

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

**DAĞITIK SENSÖR SİSTEMLERİ MİMARİSİ İLE BULANIK
MANTIK TEMELLİ VE ÇEVİRİMİÇİ KAPALI ORTAM HAVA
KALİTESİ İZLEME SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Deniz BALTA

**Enstitü Anabilim Dalı : BİLGİSAYAR VE BİLİŞİM
MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet ÖZMEN

Temmuz 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

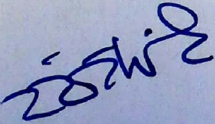
**DAĞITIK SENSÖR SİSTEMLERİ MİMARİSİ İLE BULANIK
MANTIK TEMELLİ VE ÇEVİRİMİÇİ KAPALI ORTAM HAVA
KALİTESİ İZLEME SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ**

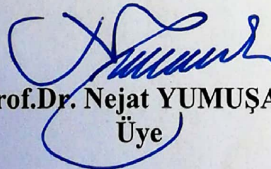
DOKTORA TEZİ

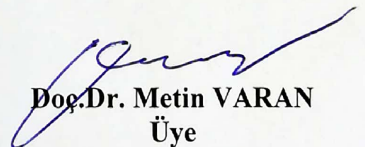
Deniz BALTA

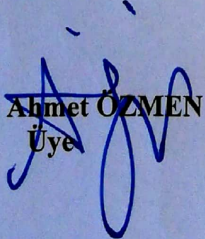
Enstitü Anabilim Dalı : BİLGİSAYAR VE BİLİŞİM
MÜHENDİSLİĞİ

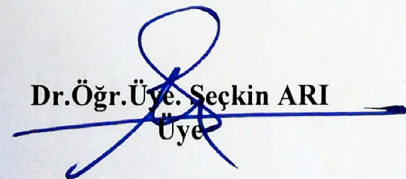
Bu tez 23 / 07 /2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Prof.Dr. Zafer Ziya ÖZTÜRK
Jüri Başkanı


Prof.Dr. Nejat YUMUŞAK
Üye


Doç.Dr. Metin VARAN
Üye


Prof.Dr. Ahmet ÖZMEN
Üye


Dr.Öğr.Üye. Seçkin ARI
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.

Deniz BALTA

23.07.2019

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca kıymetli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren ve öğrencisi olmaktan büyük onur duyduğum çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Ahmet ÖZMEN'e en derin minnettarlıklarımı sunarım.

Tanımaktan büyük onur duyduğum, yapıcı yaklaşım ve önerilerinin yanı sıra, çalışmanın tamamlanması sırasındaki büyük destekleri için, saygıdeğer hocam Prof. Dr. Zafer Ziya ÖZTÜRK'e, olumlu ve yapıcı eleştirileri ile beni yönlendiren, tecrübe ve bilgi birikimleriyle kendilerinden çok şey öğrendiğim değerli hocam Prof. Dr. Nejat YUMUŞAK'a teşekkür ederim.

Bu zorlu süreçte her zaman en büyük destekçim ve yardımcım olan, beni her daim motive eden sevgili eşim ve meslektaşım Arş. Gör. Dr. Musa BALTA'ya ve yaşam sevincim kızım Elif Ece BALTA'ya sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca tüm hayatım boyunca en büyük desteği ve sevgiyi vererek hep yanımda olan aileme çok teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2016-50-02-017) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR TARAMASI.....	7
2.1. Kapalı Ortam Hava Kalitesi.....	7
2.2. Ortam Hava Kalitesi Standartları.....	8
2.3. Gerçek Zamanlı Kapalı Ortam Hava Kalitesi İzleme Sistemleri.....	11
2.4. Kapalı ortam hava konforu.....	18
2.5. Termal konfor.....	19
2.6. Bulanık mantık tabanlı kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemleri	26
2.7. Literatürde Yapılan Çalışmaların Karşılaştırmalı Özeti.....	27
BÖLÜM 3.	
YÖNTEM.....	31
3.1. Problemin Tanımı.....	31
3.2. Çözüm Önerisi.....	32
3.3. Metot.....	34

3.3.1. Önerilen sistem mimarisinin genel yapısı	35
3.3.1.1. Uç düğümlerin tasarımı.....	37
3.3.1.2. Web sunucusu, veri tabanı sunucusu ve uygulama sunucusu.....	40
3.3.1.3. Servis yönelimli kullanıcı.....	41
3.3.1.4. NTP sunucu.....	41
3.3.2. Ölçüm ortamı.....	42
3.4. Geliştirilen Modelin Veri Çevrimi.....	45
3.4.1. Veri toplama.....	47
3.4.2. Veri ayrıştırma.....	50
3.4.3. Veri işleme.....	52
3.4.4. Servis dağıtımı.....	60
3.4.5. Sistemin işleyişi.....	60
3.4.6. Veri tabanı tasarımı.....	62
3.5. Önerilen Sistemin Nesnelerin İnterneti Kavramı Altında İncelenmesi	63
3.5.1. Nesnelerin interneti kavramı.....	63
3.5.2. Nesnelerin interneti uygulamaları.....	65
3.5.3. Kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemleri ve nesnelerin interneti.....	66
 BÖLÜM 4.	
TARTIŞMA.....	71
4.1. Toplanan Veriler.....	71
4.2. Sübjektif Değerlendirme, Sonuçları ve Yorumlanması.....	82
 BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR ve GELECEK ÇALIŞMALAR.....	86
 KAYNAKLAR.....	90
EKLER.....	96
ÖZGEÇMİŞ.....	100

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ASHRAE	: American Society Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers – Amerikan Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Birliği
CO	: Karbon monoksit
CO ₂	: Karbondioksit
EPA	: US Environmental Protection Agency – Çevre Koruma Ajansı
H ₂ S	: Hidrojen sülfür
HVAC	: Heating, Heating and Air Conditioning – Isıtma, Soğutma ve Havalandırma
IAQ	: Indoor air quality - Kapalı ortam hava kalitesi
IEQ	: Indoor environmental quality - Kapalı ortam çevresel kalite
IoT	: Internet of things – Nesnelerin interneti
ISO	: International Organization for Standardization - Uluslararası Standartlar Teşkilâtı
İOHK	: İç ortam hava kalitesi
LAN	: Local area network – Yerel alan ağı
MOS	: Metal oxide semiconductor - Metal oksit yarı iletken
MRT	: Mean radiant temperature – Ortalama ışıma sıcaklığı
NO ₂	: Azot dioksit
NO _x	: Azot oksit
NTP	: Network time protocol - Ağ zaman protokolü
O ₃	: Ozon
PM	: Particulate matter – Partikül madde
PMV	: Predicted mean vote – Beklenen ortalama karar
ppm	: Parts per million – Milyonda bir
RH	: Relative humidity – Bağlı nem

SO ₂	: Kükürt dioksit
TCP/IP	: Transmission control protocol / Internet protocol – Taşıma kontrol protokolü / Internet protokolü
UDP	: User datagram protocol - Kullanıcı veri bloğu iletişim kuralları
WHO	: World Health Organization - Dünya Sağlık Örgütü
WSN	: Wireless sensor network – Kablosuz sensör ağı
VOC	: Volatile organic compounds – Uçucu organik bileşenler



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Termal konfora etki eden çevresel ve kişisel faktörler.....	28
Şekil 3.1. Kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemi genel mimarisi.....	36
Şekil 3.2. Uç düğümlerin tasarımı.....	38
Şekil 3.3. Ölçüm düzeneğinde kullanılan cihazlar.....	39
Şekil 3.3.a. Raspberry Pi 3 Model B.....	39
Şekil 3.3.b. AZ Instrument 77535 CO ₂ /Sıcaklık/RH Metre.....	39
Şekil 3.3.c. PCE-423 Hot wire anemometre	39
Şekil 3.4. Sakarya Üniversitesi Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakülte Binası.....	43
Şekil 3.5. Fakülte binasının birinci katındaki sınıfların şematik gösterimi.....	44
Şekil 3.6. Geliştirilen kapalı ortam hava kalitesi izleme sisteminin veri çevrim dizge diyagramı.....	46
Şekil 3.7. Ders esnasında ölçüm yapılan bir sınıfın görüntüsü	47
Şekil 3.8. CO ₂ Metre ve Anemometre cihazlarından bilgisayara gelen bir saniyelik USB Yığın paket yapıları.....	49
Şekil 3.9. Sınıflardaki istasyon üzerinde bulunan bu ara katman yazılımı çalışma şeması.....	51
Şekil 3.10. Sınıflardan gelen TCP/IP paket yapısı.....	52
Şekil 3.11. Gerçek zamanlı kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemi için uygulanan veri işleme yaklaşımı.....	52
Şekil 3.12. Veri işleme için tasarlanan bulanık sistem.....	53
Şekil 3.13. CO ₂ giriş değişkeni için üyelik fonksiyon grafiği.....	55
Şekil 3.14. PMV giriş değişkeni için üyelik fonksiyon grafiği.....	56
Şekil 3.15. Kapalı ortam çevresel kalite (IEQ) çıkış değişkeni için üyelik fonksiyon grafiği.....	56
Şekil 3.16. Giriş değişkenleri ve çıkış değişkeni arasındaki ilişkiyi gösteren bulanıklaştırma yüzeyi.....	56

Şekil 3.17. Tanımlanan kuralların bir kısmının görüntüsü.....	59
Şekil 3.18. Sistemin işleyişi akış diyagramı (Uç düğümlerde verilerin toplanması ve verilerin sunuculara iletilmesi).....	61
Şekil 3.19. Sistemin işleyişi akış diyagramı (Veri işleme ve ölçüm sisteminin çıktısı).....	62
Şekil 3.20. Nesnelerin interneti bileşenleri.....	65
Şekil 3.21. Tasarlanan kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemi için Nesnelerin İnterneti temelli ve TCP/IP temelli mimarilerin karşılaştırması.....	68
Şekil 4.1. C1106 nolu sınıfa ait Mart ayındaki herhangi bir haftalık min-max CO ₂ konsantrasyonu ölçüm sonuçları.....	72
Şekil 4.2. C1106 nolu sınıfa ait Mart ayındaki herhangi bir haftalık hesaplanan min-max PMV sonuçları.....	72
Şekil 4.3. C1104 nolu sınıfa ait bir günlük ölçüm verileri (zamana bağlı CO ₂ konsantrasyonu (ppm) ve PMV (termal konfor)).....	73
Şekil 4.4. C1105 nolu sınıfa ait bir günlük ölçüm verileri (zamana bağlı CO ₂ konsantrasyonu (ppm) ve PMV (termal konfor)).....	74
Şekil 4.5. C1106 nolu sınıfa ait bir günlük ölçüm verileri (zamana bağlı CO ₂ konsantrasyonu (ppm) ve PMV (termal konfor)).....	75
Şekil 4.6. C1107 nolu sınıfa ait bir günlük ölçüm verileri (zamana bağlı CO ₂ konsantrasyonu (ppm) ve PMV (termal konfor)).....	76
Şekil 4.7. Bir sınıfa ait çevresel ölçüm parametrelerinin gösterildiği web arayüzü..	80
Şekil 4.8. Ölçüm yapılan dört sınıfa ait çevresel ölçüm parametrelerinin grafiksel gösterimlerinin yapıldığı web arayüzü.....	81

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. EPA ve WHO tarafından kabul edilen ve yayınlanan iç ortam hava kalitesi limit değerleri	9
Tablo 2.2. ASHRAE tarafından yayınlanan kapalı ortamlardaki CO ₂ seviyesinin sınıflandırılması	10
Tablo 2.3. ASHRAE Standart 55 ve ISO 7730'a göre ısı konfor sınır değerleri.....	22
Tablo 2.4. Belirli durumlar için metabolik aktivite seviyeleri.....	23
Tablo 2.5. Belirli durumlar için giyim seviyeleri	23
Tablo 2.6. PMV termal konfor duyarlılık aralıkları.....	25
Tablo 2.7.a. Literatürdeki çalışmaların karşılaştırmalı özetleri.....	29
Tablo 2.7.b. Literatürdeki çalışmaların karşılaştırmalı özetleri.....	30
Tablo 3.1. Sınıfların geometrik özellikleri.....	43
Tablo 3.2. İlgili bulanık aralıklar ile giriş ve çıkış bulanık değişkenleri.....	55
Tablo 3.3. Net çıkış değerine göre karar verme kuralları.....	58
Tablo 4.1. C1106 nolu sınıfta bir haftalık min-max ve ortalama ölçüm sonuçları.....	78
Tablo 4.2. Ankette kullanılan kriterler.....	83
Tablo 4.3. Sübjektif değerlendirme için öğrenci cevaplarının dağılımları.....	85

ÖZET

Anahtar kelimeler: Kapalı ortam hava kalitesi, termal konfor, çevrimiçi izleme sistemi, çevresel izleme, bulanık mantık

Kapalı ortam hava kalitesi genel olarak insan sağlığını, rahatlığını ve performansını etkileyebilecek, bina içindeki çevresel özellikleri ifade eder. İç ortam havası dış ortam havasından farklı olarak sürekli geri dönüştürülür ve bu durum içinde kirleticilerin toplanmasına ve tutulmasına neden olur. Kötü iç ortam hava kalitesi kısa ve uzun vadede insan sağlığı üzerinde kötü etkilere sahiptir. İnsanların kapalı ortamlarda geçirdiği uzun vakit düşünüldüğünde ise ortamın hava kalitesinin sürekli olarak izlenmesiyle farkında olunmayan kirlilik konusunda bilgilendirilmelerin yapılması gerekir. Böylece sağlıklı yaşam için gereken temiz havanın geliştirilmesi ve korunması için doğru stratejiler sunulabilir. Bu nedenle hem akademik hem de ticari çevrelerde bir akıllı şehir uygulaması (green building) olan kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemleri üzerine birçok çalışmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmada, önerilen kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemi ile bir ortamdaki bütün konfor parametrelerinin birlikte değerlendirilmesi ve ortamdaki insanlar için en iyi hava kalitesinin sağlanması amaçlanmıştır. Bu kapsamda literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, tek bir ölçüm ortamına bağlı kalmayarak çoklu parametre ölçümüne imkân veren, web tabanlı, dağıtık mimariye sahip, esnek ve ölçeklenebilir bir kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemi önerilmiştir. Ayrıca çalışmada, kapalı ortamlardan elde edilen birbirinden bağımsız ölçüm ve ortam parametrelerinin (CO₂ seviyesi, termal konfor değeri) birlikte analiz edilebilmesini ve sonuç olarak ortamın çevresel hava kalite bilgisinin elde edilebilmesini sağlayan bir bulanık model önerilmiştir.

Çalışmada geliştirilen web tabanlı gerçek zamanlı izleme sistemi ile Sakarya Üniversitesi Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi'nin birinci katında bulunan dersliklerin çeşitli senaryolar altında kapalı ortam hava kaliteleri ve termal konforları izlenmiştir. Sistemde bulunan ölçüm cihazları ile çevresel faktörler (sıcaklık, nem, hava akış hızı, CO₂ konsantrasyonu) algılanmaktadır. Elde edilen ham bilgi metabolizma hızı, giyim gibi sübjektif faktörlerle birlikte değerlendirilerek anlamlı hale getirilmektedir. Son olarak, elde edilen ortam hava kalitesi ve termal konfor bilgileri bulanık mantık yöntemiyle analiz edilip, son kullanıcıya sınıf ortamının genel çevresel kalitesi bilgisi sunulmaktadır. Her ölçüm senaryosunun ardından ortamdaki kişilere uygulanan değerlendirme ölçeği tipinde anketlerle önerilen sistemin ortamın hava kalitesi hakkında ne kadar başarılı sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir.

DEVELOPMENT OF FUZZY LOGIC BASED ONLINE INDOOR AIR QUALITY MONITORING SYSTEM WITH DISTRIBUTED SENSOR SYSTEMS ARCHITECTURE

SUMMARY

Keywords: Indoor air quality, thermal comfort, web-based monitoring system, environmental monitoring, fuzzy logic

Indoor air quality generally refers to the environmental characteristics within the building that can affect human health, comfort and performance. Unlike the outside air, the indoor air is recycled continuously which causes the pollutants to be collected and stored. Poor indoor air quality has bad effects on human health in short and long-term. Considering the long hours people spend in indoor environments, it is necessary to be informed about the pollution which is not aware of by continuously monitoring indoor air quality. Thus, the right strategies for the development and protection of clean air required for healthy living can be offered. Therefore, many studies are being carried out on indoor air quality monitoring systems which are a smart city application (green building) in both academic and commercial environments.

In this study, the proposed indoor air quality monitoring system aims to evaluate all comfort parameters in an environment together and to provide the best air quality for the people in the environment. In this context, unlike studies in the literature, a flexible and scalable indoor air quality monitoring system with web-based, distributed architecture that allows multi-parameter measurement independent of the measurement environment has been proposed. In addition, a fuzzy model was proposed to enable the analysis of independent measurement parameters (CO₂ level and thermal comfort value) from indoor environments and to obtain indoor environmental quality information.

In the study, indoor air quality and thermal comfort of the classrooms in the first floor of the Faculty of Computer and Information Sciences of Sakarya University has been monitored by web based real-time monitoring system under various scenarios. Environmental factors (temperature, humidity, airflow rate, CO₂ concentration) are detected by measuring devices in the system. Then, the raw information obtained is evaluated together with subjective factors such as metabolic rate and clothing level. Thus, thermal comfort value and indoor air quality information of the environment are obtained. Finally, the acquired indoor air quality and thermal comfort information are analyzed by fuzzy logic method and then the end user is informed about the general environmental quality of the classes.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde insanlar zamanlarının yaklaşık %90'ını kapalı ortamlarda geçirmektedir. Bu nedenle kapalı ortamlardaki kötü hava kalitesi insan sağlığı için önemli bir risk oluşturmaktadır. Kötü hava kalitesine sahip bir ortam kısa vadede baş ağrısı, yorgunluk ve mide bulantısı gibi rahatsızlıklar oluştururken uzun vadede kronik hastalıklar, kalp rahatsızlıkları ve kanser gibi ciddi sağlık sorunlarına da meydan verebilir. Dolayısıyla kapalı ortam hava kalitesi üzerine yapılan araştırma ve çalışmalar gün geçtikçe artmakta ve önem kazanmaktadır. Yapılan araştırmalarda göze çarpan bir husus da kötü hava kalitesinin neden olduğu sağlık problemlerine en duyarlı kesimlerin çocuklar ve yaşlı insanlar olduğu yönündedir (Bakó-Biró ve ark., 2012; Chatzidiakou ve ark., 2012). Türkiye'deki öğrencilerin hafta içinde günlerinin %30'undan fazlasını okullarda geçirdiği düşünüldüğünde, sınıflardaki kötü hava kalitesinin onların sağlığı, üretkenliği, odaklanması ve performansı üzerinde kritik etkiler oluşturması büyük olasılıktır (Behzadi ve Fadeyi, 2012).

Kapalı ortam hava kalitesi problemleri veya kötü/düşük ortam hava kalitesi yalnızca tek bir etkene bağlı değildir. Ortamda bulunan farklı kirletici kaynaklarına, mevsimden mobilyalara, binanın yapısına kadar birçok faktöre bağlı olabilir. Sınıf ortamlarındaki kötü hava kalitesinin nedenleri ise, genellikle ortamdaki öğrenciler ve havalandırma problemleridir. Kapalı ortamda bulunan her bir öğrenci birer kirletici kaynağı olarak düşünülür. Dolayısıyla ders süresi, ortamda bulunan öğrenci sayısı, sınıfın hacmi ve havalandırma oranı düşünüldüğünde ortam hava kalitesinin tehlikeli seviyeye gelmesi kaçınılmazdır.

Son zamanlarda yapılan kapalı ortam hava kalitesi izleme çalışmaları, CO₂ konsantrasyonunun binalarda önemli bir kirletici kaynağı olduğunu ve hava kalitesini belirlerken kabul edilebilir bir gösterge olduğunu ileri sürmektedir (Bas, 2004; Grace ve ark., 2004; Emmerich ve ark., 2017). Bu nedenle okul ve kampüs binalarında CO₂

seviyesinin belirlenmesi üzerine yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Çalışmalarda, CO₂ seviyesinin 1000 ppm'den yüksek olması durumunda, karar verme performansının orta derecede düştüğü ve 2500 ppm'in üzerindeki CO₂ seviyesinde ise önemli derecede azaldığı saptanmıştır (Chatzidiakou ve ark., 2012; ASHRAE-62, 2016; Ekren ve ark., 2017).

Kapalı ortamlarda, CO₂ ortam hava kirliliğini belirleyen bir parametre iken, sıcaklık, nem, hava akış değerleri ve ortalama ışıma sıcaklığı (MRT- mean radiant temperature) da ortamdaki insanların konforuna doğrudan etki eden faktörlerdir. Bu faktörlere bağlı olarak değişen ve termal konfor olarak adlandırılan bu değer de ortam hava kalitesinin belirlenmesinde anahtar unsurlardan biri olarak nitelendirilir. Bu konfor değeri ayrıca ortamda bulunan insanların kıyafetleri, metabolizma değerleri ve aktivite seviyeleri gibi sübjektif parametrelere de bağlıdır (Parsons, 2003). Birçok çalışmada ortamın termal konfor seviyesini belirlemek için PMV (Beklenen ortalama karar) yaklaşımı kullanılmaktadır (Rabadi, 1995; Hamdi ve ark., 1999; Atthajariyakul ve Leephakpreeda, 2004). 1970 yılında Fanger tarafından yayınlanan bu PMV eşitliği dört çevresel parametre (kuru termometre sıcaklığı, ortalama ışıma sıcaklığı, bağıl nem ve hava akışı) ve iki psikolojik parametre (metabolizma oranı ve giysi seviyesi) kullanılarak hesaplanır (Fanger, 1972). Bu çalışmada da kullanılan ölçüm cihazları ile sınıf ortamın CO₂ konsantrasyonu ve PMV hesabında kullanılan çevresel parametreler ölçülebilmektedir. Böylece CO₂ değeri ile ortam hava konforu (indoor air comfort) ve hesaplanan PMV değeri ile de termal konfor elde edilmektedir.

Herhangi bir kapalı ortamın hava kalitesi tespitini zorlaştıran bir takım faktörler vardır. Bunlardan ilki kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemlerinde kullanılan ölçüm cihazlarının hem pahalı hem de ortalama kullanıcıya hitap edemeyecek kadar karmaşık olmasıdır. İkincisi, bir ortamda bulunan insanların bir süre sonra ortamın havasının kötü olup olmadığını anlayamaz duruma gelmesidir. Bunların yanında, çoğu insanın iç ortam hava kalitesinin açık havadan daha iyi olduğunu düşünmesidir ki, yapılan çalışmalar, içerideki kirletici seviyelerinin açık havaya göre iki ila beş kat daha yüksek olabileceğini göstermektedir (Oh ve ark., 2012; Emmerich ve ark., 2017; Yalcin ve ark., 2018). Kapalı ortamda kullanılan kimyasallar, elektronik cihazlar, makineler ve

hatta yaptığımız günlük aktiviteler bile iç ortam hava kalitesini düşürebilir. Bu nedenle, kapalı ortamlarda sezgisel hava kalitesi koşulları hissi verebilen ve yaygın olarak erişilebilen bir IAQ (kapalı ortam hava kalitesi- indoor air quality) izleme sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Çünkü yapılan araştırmalara göre kapalı ortamdaki mevcut hava kalitesi seviyesinin fark edilmesi, insanların davranışlarını değiştirmeye ve hava kalitesini iyileştirmek için harekete geçilmesine motive ettiğini göstermektedir.

Mevcut bir kapalı ortam hava kalitesi izleme sisteminin ortamın hava kalitesini tam ve doğru olarak tanımlayabilmesi önemlidir. Çünkü ortamın insanlar üzerinde oluşturacağı ters etkileri en aza indirmek için sistemin sonuçları doğrultusunda doğru eylemlerin yapılması gerekecektir. Örneğin binalardaki kapalı ortam hava kalitesini veya enerji tüketimini sürekli olarak ölçmek ve izlemek için geliştirilen sistemler, akıllı ve uyarlanabilir binalar oluşturmak için iyi bir alt yapı oluşturmaktadır. Yapılan ölçümler her zaman tek başına bir anlam ifade etmeyebilir. Mesela CO₂, sıcaklık ve nem ölçümü yapabilen bir sistemde ölçülen parametreler ortam hava kalitesi seviyesinin tespitinde yalnız düşünülemez. Çünkü bir ortamda ölçülen CO₂ miktarı kabul edilebilir seviyede iken, ölçülen hava sıcaklığı ve nem ortamdaki insanlar için yeterince konforlu mudur? Yoksa sıcaklık arttırılmalı veya azaltılmalı mıdır? Eğer değiştirilirse bu durumun diğer konfor parametreleri üzerinde etkisi nasıl olur? Bu tarz bir durumda ortamın genel hava kalitesi hakkında net bir sonuca varılamaz. Bu nedenle birden fazla parametre ölçümü yapılan izleme sistemlerinde makine öğrenmesi ve hesaplama yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Assimakopoulos ve ark., 2013; Ozmen ve ark, 2016).

Bütün bunlardan yola çıkılarak bu tez çalışmasının öncelikli hedefi kampüs sınıflarındaki öğrenciler için daha konforlu ve sağlıklı bir çalışma ortamının sağlanmasıdır. Bu nedenle çalışmada bir üniversite kampüsü içindeki binaların ortam hava kalitesinin izlenip analiz edilebildiği web tabanlı gerçek zamanlı bir izleme sistemi tasarlanmıştır. Ölçümler sırasında her sınıfta bir adet CO₂ metre ve iki adet hava akış metre kullanılmıştır. Sınıf ortamı ve mevsimsel faktörler göz önüne alındığında, bu ölçüm cihazları ile çevresel faktörler (sıcaklık, nem, hava akış hızı,

CO₂ konsantrasyonu) algılanmakta, metabolizma hızı, giyim gibi sübjektif faktörlerle birlikte elde edilen ham bilgi anlamlı hale getirilmekte, bulanık mantık ile ağırlıklandırılıp ve entegrasyon kriterleri belirlenip değerlendirilmektedir. Böylece son kullanıcıya ortamın genel hava kalitesi bilgisi sunulmaktadır.

Her sınıfta kullanılan ölçüm cihazları mikro bilgisayarlara (Raspberry Pi iş istasyonları) bağlıdır ve veri toplama işlemi bu bilgisayarlar üzerinde yapılır. Bunların yanında mimaride kampüs ağına bağlı halde ve verilerin depolandığı bir adet veritabanı sunucusu, sistemin çevrimiçi kullanılması için 1 adet web sunucusu ve bulanık mantık hesaplamaları için kullanılan 1 adet hesaplama sunucusu bulunmaktadır. Ölçüm cihazları ve bir adet bilgisayarın (host machine) bulunduğu her bir sınıf bir sensör düğümü olarak kabul edilmiştir. Bu düğümlerden gelen veriler kampüs ağı üzerinden arka uç sunuculara iletilmekte, orada depolanıp bulanık mantık yöntemi ile analiz edilmekte ve sonuçlar kabul edilen sınır değerlerinin üstünde olup olmadığını kontrol etmek için izleme bölümüne bildirilmektedir. Bu çalışma kısaca sınıf ortamındaki öğrencilerin konforunu izleyen bir araç olarak değerlendirilebilir ve literatürdeki çalışmalardan farkı ve yapılan katkılar şu şekildedir;

- Çalışmada, kullanılan yüksek hassasiyete sahip sensör dizilerinden oluşan ölçüm cihazları ile çevresel faktörler (sıcaklık, nem, hava akış hızı, CO₂ konsantrasyonu) ölçülür, termal konforu direkt etkileyen sübjektif parametrelerle birlikte elde edilen ham bilgi anlamlı hale getirilir.
- Ortamın çevresel kalite bilgisi elde edilirken kullanılan ve ortam hava kalitesi bilgisi ile birlikte analiz edilen termal konfor değeri bulunurken ölçümlerden elde edilen gerçek değerlerin yanında (sıcaklık, nem ve hava akış değerleri) insanların termal konforunu direkt etkileyen sübjektif parametreler de (giyim seviyesi, metabolik aktivite bilgisi) dinamik olarak hesaplamaya katılmıştır.
- Çalışmada ölçüm parametreleri arasındaki ilişkileri modellemek ve insan algısına yakın sonuçlar üretmek için bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır. Bu veri analiz metodu, ağ üzerinde bulunan hesaplama sunucusu üzerinde

yürütülerek, merkezi sunucu üzerindeki yükü hafifletip bağımlılığı azaltan bir mimari tasarlanmıştır. Böylece merkezi sunucu sadece sistemin görüntülenmesi ve kontrolü için kullanılmıştır.

- Sistemin ölçeklenebilir bir mimariye sahip olması sayesinde her türlü sensör dizisi, ölçüm cihazı veya düğümler sisteme dâhil edilebilmektedir. Böylece ölçüm ortamının özelliklerine ve kullanılan cihazlara bağlı olarak farklı konfigürasyonlar yapıldığında sistem her ortamda kullanılabilir hale gelmektedir.
- Dağıtık ölçüm sisteminin ve sistemdeki cihazların, hostların ve sunucuların merkezdeki sunucu tarafından kontrol ediliyor olması ile sistemi düşük maliyetli, kontrolü kolay ve ölçeklenebilir bir sistem haline getirir.
- Sistemde uç düğümlerin mikro bilgisayarlar üzerinde kurulu olması sistemin genişletilebilmesini ve mevcut nesnelerin interneti uygulamalarına entegresini kolaylaştırmıştır.
- Gerçek zamanlı bir sistem amaçlandığından ağa bağlı düğümlerin ve sunucuların saatini doğru ayarlamak ve eşitlemek için her birine NTP-Ağ zaman protokolü (Network Time Protocol) kurulmuştur.

Bu tez çalışması 5 ayrı bölümden oluşmaktadır. Tezin 2. Bölümünde, öncelikle kapalı ortam hava kalitesi kavramının ne olduğu ve belirli gruplar ve organizasyonlar tarafından kabul edilen kapalı ortam hava kalitesi standartlarından bahsedilmiştir. Daha sonra ortamdaki kirleticilerin endişe verici seviyelerini hızlı analiz edebilmek ve tanımlayabilmek için ise ihtiyaç duyulan gerçek zamanlı ölçümlere dayalı kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemleri ile ilgili son zamanlarda yapılmış çalışmalardan bahsedilmiştir. Ardından bir ortamın hava kalitesi belirlenirken en önemli faktörler olarak değerlendirilen kapalı ortam hava konforu ve termal konfor kavramlarından ve bu konfor parametrelerinin nasıl elde edildiği anlatılmıştır. Bu tarz konfor

parametrelerinin bulanık mantık yöntemiyle değerlendirildiği bulanık mantık tabanlı kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemlerinden bahsedilmiştir.

Tezin 3. Bölümünde çalışmanın yöntem kısmı anlatılmıştır. Öncelikle problemin tanımı ve probleme sunulan çözüm önerisinden bahsedilmiş, ardından kullanılan metotlar anlatılmıştır. Sistemin mimarisinin nasıl olduğu mimarideki uç düğümlerin, sunucuların ve kullanıcıların özellikleri detaylı olarak sunulmuştur. Ardından ölçüm ortamının nasıl oluşturulduğu ve buna bağlı olarak veri toplama ve veri işleme yöntemlerinden bahsedilmiştir. Ayrıca sistemin işleyişi akış şeması şeklinde detaylandırılmış ve ölçüm ortamlarında ölçümlerden sonra ortamda bulunan kişilere yapılan anketler sayesinde gerçek ölçüm sonuçları ile sübjektif değerlendirme sonuçları karşılaştırılarak izleme sisteminin çıktısı değerlendirilmiştir. Çalışmada oluşturulan mimari nesnelerin interneti kavramı altında incelenmiş ve mimarinin bu kavram ile uygulanabilir olduğu görülmüştür.

Tezin 4. Bölümünde yapılan ölçümler sonucunda toplanan verilerden bahsedilmiş, bu veriler ile hesaplanan termal konfor ve kapalı ortam hava konforu bilgilerinin zamana bağlı grafiksel gösterimleri yapılmıştır. Ayrıca sınıfların çevresel hava kalitesine karar veren bulanık sistemin sonuçlarının doğrulanması hedeflenerek ölçüm sonunda yapılan sübjektif değerlendirme sonuçları verilmiş ve yorumlanmıştır.

Tezin son bölümünde ise önerilen ölçeklenebilir bulanık mantık temelli ve gerçek zamanlı çevrimiçi kapalı ortam hava kalitesi izleme sisteminin katkılarından bahsedilmiştir. Ayrıca uygulamadan çıkarılan sonuçların neler olduğu ve gelecekte bu konu üzerinde yapılacak çalışmalar anlatılmıştır.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Kapalı Ortam Hava Kalitesi

İç ortam hava kalitesi (İOHK), iç ortamlarda solunan havanın ne kadar “iyi” ya da “kötü” olduğunu gösteren bir ölçüttür. Kötü İOHK, hastalık ve üretkenlik kaybına yol açabilir. İyi İOHK ise sağlıklı bir yaşam ve çalışma ortamı sağlayabildiği gibi ortamdaki insanlar daha etkin, istekli ve katılımcı olabilir. Bugünlerde insanlar vakitlerinin yaklaşık %80-90’ını kapsayan büyük bir kısmını kapalı ortam içinde geçirmektedir. Kapalı ortamlar okullar, resmi binalar, ev ortamları, spor salonları, hastaneler, alışveriş merkezleri ve taşıtlar gibi mekânlardır. Kapalı ortamlarda kişiler tarafından kolay algılanan ortamın ısısı, ışık miktarı ve ortamdaki gürültü gibi konfor faktörlerinin yanında ortam hava kalitesinin de ortamdaki kişilerin sağlıkları, verimlilikleri ve rahat hissetmeleri üzerine oldukça fazla etkileri vardır. Fakat kapalı ortam hava kirliliği etkileri genellikle uzun vadede ortaya çıkmakta ve kronik rahatsızlıklara neden olmaktadır. Dolayısıyla insan sağlığını doğrudan veya acil olarak tehdit etmemektedir. Bu nedenle aslında çok önemli olan bu etkiler yeterince önemsenmemektedir.

