

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ENDÜSTRİYEL DAĞILMAYAN KIZILÖTESİ (NDIR)
METAN (CH_4) GAZ SENSÖRÜ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Dilan YALÇIN

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2023

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ENDÜSTRİYEL DAĞILMAYAN KIZILÖTESİ (NDIR)
METAN (CH_4) GAZ SENSÖRÜ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Dilan YALÇIN
(518201008)**

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Serhat İKİZOĞLU

HAZİRAN 2023

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**DESIGN OF AN INDUSTRIAL NON-DISPERSIVE INFRARED (NDIR)
METHANE (CH_4) GAS SENSOR**

M.Sc. THESIS

**Dilan YALÇIN
(518201008)**

Department of Mechatronic Engineering

Mechatronic Engineering Programme

Thesis Advisor: Assoc. Dr. Serhat İkizoğlu

JUNE 2023

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 518201008 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Dilan YALÇIN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "ENDÜSTRİYEL DAĞILMAYAN KIZILÖTESİ (NDIR) METAN (CH_4) GAZ SENSÖRÜ TASARIMI" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Serhat İKİZOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Ali Fuat Ergenç**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof Dr. Hakan Undil
Nişantaşı Üniversitesi

.....

Teslim Tarihi : **23.05.2023**

Savunma Tarihi : **12.06.2023**





2023'e,



ÖNSÖZ

Bu çalışmada, günümüzde metan gazı maruziyeti olabilecek ortamlarda, gazın yanıcı ve patlayıcı özelliklerinden dolayı oluşabilecek tehlikelerden korunmak amacıyla gaz algılama sistemleri için uyumlu standart minyatür formatta endüstriyel NDIR metan gaz sensörü tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Yüksek lisans eğitimimde ve tez çalışmam sırasında beni yönlendiren ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Serhat İKİZOĞLU'na çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım süresince desteklerini esirgemeyen UESTCO ENERJİ SİSTEMLERİ Ltd. Şti. ailesine ve bu süreçte bana destek veren ailem ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Haziran 2023

Dilan YALÇIN
(Fizik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xii
KISALTMALAR	xiv
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xx
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Araştırması	3
1.3 Hipotez	5
2. TEORİ	7
2.1 Elektromayetik Spektrum	7
2.2 Kızılötesi Işıma	8
2.2.1 Kara cisim ışıması	9
2.3 Kızılötesi Absorbsiyon Spektrumları	10
2.4 Dağılmayan Kızılötesi Işıma ile Gaz Algılama	11
2.4.1 Beer-Lambert yasası	11
3. DAĞILMAYAN KIZILÖTESİ GAZ ÖLÇÜM SİSTEMLERİ	13
3.1 Kızılötesi Radyasyon Kaynakları	13
3.1.1 IR akkor lamba	13
3.1.2 IR led	14
3.1.3 MEM kızılötesi yayıcılar	15
3.2 Termal Dedektörler	16
3.2.1 Piroelektrik dedektörler	17
3.2.2 Termofil dedektörler	18
3.2.3 Bolometre dedektörler	20
3.3 Fotonik dedektörler	20
3.3.1 Fotovoltaik dedektörler	21
3.3.2 Fotoiletken dedektörler	21
3.4 Optik Sensör Kapsülü	22
3.4.1 Optik sensör kapsülü ölçüleri	23
3.4.2 Optik sensör kapsülü malzemesi	24
4. NDIR METAN (CH₄) GAZ SENSÖRÜ TASARIMI	27
4.1 Optik Sensör Kapsülü	27
4.1.1 Optik yol tasarımı	28
4.1.1.1 Optik kapsül simülasyonu ve sonuçları	30
4.1.1.2 Optik yol uzunluğu	33
4.1.2 Gaz difüzyonu	35
4.1.2.1 Delik yapısına göre gaz difüzyon hızı	36
4.1.2.2 Delik yapısına göre radyasyon kaybı	37
4.1.3 Elektronik tasarım	40
4.1.3.1 Sensör kartı tasarımı	40
4.1.3.2 Kızılötesi radyasyon kaynağı	41
4.1.3.3 Kızılötesi dedektör	42
4.1.4 Test kartı	44
5. PROTOTİPİN ÇALIŞMASININ DEĞERLENDİRİLMESİ	49
5.1 Prototip Üretimi	49
5.2 Ölçüm Düzenegi	50

5.3 Sonuçlar	52
6. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	67
EKLER	73
EK A : Yazılım Arayüzü	75
EK B : Yazılım Akış Şematığı	77
EK C : Hedef Gaz Konsantrasyonunun Hesaplanması	79
EK D : Sensör doğrusallaştırma katsayılarının hesaplanması	81
EK E : Sensör Kalibrasyonu	83
ÖZGEÇMİŞ	85





KISALTMALAR

CH₄	: Metan
NDIR	: Dağılmayan kızılötesi (Non-dispersive Infrared)
NIR	: Yakın Kızılötesi (Near Infrared)
SWIR	: Kısa Dalga Kızılötesi (Short Wave Infrared)
MWIR	: Orta Dalga Kızılötesi (Middle Wavelength Infrared)
LWIR	: Uzun Dalga Kızılötesi (Long Wavelength Infrared)
FIR	: Uzak Dalga Kızılötesi (Far Infrared)
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)
3D	: 3 boyutlu (Three-Dimensional)
UART	: Evrensel Asenkron Alıcı / Verici (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)
PPB	: Miyarda bir parçacık (particles per billion)
PPM	: Milyonda bir parçacık (particles per million)
IR	: Kızılötesi (Infrared)
mA	: Miliamper
mm	: Milimetre
cm	: Santimetre
mV	: Milivolt
mW	: Miliwatt
ms	: Milisaniye
Hz	: Hertz
THz	: Terahertz
I	: Gaz varlığında dedektöre düşen ışığın yoğunluğu
I₀	: Gaz yokken dedektöre düşen ışığın yoğunluğu
μm	: Mikrometre
μF	: Mikro Farad
nF	: Nano Farad
f_c	: Kesme Frekansı
MOS	: Metal-Oksit Yarıiletken (Metal-oxide semiconductor)
TDLS	: Ayarlanabilir Diyot Lazer Spektrometresi (Tunable Diode Laser Spectrometer)
CO₂	: Karbondioksit
EM	: Elektromanyetik
T	: Sıcaklık
C	: Gaz Konsantrasyonu
MEM	: Mikro-elektro-mekanik
LED	: Işık yayan diyot (Light Emitting Diode)
NEP	: Gürültü Eşdeğer Gücü (Noise Equivalent Power)
R_v	: Fotocevap
D*	: Dedektivite

SEMBOLLER

μ	: Mikro
Ω	: Ohm
λ	: Lamda
t	: Zaman
Δ	: Delta
α	: Seebeck Katsayısı
π	: pi





ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Absorbsiyon spektroskopisinin ana grupları.....	8
Çizelge 2.2 : Kızılötesi radyasyonun alt grupları.	8
Çizelge 3.1 : Farklı malzemelerin Seebeck Katsayıları.	19
Çizelge 4.1 : HSL 5/115 (HEMANN Sensor GmbH) teknik özellikleri.	41
Çizelge 4.2 : HTS-E21 (HEMANN Sensor GmbH) teknik özellikleri.....	43
Çizelge 4.3 : Sensör kartı pinleri.....	44
Çizelge 5.1 : Metan gazı tüplerinin derişimleri.	53
Çizelge 5.2 : Metan gazı ölçüm sonuçları.	59
Çizelge 6.1 : Endüstriyel NDIR metan gaz sensörünün özellikleri.	63



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : Elektromanyetik spektrum cetveli.	7
Şekil 2.2 : Farklı sıcaklıklardaki cisimlerin dalga boyuna göre spektral ışıınım dağılımı.	9
Şekil 2.3 : Farklı gazların IR absorbsiyon dalga boyu.	10
Şekil 2.4 : NDIR gaz sensörlerinin temel yapısı.	11
Şekil 3.1 : IR akkor lamba.	14
Şekil 3.2 : IR LED.	15
Şekil 3.3 : MEM IR radyasyon kaynağı yapısı.	16
Şekil 3.4 : Voltaj modunda piroelektrik sensör eşdeğer devresi.	18
Şekil 3.5 : Termokupl şematik gösterimi.	19
Şekil 3.6 : Bolometre devre şematığı.	20
Şekil 3.7 : Basit fotovoltaiik dedektör devre şematığı.	21
Şekil 3.8 : Basit fotoiletken dedektör devre şematığı.	22
Şekil 3.9 : Optik gaz kapsülü temel yapısı.	23
Şekil 3.10 : Alüminyum (Al), gümüş (Ag) ve altın (Au) metal yüzeyler için dalga boyuna göre yansıtma oranı.	25
Şekil 4.1 : Optik sensör kapsülü parçaları genel görünümü.	28
Şekil 4.2 : Optik yol gövdesi tasarımı üst görünümü.	28
Şekil 4.3 : Optik yol gövdesi perspektif görünümü.	29
Şekil 4.4 : Zemax simülasyon ortamına aktarılmış optik sensör kapsülü.	30
Şekil 4.5 : Kızılötesi radyasyon kaynağının dalga boyuna bağlı iletim oranı. ...	31
Şekil 4.6 : 3.3 μm dalga boyunda altın kaplama için yansıtıcılık oranı.	32
Şekil 4.7 : Simülasyonlar için tasarlanan kızılötesi radyasyon kaynağı.	32
Şekil 4.8 : Simülasyon sonucu dedektörden okunan ışıınım ve toplam güç değerleri.	33
Şekil 4.9 : Simülasyon sonucu elde edilen optik yol örneklerinden biri.	34
Şekil 4.10 : Simülasyon sonucu elde edilen optik yol örneklerinden biri.	34
Şekil 4.11 : Optik yol uzunluğu dağılım grafiğı.	35
Şekil 4.12 : Zamana bağlı hacimsel akış oranı değişim grafiğı.	36
Şekil 4.13 : Silindirik delik tipi için toplam yüzey alanına bağlı enerji kaybı grafiğı.	38
Şekil 4.14 : Yakınsak nozul kullanımında toplam yüzey alanına bağlı enerji kaybı grafiğı.	38
Şekil 4.15 : Optik sensör kapsülü tasarımının son hali.	39
Şekil 4.16 : Son tasarımda dedektörden okunan ışıınım ve toplam güç değerleri.	40
Şekil 4.17 : NDIR gaz sensörü demonte görünümü.	41
Şekil 4.18 : Kızılötesi radyasyon kaynağının dalga boyuna bağlı iletim oranı. ...	41

Şekil 4.19 :	Aktif kanal ve referans kanalı filtrelerinin dalga boyuna göre geçirgenlikleri.	42
Şekil 4.20 :	Sensör kartı elektronik devresi; (a) sensör kartı üst görünüm; (b) sensör kartı alt görünüm.	44
Şekil 4.21 :	Sensör kartı ve test kartından oluşan sistemin elektronik şematiği. ...	45
Şekil 4.22 :	Termofil dedektörü çıkışı için yükseltici devre şematiği.	45
Şekil 4.23 :	Anahtarlama devresi şematiği.	46
Şekil 4.24 :	Termistör sürücü devresi.	47
Şekil 4.25 :	NDIR gaz sensörü için tasarlanan test kartı genel görünümü.	48
Şekil 5.1 :	Prototip optik yol gövdesi görünümü.	49
Şekil 5.2 :	Prototip optik yol gövdesi perspektif görünümü.	49
Şekil 5.3 :	Prototip sensör kartı.	50
Şekil 5.4 :	Prototip test kartı.	50
Şekil 5.5 :	Ölçüm düzeneği şematik görünümü.	51
Şekil 5.6 :	Sıcaklık/nem kabini.	51
Şekil 5.7 :	Gaz akış aparatı.	52
Şekil 5.8 :	Sıcaklık/Nem kabininde ayarlanan ortam koşulları.	53
Şekil 5.9 :	%0.5 vol Metan gazı ölçüm sonuçları.	54
Şekil 5.10 :	%1 vol Metan gazı ölçüm sonuçları.	55
Şekil 5.11 :	%1.5 vol Metan gazı ölçüm sonuçları.	55
Şekil 5.12 :	%2 vol Metan gazı ölçüm sonuçları.	56
Şekil 5.13 :	%2.5 vol Metan gazı ölçüm sonuçları.	56
Şekil 5.14 :	%3 vol Metan gazı ölçüm sonuçları.	57
Şekil 5.15 :	%3.5 vol Metan gazı ölçüm sonuçları.	57
Şekil 5.16 :	%4 vol Metan gazı ölçüm sonuçları.	58
Şekil 5.17 :	%4.5 vol Metan gazı ölçüm sonuçları.	58
Şekil 5.18 :	%5 vol Metan gazı ölçüm sonuçları.	59
Şekil 5.19 :	Sensörün kuru hava gazına tepkisi.	60
Şekil 5.20 :	%2.5 vol Metan gazı 10 periyot için ölçüm sonuçları.	61
Şekil A.1 :	Sensör çıktıları için kullanılan yazılım arayüzü.	75
Şekil B.1 :	Sensör çıktıları için kullanılan yazılımın akış şematiği.	77
Şekil D.1 :	Sensör "a" ve "n" katsayılarının hesaplanma prosedürü.	81

ENDÜSTRİYEL DAĞILMAYAN KIZILÖTESİ (NDIR) METAN (CH_4) GAZ SENSÖRÜ TASARIMI

ÖZET

Günümüzde metan (CH_4) gaz sensörleri, gazın oluşturabileceği tehlikeler sebebiyle giderek artan bir eğilimle kullanılmaktadır. Doğal gazın temel bileşeni olan metan, yanıcı ve kapalı bir ortamda %5 konsantrasyona ulaştığında patlayıcı olan bir gazdır. Bu sebeplerle, petrol gaz endüstrilerinde, depolama alanlarında, ticari ve evsel ortamlarda metan gazının tespiti oldukça önemlidir.

Metan gazının tespiti için tasarlanmış sistemlerde kullanılan sensörlerden biri optik tekniklere dayalı olarak ölçüm yapan dağılmayan kızılötesi (NDIR) gaz sensörleridir. Hidrokarbon gazların ve CO_2 gazının tespitinde kullanılan NDIR gaz sensörleri, belirli bir gazın konsantrasyon ölçümüne olanak sağlaması, hızlı ve doğru bir gaz analiz yöntemi olması, basit ve ekonomik olması sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır.

NDIR gaz sensörü temelde bir kızılötesi radyasyon kaynağı, bir kızılötesi dedektör ve optik sensör kapsülünden oluşmaktadır. NDIR algılama yöntemi kızılötesi radyasyonun gaz molekülleri tarafından emilimi esasına dayanmaktadır. Optik sensör kapsülü kızılötesi radyasyon kaynağından saçılan ışınların yansımalar yaparak algılayıcıya ulaştığı kısımdır. Ortamda hedef gaz bulunması durumunda, gaz optik sensör kapsülünde bulunan gaz giriş-çıkış deliklerinden difüzyon yoluyla kapsül içine örneklenir. Hedef gazın emilim spektrumundaki ışınlar gaz molekülü tarafından emilime uğrar. Hedef gaz varlığına bağlı olarak emilim sebebiyle kızılötesi detektöre ulaşan radyasyon yoğunluğunda değişim olur. Bu değişime bağlı olarak ortamdaki hedef gazın yoğunluğu tespit edilir.

Gaz varlığına göre değişim gösteren radyasyon yoğunluğu Beer-Lambert yasası ile açıklanmaktadır. Beer-Lambert yasasına göre hedef gazdan geçtikten sonraki radyasyon yoğunluğunun, hedef gaz yokken ölçülen radyasyon yoğunluğuna oranı, hedef gazın emilim katsayısının, optik yol uzunluğunun ve gaz konsantrasyonunun bir fonksiyonudur. Radyasyon kaynağından saçılan ışınların kızılötesi detektöre ulaşana kadar optik sensör kapsülü içinde aldığı yol optik yol olarak adlandırılmaktadır.

Bu çalışmada, endüstriyel NDIR metan gaz sensörü geliştirilmesi amaçlanmıştır. Öncelikle standart minyatür formatta 20mm çapında 16.15mm yüksekliğinde silindirik yeni sensör kapsülü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sensör kapsülü optik yol gövdesi ve sensör kapsülü kapağı olmak üzere iki parça halindedir. Kapsülde 1.5mm yüksekliğinde 2mm'den 1mm'ye daralan yakınsak nozul yapısında 5 delik kullanılmıştır. Böylece ışık kaybı artırılmadan difüze olan gazın hacimsel akış oranı artırılmıştır.

Optik sensör kapsülünün optik analizleri Zemax ışın izleme programından yararlanılarak yapılmıştır. Kapsül yüzeyi yüksek yansıtma oranı (%95) sebebiyle altın

malzeme olarak seçilmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda optik yol uzunluğunun ortalama 54mm olduğu ve ışın yoğunluğunun yaklaşık %20'sinin dedektöre ulaştığı görülmüştür.

Prototipi üretilen optik sensör kapsülü MS-58 pirinç malzeme ile CNC işleme yöntemi ile üretilmiş ve altın kaplama işlemi uygulanmıştır. Sensör kartı tasarımında Heimann HSL 5/115 akkor lamba ve Heimann HTS-E21 iki kanallı termofil dedektörü kullanılmıştır. Kanallardan biri referans kanalı olup $3.91\mu\text{m}$ optik filtreye, diğeri ise ölçüm kanalı olup $3.3\mu\text{m}$ optik filtreye sahiptir.

Prototipi üretilen NDIR gaz sensörü için uygun test kartı kullanılarak sensörün ölçüm testleri yapılmıştır. Ortam koşulları 20°C ve %50RH olan sıcaklık/nem kabini içinde çalıştırılan sensör ile yapılan testlerde sensörün ölçümdeki tekrarlanabilirliğinin iyi olduğu ve minimum algılama limitinin 60ppm olduğu tespit edilmiştir. Sensör %0 – 5 vol metan gazı ölçümünde %3'ten küçük bağıl hata oranına sahiptir. %0 – 5 vol aralığında 10 farklı metan konsantrasyonu ile yapılan ölçümler sonucunda sensörün T90 süresinin 20 saniyeden az olduğu tespit edilmiştir.



DESIGN OF AN INDUSTRIAL NON-DISPERSIVE INFRARED (NDIR) METHANE (CH_4) GAS SENSOR

SUMMARY

Methane (CH_4), a flammable gas, can be explosive when it reaches 5% concentration in a closed environment. Detection of methane gas is crucial for safety reasons in places where methane gas may accumulate in the environment, such as oil and gas industries, storage areas, and water treatment plants. Gas detectors designed to detect gas leaks in such environments and to measure the methane concentration in the background are being used with an increasing trend to protect themselves from potential hazards.

Methane, the primary component of natural gas, can also pose a hazard in commercial and domestic environments. A possible gas leak may result in combustion and explosion if there is a trigger/ignition in the environment due to the flammable effect of methane gas. For this reason, detecting methane gas in these environments is very significant.

One of the sensors used in systems that detect methane gas is a non-dispersive infrared (NDIR) gas sensor measuring based on optical techniques. The NDIR gas sensors, which allow the detection of hydrocarbon gases and CO_2 gas, are widely used because they allow concentration measurement of a specific gas, is a fast and accurate gas analysis method, and are simple and economical.

An NDIR gas sensor comprises an infrared radiation source, an infrared detector, and an optical sensor capsule. The NDIR detection method is based on gas molecules' absorption of infrared radiation. The optical sensor capsule is the part where the rays scattered from the infrared radiation source reach the sensor by making reflections. In the presence of target gas in the environment, the gas is sampled into the capsule by diffusion from the gas inlet and outlet holes. The gas molecules absorb the rays in the absorption spectrum of the target gas. There is a change in the intensity of radiation reaching the infrared detector due to absorption. The density of the target gas in the environment is determined depending on the change.

The Beer-Lambert law explains the radiation intensity, which varies according to the presence of gas. According to the Beer-Lambert law, the ratio of the radiation intensity after passing through the target gas to the radiation intensity measured in the absence of the target gas is a function of the absorption coefficient of the target gas, the optical path length, and the gas concentration. The path that the rays scattered from the radiation source take within the optical sensor capsule until they reach the infrared detector is called the optical path.

According to the Beer-Lambert law, increasing the optical path length allows the rays to interact with more gas molecules. Therefore, increasing the optical path length increases the measurement accuracy. However, when the optical path length

is increased, the energy loss due to absorption and reflection of the rays will also increase, and the light intensity reaching the infrared detector will decrease. This situation causes the sensor to measure incorrectly or low signals to remain below the noise threshold.

This thesis aims to design and realize the NDIR methane gas sensor to detect methane gas. In order to ensure the industrial use of the designed sensor, a design in accordance with the standard miniature format accepted by the gas industry has been realized. NDIR methane gas sensor consists of three parts: optical path body, sensor capsule cover, and sensor board. The cylindrical optical sensor capsule with a diameter of 20mm and a height of 16.15mm is compactly designed to include the sensor board.

In order to provide gas inlet and outlet, there are gas inlet-outlet holes in the optical sensor capsules. The hole structure affects the volumetric flow rate of the target gas. The high volumetric flow rate of the gas provides a faster equalization of the gas concentration inside and outside the capsule. Thus, accurate gas concentration measurement will also take place faster. Cylindrical hole structure is mostly preferred in gas sensors. However, when the cylindrical hole structure is used, it is necessary to increase the hole surface area to increase the gas's volumetric flow rate. In a study carried out within the scope of the thesis, it has been observed that the light intensity coming out of the capsule increases when the hole surface area is increased. This situation causes a decrease in the light intensity reaching the infrared detector.

In the new sensor capsule design, the hole structure is designed in convergent nozzle geometry to provide a gas inlet and outlet. Convergent nozzles increase the pressure difference between the inside and outside of the capsule thanks to their narrowing structure from the outside to the inside. Thus the volumetric flow rate of the diffused gas also increases. In the capsule, 5 holes in the convergent nozzle structure are used, which are 1.5mm high and narrow from 2 mm to 1 mm . The fluid dynamic analysis monitored and recorded the volumetric flow rate of 2.5% vol methane gas reaching the hole for 1.2 seconds. It was observed that the average volumetric flow rate of the gas increased 1.54 times compared to using a cylindrical hole with a diameter of 1mm . In addition, it was observed that the light intensity of the capsule was approximately the same in 5 cylindrical holes of 1mm diameter and 5 convergent nozzles narrowing from 2mm to 1mm . Thus, the volumetric flow rate of the diffused gas is increased without increasing the light loss.

Optical sensor capsule analysis was performed with the Zemax ray tracing program. The capsule surface was chosen as the gold material due to its high reflectivity (95%). As a result of the simulations, it was seen that the optical path length is 54mm on average, and approximately 20% of the radiation intensity reaches the detector.

The optical sensor capsule, whose prototype was produced, was produced with MS-58 brass material by CNC machining method, and the gold-coating process was applied. Heimann HSL 5/115 incandescent lamp and Heimann HTS-E21 two-channel thermophile detector are used in the sensor board design. One of the channels is the reference channel and has a $3.91\mu\text{m}$ optical filter, and the other is the measurement channel and has a $3.3\mu\text{m}$ optical filter.

The sensor tests were carried out with the convenient test card for the prototype NDIR gas sensor. In the tests carried out with the sensor operated in a temperature/humidity cabinet with ambient conditions of 20°C and 50% RH, it has been determined that the repeatability of the sensor in measurement is good, and the minimum detection limit is 60 *ppm*. The sensor has a relative error rate of less than 3% in the 0 – 5%*vol* methane gas measurement. As a result of measurements made at different concentrations in the range of 0 – 5% *vol* methane gas, it was determined that the T90 time of the sensor was less than 20 seconds.





1. GİRİŞ

Kokusuz, renksiz ve yanıcı bir gaz olan metan (CH_4), doğal gazın ana bileşenidir. Dünya çapında elektrik üretiminde ve ısınmada yakıt olarak kullanılan metan gazı iklim değişikliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Metan gazı, 100 yıllık bir süre boyunca karbondioksitten (CO_2) 28 kat daha fazla küresel ısınma potansiyeline sahip güçlü bir sera gazıdır [1]. Sanayi devriminin başlamasıyla birlikte, atmosferik metan gazı konsantrasyonu, 1900'lerin başlarında yaklaşık 800 ppb'den 2022'nin sonlarında 1925 ppb'ye yükseldiği kaydedilmiştir [2]. Bu artış temel olarak, depolama alanları, hayvan atık yönetim sistemleri, kömür madenciliği, petrokimya aramaları, güç trafoları ve petrol ve gaz dağıtım ve üretim tesisi sayılarındaki artışa bağlanmaktadır [3].

Metan gazı yanıcıdır ve kapalı bir alanda konsantrasyonu %5-15'e ulaşırsa patlayıcı olabilmektedir [4]. Bu yüzden, metan gazının tespiti, petrol ve gaz endüstrilerinde, su arıtma tesislerinde, depolama sahalarında ve metan gazının zeminden süzülerek bir patlama tehlikesi oluşturabileceği ticari veya evsel ortamlarda güvenlik nedenleriyle son derece önemlidir. Gaz kaçaqlarının yerini tespit etmeye yönelik tasarlanmış portatif gaz dedektörleri, bu uygulamaların birçoğunda kullanılmaktadır, ancak yaygın kullanım ve bulunabilirlik için düşük maliyetli bir tasarıma sahip olması ticari açıdan önemlidir. Metan gazı tespiti için, metal-oksit-yarıiletken (MOS) direnç kullanımı [5], katalitik (pelistör) sensör [6], ayarlanabilir diyot lazer (TDLAS) absorpsiyon spektroskopisi [7], dağılmayan kızılötesi (NDIR) absorpsiyon spektroskopisi vb. algılama yöntemleri bulunmaktadır.

Günümüzde, optik tekniklere dayalı portatif gaz sensörleri, basit ve ekonomik olduklarından ticari açıdan daha fazla ilgi çekmektedir. Hidrokarbon gazlarının ve CO_2 gazının tespitinde kullanılan NDIR gaz algılama yöntemi, belirli bir gazın tespitine olanak sağlaması, hızlı ve doğru bir gaz analiz teknolojisi olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır [8]. NDIR gaz algılama yöntemi, kızılötesi ışık kaynağından belirli aralıklarla yayılan radyasyonun belirli dalga boylarında hedef gaz

tarafından emilimi esasına dayanmaktadır. Ortamda bir hedef gaz bulunduğunda, bu gaz molekülleri NDIR gaz sensörü kapsülünün içinde, kızılötesi ışık kaynağı ile kızılötesi dedektör arasındaki boşluğa difüzyonla örneklenmektedir. Kızılötesi dedektör ile hedef gazın varlığına göre değişen ışık şiddetindeki fark ölçülerek hedef gaz konsantrasyonu belirlenmektedir [9].

Bu tezde, giriş bölümünü takiben tezin amacı ve tez süresince yapılan literatür araştırmalarına yer verilmiştir. 2. bölümde, dağılmayan kızılötesi (*NDIR*) gaz algılama sistemlerinin arka planında yer alan elektromanyetik spektrum, kızılötesi ışıma, kızılötesi absorpsiyon spektrumları ve kızılötesi ışıma ile gaz algılama prensibi ile ilgili teorik bilgiler yer almaktadır. 3. bölümde, NDIR gaz ölçüm sistemlerinde kullanılan kızılötesi radyasyon kaynakları, kızılötesi dedektör türleri ve çalışma prensipleri, son olarak da optik sensör kapsülü hakkında genel bilgiler verilmiştir. 4. bölümde, prototip üretimi için tasarlanan optik sensör kapsülü özellikleri ve optik simülasyonu, NDIR metan gaz sensörü için tasarlanan sensör kartı ve test kartının özellikleri paylaşılmıştır. 5. bölümde, prototip üretimi gerçekleştirilen NDIR metan gaz sensörü ile yapılan doğrulama testleri ve sensörün ölçüm limitleri bulunmaktadır. Tezin "Değerlendirme ve Öneriler" bölümünde ise yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar, bu sonuçların değerlendirmesi ve gelecekteki çalışmalar için öneriler yer almaktadır.

1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, gaz algılama sistemlerinde kullanılmak üzere, yeni endüstriyel dağılmayan kızılötesi (*NDIR*) metan (CH_4) gaz sensörü geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, ilk olarak gaz endüstrisi olarak kabul gören standart minyatür formata uygun, hassas ölçüm için etkin optik yol uzunluğuna sahip, hedef gaz difüzyonunu kolaylaştıracak yapıda ve endüstriyel kullanım için üretimi kolay yeni bir optik sensör kapsülü tasarlanması hedeflenmiştir. İkinci olarak, hedef gaz ölçümü için uygun ve düşük maliyetli komponentler ile tasarlanmış bir sensör kartına sahip kompakt yapıda bir sensör tasarımı gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Literatürde NDIR gaz algılama sistemleri için tasarlanmış birçok NDIR gaz sensörü tasarımı mevcuttur. NDIR gaz sensörleri, performansı iyileştirmek için farklı yapılarda optik sensör kapsülü tasarımlarına sahiptir. Optik sensör kapsülleri tasarıma göre değişen farklı optik yol uzunluğuna ve kullanılan malzemeye ya da kaplamaya göre değişen farklı yansıtıcılık oranlarına sahiptir. Algılanması hedeflenen gaz türüne bağlı olarak tasarımlarda alternatif kızılötesi dedektörler ve kızılötesi radyasyon kaynakları kullanılmaktadır.

