

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GAZ SENSÖRLERİ İLE ÖLÇÜM SİSTEMLERİ İÇİN  
ORTAM MODELLEME VE SİMÜLATÖR  
GELİŞTİRİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Nesibe YALÇIN**

**Enstitü Anabilim Dalı : BİLGİSAYAR VE BİLİŞİM  
MÜHENDİSLİĞİ**

**Danışman : Doç. Dr. Ahmet ÖZMEN**

**Temmuz 2017**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

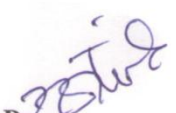
**GAZ SENSÖRLERİ İLE ÖLÇÜM SİSTEMLERİ İÇİN  
ORTAM MODELLEME VE SİMÜLATÖR  
GELİŞTİRİLMESİ**

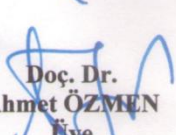
**DOKTORA TEZİ**

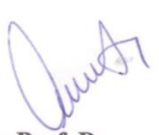
**Nesibe YALÇIN**

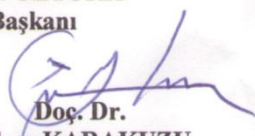
**Enstitü Anabilim Dalı : BİLGİSAYAR VE BİLİŞİM  
MÜHENDİSLİĞİ**

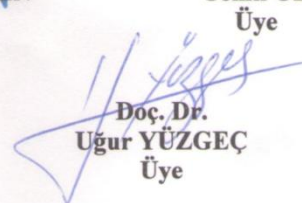
**Bu tez 17 / 07 /2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.**

  
Prof. Dr.  
Zafer Ziya ÖZTÜRK  
Jüri Başkanı

  
Doç. Dr.  
Ahmet ÖZMEN  
Üye

  
Prof. Dr.  
Cemil ÖZ  
Üye

  
Doç. Dr.  
Cihan KARAKUZU  
Üye

  
Doç. Dr.  
Uğur YÜZGEÇ  
Üye

## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Nesibe YALÇIN

17.07.2017

## TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimleri ile beni yönlendiren, teŐvik eden, tez çalıŐmamın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aŐamalarında bilgi ve desteğini esirgemeyen çok sayđı değer danışman hocam Doç. Dr. Ahmet ÖZMEN'e tüm içtenliğimle teŐekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca bana emeği geçen, bilimsel disiplin ve bakış açısı kazanmamı sağlayan başta Doç. Dr. Cihan KARAKUZU olmak üzere bütün hocalarıma, değerli bilgileri ile tez çalıŐmama katkıda bulunarak bana yol gösteren Prof. Dr. Zafer Ziya ÖZTÜRK ve Prof. Dr. Cemil Z'e, tez çalışmaları sırasında birlikte çalıŐmaktan her zaman zevk aldığım ArŐ. Gör. Deniz DURAL BALTA'ya ve tezimi bitirmem için beni yreklendiren dostlarıma ve çalışma arkadaŐlarıma teŐekkürü bir borç bilirim.

Buğnlere gelmemde büyük pay sahibi olan, sevgilerini, güvenlerini, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen haklarını ödeyemeyeceğim babam ve annem başta olmak üzere canım aileme sayđılarıma ve teŐekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	viii
TABLOLAR LİSTESİ .....	xi
ÖZET .....	xiii
SUMMARY .....	xiv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
1.1. Çalışmanın Amacı, Önemi ve Hedefler .....	1
1.2. Çalışmanın Kapsamı .....	2
1.3. Literatür Araştırması .....	3
BÖLÜM 2.	
İÇ ORTAM HAVA KALİTESİ .....	10
2.1. İç Ortam Hava Kalitesini Etkileyen Parametreler .....	10
2.1.1. Dış ortam .....	10
2.1.2. İç ortam hava kirleticileri .....	12
2.1.3. İç ortamın fiziksel durumu .....	16
2.1.4. İç ortam kaynakları .....	16
2.1.5. Havalandırma sistemleri .....	16
2.2. Hava Kalitesi Modelleme .....	17
2.3. İç Ortam Hava Kalitesi Modelleri .....	17
2.3.1. Kütle denge modelleri .....	19
2.3.2. Hesaplama akışkanlar dinamiği modelleri .....	22

### BÖLÜM 3.

İÇ ORTAM HAVA KALİTESİ ÖLÇÜM SİSTEMLERİ .....	23
3.1. Gaz Ölçüm Yöntemleri .....	23
3.1.1. Gaz kromatografisi yoluyla konsantrasyon belirlenmesi .....	23
3.1.2. Elektronik gaz algılayıcılar ile konsantrasyon belirlenmesi ....	25
3.1.3. Elektriksel özelliklerin değişimine dayalı yöntemler .....	26
3.1.3.1. Metal oksit yarı iletken algılayıcılar .....	27
3.1.3.2. Polimer algılayıcılar .....	28
3.1.3.3. Karbon nanotüpler .....	30
3.1.3.4. Nem emici materyal algılayıcılar .....	30
3.1.4. Akustik yöntemler .....	31
3.1.5. Optik yöntemler .....	32
3.1.6. Kalorimetrik yöntemler .....	34
3.2. Gaz Ölçüm Yöntemlerinin Karşılaştırılması .....	35
3.3. İç Hava Kalitesi Ölçüm Cihazları .....	37

### BÖLÜM 4.

İÇ ORTAM HAVA KALİTESİ MODELLEME VE BENZETİM UYGULAMALARI .....	38
4.1. Karbondioksit Üretimi ve Havalandırma Oranı .....	38
4.2. Ortam Modelleme .....	43
4.3. Tek Bölmeli Model Uygulamaları .....	43
4.3.1. Nazaroff-Cass modeli ile ortam modelleme .....	43
4.3.2. Bir toplantı odasının modellenmesi .....	50
4.4. Çok Bölmeli Model Uygulamaları .....	54

### BÖLÜM 5.

PİLOT UYGULAMA .....	63
5.1. Uygulama Mimarisi .....	63
5.2. Model Tanımı .....	64

5.3. Veritabanı Tasarımı .....	69
5.3.1. Tablo tanımlamaları .....	69
5.3.2. Veritabanı diyagramı .....	77
5.4. Tahminler ve Benzetim .....	79
5.5. Ölçüm Düzenegi .....	80
5.6. Değerlendirme .....	81
BÖLÜM 6.	
UYGULAMA SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME .....	82
BÖLÜM 7.	
SONUÇ VE ÖNERİLER .....	95
KAYNAKLAR .....	97
EKLER .....	106
ÖZGEÇMİŞ .....	117

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: yüzey alanı
$A_D$	: vücut yüzey alanı
$A_z$	: zemin alanı
Ar	: Argon
ASHRAE	: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers - Amerikan Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Birliği
$C_{avg}$	: ortalama kirletici konsantrasyonu
$C_{dış}$	: dış ortam kirletici miktarı
$C_h$	: havalandırma sisteminden üflenen kirletici miktarı
$C_i$	: kirletici miktarı (konsantrasyonu)
$C_{iç}$	: iç ortam kirletici miktarı
CFD	: Computational Fluid Dynamics - Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
CH <sub>4</sub>	: Metan
CO	: Karbonmonoksit
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
EPA	: Environmental Protection Agency - Çevre Koruma Ajansı
G	: toplam karbondioksit üretim oranı
h	: havalandırma indisi
H	: kişinin boyu
H <sub>2</sub> S	: Hidrojen sülfür
HVAC	: Heating, Ventilating and Air Conditioning - Isıtma, Soğutma ve Havalandırma
IAQ	: Indoor Air Quality
i	: bölme indisi
İOHK	: İç Ortam Hava Kalitesi

j	: bölme indisi
L	: gider terimi
M	: fiziksel aktivite seviyesi
MOS	: Metal Oxide Semiconductor - Metal Oksit Yarı İletken
N <sub>2</sub>	: Azot
NH <sub>3</sub>	: Amonyak
NO <sub>2</sub>	: Azot dioksit
NO <sub>x</sub>	: Azot oksitler
O <sub>2</sub>	: Oksijen
O <sub>3</sub>	: Ozon
p	: içeri girme faktörü
P	: kişi sayısı
PM	: Particulate Matter - Partikül Madde
Q	: toplam hava değişim oranı
Q <sub>e</sub>	: egzoz havası
Q <sub>exf</sub>	: dışarı sızma
Q <sub>h,i</sub>	: havalandırma sisteminden <i>i</i> bölmesine üflenen hava akış oranı
Q <sub>i,h</sub>	: <i>i</i> bölmesinden havalandırma sistemine hava akış oranı
Q <sub>inf</sub>	: içeri sızma
Q <sub>ma</sub>	: harici (HVAC sisteminin dışarıdan hava alımı) hava akış oranı
Q <sub>p</sub>	: kişi başına dış ortam havalandırma oranı
Q <sub>ra</sub>	: geri dönüş havası
R <sub>a</sub>	: alan dış hava oranı
QCM	: Quartz Crystal Microbalance - Kuvars Kristal Mikrobalans
R <sub>p</sub>	: kişi dış hava oranı
RFID	: Radio Frequency Identification, Radyo Frekansı ile Tanımlama
RQ	: solunum katsayısı
S	: kaynak terimi
SAW	: Surface Acoustic Wave - Yüzey Akustik Dalga
SO <sub>2</sub>	: Kükürt dioksit
t	: zaman

$V$	: hacim
$V_b$	: gerekli minimum soluma bölgesi dış hava oranı
$v_d$	: birikim hızı
$V_{CO_2}$	: karbondioksit üretim oranı
$V_{O_2}$	: oksijen tüketim oranı
VOC	: Volatile Organic Compound - Uçucu Organik Bileşik
$W$	: kişinin ağırlığı
WHO	: World Health Organization - Dünya Sağlık Örgütü
$\lambda$	: hava değişim oranı
$\lambda_d$	: birikim oranı
$\lambda_v$	: nominal hava değişim oranı
$\eta$	: filtreleme etkinliği

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Kütle denge modelinde yer alan temel parametreler (Nazaroff ve Cass, 1986; Jamriska, 2003; Yalçın ve Özmen, 2014a) .....	20
Şekil 3.1. Gaz kromatografisinin şematik bir diyagramı (SHU, 2017) .....	24
Şekil 3.2. Bir gaz sensör dizisi sisteminin şematik diyagramı .....	26
Şekil 3.3. n-tipi ve p-tipi MOS sensörlerinin dirençlerinin değişimin şematik gösterimi (Choopun ve ark., 2012) .....	28
Şekil 3.4. İletken polimer tabanlı bir sensörün konfigürasyonu (Bai ve Shi, 2007) .....	29
Şekil 3.5. Tipik bir QCM sensörünün şematik diyagramı (Bai ve Shi, 2007) .....	32
Şekil 3.6. Bir optik sensörün şematik gösterimi (Lobnik ve ark., 2012) .....	33
Şekil 3.7. Yanabilir gazların katalitik yanması ile sıcaklığa bağlı ısı üretim grafiği (Korotcenkov, 2013) .....	34
Şekil 4.1. Aktivite seviyesine göre O <sub>2</sub> ve CO <sub>2</sub> oranları (A <sub>D</sub> =1) .....	41
Şekil 4.2. MATLAB ortamında geliştirilen yazılımın kullanıcı ara yüzü (Yalçın ve Özmen, 2014b) .....	45
Şekil 4.3. HVAC sistemli odadaki iç ortam gaz kirleticilerin konsantrasyonları ...	47
Şekil 4.4. Doğal havalandırılmalı odadaki iç ortam gaz kirleticilerin konsantrasyonları .....	47
Şekil 4.5. Havalandırmasız odadaki iç ortam gaz kirleticilerin konsantrasyonları .	48
Şekil 4.6. HVAC sistemli odadaki iç ortam gaz kirleticilerin konsantrasyonları (zamana bağlı üretimli) .....	49
Şekil 4.7. Doğal havalandırılmalı odadaki iç ortam gaz kirleticilerin konsantrasyonları (zamana bağlı üretimli) .....	49
Şekil 4.8. Modellenen toplantı odasının şematik gösterimi .....	50
Şekil 4.9. CO <sub>2</sub> &Temp.&RH metre cihazı ile elde edilen ölçümlerin kaydedilmesi .....	52

Şekil 4.10.	Cihaz arayüzü kullanılarak elde edilen sıcaklık ve nem okumaları .....	52
Şekil 4.11.	Cihaz arayüzü kullanılarak elde edilen CO <sub>2</sub> okumaları .....	53
Şekil 4.12.	Cihaz arayüzü kullanılarak elde edilen CO <sub>2</sub> okumalarına ilişkin histogram grafiği .....	53
Şekil 4.13.	Toplantı odasındaki CO <sub>2</sub> gazının zamana bağlı değişimi .....	54
Şekil 4.14.	Modellenen binanın şematik gösterimi .....	55
Şekil 4.15.	Modellenen binanın açık şeması .....	56
Şekil 4.16.	MATLAB ortamında geliştirilmiş programın kullanıcı ara yüzü .....	57
Şekil 4.17.	Modelleme işleminde kullanılan parametreler ve değerleri .....	58
Şekil 4.18.	Havalandırmasız bir binadaki CO <sub>2</sub> değişimi .....	59
Şekil 4.19.	Doğal havalandırmalı bir binadaki CO <sub>2</sub> değişimi .....	59
Şekil 4.20.	Doğal-mekanik havalandırmalı bir binadaki CO <sub>2</sub> değişimi .....	60
Şekil 4.21.	Mekanik havalandırmalı bir binadaki CO <sub>2</sub> değişimi .....	60
Şekil 4.22.	Havalandırmasız bir binadaki CO <sub>2</sub> değişimi .....	61
Şekil 4.23.	Doğal havalandırmalı bir binadaki CO <sub>2</sub> değişimi .....	61
Şekil 4.24.	Doğal-mekanik havalandırmalı bir binadaki CO <sub>2</sub> değişimi .....	62
Şekil 4.25.	Mekanik havalandırmalı bir binadaki CO <sub>2</sub> değişimi .....	62
Şekil 5.1.	Sakarya Üniversitesi Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi binası	64
Şekil 5.2.	Sakarya Üniversitesi Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi konumu (Google, 2017) .....	65
Şekil 5.3.	Dersliklerin şematik gösterimi .....	66
Şekil 5.4.	Modelleme işleminin akış diyagramı .....	67
Şekil 5.5.	Veritabanı bağlantı şeması .....	78
Şekil 5.6.	Derslikler için oluşturulmuş bir simülatör örneği (Yalçın ve ark., 2017) .....	79
Şekil 5.7.	Ölçümlerde kullanılan CO <sub>2</sub> &Temp.&RH metre cihazı .....	80
Şekil 6.1.	1103 nolu derslikteki öğrenci sayısına göre CO <sub>2</sub> üretim miktarı değişimi (g/m <sup>3</sup> ) .....	83
Şekil 6.2.	1101 ve 1102 nolu dersliklerdeki CO <sub>2</sub> dağılımı (ppm) .....	83
Şekil 6.3.	1103 ve 1104 nolu dersliklerdeki CO <sub>2</sub> dağılımı (ppm) .....	84
Şekil 6.4.	1105 ve 1106 nolu dersliklerdeki CO <sub>2</sub> dağılımı (ppm) .....	84

Şekil 6.5.	1107 ve 1108 nolu dersliklerdeki CO <sub>2</sub> dağılımı (ppm) .....	85
Şekil 6.6.	1109 nolu derslikteki ve koridordaki CO <sub>2</sub> dağılımı (ppm) .....	85
Şekil 6.7.	1103 nolu dersliğe ilişkin öğrenci sayısı, kapı ve pencere durumlarına göre CO <sub>2</sub> dağılımı (ppm) .....	87
Şekil 6.8.	1103 nolu derslik için minimum dış ortam havalandırma ihtiyacı V <sub>b</sub> ..	88
Şekil 6.9.	1103 nolu dersliğe ilişkin kişi başına düşen havalandırma oranı Q <sub>0</sub> değişimi .....	89
Şekil 6.10.	1101 nolu dersliğe ilişkin kişi başına düşen havalandırma oranı Q <sub>0</sub> değişimi .....	89
Şekil 6.11.	1103 nolu dersliğe ilişkin CO <sub>2</sub> , sıcaklık ve nem ölçümleri .....	91
Şekil 6.12.	1104 nolu dersliğe ilişkin CO <sub>2</sub> , sıcaklık ve nem ölçümleri .....	91
Şekil 6.13.	1105 nolu dersliğe ilişkin CO <sub>2</sub> , sıcaklık ve nem ölçümleri .....	92
Şekil 6.14.	1103 nolu derslikteki hacimsel hava akış oranı ve öğrenci sayısı değişimine göre tahmin edilen CO <sub>2</sub> konsantrasyonu .....	93
Şekil 6.15.	1104 nolu derslikteki hacimsel hava akış oranı ve öğrenci sayısı değişimine göre tahmin edilen CO <sub>2</sub> konsantrasyonu .....	93
Şekil 6.16.	1105 nolu derslikteki hacimsel hava akış oranı ve öğrenci sayısı değişimine göre tahmin edilen CO <sub>2</sub> konsantrasyonu .....	94

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1.	İç ortam hava kirliliğinin tarihçesi .....	3
Tablo 2.1.	Hava karışımında bulunan gazlar ve miktarları (Seinfeld, 1975; Kırımhan, 2006; Türkeş, 2010) .....	11
Tablo 2.2.	Modelleme yaklaşımlarının avantaj ve dezavantajları (Demokritou, 2016) .....	18
Tablo 3.1.	Temel gaz ölçüm yöntemleri (Liu ve ark., 2012) .....	36
Tablo 4.1.	CO <sub>2</sub> miktarının insan üzerindeki etkisi (Güyağüler ve ark., 2005) .....	39
Tablo 4.2.	CO <sub>2</sub> miktarının insan vücuduna etkisi (Chamberlin ve ark., 1995; Durukan, 2013) .....	39
Tablo 4.3.	Çeşitli aktiviteler için metabolik oranlar ve aktivite seviyeleri (ASHRAE, 2013) .....	40
Tablo 4.4.	Kişi ve alan dış ortam hava oranları ve kişi yoğunluğu (ASHRAE, 2001) .....	42
Tablo 4.5.	Kirleticiler için başlangıç değerleri .....	46
Tablo 4.6.	Toplantı odasında bulunan kişilerin karakteristikleri .....	51
Tablo 5.1.	Derslik ve koridor bilgileri .....	65
Tablo 5.2.	building_table tablosu .....	69
Tablo 5.3.	day_table tablosu .....	70
Tablo 5.4.	condition_table tablosu .....	71
Tablo 5.5.	course_table tablosu .....	71
Tablo 5.6.	airflow_table tablosu .....	72
Tablo 5.7.	schedule_table tablosu .....	73
Tablo 5.8.	result_table tablosu .....	73
Tablo 5.9.	initial_table tablosu .....	75

Tablo 5.10. type_table tablosu .....	75
Tablo 5.11. activity_table tablosu .....	76
Tablo 5.12. source_table tablosu .....	76
Tablo 6.1. Derslikler için maksimum öğrenci sayıları .....	82
Tablo 6.2. 1103 nolu derslik Pazartesi günü ders programı .....	86
Tablo 6.3. Dersliklerde başlangıçta ölçülen CO <sub>2</sub> , sıcaklık ve nem değerleri .....	90



## ÖZET

Anahtar Kelimeler: İç ortam hava kalitesi, karbondioksit, kütle denge modeli, matematiksel modelleme, simülatör

İç ortam hava kirliliği, insanların zamanlarının çoğunu geçirdiği ev, okul, hastane, işyeri gibi kapalı ortamlarda insan nefesi, uçucu organik bileşikler, bakteriler vb. nedenlerle artmakta ve nadiren hissedilmektedir. Sağlıklı ve konforlu bir yaşam ortamı için sıcaklık ve nem kontrolünün yanı sıra kirlenici gazların miktarının ölçülmesine ve ölçülen değerlere göre iç ortam hava iklimlendirmesinin yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Karbondioksit ( $CO_2$ ), havalandırma gereksinimlerini belirlemek ve İç Ortam Hava Kalitesi (İOHK)'ni kontrol etmek için önerilen önemli bir iç ortam hava kirlenicisidir. İç ortam  $CO_2$  konsantrasyonları, kapalı bir ortamda bulunan kişilerin sayısına ve yaptıkları aktivitelerin seviyesine göre doğrusal olarak değişmektedir. Bu çalışmada, kapalı ortamlarda  $CO_2$  değişimlerini ortamın fiziksel özellikleri, ortamdaki insan sayısı, insanların karakteristik özellikleri ve aktivitelerine göre tahmin eden bir matematiksel model geliştirilmiştir. Daha sonra bu model, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi'nde bir toplantı odası için uygulanmış ve ölçüm sonuçları ile doğrulanmıştır.

Çalışmanın ikinci kısmında geliştirilen model, Sakarya Üniversitesi Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi 1. katında bulunan derslikler için uygulanmış ve  $CO_2$  gazı açısından İOHK çeşitli durumlar için analiz edilmiştir. Çalışmada, geliştirilen model yardımıyla dersliklerdeki iç ortam  $CO_2$  konsantrasyonları kişi sayısı, farklı havalandırma ve ortam şartları dikkate alınarak hesaplanmış ve bu hesaplama sonuçları yapılan ölçümler ile doğrulanmıştır. Ölçme çalışmalarının bir diğer çıktısı olarak ise sağlık ve konfor şartları açısından sınıfların çoğunda  $CO_2$  miktarının sağlık sınırlarının üzerinde olduğu gözlenmiştir.

Geliştirilen matematiksel model yeni yapılacak binaların tasarım aşamasında ve mevcut binaların İOHK analizinde kullanılabilir. Model ayrıca, görsel arayüz ile de entegre edilmiş olup, elde edilen sayısal değerler grafik arayüzlerde ile analiz edilebilmektedir.

# **ENVIRONMENTAL MODELING AND SIMULATOR DEVELOPMENT FOR GAS SENSORS AND MEASUREMENT SYSTEMS**

## **SUMMARY**

Keywords: Indoor air quality, carbon dioxide, mass balance model, mathematical modeling, simulator

Indoor air pollution increases due to human breath, volatile organic compounds, bacteria etc. in places such as schools, hospitals and offices where people spend most of their time and is rarely felt. For a healthy and comfortable living environment, besides temperature and humidity control, it is necessary to measure the amount of pollutant gases and to perform indoor air conditioning according to measured values.

Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) is an important indoor air pollutant that is recommended for determining ventilation requirements and for control Indoor Air Quality (IAQ). Indoor CO<sub>2</sub> concentrations vary linearly with the number of people in a closed environment and the level of activity they perform. In this study, a mathematical model has been developed that predicts CO<sub>2</sub> changes in indoor environments according to physical properties of the environment, the number of people, the characteristics and activities of humans in the environment. This model was then applied to a meeting room in Bilecik Şeyh Edebali University and verified by measurement results.

In the second part of the study, the developed model was applied to the naturally ventilated classrooms on the first floor in Faculty Building of Computer and Information Sciences in Sakarya University and IAQ was analyzed for various situations in terms of CO<sub>2</sub> gas. In the study, the indoor CO<sub>2</sub> concentrations were calculated by considering the number of people in the classrooms on different ventilation and indoor conditions. Then, the results were validated by the measurements. As another output of the measurement studies, the amounts of CO<sub>2</sub> in most of the classrooms were observed above the limits in terms of health and comfort conditions.

The developed mathematical model can be used in the design phase of new buildings and IAQ analysis of existing buildings. The model is also integrated with a visual interface, and the resulting numerical values can be analyzed by graphical interfaces.

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

Günümüzde insanlar zamanlarının büyük bir kısmını ev, ofis, hastane, okul gibi kapalı ortamlarda geçirmektedir ve çeşitli gazlar ve partiküller ile kirlenen ortamdaki hava insan sağlığını tehdit etmektedir. Yapılan araştırmalar da insanların günde ortalama 2 saatini dışarıda geçirdiğini göstermektedir, dolayısı ile insanlar en fazla kapalı ortamlarda hava ile etkileşim halindedir. Bu nedenle, iç ortam hava kalitesinin (İOHK) artırılması ile insanların konforunun artması, sağlık problemlerinin azalması sağlanmaktadır.

Kabul edilebilir İOHK'yi sağlamada, iç ortam karbondioksit ( $CO_2$ ) konsantrasyonunun ölçümü ve analizi çok yarar sağlamaktadır. Binalardaki enerji verimliliğini artırmanın yanı sıra sağlık ve konfor şartları açısından temiz iç ortam havası sağlamak için havalandırma tasarım ve kontrol problemleri bu çalışmanın ana motivasyonunu oluşturmaktadır. Sadece oda sıcaklığı ölçülmesi ile klima kontrolü yeterli değildir, çünkü uzun bir süre kapalı ortamda kalan insanlar hava kalitesinin kötüye gittiğini anlamazlar. Benzer şekilde gereksiz havalandırma yaşam giderlerini artırabilir. Enerji giderlerini artırma ve hava kalitesini düşürme ikilemi, hastane, okul ve hükümet binası gibi halka açık yerlerde daha da fazla ciddidir. Modelleme ve benzetim çalışmaları, bina ve sistemleri kurulmadan önce gözden geçirmeye yardımcı olur.

### **1.1. Çalışmanın Amacı, Önemi ve Hedefler**

Bir ortamdaki gaz konsantrasyonunu öğrenmek için gaz kromatografisi veya elektronik gaz sensörleri kullanılabilir. Gaz kromatografisi, karmaşık karışımları ayırabilme ve karışım içerisinde çok küçük miktarda yer alan gaz bileşenlerini tespit edebilme yeteneğine sahiptir. Ancak cihazın kullanımı oldukça

zor ve zahmetlidir. Elektronik gaz sensörleri ile ölçüm daha pratik ve ekonomiktir (Yalçın ve Özmen, 2014b). Elektronik gaz sensör sistemlerinin geliştirilmesi kimya, fizik, elektronik ve bilişimcilerin birlikte çalışmasını gerektiren disiplinler arası bir süreçtir ve bu süreç; tasarım, gerçekleştirme, karakterizasyon ve test gibi kısımlardan oluşmaktadır.

Sensör sistemleri geliştirme süreçlerini hızlandırmak ve/veya ekonomik hale getirmek için ortamların matematiksel olarak modellenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, sensör sistemleri geliştirme süreçlerini hızlandırmak ve/veya ekonomik hale getirmek için; sıcaklık, nem, hava akış şekli ve sınırları belirli iç ortamların matematiksel olarak modellenmesi ve bu modellemeyi temel alan ve gerçeğe yakın yapay ortam verisi üretebilen yazılım temelli bir simülatör geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

Çalışmanın hedefleri:

- Literatürde yer alan İOHK modellerinin incelenmesi
- İOHK değerlendirmesi yapılacak ortamın seçilmesi
- Seçilen ortamın İOHK'nin değerlendirilebilmesi için matematiksel bir model geliştirilmesi
- Farklı ortam değişkenlerine göre modeli test etmek için simülatörün geliştirilmesi
- Geliştirilen modelin gerçek ölçümlerle doğrulanması
- Seçilen ortamın İOHK sorunlarının belirlenmesi

## 1.2. Çalışmanın Kapsamı

Gaz sensörleri ve ölçüm sistemleri için yapılan İOHK modelleme çalışmalarını ve modele dayalı geliştirilen simülatör yazılımını anlatan bu tez çalışması, 7 bölümden oluşmaktadır: Giriş bölümünde tez konusunun genel bir tanımı yapılmış, tez çalışmasının amacı, önemi ve hedefleri açıklanmış ve literatürde konu ile ilgili yapılmış çalışmalara yeri verilmiştir. İOHK kavramı, İOHK'yi etkileyen

parametreler (kaynakları ve sağlık üzerindeki olası etkileri), İOHK modelleri ikinci bölümde detaylı olarak anlatılmış ve üçüncü bölümde ise İOHK ölçüm yöntemleri, ölçümlerde kullanılan cihaz ve sistemler hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde tez kapsamında yapılmış tek ve çok bölmeli modelleme, benzetim ve ölçüm çalışmaları detaylı bir şekilde verilmiştir. Beşinci bölümde, İOHK değerlendirmesi için yapılan pilot uygulama ve modelleme ve benzetim çalışmalarında kullanılacak girdive çıktıları tutacak veritabanı yapısı anlatılmıştır. Altıncı bölümde ise günlük ve haftalık benzetim tahmin sonuçları verilmiş, doğrulama için yapılan ölçümler hakkında bilgi verilmiş ve ölçüm sonuçları sunulmuştur. Son bölümde ise tez çalışması sonuçları özetlenmiş ve değerlendirme yapılmıştır.

### 1.3. Literatür Araştırması

İç ortam hava kalitesi (İOHK) kavramı, 70'li yıllarda özellikle İskandinav ülkelerinde çıkan petrol krizi sonrası, enerji kısıtlamasının uygulandığı dönemde gündeme gelmiştir. Ancak iç ortam hava kirliliğinin tespiti ve önlenmesine yönelik çalışmalar bilindiğinin aksine çok uzun bir geçmişe sahiptir. İç ortam hava kirliliğine yönelik gelişmeler Tablo 1.1.'de özetlenmiştir (Brooks ve Davis, 1991; Vaizoğlu ve ark., 2000; Parab, 2001; Ellis, 2010; Readygo, 2016; Bulgurcu, 2017).

Tablo 1.1. İç ortam hava kirliliğinin tarihçesi

Zaman Dilimi	Neden	Sonuçlar
Taş Devri	Mağaralarda ateşin yakılması	Dumanın dağılması sağlanmış.
Antik Mısır	Basit taş aletlerin yapılmaya başlanması	Açık havada çalışan taşçıların, kapalı ortamlarda çalışanlardan daha sağlıklı oldukları gözlenmiş.
1 yy	Asbestin zararlı etkileri	Pliny The Elder, taş ocakları ve asbest madencileri için maske kullanma tavsiyesinde bulundu.
Orta Çağ	Havanın düşük katlı binalarda olduğu gibi yüksek katedrallerde daha iyi olduğunun fark edilmesi	Yüksek binaların temiz hava depolanan bir tür rezerve olduğu ve kişi başına daha çok hava düştüğü görülmüş.

Tablo 1.1. (Devamı)

Zaman Dilimi	Neden	Sonuçlar
11 yy	İbn-i Haldun'un, hava kirliliğinin hastalıklara sebebiyet vereceğine işaret etmesi	Şehirlerin kurulurken dikkat edilmesi gereken hususlar belirlendi.
1777	Modern kimyanın kurucusu Antoine Laurent de Lavoisier'in soluma üzerine çalışması	Solunumun oksijen alıp CO <sub>2</sub> vermeye bağlı olduğunu ve hava kalitesi üzerindeki etkisinin birçok insanın bulunduğu odalarda çabucak fark edilebileceği görüldü.
1853, Kırım Savaşı sırası	Yaralılarla dolup taşan İstanbul'daki hastanelerde, yaralıların iyileşmesinin uzun sürmesi	Yetersiz havalandırma nedeniyle mikropların uygun yayılma ortamı bulunduğunun anlaşılması
1862	Max Josef von Pettenkofer, Lavoisier'in CO <sub>2</sub> teorisine bir iyileştirme önermesi	Pettenkofer ve bazı arkadaşları, havalandırılan bir oda için CO <sub>2</sub> limitini 1000 ppm olarak önerdi.
1870 ler	Florence Nightingale'in, hasta sonuçları ile havalandırma arasındaki bağlantıyı bulması	Mimarlar tarafından hacimsel hava ilkelerine dayalı yapılar tasarlanmaya başlandı.
1936	Yaglou'nun vücut kokusunu azaltmaya çalışması	Binaların içi için minimum havalandırma oranını önerdi.
1970 ler, İskandinav Ülkeleri	Petrol krizi	Enerji tasarrufuna gidilmiş, pencereler devamlı kapalı tutulmuş, hasta bina sendromu kavramı ortaya çıkmıştır.
1989	İç ortam hava kirliliği için kriterlerin belirlenmesine duyulan ihtiyaç	ASHRAE 62 nolu standardı yayınladı.

İOHK izleme sistemleri geliştirme süreçlerini hızlandırmak ve/veya ekonomik hale getirmek için ortamların matematiksel olarak modellenmesi gerekmektedir. Kişisel bilgisayarların yaygınlaşması ile de İOHK'yi belirlemek, kirleticilerin yüzeyler üzerindeki etkisini anlamak ve dağılımını incelemek amacıyla birçok matematiksel model geliştirilmiştir (Nazaroff, 1989; Nazaroff ve Cass, 1989; Hayes, 1989; Hayes, 1991; Blades, 2007; Carslaw, 2007; Yiğit ve ark., 2013).

Nazaroff (1989) doktora tezinde, iç ortam havasında kimyasal olarak reaktif bileşiklerin konsantrasyonunu tahmin etmede genel bir matematiksel bir model sunmuştur. Model; havalandırma, kimyasal reaksiyon ve direkt emisyon ile ilgili üretim oranları ile havalandırma, kimyasal reaksiyon, filtreleme bozunum oranlarını hesaplamaktadır. Model,  $\text{HNO}_2$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NO}_3$  ve  $\text{N}_2\text{O}_5$  içeren kimyasal reaksiyon sebebiyle birkaç türün önemli üretimini öngörmektedir.

Nazaroff ve Cass'in 1989 yılında yaptıkları çalışmada, iç ortam aerosolları modellenmiştir. Aerosol boyut dağılımı ve kimyasal bileşimi simüle edilmiştir. Çok odalı bir bina gösterimi kullanılarak, havalandırma, filtreleme, yüzeylerde birikim, pıhtılaşma ve direkt emisyon etkileri hesaplanmıştır. Düşük hava değişim oranına sahip bir odada bir sigaranın yanması ile ölçülmüş aerosol boyut dağılımının zamanla değişimi, model tahminleri ile karşılaştırılmıştır. Model, deneysel sonuçların üretilmesinde makul bir şekilde başarılı olduğunu göstermiştir. Sunulan model, özellikle kirlilik oranını azaltmak için tasarlanmış denetim ölçütlerinin etkisini tahmin etmede kullanışlıdır.

Hayes, 1989 yılındaki çalışmasında farklı iç ve dış ortamlar arasında hareket eden popülasyon grupları nedeniyle gün içerisindeki kirliliğe maruz kalışı kestirmek için kişisel hava kalite modeli geliştirmiştir. Burada geliştirilen modelleme tekniği, 1) dış ortam kirlilik seviyesini, 2) iç ortam doğasını ve 3) günlük popülasyon aktivite örneklerini hesaba katmaktadır. 1991 yılındaki çalışmasında ise mikro çevre tipine (ev, ofis ve araç) ve yapısına (pencere açık, pencere kapalı, izole edilmiş, havalandırılmı) göre iç ortam ozon seviyesini kestirmek için bir İOHK modeli kullanmıştır. Modelin çok bölmeli versiyonunun formülasyonu, bu çalışmada bildirilen analizler için kullanılan tek bölmeli versiyonu ile açıklanmış ve bina yapılandırmasındaki farklılıkların, iç/dış ortam oranını güçlü bir şekilde etkilediği ifade edilmiştir.

Blades (2007) çalışmasında, iç ortamdaki koleksiyonların kirletici etkisini öngörmek amacıyla mimar, mühendis ve müze müdürü gibi uzman olmayan kişiler için Weschler kütle denge denkleminde dayalı bir Java applet uygulaması tanımlanmıştır.

Weschler kütle denge denklemi, hava kirleticileri ile koleksiyonlar arasındaki ilişkiyi anlama açısından kullanışlıdır. Weschler denklemi, Denklem 1.1'deki iç ve dış kirletici oranını ( $C_{iç}/C_{dış}$ ) doğrudan bina parametreleri ( $\lambda$  hava değişim oranı,  $V$  iç hacim ve  $A$  materyallerin iç yüzey alanı) ile ilişkilendirir. Birikim hızı ( $v_d$ ) teriminde ifade edilen hava kirleticileri ile ilgili reaksiyon için çekim kuvveti:

$$\frac{C_{iç}}{C_{dış}} = \frac{\lambda}{\lambda + v_d A / V} \quad (1.1)$$

Carslaw, 2007 yılında yaptığı çalışmada Birleşik Krallık'ta tipik bir kent evindeki iç hava kimyasını araştırmak için detaylandırılmış yeni bir kimyasal kutu modeli (Carslaw, 2007) çıkarmıştır. Modelde, kirletici reaksiyon oranları, yüzeylerdeki birikim oranları ve bina filtreleme faktörü dikkate alınmıştır. Bu çalışma için kullanılan kutu modeli, iyi karışmış tek bir ortam varsaymaktadır.

Isıtma, havalandırma ve iklimlendirme (HVAC - Heating Ventilating and Air Conditioning) sistemlerinin uygun şekilde modellenmesi ve bu modellerin iyileştirilmesi, tasarım maliyetlerinin düşmesi ve tasarım süreçlerinin kısılması gibi önemli avantajlar sağlamaktadır. Yiğit ve ark. (2013)'nın değişken hava debili bir HVAC sisteminin modellenmesi, bulanık mantık ve aç-kapa denetimine yönelik yaptıkları çalışmada sistemdeki iç hava kalitesi değişiminin sistemin enerji sarfiyatına etkisini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar, bulanık mantık ile yapılan denetimin aç-kapa denetime göre enerji tasarrufu ve konfor koşullarının sağlanması açısından belirgin bir üstünlüğü olduğunu göstermiştir.

Modelleme yardımı ile kapalı ortamda bulunan kirleticilerin konsantrasyonları zamana bağlı olarak tahmin edilebilmekte ve böylece kabul edilebilir İOHK için gereken standartları sağlayıp sağlamadığı kontrol edilebilmektedir. Ancak son yıllarda hava kalitesi modellemede dikkate değer bir gelişme olsa da bazı zorlukları hala bulunmaktadır. Mevcut modelleme araçlarının geliştirilmesi ve doğrulanması, tam potansiyelini başarmak için gereklidir (Morawska ve Congrong, 2003; Yalçın ve Özmen, 2014b).

Okul binalarındaki İOHK'yi analiz etmek için birçok çalışma yapılmıştır (Chaloulakoua ve Mavroidis, 2002; Santamouris ve ark., 2008; Clements-Croome ve ark., 2008; Bakó-Biró ve ark., 2011; Ellis, 2010; Vilcekova ve ark., 2017). Bu çalışmalarda, okulların yetersiz havalandırma ve kabul edilemez İOHK'ye sahip olduğu belirtilmiştir.

Atina'daki bir okuldaki İOHK'yi değerlendirmek için, Chaloulakoua ve Mavroidis (2002), Hayes (1989, 1991) tarafından geliştirilen modeli kullanarak karbon monoksit (CO) gazının iç ve dış ortam konsantrasyonlarını karşılaştırmışlardır. En yüksek CO konsantrasyonlarını sabah saatleri için ölçmüşler, modelin ani dış ortam konsantrasyon değişimleri haricinde memnun edici sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Mendel ve Heath (2005), kötü İOHK'nin öğrencilerin akademik performansını etkilediğini ve bu nedenle dersliklerdeki İOHK konusunun dikkate alınması gerektiğini belirtmiştir (Ellis, 2010).

Santamouris ve arkadaşları (2008), Atina'da doğal havalandırılmalı okullarda hava akışı ve iç ortam CO<sub>2</sub> konsantrasyonlarını izlemenin yanı sıra spesifik havalandırma öğelerini de öğretim öncesinde, sırasında ve sonrasında detaylı incelemişlerdir. Sınıfların yaklaşık %52'sinde ortalama bir CO<sub>2</sub> konsantrasyonunun 1000 ppm'den yüksek olduğu bildirilmiş ve pencere açık olduğunda CO<sub>2</sub> konsantrasyonu ile birlikte iç ortam - dış ortam sıcaklıklarının etkisi de detaylı incelenmiştir.

Bako-Biro ve arkadaşları (2012), havalandırmanın öğrenciler üzerindeki etkisini araştırmak için İngiltere'de 8 ilkokulda CO<sub>2</sub> konsantrasyonu ve diğer parametreleri gözlemlemişlerdir. Gözlemler sonucunda, sınıflarda CO<sub>2</sub> konsantrasyonunun önerilen 5000 ppm üzerinde olduğu ve öğrenci ve öğretmenlerin genellikle hava kalitesinin kötü olduğu koşullara maruz kaldığı belirtilmiştir.

Vilcekova ve arkadaşları (2017), Kosova'da öğrenme zorluğu ve dikkat eksikliği / hiperaktivite bozukluğu tanısı konmuş öğrencilerin okuduğu bir okulda İOHK'yi araştırmak için yaptıkları ölçümler sonucunda dersliklerde çok büyük partikül ve

CO<sub>2</sub> konsantrasyonları, düşük düzeyde aydınlık (görsel rahatsızlık) ve yüksek ses (akustik rahatsızlık) gibi sorunlarla karşılaşmışlar, öğrenciler ve personel arasında bazı hasta bina sendromu semptomları gözlemlemişlerdir.

