T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

BİLGİSAYAR LABORATUVARLARINDA İÇ HAVA KALİTESİNİN ARAŞTIRILMASI

Mahmoud S S ABUOWDA

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2026

ANTALYA

T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

BİLGİSAYAR LABORATUVARLARINDA İÇ HAVA KALİTESİNİN ARAŞTIRILMASI

Mahmoud S S ABUOWDA

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2026

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLGİSAYAR LABORATUVARLARINDA İÇ HAVA KALİTESİNİN ARAŞTIRILMASI

Mahmoud S S ABUOWDA

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2026

Evrak Tarih ve Sayısı: 20.07.2026-1001

T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLGİSAYAR LABORATUVARLARINDA İÇ HAVA KALİTESİNİN ARAŞTIRILMASI

Mahmoud S S ABUOWDA

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 19/06/2026 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Doç.Dr. Ahmet ÇOŞGUN (Danışman)

Prof.Dr. Afşin GÜNGÖR

Doç.Dr. Tansel KOYUN

Bu belge, güvenli elektronik İmza ile imzalanmıştır.
Evrak sorgulaması https://turkiye.gov.tr/ebd?eK=5543&eD=BSCVP3HT6P&eS=1001 adresinden yapılabilir. (PIN:51282)

ÖZET

BİLGİSAYAR LABORATUVARLARINDA İÇ HAVA KALİTESİNİN ARAŞTIRILMASI

MAHMOUD S S ABUOWDA

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç.Dr. Ahmet ÇOŞGUN

Haziran 2026; 84 sayfa

Bu çalışma, öğrenci sağlığını ve bilişsel performansını en iyi şekilde koruma yollarını belirlemek amacıyla, Akdeniz Üniversitesi Enformatik Bölümü bünyesindeki bilgisayar laboratuvarlarında iç ortam hava kalitesi (İOHK) dinamiklerini özellikle CO2, partikül madde (PM), sıcaklık ve bağıl nem parametrelerini ayrıntılı olarak incelemektedir. Scopus veri tabanında indekslenmiş 510 makalenin (2015–2025) PRISMA protokolüne uygun bibliyometrik analiziyle haritalandırılan küresel akademik eğilimler ekseninde ele alınan bu araştırma; insan kaynaklı biyo-emisyonların, aktif elektronik cihazlardan kaynaklanan kalıcı teknik kirlilikle karıştığı kritik bir "çift yüklü paradigma" (dual-load paradigm) modelini ortaya koyarak mevcut literatürdeki köklü bir çelişkiyi çözüme kavuşturmaktadır.

Deneysel veriler, Ekim 2025 ile Ocak 2026 tarihleri arasında, beş farklı laboratuvarda, solunum bölgesi yüksekliklerini (0,5, 1,2 ve 1,8 metre) izleyen 12 ölçüm istasyonu kullanılarak gerçek zamanlı olarak toplanmıştır. Bu doğrultuda, çoklu fraksiyon aerosollerin ($PM_{0.3}$ ila PM_{10}) ölçümü için fabrikada kalibre edilmiş bir PCE-PCO 2 partikül sayım cihazından; CO_2 ve sıcaklık takibi için ise bir JD-3002 sensöründen yararlanılmıştır. IBM SPSS 26.0 yazılımında yürütülen istatistiksel analizlerde, Kolmogorov Smirnov testi sonucunda verilerin normal dağılım göstermediği ve yüksek derecede çarpık olduğu belirlendiğinden ($p < 0.05$), çoklu grup değişimlerini tespit etmek için Kruskal-Wallis H testi ve değişkenler arası ilişkileri bağlamak için Spearman korelasyonu gibi parametrik olmayan çıkarımsal testler uygulanmıştır. Eş zamanlı olarak, FLOW-3D yazılımında zamana bağlı (transient) 3 boyutlu RANS denklemlerini, realizable k-epsilon türbülans modeli ve sürekli hacimsel PM kaynak terimleriyle birlikte çözen sayısal modellemeler yürütülmüştür.

Saha sonuçları, farklı laboratuvarlar arasında belirgin çevresel varyasyonlar olduğunu ortaya koymuştur ($p < 0.001$). Dikey analizler LAB1, LAB3 ve LAB7'de hava kütlelerinin iyi karıştığını gösterirken ($p > 0.05$); LAB5 ve LAB6'da ciddi bir dikey partikül katmanlaşması (stratifikasyon) tespit edilmiştir ($p < 0.05$). Bu durumun, elektronik cihazlardan yükselen termal bacaların (thermal plumes), kaba partiküllerin 1,8 metrelik üst düzlem civarında aşırı birikmesine (PM_{10} basıklık/kurtosis = 7.763) yol açmasından kaynaklandığı belirlenmiştir. Ayrıca, bağıl nem ile PM arasında güçlü pozitif Spearman korelasyonları saptanmış ($r > 0.50$, $p < 0.001$); bununla birlikte LAB7'de iç ortam birikiminin yüksek olduğu dönemlerde anlamlı bir pozitif CO_2 - PM_{10} korelasyonu ($r = 0.464$, $p < 0.001$) elde edilerek, kullanıcı varlığının taban tozunu aktif olarak

havalandırdığı net bir şekilde kanıtlanmıştır. Son olarak, %4'ün altında dikkate değer bir hata payı ile doğrulanmış (valide edilmiş) FLOW-3D modelimiz; bölgesel İOHK düşüşlerinin taze hava eksikliğinden ziyade hatalı hava akışı geometrisinden kaynaklandığını kesin olarak ispatlamıştır. Yüksek hızlı üfleme havası, oda çeperlerini 2,50 m/s'ye varan hızlarla etkin bir şekilde süpürürken, merkeze doğru momentumunu hızla kaybetmekte ve zararlı kirleticilerin kümelendiği merkezi durgunluk bölgeleri (0,20 ila 0,28 m/s) oluşturmaktadır. Bu bulgular, lokalize aerosol giderici menfezlerin ve çift kaynaklı ihtiyaca göre ayarlı havalandırma (DCV) sistemlerinin kurulmasına yönelik açık bir ihtiyacı ortaya koymaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: Bibliyometrik Analiz, Bilgisayar Laboratuvarları, Çift Yük Paradigması, Flow-3d, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), İç Hava Kalitesi (IHK), Partikül Madde.

JÜRİ: Doç.Dr. Ahmet ÇOŞGUN

Prof.Dr. Afşin GÜNGÖR

Doç.Dr. Tansel KOYUN

ABSTRACT

INVESTIGATION OF INDOOR AIR QUALITY IN COMPUTER LABORATORIES

MAHMOUD S S ABUOWDA
Master's Degree, Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Ahmet ÇOŞGUN

June 2026; 84 pages

To figure out how to best protect student health and cognitive performance, this study looks closely at indoor air quality (IAQ) dynamics specifically CO_2, particulate matter (PM), temperature, and relative humidity within the computer labs at Akdeniz University's Informatics Department. Positioned within a global academic trend that we mapped via a PRISMA compliant bibliometric review of 510 Scopus-indexed papers (2015–2025), this research unpacks a critical "dual-load paradigm" where human bio emissions mix with persistent technical pollution from active electronics, resolving a long-standing contradiction in current literature.

We collected real-world data from October 2025 to January 2026 across five different laboratories using 12 monitoring stations tracking breathing-zone heights at 0.5, 1.2, and 1.8 meters; for this, we used a factory-calibrated PCE-PCO 2 particle counter for multi-fraction aerosols ($PM_{0.3}$ to PM_{10}) and a JD-3002 sensor for CO_2 and temperature. Because statistical processing in IBM SPSS 26.0 revealed highly skewed, non-normal distributions ($p < 0.05$) via the Kolmogorov-Smirnov test, we relied on non-parametric inferences like Kruskal-Wallis H tests for multi-group shifts and Spearman correlations to link variables, while concurrently running numerical modeling in FLOW-3D software to solve transient 3D RANS equations coupled with a realizable k-epsilon turbulence model and continuous volumetric PM source terms.

The field results highlighted major environmental variations across the different labs ($p < 0.001$). While vertical analysis showed well mixed air masses in LAB1, LAB3, and LAB7 ($p > 0.05$), LAB5 and LAB6 suffered from severe vertical particle stratification ($p < 0.05$) because electronic thermal plumes drove an extreme accumulation of coarse particles (PM_{10} kurtosis = 7.763) right around the 1.8 meter upper plane. We also found strong positive Spearman correlations between relative humidity and PM ($r > 0.50$, $p < 0.001$), alongside clear proof in LAB7 that user presence actively kicks up floor dust, given a significant positive CO_2 to PM_{10} correlation ($r = 0.464$, $p < 0.001$) under high indoor accumulation periods. Finally, our validated FLOW-3D model which achieved an impressive error margin under 4% conclusively proved that localized IAQ drops stem from bad airflow geometry rather than a shortage of fresh air; while high-speed supply air effectively sweeps room perimeters at up to 2.50 m/s, it rapidly loses momentum and creates central stagnation zones (0.20 to 0.28 m/s) where hazardous contaminants pool, underscoring a clear need for targeted aerosol-displacing diffusers and dual-source demand-controlled ventilation setups.

KEYWORDS: Bibliometric Analysis, Computational Fluid Dynamics (CFD), Computer Laboratories, Dual-Load Paradigm, Flow-3d, Indoor Air Quality (IAQ), Particulate Matter**.**

COMMITTEE: Assoc.Prof. Dr. Ahmet ÇOŞGUN

Prof. Dr. Afşin GÜNGÖR

Assoc. Prof. Dr.Tansel KOYUN

ÖNSÖZ

Hızla kentleşen modern dünyada, insanların zamanlarının büyük bir kısmını iç mekânlarda geçirmesi, iç hava kalitesini (İHK) halk sağlığı ile doğrudan ilişkili, kritik bir unsur haline getirmiştir. Üniversite eğitimi ve araştırma faaliyetlerinin kalbi sayılan bilgisayar laboratuvarları ise insan kaynaklı biyo-emisyonlar ile elektronik cihazlardan yayılan kalıcı teknojenik kirliliğin ve yüksek ısıl yükün bir arada bulunduğu "çift yüklü paradigma" (dual-load paradigm) modelini barındırmaktadır. Bu çalışmada, Akdeniz Üniversitesi Enformatik Bölümü bünyesindeki bilgisayar laboratuvarlarında iç ortam hava kalitesi dinamiklerini hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle inceleyerek, öğrenci sağlığını ve bilişsel performansı en üst düzeyde koruyacak stratejiler geliştirmeyi amaçladım. Literatürdeki kilit bir çelişkiyi çözüme kavuşturan ve bu alandaki önemli bir boşluğu dolduracağına inandığım bu konunun seçilmesi, sağlıklı, üretken ve enerji verimli eğitim ortamlarının tasarlanması vizyonuna dayanmaktadır.

Tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren danışmanım Sayın Doç. Dr. Ahmet Çoşgun hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tez izleme komitesinde görev alacak olan değerli öğretim üyelerine ve tez sürecinin değerlendirilmesinde katkı sağlayacak jüri üyelerine de şimdiden şükranlarımı sunarım. Ayrıca, ampirik saha ölçümlerinin gerçekleştirilmesinde kapılarını bana açan binalardaki altyapıyı sağlayan ve laboratuvar imkanlarını seferber eden Akdeniz Üniversitesi Enformatik Bölüm Başkanlığına teşekkür ederim.

Bu çalışmayı Gazze'de haksızca can veren tüm aziz şehitlerimize ithaf ediyorum. Onların aziz hatırası, hayatım boyunca bilimin ve insanlığın hizmetinde daha kararlı adımlarla yürümem için en büyük manevi itici gücüm olacaktır. Bununla birlikte, bu eğitim fırsatını bana sağladığı için Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığı (YTB) içtenlikle teşekkür ederim.

