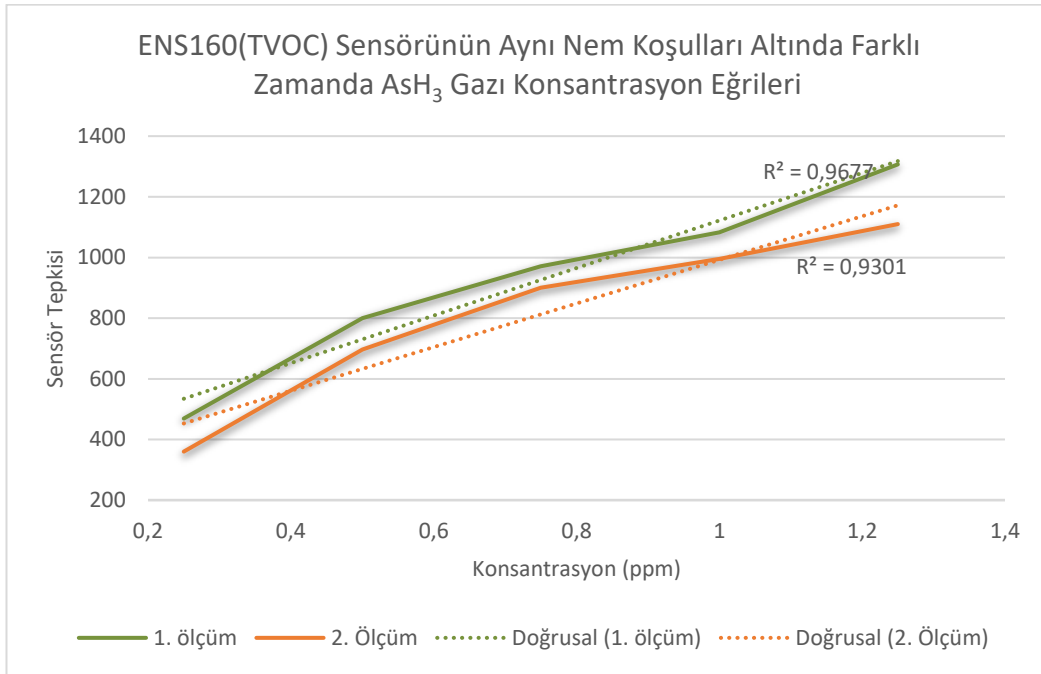
ENS160 sensörünün %50 ve %85 nem ortamında CO gazı tepkilerinin grafikleri gösterilmiştir. Bu grafikten anlaşılacağı gibi sensör farklı nem ortamlarında benzer davranmakta ve lineerliği değişmemektedir. %85 nem ortamında sensör çıktısında bir artış gözlemlenmiştir fakat lineerlik ve doğrusallık durumları benzerdir. CO gazı tepki süreleri yaklaşık 33 sn ve geri dönüş süreleri yaklaşık 140 sn olarak hesaplanmıştır.

ENS160 sensörü AsH_3 gazına %50 nemli ortamda yüksek doğrusallıkta ve anlamlandırılabilir tepki vermiştir, %85 nemli ortamda konsantrasyon değeri ilk değerlerde artış gösterse de daha sonradan azalan değerde tepki göstermiştir. ENS160 Sensörünün, AsH_3 ölçümlerinde %50 nemli ortamda anlamlı ve lineer tepki verdiği tespit edilmiştir.



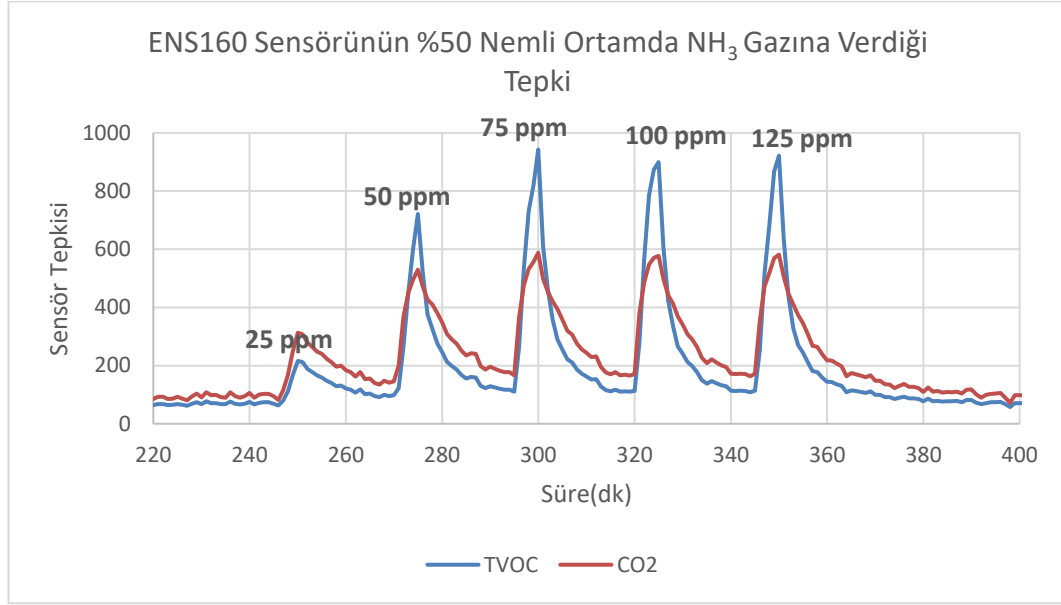
Şekil 4. 4: ENS160 Sensörünün %50 Nemli Ortamda AsH₃ Gazına Verdiği Tepki

ENS160 sensörü, %50 nem şartlarında farklı zamanlarda yapılan ölçümlerde oldukça benzer sonuçlar vermiştir. Bu şartlarda yapılan ölçümlerden elde edilen konsantrasyon Eğrileri aşağıdaki gibidir:



Şekil 4. 5: ENS160 Sensörün Aynı Nem Ortamlarında Farklı Zamanlarda AsH₃ Gazı Tepkilerinin Karşılaştırması

Şekil 4.5'ten anlaşılacağı gibi ENS160 Sensörü AsH_3 tepkilerinde R^2 değeri 1'e oldukça yakındır. AsH_3 gazı tepki süreleri yaklaşık 33 sn ve geri dönüş süreleri yaklaşık 140 sn olarak hesaplanmıştır.

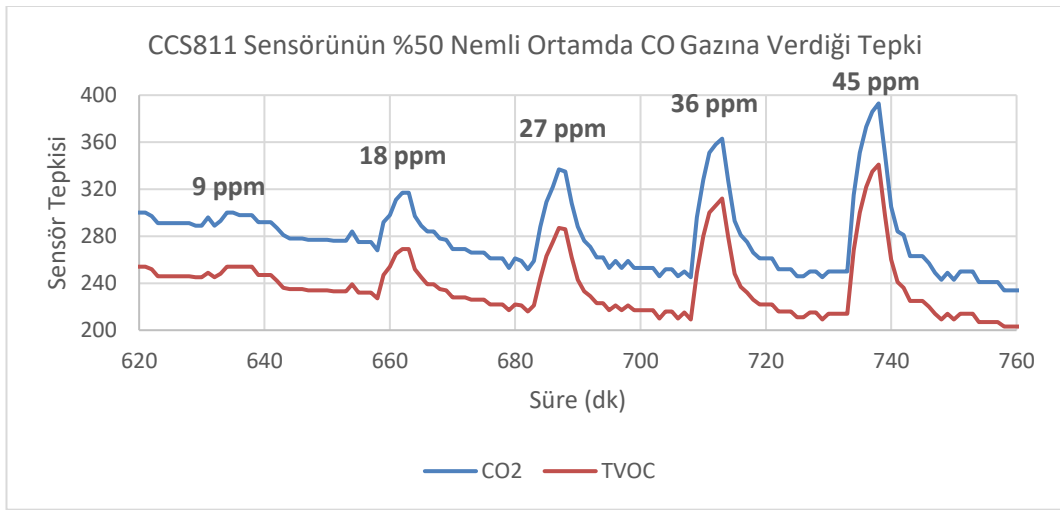


Şekil 4. 6: ENS160 Sensörünün %50 Nemli Ortamda NH_3 Gazına Verdiği Tepki

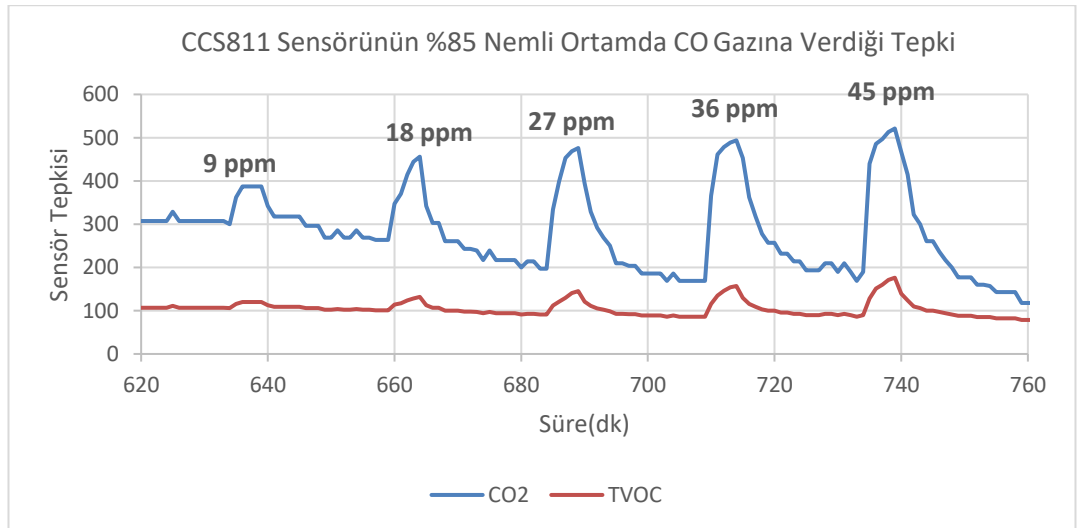
Şekil 4.8'de ENS160 sensörünün NH_3 gazına ilk 3 konsantrasyon değerinde doğrusal tepki vererek daha sonrasında artan konsantrasyonlarda azalarak sabit kaldığı görülmüştür. ENS160 sensörü TVOC ve CO_2 sensörü olarak üretilmiş olsa da farklı bir gaz olan amonyağa lineer ve anlamlı tepkiler verebildiği tespit edilmiştir. NH_3 gazı ölçümlerinde ENS160 sensörünün 25-75 ppm konsantrasyonları arası daha doğru değerler üretebilir kanısına varılmıştır.

4.2. CCS811 SENSÖR ÖLÇÜMLERİ

CCS811 sensörü yine ENS160 gibi 2 adet sensör çıktısı vermektedir. CCS811 sensör tepkileri incelendiğinde yine en çok CO gazına tepki verdiği tespit edilmiştir. CO gazı için farklı nem şartları altında benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. AsH₃ gazı için sadece %50 nemli ortamda doğrusal bir tepki vermiştir.