Kapalı ortamlarda havada bulunan çok sayıda ve çeşitli kirleticiler, binaların fiziksel özelliklerine, bulundukları konumlara göre farklılık gösterebilmektedir. Hatta aynı binadaki farklı odalarda bile çok çeşitli hava kirleticileri bulunabilmektedir. Bu kirleticiler genel olarak dış ortamdan kaynaklansa da daha az miktarda iç ortam kaynakları da bulunur. Örneğin, insan sağlığı için oldukça zararlı olan ve hava kirleticileri arasında en yaygın olarak bulunan gazlardan olan kükürt dioksit (SO_2), elektrik üretmek amacıyla termik santrallerden yayılırken, azot dioksit gazı (NO_2) çoğunlukla taşıtlardan yayılmaktadır. Bunların yanında insanlar, havada asılı olan ve solunan parçacıklara, bir şeyin yanması sonucu ortaya çıkan karbon monoksit (CO)

gazı, dış ve iç ortamda çokça bulunan karbon dioksit (CO₂) gazı gibi birçok kirleticiye maruz kalmaktadır. Bu gazlar çeşitli rahatsızlıklara ve hastalıklara sebep olmaktadır. Örneğin, CO gazı baş ağrısına, bilinç kaybına neden olabilirken, CO₂ gazı kişilerin performansı ve üretkenliği üzerinde olumsuz etkilidir. Havada asılı olarak bulunan uçucu organik bileşenler ise solunum yolu rahatsızlıklarına ve kanser gibi hastalıkların oluşmasına temel oluşturmaktadır (Ammann ve ark., 1987; Yalçın ve ark., 2015a).

Binalardaki kapalı ortam hava kalitesi birçok faktöre bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Bu faktörler aşağıdaki gibi listelenebilir (Ammann ve ark., 1987);

- Binaların fiziksel özelliklerinden kaynaklanan bakım problemleri,
- Binanın tavanlarının çok alçak olması veya 2.4 metreden yüksek olması,
- Binaların yalıtımının çok iyi yapılması,
- Binalar yapılırken kullanılan malzemeler (iç cephe boyası, kullanılan yalıtımlı inşaat malzemeleri gibi),
- Binanın çok eski olması,
- Doğal havalandırmanın çok veya az olması,
- Belirli bir merkezden yapılan bina havalandırması ve ısı kontrolü,
- Ortamın neminin çok düşük olması,
- Kapalı ortamlarda kullanılan halılar ve mobilyalar,
- Kapalı ortamlarda içilen sigaralar,
- Kapalı ortamların temizliğinde kullanılan malzemelerden salınan gazlar ve uçucu organik bileşikler,
- Ortamların çok fazla kalabalık olması.

2.2. Ortam Hava Kalitesi Standartları

Tasarlanan sistemlerde, ortam hava kalitesi hakkında karar verilebilmesi için belirli standartlara ihtiyaç vardır. Çünkü bir ortamda insanların maruz kaldığı kirleticilerin tespiti son derece önemlidir. Bu konularda yapılan birçok çalışma sonucunda belirlenmiş standart kabul edilen limit değerler mevcuttur (Satish ve ark., 2012).

Türkiye’de iç ortam hava kalitesi ile ilgili çalışmalar 2001 yılında kurulan İş Sağlığı ve Güvenliği Merkezi tarafından yapılmaktadır. Bugüne kadar Avrupa Birliği’ne uyum çerçevesinde Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 3 farklı yönetmelik yayınlanmıştır. Bu yönetmelikler; Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği, Isınmadan Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği ve Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği olarak yayınlanan yönetmeliklerdir. Ancak hava kalitesi yasa ve yönetmeliklerle kontrol altına alınmak istense de henüz iç ortam hava kalitesi standartları konusunda ülkemizde belirlenmiş değerler yoktur ve Avrupa Birliği’nin belirlemiş olduğu limit değerler geçerli kabul edilmiştir.

Ortam hava kalitesi izleme sistemlerinde kullanılan ve atmosferik ortam kirliliğini analiz etmek için EPA (US Environmental Protection Agency – Çevre Koruma Ajansı) ve Dünya sağlık örgütünün (WHO – World Health Organization) yayınladığı iç ortam hava kalitesi standartları ve bazı temel gazların eşik değerleri Tablo 2.1’de gösterilmiştir. Standartlar, ortam hava kalitesi fonksiyonları, derecelendirilmiş standartlar, kirlilik göstergeleri, gaz yoğunluk limit değerleri, örnekleme ve analiz yöntemleri ve veri istatistiklerine göre hazırlanmıştır (WHO, 2010; Mintz, 2012).

Tablo 2.1. EPA ve WHO tarafından kabul edilen ve yayınlanan iç ortam hava kalitesi limit değerleri

Parametreler	EPA (Çevre Koruma Ajansı)	WHO (Dünya Sağlık Örgütü)
CO	9 (ppm)	9 (ppm)
CO ₂	1000 (ppm)	1000 (ppm)
O ₃	0,05 (ppm)	0,12 (ppm)
SO ₂	70 (ppm)	70 (ppm)
Sıcaklık	22,5-25,5 (°C)	22,5-25,5 (°C)
Nem	<70	<70
PM ₁₀	150 mg/m ³	150 mg/m ³
PM _{2,5}	35 mg/m ³	

Ortam hava kalitesi indeksleri ülkeden ülkeye değişiklik gösterse de belirli kirleticiler için tanımlanan eşik değerler birçok ülkede aynıdır. Dolayısıyla kapalı ortam hava kalitesinin değerlendirilmesi için literatürde genellikle ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers/ Amerikan Isıtma Soğutma

ve İklimlendirme Mühendisleri Topluluğu) ve EPA standartları kullanılmaktadır (Mintz, 2012; ASHRAE-62, 2016). Bu çalışmada da bu standartlar temel alınmıştır.

Yapılan kapalı ortam hava kalitesi izleme çalışmalarına göre, CO₂ konsantrasyonunun binalarda önemli bir kirletici kaynağı olduğu ve hava kalitesini belirlerken kabul edilebilir bir gösterge olduğu açıktır. Çalışmalarda, CO₂ seviyesinin 1000 ppm'den yüksek olması durumunda, karar verme performansının orta derecede düştüğü ve 2500 ppm'in üzerindeki CO₂ seviyesinde ise önemli derecede azaldığı saptanmıştır (Chatzidiakou ve ark., 2012; ASHRAE-62, 2016; Ekren ve ark., 2017). Tablo 2.2'de ASHRAE tarafından yayınlanan ortamdaki CO₂ seviyesinin nasıl sınıflandırıldığı gösterilmektedir.

Tablo 2.2. ASHRAE tarafından yayınlanan kapalı ortamlardaki olası CO₂ seviyesinin sınıflandırılması

CO ₂ (ppm)	HAVA KALİTESİ	AÇIKLAMA
1600 ve üstü	Kötü	Aşırı kirli iç ortam havası Havalandırma gerekir. Sağlık üzerinde negatif etkiler görülmeye başlar. 8 saatten az maruz kalınmalı.
1100 - 1500	Vasat	Kirli iç ortam havası Havalandırma önerilir Uyku hali görülür.
900 - 1000	Makul	Kabul edilebilir seviye
700 - 800	İyi	Normal seviye
400 - 600	Mükemmel	Temiz hava

Kapalı ortamdaki hava kirleticilerinin hemen hepsi ortamlarda az veya çok mutlaka bulunmakta ve adeta insan hayatını, sağlığını olumsuz yönde etkileyen mecburi anlamda vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Bu yüzden kapalı ortam hava kalitesinin belirlenmesi ve ortam havasında asılı bulunan bu kirleticilere karşı önlemlerin alınması şarttır ve insan sağlığı için oldukça önemlidir. Dolayısıyla, binalarda yaşanabilir koşulların sürekliliğinin sağlanması için kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemleri önemli bir ihtiyaç haline gelmiştir.

2.3. Gerçek Zamanlı Kapalı Ortam Hava Kalitesi İzleme Sistemleri

Kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemleri ortamın hava kalitesi hakkında bilgi vermenin yanında, ortamdaki temiz havanın artırılması için doğru stratejileri sunmaya yardımcı olarak geliştirilen sistemlerdir. Ortamdaki kirleticilerin endişe verici seviyelerini hızlı analiz edebilmek ve tanımlayabilmek için ise gerçek zamanlı ölçümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Gerçek zamanlı hava kalitesi verisinin bulunması, zamanla insanların ortam hava kirliliğini arttıran konular hakkında daha duyarlı olmasını sağlar. Daha fazla sağlık bilincine sahip insanlar ise alternatif rotalar seçerek ortam hava kirliliğinin azalmasına fayda sağlar. Dolayısıyla ulaşım, nüfus yoğunluğu, artan küresel ısınma ve ani iklim değişikliği ile hava kalitesi, günümüz kentsel ekosistemlerinde gerçek zamanlı olarak yakından takip edilmesi gereken kritik önlemlerden biridir.

Kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemleri ile ilgili yapılan çalışmalarda genellikle farklı sensör tipleri ve iletim altyapıları ile ortam havası izlenmiş, elde edilen veriler farklı veri işleme veya istatistiksel metotlar ile değerlendirilerek hava kalitesi izleme sistemleri için birçok farklı yöntem önerilmiştir. MOS (Metal oxide semiconductor - Metal oksit yarı iletken) sensörleri kullanarak gerçekleştirilen bir çalışmada gerçek zamanlı olarak iç ortam hava kalitesini izlemek için bir yöntem önerilmiştir. Çalışmada sistemin tasarlanması, uygulanması ve altyapısı ile verilerin işlenmesi ve sistemin sorunları ele alınmaktadır (Kim ve ark., 2014). Başka bir sensör çeşidi olan iAQ-2000 CO₂ sensörünün kullanıldığı bir başka çalışmada ise, CO₂ konsantrasyonun gerçek zamanlı izlenip, tespit edildiği WSN (Wireless sensor network – Kablosuz sensör ağı) sensör ağı sistemi sunulmuştur. Tasarlanan sistem binanın mevcut ağ altyapısı üzerinde minimum etkiye sahip bir prototip olarak oluşturulmuştur (Spachos ve Hatzinakos, 2016).

Hava kirliliği izleme ve tahmini için, gaz ve meteorolojik sensör dizisi kullanılarak yapılan bir çalışmada, sensörlerin düşük maliyetli olmasının sağladığı avantaj ile bir hava kalitesi izleme sistemi tasarlanmıştır. Sistemde, çoklu gaz sensör cihazı kullanılarak algılanan veriler, kirlilik verilerini alıp depolamaktan sorumlu olan akıllı

bir algılama platformuyla iletişim kurar ve istatistiksel verilere dayanarak, sistem kirletici seviyesini tahmin eder. Ancak tasarlanan sistem gerçek zamanlı ölçüm ve buna bağlı olarak gerçek zamanlı kirletici seviye tespiti için uygun değildir (Shaban ve ark., 2016).

Kablosuz sensör ağları aracılığı ile iç ve dış ortam hava kalitesi izleme sistemi sunulan bir çalışmada, sistemde bulunan her düğüm sensör dizilerinden oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Bu sensör dizilerinden alınan veriler kablolu ve kablosuz şekilde merkezi sunucuya iletilmektedir. Kullanılan sensörlerin tepkilerinin çok çeşitli karakterizasyona sahip olması yani sıcaklık ve nemin sensörlerin tepkileri üzerinde epey etkili olmasından kaynaklı ise sonuçları gerçek sonuçlara yaklaştırmak ve ölçüm doğruluğunu arttırmak için sıcaklık ve gaz sensörünün ürettiği voltaj nem faktörü ile birlikte yapay sinir ağında analiz edilip ortamın gaz yoğunluğu tespit edilmeye çalışılmıştır (Postolache ve ark., 2009).

Son zamanlarda elektronik gaz sensör teknolojisinin gelişim göstermesi ve eskiye oranla ucuzlaması, bunun yanında birçok alanda kapalı ortam hava kalitesinin izlenmesinin mecburi hale gelmesi dağıtık gaz sensör sistemlerinin kullanımını oldukça yaygın hale getirmiştir. Gaz sensörlerinin doğası gereği dağıtık halde bulunmaları ve farklı yerlerdeki gazların da eş zamanlı ölçülmek istenmesi kurulacak sistemi çevrimiçi dağıtık bir hale sokmaktadır.

Dağıtık paralel gözlemleme sistemleri ile dağıtık gaz sensörlerinin verilerinin toplanması ve işlenmesi arasında benzerlik bulunur (Dural ve Ozmen, 2014a; Dural ve Ozmen, 2014b). Dağıtık paralel performans verisi toplama işlemi 2 aşamadan oluşur. Öncelikle yerel düğümlerde veriler toplanır, ardından sunum araçları tarafından grafiğe dönüştürülmesi için merkezi bir yere (sunuculara) taşınır. Merkezi yerde toplanan veriler, veri analizleri için depolanabilir. Benzer şekilde dağıtık gaz sensörleri veya sensör hücreleri de veri kaynağı olarak düşünülürse, bu kaynaklarda bulunan mikro denetleyici devre yoluyla üretilen verilerin merkezi bir yerde (sunucuda) toplanması ve işlenmesi gerekir. Böylece maliyet, erişim kolaylığı (hız performans), ölçeklenebilirlik, güvenilirlik, dağıtım kolaylığı, hesaplama ve depo alanı gibi dağıtık

sistemlerin sağladığı avantajlardan yararlanılır. Kısaca ortam hava kalitesinin izlenebilmesi için oluşturulan dağıtık sistemlerin dağıtık olmayan sistemlere göre gayet esnek yapıda ve zeki sistemlere dönüştüğü görülmektedir.

Kapalı ortam hava kalitesinin izlenmesi için oluşturulan sistemlerde dağıtık halde bulunan sensör düğümlerinden alınan veriler sensör ağları üzerinden merkezi sunuculara taşınır, orada analiz edilir ve sınır değerleri aşan sonuçlar izleme bölümü üzerinden gösterilir. Yani bu tarz sistemler veri toplama katmanı, iletim katmanı ve izleme katmanı olmak üzere dağıtık halde birçok katmandan oluşur. Veri toplama katmanı; farklı lokasyonlarda bulunan farklı çok sayıda düğüm içerir. Sensörlerden toplanan çeşitli çevresel parametreler ile paketler oluşturulur ve oluşan veri paketleri bir mikro kontrolör üzerinden iletim katmanı aracılığı ile çeşitli iletişim protokolleri kullanılarak merkezdeki sunuculara gönderilir. Bu paketler merkezi sunucularda incelenip analiz edilerek izleme katmanında son kullanıcı için anlamlı grafiksel bilgiye dönüştürülür.

Dağıtık sensör birimlerinden oluşan altyapı ile tasarlanan iç veya dış ortam hava kalitesi izleme sistemleri ile ilgili yapılan çalışmalardan birinde astım hastalığını tetikleyici faktörlerin değerlendirildiği, Raspberry Pi düğümlerinden oluşan kablosuz sensör ağı tasarlanarak web tabanlı bir bilgi sistemi sunulmuştur (Teixeira ve Postolache, 2014). Başka bir çalışmada ise, sıcaklık, nem ve ışık yoğunluğunu izleyen bir sistem önerilmiş ve ev ortamında ölçümler yapılmıştır (Kelly ve ark., 2013).

Kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemlerinin tasarımı sırasında pek çok soru ortaya çıkar:

- Kullanılacak sensör tipleri,
- Sensörlerin yerleştirileceği noktaların tespiti,
- Sensörlerin ve merkezi kontrol biriminin iletişim yöntemleri,
- Sensörlerin ürettiği verilerin analiz edileceği ve depolanacağı yere karar verilmesi.

Sistem tasarımı sırasında kullanılacak sensörlerin seçimi oldukça önemlidir. Çünkü yüksek seçiciliğe sahip sensörler epey pahalı iken, ucuz sensörler de her zaman doğru sonuç vermeyebilir. Ancak bu tarz sistemlerin büyüklüğü göz önüne alındığında pahalı sensörlerin kullanılması çok büyük maliyetlere meydan verecektir. Son zamanlarda bu konuda yapılan çalışmalara bakıldığında düşük maliyetli sensörlerin (genellikle tin-oxide yarı iletken elemanlardan oluşurlar) epey popüler hale geldiği ve gerçek hayat uygulamalarında kullanışlı olduğu görülmektedir. Bu sensörler ucuzdur ve aralarında atmosferik kirlilik yaratan CO, CO₂, NO_x ve H₂S gazları da olan geniş yelpazede birçok gaz üzerinde yüksek seçicilik gösterdiği gözlenmiştir (Tasai ve ark., 1995; Ozmen ve ark., 2016).

Kapalı bir ortamda sensörlerin yerleştirileceği yerin belirlenmesi etkili ve doğru bir ölçümün yapılabilmesi için önemlidir. Sensör yerleşimi bir ortamdaki pencere ve kapı konumları, odanın büyüklüğü, tavan yüksekliği, insanların konumlanacağı yerlere göre değişiklik gösterir (Krause ve ark., 2006). Ayrıca bir ortamda doğru yere konumlandırılan sensörler güvenilir ve doğru ölçüm sağladığında gereksiz sensör kullanımı azalmış olur. Bütün sistem düşünüldüğünde optimum sensör kullanımı toplam maliyeti büyük ölçüde azaltacaktır.

Kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemlerinde gözlenen oda sayısı uygulama alanlarına göre değişiklik gösterir ve çoğunda bu sayı birden fazladır. Dolayısıyla çok sayıda sensörün ürettiği verinin bir merkezde toplanması ve son kullanıcıya anlamlı bilgi şeklinde sunulması gerekir. Aynı şekilde sistem konfigürasyonu sırasında da merkezi sunucudan sensör düğümlere bilgi akışı olur. Dolayısıyla veri gönderme-alma işlemi belirli ağ protokolleri kullanılarak ve ya dağıtık sistemlerdeki gibi paralel veri iletişimi kullanılarak yapılabilir (Balta ve ark., 2015). Veri iletişimi sırasında darboğazların oluşmaması için sensörler ve merkezi sunucu arasındaki iletişim bu sistemler tasarlanırken irdelenmesi gereken bir konudur.

Sensörler belirli aralıklarla veri üretir. Bu veriler önce depolanır, ardından veri işleme algoritmaları ile analiz edilir. Elde edilen bilgiler merkezi sunucuya gönderilir. Verilerin depolanacağı ve analiz edileceği yere karar verilmesi sistemin işleyişi ve

hızlı cevap vermesi açısından epey önemlidir. Örneğin üretilen verilerin merkezi sunucuda veya sensör düğümlerinde analiz edilmesi sistemin büyüklüğüne göre değişmelidir. Çok sayıda sensör düğümü bulunan sistemlerde merkezde toplanacak veri çokluğu düşünüldüğünde veri analizinin sensör düğümlerinde yapılması sistemin hızına ve işleyişine olumlu etki yapacaktır. Kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemlerinin tasarımı sırasında ortaya çıkan bu tarz problemlerin çözümü sistemin performansı, doğruluğu ve maliyeti üzerinde doğrudan etkilidir. Dolayısıyla bu sorunların deneme yanılma yöntemleriyle çözülmesi hem zaman ve iş gücü kaybına hem de maddi kayıplara neden olur (Yalcin ve ark., 2015b).

Kapalı bir ortamdaki kirletici gazları ve buharı tespit etmekle birlikte ortamdaki sıcaklık ve buharı izlemek için yapılan bir çalışmada, bluetooth özellikli kablosuz sensör ağı tasarlanmıştır. Dağıtık ölçüm sistemi olarak tanımlanan bu çalışmada ayrıca kullanıcı ve sistem etkileşimini sağlamak için akıllı telefonlar kullanılmıştır. Sensör düğümleri veri okuma işlemini bluetooth üzerinden yapmaktadır. Veri işleme, veri depolama işlemlerini yapmakta, ayrıca hava kalitesi parametreleri için belirli bir eşik değer gözeterek alarm sistemini devreye sokmaktadır. Çalışmada akıllı telefonlar kullanılarak düşük maliyetli insan-makine etkileşimli dağıtık kablosuz ölçüm sistemlerinin tasarlanması kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemlerine iyi bir çözüm olacağı söylenmektedir. Çalışmada, sensör düğümlerinin bir oda içerisinde yerleştirilmesi iki kriter göz ederek yapılmıştır. Bunlar bluetooth sinyal gücü ve hava parametrelerinin ölçüm doğruluğudur. 2 sensör kullanılmış ve ilki pencerenin olduğu duvarda pencerenin üstüne konurken, diğeri de tam karşısındaki duvara tavan yüksekliğinin yerden %60'ına konulmuştur (Postolache ve ark., 2009).

Kapalı ortam hava kirliliği ölçümlerinde genelde sabit veya mobil sensör ağları kullanılmaktadır. Ancak her ikisinin de kendine özgü eksiklikleri bulunmaktadır. Sabit sensörlerin ölçüm sonuçları yeterince güvenilir olmayabilir. Çünkü insanların yoğun olarak bulunduğu her noktaya yerleştirilmeleri zordur. Mobil sensörler ise epey ekonomiktir fakat doğruluk ve direnç kaymaları konusunda sonuçlar çok kesin değildir. Bu konuyla alakalı yapılan bir çalışmada sabit ve mobil sensörlerin kullanıldığı hibrit bir sensör ağı mimarisi önerilmiştir. Bu mimarinin uygulama alanı

için simülasyon ortamı tercih edilmiştir. Çalışmada yazarlar kapalı ortam kirletici yoğunluk tahmini problemini formüle etmişler ve sensör doğruluğunu artıran Bayesian analizini önermişlerdir. Geliştirdikleri algoritma ile hibrit sensör ağlarında kirletici yoğunluğunu en az hata ile ölçmeye çalışmışlardır. Oluşturulan hibrit sistemin, sabit sensörlerden oluşan ağlara göre %35,8, mobil sensörlerden oluşan ağlara göre %40,4 oranında daha doğru sonuçlar verdiği gözlenmiştir (Xiang ve ark., 2013).

Bir binanın kapalı ortam hava kalitesi izlendiği başka bir çalışmada, izleme sistemi sayesinde kontrol sistemlerinde karar mekanizması için bir platform sunulmuştur. Düşük güç tüketimi sağlayan kablosuz sensör ağ tasarımı ile hava kalitesi bilgisi sağlanmış ve CO₂, CO, Propan ve metan gazları izlenmiştir. Çalışmada bu gazlar için iyi seçiciliğe sahip ve Figaro firmasına ait yarı iletken metal oksit gaz sensör dizileri kullanılmıştır. Sensör düğümlerinden ise veriler analiz edilmiş halde toplanmıştır. Farklı düğümlerden farklı gazlara ait veriler toplanıp birleştirilmiş ve ortam havası hakkında iyi veya kötü şeklinde karar verilmiştir. Sensör düğümleri ve merkez arasındaki iletim radyo frekansı üzerinden ZigBee protokolü kullanılarak yapılmıştır (Preethichandra, 2013). Yazarların yaptığı diğer çalışmada ise kompleks ortamlar için gaz ölçüm sistemlerinde enerji verimliliği için dinamik olarak tekrar konfigüre edilebilen sensör ağ topolojileri önerilmiştir (Preethichandra, 2014). Bu tarz çalışmalarda her bir uygulama farklı zamanlarda, farklı doğrulukta ve hassasiyete gerek duyabilir. Bu nedenle değişken ağ topolojilerine ve uygulama alanına uygun bir altyapı tasarlanmıştır. Talebe bağlı büyüyen ağ, iletişim gecikmelerine ve donanımsal hatalara eden olduğundan böyle bir çalışmaya gerek duyulmuştur. Önerilen sistemde çok sayıda sensörden oluşan sensör düğümleri ölçüm yapacak ve diğerlerinden bağımsız olarak ana merkeze rapor edecektir. Eğer bir sensör düğümünde ölçüm sırasında sapmalar meydana gelirse konfigürasyonu değişecektir.

Monte Carlo tahmin yönteminin kullanıldığı bir başka çalışmada, mutfak gazlarının ürettiği kirliliğin kapalı ortam hava kalitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir (Johnson ve ark., 2011). Diğer bir çalışmada ise, sigara içilen ortamlardaki hava kirliliği için bir kaç matematiksel model önerilmiştir (Ott, 1999). Bu yöntemlerden farklı olarak yapılan başka bir çalışmada, daha iyi tahminler yapabilmek için, meteorolojik

özellikler ve dış ortam hava kalitesi de işin içinde katılmıştır (Chen ve ark., 2014). Çalışmada binalardaki kapalı ortam hava kalitesinin iç ortam, dış ortam havası, nem, sıcaklık ve rüzgâr hızına bağlı olduğu söylenmiştir. Bir binadaki her kata izleme aracı kurulmuş, com-usb-port ile merkezi sunucuya bağlanmıştır. Sunucu her dakika izleme cihazından hava kalitesi bilgisini alıp, 10 dakikada bir ortalama hava kalitesini bulut sistemine yüklemektedir. Web sitesi veya mobil kullanan son kullanıcı anlık bilgileri takip edebilmektedir. 150 günlük kapalı ortam, dış ortam hava kalitesi ile meteorolojik veriler toplanıp yapay sinir ağlarıyla işlenmiştir. Sonuç olarak sistemden elde edilen bilgi anında son kullanıcının mekân tercihi yapmasında epey etkili olduğu söylenmiştir.

Kapalı ortam hava kalitesinin izlendiği başka bir çalışmada tasarlanan sistem kablosuz sensör ağı, bir sunucu ve servis yönelimli kullanıcı tarafı olmak üzere 3 bölümden oluşmaktadır (Peng ve ark., 2013). Figaro firmasının ürettiği metal oksit yarı iletken temelli ve hava kirleticilerinin tespiti için kullanılan gaz sensörü (TGS2602) ile ölçülen gazlar kablosuz sensör ağları aracılığıyla ZigBee teknolojisi kullanılarak merkez düğümde toplanır. Buradan veriler RS232 iletişim protokolü ile sunucuya gönderilir. Bu sunucusunun asıl işi, algılanan verileri veritabanı sistemine depolamak ve web sunucusu olarak kullanıcılara erişim arayüzü sağlamaktır. Kullanıcı ise web tarayıcı, akıllı telefon ve diğer web tabanlı cihazlar ile ortamın hava kalitesi hakkında bilgi sahibi olur. Bu çalışma ile düşük maliyetli, karmaşık olmayan ve gerçek zamanlı bir gaz sensör ağı tasarlanmıştır. Ancak kullanılan sensörlerin düşük seçiciliğe sahip olması, sıcaklık ve nemden kolay etkilenmesi ölçüm sonuçlarının doğruluğunu olumsuz yönde etkiler. Bu nedenle sistemde yüksek seçiciliğe sahip sensörlerin kullanılması veya kullanılan sensör düğüm sayısının artırılması gerektiği açıktır. Benzer bir çalışmada ise yüksek seçiciliğe sahip sensörler kullanılarak kablosuz sensör ağı tasarlanmış, 5 farklı ortamda ölçümler yapılmıştır. Elde edilen veriler eğitim ve test için ayrılmış ve sistemde veri analizi için yapay sinir ağı kullanılmıştır. Elde edilen ölçüm verilerinin yapay sinir ağı ile analizi sonrası hangi ortama ait olduğu tespit edilmiştir. Sistemde gerçek zamanlı ölçüm ile gerçek zamanlı tahmin yapıldığı söylenmiştir (Saad ve ark., 2015).

Dış ortam hava kirliliği izleme sistemi tasarlandığı bir çalışmada, sistemde farklı sensör cihazları kurularak üretilen veriler bir sunucuda toplanmıştır. Sunucu gelen verileri sıralamakta ve veri tabanında kayıtlı olan kurallara göre çeşitli işlemlerden geçirmektedir. Ardından elde edilen sonuçları alarm sistemine göndermektedir. Sonuç olarak ise alarm sistemi yüksek gaz yoğunluğu olduğunda uyarı vermektedir (Choi ve ark., 2009). Başka bir çalışmada, sensör yazılım ve donanımı birleştirilmiş ve gerçek ortamda test edilmiştir. Yazarlar, aynı zamanda farklı sensör cihazlarını kurmak yerine, farklı sensörleri (sıcaklık, nem, VOC – uçucu organik bileşen gibi) aynı kart üzerinde birleştirmişlerdir. Ölçülen farklı hava kalitesi verileri izleme sistemine gönderiliyor. İletişim düğümünden-düğüme (hop-by-hop) şeklinde yapılmış, farklı yönlendirme protokolleri kullanılmıştır (Mandayo ve ark., 2011).

Kapalı ortam hava kalitesi izleme için yapılan başka bir çalışmada ise kişiselleştirilmiş mobil ölçüm sistemi tasarlanmıştır. Hava değişim oranı kullanılarak uçucu organik bileşenleri, CO₂ yoğunluğu kullanılarak ise insana bağımlı hava kalitesi faktörü tahmin edilmiştir. Ayrıca sistemde, akıllı telefonlar ve taşınabilir ölçüm aletleri birleştirilmiştir. Çalışma, taşınabilir kapalı ortam hava kalitesi ölçüm aletleri, akıllı telefonlar, veri sunucusu ve web sunucusu olmak üzere 4 tip bileşenden oluşmaktadır. Kullanıcılar ile veri sunucusu ortam hakkında bilgi için iletişim halindedir. Web sunucu ise kullanıcıya IAQ verilerini inceleme, analiz etme ve paylaşma imkânı tanımaktadır. Bu çalışma ile sabit sensörlerin ölçüm sırasında karşılaştığı yetersizlikler ve yüksek maliyetin hareketli sensörler kullanarak önüne geçildiği görülmektedir (Jiang ve ark., 2011).

2.4. Kapalı Ortam Hava Konforu

Kapalı ortam hava kalitesinin değerlendirilmesi sırasında birçok konfor faktörü birlikte düşünülmelidir. İstenilen konforlu yaşam seviyesinin sağlanması için görsel konfor, akustik konfor, termal konfor ve ortam hava konforu şeklinde ayrılmış olan bu faktörlerin hepsinin kabul edilebilir seviyelerde olması şarttır. Ancak ortam hava konforu ve termal konfor, ortamın genel hava kalitesinin belirlenmesinde en önemli

faktörler olarak düşünülürken, diğer konfor parametreleri ise ihmal edilebilmektedir (Rawi ve Al-Anbuky, 2013; Martínez ve ark., 2015).

19. Yüzyıldan beri kapalı bir ortamda ölçülen CO₂ seviyesi binalarda hava kalitesinin ve dış ortamdan gereken hava akış oranının bir göstergesi olarak kullanılmaktadır (Satish ve ark., 2012; Emmerich ve ark., 2017). Bir ortamdaki CO₂ konsantrasyonunun izlenmesi ortamın havalandırma kontrolüne yardımcı olur ve böylece kapalı ortam hava kalitesini ve buna bağlı olarak da konfor koşullarını muhafaza eder. CO₂ miktarı için Pettenkofer sayısı olarak da bilinen sınır değer 1000 ppm veya 1800 mg/m³ değeridir. Dolayısıyla 1000 ppm CO₂ konsantrasyonu, kapalı ortam hava kalitesi için sınır kabul edilmektedir (Mendell ve Heath, 2005; Satish ve ark., 2012; William ve ark., 2013). Eğer CO₂ miktarı bu sınır değerden düşük ise iç ortamın hava kalitesi kabul edilebilir seviyededir ve ortam hava konforu iyidir denilebilir. CO₂ seviyesinin arttığı diğer durumda ise ortam konfor seviyesi gitgide düşmektedir.

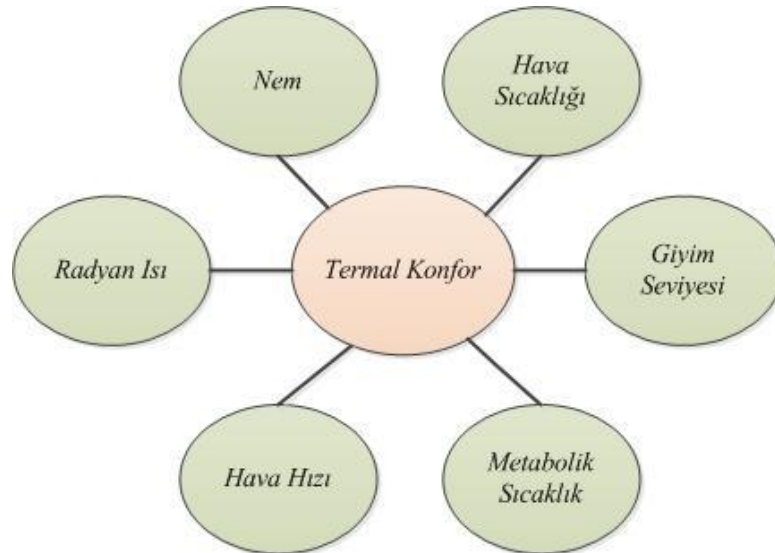
Literatürde okul, hastane ve ofis gibi çeşitli ortamlarda yapılan ölçümler ile yalnızca CO₂ seviyesinin izlendiği ve analiz edildiği birçok çalışma mevcuttur. Örneğin, sınıf ortamlarında uzun vadede yapılan ölçümler sonucunda CO₂ seviyesinin çoğu sınıfta kabul edilebilir sınır değerinin epey üzerinde olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca CO₂ yoğunluğunun artmasıyla sınıfta bulunan öğrencilerin konforlarının düştüğü ve davranışlarının değiştiği belirlenmiştir (Santamouris ve ark., 2008; Bakó-Biró ve ark., 2012). Kavgic ve arkadaşlarının (2008) çalışmasında ise iç mekânlarda daha düşük bir CO₂ seviyesine ulaşmak için ortam aşırı havalandırılrsa bu sefer de soğuktan dolayı rahatsızlık şikâyetlerinin arttığını önerilmektedir. Bu durumda da ortam hava konforu iyi olarak nitelendirilirken termal konfor kötü seviyededir denilebilir ve ortamda bulunan insanlar ortamı yine de konforsuz olarak nitelendirecektir.

2.5. Termal Konfor

Termal Konfor; bir ortamın sıcaklık, nem, hava akımı gibi iklimsel parametreler altında ısı konforu ile ilgili memnuniyetini belirleyen ve öznel değerlendirme ile ifade edilen kişisel bir durum olarak tanımlanabilir. Yani ortamda bulunan insanların

fiziksel ve zihinsel aktivitelerini devam ettirirken belirli bir konfor içinde bulunmalarıdır. Örneğin, soğuk ortamlarda, vücut daha fazla ısı kaybeder ve sıcak ortamlarda vücut çevreye yeterince ısı vermez. Dolayısıyla hem sıcak hem soğuk senaryolar her zaman rahatsızlığa yol açar. Bir ortamda termal konfor koşulları iyi değilse ortamdaki insanlar önce sıkıntı hisseder ardından bu durum rahatsızlık boyutuna geçer. Yani ortamın termal konforunun iyi veya kötü seviyede olması ortamdaki kişiler tarafından bir süre sonra hissedilir. Kapalı bir ortam için bu termal konfor standardını korumak önemli hedeflerden biridir.