Son olarak beni bu günlere sevgi ve saygı kelimelerinin anlamlarını bilecek şekilde yetiştirerek getiren ve benden hiçbir zaman desteğini esirgemeyen haklarını asla ödeyemeyeceğim annem ve babama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....i
ABSTRACT..... iiii
ÖNSÖZ.....iii
AKADEMİK BEYAN.....ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....xv
1. GİRİŞ.....1
1.1. Yükseköğretimde İç Hava Klitesinin Kritik Önemi.....1
1.2. İç Hava Kalitesinin Sağlık, Konfor ve Bilişsel Performans Üzerindeki Etkisi.....1
1.3. Bilgisayar Laboratuvarlarının Benzersiz Çevresel Zorluğu: İkili Yük Paradigması.....3
1.4. Problem Tanımı ve Araştırma Amaçları.....4
2. KAYNAK TARAMASI.....6
2.1.Temel İHK Parametreleri: Kaynaklar, Standartlar ve Sağlık Üzerindeki Etkileri…6
2.1.1. Karbondioksit (CO_2).....6
2.1.2. Partikül Madde (PM).....9
2.1.3. Isıl Çevre (Sıcaklık & Bağıl Nem).....10
2.2. Genel Eğitim Ortamlarında İHK'nın Durumu.....11
2.2.1. Karbondioksit ve Havalandırma Yetersizliği.....12
2.2.2. Partikül Madde Konsantrasyonları ve Kaynakları.....12
2.2.3. Isı Konfor Koşulları.....13
2.3. Bilgisayar Laboratuvarlarının Belirgin Kirleticiler ve Isıl Dinamikleri.....14
2.3.1. Karbondioksit (CO2) Konsantrasyonları: Kronik Hiperkapni Durumu.....14
2.3.2. Partikül Madde (PM) : Elektronik Ayak İzi.....15
2.3.3. Isıl Çevre.....15
2.4. İHK Değerlendirme Metodolojileri.....18
2.4.1. Saha Ölçüm Teknikleri ve Cihazlar.....18
2.4.2. İHK Verilerinin İstatistiksel Analizi.....19
2.4.3. İHK Araştırmalarında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Uygulaması.....19

2.5. Araştirmanin Nedenleri ve Gelecek Çalişmalar 20
2.51. Mevcut bilginin sentezi ve çözümlenmemiş sorular 20
2.5.2. Temel araştırma boşluğu 21
2.5.3. Literatürdeki çelişkiler 22
2.5.4. Gelecek çalışmalar için öneriler 22
2.6. Bibliyometrik Analiz 23
2.6.1. Yükseköğretim kurumlarında iç hava kalitesi üzerine uluslararası çalışma.. 23
3. MATERYAL VE METOT 40
3.1. Çalışma Alanı ve Fiziksel Alan 40
3.2. Yerinde Saha Ölçümleri 40
3.3. Ölçüm Cihazları ve Teknik Özellikler 40
3.3.1. Partikül Madde Ölçüm Cihazı: PCE-PCO 2 40
3.3.2. CO2 ve Sıcaklık Ölçüm Cihazı: JD-3002 41
3.4. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) Kurulumu 41
3.4.1. Sınır Koşulları ve Kaynak Terimleri 41
3.4.2. Sayısal Çözüm ve Yakınsama Kriterleri 41
3.5. İstatistiksel Yöntemler ve Veri Analizi 42
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 43
4.1. İstatistiksel Yönteme Genel Bakış 43
4.2. Normallik Testi Sonuçları 43
4.3. Laboratuvarlar Arası Değişkenlerin Karşılaştırılması 49
4.4. Yükseklikler Arası Karşılaştırma (Dikey Dağılım) 50
4.5. Ölçümlerin Ülkelere/Standartlara Göre Karşılaştırılması 55
4.6. Karşılaştırmalar ve Korelasyon Analizi 57
4.7. İç Ortam ve Dış Ortam Hava Kalitesinin Karşılaştırılması 62
4.8. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) Analizi Bulguları 61
4.8.1. LAB1 Bulguları ve Tartışması 61
6.8.2. LAB6 Bulguları ve Tartışması 68
6.8.3. LAB7 Bulguları ve Tartışması 73
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 79
5.1. Sonuçlar 79
5.2. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler 80

6. KAYNAKLAR 81
ÖZGEÇMİŞ

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum " **Bilgisayar Laboratuvarlarinda İç Hava Kalitesinin Araştirilmasi** " adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

19/06/2026

MAHMOUD S S ABUOWDA

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Sembol	Açıklama
CO_2	Karbondioksit
PM	Partikül Madde
$PM_{0.3}$	0.3 µm çapında partikül madde
$PM_{0.5}$	0.5 µm çapında partikül madde
PM_1	1 µm çapında partikül madde
$PM_{2.5}$	2.5 µm çapında partikül madde
PM_5	5 µm çapında partikül madde
PM_{10}	10 µm çapında partikül madde
°C	Sıcaklık (Santigrat derece)
%RH	Bağıl nem (Relative Humidity)
HVAC	Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme
CFD	Sayısal Akışkanlar Dinamiği
ACH	Hava Değişim Hızı (Air Change per Hour)
m	Metre
m^3	Metreküp
S	Saniye
$\mu g/m^3$	Metreküpte mikrogram cinsinden kütle yoğunluğu

Kısaltmalar

ACH	Saatteki Hava Değişim Sayısı
ACGIH	Amerikan Hükümet Endüstriyel Hijyenistleri Konferansı
ANSI	Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü
ASHRAE	Amerikan Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Derneği
BRI	Binaya Bağlı Hastalık
DCV	İhtiyaca Göre Kontrollü Havalandırma
EPA	Çevre Koruma Ajansı (ABD)
ERV	Enerji Geri Kazanımlı Havalandırma Cihazı
HEPA	Yüksek Verimli Partikül Hava Filtresi
İHK	İç Ortam Hava Kalitesi
İÇK	İç Ortam Çevresel Kalitesi
I/O	İç/Dış Ortam Oranı
IPCC	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli
ISO	Uluslararası Standartlar Örgütü
LCS	Düşük Maliyetli Sensör
MERV	Minimum Verimlilik Raporlama Değeri
MVHR	Isı Geri Kazanımlı Mekanik Havalandırma
NDIR	Dağılımsız Kızılötesi
NIOSH	Ulusal İş Sağlığı ve Güvenliği Enstitüsü (ABD)
OSHA	İş Sağlığı ve Güvenliği İdaresi (ABD)
PM	Partikül Madde
PMV	Tahmin Edilen Ortalama Oy
PPD	Tahmin Edilen Memnuniyetsiz Yüzdesi
BN	Bağıl Nem
HBS	Hasta Bina Sendromu

SPSS	Sosyal Bilimler İçin İstatistik Paketi
SVOC	Yarı Uçucu Organik Bileşik
TA	Toplam Atıf Sayısı
TY	Toplam Yayın Sayısı
TVOC	Toplam Uçucu Organik Bileşikler
UFP	Ultra İnce Parçacık
VAV	Değişken Hava Debisi
VOC	Uçucu Organik Bileşik
DSÖ	Dünya Sağlık Örgütü

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Prisma çerçevesi. 24

Şekil 2.2. Yayınların yıllık dağılımı 25

Şekil 2.3. Yayınların küresel dağılımı 26

Şekil 2.4. Ülkeler arasındaki işbirliğini gösteren bibliyometrik eşleşme bağları. 27

Şekil 2.5. Ülkeler arasındaki işbirliğini gösteren ortak yazarlık bağları..... 28

Şekil 2.6. Dergiler arasındaki işbirliğini gösteren bibliyometrik eşleşme bağları 31

Şekil 2.7. Dergiler arasındaki işbirliğini gösteren ortak atıf bağları..... 31

Şekil 2.8. Yazarlar arasındaki işbirliğini gösteren ortak yazarlık bağları..... 33

Şekil 2.9. Yazarlar arasındaki işbirliğini gösteren bibliyometrik eşleşme bağları 34

Şekil 2.10. Yazarlar arasındaki işbirliğini gösteren bibliyometrik eşleşme bağları 34

Şekil 2.11. Kurumlar arasındaki işbirliğini gösteren bibliyometrik eşleşme bağları..... 36

Şekil 2.12. Tüm anahtar kelimeler arasındaki işbirliğini gösteren birlikte görülme 37

Şekil 2.13. Yazar anahtar kelimeleri arasındaki işbirliğini gösteren birlikte görülme ... 37

Şekil 2.14. Araştırma çalışmalarının farklı konu alanlarına göre dağılımı..... 39

Şekil 4.1. Yüksekliğe Göre CO2 Seviyelerinin Sütun Grafiği 51

Şekil 4.2. Yüksekliğe Göre PM0.3 Seviyelerinin Sütun Grafiği 52

Şekil 4.3. Yüksekliğe Göre PM0.5 Seviyelerinin Sütun Grafiği 52

Şekil 4.4. Yüksekliğe Göre PM1.0 Seviyelerinin Sütun Grafiği 53

Şekil 4.5. Yüksekliğe Göre PM2.5 Seviyelerinin Sütun Grafiği 53

Şekil 4.6. Yüksekliğe Göre PM5.0 Seviyelerinin Sütun Grafiği 54

Şekil 4.7. Yüksekliğe Göre PM10 Seviyelerinin Sütun Grafiği 54

Şekil 4.8. İç Hava Kalitesi Yönergeleri ve Standartları CO2 Seviyelerinin Grafiği 56

Şekil 4.9. İç Hava Kalitesi Yönergeleri ve Standartları PM2.5 Seviyelerinin Grafiği ... 56

Şekil 4.10. İç Hava Kalitesi Yönergeleri ve Standartlar PM10 Seviyelerinin Grafiği ... 57

Şekil 4.11. Laboratuvar 1'in Zamana Bağlı Çevresel Değişken Grafiği..... 62

Şekil 4.12. ise LAB1 İstasyonları Genelinde Hız ile PM0.3 Birikimi Karşılaştırmalı Sütun Grafiği 62

Şekil 4.13. Laboratuvar 1 — PM konsantrasyon dağılımı, T=900 sn (Akış 3D simülasyonu) 65

Şekil 4.14. Laboratuvar 1 — PM konsantrasyon dağılımı, T=1800sn (Akış 3B simülasyonu) 66

Şekil 4.15. Laboratuvar 1 — PM konsantrasyon dağılımı, T=2700sn (Akış 3B simülasyonu) 67

Şekil 4.16. Laboratuvar 6'in Zamana Bağlı Çevresel Değişken Grafiği 68

Şekil 4.17. ise LAB 6 İstasyonları Genelinde Hız ile PM0.3 Birikimi Karşılaştırmalı Sütun Grafiği 69

Şekil 4.18. Laboratuvar 6 — PM konsantrasyon dağılımı, T=900sn (Akış 3B simülasyonu) 71

Şekil 4.19. Laboratuvar 6 — PM konsantrasyon dağılımı, T=1800sn (Akış 3B simülasyonu) 72

Şekil 4.20. Laboratuvar 6 — PM konsantrasyon dağılımı, T=2700sn (Akış 3B simülasyonu) 73

Şekil 4.21. Laboratuvar 7'in Zamana Bağlı Çevresel Değişken Grafiği 73

Şekil 4.22. ise LAB7 İstasyonları Genelinde Hız ile PM0.3 Birikimi Karşılaştırmalı Sütun Grafiği 74

Şekil 4.23. Laboratuvar 7 — PM konsantrasyon dağılımı, T=900sn (Akış 3B simülasyonu) 76

Şekil 4.24. Laboratuvar 7 — PM konsantrasyon dağılımı, T=1800sn (Akış 3B simülasyonu) 77

Şekil 4.25. Laboratuvar 7 — PM konsantrasyon dağılımı, T=2700sn (Akış 3B simülasyonu) 77

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Uluslararası İç Hava Kalitesi Standartları 8

Çizelge 2.2. Karşılaştırmalı İHK Profili: Genel Derslikler vs. Üniversite Bilgisayar Laboratuvarları 17

Çizelge 2.3. Eğitim kurumlarında iç hava kalitesi araştırmalarında ilk 10 ülke 27

Çizelge 2.4. Eğitim kurumlarında iç hava kalitesi araştırmalarında en ilgili 10 dergi ... 29

Çizelge 2.5. Eğitim kurumlarında iç hava kalitesi araştırmalarında ilk 10 yazar 32

Çizelge 2.6. Eğitim kurumlarında iç hava kalitesi araştırmalarında önemli kurumlar ... 35

Çizelge 4.1. LAB1 için Normallik Testi ve Tanımlayıcı İstatistik Sonuçları 43

Çizelge 4.2. LAB3 için Normallik Testi ve Tanımlayıcı İstatistik Sonuçları 44

Çizelge 4.3. LAB5 için Normallik Testi ve Tanımlayıcı İstatistik Sonuçları 45

Çizelge 4.4. LAB6 için Normallik Testi ve Tanımlayıcı İstatistik Sonuçları 47

Çizelge 4.5. LAB7 için Normallik Testi ve Tanımlayıcı İstatistik Sonuçları 48

Çizelge 4.6. Kruskal-Wallis Testi Sonuçları: Laboratuvarlar Arası Karşılaştırma 49

Çizelge 4.7. Yüksekliğe Göre Kapsamlı İstatistiksel Analiz (Test Anlamlılıkları ve Medyan Değerleri) 50

Çizelge 4.8. CO2, PM2.5 ve PM10 Ölçümlerinin İHK Kılavuzları ve Standartları ile Karşılaştırılması 55

Çizelge 4.9. Spearman Korelasyon Analizi Sonuçları (CO2, Nem ve PM Karşılaştırması) 58

Çizelge 4.10. İç Ortam - Dış Ortam Karşılaştırma Sonuçları 60

Çizelge 4.11. CFD Temel Durum Parametrelerinin Doğrulanması (LAB 1) 63

Çizelge 4.12. Kararlı Durumda Mekânsal Hız ve PM Dağılımı (LAB 1) 64

Çizelge 4.13. CFD Temel Durum Parametrelerinin Doğrulanması (LAB 6) 69

Çizelge 4.14. Kararlı Durumda Mekânsal Hız ve PM Dağılımı (LAB 6) 70

Çizelge 4.15. CFD Temel Durum Parametrelerinin Doğrulanması (LAB 7) 74

Çizelge 4.16. Kararlı Durumda Mekânsal Hız ve PM Dağılımı (LAB 7) 75

1. GİRİŞ

1.1. Yükseköğretimde İç Hava Klitesinin Kritik Önemi

İç hava kalitesinin (İHK) bir halk sağlığı belirleyicisi olarak önemi, temelde modern toplumlardaki insanların zamanlarının büyük çoğunluğunu iç mekanlarda geçirmesi gerçeğine dayanmaktadır (Alves vd., 2013, Onat vd., 2023, Sesena vd., 2022). İş günlerinde bu oran %85'i aşabilmekte ve bu durum iç mekân çevresini, hava kaynaklı kirleticilere maruz kalma açısından birincil ortam haline getirmektedir (Onat vd., 2023). Bu gerçeklik, öğrencilerin, öğretim üyelerinin ve araştırmacıların günlerinin önemli bir bölümünü derslikler, ofisler ve laboratuvarlarda geçirdiği akademik ortamlarda özellikle belirgindir (Kuş, 2007, Mata vd., 2022). Sonuç olarak, bu eğitim alanları, hava kalitesinin kullanıcıların sağlığı, konforu ve performansı üzerinde doğrudan ve önemli bir etkiye sahip olduğu kritik mikro-çevreler haline gelmektedir (Onat vd., 2023, Settimo vd., 2024).