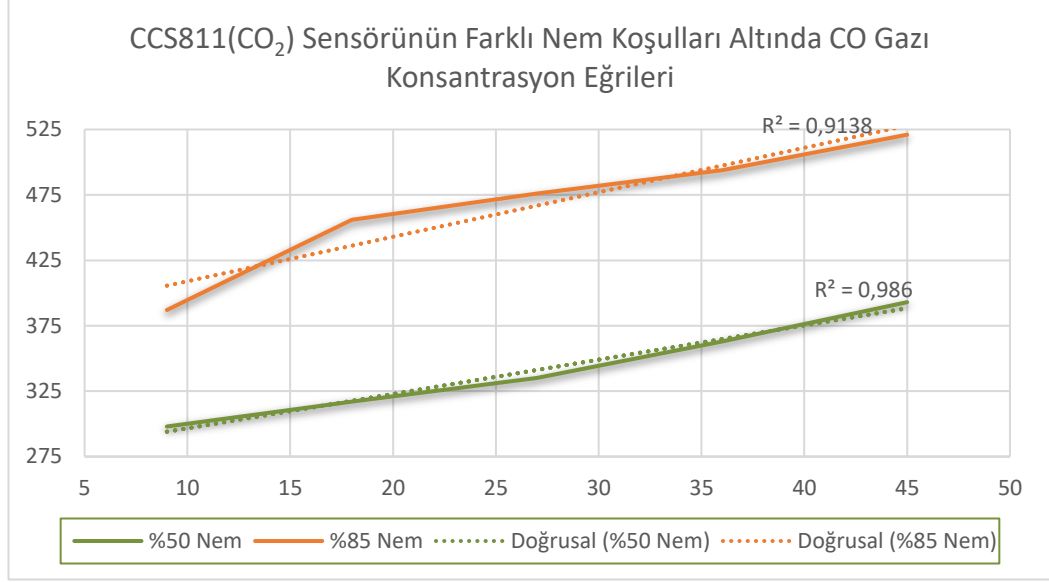
Şekil 4. 7: CCS811 Sensörünün %50 Nemli Ortamda CO Gazına Verdiği Tepki



Şekil 4. 8: CCS811 Sensörünün %85 Nemli Ortamda CO Gazına Verdiği Tepki

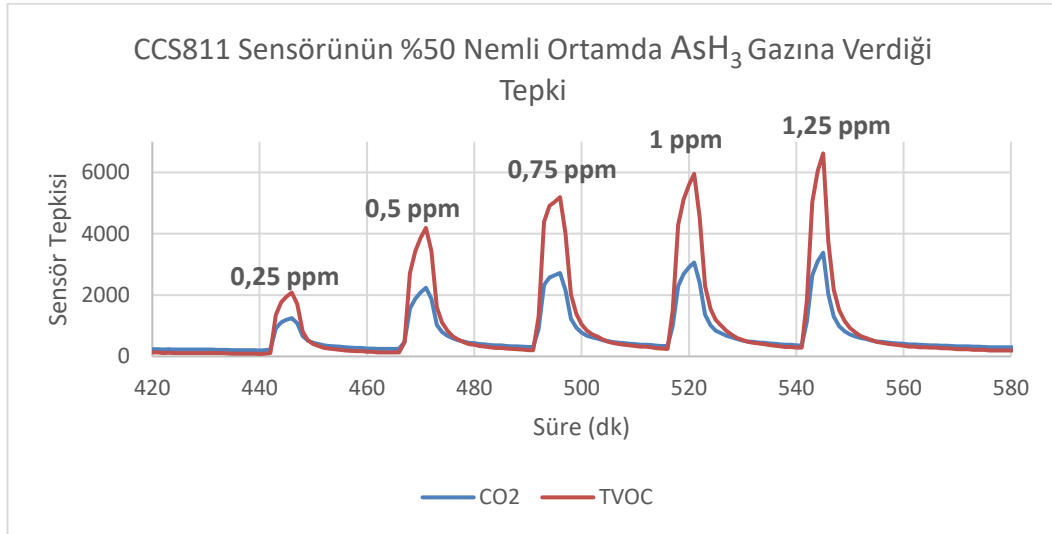
Yukarıda verilen %50 ve %85 nem ortamındaki sensör tepkileri incelendiğinde artan konsantrasyon değerine karşılık sensör tepkisinin de doğrusal bir şekilde arttığı

tespit edilmiştir. Bu sonuçlardan yola çıkarak sensörün konsantrasyon eğrisi çizilmiştir.



Şekil 4. 9: CCS811 Sensörün Farklı Nem Ortamlarında CO Gaz Tepkilerinin Karşılaştırması

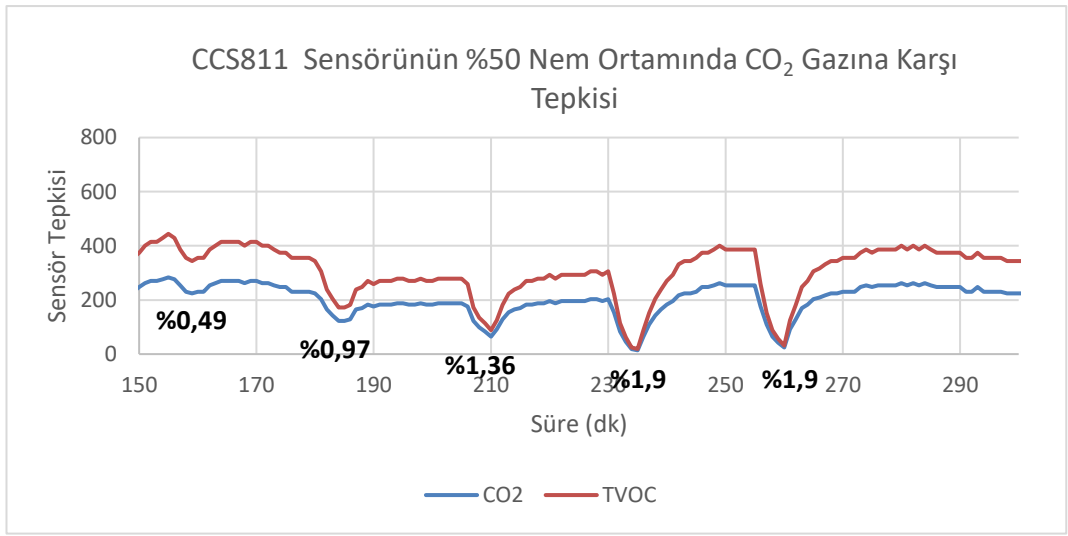
CCS811 sensörünün CO gazı tepki süreleri yaklaşık 160 sn ve geri dönüş süreleri yaklaşık 154 sn olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4. 10: CCS811 Sensörünün %50 Nemli Ortamda AsH₃ Gazına Verdiği Tepki

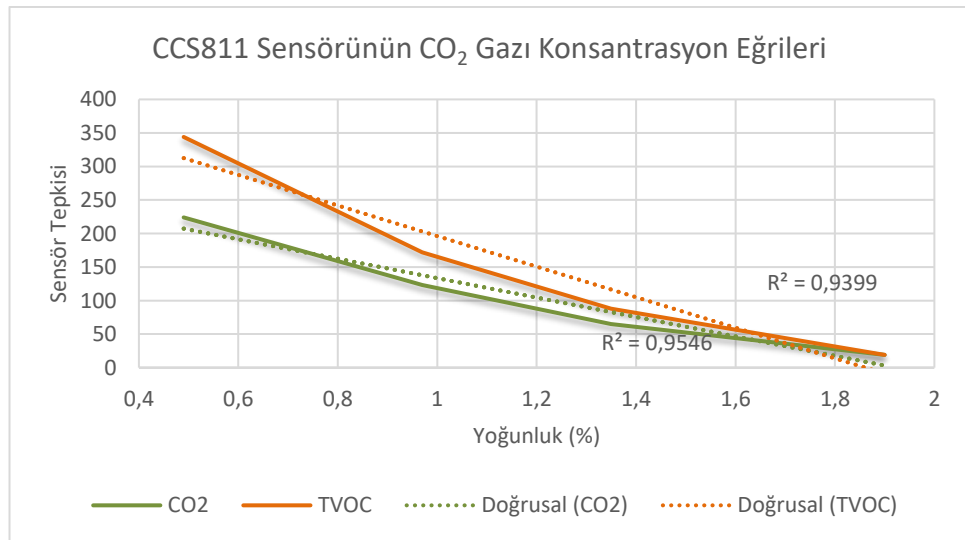
Aynı nem şartları altında farklı zamanlarda yapılan CCS811 sensörünün ilk AsH₃ ölçümünde CO₂ ve TVOC çıktısının R² değeri 0,93'tür. İkinci AsH₃ ölçümünde CO₂ ve TVOC çıktısının R² değeri 0,96 ve 0,98'dir. Her iki ölçüm çıktılarının R² değerleri 1'e oldukça yakındır.

CO₂ gazı ile yapılan ölçümlerde CCS811 sensörünün nitelikli bir tepki verdiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Verilen % CO₂ değerleri grafikte belirtilmiştir.



Şekil 4. 11: CCS811 Sensörünün %50 Nem Ortamında CO₂ Gazına Karşı Tepkisi

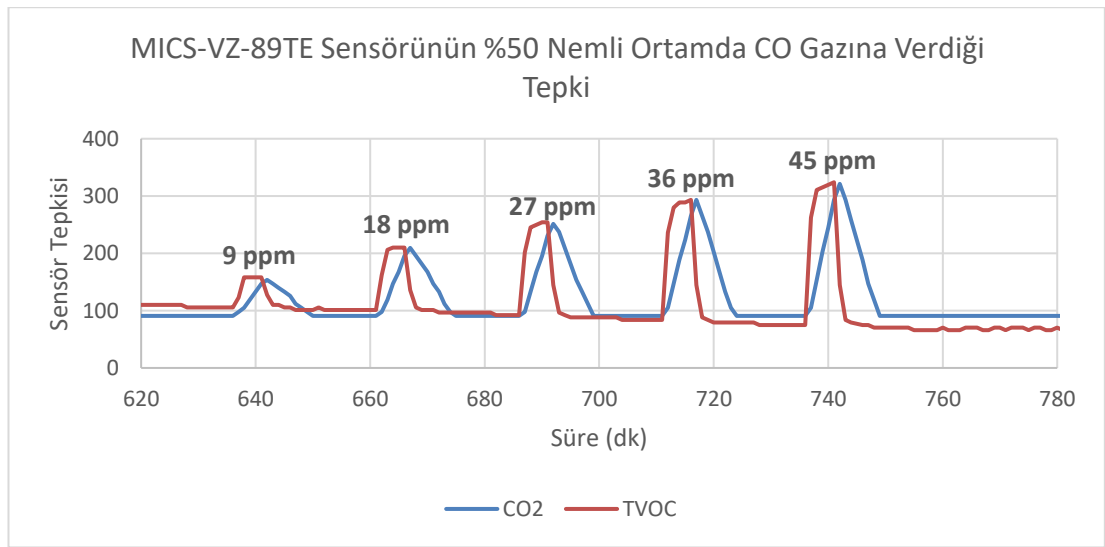
Bu grafikteki değerlere göre çizilmiş kalibrasyon eğrisi aşağıdaki gibidir:



Şekil 4. 12: CCS811 Sensörünün CO₂ Gazı Konsantrasyon Eğrileri

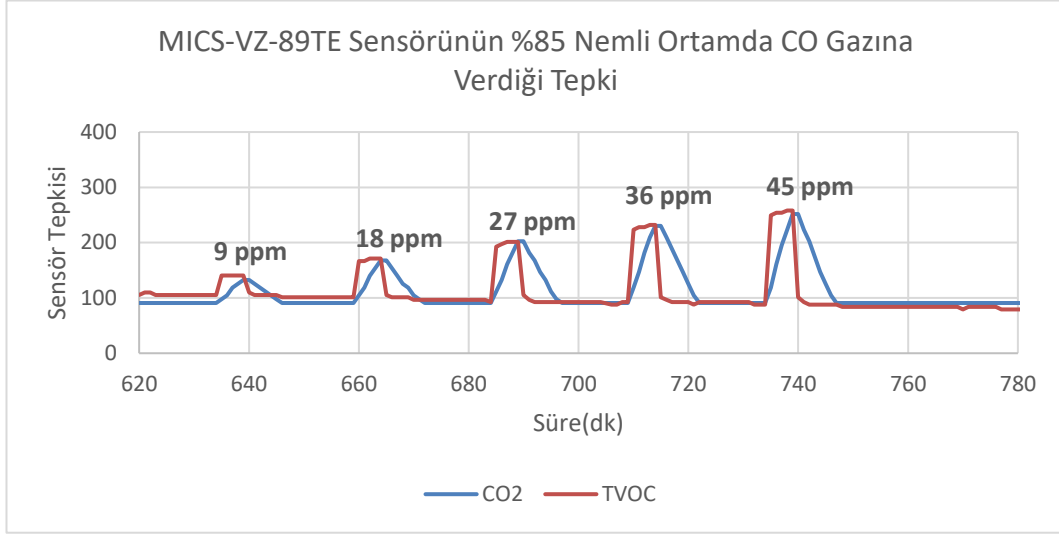
4.3. MICS-VZ-89TE SENSÖR ÖLÇÜMLERİ

MICS-VZ-89TE sensörü de 2 adet sensör çıktısı vermektedir. Sensör tepkileri incelendiğinde iki sensör çıktısının CO gazına doğrusal ve anlamlı tepki verdiği tespit edilmiştir. CO gazı için farklı nem şartları altında benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. AsH₃ gazı için sadece TVOC çıkışı anlamlandırılabilir doğrusal tepkiler vermiştir.