Termal konforu etkileyen kişisel ve çevresel faktörler Şekil 2.1.'de gösterilmiştir. Çevresel konfor parametreleri havanın akış hızı, nemi, sıcaklığı, radyan ısıdır. Kişisel faktörler ise kişiye göre değişen metabolik aktivite seviyesi ve giyim seviyesi (mevsim ile doğru orantılı giyilen kıyafetlerin kalınlığı) olarak belirlenir. Termal konforu etkileyen bu parametreler aslında birbirinden bağımsızdır. Ancak birlikte düşünüldüğünde bu parametreler bir kişinin bulunduğu ortamdaki termal konforunu belirlemektedir.



Şekil 2.1. Termal konfora etki eden çevresel ve kişisel faktörler

Havanın sıcaklığı insan vücudunu çevreleyen havanın sıcaklığı iken, radyan ısı ise bir nesneden yayılan sıcaklık olarak tanımlanır. Güneş, ateş, buharlı makineler, bilgisayar ve televizyon gibi ısınan cihazlar, ev ortamlarındaki kurutucu makineler, ısı yayan küçük ev aletleri gibi cisimler radyan ısı kaynaklarına örnek gösterilebilir. İnsan vücudunun çevre ile yaptığı ısı alışverişinde radyan ısı, havanın sıcaklığına göre daha fazla etkilidir.

Termal konforu etkileyen parametrelerden biri olan hava akışı, bir yüzey ile hava arasındaki sıcaklık taşınım katsayısını etkiler. Dolayısıyla bir ortamdaki hava akış hızı yani havanın hareketli olması termal konfor hesabı sırasında çok önemli bir parametredir denilebilir. Eğer bir ortamda, ortamın sıcaklığından daha soğuk bir hava hareket halindeyse kişiler ortamı daha soğuk olarak hisseder. Yani vücut ile ortamdaki hava arasındaki ısı transferi hava akışı ile olur. Bu durumda bir ortamın sıcaklığının belirlenmesinde hava akışı mutlaka hesaba katılmalıdır. Ayrıca bir ortamdaki hava hareketi ortamda mevcut olan sağlığa zararlı gaz ve toz gibi uçucu bileşenlerin ortamdaki uzaklaştırılmasına yardımcı olur. Yani bir ortamın termal konforunu kabul edilebilir seviyede tutmak ve havada asılı olan zararlı parçacıkların ortamdaki uzaklaştırılması için uygun hava akışı sağlanmalıdır.

Havadaki nem miktarının olabilecek maksimum nem miktarına oranı olarak tanımlanan ortamın bağıl nemi ise, termal konfora katkıda bulunan diğer konfor parametrelerine bağlı olarak %0 ile %100 arasında değişebilir. Ancak %40-%70 arasında bulunan bağıl nem miktarı termal konfor hesabı sırasında çok fazla etki oluşturmaz. Havalandırma sistemi olmayan ve dış ortam hava durumunun devamlı olarak iç ortamı etkilediği durumlarda nem oranı %70 ve üzeri olabilir. Yüksek oranda su buharı bulunan nemli ortamlar; insanlardaki ısı düşürme düzeneği olan terin buharlaşmasını önler, yani bir ortamda nem oranı %80'den yüksek ise insan derisindeki ter buharlaşamaz. Bu nedenle çok sıcak ortamlarda havadaki nem oranı oldukça önemli bir faktördür.

Tablo 2.3.'te belirtildiği gibi ASHRAE Standard 55- 2013 ve ISO 7730'ye göre (International Organization for Standardization - Uluslararası Standartlar Teşkilâtı),

sıcaklık değerinin yaz döneminde 23-28 °C aralığında, kış döneminde ise 20 – 25,5 °C aralığında ayarlamının ve ortamın nemini kışları %30 - %65 arasında, yaz döneminde ise %20 - %60 arasında tutmanın termal konfor için uygun olarak belirlenmiştir (ISO/FDIS7730, 2005; ASHRAE Standard 55, 2013).

Tablo 2.3. ASHRAE Standart 55 ve ISO 7730'a göre ısı konfor sınır değerleri

	Kışın Konfor Aralığı	Yazın Konfor Aralığı
Sıcaklık	20 °C ile 25.5 °C arası	23 °C ile 28 °C arası
Bağıl Nem	%30 ile %65 arası	%20 ile %60 arası
Hava Akış Hızı	< 0.15 m/sn	> 0.25 m/sn

Termal konforun belirlenmesinde giysilerin yalıtkan etkisi ve giyim seviyesi oldukça önemlidir. Bir ortam gayet uygun sıcaklık seviyesinde olsa dahi ortamdaki bir kişinin çok kalın kıyafetler giymesi kendini sıcaklık konusunda gergin hissetmesinin temel neden olmaktadır. Termal konfora etki eden diğer kişisel faktör ise metabolik aktivite seviyesidir. Kişilerin bir iş yaparken vücutlarının ortaya çıkardığı sıcaklık metabolik sıcaklık olarak belirlenir. İnsanların vücut ısısı yapılan aktivite oranında ısı üretir ve üretilen ısıyı dışarıya iletilmesi şarttır. Yani kişilerin metabolik aktivite sonucunda ürettikleri metabolik sıcaklık faktörünün termal konfor hesabında etkisi fazladır. Metabolik aktivite sonucunda kişilerin ürettikleri sıcaklık kendilerine özel fiziksel karakteristiklerine bağlıdır. Yani bir ortamın hava sıcaklığı, nemi ve hava akış hızı sabit kabul edilse bile, kişilerin cinsiyeti, yaşı, kilosu, kondisyonu, boyu gibi unsurlar aynı ortamda bulunmalarına rağmen ortamın termal konforunu farklı farklı hissetmelerinin nedenidir.

ASHRAE 55-2013 standartlarına göre düzenlenen, belirli durumlar için metabolik aktivite seviyeleri ve giyim seviyeleri sırasıyla Tablo 2.4. ve Tablo 2.5.'de gösterilmiştir.

Tablo 2.4. Belirli durumlar için metabolik aktivite seviyeleri

Aktivite	Metabolik oran (mets)
Yaslanarak uzanma	0.8
Sessizce oturma	1.0
Oturarak yapılan işler (ofis, lab, okul)	1.2
Ayakta durmak (rahat halde)	1.2
Hafif aktivite ayakta (alışveriş, lab, hafif endüstri)	1.6
Orta derece aktivite ayakta (ev işleri, makine işleri)	2.0
Ağır aktivite (ağır makine işleri, tamir işleri)	3.0

Tablo 2.5. Belirli durumlar için giyim seviyeleri

1 clo = 0.155 m ² °C/ W	Icl (clo)
En düşük değeri (kıyafetsiz)	0
En yüksek değer (kürk pantolon, ceket, şapka, eldiven vs.)	4 clo
Yazlık kıyafet	~ 0.6
Kışlık kıyafet	~ 1

Termal konfor insan vücudunun en çok etkilendiği konfor faktörüdür. Bu nedenle görsel konfor, akustik konfor, termal konfor gibi çevresel konfor faktörlerinin incelendiği birçok çalışmada termal konfor en yüksek ağırlığa sahip konfor faktörü olarak değerlendirilmiştir (Gouda ve ark., 2001; Reffat ve Harkness, 2001; Chen ve ark., 2006). Dolayısıyla kapalı ortam hava kalitesi izleme veya analiz çalışmalarında mutlaka üzerinde durulması gereken bir konudur. Yıllardır iç hava kalitesinin analizi ve HVAC (Heating, Heating and Air Conditioning – Isıtma, Soğutma ve Havalandırma) sistemlerinin tasarımı için çok sayıda termal konfor modeli kurulmuştur. Ancak bunlardan yalnızca bazıları mevcut bir oda ikliminin odadaki insanlar için en uygun termal koşulları oluşturması için kullanılmıştır. En yaygın ve en iyi anlaşılanı 1970 yılında, Fanger'ın ortaya koyduğu, herhangi bir aktivite seviyesi ve herhangi bir giysi yalıtımı için, sıcaklık, nem, ortalama ışıın sıcaklığı ve hava akış hızının çevresel değişkenlerin tüm kombinasyonlarını optimum termal konfor yaratacak şekilde hesaplamayı mümkün kılan genel bir konfor denklemdir (Fanger, 1972). Daha sonra ASHREA (American Society of Heating, Refrigerating and Air-

Conditioning Engineers, Isıtma, soğutma ve havalandırma mühendisliği, Amerikan Derneği) tarafından da benimsenen bu denklem, ISO ve Fanger tarafından basitleştirilerek her türlü HVAC sistemde uygulanabilir hale getirilmiştir (Fanger, 1972; ; Int-Hout, 1990; Hamdi ve ark., 1999; ISO/FDIS7730, 2005).

Bilimsel araştırmanın sonuçlarına ve gerçek ISO ve ASHRAE Standartlarına dayalı termal konfor modelleri hakkında derin bir araştırma raporu şeklinde yayınlanan bir çalışmada, yapılan araştırmalarla birlikte, bina tasarımı sırasında termal konfor için deneysel ve teorik modeller oluşturulmuştur. Çalışmada, Fanger'ın termal konfor modelinin termal duyuda rol oynayan değişkenler arasındaki ilişkiyi derin bir analiz ile inceleyip sunduğu söylenmektedir (Orosa, 2009).

Termal konfor çalışmalarının amacı, insanların bir ortamda kendilerini en rahat hissettiği koşulları sağlayan faktörleri bulmaktır. Bir insanın ne kadar sıcak veya soğuk (yani, ne kadar rahat) hissettiğini belirleyen 6 esas değişken vardır. Bunlardan dört tanesi çevresel faktör olarak sınıflandırılan hava sıcaklığı, hava akış hızı, nem ve ortalama ışın sıcaklığı ve diğer ikisi kişisel olarak sınıflandırılan metabolik aktivite ve giyim şeklidir (Parsons, 2003). Bu parametreler ölçüldüğünde veya tahmin edildiğinde, insan vücudu için termal algı PMV hesaplanarak öngörülebilir. Ayrıca PMV ve CO₂ değerleri ile havalandırmanın termal konforu, iç ortam hava kalitesini ve enerji tüketimini gösteren girdi parametreleri olduğundan bahsedilen bir çalışmada, sistemin genel gereksinimlerini karşılamak adına ısıtma, havalandırma ve klima (HVAC) sistemi için en optimal iç ortam havasının gerçek zamanlı belirlendiği alternatif bir yöntem önerilmiştir (Atthajariyakul ve Leephakpreeda, 2004).

PMV, Fanger tarafından yayınlanan vücut termal denge modelidir ve Tablo 2.6' teki gibi -3 ile +3 aralığında soğuktan ısıca doğru ve maviden kırmızıya renklendirilerek gösterilir. ISO standardına göre en konforlu ortam için PMV değerinin 0.5 tolerans ile 0 olması gerekmektedir.

Tablo 2.6. PMV termal konfor duyarlılık aralıkları

PMV Değeri	3	2	1	0	-1	-2	-3
Konfor Duyarlılığı	Sıcak	Ilık	Biraz Ilık	Normal	Biraz Serin	Serin	Soğuk

PMV aşağıdaki eşitlikler kullanılarak (Denklem 2.1, Denklem 2.2, Denklem 2.3, Denklem 2.4) hesaplanır;

$$PMV = (0.303e^{-0.036 \times M} + 0.028) \{ (M - W) - 3.05 \times 10^{-3} [5733 - 6.99 (M - W) - P_a] - 0.42 [(M - W) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5} M (5867 - P_a) - 0.0014 M (34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \} \quad (2.1)$$

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W) - l_{cl} \{ 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \} \quad (2.2)$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} & \text{için } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1\sqrt{V_a} \\ 12.1\sqrt{V_a} & \text{için } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} \leq 12.1\sqrt{V_a} \end{cases} \quad (2.3)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.29l_{cl} & \text{için } l_{cl} \leq 0.078m^2\text{°C/W} \\ 1.05 + 0.645l_{cl} & \text{için } l_{cl} > 0.078m^2\text{°C/W} \end{cases} \quad (2.4)$$

Burada kullanılan parametrelerden, M: metabolizma hızını (W/m^2), W: harici hareket işi (W/m^2) (0 kabul edilebilir), l_{cl} : giyim yalıtımını, f_{cl} : giyim faktörünü, t_a : hava sıcaklığını ($^{\circ}C$), t_r : ortalama ışıma sıcaklığını (mean radiant temperature) ($^{\circ}C$), v: hava akış hızını (m/s), P_a : havanın buhar basıncını (kPa), h_c : konvektif ısı transfer katsayısını ($W/(m^2K)$), t_{cl} : giyim yüzey sıcaklığını ($^{\circ}C$), e: Euler sayısını (2.718) ifade etmektedir.

2.6. Bulanık Mantık Tabanlı Kapalı Ortam Hava Kalitesi İzleme Sistemleri

Mevcut bir kapalı ortam hava kalitesi izleme sisteminin ortamda ölçülen kirletici miktarlarına göre ortamın hava kalitesini tam ve doğru olarak tanımlayabilmesi önemlidir. Çünkü bir ortamda hava kalitesini etkileyen birçok ve birbirinden bağımsız parametre vardır. Dolayısıyla her bir parametre için yapılan ölçüm tek başına ortamın hava kalitesini tanımlamak için yeterli değildir. Ölçülen bütün parametrelerin birlikte değerlendirilmesi gerekir. Kapalı ortam hava kirliliğine sebep olan parametrelerin ve sübjektif konfor verilerinin birlikte değerlendirilerek ortam hava kalitesinin sınıflandırılması için bulanık mantık, yapay sinir ağları gibi yapay zeka tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır (Kolokotsa ve ark., 2001; Tennakoon ve ark., 2010; Mandal ve ark., 2012).

Son yıllarda literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, çevre konularındaki belirsizlik ve öznellik problemlerini çözmek için bulanık mantık tabanlı yöntemlerin kullanışlı olduğu ve istenilen sonuçların elde edildiği görülmektedir. Örneğin, bulanık mantık yönetimi ile enerji verimliliğinin değerlendirildiği, Kolokotsa ve ark. (2001)'nin yaptığı çalışmada, PMV, CO₂ konsantrasyonu ve aydınlanma seviyesini değişen giriş değerleri olarak kullanarak farklı bulanık denetleyiciler tasarlanmış ve denetleyicilerin değişen giriş değerlerine verdikleri yanıtlar incelenmiştir. Rawi ve Al-Anbuky (2013), çalışmalarında çevrenin değerlendirilmesi ve genel konfor indeksinin belirlenmesi için bir bulanık sistem tasarlamışlardır. Termal konfor, görsel konfor, iç ortam hava konforu ve akustik konfor değerlerini belirlemek adına hepsi için ayrı bulanık modeller uygulamışlardır. Ardından her birine insan vücudunu etkileme oranlarına göre birer konfor ağırlığı belirleyerek genel konfor indeksi altında birleştirmişlerdir. Oluşturdukları bulanık modeller, ulusal veya uluslararası standartlara dayalı olarak tanımlanmaktadır. Çalışmada termal konfor (sıcaklık, nem) ve görsel konfor (ışık şiddeti) ölçümleri için fiziksel sensörler kullanılırken, iç ortam hava konforu (CO₂ yoğunluğu) ve akustik konfor (ortamdaki ses miktarı) bilgileri için sanal sensörler yani simülasyonlar kullanılmıştır.

Bu çalışmada, öncelikle hesaplanan PMV değeri ile insan vücudunun en çok etkilendiği ve en yüksek ağırlığa sahip konfor faktörü olan ortamın termal konfor seviyesi elde edilirken, ortam hava kalitesinin direk göstergesi olan ölçülen CO₂ miktarı ile de ortam hava konfor seviyesi belirlenmiştir. Ardından birbirinden bağımsız bu iki konfor faktörü arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi ve sonuçta kapalı ortamın çevresel kalite değerinin elde edilmesi için bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır.

2.7. Literatürde Yapılan Çalışmaların Karşılaştırmalı Özeti

Literatürde kapalı ortam hava kalitesi ve termal konfor izleme sistemleri ile alakalı birçok çalışma ve araştırma mevcuttur. Önceki bölümlerde detaylı olarak anlatılan ve bu konularla alakalı son yıllarda yapılmış olan çalışmaların bu bölümde bu tez çalışması da dâhil olmak üzere karşılaştırmalı olarak özetleri sunulmuştur. İncelenen çalışmalar; kullanılan sensör ağ altyapısına, kullanılan ağ protokolüne, ölçülen gazlara veya parametrelere, veri toplama yöntemlerine, kullanılan sensör tipi ve adedine göre sistemin toplam maliyetine, uygulama alanına, kullanılan veri işleme yöntemlerine, oluşturulan sistemin nesnelerin interneti kapsamında uygulanabilir olmasına kadar çeşitli ölçütlerle değerlendirilmiş ve Tablo 2.7.a.'da ve Tablo 2.7.b.'de sunulmuştur.

Çalışmaların genelinde hava kalitesinin izlendiği ortamların özelliklerine göre ölçülen gaz veya parametre çeşitlerinin ve sayısının değiştiği görülmektedir. Sistemlerde kullanılan sensör tipine, sayısına ve ortamın fiziksel durumuna (uygulama alanı) göre kullanılan sensör ağ altyapısı, dolayısıyla tercih edilen ağ protokolleri ve toplam maliyet değişmektedir. Çalışmaların bazılarında veriler gerçek ölçümlerle elde edilirken, bazılarında simülasyon tekniklerinin veya analitik modelleme yönteminin kullanıldığı görülmektedir. Simülasyon veya analitik modelleme sonucu elde edilen sentetik verilerin kullanıldığı çalışmalarda genellikle veri işleme yöntemlerine başvurulmadığı görülmüştür. Veri işleme algoritmalarının kullanıldığı çalışmalarda bu yöntemler ortamdaki gazın tahmini, verilerin düzeltilmesi, sensör tepkilerinin doğruluğunun artırılması için kullanılırken bazı çalışmalarda ortam hava kalitesinin belirlenmesi için kullanılmıştır. Gelişen teknolojilerinin takibi adına çalışmaların

birçoğunun nesnelerin interneti kavramına çok uzak olduğu, gerekli durumlarda sistemlerin bu kavrama entegre edilebilmesi için tasarımlarının büyük oranda değışmesi gerektiği açıktır.

Bu tez çalışmasının, ölçüm yapılan ortamın ve kullanılan ölçüm cihazlarının özelliklerinden dolayı kullanılan ağ altyapısıyla, gerçek zamanlı ölçüm yapan çevrimiçi bir sisteme sahip olmasıyla, tasarlanan mimarinin yapısıyla ve bu mimarinin nesnelerin interneti kavramıyla uygulanabilir olmasıyla diğerk çalışmalardan ayrıldığı görölmektedir. Bütün bunlardan yola çıkılarak bu çalışmada, ortamın çevresel kalite bilgisi elde edilirken kullanılan ve ortam hava kalitesi bilgisi ile birlikte analiz edilen termal konfor değeri bulunurken ölçümlerden elde edilen gerçek değerklerin yanında (sıcaklık, nem ve hava akış değerkleri) insanların termal konforunu direk etkileyen sübjektif parametreler de (giyim seviyesi, metabolik aktivite bilgisi) dinamik olarak hesaplamaya katılmıştır. Oluşturulan sistem ölçeklenebilir bir mimariye sahiptir, ölçüm yapılan ortamın özelliklerine ve kullanılacak cihazlara bağılı olarak yapılacak farklı konfigürasyonlarla sistem iletişim altyapısını değıştirmeden ve aynı mimariyi kullanarak her türlü ortam için uygun hale gelebilir.

Çalışmada ölçüm parametreleri arasındaki ilişkileri modellemek ve insan algısına yakın sonuçlar üretmek için kullanılan bulanık mantık hesaplamaları ağ üzerinde bulunan hesaplama sunucusu üzerinde yürütölmüştür. Böylece merkezi sunucu üzerindeki yükü hafifletilip merkeze bağımlılığı azaltan bir mimari tasarlanmıştır. Yani merkezi sunucu sadece sistemin görüntölenmesi ve kontrolü için kullanılmıştır. Çalışmada ayrıca gerçek zamanlı bir sistem amaçlandığından ağa bağılı düğümlerin ve sunucuların saatini doğru ayarlamak ve eşitlemek adına her birine NTP-Ağ zaman protokolü kurulmuştur.

Tablo 2.7.a. Literatürdeki çalışmaların karşılaştırmalı özetleri

	Kim ve ark., 2014	Postolache ve ark., 2009	Jiang ve ark.,2011	Xiang ve ark., 2013	Rawi ve Al- Anbuky, 2013	Assimakopoulos ve ark., 2013
Kullanılan Sensör Ağ Altyapısı	WSN (Star)	WLAN	Mobil	Hibrit (Mobil ve sabit sensörler)	WSN	Veriler metro istasyonundan alınmıştır.
Kullanılan Ağ Protokolü	ZigBee	Wi-Fi	Bluetooth Wi-Fi	X	Wi-Fi	
Ölçülen Gazlar / Parametreler	O ₃ ,PM _s , CO, NO,SO ₂ ,CO ₂ , VOC, °C, RH	Metan, CO, CO ₂ , °C, RH	CO ₂ , O ₃	VOC, CO ₂ , °C, RH	°C, RH, Işık (Fiziksel Sensörler) CO ₂ , ses (Simülasyon)	VOC, PMs, °C, RH, CO ₂
Kullanılan Veri İşleme Yöntemi	X	YSA	X	X	Bulanık Mantık	Bulanık Mantık
Uygulama Alanı	Sınıflar, Odalar, Kiliseler	Odalar	Odalar	Simülasyon	Simülasyon	Metrolar
Toplam Maliyet	Yüksek MOS(5), Elk.Kim. (1), Optik (2) sensörler	Orta MOS sensör (4)	Orta MOS sensör (2)	Yüksek MOS (1) Optik (2) sensör	Düşük SunSpot Sensör (2)	Yok
Kullanılan Ortam (iç/dış ortam)	İç ortam	İç ortam	İç ortam	İç ortam	İç ortam	İç ortam
Uygulama / Veri Eldesi	Gerçekleme	Gerçekleme	Gerçekleme	Simülasyon ve Analitik modelleme	Simülasyon	X
Değerlendirme	Yok	Yok	Var	Var	Var	Yok
Veri Toplama Modeli	Gerçek zamanlı ölçüm	Gerçek zamanlı ölçüm	Gerçek zamanlı ölçüm	Sentetik veri	Sentetik veri	Sentetik veri
Nesnelerin İnterneti Uygulanabilirliği	Evet	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır

Tablo 2.7.b. Literatürdeki çalışmaların karşılaştırmalı özetleri

	Spachos ve Hatzinakos, 2016	Saad ve ark., 2015	Ekren ve ark., 2017	Martinez ve ark., 2015	Shaban ve ark, 2016	Bu çalışma
Kullanılan Sensör Ağ Altyapısı	WSN AdHoc	WSN	Ölçümler elle yapılmıştır.	Ölçümler elle yapılmıştır.	WSN	Ethernet
Kullanılan Ağ Protokolü	802.15.4 kablosuz protokolü	802.15.4 kablosuz protokolü			GPRS, TCP/IP	TCP/IP
Ölçülen Gazlar/ Parametreler	CO ₂	NO ₂ , CO ₂ , O ₃ , CO, O ₂ , VOC, PM, °C, RH	CO ₂ , NO ₂ , PM ₁₀ , VOC, °C, RH, Hava akışı (Simülasyon)	Hava akışı, °C, RH, CO ₂	O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , H ₂ S, °C, RH, Hava akışı	CO ₂ , Hava akışı, °C, RH
Kullanılan Veri İşleme Yöntemi	X	PCA, YSA	X	X	SVM, M5P, YSA (gaz yoğunluk tahmini için)	Bulanık Mantık
Uygulama Alanı	Ofis, Laboratuvar, Toplantı odası	Odalar	Sınıflar	Ofisler	Binalar	Sınıflar Ofisler
Toplam Maliyet	Düşük MOS (1) sensör	Yüksek MOS (4), Elk.kim. (2), Optik (1), Termal (2) sensörler	Yüksek IAQ cihazı Optik sensör (4)	Yüksek CO ₂ ölçüm cihazı (3), °C, RH ve Hava akışı propları (3)	Orta Elk.kim. MOS sensör	Yüksek CO ₂ ölçüm cihazı, Optik sensör (4)
Kullanılan Ortam (iç/dış ortam)	İç ortam	İç ortam	İç ortam	İç ortam	İç ve dış ortam	İç ortam
Uygulama / Veri Eldesi	Gerçekleme	Gerçekleme	Gerçekleme ve Simülasyon	Gerçekleme	Analitik Modelleme	Gerçekleme
Değerlendirme	Var	Var	Var	Var	Var	Var
Veri Toplama Modeli	Gerçek zamanlı ölçüm	Gerçek zamanlı ölçüm	Çevrimdışı Ölçüm	Çevrimdışı Ölçüm	Çevrimdışı Ölçüm	Çevrimiçi sistem, Gerçek zamanlı ölçüm
Nesnelerin İnterneti Uygulanabilirliği	Evet	Evet	Hayır	Hayır	Hayır	Evet



BÖLÜM 3. YÖNTEM

3.1. Problemin Tanımı

İnsanlar gün içinde vakitlerinin %90'ını kapalı ortamlarda geçirmektedir. Dolayısıyla kötü hava kalitesi kısa ve uzun vadede insanlar üzerinde kritik sağlık problemlerine neden olmaktadır (Bakó-Biró ve ark., 2012; Chatzidiakou ve ark., 2012; Emmerich ve ark., 2017). Ayrıca insan burnunun sübjektif olmasından dolayı kapalı ve kalabalık ortamlarda hava kalitesinin kısa sürede bozulduğu ve kötü hava kalitesine maruz kalındığı algılanmamaktadır. Bu nedenle kapalı ortamlarda sıcaklık, nem gibi termal konfor ölçümlerinin yanında hava kalitesi ölçümlerinin de yapılması ve elde edilen bilginin kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemlerinde kullanılarak kötü hava kalitesine karşı doğru stratejilerin sunulması çok önemlidir. Örneğin okul, hastane, alışveriş merkezi ve ofis gibi insanların topluca bulundukları yerlerde konforlu ve verimli bir yaşam için ortam havasının temiz olması şarttır. Kötü hava kalitesinin direkt algılanamaması ve meydana verdiği sağlık problemleri, iç ortam hava kalitesi ve izleme sistemleri üzerine yapılan incelemelerin ve çalışmaların sayısını arttırmıştır (Oh ve ark., 2012; Shaban ve ark., 2016; Yalçın ve ark., 2018). Yapılan çalışmalarla ortam hava kalitesinin devamlı olarak ölçülüp izlenmesi, kişilerin maruz kaldığı kötü havanın belirlenmesi ve mevcut sınır değerlerle karşılaştırılıp uyarıların yapılması gerekir. Bu değerlendirme sayesinde havalandırma etkin ve verimli bir şekilde yapılır ve enerji verimli bir şekilde kullanılırken aynı zamanda da konforlu bir yaşam ortamı kolaylıkla sağlanır.

Mevcut kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemleri, birbirine bağlı veya tekil birçok sensor düğümünden ve yoğun veri trafiklerinden oluşan karmaşık yapılar haline geldikleri için, bu sistemlerin veri toplama ve iletişim altyapılarının özellikle değişken ve çoklu parametre ölçüm senaryoları altında ölçeklenebilirlik, esneklik ve

düğümlemlerden gelen veri paketlerinin kontrolü, gibi konularda yetersiz kaldığı görülmüştür (Postolache ve ark., 2009; Kim ve ark., 2014; Spachos ve Hatzinakos, 2016). Ayrıca verilerin toplanması ve merkeze iletimleri sırasında oluşabilecek bir problem (cihaz bozulması, bağlantı kopması vb.) ise alarm durumlarında sistemin ortamın durumu hakkında bilgi ve tepki verememesine neden olabilir. Kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemlerinde karşılaşılan başka bir problem ise, çoğu sistemin veri işleme yöntemlerini kullanmamasından kaynaklı çoklu parametre ölçümü yapılsa dahi ortam hava kalitesi hakkında doğru ve anlamlı sonuçların elde edilememesidir. Dolayısıyla, mevcut sistemlerden farklı olarak, değişkenlik gösteren ortam şartlarına adaptif uyum sağlayabilen dinamik bir yapıya gerek duyulmaktadır.

3.2. Çözüm Önerisi

Çalışmada, kapalı bir ortamda bulunan insanlar için daha konforlu ve sağlıklı bir yaşam ortamı sağlanması hedeflenerek, binaların ortam hava kalitesinin izlenip analiz edildiği web tabanlı gerçek zamanlı bir izleme sistemi tasarlanmıştır. Kurulan iç ortam hava kalitesi izleme sistemi gazların anlık ölçümü, ölçülen verinin analizi, ortamlar hakkında anlık bilgi edinimi ve kullanıcıya sunulması olarak mutlak aşamalardan oluşmaktadır. Çalışmanın web tabanlı olması sayesinde sistemin geliştirilmesi aşamasında uygulanabilirlik artırılmış ve maliyet düşük tutulmuştur. Böylece internet teknolojileri kullanılarak düşük maliyetlerle kapalı ortam hava kalitesini denetleme ve izleme imkânı sağlanmıştır.

Bu çalışmada, mevcut kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemlerinin iletim ve uygulama altyapılarındaki veri çevrim modüllerinde (veri toplama, veri ayrıştırma, veri işleme ve servis dağıtım) karşılaşılan problemlere çözüm getirmek adına, çoklu parametre ölçümüne imkân veren, web tabanlı, dağıtık mimariye sahip, esnek ve ölçeklenebilir yapıda gerçek zamanlı bir kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemi geliştirilmiştir. Ayrıca çalışmada bu sistemle entegre çalışan, kapalı ortamdaki elde edilen verilerin analiz edilerek, ortamın çevresel hava kalitesini hesaplayan bir bulanık model de önerilmiştir.

Kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemlerinin tasarım ve uygulama aşamalarında karşılaşılan problemler için önerilen çözümler aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir.

- İncelenen akademik çalışmalar neticesinde, mevcut kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemlerinin genel olarak tek bir ortama bağlı kalarak geliştirildiği, verileri toplama ve işleme şekillerinde iletim ve uygulama altyapılarının ölçeklenebilirlik, esneklik, kolay ağ yönetimi gibi kriterleri istenen servis kalitesinde sağlayamadıkları görülmüştür. Bu nedenle, bu çalışmada tek bir ölçüm ortamına bağlı kalınmadan, farklı sensör tiplerinin sisteme dahil edilebildiği, farklı uygulama alanlarına göre sensör düğümlerinin sayısının kolayca arttırılabildiği esnek, ölçeklenebilir ve dağıtık yapıya sahip uçtan-uca iletim sağlayan bir mimari yapısı önerilmiştir. Önerilen bu mimari yapısında, sahadaki sensör cihazlarından gelen verilerin mevcut data trafiğinde dar boğaz oluşturmaması için termal konfor hesaplama işlemleri, sis hesaplama mantığında mikro kontroller üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sensör düğümlerden merkez sunuculara kadar olan veri iletiminde kullanılan protokollere uygun ölçüm verilerini içeren TCP tabanlı paket yapıları tasarlanmıştır.
- Literatürdeki çalışmaların aksine kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemlerinin, birbirinden bağımsız ancak her birinin ortamın hava kalitesini direk etkilediği ölçüm parametreleriyle birlikte değerlendirilmesi ve anlamlı bir sonuç çıkarılması gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, sınıf ortamlarında öğrencilerin performansını etkileyen faktörler göz önüne alınmıştır. Bu kapsamda ortamın ölçülen sıcaklık, nem ve hava akış verilerinin metabolik aktivite seviyesi ve giyim seviyesi ile birlikte dinamik olarak hesaplanmasıyla termal konfor bilgisi elde edilmiştir. Elde edilen termal konfor bilgisi değeri, ortamda ölçülen CO₂ miktarı, ölçüm anında sınıflarda bulunan öğrenci sayıları ve ders anındaki ışık şiddeti birlikte dikkate alınarak bir bulanık model önerilmiş ve geliştirilmiştir. Böylece ortamda elde edilen birbirinden bağımsız bütün veriler birlikte

değerlendirilmiş olup, ortamın çevresel hava kalitesi bilgisi elde edilerek toplanan veriler anlamlı hale getirilmiştir.

- Bu çalışmada önerilen ve geliştirilen kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemi ve bulanık model ile kampüs sınıfları içerisindeki konfor seviyelerini değerlendirerek hava kalitesinin en kötü olduğu ders zamanlarında öğrenciler için optimal koşulların sağlanması amaçlanmıştır. Bu kapsamda öncelikle önerilen sistem, Sakarya Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği binasının farklı boyutlardaki sınıflarında, farklı öğrenci yoğunlukları ve farklı zaman dilimlerine göre çeşitli senaryolar altında çalıştırılmış, elde edilen ölçüm verileri analiz edilerek sınıf ortamlarının durumu izlenmiştir. Her ölçüm senaryosu neticesinde, sınıflardaki öğrencilere yapılan rating scale question tipi anketler ile önerilen sistemin ortamın hava kalitesi hakkında başarılı sonuç ürettiği gözlemlenmiştir.

3.3. Metot

Çalışmada tasarlanan iç ortam hava kalitesi izleme sisteminin amacı, sınıflardaki CO₂ konsantrasyonu, sıcaklık, nem seviyeleri ve hava akış değerleri hakkında anlık bilgi sağlayarak iç hava kalitesini incelemektir. Böylece sınıfın CO₂ seviyesini ve termal konfor derecesini belirli bir değerin altında tutmak ve kapalı ortam havasının neminin çok kuru veya küflü olmasını önlemek amaçlanmıştır. Çünkü bu durum öğrencilerin öğrenme performansı üzerinde olumsuz etkilere sahiptir.