Dağılmayan kızılötesi (NDIR) gaz algılama tekniği ilk olarak 1943'te Dr. Karl Luft tarafından geliştirilmiştir [10]. Luft gaz analizörü, birbirinden bir diyafram ile ayrılan iki optik kapsülden oluşmaktadır. Hedef gaz bulunan hücrede gaz molekülleri ile kızılötesi radyasyonun emilimi ile enerji alan gaz moleküllerinin hareketleri sonucu kapsüldeki basınçta artış gözlenmektedir. Basıncıdaki değişim iki kapsülü ayıran diyaframın, basıncı düşük kapsül tarafında eğilmesine neden olmakta ve bir basınç sensörü yardımıyla diyaframın hareketine bağlı olarak hedef gaz konsantrasyonu ölçülmektedir.

Ingo Sieber, Horst Eggert, Karl-Heinz Suphan ve Oliver Nüssen, NDIR optik gaz algılama uygulamaları için kaynaktan çıkan ışığı kızılötesi dedektör üzerine odaklayan tavanı parabolik bir yüzey olarak tasarlanmış optik sensör kapsülünde IR akkor lamba ve termofil dedektör kullanarak analizler gerçekleştirmiş ve sonuçları rapor etmişlerdir [11]. Tasarlamış oldukları optik sensör kapsülü $42mm$ uzunluğunda ve ortalama optik yol uzunluğu $60mm$ 'dir. Yaptıkları çalışmada, genel gaz algılama performansının nasıl modelleneceğini ve radyasyon kaynağının konumlandırılmasının kapsüldeki ışıyım dağılımı üzerindeki etkisini rapor etmişlerdir.

2006 yılında Roberto Viola, kızılötesi kaynak ve dedektör için $5 \times 5mm$ alanı olan çok geçişli bir optik sensör kapsülü geliştirdiğini rapor etmiştir [12]. Optik sensör kapsülünün yüzeyi altın kaplama olarak ayarlanmış ve tasarımda iki parabolik ayna kullanılmıştır. Optik sensör kapsülünün uzunluğu $120mm$ 'den büyüktür. Kullanılan

parabolik aynalar ile çoklu geçişler sağlanmış ve optik yol uzunluğu 940mm olarak rapor edilmiştir. Tasarlanan optik sensör kapsülü $10.5\mu\text{m}$ 'de amonyağı tespit etmek için kullanılmıştır.

2011 yılında Jongseon Park and Seunghwan Yi, iki içbükey ayna kullanarak, kaynaktan çıkan ışınların bu aynalar yardımıyla iki kez yansıtılarak Z şeklinde bir optik yol doğrultusunda ilerleyen ışınların kızılötesi dedektör üzerine odaklanmasını sağlayan optik sensör kapsülü tasarımı gerçekleştirmiştir [13]. Tasarımda ayna kullanılması, ve ışınların yalnızca iki kez yansıtılarak dedektör üzerine odaklanması ışın kaybını oldukça azaltmıştır. 65mm optik yol uzunluğuna sahip bu optik sensör kapsülünde metan gazıyla yapılan testler sonucunda termofil dedektörden alınan çıkış geriliminin yükseltildiği rapor edilmiştir.

2008 yılında Fonollosa ve diğerleri, bir NDIR optik gaz sensörünün hassasiyetini artırmak için kırınımlı Fresnel lens tasarımları gerçekleştirmiştir [14]. Tasarlamış oldukları lensleri silikon mikroteknolojisiyle üreterek test etmişlerdir. Yaptıkları çalışmalarda lens kullanımıyla sensör hassasiyetinde ve verimliliğinde artış olduğunu göstermişlerdir.

2020 yılında Weilin Ye ve diğerleri, beş yüzlü bir optik sensör kapsülü tasarımı gerçekleştirmiştir. Tasarımda bir parabolik odaklayıcı, iki lens ve beş düzlemsel aynadan yararlanılmıştır. 170mm optik yol uzunluğuna sahip olan optik sensör kapsülü farklı konsantrasyonlarda metan gazı ile test edilerek yaklaşık 3ppm 'lik ölçüm hassasiyetine sahip olduğu rapor edilmiştir [15].

2021 yılında Maosen Xu ve diğerleri, boyutu $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ bir prizma içine açılmış yarım silindirik bir oyuk şeklinde optik sensör kapsülü tasarımı gerçekleştirmiştir. Tasarım dört ayna yüzeyinden oluşmakta olup optik yol uzunluğu 12mm 'dir. Oldukça küçük yapıda tasarlanan optik sensör kapsülü CO_2 tespiti için tasarlanmış ve sensör çözünürlüğünün 65ppm olduğu rapor edilmiştir [16].

2015 yılında Qiulin Tan ve diğerleri, metan, karbon dioksit ve karbon monoksit olmak üzere üç gaz algılamak için NDIR tekniğine dayalı bir sensör tasarımı gerçekleştirmiştir. Tasarımda bir ışık kaynağı ve dört tek kanallı piroelektrik dedektör kullanılmıştır. Optik sensör kapsülü, tavanı parabolik bir yüzeyden oluşan

silindirik kapsül şeklinde tasarlanmıştır. İç yüzeyi gümüş kaplanmış olan optik sensör kapsülünün optik yol uzunluğu 26mm olarak rapor edilmiştir [17].

2020 yılında Hehuan Liu, Yunbo Shi, and Tian Wang, altı farklı gazı algılamak için NDIR gaz sensörü tasarımı gerçekleştirmiştir. Optik sensör kapsülü, altıgen bir prizma kabuğundan ve her kenarı bir odacık olacak şekilde ayıran yansıma plakasından oluşmaktadır. Farklı gazları algılamak için altı çift kanallı kızılötesi dedektör ve bir paralelleştirilmiş kızılötesi ışık kaynağı kullanılmıştır. Ortalama optik yol uzunluğunun 63mm olduğu ve sensörün hacim oranı %0 ila %4 arasında değişen CO , CO_2 , CH_4 , H_2CO , NH_3 ve NO gazlarını algılayabildiği rapor edilmiştir [18].

2021 yılında Bandara ve diğerleri, 60cm uzunluğunda alüminyum bir gaz tüpü kullanarak NDIR gaz algılama cihazı geliştirmiştir. Tüpün bir ucuna kızılötesi radyasyon kaynağı, bir ucuna piroelektrik dedektör yerleştirilmiştir. Tasarımda ışık kaynağında saçılan ışınları dedektör üzerine odaklamak için bir dışbükey mercek kullanılmıştır. Tasarlanan sistemde optik yol uzunluğunun 59cm olduğu ve 1–2000 ppm NO_2 gazı tespiti gerçekleştirdiği rapor edilmiştir [19].

1.3 Hipotez

Petrol ve gaz endüstrileri, su arıtma tesisleri, depolama sahaları vb. yerlerde patlama tehlikesine karşı güvenlik amacıyla metan gaz dedektörleri artan bir eğilimle kullanılmaktadır. Bu durum göz önüne alındığında gaz dedektörlerinde kullanılan sensörlerin hızlı ve doğru bir gaz analizi gerçekleştirmesi ve farklı ortam koşullarında (nem, sıcaklık vb.) çalışmaya uygun olması önem arz etmektedir.

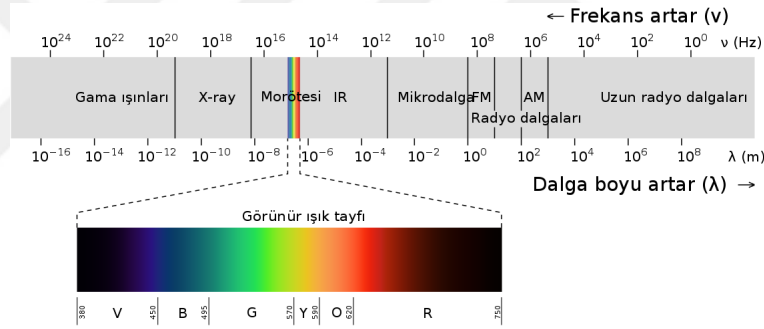
Dağılmayan kızılötesi gaz algılama yöntemi kullanılarak, minyatür formatta ve kompakt yapıda, düşük maliyetli, hassas ve doğru ölçüm sağlayan sensör tasarımı gerçekleştirilebilmektedir.



2. TEORİ

2.1 Elektromanyetik Spektrum

Elektromanyetik (EM) radyasyon, hem parçacık hem de dalga gibi davranan bir enerji türüdür [20]. EM radyasyonu, farklı dalga boylarına ve frekanslarına göre gruplara ayrılır. Bu gruplar, Şekil 2.1’de [21] görüldüğü gibi, birlikte elektromanyetik spektrumu oluştururlar. Elektromanyetik spektrumda gama (γ) ışınları, X ışınları, ultraviyole (UV), görünür spektrum, kızılötesi ışınlar (IR), mikrodalgalar ve radyo dalgaları bulunur.



Şekil 2.1 : Elektromanyetik spektrum cetveli.

Planck-Einstein teorisinde açıklandığı gibi, EM radyasyonunun dalga boyu ne kadar kısaysa, frekansı ve enerjisi de o kadar yüksektir [22]. Bu nedenle, çok düşük veya çok yüksek enerjili EM radyasyon absorpsiyon spektroskopisinde yaygın olarak kullanılamaz. Düşük enerjili radyasyon, gözlemlenen maddenin enerji durumunu değiştirmek için yeterli olmayabilir ve çok yüksek enerji, maddenin iyonlaşmasına sebep olabilir. Bununla birlikte, EM spektrumundaki bazı gruplar yalnızca özel uygulamalar için uygun olmasına ve yalnızca bilimsel araştırma amaçları için kullanılmasına rağmen, çoğu EM radyasyon absorpsiyon spektroskopisi için kullanılabilir. Çizelge 2.1’de, en yaygın absorpsiyon spektroskopisi türleri ve bunların EM radyasyon grupları görülmektedir.

Çizelge 2.1 : Absorbsiyon spektroskopisinin ana grupları.

EM Radyasyon Tipi	Spektroskopi Grubu
X-ray	X-ray Absorpsiyon Spektroskopisi
UV-Görünür Bölge	UV-Görünür Bölge Absorpsiyon Spektroskopisi
IR	Kızılötesi Absorpsiyon Spektroskopisi
Mikrodalga	Mikrodalga Absorpsiyon Spektroskopisi
Radyo dalgası	Elektron Spin Rezonans Spektroskopisi
	Nükleer Manyetik Rezonans Spektroskopisi

Ticari olarak kullanılan en önemli EM radyasyon spektrumları UV/Görünür spektrum ve kızılötesi (*IR*) spektrumudur. IR absorpsiyon spektroskopisinden yararlanılan birkaç uygulama örneği, gaz halindeki maddelerin uzun vadeli izlenmesi ve endüstriyel otomasyon ve proses kontrolü için çeşitli ölçümler olabilir. Yaygın olarak ölçülen, IR radyasyonu absorbe eden bazı gazlar arasında karbon monoksit (*CO*), karbon dioksit (*CO₂*), kükürt dioksit (*SO₂*), nitrojen oksitler (*NO_x*), azot oksit (*N₂O*), amonyak (*NH₃*), hidrojen klorür (*HCl*) , hidrojen florür (*HF*), metan (*CH₄*), vb. bulunur [23].

2.2 Kızılötesi Işıma

Kızılötesi radyasyon, yüksek dalga boyları nedeniyle görünür aralıkta olmayan, sıcak cisimlerin yaydığı radyasyondur. Tüm nesneler, ısı enerjisi olarak adlandırılan termal enerjiyi emerler ve yayarlar. Bu termal enerji, cisimlerin atomlarında ve moleküllerinde hareketli parçacıkların hızıyla ilişkilidir. Bu hareketli parçacıklar, yani atomlar ve moleküller, kızılötesi ışıınımı üretirler. Kızılötesi radyasyon, farklı uygulamalara bağlı olarak Çizelge 2.2’de görülmekte olan belirli alt gruplara bölünmüştür.

Çizelge 2.2 : Kızılötesi radyasyonun alt grupları.

Kızılötesi Alt Grubu	Dalga boyu Aralığı	Frekans
Yakın kızılötesi (<i>NIR</i>)	0.75-1.4 μm	214-400 THz
Kısa dalga kızılötesi (<i>SWIR</i>)	1.4-3 μm	100-214 THz
Orta dalga kızılötesi (<i>MWIR</i>)	3-8 μm	37-100 THz
Uzun dalga kızılötesi (<i>LWIR</i>)	8-15 μm	20-37 THz
Uzak dalga kızılötesi (<i>FIR</i>)	15-1000 μm	0.3-20 THz

Kızılötesi radyasyonun maksimum dalga boyu, denklem 2.1’de görülen Wien yasasında verildiği gibi, yayılan nesnenin mutlak sıcaklığı ile ters orantılıdır.

$$\lambda_{max} = b/T \quad (2.1)$$

$$b = 2.8977729810 * 10^{-3} m.K \quad (2.2)$$

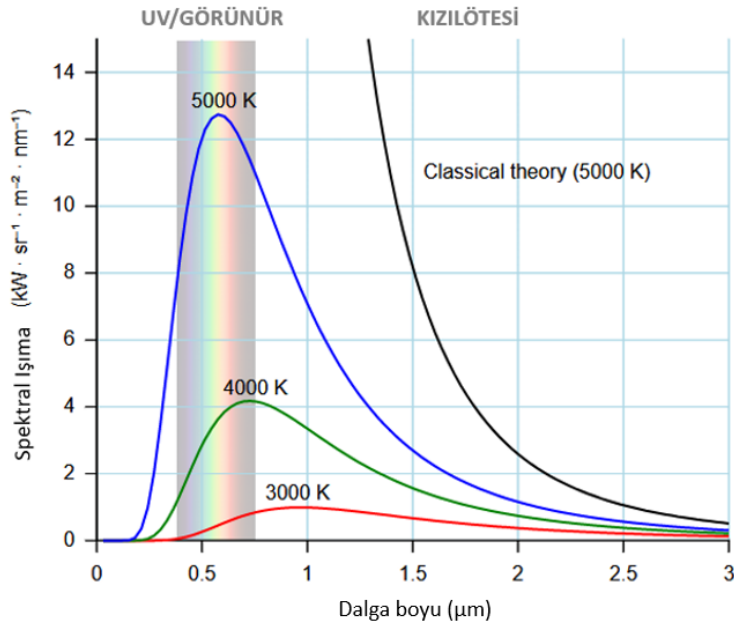
Denklem 2.1’de λ_{max} kızılötesi radyasyonun maksimum dalga boyudur; T , Kelvin cinsinden sıcaklıktır; denklem 2.2’de b , Wien yer değiştirme katsayısıdır.

2.2.1 Kara cisim ışıması

Kara cisim ışıması, üzerine gelen tüm radyasyonu emen ve ardından enerjiyi yeniden yayan bir sistemin davranışdır. Kara cisim ışıması, Planck yasası ile açıklanmaktadır. Planck yasası, denklem 2.3’de eşitliğinde görüldüğü gibi, bir kara cisimden yayılan elektromanyetik ışınımın spektral dağılımını belirler.

$$M_q(\lambda, T) = 2\pi c/\lambda^4 (e^{hc/\lambda kT} - 1) \quad (2.3)$$

Denklem 2.3’de c vakum ortamındaki ışık hızıdır; h Planck sabitidir; ve k Boltzmann sabitini göstermektedir. Denklemde görüldüğü gibi, kara cisimden yayılan elektromanyetik ışınımın yoğunluğu, ışınımın dalga boyuna ve sıcaklığına bağlıdır.



Şekil 2.2 : Farklı sıcaklıklardaki cisimlerin dalga boyuna göre spektral ışınım dağılımı.

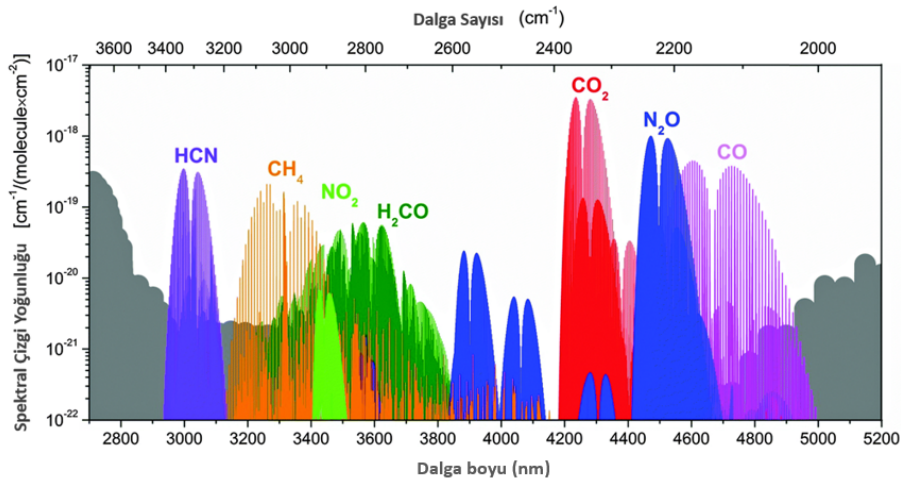
Şekil 2.2’de [24] farklı sıcaklıklardaki cisimlerin dalga boyuna göre spektral ışıınım dağılımı görülmektedir. Kara cisim ışıınım dağılımı grafiğinde görüldüğü gibi, cismin sıcaklığı artıkça yaydığı toplam enerji artmaktadır. Dalga boyu ise artan sıcaklıkla azalmaktadır.

2.3 Kızılötesi Absorbsiyon Spektrumları

Kızılötesi radyasyonun çeşitli moleküllerle etkileşimine bağlı olarak kızılötesi absorbsiyon spektrumları oluşur. Bu etkileşim, molekülün dipol moment özelliğine bağlıdır. Her maddenin doğal bir frekansı vardır ve maddenin atomları arasındaki bağlar sabit bir frekansla titreşir. Moleküldeki titreşim veya dönme hareketleri dipol oluşturan iki atom arasındaki mesafenin değişmesine neden olur. Denklem 2.4’de görüldüğü gibi, atomlar arasındaki mesafenin değişmesi molekülün dipol momentini değiştirmektedir.

$$\mu = q * r \quad (2.4)$$

Denklemdaki μ molekülün dipol momentidir; q elektrik yüküdür; r iki zıt yük arasındaki mesafedir. Dipol momentteki bu değişim, molekülün belirli bir frekansta titreşen elektrik alan oluşturmalarını sağlar. Oluşan bu elektrik alan ile aynı frekanstaki elektromanyetik radyasyon etkileşir ve molekül tarafından emilir.



Şekil 2.3 : Farklı gazların IR absorpsiyon dalga boyu.

Meydana gelen bu absorpsiyon sonucu, bu atomlar veya moleküller temel hallerinden daha enerjik, uyarılmış bir duruma geçerler. Gaz molekülleri ile IR radyasyonun bu

etkileşimi sonucunda gazın sıcaklığı artarken IR radyasyon yoğunluğu azalır. Bu durum, IR ışınları kullanılarak gaz algılanmasını mümkün kılmaktadır. Birçok gaz, orta dalga boyu kızılötesi (MWIR) bandındaki ışınları güçlü bir şekilde soğurur. Şekil 2.3'de [25] birkaç gazın IR absorpsiyon dalga boyu görülmektedir.

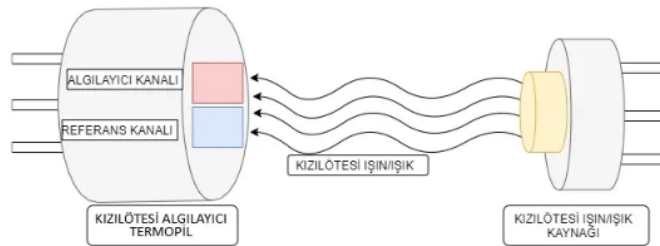
2.4 Dağılmayan Kızılötesi Işıma ile Gaz Algılama

IR absorpsiyon spektroskopisi, bileşik karakterizasyonu ve optik gaz algılama sistemleri gibi birçok bilimsel ve endüstriyel uygulama için uygundur. Gaz algılama üzerine yapılan çalışmalar sonucunda, belirli bir gazı tespit etmek ve konsantrasyonunu ölçmek için tasarlanmış birçok ölçüm cihazları geliştirilmiştir. Son teknoloji cihazlardan bazıları, birden fazla farklı gazı doğru bir şekilde ölçebilmektedir [26].

Bir gaz spektrumu oluşmasını sağlayan cihaza dağıtıcı gaz sensörü denir. Dağıtıcı gaz sensörlerinde, IR radyasyon önce gazdan geçer ve sonra dedektöre ulaşmadan önce uygun bir filtre veya bir prizma tarafından spektruma dağıtılır. Bu tür cihazlar aynı zamanda gaz spektrometreleri olarak da bilinir [27]. Dağıtıcı olmayan gaz algılama sistemlerinde, hedef gazın kimlikleri zaten bilindiğinden, spektruma dağılma işlemine gerek yoktur. Bu sistemlerde kimliği bilinen hedef gazın konsantrasyon ölçümü amaçlanmaktadır. NDIR gaz sensörleri ile hedef gaz konsantrasyon ölçümü ve ilişkili olduğu faktörler Beer-Lambert yasası ile açıklanmaktadır.

2.4.1 Beer-Lambert yasası

NDIR gaz sensörleri, Şekil 2.4'de [28] görüldüğü gibi bir kızılötesi radyasyon kaynağı, bir dedektör ve bir optik sensör kapsülünden oluşur.



Şekil 2.4 : NDIR gaz sensörlerinin temel yapısı.

Kızılötesi radyasyon kaynağı ile dedektör arasındaki optik yolu içeren kısım optik gaz odası olarak da adlandırılmaktadır. Bir IR ışını, bu optik gaz odasında bulunan IR soğuran gazdan geçtiğinde, gaza karşılık gelen belirli bir dalga bandı radyasyonu, gaz tarafından soğurulur. Soğurulma sonucu, dedektöre ulaşan IR ışını yoğunluğunda azalma meydana gelir [29]. Gaz emiliminden önceki ve sonraki kızılötesi ışık yoğunluğuna bağlı olarak, gaz konsantrasyonu Beer-Lambert yasası ile hesaplanır:

$$I/I_0 = e^{-k \cdot C \cdot l} \quad (2.5)$$

$$A = -k \cdot C \cdot l \quad (2.6)$$

Denklem 2.5’de $I(W/cm^2)$ IR radyasyonun hedef gazdan geçtikten sonraki radyasyon yoğunluğudur; $I_0(W/cm^2)$ gelen IR radyasyonun yoğunluğudur; $k(M \cdot cm^{-1})$ emilim katsayısıdır; $C(M)$ gaz konsantrasyonudur; ve $l(cm)$ IR ışınların algılayıcıya ulaşana kadar aldığı optik yol uzunluğudur. Denklem 2.6’da A absorbans olarak tanımlanmaktadır [30]. Absorbans değeri oldukça küçük kabul edilirse denklem 2.7’deki gibi lineer bir ilişki elde edilebilmektedir.

$$I = I_0 \cdot (-k \cdot C \cdot l) \quad (2.7)$$

Beer-Lambert yasasında görüldüğü gibi, optik yol uzunluğunun artırılması, kaynaktan saçılan ışınların daha fazla yansımaları ve daha fazla gaz molekülü ile çarpışarak soğurulmasını sağlar [31]. Ancak optik yol uzunluğu artırılırken algılayıcıya ulaşan IR ışın yoğunluğu da göz önünde bulundurulmalıdır. Işınlar her yansımadan sonra enerji kaybedeceğinden, optik yol uzunluğu artırılırken algılayıcıya ulaşan ışık yoğunluğu azalmaktadır. Algılayıcının doğru ölçüm yapabilmesi için, bu iki faktör arasındaki denge göz önünde bulundurulmalıdır.

3. DAĞILMAYAN KIZILÖTESİ GAZ ÖLÇÜM SİSTEMLERİ

Dağılmayan kızılötesi (*NDIR*) gaz algılama, en yaygın kullanılan optik gaz algılama tekniklerinden biridir ve ticari üretimde çok çeşitli sensör tasarımları bulunmaktadır [8]. Bu NDIR gaz sensörleri, kızılötesi radyasyon kaynağı, algılayıcı ve optik sensör kapsülü olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır.

3.1 Kızılötesi Radyasyon Kaynakları

NDIR gaz algılama sistemleri, kızılötesi dalga boyu bölgesindeki elektromanyetik radyasyonun emiliminden, yani kızılötesi absorpsiyon spektroskopisinden yararlanır. Kızılötesi dalga boyu bölgesinde IR radyasyon üretmek için birçok yöntem mevcuttur ve NDIR uygulamaları için özel tasarlanmış IR radyasyon kaynakları bulunmaktadır. NDIR gaz sensörü uygulamalarında en yaygın kullanılan kızılötesi radyasyon kaynakları IR lambalar, IR ledler ve Mikro-elektro-mekanik (*MEM*) IR yayıcılarıdır. Bir NDIR gaz sensöründe kullanılacak IR radyasyon kaynağına karar verilirken, hedef gazın absorpsiyon dalga boyu, algılama limiti seviyesi ve kullanılacak dedektör tipi göz önünde bulundurulmalıdır.

3.1.1 IR akkor lamba

Bir cisim ısıtıldığında, cismin içindeki atomlar termal olarak uyarılır. Bu atomların dış yörüngedeki elektronları sağlanan enerji nedeniyle daha yüksek bir enerji seviyesine sıçrar. Bu daha yüksek enerji seviyelerindeki elektronlar kararlı değildir, bu yüzden tekrar daha düşük enerji seviyelerine düşerler. Elektronlar daha yüksek enerji seviyelerinden daha düşük enerji seviyelerine düşerken iki enerji seviyesi arasındaki fazla enerjilerini bir foton formunda serbest bırakırlar. Bu fotonlar daha sonra nesnenin yüzeyinden elektromanyetik radyasyon şeklinde yayılır [32]. Bu radyasyon farklı dalga boylarına sahiptir. Dalga boylarının bir kısmı görünür dalga boyları aralığındadır ve önemli bir kısmı da kızılötesi aralıktadır.

Akkor, bir nesneyi ısıtarak görünür ışık üretmek anlamına gelir [33]. Şekil 3.1’de [34] örneği görülen, bir akkor lamba bu prensipte çalışır. Görünür ışık üretmek için ince bir filaman ve ince bir filamandan akan elektrik akımından yararlanır. Akım, filamanın sıcaklığını parlak hale gelecek kadar yükseltir.



Şekil 3.1 : IR akkor lamba.

Basit üretim süreçleri ile elde edilmesi, akkor lambaların ekonomik olmalarını sağlamaktadır. Bu lambalar yüksek çıkış enerjisi, geniş dalga boyu aralığı ve düşük maliyetleri nedeniyle NDIR gaz sensörlerinde tercih edilmektedirler [35].

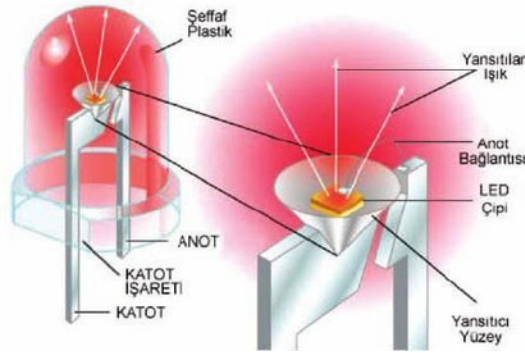
Akkor lambalarda, filamanın oksidasyonunu önlemek amacıyla lamba camı kullanılmaktadır. Yüksek çalışma sıcaklığından dolayı, filament yüzeyinde bulunan tungsten, buharlaşma eğilimi gösterir ve lamba camının iç yüzeyinde birikir. Bu durum zamanla camda kararmalara neden olmaktadır. Bunun yanında, lamba camı, spektral iletimine bağlı olarak kızılötesi radyasyonu engelleyici etki de göstermektedir [36]. Bunlar IR akkor lambalarının zayıf yönleridir.

3.1.2 IR led

NDIR uygulamalarında kullanılan diğer alternatif IR radyasyon kaynakları IR LED’lerdir. Bir IR LED, Şekil 3.2’de [34] görüldüğü gibi, anot ve katot olmak üzere içinde yarıiletken bulunan LED çipinden oluşan iki uçlu bir ışık kaynağıdır. Uçlara uygun bir gerilim uygulandığında, elektronlar yarıiletken içindeki elektron delikleriyle birleşerek fotonlar şeklinde enerji açığa çıkarır. Bu etki elektrolüminesans olarak adlandırılır. Saçılan fotonun özelliği yarıiletkenin enerji bant aralığına bağlıdır.

IR LED’lerin emisyon bantları oldukça dar, ama hedef gazın absorpsiyon bandını kaplayacak kadar geniş olarak optimize edilebilmektedir [37]. Bu özellikleri IR

LED'lerin oldukça seçici olmasını sağlamaktadır. Bu LEDler IR akkor lambalara kıyasla düşük güç tüketimine ve daha uzun ömre sahiptir.