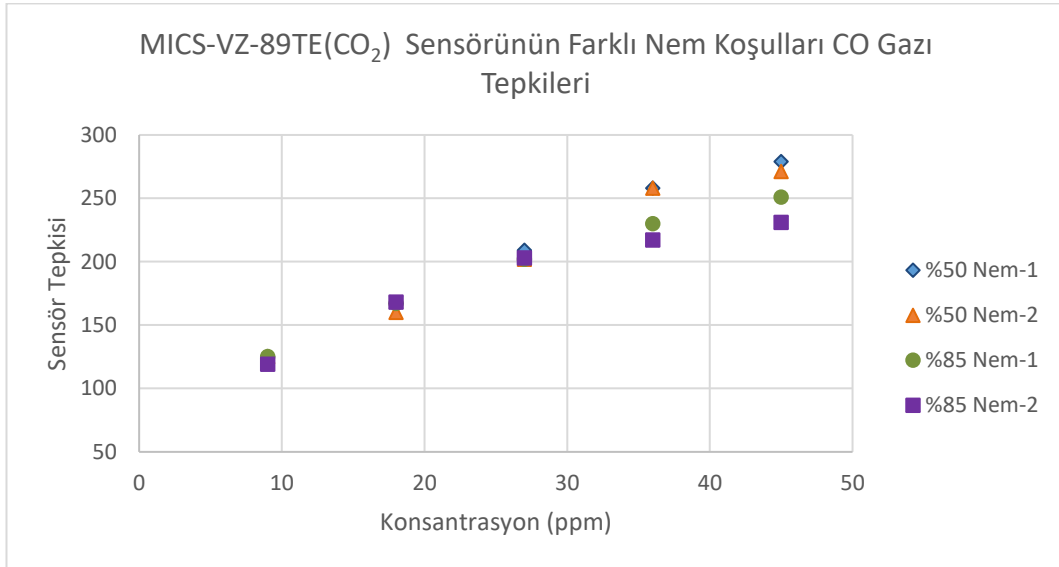
Şekil 4. 13: MICS-VZ-89TE Sensörünün %50 Nemli Ortamda CO Gazına Verdiği Tepki

MICS-VZ-89TE Sensörünün 2 farklı çıkışının CO gazına karşı davranışında tepki verme süresi geri dönüşüm sürelerinin farkı grafiklerden anlaşılmaktadır. TVOC sensör çıkışı doygunluğa ulaşmış ve geri dönüşüm aşamasına geçmişken CO₂ sensörü tepki verme sürecini devam ettirmektedir. MICS-VZ-89TE CO₂ sensörünün tepki verme süresi 16 sn ve geri dönüş süresi 50 sn olarak hesaplanmıştır, TVOC sensörüne göre daha kısadır.

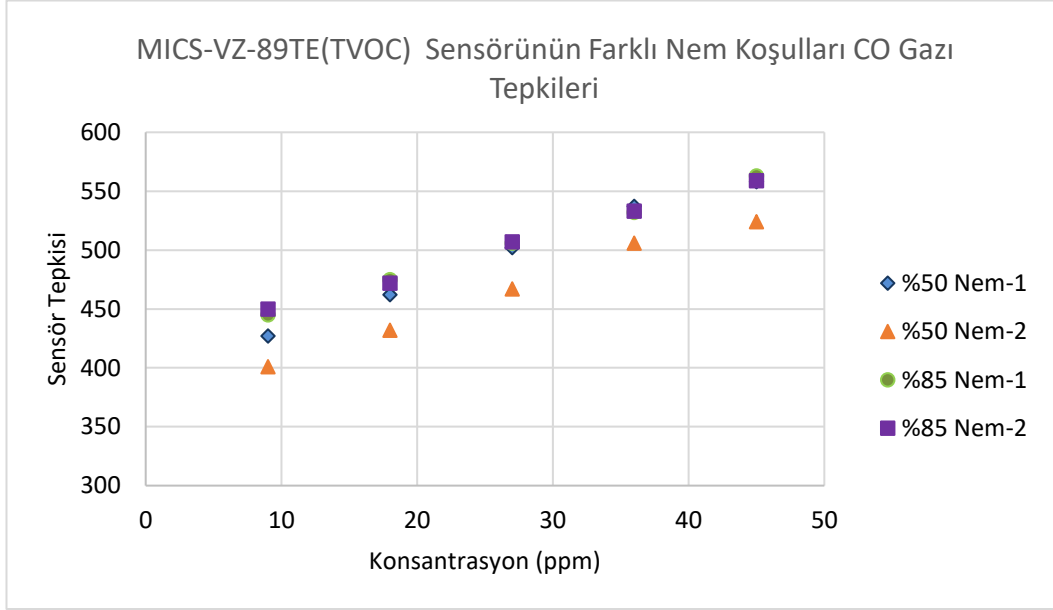


Şekil 4. 14: MICS-VZ-89TE Sensörünün %85 Nemli Ortamda CO Gazına Verdiği Tepki

MICS-VZ-89TE Sensörü, farklı nem ortamlarında benzer sonuçlar vermiştir. Aynı şartlarda farklı zamanlarda yapılan ölçümlerde oldukça benzer sonuçlar vermiştir. Fakat artan konsantrasyon değerlerinde (30 ppm'den sonra) tepki noktalarının birbirinden biraz uzaklaştığı gözlemlenmiştir.

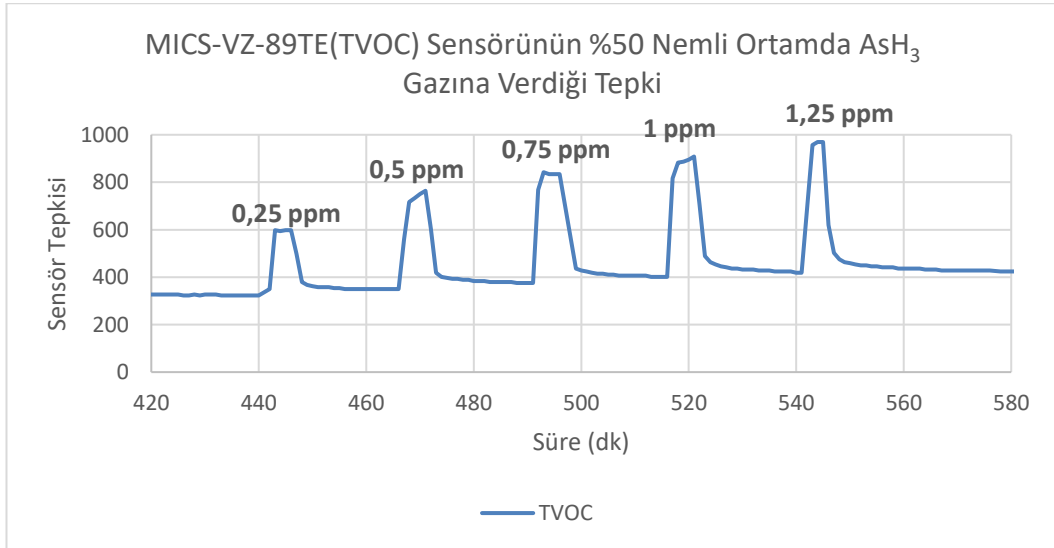


Şekil 4. 15: MICS-VZ-89TE(CO₂) sensörünün farklı nem ortamlarında CO tepkilerinin karşılaştırılması



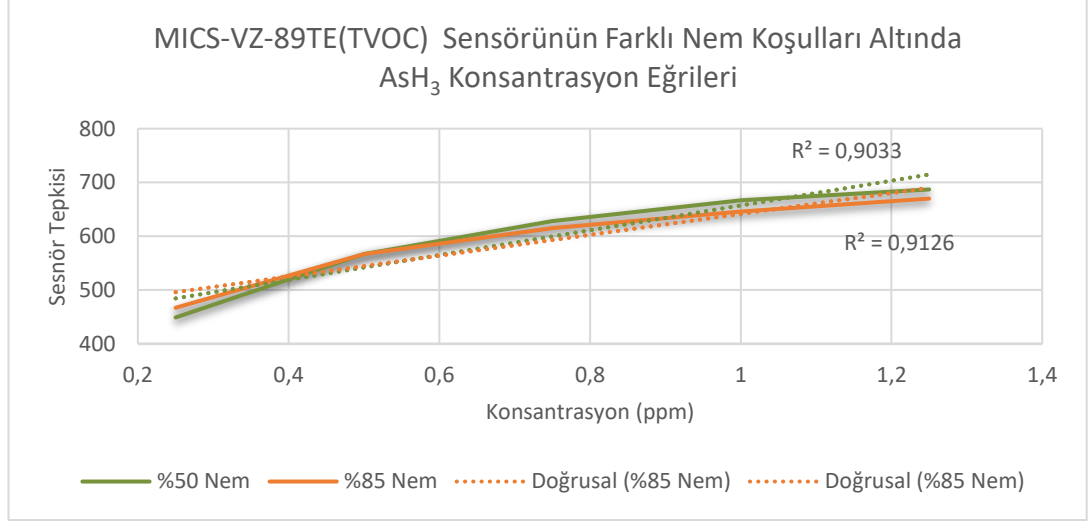
Şekil 4. 16: MICS-VZ-89TE(TVOC) sensörünün farklı nem ortamlarında CO tepkilerinin karşılaştırılması

MICS-VZ-89TE CO₂ sensörü AsH₃ gazına doğrusal tepkiler vermemiştir. Fakat TVOC sensöründe AsH₃ gazı %50 ve %85 nemli ortamlarda benzer tepkiler vermiştir.



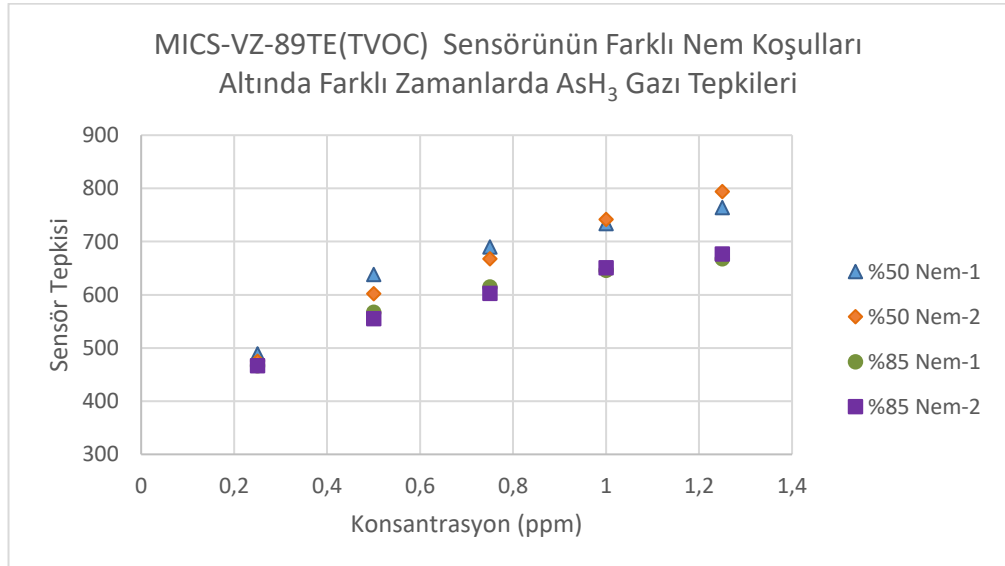
Şekil 4. 17: MICS-VZ-89TE Sensörünün %50 Nemli Ortamda AsH₃ Gazına Verdiği Tepki

MICS-VZ-89TE TVOC sensörü AsH_3 gazı %50 ve %85 nemli ortamlarda benzer tepkiler vermiştir. Artan konsantrasyona bağlı sensör çıktı grafiklerinde R^2 değerleri 1 değerine oldukça yakındır.