Bu bölümde kampüs sınıf ortamlarındaki hava kalitesinin ve buna bağlı olarak öğrencilerin öğrenme performanslarının artırılması adına önerilen kapalı ortam hava kalitesi izleme sisteminin genel yapısından bahsedilecek ve sistemin modellendiği deneysel ortam tanıtılacaktır. Ardından ise önerilen sistemin veri çevrim (veri toplama, veri ayrıştırma, veri işleme ve hizmet iletimi) yapısı detaylı olarak anlatılacaktır.

Çalışmada, CO₂ miktarı ile belirlenen ortam hava kalitesi ve hesaplanan termal konfor değeri olmak üzere 2 ana parametre üzerine odaklanılmıştır. Bu iki parametreye ait verilerin toplanması yerinde yapılan ölçümlerle sağlanmıştır. Ardından ölçüm sonuçları ve sınıflarda bulunan öğrencilere yapılan anketlerin birlikte değerlendirilmesi ile kurulan bulanık sistem sayesinde veriler anlık analiz edilerek kapalı ortam çevresel kalite bilgisi (IEQ – Indoor environmental quality) belirlenebilmiştir.

3.3.1. Önerilen sistem mimarisinin genel yapısı

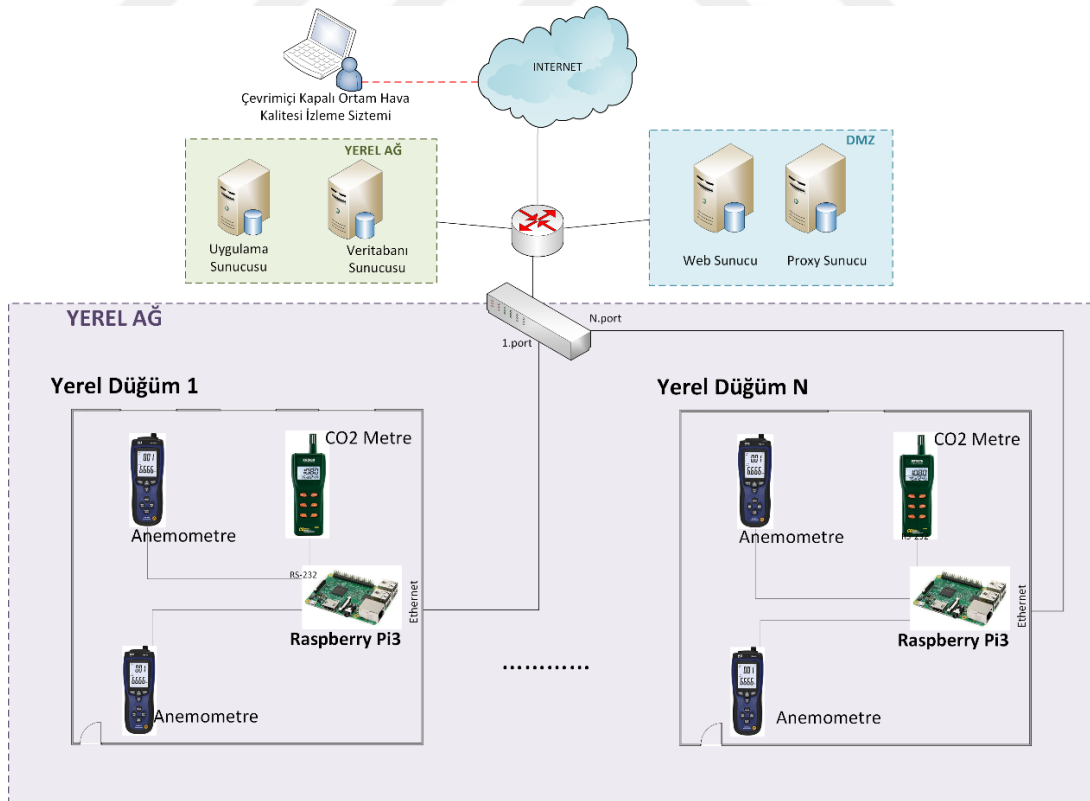
Kapalı ortam hava kalitesi ölçüm ve izleme sistemleri için yeni bir mimari önerisi sunulan bu tez çalışmasında, tek bir ölçüm ortamına bağlı kalınmamıştır. Farklı sensör tiplerinin sisteme dahil edilebildiği, farklı uygulama alanlarına göre sensör düğümlerinin sayısının kolayca arttırılabildiği esnek, ölçeklenebilir ve dağıtık yapıya uygun uçtan-uca iletim sağlayan bir mimari tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Sistem ölçümlerin yapıldığı sensör ağı, sunucular ve kullanıcılar olmak üzere 3 bölümden oluşmaktadır. Mimarinin ilk bölümü olan sensör ağı, sınıflardaki ortam hava kalitesini ve hava akış hızını ölçen ölçüm cihazlarından (CO₂ metre ve anemometre) ve bu cihazların bağlı olduğu mikro bilgisayarlardan (Raspberry Pi iş istasyonları) oluşan yerel/uç düğümlerden meydana gelmektedir. Cihazlardan gelen ölçüm verilerinin toplandığı ve ortamın termal konfor hesabının yapıldığı bu mikro bilgisayarlar yerel ağa bağlı bulunmaktadır ve elde edilen ölçüm verileri Ethernet üzerinden TCP/IP paketleri şeklinde buradan yine lokal ağ üzerinde bulunan veritabanı ve uygulama sunucusuna ve DMZ üzerinde bulunan web sunucusuna iletilmektedir.

Geliştirilen sistem mimarisinin ikinci bölümü farklı çeşit sunuculardan oluşmaktadır. Sistemde web sunucusu, veritabanı sunucusu ve uygulama sunucusu olmak üzere üç tip sunucu bulunmaktadır. Bu sunucular üniversitenin farklı lokasyonlarında bulunan sanal sunucular üzerinde bulunmaktadır. Web sunucusu, sistemdeki her bir çevresel ölçüm parametresinin grafiksel gösteriminin yapıldığı çevrimiçi web sitesinden

sorumludur. Uygulama sunucusu, üzerinde ortamın genel çevresel hava kalitesinin bulunması için uygulanan bulanık mantık hesaplamalarının yürütüldüğü sunucudur. Bu sunucu üzerinde hesaplanan ortamın çevresel kalite bilgisi, buradan web sunucusuna iletilerek çevrimiçi sisteme aktarılmakta aynı zamanda da veritabanı sunucusuna iletilip kaydedilmektedir. Veritabanı sunucusu ise, her bir sınıfa ait çevresel ölçüm parametrelerinin kaydedildiği sunucudur.

Sistemin son bölümü ise kullanıcılardır. Elde edilen çevresel ölçüm parametreleri ve uygulama sunucusu üzerindeki yazılım sayesinde bulunan ortamın genel çevresel hava kalite bilgisi web sunucusu üzerinden web servisleri aracılığı ile internet ortamındaki çevrimiçi kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemi kullanıcısına ulaştırılır. Böylece servis yönelimli kullanıcılar sistem üzerinden ortamların hava kalitesi bilgisini ve ölçüm sonuçlarını anlık olarak izleyebilirler. Kapalı ortamların hava kalitesini izlemek için tasarlanmış sistemin genel mimarisi Şekil 3.1.’de gösterilmiştir.



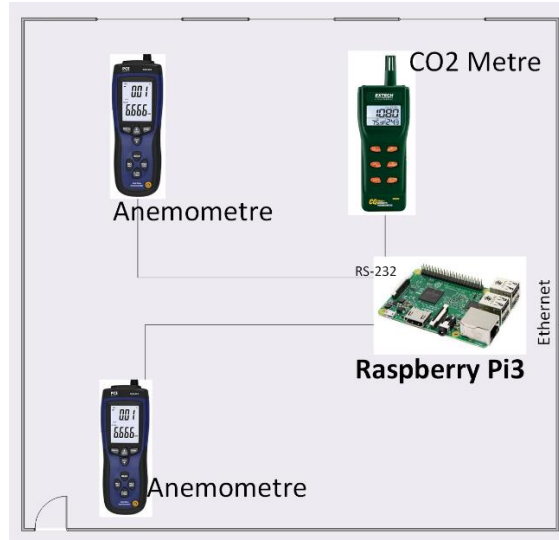
Şekil 3.1. Kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemi genel mimarisi

Çalışmada merkezdeki sunucular üzerindeki yükü azaltmak ve performansı arttırmak için her bir sınıfa ait termal konfor ölçütü olan PMV değeri, sınıflardaki mikro bilgisayarlar üzerinde hesaplanmaktadır. İstasyonlardan elde edilen PMV değeri ve CO₂ konsantrasyon verileri ise merkezdeki sunuculara taşınmakta ve ortam hava kalitesi hakkında son karar verilmektedir. Böylelikle hem dağıtık hem de merkezi yapıya uygun bir hibrit model önerilmektedir. Ayrıca sistemin dağıtık mimaride çalışabilmesi yeni düğümlerin sisteme kolayca dâhil edilebilmesine imkân tanımaktadır. Dolayısıyla sistem artan düğüm sayısına cevap veren, ölçeklenebilir bir mimariye sahiptir denilebilir (Balta ve ark., 2017).

Sistemin çalışması sırasında iletim hattında kopma, veri bütünlüğünde bozulma, ölçüm cihazlarında veya mimaride bulunan herhangi bir cihaz üzerinde oluşabilecek arıza (device failure), soket / port hatası gibi beklenmedik birçok hata meydana gelebilir. Bu nedenle sisteme dâhil edilen teşhis modülü ile sistemde bir hata meydana geldiğinde web sitesi üzerinde uyarı baloncukları ile veri alınamadığına dair kullanıcı ikaz edilmektedir. Bu sayede sistemin kararlılığı ve sürdürülebilirliği konusunda destek sağlanmış olmaktadır.

3.3.1.1. Uç düğümlerin tasarımı

Uç düğümler kapalı ortam hava kalitesi bilgilerinin algılanıp ölçülmesi ve verilerin toplanması için kullanılmaktadır. Çalışmada, sınıflarda takılı durumda CO₂ ölçümü için kullanılan AZ Inst. 77535 CO₂/sıcaklık/nem ölçer, sınıftaki hava akışını ölçmek için kullanılan PCE-423 Sıcak tel anemometre (Hot wire Anemometer) ve hem veri toplamak için hem de ağ üzerinde geçit cihazı gibi kullanılan Raspberry Pi 3 iş istasyonu yani bir mikro bilgisayar bulunur. Böylece Şekil 3.2.'de de görüldüğü gibi ölçümlerin yapıldığı her bir sınıf ağa bağlı birer uç düğüm haline gelmiştir.



Şekil 3.2. Uç düğümlerin tasarımı

Uygulanan mimarinin esnekliğini ve birlikte çalışabilirliğini artırmak için, Raspbian Linux işletim sistemini temel alan düşük güçte tek bir bilgisayar olan Raspberry Pi 3 Model B'nin kullanıldığı bir sistem tasarlanmıştır. Şekil 3.3.a.'da gösterilen Raspberry Pi, ortam hava kalitesi izleme sistemleri için daha az karmaşıklık ve daha uygun fiyatlı çözümler sunmaktadır. Kart üzerinde bulunan işlemci 64 bit dört çekirdekli 1.2 GHz hıza sahip ARM işlemcidir. Ayrıca depolama için 1 GB RAM ve Micro SD kart yuvası, bir HDMI portu ve 4 USB Portu ve çevresel aygıtları iletmek için 40 GPIO pini vardır. Debian, Windows vb. birçok işletim sistemini desteklemektedir. USB ve HDMI portları üzerinden bir monitör, klavye ve fare bağlanarak masaüstü bir bilgisayar gibi kullanılabilir. Ayrıca üzerindeki Ethernet portu veya Wi-Fi Adaptörü kullanılarak internete bağlanabilir. Raspberry Pi, ucuz fiyatı, düşük güç tüketimi sağlaması, işlemci, grafik birimi gibi bileşenler içerdiğinden tasarlanan sistem için epey kullanışlıdır. Ethernet portuna sahip olması sisteme avantaj sağlamıştır. Çünkü cihaza IP adresi verilerek SSH üzerinden uzaktan erişim yönetimi sağlanabilir ve veriler internet üzerinden merkezdeki sunuculara aktarılabilir.



Şekil 3.3. Ölçüm düzeneğinde kullanılan cihazlar a. Raspberry Pi 3 Model B b. AZ 77535 CO₂/Sıcaklık/RH Metre c. PCE-423 sıcak tel anemometre (Hot wire anemometer)

Sınıflarda yapılan CO₂ ölçümü için AZ Instrument 77535 CO₂/Sıcaklık/RH Metre cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.3.b.). Cihaz 0-9999 ppm CO₂ konsantrasyonu ölçme aralığı ile hava sıcaklığı ve bağıl nem değerlerini okuma yeteneğine sahiptir. Ölçüm işlemine başlamadan önce kendi kendini kalibre etme özelliğine sahiptir. Dolayısıyla çalışmada yapılan ölçümler sırasında tekrar kalibrasyon işlemine gerek kalmamıştır. Cihazdan CO₂, sıcaklık, nem, havanın içerdiği nemi belirletmek için kullanılan çiy noktası (DP - dew point) ve ıslak termometre sıcaklığı (WBT - wet bulb temperature) bilgileri elde edilir. Cihaz ölçüm sonuçlarını küçük LCD ekranından gösterir ve RS232 seri bağlantı ara yüzü ile sonuç verileri aktarılabilir.

PMV hesabı sırasında kullanılan çevresel parametrelerden sıcaklık ve nem gibi hava akış oranının da hesaba katılması ortamın termal konforunun daha doğru olarak belirlenmesi için önemlidir. Yapılan ölçümler sırasında sınıfların kapı ve pencerelerinin açık/kapalı olma duruma bağlı olarak sınıfta oluşacak hava akış oranının belirlenmesi için Şekil 3.3.c.'de gösterilen anemometre PCE-423 cihazı kullanılmıştır. Bir termik teleskopik sondaya sahip bu cihaz ile ± 5 % hassasiyet ile hava hızı, ± 1 hassasiyet ile de sıcaklık ölçülebilmektedir. Cihazdan hava hızı (m/sn), sıcaklık (°C), dakikadaki metreküp cinsinden hava akışı (cmm- cubic meters per minute) ve alan (m²) bilgisi elde edilmektedir. Cihaz düşük hava hızlarını ölçmek için ideal olarak tanımlanmıştır. Dolayısıyla ölçüm yapılan sınıf ortamlarında oluşabilecek hava akış miktarının çok şiddetli olmadığı düşünülürse, cihazın bu

çalışmadaki kapalı ortam hava kalitesi ölçüm sistemi için epey kullanışlı olduğu açıktır.

3.3.1.2. Web sunucusu, veri tabanı sunucusu ve uygulama sunucusu

Web sunucusu, veri tabanı sunucusu ve uygulama sunucusu üniversite bünyesinde bulunan bir sanal bir sunucu (www.csogr.sakarya.edu.tr) üzerinde bulunmaktadır.

Mimaride bulunan web sunucusu ve veri tabanı sunucusu 10 dakikada bir sınıflardan PMV değerini ve CO₂ ölçüm bilgilerini almaktadır. Veri tabanı sunucusu, MySQL veri tabanı yazılımını kullanır, veri tabanında yer alan verilerin saklaması ve dağıtımının yapılması için kullanılan sunucudur. Web sunucusu HTTP protokolünü kullanır ve internet üzerinden çevrimiçi kapalı ortam hava kalitesi izleme sisteminin içeriğini kullanıcılara ulaştırır. Yani www.iaq.csogr.sakarya.edu.tr adresi üzerinde yayınlanan ve çevresel ölçüm parametrelerine ait grafiksel gösterimlerin yapıldığı siteden sorumludur. Web sunucusu mesajlaşma ve veri tabanı bağlantısı gibi fonksiyonları kendisi yerine getirmektedir. İlaveten gelen istekler bünyesindeki en uygun programlara aktarılır ve işlenerek geri cevap döndürülür.

Uygulama sunucusu ise üzerinde özel uygulamaların çalıştırılabildiği ve veri tabanı bağlantılarının da gerçekleştirildiği sunucudur. Bu sistemde, uygulama sunucusu üzerinde çalışan uygulama son kullanıcının erişimine kapalıdır ve bu sunucu yalnızca başka sunucuların farklı bilgilere ulaşmak için kullandığı ara sunucudur. Sistemde bu sunucusu üzerinde çalışan uygulama ile belirli periyotlarla MySQL veri tabanına kaydedilen her bir sınıfa ait çevresel ölçüm parametreleri alınır. Java programlama dili ile yazılmış ve bulanık sistemlerdeki gelişmeleri kolaylaştırmak için endüstri standartlarını uygulayan açık kaynaklı bir bulanık mantık kütüphanesi olan jfuzzylogic kütüphanesi kullanılarak bulanık mantık yöntemiyle sınıflar hakkında son ortam hava kalitesi bilgisi elde edilir (Cingolani ve Jesús, 2013). Elde edilen bu bilgi ardından veri tabanına kaydedilir. Aynı zamanda bu bilgiler web servislerine gönderilerek web sunucusu üzerinden kullanıcıların her bir sınıfın ortam hava kalitesini anlık olarak görüntüleyebilmesine olanak sağlar.

3.3.1.3. Servis yönelimli kullanıcı

Service yönelimli kullanıcı kapalı ortam hava kalitesi ile alakalı bilgileri gerçek zamanlı olarak elde eder. Veriler geliştirilen web ara yüzü aracılığı ile kullanıcı ile paylaşılır. Bu çalışmada tasarlanan web sitesi ASP.Net ve javascript kullanılarak geliştirilmiştir. Web ara yüzlerinden ölçümlerin yapıldığı sınıflara ait mevcut ortam hava kalitesi parametreleri ile verilerin bulanık mantık yöntemi ile analizi sonucu her bir sınıfa ait kapalı ortam çevresel kalite seviyesinin anlık renkli (color-coded) grafiksel gösterimleri yapılmaktadır. Ayrıca sınır değerlerin aşıldığı, ortam hava kalitesinin kötüye gittiği durumlarda kullanıcıya çeşitli uyarı ve önerilerde bulunmaktadır.

3.3.1.4. NTP sunucu

Ortam hava kalitesi izleme sistemlerinde ölçümlerin yapıldığı düğümler ve sensörler bağımsız çalıştığından yerel saatleri birbirleri ile senkronize olmayabilir. Bu da farklı düğümlerden algılanan bilgileri bütünleştirmeye çalışırken zorluklara neden olabilir. Ayrıca verilerin uzak sunuculara iletilmeleri sırasında olası gecikmelerden kaynaklı düğümler arasındaki zaman farklarının doğru bir şekilde hesaplanması da önemlidir. Bu durumlar sensör ağlarında ortak bir zaman kavramını gerektirir. Bu nedenle, son zamanlarda internet ve yerel alan ağlarında (LAN) ortak bir zaman kavramı sağlamak için enerji verimli saat senkronizasyon protokolleri geliştirmeye yönelik büyük bir ilgi vardır.

Bilgisayar Ağlarında senkronizasyonu sağlamak için geliştirilen birçok protokol arasında NTP (Ağ Zaman Protokolü), her yere yayılma, ölçeklenebilirlik, arızalara karşı dayanıklılık ve büyük multihop ağlarındaki kendi kendine konfigürasyonundan ötürü öne çıkmıştır (Mills, 1991). Ağ zaman protokolü, aynı ağ üzerinde bulunan bilgisayarların saatlerinin eş zamanlanması amacıyla yararlanılan bir protokoldür. Zaman sunucuları (NTP Server) ile haberleşme UDP (User Datagram Protocol -

Kullanıcı Veri Bloğu İletişim Kuralları) , 123 numaralı port üzerinden haberleşme gerekir. Bu nedenle güvenlik duvarında bu protokol ve portun açık olması gerekir.

Tasarlanan mimaride her bir sınıf, mikro bilgisayarlar üzerinden ağa bağlanan bir düğüm olarak düşünülebilir ve her düğümden düzenli olarak sunuculara veri aktarılmaktadır. Ancak kayıtların tutulduğu sunucular veya ölçümlerin yapıldığı düğümlerin saatinin doğru ve senkronize olmaması izleme sisteminde karmaşaya eden olur. Dolayısıyla etkili bir veri çevriminin yapılabilmesi için her bir sunucunun ve düğümlerin saatlerinin senkronize olması, hangi verinin nerde, ne zaman ölçüldüğünün doğru tutulması gerekir. Bunun yanı sıra sunuculara kimin ne zaman bağlandığı da bilinmelidir. Bu nedenle ağa bağlı tüm sunucu ve düğümlerin saati doğru ve senkronize olmalıdır. Çalışmada da ağa bağlı düğümlerin ve sunucuların saatini ayarlamak için her birine NTP - Ağ zaman protokolü kurulmuştur.

3.3.2. Ölçüm ortamı

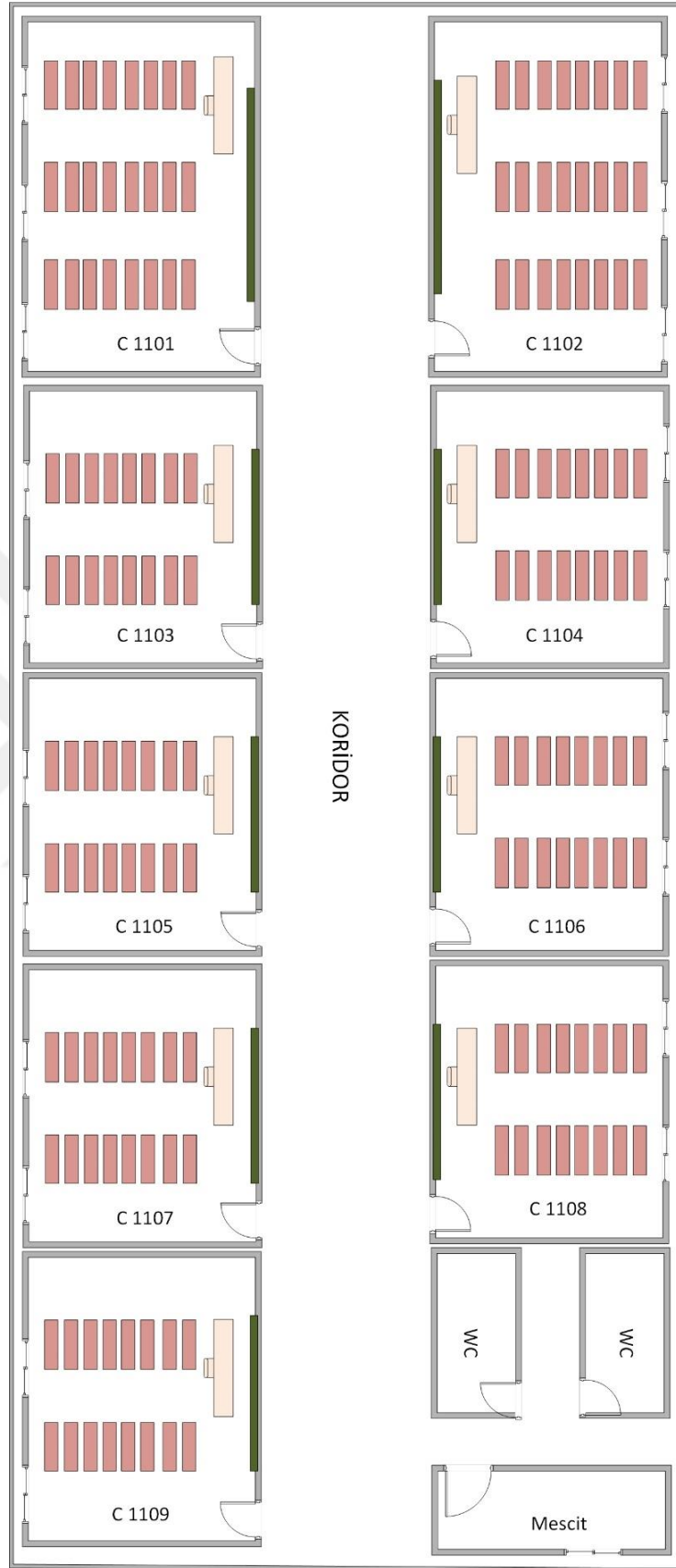
Çalışma Şekil 3.4.'te görülen Sakarya Üniversitesi Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi binasının 1. katında bulunan değişik boyutlarda 9 adet sınıfta yürütülmüştür. Sınıflar (C1101, ..., C1109) doğal havalandırmalıdır yani sınıflar kapı veya pencereler açılarak havalandırılmaktadır. Her sınıfta 3 adet yarı açılır pencere (bir pencerenin boyutu 1.1 m x 1.3 m) ve bir adet kapı (2.05 m x 0.9 m boyutlarında) bulunmaktadır. Sınıflardan altı tanesi 65 m², iki tanesi 102 m² ve bir tanesi 76 m² taban alanına sahiptir. Sınıfların geometrik özellikleri ayrıca Tablo 3.1'de sunulmuştur. Ölçümlerin yapıldığı sınıfların bulunduğu kat planı Şekil 3.5.' te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Sakarya Üniversitesi Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakülte Binası

Tablo 3.1. Sınıfların geometrik özellikleri

	Sınıf Hacmi (m ³)	Sınıfın Taban Alanı (m ²)	Toplam Açık Pencere Alanı (m ²)
C1101-C1102	298	102	2.16
C1103-...- C1108	190	65	2.16
C1109	222	76	2.16

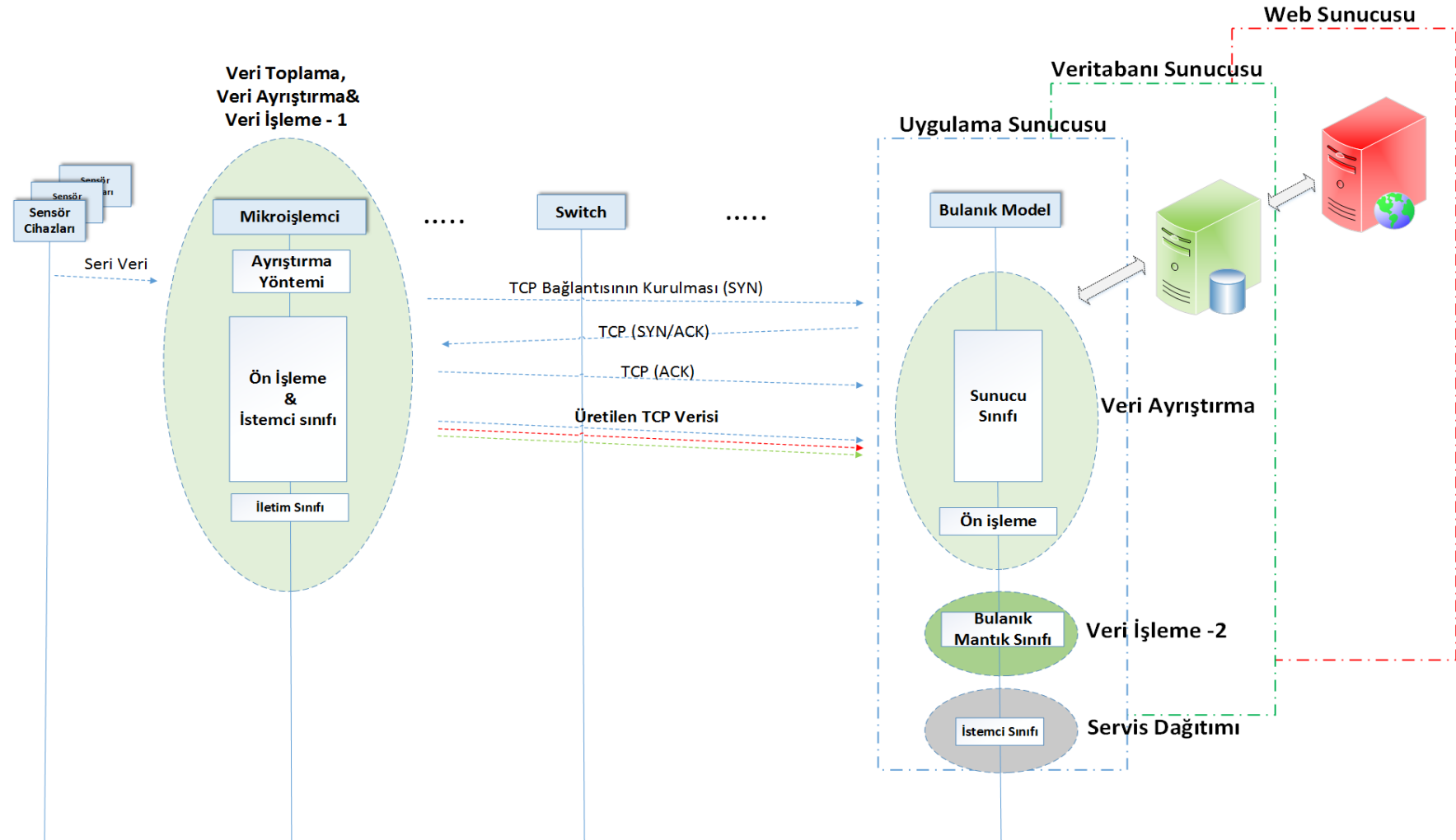


Şekil 3.5. Fakülte binasının birinci katındaki sınıfların şematik gösterimi

3.4. Geliştirilen Modelin Veri Çevrimi

Bu bölümde, sınıf ortamlarından gelen ölçüm verilerini elde etme (veri toplama), toplanan bu verilerin bir standart haline getirilmesi (veri ayrıştırma), ortamın çevresel hava kalitesinin hesaplanması için bir merkeze aktarımı ve işlenmesi (veri işleme) ve son olarak da elde edilen sonuçların yine ortamdaki kullanıcılarla ve sahadaki lokal sensor düğümleri ile paylaşılması (servis dağıtımı) olmak üzere 4 ana aşamadan oluşan kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemi veri çevrimi anlatılmıştır. Şekil 3.6'da önerilen sistemin yatay olarak veri çevrim dizge diyagramı gösterilmektedir.





Şekil 3.6. Geliştirilen kapalı ortam hava kalitesi izleme sisteminin veri çevrim dizge diyagramı

3.4.1. Veri toplama

Bir ortamda ölçülen CO₂ miktarı kapalı ortam hava kalitesinin direk göstergesi kabul edilirken, termal konfor ise bir ortamdaki insanların en çok etkilendiği ve hissettiği konfor faktörü olarak bilinir. Dolayısıyla bu iki konfor faktörünün bir ortamın hava kalitesini belirlerken birlikte değerlendirilmesi gerektiği açıktır. Bu nedenle, bu tez çalışmasında bu iki parametreye ait veriler yerinde ölçümlerle elde edilmiştir.

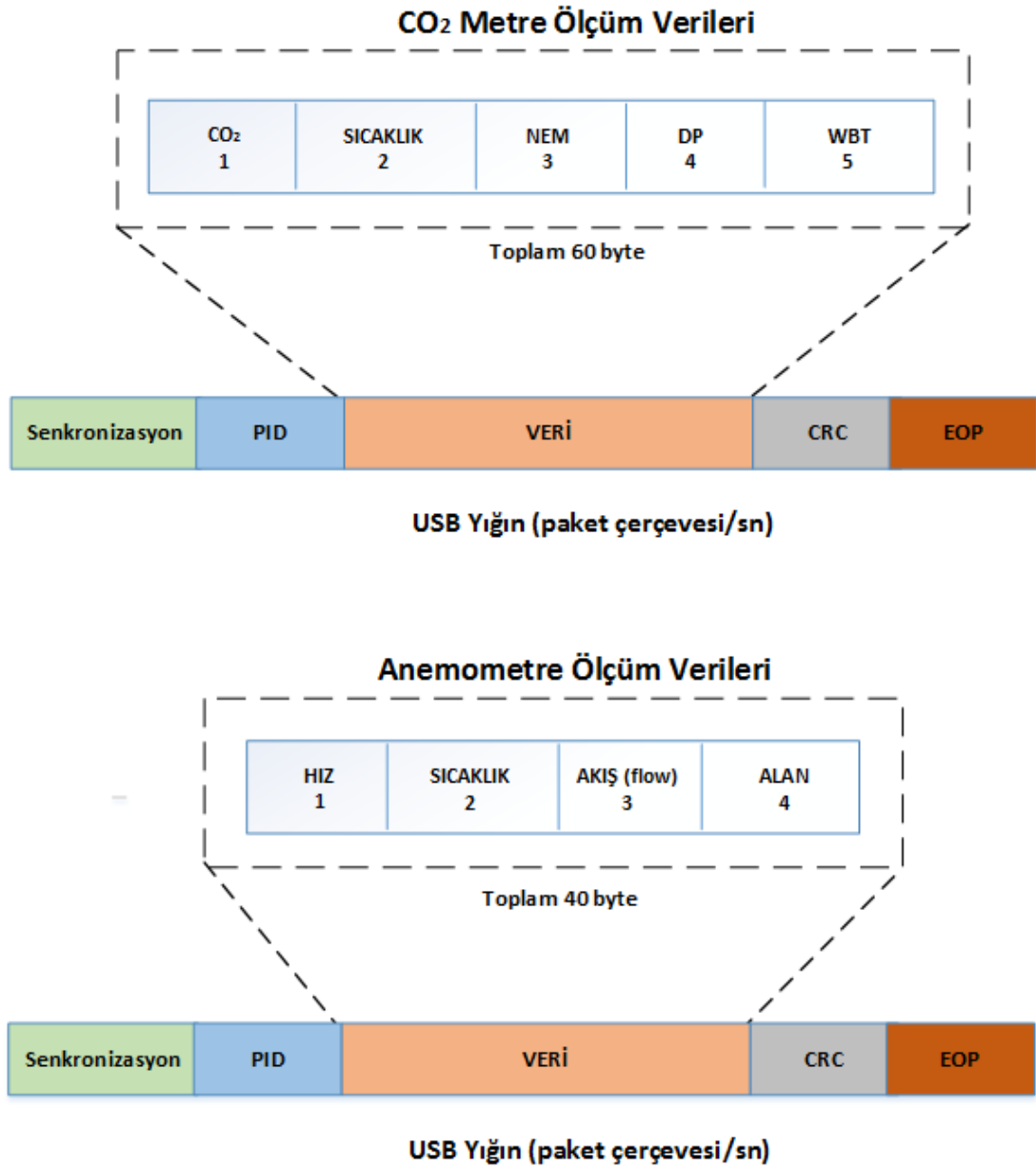
Öğrenciler sınıflarda genellikle oturur pozisyonda olduğundan CO₂ sensör modülü, oturan katılımcıların nefes alma seviyesi olarak kabul edilen 1.2 m yüksekliğinde ve öğrencilerin yoğun olarak bulunduğu bölgeye yerleştirilmiştir. Sınıftaki hava akış oranını ölçmek için kullanılan hava akış sensör modülü ise kapı ve pencerelerin açılan kısımlarında orta seviyeye yerleştirilmiştir. Şekil 3.7., ders esnasında ölçüm yapılan bir sınıfı ve kullanılan CO₂ ve hava akış sensör modüllerinin sınıf içerisindeki pozisyonunu göstermektedir.