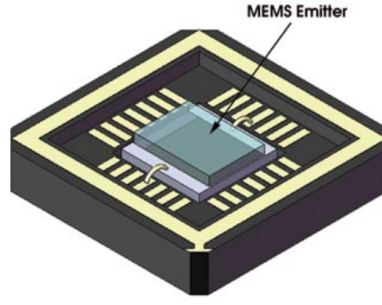
Şekil 3.2 : IR LED.

IR LEDler 1.3-2.3 μm dalga boyu aralığında herhangi bir soğutma gereksinimi doğurmadan düzgün çalışmaktadır. Ancak 3 μm 'den yüksek dalga boylarında iletkenlikleri sıcaklığa bağımlı hale gelmektedir. Bu durum yarıiletkenlerdeki radyasyon rekombinasyonunun azalmasına neden olmaktadır [38]. Bu yüzden IR LED'ler 3 μm 'den yüksek dalga boylarında daha kısa dalga boylarında olduğu kadar güvenilir şekilde çalışamazlar. Ayrıca IR LED'ler Poisson, 1/f, termal gürültü gibi birçok gürültü kaynağına sahiptir [39]. Bir diğer zayıf yönleri ise IR akkor lambalara kıyasla daha pahalı olmalarıdır.

3.1.3 MEM kızılötesi yayıcılar

Mikro-elektro-mekanik (MEM) yapılı IR yayıcıların çeşitlerinin sayısı son yıllarda büyük ölçüde artmıştır. Şekil 3.3'te [40] görüldüğü gibi, genellikle silikon alt tabaka üzerine inşa edilmiş dielektrik malzeme içine gömülü tungsten ya da platin malzemelerden yapılmış bir filamana sahiptirler. Akım uygulandığında filaman sıcaklığı yükselir ve radyasyon yayar.

Dielektrik malzeme filamanı alt tabakadan termal olarak izole etmek amacıyla kullanılmaktadır. Dielektrik malzeme sayesinde ısıtma süresi minimize edilerek güç tüketimi de azaltılmaktadır. Yüksek termal iletkenlik hızlı soğumayı mümkün kılar. Bu yüzden IR akkor lambaya kıyasla çalışma hızları daha yüksektir [41].



Şekil 3.3 : MEM IR radyasyon kaynağı yapısı.

Bu radyasyon kaynaklarında cihazın yüzeyi ilgilenilen dalga boyunda emisyonun sağlanabilmesi için özel olarak işlenebilmektedir. Böylece radyasyon kaynağının spektrumu, konsantrasyonu ölçülmek istenen gazın absorpsiyon aralığını kapsayacak şekilde tasarlanabilmektedir [42]. Diğer radyasyon kaynaklarına göre daha küçük bir yapıya sahip olmaları ve daha az güç tüketmeleri diğer avantajlarındandır.

Ancak IR akkor lambalar bu radyasyon kaynaklarına kıyasla daha geniş spektral aralıkta radyasyon yayabilmektedir. Ayrıca MEM radyasyon kaynaklarına kıyasla daha ucuz olmaları, IR akkor lambaları daha uygun maliyetli çözüm haline getirebilmektedir.

3.2 Termal Dedektörler

Termal dedektörler, sıcaklıktaki değişikliğe bağlı olarak ölçüm alan dedektörlerdir. Algılama yöntemi sahip oldukları sıcaklığa duyarlı elemanları üzerine düşen radyasyon akısının sıcaklık farkı yaratmasına dayanmaktadır. Sıcaklık değişimine bağlı olarak sıcaklığa duyarlı malzemenin fiziksel özelliklerinde değişim meydana gelir ve dedektör tarafından bir sinyal üretilir [43].

Termal dedektörlerin, termal algılama yöntemine göre farklı çeşitleri bulunmaktadır. Günümüzde çoğunlukla tercih edilen termal dedektörler, piroelektrik dedektörler, termopil dedektörler ve bolometrelerdir. Bu dedektörlerin fotocevap (R), gürültü eşdeğer gücü (NEP) ve dedektivite (D^*) olmak üzere performansını belirleyen üç önemli parametre vardır.

Fotocevap (R_v), dedektörün çıkış gerilimi ya da akımının gelen ışımının gücüne oranıdır. Birimi dedektör çıkışına bağlı olarak $[V/W]$ ya da $[A/W]$ 'dir [43].

$$R_v = (V_{RMS}/\phi_{RMS}) \quad (3.1)$$

Denklem 3.1'de V_{RMS} [V] dedektör tarafından üretilen gerilim değerinin kök-kare-ortalamasıdır; ϕ_{RMS} [W] dedektör üzerine düşen termal radyasyonun güç değerinin kök-kare-ortalamasıdır. Yüksek bir çıkış sinyali elde etmek için fotocevap değerinin yüksek olması istenen bir durumdur.

Gürültü eşdeğer gücü (NEP) dedektörün algılayabileceği minimum güç değerini ifade etmek için kullanılır; dedektörün algılayacağı minimum ışık şiddetinin ölçüsünü verir. Birimi $[W/\sqrt{Hz}]$ 'dir [44].

$$NEP = (N/R_v\sqrt{\Delta f}) \quad (3.2)$$

Denklem 3.2'de N gürültü gerilimidir; Δf gürültü geriliminin ölçüm bant genişliğidir; R_v dedektörün duyarlılık değeridir. Hassas ölçüm almak için bu değer küçük olması beklenir.

Dedektivite, dedektör alanı ve frekans bant genişliğine bağlı olarak dedektör performansını ifade eden terimdir. Birimi $[cm\sqrt{Hz}/W]$ 'dir. Dedektivite değeri ne kadar büyük ise, dedektör performansı o kadar iyidir.

$$D^* = \sqrt{A_d\Delta f}/NEP \quad (3.3)$$

Denklem 3.3'de A_d dedektör alanıdır; Δf frekans bant genişliğidir. D^* değeri bazen frekans bant genişliğinden bağımsız olarak denklem 3.4'de görüldüğü gibi de karşımıza çıkmaktadır [45].

$$D^* = \sqrt{A_d}/NEP \quad (3.4)$$

3.2.1 Piroelektrik dedektörler

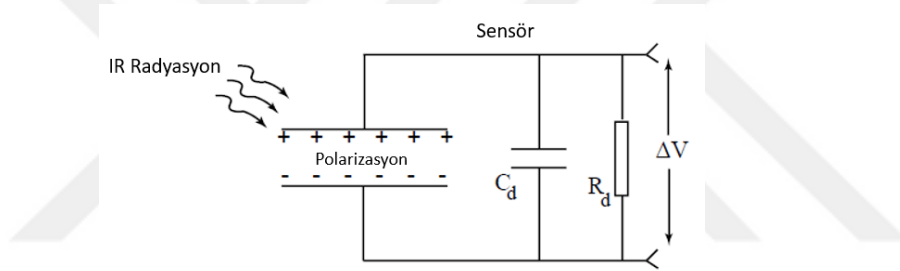
Piroelektrik dedektörler, sıcaklığında oluşan değişikliğe bağlı olarak yüzeyinde elektrik yükü üreten piroelektrik kristallerden oluşur. Bu kristallerde meydana gelen sıcaklık değişimi kristal malzemeyi genişletir ve dielektrik sabitini değiştirir. Bu durum malzeme içinde pozitif ve negatif polarizasyon yüklerinde değişim meydana

getirir ve malzemenin farklı yüzlerinde zıt yüklerin birikimi gerçekleşir. Böylece sıcaklığa bağlı olarak piroelektrik bir akım oluşur.

$$I_p = p * A * (dT/dt) \quad (3.5)$$

Denklem 3.5’de p kullanılan malzemenin piroelektrik katsayısıdır; A malzemenin yüzey alanıdır; T sıcaklıktır; I_p oluşan piroelektrik akımdır. Oluşan akım sıcaklık değişimi ile doğru orantılıdır.

Piroelektrik dedektörler uzun dalga boyu ışıma spektrumuna sahiptir (2-14 μm) [46]. Bu yüzden NDIR uygulamalarında kullanıma uygundurlar. Alınmak istenen çıktıya bağlı olarak voltaj modu ya da akım modunda kullanılırlar. Bu sensörlerde, mikrofoniğin gürültü görülmektedir. Şekil 3.4’de [47] piroelektrik sensörün optik sinyali elektrik sinyaline dönüştürme süreci görülmektedir.

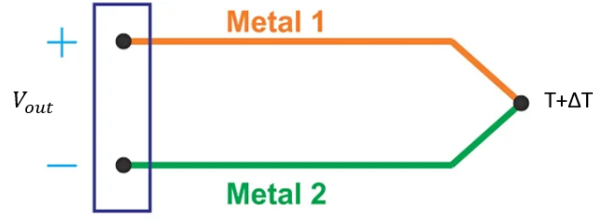


Şekil 3.4 : Voltaj modunda piroelektrik sensör eşdeğer devresi.

Piroelektrik dedektörler, 7 μm ’nin ötesindeki orta-IR spektrumu hedeflendiğinde, maliyet etkinlikleri ve çözünürlükleri nedeniyle gaz sensörlerinde kullanılan iyi bilinen dedektörlerdir [48].

3.2.2 Termofil dedektörler

Termofil dedektörlerin çalışma prensibi , Seebeck etkisine dayanmaktadır. Seebeck etkisi, iki farklı metal malzeme bağlantısının bir ucu sıcaklıktaki bir değişikliğe maruz kaldığında, malzemedan küçük bir akım akacağını gösterir [49]. DC bağlantılı bir okuma devresi ile çalışırlar. Bu sensörlerde, genellikle termal gürültü görülmektedir. Şekil 3.5’de iki farklı metalden oluşan termokupl görülmektedir.



Şekil 3.5 : Termokupl şematik gösterimi.

Seebeck etkisine göre, bir termokupl Metal 1 ve Metal 2 olmak üzere iki farklı metalden oluşur. Kızılötesi radyasyon bu iki metalin bağlantı noktası üzerine düştüğünde soğurulur ve sıcaklık değişimine bağlı olarak bir açık devre gerilimi üretilir. Çıkış voltajı (V_{out}) [V] ile uygulanan sıcaklık farkı (ΔT) [K] ilişkisi şu şekilde gösterilmektedir:

$$V_{out} = \alpha * \Delta T \quad (3.6)$$

Denklem 3.6'da α [V/K] Seebeck katsayısıdır. Tek bir termokupldan gelen çıkış voltajı oldukça küçüktür ($\mu V/K$). Bu yüzden genellikle tek bir termokupl çıkış voltajı ölçüm için yeterli olmaz. Çıkış voltajını artırmak için belirli sayıda termokupllar seri bağlanarak termopiller oluşturulur. Kullanılan malzemeler genellikle yarıiletken ya da metallerdir.

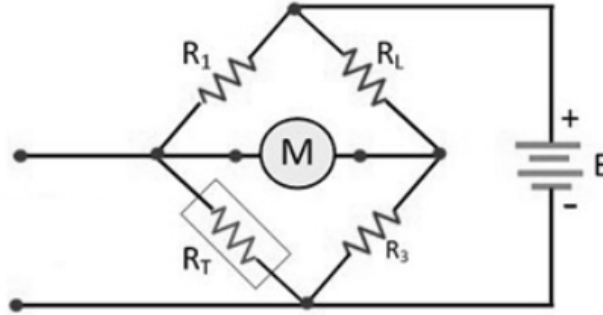
Çizelge 3.1 : Farklı malzemelerin Seebeck Katsayıları.

Malzeme	Seebeck Katsayısı [$\mu V/^\circ C$]
Alüminyum	3.5
Demir	19
Altın	6.5
Bakır	6.5
Platin	0
Silikon	440
Gümüş	6.5
Germanyum	300
Potasyum	-9.0

Çizelge 3.1’de [50] farklı malzemelere ait 0°C’de Seebeck katsayıları ($\mu V/ ^\circ C$) görülmektedir. Verimliliğini korurken NDIR sensörünün maliyetini ve güç tüketimini azaltmak için mikro işlenmiş termopil dedektörleri tercih edilmektedir.

3.2.3 Bolometre dedektörler

Bolometreler, sıcaklığa duyarlı termistörler kullanılarak, üzerine düşen elektromanyetik radyasyonun gücünü veya ısısını algılayan sensörlerdir.



Şekil 3.6 : Bolometre devre şematığı.

Termistörler, direnci sıcaklığa bağlı olarak değişen direnç elemanlarıdır. Bu termistörler, bir köprü devresine Şekil 3.6’de [51] görüldüğü gibi bağlanırlar. Köprü devresi dirençte meydana gelen değişimi ölçer. Bu dedektörlerde çalışma prensibine bağlı olarak, baskın olarak termal gürültü ve 1/f gürültüsü görülmektedir.

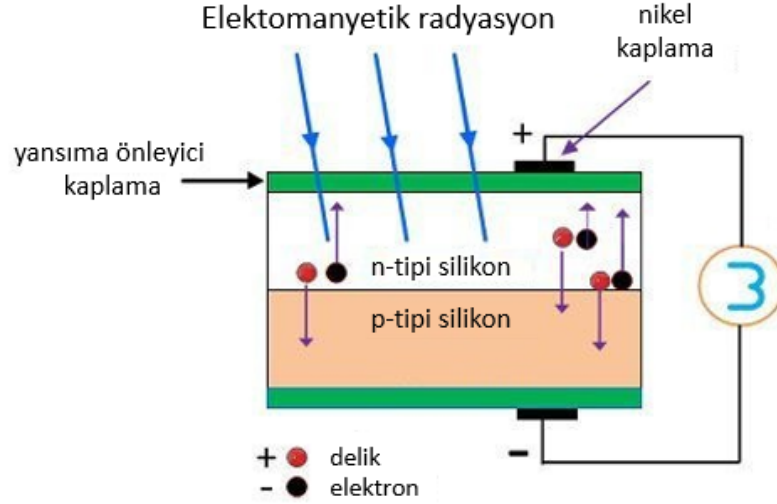
Kızılötesi uygulamalarda kullanıma uygun olan bu dedektörler, hızlı ölçüm gerektiren uygulamalarda tercih edilmemektedir. Genel olarak bolometreler, $8 \mu m - 12 \mu m$ mertebesindeki IR dalga boylarında verimli çalışırlar. Bu nedenle, absorpsiyon spektroskopisi bu dalga boyu aralığında olmayan gazların algılanması amacıyla tasarlanan sistemler için uygun değildir.

3.3 Fotonik dedektörler

Fotonik dedektörler, üzerine düşen ışımaya bağlı olarak bir elektrik çıktısı üreten dedektörlerdir. Ticari olarak en çok kullanılan türleri fotovoltaiik ve fotoiletken dedektörlerdir.

3.3.1 Fotovoltaik dedektörler

Fotovoltaik etki, üzerine elektromanyetik radyasyon düşen fotovoltaik bir hücrede voltaj ya da elektrik akımını üretilmesidir. Fotovoltaik hücreler p-tipi ve n-tipi olmak üzere iki farklı türde yarıiletkenlerden oluşmaktadır [52].



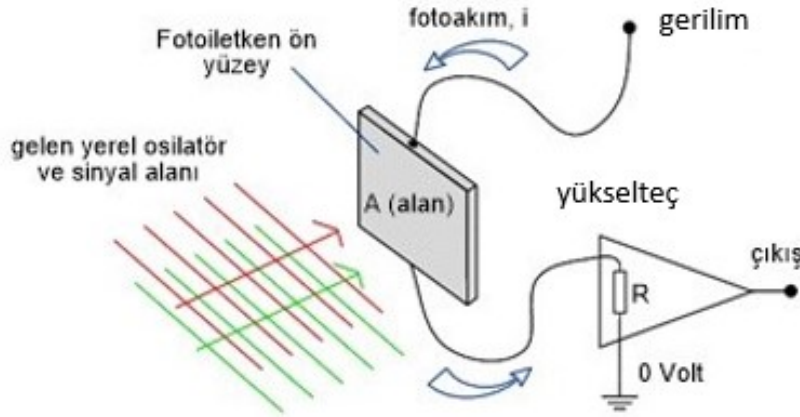
Şekil 3.7 : Basit fotovoltaik dedektör devre şematiği.

Şekil 3.7’de [53] fotovoltaik hücre yapısı görülmektedir. Bu hücrede elektronlar pozitif tarafa (p tarafına) delikler negatif tarafa (n tarafına) hareket ettikçe iki yarıiletkenin birleşim bölgesinde bir elektrik alan oluşmaktadır. Hücre üzerine düşen fotonlar yarıiletkenin elektronlarını uyarak elektronların bir üst enerji bandına sıçramasına sebep olur. Her bir elektron bu şekilde sıçrama sonucu delikler oluşturur. Bu elektron-delik çiftleri difüzyon yoluyla iki yarıiletkenin birleşim noktasına doğru ilerleyerek, bu bölgenin sahip olduğu elektrik alan sayesinde diğer tarafa geçer. Elektron-delik çiftlerinin bu hareketi bir akım oluşmasını sağlar. Böylece hücre üzerine düşen radyasyon yoğunluğu hesaplanabilir.

3.3.2 Fotoiletken dedektörler

Fotoiletken dedektörler, ışığa duyarlı yarıiletkenlerin özelliklerinden faydalanılarak elde edilmektedir. Dedektörde kullanılan yarıiletken malzeme, dedektör üzerine düşen

radasyonun soğurulmasını sağlar ve buna bağı olarak bir elektrik sinyali üretir [54]. Şekil 3.8'de [55] bir fotoiletken dedektöre ait devre şematiğı görölmektedir.



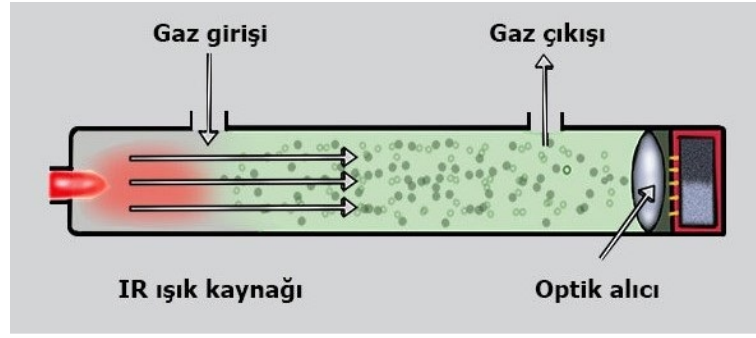
Şekil 3.8 : Basit fotoiletken dedektör devre şematiğı.

Yarıiletken malzeme tarafından radyasyon Emilimi gerçekleştiğinde, soğurulan radyasyonun enerjisi yeterince büyükse, yarıiletken malzemedeki serbest elektron sayısı artar. Bu sayede, yarıiletken malzemenin iletkenliği de artar. İletkenliği değişen yarıiletken üzerindeki voltaj değişimi gözlemlenerek radyasyon miktarı ölçülebilmektedir.

3.4 Optik Sensör Kapsülü

Optik sensör kapsülü, NDIR gaz sensörlerinde kızılötesi radyasyon ile gaz molekülleri arasındaki etkileşimin gerçekleştiği mekanik kısımdır. Bu kısım optik gaz hücresi ya da optik gaz odacığı olarak da adlandırılmaktadır.

Optik sensör kapsülü, kızılötesi radyasyon kaynağı ile kızılötesi dedektörü içine alır. Sensör kapsülünde gaz giriş-çıkışının sağlanması için Şekil 3.9'de [56] görüldüğü gibi açıklıklar bulunur. Ortamda hedef gaz bulunması durumunda, gaz molekülleri difüzyon yoluyla bu açıklıklardan kapsül içine dolmaktadır. Kızılötesi radyasyon kaynağından saçılan ışınlar kızılötesi dedektöre ulaşmaya kadar kapsül içerisinde yol alır. Kapsül içerisinde hedef gaz bulunması durumunda, ışınlar gaz molekülleri tarafından Emilime uğrar ve sonrasında kızılötesi dedektöre ulaşır.



Şekil 3.9 : Optik gaz kapsülü temel yapısı.

NDIR gaz sensörlerinde optik yol uzunluğunu belirleyen kısım optik sensör kapsülüdür. Gaz kapsülü içerisinde kızılötesi algılayıcı ile kızılötesi dedektör arasında kalan, kızılötesi radyasyon kaynağından saçılan ışınların yol aldığı kısım optik yol olarak adlandırılmaktadır. Bu kısımda ışınlar yansımalar yaparak yol almaktadır. Bu yüzden kapsül içerisindeki optik yol tasarımı ışınları kızılötesi dedektöre yönlendirecek ve optik yol uzunluğunu belirleyecek şekilde tasarlanmalıdır.

3.4.1 Optik sensör kapsülü ölçüleri

Optik bir hücrede enerji toplama verimliliği geometrik yapısına bağlı olarak açıklanmaktadır. Genel verim ile geometrik yapı arasındaki ilişki denklem 3.7 'de görülmektedir [12].

$$T = A * \Omega * \rho \quad (3.7)$$

Denklem 3.7'de A elektromanyetik radyasyonun yayılma alanıdır; Ω katı açıdır; ρ hücre içinde yansımalarla kaynaklı ek kayıplardır. Verimliliği artırmak için hücrenin geniş açıklıklara sahip olması gerekir.

15 yılı aşkın süredir ticari pazarda küçük formatta NDIR gaz sensörleri tercih edilmektedir. Gaz sensörü endüstrisi tarafından kabul gören standart minyatür format NDIR gaz sensörleri 20 mm çapında, 16-21.5 mm yüksekliğinde bir silindir şeklindedir [57] [58] [59] [60]. Ekipman üreticileri NDIR sensörleri kullanacakları yuvaları da bu ölçülere uygun tasarlamaktadır. Bu nedenle NDIR sensör kapsülü tasarımlarında bu ölçülere uyulması önemlidir.

Optik sensör kapsülü içerisinde bulunması gereken kızılötesi radyasyon kaynağı ve kızılötesi dedektörde kapsül de alan kısıtlamaları yaratmaktadır. Kapsül hacmindeki bu kısıtlamalar, optik yol uzunluğunu ve optik verimliliği etkilemektedir.

3.4.2 Optik sensör kapsülü malzemesi

Optik sensör kapsülü içerisinde, kızılötesi radyasyon kaynağından saçılan ışınlar yansımalar yaparak kızılötesi algılayıcıya ulaşmaktadır. Elektromanyetik ışınlar yansıtıcı bir yüzey üzerine gönderildiğinde, bu ışınlar yüzeyden yansırken gönderildiği yüzeyin optik özelliklerine bağlı olarak her yansıma sonrasında enerji kaybetmektedir.

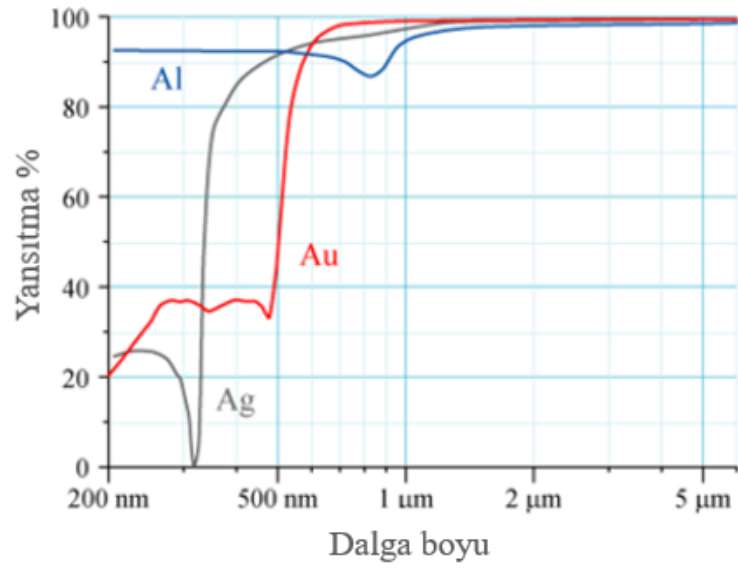
Fresnel yasası, bir yüzeye düşen elektromanyetik ışınların yansımalarını açıklamaktadır. Yansıtıcı yüzey olarak seçilen bir malzeme üzerine düşen elektromanyetik ışınların bir kısmı yansıtılırken, bir kısmı malzeme tarafından geçirilmektedir [61]. Elektromanyetik ışınların ne kadarının yansıtılıp ne kadarının geçirildiği kullanılan malzemenin yansıtma ve geçirgenlik katsayısına bağlıdır. Fresnell yasasına göre:

$$R + T = 1 \quad (3.8)$$

Denklem 3.8’de R, malzemenin yansıtma katsayısıdır, T, malzemenin geçirgenlik katsayısıdır. Optik gaz kapsülü içerisinde kızılötesi algılayıcıya iletilen ışın miktarını arttırmak için, kapsül malzesinin yansıtma katsayısı yüksek olmalıdır.

NDIR gaz algılama uygulamalarında optik sensör kapsülü malzemesi genellikle metal malzeme seçilir. Metal malzemeler serbest elektronlara sahiptirler. Bu serbest elektronlar malzeme yüzeyinde düzenli bir dağılıma sahiptir ve bu nedenle metaller parlak bir yüzeye sahiptir. Aynı zamanda metal malzemeler düzgün kristal yapıları sayesinde pürüzsüz bir yüzeye sahiptir [62]. Bu özellikleri sebebiyle metaller oldukça iyi yansıtıcılardır.

Şekil 3.10’de [63] en yüksek yansıtma katsayısına sahip altın, gümüş ve alüminyum malzemesine ait dalga boyuna bağlı yansıtma katsayıları görülmektedir. Bu malzemeler yüksek yansıtma katsayıları sebebiyle NDIR gaz algılama sistemlerinde kapsül ya da kaplama malzemesi olarak çoğunlukla tercih edilen malzemelerdir.



Şekil 3.10 : Alüminyum (Al), gümüş (Ag) ve altın (Au) metal yüzeyler için dalga boyuna göre yansıtma oranı.



4. NDIR METAN (CH_4) GAZ SENSÖRÜ TASARIMI

Endüstriyel NDIR Metan (CH_4) gaz sensörünün tasarımından önce, tasarımda dikkate alınması gereken sistem kriterleri belirlenmiştir. NDIR gaz sensörü tasarımı bu gereksinimler doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Belirlenen bu gereksinimler aşağıda listelenmiştir:

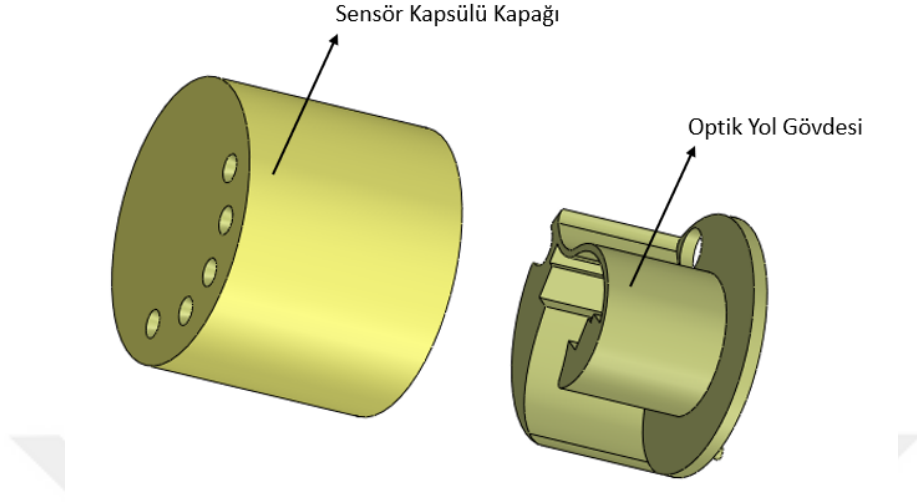
- 1) Endüstriyel NDIR gaz sensörü, gaz sensörü endüstrisi tarafından kabul gören standart minyatür formata uygun ölçülerde olmalıdır.
- 2) Endüstriyel NDIR gaz sensöründe, optik sensör kapsülü tasarımı optik verimlilik göz önünde bulundurularak tasarlanmalıdır.
- 3) Endüstriyel NDIR gaz sensörü, sabit geometriye sahip kompakt yapıda olmalıdır.
- 4) Endüstriyel NDIR gaz sensörü, gaz difüzyonu için uygun bir tasarıma sahip olmalıdır.
- 5) Endüstriyel gaz sensörü, düşük güç tüketimine sahip olmalı ve kullanılacak elektronik ölçüm ekipmanlarına kolayca bağlanabilmelidir.

4.1 Optik Sensör Kapsülü

Bir NDIR gaz sensöründeki optik gaz kapsülü dört önemli amaca sahiptir: yayılan kızılötesi radyasyonun dış ortam faktörlerinden etkilenmeden dedektöre ulaşması için bir optik yol sağlamak, hedef gazın difüzyonuna uygun yapı sağlamak, hedef gaz ile radyasyonun etkileşimi için sınırlı bir hacim oluşturmak ve gaz sensörü için genel kompakt bir yapı oluşturmak.

Bu çalışmada, yukarıda belirtilen tasarım gereksinimleri göz önünde bulundurularak, endüstriyel standartlara uygun 20 mm çapında 16.15 mm yüksekliğinde silindirik yapıda Şekil 4.1'de [64] görülmekte olan optik sensör kapsülü tasarımı yapılmıştır.