İHK çalışmaları, yalnızca bir konfor meselesi olarak değil, aynı zamanda modern toplumsal gelişmeyle içsel olarak bağlantılı, önemli ve giderek büyüyen bir halk sağlığı belirleyicisi olarak çerçevelenmektedir (Mata vd., 2022). Kentleşmiş yaşam tarzlarına doğru ilerleyiş, iç mekanlarda geçirilen sürenin artmasıyla doğrudan ilişkili olup, bu durum da insanların yoğunlaşmış bir hava kaynaklı kirletici ortamına maruz kalmasını artırmaktadır (Mata vd., 2022). İç mekanlardaki kirletici konsantrasyonu, dış ortamı katbekat aşabilmekte olup, bu durum riski artıran kritik bir faktördür (Babayiğit vd., 2014, Mata vd., 2022). Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından yürütülen araştırmalar, iç mekân havasındaki çok sayıda kirleticinin seviyesinin dış ortam seviyelerinden 2-5 kat, hatta zaman zaman 100 kattan daha fazla olabileceğini göstermiştir (Alves vd., 2013). Bu durum, iç mekân hava kirliliğini halk sağlığına yönelik ilk beş çevresel risk arasında konumlandırmaktadır (Babayiğit vd., 2014).

Bu sorun, fizyolojik sistemleri çevresel kirleticilerin olumsuz etkilerine karşı daha duyarlı olabilen okul çağındaki çocuklar ve genç yetişkinlerin başı çektiği hassas popülasyonlar için özellikle akuttur (Babayiğit vd., 2014, Kuş, 2007). Okullar ve üniversiteler, tipik ofis binalarından dört kata kadar daha fazla olabilen yüksek kullanıcı yoğunlukları ile karakterize edilen, benzersiz ve kritik bir mikro-çevre temsil etmektedir (Babayiğit vd., 2014, Poladov, 2024). Bu yüksek yoğunluk, ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme (HVAC) sistemleri üzerinde önemli bir baskı oluşturmakta ve biyo-atıkların (bioeffluents) ve diğer kirleticilerin birikme potansiyelini artırmaktadır (Babayiğit vd., 2014). Fizyolojik duyarlılık, yüksek yoğunluklu kullanım ve potansiyel olarak yetersiz altyapının bu birlikteliği, eğitim ortamının kendisinin önemli bir çevresel sağlık riski kaynağı haline gelebildiği bileşik bir savunmasızlık senaryosu yaratmaktadır (Mustață vd., 2025).

1.2. İç Hava Kalitesinin Sağlık, Konfor ve Bilişsel Performans Üzerindeki Etkisi

Önemli ve giderek artan sayıda kanıt, kötü iç mekan hava kalitesi ile bina kullanıcıları için bir dizi olumsuz sonuç arasında doğrudan ve ölçülebilir bir bağlantı olduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuçlar önemsiz değildir; fiziksel sağlığı tehlikeye atarak, konforsuzluğa yol açarak ve öğrenme ile araştırma için gerekli olan spesifik bilişsel işlevleri sistematik olarak kötüleştirerek bir eğitim ortamının temel işlevlerini

baltalamaktadır (Mustață vd., 2025).

Halk sağlığı perspektifinden bakıldığında, standartların altındaki İHK; solunum rahatsızlıkları, alerjiler ve bozulmuş bilişsel işlev de dahil olmak üzere bir dizi sağlık sorunuyla ilişkilendirilmiştir. Bu durum, öğrencilerin akademik performansı ve öğretim üyelerinin etkinliği üzerinde zararlı bir etkiye sahip olabilmektedir (Mendell ve Heath, 2005, Sadrizadeh vd., 2022). Bu etkiler, baş ağrısı, baş dönmesi, yorgunluk, kuru öksürük ve göz, burun veya boğazda tahriş gibi sıklıkla Hasta Bina Sendromu (HBS) olarak kategorize edilen akut semptomlardan, daha ciddi, uzun vadeli durumlara kadar uzanmaktadır (Alves vd., 2013, Onat vd., 2023, Poladov, 2024).

Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), hava kirliliğini insan sağlığına yönelik en büyük çevresel tehditlerden biri olarak tanımlamış olup, bu durum konunun ciddiyetinin altını çizmektedir (Mata vd., 2022). Bu risklerin sürekli varlığı, yükseköğretim tesislerindeki hava kalitesini izleme, anlama ve yönetme zorunluluğunu vurgulamaktadır (Onat vd., 2023).

Fiziksel sağlığın ötesinde, İHK ile bilişsel performans arasındaki bağlantı, bu alandaki araştırmaları haklı kılan merkezi bir dayanaktır. Bir üniversitenin temel misyonu öğretme ve öğrenmeyi kolaylaştırmaktır; zihinsel işlevi bozan bir ortam bu misyonu doğrudan baltalamaktadır (Mustață vd., 2025). İç mekan havasının kalitesinin sağlık, konfor ve kullanıcı performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir (Mustață vd., 2025). Yüksek konsantrasyonlardaki iç mekan kirleticileri, özellikle de yüksek karbondioksit (CO_2) seviyeleri ile belirtilen biyo-atıklar (bioeffluents), öğrenmeyi doğrudan bozabilmektedir (Haddad vd., 2021). Karar verme ve problem çözme becerileri de dahil olmak üzere bilişsel işlevlerin, 1000 ppm'i aşan CO_2 konsantrasyonlarından önemli ölçüde etkilenebildiği saptanmıştır. Bu olgu, özellikle yetersiz havalandırılan dersliklerde gözlemlenmiştir (Allen vd., 2016, Cao vd., 2022).

Mevcut araştırmalar, eğitim kurumlarındaki yetersiz havalandırma seviyelerinin, öğrencilerde dikkat, uyanıklık, hafıza ve konsantrasyon seviyelerinin azalmasına neden olabildiğini göstermektedir (Sadrizadeh vd., 2022). Bu olumsuz etkilerin büyüklüğü, uzamsal çalışma belleği gibi daha karmaşık bilişsel beceriler gerektiren görevler için artmaktadır (Sadrizadeh vd., 2022). Çalışmalar, CO_2 seviyelerini düşürmenin ve İHK'yı iyileştirmenin konforu artırdığını, yorgunluk hissini azalttığını ve öğrencilerin üretkenliğini ve öğrenme performansını artırdığını göstermiştir (Haddad vd., 2021). Kötü İHK'nın performans üzerindeki olumsuz etkisi, ofis ve genel derslik ortamlarında iyi bir şekilde kanıtlanmıştır ve özellikle "Dikkat Gücü"nde (Power of Attention) bir azalma ile ilişkilendirilmiştir (Lazović vd., 2016). Bu durum açık bir nedensel yol oluşturmaktadır: yetersiz havalandırma kirletici birikimine yol açmakta, bu da öğrencilerin bilişsel kapasitesini azaltmakta ve böylece eğitim sürecinin kendisini sekteye uğratmaktadır (Haddad vd., 2021). Bu nedenle, optimal İHK'yı sürdürmek yalnızca bir konfor meselesi değil, aynı zamanda sağlıklı ve etkili bir öğrenme ortamı için temel bir gerekliliktir (Villanueva vd., 2021).

1.3. Bilgisayar Laboratuvarlarının Benzersiz Çevresel Zorluğu: İkili Yük Paradigması

İHK, tüm eğitim alanları için bir endişe kaynağı olmakla birlikte, bilgisayar laboratuvarları, onları standart dersliklerden ayıran benzersiz derecede karmaşık bir çevresel zorluk sunar (Villanueva vd., 2021). Teknoloji yoğun bu alanlar, İHK sorununun doğasını aralıklı, biyojenik kaynakların yönetiminden, yüksek ve kalıcı bir teknojenik kirlilik ve ısıl yükün kontrol edilmesine dönüştüren ikili bir çevresel yüke maruz kalmaktadır (Abhijith vd., 2022). Bu ikili yük paradigması, bu ortamlar için özel bir araştırma alanı justifying a specialized field of research) gerekçelendiren temel kavramsal modeldir.

Bu yükün ilk bileşeni, insanlar tarafından üretilen değişken biyo-atık (bioeffluent) yüküdür. Yoğun olarak kullanılan her alanda olduğu gibi, birincil iç mekân kirletici kaynağı kullanıcıların kendisidir (Torriani vd., 2023). Solunum yoluyla, karbondioksit (CO_2), nem ve diğer biyo-atıkların ana kaynağıdırlar (Mata vd., 2022, Poladov, 2024, Zhang ve Srinivasan, 2020). Bu yük değişkendir ve ders programları ile herhangi bir anda mevcut olan öğrenci sayısıyla doğrudan ilişkilidir (Argunhan ve Avci, 2018).

İkinci ve ayırt edici bileşen, yüksek konsantrasyondaki elektronik ekipmandan kaynaklanan kalıcı teknojenik yüktür. Bu yük çok yönlüdür. İlk olarak, önemli ve sabit bir ısıl yük mevcuttur (Abhijith vd., 2022, Mata vd., 2022). "İlgili odaların karakteristik bir özelliği, ek ısı kaynaklarının, yani bilgisayarların bulunmasıydı" (Mata vd., 2022). Düzinelerce bilgisayar, monitör, sunucu ve ağ donanımı tarafından üretilen ısı, bir mekânı aşırı yükleyebilir; çalışmalar, 29,6°C ila 32,7°C aralığında, optimal ısıl konfor bölgelerini aşan maksimum sıcaklıklar kaydetmiştir (Settimo vd., 2024, Torriani vd., 2023). Bu durum, BT olmayan alanlarda bulunmayan, soğutma ve havalandırma için sürekli ve önemli bir talep yaratır (Lazović vd., 2016).

İkinci olarak, karmaşık bir kimyasal kirletici yükü vardır. Elektronik ekipmanın, çok çeşitli kimyasal emisyonların bilinen bir kaynağı olduğu bilinmektedir (Lazović vd., 2016). Masaüstü bilgisayarların, yazıcıların ve fotokopi makinelerinin benzen, toluen, etilbenzen, stiren ve formaldehit gibi uçucu organik bileşiklerin (UOB) yanı sıra, plastik kasalarda ve devre kartlarında kullanılan ftalat esterleri ve organofosfat alev geciktiricileri içeren yarı uçucu organik bileşikler (YUOB) yaydığı gösterilmiştir (Mata vd., 2022, Szabados vd., 2021, Yalcin vd., 2018). Bir derleme, masaüstü bilgisayarlardan kaynaklanan emisyonların birim başına 103 µg/saat'e varan oranlarda formaldehit içerebileceğini belirtmiştir (Szabados vd., 2021).

Üçüncü olarak, partikül madde profili değişmektedir. Kullanıcılar tarafından yeniden havaya kalkan kaba partiküllere ek olarak, elektronik ekipmanlar, özellikle yazıcılar ve fotokopi makineleri, solunabilir ve ultrafin partiküller (UFP) için önemli iç mekan kaynaklarıdır (Abhijith vd., 2022, Mata vd., 2022, Yalcin vd., 2018).