Şekil 3.7. Ders esnasında ölçüm yapılan bir sınıfın görüntüsü

Sensör modülleri 9V adaptör ile beslenmektedir ve saniyede bir ölçüm yapmaktadır. Ölçülen veriler RS232 aracılığı ile mikro bilgisayarlara iletilir ve ölçülen her bir parametrenin 10'ar dakikalık ortalaması alınarak merkezi sunucuya gönderilir. Veri toplama işlemi ders planına göre hafta içi 09:00-22:00 saatleri arasında yapılır. Gün içinde ölçüm yapılan her ders sonunda pencereler açılarak sınıflar havalandırılır.

Veriler, önceki bölümlerde bahsedilen iki tip ölçüm cihazından asenkron seri haberleşme protokolü olan UART protokolü ile gönderilmektedir. Cihazlar ile mikro bilgisayar arasındaki bağlantı kablolarının ucunda bulunan UART-to-USB dönüştürücü sayesinde cihazlardan UART protokolü ile iletilen veriler USB protokolüne çevrilir ve mikro bilgisayara USB Yığın (USB Bulk) mesaj tipi şeklinde gelir. UART protokolü 5 ile 9 bit arası data uzunluğunda olan veriyi taşıma özelliğine sahiptir. USB Yığın, büyük paketler halinde veri alan cihazların kullandığı transfer modudur. Dolayısıyla bütün veriler cihazlardan birer bayt şeklinde gönderilmektedir. Yani veriler Raspberry Pi mikro bilgisayara 27 bayt başlık + 1 bayt veri olmak üzere toplam 28 baytlık USB Yığın paketleri tipinde gelir. CO₂ ölçümü için kullanılan AZ Instrument 77535 CO₂/Sıcaklık/RH Metre cihazından 1 saniyede gelen ölçüm verisinin toplam boyutu 60 bayttır. Dolayısıyla cihazdan mikro bilgisayara 1 saniyede 60 adet USB Yığın paketi gelmektedir. Aynı şekilde hava akış ölçümü için kullanılan anemometre PCE-423 cihazından ise 1 saniyede toplam 40 baytlık ölçüm verisi gelmektedir. Yani cihazdan bilgisayara 1 saniyede 40 adet USB Yığın paketi gönderilmektedir. Şekil 3.8'te sırasıyla CO₂ Metre cihazından 1 saniyede gelen toplam 60 baytlık, Anemometre cihazından 1 saniyede gelen toplam 40 baytlık USB Yığın paket yapıları gösterilmektedir.



Şekil 3.8. CO₂ Metre ve Anemometre cihazlarından bilgisayara gelen bir saniyelik USB Yığın paket yapıları

USB Yığın paketi Senkronizasyon, PID (packet id – paket kimliği), veri, CRC (Cyclic Redundancy Check – Döngüsel artıklık yönetimi) ve EOP (End of packet – paket sonu) olmak üzere 5 adet alan içermektedir. Senkronizasyon, paket başlangıcında oluşan zorunlu bir alandır. Bu alan alıcının saatini vericiyle senkronize eder. Düşük ve tam hız modu için bu alan 8 bayt uzunluğunda ve yüksek hız modu için 32 bayt uzunluğundadır. PID, Paket Kimliği anlamına gelir. Gönderilen paket türünü gösterir. Bu alan 8 bit uzunluğundadır. Üst dört bit, paket türünü tanımlar ve alt dört bit ise, hataları algılamaya yardımcı olur. CRC, döngüsel artıklık kontrolü

anlamına gelir. Bu alan, CRC işlemini kullanarak paketteki verileri kontrol etmek için kullanılır. Veri paketleri için 16 bit CRC kullanılır. EOP ise paket sonu anlamına gelmektedir.

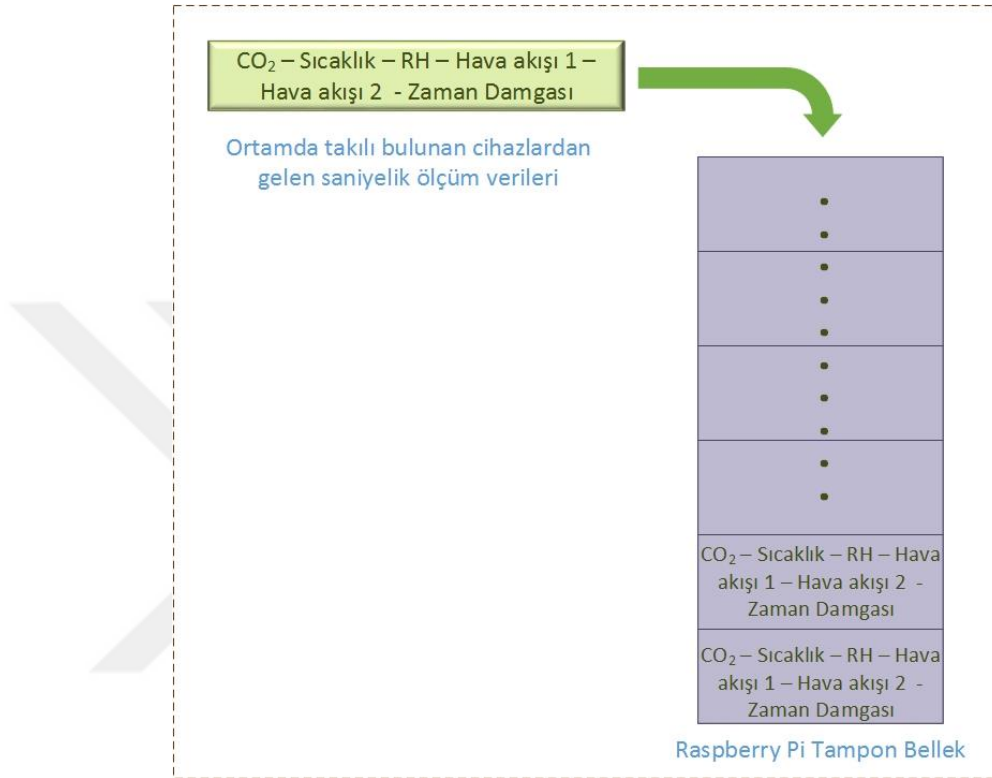
Mikro bilgisayar üzerinde yapılan PMV hesabı sırasında; metabolik aktivite ve giyim seviyeleri sabit olarak kabul edilmiştir. ASHRAE 55-2004 standardı çeşitli aktivitelere göre sağlıklı bir vücutta beklenen metabolizma hızlarını ve belirli kıyafetler için giyim izolasyonu verilerini listelemiştir. Buna göre, metabolik aktivite seviyesi öğrenciler oturma pozisyonunda olduğundan 1.0, giyilen kıyafet seviyesi ise ölçümlerin kış aylarında yapılmasından kaynaklı 1 clo (1 clo = 0.155 m² °C/W) olarak belirlenmiştir. ASHRAE 55-2004 standartlarına göre çıkarılan belirli durumlar için metabolik aktivite seviyeleri ve giyim seviyeleri sırasıyla Tablo 2.4. ve Tablo 2.5.'te gösterilmiştir (ASHRAE Standard 55, 2013).

3.4.2. Veri ayrıştırma

Önerilen ve geliştirilen mimaride veri ayrıştırma işlemi öncelikle sınıflarda bulunan mikro bilgisayarlar üzerinde yapılmaktadır. Ölçüm yapılan her sınıfta 1 adet mikro bilgisayar (Raspberry Pi 3 iş istasyonu), 1 adet AZ77535 CO₂ ölçüm cihazı ve kapı ve pencerenin açılan kısımlarına yerleştirilmiş halde 2 adet PCE-423 Anemometre bulunmaktadır. Ubuntu Mate işletim sistemi kurulu olan mikro bilgisayar üzerinde Mono Develop kullanılarak C# dilinde bir yazılım geliştirilmiştir ve bu yazılım ölçüm cihazları ve veritabanı, web, uygulama sunucuları arasında ara katman görevi görmektedir. Öncelikle CO₂ ölçüm cihazı ile ölçülen CO₂ gaz yoğunluğu (ppm), sıcaklık (°C) ve nem (RH) değerleri ile anemometre ile ölçülen hava akış hızı (m/s) verisi periyodik olarak yine sınıfta bulunan mikro bilgisayara gönderilir.

Sınıflardaki genel hava akış değerini bulmak için anemometrelerden aynı saniyede elde edilen hava akış değerlerinin ortalaması alınır. CO₂ metre ve anemometrelerden gelen saniyelik veriler istasyon üzerinde bulunan bu ara katman yazılımı ile önce bir tampon belleğe kaydedilir. Ardından 10 ar dakikalık periyotlarla veriler ara bellekten

okunur ve ortalaması alınır. Böylece istasyon üzerinde, gelen ve ortalaması alınan sıcaklık, nem ve hava akış değerleri kullanılarak ortamın termal konforu yani PMV değeri hesaplanmaktadır. Sınıflardaki istasyon üzerinde bulunan bu ara katman yazılımının çalışma şeması Şekil 3.9.'da gösterilmiştir.

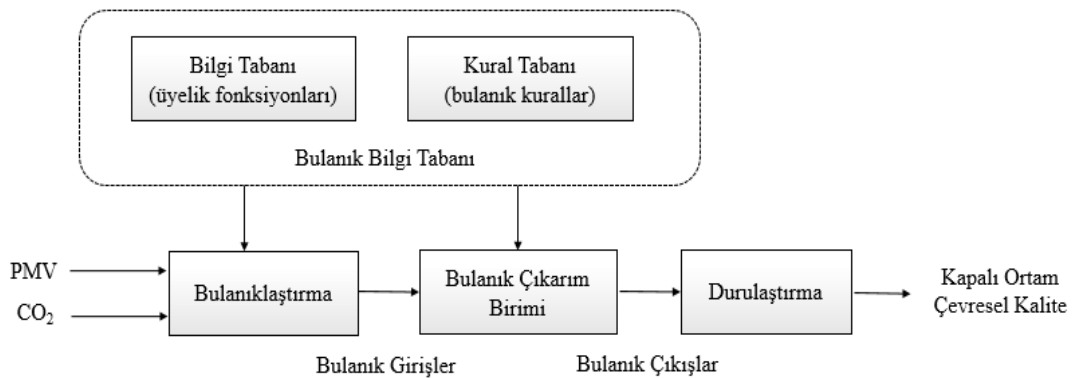


Şekil 3.9. Sınıflardaki istasyon üzerinde bulunan bu ara katman yazılımı çalışma şeması

Mikro bilgisayar üzerinde her 10 dakika da bir hesaplanan ortalama PMV değeri ve ölçülen 10 dakikalık ortalama CO₂, sıcaklık nem ve hava akış verileri ile birlikte sonuna zaman damgası da eklenerek, sınıflarda bulunan Ethernet portları üzerinden gönderilmek üzere TCP/IP raw paketleri oluşturulur. Gönderilen TCP/IP paketleri, 48 baytı TCP veri kısmı olmak üzere toplam 106 bayt uzunluğundadır. Her bir sınıftan çıkan (uç düğümlerden) bu paketler, binadaki yönlendirici ve anahtar cihaz üzerinden lokal ağ üzerinde bulunan veri tabanı sunucusuna ve DMZ ortamında bulunan web sunucusuna gönderilir. İnternet ortamında bulunan kullanıcı bu sayede ölçüm verilerini anlık olarak izleyebilir ve ortamın durumu hakkında son bilgiye sahip olabilir. Uç düğümlerde oluşturulan TCP/IP paket yapısı Şekil 3.10.'da gösterilmektedir.

Veri işlemenin ilk aşaması termal konfor hesabının sınıflardaki mikro bilgisayar üzerinde yapılmasıdır. Çünkü sensörlerden elde edilen saniyelik verilerin düzenli olarak internet üzerinden merkezi sunuculara gönderilmesi yüksek bant genişliği ihtiyacı doğuracaktır. Bunun aksine, önerilen sistemde üretilen sensör verileri ilk olarak yerel düğümlerde analiz edilir ve PMV değeri burada elde edilir. Ardından elde edilen anlamlı bilgi belirli periyotlarla merkezi sunuculara gönderilir. Böylece veri nerede üretildiyse orada işlenerek, sistem düşük bant genişliği ile çalışabilir hale gelir ve merkezi sunuculara bağımlılığı azalmış olur. Bu sebeple önerilen mimari sis hesaplama yaklaşımına uygundur.

Çalışmada veri işlemenin ikinci aşaması, uygulama sunucusu üzerinde çalışan ve çevresel ölçüm parametrelerinin birlikte değerlendirilerek kapalı ortam çevresel kalite bilgisinin elde edildiği bulanık mantık modelidir. Çalışmada, oluşturulan bulanık sistem CO₂ değeri ve PMV değeri olmak üzere 2 girişe, kapalı ortam çevresel kalite seviyesi olarak bir çıkışa sahiptir. CO₂ (ortam hava kalitesi) ve PMV (termal konfor) değerleri birbirinden bağımsız girişlerdir. Sistem Şekil 3.12.'deki gibi bir adet bulanıklaştırma birimi, bulanık bilgi tabanı, kural tabanlı bulanık çıkarım birimi ve durulaştırma birimi olmak üzere 4 bölümden oluşmuştur.



Şekil 3.12. Veri işleme için tasarlanan bulanık sistem

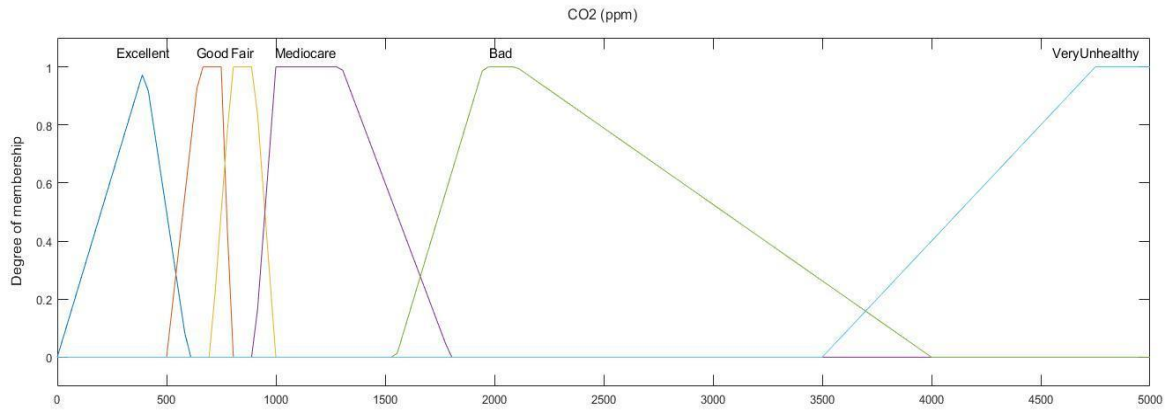
Bulanıklaştırma biriminde üyelik fonksiyonlarının aralıkları belirlenirken, giriş değişkeninin en yüksek kabul oyu üyelik işlevi değer aralığının maksimum değerine ölçeklendirilir. Ayrıca, en düşük kabul edilebilirlik oyu, üyelik işlevi değer aralığının minimum değerine ayarlanır. Diğer kalan aralıklar ise buna göre uyarlanmıştır.

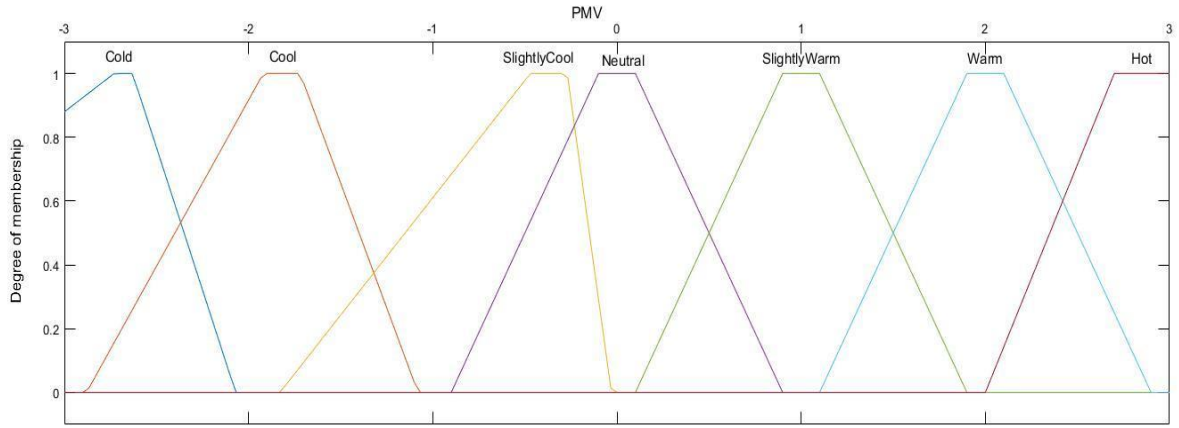
Sınıflardaki CO₂ konsantrasyonu sınır değerleri EPA ve ASHREA tarafından 1000 ppm veya 1800 mg/m³ olarak belirlenmiştir. PMV değer aralıkları ise, Fanger tarafından yayınlanan ve ISO standardı tarafından kabul edilen -3 ile +3 aralığında soğuktan ısıca doğru kabul edilmiştir. (Fanger, 1972; ISO/FDIS7730, 2005; ASHRAE Standard 55, 2013; ASHRAE-62, 2016).

Bu çalışmada her bir girişin ve çıkışın üyelik fonksiyonları belirlenirken kullanılan sözel değerler ve bulanık aralıkları Tablo 3.2.'de gösterilmiştir. CO₂ girişi çok iyi, iyi, makul, vasat, kötü, çok kötü olarak ifade edilirken, PMV girişi sıcak, ılık, biraz ılık, normal, biraz serin, serin, soğuk olarak sınıflandırılmıştır. Sunulan aralıklar, yayınlanan standartlar içindeki kategorilere göre belirlenmiştir ve her kategorinin yeterli veri noktaları ile temsil edilebilmesi için fazlaca ölçüm ve anket yapılmıştır. Her bir giriş ve çıkış için oluşturulan üyelik fonksiyonları ve sınıflandırma aralıkları Şekil 3.13., Şekil 3.14. ve Şekil 3.15.'te gösterilmiştir. Girişler ve çıkış arasındaki ilişkiyi gösteren bulanık çıktı modeli de Şekil 3.16.'da gösterilmiştir. Şekil çıkışın net değerini belirlemek için kullanılan ve If-Then kurallarından ortaya çıkan bulanık yüzeyi gösterir.

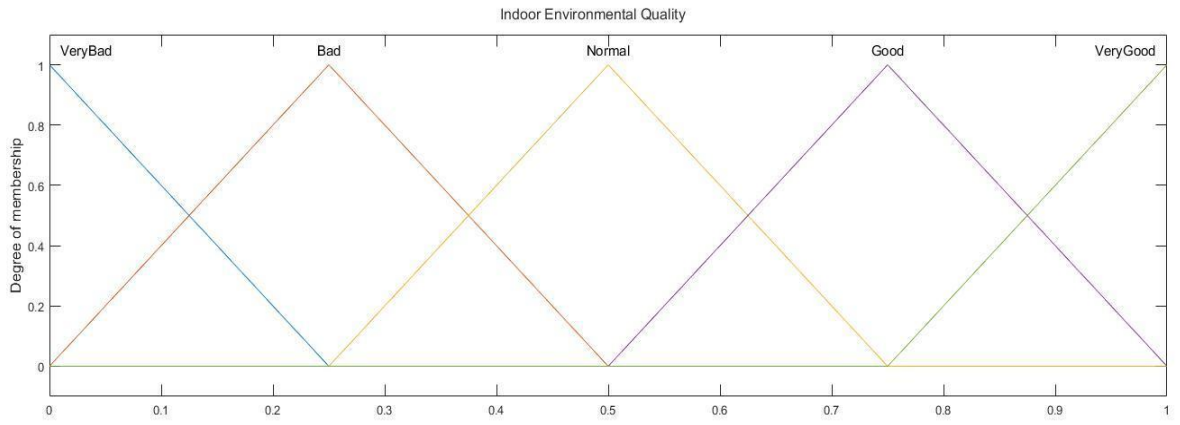
Tablo 3.2. İlgili bulanık aralıklar ile giriş ve çıkış bulanık değişkenleri

Bulanık Değişkenler	Sözel Değişkenler	Sözel Değerler	Bulanık Aralıklar
Giriş 1	CO ₂ (ppm)	Çok İyi	0- 600
		İyi	500- 800
		Makul	700- 1000
		Vasat	900- 1800
		Kötü	1550- 4000
		Çok Sağlıksız	3500- 7250
Giriş 2	PMV	Sıcak	2.0 - 5.7
		Ilık	1.1 - 2.9
		Biraz Ilık	0.1- 1.9
		Normal	(-0.9) – 0.9
		Biraz Serin	(-1.83) – (-0.03)
		Serin	(-2.88) – (-1.08)
		Soğuk	(-4.97) – (-2.07)
Çıkış	Kapalı Ortam Çevresel Kalite (IEQ)	Çok Kötü	(-0.25) – 0.25
		Kötü	0 – 0.5
		Normal	0.25 – 0.75
		İyi	0.5 – 1
		Çok İyi	0.75 – 1.25

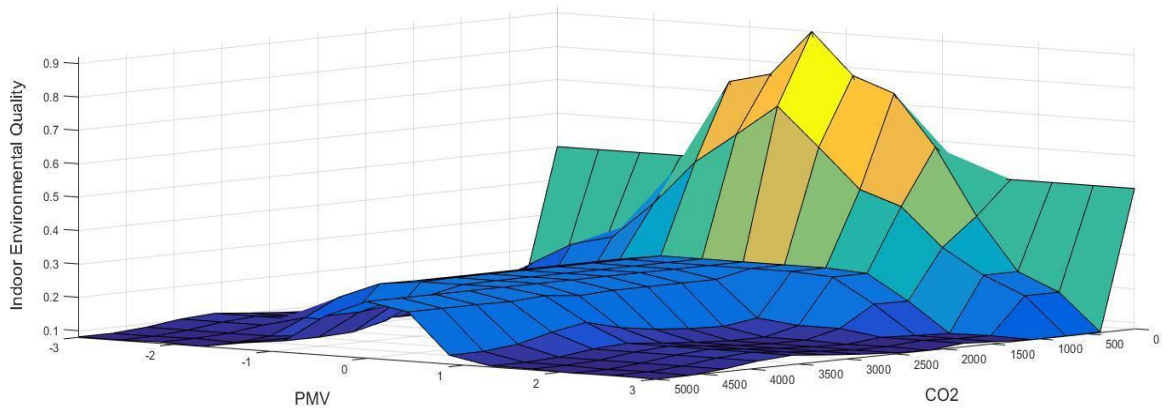
Şekil 3.13. CO₂ giriş değişkeni için üyelik fonksiyon grafiği



Şekil 3.14. PMV giriş değişkeni için üyelik fonksiyon grafiği



Şekil 3.15. Kapalı ortam çevresel kalite (IEQ) çıkış değişkeni için üyelik fonksiyon grafiği



Şekil 3.16. Giriş değişkenleri ve çıkış değişkeni arasındaki ilişkiyi gösteren bulanıklaştırma yüzeyi

Bulanık sistemin tasarımı sırasında;

- Giriş ve çıkış değişken aralıklarının belirlenmesi:

Sistemin geliştirilmesinde önemli bir adımdır. Girdi ve çıktı değişkenlerinin aralıklarını belirlemektir. Tablo 3.4., sözel değişkenleri, sözel değerlerini ve ilişkili bulanık aralıkları göstermektedir.

- Bulanıklaştırma birimi:

Bulanıklaştırma, daha önce tanımlanan kurallar ve mevcut bilgilerden yararlanarak aralarında bağlantı kurma ve bu bağlantılar sayesinde bulanık değerlere sahip kümeleri meydana getirme süreci olarak tanımlanabilir. Bulanıklaştırma aşamasının ardından talep edilen veya beklenen sonuç bilgisinin bulanık hali elde edilir. Sonuç olarak dış ortamdan ölçüm yoluyla elde edilen ve mutlak nümerik bir değeri olan giriş verisi, bulanıklaştırma biriminde oluşturulan üyelik fonksiyonları aracılığı ile sözel ifadeler ve giriş verisinin bu sözel ifadeleri ne seviyede desteklediğini gösteren üyelik derecelerine dönüştürülür.

- Bulanık çıkarım süreci:

Bulanık çıkarım süreci insanların karar verme süreci ile aynı kabul edilebilir. Yani, bir önceki aşama olan bulanıklaştırma sürecinin ardından oluşturulan sözel ifadeler, kural tabanındaki önermelerle karşılaştırılır ve yine sözel yargı sonuçlarına varılır. Ardından sonuçlar için oluşturulan üyelik dereceleri ile de bu sonuçların hangi oranda doğru olduğu saptanır. Dolayısıyla bu aşamaya bulanık karar verme süreci de denilebilir. Bu sistem için 42 adet kural tanımlanmıştır. Kuralların bir kısmı Şekil 3.17.'de kural tablosu olarak gösterilmiştir. Tanımlanan if-then kurallarının tamamı ise Ek-1'de verilmiştir.

- Durulaştırma birimi:

Bir önceki aşama olan bulanık çıkarım sürecinin ardından elde edilen sözel ifadeler ve üyelik dereceleri ile bu ifadelerin doğruluk dereceleri bulanık çıkışlar olarak bilinir. Bu bulanık çıkışların sözel ifadelerden sayısal

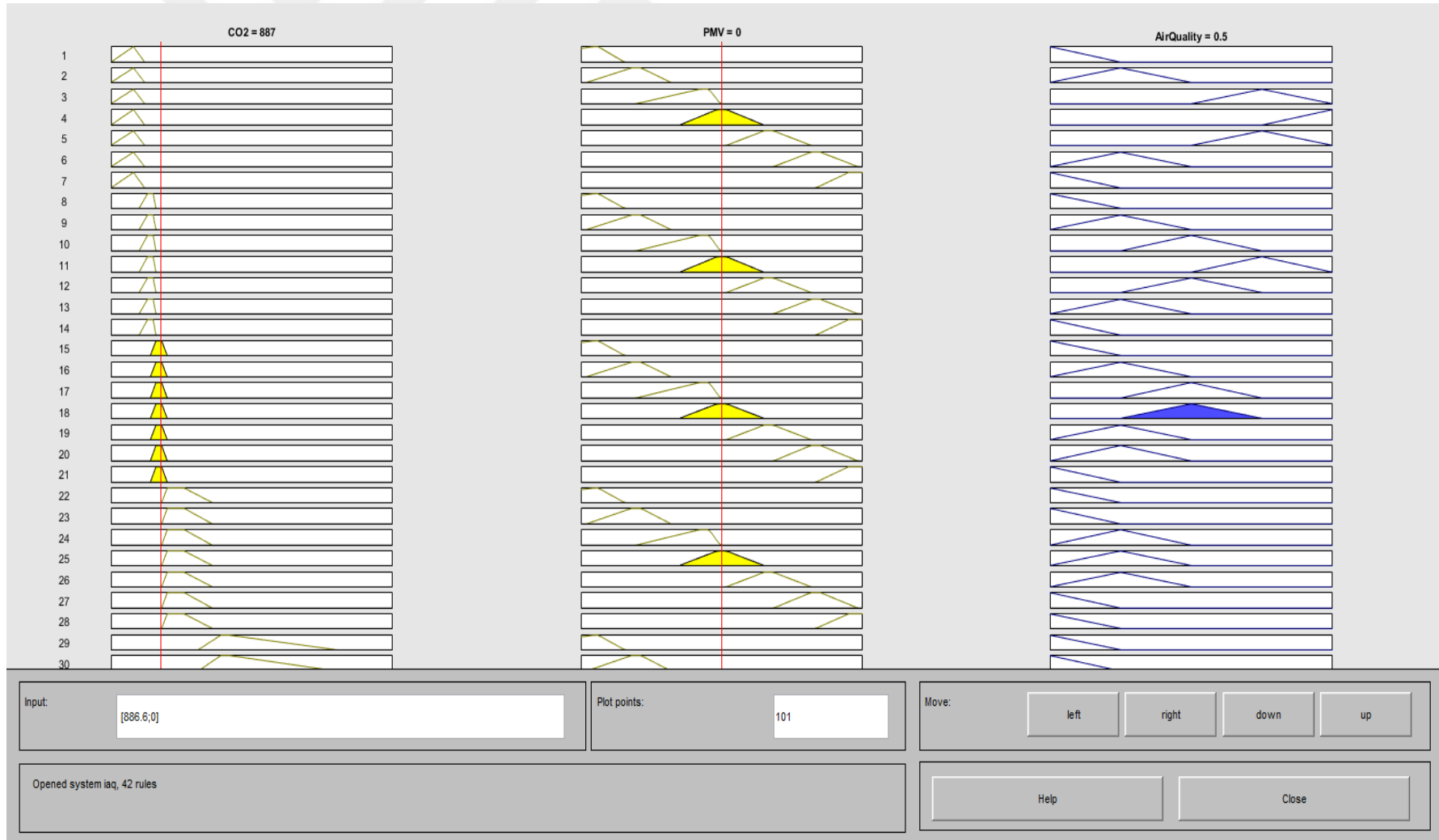
değerlere çevrilmesi süreci netleştirme veya durulama aşaması olarak adlandırılır. Elde edilen sayısal değerler arasında üyelik fonksiyonlarına göre en iyi noktaya karşılık gelen değer o problemin çözümü olduğu söylenir.

- Karar verme kuralları:

Çıkışın net değeri, karar vermeye dayalı olarak ortam hava kalitesi seviyesini belirlemek için kullanılır. Bu sistemin net çıkış değeri için karar verme kuralları Tablo 3.3.'te gösterilmiştir.