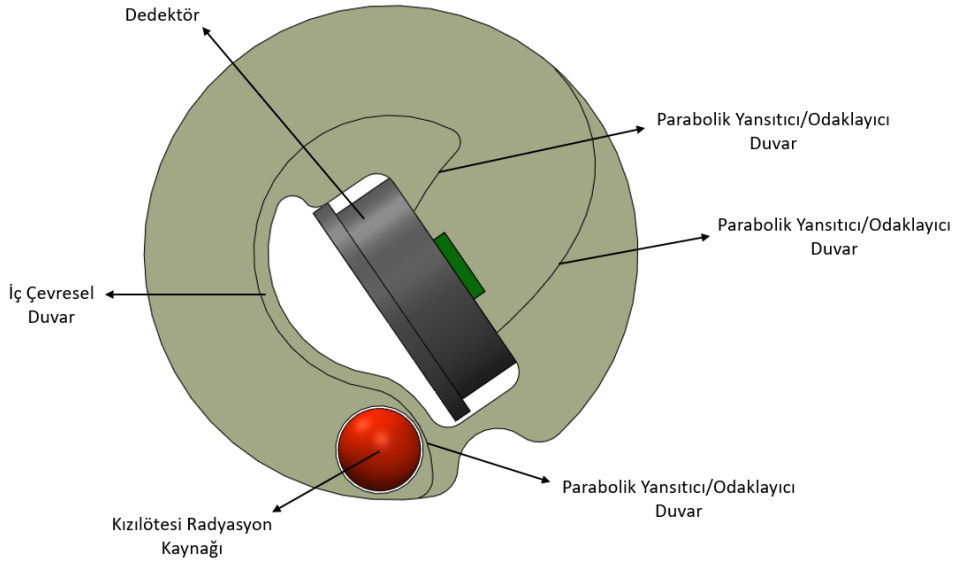
Optik sensör kapsülü, imalat ve montaja uygun olarak optik yol gövdesi ve sensör kapsülü kapağı olmak üzere iki parça olarak tasarlanmıştır.



Şekil 4.1 : Optik sensör kapsülü parçaları genel görünümü.

4.1.1 Optik yol tasarımı

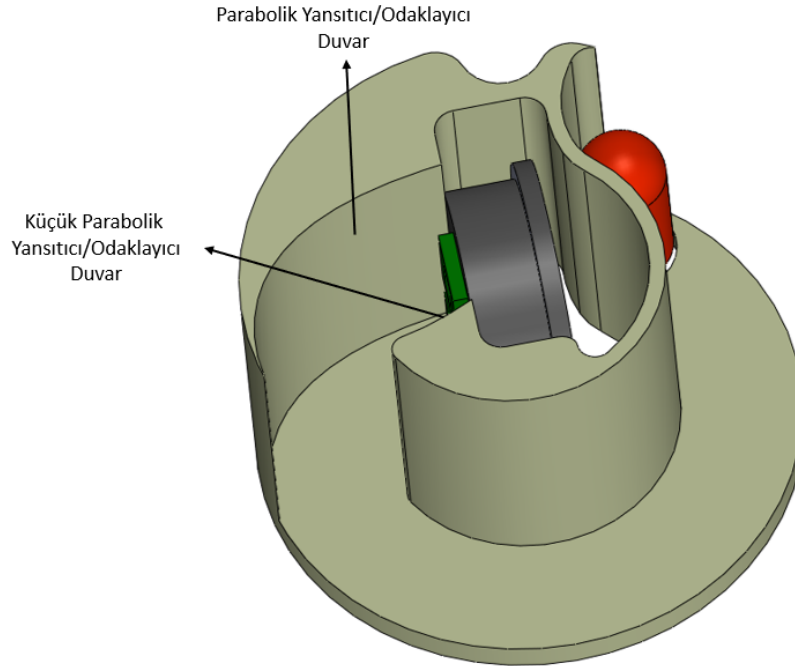
Optik yol gövdesi tasarımı, Solidworks 3D tasarım programı kullanılarak yapılmıştır. Yapılan tasarım, Şekil 4.2’de [64] Solidworks programından alınmış bir ekran görüntüsü olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.2 : Optik yol gövdesi tasarımı üst görünümü.

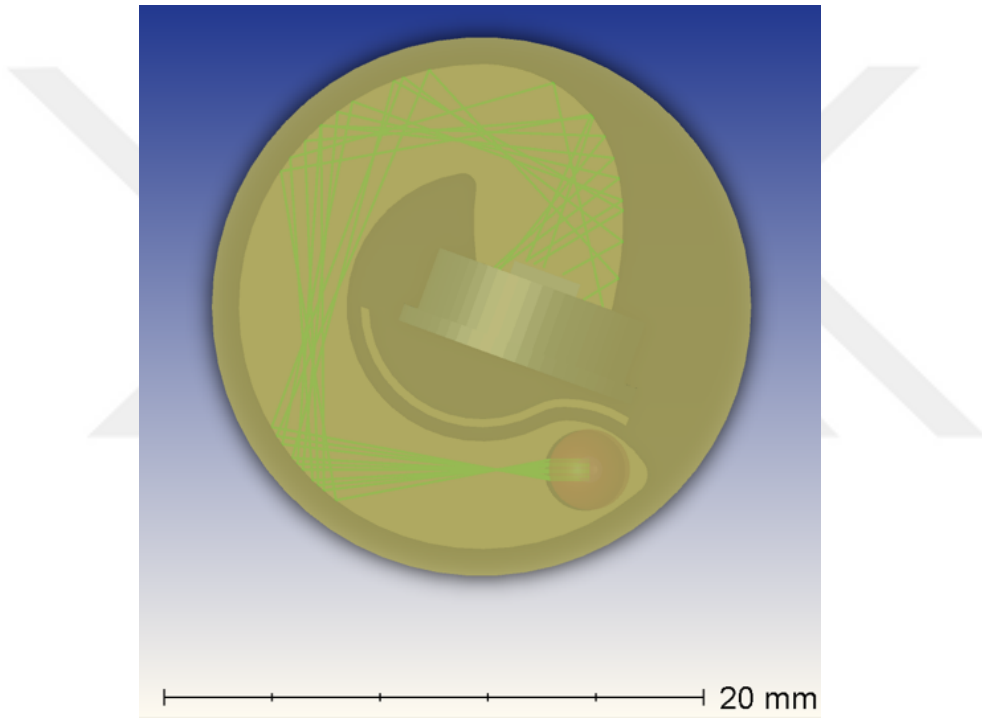
Optik yol tasarımı, genel hatlarıyla iç içe geçmiş iki çevresel silindirik duvardan oluşmaktadır. İç çevresel duvar optik yol gövdesi üzerinde olup, dış çevresel duvar sensör kapsülü kapağı ile sağlanmaktadır. İç çevresel duvar, tasarım için yansıtıcı duvar görevi görürken, aynı zamanda kızılötesi dedektör yuvası görevi görmektedir. Yapılan optik yol tasarımında Şekil 4.2’de [64] görüldüğü gibi, kızılötesi radyasyon kaynağı ile kızılötesi algılayıcı sırt sırta yerleştirilmiştir. Kızılötesi dedektör, iç çevresel duvar içine yerleştirilerek optik yoldan ayrılmıştır. Optik yol gövdesi 18mm çapında olup, yüksekliği 9mm’dir. İki çevresel duvar arasında bulunan optik yol genişliği 4mm’dir ve iç hacim 1.44ml’dir.

Kızılötesi radyasyon kaynağı 360° saçılım yapabilmektedir. Bu yüzden rastgele saçılımları engellemek, maksimum odaklamayı sağlamak ve kızılötesi dedektöre iletilen ışıma oranını arttırmak amacıyla kızılötesi radyasyon kaynağının arkasına parabolik yansıtıcı/odaklayıcı duvar yerleştirilmiştir. Parabolik yansıtıcılar, odak noktasından gelen ışınları paralel olarak yansıtmaktadır. Bu ışınları dış çevresel duvara yönlendirmek amacıyla parabolik yansıtıcı/odaklayıcı 60° açıyla konumlandırılmıştır. Kızılötesi radyasyon kaynağı merkezi parabolün odak noktasına (1.65mm) konumlandırılmıştır.



Şekil 4.3 : Optik yol gövdesi perspektif görünümü.

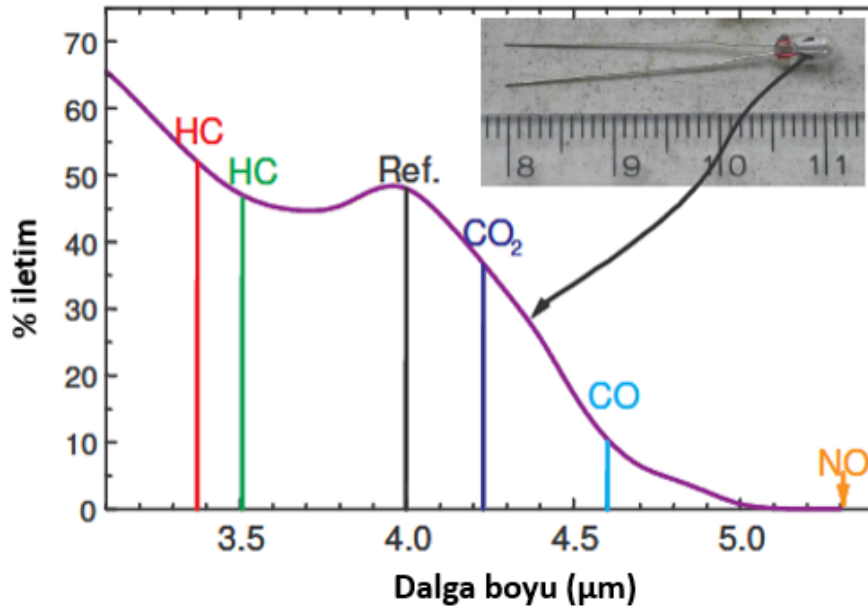
Işıklar iki çevresel duvar arasında yansımalar yaparak ilerlemektedir. Yol sonuna ulaşan ışınları dedektör ölçüm kanalları üzerine yönlendirmek için dedektörün karşısına Şekil 4.3’de görülen parabolik odaklayıcı/yansıtıcı duvar yerleştirilmiştir. Yol sonuna ulaşan ışınlar bu duvar tarafından geliş açılarına bağlı olarak dedektör üzerine yönlendirilmektedir. Tek seferde dedektör üzerine odaklanamayan ışınlar için bu parabolik yansıtıcı/odaklayıcı duvar karşına iç çevresel duvar yapısına bağlanan küçük parabolik yansıtıcı/odaklayıcı duvar yerleştirilmiştir. Dedektör pozisyonu bu parabolik duvarlardan yansıtılan ışınların odaklandığı nokta doğrultusunda, dedektör üzerine düşen ışık yoğunluğu maksimum olacak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 4.4 : Zemax simülasyon ortamına aktarılmış optik sensör kapsülü.

4.1.1.1 Optik kapsül simülasyonu ve sonuçları

Tasarım süreci boyunca, optik sensör kapsülü için gerekli tasarım optimizasyonları ve optik analizler Zemax OpticStudio programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Analizler için programın CAD dosyalarını içe ve dışa aktarma özelliklerinden faydalanılarak mekanik tasarımı ve revizyonları Solidworks 3D CAD tasarım programında gerçekleştirilen sensör kapsülünün optik analizleri de kolaylıkla gerçekleştirilmiştir.



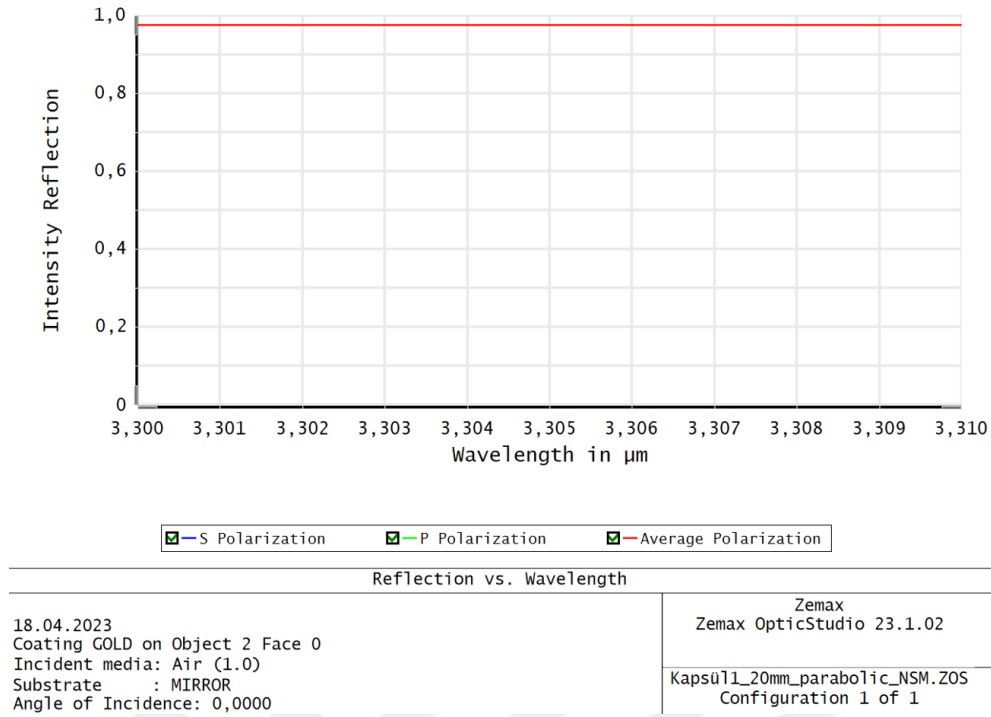
Şekil 4.5 : Kızılötesi radyasyon kaynağının dalga boyuna bağlı iletim oranı.

Kızılötesi radyasyon kaynağı, sensörde kullanılacak radyasyon kaynağı ölçülerinde tasarlanmıştır. Kullanılan radyasyon kaynağının camına ait dalga boyuna göre iletim oranı Şekil 4.5’de [34] görülmektedir. Analiz için cam iletim oranı $3.3\mu m$ dalga boyu için gerçek verilere uygun olarak %55 olarak ayarlanmıştır.

NDIR sensör tasarımında kızılötesi algılayıcı olarak iki kanallı termofil dedektör kullanılmıştır. Dedektör $2.6mm \times 2.6mm$ boyutlarında merkezleri arası mesafe $3.5mm$ olan iki elemana sahiptir. Analiz için her iki algılayıcı elemanı kapsayan $2.6mm \times 6.1mm$ ’lik dedektör alan tanımlanmıştır.

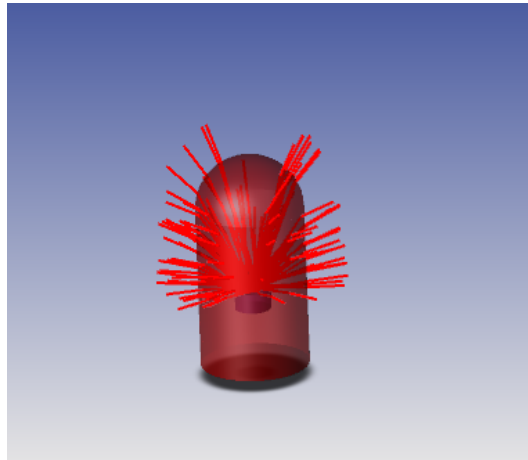
CAD dosyası olarak optik simülasyon programına aktarılan optik sensör kapsülü yansıtıcı yüzey olarak tanımlanmış olup, altın kaplama olarak ayarlanmıştır. $3.3\mu m$ dalga boyu için altın kaplama yüzeyin yansıtıcılığı Şekil 4.6’de görüldüğü gibi yaklaşık %96 civarındadır.

Tasarımda kullanılan parabolik yansıtıcı/odaklayıcı duvar tasarımları ve pozisyonları dedektöre iletilen ışıma oranı maksimum olacak şekilde, sınırlayıcı alan kısıtlamalarına bağlı olarak Zemax analiz programı kullanılarak optimize edilmiştir.



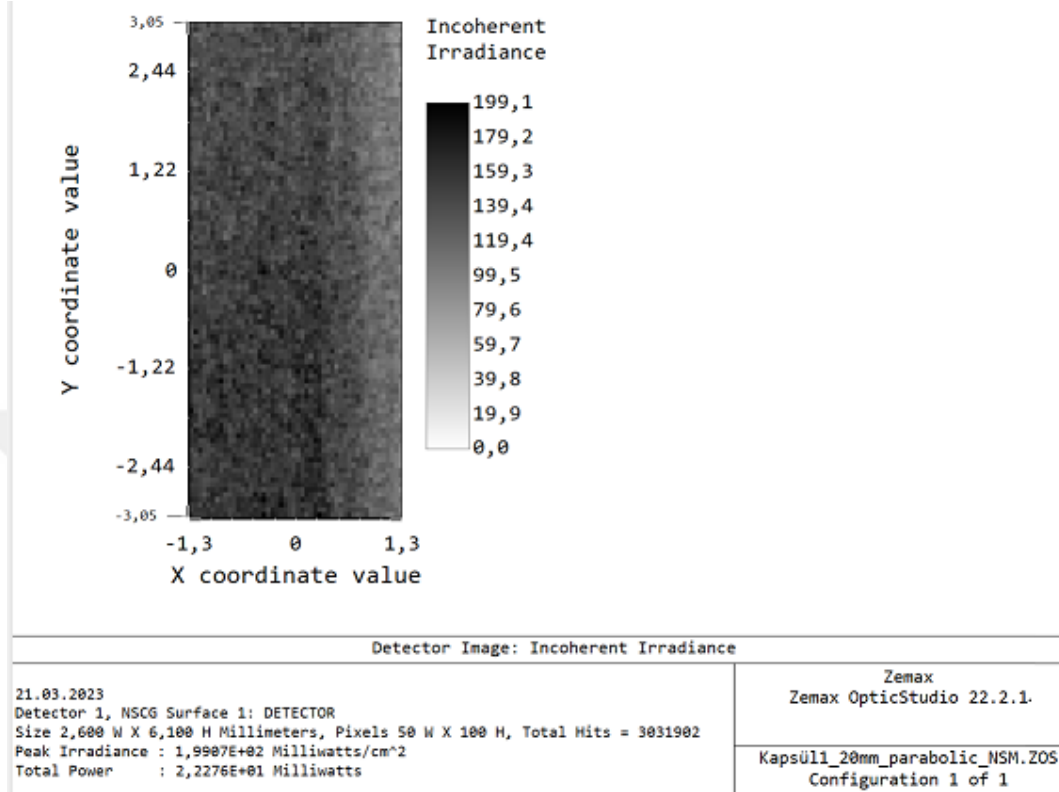
Şekil 4.6 : $3.3 \mu m$ dalga boyunda altın kaplama için yansıtıcılık oranı.

Optik simülasyonlar, Zemax OpticStudio üzerinde ışınların nesnelere herhangi bir sırayla çarpmasına izin veren üç boyutlu ardışık olmayan modda gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda radyasyon kaynağının dalga boyu metan gazı ölçümü için $3.3 \mu m$ olarak ayarlanmıştır. 360° rastgele ışın yapan kaynağın gücü $100 mW$ ve ışın sayısı 1×10^6 'dır. Zemax ortamında tasarlanan kızılötesi akkor lamba Şekil 4.7'de görülmektedir.



Şekil 4.7 : Simülasyonlar için tasarlanan kızılötesi radyasyon kaynağı.

Gaz giriş-çıkış delikleri eklenmemiş optik sensör kapsülü için yapılan simülasyon sonucunda dedektörden okunan değerler Şekil 4.8’de görülmektedir. Toplam güç $22.28mW$ olup optimum ışınlım değeri $199.07 mW/cm^2$ ’dir.



Şekil 4.8 : Simülasyon sonucu dedektörden okunan ışınlım ve toplam güç değerleri.

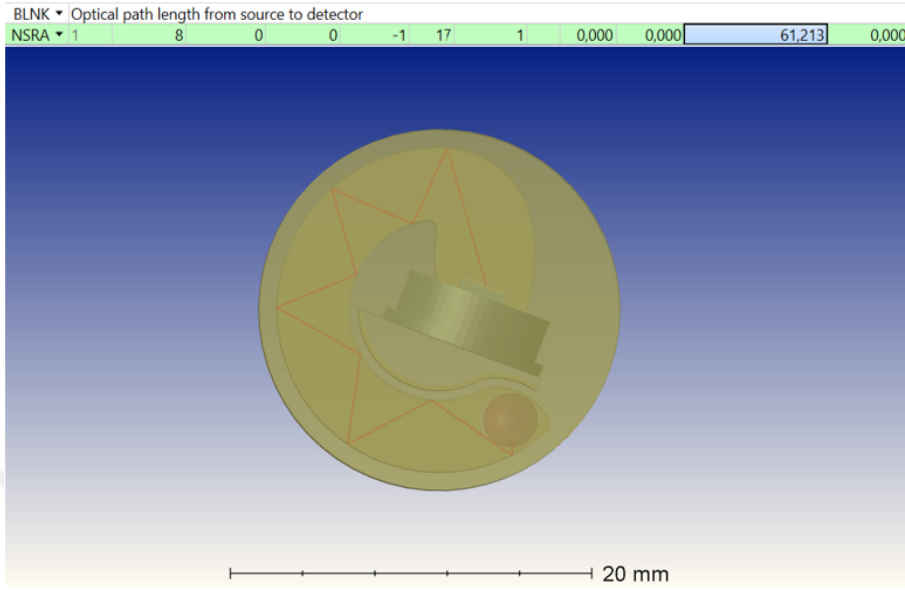
4.1.1.2 Optik yol uzunluğu

Optik yol uzunluğu, kızılötesi radyasyon kaynağından saçılan ışınların kızılötesi algılayıcıya ulaşana kadar aldığı yol olarak tanımlanmaktadır.

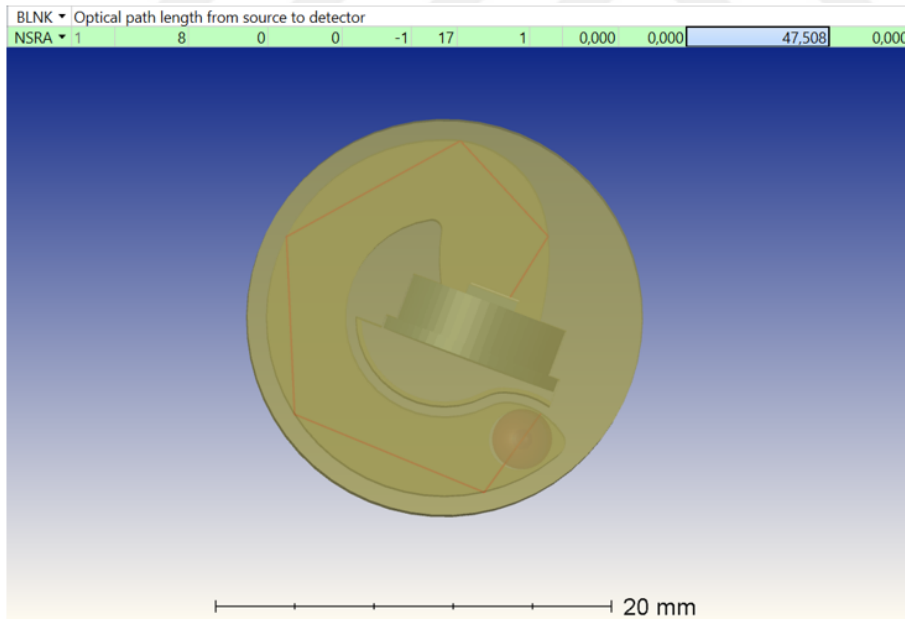
Zemax Opticstudio üzerinde üç boyutlu ardışık olmayan modda optik yol uzunluğu NSRA operatörü kullanarak hesaplanabilmektedir. NSRA operatörü merit fonksiyon düzenleyicisi üzerinden ardışık olmayan mod için kullanılan bir operatördür. NSRA operatöründe 17 numaralı veri tanımlanan iki nokta arasında ışının aldığı optik yol uzunluğunu vermektedir.

NSRA operatörü tek ışın üzerinden hesaplama yaparak optik yol uzunluğunu vermektedir. Bu yüzden ışın açısı 1° değiştirilerek, kızılötesi ışık kaynağından saçılan ve dedektöre ulaşan bir ışının izleyeceği farklı yol alternatifleri için optik

yol uzunluğu verileri okunarak kaydedilmiştir. Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da optik yol simülasyonlarından elde edilen veriler için optik yol örnekleri görülmektedir.

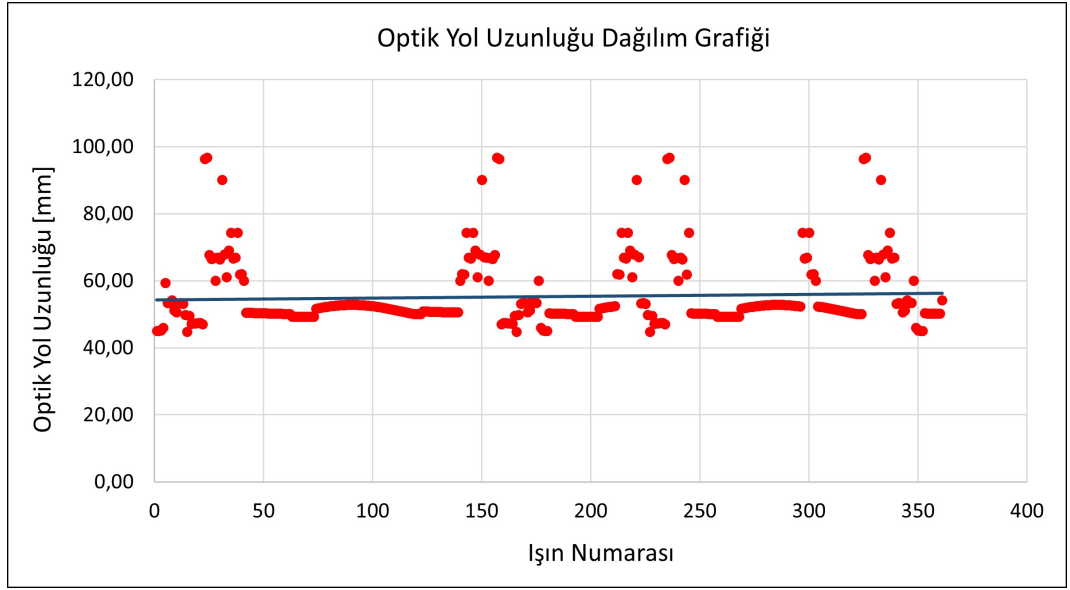


Şekil 4.9 : Simülasyon sonucu elde edilen optik yol örneklerinden biri.



Şekil 4.10 : Simülasyon sonucu elde edilen optik yol örneklerinden biri.

Analizler sonucunda kaydedilen optik yol uzunluğu değerleri için oluşturulan dağılım grafiği Şekil 4.11’de görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, optik sensör kapsülü için ortalama optik yol uzunluğu 54 mm’dir.



Şekil 4.11 : Optik yol uzunluğu dağılım grafiği.

4.1.2 Gaz difüzyonu

NDIR gaz sensörlerinde gaz konsantrasyon ölçümü, ortamda bulunan gazın difüzyon yoluyla sensör kapsülü içine örneklenmesi ile gerçekleştirilmektedir. Difüzyonun gerçekleşmesi için optik sensör kapsülleri üzerinde gaz giriş-çıkış delikleri bulunmaktadır.

Gaz konsantrasyon ölçümü gaz molekülleri ile kızılötesi radyasyon kaynağından saçılan ışınların etkileşimi sonucu ölçüldüğünden, gaz giriş-çıkış delikleri optik sensör kapsülü üzerinde gazın optik yol içine örnekleneyeceği şekilde konumlandırılmaktadır. Ancak bu deliklerin geometrik yapısına, ölçülerine ve sayısına karar verilirken dikkat edilmesi gereken iki önemli unsur vardır:

- 1) Optik sensör kapsülü üzerinde açıklıklar olması durumunda, açıklık yüzey alanına göre kapsül dışına kaçan ışın miktarı değişmektedir.
- 2) Gaz giriş-çıkış deliklerinin geometrik yapısı difüze olan gazın hacimsel akış oranını etkilemektedir.

Bu çalışmada radyasyon kaybını minimum tutarken, difüze olan gazın hacimsel akış oranını arttırmak için optik analizler ve akış analizleri gerçekleştirilerek, uygun delik yapısı önerilmiş ve tasarıma eklenmiştir.