İnsanların yoğun olarak buldukları yerlerde, en önemli kirletici kaynağı insan metabolik üretimidir. İnsanlar tarafından üretilen CO<sub>2</sub> gazı; literatürdeki birçok çalışmada İOHK'nin yeterli bir göstergesi olarak dikkate alınmıştır (Lu ve ark., 2011; Sun ve ark., 2011; Ng ve ark., 2011; Nassif, 2012; Bakó-Biró ve ark., 2011; Rackes ve Waring, 2013). Ayrıca CO<sub>2</sub> gazı, insan vücut kokusu ve popülasyon yoğunluğu açısından bir iç ortamın kabul edilebilirliğini göstermede kullanılmaktadır (Persily, 1997).

Ortamdaki kişilerin kirletici miktarına dolayısıyla İOHK'ye etkisi üzerine yapılan çalışmalar (Hayes, 1989; Persily, 1997; Sarbu ve Sebarchievici, 2013), aynı zamanda kişiler tarafından üretilen CO<sub>2</sub> gazının havalandırma sistemlerinin kontrolünde kullanılabileceğini de göstermiştir (Nassif, 2011).

Nassif çalışmasında (2011), CO<sub>2</sub> tabanlı talep kontrollü havalandırma sistemindeki zorlukları ele almış ve besleme havası CO<sub>2</sub> konsantrasyonuna dayalı alternatif bir strateji amaçlamıştır. Bu strateji, her bir bölgedeki gerçek kişi sayısını kestirmek zor olmasına rağmen bölgedeki kişi düzenlemesine bağlı olarak besleme CO<sub>2</sub> konsantrasyonunu belirlemektedir. Amaçlanan strateji, daha iyi iç ortam hava kontrolü açısından büyük yararlar önermekte, enerji etkinliğini artırmakta ve çok bölmeli HVAC sistemleri için kolayca gerçekleştirilmektedir.

Jian ve arkadaşları (2011) pencere ve kapı açık/kapalı olma durumlarına göre alan ölçümleri yapmış ve kişi davranışı açısından en iyi tahmin unsuru olarak CO<sub>2</sub> gazını önermiştir. Pencere açma davranışının İOHK'yi açıklamada ortamdaki kişilerin gereksinimlerini anlamayı sağlayacağını önermiştir.

Özdamar ve Umaroğulları (2017) çalışmalarında, ısı konfor ve iç hava kalitesini araştırmak için Edirne'deki bir ofis binasında ölçümler yapmışlardır. Ölçümler

sonucunda, ofis birimlerinin güneşlenme yönünün havalandırma türü, mobilyalar, çalışan sayısı, ofis alanı ve kabuğu kadar iç hava kalitesi üzerinde etkisi olmadığını göstermişlerdir.

Son yıllarda yurtdışında İOHK'yi belirlemek için bir dizi benzetim programı (COMIS, CONTAM, COwZ, INPOLL) geliştirilmiştir. Dinamik yöntemler kullanan bu programların kullanımı ve elde edilen sonuçların yorumlanması uzmanlık gerektirmektedir. Ayrıca çok sayıda veri girişine ihtiyaç duymakta ve zaman almaktadır. Daha basit benzetim programları ise birçok varsayım üzerine kurulmuştur, dinamik simülasyon programlarına göre daha hızlıdır ve daha az veri girişi gerektirmektedir. Ancak bu programlar, sonuçlarda önemli ölçüde belirsizliğe ve İOHK'nin belirlenmesinde sapmalara neden olmaktadır. Bu durumlar, İOHK yazılımlarının doğrulanmasını ön plana çıkarmaktadır. Ülkemizde İOHK'ye yönelik çalışmalar ise modelleme ve simülasyon geliştirilmesinden ziyade daha çok gaz ve partikül ölçümlerine dayanmaktadır (Bulut, 2007; Kuş ve ark., 2008; Onat vd, 2011; Onat, 2015).

Güllü, 2013 yılında yaptığı çalışmada, Türkiye'deki İOHK ile ilgili yayınları değerlendirerek, İOHK'nin hali hazırdaki durumu ve iyileştirilmesi için yapılması gerekenler ile ilgili eldeki bilimsel kanıtları ortaya konmuş, ilave çalışma yapılması gerekli alanları tespit etmeye çalışmıştır. Değerlendirmesine göre, 1945-2013 yılları arasında İOHK ile ilgili ülkemizde SCI indeksli dergilerde yayınlanmış makalelerin büyük bir kısmı son 10 yılda yapılmıştır ve toplam sayısı 125'tir. İOHK'ye yönelik çalışmaların sayısı ülkemizde de dünyadaki literatüre paralel olarak her geçen yıl artmaktadır (Güllü, 2013).

Ülkemizde bu konularda çoğunlukla çevre ve makine mühendisliği bölümlerinde çalışmalar yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmalarda genelde açık ortamlardaki hava kirliliği analiz edilmiştir. Belirli gazların ofislerde, kalabalık şehirlerde ve endüstriyel bölgelerdeki etkisi üzerine çalışmalar yapıldığı görülmüştür.

## **BÖLÜM 2. İÇ ORTAM HAVA KALİTESİ**

İç ortam hava kalitesi (İOHK), kapalı bir ortamda bulunan kişilerin performansını, sağlığını ve konforunu etkileyen ısıl şartlar ve kirleticilerin konsantrasyonu ile temsil edilen bina içindeki havanın kalitesini ifade etmektedir. İOHK açısından ısıl konfor, ortamın sıcaklığı, nemi ve hava hızı ile ilişkilidir. EN ISO 7730'e göre ortam sıcaklığının 20-26 °C ve nemin %30-70 arasında olması gerekmektedir. Erkekler sıcaklığın 20-24 °C, bayanlar ise 23-26 °C arasında olmasını tercih etmektedirler (Olesen, 2000). ASHRAE 55 standardına (ASHRAE, 2014) göre hava hızı 0,2 m/s'nin altında olmalıdır. İOHK'yi belirlemede, ortamda bulunan insanların havayı kirletme durumlarını (aktivitelerini) ve ortamın kullanım amacını göz önünde bulundurmak da gerekir.

### **2.1. İç Ortam Hava Kalitesini Etkileyen Parametreler**

CO<sub>2</sub>, ozon (O<sub>3</sub>), uçucu organik bileşikler (VOCs – Volatile Organic Compounds), su buharı, formaldehit gibi kirleticiler ve dış ortamdaki kaynaklanan kirleticilerin yanı sıra radon ve elektromanyetik radyasyon, mantar, virüs, bakteri, asbest gibi iç ortamlarda bulunabilen kirleticiler İOHK'yi etkilemektedir. Bina içerisinde bulunan eşyalar, binaların yapımında kullanılan malzemeler kirletici miktarlarını artırmaktadır. Ayrıca sigara içmek, temizlik yapmak ve yemek pişirmek gibi insanların yaptığı aktiviteler ile partiküller ve bazı kimyasal maddeler iç ortam havasına karışmaktadır (Ağca, 2015).

#### **2.1.1. Dış ortam**

Dış ortam havası, çeşitli gazların karışımından oluşmaktadır. Karışım içerisindeki gazların bir kısmının miktarı çoğunlukla sabitken, bir kısmının miktarı çevre koşullarına göre değişmektedir. Bu nedenle, hava karışımında yer alan gazlar Tablo

2.1.'den de görüleceği üzere miktarları değişen ve değişmeyen gazlar olarak iki sınıfta incelenmektedir (Kırımhan, 2006). Hava olaylarındaki rolü küçük veya önemsiz olan Azot ( $N_2$ ) ve Oksijen ( $O_2$ ) gazlarının hava karışımındaki payları sırası ile %78,08 ve %20,95'tir. Miktar bakımından üçüncü sırada yer alan Argon (Ar) %1 civarındadır ve önemli bir sera gazı olan  $CO_2$  ise %0,038 oranla dördüncü sırada yer almaktadır (Türkeş, 2010).

Tablo 2.1. Hava karışımında bulunan gazlar ve miktarları (Seinfeld, 1975; Kırımhan, 2006; Türkeş, 2010)

Gazlar	Kimyasal Sembol	Molekül Ağırlığı (g/mol)	Hacim (%)	ppm	
Değişmeyen Gazlar	Azot	$N_2$	28	78,084	780,840
	Oksijen	$O_2$	32	20,946	209,460
	Argon	Ar	39,95	0,934	9,340
	Neon	Ne	20		18,2
	Helyum	He	4,0026		5,24
	Kripton	Kr	83,80		1,14
	Hidrojen	$H_2$	2,016	0,00005	0,5
	Diazotmonoksit	$N_2O$	44		0,5
	Xenon	Xe	131,293		0,09
Değişen Gazlar	Su Buharı	$H_2O$	18	0,7	7000
	Karbondioksit	$CO_2$	44	0,038	380
	Metan	$CH_4$	16,042		1,5
	Karbon monoksit	CO	28,01		0,1
	Ozon	$O_3$	48		0,02
	Amonyak	$NH_3$	17,03		0,01
	Azot Dioksit	$NO_2$	46,01		0,001
	Kükürt Dioksit	$SO_2$	64		0,0002
Hidrojen Sülfür	$H_2S$	34,08		0,0002	

Doğal olaylar ve insan faaliyetleri, miktarı değişen gazların bir kısmını etkilemektedir. İnsan faaliyetleri sonucu çevreye yayılan gazların büyük bir kısmı kirletici niteliktedir. Bunlar, CO, kükürt dioksit ( $SO_2$ ), azot oksitler ( $NO_x$ ) ve hidrojen sülfür ( $H_2S$ ) gibi gazlardır. Metan ( $CH_4$ ) ve amonyak ( $NH_3$ ) gazları ise daha çok doğal olaylar ile çevreye yayılmaktadır (Kırımhan, 2006).  $SO_2$ , azot dioksit

(NO<sub>2</sub>), CO, kurşun gibi bazı iç ortam kirleticilerinin temel kaynağı dış ortamdır. Bunların yanında dış ortam hava kalitesini etkileyen CO<sub>2</sub>, su buharı, O<sub>3</sub>, formaldehit, VOC'ler gibi etmenler iç ortam havasını da etkilemektedir (Vaizoğlu ve ark., 2000).

Dış ortam havası, iç ortam havası ile infiltrasyon (içeri sızma), doğal havalandırma ve havalandırma sistemleri vasıtası ile karışmaktadır. İnfiltrasyon; kapı, pencere, çerçeve ve baca gibi boşluklardan havanın sızması demektir. Doğal havalandırmada, pencere ve kapıların açılıp kapanması ile gerçekleşir. Havalandırma sistemi ise, ortamdaki havayı dışarı atan, iç ortama hava sağlayan fanların kullanıldığı sistemlerdir. Toz, duman, gaz ve buhar gibi hava kirleticilerin ortama yayılmasının önüne geçmek ve yol açabilecekleri sorunları engellemek için doğal veya mekanik havalandırma yöntemlerinin kullanılması gereklidir (Yılmaz, 2009).

### **2.1.2. İç ortam hava kirleticileri**

İç ortamlarda çok sayıda hava kirleticisi bulunmaktadır ve tipleri - ortamdaki miktarları, binanın konumuna, binadan binaya hatta aynı bina içindeki odadan odaya (Ağca, 2015) ve ortamda gerçekleşen etkinliklere bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir (Ellis, 2010).

Karbon dioksit (CO<sub>2</sub>): İnsan etkinliklerinden doğrudan etkilenen ve en önemli kaynağı canlıların solunum havası olan CO<sub>2</sub>, renksiz, kokusuz ve yanıcı olmayan bir gazdır. Molekül ağırlığı, 44,01 g/mol ve yoğunluğu, 1,977 kg/m<sup>3</sup>'tür (Durşen ve Yasun, 2012). Kaynakları; biokütle ve kömür, doğalgaz, petrol gibi fosil yakıtların yakılması, bitki solunumu, çimento üretimi ve insan nefes alışverişidir (Türkeş, 2010).

CO<sub>2</sub>'in iç ortam havasındaki miktarı 1000 ppm (1938 mg/m<sup>3</sup>) ve altında ise iç ortam havası normal kabul edilmektedir (ASHRAE, 2001; Açıkgöz ve ark., 2013). Dış ortam havasındaki miktarı ise 350 (678 mg/m<sup>3</sup>) ve 400 ppm (775 mg/m<sup>3</sup>) arasında değişmektedir. CO<sub>2</sub>, zehirli bir gaz olmamasına rağmen oksijensizlikten boğulma tehlikesi ortaya çıkarabilir (Bulut, 2012).

Karbon monoksit (CO): renksiz, kokusuz ve havanın ortalama mol ağırlığına yakın bir gazdır. Hava karışımındaki miktarı %0,1'e ulaştığında 30 dakika içerisinde öldürücü etkiye sahiptir. Hem kaynak noktasında etrafa iyi dağılmaması hem de renksiz ve kokusuz olması sebebiyle ortamdaki varlığı hissedilemez. Hava içerisinde 10 ppm (12,3 mg/m<sup>3</sup>) gibi az miktarlarda bulunuşunda bile insan sağlığını olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Kırımhan, 2006).

Ozon (O<sub>3</sub>): Keskin kokulu, solunumu tehlikeli, mavi renkli bir gazdır. Aynı zamanda oksijenin kimyasal bir bileşenidir. Havanın karışımında 0,02 ppm (0,0423 mg/m<sup>3</sup>) dolaylarında bulunan bu gaz, zararlı olmamasına rağmen karışım içerisindeki miktarı arttıkça zararlı olur (Kırımhan, 2006). O<sub>3</sub> gazı 0,1 ppm üzerinde olduğunda baş ağrısı, solunum problemleri, göz enfeksiyonları, astım krizleri meydana gelebilir (Sandalcı, 2016). Lazer yazıcılar, fotokopi makineleri, spreyler başlıca iç ortam ozon kaynaklarıdır (Altın, 2015).

Metan (CH<sub>4</sub>): Renksiz, kokusuz ve tatsız bir gazdır. Doğal gazın en önemli bileşenidir, havadan hafiftir, patlayıcı özelliindedir. Oda sıcaklığında alt patlama limiti %5 ve üst patlama limiti %15'tir (NJHealth, 2011). Yüksek konsantrasyonlarda boğucu etki yapabilir. Kaynakları; doğalgaz ve kömür işletmeciliği, fosil yakıt üretimi, çiftlik hayvanları, çeltik tarlaları, hayvansal ve evsel atıklardır (Türkeş, 2010).

Uçucu organik bileşikler (VOCs): Hemen hemen her ortamda bulunan VOC'lerin kaynakları; sigara dumanı, mobilyalar, fotokopi makineleri, yazıcılar, vernik ve boya gibi bina malzemeleri, kozmetik ve temizlik ürünleridir. İç ortamda en çok gözlenen bileşikler; benzen, toluen, etilbenzen ve ksilenlerdir. Benzenin iç ortamda yüksek seviyelerde bulunması, insan üzerinde kanserojen etkilere neden olmaktadır (Menteşe ve Güllü, 2009). Birçok VOC, iç ortamda dış ortamdakinden 10 kat daha yüksek seviyede bulunabilir (EPA, 2016). Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı (Environmental Protection Agency, EPA) tarafından önerilen iç ortam eşik değeri 3 ppm'dir (Yurtseven, 2007).

Azot dioksit (NO<sub>2</sub>): NO molekülünün havadaki O<sub>2</sub> gazı ile tepkimesinden oluşan NO<sub>2</sub>, toksik özelliindedir. Motorlu araçlar ve fosil yakıtlar en önemli kaynaklarıdır. Dünya Sağlık Örgütü (World Health Organization, WHO) tarafından 24 saatlik ortalama birikim temel alınarak Türkiye için belirlenen NO<sub>2</sub> eşik değeri, 300 µg/m<sup>3</sup> tür (Öztürk, 2010).

Kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>): Renksiz, havadan 2,2 kat ağır (molekül ağırlığı 64) ve keskin kokulu bir gazdır. Temiz bir hava içerisindeki miktarı 0,002 – 0,01 ppm (0,006 – 0,028 mg/m<sup>3</sup>)'dir (Kırımhan, 2006). Kömür yanması, odun ve bitki artıkları kükürt kaynaklarıdır. SO<sub>2</sub> zehirli bir gazdır ve ortamda yüksek miktarda bulunması ölümlere yola açabilir. WHO tarafından belirlenen SO<sub>2</sub> limit değeri, 500 µg/m<sup>3</sup>/10 dakikadır. SO<sub>2</sub> solunması ile bronşit ve diğer akciğer hastalıkları belirtileri ortaya çıkar, uzun süre SO<sub>2</sub>'ye maruz kalınması ile solunum hastalıklarının görülmesinde artışlar gözlenir (Türkeş, 2010).

Kurşun: Özel bir tadı ve kokusu olmayan mavimsi gri renkte toksik bir elementtir. Egzoz gazlarının iç ortama girmesi, duvarların kurşun bazlı boya ile boyanması, kurşunlu maddeler ile kaynak yapılması iç ortamın kurşun miktarını artmaktadır. İçme suyu, besinler, tozlar ve sigara dumanı aracılığı ile insan vücuduna girebilen kurşun, başta merkezi sinir sistemi olmak üzere vücuttaki tüm sistemleri etkilemektedir. Baş ağrısına, bağışıklık sisteminde ve böbreklerde hasara, kansızlığa, erken doğuma, parmaklarda ve el ve ayak bileklerinde zayıflamaya neden olmaktadır (Okuyan ve Şahin, 2001; Yurtseven, 2007).

Partikül madde (PM – Particulate Matter): EPA tarafından çok küçük partiküllerin ve sıvı damlacıkların karmaşık bir karışımı olarak tanımlanmıştır. Partikül kirliliği ise sülfat ve nitrat gibi asitler, organik kimyasallar, metaller, toprak ya da toz partikülleri dahil olmak üzere bir dizi bileşenden oluşmaktadır. 10 µm'den küçük partiküllü maddeler (PM<sub>10</sub>), akciğerlerin derinlerine yerleşebilmekte ve ciddi sağlık problemlerine neden olabilmektedir (Wang, 2012). İç ortam partikül konsantrasyonu, sigara dumanı, yanıcı madde, mobilya ve iç ortam aktivitelerinden (yemek pişirme, resim yapma, yürüme gibi) etkilenmektedir (Tran ve ark., 2010).

Radon: Tek başına insan duyuları tarafından tespit edilemeyen radon gazı; toprak, kayada yer alan uranyum gibi radyoaktif elementlerin doğal parçalanmasından meydana gelir. Daha sonra havaya, yer altı ve yüzey sularına karışır. Radon gazının atmosferdeki, nehir ve göllerden elde edilen içme sularındaki varlığı, sağlığımızı tehdit etmeyecek kadar düşük seviyededir ancak iç ortamlarda ve yer altı kaynaklarından elde edilen sularda daha yüksek seviyelerde olabilmektedir. Radon, bina içerisine duvarlardaki, zeminlerdeki, temeldeki çatlak ve boşluklardan girebilir. Solunum yoluyla vücuda girerek akciğer kanserine neden olabilir (ATSDR, 2012; ACS, 2015). Diğer radon kaynakları ise inşaat malzemeleri ve sigara dumanıdır (Ellis, 2010).

Asbest: Binalarda yapı ve yalıtım malzemesi olarak kullanılan asbest, çeşitli akciğer hastalıklarına ve göğüs, mide ve sindirim sistemi kanserlerine neden olmaktadır (Ağca, 2015).

Formaldehit: Renksiz, keskin kokulu, zehirli bir gazdır. Yalıtım malzemeleri, mobilyalar, koku gidericiler, temizlik ürünleri, sigara dumanı kaynaklarıdır. Solunum, sindirim ve sinir sistemi üzerinde birçok zararlı etkisi bulunmaktadır (Ünsaldı ve Çiftçi, 2010).  $0,36 \text{ mg/m}^3$  (4 saatlik)'ün üzerinde olduğunda gözlerde tahrişe neden olur. WHO tarafından önerilen iç ortam limiti ise  $0,1 \text{ mg/m}^3$  (ortalama 30 dk)'tür (WHO, 2010).

Biyolojik maddeler: Polenler, böcekler, parazitler, bakteri ve virüsler örnek olarak verilebilir. Gözlerde, burun ve boğazda tahrişe, astım, grip, yüksek ateş ve bulaşıcı hastalıklara neden olabilir.

Küfler: Isı yalıtımdaki kusurlar, çatı ve yüzeylerdeki çatlaklar, havalandırma ve halılardaki rutubet, yetersiz nem kontrolü küflere neden olmaktadır. Küfler, alerji, yorgunluk, baş ağrısı, soluma güçlüğü gibi sağlık problemlerine yol açabilir.

### **2.1.3. İç ortamın fiziksel durumu**

Tasarım ve inşaat kusurları, iç ortam hava kirliliğine katkıda bulunabilir. Zayıf temeller, çatılar, pencere ve kapı açıklıkları kirletici veya su girmesine izin verebilir. Rahatsız edici ısı yalıtımı ile ıslak veya nemli yüzeyler iç ortam hava kirliliğine neden olabilir. Birden fazla daireden oluşan binalarda, bir dairenin emisyonları başka bir daireyi olumsuz etkileyebilir.

Binanın bulunduğu yer de iç ortam kirletici miktarını etkileyebilir. Karayolları, yoğun yollar veya fabrikalar, yakındaki binalar için partikül ve diğer kirletici kaynakları olabilir. (OSHA, 2011).

### **2.1.4. İç ortam kaynakları**

Halılar, ahşap ürünlerden yapılmış dolaplar veya mobilyalar, iç ortama kirletici salabilir. Binayı kullanan kişiler, yaptıkları aktiviteler (temizlik yapma, sigara içme, ısıtıcı çalıştırma, badana yapma gibi) ve kullandıkları malzemeler de kirletici (temizlik ürünleri, kişisel bakım ürünleri gibi) kaynağı olabilir.

### **2.1.5. Havalandırma sistemleri**

Mutfak, laboratuvarlar, fotokopi odaları, güzellik ve bakım salonları, garajlar, tuvaletler, kirli çamaşır odaları ve diğer özelleştirilmiş odalar, yeterli egzoz havalandırması yapılmazsa bir kirletici kaynağı olabilir.

HVAC sistemi herhangi bir nedenle düzgün çalışmadığında, bina genellikle negatif basınç altına alınır. Böyle durumlarda partiküller, araç egzozu, nemli hava gibi dış ortam kirleticileri iç ortama girebilir. Binalar yeniden projelendirildiğine ya da yenilendiğinde, havalandırma sistemi ve pencere – kapı sayısı/boyutu güncellenmediğinde binanın sıcaklık, nem ve hava akışı değişebilir (OSHA, 2011).

## 2.2. Hava Kalitesi Modelleme

Hava kalitesi modelleme, çoğu hava kirlilik çalışmaları için gerekli temel bir araçtır. Modeller, fiziksel ve matematiksel modeller olmak üzere iki kısma ayrılabilir:

- Fiziksel modeller; küçük ölçeklidir, rüzgar tüneli, su tankı gibi olayların laboratuvar gösterimleri için kullanılır.
- Matematiksel modeller; problemin fiziksel ve kimyasal bakış açısını açıklamak için analitik/sayısal algoritmalar kümesidir.

Hava kalitesi modelleri,

- Emisyon kontrol yasalarını kurmak; örneğin, sabit hava kalitesi standartlarını karşılayacak maksimum kabul edilebilir emisyon oranları
- Önerilen emisyon kontrol tekniklerini ve stratejileri değerlendirmek; örneğin, ileri kontrol etkilerini değerlendirmek
- Çevresel etkilerini minimize etmek amacıyla ileri kirlenici kaynaklarının konumlarını seçmek
- Hava kirlilik olaylarının kontrolünü planlamak; örneğin, belirli bir bölgedeki ciddi hava kirlilik olaylarını önlemek için acil müdahale stratejilerini tanımlamak (örneğin, uyarı sistemleri ve gerçek zamanlı kısa süreli emisyon azaltma stratejileri)
- Mevcut hava kirlilik seviyelerinden sorumluyu belirlemek; örneğin, var olan kaynak – alıcı ilişkilerini değerlendirmek

için vazgeçilmez bir araçtır (Zannetti, 1990a).

## 2.3. İç Ortam Hava Kalitesi Modelleri

Amacı, karmaşıklık derecesi ve doğruluğundaki çeşitli değişikliklerle son otuz yıldır geliştirilmekte olan İOHK modelleri; kütle, momentum ve enerji korunumu

yasalarına dayanılarak elde edilebilen bir korunum denklemleri setidir (Demokritou, 2000; Morawska ve Congrong, 2003; Yalçın ve Özmen, 2014b). Mevcut İOHK modellerini, kullandıkları denklemlerin tipine (Schneider ve ark., 1999) ya da başvurdukları modelleme yaklaşımına (Demokritou, 2016) göre iki temel sınıfa ayırmak mümkündür:

- Kümelenmiş (lumped) parametreler ya da makroskopik (iri ölçekli) modeller (materyal-denge modelleri gibi)
- Dağıtık ya da mikroskobik modeller (Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD – Computational Fluid Dynamics) gibi)

Makro modeller, kütle denge denklemine ve iç ortam havasının mükemmel karıştığı varsayımına dayanır. Denklemlerde kullanılan parametrelerin tipi, sayısı (kaynak ve giderler gibi) ve aralığına bağlı olarak karmaşıklığı değişebilmekte ve tahmin yeteneklerinde kayda değer bir fark yaratabilmektedirler. Mikro modeller ise Navier-Stokes denklemlerine dayanır ve bu denklemleri çözmek için ileri sayısal yöntemlere (sonlu hacim ve sonlu eleman gibi) ihtiyaç duyulur. Mikro modeller, makro modelleme ile karşılaştırıldığında daha karmaşıktır ve daha fazla hesaplama gücü gerektirir. Yine de modelin tahmin etme yeteneği gelişmiştir (Jamriska, 2003; Yalçın ve Özmen, 2014b). Modellerin karşılaştırılması Tablo 2.2.'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Modelleme yaklaşımlarının avantaj ve dezavantajları (Demokritou, 2016)

Avantaj / Dezavantaj	Mikro Modeller	Makro Modeller
Basit diferansiyel denklemler	Hayır	Evet
Kısmi diferansiyel denklemler (örneğin Navier-Stokes)	Evet	Hayır
İç ortam parametrelerinin uzaysal dağılımının tahmini (1-2-3 boyutlu çözümler)	Evet	Hayır
Hesaplamasal zaman – Bilgisayar gücü	Yüksek	Düşük
Doğruluk	Mükemmel	İyi
Hava akış şartlarının tahmini (Hız vb.)	Evet	Hayır

Modelleme yaklaşımlarının her ikisi de önemlidir. Hangi yaklaşımın seçileceği; uygulamaya, gerekli bilgilere, ele alınması gereken konulara, problemin anlaşılmasına, giriş verilerine ve hesaplama gücünün sağlanabilirliğine bağlıdır. Bir uygulama için en iyi modeli seçmenin anahtarı, uygulamaya ilişkin çeşitli parametrelerin nasıl ele alınacağını anlamaktır (Jamriska, 2003).

### 2.3.1. Kütle denge modelleri

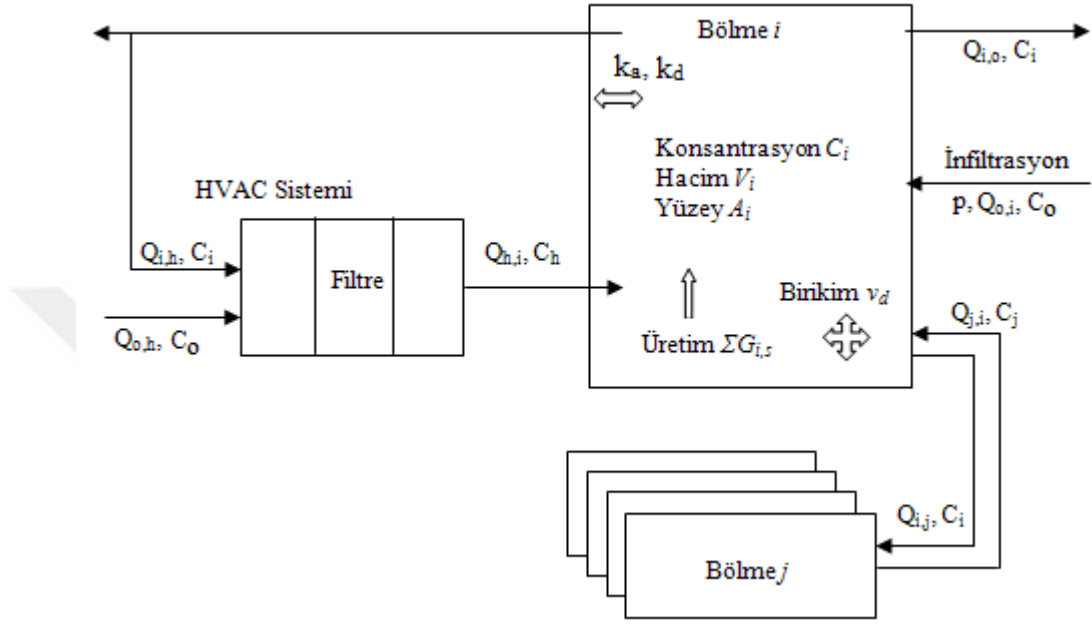
Kütle korunuma dayanan kütle denge modellerin kullanımı, havalandırma şartlarına ve iç ortamdaki kaynak ve giderlerin dağılımına bağlıdır (Goyal ve Khare, 2010). Bu modeller, kirleticilerin mükemmel bir şekilde karıştığını ve bölmeler arasında hava akışı yardımıyla taşındığını varsayar. Her bir kirletici ve bölme (oda) için bir kütle denge denklemleri seti gerekir (Jamriska, 2003). Kütle denge modelleri, ölçüm aralığında uygulanırsa uygulamada daha fazla genelleme ve tahminde daha fazla doğruluk sağlar.

Kütle denge modelinde; ortama giren toplam kütle ile ortamdan çıkan toplam kütle arasındaki fark ortamdaki kütle değişimini verir. N adet bölmeden oluşan bir modelde tek bir  $i$  bölmesi için kütle denge denklemi, aşağıdaki eşitlikte verilen (Denklem 2.1) birinci dereceden diferansiyel bir denklemdir (Nazaroff ve Cass, 1989).

$$V_i \frac{dc_i}{dt} = V_i \frac{C_{i,t+\Delta t} - C_{i,t}}{\Delta t} = S_i - L_i C_i \quad (2.1)$$

Burada,  $i$  bölmenin indisi ( $i=1, 2, \dots, N$ ) olmak üzere  $V_i$ ,  $i$  bölmesinin etkin hacmi ( $m^3$ );  $C_i$ ,  $i$  bölmesindeki kirletici konsantrasyonu ( $g/m^3$ );  $t$ , zaman (dk);  $\Delta t$ , zaman aralığı (dk);  $C_{i,t+\Delta t}$ ,  $\Delta t$  zaman sonraki kirletici konsantrasyonu ( $g/m^3$ );  $S_i$ ,  $i$  bölmesi içindeki bütün kaynakların (direkt emisyonları, bağlantılı bölmelerden ve dışarıdan kirletici taşınmasının) toplamı ( $g/dk$ );  $L_i$ , bütün giderler (yüzeylerde birikme, emilme sebebiyle kirletici konsantrasyonunda azalma, havalandırma ve hava filtreleme) nedeniyle oluşan kirletici kayıp oranlarının toplamıdır ( $m^3/dk$ ).  $S_i$  ve  $L_i$  (sırasıyla

kaynak ve gider terimleri), zamanla değişebilir. Bu sebeple ek diferansiyel denklemler, bahsi geçen terimlerin davranışını nitelendirmek için gerekebilir. Şekil 2.1.'de modelin şematik diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.1. Kütle denge modelinde yer alan temel parametreler (Nazaroff ve Cass, 1986; Jamriska, 2003; Yalçın ve Özmen, 2014a)

Denklem 2.1'de yer alan kaynak ve gider terimleri detaylandırıldığında elde edilen eşitlik aşağıdaki gibidir (Denklem 2.2):

$$V_i \frac{dc_i}{dt} = \sum_{s=0}^M G_{i,s} + pC_o Q_{o,i} - C_i Q_{i,o} + \sum_{j=1}^N C_j Q_{j,i} + C_h Q_{h,i} - \sum_{j=0}^N C_i Q_{i,j} - C_i Q_{i,h} - A_i v_d C_i - A_i k_a f(C_i) + A_i k_d f(X) \quad (2.2)$$

$p$ ,  $i$  bölmesi için içeri girme faktörü (sabit);  $G_{i,s}$ ,  $i$  bölmesindeki kaynaklardan kirleticilerin üretilme oranıdır (mg/s).  $s=0, 1, 2, \dots, M$  ve  $M$ , toplam kaynak (burada kişi) sayısıdır.  $C_o$ , dış ortam kirletici konsantrasyonu ( $g/m^3$ );  $Q_{o,i}$ , dış ortamdan  $i$  bölmesine infiltrasyon hava akış oranıdır ( $m^3/dk$ ).  $h$  indisi, HVAC sistemine karşılık gelmektedir;  $C_h$ , HVAC sisteminden üflenen havanın kirletici konsantrasyonu ( $g/m^3$ );  $Q_{h,i}$ , HVAC sisteminden  $i$  bölmesine üflenen havanın hacimsel akış oranı ( $m^3/dk$ );  $Q_{i,h}$ , HVAC sisteminden  $i$  bölmesinden dış ortama hacimsel hava akış oranı ( $m^3/dk$ );  $C_j$ ,  $j$

bölmesindeki havanın kirletici konsantrasyonu ( $\text{g/m}^3$ );  $Q_{j,i}$ ,  $j$  bölgesinden  $i$  bölgesine ( $i \neq j$ ) hacimsel hava akış oranıdır ( $\text{m}^3/\text{dk}$ ).  $j=0$  dış ortamı belirtir,  $j=1, 2, \dots, N$  ve  $N$ , toplam bölme sayısıdır.  $Q_{i,j}$ ,  $i$  bölgesinden  $j$  bölgesine hacimsel hava akış oranı ( $\text{m}^3/\text{dk}$ );  $Q_{i,h}$ ,  $i$  bölgesinden HVAC sistemine hacimsel hava akış oranı ( $\text{m}^3/\text{dk}$ );  $A_i$ ,  $i$  bölgesinin toplam yüzey alanı ( $\text{m}^2$ );  $v_d$ , yüzeylerde birikim hızı ( $\text{m}/\text{dk}$ );  $k_a$ , absorbe edilme (yüzeğe tutunma) oranı;  $k_d$ , desorpsiyon (yüzeyden salınma) oranı ve  $X$  ise yüzeylerde adsorbe edilmiş kirletici miktarıdır ( $\text{g}/\text{m}^2$ ).  $v_d$  birikim hızı, Denklem 2.3 yardımı ile hesaplanabilmektedir.

$$v_d = \frac{\lambda_d V}{A} \quad (2.3)$$

Burada  $A$  ve  $V$  terimleri, sırasıyla bölmenin alanı ve hacmidir,  $\lambda_d$  ise birikim oranıdır ( $1/\text{dk}$ ). Denklem 2.2'deki HVAC sisteminden üflenen havanın kirletici konsantrasyonu, aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir (Denklem 2.4) (Nazaroff ve Cass, 1989).

$$C_h = \frac{\sum_{j=0}^N (1-\eta) Q_{j,h} C_j}{\sum_{j=0}^N Q_{j,h}} \quad (2.4)$$

$\eta$ , HVAC filtre etkinliğini ifade eder.

Denklem 2.1'deki kaynak ve gider terimleri, Denklem 2.2 kullanılarak yeniden düzenlendiğinde 2.5 ve 2.6 denklemleri elde edilebilir:

$$S_i = \frac{1}{V_i} \left( \sum_{s=0}^M G_{i,s} + p C_o Q_{0,i} + \sum_{j=1}^N C_j Q_{j,i} + C_h Q_{h,i} + A_i k_d f(X) \right) \quad (2.5)$$

$$L_i = \frac{1}{V_i} \left( Q_{i,0} + \sum_{j=0}^N Q_{i,j} + Q_{i,h} + A_i v_d + A_i k_a f(C_i) \right) \quad (2.6)$$

Eğer kaynak ve gider terimleri, söz konusu süre boyunca zamandan bağımsız olarak dikkate alınırsa Denklem 2.1'nin analitik bir çözümü aşağıdaki eşitlikte (Denklem 2.7) verilmiştir (bk. EK 1).

$$C_i = C_0 e^{-L_i t} + \frac{S_i}{L_i} (1 - e^{-L_i t}) \quad (2.7)$$

Burada  $C_0$ ,  $i$  bölmesindeki başlangıç ( $t=0$ ) iç ortam kirletici konsantrasyonudur. Denklem 2.7'nin sağ tarafındaki ilk terim; havalandırma, hava filtreleme, yüzey birikimi ve emilimi gibi nedenlerle başlangıç konsantrasyonunun bozulmasını yansıtır, ikinci terim ise  $C_f$  kararlı hal konsantrasyonuna kadarki zaman değişimini yansıtır.

$$t = 0 \Rightarrow C = C_0 \quad (2.8)$$

$$t \rightarrow \infty \Rightarrow C = C_f \quad (2.9)$$

Denklem (2.7), (2.8) ve (2.9) denklemleri dikkate alınarak yeniden yazıldığında Denklem (2.10) elde edilir (bk. EK 1) (Jamriska, 2003).

$$C_i = (C_0 - C_f) e^{-L_i t} + C_f \quad (2.10)$$

### 2.3.2. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği modelleri

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD), uzamsal kirletici konsantrasyon dağılımına veya hava akış parametrelerine ihtiyaç duyan İOHK uygulamalarında kullanılan bir mikro modelleme aracıdır. CFD yöntemleri; kütle, enerji ve momentum korunum yasaları ve türlerin korunumu ile ilgili Navier – Stokes korunum denklemlerinin sayısal yaklaşımına dayanır (ASHRAE, 2001; Jamriska, 2003). Otomotiv endüstrisinde ve havacılıkta tasarım amaçları için sıklıkla kullanılmaktadır ve ileri CFD programlarının kullanımı artmaktadır. Bununla birlikte inşa edilmiş çevrelerde (ameliyathane gibi temiz ortamlarda hava kalitesi için özel tasarımlar haricinde) İOHK'yi tahmin etmek için CFD'yi kullanmak olağan bir düşünce değildir (Ellis, 2010). Ayrıca bu programların karmaşıklığı fazladır ve hesaplama gücü için yüksek etki alanına sahiptir (Jamriska, 2003).

## **BÖLÜM 3. İÇ ORTAM HAVA KALİTESİ ÖLÇÜM SİSTEMLERİ**

İç ortam hava kalitesini istenilen değerlerde tutmak için; ortamın sıcaklığı ve nemi sağlık açısından istenilen seviyelerde tutulmalı, toz toplayıcı ve hava temizleyicileri kullanılmalı, havalandırma artırılmalı ve en önemlisi kirletici kaynakları kontrol edilmelidir. Kirletici kaynağını kontrol etmek ve havalandırma ihtiyacını belirlemek için iç ortam kirletici miktarının ölçülmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Kirleticilerin bir kısmı gazlardan oluşmaktadır.

### **3.1. Gaz Ölçüm Yöntemleri**

Gaz algılama veya ölçüm yöntemleri, ev ve işyerlerinde zehirli ve patlayıcı gaz denetimi (CO, CH<sub>4</sub> tespiti), hava kirliliği kontrolü (emiyon ölçümleri), iş sağlığı ve güvenliği (kurşun, civa, arsenik tespiti), tıbbi uygulamalar (insan koku sistemini simüle eden elektronik burunlar), otomotiv endüstrisi (egzoz ölçümleri), endüstriyel üretim (madenlerde CH<sub>4</sub> gazı tespiti) gibi pek çok alanda yaygın kullanılmaktadır. Gaz miktarı veya konsantrasyonu ölçümü için kimyasal süreçlerden veya algılayıcı malzemelerin elektriksel özelliklerinden yararlanır. Kimyasal yöntemlerle gaz konsantrasyonu belirlenmesi işlemlerine “gaz kromatografisi” veya “kütle spektrometresi” de denilmektedir. Elektronik gaz algılayıcılar son yıllarda yaygınlaşmış olup gaz kromatografisine göre hem ebat olarak çok daha küçüktür hem de fiyat bakımından ekonomik çözümler sunmaktadır. Özellikle İOHK ölçümlerinde tamamen elektronik gaz algılayıcılarından yararlanılmaktadır.