Bu ikili yük paradigması, karmaşık bir mühendislik zorluğu yaratır. Bir yükü yönetmek için tasarlanan stratejiler, diğerini yönetmek için yetersiz ve hatta ters etki yaratabilir. Örneğin, yalnızca CO_2 sensörlerine dayalı bir talebe dayalı havalandırma (TDH) sistemi, değişken kullanıcı yüküne yanıt olarak taze hava beslemesini etkin bir şekilde düzenleyecektir. Ancak, düşük veya sıfır kullanım dönemlerinde ekipmandan

kaynaklanan sabit kimyasal emisyonları seyreltmek için gereken temel havalandırmayı sağlamada başarısız olacaktır. Bu temel ayrım, genel amaçlı derslikler için geliştirilen modellerin ötesine geçerek, bilgisayar laboratuvarlarının İHK değerlendirmesi ve yönetimine daha özel bir yaklaşımı zorunlu kılmaktadır.

1.4. Problem Tanımı ve Araştırma Amaçları

Önceki analiz, üniversite bilgisayar laboratuvarlarının, yüksek kullanıcı yoğunluğu ile yüksek yoğunluktaki aktif elektronik ekipmanın sinerjik etkileşiminden kaynaklanan, benzersiz ve karmaşık bir İHK profiline sahip belirgin bir iç mekan mikro-çevresi oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Literatür taraması; genel eğitim ortamları ve kontrollü ortamlardaki elektronik cihaz emisyonları üzerine araştırmalar yapılmış olsa da, bu benzersiz ikili yüke sahip ortamlardaki İHK'nın kapsamlı, yerinde (in-situ) karakterizasyonu konusunda bilimsel literatürde önemli bir boşluk olduğunu ortaya koymaktadır. Mevcut bilgi birikimi parçalıdır; kirleticileri sıklıkla tekil olarak incelemekte ve bilgisayar laboratuvarlarının teknolojik olarak sabitlenmiş doğasına uygulanamayabilecek teorik çerçevelere dayanmaktadır. Ayrıca, bilgisayarların birincil partikül ve kimyasal kirlilik kaynağı olarak rolü konusunda da kritik bir çelişki mevcut olup, bu durum alanda çözülmemiş kilit bir soruyu temsil etmektedir.

Bu nedenle sorun, üniversite bilgisayar laboratuvarlarındaki çok parametreli İHK dinamiklerine ilişkin bütünleşik ve kanıta dayalı bir anlayışın yokluğudur; bu durum, kullanıcı sağlığını korumak ve bilişsel performansı optimize etmek için etkili stratejilerin geliştirilmesini engellemektedir.

Bu tezin temel amacı, Akdeniz Üniversitesi Rektörlüğü Enformatik Bölüm Başkanlığına bağlı bilgisayar laboratuvarlarındaki İHK dinamiklerini (spesifik olarak CO_2, PM, Sıcaklık ve Bağıl Nem) tam olarak karakterize etmek, anlamak ve tahmin etmek için uzun vadeli ampirik saha ölçümlerini ileri istatistiksel ve hesaplamalı modelleme ile birleştiren sağlam, bütünleşik bir araştırma metodolojisi önerilmektedir.

İkincil amaçlar şunlardır:

- Eğitim ortamlarındaki İHK üzerine mevcut bilgi durumunu sentezlemek için, bilgisayar laboratuvarlarının belirgin özelliklerini tanımlamaya özel olarak odaklanarak, mevcut literatürün kapsamlı bir incelemesini yapılmıştır.

- Hem insani hem de teknojenik olan başlıca kirletici kaynaklarını tanımlamak ve bu kaynakların toplam iç mekan çevresel yüküne olan göreceli katkılarının miktarını belirlemek için zemin hazırlamaktır.

- Literatürdeki en iyi uygulamalardan yola çıkarak; enstrümantasyon, örnekleme stratejisi, istatistiksel analiz ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) uygulamasını kapsayan kapsamlı bir metodolojik çerçeve sentezlemektir.

- Mevcut araştırma boşluklarını ve çözülmemiş çelişkileri net bir şekilde ortaya koymak ve böylece önerilen araştırma için kesin bir gerekçe oluşturmaktır.

- Sağlıklı, üretken ve enerji verimli bilgisayar laboratuvarı ortamları yaratmak amacıyla, gelecekte kanıta dayalı tasarım ve işletme kılavuzlarının oluşturulması için bir temel geliştirmektir.

2. KAYNAK TARAMASI

Bu bölüm, eğitim ortamlarındaki iç mekân hava kalitesine ilişkin bilimsel literatürün kapsamlı bir incelemesini sunmaktadır. Bölüm, öncelikle temel İHK parametrelerini tanımlamak, ardından genel eğitim ortamlarındaki İHK koşullarına dair bir temel oluşturmak, bunu bilgisayar laboratuvarlarının benzersiz profiliyle karşılaştırmak ve son olarak İHK değerlendirmesi için yerleşik metodolojileri gözden geçirmek üzere yapılandırılmıştır.

2.1. Temel İHK Parametreleri: Kaynaklar, Standartlar ve Sağlık Üzerindeki Etkileri

Herhangi bir ampirik araştırmayı yapılandırmak için kilit hava kalitesi parametrelerinin temel özelliklerinin anlaşılması esastır. Bu bölümde, kaynak literatürde ayrıntılı olarak açıklandığı üzere, karbondioksit (CO_2), partikül madde (PM) ve ısıl çevre (sıcaklık ve bağıl nem) için kesin tanımlar, kaynaklar, sağlık etkileri ve düzenleyici standartlar sunulmaktadır.

2.1.1. Karbondioksit (CO_2)

Karbondioksit, tipik iç mekan seviyelerindeki doğrudan toksisitesinden dolayı değil, kullanıcı kaynaklı diğer biyo-atıkların (bioeffluents) birikimi ve havalandırmanın etkinliği için kritik bir vekil (proxy) olarak, birincil bir iç mekan hava kalitesi göstergesi olarak hizmet eder (Mata vd., 2022, Zhang ve Srinivasan, 2020).

Kaynaklar ve Gösterge Olarak Rolü

Kullanımda olan iç mekanlardaki baskın CO_2 kaynağı, tartışmasız bir şekilde insan metabolizmasına atfedilmektedir. EPA ve Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), CO_2'yi insan kaynaklı (antropojenik) bir hava kirletici olarak tanımlamıştır. Bu özel kirletici hem kokusuz hem de renksizdir (Zhang ve Srinivasan, 2020). İç mekan karbondioksit kirleticilerinin baskın kaynağı, kullanıcıların solunumuna atfedilir (Zhang ve Srinivasan, 2020). İç mekanlardaki CO_2'nin birincil kaynağı insan metabolik solunumudur. Kullanıcı yoğunluğu arttıkça, ortamda biriken CO_2 seviyesi de artar; havalandırma yetersizse, hızla sınır değerleri aşabilir (Dibiç, 2025).

İnsan varlığıyla olan bu doğrudan bağlantı nedeniyle, konsantrasyonu, mekandaki insan sayısına göre dış hava havalandırmasının yeterliliğinin güvenilir ve yaygın olarak kullanılan bir göstergesi olarak hizmet eder (Çoşgun, 2012, Torriani vd., 2023). CO_2 konsantrasyonu, havalandırma etkinliğini değerlendirmek için sıklıkla kullanılan önemli bir İHK parametresidir (Mustață vd., 2025). Bir ortamdaki CO_2 konsantrasyonu, o ortamın vücut kokusu açısından kabul edilebilirliğinin güvenilir bir göstergesidir. Aynı zamanda iç mekan İHK'nın sınırlı bir göstergesidir (Betuz, 2012). Varlığı, genellikle kullanıcı tarafından üretilen diğer kirleticilerin de aynı anda bulunduğuna işaret eder. Ayrıca, bu göstergenin varlığı, ek kirleticilerin potansiyelini de ifade eder (Mata vd., 2022).

Sağlık ve Bilişsel Etkiler

Genellikle havalandırma için bir belirteç olarak kullanılsa da, CO_2 aynı zamanda yüksek konsantrasyonlarda doğrudan fizyolojik etkileri olan bir kirleticidir (Mata vd., 2022). CO_2, düşük konsantrasyonlarda insanlar için genellikle toksik olmayan bir gaz olarak kabul edilir. Ancak, daha yüksek konsantrasyonlarda, doğrudan sağlık sonuçları olduğu gösterilmiştir (Mata vd., 2022). Yüksek CO_2 seviyelerinin baş ağrısı, baş dönmesi, nefes darlığı ve bozulmuş bilişsel işlev de dahil olmak üzere bir dizi fizyolojik semptoma neden olduğu kanıtlanmıştır. Bu olgu, CO_2 varlığının hem öğrencilerin hem de personelin bilişsel işlevleri üzerinde zararlı bir etkiye sahip olabileceği öğrenme ortamlarında özel bir endişe kaynağıdır (Mustață vd., 2025). ABD EPA BASE tarafından gösterildiği gibi, yüksek karbondioksit seviyelerinin, çok çeşitli HBS (Hasta Bina Sendromu) semptomlarının artan prevalansı (yaygınlığı) ile ilişkili olduğu gösterilmiştir (Zhang ve Srinivasan, 2020).

Bilişsel işlev üzerindeki etki, akademik bir bağlamda özellikle kritiktir. Birçok bilimsel çalışma, CO_2 seviyesinin sadece bir havalandırma göstergesi olmadığını, aynı zamanda kullanıcıların bilişsel performansını da doğrudan etkilediğini göstermiştir (Poladov, 2024). Atmosferdeki yüksek CO_2 seviyeleri tarafından bozulmaya en elverişli bilişsel işlevler, karar verme ve problem çözmeyi destekleyen işlevleri içerir; derslikler gibi yetersiz havalandırılan iç mekanlarda seviyeler genellikle önerilen 1000 ppm güvenlik eşiğini aşmaktadır (Allen vd., 2016, Cao vd., 2022).

Rehberler ve Standartlar

Çeşitli ulusal ve uluslararası kuruluşlar, iç mekan hava kirleticilerinin kabul edilebilir maksimum konsantrasyonları için rehberler oluşturmuştur. CO_2 için, 1000 ppm eşiği, genel ticari ve eğitim binalarında kabul edilebilir algılanan hava kalitesini sürdürme ve bilişsel performansta düşüşleri önleme sınırı olarak geniş çapta tanınmaktadır (Alves vd., 2013, Poladov, 2024, Zhang vd., 2020). Amerikan Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Derneği (ASHRAE) bu standartlar için kilit bir kaynaktır. ABD Çevre Koruma Ajansı ve ASHRAE, CO_2 konsantrasyonu için izin verilen sınırı 1000 ppm (veya 1800 mg/m³) olarak belirlemiştir (Heating vd., 2001, Santamouris vd., 2008). Sistematik bir derlemeden derlenen aşağıdaki Çizelge, çeşitli yetkili kurumlardan alınan rehberleri özetlemektedir (Zhang ve Srinivasan, 2020).

Çizelge 2.1. Uluslararası iç hava kalitesi standartları

Ölçülen Parametre	**NAAQS/ EPA (U.S. Enforceable)**	**OSHA (U.S. Enforceable)**	**WHO/Europe (Christopher et al., 2017; WHO, 2016b, , WHO 2010)**	**ACGIH**	**ANSI/ ASHRAE 62.1**	**NIOSH**	**CAAQS (SCAQMD)**
CO_2	Mevcut Değil	5000 ppm	N/A	5000 ppm (8-saat) 30,000 ppm (15 dk ortalama)	1000 ppm (iç mekân önerisi)	5000 ppm (9000 mg/m^3) 30,000 ppm (15 dk) (54,000 mg/m^3)	Mevcut Değil
$PM_{2.5}$	35 $\mu g/m^3$ (24-saat ortalama) 12 $\mu g/m^3$ (Yıllık ortalama)	5 mg/m^3	25 $\mu g/m^3$ (24-saat ortalama) 10 $\mu g/m^3$ (Yıllık ortalama)	3 mg/m^3 (8-saat)	15 $\mu g/m^3$	Mevcut Değil	12 $\mu g/m^3$ (Yıllık ortalama)
PM_{10}	155 $\mu g/m^3$ (24-saat ortalama) (3 yıl ortalamasında yılda bir defadan fazla aşılmamalıdı)	Mevcut Değil	50 $\mu g/m^3$ (24-saat ortalama) 20 $\mu g/m^3$ (Yıllık ortalama)	10 mg/m^3 (8-saat)	50 $\mu g/m^3$	Mevcut Değil	50 $\mu g/m^3$ (24-saat ortalama) 20 $\mu g/m^3$ (Yıllık ortalama)

OSHA'dan gelen 5000 ppm'lik mesleki sınır ile ASHRAE'den gelen 1000 ppm'lik konfor ve performans rehberi gibi rehberler arasındaki belirgin eşitsizlik, çevrenin birincil işlevine uygun bir referans noktası seçmenin önemini vurgulamaktadır. Bilişsel performansın her şeyden önemli olduğu bir bilgisayar laboratuvarı için, daha sıkı olan 1000 ppm'lik rehber, ilgili standarttır (Zhang ve Srinivasan, 2020).