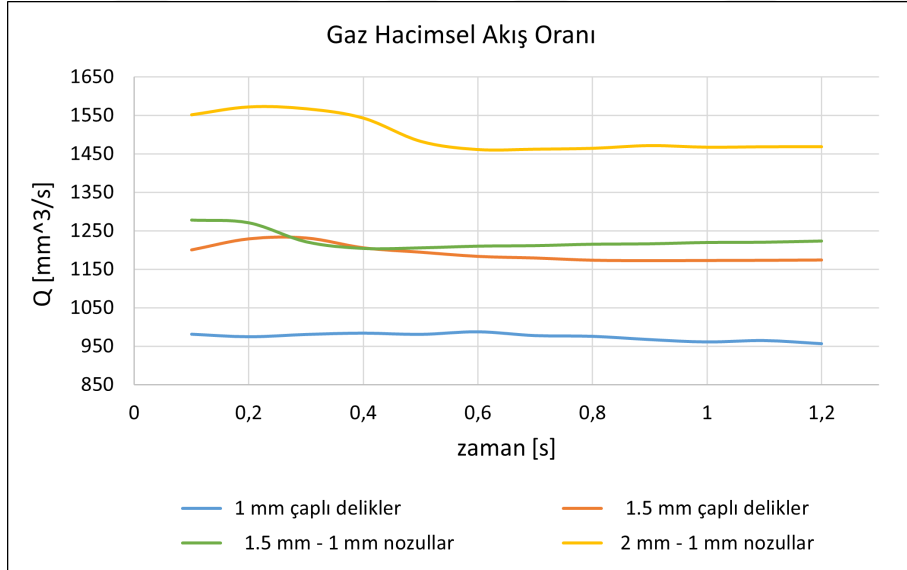
4.1.2.1 Delik yapısına göre gaz difüzyon hızı

Optik sensör kapsüllerinde, gaz giriş-çıkışının sağlanabilmesi için genellikle silindirik delik yapısı tercih edilmektedir. Kullanılan silindirik deliklerin yüzey alanları kapsül içine difüze olan gazın hacimsel akış oranını etkilemektedir. Fick's yasasına göre, difüze olan gazın hacimsel akış oranı ile delik yüzey alanı arasında denklem 4.1'de görüldüğü gibi doğrusal bir ilişki bulunmaktadır.

$$V_{gas} = [A * (\Delta P) * D] / T \quad (4.1)$$

Denklemden A delik yüzey alanıdır; ΔP deliğin iç ve dış noktaları arasındaki kısmi basınç farkıdır; D gaz difüzyon sabitidir; T deliğin giriş ve çıkışı arasındaki mesafedir; V_{gas} [ml/dk] difüze olan gazın hacimsel akış oranıdır.

Optik sensör kapsülünde yüksekliği sabit silindirik delikler kullanıldığında, difüze olan gazın hacimsel akış oranını arttırmak için delik yüzey alanını genişletmek gerekmektedir. Ancak delik yüzey alanını genişletmek, kapsül dışına kaçan ışıının miktarının artması ve buna bağlı olarak enerji kaybının artması ile sonuçlanmaktadır.



Şekil 4.12 : Zamana bağlı hacimsel akış oranı değişim grafiği.

Tez kapsamında yapılan bir çalışmada, optik sensör kapsülünde silindirik delik kullanımı yerine yakınsak nozul kullanımı önerilmiştir [65]. Bu çalışmada, 1mm ve 1.5mm çapında silindirik delikler; 1.5mm'den 1mm'ye daralan ve 2mm'den

1mm'ye daralan yakınsak nozul yapısındaki delikler kullanılarak Solidworks programı yardımıyla akış simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.12'de [65] 5 delik sayısı için her delik tipinde elde edilen veriler görülmektedir. 1.5mm'den 1mm'ye daralan yakınsak nozul kullanıldığında delik yüzey alanı 2.25 kat arttırılmadan, 1.5mm çapında silindirik delik kullanıldığında izlenen gaz hacimsel akış oranı verileri ile yaklaşık aynı değerler elde edilmiştir. 2mm'den 1mm'ye daralan yakınsal nozul kullanıldığında ise gazın hacimsel akış oranı daha da yükseltilmiştir.

Yapılan bu çalışmada, yakınsak nozul yapısında delik kullanımının sensör kapsülü üzerindeki açıklıkları arttırmadan, difüze olan gazın hacimsel akış oranını arttırdığı görülmüştür. Yakınsak nozul kullanımında, enerji kaybında meydana gelen değişimi gözlemlemek amacıyla Zemax programı yardımıyla optik analizler gerçekleştirilmiştir.

4.1.2.2 Delik yapısına göre radyasyon kaybı

Optik sensör kapsülü üzerinde bulunan açıklıklar, daha önce de bahsedildiği gibi, kızılötesi radyasyon kaynağından saçılan ışınların bir kısmının bu açıklıklardan kapsül dışına çıkması sonucu enerji kaybına yol açmaktadır. Kapsül dışına kaçan ışın miktarı arttığında, kızılötesi dedektöre iletilen ışın miktarında da düşüş gözlenmektedir.

Kapsül dışına çıkan ışın miktarı ile bu açıklıkların toplam yüzey alanı arasında bir ilişki vardır. Kapsül üzerinde bulunan açıklıkların toplam yüzey alanı arttıkça buna bağlı olarak gelişen enerji kaybında da artış meydana gelmektedir.

Gaz giriş-çıkışının sağlanması için optik sensör kapsülünde silindirik delik yapısı tercih edilirse, denklem 4.1'de görüldüğü gibi, difüze olan gazın hacimsel akış oranını arttırmak için deliklerin genişletilmesi gerekmektedir. Delikler genişletildiğinde optik sensör kapsülü üzerindeki açıklıkların toplam yüzey alanında da artış gözlenmektedir.

Silindirik delik yapısı kullanıldığında, delik yüzey alanlarının arttırılmasının enerji kaybı üzerindeki etkisini gözlemlemek amacıyla kapsül üzerinde 5 silindirik delik açılmıştır. Delik çapları 1mm'den 2mm'ye 0.1mm arttırılarak her bir durum için Zemax programı yardımıyla analizler gerçekleştirilmiştir. Kapsül üzerine 20mm x 20mm ölçülerinde dedektör alan yerleştirilerek deliklerden dışarı çıkan ışınların enerjisi ölçülmüştür. Delik çapına bağlı olarak her bir durum için delik yüzey alanları toplamı

hesaplanmıştır. Elde edilen verilere göre, toplam delik yüzey alanına bağlı enerji kaybı Şekil 4.13’de görülmektedir.



Şekil 4.13 : Silindirik delik tipi için toplam yüzey alanına bağlı enerji kaybı grafiği.

Şekil 4.13’de görüldüğü gibi delik yüzey alanı arttırıldığında, enerji kaybında artış gözlenmiştir. Silindirik delik kullanımında, yüzey alanı arttırıldığında difüze olan gazın hacimsel akış oranı artarken, enerji kaybı da artmaktadır.

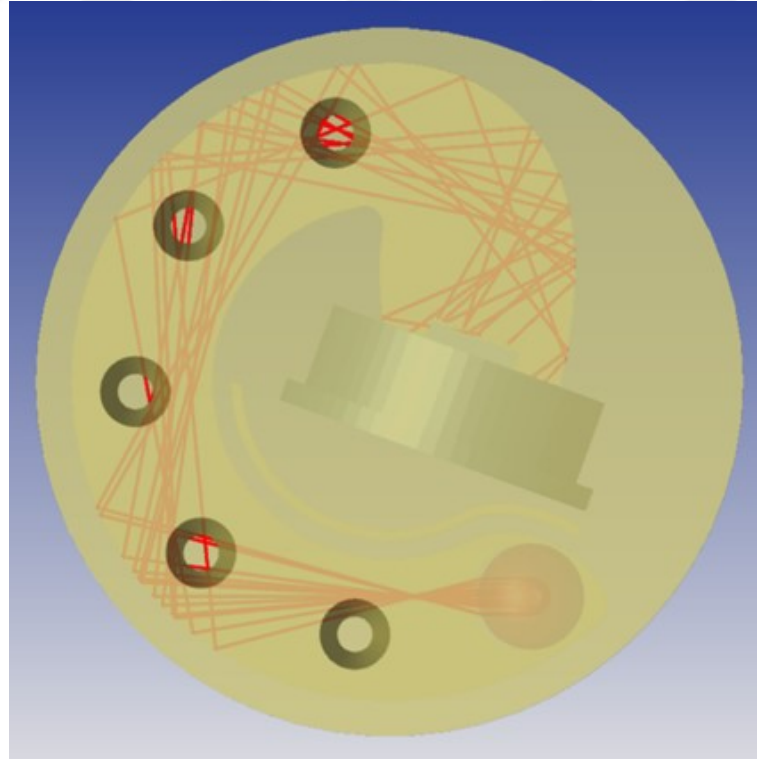


Şekil 4.14 : Yakınsak nozul kullanımında toplam yüzey alanına bağlı enerji kaybı grafiği.

Silindirik delik yerine önerilen yakınsak nozul tipindeki delik yapısı kullanıldığında, enerji kaybında meydana gelen değişimi gözlemlemek amacıyla benzer çalışma yakınsak nozul için de gerçekleştirilmiştir. Yukarıda önerilen 1,5 mm'den 1 mm'ye daralan ve 2 mm'den 1 mm'ye daralan iki tip nozul için Zemax programı yardımıyla benzer analizler gerçekleştirilmiştir. 1 mm çapında silindirik delik kullanımı ile bu iki tip nozul kullanımı durumunda gözlenen enerji kaybı değerleri Şekil 4.14'de görülmektedir.

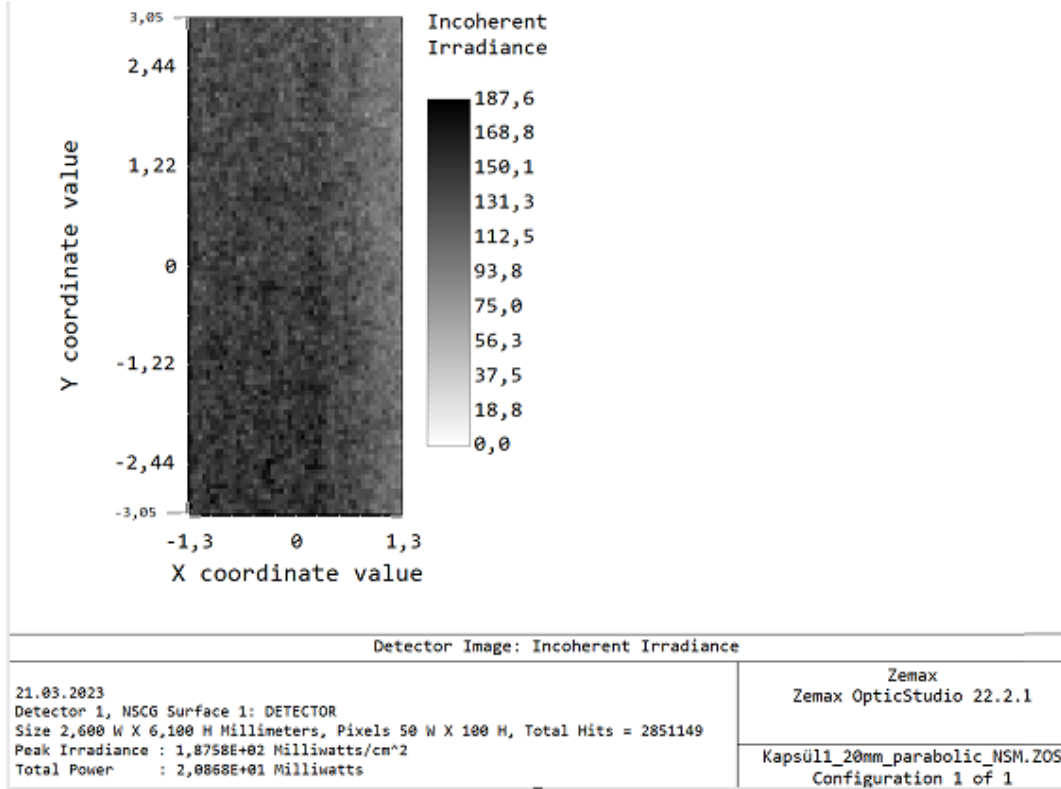
Elde edilen sonuçlara göre, yakınsak nozul kullanıldığında, iç delik çapı sabit tutulup, sadece dış delik çapı genişletildiğinden, dışarı çıkan ışınlara bağlı olarak meydana gelen enerji kaybı, 1 mm çapında silindirik delik kullanıldığında meydana gelen enerji kaybı ile neredeyse aynıdır. Bu çalışma ile yakınsak nozul kullanıldığında, enerji kaybı minimum seviyelerde tutularak, gazın hacimsel akış oranı artırıldığı görülmüştür.

Optik sensör kapsülüne optik yol boyunca, en yüksek hacimsel akış oranının gözlemlendiği 2mm'den 1mm'ye daralan 5 yakınsak nozul yapısında delik eklenerek, tasarım tamamlanmıştır. Tasarımın son hali 4.15'de görülmektedir.



Şekil 4.15 : Optik sensör kapsülü tasarımının son hali.

Delikleri eklenen tasarım için yapılan simülasyon sonucunda dedektörden okunan değerler Şekil 4.16’da görülmektedir. Simülasyon sonucunda, dedektörden okunan toplam güç değeri 20.86 mW olup optimum ışınlım değeri 187.58 mW/cm^2 ’dir. Delikler eklendiğinde toplam güç değerinde % 6.3, optimum ışınlım değerinde % 5.77 düşüş gözlenmiştir. Oluşan bu kayıplar optik kapsül tasarımına eklenen deliklerden dolayı, kapsül üzerindeki açıklıkların artmasından kaynaklanmaktadır.

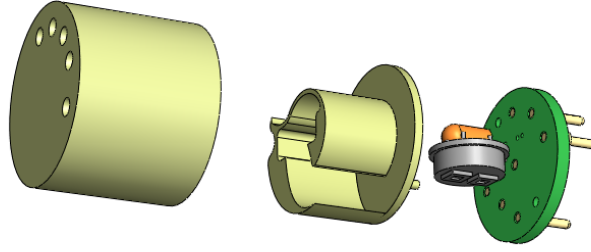


Şekil 4.16 : Son tasarımda dedektörden okunan ışınlım ve toplam güç değerleri.

4.1.3 Elektronik tasarım

4.1.3.1 Sensör kartı tasarımı

NDIR metan gaz sensörü için tasarlanan sensör kartı standart kızılötesi radyasyon kaynağı ve kızılötesi dedektörden oluşmaktadır. Sensör kartı optik sensör kapsülü içine yerleşecek şekilde tasarlanmış bir elektronik karttır. Şekil 4.17 ’de görüldüğü gibi, optik yol tabanına montajlanarak sensör kapsülü kapağının içine yerleştirilmektedir.



Şekil 4.17 : NDIR gaz sensörü demonte görünümü.

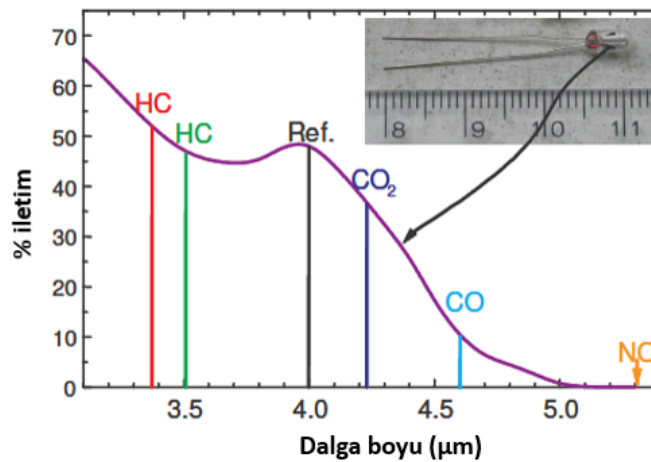
4.1.3.2 Kızılötesi radyasyon kaynağı

NDIR gaz sensörü tasarımında kızılötesi radyasyon kaynağı olarak, IR akkor lamba kullanılmıştır. Tasarımda hedef gaz metan gazı olduğundan, seçilen lambanın $3.3\mu m$ dalga boyunda yayılım yapmasına dikkat edilmiştir. HSL 5/115 (HEIMANN Sensor GmbH) IR lambanın teknik özellikleri Şekil 4.1’de [34] görülmektedir.

Çizelge 4.1 : HSL 5/115 (HEIMANN Sensor GmbH) teknik özellikleri.

Besleme Gerilimi	5 V
Akım	115 +/- %10 mA
Çalışma Sıcaklığı	(-20)-(+100) °C
Ortalama Ömür	40.000 saat

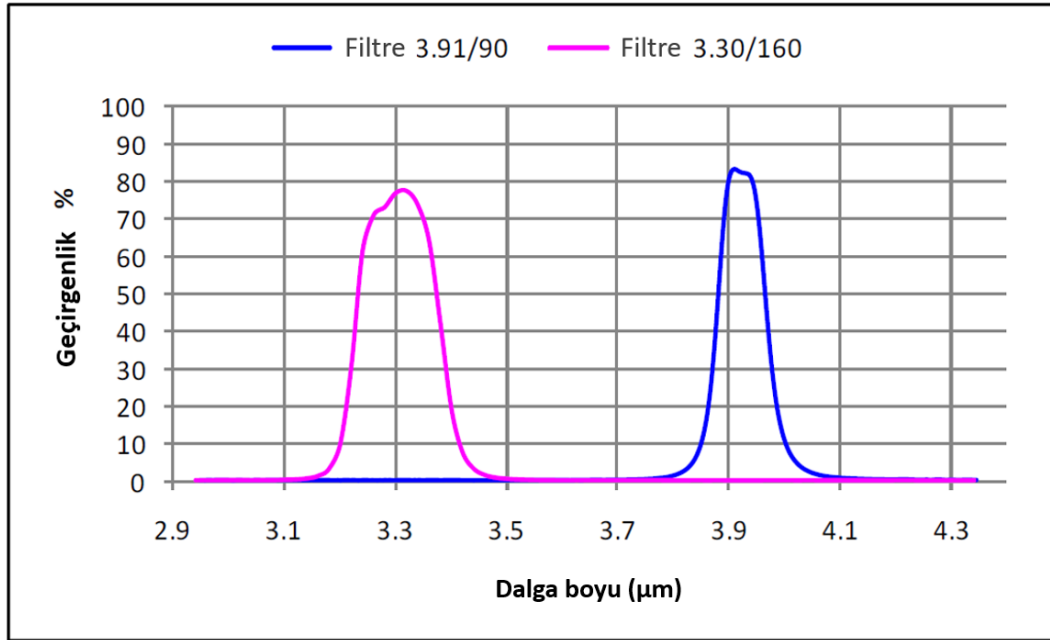
Kullanılan IR lambanın cam geçirgenliği Şekil 4.18’de [34] görülmektedir. $3.3\mu m$ dalga boyunda cam geçirgenliği yaklaşık % 55 civarındadır.



Şekil 4.18 : Kızılötesi radyasyon kaynağının dalga boyuna bağlı iletim oranı.

4.1.3.3 Kızılötesi dedektör

NDIR gaz sensörü tasarımında HEIMANN Sensor GmbH üreticisinin iki kanallı termofil dedektörü (HTS-E21-F3.91/F3.30) kullanılmıştır. Termofil sensör üzerinde bulunan kanallar aktif (ölçüm) kanalı ve referans kanalı olarak adlandırılmaktadır. Aktif kanal, metan gazı absorpsiyon bandını kapsayan $3.3\mu m$ filtreye sahiptir. Referans kanalı ise, metan gazı absorpsiyon bandı dışında kalan $3.91\mu m$ filtreye sahiptir. Aktif kanal ve referans kanalı filtrelerinin dalga boyuna göre yüzde geçirgenlik dağılımı Şekil 4.19'da [66] görülmektedir.



Şekil 4.19 : Aktif kanal ve referans kanalı filtrelerinin dalga boyuna göre geçirgenlikleri.

Aktif (ölçüm) kanalda iletim gaz emilimine bağlı olarak, Beer Lambert yasasına göre, denklem 4.2'de görüldüğü gibi ifade edilmektedir.

$$I = I_0 \int E_S(\lambda) T_A(\lambda) \exp[-kCL] d\lambda \quad (4.2)$$

Denklem 4.2'de E_S kızılötesi radyasyon kaynağının emisyon aralığıdır; T_A aktif kanal filtresinin iletimidir. Buna bağlı olarak aktif kanaldaki absorbans değeri denklem

4.3’de görüldüğü gibi ifade edilmektedir.

$$A_A = 1 - (I_A/I_{OA}) = (I_{OA} - I_A)/I_{OA} = (V_O - V)/V_O \quad (4.3)$$

Denklem 4.3’de A alt indisi aktif kanalı ifade etmek için kullanılmıştır. A_A aktif kanal absorbens değerini ifade etmektedir; V_O ortamda hedef gaz olmaması durumunda aktif kanalda üretilen voltaj çıkışıdır; V hedef gaz varlığında alınan ölçüme göre üretilen gerilim değeridir.

NDIR gaz sensörü tasarımında IR lamba kullanıldığından kaynağın emisyonunda, filamanın sıcaklık dalgalanmalarından, lamba camında zamanla meydana gelen kararmalardan ve filamanın buharlaşarak cama yapışması sonucu oluşan ışıma alanı kaybından dolayı değişiklikler meydana gelmektedir. Termofil dedektör üzerinde bulunan referans kanalı kaynağın emisyonunda oluşabilecek bu değişimleri telafi etmek için kullanılmaktadır. Referans kanalından okunan ışık yoğunluğu değeri I_O değeri yerine geçecek şekilde okunur ve aktif kanalda okunan sinyal denklem 4.4’de görüldüğü gibi normalize edilir.

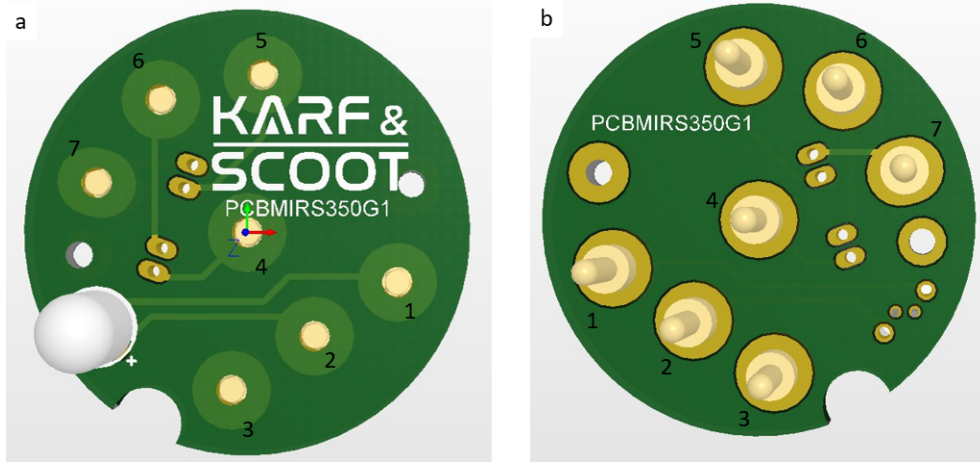
$$A_{NA} = 1 - (I_{OR}/I_R)(I_A/I_{OA}) \quad (4.4)$$

Denklem 4.4’de R alt simgesi referans kanalının ifade etmektedir. A_{NS} normalize edilmiş sinyale göre absorbens değerini ifade etmektedir. I_{OR} ve I_{OA} değerleri ortamda hedef gaz yokken okunan değerlerdir. İki kanallı HS-E21 termofil sensörün teknik özellikleri Çizelge 4.2’de [66] görülmektedir.

Çizelge 4.2 : HTS-E21 (HEMANN Sensor GmbH) teknik özellikleri.

Fotocevap	44 V/W
Dedektivite	$4.4 * 10^8 \text{ cm}\sqrt{\text{Hz}}\text{W}$
Gürültü	$37 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
NEP	$0.84 * 10^{-9} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$
İç direnç	84 kΩ

Belirlenen IR lamba ve termofil sensör kullanılarak standart 7 pin’li sensör kartı tasarımı yapılmıştır. Şekil 4.20’de sensör kartı elektronik devresi görülmektedir.



Şekil 4.20 : Sensör kartı elektronik devresi; (a) sensör kartı üst görünüm; (b) sensör kartı alt görünüm.

Sensör kartında görülmekte olan numaralandırılmış pinlerin tanımları Çizelge 4.3’de verilmiştir.

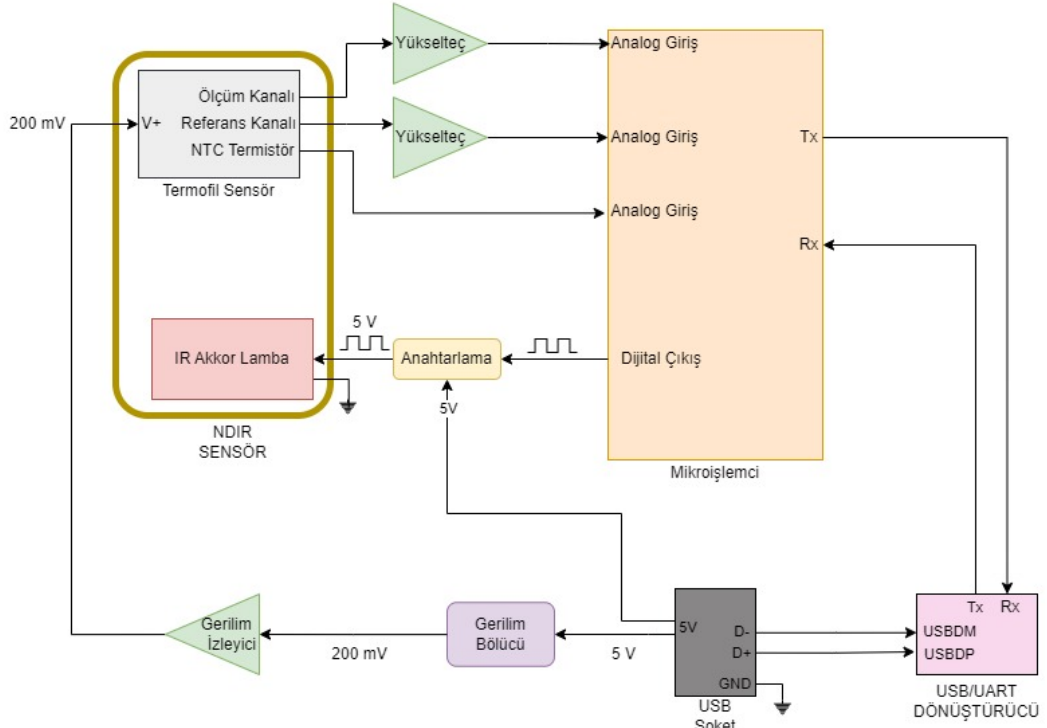
Çizelge 4.3 : Sensör kartı pinleri.

1	GND
2	Lamba 5V besleme
3	Boş
4	Dedektör aktif (ölçüm) kanalı çıkışı
5	Dedektör referans kanalı çıkışı
6	Dedektör termistör çıkışı
7	Dedektör besleme

4.1.4 Test kartı

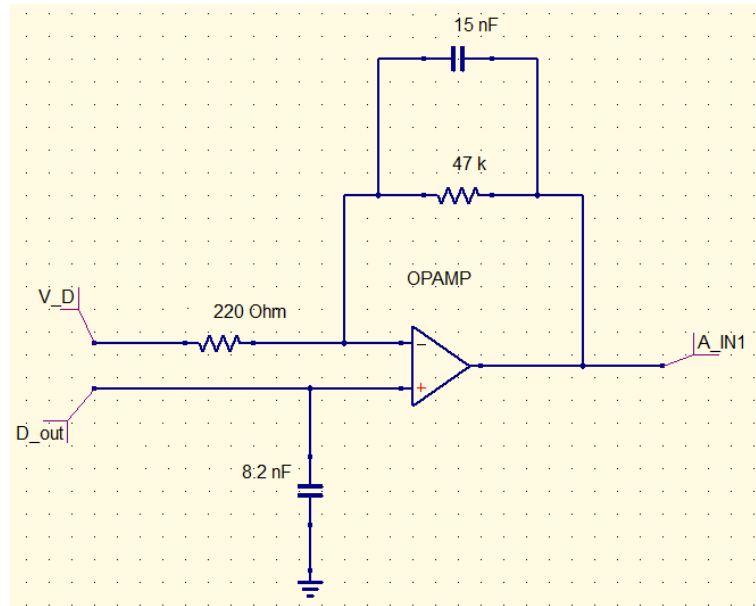
Test kartı, tasarımı yapılan NDIR metan gaz sensöründen ölçüm almak amacıyla tasarlanmış, sensör kartı ile uyumlu elektronik karttır. Tasarlanan sistemin şematik diyagramı Şekil 4.21’de görülmektedir.

Termofil dedektörün (HTS-E21) aktif ve referans kanallarında alınan sinyal çıkışı voltajlarını (μV) ve hedef gaz varlığına göre değişim miktarını daha okunabilir hale getirmek için dedektörün aktif ve referans kanallarının çıkışları Şekil 4.21’de görüldüğü gibi mikroişlemciye aktarılmadan önce bir yükseltici devreden geçirilmektedir.



Şekil 4.21 : Sensör kartı ve test kartından oluşan sistemin elektronik şematiği.

Aktif ve referans kanallarının çıkış voltajlarını yükseltmek için tasarlanan devre Şekil 4.22’de görülmektedir.



Şekil 4.22 : Termofil dedektörü çıkışı için yükseltici devre şematiği.