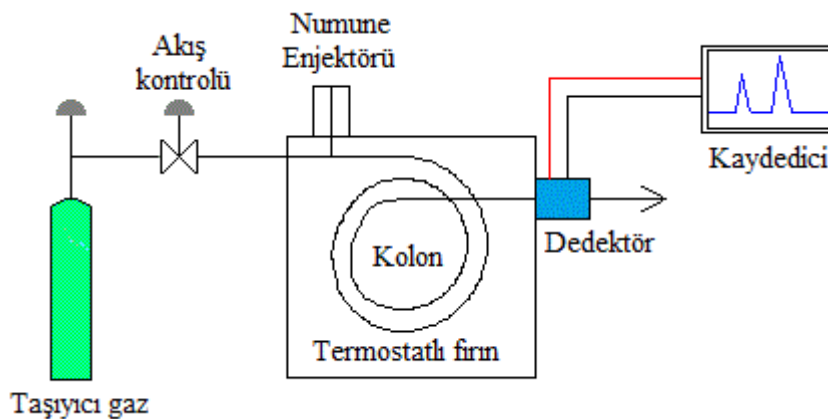
#### **3.1.1. Gaz kromatografisi yoluyla konsantrasyon belirlenmesi**

Gaz kromatografisi, hassas gaz algılama ve ölçümü için yaygın olarak kullanılan kimyasal yöntemlerden biridir. Genelde karışım halinde olan örnek gazın içindeki

ölçülmek istenen türün ortaya çıkarılması için kimyasal bir süreç tasarlanır. Süreç işletildiğinde, sonunda hedef gaz ortaya çıkar ve miktarı ölçülür.

Bu bakımdan gaz kromatografisi, gaz karışımlarını her seferinde bir kere algılayıp ölçülebilen ayrı ayrı bileşenler haline getirmektir. Karışımların nicel ve nitel analizinde, bileşiklerin saflaştırılmasında, endüstriyel süreçlerin izlenmesinde (Shivaraj ve ark., 2015), bir karışım içerisinde gaz halinde bulunan veya buharlaşabilme özelliğine sahip bileşiklerin ayrılmasında (Dereli, 2012) kullanılmaktadır. Diğer yöntemlere kıyasla numunenin ayrılması ve analizi çok hızlıdır, yüksek hassasiyet ve doğruluk özelliklerine sahiptir. Pahalı bir yöntemdir, sadece uçucu numuneler veya uçucu hale getirilebilen numuneler bu yöntemle ayrılır. Yüksek sıcaklıklarda bozulan numuneler için uygun değildir (CA, 2017).

Şekil 3.1.'de temel yapısı verilen bir gaz kromatografisinde kolonun başından enjekte edilen bir numune içerisindeki bileşikler, taşıyıcı gaz (helyum, azot gibi kimyasal olarak inert olan bir gaz) ile (hareketli fazda) kolondan (inert bir katı maddenin yüzeyine adsorbe edilen sıvı bir sabit fazdan) farklı sürelerde taşınır ve ayrılır (SHU, 2017). Ayrılan bileşikler dedektör tarafından algılanır ve dedektör tarafından üretilen sinyal kaydedicide gösterilir.



Şekil 3.1. Gaz kromatografisinin şematik bir diyagramı (SHU, 2017)

Gıda endüstrisinde kalite testinde, ilaç endüstrisinde ürünlerdeki artık çözücülerini analiz etmede, petrokimyada benzin karakterizasyonu ve doğal gaz analizinde, endüstride üretim proseslerinin izlenmesi ve organik asitlerin tespitinde, kirleticilerin tespiti ve atık emisyonlarının belirlenmesi gibi çevresel uygulamalarda gaz kromatografisinden yararlanılmaktadır (CA, 2017).

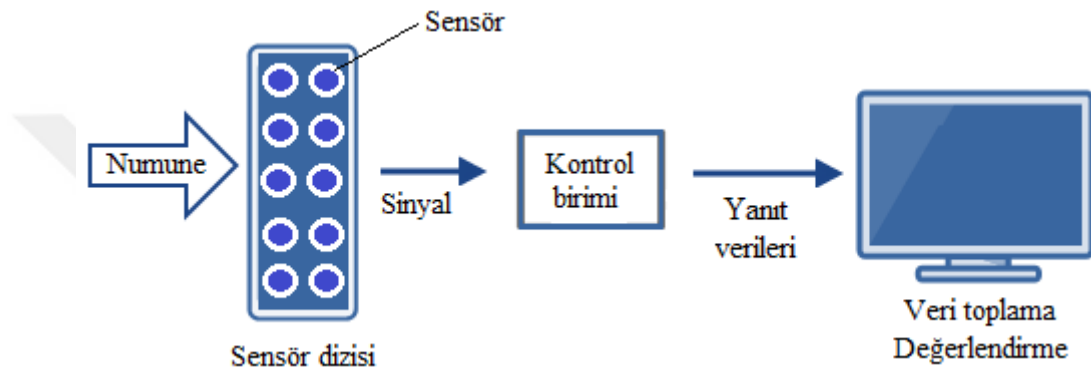
### **3.1.2. Elektronik gaz algılayıcılar ile konsantrasyon belirlenmesi**

Algılayıcı malzemeler üzerinde yapılan çalışmalar ve elektronik sistemlerdeki gelişmeler gaz konsantrasyon ölçümleri için gaz kromatografisi dışında başka yöntemlerle de ölçüm yapılabilmesini sağlamıştır. Algılayıcı malzemelerin ortamdaki gaz konsantrasyonuna bağlı olarak elektriksel özelliklerinin değiştiğinin bulunması elektronik gaz ölçüm sistemlerinde çok hızlı gelişmelere sebep olmuştur. Bu sayede endüstride, tıpta, güvenlikte ve daha birçok alanda çeşitli gazlara ilişkin ölçümler yapılabilir olmuştur. Gaz kromatografisi, boyut olarak büyük düzenekler ve kimyasal süreçler gerektirdiğinden ve ölçüm sonucu saatler sonra alınabildiğinden pratik olarak birçok gaz ölçüm uygulaması için uygun değildir. Örneğin binalardaki İOHK ölçümleri için yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı gaz kromatografisi sistemleri kullanılamaz.

Elektronik gaz algılama işlemi aşağıdaki aşamaları içerir:

1. Ortamdaki gaz yoğunluğuna bağlı olarak algılayıcı malzeme etkileşir ve yoğunlukla malzemenin iletkenliği değişir. Bu değişim miktarı akım, gerilim veya frekans değişiminin gözlenmesi yoluyla ölçülebilir.
2. Akım, gerilim veya frekans şeklindeki elektriksel işaret değişimi mikrodenetleyiciler ile sayısal veriye dönüştürülür.
3. Bu şekilde çok sayıda sensörlerden toplanan veriler, merkezi bir yerde çeşitli yöntemlerle işlenir, değerlendirilir ve görsel araçlarla sunulur.

Hassas ölçüm gerektiren veya birden fazla gaz türünün algılanması gereken durumlarda farklı algılayıcı malzemeler ile kaplanmış çok sayıda elektronik sensör bir arada dizi şeklinde kullanılmaktadır. Numune gazlara veya buhara maruz kalma süresince alınan sensörlerin yanıt verileri daha sonra özel algoritmalar kullanılarak işlenir ve değerlendirilir (Harberck ve ark., 2011). Sensör dizisi sisteminin çalışma düzeni Şekil 3.2.'de şematik olarak sunulmuştur.



Şekil 3.2. Bir gaz sensör dizisi sisteminin şematik diyagramı

Kirlilik seviyesinin tespiti, hastalıkların teşhisi, koku algılama, yüksek boyutlu verilerle gaz tespiti gibi uygulamalar için kullanılabilen ve elektronik burun olarak adlandırılan gaz sensör dizileri, çoğu zaman gelişmiş analitik yöntemlere ihtiyaç duyar. Bu sensör dizilerini geliştirmek zaman alıcı, zahmetli ve pahalıdır ancak mevcut sensörlere kıyasla daha yüksek hassasiyete sahiptir (Öztürk ve ark., 2009).

Gazların tespiti üzerine yapılan araştırmalar, gaz algılama işleminin yüzey reaksiyonları ile güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu belirtmektedir (Wang ve ark., 2010). Elektronik gaz ölçüm sistemleri, algılama malzemelerine göre elektriksel, akustik, optik ve kalorimetrik özelliklerin değişimine dayalı yöntemler olmak üzere dört grupta incelenebilir.

### 3.1.3. Elektriksel özelliklerin değişimine dayalı yöntemler

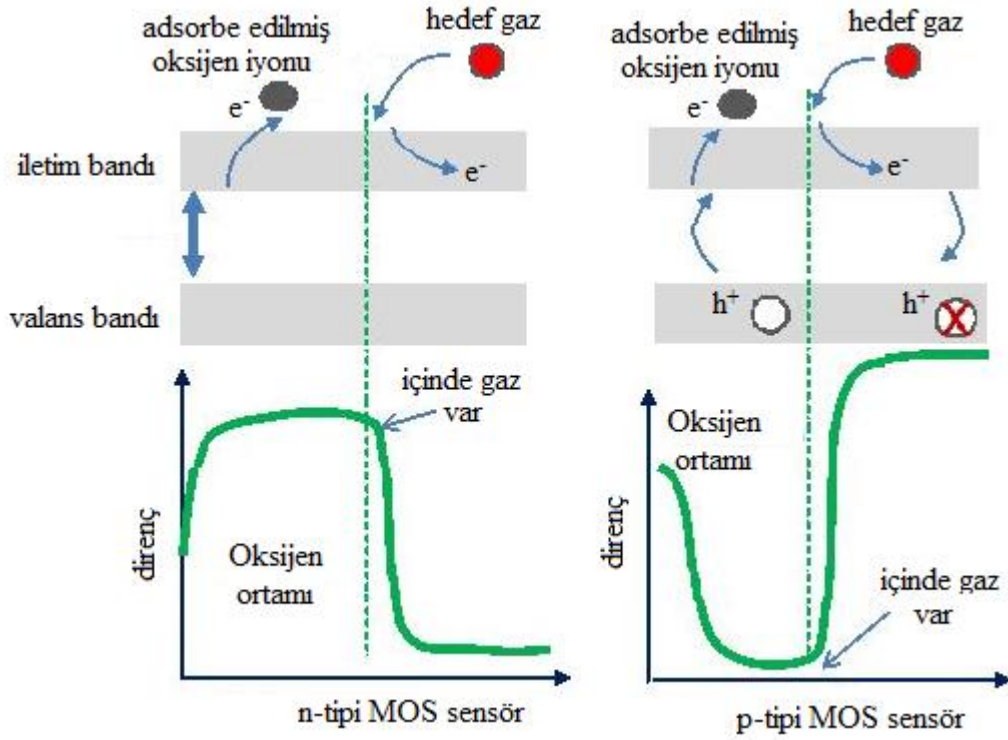
Elektriksel özelliklerin değişimine başka bir ifade ile malzemenin direnç, kapasitans veya frekansındaki değişimlere dayalı yöntemler dört grupta incelenmektedir: Metal

Oksit Yarı İletken (MOS, Metal Oxide Semiconductor), Polimer, Karbon Nanotüpler ve Nem Emici Materyal.

### 3.1.3.1. Metal oksit yarı iletken algılayıcılar

En yaygın algılama materyalleri, düşük maliyet, yüksek hassasiyet ve geniş bir hedef gaz yelpazesi gibi avantajlar sağlayan MOS'lerdir. MOS materyallerin hassasiyeti; kimyasal bileşenler, yüzey-modifikasyonu ve algılama katmanlarının yüzey alanları ve mikroyapıları, sıcaklık ve nem gibi yüzey reaksiyonlarını etkileyen birçok faktörlerden etkilenmektedir (Wang ve ark., 2010). MOS tabanlı sensörler, MOS materyalin indirgeme ve oksidasyona uğraması sayesinde bir gaz sınıfı ile reaksiyona girmek üzere tasarlanmıştır. MOS sensörleri, belirli bir karakteristik hızda hedef gazla elektron değiştirir, böylece sensör direnci etkilenir ve belirli bir sinyal üretilir (Sofian ve ark., 2009).

MOS tabanlı gaz sensörleri, indirgeme gazlarına maruz kalma nedeniyle iletkenlik değişimi yönüne göre n-tipi ve p-tipi olmak üzere iki sınıfa ayrılır (Işık, 2015). Algılama malzemesi olarak kullanılan oksit ( $\text{SnO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  gibi) n-tipi yarı iletken ise oksidin oksitleyici bir gaz ile etkileşimi sonrası yüzeydeki elektron miktarı azalır ve n-tipi yarı iletken direnci artar. Algılama malzemesi metal oksit ( $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{Ag}_2\text{O}$  gibi) p-tipi yarı iletken ise yüzey üzerindeki elektron miktarı azalır ve elde edilen elektronlar valans bandında üretim delikleri ile sonuçlandığı için p-tipi yarı iletken direnci azalır. Oksidin indirgeyici bir gaz ile etkileşiminde, gaz yüzeydeki oksijen iyonları ile reaksiyona girerek elektronları iletim bandına gönderir. Böylece yarı iletken yüzey üzerindeki elektron miktarı artar ve n-tipi yarı iletken direnci azalır. P-tipi yarı iletken durumunda ise üretilen elektronlar deliklerle birleştiği iletkenin direnci artar (Wetchakun ve ark., 2011; Akamatsu, 2013). N-tipi ve p-tipi MOS sensörlerinin hedef gaza maruz kalması durumunda sensör direncinin değişimi Şekil 3.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. n-tipi ve p-tipi MOS sensörlerinin dirençlerinin değişiminin şematik gösterimi (Choopun ve ark., 2012)

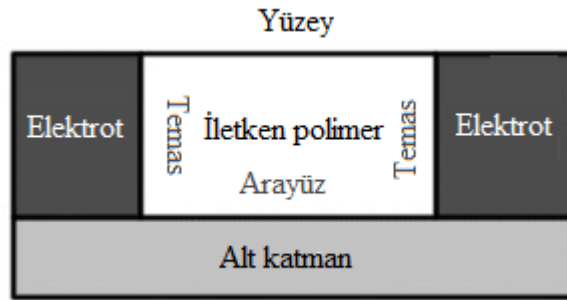
MOS sensörleri tarafından gaz algılama işlemi, iki önemli işlev içermektedir: 1) oksit yüzeyinin elektronik olarak değişmesine neden olan bir gaz-katı etkileşim yoluyla hedef gazın tanınmasını sağlayan reseptör işlevi ve 2) yüzey fenomeninin sensörün elektrik direnci değişimine iletilmesini gerçekleyen transdüser (dönüştürücü) işlevi. Gaz sensörleri için MOS malzeminin kullanımı basit olmasına rağmen bu işlevlerin anlaşılması, yarı iletken oksitlerin nano boyutlu taneciklerinden oluşan algılama malzemelerinin karmaşık doğası nedeniyle basit değildir (Işık, 2015). Bu karmaşıklık, gaz sensörlerinin işlevini etkileyen elektrofiziksel ve kimyasal özellikler, yüzeye tutunma yeteneği, katalitik aktivite gibi çeşitli parametrelerden kaynaklanmaktadır (Sofian ve ark., 2009).

### 3.1.3.2. Polimer algılayıcılar

Bazı VOC'lerin belli bir eşik üzerindeki konsantrasyonları MOS tabanlı sensörler tarafından tespit edilemediğinde olumsuz sağlık etkilerine neden olabilir. Bu

bileşiklerin konsantrasyonunu izlemek amacıyla algılama materyali olarak polimerlere ihtiyaç duyulur (Bagheri, 2017). Polimerler, uzun molekül zincirlerinden veya karbon içeren ağlardan oluşan organik maddelerdir (Aran, 2007).

Gaz algılama için kullanılan polimerler; iletken ve iletken olmayan polimerler olarak iki gruba ayrılabilir. Elektriksel iletkenliği, farklı organik ve inorganik gazlara maruz kalmasından etkilenen iletken polimerler (Bagheri, 2017), asit bazlı veya oksitleyici özelliklere sahip gazları algılama uygulamalarında (Adhikari ve Majumdar, 2004); iletken olmayan polimerler ise farklı sensör cihazlarında adsorbe edilebilir kaplamalar olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Bagheri, 2017). Polimer tabanlı bir sensör, Şekil 3.4'te gösterildiği gibi bir veya birkaç elektrot ve bu elektrotlarla temas halindeki iletken bir polimer tabakasından oluşabilir.



Şekil 3.4. İletken polimer tabanlı bir sensörün konfigürasyonu (Bai ve Shi, 2007)

Yüksek sıcaklıklarda çalışan MOS tabanlı sensörlere kıyasla, polimer tabanlı sensörler çok düşük enerji tüketerek oda sıcaklığında çalışırlar. Pahalı araç gereçlere ihtiyaç duymazlar ve taşınabilirlerdir (Péres ve ark., 2012). Yüksek hassasiyete ve kısa tepki süresine sahip olmasının yanında sensörlerin kolay bir şekilde üretilmesine olanak tanıyan iyi mekanik özelliklere sahiptir. Benzen, tolüen gibi bazı önemli organik analitler ve diğer VOC'ler oda sıcaklığında ve ılıman şartlar altında reaktif olmadığından polimerle tespit edilmesi zordur (Bai ve Shi, 2007).

### 3.1.3.3. Karbon nanotüpler

Nano teknoloji alanındaki gelişmeler gaz sensörleri alanında yeni perspektifler getirmiş ve karbon nanotüpleri, benzersiz özelliklerinden dolayı yeni nesil yüksek hassasiyetli gaz sensörleri için umut verici materyallerden biri olarak dikkate alınmaya başlanmıştır. Karbon nanotüpler, oda sıcaklığındaki NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> gibi gazların çok küçük miktarlarına karşı oldukça duyarlıdır. Ayrıca elektriksel özelliklerde (kapasitans veya direnç gibi) önemli değişikliklerle sonuçlanan yüksek hassasiyet, hızlı tepki süresi, büyük emme kapasitesi ve yüzey alanı / hacim oranı nedeniyle geleneksel sensörlerden daha iyi özelliklere sahiptir (Thai ve ark., 2011).

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

### 3.1.3.4. Nem emici materyal algılayıcılar

Nem emici materyaller, su buharı konsantrasyonlarının başka bir ifadeyle nem seviyesinin tespiti için RFID (Radio Frequency Identification, Radyo Frekansı ile Tanımlama) etiketlerine yerleştirilebilir. Çünkü dielektrik sabiti, ortamdaki su içeriği ile değiştirilebilir. Eğer RFID etiketleri kağıt gibi nem emici malzemelerle kaplı ise emilen su etiket anteni yakın alan omik kayıplarına yol açar ve böylece RFID okuyucuları tarafından tespit edilebilen rezonans frekansını değiştirir (Johan ve ark., 2007; Liu ve ark., 2012). Bu tür algılayıcılar, çürüme veya bozulmaya nedeniyle hasar görmesini önlemek amacıyla duvar veya zemin içlerine yerleştirilebilir ve sızıntı tespiti için gizli su boruları altında konumlandırılabilirler (Bagheri, 2017).

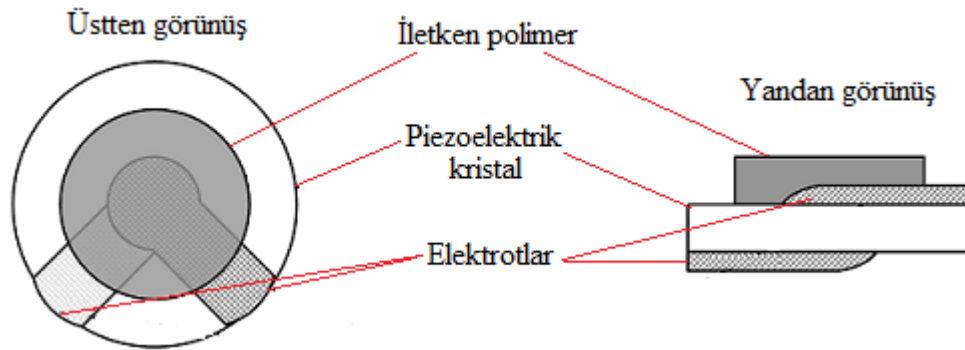
Kimyasal gaz arıtımında, kurutucularda, kağıt ve tekstil üretiminde, tahıl depolama, solunum ekipmanlarında, yaşam ortamlarında su buharı konsantrasyonu izleme gibi uygulamalarda kullanılırlar (Chen ve Lu, 2005).

#### 3.1.4. Akustik yöntemler

Akustik dalgalar, fiziksel veya kimyasal değerleri ölçmek için kullanılabilir. Akustik dalgaların üretilmesi ve algılanması ve ilgili bilgileri almak için Kuvars Kristal Mikrobals (Quartz Crystal Microbalance, QCM), Yüzey Akustik Dalga (Surface Acoustic Wave, SAW) gibi çeşitli cihazlar kullanılmaktadır. Bu cihazların ortak yönü, kendilerinin akustik özelliğindeki ya da cihaz yüzeyindeki herhangi bir değişikliğe olan duyarlılıklarıdır (Hauptmann ve ark., 2003).

Akustik dalga tabanlı sensörler akustik dalgaları başlatmak için, ya ince film formunda ya da yüzeyinde bir ya da daha fazla transdüser bulunan yığın halindeki piezo elektrik malzeme (kuvars kristal) kullanır (Chokshi, 2007). Akustik dalgalar, piezo elektrik katmanda üretilir ve katmanlar boyunca normal yönde ileriye ve geriye doğru ilerler (Hauptmann ve ark., 2003). Daha sonra üretilen akustik dalganın tipi ve cihaz rezonans (çınlama) frekansı belirlenir. Buna bağlı olarak gaz fazında, sıvı fazda, vakumda veya ince katı filmlerde kimyasal türler (karışımında yer alan özel bir gaz türünü diğerlerinden ayırt etmede) veya özellikler (hedef gazın konsantrasyonu gibi) ölçülür (Chokshi, 2007). Akustik dalga sensörlerinin hassasiyeti, rezonans frekansından büyük ölçüde etkilenir.

En yaygın kullanılan akustik dalga tabanlı sensör olan QCM, değişken gaz konsantrasyonlarına (özellikle tek gaz numunelerine) doğrusal tepkiler verdiği için gaz algılama ve tespit sistemlerinde sıklıkla tercih edilmektedir (Mumyalmaz ve ark., 2008). QCM sensörü Şekil 3.5.'te görüldüğü gibi bir çift elektrot ve kuartz kristal ile kaplanmış bir iletken polimerden oluşmaktadır. SAW sensörü ise bir piezoelektrik kristal üzerine eklenmiş alıcı ve verici inter dijital elektrotlardan oluşmaktadır.



Şekil 3.5. Tipik bir QCM sensörünün şematik diyagramı (Bai ve Shi, 2007)

SAW sensörünün gaz algılama mekanizması: duyarlı katman ortamdaki gaz moleküllerini adsorbe ettiğinde, yayılma yüzeyi için sınır koşulları değiştirilir ve böylece dalganın hem hızı hem de zayıflaması değişir (Taşaltın ve ark., 2012). SAW sensörleri, küçük boyutludur, düşük konsantrasyonları tespit eder, uzun dinamik aralıklara sahiptir ve çeşitli gaz veya buhar algılama uygulamalarına kolayca uyarlanabilir (Özmen ve ark., 2016). SAW sensörlerinin karakteristikleri, yüzeylerindeki kaplama malzemelerinin tür ve kalınlığına bağlı olarak farklılıklar göstermekte ve bu sensörler nemden etkilenmektedir (Gökçimen ve ark., 2014).

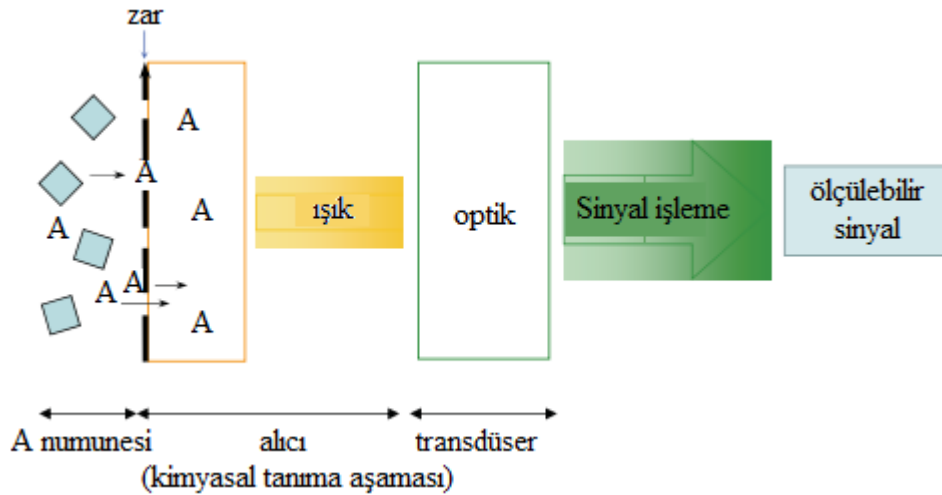
SAW sensörleri, QCM sensörlerine kıyasla daha yüksek frekanslarda çalışır, bu da alan ve güç tüketiminin azalmasına neden olur. Yüksek frekans, çözünürlüğü artırırken parazit, sinyal bozulması ve gürültü gibi birçok problem de oluşturabilir (Özmen ve ark., 2016).

### 3.1.5. Optik yöntemler

Optik yöntemler belirli bir optik dalga boyundaki bir gaz türünün optik absorpsiyonunu, emisyonunu ve saçılmasını izler. Bu optik adsorpsiyonun veya emisyonun dalga boyuyla dağılımı, yakınlardaki herhangi bir gaz türü için optik bir "parmak izi" verir ve büyüklük tipik olarak konsantrasyonu gösterir (Shivaraj ve ark., 2015).

Optik yöntemlerle gaz algılama genellikle basittir ve daha uzun ömürlü optik olmayan yöntemlere kıyasla yüksek hassasiyet, seçicilik ve kararlılık sağlayabilir. Tepki süresi nispeten kısa olup çevrim içi gerçek zaman tespitine olanak tanır. Değişen çevreden ve bazı gazların neden olduğu katalizör zehirlenmesinden performansı etkilenmemektedir. Gaz sensörleri üzerine uygulamaları, nispeten yüksek maliyeti ve minyatürleştirme nedeniyle ciddi şekilde kısıtlanmıştır. Sadece birkaç ticari gaz sensörü, optik prensiplere dayalıdır. Uzaktan hava kalitesi izlemede, yüksek doğruluk ve emniyetli gaz kaçağı tespit sistemlerinde, üst düzey pazar uygulamalarında kullanılmaktadır (Liu ve ark., 2012).

Optik sensörler, bir iletim elemanı ve bir kimyasal tanıma fazından (algılama elemanı ya da alıcı) oluşur. Alıcı, bir parametre (örneğin, verilen bir bileşiğin konsantrasyonu) tanımlar ve bu parametrenin büyüklüğü ile orantılı optik bir sinyal sağlar. Şekil 3.6.'da gösterildiği gibi birçok durumda, numune bileşikler ile etkileşimde olabilen ince bir katman ile alıcının görevi yerine getirilebilir (Lobnik ve ark., 2012).



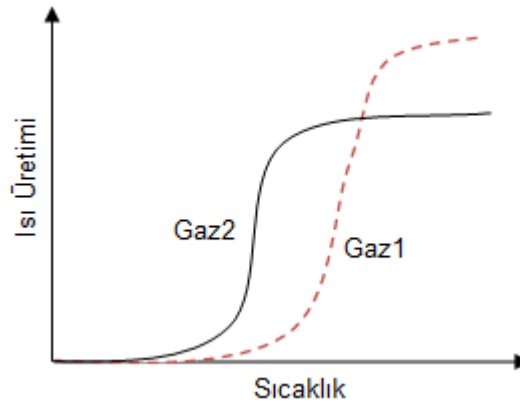
Şekil 3.6. Bir optik sensörün şematik gösterimi (Lobnik ve ark., 2012)

### 3.1.6. Kalorimetrik yöntemler

Kalorimetrik gaz sensörleri, sensör yüzeyindeki bir reaksiyon sıcaklığını ölçerek ısı iletim prensibi olarak kalorimetre kullanır. Sıcaklık değişiminin yanma hızına bağlı olduğu göz önüne alındığında kalorimetrik sensörler, hedef gazın yanmasını etkili bir şekilde destekleyecek bir katalizör gerektirirler. Bu katalizörün özellikleri, sensörlerin seçiciliği, tepkisi ve kararlılığını belirlemede kullanılır (Korotcenkov, 2013). Kalorimetrik gaz sensörlerinin avantajı, yalnızca bir gaza olan yüksek seçiciliğidir (Wöllenstein, 2011).

Kalorimetrik gaz sensörleri, pasifleştirilmiş sıcaklığa duyarlı ince bir film direnci (Kirchner ve ark., 2012) ve katalitik açıdan aktif bir metal (Platin, Paladyum, Rodyum gibi) filmi tabakasından oluşur. Yanma özelliğine sahip gazların yanması nedeniyle ısı oluşur. Bu ısı elektrikli ısıtma gücünde bir azalma ile dengelenir. Böylece güç tüketimi gaz konsantrasyonunu gösterir (Chokshi, 2007).

Şekil 3.7.'de sunulduğu gibi farklı gazlar ve aynı katalizör için, geçiş bölgesi (sıcaklığın dik artış bölgesi) farklı sıcaklıklarda gözlenebilir. Aynı etki, aynı gaz ve farklı katalizörler için de gerçekleşebilir. Geçiş bölgesi, belirli bir yanıcı gazın ve belirli bir katalizörün karakteristiğidir ve geniş bir sıcaklık aralığı üzerinde katalitik reaksiyonun ısı üretimi ile gazların seçimi ve tespiti mümkündür (Korotcenkov, 2013).



Şekil 3.7. Yanabilir gazların katalitik yanması ile sıcaklığa bağlı ısı üretim grafiği (Korotcenkov, 2013)

### 3.2. Gaz Ölçüm Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Gaz ölçüm yöntemleri ya da gaz sensörlerinin performansını değerlendirmek için bir dizi parametre dikkate alınmaktadır (Balaguru ve Jeyaprakash, 2004; Gürdal, 2012; Çakır, 2014):

- Hassasiyet: Gaz konsantrasyonundaki birim değişim başına gaz sensörünün tepkisi
- Seçicilik: Gaz sensörünün bir gaz karışımında sadece belirli bir gazı tanıma yeteneği
- Doğruluk: Gerçek değerle karşılaştırıldığında sensörün verdiği değer in kesinliğinin derecesi
- Algılama limiti: Belirtilen koşullar altında hedef gazlar için sensörün tespit edebildiği minimum konsantrasyon değeri
- Tepki süresi: Sensörün hedef gaza maruz kalması üzerine, sensörün çıkışının son değerine erişmesi için gereken süre
- Dinamik aralık: Algılama alt limiti ile üst sınır konsantrasyonu arasındaki konsantrasyon aralığı
- Hata: Sensörün verdiği değer ile gerçek değer arasındaki fark
- Enerji tüketimi
- Çalışma sıcaklık aralığı: Sensörün duyarlı olduğu sıcaklık aralığı
- Tekrara edilebilirlik: Sensörün aynı hedef gaza maruz kalması üzerine aynı çıkışı verebilmesi
- Tersinirlik: Algılama materyallerinin tespitten sonra orijinal durumuna dönebilmesi
- Emme yüzeyi (hassasiyet ve seçiciliği de etkiler)
- Üretim maliyeti
- Ömür: Sensörün performansını değiştirmeksizin çalışabileceği minimum süre

Bu parametreler çerçevesinde gaz ölçüm yöntemlerinin üstünlük ve zayıflıkları Tablo 3.1.'de özetlenmiştir.

Tablo 3.1. Temel gaz ölçüm yöntemleri (Liu ve ark., 2012)

Materyal	Üstünlük	Zayıflık
Metal Oksit Yarı İletkeni	Düşük maliyet	Nispeten düşük hassasiyet ve seçicilik
	Kısa tepki süresi	Çevresel faktörlere duyarlı
	Hedef gazlar	Yüksek enerji tüketimi
	Uzun ömür	
Polimer	Yüksek hassasiyet	Uzun süreli kararsızlık
	Kısa tepki süresi	Zayıf seçicilik
	Düşük üretim maliyeti	Tersinmezlik
	Basit ve taşınabilir yapı	
	Düşük enerji tüketimi	
Karbon Nanotüpler	Ultra duyarlı	Üretimde zorluklar ve tekrar edilebilirlik
	Mükemmel emici kapasite	Yüksek maliyet
	Geniş yüzey alanı/hacim oranı	
	Hızlı tepki süresi	
	Düşük ağırlık	
Nem Emici Materyal	Düşük maliyet	Sürtünmeye karşı kolay incinir
	Düşük ağırlık	Yüksek nemde potansiyel tersinmezlik
	Su buharına yüksek hassasiyet	
Optik Yöntemler	Yüksek hassasiyet, seçicilik ve kararlılık	Minyatürleştirmede zorluk
	Uzun ömür	Yüksek maliyet
	Çevresel değişime duyarlı	
Kalorimetrik Yöntemler	Ortam sıcaklığında değişmez	Katalizatör zehirlenme ve patlama riski
	Düşük maliyet	Seçicilikte temel eksiklikler
	Endüstriyel tespit için uygun hassasiyet	
Gaz Kromotografisi	Mükemmel ayırma performansı	Yüksek maliyet
	Yüksek hassasiyet ve seçicilik	Taşınabilir uygulamalar için minyatürleştirmede zorluk
Akustik Yöntemler	Uzun ömür	Düşük hassasiyet
	İkincil kirlilikten kaçınma	Çevresel değişime duyarlı

### 3.3. İç Hava Kalitesi Ölçüm Cihazları

İç hava kalitesi ölçüm cihazları, ortam sıcaklığı, nemi, hava akış hızı, kirletici konsantrasyonu gibi iç hava kalitesini değerlendirmede kullanılan parametrelerin ölçülmesi, sağlıklı ve güvenli bir ortam oluşturmak açısından gerekli önlemlerin alınması gibi amaçlar ile kullanılırlar.

Evlerde, okullarda, alışveriş merkezlerinde, fabrikalarda, kapalı otoparklarda ve neredeyse her türlü yapı, bina, tesis ve işletmelerde artık kullanımı zorunlu hale gelen optik duman dedektörleri ile yangın varlığı kolaylıkla saptanabilir ve yangın riski önlenir. CO gaz alarm cihazları ile renksiz, kokusuz ve zehirleyici özellikte olan CO gazının belli bir değer üzerine çıkması ile sesli ve görsel uyarı vererek CO zehirlenmelerine karşı etkili bir çözüm sunarlar. Başka gaz ve kirleticiler için alarm veya uyarı cihazları mevcuttur.

İç hava kalitesi ölçer cihazları, ortama ilişkin sıcaklık ve nem değerlerini, CO<sub>2</sub> ve/veya VOC konsantrasyonlarını küçük ekranında göstererek ortam durumunun anlık gözlenmesini sağlar. Kullanımı kolay ve portatiftir. Yüksek hassasiyetli çoklu sensörlerden (CO<sub>2</sub>-VOC, CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>-Sıcaklık, CO<sub>2</sub>-Sıcaklık-Nem gibi) oluşurlar. Otomatik kalibrasyon özelliği bulunur ve uzun süreli kararlılık sağlarlar. Ayrıca kayıt etme özelliği bulunan, istenilen ölçüm aralıklarında ve doğruluğa sahip her bina türü için çeşitleri vardır. Böylece kapalı ortamların hava kalitesini değerlendirmede ve /veya İOHK izleme sistemleri geliştirmede daha çok tercih edilirler.

Nesnelerin interneti ile bina içerisindeki hava kalitesini, konforu ve güvenliği sağlamaya yönelik teknolojiler (hava kalite sensörleri, talep kontrollü havalandırma ve ısıtma sağlayarak enerji tasarrufu sunan oda sensörleri/kumandaları gibi) de geliştirilmeye başlanmıştır. Bu sayede artık binalar için yangın tespiti, sıcaklık ve nem kontrolünün yanı sıra havalandırma, ısıtma, aydınlatma ve gibi sistemlerin yönetimi ve birbirleri ile etkileşimi mümkün olmaktadır.

## **BÖLÜM 4. İÇ ORTAM HAVA KALİTESİ MODELLEME VE BENZETİM UYGULAMALARI**

Hava kalitesi modellerinin pratik uygulaması; problemin analizine, uygun model(ler)in seçimi ve seçilen model(ler)in uygulamasına ihtiyaç duymaktadır. Problemin analizi ise asgari olarak, kirletici tipine (reaktif, reaktif olmayan), ilgili ortalama zaman bilgisine (örneğin, koku problemleri için anlık konsantrasyon, kısa süreli durumlar için bir saatlik ortalamalar, uzun dönem analizler için senelik ortalamalar), alan karakteristiklerine ve sayısal limitlere gerek duymaktadır. Model seçimi için de bu bilgiler hesaba katılmalıdır (Zannetti, 1990a).

Matematiksel modelleme benzetim çalışmalarının temelini oluşturduğundan, gerçeğe yakın modelleme bu tez çalışmasının önemli bir hedefidir. Bu tez çalışmasında, iç ortamda bulunan gazlar içerisinde insan sağlığını, konforunu ve performansını önemli ölçüde etkileyen ve ortam havalandırması ile ilişkisi nedeniyle CO<sub>2</sub> gazı İOHK göstergesi olarak kullanılmıştır. CO<sub>2</sub> gazının ortamdaki konsantrasyonunu; kapalı ortam boyutlarına, ortamdaki kişi sayısına, karakteristik özelliklerine ve aktivite seviyesine bağlı olarak doğru tahmin etmek amacıyla matematiksel bir model geliştirilmiştir. Model parametrelerini kestirmek için çeşitli denklemlerden yararlanılmıştır.

### **4.1. Karbondioksit Üretimi ve Havalandırma Oranı**

Kabul edilebilir İOHK için gereksinimleri, her zaman havalandırma oranı ile ilgilidir. CO<sub>2</sub>, insanların varlığı açısından iyi bir göstericidir. Bu nedenle ana kirlilik kaynağı insan olan derslik gibi ortamlarda havalandırma oranını belirlemede ve dolayısıyla İOHK'yi anlamada, CO<sub>2</sub> konsantrasyonunun ölçümü ve analizi yararlı olmaktadır. Ayrıca insanların performansını değerlendirmede (Bluyssen, 2014) ve insan vücut

kokusu açısından bir ortamın uygunluğunu göstermede (Persily, 1997) CO<sub>2</sub> gazı ele alınmalıdır.

CO<sub>2</sub> miktarının insan sağlığına etkisi ve zarar düzeyi sırasıyla Tablo 4.1. ve Tablo 4.2.'de verilmiştir.

Tablo 4.1. CO<sub>2</sub> miktarının insan üzerindeki etkisi (Güyağüler ve ark., 2005)

Atmosfer (%)	İç ortam (%)	Sağlığa Etkisi
99	1	Hissedilir bir etki yoktur.
97	3	Nefes daralması
95 – 94	5 – 6	Baş ağrısı, sık ve zorlukla nefes alma
90	10	Şiddetli acı
85	15	Kısmi bilinç kaybı
82	18	Boğulma ve ölüm
75	25	Kısa sürede ölüm

Tablo 4.2. CO<sub>2</sub> miktarının zarar düzeyi (Chamberlin ve ark., 1995; Durukan, 2013)

Düzyey (%)	Miktar (ppm)	Vücuda Etkisi
0,04	400	Normal dış ortam konsantrasyonu, hissedilir bir etki yoktur.
0,1	1000	ASHRAE tarafından tavsiye edilen iç ortam limiti, hissedilir bir etki yoktur.
0,5	5000	Hijyenik limit değeri, 8 saatlik periyot için maksimum kabul edilebilir konsantrasyon, baş ağrısı, nefes almada zorluk
1,5	15000	Solunum güçlüğü ve kalp atım hızı artışı
3	30000	Kas ağrıları, konsantrasyon güçlüğü, bayılma, konvülsiyon ve ölüm riski
8	80000	Kasılma, çirpınma, felç ve ölüm

Hem iç ortam CO<sub>2</sub> konsantrasyonları ile İOHK arasındaki ilişki hem de CO<sub>2</sub> ile havalandırma arasındaki ilişki, insanlar tarafından üretilen CO<sub>2</sub> üretilme oranına bağlıdır. İnsanların ürettiği CO<sub>2</sub> ve tükettiği oksijen oranı da kişilerin ölçülerine ve fiziksel aktivite seviyesine bağlıdır (Persily, 1997).

Bir kişinin oksijen tüketim oranı  $V_{O_2}$  (L/s) ve  $CO_2$  üretim oranı  $V_{CO_2}$  (L/s) sırasıyla 4.1 ve 4.2 denklemleri yardımıyla hesaplanır (Persily, 1997; Sarbu ve Sebarchievici, 2013):

$$V_{O_2} = \frac{0.00276 A_D M}{(0.23 RQ + 0.77)} \quad (4.1)$$

$$V_{CO_2} = 0.83 \times V_{O_2} \quad (4.2)$$

Burada, M, metabolik değerdir ( $W/m^2$  ve  $1 \text{ met} = 58 \text{ W/m}^2$ ). Aynı zamanda fiziksel aktivite seviyesini ifade eden M değerini belirlemek için Tablo 4.3.'ten yararlanılabilir.