2.1.2. Partikül madde (PM)

Partikül madde, partikül boyutuna bağlı olarak değişen önemli sağlık etkileri olan, hava kaynaklı partiküllerin karmaşık bir karışımını temsil etiğini belirlemiştir (Mata vd., 2022, Zhang ve Srinivasan, 2020).

Tanım, Sınıflandırma ve Kaynaklar

"PM, asitler, organik kimyasallar, kurum, metaller, toprak ve toz dahil olmak üzere havada somutlaşan katı ve sıvı partiküllerin bir karışımıdır" (Zhang ve Srinivasan, 2020). PM, atmosferde ve iç mekân havasında asılı duran katı ve sıvı partiküllerden oluşur. Bu partiküllerin çapı nanometrelerden onlarca mikrometreye kadar değiştiğini belirlemiştir (Poladov, 2024).

PM'nin sınıflandırılması tipik olarak aerodinamik çapına göre yapılır (Mustață vd., 2025). Partikül madde kirliliğinin kategorizasyonu tipik olarak çapına dayanmaktadır. En yaygın kategoriler arasında PM_{10} (2.5 μm ila 10 μm), $PM_{2.5}$ (2.5 μm'den az) ve PM_1 (1.0 μm'den az) bulunmaktadır (Zhang ve Srinivasan, 2020). Diğer ilgili referanslar $PM_{0.3}$, $PM_{0.5}$ ve PM_5'i içermektedir (Poladov, 2024).

İç mekân PM kaynakları çeşitlidir ve hem dış ortam kirleticilerinin sızmasını hem de iç mekân aktiviteleri ve malzemelerinden kaynaklanan üretimi içerir (Chithra ve Nagendra, 2014, Mata vd., 2022). Kirli kentsel alanlarda, trafik ve endüstriden kaynaklanan ince partiküllerin bina kabuğuna kolayca nüfuz etmesiyle dış hava önemli bir kaynaktır (Alves vd., 2013, Chithra ve Nagendra, 2014, Szabados vd., 2021).

İç mekân hava kaynaklılar da önemlidir. "Tütsü çubukları ve mumların kullanımı, ekmek kızartma, kızartma, fırınlama, açık bacalar ve eski odun sobaları $PM_{2.5-10}$ emisyonlarından sorumludur" (Mata vd., 2022). Eğitim ortamlarında, birincil iç mekân kaynağı kullanıcıların fiziksel aktivitesidir. Bu belirtilen çalışmada gözlemlenen yüksek iç mekân PM_{10} konsantrasyonları, ağırlıklı olarak sınıf ortamında öğrenci ve öğretmen hareketi, tebeşir kullanarak tahtaya yazı yazma ve silme dahil olmak üzere kullanıcıların faaliyetlerine atfedilmiştir (Chithra ve Nagendra, 2014). Özel ortamlarda, ekipman da önemli bir kaynak olabilir. "Lazer yazıcılar ultra ince partiküller, siloksanlar ve uzun zincirli alkanlar (C21-C45) yayar ve 3D yazıcılar nanopartikül kaynağıdır" (Mata vd., 2022).

Sağlık Etkileri

İç hava kalitesi partiküllerin fizyolojik etkisi, solunum sistemi içindeki birikim yerlerini ve kan dolaşımına girme potansiyellerini belirleyen aerodinamik çaplarıyla doğrudan ilişkilidir (Zhang ve Srinivasan, 2020). Sağlık etkileri, daha küçük partikül boyutları için artan ciddiyetle tanımlanmaktadır (Mustață vd., 2025, Poladov, 2024,

Zhang ve Srinivasan, 2020).

- **PM_{10}'un etkileri** nazal ve oral kaviteler (burun ve ağız boşlukları), farinks (yutak), larinks (gırtlak) ve üst trakeaya (soluk borusu) kadar uzanır (Zhang ve Srinivasan, 2020). Yüksek PM_{10} seviyelerine uzun süreli maruz kalmanın, kardiyovasküler hastalıklar ve bozulmuş akciğer fonksiyonu dahil ancak bunlarla sınırlı olmamak üzere bir dizi sağlık sorununun artan insidansı (görülme sıklığı) ile ilişkili olduğunu gösteren önemli miktarda kanıt mevcut olduğu belirlenmiştir. (Ni vd., 2024, Streinu vd., 2024).

- **$PM_{2.5}$**, bir ince, solunabilir partikül kategorisi oluşturur. Maruziyetin ardından, bu partiküller bronşiyoller ve alveollerdeki epitel hücrelerinin yüzeylerinde birikme eğilimindedir (Zhang ve Srinivasan, 2020). $PM_{2.5}$'in astım gibi solunum hastalıkları üzerinde zararlı bir etkisi olduğu kanıtlanmış bir gerçektir. Bu maddeye uzun süreli maruz kalmanın kardiyovasküler sağlık için ciddi sonuçları olduğu gösterilmiştir (Chauhan vd., 2024, Gokul vd., 2023).

- **PM_1'in**, kalp ve beyin de dahil olmak üzere iç organlara ulaşma potansiyeli ile vücuda nüfuz etme kapasitesine sahip olduğu saptanmıştır (Zhang ve Srinivasan, 2020). $PM_{2.5}$ ve PM_1'in pulmoner (akciğer) enfeksiyonlara neden olma ve vasküler (damarsal) ve endotelyal (damar iç yüzeyi) disfonksiyona yol açma potansiyeline sahip olduğu açıktır. Ayrıca, bu partiküllerin kalp atış hızı değişkenliği, pıhtılaşma ve kardiyak otonomik fonksiyonda değişikliklere neden olduğu gözlemlenmiştir (Zhang ve Srinivasan, 2020).

Dünya Sağlık Örgütü, hava kaynaklı PM'yi, bilinen güvenli bir maruziyet seviyesi olmaksızın, Grup 1 kanserojen olarak sınıflandırmaktadır (Çoşgun ve Koyun, 2025). Bu durum, tüm iç mekan ortamlarında maruziyeti en aza indirmenin kritik önemini vurgulamaktadır.

2.1.3. Isıl çevre (Sıcaklık & Bağıl Nem)

Isıl konfor parametreleri hava kalitesinden bağımsız değildir; kullanıcıların soludukları havanın kalitesini nasıl algıladıklarını önemli ölçüde etkiler ve kirletici dinamiklerini ile kullanıcı performansını etkileyebilir (Mustață vd., 2025, Zhang ve Srinivasan, 2020). Sıcaklık ve bağıl nem, sadece insan konforu için değil, aynı zamanda yapı malzemelerinin, arşiv materyallerinin ve özellikle kütüphane koleksiyonlarının korunması için de iç mekan hava kalitesinde kritik öneme sahip fiziksel parametrelerdir (Poladov, 2024).

Algılanan Hava Kalitesi ve Performans Üzerindeki Etki

Yaygın hava kirleticilerine ek olarak, iç mekan sıcaklığının ve bağıl nemin de İHK üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu kanıtlanmıştır (Zhang ve Srinivasan, 2020). Araştırmalar, ısıl çevre ile hava kalitesinin subjektif (öznel) değerlendirilmesi arasında doğrudan bir korelasyon bulmuştur. Fang vd. (1998), İHK'nın kabul edilebilirliği ile entalpi arasında açık ve doğrudan bir ilişki keşfetmiştir. Çalışmanın bulguları, sabit kirlilik seviyeleri koşullarında, hem sıcaklık hem de bağıl nemdeki artışla birlikte İHK'da

bir düşüş olduğunu göstermiştir (Zhang ve Srinivasan, 2020). Bu durum, kirletici konsantrasyonlarının tutarlı kaldığı durumlarda bile, aşırı sıcaklık veya nem ile karakterize edilen bir ortamın standartların altında hava kalitesine sahip olarak algılanabileceğini göstermektedir.

Algılamanın ötesinde, ısıl koşulların bilişsel işlev üzerinde doğrudan bir etkisi vardır. "...uygun olmayan sıcaklık ve nem, konforu ve konsantrasyonu etkiler" (Khan vd., 2021, Yin vd., 2024). Sınıf sıcaklığının performansı etkileme derecesi çok yönlü bir konudur ve araştırmalar, belirli görevler için olumsuz etkinin %30'a kadar ulaşabileceğini göstermektedir (Sadrizadeh vd., 2022). Kapsamlı bir literatür taraması, öğrenci performansı için 22°C'nin altındaki sıcaklıkların optimal (en uygun) olacağı sonucuna varmıştır (Sadrizadeh vd., 2022).

Sağlık Etkileri ve Standartlar

Nem seviyelerindeki aşırılıkların doğrudan sağlık sonuçları vardır. Yüksek nem seviyelerinin, küf ve toz akarlarının yayılmasına katkıda bulunan bir faktör olduğu kanıtlanmıştır. Bunun da, iç mekan hava kalitesi (İHK) üzerinde zararlı bir etkiye sahip olduğu ve alerji semptomlarını şiddetlendirdiği gösterilmiştir (Lee vd., 2024, Portnoy vd., 2013).

Tersine, düşük nem de sorunlara neden olabilir. Yüksek bağıl nem seviyelerine sahip dersliklerin bulunmaması, sağlık açısından avantajlıdır, zira küf büyümesi %60'ı aşan bağıl nem seviyelerinde başlar ve bu durum insan sağlığı üzerinde önemli ölçüde zararlı bir etkiye sahip olabilir. Buna karşılık, düşük nem seviyelerinin cilt, gözler ve üst solunum yolları üzerinde zararlı bir etki gösterdiği kanıtlanmıştır (Szabados vd., 2021).

Kabul edilebilir bir ısıl çevreyi sürdürmek için, yerleşik standartlar net hedefler sağlar. 'İç mekan ısıl konfor kriterleri, kışın 68.5°F (20.3°C) ile 75°F (23.9°C) arasında ve yazın 75°F (23.9°C) ile 80.5°F (26.9°C) arasında bir iç mekan operatif sıcaklığı belirten ASHRAE Standardı 55-2017 tarafından tavsiye edilmiştir' (Zhang ve Srinivasan, 2020). Benzer şekilde, 'ABD EPA tarafından önerilen iç mekan bağıl nemi, küf büyümesini azaltmak için %30 ile %60 arasındadır' (Zhang ve Srinivasan, 2020). Bu bağıl nem dengesini korumak, hem doğrudan fizyolojik tahrişi hem de ikincil biyolojik kontaminasyon riskini önlemek için kritik bir kontrol parametresidir (Sadrizadeh vd., 2022).

2.2. Genel Eğitim Ortamlarında İHK'nın Durumu

İlkokullar, ortaokullar ve üniversite dersliklerinde yürütülen çok sayıda saha çalışması, bu yüksek yoğunluklu ortamlarda yaygın olan İHK zorluklarının net ve tutarlı bir resmini sunmuştur. Bulgular, yaygın havalandırma yetersizlikleri, yüksek partikül madde konsantrasyonları ve ısıl konfor standartlarından sık sapmalar ile karakterize edilen bir temel durumu ortaya koymaktadır.

2.2.1. Karbondioksit ve havalandırma yetersizliği

Eğitim binalarında en sık rapor edilen İHK sorunu, kullanıcı yüküne (occupant load) göre kronik ve yetersiz bir havalandırma durumuna işaret eden, olağanüstü yüksek karbondioksit konsantrasyonlarının yaygınlığıdır (Mata vd., 2022, Torriani vd., 2023). Dünyanın dört bir yanından yapılan çalışmalar bu eğilimi doğrulamaktadır.

- Romanya'daki üniversite ortamlarında yapılan bir çalışmada, "CO_2 konsantrasyonları sıklıkla 1000 ppm'lik rehber değeri aşmış, ders alanlarında tepe değerler 3018 ppm ve 2715 ppm'e ulaşmıştır" (Mustață vd., 2025).

- Orta Avrupa'daki ilkokullarda yapılan bir çalışmada, "Okulların yaklaşık %80'i karbondioksit için önerilen konsantrasyon değerine (1000 ppm) uymayı başaramamış" ve ortalama konsantrasyon 1329 ppm olarak bulunmuştur (Szabados vd., 2021).

- Türkiye'deki üniversite dersliklerinde, "Ortalama karbondioksit CO_2 değeri 1415.72 ppm olarak saptanmıştır" (Argunhan ve Avci, 2018).