Şekil 4.22’de D_{out} termofil dedektörün aktif ve referans kanalı çıkışıdır ve A_{IN1} mikroişlemci girişini temsil etmektedir. Yükseltici devre ile sağlanan kazancın hesaplanmasına ilişkin ifade denklem 4.5’de görülmektedir.

$$I = [D_{out} - V_D]/220 = [A_{IN1} - D_{out}]/47000 \quad (4.5)$$

Denklem 4.5’de $V_D = 0$ için:

$$4700 * D_{out} = 22 * A_{IN1} - 22 * D_{out} \quad (4.6)$$

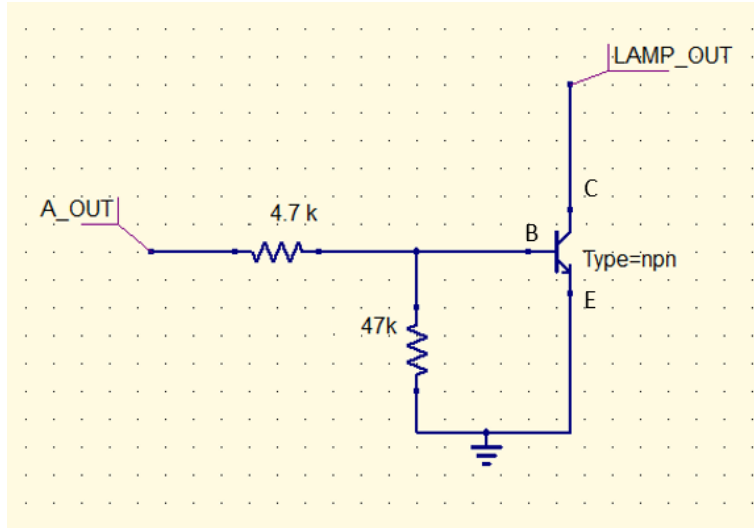
$$A_{IN1}/D_{out} = 214.6 \quad (4.7)$$

elde edilir. Denklem 4.7’de görüldüğü gibi yükseltici devre ile termofil dedektörün kanal çıkışları 214.6 kat yükseltilmiştir.

Yükseltici devrede kesim frekansı denklem 4.8’de görüldüğü gibi yaklaşık $225.7Hz$ ’tir.

$$f_c = 1/(2 * \pi * R * C) = 1/(2 * \pi * 47k\Omega * 15nF) = 225.7Hz \quad (4.8)$$

NDIR gaz sensöründe, kızılötesi radyasyon kaynağı 5V genliğinde 1 Hz kare dalga sinyali ile sürülmektedir. IR akkor lamba için kullanılan anahtarlama devresinin şematiği Şekil 4.23’de görülmektedir.

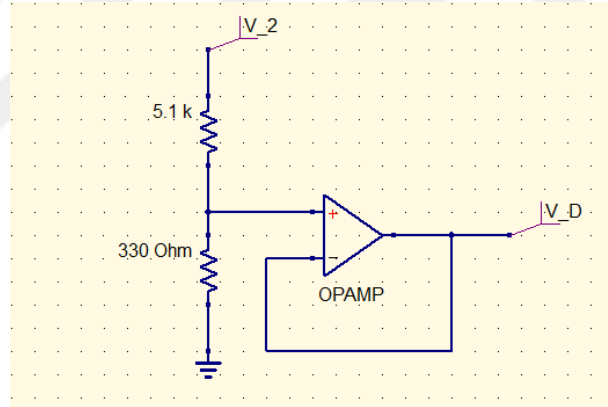


Şekil 4.23 : Anahtarlama devresi şematiği.

Transistörlü anahtarlama devresinde transistör kesim ve doyum bölgesinde çalıştırılarak, transistörün kesim bölgesinde açık anahtar, doyum bölgesinde ise kapalı

anahtar gibi davranmasından yararlanılmaktadır. Şekil 4.23’de A_{OUT} mikroişlemciden alınan çıkışı temsil etmektedir; $LAMP_{OUT}$ lamba girişini temsil etmektedir. Kesim bölgesinde giriş gerilimi V_{BE} açılma geriliminin altındadır bu yüzden transistör açık anahtar olarak çalışmaktadır. Doyum bölgesinde ise giriş gerilimi V_{BE} açılma geriliminin üstündedir ve transistör kapalı anahtar olarak çalışmaktadır.

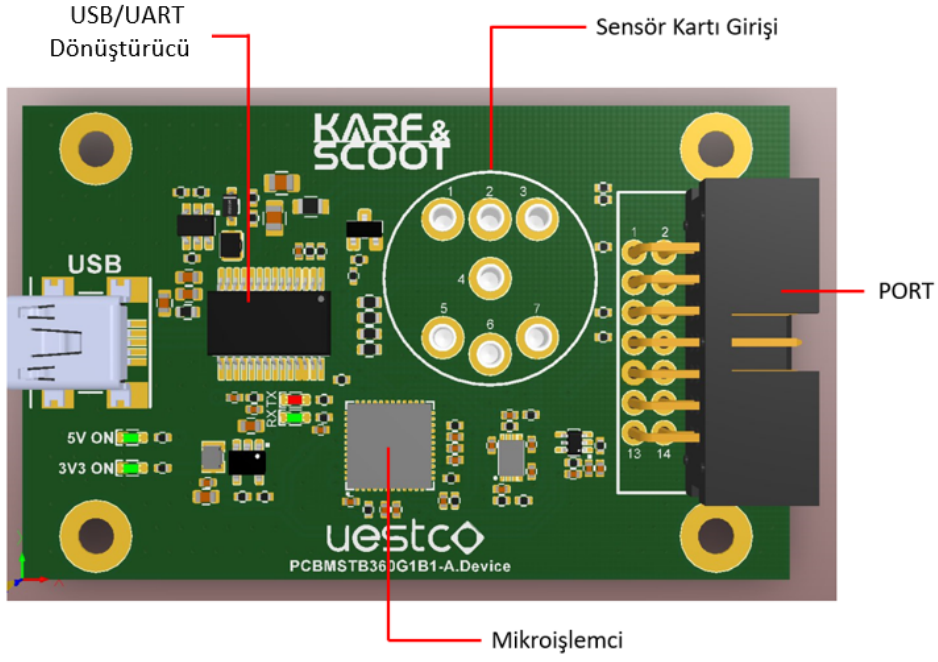
NDIR gaz sensörlerinde kızılötesi radyasyon ile gaz moleküllerinin etkileşimi sonucu kızılötesi ışınlar absorbe edilirken gaz molekülleri aldıkları enerjiyle daha fazla titreşmektedir. Buna bağlı olarak optik sensör kapsülü içerisinde sıcaklık değişimleri gözlenebilmektedir. Termofil sensörler ortamdaki sıcaklık değişimlerinden etkilenmektedir. Sıcaklık değişimlerinin yanlış ölçümlere sebep olmaması için termofil sensörler sıcaklık ölçümü yapılmasını sağlayan termistör çıkışına sahiptir. Termistör çıkışından sıcaklık verileri (K) okunarak sensör için sıcaklık kompanzasyonu gerçekleştirilir. Şekil 4.21’de görülmekte olan NTC termistör için tasarlanmış sürücü devresi şematiği Şekil 4.24’de görülmektedir.



Şekil 4.24 : Termistör sürücü devresi.

Şekil 4.24’de V_2 , 3.3V’tur ve V_D termofil dedektör girişini göstermektedir. Devrede 3.3V gerilimi 220mV’a düşürülerek, gerilim izleyici yardımıyla çıkışa verilmektedir. Gerilim izleyiciler giriş gerilimini olduğu gibi çıkışa ileten devrelerdir.

NDIR gaz sensörü ile ölçüm almak için tasarlanan test kartı Şekil 4.25’de görülmektedir.



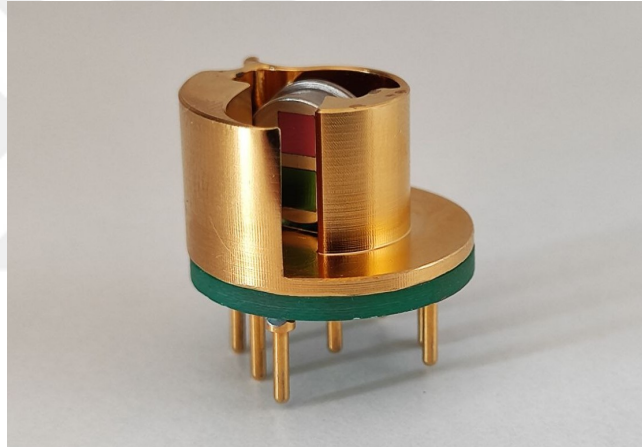
Şekil 4.25 : NDIR gaz sensörü için tasarlanan test kartı genel görünümü.

Şekil 4.25’de görülmekte olan *PORT* girişi gerekli yazılımın karta aktarımı için kullanılmaktadır. Devrenin besleme gerilimi 5 V olup USB porttan sağlanmaktadır. Mikroişlemciden alınan verileri bilgisayara aktarmak için mikroişlemci ile USB arasında UART kullanılmıştır. UART mikroişlemciden alınan verileri bilgisayardan okuyabileceğimiz sinyallere dönüştürerek USB girişine iletmektedir.

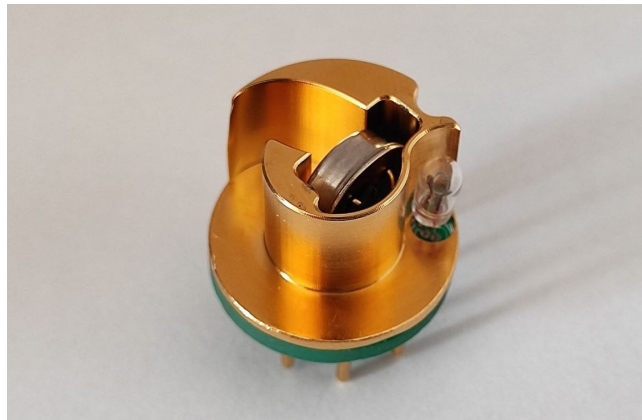
5. PROTOTİPİN ÇALIŞMASININ DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1 Prototip Üretimi

NDIR metan gaz sensörü için tasarımı yapılan optik sensör kapsülü, CNC işleme yöntemi ile MS-58 pirinç malzemesi ile işlenmiş ve yaklaşık $0.3\ \mu\text{m}$ altın kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen optik yol gövdesi Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de görülmektedir. Tasarlanan optik gaz sensörü için faydalı model başvurusu yapılmıştır [64].

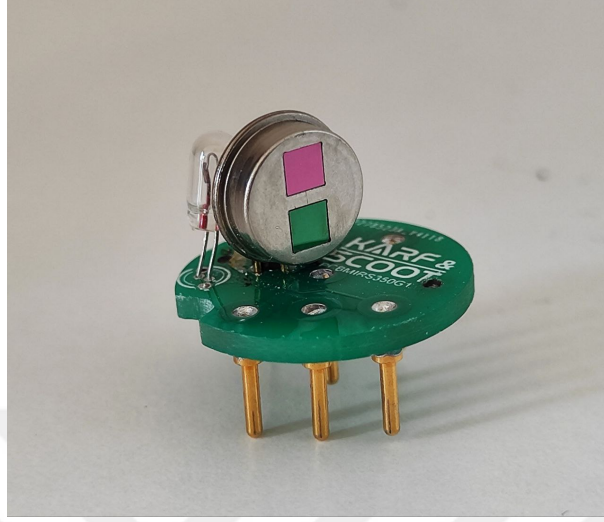


Şekil 5.1 : Prototip optik yol gövdesi görünümü.

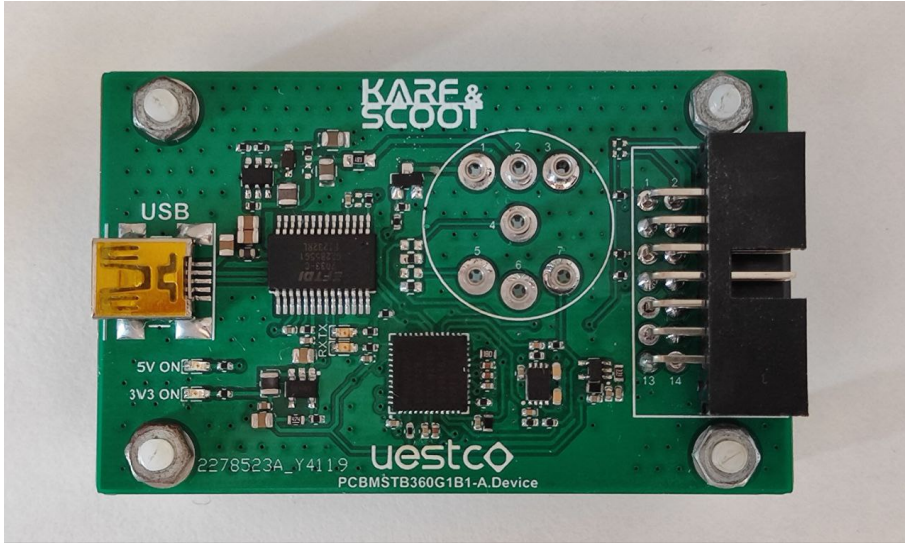


Şekil 5.2 : Prototip optik yol gövdesi perspektif görünümü.

Sensör kartı ve test kartı için tasarlanmış elektronik kartlar PCB baskı yöntemiyle üretimi gerçekleştirilerek, elektronik komponent dizgileri yapılmıştır. Son hali verilen sensör kartı Şekil 5.3’de, test kartı ise Şekil 5.4’de görülmektedir.



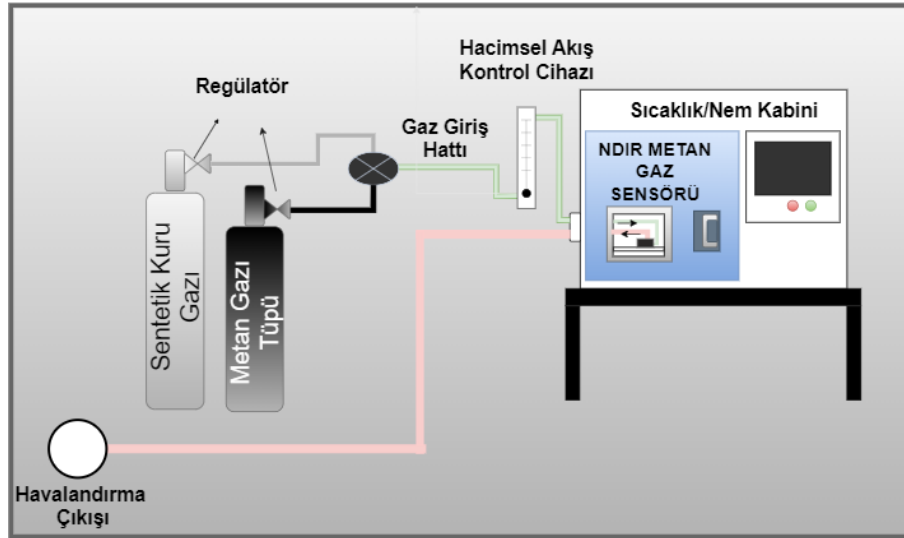
Şekil 5.3 : Prototip sensör kartı.



Şekil 5.4 : Prototip test kartı.

5.2 Ölçüm Düzenegi

NDIR metan gaz sensörünün performansının gözlemlenmesi, metan gazına tepkisinin test edilmesi edilmesi için laboratuvar ortamında bir ölçüm düzenegi hazırlanmıştır. Hazırlanan test düzeneginin şematiği Şekil 5.5’de görülmektedir.



Şekil 5.5 : Ölçüm düzeneği şematik görünümü.

Şekil 5.5’de görülmekte olan Sıcaklık/Nem Kabini "LIB test chamber" üreticisinin "TH-50B" model numaralı ürünüdür [67]. Sıcaklık/Nem Kabini sensörün sabit sıcaklık ve nem ortamında tutulmasını sağlamaktadır. Girilen sıcaklık ve nem verilerine göre kabin içinde istenen ortam koşulları ayarlanmaktadır. Test için kullanılan sıcaklık/nem kabini Şekil 5.6’de görülmektedir. NDIR gaz sensörü gerekli bağlantıları yapılarak kabin içine yerleştirilip çalıştırılmış ve gerekli ölçümler sabit sıcaklık ve nem değerlerinde yapılmıştır.

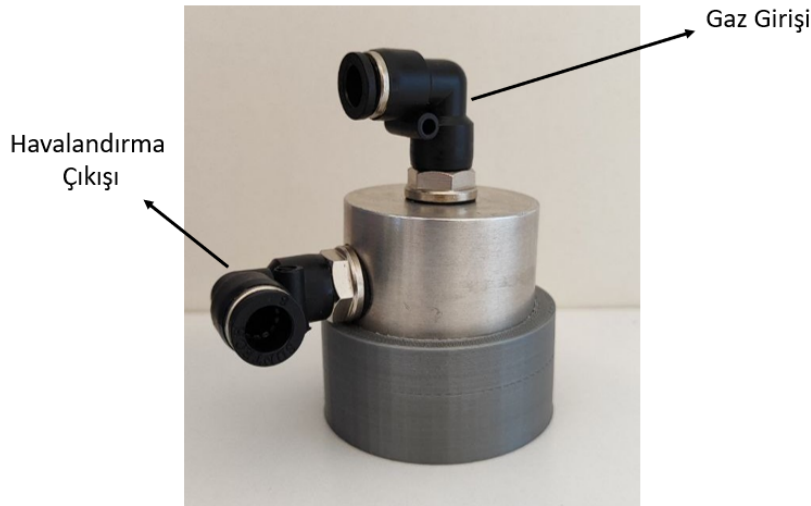


Şekil 5.6 : Sıcaklık/nem kabini.

Ölçümlerde, sensöre verilen gazın hacimsel akış oranını ayarlamak için "LZT M-4" serisi maksimum akış hızı 1 L/dk olan hacimsel akış kontrol cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz üzerinden gazın hacimsel akış oranı kontrol edilmekte ve ayarlanabilmektedir.

Havalandırma çıkışı, sensöre verilen gazın çıkışının sağlanması içindir. Sensör kapsülü içine dolan gaz bu çıkış sayesinde difüzyon yoluyla boşalmaktadır. Böylece sensör kapsülü içindeki basınç dengesi sağlanmaktadır.

Ölçümler için farklı konsantrasyonlarda metan gazı tüpleri kullanılmıştır. Sentetik kuru hava gazı ise kapsül içine dolan metan gazını temizlemek için kullanılmaktadır. İki gaz tüpü bağlantı boruları yardımıyla Şekil 5.7’de görülmekte olan gaz akış aparatına bağlanmaktadır. Gaz akış aparatının diğer çıkışı ise havalandırma çıkışına bağlanarak sabit basınçta akış sağlanmaktadır.



Şekil 5.7 : Gaz akış aparatı.

Sıcaklık/Nem kabini içine yerleştirilen NDIR gaz sensöründe, test kartında bulunan USB girişi ile bilgisayar bağlantısı yapılarak veri alış verişi sağlanmaktadır.

5.3 Sonuçlar

Prototipi hazırlanan NDIR metan gaz sensörü gerekli bağlantıları yapıldıktan sonra Sıcaklık/Nem kabini içine yerleştirilmiştir. Sıcaklık/Nem kabini ortam koşulları, Şekil 5.8’de görüldüğü gibi 20 °C ve %50 RH (oda koşulları) olarak ayarlanmıştır.



Şekil 5.8 : Sıcaklık/Nem kabininde ayarlanan ortam koşulları.

Testler için kullanılan metan gazı tüplerinin derişimleri Çizelge 5.1’de görölmektedir. Her bir derişimde ölçümler alınarak sensörün gaza tepkisi test edilmiştir. %4 vol konsantrasyonun üzerinde metan gazı yanıcı/patlayıcı olmaktadır. Testlerde hem metan gazının hem de temiz gaz olarak da adlandırılan kuru hava gazının hacimsel akış oranı 0.4-0.5 L/dk (testler için tavsiye edilen hacimsel akış hızı aralığı) olarak ayarlanmıştır.

Çizelge 5.1 : Metan gazı tüplerinin derişimleri.

%vol	ppm	valans gaz
0.5	5000	nitrojen
1	10000	nitrojen
1.5	15000	nitrojen
2	20000	nitrojen
2.5	25000	nitrojen
3	30000	nitrojen
3.5	35000	nitrojen
4	40000	nitrojen
4.5	45000	nitrojen
5	50000	nitrojen

Çizelge 5.1’de görülmekte olan farklı konsantrasyonlardaki gaz tüpleri "Elite Gaz Teknolojileri" kurumundan tedarik edilmiştir [68].

Testlere başlanmadan önce, sıcaklık/nem kabini içinde ortam koşulları dengeye ulaştıktan sonra, NDIR gaz sensörü kabin içine yerleştirilmiş ve 2 saat kabin içinde çalıştırılarak ortama alıştırmıştır. 2 saatlik ısınma süresinin sonunda gerekli kalibrasyonlar yapılarak ölçümler alınmıştır.

Testlerde önce kuru hava gazı ile sensör kapsülü içi temizlenmiş, daha sonra 90 saniye kadar metan gazı verilmiştir. Her bir gaz konsantrasyonu için bu adımlar 3 periyotta tekrarlanmış, her periyotta metan gazı maruziyeti sonunda, metan gazı akışının kesilmesini takiben kuru hava gazı akışı sağlanarak kapsül içi temizlenmiştir.

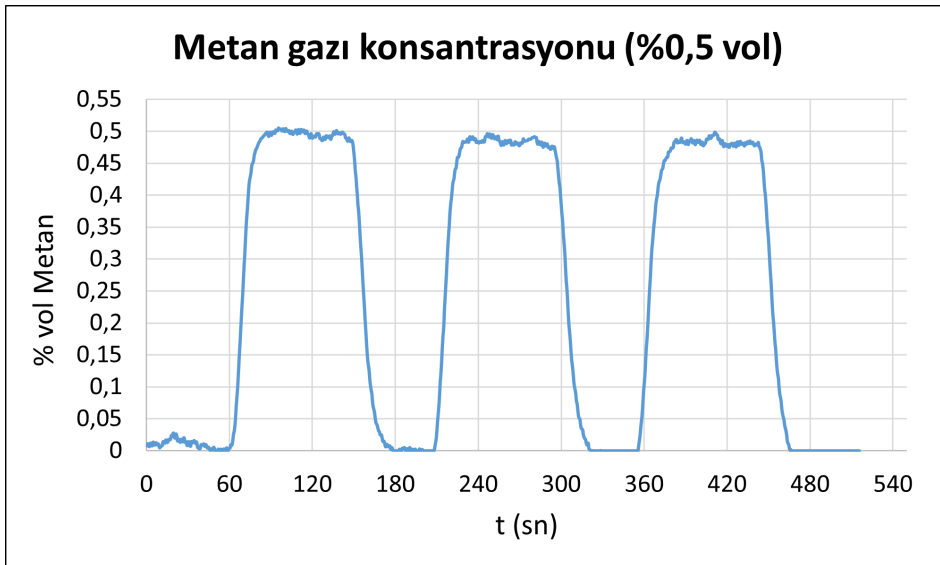
Her bir ölçüm testi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak, Denklem 5.1 ve Denklem 5.2’ye göre yapılan ölçüm için mutlak hata ve bağıl hata hesaplanmıştır.

$$E = (\bar{x}_1) - (x) \quad (5.1)$$

$$\% \varepsilon = [E/x] * 100 \quad (5.2)$$

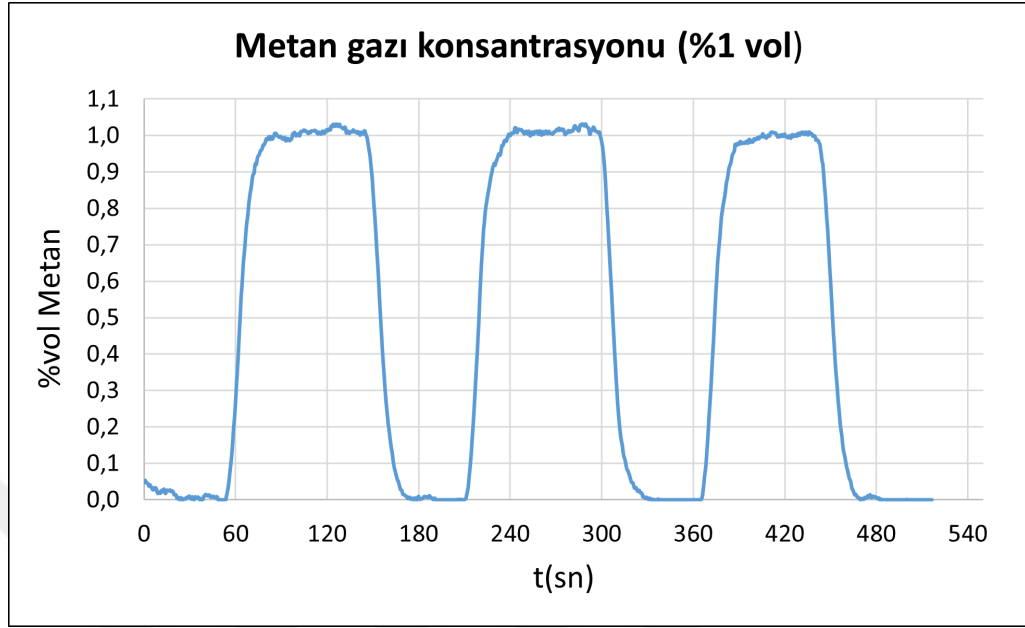
Denklem 5.1’de E mutlak hatadır; $\bar{x}_1$ ortalama ölçülen değerdir; x, beklenen değerdir. Denklem 5.2’de $\% \varepsilon$ bağıl hatadır.

$\%0.5$ vol (5000ppm) metan gazı tüpüyle gerçekleştirilen test sonucunda elde edilen veriler Şekil 5.9’de görülmektedir.



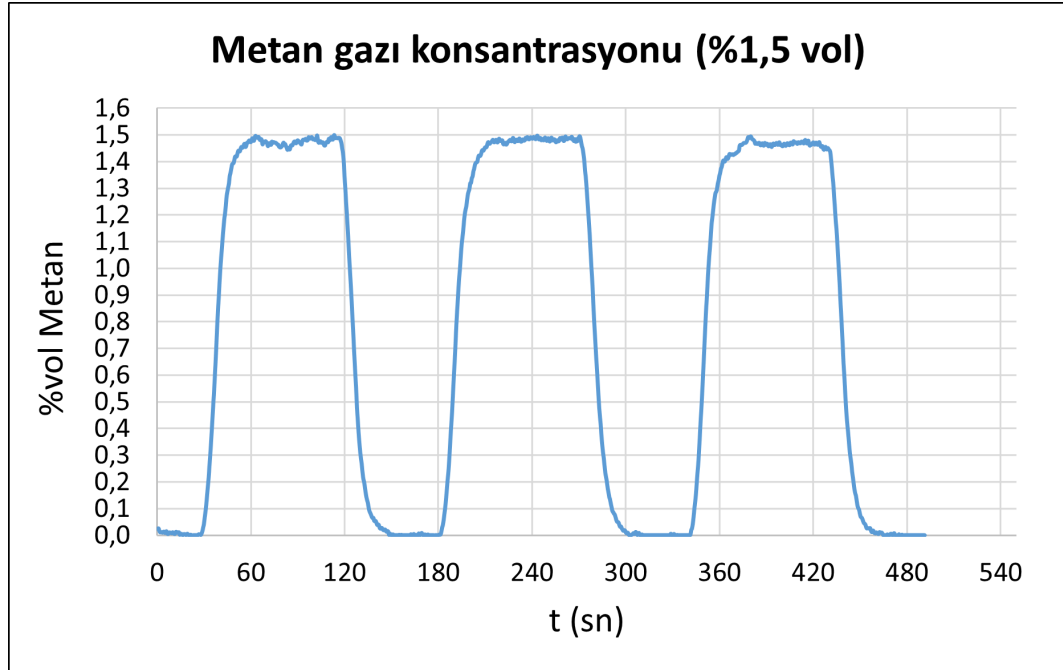
Şekil 5.9 : $\%0.5$ vol Metan gazı ölçüm sonuçları.

%1 vol (10000ppm) metan gazı tüpüyle gerçekleştirilen test sonucunda elde edilen veriler Şekil 5.10'de görülmektedir.