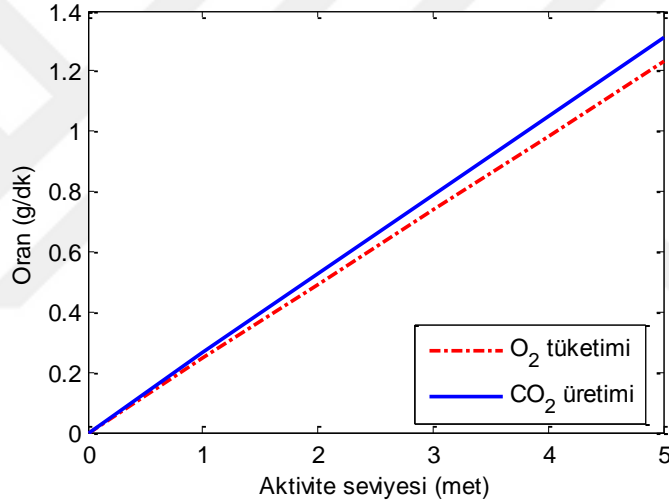
Tablo 4.3. Çeşitli aktiviteler için metabolik oranlar ve aktivite seviyeleri (ASHRAE, 2013)

Aktivite	Aktivite seviyesi (met)	Metabolik oran ( $W/m^2$ )
Uyuma	0,7	40
Yaslanma	0,8	45
Oturma, sakin	1,0	60
Ayakta, rahat	1,2	70
Okuma, oturma	1,0	55
Yazma	1,0	60
Yazma (daktilo ile)	1,1	65
Dosyalama, oturma	1,2	70
Dosyalama, ayakta	1,4	80
Kaldırma/Paketleme	2,1	120
Dolanma	1,7	100
0,9 m/s hızda yürüme	2,0	115
1,2 m/s hızda yürüme	2,6	150
Pişirme	1,6 – 2,0	95 – 115
Ev temizleme	2,0 – 3,4	115 – 200
Jimnastik/Egzersiz	3,0 – 4,0	175 – 235

RQ ise solunum katsayısı (üretilen CO<sub>2</sub> ile tüketilen O<sub>2</sub> değerlerinin oranı, boyutsuz) ve A<sub>D</sub>, vücut yüzey alanıdır (m<sup>2</sup>) ve kişinin boyuna *H* (m) ve kütlesine *W* (kg) bağlı olarak DuBois denklemi (Denklem 4.3) (Ibe ve Anyanwu, 2013) yardımıyla hesaplanabilir.

$$A_D = 0,20247H^{0,725} W^{0,425} \quad (4.3)$$

A<sub>D</sub>=1 için çeşitli seviyedeki fiziksel aktivitesine bağlı olarak üretilen CO<sub>2</sub> ve tüketilen O<sub>2</sub> oranlarının değişimi Şekil 4.1.'de sunulmuştur.



Şekil 4.1. Aktivite seviyesine göre O<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub> oranları (A<sub>D</sub>=1)

Ortamda üretilen CO<sub>2</sub> miktarı Denklem 4.4'ten görüleceği gibi kişi sayısı ile doğrusal olarak değişmektedir.

$$G = V_{CO_2} \times P \quad (4.4)$$

Denklemde yer alan *G*, CO<sub>2</sub> üretim oranı (L/s) ve *P*, ortamdaki kişi sayısıdır. Gerekli minimum soluma bölgesi dış hava oranı *V<sub>b</sub>*, Denklem 4.5 ile hesaplanabilir ve ortamdaki kişi sayısı *P* ve ortam zemin alanının *A<sub>z</sub>* bir işlevidir (Nassif, 2011).

$$V_b = R_p \times P + R_a \times A_z \quad (4.5)$$

Buradaki  $R_p$  ve  $R_a$  terimleri, sırasıyla kişi dış hava oranı ve alan dış hava oranını ifade etmektedir. Ortamlara göre çeşitlilik göstermektedir. ASHRAE Standart 62-2001'e göre çeşitli ortamlar için  $R_p$  ve  $R_a$  değerlerinin yanı sıra, 100 m<sup>2</sup>'lik bir ortam için maksimum kişi sayısı Tablo 4.4.'te verilmiştir.

Tablo 4.4. Kişi ve alan dış ortam hava oranları ve kişi yoğunluğu (ASHRAE, 2001)

Ortam tipi	$R_p$		$R_a$		Kişi sayısı (100 m <sup>2</sup> )
	(L/s kişi)	(g/dk kişi)	(L/s m <sup>2</sup> )	(g/dk m <sup>2</sup> )	
Çocuk bakım (4 yaşına kadar)	5	0,3	0,9	0,054	25
Sınıflar (5-8 yaş)	5	0,3	0,6	0,036	25
Sınıflar (9 yaş üzeri)	5	0,3	0,6	0,036	35
Ders sınıfı	3,8	0,228	0,3	0,018	65
Amfi (sabit koltuklu)	3,8	0,228	0,3	0,018	150
Sanat sınıfı	5	0,3	0,9	0,054	20
Bilim laboratuvarı	5	0,3	0,9	0,054	25
Bilgisayar laboratuvarı	5	0,3	0,6	0,036	25
Müzik/tiyatro/dans	5	0,3	0,3	0,018	35
Çok kullanımlı salon	3,8	0,228	0,3	0,018	100
Konferans/buluşma	2,5	0,15	0,3	0,018	50
Koridor	-	-	0,3	0,018	-
Ahşap metal atölyesi	5	0,3	0,9	0,054	20
Ofis	2,5	0,15	0,3	0,018	5

Kişi başına düşen dış ortam havalandırma oranı  $Q_p$ , Denklem 4.6 ile hesaplanabilir (Schell ve ark., 1998).

$$Q_p = \frac{V_{CO_2}}{(C_{iC} - C_{d1s})} \quad (4.6)$$

Aktivite seviyesi arttığında aynı CO<sub>2</sub> seviyesini sürdürmek için dış ortam havalandırmasının da artırılması gerekmektedir (Chamberlin ve ark., 1995).

## 4.2. Ortam Modelleme

İOHK'nin belirlenmesi ve ortamdaki gaz konsantrasyonunun hesaplanması için en önemli adımlardan biri ortamı ve ortamdaki gaz dağılım olayını bir model içerisinde değerlendirmektir.

Model, kavram olarak gerçek durumların ifade edilmesinin basitleştirilmiş bir şeklidir. Modeller, tahminleri ve deneysel olarak elde edilen sabitleri içerir. Ancak bu suretle, model tahminlerine dayanan değişik tipteki hava kirleticilerin davranışlarının kontrolü ve gazların konsantrasyonunu sağlık, konfor ve güvenlik açısından belirli sınırlar içerisinde tutulması gibi konularda uygun kararların alınabilmesi mümkün hale gelebilecektir (İncecik, 1994).

## 4.3. Tek Bölmeli Model Uygulamaları

### 4.3.1. Nazaroff-Cass modeli ile ortam modelleme

Bir odadaki CO, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> gibi bazı kirletici gazların konsantrasyonlarını tahmin etmek için Nazaroff ve Cass (1989) modeli kullanılmıştır. Bu model; filtreleme, havalandırma, yüzeylerde birikim ve emisyon gibi parametreleri kirletici miktarının hesaplanmasında göz önünde bulundurmaktadır. Tek bölmeli bir model için kirletici konsantrasyonu aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.7) hesaplanabilir:

$$V \frac{dc}{dt} = C_{dış}pQ_{inf} + C_h Q_h + G - C Q_{exf} - C Q_e - C Q_{ra} - C A v_d \quad (4.7)$$

Bu denklemde; Q<sub>e</sub>, HVAC sistemi sebebiyle egzozlu dış ortamda iç ortamdaki havanın hacimsel akış oranı (egzoz havası) (m<sup>3</sup>/s); Q<sub>ra</sub>, iç ortamdaki HVAC sistemine hacimsel akış oranı (geri dönüş havası) (m<sup>3</sup>/s); Q<sub>inf</sub>, dış ortamdaki iç ortama

hacimsel hava akış oranı (içeri sızma) ( $m^3/s$ ),  $Q_{exf}$ , iç ortamdan dış ortama hacimsel hava akış oranıdır (dışarı sızma) ( $m^3/s$ ).

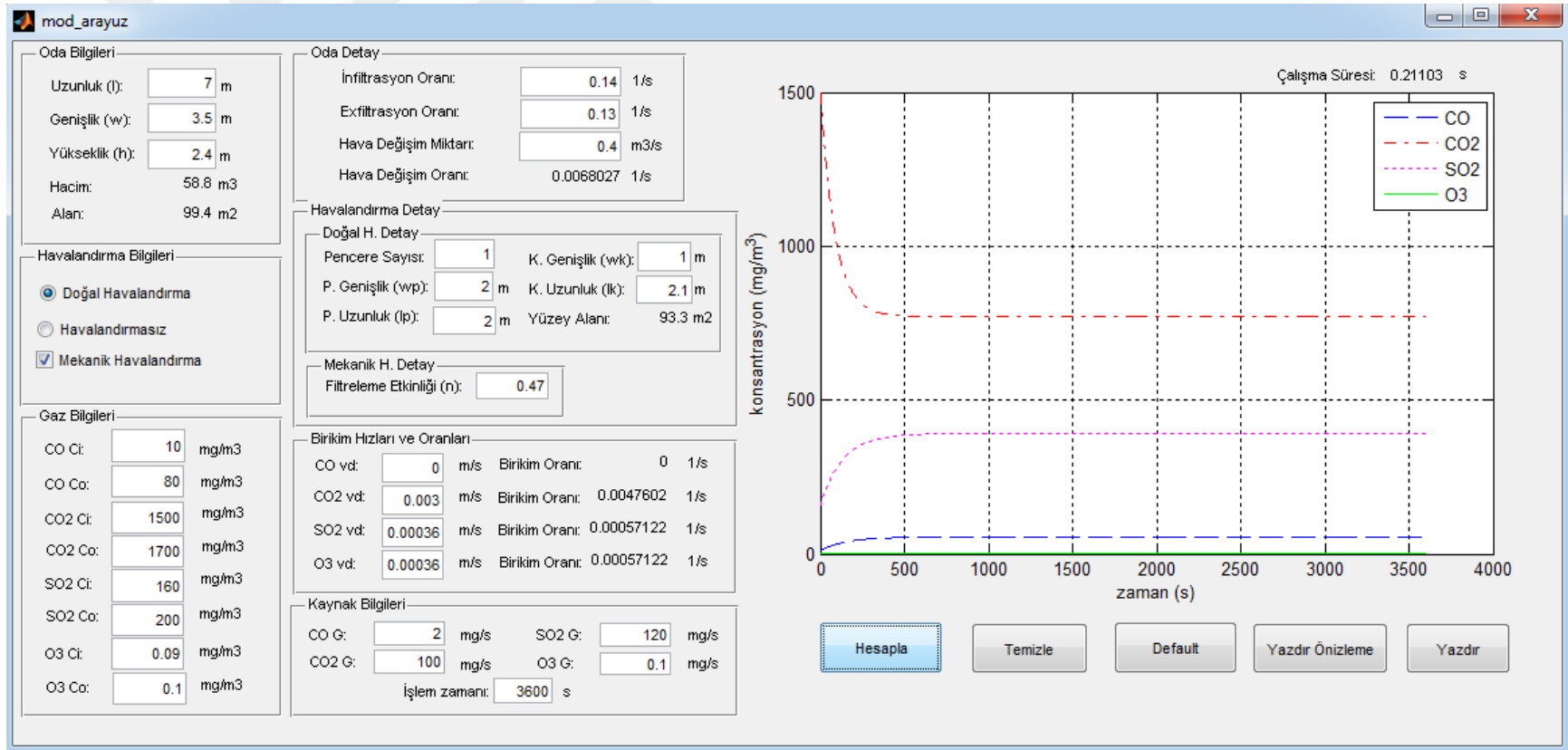
Besleme havası akış oranı  $Q_h = Q_{ma} + Q_{ra}$ 'dır.  $Q_{ma}$ , harici (HVAC sisteminin dışarıdan hava alımı) hava akış oranıdır.  $Q = Q_{ma} + O_{inf} = Q_e + Q_{exf} = \lambda_v V$ 'dir ve  $\lambda_v$ , nominal hava değişim oranını ifade eder (Jamriska, 2003).  $C_h$  değeri hesabı için kullanılan Denklem 2.4 ile yukarıda bahsi geçen hava akış oranları Denklem 4.7'de yerine konduğunda aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.8) elde edilir:

$$V \frac{dc}{dt} = C_{dış} P Q_{inf} + (1 - \eta) C_{dış} Q_{ma} + G - C Q_{exf} - \eta C Q_{ra} - C Q_e - C A v_d \quad (4.8)$$

Modellenen odanın boyutları  $6 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 2,4 \text{ m}$ 'dir. Oda içerisinde  $1,5 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  boyutlarında bir adet pencere ve  $2,1 \text{ m} \times 1,2 \text{ m}$  boyutlarında bir adet kapı yer almaktadır.

Çalışma kapsamında, MATLAB ortamında geliştirilen özel bir yazılım ile 1) Sürekli çalışan HVAC sisteme sahip bir oda 2) Doğal havalandırmalı (pencere ve kapılar açılarak yapılan havalandırma) bir oda 3) Havalandırmasız (ortama/ortamdan herhangi bir hava akışı olmayan) bir oda modellenmiş ve benzetim ortamına aktarılmıştır. Geliştirilen yazılım Şekil 4.2.'deki gibi bir kullanıcı ara yüzüne sahiptir.

Tek bölmeli oda içerisine, CO, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> ve O<sub>3</sub> üreten kaynaklar yerleştirilmiş ve kirleticilerin üretim oranının sabit tutulduğu ve zamana bağlı değiştiği durumlar için gazların konsantrasyonlarının zamana bağlı değişimleri incelenmiştir. Çalışmada sıcaklık ve nem değerleri, iç ortam aktiviteleri (sigara içme, yürüme, hijyen ürünü kullanma gibi) sınırlandırılmıştır. Hava akış oranları, filtreleme ve havalandırma etkinliği ilgili zaman süresince sabit tutulmuştur.



Şekil 4.2. MATLAB ortamında geliştirilen yazılımın kullanıcı ara yüzü (Yalçın ve Özmen, 2014b)

Kullanıcı arayüzü vasıtası ile oda, havalandırma ve kaynak bilgilerinin yanı sıra atmosfer ve kapalı ortamdaki gazların miktarlarını ve hava değişim oranlarını kullanıcıdan girdi olarak almaktadır. Programın çıktısı ise verilen girdilere bağlı olarak ortamdaki gazların konsantrasyonunun zamana bağlı değişim grafiğidir.

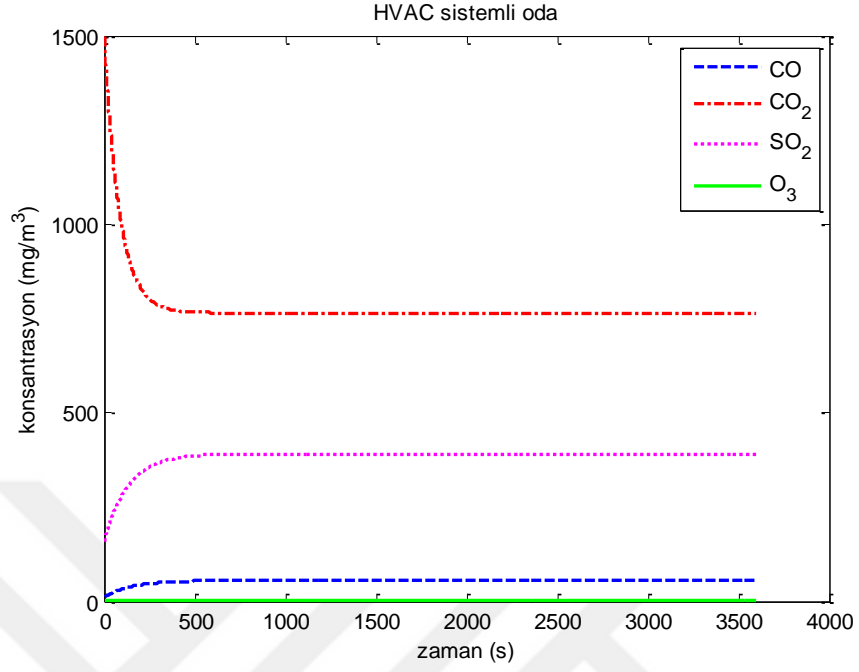
Kirleticilerin birikim hızları için literatürde yer alan değerlere göre belirlenmiştir. CO'nin birikim hızı 0 m/s, SO<sub>2</sub> ve O<sub>3</sub> gazlarının birikim hızları 0,00036 m/s (Sarwar ve ark., 2002; Carslaw, 2007), CO<sub>2</sub>'in birikim hızı ise 0,003 m/s (Sehmel, 1980; Zannetti,1990b)'dir. Modelleme işleminde gerçekleştirilmesinde aşağıda belirtilen sabit değerlerin yanında Tablo 4.5.'te verilen kirleticiler başlangıç değerleri kullanılmıştır.

$$\begin{array}{lll}
 p=0,8 & \eta=0,47 & \\
 Q=0,4 & Q_{inf}=0,14 & Q_{ma}=Q-Q_{inf} \\
 Q_{exf}=0,13 & Q_{ra}=0 & 
 \end{array}$$

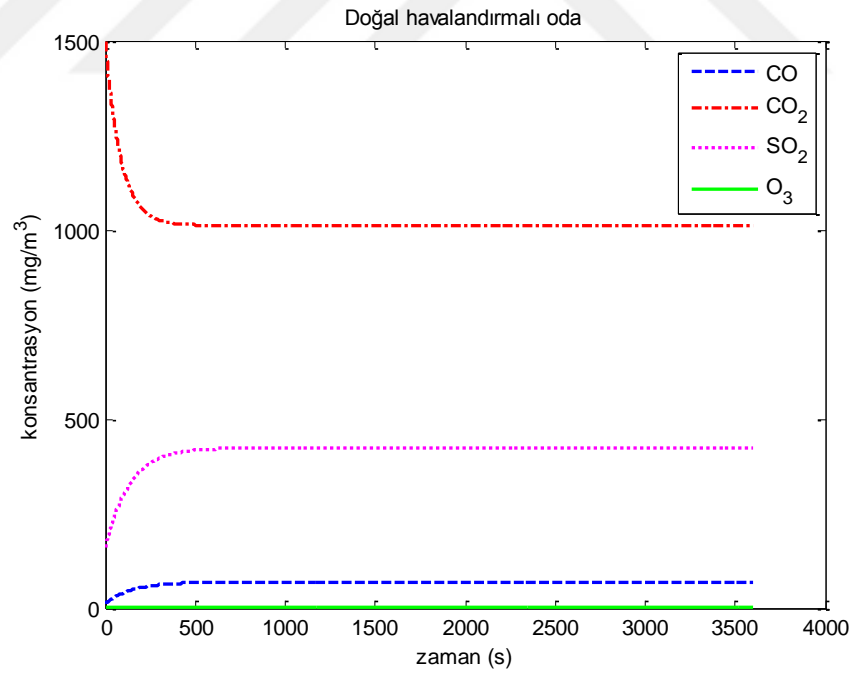
Tablo 4.5. Kirleticiler için başlangıç değerleri

Kirletici	Üretim miktarı (mg/s)	İç ortam miktarı (mg/m <sup>3</sup> )	Dış ortam miktarı (mg/m <sup>3</sup> )
CO	2	10	80
CO <sub>2</sub>	150	1500	1700
SO <sub>2</sub>	120	160	200
O <sub>3</sub>	0,1	0,09	0,1

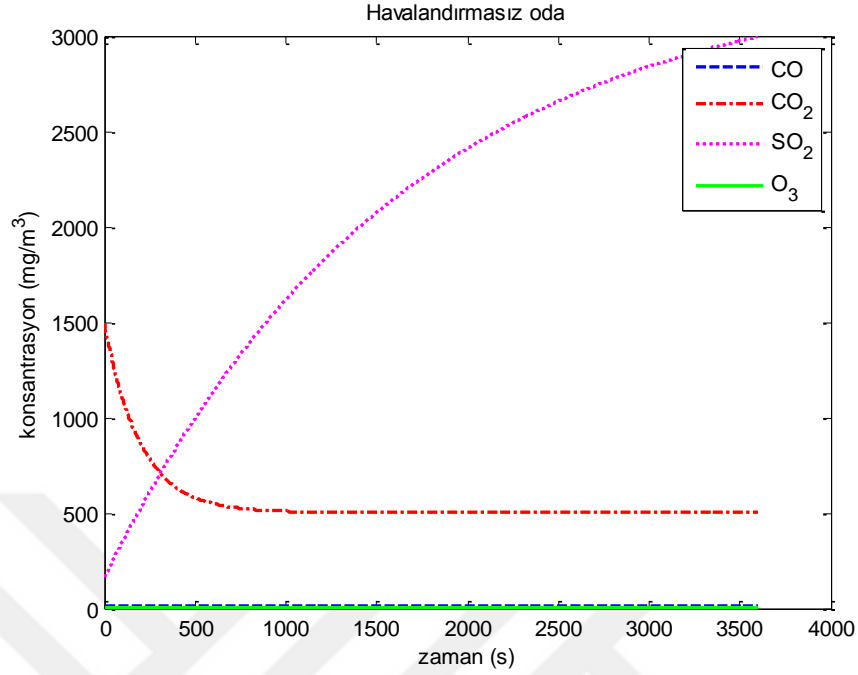
İşlem süresi 1 saattir. Bu süre içerisinde kirleticilerin üretim hızlarının sabit tutulduğu HVAC sistemli, doğal havalandırmalı ve havalandırmasız bir odadaki iç ortam gaz kirletici konsantrasyonlarının zamana bağlı değişim grafikleri sırasıyla Şekil 4.3., Şekil 4.4. ve Şekil 4.5.'te verilmiştir.



Şekil 4.3. HVAC sistemli odadaki iç ortam gaz kirleticilerin konsantrasyonları



Şekil 4.4. Doğal havalandırmalı odadaki iç ortam gaz kirleticilerin konsantrasyonları

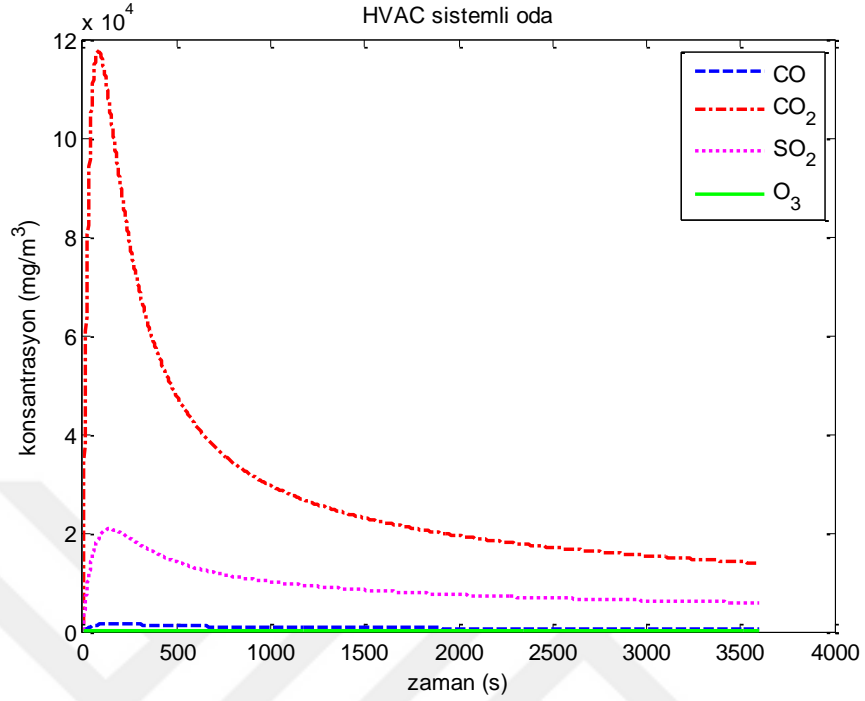


Şekil 4.5. Havalandırmasız odadaki iç ortam gaz kirleticilerin konsantrasyonları

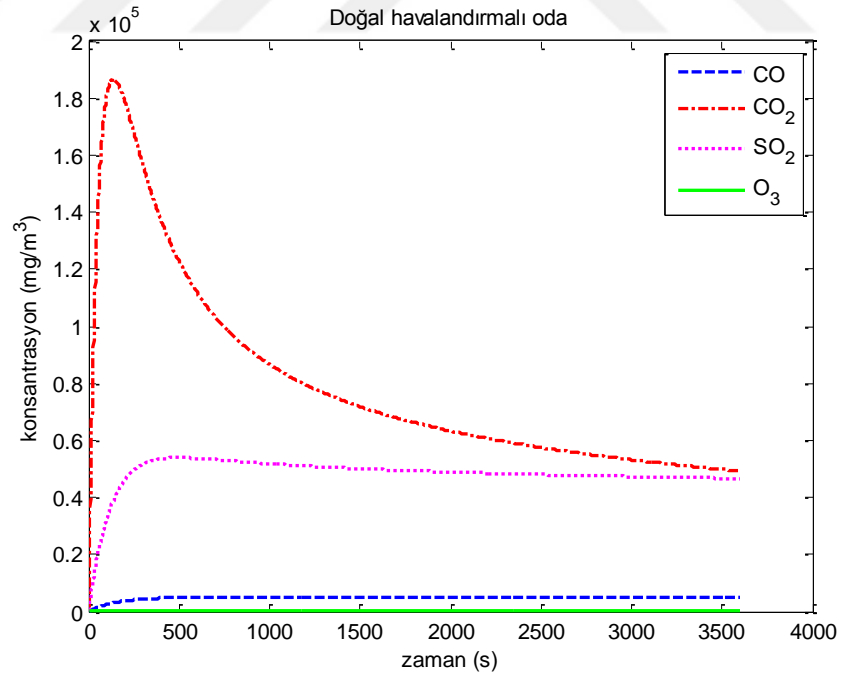
Zamana bağlı kirletici üretim oranı (kaynak gücü) (Arnold ve Jayjock, 2007), aşağıdaki eşitlik (Denklem 3.15) ile ifade edilmiştir:

$$G(t) = \frac{C_{avg}Q^2t}{Ve^{-\frac{Q}{V}t} + Qt - V} \quad (4.9)$$

Bu denklemde, Q hacimsel hava akış oranını ve  $C_{avg}$  ilgili zaman aralığındaki ortalama kirletici konsantrasyonunu ifade etmektedir. Çeşitli havalandırma tiplerine göre kirleticilerin üretim hızlarının zamana bağlı değiştiği durumlar için Şekli 4.6. ve Şekil 4.7.'deki grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 4.6. HVAC sistemli odadaki iç ortam gaz kirleticilerin konsantrasyonları (zamana bağlı üretimli)



Şekil 4.7. Doğal havalandırmalı odadaki iç ortam gaz kirleticilerin konsantrasyonları (zamana bağlı üretimli)

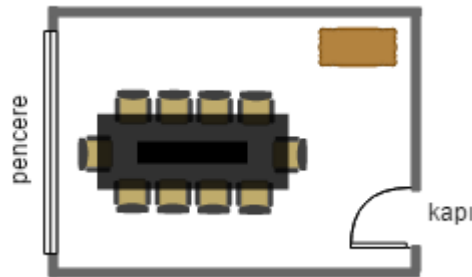
HVAC sistemi kullanılarak havalandırılan bir odadaki CO<sub>2</sub> gazının konsantrasyonunun önce arttığı sonra denge durumuna ulaşmak için azaldığı, CO ve

SO<sub>2</sub> gazlarının konsantrasyonlarındaki artışın daha az olduğu ve O<sub>3</sub> gazının ise miktarındaki değişimin ise çok az olduğu gözlenmiştir. Bu durum, HVAC sistemle havalandırmanın, doğal havalandırmaya göre kirletici konsantrasyonlarını daha düşük değerlerde tuttuğunu göstermektedir.

Havalandırmasız bir odada ise gazların üretim hızlarına, iç ve dış ortam konsantrasyonlarına bağlı olarak SO<sub>2</sub> miktarının 1000 mg/m<sup>3</sup>'ü geçtiği, diğer iki durumla karşılaştırıldığında CO<sub>2</sub> miktarının çok daha fazla azaldığı görülmektedir (Yalçın ve Özmen, 2014).

#### 4.3.2. Bir toplantı odasının modellenmesi

İOHK modellemesi için Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Toplantı Odası modellenmiştir. Modellenen toplantı odası, doğal ve mekanik havalandırılmalıdır. Modelleme ve ölçümlerde havalandırmasız durum üzere yapılmıştır. Odanın şematik gösterimi Şekil 4.8.'de verilmiştir. Odanın geometrik boyutları 5,34 m × 3,27 m × 3,51 m'dir. Odada bir adet kapı (2,1 m × 0,95 m) ve bir adet pencere (1,1 m × 0,95 m) bulunmaktadır.



Şekil 4.8. Modellenen toplantı odasının şematik gösterimi

14:40 – 16:25 saatleri arasında toplantı odası modellenmiş ve sıcaklık, nem ve CO<sub>2</sub> gazı ölçümü yapılmıştır. Modelleme sürecinde, CO<sub>2</sub> kaynağı olarak Tablo 4.6.'da özellikleri verilen 5 kişi yer almıştır.

Tablo 4.6. Toplantı odasında bulunan kişilerin karakteristikleri

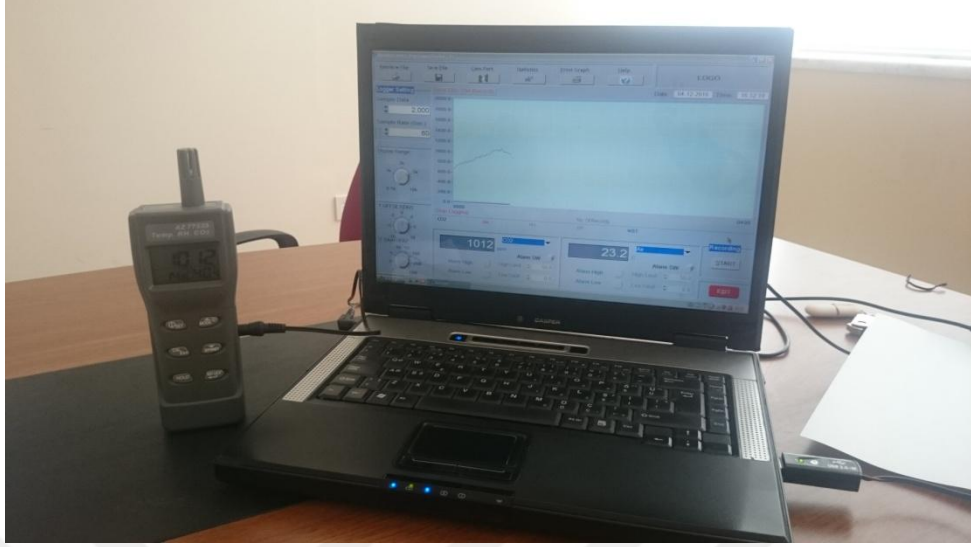
Kişi ID	Boy (m)	Kilo (kg)	$A_D$
1	1,65	62	1,6819
2	1,60	50	1,5011
3	1,68	56	1,6319
4	1,64	51	1,5411
5	1,71	85	1,9737

Denklem 2.2 söz konusu model için uyarlandığında aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.10) (Yalçın ve ark., 2016) elde edilir:

$$V_i \frac{dc_i}{dt} = \sum_{s=0}^M G_{i,s} + pC_o Q_{0,i} - C_i Q_{i,o} \quad (4.10)$$

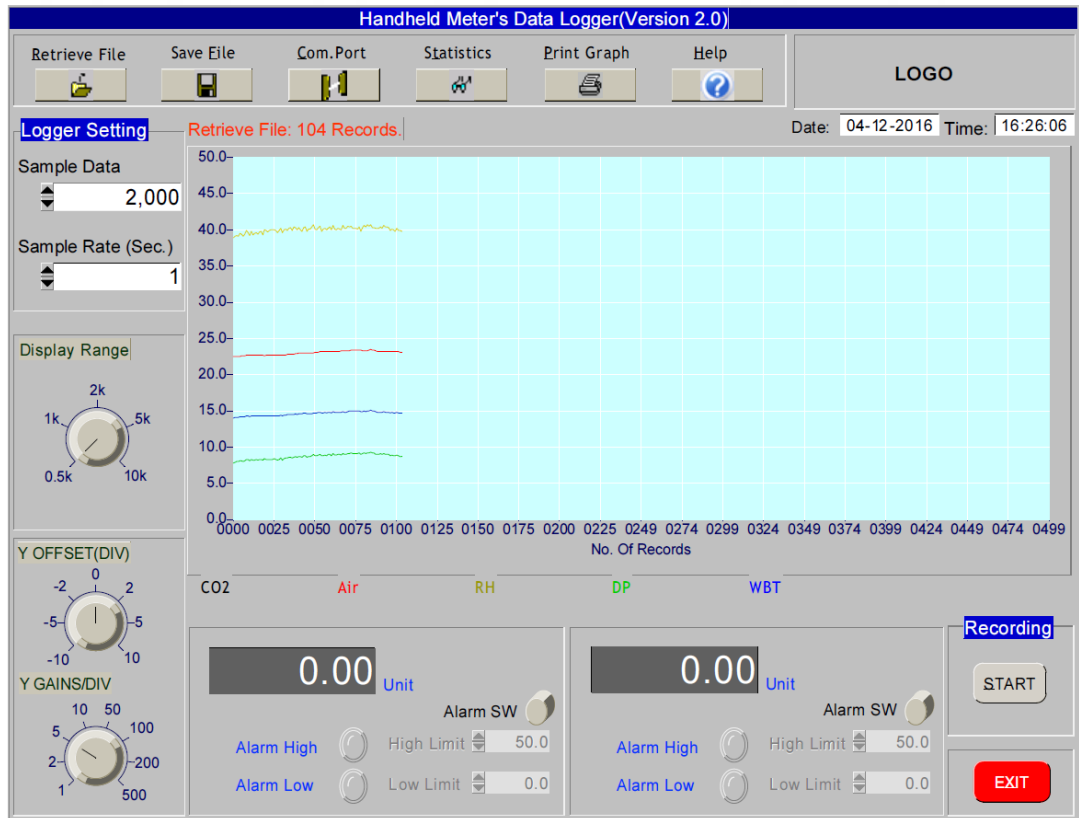
Burada,  $i$  indisi toplantı odasını simgelemekle birlikte  $p$ , toplantı odası için penetrasyon oranı (sabit) ve  $G_{i,s}$ , toplantı odasında bulunan kaynaklardan kirleticilerin üretilme oranıdır (mg/s).  $M$ , toplam kişi sayısıdır ve  $s=0, 1, 2, \dots, M$ .  $C_o$ , dış ortam kirletici konsantrasyonu ( $g/m^3$ );  $Q_{0,i}$ , havanın dış ortamdaki toplantı odasına içeri sızma oranı ( $m^3/dk$ ) ve  $Q_{i,o}$ , havanın toplantı odasından dışarı sızma oranıdır ( $m^3/dk$ ).

Model doğrulaması sırasında yapılan ölçümlerde kullanılan cihaz Şekil 4.9.'da gösterilen AZ 77535 CO<sub>2</sub>/Temp./RH Meter cihazıdır (bk. EK 2). Cihaz CO<sub>2</sub>, sıcaklık ve nem ölçme özelliğine sahiptir. Gerçek ölçümler, standart şartlar altında yapılmıştır.



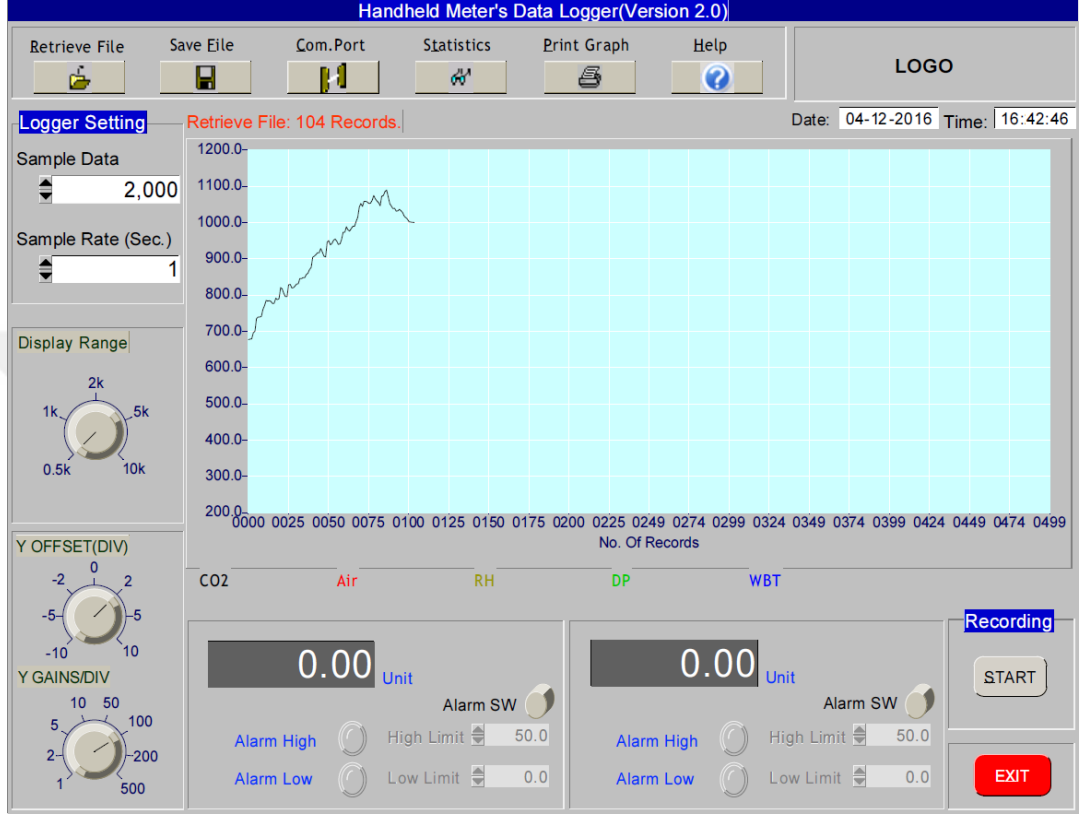
Şekil 4.9. CO2&Temp.&RH metre cihazı ile elde edilen ölçümlerin kaydedilmesi

Ölçülen hava sıcaklığı ve bağıl nem miktarı, CO2/Temp./RH Meter cihazının arayüzü kullanılarak elde edilmiş ve Şekil 4.10.'da sunulmuştur. Sıcaklık aralığı 22,5 - 23,5 °C ve ve bağıl nem aralığı %38,9 - 40,72' dir



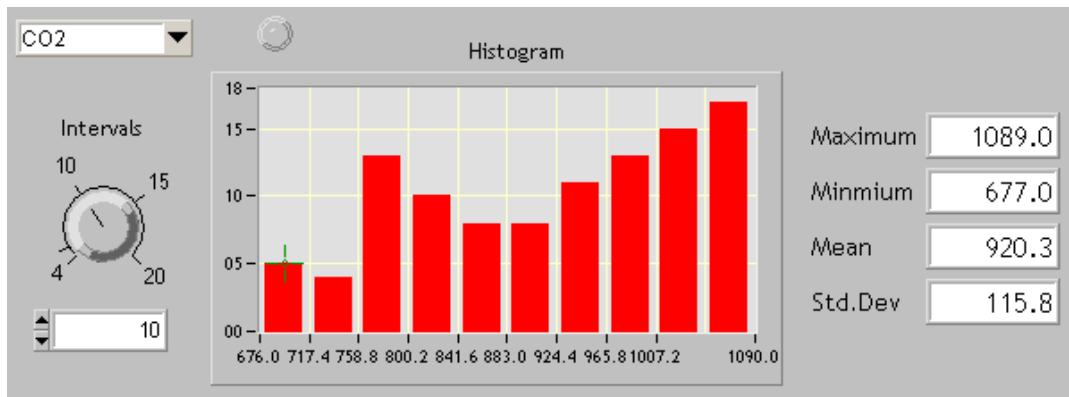
Şekil 4.10. Cihaz arayüzü kullanılarak elde edilen sıcaklık ve nem okumaları

Toplantı odasında yapılan ölçümler sonucu elde edilen CO<sub>2</sub> grafiği Şekil 4.11.'de verilmiştir.