- Portekiz okullarında yapılan bir çalışma, "kullanım periyotları boyunca 1000 ppm'den çok daha yüksek iç mekan seviyeleri" belgeledi; bazı ölçümler 7000 ppm'e kadar ulaşarak "oldukça yetersiz havalandırmayı" göstermiştir (Alves vd., 2013).

- Bakü, Azerbaycan'da, okul dersliklerindeki ortalama CO_2 konsantrasyonu 1776.7 ppm olarak ölçülmüş, bazı derslikler 2100 ppm'in üzerinde medyan seviyelere ulaşmıştır (Poladov, 2024).

- Türkiye'de ODTÜ Mimarlık Fakültesi'ndeki bir derslikte, en yüksek CO_2 seviyeleri 1999 ppm olarak kaydedilmiştir (Betuz, 2012).

Bu bulgular toplu olarak, doğal havalandırmalı veya kötü yönetilen mekanik havalandırmalı eğitim binalarında, CO_2 konsantrasyonlarının düzenli olarak hem sağlık hem de bilişsel performans için zararlı seviyelere ulaşacağını göstermektedir (Mata vd., 2022). Neden, tutarlı bir şekilde, metabolik yükü karşılamada yetersiz kalan havalandırma sistemleriyle birleşen yüksek kullanıcı yoğunluğuna atfedilmektedir; bu sorun, ısıyı korumak için pencerelerin ve kapıların kapalı tutulduğu kış aylarında daha da şiddetlenmektedir (Argunhan ve Avci, 2018, Kuş, 2007, Poladov, 2024).

2.2.2. Partikül madde konsantrasyonları ve kaynakları

Eğitim ortamlarındaki partikül madde seviyeleri de önemli bir endişe kaynağıdır ve konsantrasyonlar sıklıkla DSÖ'nün sağlık temelli rehber değerlerini aşmaktadır (Argunhan ve Avci, 2018, Szabados vd., 2021). Kaynaklar, dış mekan sızması (infiltrasyonu) ve iç mekan üretiminin karmaşık bir karışımıdır.

- **Dış Mekan Sızması (İnfiltrasyon):** Kentsel alanlardaki çalışmalar, özellikle ince partiküller ($PM_{2.5}$) için dış ve iç mekan PM seviyeleri arasında güçlü bir bağ olduğunu tutarlı bir şekilde göstermektedir (Chithra ve Nagendra, 2014, Szabados

vd., 2021). PM_1 seviyelerinin hafta sonu ve hafta içi iç ve dış mekanlarda benzer olduğu gözlemlenmiştir, bu da emisyonların aynı kaynaktan, yani trafikten geldiğini düşündürmektedir (Chithra ve Nagendra, 2014). İspanyol okullarında yapılan bir çalışma, "Dış mekan $PM_{2.5}$'in, iç mekan partiküllerinin ana kaynağı olduğunu" bulmuştur (Abhijith vd., 2022).

- **İç Mekan Kaynakları ve Yeniden Havaya Kalkma (Resüspansiyon):** Daha kaba partiküller (PM_{10}) için iç mekan kaynakları genellikle baskındır. Birincil mekanizma, kullanıcı aktivitesiyle çökelmiş tozun yeniden havaya kalkmasıdır (Alves vd., 2013, Chithra ve Nagendra, 2014, Onat vd., 2023). Bu durum, iç/dış (İ/D) oranı hesaplanarak kanıtlanmaktadır. Birden büyük bir İ/D oranı, iç mekan kaynaklarının dış mekan kaynaklarından daha güçlü olduğunu gösterir.
    - Bir çalışma, PM_{10} için ortalama İ/D oranını 1.40 olarak bulmuş, bu da "iç mekan partikül madde miktarının dış mekan değerlerinden daha yüksek olduğunu" göstermiştir (Argunhan ve Avci, 2018).
    - Bir diğeri, PM_{10} için ortalama İ/D oranını 2.04 olarak belgeleyerek iç mekan kaynaklarının baskınlığını doğrulamıştır (Çoşgun, 2012).
    - Portekiz okullarında yapılan bir çalışma, PM_{10} için İ/D oranlarının "daima >1 olduğunu" bulmuş, kullanım dönemindeki ortalama konsantrasyonlar 362 ± 84 µg/m³ kadar yüksek çıkmıştır (Alves vd., 2013).
- **Yapı Malzemelerinin Etkisi:** İç tasarım seçimleri PM seviyeleri üzerinde ezici bir etkiye sahip olabilir. Alanında çığır açan bir çalışma, yüksek PM değerlerinin sadece aktivite türüyle değil, aynı zamanda döşeme tipi ve kullanıcı hareketiyle de güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu keşfetmiştir (Mustață vd., 2025). Halı kaplı bir amfide, kullanıcı hareketi PM_{10} konsantrasyonlarının 541.5 µg/m³'lük bir tepe noktasına ulaşmasına yol açmış, bu da 50 µg/m³'lük yasal günlük sınırı dramatik bir şekilde aşmıştır (Mata vd., 2022, Mustață vd., 2025). Bu, malzeme seçimlerinin diğer faktörleri gölgede bırakan bir iç mekân kirlilik kaynağı yaratabildiğini göstermektedir (Mustață vd., 2025).

2.2.3. Isıl konfor koşulları

Saha çalışmaları, ısıl konforu sürdürmenin birçok eğitim binasında kalıcı bir zorluk olduğunu ve koşulların sıklıkla ASHRAE tarafından belirlenen önerilen aralıkların dışına düştüğünü ortaya koymaktadır.

- **Sıcaklık:** Daha soğuk iklimlerde veya mevsimlerde, derslikler genellikle çok soğuktur. Türkiye'deki üniversite dersliklerinde yapılan bir çalışma, "Ortalama iç mekân sıcaklığı 19,68°C olarak saptanmıştır" bulgusuna ulaşmıştır; bu, standartların altında olup yetersiz ısıtma ve yalıtıma işaret etmektedir (Argunhan ve Avci, 2018). Buna karşılık, daha sıcak iklimlerde veya yetersiz havalandırılan alanlarda aşırı ısınma yaygındır. Polonya'daki lise laboratuvarlarında yapılan bir çalışmada, "Isıl konfor için optimal değerlerin tüm odalarda kaydedilen sıcaklıklar tarafından aşıldığı" bulunmuştur. Güneşli bir günde 29.6°C'lik maksimum sıcaklık belgelenmiştir (Mata vd., 2022).

- **Bağıl Nem:** Düşük bağıl nem, özellikle ısıtma mevsimi boyunca yaygın bir sorundur. Bir çalışma, "okul binalarının %80'inde ölçülen bağıl nemin önerilen aralığın altında olduğunu" bulmuştur (Szabados vd., 2021). Bir diğeri, yaz aylarında, sıcak ve kurak bir iklimin, iç mekan nem seviyelerinin sıklıkla önerilen %30'luk alt sınırın altına düşmesine neden olduğunu belirtmiştir (Kuş, 2007). Bu koşullar, kullanıcı konforsuzluğuna ve cilt tahrişi, göz tahrişi ve üst solunum yollarının tahrişi gibi olumsuz sağlık etkilerine yol açabilir (Szabados vd., 2021).

Özetle, mevcut literatür, genel eğitim ortamlarının sıklıkla yetersiz havalandırma, hem iç hem de dış kaynaklardan gelen yüksek düzeyde partikül madde ve optimal olmayan ısıl koşullardan muzdarip alanlar olduğuna dair net bir resim çizmektedir. Bu bulgular, bir bilgisayar laboratuvarının benzersiz çevresinin karşılaştırılabileceği ve zıtlık kurulabileceği kritik bir temel sağlamaktadır.

2.3. Bilgisayar Laboratuvarlarının Belirgin Kirleticiler ve Isıl Dinamikleri

Genel eğitim ortamlarındaki çalışmalar sağlam bir çerçeve sunsa da, literatürün kapsamlı bir incelemesi, üniversite bilgisayar laboratuvarlarının benzersiz bir "kirletici imzası" (pollutant signature) (Torriani vd., 2023) ile belirgin bir mikro-çevre oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Bu imza, yüksek kullanıcı yoğunluğunun yüksek yoğunluktaki aktif elektronik ekipmanla olan sinerjik etkileşimi ile tanımlanır. Bu yapılandırma, İHK profilini temelden değiştirmekte; kullanıcıların neden olduğu (örn. CO_2 birikimi) sorunların, teknolojinin operasyonel gereksinimleri tarafından şiddetlendirildiği (exacerbated) ve bunun da tamamen yeni kirletici kategorilerini beraberinde getirdiği bir ortam yaratmaktadır (Torriani vd., 2023).

2.3.1. Karbondioksit (CO_2) konsantrasyonları:

kronik hiperkapni durumu Genel dersliklere benzer şekilde, üniversite bilgisayar laboratuvarlarında en tutarlı şekilde rapor edilen İHK sorunu, olağanüstü yüksek karbondioksit konsantrasyonlarının yaygınlığıdır (Torriani vd., 2023). Bu seviyeler, kullanıcı yüküne (occupant load) göre kronik ve yetersiz bir havalandırma durumuna işaret ederek, 1.000 ppm'lik rehber değeri sık sık ve önemli ölçüde aşmaktadır (Torriani vd., 2023, Zhang ve Srinivasan, 2020).

- Doğal havalandırmalı üniversite bilgisayar laboratuvarlarında yürütülen araştırmalar, 3.000 ppm'i aşan maksimum CO_2 değerleri belgelemiştir (Torriani vd., 2023).

- Bir çalışma, bir laboratuvar ortamında 2251 ppm'lik bir zirve CO_2 seviyesi ölçmüştür (Lazović vd., 2016, Mustață vd., 2025).

- Özellikle çarpıcı bir vakada, bir Elektronik Mühendisliği programının laboratuvar ve atölyelerindeki izleme, CO_2 seviyelerinin 4.221 ppm'den 8.721 ppm'e kadar değiştiğini bulmuştur; bu, önemli bilişsel bozulma ile ilişkili aralığın çok üzerindedir (Korsavi vd., 2020, Torriani vd., 2023).

- Bir Nijerya üniversitesindeki bilgisayar tabanlı bir sınav salonunda, 602 ppm'lik temel CO_2 seviyeleri, aktif sınav dönemi boyunca ortalama 1.892 ppm'e

yükselmiş ve zirveler 2.450 ppm'e ulaşmıştır (Torriani vd., 2023).

Bunlar küçük, geçici artışlar değildir; bunlar, doğrudan kullanıcı yoğunluğu ve kalış süresiyle bağlantılı olarak, operasyonel ortamın temel bir koşulunu temsil eder (Torriani vd., 2023). Veriler toplu olarak, hiperkapnik koşulların bir anormallik değil, birçok üniversite bilgisayar laboratuvarının standart bir özelliği olduğunu ve kullanıcı sağlığı ile performansı için önemli ve kalıcı bir zorluk oluşturduğunu göstermektedir (Torriani vd., 2023).

2.3.2. Partikül madde (PM):

Elektronik ayak izi bilgisayar laboratuvarı ortamının kritik bir ayırt edici özelliği, iç mekanda üretilen Partikül Maddenin (PM) önemli varlığıdır (Torriani vd., 2023). Herhangi bir iç mekanda kullanıcı hareketi PM seviyelerine katkıda bulunurken, bilgisayar laboratuvarlarındaki yüksek yoğunluktaki elektronik ekipman, güçlü ve sürekli bir birincil iç mekan kaynağı sunar (Torriani vd., 2023, Zhang ve Srinivasan, 2020). Bilgisayarlar, yazıcılar, fotokopi makineleri ve diğer çevre birimlerinin, hem ince ($PM_{2.5}$) hem de ultra ince partiküllerin (UFP) önemli yayıcıları (emitter) olduğu belirlenmiştir (Lazović vd., 2016, Torriani vd., 2023).

- Bilgisayar tabanlı bir sınav salonunda yapılan bir çalışma, 26 µg/m³'lük bir zirve $PM_{2.5}$ konsantrasyonu belgelemiştir; bu seviye, Dünya Sağlık Örgütü'nün 24 saatlik 15 µg/m³'lük rehber değerini aşmaktadır (Torriani vd., 2023).

- Bir araştırma, bir laboratuvarın ortalama PM_{10} konsantrasyonunun 53.83 µg/m³ olduğunu bulmuştur; bu, 50 µg/m³'lük temeli hafifçe aşmaktadır ve artış, yüksek kullanıcı yoğunluğuna ve tesadüfi bir tebeşir tozu salınımına bağlanmıştır (Lazović vd., 2016, Mustață vd., 2025).