Tablo 3.3. Net çıkış değerine göre karar verme kuralları

Çıkış Değişkeni	Çıkış Net Değeri	Ortam Hakkında Karar
Kapalı ortam çevresel kalite (IEQ)	<0.12	Çok Kötü
	0.12 – 0.37	Kötü
	0.37 – 0.62	Normal
	0.62 – 0.87	İyi
	0.87 <	Çok İyi



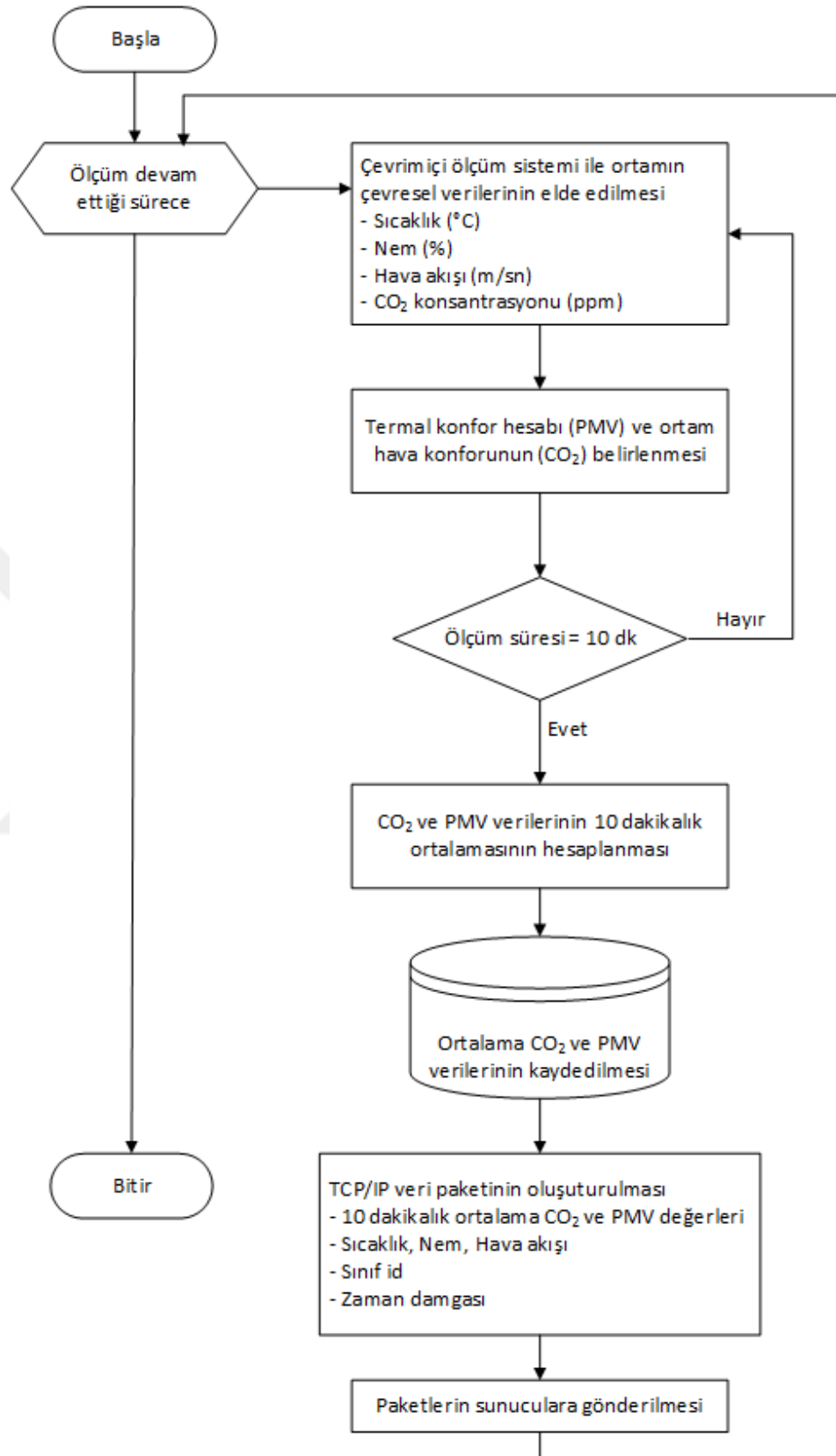
Şekil 3.17. Tanımlanan kuralların bir kısmının görüntüsü

3.4.4. Servis dağıtımı

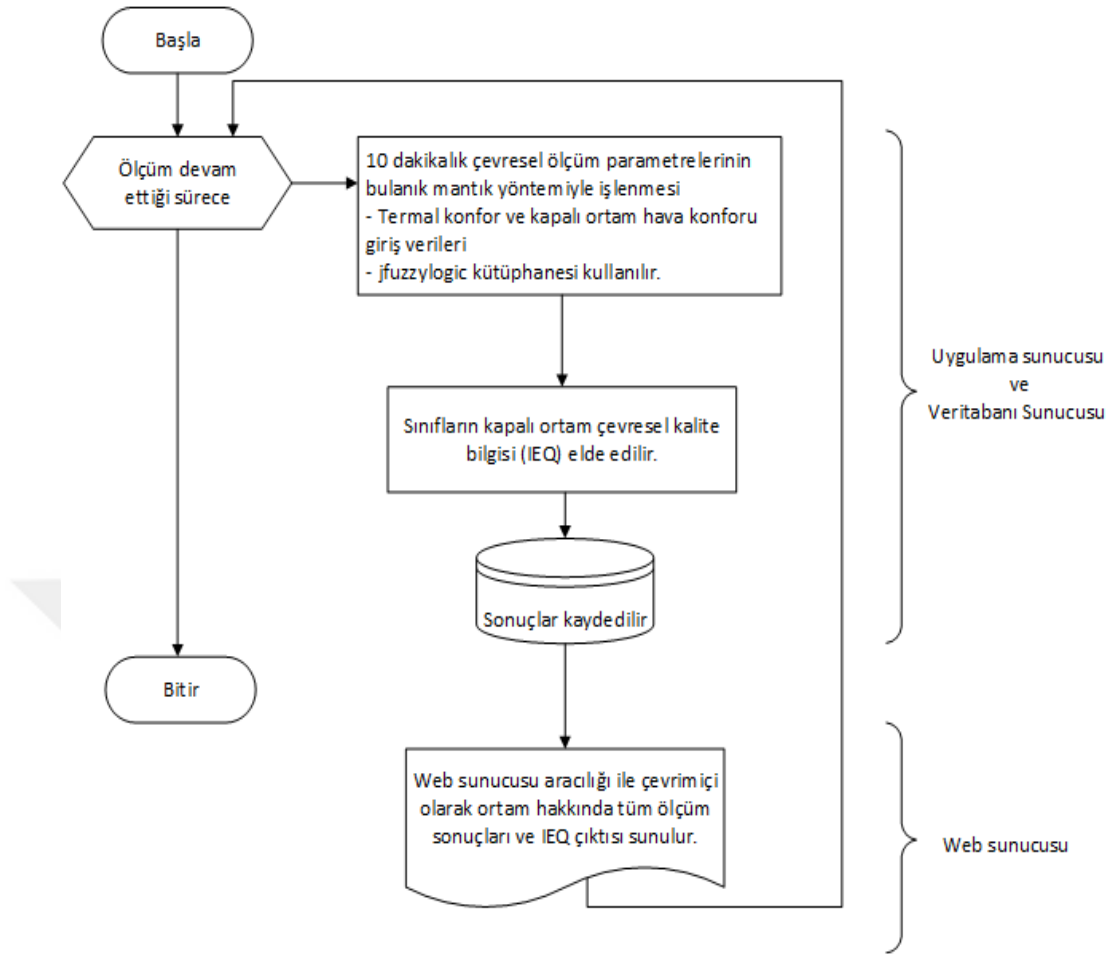
Servis dağıtımı, veri işleme modülü neticesinde elde edilen sonuçlar veya kararların kullanıcılar ve sahadaki sensör düğümlere aktarıldığı aşama olarak tanımlanmaktadır. Bu kapsamda, önerilen sistemde, ölçüm verileri bulanık model ile analiz edilip, elde edilen kapalı ortam çevresel kalite bilgisi web sunucusu üzerinden çevrimiçi izleme sistemi aracılığı ile kullanıcıya iletilir. Bu mimarinin çalışma şekline göre kullanıcı çevrimiçi izleme sistemi üzerinden herhangi bir sınıftaki cihazlara müdahale edebilir (ölçüm sıklığını değiştirme, açıp/kapama, self- calibration vb.) veya pencerelere ve havalandırma sistemine gerekli ekipmanlar takılarak sistem kullanıcı tarafından kontrol edilebilir.

3.4.5. Sistemin işleyişi

Kapalı ortam hava kalitesi ölçüm sistemi işleyişi 3 aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak uç düğümlerde ölçüm yoluyla yani sınıflara takılan ölçüm cihazları ile sınıfın CO₂ seviyesi, sıcaklık, nem ve hava akış hızı verilerinin toplanması ve bu verilerle oluşturulan paketlerin sunuculara gönderilmesidir. İkinci aşama, uç düğümlerden gelen veri paketlerinin öncelikle veri tabanına kaydı ardından uygulama sunucusu üzerinde bulanık mantık yöntemiyle işlenmesi ve sınıfların kapalı ortam çevresel kalite bilgisinin elde edilmesidir. Son ve üçüncü aşama ise elde edilen bu bilginin ve tüm ölçüm sonuçlarının web sunucusu aracılığı ile web sitesi üzerinden son kullanıcıya ulaştırılmasıdır. Sistemin işleyişinin anlatıldığı akış diyagramları Şekil 3.18.'de ve Şekil 3.19.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Sistemin işleyişi akış diyagramı (Uç düğümlerde verilerin toplanması ve verilerin sunuculara iletilmesi)



Şekil 3.19. Sistemin işleyişi akış diyagramı (Veri işleme ve ölçüm sisteminin çıktısı)

3.4.6. Veri tabanı tasarımı

Çevrimiçi kapalı ortam hava kalitesi ölçüm sistemi için MySQL veri tabanı yönetim sistemi kullanılarak “online_monitoring” adında bir veri tabanı tasarlanmıştır. Tasarlanan veri tabanında Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakülte binasının 1. Katında bulunan dersliklerine ilişkin bilgiler, ölçümlerin yapıldığı her bir sınıfa ait ölçüm sonuçları, sistemde aktif haldeki cihazlara ait bilgiler, her ortamın konfor seviyeleri ve ölçüm verilerinin işlenmesi sonucu elde edilen ortamlar hakkındaki kapalı ortam çevresel kalite bilgileri tutulmaktadır.

Veri tabanı 7 adet tablodan oluşmaktadır. Sistemdeki “Room1_Monitoring, Room2_Monitoring, Room3_Monitoring ve Room4_Monitoring” isimli tablolar

ölçüm yapılan 4 adet sınıf için oluşturulmuştur ve ölçülen saniyelik CO₂ seviyesi, PMV değeri (termal konfor seviyesi), sıcaklık, nem, hava akışı ve ölçüm zaman bilgileri tutulmaktadır. “Metabolic_Aktivitiy” tablosunda aktivite ve met seviye bilgileri tutulurken, “Clothing_Level” tablosunda ise hava duruma ve mevsime bağlı ortamdaki öğrencilerin giyinme seviye bilgileri tutulmaktadır. “Comfort_Levels” tablosunda ise, veri işleme sonucunda elde edilen her bir sınıfın kapalı ortam çevresel kalite bilgisinin sayısal ve sözel değerleri tutulmaktadır.

3.5. Önerilen Sistemin Nesnelerin İnterneti Kavramı Altında İncelenmesi

Binalarda havalandırma konularındaki eksiklik ve yetersizliğin yarattığı olumsuz koşullar göz önüne alındığında kapalı ortam hava kalitesi çalışmaları mutlak gereklilik haline gelmiştir. Ancak yapılan çalışmalara bakıldığında tasarlanan sistemlerin bazı problemleri olduğu açıktır. En büyük problemlerden biri var olan kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemlerinin ölçeklenebilir, genişleyebilir ve kolay hayata geçebilecek sistemler olmamasıdır. Çünkü binaların yapısı, kullanım amacı ve bulunduğu ortamlar düşünülmeden sistemler tasarlanmaktadır. Dolayısıyla tasarlanan kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemlerinin nesnelerin interneti kavramı ile birlikte düşünülmesi bu tarz problemler için bir çözüm sunabilir. Çünkü bu tarz sistemlerinin nesnelerin interneti altyapısı ile kullanılması ölçeklenebilirliği arttırmaktadır. Tasarlanan mimaride her bileşen bir nesne gibi düşünüldüğünden oluşturulan sistem her türlü ortama uygun ve her tarz bina için kullanılabilir olacaktır. İzleme sistemi üzerinden geri besleme kontrolünün yapılabilmesi, cihazlar ve alanlar arasında hiyerarşik bir yönetim ilişkisi olması, kullanıcının hata tespiti kolayca yapabilecek olması tasarlanan sistemi güçlü kılacaktır.

3.5.1. Nesnelerin interneti kavramı

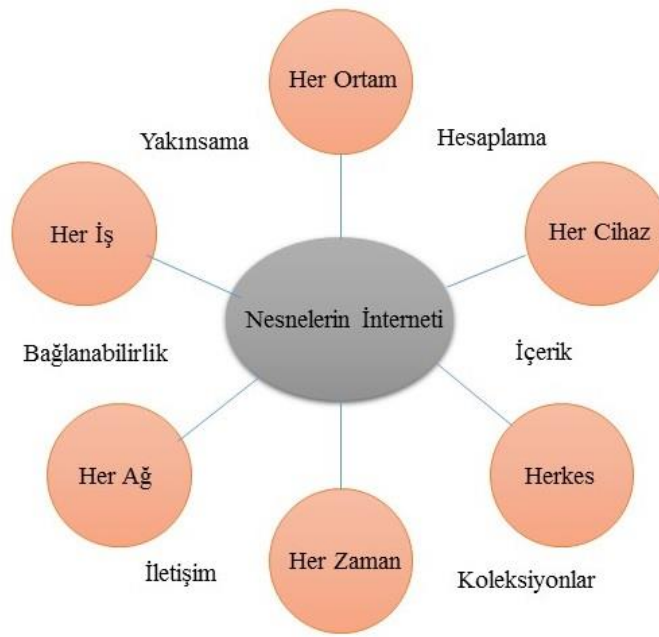
Nesnelerin interneti (Internet of Things - IoT), her fiziksel nesnenin bir şekilde internete erişip, birbirleri ile veya daha büyük sistemlerle iletişim halinde olması yani bir bağlantı platformu olarak tanımlanabilir. Basit bir deyişle, farklı iletişim protokolleri aracılığı ile birbirleri ile haberleşebilen, aynı zamanda birbirine

bağlanarak bilgi paylaşımı yapabilen, kısaca akıllı bir ağ üzerindeki her türlü erişilebilir cihazların bütünüdür denilebilir. Nesne olarak adlandırılan erişilebilir bütün cihazların tekil bir anahtar (unique identifier) ile gösterilerek internet altyapısı üzerinden birlikte çalışabilmesidir. Birlikte çalışabilen, erişilebilir her bir küçük parçanın derlenip bu sayede daha büyük parçalar oluşturulması temeline dayanmaktadır.

Nesnelerin interneti kavramı ilk olarak 1999 yılında Kevin Ashton tarafından ortaya atılmıştır (Ashton, 2009). İlk zamanlarda RFID etiketleri sayesinde radyo frekansı üzerinden birbirlerine bağlanabilen cihazlardan oluşmaktaydı. 2000’li yılların başında, endüstriyel otomasyon amacı için RFID (Radio Frequency Identification – Radyo frekansı ile tanımlama) entegrasyonu gerektiren bir sistemi geliştirmeye çalışan bir grup araştırmacı tarafından popüler hale gelmiştir ve gelişen teknoloji ile kavram çok daha yaygın bir vizyona erişmiştir (Atzori ve ark., 2010).

“Nesne” kavramı, nesnelerin interneti açısından oldukça geniş yelpazede düşünülebilir. Her türlü izleme cihazı, ölçüm cihazları (sensörler gibi), mikro devre veya bağlantı cihazları nesne olarak nitelendirilir. Bir cihazın nesne olarak sayılabilmesi için tek, özel bir isme sahip olması, erişilebilir olması yani bir iletişim protokolünü desteklemesi ve bir sensörü olması gerekir. Çünkü ancak bu şekilde nesne her yerden erişilebilir olur.

Nesnelerin interneti kavramı Şekil 3.20.’de görüldüğü gibi çeşitli bileşenlerden oluşur. Hesaplama (işlemciler), içerik (bilgi), koleksiyonlar (veri tabanı), iletişim (bilginin taşınması), bağlanabilirlik (ağ erişilebilirliği) ve yakınsama (entegrasyon, uyum) kombinasyonu olarak değerlendirilebilir. Yani herhangi bir ortamda herhangi bir ağa bağlı bulunan her nesne, her zaman herkes tarafından erişilebilmelidir. Kısaca nesnelerin interneti, kullanıcıların herhangi içerikteki bilgiyi ağa bağlı cihazlar üzerinden herhangi başka bir ağa yönlendirerek taşıyabilmesine olanak sağlar.



Şekil 3.20. Nesnelerin interneti bileşenleri

3.5.2. Nesnelerin interneti uygulamaları

Nesnelerin interneti uygulamaları, sensörlerin her birinin bağlanılabilir olmasından başka birden fazla sensörden gelen verinin birleştirilerek veya işlenerek bir sonuç değer elde edilmesi için de kullanılabilir. Fiziksel ölçüm ortamlarından alınan fazla sayıda sensör verisinin belirli işlemlerden geçmesinin ardından anlamlı bilgi olarak ilgili yere iletilmesi veya bunun sonucunda bir iş yapılması temin edilmektedir. Bu yönden nesnelerin interneti büyük verilerle ve uygulamaları ile iç içedir ve uygulama alanları oldukça geniş bir yelpazeye sahiptir. Nesnelerin interneti, akıllı şehir/çevre uygulamaları, akıllı ev uygulamaları, tedarik otomasyon uygulamaları gibi birçok alana uygulanabilmektedir. Örneğin, bir oteldeki odaların karbon monoksit oranı sensörler yardımıyla ölçülerek yangın kontrolü sağlanmak istenebilir. Kritik seviye aşıldığında gaz vanalarının ve elektrik şalterlerinin kapatılması ve uygun odalarda yangın musluklarının açılması kontrol edilebilir. Ya da yönetici gelen ortam verilerini analiz ederek odalardaki karbon monoksit oranının günün hangi saatlerinde yüksek olduğunu tespit edebilir ve o saatlerde odanın havalandırılmasını önerebilir.

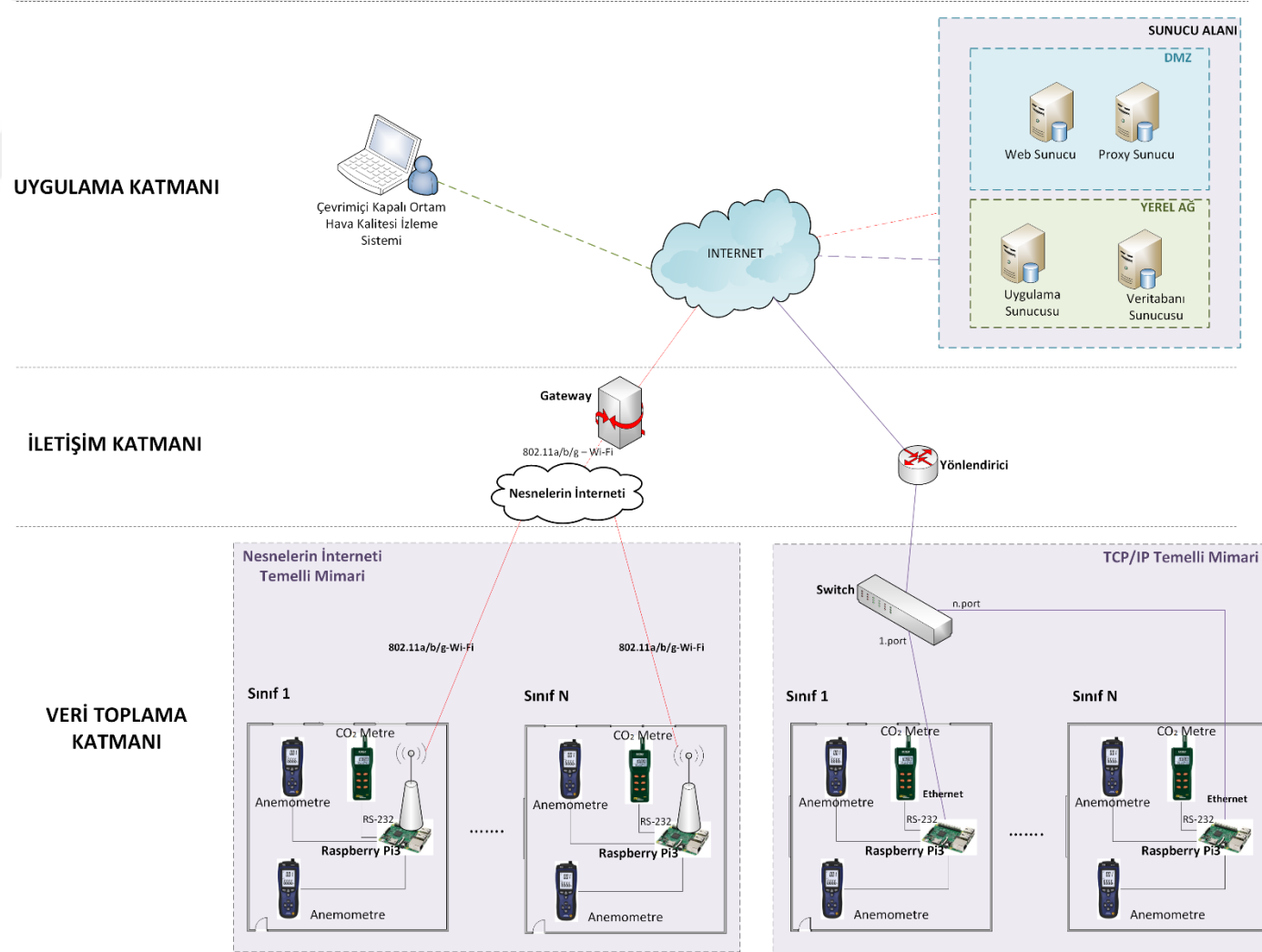
3.5.3. Kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemleri ve nesnelerin interneti

Son zamanlarda yapılan çalışmalara bakıldığında kapalı ortam hava kalitesi ölçüm ve izleme sistemleri ile nesnelerin interneti kavramları birlikte kullanılmaya başlandığı görülmektedir. Bu tarz sistemlerde en uçtaki algılayıcıdan en sondaki sunuculara ve kullanıcılara kadar her nesneye herhangi bir zaman kısıtlaması olmadan her ortamdan erişilebilmekte, nesneler birbiriyle iletişime geçebilmekte ve toplanan veriler üzerinde hesaplamalar yapıp veri tabanlarında toplanabilmektedir. Nesnelerin interneti tabanlı ev içi izleme sisteminin tasarlandığı bir çalışmada nem, sıcaklık, LDR sensörü, gaz sensörleri ve Zigbee modülünün entegre edildiği mikro denetleyici kullanılarak elde edilen bütünleşik ağ mimarisi tasarlanmıştır. Bu mimari ve akıllı sensörler sayesinde çevresel parametreler güvenilir bir şekilde ölçülüp taşınabilmıştır (Kelly ve ark., 2013). Sıcaklık, nem ve ışık sensörlerinin kullanıldığı bir başka çalışmada ise oluşturulan nesnelerin interneti tabanlı kablosuz ölçüm ve izleme platformu ile bir akıllı bina uygulaması geliştirilmiştir. Toplanan veriler LabView üzerinden grafiksel olarak gösterilmiş veri kaydı ve izleme bu şekilde yapılmıştır (Shah ve Mishra, 2016). Nesnelerin interneti altyapısının kullanıldığı bir başka çalışmada, bu altyapı üzerine iki adet HVAC enerji zamanlamalı metot geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntemler sayesinde kullanıcılar HVAC kontrol sistemlerini uzaktan kontrol edebilmektedir (Serra ve ark., 2014). Nesnelerin interneti altyapısının kullanıldığı benzer bir başka çalışmada ise, adına I-HVAC dedikleri nesnelerin interneti tabanlı HVAC sistemi önerilmiştir. Bu altyapı sayesinde bir binanın her katı ve alanı nesnelerin interneti ağına bağlanmış ve böylece fanları ve havalandırma sistemi kontrol edebilmiştir (Choi ve ark., 2017).

Bu tez çalışması kapsamında tasarlanan mimari ve sistem nesnelerin interneti kavramı ile birlikte düşünülebilir, birbirine bağlı nesnelerden oluşan ve her biri tekil id (kimlik) kullanarak adreslenebilen ve standart protokollere dayalı olarak iletişim kuran bir ağ olarak uygulanabilir. Kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemi için tasarlanan TCP/IP temelli mimari, ayrıca nesnelerin interneti kavramı altında da incelenmiş ve Şekil 3.21’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Nesnelerin interneti temelli mimaride, her biri benzersiz bir kimlik kullanarak adreslenebilen ve standart iletişim protokollerine dayanarak iletişim kuran birbirine bağlı sensör düğümleri ağı olarak uygulanabilmektedir. Bu sensör düğümleri, sensörler veya cihazlardan veri toplayabilmekte, verileri yerel olarak işleyip uygun iletişim protokolleri ile kablosuz olarak ağ geçidine yollayabilmektedir. Ağ geçitleri çift yönlü olarak verileri bulut sistemine gönderebilmektedir. Bu mimarinin TCP/IP temelli mimariden farkının veri toplama katmanında ve iletişim katmanında kullanılan araçlar ve iletişim protokolleri olduğu görülmektedir. Nesnelerin interneti tabanlı sistemde, sıcaklık, nem, hava akışı ve CO₂ gaz sensörlerinin veya ölçüm cihazlarının bağlandığı Wi-Fi erişimli (örneğin ZigBee modülü) tek kart bilgisayar kullanılarak elde edilen bütünleşik bir ağ mimarisi tasarlanabilir. Bu sayede akıllı uç birimler oluşturulur ve çevresel parametreler güvenilir bir şekilde ölçülüp sunuculara taşınır ve çevrimiçi izleme sisteminde izlenebilir.

Uygulama katmanında bulunan sunucu alanı ve çevrimiçi izleme sistemi iki mimaride de aynı kalmaktadır. Yani her iki mimaride de ölçüm sisteminden gelen veriler veri tabanı sunucusunda tutulmakta, uygulama sunucusunda bulanık mantık yöntemiyle veriler işlenmekte ve ölçüm ortamlarının hava kalite bilgisi elde edilebilmektedir. Web sunucusu aracılığı ile de kullanıcı çevrimiçi sistem üzerinden anlık olarak ölçüm ortamlarının hava kalitesini izleyebilmektedir.



Şekil 3.21. Tasarlanan kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemi için Nesnelerin İnterneti temelli ve TCP/IP temelli mimarilerin karşılaştırması

- Veri Toplama Katmanı: Fiziksel katman, AZ Inst. 77535 CO₂ metre aracılığıyla ortamın CO₂ yoğunluğunu, sıcaklığını ve nemini, PCE-423 Anemometre cihazı ile de ortam hava akış durumunu ölçen cihazlardan oluşur. Elde edilen ölçüm sonuçlarını arada kullanılan UART-to-USB dönüştürücü kablo ile UART protokolü ile iletip USB Yığın mesaj tipine çevirerek mikro bilgisayara gönderen en alttaki katmandır. Raspberry Pi mikro bilgisayarlar üzerinde Ubuntu Mate işletim sistemi kuruludur. Temelde, cihazların ve mini bilgisayarların entegrasyonu ve çevresel faktörlere erişim bu katmanın görevleridir.

TCP/IP temelli mimaride, mikro bilgisayar cihazlardan gelen veriyi alır, bir tampon bellekte tutar ve ilgili eylemleri gerçekleştirdikten sonra elde ettiği sonuçları belirli periyotlarla TCP/IP raw paketleri şeklinde üst katmana iletir. Nesnelerin interneti temelli mimaride ise, ortamdan sensör düğümü aracılığı ile toplanan veriler kablosuz olarak ağ geçidine yollanır.

- İletişim Katmanı: Sistemde verilerin fiziksel katmandan uygulama katmanına iletilmesi sırasında Sakarya Üniversitesi Ethernet altyapısı kullanılır. Sınıflardan gelen TCP/IP paketleri önce binadaki yönlendirici ve anahtar cihaz üzerinden yine üniversite bünyesinde bulunan sunuculara iletilmektedir. Nesnelerin interneti temelli mimaride ise sensör düğümlerinden gelen veriler kablosuz olarak ağ geçidine, oradan da nesnelerin interneti haberleşme protokolleri ile (örneğin MQTT- Message Queuing Telemetry Transport) bulut sisteme aktarılır. Sistemde sensör düğümleri de (sensörler ve Raspberry Pi bilgisayar) birbirleri ile haberleşebilmektedir.
- Uygulama katmanı: İletişim katmanı aracılığı ile veri toplama katmanından gelen ölçüm verileri öncelikle veri tabanı sunucusuna iletilir ve kaydedilir. Ardından bu katmanda bulunan uygulama sunucusu üzerinde bulanık mantık veri işleme algoritması çalışır ve ortamın genel hava kalitesi olan kapalı ortam çevresel kalite bilgisi elde edilir. Daha sonra bu bilgiler ve veriler web sunucusu aracılığı ile gerçek zamanlı gösterimler, istatistiksel analizler ve

ortam hava kalitesi izleme sistemi için bir üst katmana iletilir. Web sunucusu, veri tabanı sunucusu ve uygulama sunucusu üniversite bünyesinde bulunan sunuculardır. Bu katman, veri depolama, grafiksel görselleştirme, gerçek zamanlı izleme ve istatistiksel analiz ihtiyaçlarını tam otomatik biçimde kullanmak için tasarlanmış kullanıcı odaklı katmandır. Kullanıcı herhangi bir zaman, herhangi bir yerden birkaç tıklama ile gerçek zamanlı olarak sistemden beklenen sonucu elde edebilir. Bu katman TCP/IP temelli mimaride ve Nesnelerin İnterneti temelli mimaride de aynı şekildedir.



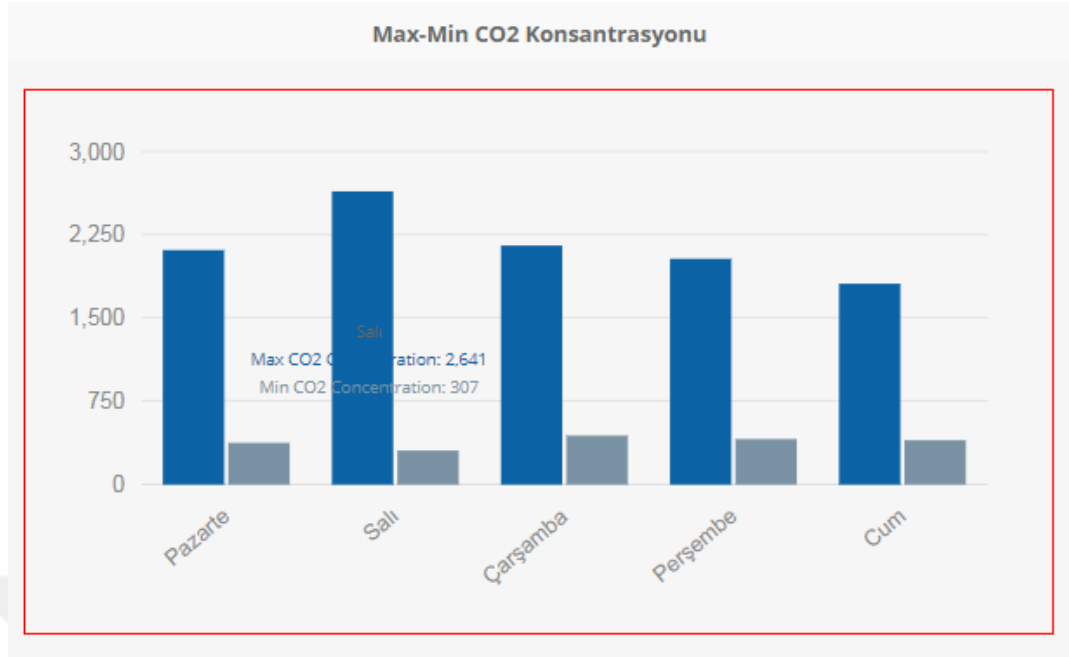
BÖLÜM 4. TARTIŞMA

4.1. Toplanan Veriler

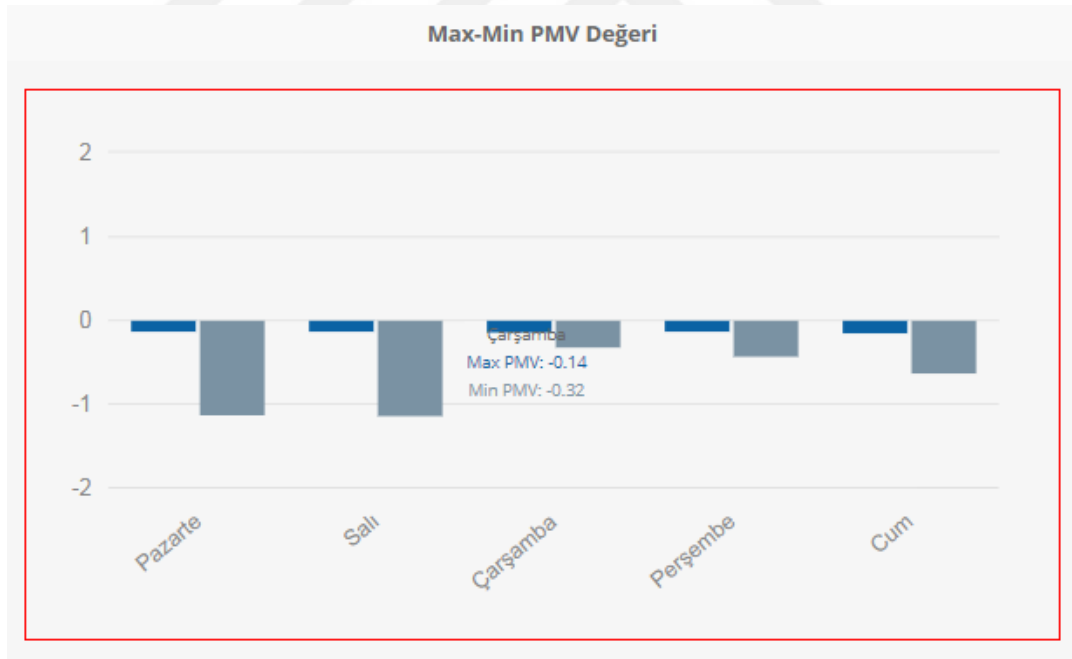
Bu çalışmanın amacı üniversite kampüsü içindeki bir binanın kapalı ortam çevresel kalitesini belirlemektir. Bunun için ortamda ölçülen CO₂ gazı ile kapalı ortam hava kalitesi, ölçülen sıcaklık, nem değerleri ve hava akış hızı ile de termal konfor seviyesi elde edilmiştir. Elde edilen bu iki değerin bulanık mantık yöntemiyle değerlendirilmesiyle ortamın çevresel kalite seviyesi hakkında son bilgi elde edilmiştir.

Çalışma sırasında sürekli hava kalitesi takibi Eylül-Aralık ayları ile Ocak-Nisan ayları arasında devam etmiştir. Binadaki sınıflarda dersler genellikle Pazartesi gününden Cuma gününe kadar sabah 09:00 ile akşam 22:00 arasında yapılmaktadır. Sınıflarda ders olduğu süre boyunca öğrenci mevcuttur. Her ders 3'er saatlik periyotlarla yapılmaktadır ve 45 dakikada bir 10-15 dakika arası mola verilmektedir. Mola süresince öğrencilerin çoğu dışarı çıkmakta ve cam veya kapı açılarak sınıf havalandırılmaktadır. Kış aylarında ders süreleri boyunca yapılan ölçümlerde sınıfların ortalama CO₂ seviyesi yaklaşık 2900 ppm, sıcaklık 21°C ve nem %40 civarlarında olduğu, bahar aylarında yapılan ölçümlerde ise CO₂ seviyesi 2300 ppm, sıcaklık 25°C ve nem %36 civarlarında olduğu görülmüştür.