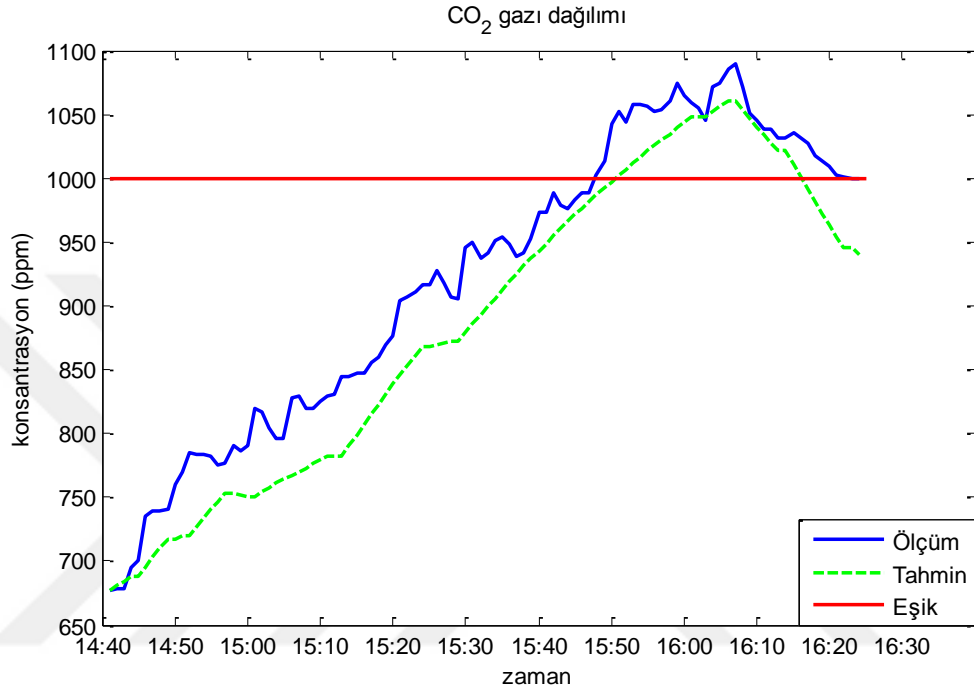
Şekil 4.11. Cihaz arayüzü kullanılarak elde edilen CO<sub>2</sub> okumaları

Ölçümlerden elde edilen iç ortam CO<sub>2</sub> grafiğine ilişkin maksimum, minimum, ortalama ve standart sapma değerleri ile histogram grafiği Şekil 4.12.'de verilmiştir.



Şekil 4.12. Cihaz arayüzü kullanılarak elde edilen CO<sub>2</sub> okumalarına ilişkin histogram grafiği

İç ortam CO<sub>2</sub> başlangıç konsantrasyonu ve dış ortam CO<sub>2</sub> konsantrasyonu sırasıyla 677 ppm ve 400 ppm ölçülmüştür. CO<sub>2</sub> model tahmin sonuçları Şekil 4.13.'te ölçüm sonuçları ve eşik değeri ile birlikte karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



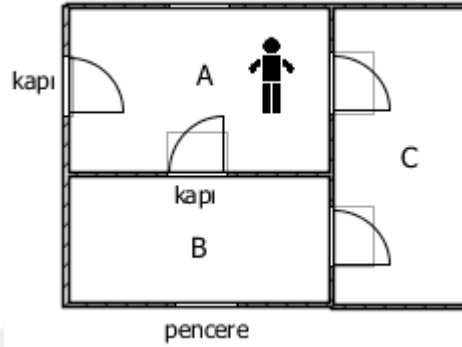
Şekil 4.13. Toplantı odasındaki CO<sub>2</sub> gazının zamana bağlı değişimi

Model sonuçları ile ölçümler arasında yakın bir ilişki gözlenmiştir. Tuşlama yapılmadığında ölçüm cihazı, kısa sürede kapanmaktadır. Ölçüm sonuçlarında dalgalanmalar göze çarpmaktadır, cihaza tuşlamak için yaklaşıldığında kullanıcı tarafından üretilen CO<sub>2</sub> miktarı, ortamda ölçülen CO<sub>2</sub> miktarında ani değişimlere sebebiyet vermiştir.

#### 4.4. Çok Bölmeli Model Uygulamaları

Çok bölmeli kütle denge modeli kullanılarak 3 odalı bir bina modellenmiş ve binanın iç ortam CO<sub>2</sub> konsantrasyon seviyesi tahmin edilmeye çalışılmıştır. Havalandırma tipinin değişimi de göz önünde bulundurularak ortama yerleştirilen insan sayısının CO<sub>2</sub> miktarını nasıl etkilediği gözlenmiştir.

Modelleme için kullanılan bina Şekil 4.14.'te gösterildiği gibi birbirine hava akışları ile bağlantılı A, B ve C odalarından oluşmaktadır. Odaların geometrik boyutları sırasıyla 8 m × 5 m × 4 m, 8 m × 4 m × 4 m ve 9 m × 4 m × 4 m'dir. Her bir odada, bir adet pencere (2,5 m × 1,2 m) ve bir adet kapı (2 m × 2 m) bulunmaktadır.

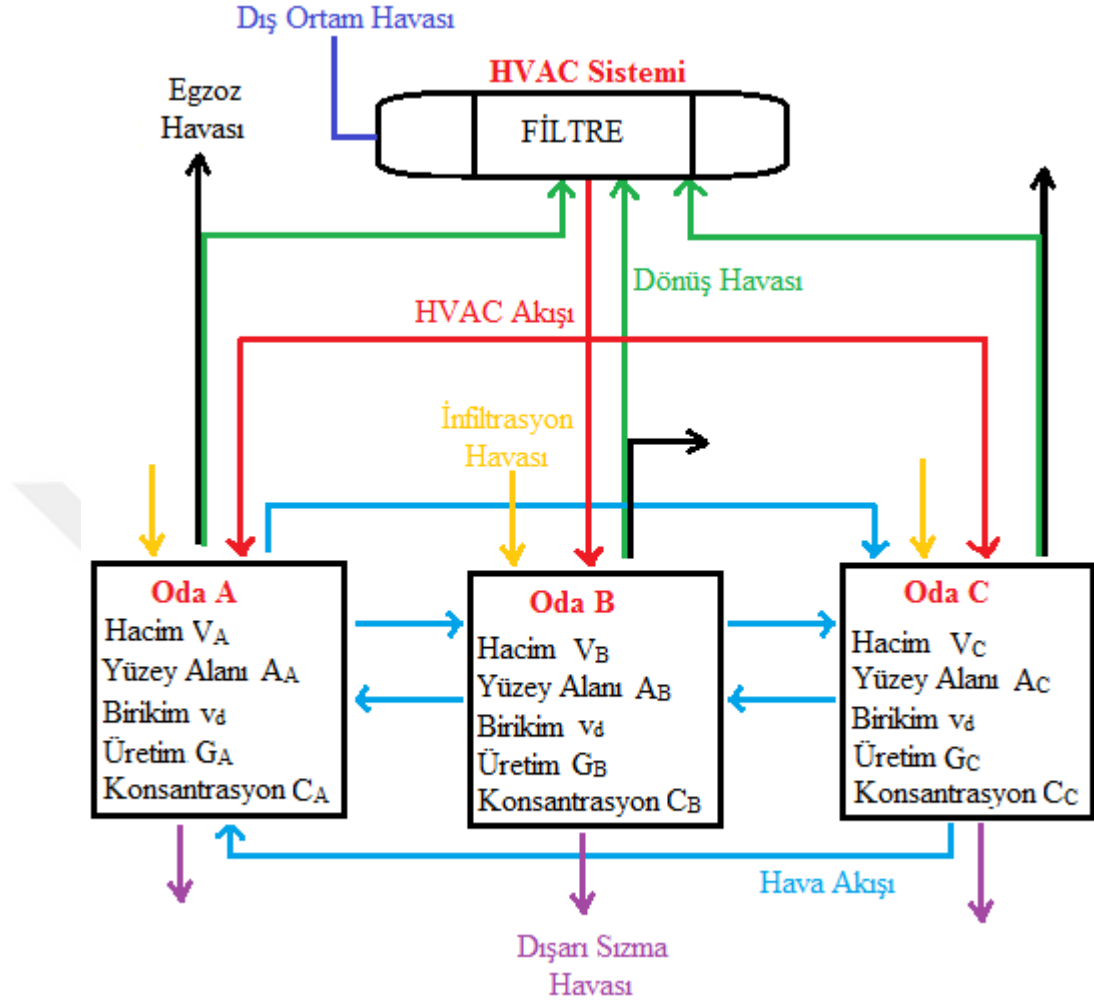


Şekil 4.14. Modellenen binanın şematik gösterimi

Bina içerisindeki kaynak ve giderler Şekil 4.15.'te gösterilmiştir. Odaların her biri, genel bir HVAC sistemine bağlıdır. Odalardaki kirletici konsantrasyonu; dış ortam havasının içeri sızması, bağlantılı diğer oda(lar) arasındaki hava akışı, ortamdaki kirletici kaynaklarının üretim oranı ve kirleticinin yüzeylerdeki birikim hızı gibi parametrelerden etkilenmektedir. Bu parametrelerin etkisi Denklem 4.10'da verilmiştir.

$$V_i \frac{dC_i}{dt} = \sum_{s=0}^M G_{i,s} + pC_o Q_{o,i} - C_i Q_{i,o} + \sum_{j=1}^3 C_j Q_{j,i} + C_h Q_{h,i} - \sum_{j=0}^3 C_i Q_{i,j} - C_i Q_{i,h} - AivdCi \quad (4.11)$$

Çalışmada binadaki A odası içerisine CO<sub>2</sub> kaynağı olarak insan(lar) yerleştirilmiş, kişilerin saniyede ürettikleri CO<sub>2</sub> miktarları sabit tutulmuştur. A odasında elle hafif iş yapan bir kişinin bulunduğu bir bina ile 10 kişinin bulunduğu bir bina modellenmiş ve kişi sayısına bağlı olarak CO<sub>2</sub> konsantrasyonunun zamana bağlı değişimleri incelenmiştir.



Şekil 4.15. Modellenen binanın açık şeması (Yalçın ve ark., 2015)

MATLAB ortamında geliştirilmiş program Şekil 4.16.'daki gibi bir kullanıcı ara yüzüne sahiptir. Programın ara yüzünde, odalar arasındaki hava akışı yönü için “->” kullanılmıştır. Örnek olarak “A->B Hava Değişimi”, A odasından B odasına hacimsel hava akışını ifade etmektedir. “P.” ve “K.” kısaltmaları sırasıyla pencere ve kapıyı ifade etmektedir. “Pencere Sayısı” ile odalarda bulunan pencerelerin sayısını artırmak mümkündür. Odalardaki  $CO_2$  gazının başlangıç değeri “ $C_i$ ” ile gösterilmiştir. Örneğin “A  $CO_2 C_i$ ” ifadesi A odasındaki  $CO_2$  gazının başlangıç değerini belirtmektedir. Dış ortam  $CO_2$  miktarı, “ $CO_2 C_o$ ” ile gösterilmiştir.

coklumodel\_arayuzu

Çalışma Süresi: 0 s

**Oda Bilgileri**

A Odası	B Odası	C Odası
Uzunluk (l): 0 m	Uzunluk (l): 0 m	Uzunluk (l): 0 m
Genişlik (w): 0 m	Genişlik (w): 0 m	Genişlik (w): 0 m
Yükseklik (h): 0 m	Yükseklik (h): 0 m	Yükseklik (h): 0 m
Hacim: 0 m <sup>3</sup>	Hacim: 0 m <sup>3</sup>	Hacim: 0 m <sup>3</sup>
Alan: 0 m <sup>2</sup>	Alan: 0 m <sup>2</sup>	Alan: 0 m <sup>2</sup>

**Havalandırma Bilgileri**

A Odası	B Odası	C Odası
<input checked="" type="radio"/> Doğal Havalandırma	<input checked="" type="radio"/> Doğal Havalandırma	<input checked="" type="radio"/> Doğal Havalandırma
<input type="radio"/> Havalandırmasız	<input type="radio"/> Havalandırmasız	<input type="radio"/> Havalandırmasız
<input type="checkbox"/> Mekanik Havalandırma	<input type="checkbox"/> Mekanik Havalandırma	<input type="checkbox"/> Mekanik Havalandırma

**Oda Detay**

A Odası	B Odası	C Odası
Infiltrasyon Oranı: 0 m <sup>3</sup> /s	Infiltrasyon Oranı: 0 m <sup>3</sup> /s	Infiltrasyon Oranı: 0 m <sup>3</sup> /s
Exfiltrasyon Oranı: 0 m <sup>3</sup> /s	Exfiltrasyon Oranı: 0 m <sup>3</sup> /s	Exfiltrasyon Oranı: 0 m <sup>3</sup> /s
A->B Hava Değişimi: 0 m <sup>3</sup> /s	B->A Hava Değişimi: 0 m <sup>3</sup> /s	C->A Hava Değişimi: 0 m <sup>3</sup> /s
A->C Hava Değişimi: 0 m <sup>3</sup> /s	B->C Hava Değişimi: 0 m <sup>3</sup> /s	C->B Hava Değişimi: 0 m <sup>3</sup> /s
Hava Değişim Oranı: 0 1/s	Hava Değişim Oranı: 0 1/s	Hava Değişim Oranı: 0 1/s

**Havalandırma Detay**

Doğal H. Detay

Pencere Sayısı: 0 (A) Yüzey Alanı: 0 m<sup>2</sup>

P. Genişlik (wp): 0 m (B) Yüzey Alanı: 0 m<sup>2</sup>

P. Uzunluk (lp): 0 m (C) Yüzey Alanı: 0 m<sup>2</sup>

K. Genişlik (wk): 0 m

K. Uzunluk (lk): 0 m

Mekanik H. Detay

Filtreleme Etkinliği (n): 0

**Gaz Bilgileri**

A CO<sub>2</sub> Ci: 0 mg/m<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> vd: 0 m/s

B CO<sub>2</sub> Ci: 0 mg/m<sup>3</sup> A Birikim Oranı: 0 1/s

C CO<sub>2</sub> Ci: 0 mg/m<sup>3</sup> B Birikim Oranı: 0 1/s

CO<sub>2</sub> Co: 0 mg/m<sup>3</sup> C Birikim Oranı: 0 1/s

Kişi Adeti: 0 İşlem zamanı: 0 s

0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1

0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1

Hesapla Temizle Default Yazdır Önizleme Yazdır

Şekil 4.16. MATLAB ortamında geliştirilmiş programın kullanıcı ara yüzü

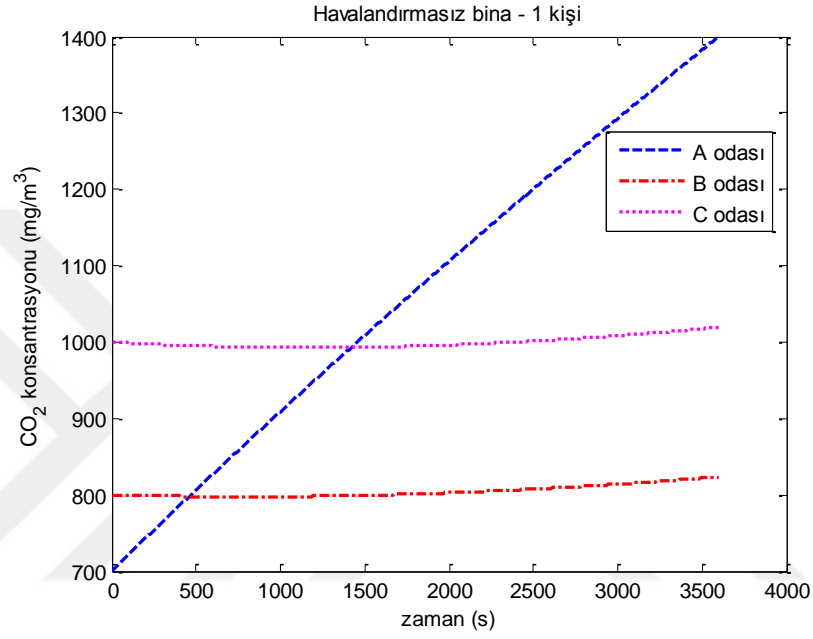
Program kullanıcıdan, oda, havalandırma ve kirletici bilgilerinin yanı sıra kişi sayısını ve odalar arasındaki hava akış oranlarını girdi olarak almakta havalandırma seçimine göre kullanıcı tarafından belirlenen zaman aralığındaki CO<sub>2</sub> konsantrasyonu değişimini çıktı olarak vermektedir. Odaların modellenmesi işleminin gerçekleştirilmesinde, Şekil 4.17.'de belirtilen değerler kullanılmıştır. Ayrıca CO<sub>2</sub>'nin yüzeylerdeki  $\lambda_d$  birikim (azalım) hızı, 0,003 m/s olarak seçilmiştir (Sehmel, 1980; Zannetti, 1990b). Havalandırma açık iken içeri girme faktörü değeri p=0,18, kapalı iken p=0,16'dır.

Oda Bilgileri		
A Odası		
Uzunluk (l):	8 m	
Genişlik (w):	5 m	
Yükseklik (h):	4 m	
Hacim:	160 m <sup>3</sup>	
Alan:	184 m <sup>2</sup>	
B Odası		
Uzunluk (l):	8 m	
Genişlik (w):	4 m	
Yükseklik (h):	4 m	
Hacim:	128 m <sup>3</sup>	
Alan:	160 m <sup>2</sup>	
C Odası		
Uzunluk (l):	9 m	
Genişlik (w):	4 m	
Yükseklik (h):	4 m	
Hacim:	144 m <sup>3</sup>	
Alan:	176 m <sup>2</sup>	
Oda Detay		
A Odası		
Infiltrasyon Oranı:	0.18 m <sup>3</sup> /s	
Exfiltrasyon Oranı:	0.14 m <sup>3</sup> /s	
A->B Hava Değişimi:	0.3 m <sup>3</sup> /s	
A->C Hava Değişimi:	0.54 m <sup>3</sup> /s	
Hava Değişim Oranı:	0.000375 1/s	
B Odası		
Infiltrasyon Oranı:	0.15 m <sup>3</sup> /s	
Exfiltrasyon Oranı:	0.13 m <sup>3</sup> /s	
B->A Hava Değişimi:	0.05 m <sup>3</sup> /s	
B->C Hava Değişimi:	0.015 m <sup>3</sup> /s	
Hava Değişim Oranı:	0.0032812 1/s	
C Odası		
Infiltrasyon Oranı:	0.13 m <sup>3</sup> /s	
Exfiltrasyon Oranı:	0.12 m <sup>3</sup> /s	
C->A Hava Değişimi:	0.01 m <sup>3</sup> /s	
C->B Hava Değişimi:	0.12 m <sup>3</sup> /s	
Hava Değişim Oranı:	0.0038542 1/s	
Havalandırma Detay		
Doğal H. Detay		
Pencere Sayısı:	1	(A) Yüzey Alanı: 184 m <sup>2</sup>
P. Genişlik (wp):	2 m	(B) Yüzey Alanı: 160 m <sup>2</sup>
P. Uzunluk (lp):	2 m	(C) Yüzey Alanı: 176 m <sup>2</sup>
K. Genişlik (wk):	1.2 m	
K. Uzunluk (lk):	2.5 m	
Mekanik H. Detay		
Filtreleme Etkinliği (n):	0.6	
Gaz Bilgileri		
A CO <sub>2</sub> Ci:	700 mg/m <sup>3</sup>	CO <sub>2</sub> vd: 0.003 m/s
B CO <sub>2</sub> Ci:	800 mg/m <sup>3</sup>	A Birikim Oranı: 0.00345 1/s
C CO <sub>2</sub> Ci:	1000 mg/m <sup>3</sup>	B Birikim Oranı: 0.00375 1/s
CO <sub>2</sub> Co:	400 mg/m <sup>3</sup>	C Birikim Oranı: 0.00366 1/s
Kişi Adeti:	1	İşlem zamanı: 3600 s

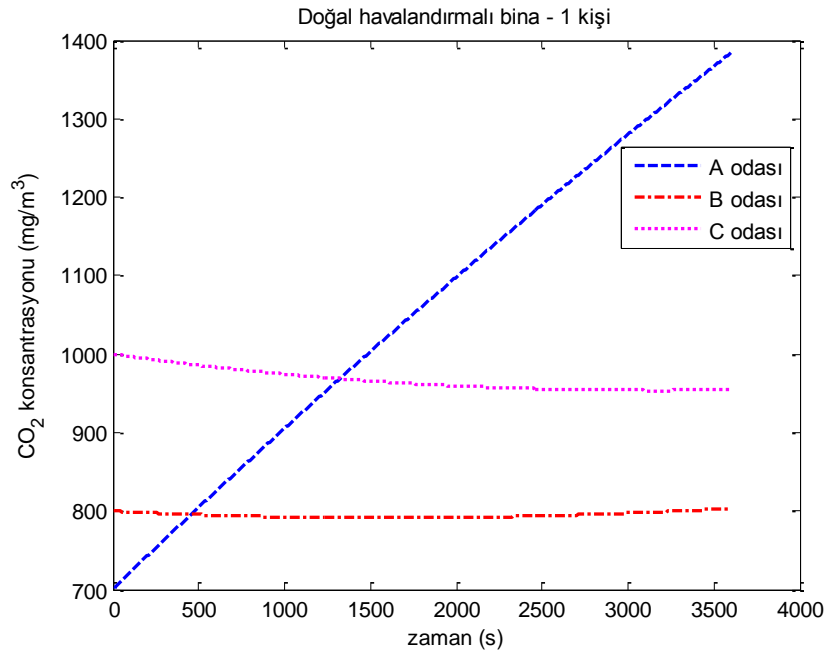
Şekil 4.17. Modelleme işleminde kullanılan parametreler ve değerleri

Çalışmada hava akış oranlarını etkileyen meteorolojik şartlar sınırlandırılmıştır. Odalar arası hava akış hızları ile filtreleme etkinliği ilgili zaman aralığında sabit tutulmuştur. İşlem süresi 1 saattir. Bu süre sonucunda; A odasında bir kişinin

bulunduğu havalandırmasız (pencere ve HVAC sistemi kapalı), doğal havalandırmalı (pencere açık), doğal-mekanik havalandırmalı ve HVAC sistemli bir binadaki CO<sub>2</sub> konsantrasyonlarının zamana bağlı değişim grafikleri sırasıyla Şekil 4.18., Şekil 4.19., Şekil 4.20., ve Şekil 4.21.'de verilmiştir.

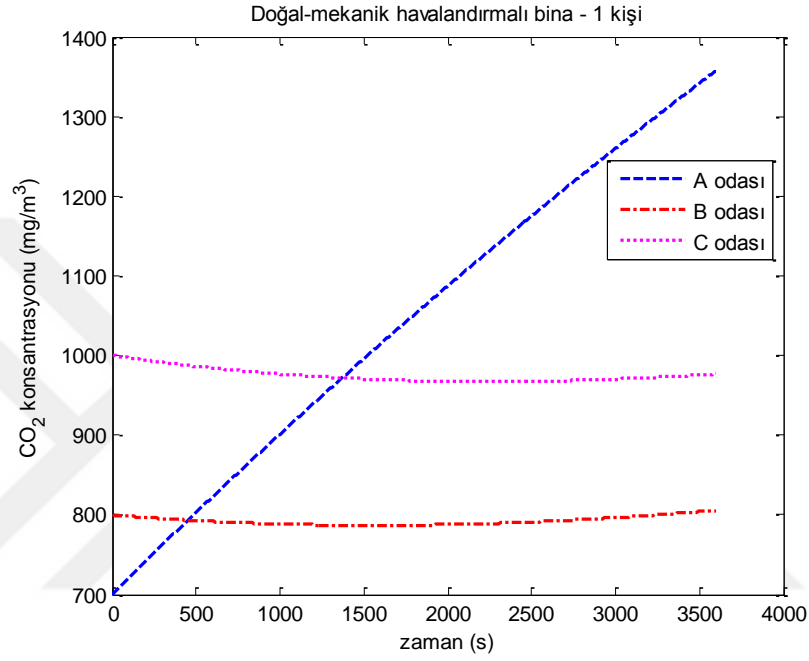


Şekil 4.18. Havalandırmasız bir binadaki CO<sub>2</sub> değişimi

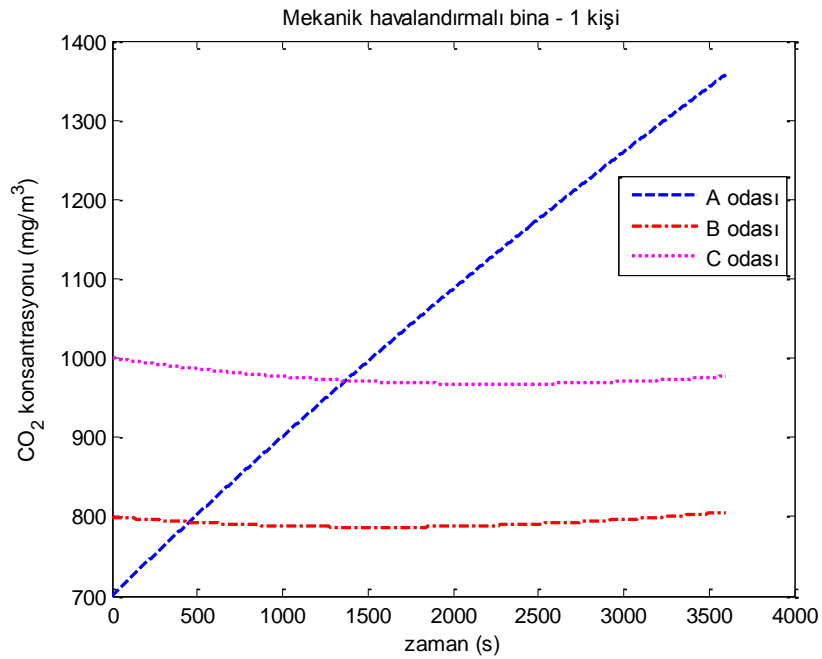


Şekil 4.19. Doğal havalandırmalı bir binadaki CO<sub>2</sub> değişimi

Kapı ve pencereye dayalı doğal havalandırmalı bir binada bunlar açılmadığı zaman, ortamdaki kirletici konsantrasyonu artmaktadır. Ayrıca birden fazla odadan oluşan yapılarda, odadaki kirletici kaynaklarının diğer odalardaki miktarları üzerinde olumsuz etkisi olduğu görülmektedir.

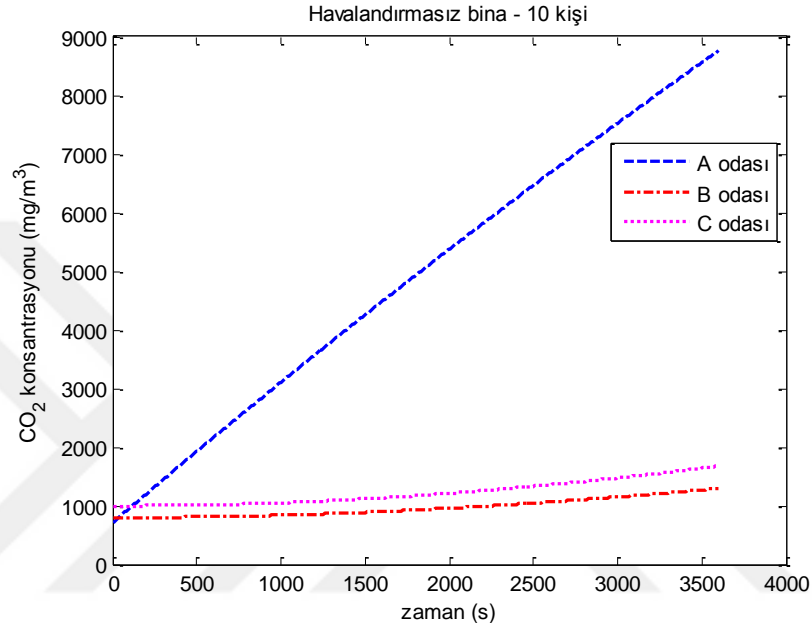


Şekil 4.20. Doğal-mekanik havalandırmalı bir binadaki CO<sub>2</sub> değişimi

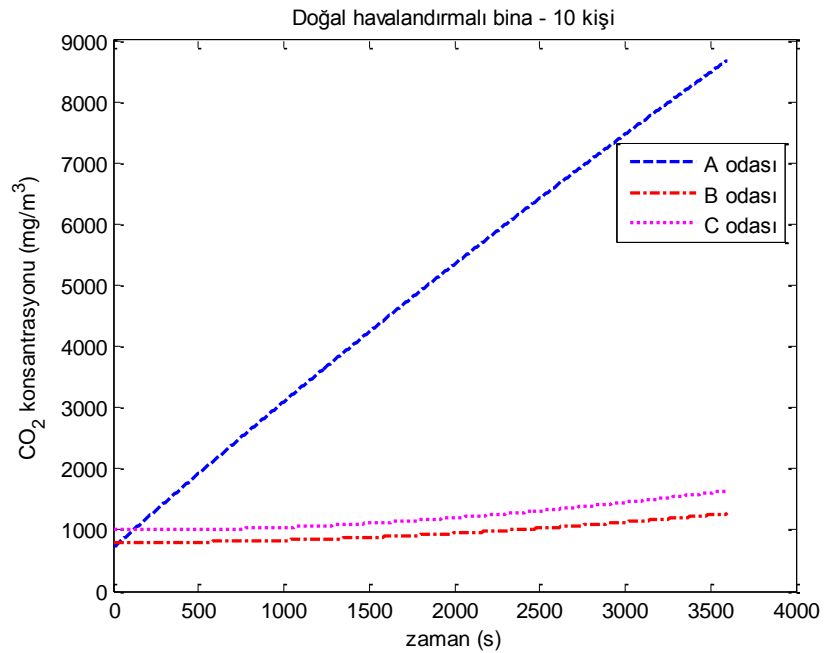


Şekil 4.21. Mekanik havalandırmalı bir binadaki CO<sub>2</sub> değişimi

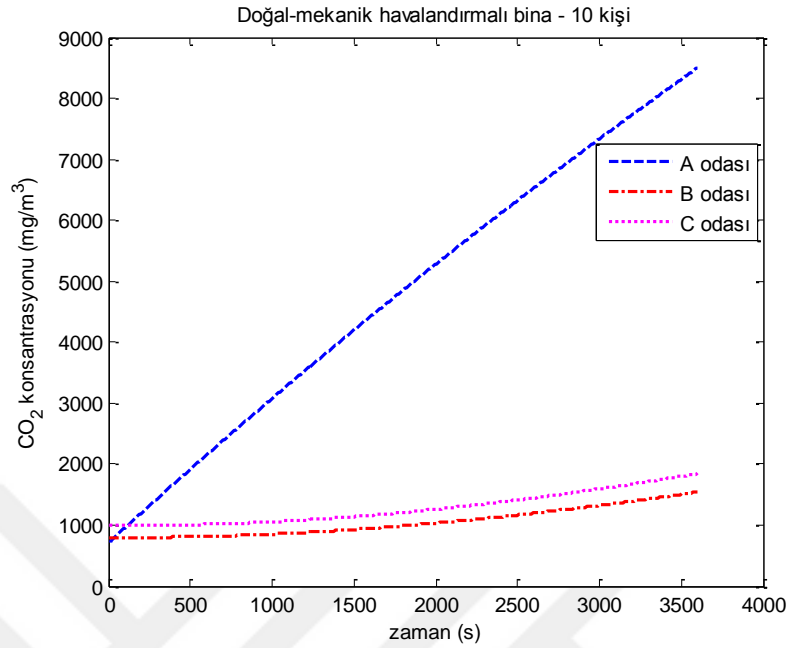
10 kişinin bulunduğu havalandırmasız, doğal havalandırmalı, doğal-mekanik havalandırmalı ve HVAC sistemli bir binadaki CO<sub>2</sub> konsantrasyonlarının zamana bağlı değişim grafikleri sırasıyla Şekil 4.22., Şekil 4.23., Şekil 4.24. ve Şekil 4.25.'te verilmiştir.



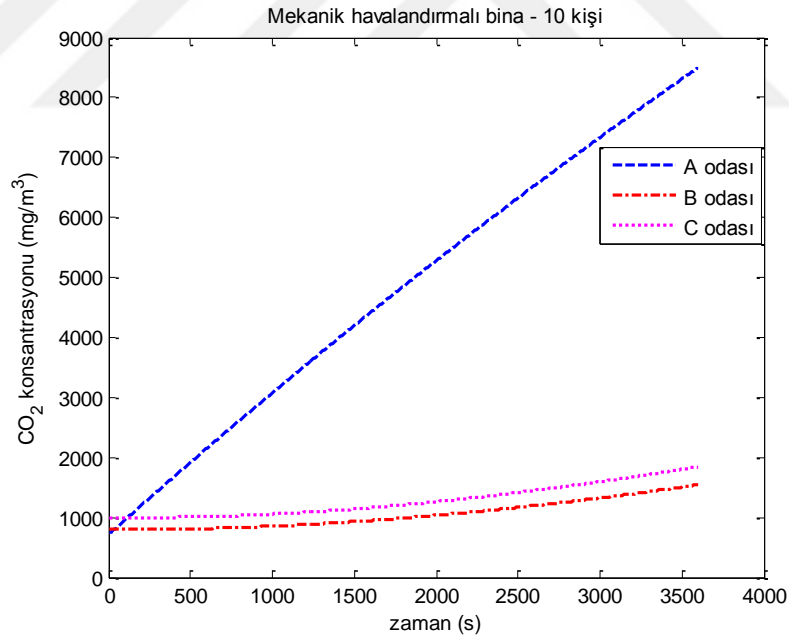
Şekil 4.22. Havalandırmasız bir binadaki CO<sub>2</sub> değişimi



Şekil 4.23. Doğal havalandırmalı bir binadaki CO<sub>2</sub> değişimi



Şekil 4.24. Doğal-mekanik havalandırmalı bir binadaki CO<sub>2</sub> değişimi



Şekil 4.25. Mekanik havalandırmalı bir binadaki CO<sub>2</sub> değişimi

Oda içerisinde bulunan insanların sayısının artması ile öncelikle söz konusu odadaki CO<sub>2</sub> konsantrasyonu orantılı olarak artmış, odalar arasındaki kapıların açık olması sebebiyle diğer odalardaki CO<sub>2</sub> konsantrasyonu artmıştır. Ortamın havalandırılması ile daha az artım göstermiştir.

## **BÖLÜM 5. PİLOT UYGULAMA**

Okul binalarındaki hava kalitesi konusuna çok ilgi vardır. Okullar herhangi diğer binadan çok daha fazla bir kullanma (oturma) sunar, birim başına oturan sayısı diğer ofis binalarındakinin dört katı olabilir (Santamouris ve ark., 2008). Bunun yanı sıra dersliklerde, amfilerde İOHK, diğer bina türlerindeki kadar incelenmemiştir. Üniversitelerde yeterli ısı konforun sağlanması bir öncelik olmasına rağmen dersliklerdeki İOHK konforu çoğunlukla yetersizdir (Ellis, 2010). Bu nedenle, dersliklerdeki İOHK'nin değerlendirilmesi araştırma fikri olarak belirlenmiştir.

İOHK, öğrencilerin sağlığını, akademik performansını ve verimliliğini doğrudan etkiler. Yüksek iç ortam CO<sub>2</sub> seviyeleri (standart seviyenin üstünde, 1000 ppm'den fazla), baş ağrısı, uyuşukluk, dikkat kaybı ve mide bulantısı gibi şikayetleri oluşturur (Halgamuge ve ark., 2009). Bu sebeple yüksek CO<sub>2</sub> miktarını önlemek ve / veya azaltmak için iç ortam CO<sub>2</sub> konsantrasyonunun (özellikle okullar için) tahmin edilmesi ve minimum havalandırma ihtiyacının belirlenmesi gereklidir. İnsanlar, ortamdaki O<sub>2</sub> gazını tüketerek CO<sub>2</sub> gazını oluştururlar. Yeterli havalandırılma yapılmadığında ya da ortamdaki insan sayısı gerekenden fazla ise bir müddet sonra ortamdaki oksijen miktarı yetersiz kalacaktır. Oksijen yetersizliği ise solunum ve nabız artışına, algıda zayıflamaya, şuur kaybına, hatta solunumun duruşuna ve ölüme neden olabilir. Okul binalarında yapılan İOHK çalışmalarında CO<sub>2</sub> ölçüm sonuçlarının insan sağlığını tehlikeye atacak değerlerde bulunması da bu tez çalışmasının motivasyonunu artırmıştır.

### **5.1. Uygulama Mimarisi**

Tez çalışması kapsamında önerilen analitik modelleme yazılımı, MATLAB programı kullanılarak geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılım, modellenecek binaya ilişkin bilgileri, kirletici tahmini hesabında kullanılan standart parametreleri (kişi dış hava

oranı  $R_p$ , alan dış hava oranı  $R_a$  gibi) MySQL Veritabanı Yönetim Sistemi kullanılarak oluşturulmuş bir veritabanından okumakta ve elde ettiği tahmin sonuçlarını yine bu veritabanına kaydetmektedir. Oluşturulan veritabanı farklı lokasyonlarda bile olsalar modelleme yazılımı ve İOHK simülörünün birbirleri ile haberleşmesini sağlamaktadır.

Bina özellikleri, binaya ilişkin günlük aktiviteleri ve havalandırma durumunu içeren senaryo bilgileri kullanıcı tarafından modelleme işleminin başlangıcında veritabanına kaydedilmelidir. Modelleme yazılımı bu girdileri kullanarak sanal bir ortam oluşturur, daha sonra bu sanal ortamı modelledikten sonra senaryo bilgilerini okuyarak İOHK tahmin değerlerini (minimum dış ortam havalandırma ihtiyacı  $V_b$ , tahmin edilen  $CO_2$  miktarı gibi) hesaplar ve elde ettiği sonuçları periyodik olarak veritabanına kaydeder. Böylece, İOHK simülörü bu analitik sonuçları okuyarak grafiksel çıktılar oluşturur.

## 5.2. Model Tanımı

Pilot uygulama için model olarak Şekil 5.1.'de fotoğrafı ve Şekil 5.2.'de konumu verilen doğal havalandırmaya sahip Sakarya Üniversitesi Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakülte Binası seçilmiştir. Fakültenin 1. katında dersliklerin yer aldığı bölüm modellenmiştir. Bina bölümü, 9 adet derslik (1101, 1102, ..., 1109) ve her bir dersliğin hava akışları ile bağlı olduğu ortak bir koridordan oluşmaktadır.