- Ancak, bilgisayarların rolü karmaşıktır. Öğrencilerin ve bilgisayarların sınıf hava kalitesi üzerindeki etkisini doğrudan araştıran çığır açıcı bir çalışma, net bir sonuca ulaşmıştır: "Küçük laboratuvarda on iki bilgisayar çalıştırıldı. Bu, hava kirliliğine katkıda bulunmadı. Bu durum, incelenen kirleticiler için geçerliydi." Bunun yerine çalışma, "insanların ana iç mekan PM kaynağı olduğunu" tanımlamıştır (Mata vd., 2022). Aynı çalışma, bilgisayar fanlarının türbülans yaratıp çökelmiş partikülleri yeniden havaya kaldırabileceğini (resuspend), pozitif yüklü ekranların ise hava kaynaklı partikülleri çekip uzaklaştırabileceğini belirtmiştir (Lazović vd., 2016, Mata vd., 2022).

2.3.3. Isıl çevre:

Ekipman Kaynaklı Isı Yükünün Baskınlığı Bilgisayar laboratuvarlarındaki ısıl çevre, standart dersliklerden temelde farklıdır çünkü elektronik ekipman tarafından üretilen yüksek yoğunluklu bir iç ısı yükünün baskınlığı altındadır (Torriani vd., 2023). Bu sürekli ısı çıkışı, odanın enerji dengesini değiştirir ve genellikle güneş kazancı veya kullanıcı metabolizmasından ziyade, iç mekan sıcaklığının birincil itici gücü olarak ekipman yükünü belirler (Torriani vd., 2023). Bu durum, ısıl konfor eşiklerinin sık ve önemli ölçüde aşılmasına yol açar.

- Saha çalışmaları, bu alanlarda sürekli olarak yüksek sıcaklıklar bildirmektedir. Üniversite bilgisayar laboratuvarlarındaki araştırmalar, iç mekan sıcaklıklarının düzenli olarak ısıl konfor seviyelerini aştığını ve 29.6°C ila 32.7°C aralığında maksimum değerlerin kaydedildiğini bulmuştur (Abhijith vd., 2022, Mata vd., 2022, Torriani vd., 2023).

- Bilgisayar tabanlı bir sınav salonu çalışmasında, 29°C'lik yüksek sıcaklıklar kaydedilmiştir (Torriani vd., 2023).

- Polonya'daki lise bilgisayar laboratuvarları üzerine yapılan bir çalışma bu sorunu açıkça tanımlamıştır: "Söz konusu odaların karakteristik bir özelliği, bilgisayarlar şeklinde birkaç ek ısı kaynağının varlığıydı" (Mata vd., 2022). "Tüm odalardaki sıcaklıklar konfor için ideal seviyelerden daha yüksek olduğu için bu durum sorunlara yol açtı. En yüksek sıcaklık olan 29.6°C, güneşli bir günde HS1 laboratuvarında kaydedildi" (Korsavi vd., 2020, Mata vd., 2022).

Bu kalıcı ısıl zorluk, birçok doğal havalandırmalı okul için merkezi olmayan, güçlü mekanik soğutma ve havalandırma ihtiyacını pekiştirmektedir (Lazović vd., 2016). Bu durum, Havalandırma-Soğutma Çatışması (Ventilation-Cooling Conflict) olarak adlandırılan kritik bir geri besleme döngüsü (feedback loop) yaratır. Bilgisayarlardan kaynaklanan yüksek ısıl yükü yönetme ihtiyacı, genellikle taze hava değişimini doğrudan azaltan davranışlara (klimayı çalıştırmak için pencereleri kapatmak) veya sistem tasarımlarına (iç havayı yeniden sirküle etmek) yol açar (Mata vd., 2022). Soğutma verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için odayı izole ederek (sealing), kullanıcılar farkında olmadan kendilerinin ürettiği CO_2 ve PM'i hapseder (Mata vd., 2022). Dolayısıyla, bilgisayarlardan kaynaklanan ısı, havalandırmayı azaltan davranışları teşvik ederek dolaylı bir kötü İHK itici gücü olarak hareket eder (Mata vd., 2022). Isıl sorunu çözmenin hava kalitesi sorununu daha da kötüleştirdiği bu geri besleme döngüsü, sağlıklı ve etkili bilgisayar laboratuvarı ortamlarının tasarlanması ve yönetilmesinde kritik bir zorluktur (Mata vd., 2022).

Aşağıdaki Çizelge, gözden geçirilen literatürden elde edilen nicel (kantitatif) verileri sentezleyerek, genel dersliklere karşı bilgisayar laboratuvarlarına özgü çevresel koşulların konsolide (birleştirilmiş) ve karşılaştırmalı bir görünümünü sunmaktadır.

Çizelge 2.2. Karşılaştırmalı İHK profili: Genel derslikler vs. üniversite bilgisayar laboratuvarları

Parametre	Genel Dersliklerde Tipik Aralık	Bilgisayar Laboratuvarlarında Tipik Aralık	Dersliklerde Birincil Kaynaklar	Bilgisayar Laboratuvarlarında Birincil Kaynaklar
CO_2 (ppm)	Ortalama: 546 – 1416 (Abhijith vd., 2022, Argunhan ve Avci, 2018, Poladov, 2024) Maks: >3000 (Alves vd., 2013)	Ortalama: 922- 1892 (Haddad vd., 2021, Torriani vd., 2023) Maks: >3000 (Torriani vd., 2023)	Kullanıcı Solunumu	Kullanıcı Solunumu (yetersiz havalandırılan bir alanda)
PM_{10} ($\mu g/m^3$)	Ortalama: 17 – 107 (Abhijith vd., 2022, Argunhan ve Avci)	Ortalama: 107 (Türk üniversitesi) (Abhijith vd., 2022, Argunhan ve Avci)	Kullanıcı aktivitesi (yeniden havaya kalkma/resüspansiyon)	Kullanıcı aktivitesi, dış hava girişi, yazıcı/fotokopi makinelerinden potansiyel emisyonlar
$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	Ortalama: 4 – 48 (Abhijith vd., 2022, Argunhan ve Avci)	Ortalama: 48 (Türk üniversitesi) (Abhijith vd., 2022, Argunhan ve Avci)	Dış hava girişi (sızma/infiltrasyon)	Dış hava girişi, yazıcı/fotokopi makinelerinden ve diğer elektronik cihazlardan emisyonlar
Sıcaklık (°C)	Ortama bağlı, kullanıcı yoğunluğundan etkilenen	Maks: 29.6- 32.7 (Abhijith vd., 2022, Torriani vd., 2023, Settimo vd., 2024)	Güneş kazancı, kullanıcı metabolizması	Güneş kazancı, kullanıcı metabolizması, elektronik cihazlardan kaynaklanan yüksek ve sürekli ısı
Bağıl Nem (%)	Ortama bağlı, kullanıcı yoğunluğundan etkilenen	Kullanım yokken genellikle düşük (%30-37), kullanım ile yükselir (Abhijith vd., 2022, Torriani vd.,2023, Settimo vd., 2024)	Kullanıcı solunumu	Kullanıcı solunumu, HVAC sistemi çalışması

2.4. İHK Değerlendirme Metodolojileri

Gözden geçirilen literatür, iç mekân hava kalitesini değerlendirmek için bir dizi yerleşik ve gelişmekte olan metodoloji kullanmaktadır. Doğrudan saha ölçümünden ileri hesaplamalı modellemeye kadar bu yaklaşımlar, bir bilgisayar laboratuvarının karmaşık iç mekân çevresini karakterize etmek için gerekli araçları sağlar.

2.4.1. Saha ölçüm teknikleri ve cihazlar

Herhangi bir İHK çalışmasının temeli, saha ölçümleri yoluyla ampirik (deneysel) veri toplanmasıdır. Literatür, ilgilenilen İHK parametrelerini ölçmek için taşınabilir, doğrudan okumalı cihazların tutarlı bir şekilde kullanıldığını göstermektedir.

- **İç hava kalitesi cihazları:**
    - **CO_2:** Dağılımlı Olmayan Kızılötesi (Non-Dispersive Infrared - NDIR) sensörler, doğru, gerçek zamanlı CO_2 izlemesi için standart teknolojidir. Atıfta bulunulan spesifik modeller arasında Testo kızılötesi (IR) sensör, Testo 435, Testo 535, TSI Q-Trak ve Extech CO250 bulunmaktadır (Argunhan ve Avci, 2018, Çoşgun, 2012, Lazović vd., 2016, Mata vd., 2022, Mustață vd., 2025).
    - **Partikül Madde:** Işık saçılımlı lazer fotometreler veya optik partikül sayaçları, çeşitli boyut fraksiyonlarında gerçek zamanlı PM ölçümü için yaygın olarak kullanılmaktadır. Atıfta bulunulan cihazlar arasında DLS tipi taşınabilir aerosol spektrometreleri (DURAG GROUP), Grimm toz monitörleri, TSI Dusttrak, Lighthouse Handheld 3016 ve Fluke 983 bulunmaktadır (Argunhan ve Avci, 2018, Chithra ve Nagendra, 2014, Çoşgun, 2012, Mustață vd., 2025, Zhang ve Srinivasan, 2020).
    - **Sıcaklık ve Bağıl Nem:** Bunlar genellikle Testo 435, TSI 7545 ve Lighthouse Handheld 3016 gibi çok parametreli İHK monitörlerinde bulunan entegre sensörlerle ölçülür (Argunhan ve Avci, 2018, Lazović vd., 2016, Szabados vd., 2021).
- **Örnekleme stratejisi:**
    - **Zamansal Çözünürlük:** Yüksek frekanslı örnekleme (örn. CO_2 için 15 saniye, PM için 6 saniye) ile sürekli izleme, dinamik değişikliklerin ayrıntılı analizine olanak tanır (Mustață vd., 2025). Ölçümler genellikle belirli aralıklarla (örn. her on dakikada bir) alınır veya belirli periyotların ortalaması alınır (Lazović vd., 2016).
    - **Mekansal Çözünürlük:** Kullanılan bölge (occupied zone) içindeki koşulları yakalamak için, cihazlar tipik olarak yerden yaklaşık 1 ila 1.5 metre yükseklikte, solunum hizasına ve pencereler veya difüzörler gibi doğrudan kaynaklardan uzağa yerleştirilir (Argunhan ve Avci, 2018, Dibiç, 2025, Lazović vd., 2016). Bazı çalışmalar, mekansal değişkenliği değerlendirmek için tek bir oda içinde birden fazla ölçüm noktası kullanır

(Argunhan ve Avci, 2018, Dibiç, 2025).

- **Operasyonel Koşullar:** Önemli bir metodolojik özellik, insan varlığının etkisini izole etmek için, kullanım olan ve olmayan periyotları karşılaştırmak gibi farklı operasyonel durumlar altında İHK'nın karşılaştırılmasıdır (Chithra ve Nagendra, 2014, ISSA, 2021).

2.4.2. İHK verilerinin istatistiksel analizi

Toplanan veriler, eğilimleri belirlemek, hipotezleri test etmek ve değişkenler arasındaki ilişkileri nicelemek amacıyla standart istatistiksel yazılım paketleri kullanılarak işlenir.

- **Yazılım:** İstatistiksel değerlendirme için en sık atıf yapılan yazılım IBM SPSS programıdır (Argunhan ve Avci, 2018, Dibiç, 2025, Parmaksız, 2025).
- **Tanımlayıcı İstatistikler:** Ortalama, medyan, standart sapma ve minimum/maksimum değerler dahil olmak üzere tüm parametreler için standart tanımlayıcı istatistikler hesaplanır (Argunhan ve Avci, 2018, Parmaksız, 2025, Szabados vd., 2021).
- **Çıkarımsal İstatistikler:**
  - Korelasyon analizi, iç ve dış mekan konsantrasyonları ile diğer ilişkili zaman serisi verileri arasındaki ilişkileri (association) değerlendirmek için sıklıkla kullanılır (Zhang ve Srinivasan, 2020). İlişkileri incelemek için Pearson korelasyonu gibi parametrik testler ve Spearman korelasyonu gibi parametrik olmayan testler kullanılır (Sesena vd., 2022, Szabados vd., 2021, Zhang ve Srinivasan, 2020).
  - Grupları karşılaştırmak için (örn. farklı odalar, kullanım olan vs. olmayan), normal dağılıma sahip veriler için t-testleri ve ANOVA gibi parametrik testler kullanılırken, normal olmayan veriler için Mann-Whitney U testi ve Kruskal-Wallis testi gibi parametrik olmayan testler kullanılır (Dibiç, 2025, Parmaksız, 2025, Szabados vd., 2021, Zhang ve Srinivasan, 2020). İHK verileri sıklıkla normal bir dağılım göstermediğinden, parametrik olmayan testlerin kullanımı yaygındır (Dibiç, 2025, Szabados vd., 2021).
  - Temel Bileşen Analizi (Principal Component Analysis - PCA) gibi gelişmiş çok değişkenli teknikler, bazen İHK verilerindeki varyansı (değişimi) yönlendiren baskın temel faktörleri belirlemek için kullanılır (Zhang ve Srinivasan, 2020).