Şekil 4. 18: MICS-VZ-89TE (TVOC) Sensörünün Farklı Nem Koşulları Altında AsH_3 Gazı Tepkileri

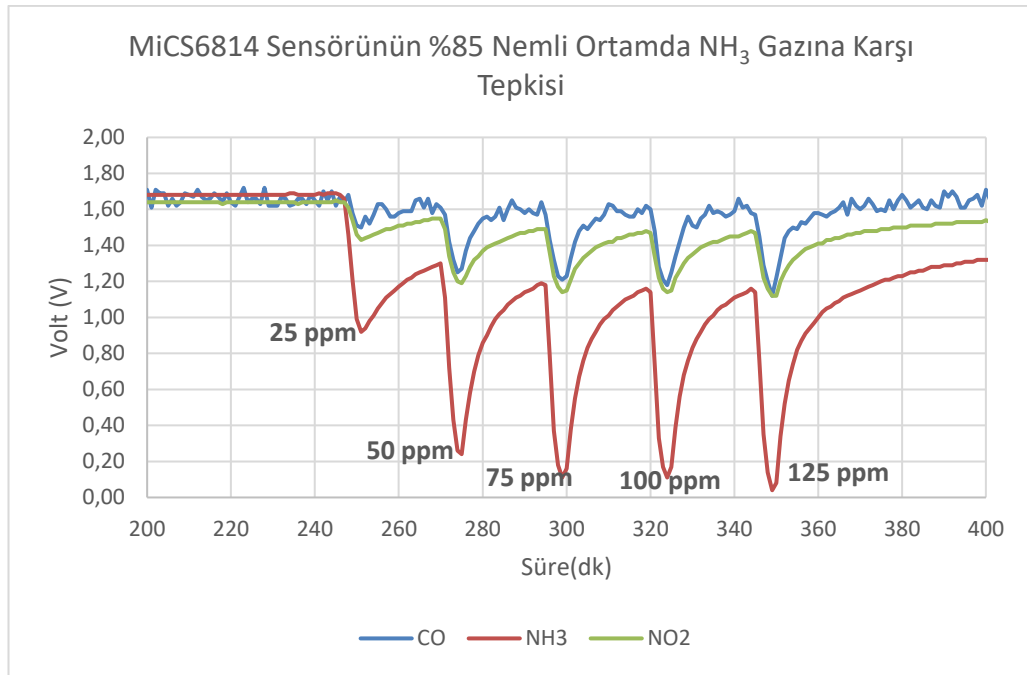
MICS-VZ-89TE sensörü AsH_3 gazı tepkilerinin %85 nemli ortamda, %50 nemli ortama göre tepkilerin birbirine çok daha yakın olduğu gözlemlenmiştir.



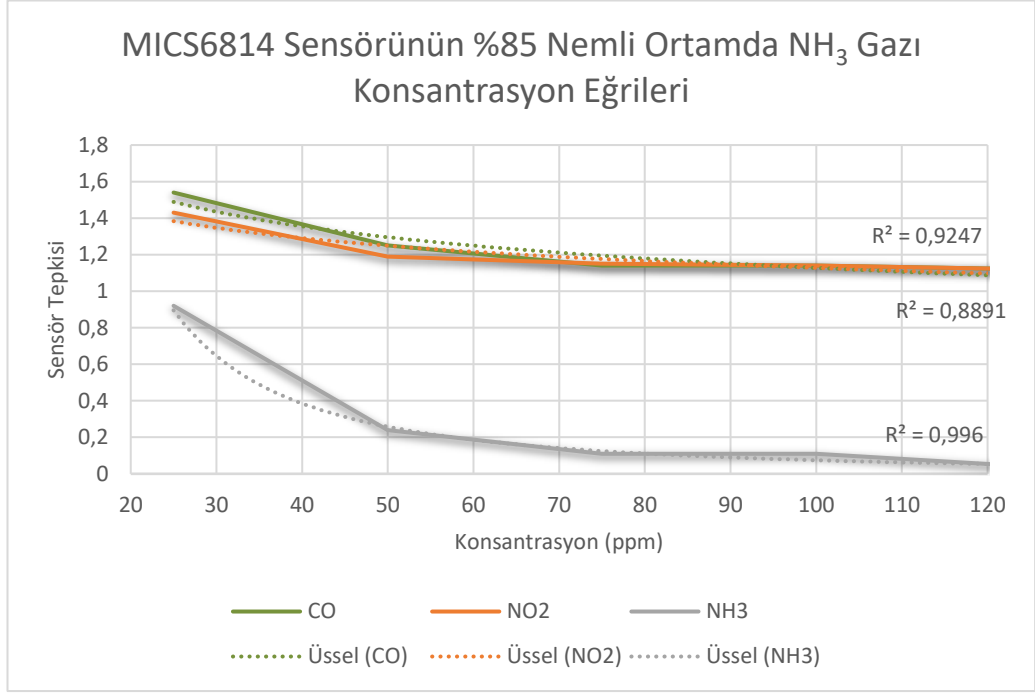
Şekil 4. 19: MICS-VZ-89TE sensörünün Farklı Nem Ortamlarında AsH_3 Tepkilerinin Karşılaştırılması

4.4. MICS6814 SENSÖR ÖLÇÜMLERİ

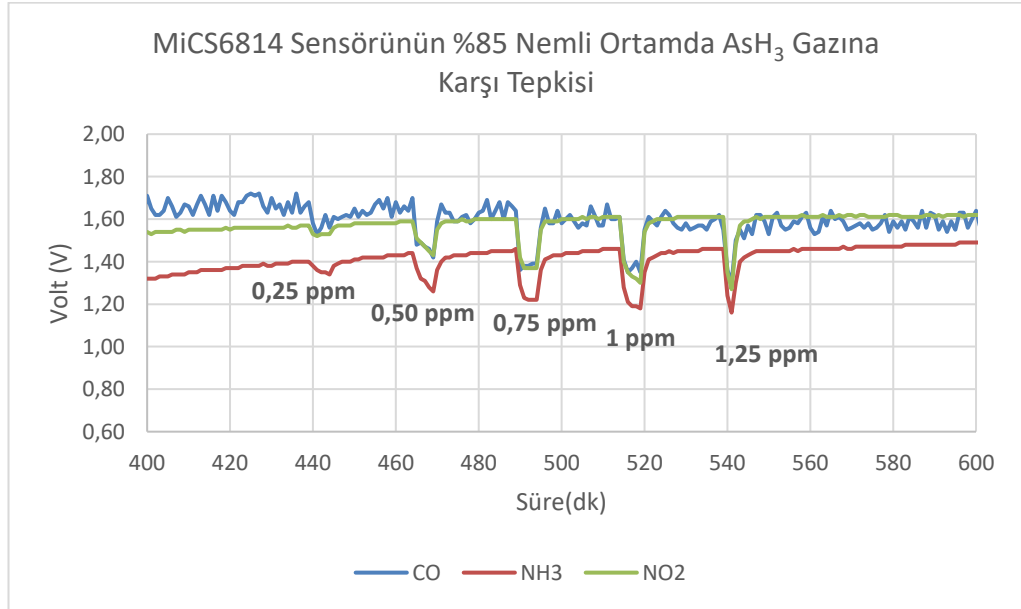
MiCS 6814 Modülü 3 ayrı sensöre sahiptir. Bunlar CO, NH₃, NO₂ sensörleridir. Yapılan farklı zaman ve farklı nem şartlarında tekrarlanabilir olarak anlamlı ve nitelikli sensör tepkileri verebildiği gözlemlenmiştir. Yapılan ölçümlere göre NO₂, CO, NH₃ ve AsH₃ gazlarına anlamlı ve doğrusal tepkiler vermiştir. MiCS6814 sensörünün NH₃ gazına verdiği tepki diğer sensörlerden farklı olarak doğrusal ve pozitif bir artış söz konusu değildir. Üssel ve negatif yönde artan bir konsantrasyon eğrisi verdiği tespit edilmiştir. R² değerleri aşağıdaki grafik üzerinde belirtilmiştir.



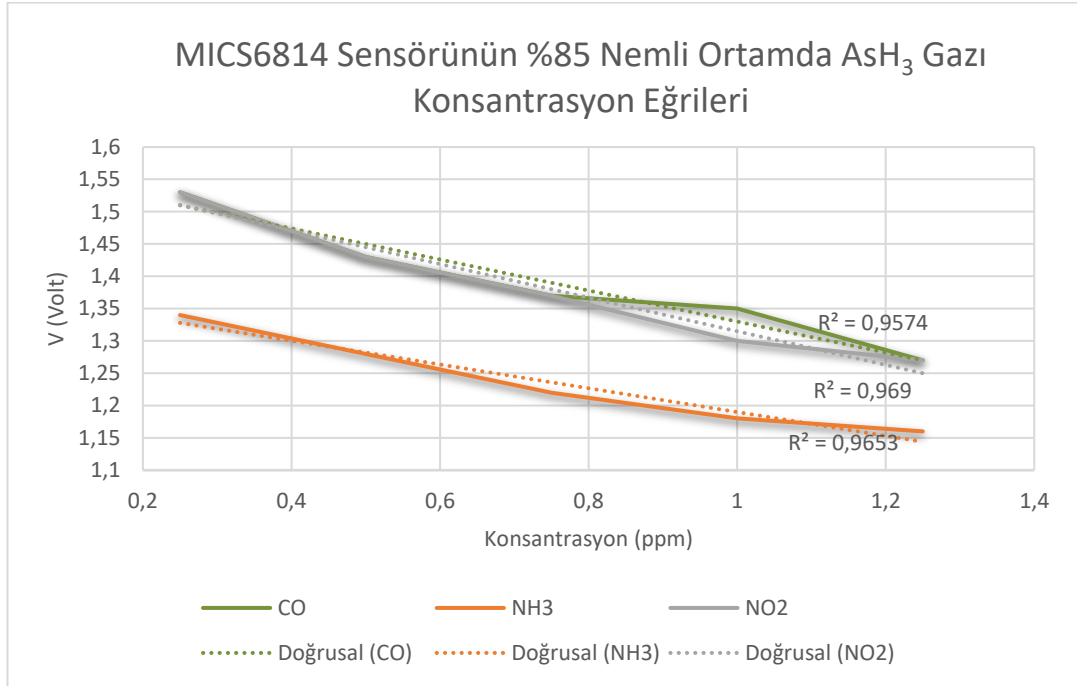
Şekil 4. 20: MiCS6814 Sensörünün %85 Nemli Ortamda NH₃ Gazına Karşı Tepkisi



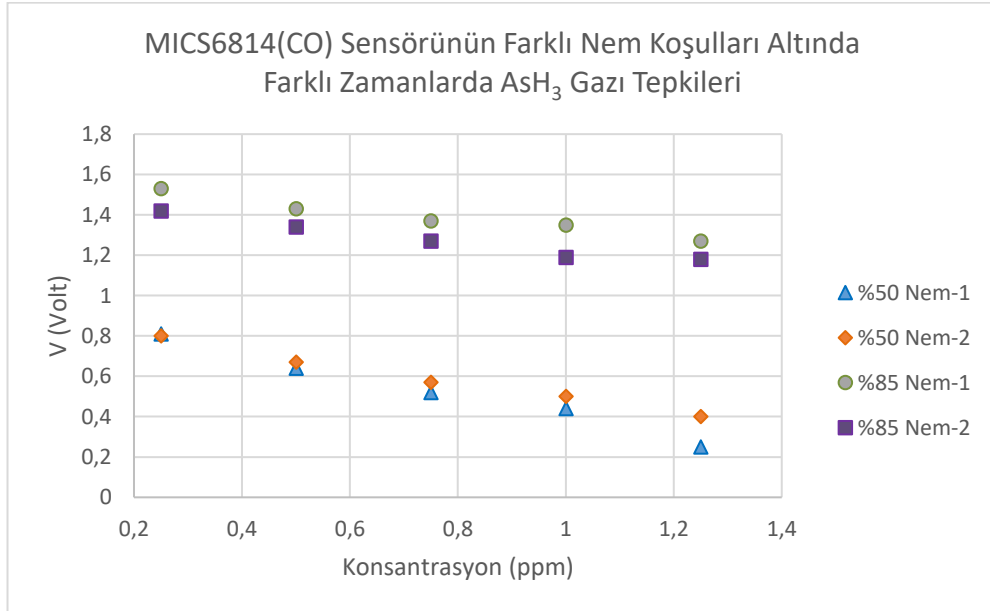
Şekil 4. 21: MICS6814 Sensörünün %85 Nemli Ortamda NH₃ Gazı Konsantrasyon Eğrileri