Şekil 5.1. Sakarya Üniversitesi Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi binası



Şekil 5.2. Sakarya Üniversitesi Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi konumu (Google, 2017)

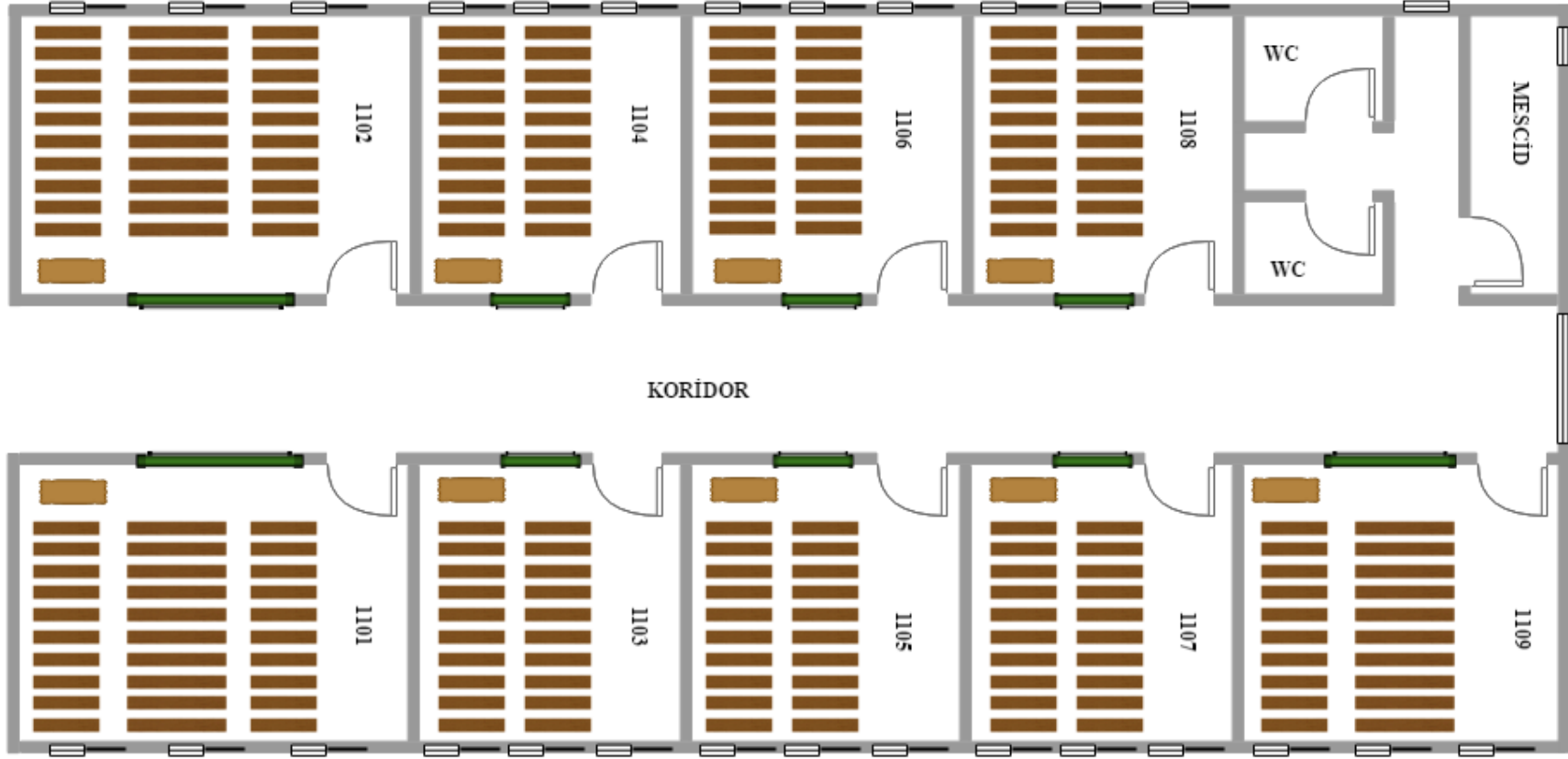
Derslikler ve koridor, mekanik havalandırma sistemine sahip değildir, pencere ve kapıların açılması vasıtası ile havalandırmaktadır. Derslik ve koridorun modelleme süresince sıcaklık ve nem açısından konfor şartlarını sağladığı varsayılmıştır. Dersliklere ve koridora ilişkin diğer bilgiler Tablo 5.1.'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Derslik ve koridor bilgileri

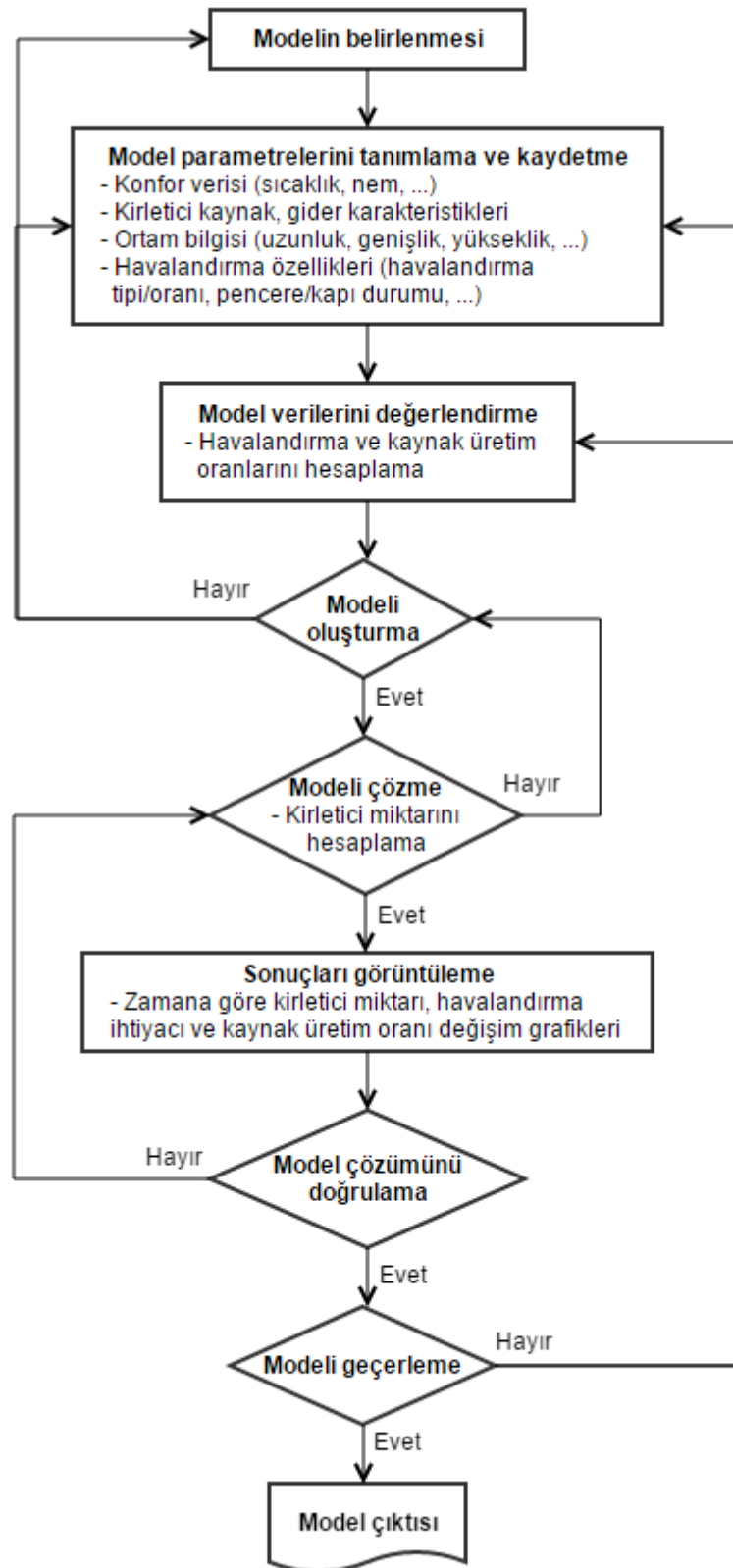
Derslik / Koridor	Hacim (m <sup>3</sup> )	Yüzey alanı (m <sup>2</sup> )	Zemin alanı (m <sup>2</sup> )	Açık pencere alanı (m <sup>2</sup> )
1101 - 1102	298	325	102	0,72
1103 - ... - 1108	190	228	65	0,72
1109	222	257	76	0,72
Koridor	640	475	218	7

Her bir derslikte, havalandırmayı sağlayan 3 adet sürgülü pencere ve 1 adet kapı bulunmaktadır. Dersliklerdeki pencere ve kapıların boyutları sırası ile 1,1 m × 1,3 m ve 2,05 m × 0,9 m'dir. Koridordaki pencerenin alanı, 18 m<sup>2</sup>'dir.

İOHK modelleme çalışmamızın adımları Şekil 5.4.'te verilmiştir.



Şekil 5.3. Dersliklerin şematik gösterimi



Şekil 5.4. Modelleme işleminin akış diyagramı

Bu çalışmada, kapalı ortamlardaki gazların konsantrasyonunu tahmin etmek için bir kütle denge modeli geliştirilmiştir. Daha önceki model, Nazaroff ve Cass (1989) tarafından İOHK izleme için partiküller düşünülerek geliştirilmiştir ve mekanik olarak havalandırılan ortamlar için de kullanılmıştır (Kulmala ve ark., 2016; Noh ve Yok, 2016).

Dersliklerin modellenmesi için aşağıdaki eşitlik (Denklem 5.1) kullanılmıştır:

$$V_i \frac{dc_i}{dt} = \sum_{s=0}^M G_{i,s} + C_o Q_{0,i} - C_i Q_{i,0} + \sum_{j=1}^N C_j Q_{j,i} - \sum_{j=0}^N C_i Q_{i,j} \quad (5.1)$$

$G_{i,s}$ ,  $i$  dersliğinde/koridorda bulunan öğrencilerden  $\text{CO}_2$  üretilme oranıdır (g/dk).  $s=0, 1, 2, \dots, M$  ve  $M$ , toplam öğrenci sayısıdır.  $C_o$ , dış ortam  $\text{CO}_2$  konsantrasyonu ( $\text{g/m}^3$ );  $Q_{0,i}$ , dış ortamdan  $i$  dersliğine/koridora giren havanın infiltrasyon oranı ( $\text{m}^3/\text{dk}$ );  $Q_{i,0}$ ,  $i$  dersliğinden/koridordan dış ortama sızan havanın akış oranı ( $\text{m}^3/\text{dk}$ );  $C_j$ ,  $j$  dersliğindeki/koridorundaki havanın  $\text{CO}_2$  konsantrasyonu ( $\text{g/m}^3$ );  $Q_{j,i}$ ,  $j$  dersliğinden/koridorundan  $i$  dersliğine/koridoruna ( $i \neq j$ ) hacimsel hava akış oranıdır ( $\text{m}^3/\text{dk}$ ).  $j=0$  dış ortamı belirtir,  $j=1, 2, \dots, N$  ve  $N$ , toplam derslik/koridor sayısıdır.  $Q_{i,j}$ ,  $i$  dersliğinden/koridordan  $j$  dersliğine/koridoruna hacimsel hava akış oranıdır ( $\text{m}^3/\text{dk}$ ).

Ortalama ölçülere sahip bir öğrenci (boy: 1,70 m, ağırlık: 66 kg) için fiziksel aktivite seviyesi 1,0 met olarak seçilmiştir. Bu değerlere göre bir öğrenci tarafından üretilen  $\text{CO}_2$  ve tüketilen  $\text{O}_2$  miktarı sırasıyla 0,4347 g/dk ve 0,4635 g/dk olarak hesaplanmıştır.

Minimum havalandırma oranını belirlemek için gereken  $R_p$  ve  $R_a$  terimleri, oturan bir kişiye göre ASHRAE Standart 62.1'den elde edilmiştir. Derslikler için  $R_p$  değeri, 3,8 L/s kişi ( $0,228 \text{ m}^3/\text{dk}$  kişi) ve  $R_a$  değeri  $0,3 \text{ L/s m}^2$  ( $0,018 \text{ m}^3/\text{dk m}^2$ )'dir.

### 5.3. Veritabanı Tasarımı

Sakarya Üniversitesi Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakülte binasının 1. Kat dersliklerine ilişkin bilgiler, öğrenci karakteristikleri - aktivite değerleri, senaryolar, havalandırma özellikleri, tahmin ve ölçüm sonuçları MySQL Veritabanı Yönetim Sistemi kullanılarak oluşturulmuş "iaq\_model" adında bir veritabanına kaydedilmiştir. Senaryoya göre İOHK değerlerini tahmin etmek için modelleme yazılımı bu veritabanına erişip değerleri okuyarak çıktı üretmektedir.

Veritabanında 11 adet tablo yer almaktadır: building\_table, day\_table, condition\_table, course\_table, airflow\_table, schedule\_table, result\_table, initial\_table, type\_table, activity\_table ve source\_table.

#### 5.3.1. Tablo tanımlamaları

Sakarya Üniversitesi Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi 1. Kat dersliklerine ilişkin bilgiler (numara, ad, hacim, yüzey alanı, zemin alanı, kapı alanı, pencerenin açık kısmının alanı, derslikteki toplam pencere sayısı) Tablo 5.2.'deki building\_table isimli tabloda tutulmaktadır.

Tablo 5.2. building\_table tablosu

Sütun	Tür	Varsayılan
id (Birincil)	int (11)	
name	varchar (50)	
volume	float	0
surface_area	float	0
floor_area	float	0
door_area	float	0
openwindow_area	float	0
window_number	int(1)	0

- id: bina içerisinde yer alan her bir bölmeyi (derslik, koridor) tek olarak belirten birincil anahtar alanıdır.
- name: bölmenin adını,
- volume: bölmenin hacmini ( $m^3$ ),
- surface\_area: bölmenin yüzey alanını ( $m^2$ ),
- floor\_area: bölmenin zemin alanını ( $m^2$ ),
- door\_area: bölmenin kapısının alanını ( $m^2$ ),
- openwindow\_area: bölme içerisindeki pencerenin açılan kısmının alanını ( $m^2$ ),
- window\_number: bölmenin pencere sayısını tutmaktadır.

Günlere ilişkin bilgileri tutan day\_table isimli tabloya ilişkin bilgiler Tablo 5.3.'te gösterilmektedir.

Tablo 5.3. day\_table tablosu

Sütun	Türü
id (Birincil)	int (11)
name	varchar (50)

- id: günleri tek olarak tanımlayan birincil anahtar alanını ifade etmektedir.
- name: gün adı bilgisini tutar.

Dersliklerdeki İOHK'yi ve konfor şartlarını etkileyen parametreler condition\_table isimli tabloda tutulmaktadır. Dersliklere ilişkin havalandırma ve konfor parametrelerinin yanı sıra kirletici kaynaklarının değişimi bu tablo üzerinden yapılmaktadır. Tablo 5.4.'te yer alan sütunlar sırasıyla tablo numarası, dersliğin numarasını, hangi gün olduğunu, dersliğin sıcaklığını, bağıl nemini, derslikteki öğrenci sayısını, açık pencere sayısını, kapının, mekanik havalandırmanın açık olup olmadığını ve bu durum şartlarının hangi zamana ilişkin olduğunu tutmaktadır.

Tablo 5.4. condition\_table tablosu

Sütun	Türü	Varsayılan	Bağlantı verilen
id (Birincil)	int (11)		
class_id (İkincil)	int (11)		building_table->id
day_id (İkincil)	int (1)		day_table->id
temp	float		
rh	float		
student_currentnumber	int (3)		
openwindow_number	int (1)	0	
door_state	int (1)	0	
hvac_state	int (1)	0	
state_time	datetime		

- id: her bir durum bilgisini tek olarak belirten birincil anahtar alanıdır.
- class\_id: bölme numarasını,
- day\_id: gün numarasını,
- temp: sıcaklık değerini (°C),
- rh: bağıl nemi (%),
- student\_currentnumber: bölmedeki mevcut öğrenci sayısını,
- openwindow\_number: bölmedeki açık pencere sayısını,
- door\_state: kapının açık/kapalı olma durumunu (0: kapalı, 1: açık),
- hvac\_state: havalandırma sisteminin açık/kapalı olma durumunu (0: kapalı, 1: açık),
- state\_time: mevcut durumlara ilişkin zaman bilgisini tutmaktadır.

Ders bilgilerini tutan course\_table isimli tablonun yapısı Tablo 5.5.'te verilmiştir.

Tablo 5.5. course\_table tablosu

Sütun	Türü
id (Birincil)	int (11)
name	varchar (50)

- id: fakültede verilen her bir derse ilişkin bilgiyi tek olarak tanımlayan birincil anahtar alanıdır.

- name: dersin adını tutmaktadır.

Tablo 5.6.'da airflow\_table isimli tablonun yapısı verilmiştir. Tablo numarası, derslik numarası, dersliğe hava akışı sağlayan diğer bölmenin numarası (başka bir derslik, koridor ya da dış ortam), hava akış miktarı, akış zamanı ve gününe ait bilgiler tabloda tutulmaktadır.

Tablo 5.6. airflow\_table tablosu

Sütun	Türü	Varsayılan	Bağlantı verilen
id (Birincil)	int (11)		
class_id (İkincil)	int (11)		building_table->id
neighbor_id (İkincil)	int (11)		building_table->id
flow_rate	float	0	
flow_time	datetime		
day_id (İkincil)	int (11)		day_table->id

- id: her bir hava akış bilgisini tek olarak belirten birincil anahtar alanıdır.
- class\_id: bölme numarasını,
- neighbor\_id: class\_id ile belirtilen bölme ile bağlantılı diğer bölmenin numarasını,
- flow\_rate: hacimsel hava akış miktarını ( $\text{g/m}^3$ ),
- flow\_time: hava akışına ilişkin zaman bilgisini,
- day\_id: gün numarasını tutmaktadır.

Dersliklere ait ders programı ve dersi alan öğrenci sayıları ortamdaki gaz dağılımı incelemek amaçlı senaryo olarak kullanılmıştır. Dersliklere ilişkin senaryo bilgileri schedule\_table isimli tabloda tutulmaktadır. Tablo 5.7.'de verilen sütunlar sırasıyla tablo numarası, derslik numarası, ders günü, dersin numarası, dersi alan toplam öğrenci sayısı, dersin başlangıç ve bitiş zamanlarını ifade etmektedir.

Tablo 5.7. schedule\_table tablosu

Sütun	Türü	Bağlantı verilen
id (Birincil)	int (11)	
class_id (İkincil)	int (11)	building_table->id
day_id (İkincil)	int (11)	day_table->id
course_id (İkincil)	int (11)	course_table->id
student_number	int (3)	
start_time	Time	
end_time	Time	

- id: her bir durum bilgisini tek olarak belirten birincil anahtar alanıdır.
- class\_id: derslik numarasını,
- day\_id: gün numarasını,
- course\_id: ders numarasını,
- student\_number: dersi alan öğrenci sayısını,
- start\_time: dersin başlangıç saatini,
- end\_time: dersin bitiş saatini tutmaktadır.

Derslikteki kirletici gazların ölçüm ve tahmin edilen konsantrasyon değerlerinin yanı sıra ölçülen sıcaklık ve nem değerleri result\_table isimli tabloda tutulmaktadır. Tablo 5.8.'de verilen sütun isimleri sırasıyla tablo numarası, derslik numarası, gün, ölçüm zamanı, ölçülen sıcaklık ve nem, ölçülen ve tahmin edilen CO<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> konsantrasyonları, kararlı hal CO<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> konsantrasyonları, gerekli minimum soluma bölgesi dış hava oranı ve kişi başı dış ortam havalandırma oranıdır.

Tablo 5.8. result\_table tablosu

Sütun	Türü	Bağlantı verilen
id (Birincil)	int (11)	
class_id (İkincil)	int (11)	building_table->id
day_id (İkincil)	int (11)	day_table->id
measurement_time	datetime	
measured_temp	Float	
measured_rh	Float	
measured_CO2	Float	

Tablo 5.8. (Devamı)

Sütun	Türü	Bağlantı verilen
measured_O2	float	
predicted_CO2	float	
predicted_O2	float	
Cf_CO2	float	
Cf_O2	float	
out_min_vent_rate	float	
out_vent_rate_person	float	

- id: her bir durum bilgisini tek olarak belirten birincil anahtar alanıdır.
- class\_id: derslik numarasını,
- day\_id: gün numarasını,
- measurement\_time: ölçüm yapılan zamanı,
- measured\_temp: ölçülen sıcaklık değerini ( $^{\circ}\text{C}$ ),
- measured\_rh: ölçülen bağıl nemi (%),
- measured\_CO2: ölçülen  $\text{CO}_2$  konsantrasyonunu ( $\text{g}/\text{m}^3$ ),
- measured\_O2: ölçülen  $\text{O}_2$  konsantrasyonunu ( $\text{g}/\text{m}^3$ ),
- predicted\_CO2: tahmin edilen  $\text{CO}_2$  konsantrasyonunu ( $\text{g}/\text{m}^3$ ),
- predicted\_O2: tahmin edilen  $\text{O}_2$  konsantrasyonunu ( $\text{g}/\text{m}^3$ ),
- Cf\_CO2: söz konusu zaman için kararlı hal  $\text{CO}_2$  konsantrasyonunu ( $\text{g}/\text{m}^3$ ),
- Cf\_O2: söz konusu zaman için kararlı hal  $\text{O}_2$  konsantrasyonunu ( $\text{g}/\text{m}^3$ ),
- out\_min\_vent\_rate: derslik için gerekli minimum dış hava oranını ( $\text{m}^3/\text{dk}$ ),
- out\_vent\_rate\_person: kişi başına dış ortam havalandırma oranını ( $\text{m}^3/\text{dk}$ ) tutmaktadır.

Modellenen ortamlara ilişkin başlangıç değerler Tablo 5.9.'da özellikleri verilen "initial\_table" isimli tabloda tutulmaktadır.

Tablo 5.9. initial\_table tablosu

Sütun	Türü	Bağlantı verilen
id (Birincil)	int (11)	
class_id (İkincil)	int (11)	building_table->id
day_id (İkincil)	int (11)	day_table->id
initial_time	datetime	
initial_temp	float	
initial_rh	float	
conc_CO2	float	
conc_O2	float	

- id: her bir durum bilgisini tek olarak belirten birincil anahtar alanıdır.
- class\_id: derslik numarasını,
- day\_id: gün numarasını,
- initial\_time: başlangıç zamanı,
- initial\_temp: başlangıç zamanındaki sıcaklık değerini ( $^{\circ}\text{C}$ ),
- initial\_rh: başlangıç zamanındaki bağıl nemi (%),
- conc\_CO2: başlangıç zamanındaki  $\text{CO}_2$  miktarını ( $\text{g}/\text{m}^3$ ),
- conc\_O2: başlangıç zamanındaki  $\text{O}_2$  miktarını ( $\text{g}/\text{m}^3$ ) tutmaktadır.

Ortam tipi, ortama tipine (derslik, laboratuvar, anasınıfı vs. ) göre  $R_p$  ve  $R_a$  ve ortamın sahip olması gereken kişi yoğunluğu Tablo 5.10.'da verildiği gibi type\_table isimli tabloda tutulmaktadır.

Tablo 5.10. type\_table tablosu

Sütun	Türü	Varsayılan
id (Birincil)	int (11)	
type	varchar (50)	
$R_p$	float	NULL
$R_a$	float	
occupant_density	float	NULL

- id: fakülte içerisinde olması muhtemel her bir bölme tipine ilişkin bilgiyi tek olarak belirten birincil anahtar alanıdır.

- type: bölmenin tipini,
- rp: kişi dış hava oranını ( $m^3/dk$  kişi),
- ra: alan dış hava oranını ( $m^3/dk m^2$ ),
- occupant\_density: bölmenin sahip olması gereken kişi yoğunluğunu tutmaktadır.

Tablo 5.11.'de aktivite ve met seviye bilgilerini tutan activity\_table isimli tabloya ilişkin özellikler belirtilmiştir.

Tablo 5.11. activity\_table tablosu

Sütun	Türü
id (Birincil)	int (11)
name	varchar (50)
Level	float

- id: her bir fiziksel aktiviteyi tek olarak belirten birincil anahtar alanıdır.
- name: aktivitenin adını,
- level: aktivitenin seviyesini (met) tutmaktadır.

Tablo 5.12.'de ortama tipinin yanı sıra ortama ilişkin kaynak bilgilerini (kişi vücut ağırlığı, boyu ve hacmi, aktivite seviyesi) tutan source\_table isimli tabloya ilişkin bilgiler yer almaktadır.

Tablo 5.12. source\_table tablosu

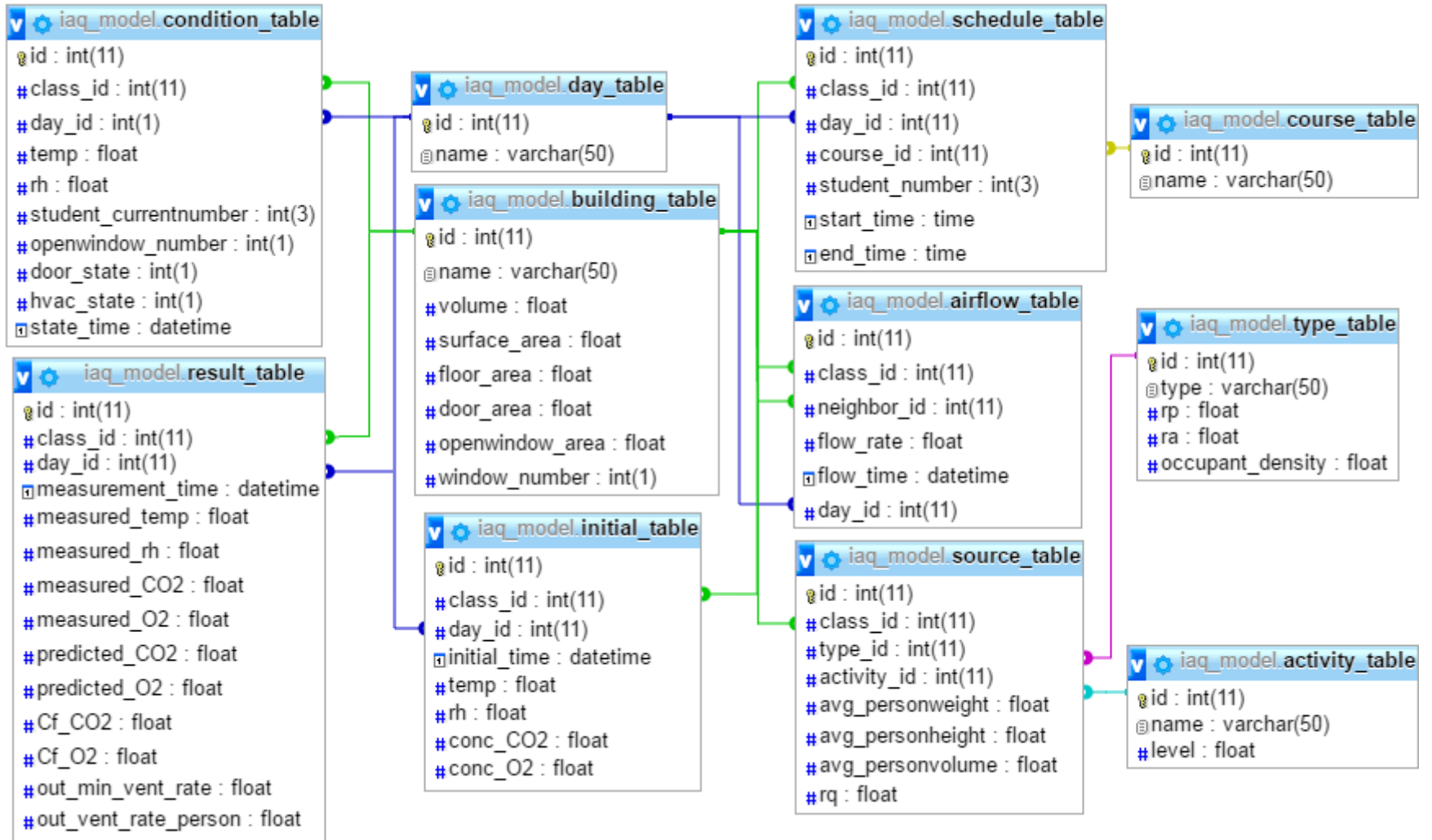
Sütun	Türü	Varsayılan	Bağlantı verilen
id (Birincil)	int (11)		
class_id (İkincil)	int (11)		building_table->id
type_id (İkincil)	int (11)	4	type_table->id
activity_id (İkincil)	int (11)	2	activity_table->id
avg_personweight	float	66	
avg_personheight	float	1,7	
avg_personvolume	float	0,06	
Rq	Float	0,83	

- id: fakülte içerisinde olması muhtemel her bir bölme tipine ilişkin bilgiyi tek olarak belirten birincil anahtar alanıdır.
- class\_id: bölmenin numarasını,
- type\_id: bölmenin tipini,
- activity\_id: bölmede yapılan aktiviteler için ortalama aktivite seviyesini,
- avg\_personweight: bölmedeki öğrencilerin ortalama ağırlığını (kg),
- avg\_personheight: bölmedeki öğrencilerin ortalama boyunu (m),
- avg\_personvolume: bölmedeki öğrencilerin ortalama vücut hacmini (m<sup>3</sup>),
- rq: solunum oranını tutmaktadır.

Dersliklerde ve koridorda gün boyunca değişen öğrenci sayısının yanı sıra havalandırma parametrelerinin değişimine göre CO<sub>2</sub> gazının değişimi incelenmiştir. Modelleme işleminde öğrenci sayısı değişiminde dikkate alınan ve senaryo dosyası olarak kullanılan ders programı EK 3'te yer alan tablolarda verilmiştir.

### 5.3.2. Veritabanı diyagramı

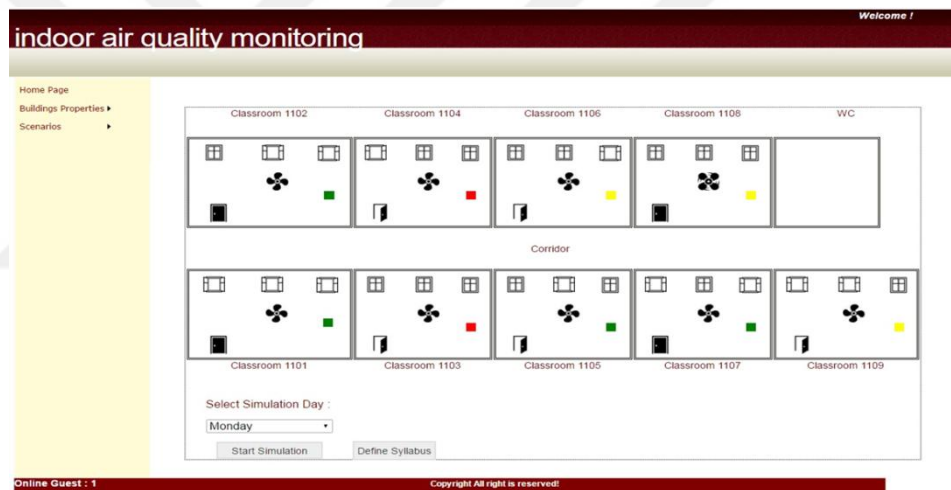
"iaq\_model" veritabanında bulunan tablolar, anahtar alanlar ve tablolar arasındaki ilişkiler Şekil 5.5'te görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 5.5. Veritabanı bağlantı şeması

#### 5.4. Tahminler ve Benzetim

Modelleme işlemi sonrasında üretilen tahmin değerleri, Şekil 5.6.'daki gibi bir simülasyon vasıtasıyla grafik ara yüzünde gösterilebilmekte, bir model üzerinde daha kısa sürede değişiklik yapılabilen ve model tekrar tasarlanıp test edilebilmektedir. Böylece kullanıcı hem daha az kaynak tüketmekte hem de ortamda bulunan kirleticilerin dağılımını gözlemleyerek ortamdaki kişilerin konforu, sağlığı ve verimliliği gerekli önlemleri önceden alabilecektir. Simülasyon yardımıyla ayrıca kabul edilebilir İOHK'nin sağlanması için uygun havalandırma ve bina tasarımları geliştirilebilir.



Şekil 5.6. Derslikler için oluşturulmuş bir simülasyon örneği (Yalçın ve ark., 2017)

Tez kapsamında, model olarak seçilen binadaki dersliklerin matematiksel modellemesinin yanında, bu ortamlara uygun veri üreten yazılım temelli bir simülasyon geliştirilmiştir. Bu simülasyon, matematiksel modelleme denklemleri yardımıyla ilgili ortama ait yapay verileri gerçeğe en yakın bir şekilde üretmektedir. Bu sayede, modelleme sırasında ortaya konan parametrelere simülasyon üzerinde farklı değerler verilerek sanal bir test ortamı elde edilmiştir. Bu sanal test ortamı, öğrencilerin sağlığı ve verimliliği açısından gerekli havalandırma miktarının belirlenmesine yardımcı olacaktır. Sanal ortam simülasyonu ile karmaşık gaz sensör sistemlerini yazılım ortamında geliştirmek, optimize etmek mümkün olacaktır.

## 5.5. Ölçüm Düzenegi

Binaların tasarım aşamasında hava kalitesini tahmin etmek için, ısıl veya diğer yüklerin kestirilmesi ile aynı şekilde fiziksel bir (kütle denge) hesaplama yapılmalıdır. Kirletici konsantrasyon seviyelerinin ölçümü ve bu seviyelerin kişisel değerlendirilmesi, binaların tasarım, kurulum ve kullanımından sonra meydana gelir. (Chamberlin ve ark., 1995). Bu nedenle hesaplama işleminin doğru bir şekilde yapılması büyük önem arz etmektedir.

İOHK modellemesi ile elde edilen tahmin sonuçlarının gerçeğe yakın olup olmadığını görmenin yolu, kurgulanan model ile aynı koşullara sahip ölçümlerden geçmektedir. İç hava kalitesini ölçmek ve kontrol etmek amacıyla iki yöntem uygulanmaktadır: ortamın CO<sub>2</sub> seviyesi ölçümü ve karışım gaz ölçümüdür (ASHRAE, 1999; Açıkgöz ve ark., 2013). Bu çalışmada, iç ortam havasında yer alan CO<sub>2</sub> gazının belli bir zaman aralığındaki konsantrasyon seviyesinin tahmin edilmesi amaçlandığı için ortamın CO<sub>2</sub> seviyesi ölçülmüştür.

Dersliklerdeki sıcaklık, nem ve CO<sub>2</sub> gazı ölçümleri için Şekil 5.7'de gösterilen AZ 77535 CO<sub>2</sub>/Temp./RH Meter cihazı (bk. EK 2) kullanılarak alınmıştır. Cihazın doğruluk değerleri, 0~2000 ppm için  $\pm 50$  ppm + %5 ve 0~5000 ppm için  $\pm 30$  ppm + %5'dir.



Şekil 5.7. Ölçümlerde kullanılan CO<sub>2</sub>&Temp.&RH metre cihazı

Cihaz, herhangi bir ölçüm işlemine başlamadan kendi kendini kalibre etme özelliğine sahiptir. Cihazın LCD ekranında ölçülen zamana ilişkin ortamın CO<sub>2</sub>, sıcaklık ve nem değerleri gösterilir ve/veya RS232 portu üzerinden çıkışlar yapar. Dersliklerde yapılan sürekli ölçümlerde bu çıkışlar, cihazın kendi yazılımı kullanılarak ya da geliştirilmiş küçük bir yazılım ile periyodik olarak bilgisayar ortamına kaydedilmiştir.

### **5.6. Değerlendirme**

Bir ortamın İOHK'nin değerlendirilmesinde kirletici eşik değerleri için literatürde çoğunlukla US EPA ve ASHRAE standartları kullanılmaktadır. Örneğin "Kimyasal Maddelerle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmelik"te de bu standartlar kullanılmıştır. Bu standartlar arasında çelişki görülmediğinden çalışmada EPA/ASHRAE kullanılmıştır.

## BÖLÜM 6. UYGULAMA SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

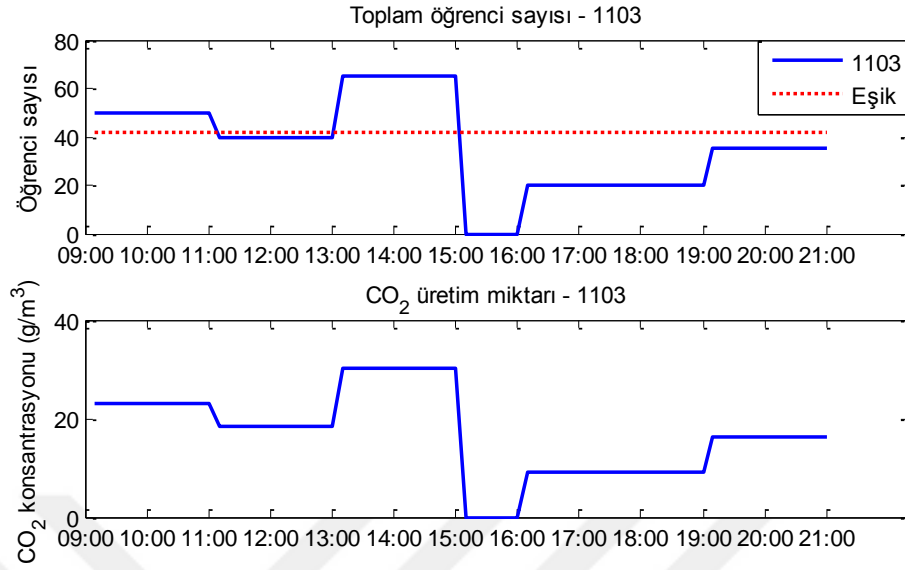
Bu çalışmada geliştirilen modelleme yazılımı kullanılarak Sakarya Üniversitesi Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi 1. Kat derslikleri modellenmiş ve modellenen derslikler için elde edilen tahmin sonuçları, dersliklerde farklı günlerde yapılan uzun süreli gerçek ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak yazılımın doğruluğu test edilmiştir.

Sağlıklı ve konforlu bir eğitim için dersliklerde olması gereken maksimum öğrenci sayısı, Tablo 4.4. yardımı ile hesaplanarak Tablo 6.1.'de verilmiştir.

Tablo 6.1. Derslikler için maksimum öğrenci sayıları

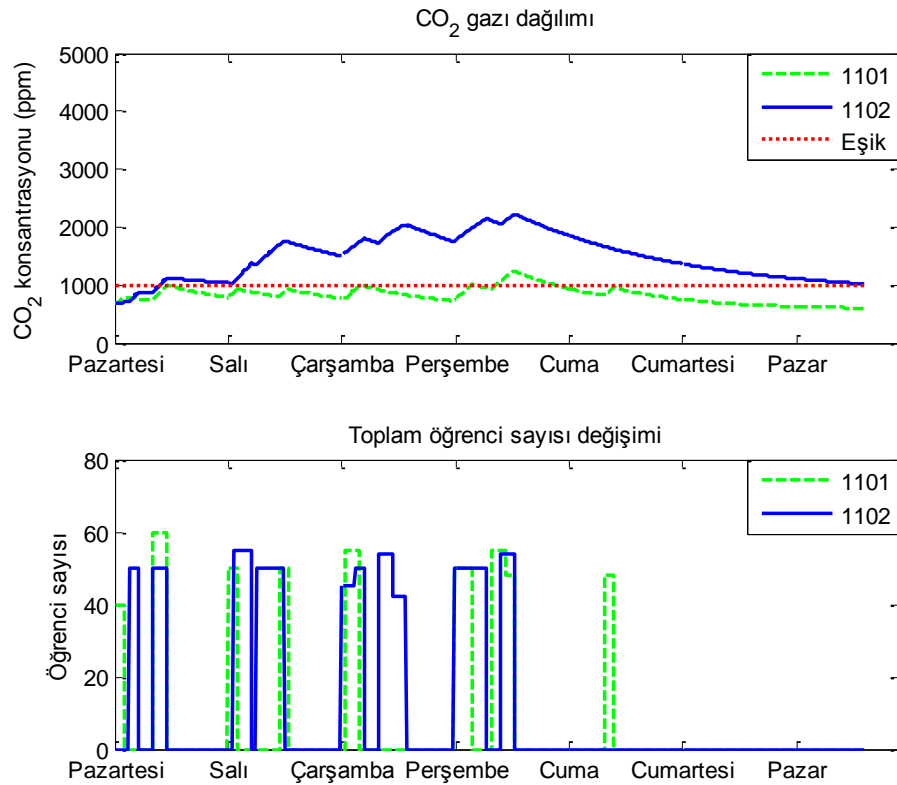
Derslik	Öğrenci sayısı
1101 - 1102	66
1103 - ... - 1108	42
1109	49

Ortamdaki öğrenci sayısı ile üretilen toplam CO<sub>2</sub> miktarının değişimi arasındaki doğrusal ilişki, 1103 nolu derslik için elde edilen Şekil 6.1.'deki grafikte gösterilmiştir. Dersliklerdeki öğrenci sayısı, ders programına göre yoklama listelerinden elde edilmiştir.