Şekil 4.1. ve Şekil 4.2., C1106 nolu sınıfa ait Mart ayındaki herhangi bir haftalık ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.1., pazartesi gününden cuma gününe kadar ölçülen CO₂ seviyesinin günlük olarak ulaştığı maximum ve minimum değerleri gösterirken, Şekil 4.2.' de ölçülen sıcaklık, nem ve hava akış değerleri ile hesaplanan PMV seviyesinin günlük minimum ve maximum sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 4.1. C1106 nolu sınıfa ait Mart ayındaki herhangi bir haftalık min-max CO₂ konsantrasyonu ölçüm sonuçları

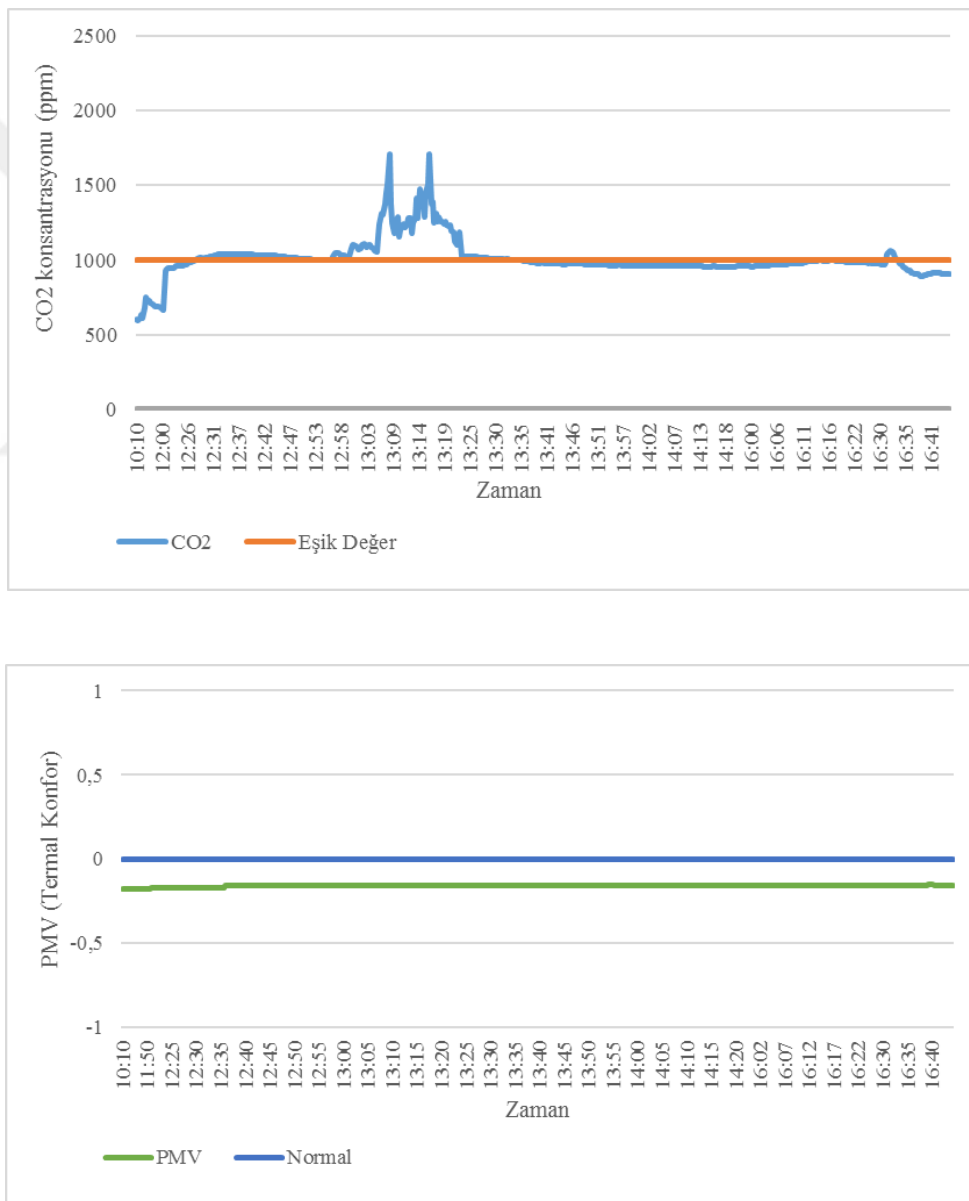


Şekil 4.2. C1106 nolu sınıfa ait Mart ayındaki herhangi bir haftalık hesaplanan min-max PMV sonuçları

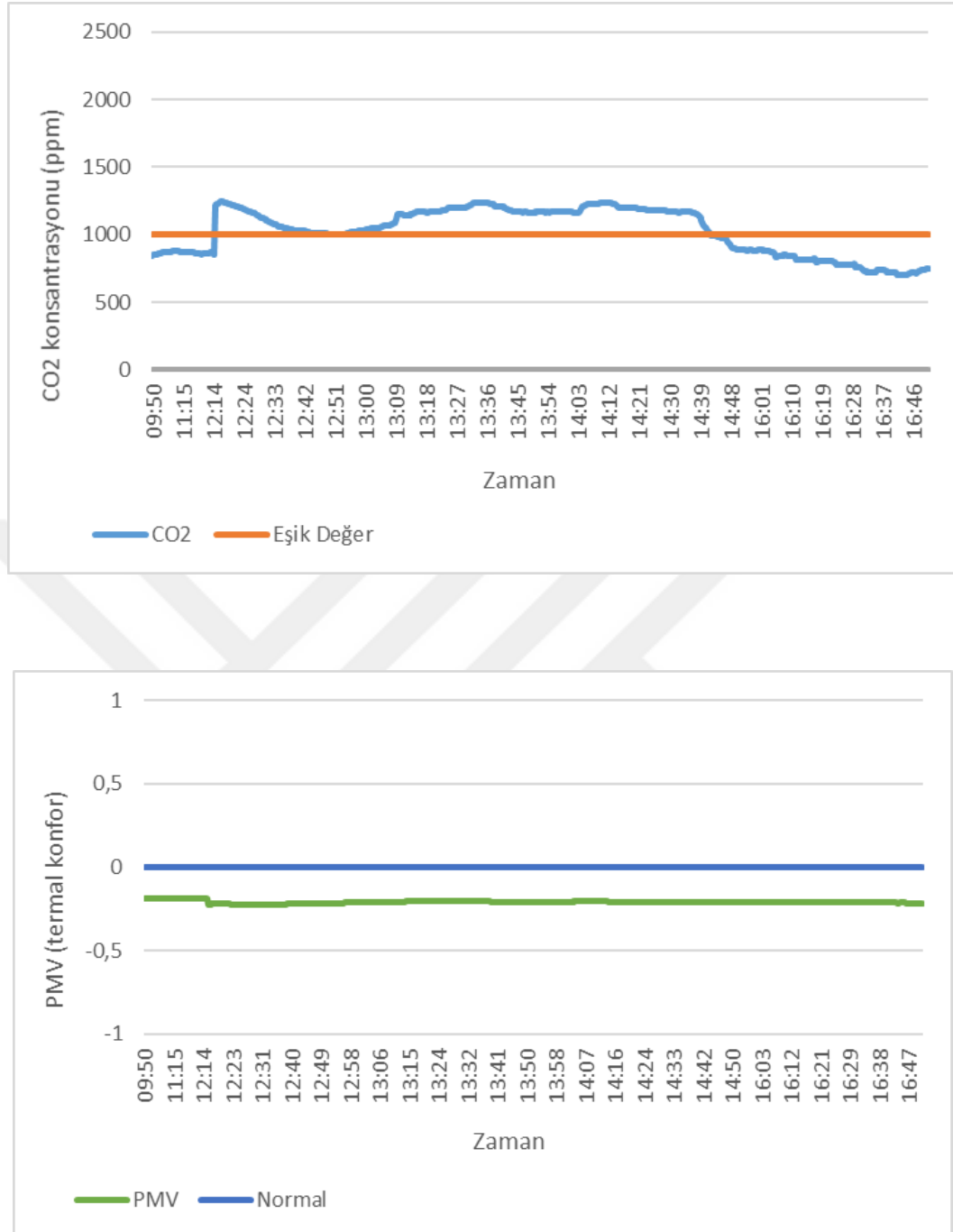
Grafiklerde bir sınıfa ait bir haftalık ölçüm verilerin gösterilmesinin nedeni o sınıfta bir dönem boyunca her hafta aynı gün ve saatlerde aynı derslerin işlenmesi ve derse katılan öğrenci sayılarının yaklaşık olarak hep aynı olmasıdır. Dolayısıyla sınıf

ortamında devamlı yapılan ölçüm sonuçlarına bakıldığında haftalık ölçüm sonuçları birbirine çok benzemektedir.

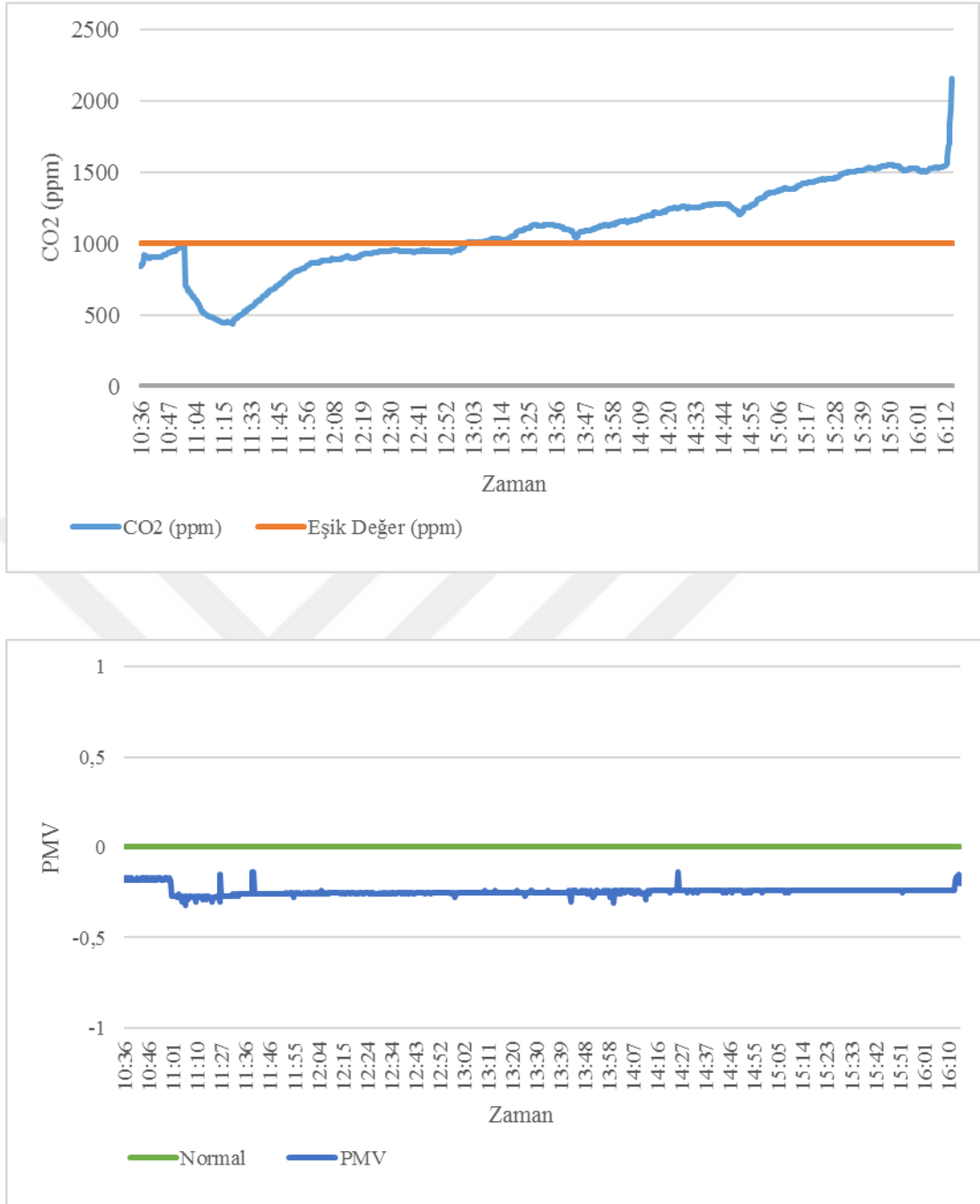
4 sınıfta birden (C1104, C1105, C1106, C1107 nolu sınıflar) eş zamanlı yapılan ölçümler sonucunda bir günlük toplanan CO₂ konsantrasyon verisi ve sıcaklık, nem, hava akış değerleriyle hesaplanan PMV (termal konfor) bilgisinin zamana bağlı grafikleri sınıf bazında ikiyeşerli grup yapılarak Şekil 4.3., Şekil 4.4., Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.'da sunulmuştur.



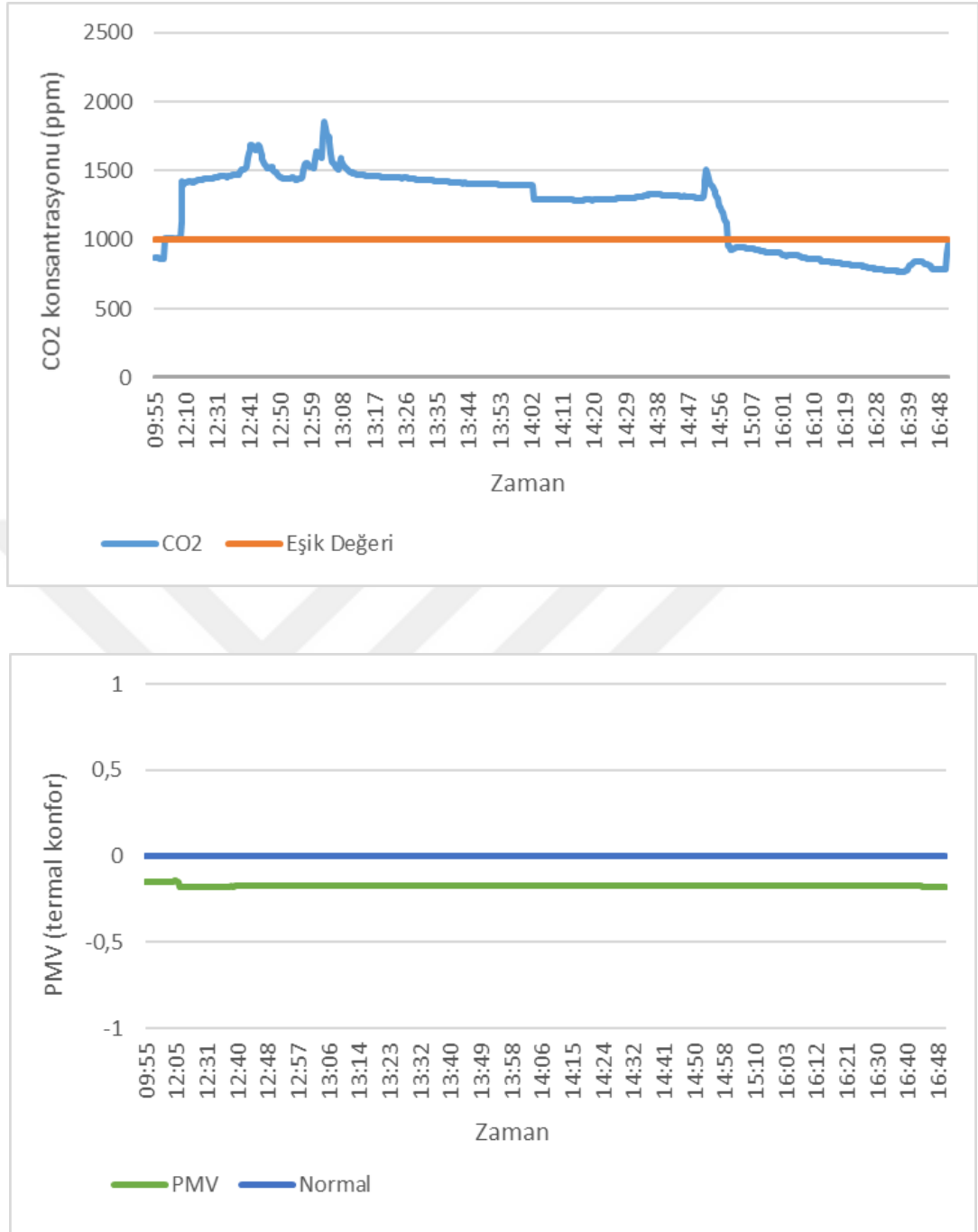
Şekil 4.3. C1104 nolu sınıfa ait bir günlük ölçüm verileri (zamana bağlı CO₂ konsantrasyonu (ppm) ve PMV (termal konfor))



Şekil 4.4. C1105 nolu sınıfa ait bir günlük ölçüm verileri (zamana bağlı CO₂ konsantrasyonu (ppm) ve PMV (termal konfor))



Şekil 4.5. C1106 nolu sınıfa ait bir günlük ölçüm verileri (zamana bağlı CO₂ konsantrasyonu (ppm) ve PMV (termal konfor))



Şekil 4.6. C1107 nolu sınıfa ait bir günlük ölçüm verileri (zamana bağlı CO₂ konsantrasyonu (ppm) ve PMV (termal konfor))

Bu grafiklere göre ders olan zamanlarda sınıflardaki CO₂ seviyesinin 2000 ppm'e çok yaklaştığı veya üstüne çıktığı görülmektedir. Ders olmayan saatlerde de CO₂ seviyesi 1000 ppm'in altında ölçülmüştür. Termal konforun ise minimum değeri -1 ile -2 arasında, maximum değeri ise -1 ile 0 arasında hesaplanmıştır. Dolayısıyla termal konfor değerine göre serin sayılabilecek bir haftada, ders süreleri boyunca sınıfın

kapalı ortam hava kalitesi yani CO₂ seviyesi ASHRAE standartlarına göre kötü olarak değerlendirilebilir.

Aynı şekilde, termal konfor ve IAQ seviyesine bağlı olarak karar veren bulanık sistem de ders yapılan zamanlarda sınıfların iç ortam kalitesini kötü olarak değerlendirmiştir. Dolayısıyla dersliklerin yeterince havalandırılmadığı ve öğrenci sayısının artmasıyla da çevresel ortam hava kalitesinin daha da kötüleştiği açıktır. Ders boyunca kapı veya camların mutlaka açık bulundurulması veya zaman zaman açılıp havalandırılması gerekir.

Tablo 4.1. ise 7 günlük (26 Mart-1 Nisan 2018 arası) ölçülen iç ortam CO₂ seviyesini ve sıcaklık, nem ve ortalama hava akış değerleri ile hesaplanan PMV değerini, ölçüm boyunca meteorolojiden alınan dış ortam hava sıcaklığını, nemini ve CO₂ seviyesini ve sınıfta bulunan öğrenci sayısını ayrıntılı olarak göstermektedir.

Ölçümler sırasında ders işlenen süreler boyunca sınıflarda 20-36 arası, ders olmadığında ise sınıflarda 0-6 arası öğrenci bulunduğu tespit edilmiştir. Ders durumunda dış ortam hava koşullarına bağlı olarak cam veya kapının açık tutulduğu, çok soğuk dönemlerde ise ikisinin de kapalı olduğu görülmüştür. Eğer dış ortam hava sıcaklığı 20°C ve üzerindeyse cam ve kapı aynı anda açık olabilmektedir. Tablo 4.1.'e göre ders yapılmayan zamanlarda boş sayılabilecek sınıfların CO₂ seviyesi hemen hemen aynı ve ortalama 380 ppm civarında olup normal sınırlardadır. Ders işlenen süreler boyunca sınıfta ölçülen CO₂ seviyesinin ise 1000 ppm olan ASHRAE sınır değerinin epey üzerinde olduğu izlenmiştir. Dolayısıyla ders süresince boş sınıfa oranla doluluk oranı arttıkça CO₂ konsantrasyonunda belirgin bir artış söz konusudur ve bu durum da sınıflardaki havalandırmanın oldukça yetersiz olduğunun kanıtıdır.

Sıcaklık ve nem değerlerinin artış veya azalışı dış ortam hava durumuna, sınıfta bulunan öğrenci sayısına, kapı ve pencerelerin açık/kapalı olma durumuna bağlıdır. Tablo 4.1.'e göre CO₂ seviyesinin artışıyla çoğunlukla sınıflardaki nem ve sıcaklık değerlerinde de artış söz konusudur. 7 günlük ölçümün Mart ayında yapılmasından dolayı öğrenci kıyafetlerinin biraz kalın olduğu göz önünde bulundurularak sıcaklık,

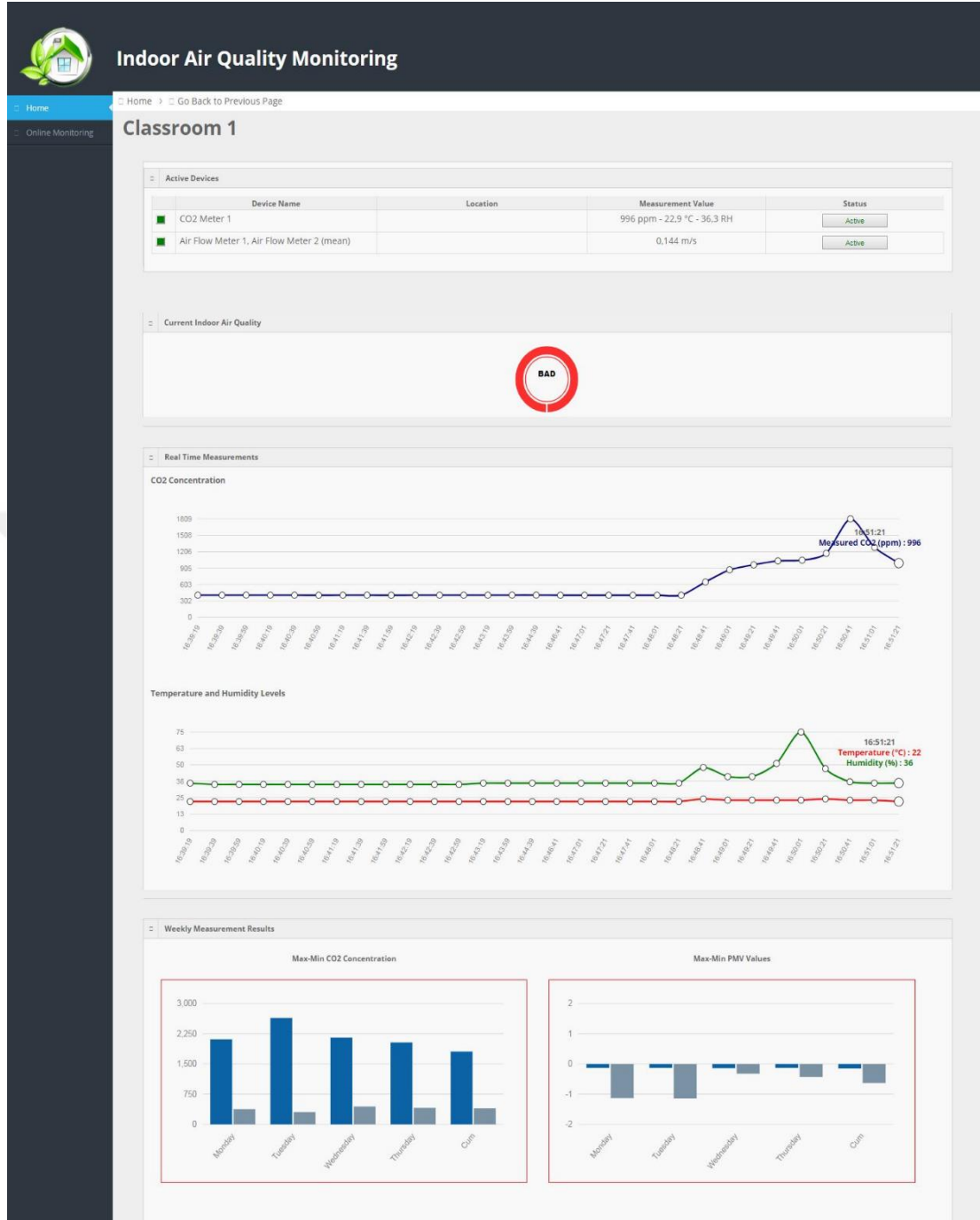
nem ve hava akış değerleriyle hesaplanan termal konfor (PMV) seviyesinin biraz serin ve normale yakın çıktığı görülmüştür.

PMV hesabı sırasında öğrenciler oturur pozisyonda olduğundan metabolik aktivite seviyesi 1.0, giyilen kıyafet seviyesi ise Eylül-Ekim aylarında yaz kıyafeti olarak ~0.6 clo, diğer aylarda (Kasım'dan Nisan'a kadar) ise kış kıyafeti olarak düşünülerek ~1 clo (1 clo = 0.155 m² °C/W) seçilmiştir.

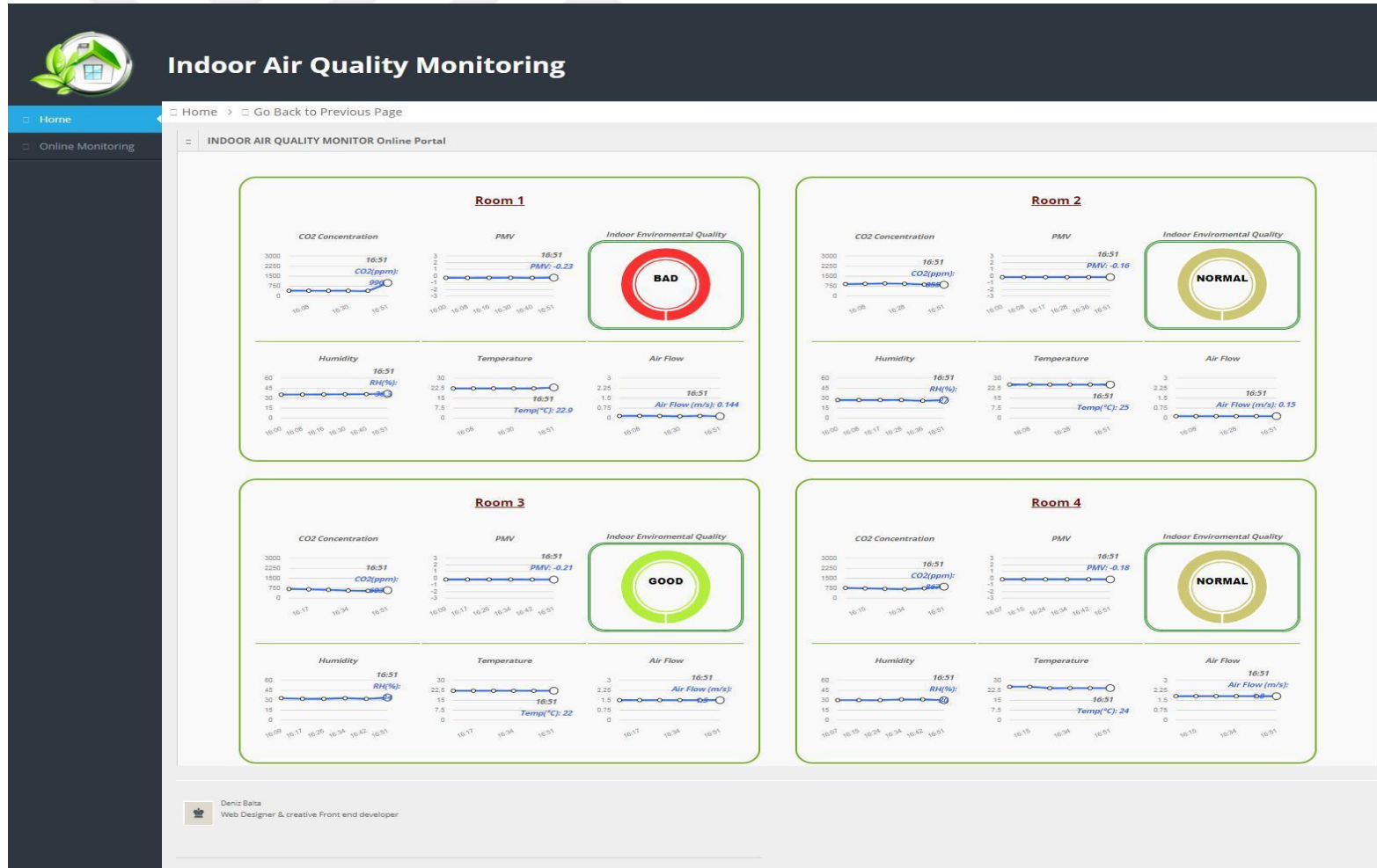
Tablo 4.1. C1106 nolu sınıfta bir haftalık min-max ve ortalama ölçüm sonuçları

		İç Ortam					Dış Ortam (ortalama)			
		CO ₂ (ppm)	Sıcaklık (°C)	RH (%)	Hava Akışı (m/s)	PMV	CO ₂ (ppm)	Sıcaklık (°C)	RH (%)	Öğrenci Sayısı
Pazartesi	Min.	377	21,2	29,3	0,021	-1,13	326	22°/4°	61,3	5
	Max.	2112	24,1	42,2	5,653	-0,14				24
	Ortalama	878,8	23,2	35,1	0,075	-0,17				
Salı	Min.	307	19,2	30,1	0,019	-1,14	351	20°/9°	41,2	6
	Max.	2641	24,1	52,0	5,584	-0,13				27
	Ortalama	554,7	22,9	37,5	0,081	-0,18				
Çarşamba	Min.	442	21,4	46,6	0,030	-0,32	327	13°/7°	73,4	3
	Max.	2153	26,6	73,9	0,352	-0,14				22
	Ortalama	1094,5	23,1	49,1	0,063	-0,25				
Perşembe	Min.	411	21,2	40,1	0,026	-0,43	366	9°/7°	54,6	5
	Max.	2034	25,3	50,6	0,890	-0,13				20
	Ortalama	933,1	23,6	44,6	0,21	-0,31				
Cuma	Min.	400	19,3	32,6	0,024	-1,66	315	16°/3°	72,1	5
	Max.	1809	24,5	75,2	2,624	-0,15				18
	Ortalama	482,5	23,1	35,9	0,18	-0,24				
Cumartesi	Min.	350	20,5	41,3	0,021	-0,09	352	24°/0°	81,2	0
	Max.	438	26,1	80,6	0,092	-0,13				0
	Ortalama	394	22,6	56,1	0,054	-0,10				
Pazar	Min.	324	27,3	56,7	0,015	-0,11	320	29°/6°	85,3	0
	Max.	463	29,8	81,3	0,068	-0,16				0
	Ortalama	406	28,4	68,4	0,036	-0,12				

Ölçümler ders başlamadan 30 dakika önce boş ve havalandırılmış sınıfta başlatılmıştır. Dolayısıyla ölçüm sonuçları 350-400 ppm civarında dış ortamın CO₂ seviyesine çok yakın olarak başlar. Ölçümler sırasında dış ortamın hava sıcaklığı 16°C/3°C'dir ve ders sırasında kapı veya pencereler çokça açık kalmamıştır. Bu nedenle ders süresince CO₂ seviyesi Pettenkofer limiti olan 1000 ppm seviyesinin yaklaşık 2 katına ulaşmıştır. Sıcaklık ve nem seviyelerinin sırasıyla maximum 24.5 °C ve %75.2 değerlerine eriştiği görülmüştür. Ölçüm sonuçlarıyla hesaplanan PMV (termal konfor) değeri ile ölçülen kapalı ortam hava kalitesi değerinin (CO₂-ppm) bulanık mantık yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda ise sınıfların iç ortam çevresel kalitesi (IEQ) ders süresince çoğunlukla kötü olarak nitelendirilebilir. Şekil 4.7.'de www.iaq.csogr.sakarya.edu.tr adresi üzerinde yayınlanan ve çalışma kapsamında geliştirilen web sitesine ait iç ortam çevresel kalitesi kötü olarak nitelendirilen bir sınıfın her bir çevresel ölçüm parametresinin grafiksel gösterimlerinin yapıldığı web ara yüzü gösterilmektedir. Şekil 4.8.'de ise ölçüm yapılan dört sınıfa ait çevresel ölçüm parametrelerinin grafiksel gösterimlerinin yapıldığı ve üzerinde bulanık mantık uygulamasının çalıştığı uygulama sunucusundan dönen her bir sınıfın kapalı ortam çevresel kalitesinin gösterildiği web ara yüzü sunulmaktadır.



Şekil 4.7. Bir sınıfa ait çevresel ölçüm parametrelerinin gösterildiği web arayüzü



Şekil 4.8. Ölçüm yapılan dört sınıfa ait çevresel ölçüm parametrelerinin grafiksel gösterimlerinin yapıldığı web ara yüzü

4.2. Sübjektif Değerlendirme, Sonuçları ve Yorumlanması

Sübjektif değerlendirme dersin sonunda öğrencilere dağıtılan değerlendirme ölçeği (rating scale) tipi anketlerle yapılmıştır. Amaç sınıflarda ders boyunca iç ortam çevresel parametrelerinin öğrenciler ve performansları üzerindeki etkisini değerlendirmek ve bulanık mantık temelli kapalı ortam hava kalitesi izleme sisteminin sonuçlarıyla gerçekten hissedilen bu sonuçları karşılaştırmaktır. Ankete katılanlar, ortamın hissedilen termal konforundan ve genel olarak hava kalitesi algısından duydukları duyguları ifade ettiler. Ankette çevresel parametreler, ortamın çevresel kalitesi ve ortamdaki kaynaklı oluşabilecek sağlık sıkıntıları ile alakalı kullanılan değerlendirme kriterleri Tablo 4.2.'de gösterilmiştir. Ayrıca anketin tamamı Ek 2'de sunulmuştur.

Tablo 4.2. Ankette kullanılan kriterler

Alakalı Anket Sorusu	Hissedilene Göre Değerlendirme	Alakalı Anket Sorusu	Hissedilene Göre Değerlendirme
<u>Hava Sıcaklığı</u>	Çok Düşük Düşük Normal Yüksek Çok Yüksek	<u>Kapalı Ortam Hava Kalitesi</u>	Mükemmel İyi Makul Ne İyi Ne Kötü (orta) Kötü Çok Sağlıksız
<u>Nem</u>	Çok Düşük Düşük Normal Yüksek Çok Yüksek	<u>Kapalı Ortam Çevresel Kalite</u>	Çok Kötü Kötü Normal İyi Çok İyi
<u>Hava akışı</u>	Hava Akışı Yok Hafif Hava Akışı Yeterli Hava Akışı Güçlü Hava Akışı Çok Güçlü Hava Akışı	<u>Sağlık Şikâyeti</u>	Yok Öksürük Burun Tıkanıklığı Sinüs Enfeksiyonları Baş Ağrısı Nefes Darlığı
<u>Termal Konfor</u>	Sıcak Ilık Biraz Ilık Normal Biraz Serin Serin Soğuk		

Sübjektif değerlendirme sırasında ortamın sıcaklık, nem ve hava akışını hesaba katarak termal konfor hissine odaklanılmıştır. İlâveten, kapalı ortam hava kalitesi hakkında bilgi edinebilmek adına öğrencilere sınıf ortam havasının sağlıkları ve performansları üzerinde nasıl etki ettiği sorulmuştur.

Sübjektif değerlendirme için hazırlanan anketler öğrencilerin bulunduğu ve ölçümlerin yapıldığı 5 gün boyunca (26-30 Mart arasında) derslerin sonunda öğrencilere

dağıtılmıştır. Böylece sınıfların çevresel hava kalitesine karar veren bulanık sistemin sonuçlarının doğrulanması hedeflenmiştir.

Öğrencilerin anket sorularına verdikleri cevaplar ile gerçek ölçüm sonuçları ve bulanık sistemin ürettiği kapalı ortam çevresel kalite sonuçlarının karşılaştırması Tablo 4.3.'te sunulmuştur.