Şekil 4. 22: MiCS6814 Sensörünün %85 Nemli Ortamda AsH₃ Gazına Karşı Tepkisi

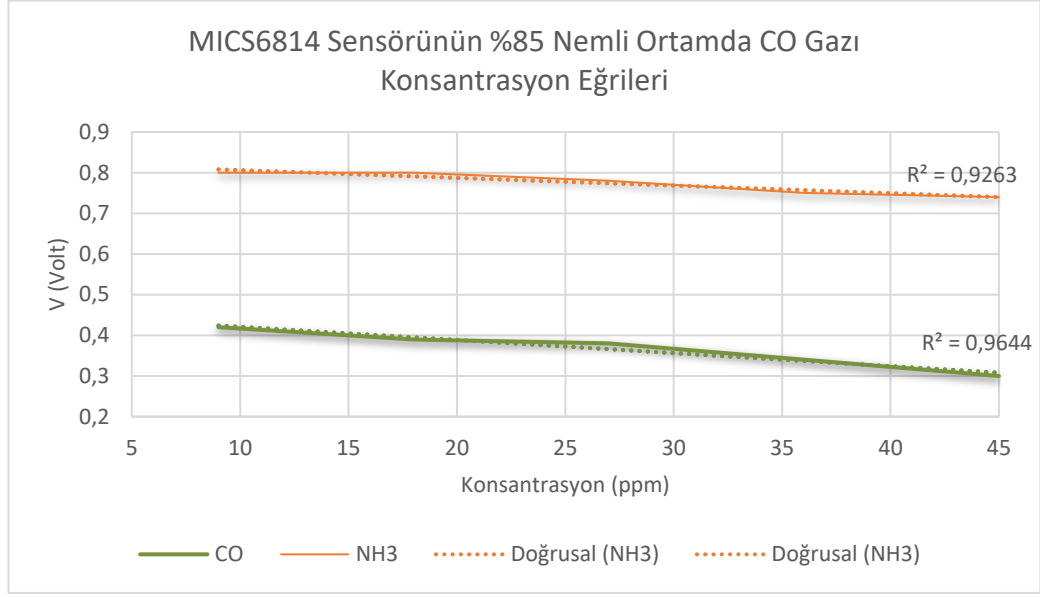


Şekil 4. 23: MICS6814 Sensörünün %85 Nemli Ortamda AsH₃ Gazı Konsantrasyon Eğrileri



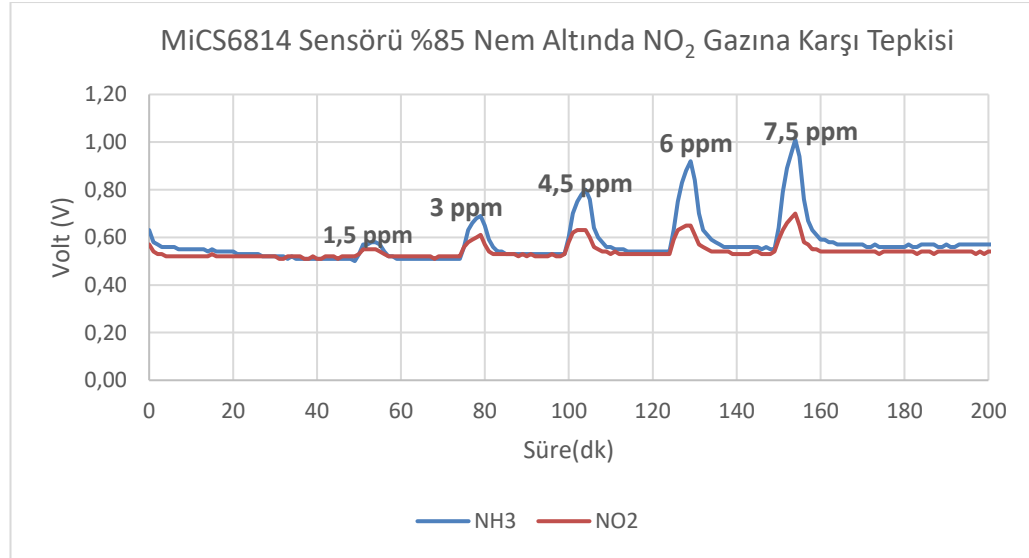
Şekil 4. 24: MICS6814(CO) Sensörünün Farklı Nem Koşulları Altında Farklı Zamanlarda AsH₃ Gazı Tepkileri

MICS6814(CO) Sensörü farklı nem koşulları altındaki ölçümlerde AsH₃ gazına karşı farklı tepkiler vermiştir. Bu farklılık sensör çıktı değerlerinde olsa da doğrusallık açısından benzerlikleri yüksektir.



Şekil 4. 25: MICS6814 Sensörünün %85 Nemli Ortamda CO Gazı Konsantrasyon Eğrileri

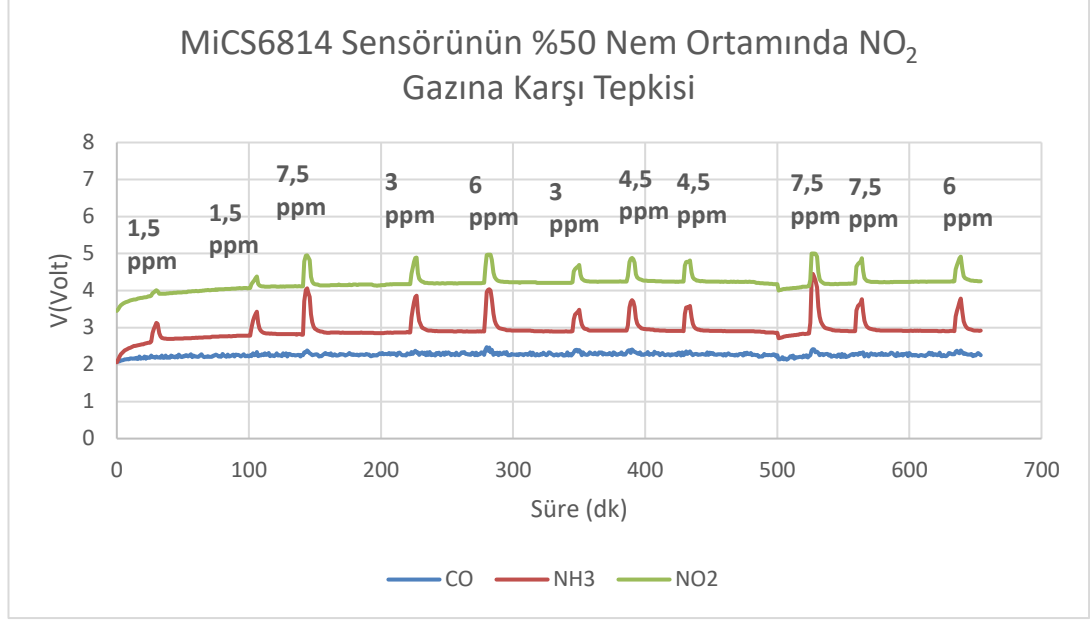
MiCS6814 Sensörü, NO₂ gazına %85 nemli ortamlarda yapılan ölçümlerin sadece bir tanesinde doğrusal tepki vermiştir.



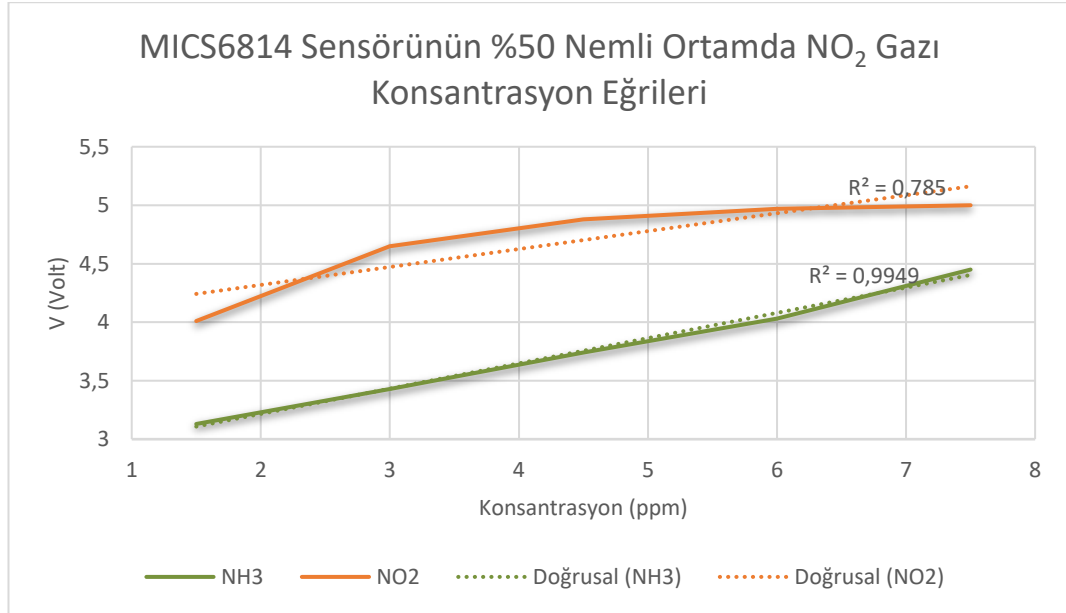
Şekil 4. 26: MiCS6814 Sensörü %85 Nem Altında NO₂ Gazına Karşı Tepkisi

Ayrıca yapılan sıralı gaz ölçümlerinin yanı sıra NO₂ ölçümleri tek başına tekrar yapılmıştır. Ölçümlerde her seferinde taze gaz olduğundan emin olunmuştur. Bu

ölçümlerde MiCS6814 NH₃ ve NO₂ sensörünün NO₂ gazına yüksek doğrusalıkta anlamlandırılabilir çıktılar verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 27: MiCS6814 Sensörünün %50 Nem Ortamında NO₂ Gazına Karşı Tepkisi



Şekil 4. 28: MiCS6814 Sensörünün %50 Nemli Ortamda NO₂ Gazı Konsantrasyon Eğrileri

Bu grafikteki R² değerleri dikkate alındığında MiCS6814 NH₃ Sensörünün NO₂ gazı konsantrasyonlarını yüksek doğruluk oranında ölçtüğü anlaşılmaktadır.

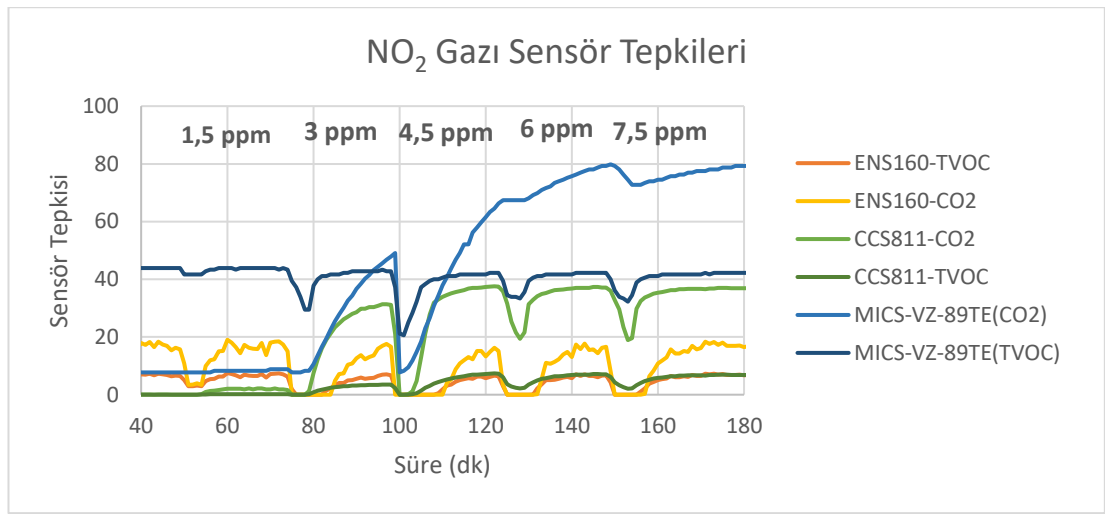
Bu grafiklerdeki sensör çıktılarının değişimine göre tepki gösterilen gazların durumu daha detaylı incelenmiştir. Buna göre sensörlerin hangi gaza karşı duyarlı olduğu incelenerek artan konsantrasyon değerlerine göre doğrusal bir çıkış değeri gözlemlenen sensörler tespit edilmiş ve Tablo 4.1’de belirtilmiştir.