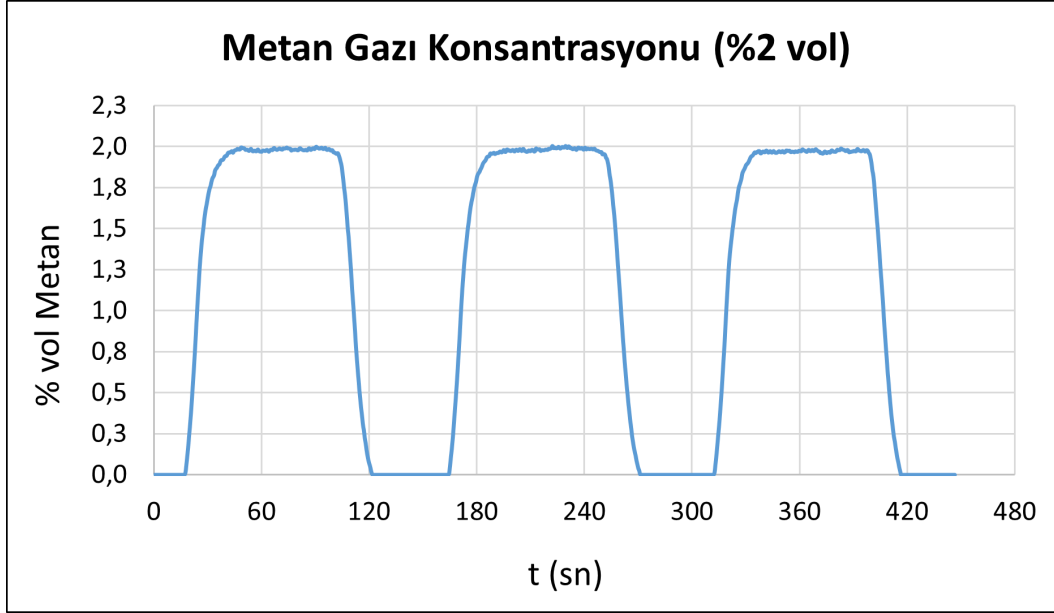
Şekil 5.10 : %1 vol Metan gazı ölçüm sonuçları.

%1.5 vol (15000ppm) metan gazı tüpüyle gerçekleştirilen test sonucunda elde edilen veriler Şekil 5.11'de görülmektedir.



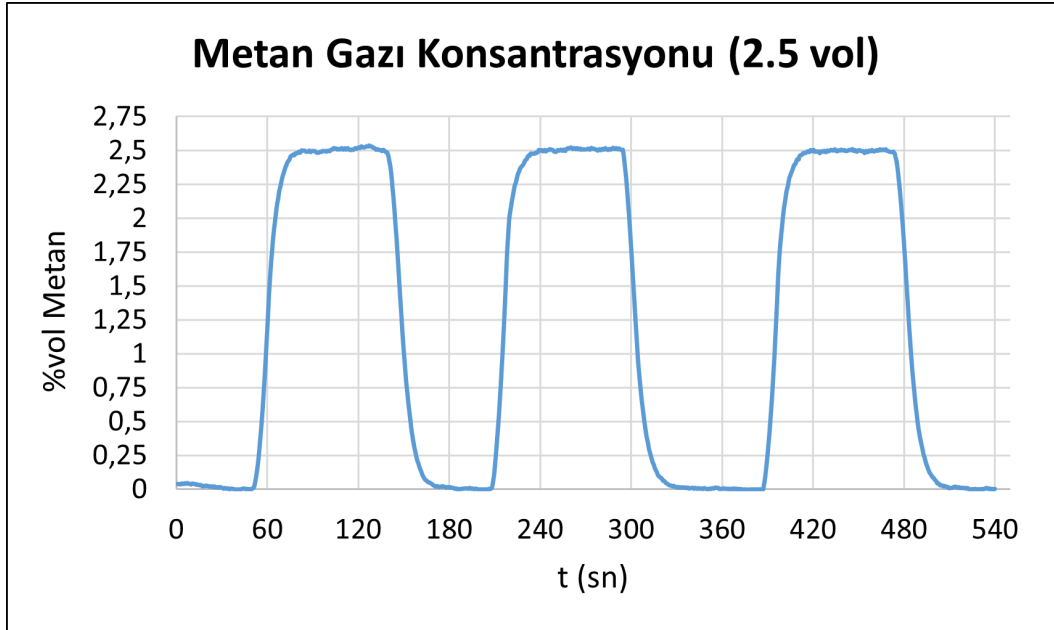
Şekil 5.11 : %1.5 vol Metan gazı ölçüm sonuçları.

%2 vol (20000ppm) metan gazı tüpüyle gerçekleştirilen test sonucunda elde edilen veriler Şekil 5.12’de görülmektedir.



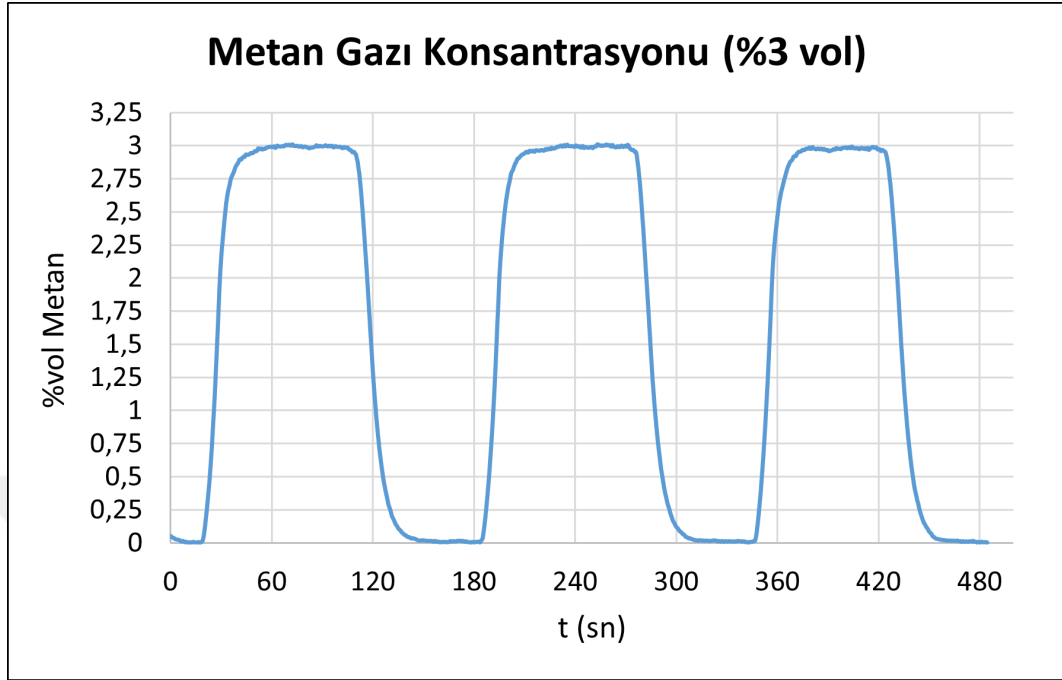
Şekil 5.12 : %2 vol Metan gazı ölçüm sonuçları.

%2.5 vol (25000ppm) metan gazı tüpüyle gerçekleştirilen test sonucunda elde edilen veriler Şekil 5.13’da görülmektedir.



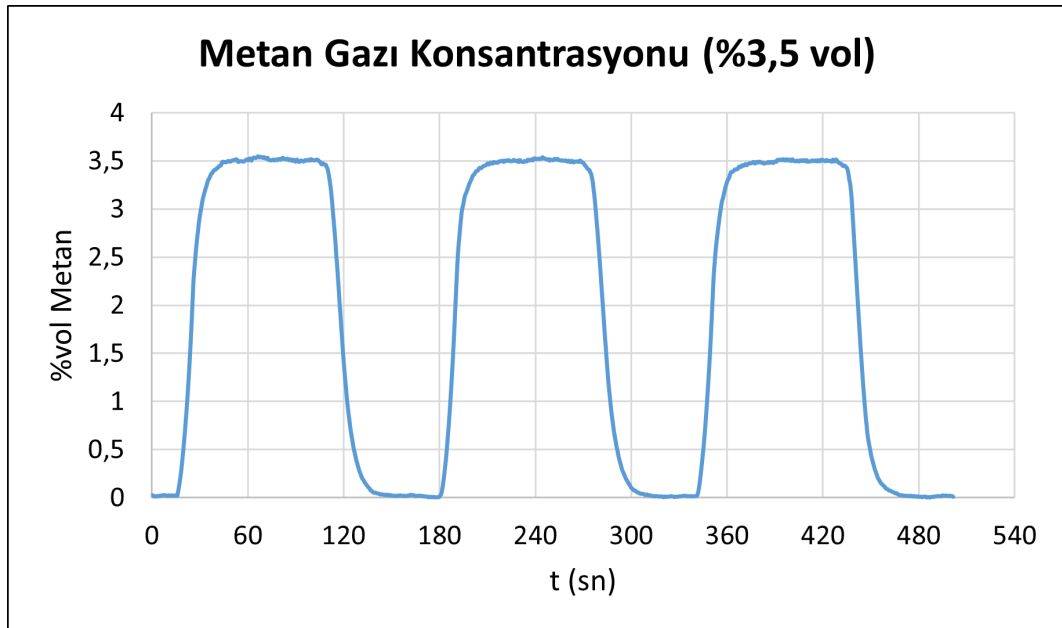
Şekil 5.13 : %2.5 vol Metan gazı ölçüm sonuçları.

%3 vol (30000ppm) metan gazı tüpüyle gerçekleştirilen test sonucunda elde edilen veriler Şekil 5.14’de görülmektedir.



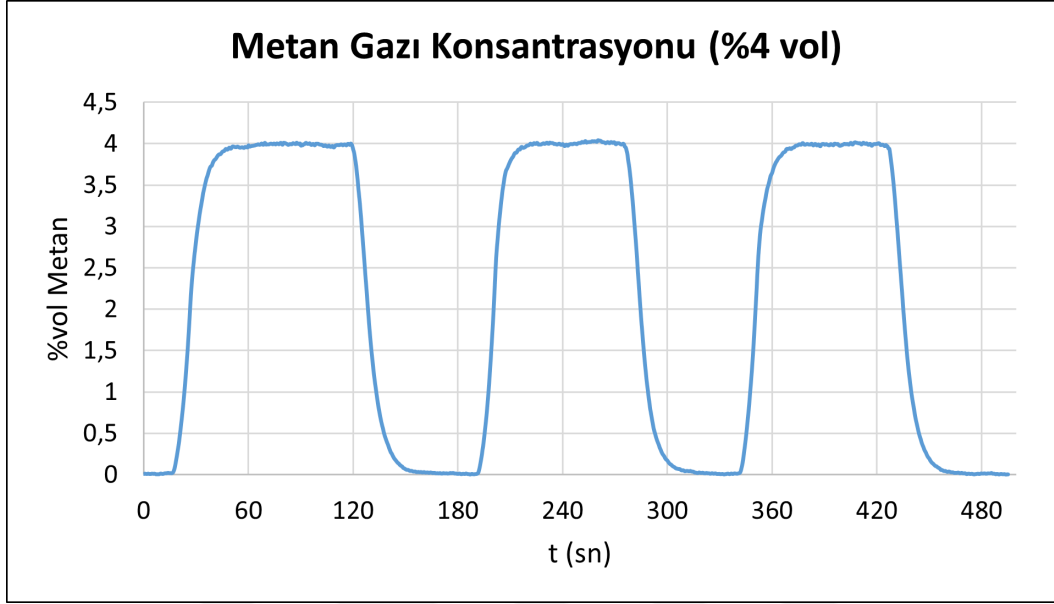
Şekil 5.14 : %3 vol Metan gazı ölçüm sonuçları.

%3.5 vol (35000ppm) metan gazı tüpüyle gerçekleştirilen test sonucunda elde edilen veriler Şekil 5.15’de görülmektedir.



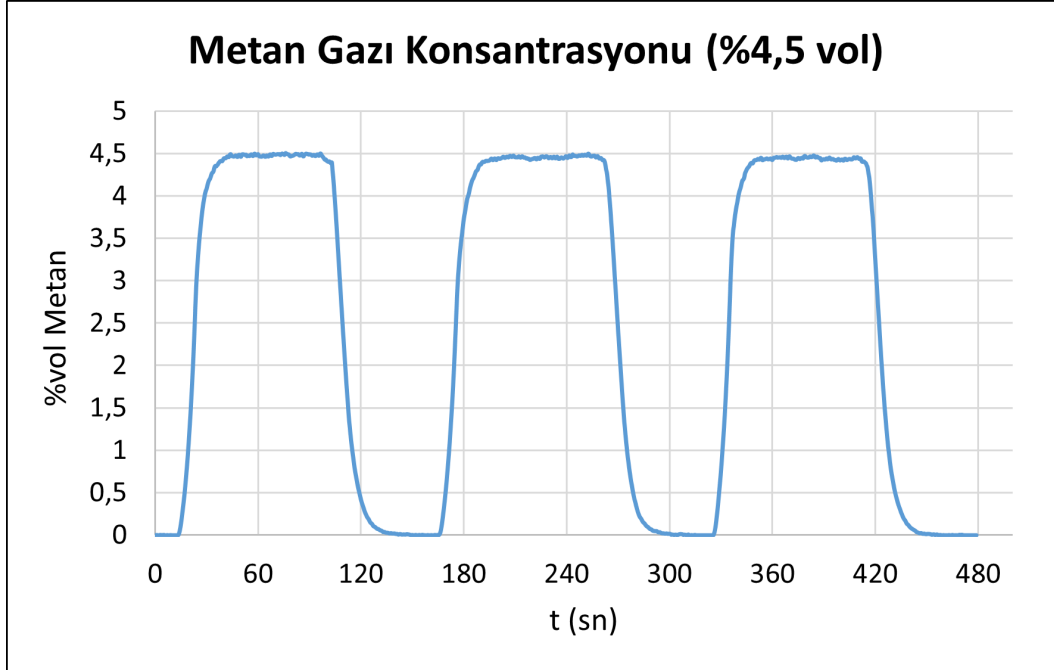
Şekil 5.15 : %3.5 vol Metan gazı ölçüm sonuçları.

%4 vol (40000ppm) metan gazı tüpüyle gerçekleştirilen test sonucunda elde edilen veriler Şekil 5.16’da görülmektedir.



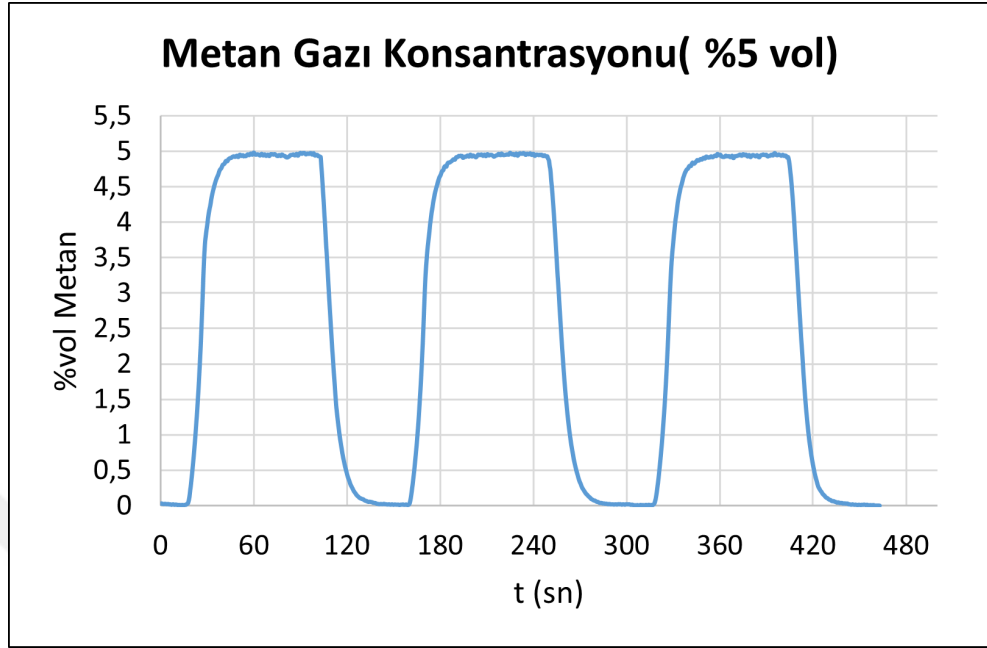
Şekil 5.16 : %4 vol Metan gazı ölçüm sonuçları.

%4.5 vol (45000ppm) metan gazı tüpüyle gerçekleştirilen test sonucunda elde edilen veriler Şekil 5.17’da görülmektedir.



Şekil 5.17 : %4.5 vol Metan gazı ölçüm sonuçları.

%5 vol (50000ppm) metan gazı tüpüyle gerçekleştirilen test sonucunda elde edilen veriler Şekil 5.18’de görülmektedir.



Şekil 5.18 : %5 vol Metan gazı ölçüm sonuçları.

Metan gazı konsantrasyonlarına bağlı olarak, elite gaz tarafından gaz tüpleri üzerinde belirtilen konsantrasyon değerleri göz önünde bulundurularak, 3 periyotta alınan verilerle hesaplanan mutlak hata ve bağıl hata değerlerinin değişimi Çizelge 5.2’de görülmektedir.

Çizelge 5.2 : Metan gazı ölçüm sonuçları.

Metan konsantrasyonu (%vol)	Mutlak Hata (%vol)	Bağıl Hata (%)
0.5	0,012	2,4
1	0.006	0.6
1.5	0.025	1.6
2	0.024	1.2
2.5	0.004	0.16
3	0.01	0.33
3.5	0.006	0.17
4	0.005	0.13
4.5	0.01	0.22
5	0.039	0.78

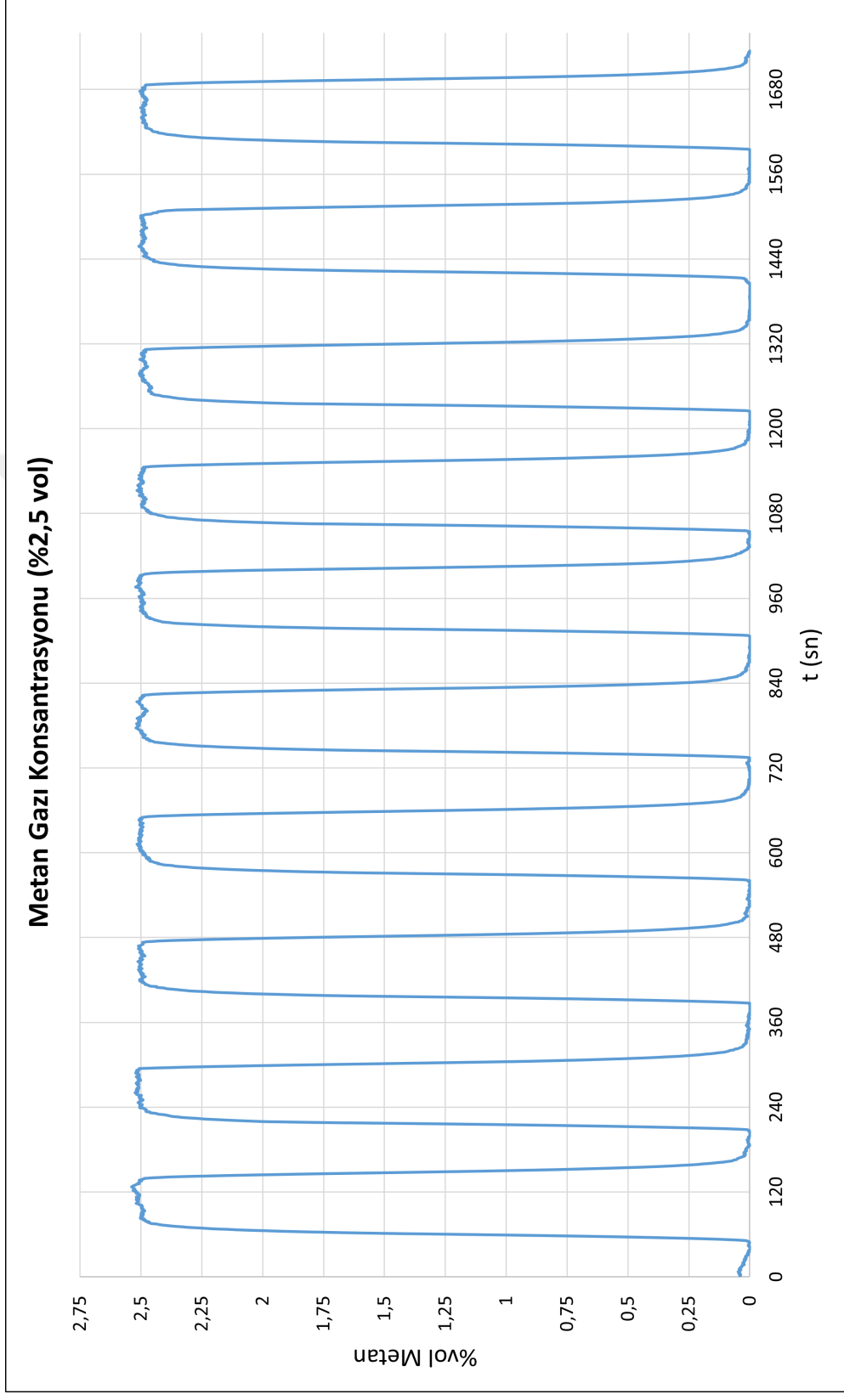
NDIR metan gaz sensörünün minimum algılama sınırını belirlemek için, kalibrasyonu yapılmış sensöre 2 dk boyunca kuru hava gazı verilerek, sensörün okuduğu veriler kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.19’de görülmektedir.



Şekil 5.19 : Sensörün kuru hava gazına tepkisi.

IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) sensörün minimum algılama sınırını ölçülen bu arka plan gürültüsünün standart sapma değerinin 3 katı olarak tanımlamaktadır. Şekil 5.19’de okunan verilerin standart sapması 0,00199 %vol olarak hesaplanmıştır. Standart sapmanın 3 katı 0,00596 %vol’dur. Yapılan teste göre NDIR gaz sensörünün minimum algılama sınırı 60 ppm olarak tespit edilmiştir.

NDIR gaz sensöründe alınan ölçümlerin tekrarlanabilirliğini gözlemlemek amacıyla %2.5 vol metan gazı kullanılarak alınan ölçümler 10 periyot olacak şekilde tekrarlanmıştır. Bu testte NDIR gaz sensörü yaklaşık 1.5 dk süresince metan gazına maruz bırakıldıktan sonra yaklaşık 1 dk süre boyunca kuru hava gazına maruz bırakılmıştır. %2.5 vol (25000ppm) metan gazı kullanılarak, 10 periyotta alınan ölçümler Şekil 5.20’de görülmektedir. Verilere göre , %2.5 vol metan gazı ölçümünde mutlak hata 0.001 [%vol] ve bağıl hata %0.04’tür.



Şekil 5.20 : %2.5 vol Metan gazı 10 periyot için ölçüm sonuçları.



6. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, metan gazı bulunabilecek ortamlarda, gazın yanıcı ve patlayıcı özelliklerinden dolayı oluşabilecek tehlikelerden korunmak amacıyla, gaz algılama sistemlerinde kullanılmak üzere standart minyatür formatta endüstriyel NDIR metan gaz sensörü tasarımı yapılmıştır. NDIR metan gaz sensörünün testler ve analizler sonucunda elde edilen verilere göre genel özellikleri Çizelge 6.1’de görülmektedir.

Çizelge 6.1 : Endüstriyel NDIR metan gaz sensörünün özellikleri.

Sensör Ölçüleri	20 mm x 16.15 mm
Optik Yol Uzunluğu	54 mm
Sensör Kapsülü Materyali	MS-58 piring
Kaplama Materyali	Altın
Ölçüm Metodu	NDIR (termofil)
T90	< 20 sn
Minimum Algılama Sınırı	60 ppm
Ölçüm Aralığı	%0-5 vol
Bağıl Hata (%)	< % 3
Güç Tüketimi	0.6 W

Standart minyatür formata uygun olarak tasarlanan endüstriyel NDIR metan gaz sensörü 20 mm çapında 16.15 mm yüksekliğinde silindir şekline sahiptir. Tekrarlanabilirliğinin iyi seviyede olduğu gözlemlenen sensörün minimum algılama limiti 60 ppm’dir.

Sensörün optik özellikleri daha da optimize edilerek optik sinyalde daha da gelişme sağlanabilir ve minimum algılama limiti değeri artırılabilir. Sensör kapsülünün optik özelliklerini geliştirmek için, üretim sırasında kapsüldeki yüzey pürüzlülüğünü azaltma yöntemleri araştırılmalıdır. Yüzeydeki çizikler ve pürüzler azaldığında ışınların dağınık yansıması da minimize edilerek, bu ışınların yansımalar sonucunda uğradığı kayıpların azaltılabileceği öngörülmektedir. Bunun yanında kaplama işlemini

daha kaliteli yapılabilmesi ve kaplama malzemesinin yüzeyi daha iyi tutunması için yöntemler araştırılmalıdır. Bu doğrultuda üretim için kullanılan pirinç malzeme değiştirilebilir.

Optik verimlilik için, tasarımda kullanılan IR akkor lambanın konumu da önemlidir. Merkezi parabolik yansıtıcı/odaklayıcı yüzeyin odak noktasında sabit tutulacak şekilde, lambanın konumu tek eksenle değiştirilerek optimize edilmeli ve en uygun konum netleştirilmelidir. Sensör kartı montajında bu konumu sabitlemek için IR akkor lambaya uygun şekilde ek bir parça olarak lamba tutucu tasarımı gerçekleştirilerek tasarıma eklenebilir.

Işın izleme için Zemax yazılımı kullanılarak, sensör kapsülü için yapılan son tasarımda ışık yoğunluğunun %20'sinin dedektör elemanlarına ulaştığı görülmüştür. Analizlerde, kapsül ve kapsül kapağındaki birleşme noktası, üretimden kaynaklı oluşan yüzey pürüzlülüğü ve yüzey kaplama işleminin kalitesi gibi etkenler hesaba katılmadığından bu etkenlerin üretilen prototipte verimliliği düşürdüğü tahmin edilmektedir.

Prototipi üretilen sensörde yapılan testler sonucunda, sensörün %0-5 vol aralığında ölçümler için uygun olduğu ve bu değerler aralığında bağıl hatanın %3'ten küçük olduğu görülmüştür. Sensörün T90 değeri, sensörün ölçtüğü gaz konsantrasyonu değerinin hedef gazın konsantrasyon değerinin %90'ına ne kadar sürede ulaştığını ifade etmektedir. Yapılan testlere göre bu değer 20 saniyenin altında olduğu tespit edilmiştir.

Sensör kartı lamba açık olduğunda maksimum 126mA akım çekmektedir. Lamba 5V gerilim ile beslendiğinden güç tüketiminin 0.6W olduğu görülmüştür. Akkor lamba daha düşük tahrik geriliminde çalıştırılabilir ve böylece lamba çıkış kararlılığı, güç tüketimi ve kullanım ömrü artırılabilir. Ancak bu durumda emisyon yoğunluğunun azalacağı göz önünde bulundurulmalıdır.

Gelecek çalışmalarda, termofil dedektörlere kıyasla daha düşük gürültü seviyesine ve dedektiviteye sahip olan piroelektrik dedektörler için tasarım revize edilerek sistem performansındaki değişim gözlemlenebilir. Bu değişim fiyatı termofil dedektöre kıyasla daha yüksek piroelektrik dedektörler için fiyat-performans açısından değerlendirilmelidir.

Tasarımda maliyeti düşürmek için pirinç üzeri altın kaplama yönteminin yanında alüminyum malzeme kullanımı değerlendirilmelidir. Alüminyum $3.3\mu m$ dalga boyu civarında yaklaşık olarak altın ile aynı (%95) yansıtıcılığa sahiptir. Ancak alüminyum uzun süreli kullanımda ortam koşullarına bağlı olarak korozyona uğrayabilmektedir. Bu durum zaman içinde yansıtıcılığının giderek düşmesi ile sonuçlanmaktadır. Bu yüzden alüminyum malzeme tercih edilmesi durumunda malzemenin korozyondan nasıl korunabileceği araştırılmalıdır. Bulunan yöntemler değerlendirilirken yansıtıcılığı nasıl etkileyeceği de göz önünde bulundurulmalıdır.

Kullanılan akkor lambanın $3.3\mu m$ dalga boyu için cam geçirgenliği yaklaşık %55 civarındadır. Bu dalga boyunda optik geçirgenliği daha yüksek olan malzemeler kullanılarak tasarlanmış ve piyasada bulunabilirliği yüksek olan alternatif akkor lambalar araştırılabilir. Geçirgenliğin daha yüksek olması durumunda optik verimlilikte artırılabilir.

Bunların yanında tasarlanan NDIR metan gaz sensörü endüstriyel kullanıma uygun olarak kullanılacağından ortam koşullarının ölçümleri nasıl etkileyebileceğini gözlemlemek amacıyla test edilebilir. Yapılan araştırmalarda ölçüm sonuçlarının ortamdaki neme bağlı olarak sensör kapsülü içine giren su buharından etkilendiği görülmüştür. Tasarımı gerçekleştirilen sensörde kapsül içine su buharının girmesini önlemek amacıyla uygun hidrofobik filtre araştırılabilir. Filtre kullanımının sonuçları ne kadar iyileştirdiği test edilebilir.