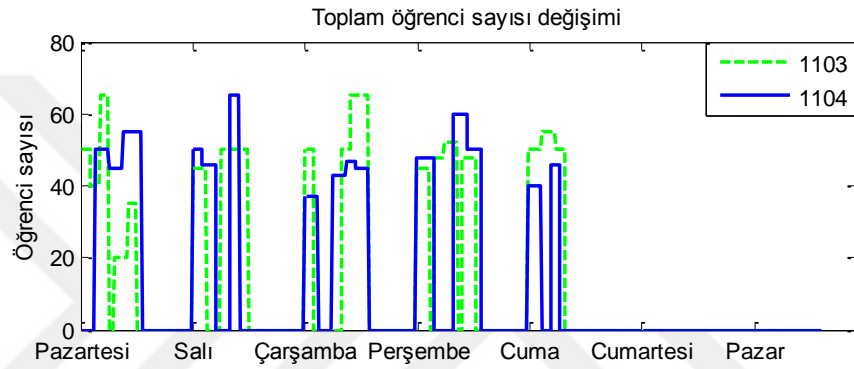
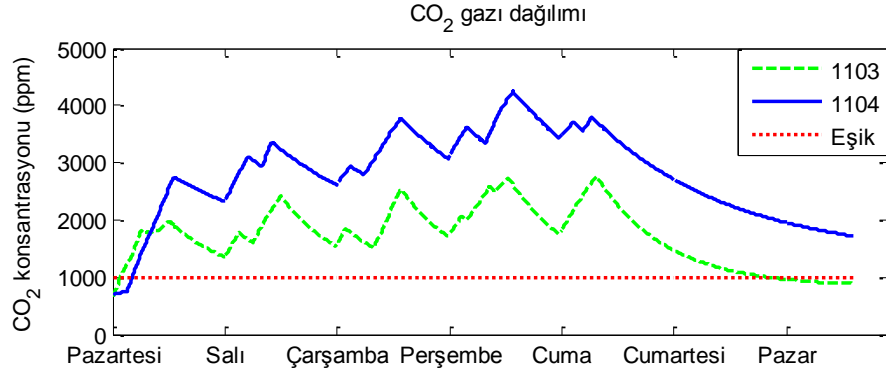
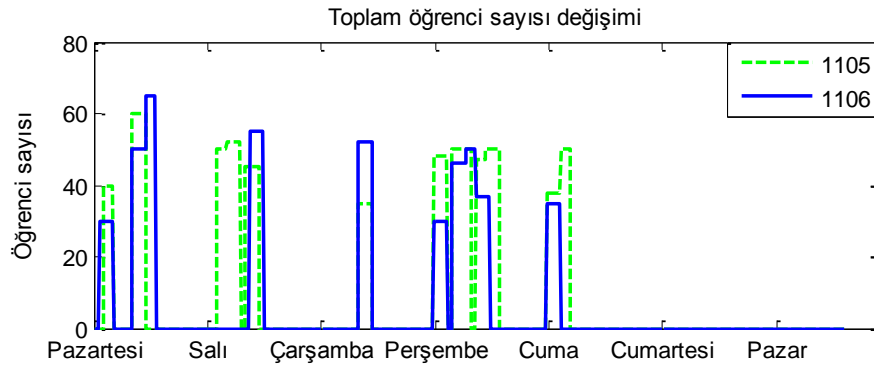
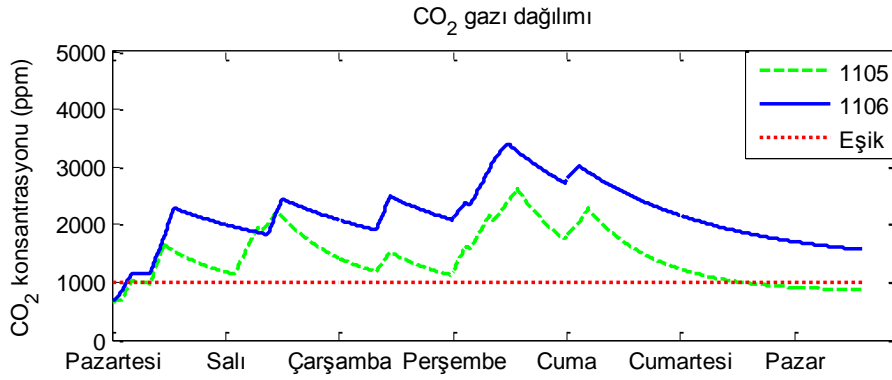


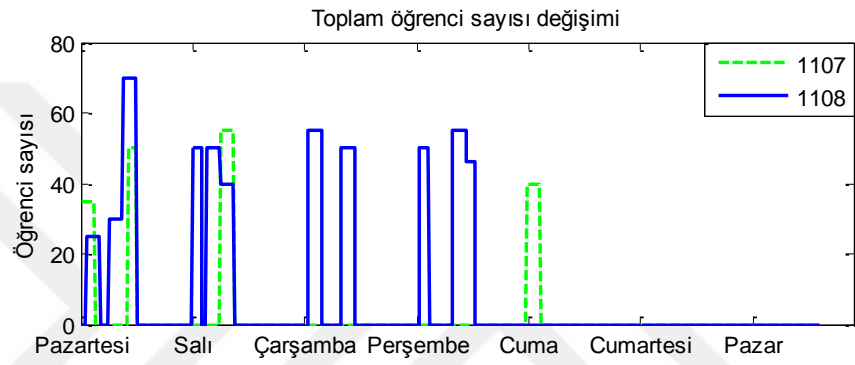
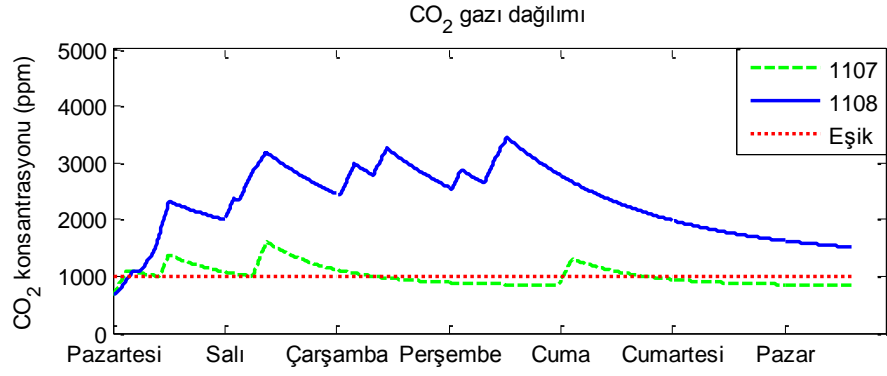
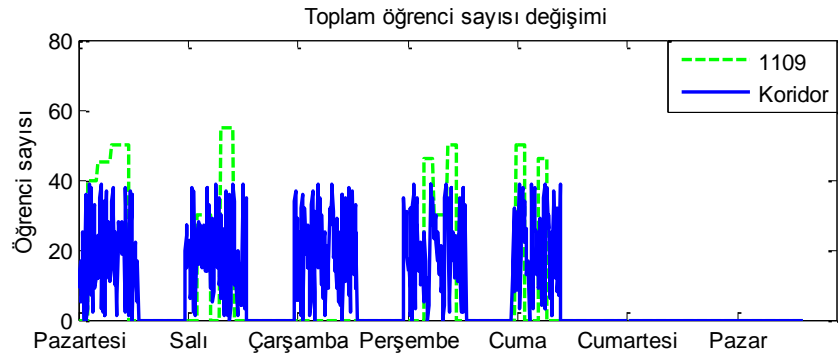
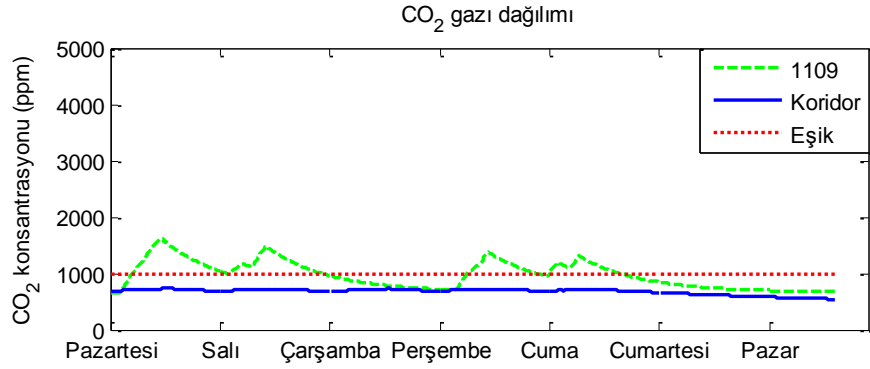
Şekil 6.1. 1103 nolu derslikteki öğrenci sayısına göre CO<sub>2</sub> üretim miktarı değişimi (g/m<sup>3</sup>)

Modelleme sonucunda elde edilen 9 adet derslik ve 1 adet koridora ilişkin bir haftalık tahmin grafikleri, ikişerli gruplandırılarak Şekil 6.2., Şekil 6.3., Şekil 6.4., Şekil 6.5. ve Şekil 6.6.'da sunulmuştur.



Şekil 6.2. 1101 ve 1102 nolu dersliklerdeki CO<sub>2</sub> dağılımı (ppm)

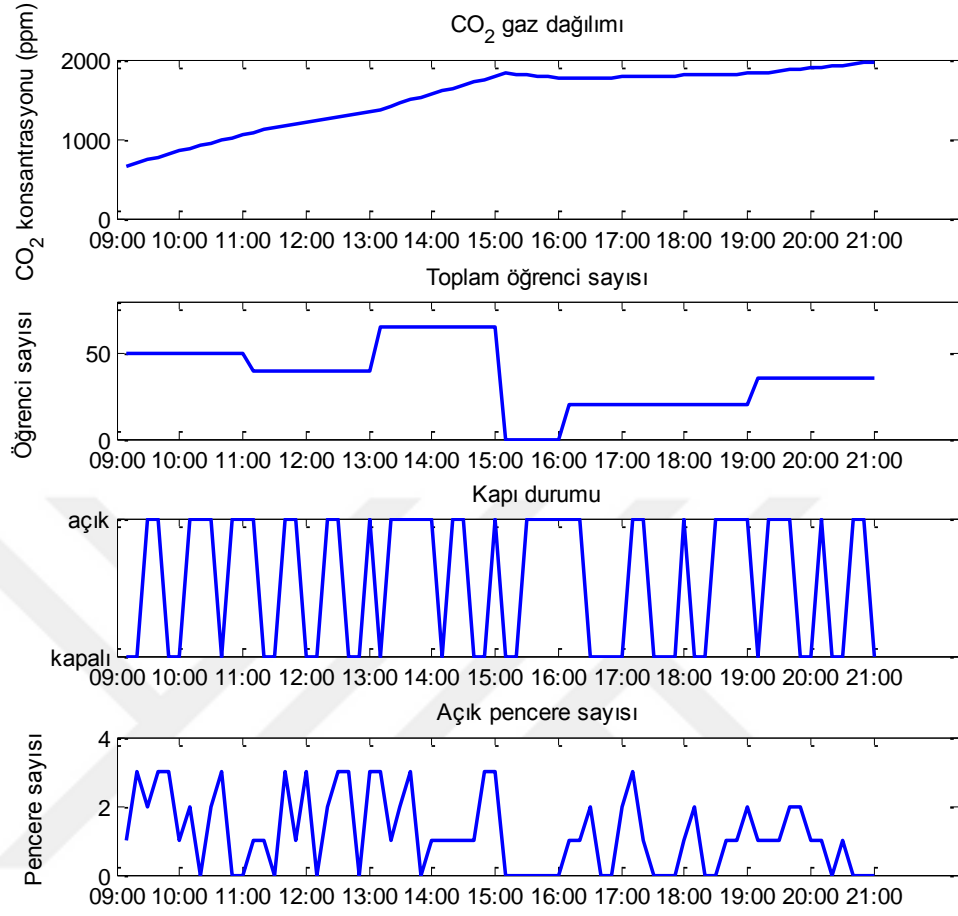
Şekil 6.3. 1103 ve 1104 nolu dersliklerdeki CO<sub>2</sub> dağılımı (ppm)Şekil 6.4. 1105 ve 1106 nolu dersliklerdeki CO<sub>2</sub> dağılımı (ppm)

Şekil 6.5. 1107 ve 1108 nolu dersliklerdeki CO<sub>2</sub> dağılımı (ppm)Şekil 6.6. 1109 nolu derslikteki ve koridordaki CO<sub>2</sub> dağılımı (ppm)

1103 nolu derslik için Pazartesi gününe ilişkin ders programı Tablo 6.2.'de verilmiştir. 12 saatlik zaman dilimi için 1103 nolu derslikteki öğrenci sayısı, kapı ve pencere durumlarına göre elde edilen CO<sub>2</sub> gazı dağılım grafiği Şekil 6.7.'de sunulmuştur.

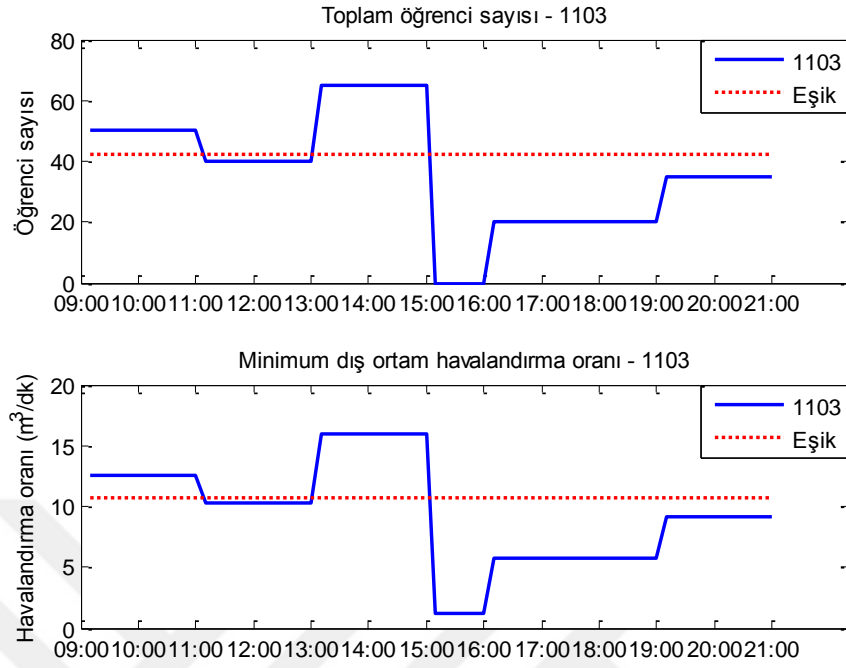
Tablo 6.2. 1103 nolu derslik Pazartesi günü ders programı

Gün	Saat	Ders Adı
Pazartesi	09:00 -10:00	Nesneye Dayalı Programlama
	10:00-11:00	Nesneye Dayalı Programlama
	11:00-12:00	Fizik 1
	12:00-13:00	Fizik 1
	13:00-14:00	Nesneye Dayalı Programlama
	14:00-15:00	Nesneye Dayalı Programlama
	15:00-16:00	
	16:00-17:00	Gerçek Zamanlı Ağ Sistemleri
	17:00-18:00	Gerçek Zamanlı Ağ Sistemleri
	18:00-19:00	Gerçek Zamanlı Ağ Sistemleri
	19:00-20:00	Bilgisayar Mimarisi
	20:00-21:00	Bilgisayar Mimarisi



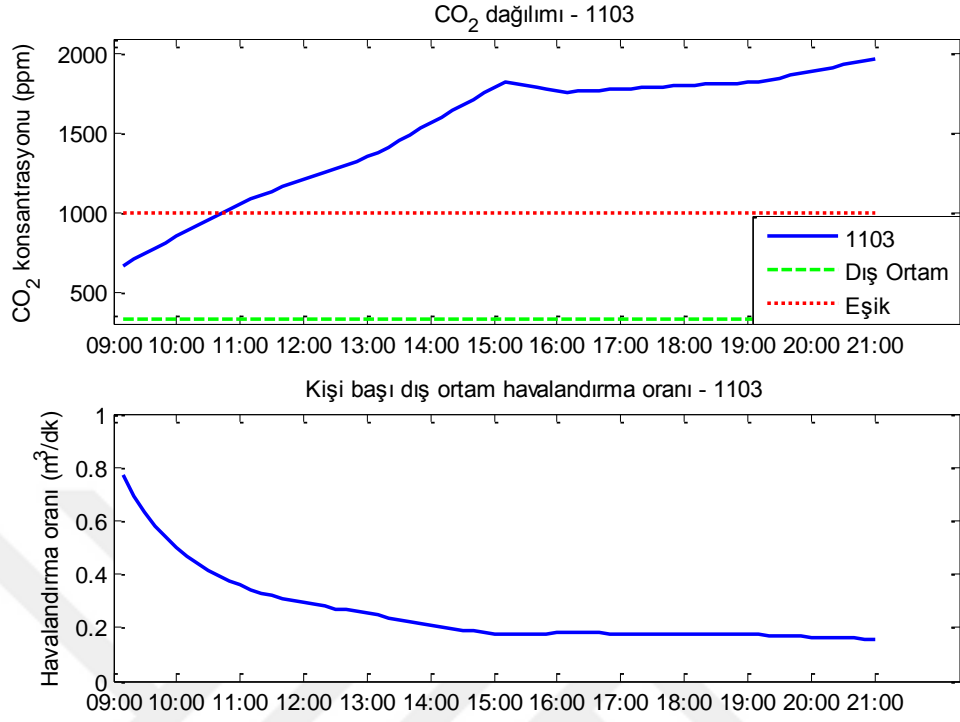
Şekil 6.7. 1103 nolu dersliğe ilişkin öğrenci sayısı, kapı ve pencere durumlarına göre CO<sub>2</sub> dağılımı (ppm)

1103 nolu derslikteki öğrenci sayısı değişimine göre belirlenen minimum dış ortam havalandırma ihtiyacı  $V_b$ , Şekil 6.8.'de gösterilmektedir.

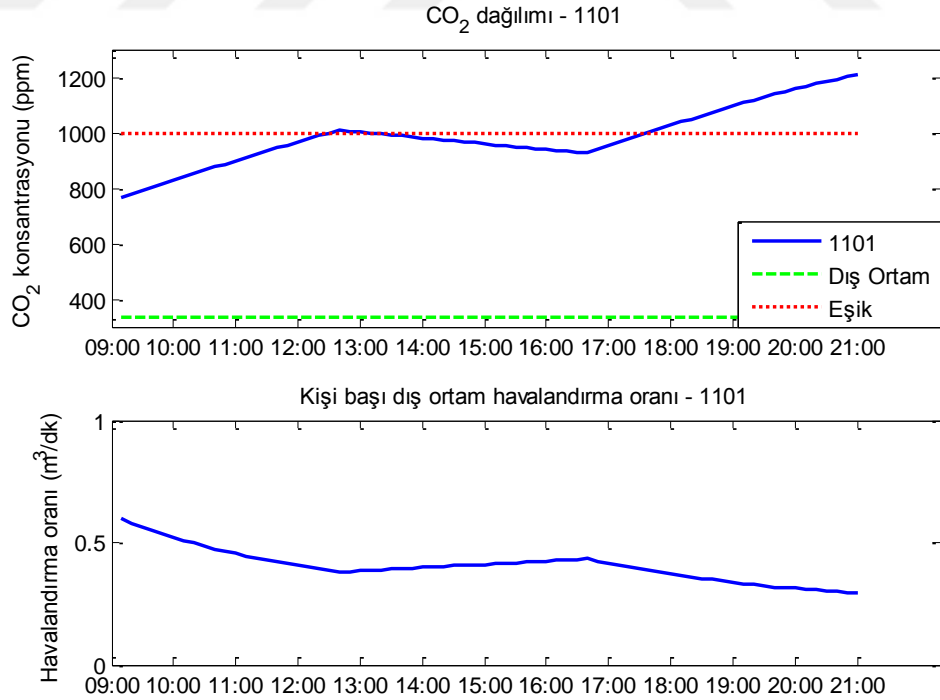


Şekil 6.8. 1103 nolu derslik için minimum dış ortam havalandırma ihtiyacı  $V_b$

Dış ortam kirletici miktarı sabit tutulduğunda kişi başına düşen havalandırma oranı  $Q_0$ , iç ortam kirletici konsantrasyonu ile ters yönde değişiklik göstermektedir. Pazartesi günü 1103 ve Perşembe günü 1101 nolu derslikler için sırasıyla Şekil 6.9. ve Şekil 6.10.'da sunulmuş grafikler, bu durumu örneklemektedir.



Şekil 6.9. 1103 nolu dersliğe ilişkin kişi başına düşen havalandırma oranı  $Q_0$  değişimi



Şekil 6.10. 1101 nolu dersliğe ilişkin kişi başına düşen havalandırma oranı  $Q_0$  değişimi

Gazın konsantrasyonları ölçülürken anlık ve uzun süreli ölçümler yapılmaktadır. Ölçümün yapıldığı anlık zaman dilimi anlık ölçümde 8-15 dk arasında önemlidir, uzun süreli ölçümlerde ise 8 saatten 1 haftaya kadar değişmektedir (Robin ve ark., 2007; Akal, 2013). Modellemesi yapılan Sakarya Üniversitesi Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi'nin 1. katındaki dersliklerde 10 dk olarak belirlenen süre aralıklarında sıcaklık, nem ve CO<sub>2</sub> ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler için AZ 77535 CO<sub>2</sub>/Temp./RH Meter cihazı kullanılmıştır.

Öğrencilerin yaptıkları fiziksel aktiviteler için ortalama met seviyesi 1,1 alınmış, ortalama fiziksel özellikleri 1,7 m, 66 kg ve 0,06 m<sup>3</sup> hacim olarak belirlenmiştir. Solunum katsayısı RQ ise 0,83 seçilmiştir.

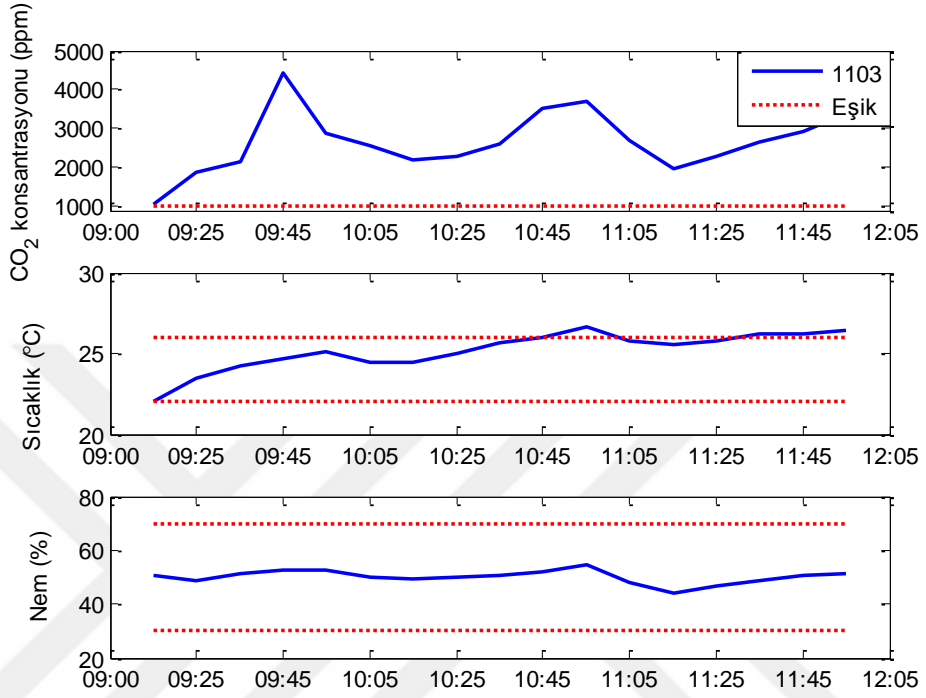
Derslikler başlangıç iç ortam CO<sub>2</sub> konsantrasyonu, dersliklerdeki ölçümler sırasındaki dış ortam CO<sub>2</sub> konsantrasyonu ve derslikler ile koridordaki CO<sub>2</sub> konsantrasyonu Tablo 6.3.'te verilmiştir. Ölçümler sırasındaki cihaz okumaları ise EK 4'te yer alan tabloda sunulmuştur.

Tablo 6.3. Dersliklerde başlangıçta ölçülen CO<sub>2</sub>, sıcaklık ve nem değerleri

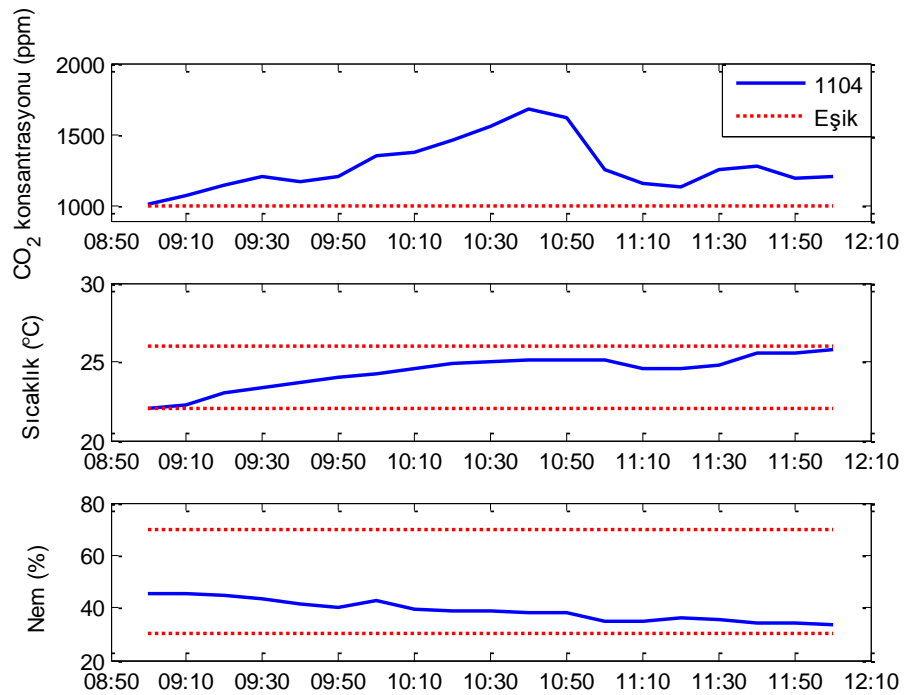
Derslik	Ortam tipi	CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	Sıcaklık (°C)	Nem (%)
1103	Derslik	1077	22	50,6
	Dış ortam	431	18,6	50,8
	Koridor	560	19,2	49,8
1104	Derslik	1014	22	45,2
	Dış ortam	667	21,4	35,6
	Koridor	971	24,1	42,9
1105	Derslik	1005	21,4	47,1
	Dış ortam	776	22,6	34
	Koridor	854	21	43,2

Ölçümler esnasında dersliklerde kapı ve pencerelerin çoğunlukla kapalı tutulmuştur. 1103, 1104 ve 1105 nolu dersliklerde hafta içi farklı günlerde yapılan ölçümlere

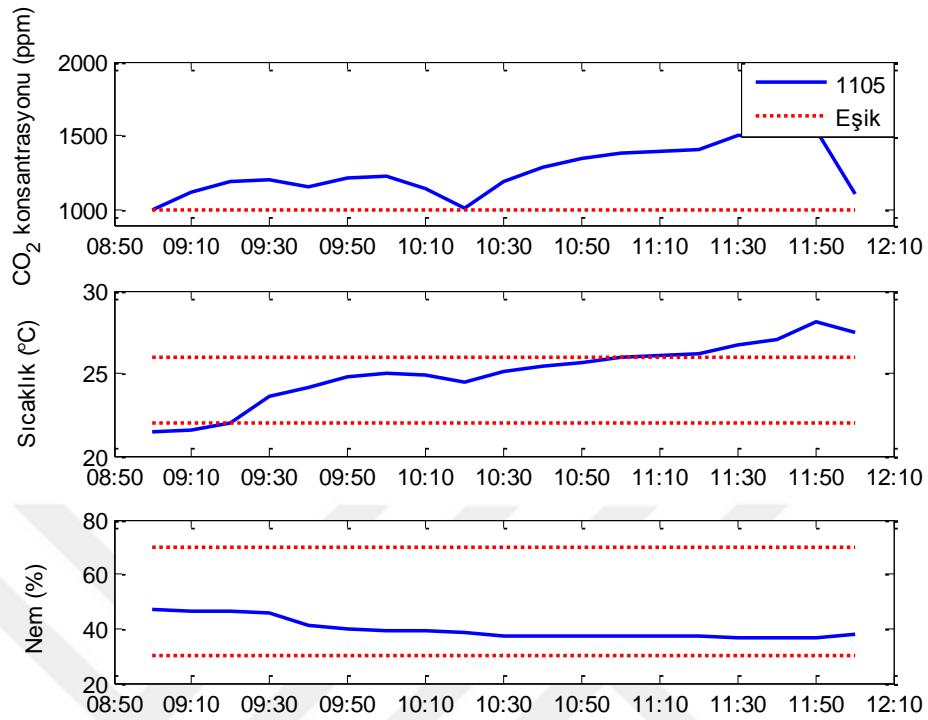
ilişkin CO<sub>2</sub> gazı, sıcaklık ve bağıl nem değişim grafikleri sırasıyla Şekil 6.11., Şekil 6.12. ve Şekil 6.13.'te verilmiştir.



Şekil 6.11. 1103 nolu dersliğe ilişkin CO<sub>2</sub>, sıcaklık ve nem ölçümleri



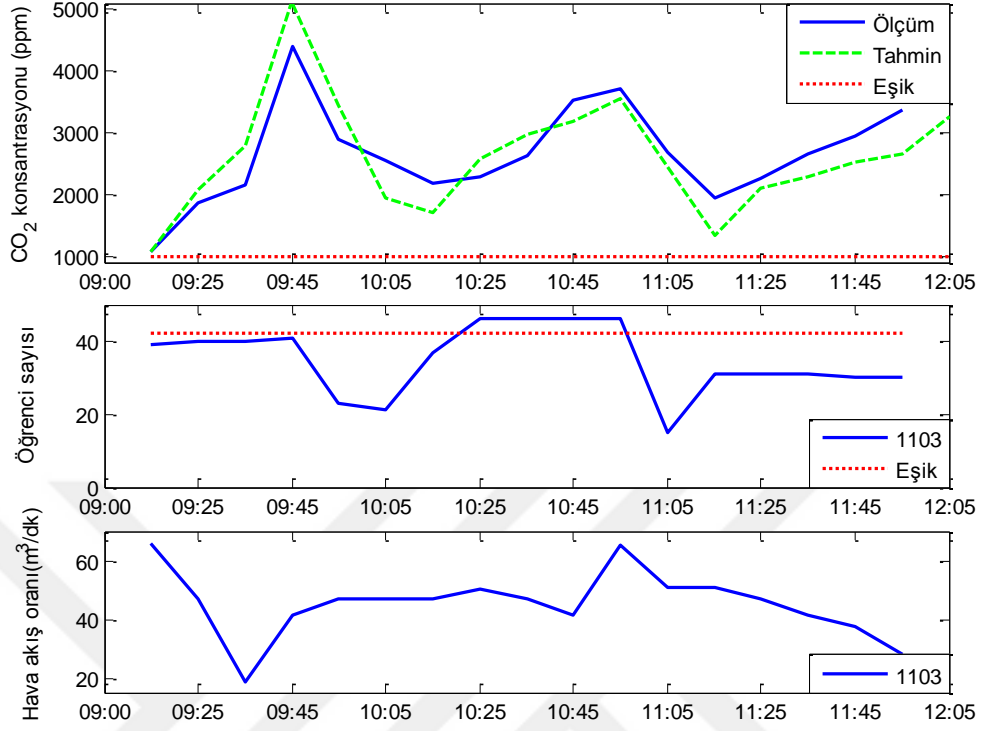
Şekil 6.12. 1104 nolu dersliğe ilişkin CO<sub>2</sub>, sıcaklık ve nem ölçümleri



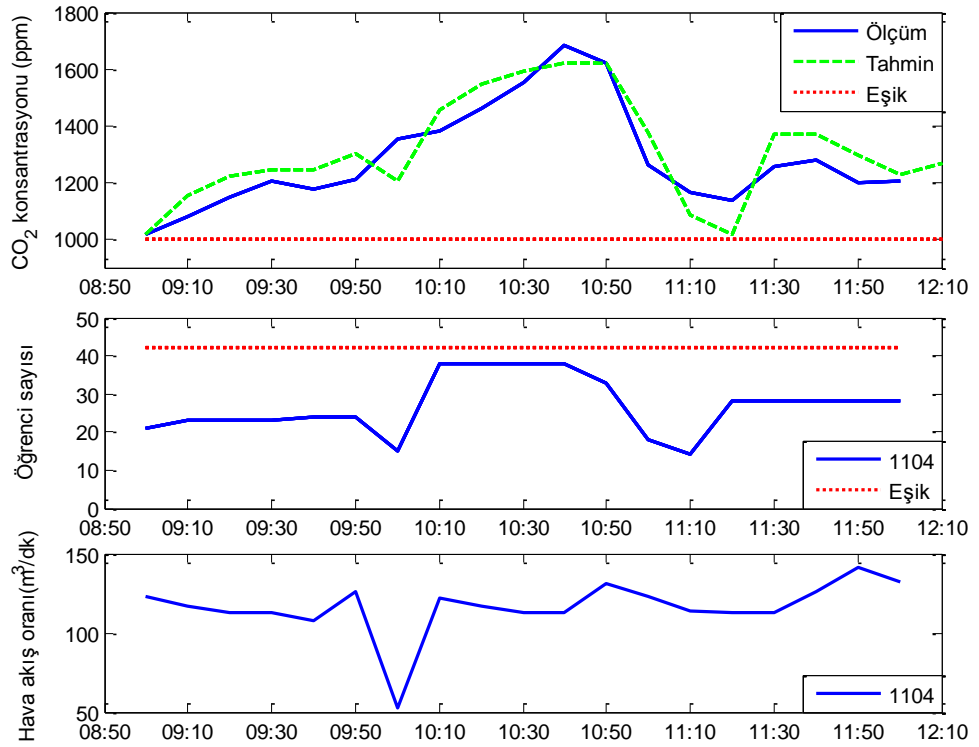
Şekil 6.13. 1105 nolu dersliğe ilişkin CO<sub>2</sub>, sıcaklık ve nem ölçümleri

Ölçümlerde, dersliklerde CO<sub>2</sub> konsantrasyonlarında belirgin bir değişiklik gözlenmiştir. Derslikler için ortalama sıcaklık değeri 24,85 °C ve nem değeri de ortalama %42,66 ölçülmüştür. Ölçümler boyunca dersliklerin büyük oranda ortalama konfor şartlarını sağladığı görülmüştür.

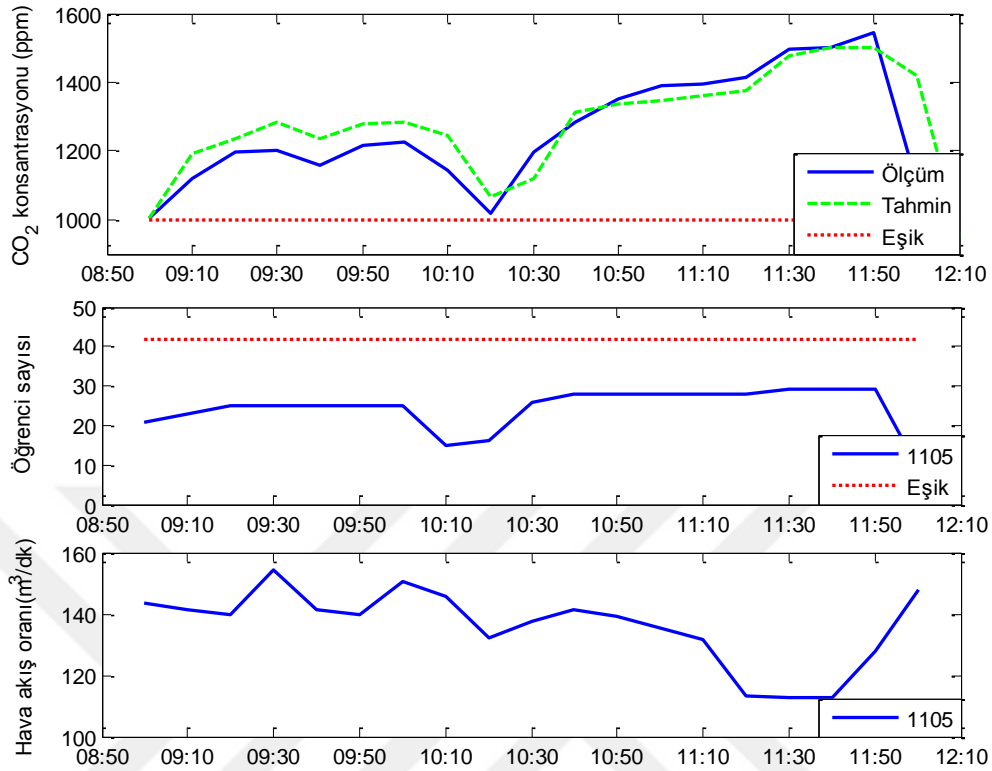
1103, 1104 ve 1105 nolu dersliklerdeki hacimsel hava akış oranı ve öğrenci sayısı değişimine göre CO<sub>2</sub> model tahmin sonuçları sırasıyla Şekil 6.14., Şekil 6.15. ve Şekil 6.16.'da ölçüm sonuçları ve CO<sub>2</sub> eşik değeri ile birlikte karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 6.14. 1103 nolu derslikteki hacimsel hava akış oranı ve öğrenci sayısı değişimine göre tahmin edilen CO<sub>2</sub> konsantrasyonu



Şekil 6.15. 1104 nolu derslikteki hacimsel hava akış oranı ve öğrenci sayısı değişimine göre tahmin edilen CO<sub>2</sub> konsantrasyonu



Şekil 6.16. 1105 nolu derslikteki hacimsel hava akış oranı ve öğrenci sayısı değişimine göre tahmin edilen CO<sub>2</sub> konsantrasyonu

Benzetim sonuçları ile ölçümler arasında yakın bir ilişki gözlenmiştir. Sonuçlar arasındaki farklılıklar; cihaz konumu, ölçüm hataları ve/veya hesaplamada öğrenci profili için kullanılan ortalama özellik değerlerinden kaynaklı olabilir.

Ölçümler esnasında dersliklerde yeterince havalandırılma yapılmaması ve dersliklerdeki öğrenci sayısının artması ile ortamdaki CO<sub>2</sub> miktarının çok yüksek seviyelere (standart değer üzeri, 1000 ppm) ulaştığı gözlenmiştir. Bu sebeple, ders boyunca mutlaka pencerelerin ya da kapının belirli zaman aralıklarında açılması önerilmektedir.

## BÖLÜM 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bir insan açlığa haftalarca, susuzluğa ise birkaç gün dayanabilirken nefes almadan sadece birkaç dakika yaşayabilir. Bu durum, insanlar için havanın ne kadar hayati bir ihtiyaç olduğunu gösterir.

Sağlıklı, konforlu, verimli ve güvenli bir yaşam için soluduğumuz havanın temiz olması başka bir ifade ile kabul edilebilir İOHK'nin sağlanması gerekir. Yeterli miktarda temiz havanın içinde bulunduğumuz ortama verilmesi, ortamda bulunan kirleticilerin kontrol edilmesi ve ısı konforunun sağlanması için iç hava kalitesinin izlenip kontrol edilmesi gerekmektedir.

Okullarda en önemli CO<sub>2</sub> kaynağı, insan metabolik üretimidir. Kişinin ürettiği CO<sub>2</sub> miktarı, kişinin fiziksel özelliklerinin (yaş, kilo, boy gibi) yanı sıra aktivite seviyesine bağlı olarak değişmektedir. Geliştirilen model yardımı ile bu değerler üzerinde kolaylıkla değişiklikler yaparak ilkokul, ortaokul ve üniversite binaları ve çeşitli bina bölümleri (amfi, derslik, çok amaçlı salon gibi) için de uygun veri üretmesini sağlamak mümkündür. Model, dinamik yapıya sahip olmasının yanında daha az veri girişi gerektirmektedir.

Öğrencilerin derslerdeki performansının artmasında okul ortamının konfor koşullarını sağlaması ve yeterli oranda havalandırılmasının olumlu etkisi vardır. Bu tez çalışmasının diğer önemli bir çıktısı da daha iyi bir eğitim ortamı oluşturmak için ortam değişkenlerinin gerekli iç ortam seviyelerini aşp aşmadığını kontrol etmek için üniversite yöneticileri tarafından kullanılabilmesidir. Herhangi bir çevre sağlığı ve/veya halk sağlığı uzman görüşüne gerek kalmadan kirleticilerin ortamdaki insan sağlığını etkileyecek sınırlar içerisinde olup olmadığını gözlemleyebilecektir.

Tez kapsamında geliştirilen model test edilmesi ve doğrulanması amacıyla seçilen Sakarya Üniversitesi Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi'nin yanı sıra, farklı özellikteki ve seviyedeki okul binalarının İOHK performansının belirlenmesinde ve İOHK problemlerinin çözümünde kullanılabilir. Ortamdaki kişi sayısının azaltılması mevcut durum için çözüm olabilirken bunun mümkün olmadığı durumlarda uygun havalandırma sisteminin kurulması gerekebilir.

Amaca uygun geliştirilecek simülatlara (modelleme yazılımı ile farklı konumlarda olsalar bile) kolaylıkla entegre edilebilir, böylece elde edilen sayısal değerler grafik ara yüzlerle çevrim içi analiz edilebilir. Ayrıca binaların tasarım aşamasında; bina bölümlerinin alanlarının, bölümler için maksimum kişi sayısının ve havalandırma oranlarının standartlara uygun olarak belirlenmesi için gerekli planlamalar model yardımıyla yapılabilir. Havalandırma kontrolü ile enerji tasarrufu ve sağlıklı yaşam ortamları oluşturma konusunda akıllı kontrol sistemlerinin geliştirilmesine yardımcı olabilir.

Bu tez çalışmasında gaz sensörleri ve ölçüm sistemleri için gerçeğe yakın ortam verisi üretmek amacıyla geliştirilmiş olan model, ölçüm yapabilmenin veya ölçüm sistemi geliştirmenin mümkün olmadığı zehirli ve patlayıcı gazların bulunduğu ortamların modellenmesi ve analizi için uyarlanabilir. Ayrıca model sonuçları kullanılarak sensörlerin yerleştirilmesinin planlaması yapılabilir.

Tez kapsamında 1 adet SCI-E makale, 5 adet uluslararası ve 1 adet ulusal tam metin bildiri, 2 adet uluslararası poster bildiri yapılmıştır (bk. EK 5).