Tablo 4. 1: Sensör Gaz Konsantrasyonu Ölçümlerinde Doğrusal Tepki Veren Sensörler

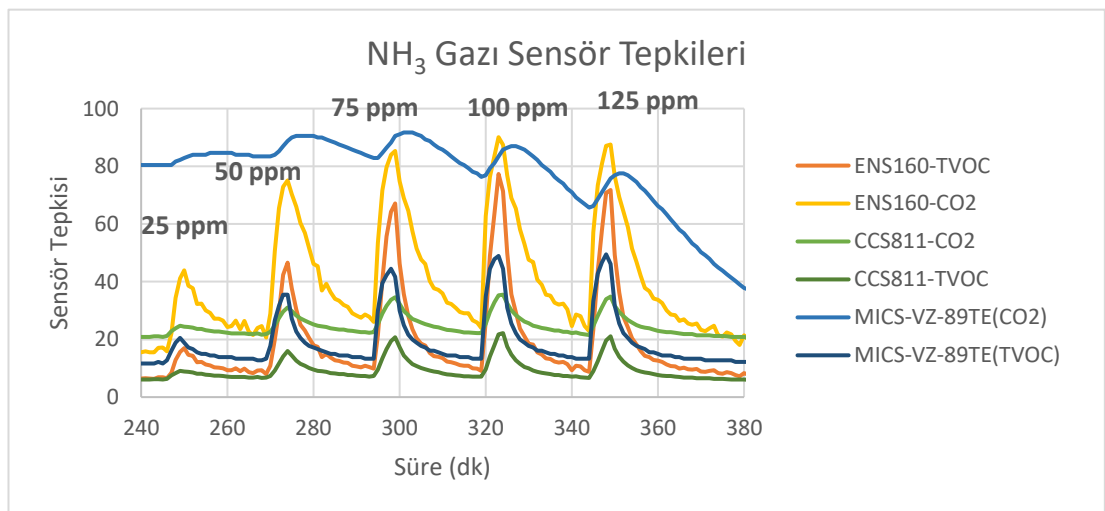
Sensörler	Konsantrasyon Ölçümü Yapılan Toksik Gazlar					
	NH ₃	SO ₂	AsH ₃	NO ₂	CO	CO ₂
ENS160 TVOC Sensörü	+	-	+	-	+	-
ENS160 CO2 Sensörü	+	-	+	-	+	-
CCS811 CO2 Sensörü	+	-	+	-	+	+
CCS811 TVOC Sensörü	+	-	+	-	+	+
MICS 89TE CO2 Sensörü	-	-	-	-	+	-
MICS 89TE TVOC Sensörü	+	-	+	-	+	-
MICS 6814 CO Sensörü	+	-	+	-	+	-
MICS 6814 NH3 Sensörü	+	-	+	+	+	-
MICS 6814 NO2 Sensörü	+	-	+	+	-	-

4.5. SENSÖR PERFORMANSLARI

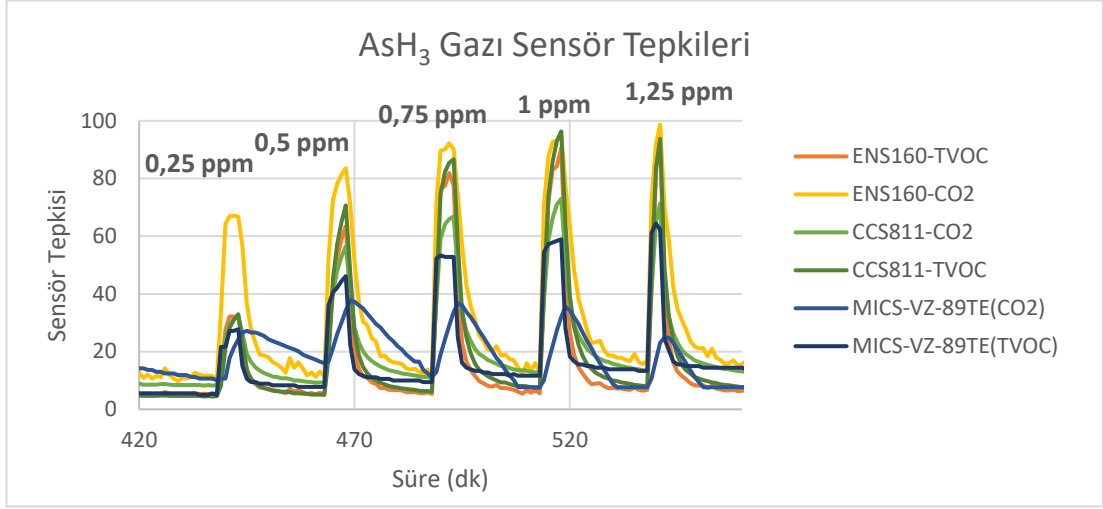
Yapılan ölçümler sonucu sensör-gaz tepkileri incelendiğinde hangi gaza hangi sensörün en iyi tepki verdiğini gözlemleyebilmek için sensör yanıtları belirli bir aralıkta normalize edilerek sensör yanıtlarının zamana göre grafikleri oluşturulmuştur. Sırasıyla NO₂, NH₃, AsH₃, CO gazlarına karşı %50 bağıl nem ortamındaki sensör performansları verilmiştir. MiCS6814 sensörünün çıkış sinyali tepkisi diğer sensörlerden farklı olduğu için ayrıca grafikleri oluşturulmuştur.



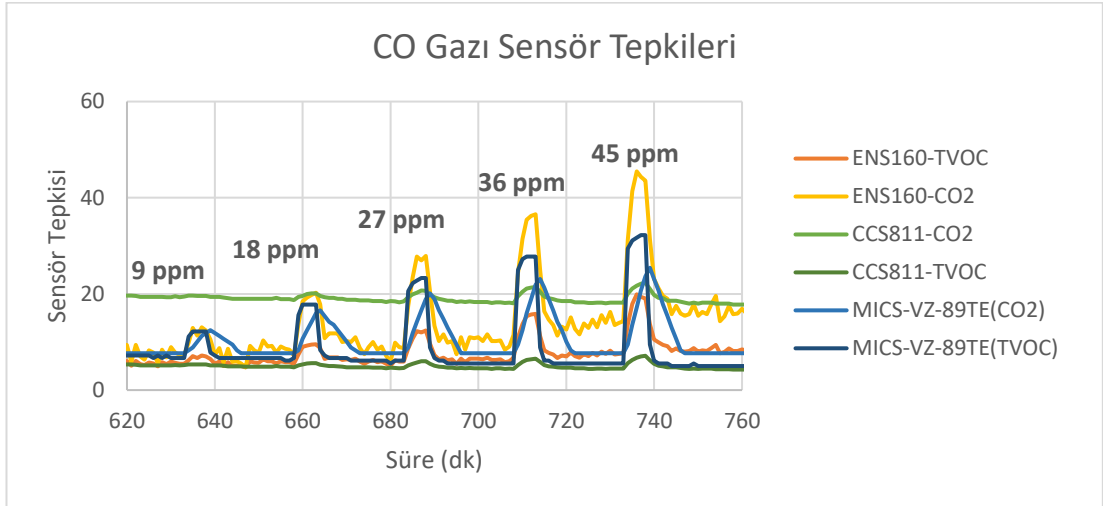
Şekil 4. 29: NO₂ Gazına Karşı Sensör Tepkileri



Şekil 4. 30: NH₃ Gazına Karşı Sensör Tepkileri



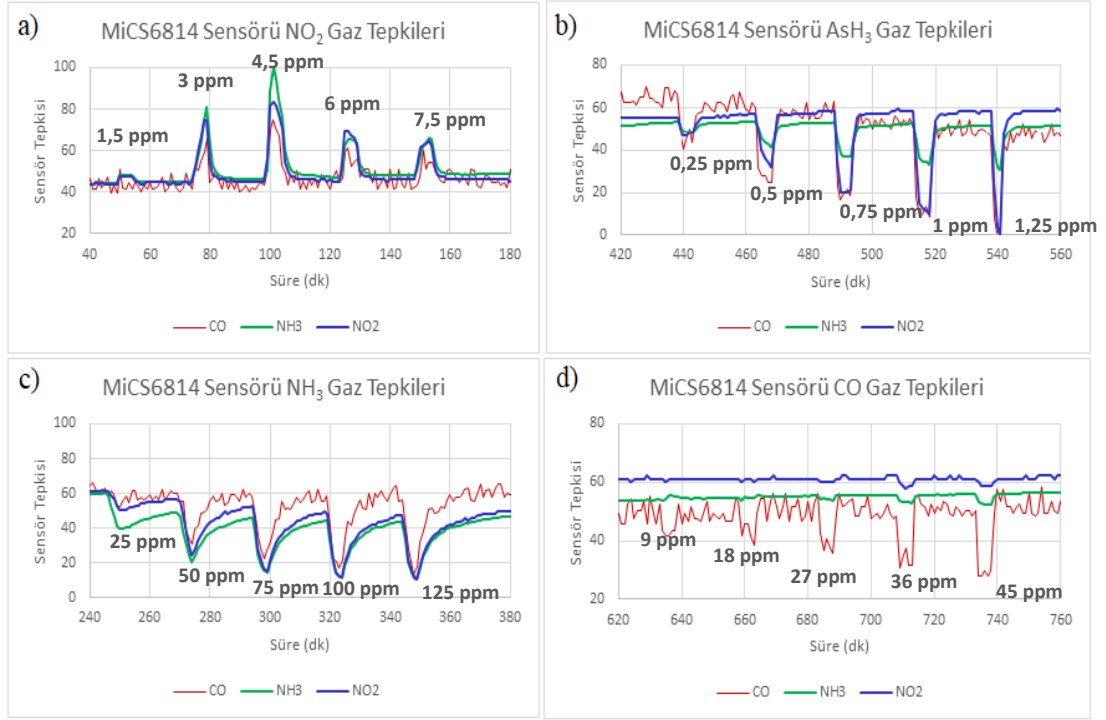
Şekil 4. 31: AsH₃ Gazına Karşı Sensör Tepkileri



Şekil 4. 32: CO Gazına Karşı Sensör Tepkileri

Yukarıdaki grafikler incelendiğinde en yüksek ve lineer tepkilerin AsH₃ ve CO gazlarına verildiği gözlemlenmektedir. MiCS-VZ-89TE CO₂ Sensörü dışındaki tüm sensörler AsH₃ gazına oldukça anlamlı ve doğrusal tepkiler vermiştir. CO gazına ise tüm sensörler tepki vermiştir en iyi tepkiyi ENS160-CO₂ sensörü vermiştir.

NH₃ gazına seçilen konsantrasyon değerlerinden belirli konsantrasyon aralıklarında test edilen sensörlerden ENS160 ve MiCS-VZ-89TE'nin lineer ve anlamlı tepkiler verdiği görülmüştür.