KAYNAKLAR

- [1] *Global Methane Emissions and Mitigation Opportunities*, https://www.globalmethane.org/documents/analysis_fs_en.pdf, accessed: 10.04.2023.
- [2] **Lan X., K.T. ve Dlugokencky, E.** (2023). Trends in globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements, https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4.
- [3] *About Methane Emissions*, <https://www.mdpi.com/2411-5134/5/3/28#B2-inventions-05-00028>, accessed: 10.04.2023.
- [4] **Toxicology, N.R.C.U.C.O.** (1984). *Emergency and Continuous Exposure Limits for Selected Airborne Contaminants*, sayıl. c. in Emergency and Continuous Exposure Limits for Selected Airborne Contaminants, National Academy Press, <https://books.google.com.tr/books?id=Ca1aAAAYAAJ>.
- [5] **Abadi, M.H.S., Hamidon, M.N., Shaari, A.H., Abdullah, N., Misron, N. ve Wagiran, R.** (2010). Characterization of Mixed xWO₃(1-x)Y₂O₃ Nanoparticle Thick Film for Gas Sensing Application, *Sensors*, 10(5), 5074–5089, <https://www.mdpi.com/1424-8220/10/5/5074>.
- [6] **Wang, Y., Tong, M.M., Zhang, D. ve Gao, Z.** (2011). Improving the Performance of Catalytic Combustion Type Methane Gas Sensors Using Nanostructure Elements Doped with Rare Earth Cocatalysts, *Sensors*, 11(1), 19–31, <https://www.mdpi.com/1424-8220/11/1/19>.
- [7] **Asakawa, T., Kanno, N. ve Tonokura, K.** (2010). Diode Laser Detection of Greenhouse Gases in the Near-Infrared Region by Wavelength Modulation Spectroscopy: Pressure Dependence of the Detection Sensitivity, *Sensors*, 10(5), 4686–4699, <https://www.mdpi.com/1424-8220/10/5/4686>.
- [8] **Zosel, J., Oelßner, W., Decker, M., Gerlach, G. ve Guth, U.** (2011). The measurement of dissolved and gaseous carbon dioxide concentration, *Measurement Science and Technology*, 22(7), 072001, <https://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/22/7/072001>.
- [9] *NDIR Gas Detection*, <https://www.heimannsensor.com/NIDR-gas-detection>, accessed: 01.05.2023.

- [10] **Luft, K.F.** (1947). Anwendung des ultraroten Spektrums in der chemischen Industrie, *Angewandte Chemie*, 19, 2–12.
- [11] **Sieber, I., Eggert, H., Suphan, K.H. ve Nuessen, O.** (2001). Optical modeling of the analytical chamber of an IR gas sensor, *B. Courtois, J.M. Karam, S.P. Levitan, K.W. Markus, A.A. Tay ve J.A. Walker, (düzenleyenler), Design, Test, Integration, and Packaging of MEMS/MOEMS 2001*, cilt4408 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, s.272–282.
- [12] **Viola, R.** (2006). High-luminosity multipass cell for infrared imaging spectroscopy, *Appl. Opt.*, 45(12), 2805–2809, <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-45-12-2805>.
- [13] **Park, J. ve Yi, S.** (2011). Nondispersive Infrared Ray CH₄ Gas Sensor Using Focused Infrared Beam Structures, *Sensors and Materials*, 23, 147–158.
- [14] **Fonollosa, J., Rubio, R., Hartwig, S., Marco, S., Santander, J., Fonseca, L., Wöllenstein, J. ve Moreno, M.** (2008). Design and fabrication of silicon-based mid infrared multi-lenses for gas sensing applications, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 132(2), 498–507, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400507009379>, transducers '07/Eurosensors XXI.
- [15] **Ye, W., Tu, Z., Xiao, X., Simeone, A., Yan, J., Wu, T., Wu, F., Zheng, C. ve Tittel, F.K.** (2020). A NDIR Mid-Infrared Methane Sensor with a Compact Pentahedron Gas-Cell, *Sensors*, 20(19), <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/19/5461>.
- [16] **Xu, M., Xu, Y., Tao, J., Li, Y., Kang, Q., Shu, D., Li, T. ve Liu, Y.** (2021). A design of an ultra-compact infrared gas sensor for respiratory quotient (qCO₂) detection, *Sensors and Actuators A: Physical*, 331, 112953, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424721004180>.
- [17] **Tan, Q., Tang, L., Yang, M., Xue, C., Zhang, W., Liu, J. ve Xiong, J.** (2015). Three-gas detection system with IR optical sensor based on NDIR technology, *Optics and Lasers in Engineering*, 74, 103–108, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816615001256>.
- [18] **Liu, H., Shi, Y. ve Wang, T.** (2020). Design of a six-gas NDIR gas sensor using an integrated optical gas chamber, *Opt. Express*, 28(8), 11451–11462, <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-28-8-11451>.
- [19] **Bandara, K., Sakai, K., Nakandakari, T. ve Yuge, K.** (2021). A Low-Cost NDIR-Based N₂O Gas Detection Device for Agricultural Soils: Assembly, Calibration Model Validation, and Laboratory Testing, *Sensors*, 21(4), <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1189>.

- [20] *Wave-Particle Duality*, <https://www.britannica.com/science/wave-particle-duality>, accessed: 11.04.2023.
- [21] *EM spectrum*, <https://www.britannica.com/science/wave-particle-duality>, accessed: 11.04.2023.
- [22] **Baggott, J.** (2008). *Beyond Measure: Modern Physics, Philosophy and the Meaning of Quantum Theory*, Oxford University Press.
- [23] **Dinh, T.V., Choi, I.Y., Son, Y.S. ve Kim, J.C.** (2016). A review on non-dispersive infrared gas sensors: Improvement of sensor detection limit and interference correction, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 231, 529–538, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400516303343>.
- [24] *Planck yasası*, https://tr.wikipedia.org/wiki/Planck_yasası, accessed: 11.04.2023.
- [25] **Cruz, F.C., Maser, D.L., Johnson, T., Ycas, G., Klose, A., Giorgetta, F.R., Coddington, I. ve Diddams, S.A.** (2015). Mid-infrared optical frequency combs based on difference frequency generation for molecular spectroscopy, *Opt. Express*, 23(20), 26814–26824, <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-23-20-26814>.
- [26] *Gas Analyzer*, <https://miro-analytical.com/our-products/>, accessed: 11.04.2023.
- [27] **Harvey, D.** (2005). GAS CHROMATOGRAPHY | Mass Spectrometry, **P. Worsfold, A. Townshend ve C. Poole**, (düzenleyenler), *Encyclopedia of Analytical Science (Second Edition)*, Elsevier, Oxford, second edition sürüm, s.106–116, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0123693977002235>.
- [28] *Kızılotesi Gaz Sensoru*, <https://www.karfandscoot.com/kizilotesi-gaz-sensoru-nasil-calisir/>, accessed: 11.04.2023.
- [29] **Rogalski, A.** (2002). Infrared detectors: an overview, *Infrared Physics & Technology*, 43(3), 187–210, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449502001408>.
- [30] **Walters, C., Keeney, A.L., Wigal, C.T., Johnston, C.R. ve Cornelius, R.D.** (1997). The Spectrophotometric Analysis and Modeling of Sunscreens, *Journal of Chemical Education*, 74, 99–101.
- [31] **Mayrwöger, J., Hauer, P., Reichl, W., Schwodiauer, R., Krutzler, C. ve Jakoby, B.** (2010). Modeling of Infrared Gas Sensors Using a Ray Tracing Approach, *IEEE Sensors Journal*, 10(11), 1691–1698.

- [32] **Kingston, R.H.**, (1995). Chapter 1 - Blackbody Radiation, Image Plane Intensity, and Units, **R.H. Kingston**, (düzenleyen), *Optical Sources, Detectors, and Systems, Optics and Photonics*, Academic Press, Burlington, s.1–32, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124086555500020>.
- [33] *Incandescent*, <https://www.britannica.com/dictionary/incandescent>, accessed: 12.04.2023.
- [34] *HSL Series*, <https://www.heimannsensor.com/HSL-Series>, accessed: 12.04.2023.
- [35] **Smith, S., Hardaway, H. ve Crowder, J.** (2002). Recent developments in the applications of mid-infrared lasers, LEDs, and other solid state sources to gas detection, *Proc SPIE*, 157–172.
- [36] **MacIsaac, D., Kanner, G.S. ve Anderson, G.K.** (1999). Basic physics of the incandescent lamp (lightbulb), *The Physics Teacher*, 37, 520–525.
- [37] **Scholz, L., Perez, A.O., Knobelspies, S., Wöllenstein, J. ve Palzer, S.** (2015). MID-IR LED-based, Photoacoustic CO₂ Sensor, *Procedia Engineering*, 120, 1233–1236, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815025072>, eurosensors 2015.
- [38] **Fanchenko, S., Baranov, A., Savkin, A., Somov, A. ve Calliari, L.** (2016). Multi-wavelength IR method for monitoring air pollution in cities, *2016 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, s.1–6.
- [39] **Rumyantsev, S., Shur, M., Bilenko, Y., Kosterin, P. ve Salzberg, B.** (2004). Low frequency noise and long-term stability of noncoherent light sources, *Journal of Applied Physics*, 96, 966–969.
- [40] *Match the Emitter to the Task*, https://www.photonics.com/Articles/Match_the_Emitter_to_the_Task/a35272, accessed: 12.04.2023.
- [41] **Chowdhury, M., Hopper, R., Ali, S., Gardner, J. ve Udrea, F.** (2016). MEMS Infrared Emitter and Detector for Capnography Applications, *Procedia Engineering*, 168, 1204–1207, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816337298>, proceedings of the 30th anniversary Eurosensors Conference – Eurosensors 2016, 4-7. September 2016, Budapest, Hungary.
- [42] **Daly, J.T., Greenwald, A.C., Johnson, E.A., Stevenson, W.A., Wollam, J.A., George, T. ve Jones, E.W.** (2000). Nanostructured surfaces for tuned infrared emission for spectroscopic applications, *J.W. Perry ve A. Scherer*, (düzenleyenler), *Micro- and Nano-phonic Materials and Devices*, cilt3937, International Society for Optics and Photonics, SPIE, s.80 – 89, <https://doi.org/10.1117/12.382797>.

- [43] **Rogalski, A.** (2003). Infrared detectors: status and trends, *Progress in Quantum Electronics*, 27(2), 59–210, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079672702000241>.
- [44] **Daniels, A.** (2018). *Field Guide to Infrared Systems, Detectors, and FPAs*, Field Guides, SPIE Press, <https://books.google.com.tr/books?id=3LxPtAEACAAJ>.
- [45] **Jones, R.C.**, (1953). Performance of Detectors for Visible and Infrared Radiation, cilt 5 of *Advances in Electronics and Electron Physics*, Academic Press, s.1–96, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065253908606836>.
- [46] *Pyroelectric Detector*, <https://www.infratec.eu/sensor-division/service-support/glossary/pyroelectric-detector/>, accessed: 12.04.2023.
- [47] **Dereniak, E. ve Boreman, G.** (1996). *Infrared Detectors and Systems*, Wiley Series in Pure and Applied Optics, Wiley, <https://books.google.com.tr/books?id=DdFdngEACAAJ>.
- [48] **Porter, S.G.** (1981). A brief guide to pyroelectric detectors, *Ferroelectrics*, 33, 193–206.
- [49] **Ravindra, N., Jariwala, B., Bañobre, A. ve Maske, A.** (2018). *Thermoelectrics: Fundamentals, Materials Selection, Properties, and Performance*, SpringerBriefs in Materials, Springer International Publishing, <https://books.google.com.tr/books?id=hBxrDwAAQBAJ>.
- [50] **Li, M., Xu, S., Chen, Q. ve Zheng, L.R.** (2011). Thermoelectric-Generator-Based DC–DC Conversion Networks for Automotive Applications, *Journal of Electronic Materials*, 40, 1136–1143.
- [51] *What is a Bolometer : Circuit & Its Working*, <https://www.elprocus.com/what-is-a-bolometer-circuit-its-working/>, accessed: 24.04.2023.
- [52] **Sturman, B. ve Fridkin, V.** (2021). *Photovoltaic and Photo-refractive Effects in Noncentrosymmetric Materials*, CRC Press, <https://books.google.com.tr/books?id=v5oiEAAAQBAJ>.
- [53] *Photovoltaic or Solar Cell*, <https://circuitglobe.com/photovoltaic-or-solar-cell.html>, accessed: 25.04.2023.
- [54] *Photoconductivity*, <https://en.wikipedia.org/wiki/Photoconductivity>, accessed: 24.04.2023.
- [55] *Işın Dedektörleri (photon and thermal detectors)*, http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_918.html, accessed: 24.04.2023.

- [56] *Gaz Algılama Sensörleri*, <https://www.mavili.com.tr/gaz-algilama-sensorleri/1238-gaz-algilama-sensorleri.html>, accessed: 25.04.2023.
- [57] *Gas Detection Solutions For Medical Laboratories and Hospitals*, <https://www.nenvitech.com/applications/laboratories-and-medical/>, accessed: 28.04.2023.
- [58] *Infrared Gas Sensor*, <https://www.winsen-sensor.com/sensors/combustible-sensor/>, accessed: 28.04.2023.
- [59] *Methane Sensor*, https://gaslab.com/products/methane-gas-sensor-cubic-sjh-5?_pos=1&_sid=6e14ad6ad&_ss=r, accessed: 28.04.2023.
- [60] *Gas Sensors*, <https://www.dynamant.com/products/gas-sensors/platinum-ex-certified-sensors/>, accessed: 28.04.2023.
- [61] **Wikipedia, S.** (2013). *Geometrical Optics: Lens, Snell's Law, Fresnel Equations, Fermat's Principle, Refraction, Total Internal Reflection, Depth of Field, Ray Tracing, Aper*, General Books, <https://books.google.com.tr/books?id=B-j9nQEACAAJ>.
- [62] **Skobel, D.** (2012). *Optical Properties of Metals and Intermolecular Interactions*, The Lebedev Physics Institute Series, Springer US, <https://books.google.com.tr/books?id=HzPoBwAAQBAJ>.
- [63] *Reflectance*, <https://en.wikipedia.org/wiki/Reflectance>, accessed: 28.04.2023.
- [64] **YALÇIN, D.** (2023). Yakınsak Nozullar ile Tasarlanmış Optik Gaz Sensörü, *Türk Patent Application No:2023/005762*, Türkiye, UESTCO Enerji Sistemleri Ltd. Şti.
- [65] **YALÇIN, D. ve İkizoğlu, S.** (2023). Fluid Dynamics Analysis in NDIR Gas Sensor Capsule Designed with Convergent Nozzles, *The European Journal of Research and Development*, 3(1), 60–70, <https://journals.orclever.com/ejrnd/article/view/236>.
- [66] *HTS Multichannel Series*, <https://www.heimannsensor.com/HTS-Multichannel-Series>, accessed: 28.04.2023.
- [67] *Benchtop Temperature humidity Test Chamber*, <https://www.lib-testchamber.com/benchtop-temperature-humidity-test-chambers/>, accessed: 11.04.2023.
- [68] <http://www.elitegaz.com.tr/ozel-gazlar>, accessed: 11.04.2023.

EKLER

EK A : Yazılım Arayüzü

EK B : Yazılım Akış Şematiği

EK C : Hedef Gaz Konsantrasyonunun Hesaplanması

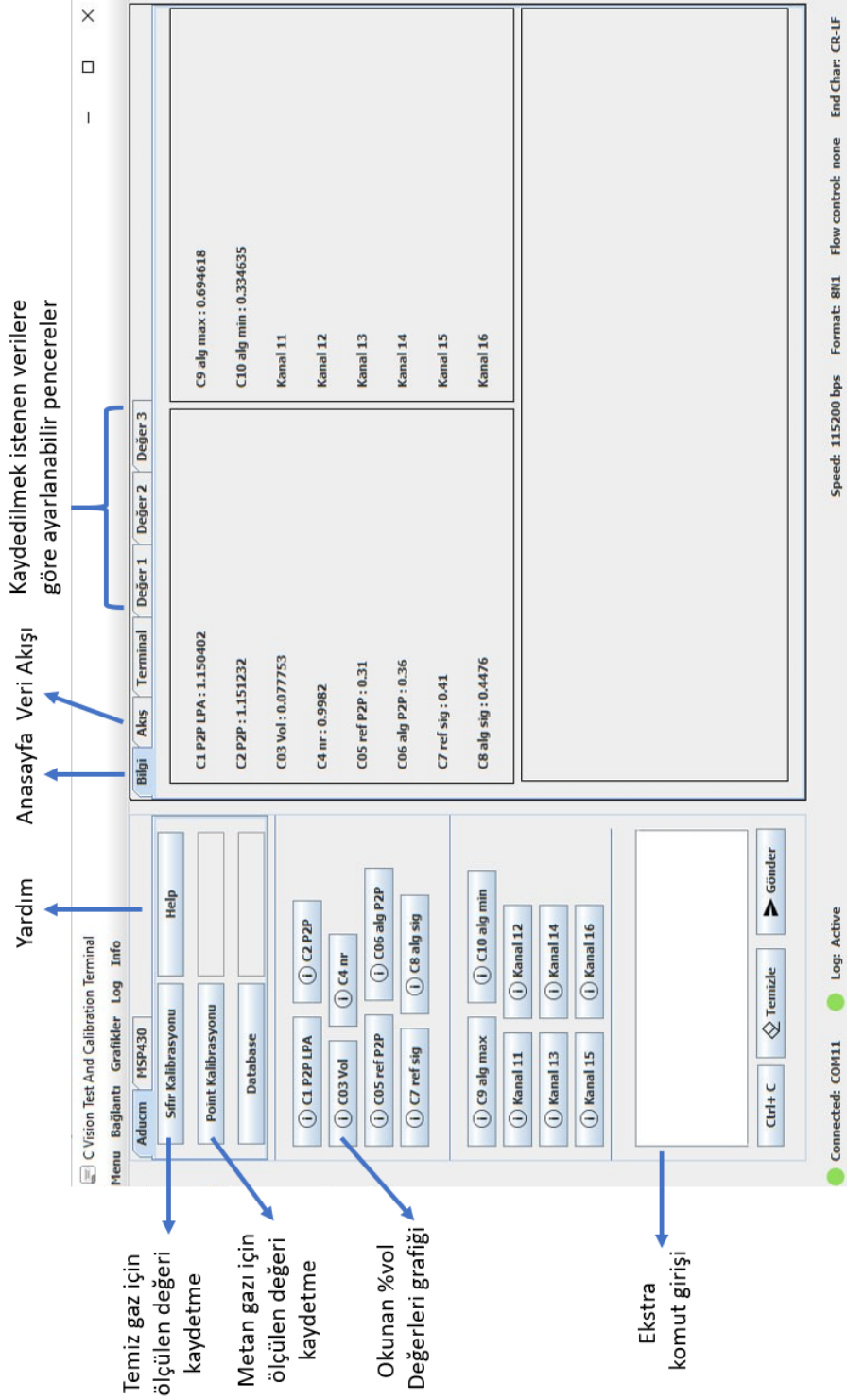
EK D : Sensör doğrusallaştırma katsayılarının hesaplanması

EK E : Sensör Kalibrasyonu





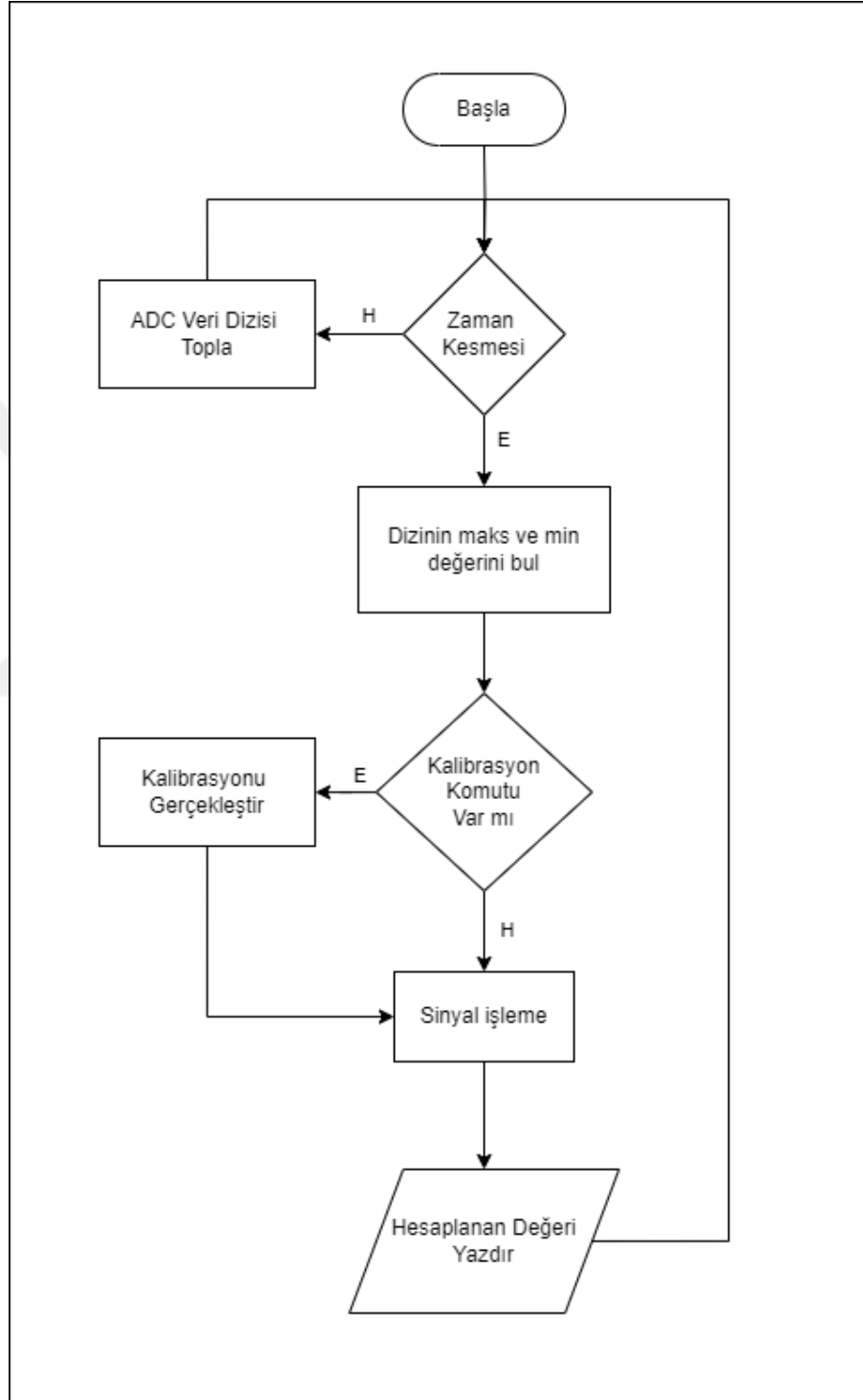
EK A : Yazılım Arayüzü



Şekil A.1 : Sensör çıktıları için kullanılan yazılım arayüzü



EK B : Yazılım Akış Şematığı



Şekil B.1 : Sensör çıktıları için kullanılan yazılımın akış şematığı.



EK C : Hedef Gaz Konsantrasyonunun Hesaplanması

Absorbans şu şekilde tanımlanır:

$$ABS = 1 - (I/I_0) \quad (A.1)$$

Denklem A.1'de:

$$I = ACT/REF \quad (A.2)$$

$$I_0 = ACT_0/REF_0 = ZERO \quad (A.3)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

ACT: Hedef gaz varlığında dedektörün aktif kanalında okunan değer (volt)

REF: Hedef gaz varlığında dedektörün referans kanalında okunan değer (volt)

ACT₀: Ortamda hedef gaz yokken dedektörün aktif kanalında okunan değer (volt)

REF₀: Ortamda hedef gaz yokken dedektörün referans kanalında okunan değer (volt)

Sensör çıkışlarına uygun olarak Absorbans değeri:

$$ABS = 1 - (ACT/(REF \times ZERO)) \quad (A.4)$$

Gaz konsantrasyonu:

$$x = [(-\ln(1 - (ABS/SPAN)))/a]^{1/n} \quad (A.5)$$

a: sabit lineerizasyon katsayısı(Bkz. Ek-D)

n: sabit lineerizasyon katsayısı (Bkz. Ek-D)

SPAN: gaz konsantrasyonu varlığında yapılan kalibrasyon ile kaydedilen değer



EK D : Sensör doğrusallaştırma katsayılarının hesaplanması

UESTCO ENERJİ SİSTEMLERİ LTD. ŞTİ.
Gaz Analizör/Dedektör Deney ve Kalibrasyon Laboratuvarı
Şerifali Mahallesi, Hendem Caddesi No:2, Kat: 2-3, 34775 Ömraniye İSTANBUL • Tel: +90 216 314 5657
• Faks: +90 216 314 5661 • E-posta: info@uestco.com • Website: www.uestco.com

uestco **MUAYENE VE DENEY RAPORU**
TEST REPORT

Rapor No

DOĞRUSALLAŞTIRMA KATSAYI DEĞERLERİNİ ("a" ve "n") HESAPLAMA DENEYİ

Deney Ortam Nemi	Deney Ortam Sıcaklığı	Belirlenen Deney Gazı	Belirlenen Derişim Oranları	Gaz Akış Oranı
%20-%80(±%10) RH	20°C	Metan	%0.5, %1, %1.5, %2, %2.5, %3, %3.5 %4, %4.5 %5	0.4-0.5 L/dk

1- Parametre Hesaplama

a. Her Bir Konsantrasyonda Hesaplanan NA (Absorbans) Değerlerin Ortalamaları

Deney Konsantrasyonu	Hesaplanan Ortalama NA
%0 vol	
%0,5 vol	
%1 vol	
%1,5 vol	
%2 vol	
%2,5 vol	
%3 vol	
%3,5 vol	
%4 vol	
%4,5 vol	
%5 vol	

b. "a" ve "n" Katsayılarının Hesaplanması

Her bir konsantrasyonun değeri x eksenini oluşturacak şekilde ve bu konsantrasyonlarda hesaplanan ortalama NA değerleri y eksenini oluşturacak şekilde eğri uydurma programına girilir. Uygun Curve fitting (Eğri uydurma) programları kullanılarak "a" ve "n" değerleri aşağıdaki verilen denkleme göre hesaplanır.

$$y = s \times [1 - e^{-ax^n}]$$

Burada;

x = Metan konsantrasyonları

y = Her bir gaz konsantrasyonu için Ortalama NA değerleri

a= Sabit doğrusallaştırma katsayısı (Eğri uydurma programı kullanılarak elde edilecek)

n=Sabit doğrusallaştırma katsayısı (Eğri uydurma programı kullanılarak elde edilecek)

s = Program tarafından hesaplanır. (Eğri uydurma programı tarafından otomatik olarak belirlenir)

(Not: a ve n'yi hesaplarken "s" göz ardı edilebilir.)

Şekil D.1 : Sensör "a" ve "n" katsayılarının hesaplanma prosedürü.



EK E : Sensör Kalibrasyonu

Sensörün ölçüm alınmadan önce sıfır kalibrasyonu ve Span kalibrasyonu olmak üzere iki kalibrasyonu yapılmalıdır.

Sıfır kalibrasyonu, sensörün kuru hava gazına maruz bırakılarak yapılan kalibrasyondur.

$$ZERO = (ACT_0 / REF_0) \quad (A.1)$$

ACT_0 : Kuru hava gazı varlığında aktif kanalda okunan değer

REF_0 : Kuru hava gazı varlığında referans kanalında okunan değer

ZERO, sensöre özgü bir parametredir ve sensör bir alete her takıldığında (veya yeniden takıldığında) belirlenmelidir.

Span kalibrasyonu, sensörün belirlenen bir konsantrasyondaki hedef gaza maruz bırakılarak yapılan kalibrasyondur.

$$SPAN = [1 - ACT / (ZERO \times REF)] / [1 - \exp(-aC^n)] \quad (A.2)$$

ACT: Hedef gaz maruziyeti sırasında dedektörün aktif kanalında okunan değer

REF: Hedef gaz maruziyeti sırasında dedektörün aktif kanalında okunan değer

ZERO: Sıfır kalibrasyonu sonucunda elde edilen değer

a: sabit linerizasyon katsayısı (Bkz. EK-D)

n: sabit lineerizasyon katsayısı (Bkz. EK-D)

C: Kullanılan hedef gaz konsantrasyonu (%vol)



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : DİLÂN YALÇIN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2020, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Mühendisliği (GPA:3.12/4.00)

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 02/2021-08/2021 tarihleri arasında EAE Aydınlatma’da Teknik Araştırma Mühendisi olarak çalıştı.
- 11/2021’den günümüze UESTCO Enerji Sistemleri’nde Arge Proje Mühendisi olarak çalışmakta.
- 2022 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Proje Yönetimi eğitimini tamamladı.

TEZ İLE İLGİLİ YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Yalçın D., İkizoğlu S.,** (2022). Effects of Different Reflector Geometries in NDIR Gas Sensors on The Light Concentration *International Congress - EGE 7th International Conference on Applied Science* , December 24-25, 2022, Turkey.
- **Yalçın D., İkizoğlu S.,** (2023). Fluid Dynamics Analysis in NDIR Gas Sensor Capsule Designed with Convergent Nozzles *International Congress - Araconf 3rd International Conference on Access to Recent Advances in Engineering and Digitalization*, March 15-17, 2023, Turkey.
- **Yalçın D., İkizoğlu S.,** (2023). Fluid Dynamics Analysis in NDIR Gas Sensor Capsule Designed with Convergent Nozzles, *The European Journal of Research and Development*, 3(1), 60-70.
- **Yalçın D.** (2023). Yakınsak Nozullar ile Tasarlanmış Optik Gaz Sensörü. Türk Patent Application No:2023/005762. Turkey, UESTCO Enerji Sistemleri Ltd. Şti.