## KAYNAKLAR

- Açıköz, A., Baykara, B., Uysal, N. 2013. Bir Üniversitedeki Adölesan ve Erişkinlerde Hasta Bina Sendromu Belirtilerinin CO<sub>2</sub> ile İlişkisinin İncelenmesi. Hava Kirliliği Araştırmaları Dergisi, 2: 21-27.
- Adhikari, B., Majumdar, S. 2004. Polymers in Sensor Applications. Prog. Polym. Sci., 29(7): 699-766.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2012. ToxFAQs for Radon. <http://www.atsdr.cdc.gov/toxfaqs/tfacts145.pdf>, Erişim Tarihi: 25.04.2016.
- Ağca, B. 2015. İç Hava Kalitesi ve Hasta Bina Sendromu. Dışişleri Bakanlığı Yayınları, Uluslararası Ekonomik Sorunlar Dergisi, 16.
- Akal, D. 2013. İç Ortam Hava Kirliliği ve Çalışanlara Olumsuz Etkileri. ÇSGB Çalışma Dünyası Dergisi, 1(1): 112-119.
- Akamatsu, T., Itoh, T., Izu, N., Shin, W. 2013. NO and NO<sub>2</sub> Sensing Properties of WO<sub>3</sub> and Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Based Gas Sensors. Sensors, 13: 12467-12481.
- Altın, S. H. 2015. İç Ortam Hava Kirliliğinin Doğurabileceği Sağlık Etkileri. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Çevre Mühendisliği A.B.D., Samsun, Bitirme Tezi.
- American Cancer Society (ACS), 2015. Radon and Cancer, <http://www.cancer.org/cancer/cancercauses/othercarcinogens/pollution/radon>, Erişim Tarihi: 25.04.2016.
- Aran, A. 2007. Manufacturing Properties of Engineering Materials. ITU Department of Computer Enginnerig, Lecture Notes, 2.
- Arnold, S., Jayjock, M. 2007. Calculating Average Airborne Concentrations from and Generation Rates for Emissions for Constant Short-Lived Sources. The LifeLine Group.
- ASHRAE . 1999. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. ASHRAE Standard 62-1999, Atlanta, USA.
- ASHRAE. 2001. Fundamentals Handbook, CFD Chapter 33, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Atlanta.
- ASHRAE. 2013. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ANSI/ASHRAE Addendum g to ANSI/ASHRAE Standard 55-2010. Atlanta, 2.
- ASHRAE. 2014. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ANSI/ASHRAE Addendum b to ANSI/ASHRAE Standard 55-2013. Atlanta, 1.

- Bagheri, F. 2017. Gas Sensors. <http://slideplayer.com/slide/5305869/>, Erişim Tarihi: 19.06.2017.
- Bai, H., Shi, G. 2007. Gas Sensors Based on Conducting Polymers. *Sensors*, 7: 267-307.
- Bakó-Biró, Z., Clements-Croome, D. J., Kochhar, N., Awbi, H. B., Williams, M. J. 2012. Ventilation Rates in Schools And Pupils' Performance. *Build. Environ.*, 48: 215- 223.
- Balaguru, R. J. B., Jeyaprakash, B. G. 2004. Mimic of a Gas Sensor, Metal Oxide Gas Sensing Mechanism, Factors Influencing The Sensor Performance and Role of Nanomaterials Based Gas Sensors. NPTEL – Electrical & Electronics Engineering – Semiconductor Nanodevices, 1-30.
- Blades, N. 2007. Application of an Air Pollution Modeling Tool to Cultural Heritage Buildings. Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Academy of Sciences of the Czech Republic / European Communities.
- Bluyssen, P. M. 2014. *The Healthy Indoor Environment: How to Assess Occupants' Wellbeing in Buildings*. Routledge, New York, 275-276.
- Brooks, B. O., Davis, W. F. 1991. *Understanding Indoor Air Quality*. CRC Press, US, 39.
- Bulgurcu, H. 2017. Bölüm-1 Havalandırma ve İç Hava Kalitesi. [http://deneysan.com/Content/images/documents/havalandirma-1\\_46167331.pdf](http://deneysan.com/Content/images/documents/havalandirma-1_46167331.pdf), Erişim Tarihi: 12.05.2017.
- Bulut, H. 2007. Konutlarda İç Hava Kalitesi ile İlgili Ölçüm Sonuçlarının Analizi. VIII. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, 415-427.
- Bulut H. 2012. Havalandırma ve İç Hava Kalitesi Açısından CO<sub>2</sub> Miktarının Analizi. *Tesisat Mühendisliği*; 128: 61-70.
- CA (Chrom Academy). 2017. Theory and Instrumentation of GC - Introduction. [http://www.chromacademy.com/lms/sco10/Theory\\_and\\_Instrumentation\\_Of\\_GC\\_Introduction.pdf](http://www.chromacademy.com/lms/sco10/Theory_and_Instrumentation_Of_GC_Introduction.pdf), Erişim Tarihi: 20.06.2017.
- Carslaw, N. 2007. A New Detailed Chemical Model for Indoor Air Pollution. *Atmos. Environ.*, 41: 1164-1179.
- Chaloulakou, A., Mavroidis, I. 2002. Comparison of Indoor and Outdoor Concentrations of CO at a Public School. Evaluation of an Indoor Air Quality Model. *Atmos. Environ.*, 36: 1769-1781.
- Chamberlin, G. A., Myers, D. B., Jones, J. M., Rojeski, P., Singh, H. 1995. Carbon Dioxide and Ventilation Rates. USACERL Technical Report 95/08, 1-38.
- Chen, Z., Lu, C. 2005. Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms. *Sensor Letters*, 3: 274-295.
- Chokshi, J. 2007. Gas Sensors. [eng.umd.edu/~nsw/enpm808b/chokshi.ppt](http://eng.umd.edu/~nsw/enpm808b/chokshi.ppt), Erişim Tarihi: 07.06.2017.

- Clements-Croome, D.J., Awbi, H.B., Bako-Biro, Z., Kochhar, N., Williams, M. 2008. Ventilation Rates in Schools. *Build. Environ.*, 43(3): 362-367.
- Çakır, M. C. 2014. Metal Oksit İnce Filmlerin Gaz Sensörü Uygulamalarının Araştırılması. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Yüksek Lisans Tezi.
- Demokritou, P. 2000. Modeling IAQ and Building Dynamics. in *Indoor Air Quality Handbook*, Spengler, J. D., Samet, J. M., McCarthy, J. F. (Eds.). McGraw-Hill, New York, 57: 1-11.
- Demokritou, P. 2016. Introduction to Indoor Air Quality Modeling. EH522 Indoor Environmental Quality & Health Lecture Notes. Harvard School of Public Health.
- Dereli, G. 2012. Tizanidin HCI, Feniramidol HCI ve İbandronik Asitin Analiz Yöntemleri. Erciyes Üniversitesi Eczacılık Fakültesi, Kayseri, Bitirme Ödevi.
- Durşen, M., Yasun, B. 2012. Yeraltı Madenlerinde Bulunan Zararlı Gazlar ve Metan Drenajı. İSGÜM, Ankara.
- Durukan, M. 2013. Gazlarla İlgili Zararlı Ortamlar ve Gaz Güvenliği. [http://www.maden.org.tr/genel/bizden\\_detay.php?kod=8735](http://www.maden.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=8735), Erişim Tarihi: 16.02.2016.
- Ellis, J. 2010. Indoor Air Quality in Lecture Theatres and Large Enclosed Public Spaces. University of Brighton, England, PhD Thesis.
- Environmental Protection Agency (EPA). 2016. Volatile Organic Compounds' Impact on Indoor Air Quality. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/volatile-organic-compounds-impact-indoor-air-quality#intro>, Erişim Tarihi: 25.04.2016.
- Google. 2017. <https://www.google.com.tr/maps/place/Bilgisayar+Ve+Bili%C5%9Fi+m+Bilimleri+Fak%C3%BCltesi/@40.7442472,30.3292929,16z/data=!4m5!3m4!1s0x14ccaded70ee240b:0xd81085b5551312fd!8m2!3d40.74244!4d30.325627>, Erişim Tarihi: 12.05.2017.
- Goyal, R., Khare, M. 2011. Indoor Air Quality: Monitoring and Modeling Protocol for Urban School Buildings, in *Sick Building Syndrome in Public Building and Workplaces*. Abdul-Wahab, S.A. (Ed.), 179-192.
- Gökçimen, F., Ebeoğlu, M. A., Taşaltın, C. 2014. SAW Sensör Dizileri ile Nem Etkisi Gözetilerek Kimyasal Gazların Tür ve Miktar Tespitleri. 2014 IEEE 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU 2014), 1853-1856.
- Güllü, G. 2013. Türkiye'de İç Ortam Hava Kirliliği Çalışmaları. *Hava Kirliliği Araştırmaları Dergisi*, 2: 146-158.
- Gürdal, O. 2012. Algılayıcılar ve Dönüştürücüler. *Seçkin Yayınları*, 3. Baskı, Ankara, 35-54.
- Güyağüler, P. D. T., Karakaş, A., Güngör, A. 2005. Occupational Health and Safety in Mining Industry. Ankara.

- Halgamuge, M. N., Chan, T. K., Mendis, P. 2009. Ventilation Efficiency and Carbon Dioxide(CO<sub>2</sub>) Concentration. *Piers Online*, 5(7): 637-640.
- Harbeck, M., Şen, Z., Gürol, İ., Gümüş, G., Muşluoğlu, E., Ahsen, V., Öztürk, Z. Z. 2011. Vic-dioximes: A New Class of Sensitive Materials for Chemical Gas Sensing. *Sensor. Actuat. B: Chem.*, 156(2): 673-679.
- Hauptmann, P. R., Lucklum, R., Schröder J. 2003. QCR-Sensors – Models and Applications. *WCU*, 907-910.
- Hayes, S. R. 1989. Estimating The Effect of Being Indoors on Total Personal Exposure to Outdoor Air Pollution. *J. Air Waste Ma.*, 39(11): 1453-1461.
- Hayes, S. R. 1991. Use of an Indoor Air Quality Model (IAQM) to Estimate Indoor Ozone Levels. *J. Air Waste Manage.*, 41(2): 161-170.
- Ibe, C. A., Anyanwu, E. E. 2013. *Principles of Tropical Air Conditioning*. AuthorHouse, USA, 33.
- Işık, S. 2015. Development of ITO (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SnO<sub>2</sub>) Based Gas Sensors. Atatürk University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Erzurum, Master's Thesis.
- İncecik, S. 1994. Hava Kirliliği. İstanbul Teknik Üniversite Matbaası, 1. Baskı, İstanbul, 76.
- Jamriska, M. 2003. Modeling of Indoor Particle Concentration. in *Indoor Environment – Airborne Particles and Settled Dust*. Morawska, L., Salthammer, T. (Eds.). Wiley-VCH, Weinheim, 319-330.
- Jian, Y., Guo, Y., Liu, J., Zhen, B., Qingrui, L. 2011. Case Study of Window Opening Behavior Using Field Measurement Results. *Building Simulation*, 4: 107-116.
- Johan, S., Xuezhi, Z., Unander, T., Koptuyug, A., Nilsson, H. 2007. Remote Moisture Sensing Utilizing Ordinary RFID Tags. in *Proceedings of 2007 IEEE Sensors*, Atlanta, USA, 308-311.
- Kırımhan, S. 2006. Hava Kirliliği ve Kontrolü. Çevre Yönetimi Dizisi, Turhan Kitabevi, Ankara, 3(1).
- Kim, K.H. Performance Characterization of The GC/PFPD for H<sub>2</sub>S, CH<sub>3</sub>SH, CH<sub>3</sub>SCH<sub>3</sub>, and CH<sub>3</sub>SSCH<sub>3</sub> in Air. *Atmos. Environ.*, 39: 2235-2242.
- Kirchner, P., Oberländer, J., Friedrich, P., Berger, J., Rysstad, G., Keusgen, M., Schöning, M. J. 2012. Realisation of a Calorimetric Gas Sensor on Polyimide Foil for Applications in Aseptic Food Industry. *Sensor. Actuat. B: Chem.*, 170: 60-66.
- Korotcenkov, G. 2013. Chapter 11 Catalysts Used in Calorimetric (Combustion-Type) Gas Sensors. *Handbook of Gas Sensor Materials: Properties, Advantages and Shortcomings for Applications Volume 1: Conventional Approaches*, Springer Science & Business Media, 287.

- Kulmala, I., Salmela, H., Kalliohaka, T., Zweglinski, T., Smolarkiewicz, M., Taipale, A., Kataja, J. 2016. A Tool for Determining Sheltering Efficiency of Mechanically Ventilated Buildings Against Outdoor Hazardous Agents. *Build. Environ.*, 106: 245-253.
- Kuş, M., Okuyan, C., Bulut, H., Bulgurcu, H. 2008. Üniversite Dersliklerinde İç Hava Kalitesinin Değerlendirilmesi. VIII. Uluslararası Yapıda Tesisat Teknolojisi Sempozyumu, İstanbul, 223-237.
- Liu, X., Cheng, S., Liu, H., Hu, S., Zhang, D., Ning, H. 2012. A Survey on Gas Sensing Technology. *Sensors*, 12: 9635-9665.
- Lobnik, A., Turel, M., Urek, S. K. 2012. Optical Chemical Sensors: Design and Applications. *Advances in Chemical Sensors*, 3-28.
- Lu, T., Lü, X., Viljanen, M. 2011. A Novel and Dynamic Demand-Controlled Ventilation Strategy for CO<sub>2</sub> Control and Energy Saving in Buildings. *Energ. Buildings*, 43(9): 2499-2508.
- Mendell, M. J., Heath, G. A., 2005. Do Indoor Pollutants and Thermal Conditions in Schools Influence Student Performance? A Critical Review of the Literature. *Indoor Air*, 15(1): 27-52.
- Menteşe, S., Güllü, G. 2009. Organik Bileşiklerin Farklı İç Ortamlardaki Seviyeleri. IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, 673-679.
- Morawska, L., Congrong, H. 2003. Particle Concentration Levels and Size Distribution Characteristics in Residential and Non-Industrial Workplace Environments. in *Indoor Environment - Airborne Particles and Settled Dust*, Morawska, L., Salthammer, T. (Eds.). Wiley-VCH, 190-225.
- Mumyalmaz, B., Özmen, A., Ebeoğlu, M. A., Taşaltın, C. 2008. Predicting Gas Concentrations of Ternary Gas Mixtures for a Predefined 3D Sample Space. *Sensor. Actuator. B*, 128: 594-602.
- Nassif, N. 2011. CO<sub>2</sub>-based Demand-Controlled Ventilation Control Strategies for Multi-Zone HVAC Systems. Eleventh International Conference Enhanced Building Operations. New York City, 18-20.
- Nassif, N. 2012. A Robust CO<sub>2</sub>-Based Demand-Controlled Ventilation Control Strategy for Multi-Zone HVAC Systems. *Energ. Buildings*, 45: 72-81.
- Nazaroff, W. W., Cass, G. R. 1986. Mathematical Modeling of Chemically Reactive Pollutants in Indoor Air. *Environ. Sci. Technol.*, 20: 924-934.
- Nazaroff, W. W. 1989. Mathematical Modeling and Control of Pollutant Dynamics in Indoor Air. California Institute of Technology, Pasadena, PhD Thesis.
- Nazaroff, W. W. ve Cass, G. R. 1989. Mathematical Modeling of Indoor Aerosol Dynamics. *Environ. Sci. Technol.*, 23(2): 157-166.
- Ng, M. O., Qu, M., Zheng, P., Li, Z., Hang, Y. 2011. CO<sub>2</sub>-Based Demand Controlled Ventilation Under New ASHRAE Standard 62.1-2010: A Case Study for a Gymnasium of an Elementary School at West Lafayette, Indiana. *Energ. Buildings*, 43(11): 3216-3225.

- NJHealth (New Jersey Department of Health), 2011. Hazardous Substance Fact Sheet, 1-6.
- Noh, K., Yook, S. 2016. Evaluation of Clean Air Delivery Rates and Operating Cost Effectiveness for Room Air Cleaner and Ventilation System in a Small Lecture Room. *Energ. Buildings*, 119: 111-118.
- Okuyan, Z. A., Şahin, Ü. 2001. İnsan Sağlığını Etkileyebilecek Unsurlar Konusunda Türk Tabipleri Birliği Görüşü. *Türk Tabipleri Birliği Bergama Raporu*.
- Olesen, B.W. 2000. Guidelines for Comfort. *ASHRAE Journal*, 40-45.
- Onat, B., Haksevenler, T., Şahin, Ü. A. 2011. İstanbul'da Farklı Bina İçi Ortamlarda PM2.5, CO Konsantrasyonları ve Partikül Sayısının Belirlenmesi. *X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, 1785-1790.
- Onat, B. 2015. Metro İstasyonları ile Metro ve Şehirlerarası Tren Vagonlarında İç Hava Kalitesi. *Teskon 2015 - İç Çevre Kalitesi Seminerleri*, 217-227.
- OSHA (Occupational Safety and Health Administration). 2011. Indoor Air Quality in Commercial and Institutional Buildings. U.S. Department of Labor, 5.
- Özdamar, M., Umaroğulları, F. 2017. Bir Ofis Yapısı Örneğinde Isıl Kofor ve İç Hava Kalitesinin İncelenmesi. *Megaron*, 12(1): 27-40.
- Özmen, A., Ebeoğlu, M. A., Mumyalmaz, B., Balta, D. 2016. Determination of Volatile Organic Compounds in Air by a Surface Acoustic Wave Array. *Instrum. Sci. Technol.*, 44(1): 54-64.
- Öztürk, M. 2010. Azot Oksitlerin Sağlık Üzerine Etkileri. <http://gnc6nts.wordpress.com/2010/04/10/azot-oksitlerin-saglik-uzerine-etkileri/>, Erişim Tarihi: 03.10.2016.
- Öztürk, Z. Z., Taşaltın, C., Önkal Engin, G., Gürek, A. G., Atilla, D., Ahsen, V., İnce, M. 2009. Evaluation of a Fast Wastewater Odour Characterisation Procedure Using a Chemical Sensor Array. *Environ. Monit. Assess.* 151: 369-375.
- Parab, R. 2001. Introduction to Indoor Air Quality (IAQ). The University of Toledo. [www.eng.utoledo.edu/~akumar/IAQ/TEXT/introduction.ppt](http://www.eng.utoledo.edu/~akumar/IAQ/TEXT/introduction.ppt), Erişim Tarihi: 09.05.2017.
- Péres, L. O., Li, R. W. C., Yamauchi, E. Y., Lppi, R., Gruber, J. 2012. Conductive Polymer Gas Sensor for Quantitative Detection of Methanol in Brazilian Sugar-Cane Spirit. *Food Chem.*, 130: 1105-1107.
- Persily, A. K. 1997. Evaluating Building IAQ and Ventilation with Indoor Carbon Dioxide. *ASHRAE Tran.*, 103(2): 4072 (1-12).
- Rackes, A. ve Waring, M. S. 2013. Modeling Impacts of Dynamic Ventilation Strategies on Indoor Air Quality of Offices In Six US Cities. *Build. Environ.*, 60: 243-253.
- Readygo. 2016. Indoor Air Quality - History. <http://www.readygo.com/rgsample/cleanair/ind01/01ind01.htm>, Erişim Tarihi: 26.04.2017.

- Robin, E., Dodson, E., Houseman, A., Levy, J., Bennet, D., Shine, J. 2007. Measured and Modelled Personal Exposures to and Risks from Volatile Organic Compounds. *Environ. Sci. Technol.*, 41(24): 8498-8505.
- Sandalcı, T. 2016. Kirleticilerin İnsan Sağlığı ve Çevre Üzerinde Etkileri, Yıldız Teknik Üniversitesi, Taşıt ve Çevre Ders Notları.
- Santamouris, M., Synnefa, A., Assimakopoulos, M., Livada, I., Pavlou, K., Papaglastra, M., Gaitani, N., Kolokotsa, D., Assimakopoulos, V. 2008. Experimental Investigation of the Air Flow and Indoor Carbon Dioxide Concentration in Classrooms with Intermittent Natural Ventilation. *Energ. Buildings*, 40: 1833-1843.
- Sarbu, I., Sebarchievici, C. 2013. Aspects of Indoor Environmental Quality Assessment in Buildings. *Energ. Buildings*, 60: 10-419.
- Sarwar, G., Corsi, R., Kimura, Y., Allen, D., Wescler, C., 2002. Hydroxyl Radicals in Indoor Environments. *Atmos. Environ.*, 36: 3973-3988.
- Schell, M. B., Turner, S. C., Shim, R. O. 1998. Application of CO<sub>2</sub>-Based Demand Control Ventilation Using ASHRAE Standard 62: Optimizing Energy Use and Ventilation. *ASHRAE Tran.*, 104: 1213-1225.
- Schneider, T., Kildesø, J., Breum, N. 1999. A Two-Compartment Model for Determining the Contribution of Sources, Surface Deposition, and Resuspension to Air and Surface Dust Concentration Levels in Occupied Rooms. *Build. Environ.*, 34: 583-595.
- Sehmel, G. A. 1980. Particle and Gas Dry Deposition: A review. *Atmos. Environ.*, 14: 983.
- Shen, C., Brozena, A. H., Wang, Y. 2011. Double-walled Carbon Nanotubes: Challenges and Opportunities. *Nanoscale*, 3: 503-518.
- Shivaraj, Naduvinamani, S., Soumya, P., Shriya, D., Sourabh. 2015. Design and Development of Gas Analyzer for Detecting Ammonia, NO<sub>2</sub>, CO and CO<sub>2</sub>. *International Journal on Emerging Technologies (Special Issue on NCRIET-2015)*, 6(2): 144-149.
- SHU (Sheffield Hallam University). 2017. Gas Chromatography. Faculty of Health and Wellbeing, Biosciences Division, On-Line Learning. <http://teaching.shu.ac.uk/hwb/chemistry/tutorials/chrom/gaschrm.htm>. Erişim Tarihi: 06.06.2017.
- Sofian, M. K., Oussama, M. E., Imad, A. A., Marsha C. K. 2009. Semiconducting Metal Oxide Based Sensors for Selective Gas Pollutant Detection. *Sensors*, 9: 8158-8196.
- Sun, Z., Wang, S., Ma, Z. 2011. In-Situ Implementation and Validation of a CO<sub>2</sub>-Based Adaptive Demand-Controlled Ventilation Strategy in a Multi-Zone Office Building. *Build. Environ.*, 46(1): 124-133.
- Taşaltın, C., Ebeoğlu, M. A., Öztürk, Z. Z. 2012. Acoustoelectric Effect on the Responses of SAW Sensors Coated with Electrospun ZnO Nanostructured Thin Film. *Sensors*, 12: 12006-12015.

- Thai, T. T., Yang, L., DeJean, G. R., Tentzeris, M. M. 2011. Nanotechnology Enables Wireless Gas Sensing. *IEEE Microw. Mag.*, 12: 84-95.
- Tran, T. D., Alleman, L. Y., Galloo, J. C. 2010. Factors Affecting The Indoor Concentrations of Particles. Indo-French Indoor Air Quality Seminar. Nantes, INDOFR-OR-007 (1-2).
- Türkeş, M. 2010. *Klimatoloji ve Meteoroloji, Kriter Yayınevi*, 1. Baskı, İstanbul, 33-45.
- Ünsaldı, E., Çiftçi, M. K. 2010. Formaldehit, Kullanım Alanları, Risk Grubu, Zararlı Etkileri ve ve Koruyucu Önlemler. *YYÜ Veteriner Fakültesi Dergisi*, 21(1): 71-75.
- Vaizoğlu, S. A., Tekbaş, F., Evcı, D. 2000. Kapalı Ortam Hava Kalitesi, Sağlığa Etkisi. *sted-Sürekli Tıp Eğitimi Dergisi*, 9(11).
- Vilcekova, S., Meciariova, L., Burdova, E. K., Katunská, J., Kosicanova, D., Doroudiani, S. 2017. Indoor Environmental Quality of Classrooms and Occupants' Comfort in a Special Education School in Slovak Republic. *Build. Environ.*, 120: 29-40
- Wang, Y., Yeow, J. T. W. 2009. A Review of Carbon Nanotubes-Based Gas Sensors. *Journal of Sensors*, 2009: 1-24.
- Wang, C., Yin, L., Zhang, L., Xiang, D., Gao, R. 2010. Metal Oxide Gas Sensors: Sensitivity and Influencing Factors. *Sensors*, 10(3): 2088-2106.
- Wang, S. 2012. Effects of Surface Roughness on the Indoor Particle Deposition Rate Constant. *Mechanical and Aerospace Engineering - Dissertations*, Paper 68.
- Wetchakun, K., Samerjai, T., Tamaekong, N., Liewhiran, C., Siritwong, C., Kruefu, V., Wisitsoraat, A., Tuantranont, A., Phanichphant, S. 2011. Semiconducting Metal Oxides as Sensors for Environmentally Hazardous Gases. *Sens. Actuator B*, 160: 580–591.
- WHO (World Health Organization). 2010. WHO Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants. WHO Regional Office for Europe, Denmark.
- Wong, K. K. L., Tang, Z., Sin, J. K. O., Chan, P. C. H., Cheung, P. W., Hiraoka, H. Study on Selectivity Enhancement of Tin Dioxide Gas Sensor Using Non-Conducting Polymer Membrane. Hong Kong Electron Devices Meeting, Hong Kong, China, 42-45.
- Yalçın, N., Özmen, A. 2014a. Prediction of Indoor Air Pollutant Concentrations Using Nazaroff-Cass Model. 2nd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES 2014), Karabük, Turkey, 1289-1297.
- Yalçın, N., Özmen, A. 2014b. Nazaroff-Cass Modeli Kullanarak İç Ortam Gaz Kirlenici Konsantrasyonunun Tahmini. ELECO 2014 Elektrik - Elektronik - Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, Bursa, 785-788.

- Yalçın, N., Özmen, A., Balta, D. 2015. The Use of Mass Balance-Based Model for Indoor Air Pollutant Concentration Modeling Problem. 3rd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES 2015), Valencia, Spain, 716-725.
- Yalçın, N., Balta, D., Özmen, A. 2016. IAQ Modeling and Estimating for a Meeting Room. 2nd International Conference on Engineering and Natural Sciences (ICENS 2016), Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 1075-1080.
- Yalçın, N., Balta, D., Özmen, A. 2017. A Modeling and Simulation Study About CO<sub>2</sub> Amount with Web-Based Indoor Air Quality Monitoring. Turk. J. Elec. Eng. & Comp. Sci., DOI: 10.3906/elk-1612-57.
- Yılmaz, G. 2009. İş Güvenliği: Kaynaklı İmalat Atölyelerinde Sağlık ve Güvenlik Önlemleri. Mühendis ve Makine, 50(599): 68-73.
- Yiğit, Ş., Büyüközkan, K., Sönmez, F., Çuhadaroğlu, B. 2013. HVAC Sistemlerinde Aç-Kapa ve Bulanık Mantık Kontrolün Kıyaslamalı Olarak İncelenmesi. 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, 1729-1740.
- Yurtseven, E. 2007. İki Farklı Coğrafi Bölgedeki İlköğretim Okullarında İç Ortam Havaasının İnsan Sağlığına Etkileri Yönünden Değerlendirilmesi. İstanbul Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Zannetti, P. 1990a. Chapter 2: Air Pollution Modeling-Theories, Computational Methods and Available Software. New York: Van Nostrand Reinhold, 27-40.
- Zannetti, P. 1990b. Chapter 6: Eulerian Dispersion Models. Air Pollution Modeling, Computational Methods and Available Software. New York: Van Nostrand Reinhold, 107-139.

## EKLER

### EK 1: Kütle Denge Denklemi Çözümü

$$V_i \frac{dC_i}{dt} = S_i - L_i C_i$$

$$\frac{dC_i}{dt} + \frac{L_i C_i}{V_i} = \frac{S_i}{V_i}$$

$$\frac{dC_i}{dt} + \underbrace{\frac{L_i}{V_i}}_{P(t)} C_i = \underbrace{\frac{S_i}{V_i}}_{Q(t)} \rightarrow C_i' + C_i P(t) = Q(t)$$

$$\boxed{u'v + uv' = (uv)'}$$

$$\frac{u(t)}{C_i'} + C_i P(t) = Q(t)$$

$$\frac{u(t)C_i'}{u C_i'} + \frac{C_i P(t)u(t)}{C_i u'} = \frac{Q(t)u(t)}{(u C_i)'}$$

$$C_i = v, C_i' = v'$$

$$C_i u' = C_i P(t)u(t) \rightarrow \frac{u'}{u} = P(t)$$

$$\ln(u)' = P(t) \rightarrow u = e^{\int P(t)dt}$$

$$u = e^{\int \frac{L_i}{V_i} dt} = e^{\frac{1}{V_i} \int_0^t L_i dt} \left. \begin{array}{l} \text{zaman bağımsız, } u = e^{\frac{L_i}{V_i} t} \\ \text{zamana bağlı, } u = e^{\frac{L_i(t) - L_i(0)}{V_i}} \end{array} \right\}$$

$$(uv)' = \frac{S_i}{V_i} e^{\frac{L_i}{V_i} t}$$

$$(e^{\frac{L_i}{V_i} t} C_i)' = \frac{S_i}{V_i} e^{\frac{L_i}{V_i} t}$$

$$\int (e^{\frac{L_i}{V_i} t} C_i)' = \int \frac{S_i}{V_i} e^{\frac{L_i}{V_i} t} \rightarrow e^{\frac{L_i}{V_i} t} C_i = \frac{S_i}{V_i} \frac{e^{\frac{L_i}{V_i} t}}{\frac{L_i}{V_i}} + K$$

$$C_i = \left( \frac{S_i}{L_i} e^{\frac{L_i}{V_i} t} + K \right) \frac{1}{e^{\frac{L_i}{V_i} t}} = \frac{S_i}{L_i} + K e^{-\frac{L_i}{V_i} t}$$

$t = 0$  için  $C_i = \frac{S_i}{L_i} + K = C_0$ , başlangıç konsantrasyonu

$$K = C_0 - \frac{S_i}{L_i}$$

$$C_i = \frac{S_i}{L_i} + (C_0 - \frac{S_i}{L_i})e^{-\frac{L_i t}{V_i}} = \frac{S_i}{L_i} \left(1 - e^{-\frac{L_i t}{V_i}}\right) + C_0 e^{-\frac{L_i t}{V_i}}$$

$t \rightarrow \infty$  için  $C_i = \frac{S_i}{L_i} \left(1 - \underbrace{e^{-\frac{L_i t}{V_i}}}_0\right) + C_0 \underbrace{e^{-\frac{L_i t}{V_i}}}_0 = \frac{S_i}{L_i} = C_f$ , kararlı hal konsantrasyonu

$$C_i = \frac{S_i}{L_i} \left(1 - e^{-\frac{L_i t}{V_i}}\right) + C_0 e^{-\frac{L_i t}{V_i}} = C_f \left(1 - e^{-\frac{L_i t}{V_i}}\right) + C_0 e^{-\frac{L_i t}{V_i}} = C_f + (C_0 - C_f) e^{-\frac{L_i t}{V_i}}$$

**EK 2: AZ 77535 Handheld CO2 & TEMP. &RH Meter**

## Ölçüm Aralığı

CO <sub>2</sub>	0 ~ 9999 ppm (5001 ~ 9999 ppm ölçüm aralığı dışında)
Sıcaklık	-10 ~ 60 °C (14 ~ 140 °F)
Bağıl nem	%0,1 ~ %99,9 RH
DP (Dew point temp., çiy noktası sıcaklığı)	-20,0 ~ 59,9 °C
WB (Wet bulb temp., yaş termometre sıcaklığı)	-5,0 ~ 59,9 °C
Çözünürlük	1 ppm, 0,1 °C/°F, 0,1 %RH
Doğruluk	
CO <sub>2</sub>	±30 ppm + %5 okuma (0 ~ 5000 ppm) Diğer aralıklar belirtilmemiştir.
Sıcaklık	±0,6 °C / ±0,9 °F
Bağıl Nem	±3 %RH (25 °C'de, 10 ~ 90 %RH) ; ±5 %RH (25 °C'de, diğerleri)
Isınma Süresi	30 s
Tepki Süresi	
CO <sub>2</sub>	<30 s (%90 kademe atlama)
Thava	<2 dk (%90 kademe atlama)
RH	<10 dk (%90 kademe atlama)
Çalışma Şartı	0 ~ 50 °C, 0 ~ 95 %RH (yoğunlaşmadan kaçının)
Saklama Şartı	-20 ~ 50 °C, 0 ~ 95 %RH (yoğunlaşmadan kaçının)





Tablo 1. (Devamı)

Gün	Derslik	1101	1102	1103	1104	1105	1106	1107	1108	1109
	Saat									
Çarşamba	09:00 -10:00		EDT	NDP	BT-BS Uyg.					
	10:00-11:00	Olasılık	EDT	NDP	BT-BS Uyg.				Olasılık	
	11:00-12:00	Olasılık	EDT		BT-BS Uyg.				Olasılık	
	12:00-13:00	Olasılık	Web Prog.						Olasılık	
	13:00-14:00		Web Prog.							
	14:00-15:00									
	15:00-16:00					BT-BS Uyg.				
	16:00-17:00					BT-BS Uyg.				
	17:00-18:00		EDT	Fizik 1	BT-BS Uyg.	Fiber	Ağ Prog.		Bilg. Ağ.	
	18:00-19:00		EDT	Fizik 1	Web Prog.	Fiber	Ağ Prog.		Bilg. Ağ.	
	19:00-20:00		EDT	NDP	Web Prog.	Fiber	Ağ Prog.		Bilg. Ağ.	
	20:00-21:00			Alg. Analizi	NDP	Robotik				
	21:00-22:00			Alg. Analizi	NDP	Robotik				
	22:00-23:00			Alg. Analizi	NDP	Robotik				

Tablo 1. (Devamı)

Gün	Derslikler	1101	1102	1103	1104	1105	1106	1107	1108	1109
	Saat									
Perşembe	09:00 -10:00	NDP	NDP	Ayrık Mat.	Mikro İşl.	Ağ Prog.	Robotik			
	10:00-11:00	NDP	NDP	Ayrık Mat.	Mikro İşl.	Ağ Prog.	Robotik		Mat. 1	
	11:00-12:00	Mat. 1	Mat. 1	Ayrık Mat.	Mikro İşl.	Ağ Prog.	Robotik		Mat. 1	
	12:00-13:00	Mat. 1	Mat. 1		Mikro İşl.					
	13:00-14:00		Sist. Prog.	Dif. Denk.	NDP	NDP	Sist. Prog.			Dif. Denk.
	14:00-15:00		Sist. Prog.	Dif. Denk.	NDP	NDP	Sist. Prog.			Dif. Denk.
	15:00-16:00		Sist. Prog.	Ayrık Mat.	NDP	NDP	Sist. Prog.			Örüntü Tan.
	16:00-17:00			Ayrık Mat.	NDP	NDP	Mikro İşl.			Örüntü Tan.
	17:00-18:00	Mat. 1		Ayrık Mat.	PDP		Mikro İşl.		Mat. 1	Örüntü Tan.
	18:00-19:00	Mat. 1			PDP	Web Prog.	Robotik		Mat. 1	Mikro İşl.
	19:00-20:00	Mat. 1	Olasılık	Web Tekn.	PDP	Web Prog.	Robotik		Mat. 1	Mikro İşl.
	20:00-21:00	Dif. Denk.	Olasılık	Web Tekn.	Sist. Prog.	Sist. Prog.	Robotik		Dif. Denk.	
	21:00-22:00	Dif. Denk.	Olasılık	Web Tekn.	Sist. Prog.	Sist. Prog.			Dif. Denk.	
	22:00-23:00				Sist. Prog.	Sist. Prog.				



**EK 4: Ölçüm Sonuçları**

Tablo 2. Dersliklere ilişkin ölçüm değerleri

1103 nolu derslik					1104 nolu derslik					1105 nolu derslik				
Saat	Öğrenci sayısı	CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	Sıcaklık	Nem	Saat	Öğrenci sayısı	CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	Sıcaklık	Nem	Saat	Öğrenci sayısı	CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	Sıcaklık	Nem
09:15	39	1077	22	50,6	09:00	21	1014	22	45,2	09:00	21	1005	21,4	47,1
09:25	40	1875	23,5	49	09:10	23	1078	22,2	45,1	09:10	23	1118	21,6	46,6
09:35	40	2159	24,2	51,2	09:20	23	1145	23	44,7	09:20	25	1196	22	46,3
09:45	41	4411	24,7	52,5	09:30	23	1203	23,4	43,2	09:30	25	1204	23,6	45,7
09:55	23	2904	25,1	52,9	09:40	24	1178	23,7	41,6	09:40	25	1156	24,1	41,4
10:05	21	2558	24,5	50	09:50	24	1213	24	40,2	09:50	25	1215	24,8	39,8
10:15	37	2188	24,5	49,3	10:00	15	1351	24,2	42,7	10:00	25	1224	25	39,1
10:25	46	2290	25	49,7	10:10	38	1381	24,6	39,7	10:10	15	1146	24,9	39,1
10:35	46	2618	25,7	50,5	10:20	38	1459	24,9	39	10:20	16	1018	24,5	38,4
10:45	46	3541	26	51,8	10:30	38	1553	25	38,8	10:30	26	1198	25,1	37,5
10:55	46	3716	26,7	54,9	10:40	38	1683	25,1	38,3	10:40	28	1283	25,4	37,1
11:05	15	2683	25,8	47,8	10:50	38	1623	25,1	38,1	10:50	28	1351	25,6	37
11:15	31	1956	25,6	44,1	11:00	33	1261	25,1	35,1	11:00	28	1389	26	37,1
11:25	31	2273	25,8	46,9	11:10	18	1165	24,6	34,8	11:10	28	1395	26,1	37,4
11:35	31	2668	26,2	48,8	11:20	14	1137	24,6	36	11:20	28	1412	26,2	37
11:45	30	2936	26,2	50,5	11:30	28	1254	24,8	35,4	11:30	29	1498	26,7	36,8
11:55	30	3368	26,4	51,3	11:40	28	1278	25,6	34,2	11:40	29	1503	27	36,7
					11:50	28	1198	25,5	34,1	11:50	29	1544	28,1	36,6
					12:00	28	1207	25,8	33,6	12:00	9	1106	27,5	38,2

## **EK 5:** Tez Kapsamındaki Bilimsel Çalışmalar

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

- Yalçın N., Balta D., Özmen A. 2017. A Modeling and Simulation Study About CO<sub>2</sub> Amount with Web-Based Indoor Air Quality Monitoring. Turk. J. Elec. Eng. & Comp. Sci., DOI: 10.3906/elk-1612-57 (SCI-E).

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler:

- Balta D., Yalçın N., Özmen A. 2017. Indoor Air Quality Monitoring System Using Raspberry Pi for Energy Efficiency in Classrooms. 3rd International Conference on Engineering and Natural Sciences (ICENS 2017). Budapest, Hungary.
- Yalçın N., Balta D., Özmen A. 2016. IAQ Modeling and Estimating for a Meeting Room. 2nd International Conference on Engineering and Natural Sciences (ICENS 2016). Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 1075-1080.
- Yalçın N., Özmen A., Balta D. 2015. The Use of Mass Balance-Based Model for Indoor Air Pollutant Concentration Modeling Problem. 3rd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES 2015). Valencia, Spain, 716-725.
- Balta D., Özmen A., Yalçın N. 2015. MPI Based Simulator Study Indoor Air Quality Monitoring. 3rd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES 2015). Valencia, Spain, 406-415.
- Yalçın N., and Özmen A. 2014. Prediction of Indoor Air Pollutant Concentrations Using Nazaroff-Cass Model. 2nd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES 2014). Karabük, Turkey, 1289-97.

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler:

- Yalçın N., Özmen A. 2014. Nazaroff-Cass Modeli Kullanarak İç Ortam Gaz Kirletici Konsantrasyonunun Tahmini. ELECO'2014 Elektrik, Elektronik, Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu ve Sergisi. Bursa, 785-788.

Diğer yayınlar:

- Yalçın N., Balta D., Özmen A. 2015. A Simulation Study About Online IAQ Monitoring. COST Action TD1105 - New Sensing Technologies for Indoor Air Quality Monitoring: Trends and Challenges – Fifth Scientific Meeting, Bulgarian Academy of Sciences. Sofia, Bulgarian.
- Yalçın N., Özmen A. 2014. Indoor Modelling and Simulator Development for Measurement Systems and Gas Sensors. COST Action TD1105 - New Sensing Technologies for Air-Pollution Control and Environmental Sustainability - Third Scientific Meeting. Bahçeşehir University, Istanbul, Turkey.

## ÖZGEÇMİŞ

Nesibe Yalçın, 04.11.1987'de Yozgat'ta doğdu. İlk ve orta öğrenimini Ankara'da tamamladı. 2005 yılında İnönü (Y.D.A.) Lisesi'nden mezun oldu. 2005 yılında başladığı Selçuk Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nü 2009 yılında bölüm birinciliği ile bitirdi. Aynı yılda Selçuk Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2011 yılında Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2012 yılında yüksek lisans eğitimini bitirdi ve akabinde Sakarya Üniversitesi Bilgisayar ve Bilişim Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora eğitimine başladı. Halen Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.