Şekil 4. 33: a) MiCS6814 Sensörünün NO₂ Gazına Karşı Tepkisi, b) MiCS6814 Sensörünün NH₃ Gazına Karşı Tepkisi, c) MiCS6814 Sensörünün AsH₃ Gazına Karşı Tepkisi, d) MiCS6814 Sensörünün CO Gazına Karşı Tepkisi

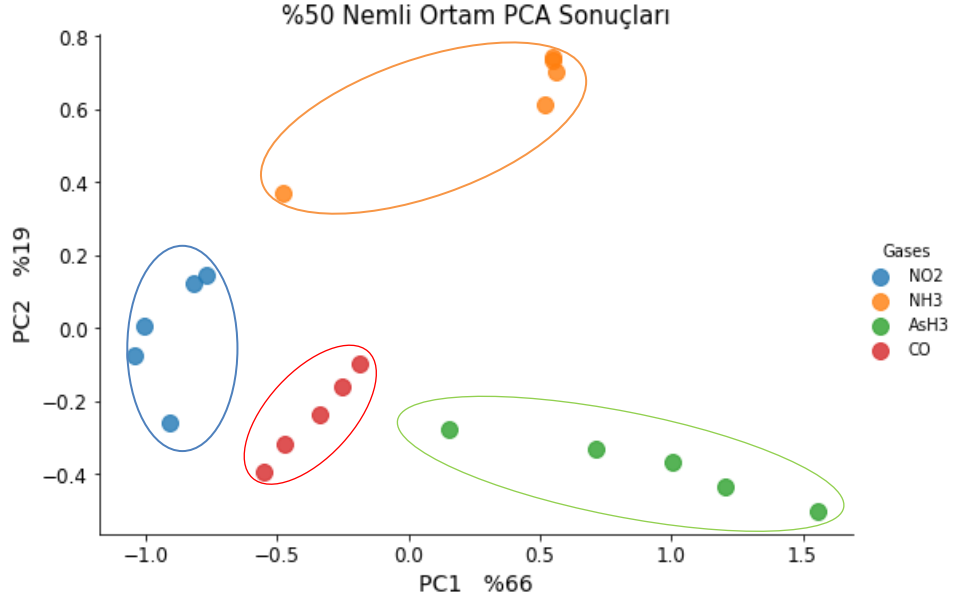
MiCS6814 sensör modülündeki CO, NH₃, NO₂ sensörleri farklı gazlara yüksek doğrusallıkta anlamlandırılabilir tepkiler vermiştir. Gazların ölçüm konsantrasyonları grafik üzerindeki gibidir. CO sensörü; CO gazının yanı sıra AsH₃, NH₃ ve NO₂ gazlarına anlamlı tepkiler üretmiştir. NH₃ sensörü; NH₃ gazının yanı sıra NO₂ ve AsH₃ gazlarına anlamlı tepkiler üretmiştir. NO₂ sensörü; NO₂ gazına ve NH₃ ve AsH₃ gazlarına anlamlı tepkiler üretmiştir.

4.6. PCA SONUÇLARI

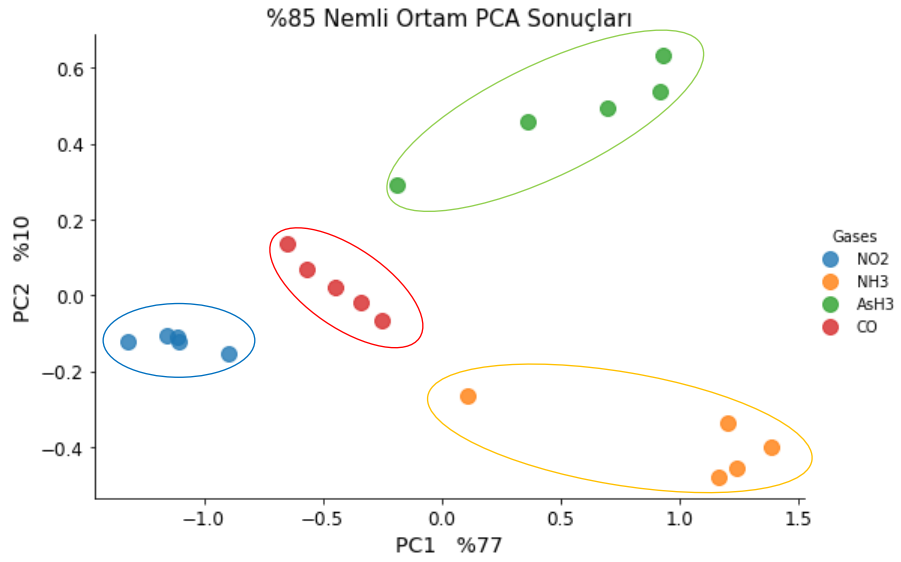
PCA işlemlerini yaparken EK kısmında bulunan tablolardan yola çıkılmıştır. Ölçüm test sonuçlarına göre hazırlanan tablolarda artan konsantrasyon değerlerine göre 9 adet sensörün çıktı verileri listelenmiştir.

PCA işleminden önce bu tablo verileri için ön işleme adımları gerçekleştirilmiştir. Ön işleme adımlarında dataya normalizasyon ve standardizasyon

işlemleri uygulanmıştır. Aşağıdaki grafiklerde %50 ve %85 nemli ortamlardaki PCA sonuçları verilmektedir.



Şekil 4. 34 %50 Nemli Ortamda Yapılan Ölçümün PCA Sonuçları



Şekil 4. 35: %85 Nemli Ortamda Yapılan Ölçümün PCA Sonuçları

Tablo 4. 2: PCA Sonuçlarının Karşılaştırılması

	%50 Nem Altında PCA Sonuçları			%85 Nem Altında PCA Sonuçları	
	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 1	Ölçüm 2
PCA1	%66	%65	%69	%75	%77
PCA2	%19	%20	%20	%14	%10
PCA3	%10	%1	%1	%1	%1
TOPLAM	%95	%86	%90	%90	%88

Yapılan PCA çalışmaları sonucunda veri setindeki 4 adet gaz bileşenlerinin tamamen ayrılıp tanımlandığı Tablo 4.2’de görüldüğü gibi tespit edilmiştir. %50 nemli ortamda yapılan ilk ölçümde temel bileşenler (PCA1, PCA2 ve PCA3) %66, %19 ve %10 olarak bulunmuştur. Toplamda %95 oranında bir bilgi ile tanımlama yapılmıştır. Diğer iki tekrarlı ölçümdeki temel bileşen oranları bu kadar yüksek olmasa da %80 oranının üstündedir ve yine benzer şekilde bileşenlerin birbirinden ayrılabilirdiği gözlemlenmiştir. %85 nemli ortamda %75, %14 %1 olan skorlar %90 oranında bir bilgi ile sınıflandırma gerçekleştirilmiştir.

SONUÇ

Tez çalışması kapsamında toksik endüstriyel gaz konsantrasyonlarının sensör dizilimleri ile ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerden ulaşılan sonuçlarla birlikte Temel Bileşenler Analizi yöntemi kullanılarak bu çalışmadaki ölçümü yapılan gazların test konsantrasyonlarının, TWA ve STEL değerlerine yakın konsantrasyonlar olmasına dikkat edilerek ayarlanmıştır. Test yaparken kullanılan konsantrasyonlar bu toksik gazların kısa süreli maruz kalma limitlerine yakın değerlerdir.

Bu kapsamda yapılan ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde ENS160 Sensör modülünün NH_3 , AsH_3 ve CO gazlarında %50 ve %85 nemli ortamlarda duyarlı olduğu doğrusal ve yüksek performanslı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. %50 ve %85 nem ortamlarında sensörlerin verdiği tepki değerlerinin değiştiği gözlemlenmiştir, bu sensör çıktılarındaki farklılık lineerliği etkilememiştir.

CCS811 Sensör modülünün CO_2 , AsH_3 ve CO Gazlarında %50 ve %85 nemli ortamda yine anlamlı tepkiler verdiği tespit edilmiştir. Bu sensör CO_2 gazına anlamlandırılabilir tepkiler vermiştir. Verdiği tepkilerden oluşturulan konsantrasyon eğrisi doğrusala çok yakındır, bu da CCS811 sensörünün CO_2 gaz konsantrasyon ölçümlerinde yüksek performans göstereceğini kanıtlamıştır. AsH_3 ve CO gaz konsantrasyon ölçümlerinde de yine doğrusal çıktılar elde edilmiştir.

MiCS-VZ-89TE Sensör modülünün AsH_3 ve CO gazlarında %50 ve %85 nemli ortamda duyarlı olduğu, farklı zamanlarda yapılan farklı ölçümlerde sensör çıktı değerlerinde farklılıklar söz konusu olsa bile yine doğrusal ve anlamlı konsantrasyon eğrileri verdiği gözlemlenmiştir. Tekrarlanabilirlik açısından güvenilir bir sensördür. Ayrıca CCS811 ve ENS160 sensörüne göre tepki verme süresi daha azdır. Hızlı bir sensördür.

MiCS6814 Sensör modülünün NH_3 , NO_2 , AsH_3 ve CO gazlarında %50 ve %85 nemli ortamda duyarlı olduğu tespit edilmiştir. Farklı gazlara farklı ortamlarda en yüksek performanslı ölçümleri yapan sensördür. Tepki süresi 14 sn ve geri dönüş süresi 32 sn olarak hesaplanmıştır. Geliştirilen sistemdeki en hızlı sensördür.

Bu çalışma kapsamında elde edilen gaz konsantrasyonu değerleri ilerleyen aşamalarda istenilen şekilde kullanılabilir veya gorselleştirilebilir. Örneğin, LCD ekran veya seri monitör aracılığıyla bu konsantrasyon değerleri görüntülenebilir veya başka bir cihaz veya sisteme aktarılabilir.

KAYNAKÇA

- Altın, Ş. (2015). *Hava Kirliliğine Neden Olan Gazların Algılanmasına Yönelik Sensörlerin Geliştirilmesi*. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Altın, Ş. (2015). Hava Kirliliğine Neden Olan Gazların Algılanmasına Yönelik Sensörlerin Geliştirilmesi. İstanbul.
- B.R. Mehta, Y. R. (2015). *Industrial Process Automation Systems Chapter 6: Fire and Gas Detection System*. Butterworth-Heinemann.
- Bagherzadeh, M. H. (2013). Electrochemical Detection of Dopamine Based On Pre-concentration by Graphene Nanosheets. *138(20)*, 6044-6051. İngiltere: Analyst.
- Dunteman, G. H. (1989). *Principal Components Analysis*. United States of America: SAGE Publications.
- Fatah, A. A., Jr., R. D., Ewing, K. J., Lattin, C. H., & Helinski, M. S. (2000). Guide for the Selection of Chemical and Biological Decontamination Equipment for Emergency First Responders. Washington: National Institute of Justice.
- Güner, U. (2014). *Toksikoloji*. Edirne: Trakya Üniversitesi Fen Fakültesi.
- Harper , A., & Anderson, M. R. (2010). Electrochemical Glucose Sensors— Developments Using Electrostatic Assembly and Carbon Nanotubes for Biosensor Construction. *Sensors*.
- Harrison, R. M. (2019). *Understanding Our Environment: An Introduction to Environmental Chemistry and Pollution* . Royal Society of Chemistry.
- IARC (International Agency for Research on Cancer). (2012). *Chemical Agents and Related Occupations: A review of human carcinogens*. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Hazards to Humans.
- Joseph LaDou, R. H. (2007). *Current Occupational & Environmental Medicine*. New York: McGraw-Hill.
- Journal of the Royal Army Medical Corps. (2002). *Toxic Industrial Chemicals*. New York: BMJ Military Health.
- Lutic, D., Manea, L. R., & Cretescu, I. (2017). *Electrochemical sensors for monitoring of indoor and outdoor air pollution*. *Electrochemical Sensors Technology*.
- Maclean, M. (2020). Raspberry Pi Computing: Gas Sensors. ABD.
- Muhammad Ali Akbar, A. A. (2016). An Empirical Study for PCA and LDA Based Feature Reduction for Gas Identification. *IEEE Sensors Journal*.

- National Institute for Occupational Safety and Health. (2007). *NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards*. Washington, DC: DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES Centers for Disease Control and Prevention National Institute for Occupational Safety and Health .
- Neumann, C. C. (1917-1918). Chemical Warfare in World War 1: The American Experience. ARMY COMMAND AND GENERAL STAFF COLLEGE FORT LEAVENWORTH KS COMBAT STUDIES INST.
- Note. (2010). Electrochemical Sensors Application Note 2 Design of Electronics for Electrochemical Gas Sensors. SGX Sensortech (IS) Ltd.
- Nriago, J. O. (2011). *Encyclopedia of Environmental Health*. Elsevier.
- OSHA. (1994). *Hazard Communication; Final Rule*. Federal Register.
- Plunkett, E. R. (1976). *Handbook of Industrial Toxicology*. United States: Chemical Public Company Limited.
- Rappaport, S. M. (1993). *History and Utility of The Material Safety Data Sheet*. Environmental Health Perspectives.
- Sanjeev Kumar Mishra, R. K. (2011). A Compact Dual-Band Fork-Shaped Monopole Antenna for Bluetooth and UWB Applications. IEEE.
- Smith, L. I. (2002). *A tutorial on Principal Components Analysis*. New Zealand: Department of Computer Science,.
- Steumpfle, A., Armour, S. J., Howells, D. ..., & Boulet, C. A. (1996). International Task Force 25. *Hazard From Industrial Chemicals Final Report*.
- Stradiotto, N. R., Yamanaka, H., & Zanoni, M. V. (2003). Electrochemical sensors: A powerful tool in analytical chemistry. Brasil: Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista.
- Şen, Z. (2010). Petrol Kaynaklı Hidrokarbonlardan Btex Kompleks Gaz Karışımlarının Sınıflandırılması İçin Qcm Gaz Sensör Dizisi Geliştirilmesi. İzmit.
- Vural, N. (2005). *Toksikoloji*. Ankara: Ankara Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Yayınları.