Ders başlarında öğrenciler sınıfların termal konforunu ve ortam hava kalitesini 'iyi' olarak değerlendirmiştir. Tablo 4.3.'te görüldüğü gibi ankete katılanların ders süresince termal konfor parametrelerindeki artışları doğru algılayabildikleri ancak kokusuz ve ortamdaki miktarı çok fark edilemeyen CO₂ gazı miktarındaki artışı uyku, burun tıkanıklığı, yorgunluk ve nefes darlığı gibi rahatsızlık şikâyetlerinin artması ile fark ettikleri görülmüştür. Ders boyunca ölçülen ve literatürdeki standartlara göre 'kötü' olarak sınıflandırılan CO₂ seviyesinin anket sorusuna verilen cevaplarda neredeyse aynı sayıda 'vasat' ve 'kötü' olarak değerlendirilmesi, ortamdaki hava kalitesinin giderek kötüleştiğinin fark edildiğini göstermektedir. Ölçümler sonucunda bulanık sistemin ortamın çevresel kalitesi hakkındaki çıktısı 'kötü' iken katılımcılar da aynı şekilde ortamın çevresel kalitesini 'kötü' olarak değerlendirmiştir.

Sonuç olarak öğrenciler ders sonunda ortamın çevresel kalitesini (IEQ) 'kötü' ve dersin başındaki havaya göre tahammül edilemez olarak değerlendirmiştir. Ayrıca termal konforun 'normal' ve hava kalitesi seviyesinin 'kötü' olduğunu belirttiler. Sübjektif değerlendirme sonuçlarının yapılan gerçek ölçümlerle ve kapalı ortam hava kalitesinin bulanık sistem çıktısı ile eşleştiği görülmüştür.

Tablo 4.3. Sübjektif değerlendirme için öğrenci cevaplarının dağılımları

Termal Konfor (PMV) Değerlendirmesi için Öğrenci Cevaplarının Dağılımları								
	Sıcak	Ilık	Biraz Sıcak	Normal	Biraz Serin	Serin	Soğuk	Sistem Çıktısı
Pazartesi	-	-	5	13	4	2	-	-0,14 Normal
Salı	-	2	4	15	3	3	-	-0,13 Normal
Çarşamba	-	-	5	11	4	2		-0,14 Normal
Perşembe	-	1	3	9	6	1		-0,13 Normal
Cuma	-	1	1	10	5	1		-0,15 Normal

Kapalı Ortam Hava Kalitesi (CO ₂) Değerlendirmesi için Öğrenci Cevaplarının Dağılımı							
	Çok Sağlıksız	Kötü	Vasat	Makul	İyi	Mükemmel	Sistemin Çıktısı
Pazartesi	1	7	12	2	2	-	2112 = Kötü
Salı	3	10	10	3	1	-	2641 = Kötü
Çarşamba	-	8	9	5	-	-	2153 = Kötü
Perşembe	-	5	6	7	2	-	2034 = Kötü
Cuma	-	3	3	9	3	-	1809 = Kötü

Genel Kapalı Ortam Çevresel Kalite (IEQ) Değerlendirmesi için Öğrenci Cevaplarının Dağılımı						
	Çok Kötü	Kötü	Normal	İyi	Çok İyi	Sistem Çıktısı
Pazartesi	1	10	9	3	1	Kötü
Salı	-	15	11	1	-	Kötü
Çarşamba	1	9	9	3	-	Kötü
Perşembe	-	9	7	3	1	Kötü
Cuma	1	8	7	1	1	Kötü

BÖLÜM 5. SONUÇLAR ve GELECEK ÇALIŞMALAR

Kapalı ortam hava kalitesinin kötü olması yalnızca tek bir etkene bağlı bir problem değildir. Ortamda bulunan farklı kirletici kaynaklarına, binaların yapısına, binalarda kullanılan malzemelere, içindeki mobilyalara ve mevsimlere kadar birçok faktöre bağlı olabilir. Kapalı ortam hava kirliliğinin insanlar üzerindeki etkilerinin çoğunlukla uzun vadede ortaya çıkması, sağlıklarını ve yaşam kalitelerini direkt ya da hızlı olarak tehdit etmemesinden kaynaklı, kötü hava kalitesi ortamdaki insanlar tarafından hemen algılanmamaktadır. Sınıf ortamlarındaki kötü hava kalitesinin nedenleri ise, genellikle ortamdaki öğrenciler ve havalandırma problemleridir. Kapalı ortamda bulunan her bir öğrenci birer kirletici kaynağıdır. Dolayısıyla ders süresi, ortamda bulunan öğrenci sayısı, sınıfın hacmi ve havalandırma oranı düşünüldüğünde ortam hava kalitesinin tehlikeli seviyeye gelmesi kaçınılmazdır.

Kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemleri, hava kalitesi hakkında bilgi vermenin yanı sıra insan sağlığını ve konforunu arttırmak adına doğru adımların atılmasını sağlamak için kullanılan sistemlerdir. Ortamda kritik kirletici seviyelerini hızlı bir şekilde analiz etmek ve tanımlamak için ise çevrimiçi ölçümler gereklidir. Hava kalitesi bilgilerinin çevrimiçi sunumu, insanların zaman içinde hava kirliliğini artıran konular hakkında daha duyarlı olmalarına ve alternatif seçeneklerden doğru olanı seçmelerine yardımcı olacaktır. Bu nedenle kapalı ortamlarda insanların maruz kaldığı havanın kalitesinin çevrimiçi olarak yakından izlenmesi oldukça önemlidir.

Bu tez çalışmasında, sınıflarda daha konforlu ve sağlıklı bir çalışma ortamının sağlanması için kapalı ortam hava kalitesi ve termal konfor parametrelerinin gerçek zamanlı olarak izlendiği çevrimiçi bir sistem geliştirilmiştir. Bu sisteme ait gerçekleştirilen mimarinin bileşenleri, ölçümlerin yapıldığı uç düğümler, verilerin depolandığı, işlendiği ve sunulduğu sunucular ile kullanıcılarıdır. Mimaride uç düğüm

olarak adlandırılan her bir sınıfta bir adet CO₂ metre, iki adet hava akış metre ve Raspberry Pi mikro bilgisayarlar kullanılmıştır. Sınıflardaki bu ölçüm cihazları ile sıcaklık, nem, hava akış hızı ve CO₂ konsantrasyonu gibi çevresel faktörler algılanmakta, metabolizma hızı, giyim katsayısı gibi sübjektif faktörlerle birlikte ölçülen ve algılanan bütün bilgiler anlamlı hale getirilerek o sınıfa ait termal konfor ve kapalı ortam hava kalitesi bilgisi elde edilmektedir. Sistemde uç düğümlerin yanı sıra, ölçüm cihazlarından alınan verilerin depolandığı ve bir adet veri tabanı sunucusu, alınan ölçüm verilerinin bulanık mantık ile ağırlıklandırılıp ve entegrasyon kriterlerinin belirlenip değerlendirildiği ve ortamın genel çevresel kalite bilgisinin elde edildiği bir adet uygulama sunucusu ve ölçüm verilerinin kullanıcılar tarafından anlık olarak görüntülenmesi ve ortamın genel çevresel hava kalitesi bilgisi gibi çevrimiçi bilgilerin sunulması için ise bir adet web sunucusu bulunmaktadır.

Çalışmada, ortam hava kalitesinin belirlenmesinde ortamda ölçülen CO₂ miktarının yanında önemli bir faktör olan ve sıcaklık, nem, hava akış hızı, metabolizma hızı, giyim seviyesi gibi çevresel ve fiziksel parametreler kullanılarak hesaplanan termal konfor incelenmiş, ardından PMV değeri olarak sistemde hesaplanabilmektedir. Ardından ölçülen CO₂ miktarı ve elde edilen PMV değeri arasındaki ilişkiyi araştırmak ve iki değerinde ortam hava kalitesi üzerindeki etkisini inceleyebilmek için bulanık mantık yöntemine başvurulmuştur. Mimaride bulunan uygulama sunucusu üzerinde geliştirilen bulanık mantık hesaplama uygulaması sayesinde CO₂ ve PMV verileri işlenerek ortam hava kalitesi hakkında elde edilen son bilgi yani kapalı ortam çevresel kalite bilgisi (IEQ) web sunucusu üzerinden son kullanıcıya iletilebilmiştir.

Bu çalışmada, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, tek bir ölçüm ortamına bağlı kalmayarak çoklu parametre ölçümüne imkân veren, web tabanlı, dağıtık mimariye sahip, esnek ve ölçeklenebilir bir kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemi önerilmiştir. Ayrıca çalışmada, kapalı ortamlardan elde edilen birbirinden bağımsız ölçüm ve ortam parametrelerinin (CO₂ seviyesi, termal konfor değeri) birlikte analiz edilebilmesini ve sonuç olarak ortamın çevresel hava kalite bilgisinin elde edilebilmesini sağlayan bir bulanık model önerilmiştir.

Yapılan ölçümler sonucunda, sınıflarda ders süresince CO₂ seviyesi Pettenkofer limiti olan 1000 ppm seviyesinin yaklaşık 2 katına ulaştığı, sıcaklık ve nem seviyelerinin ise sırasıyla maximum 24.5°C ve %75.2 değerlerine eriştiği görülmüştür. Sınıfların termal konfor değeri ile kapalı ortam hava kalitesi değerinin bulanık mantık yöntemiyle değerlendirilmesiyle elde edilen iç ortam çevresel kalite bilgisi ders yapılan zamanlarda çoğunlukla kötü olarak nitelendirilmiştir. Ardından aynı ortamda bulunan öğrencilere yapılan anketlere göre elde edilen sübjektif değerlendirme sonuçlarının yapılan gerçek ölçümlerle ve kapalı ortam hava kalitesinin bulanık sistem çıktısı ile eşleştiği görülmüştür. Yani ortamın çevresel kalitesi ders sonunda dersin başındaki havaya göre ‘kötü’ ve tahammül edilemez olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca termal konfor ‘normal’ ve hava kalitesi seviyesi ‘kötü’ olarak belirtilmiştir.

Web tabanlı çevrimiçi sistem kapalı ortam çevresel kalitesi ve ölçülen her bir parametrenin (CO₂, sıcaklık, nem, hava akışı) anlık değişimlerini grafiksel formatta göstermektedir. Ölçümler, ders yapılan saatlerde sınıf ortamının hava kalitesinin kabul edilebilir seviyelerin çok üzerinde olduğunu göstermektedir. Ayrıca, sınıflardaki doğal havalandırmanın, iç ve dış ortamlar arasında uygun miktarda temiz hava değişimi için yeterli olmadığı açıktır. Ortam hava kalitesinin artırılması adına ortamdaki kişi sayısının azaltılması ve sınıfların devamlı havalandırılması soruna çözüm olabilir fakat mevcut öğrenci sayısı ve mevsimsel faktörler göz önüne alındığında bu durum çok mümkün olmadığından sınıflara uygun havalandırma sistemlerinin kurulması gerekmektedir. Havalandırma sistemlerinin kurulması doğal havalandırma çözüm önerisine göre biraz daha maliyetli bir çözüm önerisi olsa da uyarı eşiklerinin aşılması durumunda kısa sürede sağlıklı ve konforlu bir çalışma ortamının tekrar sağlanması için en optimal çözüm olarak kabul edilebilir.

Bir üniversite kampüsünün farklı lokasyonlarındaki binalarında veya yerleşkelerinde eş zamanlı ölçümler yapıp ortam hava kalitesinin izlendiği bir sistem düşünüldüğünde sensörlerin ürettiği tüm verilerin internet ağı aracılığı ile bulut sistemine gönderilmesi yüksek bant genişliği ihtiyacı doğuracaktır. Bunun yerine ölçülen sensör verilerinin aynı lokasyondaki bir sistemde incelenerek, ancak tehlike anında merkezde bulunan sistemlere bu yüksek ölçüm sonuçlarının gönderilmesi daha

doğru bir yaklaşım olacaktır. Dolayısıyla gelecek çalışmalarda cihazların veya sensörlerin ürettiği verileri merkezi bir sunucuya gönderip işlenmesini sağlayan mimarinin aksine, önce yerel düğümlerde analiz edilmesini ve ihtiyaç anında merkezi sunuculara gönderilmesi amaçlanmaktadır. Böylece merkezi sunucuya bağımlılık azalacak, sistem düşük bant genişliği ile çalışabilir hale gelecek ve güvenlik sağlanabilecektir.

Tasarlanan sistem nesnelerin interneti (Internet of Things - IoT) kavramı ile birlikte düşünülebilir, birbirine bağlı nesnelerden oluşan ve her biri tekil id kullanarak adreslenebilen ve standart protokollere dayalı olarak iletişim kuran bir ağ olarak uygulanabilir. Böylece sistemin ölçeklenebilirliği artacaktır. Bu çalışmada tasarlanan mimaride her bileşen bir nesne gibi düşünüldüğünden oluşturulan sistem her türlü ortama uygun ve her tarz bina için kullanılabilir olmaktadır. Sistemin IoT tabanlı bir sistem haline getirilmesiyle izleme sistemi üzerinden geri besleme kontrolünün yapılabilmesi, cihazlar ve alanlar arasında hiyerarşik bir yönetim ilişkisi olması, kullanıcının hata tespitinin kolayca yapabilecek olması tasarlanan sistemi daha güçlü kılacaktır.

KAYNAKLAR

- Ammann, H., Berry, M., Childs, N., Mage, D. 1987. Health effects associated with indoor air pollutants. Environmental Protection Agency, EPA.
- ASHRAE-62. 2016. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
- ASHRAE Standard 55. 2013. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (ANSI Approved). Atlanta: ASHRAE.
- Ashton, K. 2009. That “Internet of Things” Thing. RfID Journal, 22: 97-114.
- Assimakopoulos, M.N., Dounis, A., Spanou, A., Santamouris, M. 2013. Indoor air quality in a metropolitan area metro using fuzzy logic assessment system. Science of the Total Environment, 449: 461-469.
- Atthajariyakul, S., Leephakpreeda, T. 2004. Real-time determination of optimal indoor-air condition for thermal comfort, air quality and efficient energy usage. Energy and Buildings 36: 720-733.
- Atzori, L., Antonio, I., Giacomo, M. 2010. The Internet of Things: A survey. Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking 54(15): 2787-2805.
- Bakó-Biró, Z., Clements-Croomea, D.J., Kochhara, N., Awbi, H.B., Williams, M.J. 2012. Ventilation rates in schools and pupils’ performance. Building and Environment, 48: 215-223.
- Balta, D., Yalçın, N., Ozmen, A. 2017. Indoor Air Quality Monitoring System Using Raspberry Pi for Energy Efficiency in Classrooms. International Conference on Engineering and Natural Science - ICENS, Budapest, Hungary.
- Balta, D., Yalçın, N., Ozmen, A. 2015. MPI based simulator study for indoor air quality monitoring. 3rd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science. Valencia, Spain.
- Bas, E. 2004. Indoor Air Quality- A Guide for Facility Managers. The Fairmont Press.
- Behzadi, N., Fadeyi, M.O. 2012. A preliminary study of indoor air quality conditions in Dubai public elementary schools. Architectural Engineering and Design Management, 8(3): 192-213.
- Chatzidiakou, L., Mumovic, D., Summerfield, A.J. 2012. What do we know about indoor air quality in school classrooms? A critical review of the literature. Intelligent Buildings International, 4(4): 228-259.

- Chen, K., Jia, O.Y., Lee, E.S. 2006. Fuzzy adaptive networks in thermal comfort. *Applied Mathematics Letters*, 19(5): 420-426.
- Chen, X., Zheng, Y., Chen, Y., Jin, Q., Sun, W., Chang, E., Ma, W.Y. 2014. Indoor air quality monitoring system for smart buildings. *ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp)*.
- Choi, M., Cho, K., Hwang, J., Park, L., Jang, K., Park, S., Park, S. 2017. Design and implementation of IoT based HVAC system for future zero energy building. *IEEE the first international workshop on smart edge computing networking*.
- Choi, S., Kim, N., Cha, H., Ha, R. 2009. Micro sensor node for air pollutant monitoring: hardware and software issues. *Sensors*, 9: 7970-7987.
- Cingolani, P., Jesús A. F. 2013. jFuzzyLogic: a Java Library to Design Fuzzy Logic Controllers According to the Standard for Fuzzy Control Programming. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 6: 61-75.
- Dural, D., Ozmen, A. 2014a. Distributed online gas sensor simulator for indoor air quality monitoring. *COST Action TD1105 Sustainability-EuNetAir 6th Management Committee and Working Groups Meeting*.
- Dural, D., Ozmen, A. 2014b. Developing a parallel simulator for distributed online gas sensor systems. *International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, 1: 1187-1193.
- Ekren, O., Karadeniz, Z.H., Atmaca, I., Ugranli-Cicek, T., Sofuoglu, S.C., Toksoy, M. 2017. Assessment and improvement of indoor environmental quality in a primary school. *Science and Technology for the Built Environment*, 23(2): 391-402.
- Emmerich, S.J., Teichman, K.Y., Persily, A.K. 2017. Literature review on field study of ventilation and indoor air quality performance verification in high-performance commercial buildings in North America. *Science and Technology for the Built Environment*, 23(7): 1159-1166.
- Fanger, P.O. 1972. *Thermal comfort, analysis and applications in environmental engineering*. McGraw-Hill.
- Gouda, M., Danaher, S., Underwood, C. 2001. Thermal comfort based fuzzy logic controller. *Building Service Engineering Research and Technology*, 22(4): 237-253.
- Grace, S.A., Lal, D.M., Sharma, C. 2004. Demand controlled systems with fuzzy controllers to maintain indoor air quality - an energy saving approach. *International Journal of Ventilation*, 3(1): 79-86.
- Hamdi, M., Lachiver, G., Michaud, F. 1999. A new predicted thermal sensation index of human response. *Energy and Buildings* 29: 167-178.
- Int-Hout, D. 1990. Thermal comfort calculations / A computer model. *ASHRAE Transaction*, 96(1): 840-844.
- ISO / FDIS7730. 2005. International Standard, Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.

- Jiang, Y., Li, K., Tian, L., Piedrahita, R., Yun, X., Mansata, O., Lv, Q., Dick, R.P., Hannigan, M., Shang, L. 2011. MAQS: A personalized mobile sensing system for indoor air quality monitoring. *ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, 271-280.
- Johnson, M., Lam, N., Brant, S., Gray, C., Pennise, D. 2011. Modelling indoor air pollution from cook stove emissions in developing countries using a Monte Carlo single box model. *Atmospheric Environment*, 45(19): 3237-3243.
- Kavgic, M., Mumovic, D., Stevanovic, Z., Young, A. 2008. Analysis of thermal comfort and indoor air quality in a mechanically ventilated theatre. *Energy and Buildings*, 40: 1334-1343.
- Kelly, S.D.T., Suryadevara, N.K., Mukhopadhyay, S.C. 2013. Towards the implementation of IoT for environmental condition monitoring in homes. *IEEE Sensors Journal*, 13(10): 3846–3853.
- Kim, J., Chu, C., Shin, S. 2014. ISSAQ: An integrated sensing system for real-time indoor air quality monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 14(12): 4230-4244.
- Kolokotsa, D., Tsiavos, D., Stavrakakis, G., Kalaitzakis, K., Antonidakis, E. 2001. Advanced fuzzy logic controllers design and evaluation for buildings occupants' thermal-visual comfort and indoor air quality satisfaction. *Energy and Buildings*, 33(6): 531-543.
- Krause, A., Guestrin C., Gupta, A., Kleinberg, J. 2006. Near optimal sensor placement: Maximizing information while minimizing communication cost. *International Conference on Information Processing in Sensor Networks*.
- Mandal, T., Gorai, A.K., Pathak, G. 2012. Development of fuzzy air quality index using soft computing approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(10): 6187–6196.
- Mandayo, G.G., Herran, J., Castro-Hurtado, I., Castano, E. 2011. Performance of a CO₂ impedimetric sensor prototype for air quality monitoring. *Sensors* 11: 5047-5057.
- Martínez, F. J. R., Chicote, M.A., Peñalver, A.V., González, A.T., Gómez, E.V. 2015. Indoor air quality and thermal comfort evaluation in a Spanish modern low-energy office with thermally activated building systems. *Science and Technology for the Built Environment*, 21(8): 1091-1099.
- 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.
- Mills, D.L. 1991. Internet time synchronization: the network time protocol. *IEEE Transactions on Communications*, 39(10): 1482 - 1493.
- Mintz, D. 2012. Technical Assistance Document for Reporting of Daily Air Quality-The Air Quality Index (AQI). North Carolina, US EPA.
- Oh, T., Kim, M., Lim, J., Kang, O., Shetty, K.V., SankaraRao, B., Yoo, C., Park, J.H., Kim, J.T. 2012. A real-time monitoring and assessment method for calculation of total amounts of indoor air pollutants emitted in subway stations. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 62(5): 517-526.

- Orosa, J.A. 2009. Research on the origins of thermal comfort. *European Journal of Scientific Research*, 34(4): 561-567.
- Ott, W.R. 1999. Mathematical models for predicting indoor air quality from smoking activity. *Environmental Health Perspectives*. 107(2): 375.
- Ozmen, A., Ebeoglu, M., Mumyakmaz, B., Balta, D. 2016. Determination of volatile organic compounds in air by a surface acoustic wave array. *Instrumentation Science & Technology* (44): 54-64.
- Ozmen, A., Mumyakmaz, B., Ebeoglu, M., Tasaltin, C., Gurol, I., Ozturk, Z.Z., Dural, D. 2016. Quantitative information extraction from gas sensor data using principal component regression. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 24: 946-960.
- Parsons, K.C. 2003. Human thermal environments: the effects of hot, moderate and old environments on health, comfort and performance, 3. Edition. London, CRC Press, Taylor and Francis, 1-635.
- Peng, I.H., Chu, Y.Y., Kong, C.Y., Su, Y.S. 2013. Implementation of indoor VOC air quality monitoring system with sensor network. *International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems*, IEEE, 639-643.
- Postolache, O.A., Pereira, J.M.D., Girao, P.M.B.S. 2009. Smart sensors network for air quality monitoring applications. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 58(9): 3253–3262.
- Postolache, O., Girao, P., Pereira, M.D., Ferrara, G., Barroso, N., Postolache, G. 2009. Indoor monitoring of respiratory distress triggering factors using a wireless sensing network and a smart phone. *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*.
- Preethichandra, D.M.G. 2014. Environmental gas sensing in complex environments. *IEEE International Instrumentation and measurement technology conference*, 1480-1483.
- Preethichandra, D.M.G. 2013. Design of a smart indoor air quality monitoring wireless sensor network for assisted living. *Instrumentation and measurement technology conference, IEEE International*, 1306-1310.
- Rabadi, N. J. 1995. Developing a software to predicted thermal comfort of humans at work. *Jourdan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 5(4): 359-368.
- Rawi, M.I.M., Al-Anbuky, A. 2013. Wireless sensor networks and human comfort index. *Personal and Ubiquitous Computing*, 17(5): 999-1011.
- Reffat, R.M., Harkness, E.L. 2001. Environmental comfort criteria: weighting and integration. *Journal of Performance Of Constructed Facilities*, 104-108.
- Saad, S.M., Andrew, A.M., Shakaff, A.Y.M., Saad, A.R.M., Kamarudin, A.M.Y., Zakaria, A. 2015. Classifying sources influencing indoor air quality (IAQ) using artificial neural network (ANN). *Sensors*, 15: 11665-11684.
- Santamouris, M., Synnefa, A., Assimakopoulos, M., Livada, I., Pavlou, K., Papaglastra, M., Gaitani, N., Kolokotsa, D., Assimakopoulos, V. 2008. Experimental investigation of the airflow and indoor carbon dioxide concentration

- in classrooms with intermittent natural ventilation. *Energy and Buildings*, 40: 1833-1843.
- Satish, U., Mendell, M.J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S., Fisk, W.J. 2012. Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance. *Environmental Health Perspectives*, 120: 1671-1677.
- Serra, J., Pubill, D., Antonopoulos, A., Verikoukis, C. 2014. Smart HVAC Control in IoT: Energy Consumption Minimization with User Comfort Constraints. *The Scientific World Journal*.
- Shaban, K. B., Kadri, A., Rezk, E. 2016. Urban air pollution monitoring system with forecasting models. *IEEE Sensors Journal*, 16(8): 2598 - 2606.
- Shah, J., Mishra, B. 2016. Customized IoT enabled wireless sensing and monitoring platform for smart buildings. 3rd International Conference on Innovations in Automation and Mechatronics Engineering, *Procedia Technology* 23: 256-263.
- Spachos, P., Hatzinakos, D. 2016. Real-Time indoor carbon dioxide monitoring through cognitive wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 16(2): 506-514.
- Tasai, P., Chen, T., Tzeng, M. 1995. Tin oxide carbon monoxide sensor fabricated by thick-film methods. *Sensors and Actuators B*, (25): 537-539.
- Teixeira, A. F., Postolache, O. 2014. Wireless sensor network and web based information system for asthma trigger factors monitoring. *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, 2014 IEEE International*. Montevideo, Uruguay.
- Tennakoon, M., Mayorga, R.V., Shirif, E. 2010. A fuzzy inference system prototype for indoor air and temperature quality monitoring and hazard detection. *Journal of Environmental Informatics*, 16(2).
- WHO. 2010. WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. WHO Regional Office for Europe.
- William J.F., Satish, U., Mendell, M.J., Hotchi, T., Sullivan, D. 2013. Is CO₂ an indoor pollutant? Higher levels of CO₂ may diminish decision-making performance. *Rehva Journal*, 63.
- Xiang, Y., Piedrahita, R., Dick, R.P., Hannigan, M., Lv, Q., Shang, L. 2013. A hybrid sensor system for indoor air quality monitoring. *IEEE Int. Conf. Distrib. Comput. Sensor Syst.*, 96-104.
- Yalcin, N., Balta, D., Ozmen, A. 2015a. A simulation study about online IAQ monitoring. *COST Action TD1105 - New Sensing Technologies for Air-Pollution Control and Environmental Sustainability - Fifth Scientific Meeting*. Sofia, Bulgaria.
- Yalcin, N., Balta, D., Ozmen, A. 2015b. The Use of Mass Balance-Based Model for Indoor Air Pollutant Concentration Modeling Problem. *Third International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*. Valencia, Spain.

Yalcin, N., Balta, D., Ozmen, A. 2018. A modeling and simulation study about CO₂ amount with web-based indoor air quality monitoring. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, (26): 1390 – 1402.



EKLER

EK 1: Bulanık çıkarım süreci, If-Then Kuralları

1. Eğer (CO₂ Çok iyi) ve (PMV Soğuk) ise (Hava kalitesi Çok Kötü) (1)
2. Eğer (CO₂ Çok iyi) ve (PMV Serin) ise (Hava kalitesi Kötü) (1)
3. Eğer (CO₂ Çok iyi) ve (PMV Biraz Serin) ise (Hava kalitesi İyi) (1)
4. Eğer (CO₂ Çok iyi) ve (PMV Normal) ise (Hava kalitesi Çok İyi) (1)
5. Eğer (CO₂ Çok iyi) ve (PMV Biraz Ilık) ise (Hava kalitesi İyi) (1)
6. Eğer (CO₂ Çok iyi) ve (PMV Ilık) ise (Hava kalitesi Kötü) (1)
7. Eğer (CO₂ Çok iyi) ve (PMV Sıcak) ise (Hava kalitesi Çok Kötü) (1)
8. Eğer (CO₂ İyi) ve (PMV Soğuk) ise (Hava kalitesi Çok Kötü) (1)
9. Eğer (CO₂ İyi) ve (PMV Serin) ise (Hava kalitesi Kötü) (1)
10. Eğer (CO₂ İyi) ve (PMV Biraz Serin) ise (Hava kalitesi Normal) (1)
11. Eğer (CO₂ İyi) ve (PMV Normal) ise (Hava kalitesi İyi) (1)
12. Eğer (CO₂ İyi) ve (PMV Biraz Ilık) ise (Hava kalitesi Normal) (1)
13. Eğer (CO₂ İyi) ve (PMV Ilık) ise (Hava kalitesi Kötü) (1)
14. Eğer (CO₂ İyi) ve (PMV Sıcak) ise (Hava kalitesi Çok Kötü) (1)
15. Eğer (CO₂ Makul) ve (PMV Soğuk) ise (Hava kalitesi Çok Kötü) (1)
16. Eğer (CO₂ Makul) ve (PMV Serin) ise (Hava kalitesi Kötü) (1)
17. Eğer (CO₂ Makul) ve (PMV Biraz Serin) ise (Hava kalitesi Normal) (1)
18. Eğer (CO₂ Makul) ve (PMV Normal) ise (Hava kalitesi Normal) (1)
19. Eğer (CO₂ Makul) ve (PMV Biraz Ilık) ise (Hava kalitesi Kötü) (1)
20. Eğer (CO₂ Makul) ve (PMV Ilık) ise (Hava kalitesi Kötü) (1)
21. Eğer (CO₂ Makul) ve (PMV Sıcak) ise (Hava kalitesi Çok Kötü) (1)
22. Eğer (CO₂ Vasat) ve (PMV Soğuk) ise (Hava kalitesi Çok Kötü) (1)
23. Eğer (CO₂ Vasat) ve (PMV Serin) ise (Hava kalitesi Çok Kötü) (1)
24. Eğer (CO₂ Vasat) ve (PMV Biraz Serin) ise (Hava kalitesi Kötü) (1)

25. Eğer (CO₂ Vasat) ve (PMV Normal) ise (Hava kalitesi Kötü) (1)
26. Eğer (CO₂ Vasat) ve (PMV Biraz Ilık) ise (Hava kalitesi Kötü) (1)
27. Eğer (CO₂ Vasat) ve (PMV Ilık) ise (Hava kalitesi Çok Kötü) (1)
28. Eğer (CO₂ Vasat) ve (PMV Sıcak) ise (Hava kalitesi Çok Kötü) (1)
29. Eğer (CO₂ Kötü) ve (PMV Soğuk) ise (Hava kalitesi Çok Kötü) (1)
30. Eğer (CO₂ Kötü) ve (PMV Serin) ise (Hava kalitesi Çok Kötü) (1)
31. Eğer (CO₂ Kötü) ve (PMV Biraz Serin) ise (Hava kalitesi Kötü) (1)
32. Eğer (CO₂ Kötü) ve (PMV Normal) ise (Hava kalitesi Kötü) (1)
33. Eğer (CO₂ Kötü) ve (PMV Biraz Ilık) ise (Hava kalitesi Çok Kötü) (1)
34. Eğer (CO₂ Kötü) ve (PMV Ilık) ise (Hava kalitesi Çok Kötü) (1)
35. Eğer (CO₂ Kötü) ve (PMV Sıcak) ise (Hava kalitesi Çok Kötü) (1)
36. Eğer (CO₂ Çok Sağlıksız) ve (PMV Soğuk) ise (Hava kalitesi Çok Kötü) (1)
37. Eğer (CO₂ Çok Sağlıksız) ve (PMV Serin) ise (Hava kalitesi Çok Kötü) (1)
38. Eğer (CO₂ Çok Sağlıksız) ve (PMV Biraz Serin) ise (Hava kalitesi Çok Kötü) (1)
39. Eğer (CO₂ Çok Sağlıksız) ve (PMV Normal) ise (Hava kalitesi Kötü) (1)
40. Eğer (CO₂ Çok Sağlıksız) ve (PMV Biraz Ilık) ise (Hava kalitesi Çok Kötü) (1)
41. Eğer (CO₂ Çok Sağlıksız) ve (PMV Ilık) ise (Hava kalitesi Çok Kötü) (1)
42. Eğer (CO₂ Çok Sağlıksız) ve (PMV Sıcak) ise (Hava kalitesi Çok Kötü) (1)

EK 2: Kapalı ortam hava kalitesi anketi

Bu anket sınıflardaki ortam hava kalitesini belirlemek ve değerlendirmek için hazırlanmıştır. Ankette sınıflardaki çalışma ortamının hava kalitesi ve bunun sağlığını üzerindeki etkileriyle alakalı sorular bulunmaktadır.

Cinsiyet: Kadın ☐ Erkek ☐

Yaş:

Unvan: Öğretim Elemanı ☐ Öğrenci ☐

Bina Adı: Haşım Gürdamar Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi

Sınıf No:

Tarih:

Şu anda sınıf ortamındaki termal konforu nasıl değerlendirirsiniz? Uygun olanların tümünü seçiniz.

- ☐ Sıcaklık çok düşük
- ☐ Sıcaklık düşük
- ☐ Sıcaklık normal
- ☐ Sıcaklık yüksek
- ☐ Sıcaklık çok yüksek
- ☐ Nem yüksek
- ☐ Nem normal
- ☐ Nem düşük
- ☐ Hava akışı yeterli
- ☐ Hava akışı yetersiz (havasız ortam)

Şu anda sınıfın ortam hava kalitesini (Oksijen ve Karbondioksit durumu göz önünde bulundurulmalı) nasıl değerlendirirsiniz? Lütfen birini seçiniz.

- ☐ Çok iyi
- ☐ İyi
- ☐ Makul
- ☐ Ne iyi ne kötü (orta)

- ☐ Kötü
- ☐ Çok sağlıksız

Termal konfor ve ortam hava kalitesini birlikte değerlendirerek genel anlamda şu anda sınıfın ortam hava kalitesi konfor seviyesini nasıl değerlendirirsiniz? Lütfen birini seçiniz.

- ☐ Çok iyi
- ☐ İyi
- ☐ Orta
- ☐ Kötü
- ☐ Çok kötü

Sınıfta havalandırma mevcut mudur?

- ☐ Evet
- ☐ Hayır

Önceki dönemleri de göz önünde bulundurarak sınıflarda bulunduğunuz süre boyunca ortamdan kaynaklanabilecek aşağıdaki belirtilerden herhangi birini yaşadınız mı?

- ☐ Sık öksürük
- ☐ Burun tıkanıklığı
- ☐ Hırıltı (soğuk algınlığı hariç)
- ☐ Sinüs enfeksiyonları
- ☐ Boğaz ağrısı
- ☐ Nefes darlığı
- ☐ Boğuk ses
- ☐ Migren
- ☐ Baş ağrısı (en az 2 ayda)

Sınıfın ortam hava kalitesi performansınız üzerinde olumsuz etkiler yaratıyor mu?

- ☐ Evet
- ☐ Hayır

ÖZGEÇMİŞ

Deniz Balta, 14.05.1987’de Sakarya’da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Sakarya’da tamamladı. 2005 yılında Sakarya Anadolu Lisesi’nden mezun oldu. 2005 yılında başladığı Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nü 2010 yılında bitirdi. 2012 yılında Sakarya Üniversitesi Bilgisayar ve Bilişim Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2010 yılından beri Sakarya Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.