İNTERNET KAYNAKLARI

Url-1 < <https://echa.europa.eu/regulations/legislation> > Erişim Tarihi:
01.09.2022

Url-2 < <https://www.osha.gov/chemical-hazards-and-toxic-substances> >
Erişim Tarihi: 05.09.2022

Url-3 < <https://www.osha.gov/chemical-hazard-toxic-substances> > Erişim
Tarihi:05.09.2022

Url-4 < <https://www.epa.gov/> , <https://tr.wikipedia.org/wiki/> > Erişim
Tarihi:05.09.2022

Url-5 < <https://www.afad.gov.tr/kbrn/kan-zehirleyici-ajanlar> > Erişim
Tarihi:12.09.2022

Url-6 < <https://chem.libretexts.org/> > Erişim Tarihi:12.09.2022

Url-7 < <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/gas-sensors/bme680/> > Erişim Tarihi: 21.03.2023

Url-8 < <https://shop.watterott.com/BME680-Breakout-humidity-pressure-temperature-air-quality-sensor> > Erişim Tarihi: 21.03.2023

Url-9 < <https://ams.com/ccs811> > Erişim Tarihi: 21.03.2023

Url-10 < <https://www.mikroe.com/air-quality-3-click> > Erişim Tarihi:
21.03.2023

Url-11 < <https://fermionics.com/products/sensors/> > Erişim Tarihi: 21.03.2023

Url-12 < <https://www.sgxsensortech.com/> > Erişim Tarihi: 21.03.2023

Url-13 < <https://sensorsandpower.angst-pfister.com/> > Erişim
Tarihi:21.03.2023

Url-14 < <https://tr.wikipedia.org/wiki/Mikrodenetleyici> > Erişim
Tarihi:20.05.2023

Url-15 < <https://www.arduino.cc/> > Erişim Tarihi:04.03.2023

Url-16 < <https://opensource.com/resources/raspberry-pi> > Erişim
Tarihi:04.04.2023

Url-17 < <https://robocraze.com/blogs/post/what-is-bme680-sensor-specification-working> > Erişim Tarihi:24.03.2023

EK-A: SENSÖR ÖLÇÜM VERİLERİ

% 50 Nemli Ortamda Yapılan Ölçüm Verileri (1. Ölçüm)										
Gaz	Gaz Konsantrasyon (ppm)	S1 ENS 160 TVOC	S2 ENS 160 CO ₂	S3 CCS 811 CO ₂	S4 CCS 811 TVOC	S5 MiCS 89TE CO ₂	S6 MiCS 89TE TVOC	S7 MiCS 6814 CO	S8 MiCS 6814 NH ₃	S9 MiCS 6814 NO ₂
NO ₂	1,5	56	86	266	41	567	270	1,16	1,51	1,36
	3	67	90	1570	694	1042	270	1,35	2,52	1,62
	4,5	79	112	1546	657	1140	279	1,31	2,5	1,62
	6	81	119	1526	625	1182	279	1,17	1,64	1,5
	7,5	85	135	1514	586	1182	279	1,17	1,55	1,41
NH ₃	25	223	311	1593	734	1259	353	1,04	0,73	1,71
	50	855	558	1932	1385	1350	541	0,71	0,08	0,9
	75	822	555	1949	1492	1322	558	0,71	0	0,87
	100	803	544	1885	1320	1217	558	0,71	0	0,87
	125	747	530	1844	1192	1063	567	0,65	0	0,87
AsH ₃	0,25	469	456	2331	2331	679	541	0,81	0,81	1,14
	0,5	800	545	3400	4559	791	711	0,64	0,64	1
	0,75	971	594	3919	5444	805	777	0,52	0,52	0,88
	1	1083	614	4055	6183	770	847	0,44	0,44	0,76
	1,25	1307	671	4568	7079	735	912	0,25	0,25	0,61
CO	9	91	91	1338	360	455	406	0,82	1,08	1,26
	18	125	129	1344	385	504	458	0,81	1,08	1,26
	27	150	221	1356	399	546	502	0,74	1,05	1,26
	36	183	272	1369	413	595	541	0,72	1,05	1,26
	45	210	306	1377	424	619	563	0,68	1,04	1,26

% 50 Nemli Ortamda Yapılan Ölçüm Verileri (2. Ölçüm)										
Gaz	Gaz Konsantrasyon (ppm)	S1 ENS160 TVOC	S2 ENS160 CO	S3 CCS811 CO₂	S4 CCS811 TVOC	S5 MiCS 89TE CO₂	S6 MiCS 89TE TVOC	S7 MiCS 6814 CO	S8 MiCS 6814 NH₃	S9 MiCS 6814 NO₂
NO₂	1,5	71	102	0	0	105	345	1,07	1,2	0,93
	3	77	116	76	0	105	341	1,22	2,08	1,22
	4,5	74	106	1096	169	566	336	2,28	2,59	2,25
	6	70	102	1308	347	783	332	1,17	1,66	1,16
	7,5	74	102	1298	336	936	332	1,16	1,66	1,1
NH₃	25	172	275	1377	252	999	397	0,9	0,7	0,83
	50	512	470	1567	763	1062	515	0,71	0,19	0,61
	75	738	526	1732	928	1076	585	0,64	0	0,53
	100	850	564	1756	1040	1027	611	0,57	0	0,5
	125	778	545	1710	1010	908	624	0,53	0	0,5
AsH₃	0,25	350	420	1961	1577	307	489	0,8	0,94	0,8
	0,5	697	523	2847	3381	447	638	0,67	0,74	0,67
	0,75	900	565	3177	4144	426	690	0,57	0,77	0,57
	1	995	600	3423	4606	419	734	0,5	0,51	0,5
	1,25	1067	618	3367	4482	293	764	0,4	0,4	0,4
CO	9	71	113	1208	247	140	410	0,82	1,1	0,9
	18	105	158	1227	269	182	454	0,82	1,1	0,9
	27	132	200	1245	287	224	498	0,77	1,09	0,9
	36	174	260	1273	312	259	533	0,72	1,05	0,9
	45	213	309	1303	341	300	568	0,68	1,04	0,9

% 50 Nemli Ortamda Yapılan Ölçüm Verileri (3. Ölçüm)										
Gaz	Gaz Konsantrasyon (ppm)	S1 ENS160 TVOC	S2 ENS160 CO₂	S3 CCS811 CO₂	S4 CCS811 TVOC	S5 MiCS 89TE CO₂	S6 MiCS 89TE TVOC	S7 MiCS 6814 CO	S8 MiCS 6814 NH₃	S9 MiCS 6814 NO₂
NO₂	1,5	64	94	629	79	97	331	1,21	1,51	1,21
	3	66	89	583	88	111	331	1,55	2,61	1,55
	4,5	53	52	1171	222	144	314	1,55	3	1,55
	6	38	49	1362	405	852	314	1,33	2,07	1,47
	7,5	47	79	1354	411	1006	318	1,34	2,12	1,45
NH₃	25	212	307	1530	659	1096	419	1,09	0,8	1,09
	50	721	530	1822	1347	1173	563	0,85	0,25	0,85
	75	943	588	1986	1658	1180	615	0,73	0,1	0,79
	100	900	577	2061	1688	1110	641	0,68	0,07	0,77
	125	922	582	2048	1668	1006	655	0,64	0	0,75
AsH₃	0,25	350	410	2154	2002	440	475	1,12	1,11	1,11
	0,5	691	509	3060	3827	480	602	0,9	0,99	0,99
	0,75	967	594	3528	4854	515	668	0,84	0,87	0,87
	1	1313	675	4025	5894	510	742	0,72	0,72	0,72
	1,25	1642	746	4533	6970	433	794	0,58	0,56	0,54
CO	9	96	140	1414	467	125	427	1	1,23	1,25
	18	117	179	1415	469	167	462	0,97	1,23	1,25
	27	130	198	1448	492	209	502	0,94	1,23	1,25
	36	174	260	1466	503	258	537	0,9	1,23	1,25
	45	192	271	1441	503	279	558	0,9	1,23	1,25

% 85 Nemli Ortamda Yapılan Ölçüm Dataları (1. Ölçüm)

Gaz	Gaz Konsantrasyon (ppm)	S1 ENS 160 TVOC	S2 ENS 160 CO2	S3 CCS 811 CO2	S4 CCS 811 TVOC	S5 MiCS 89TE CO2	S6 MiCS 89TE TVOC	S7 MiCS 6814 CO	S8 MiCS 6814 NH3	S9 MiCS 6814 NO2
NO₂	1,5	185	278	959	219	482	406	1,63	1,68	1,65
	3	204	307	956	213	468	401	1,67	1,8	1,71
	4,5	186	286	941	200	412	393	1,67	1,91	1,73
	6	155	253	902	168	328	384	1,71	2,03	1,67
	7,5	148	247	897	155	209	384	1,8	2,12	1,8
NH₃	25	455	4555	1128	349	537	484	1,54	1,43	0,92
	50	1318	662	1452	865	677	615	1,25	1,19	0,24
	75	1404	670	1555	1066	663	655	1,14	1,15	0,11
	100	1322	650	1504	974	489	663	1,14	1,14	0,11
	125	1469	711	1544	1062	328	698	1,12	1,12	0,04
AsH₃	0,25	318	412	1271	561	216	467	1,53	1,34	1,53
	0,5	695	515	1717	1436	349	567	1,43	1,28	1,43
	0,75	836	561	1788	1592	405	615	1,37	1,22	1,37
	1	956	593	1814	1672	370	646	1,35	1,18	1,3
	1,25	871	571	1792	1536	209	668	1,27	1,16	1,27
CO	9	142	232	787	120	125	445	1,56	1,53	1,61
	18	159	249	844	124	167	475	1,49	1,52	1,61
	27	198	313	853	130	202	506	1,47	1,52	1,61
	36	264	353	878	146	230	532	1,43	1,49	1,61
	45	307	400	913	171	251	563	1,41	1,48	1,61

% 85 Nemli Ortamda Yapılan Ölçüm Dataları (2. Ölçüm)

Gaz	Gaz Konsantrasyon (ppm)	S1 ENS 160 TVOC	S2 ENS 160 CO₂	S3 CCS 811 CO₂	S4 CCS 811 TVOC	S5 MiCS 89TE CO₂	S6 MiCS 89TE TVOC	S7 MiCS 6814 CO	S8 MiCS 6814 NH₂	S9 MiCS 6814 NO₂
NO₂	1,5	166	228	585	80	370	393	1,5	1,62	1,57
	3	149	215	556	84	356	383	1,62	2,24	1,79
	4,5	136	207	485	73	433	384	1,9	2,93	1,91
	6	117	178	1269	308	692	376	1,84	2,91	1,92
	7,5	129	186	1281	320	685	371	1,78	2,74	1,9
NH₃	25	475	458	1672	868	824	502	1,38	0,78	1,3
	50	1404	695	2078	1728	943	638	1,12	0,1	1,05
	75	1448	686	2160	1907	915	677	1,01	0	1,01
	100	1276	667	2057	1688	734	664	1,04	0,06	1,04
	125	1185	646	1980	1528	503	664	1,05	0	1,05
AsH₃	0,25	326	415	1818	1184	279	467	1,42	1,24	1,42
	0,5	644	489	2295	2198	419	555	1,34	1,18	1,34
	0,75	927	574	2445	2535	475	603	1,27	1,13	1,27
	1	1066	618	2535	2667	447	651	1,19	1,08	1,19
	1,25	1026	608	2509	2649	286	677	1,18	1,05	1,12
CO	9	150	217	1333	370	119	450	1,39	1,42	1,53
	18	171	256	1338	374	168	472	1,39	1,42	1,53
	27	184	281	1375	402	203	507	1,32	1,42	1,53
	36	219	325	1400	431	217	533	1,3	1,4	1,53
	45	256	363	1405	445	231	559	1,3	1,39	1,53