2.4.3. İHK araştırmalarında hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) uygulaması

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) (Computational Fluid Dynamics - CFD), akışkan akışını, ısı transferini ve kirletici taşınımını analiz etmek ve görselleştirmek için kullanılan gelişmiş bir sayısal simülasyon tekniğidir (Çoşgun ve Koyun, 2025, Yetiş, 2023).

- **Amaç:** Esasen, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), akışkanlar ve akışkanlar mekaniği hakkındaki önemli miktarda dijital verinin bilgisayar ortamında analiz edilmesini içerir (Çoşgun ve Koyun, 2025). Fiziksel ölçüm araçlarının neden olduğu kesinti olmaksızın hava akış modellerinin, sıcaklık dağılımlarının ve kirletici konsantrasyonlarının ayrıntılı olarak incelenmesine olanak tanır (Çoşgun ve Koyun, 2025).

- **Yazılım:** ANSYS, ABAQUS ve Flow-3D dahil olmak üzere çeşitli ticari yazılım paketleri kullanılmaktadır (Çoşgun ve Koyun, 2025, Dibiç, 2025, ISSA, 2021).

- **Modelleme Yaklaşımı:** Süreç, mekânın 3 boyutlu bir geometrik modelinin oluşturulmasını, fiziksel sınır koşullarının (örn. hava besleme hızı, ısı kaynakları) tanımlanmasını ve akışkan hareketinin temel denklemlerinin çözülmesini içerir (Çoşgun ve Koyun, 2025, Yetiş, 2023). "Gerçekleştirilebilir k-ε modeli" (realizable k-ε model), bu tür uygulamalar için yaygın olarak kullanılan bir türbülans modelidir (Yetiş, 2023).

- **İleri Düzey Metrikler:** HAD, odanın herhangi bir noktasındaki havanın "tazeliğini" ölçen "Havanın Yaşı" (Age of Air) gibi sofistike havalandırma performansı metriklerini hesaplamak için kullanılabilir (Yetiş, 2023).

- **Doğrulama (Validasyon):** Kritik bir adım, simülasyon sonuçlarını saha ölçümlerinden toplanan ampirik verilerle karşılaştırarak HAD modelinin doğrulanmasıdır. Simüle edilen ve ölçülen veriler arasındaki güçlü bir uyum, modelin doğruluğunu ve öngörü gücünü teyit eder (Çoşgun ve Koyun, 2025, Dibiç, 2025).

2.5. Araştirmanin Nedenleri ve Gelecek Çalişmalar

2.5.1. Mevcut bilginin sentezi ve çözümlenmemiş sorular

Literatür taraması, eğitim ortamlarında iç mekân hava kalitesinin önemli ve sıklıkla ihmal edilen bir sorun olduğunu gösteren sağlam ve tutarlı bir kanıt bütünü oluşturmaktadır. Genel amaçlı dersliklerde, özellikle doğal havalandırmaya dayananlarda, karbondioksit konsantrasyonları, kullanıcı konforu ve optimal bilişsel performans ile ilişkilendirilen 1000 ppm eşiğini sıklıkla aşmakta ve bu durum sistemik havalandırma yetersizliklerine işaret etmektedir (Alves vd., 2013, Argunhan ve Avci, 2018, Mustață vd., 2025, Szabados vd., 2021).

Partikül madde seviyeleri de bir endişe kaynağı olup; kullanıcı kaynaklı kaba partiküllerin yeniden havaya kalkması (resüspansiyon) ve kirli kentsel havadan gelen ince partiküllerin sızmasının (infiltrasyon) bir kombinasyonundan kaynaklanmaktadır (Alves vd., 2013, Chithra ve Nagendra, 2014, Mustață vd., 2025).

Ancak, yapılan inceleme, bilgisayar laboratuvarlarının daha karmaşık ve ciddi bir İHK zorluğu sunduğunu da açıkça ortaya koymaktadır. Bu alanlar, kullanıcılardan kaynaklanan değişken biyo-atık (bioeffluent) yükünün, elektronik ekipmanlardan kaynaklanan kalıcı teknojenik ısı ve emisyon yükü ile birleştiği bir ikili yük paradigması ile tanımlanmaktadır (Abhijith vd., 2022, Torriani vd., 2023). Bu durum, daha aşırı ısıl

koşullar ve benzersiz bir kimyasal imza ile karakterize edilen belirgin bir çevresel profil ile sonuçlanmaktadır (Mata vd., 2022, Torriani vd., 2023). Elektronik cihazlardan kaynaklanan yüksek ısıl yükü yönetme eyleminin kendisi, sıklıkla taze hava değişiminde bir azalmaya yol açarak, CO_2 gibi iç mekânda üretilen kirleticilerin birikimini şiddetlendiren bir "Havalandırma-Soğutma Çatışması" yaratmaktadır (Mata vd., 2022).

Sorun iyi tanımlanmış olsa da literatür parçalı kalmaya devam etmektedir. Çalışmalar ya genel dersliklere odaklanarak elektronik ekipmanların kritik rolünü göz ardı etme, ya da gerçek dünya ortamındaki kullanıcı yükleri ve bina sistemleri ile olan karmaşık etkileşimleri yakalamakta yetersiz kalan kontrollü oda çalışmalarındaki elektronik emisyonlarına odaklanma eğilimindedir. Bu parçalı yapı, birkaç kilit soruyu yanıtsız bırakmaktadır.

2.5.2. Temel araştırma boşluğu: Bilgisayar laboratuvarları için bütünleşik bir İHK modeli ihtiyacı

Ortaya çıkan temel araştırma boşluğu, gerçek dünyadaki bir üniversite bilgisayar laboratuvarında değişken kullanıcı yükü (variable occupant load) ile sabit ekipman yükü (constant equipment load) arasındaki etkileşimi araştıran kapsamlı, çok parametreli, yerinde (in-situ) bir çalışmanın eksikliğidir. Mevcut bilgi birikimi, bu benzersiz ikili yük ortamındaki İHK dinamiklerini doğru bir şekilde karakterize edebilecek ve tahmin edebilecek bütüncül, entegre bir modelden yoksundur.

Bu boşluğun gerekçesi açıktır. İncelenen çalışmaların çoğunda İHK için temel model biyo-atık odaklıdır (bioeffluent-centric) ve insan kullanımına göre havalandırma yeterliliği için birincil vekil (proxy) olarak CO_2'yi kullanır (Korsavi vd., 2020). Bu model bilgisayar laboratuvarları için yetersizdir. Daha uygun bir kavramsal çerçeve, iki farklı emisyon türünü hesaba katması gereken bir ikili kaynak modeli (dual-source model) olacaktır:

1. Aralıklı, kullanıcı kaynaklı biyo-atıklar (ki bunlar CO_2 tabanlı talebe dayalı havalandırma yoluyla yönetilebilir) ve

2. Kullanımdan bağımsız olan sürekli, ekipman kaynaklı kimyasal ve ısıl emisyonlar (ki bunlar sabit bir baz havalandırma oranı ve potansiyel olarak özel filtreleme gerektirir) (Mata vd., 2022).

Yeni, entegre bir modele duyulan ihtiyaç, genel dersliklerden elde edilen bulguların uygulanmasının sınırlamalarıyla vurgulanmaktadır. Çocuk kullanıcıları ve biyolojik/malzeme kaynakları olan doğal havalandırmalı bir okulun bağlamı; yetişkin kullanıcıları ve baskın teknojenik ısı ve kimyasal kaynakları olan mekanik havalandırmalı bir bilgisayar laboratuvarından temelden farklıdır (Szabados vd., 2021). Kirletici profili, ısıl konforun itici güçleri ve havalandırma dinamikleri tamamen farklıdır. Bu nedenle, risklere dair doğru bir anlayış geliştirmek ve etkili, ortama özgü azaltma stratejileri (mitigation strategies) tasarlamak için özel bir araştırma (dedicated investigation) yalnızca haklı bir gerekçeye dayanmakla kalmayıp, aynı zamanda esastır.

2.5.3. Literatürdeki çelişkiler: Bir kirletici kaynağı olarak elektronik ekipmanların rolü

Literatürün eleştirel bir analizi, bilgisayarların iç mekan hava kirliliği kaynağı olarak rolü konusunda temel ve çözülmemiş bir çelişkiyi ortaya koymaktadır. Bu, küçük bir tutarsızlık değil, teknoloji yoğun alanlarda İHK (İç Mekan Hava Kalitesi) yönetim stratejileri için derin etkileri olan, kaynak atfı (source attribution) konusundaki temel bir anlaşmazlıktır (Mata vd., 2022).

Bir yandan, bir grup araştırma elektronik ofis ekipmanlarını önemli bir kirletici kaynağı olarak tanımlamaktadır. Bir çalışma, kişisel bilgisayarların (PC'ler), standart bir insanınkinden üç kattan fazla duyusal kirlilik yükü ile güçlü iç mekan kirlilik kaynakları olduğu sonucuna varmıştır (Abhijith vd., 2022, Lazović vd., 2016, Mata vd., 2022). Bu PC'lerden tespit edilen emisyonlar, fenol, toluen, 2-etilheksanol, formaldehit ve stiren gibi bir dizi uçucu organik bileşiği (UOB) içermekteydi (Lazović vd., 2016, Mata vd., 2022). Ofis ekipmanlarına yönelik daha geniş araştırmalar; toner, ısınmış plastikler ve devre kartları gibi bileşenlerden kaynaklanan UOB'ler, yarı uçucu organik bileşikler (YUOB'ler), ozon ve ultra ince partikül emisyonları bulmuştur (Mata vd., 2022, Szabados vd., 2021, Yalcin vd., 2018). Bu bakış açısı, ekipmanın kendisinin kaynak kontrolü veya özel havalandırma yoluyla yönetilmesi gereken aktif bir yayıcı olduğunu öne sürmektedir.

Öte yandan, farklı bir ampirik çalışma tam tersi bir sonuca varmış ve 'Küçük laboratuvarda on iki bilgisayarın çalıştırılmasının, en azından incelenen kirleticiler için hava kirliliğine katkıda bulunmadığını' belirtmiştir (Lazović vd., 2016, Mata vd., 2022). Bu bulgu, bir bilgisayar laboratuvarındaki birincil kirletici kaynağının (o çalışmada özellikle PM ve TVOC'ler) insan kullanıcılar olarak kaldığını ve İHK yönetiminin, standart bir sınıfa benzer şekilde, kullanıma bağlı havalandırma stratejilerine odaklanması gerektiğini işaret etmektedir (Mata vd., 2022).

Bu çelişki literatürde bir kusur değil, önemli ve çözülmemiş bir bilimsel sorudur. Bu durum; incelenen ekipmanın yaşı ve türündeki farklılıklar, test sırasında bilgisayarlar üzerindeki operasyonel yük, ölçülen spesifik kirleticiler veya kullanılan cihazların analitik hassasiyeti gibi çeşitli faktörlere atfedilebilir. Bu, elektronik ekipmanın kaynak gücünün sabit bir varsayım olarak ele alınamayacağı; incelenen ortamın spesifik bağlamına bağlı kilit bir değişken olarak kabul edilmesi gerektiği anlamına gelir. Bu nedenle, farklı operasyonel senaryolar (örn. ekipman açık/kapalı, boşta çalışma/yüksek yük) altında kapsamlı bir kirletici ölçüm setini (PM dahil) içeren yeni bir çalışma, bu temel tartışmanın çözülmesine yardımcı olacak kritik verileri sağlamak üzere konumlanmıştır.

2.5.4. Gelecek çalışmalar için öneriler

- **Daha Fazla Yerinde (In-Situ), Uzun Vadeli Veriye Duyulan İhtiyaç:** Tekrarlanan bir çağrı, daha büyük örneklem boyutları ve daha uzun sürelerle yapılan daha doğrudan, gerçek dünya ölçümlerine yöneliktir. Araştırmacılar tarafından daha fazla parametreye ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir. Kirletici özelliklerini daha derinlemesine anlamak için, yerinde ölçümlerden spesifik veriler elde etmek esastır (Sadrizadeh vd., 2022). Kısa vadeli kampanyalara olan

tarihsel bağımlılık bilinen bir yanlılıktır ve "İHK araştırma topluluğunda uzun vadeli veri izleme eksikliği vardır" (Onat vd., 2023). Önerilen 4 aylık sürekli izleme kampanyası, bu kritik ihtiyaca doğrudan yanıt vermektedir.

- **Mekanik Havalandırmanın Araştırılması:** Doğal havalandırmalı binalarda yürütülen çalışmalar, sıklıkla mekanik sistemlerin araştırılmasını önererek sonuçlanmaktadır. Bir çalışma, tamamlayıcı havalandırma sistemlerinin kurulumunun tavsiye edilebilir olduğunu belirtirken (Abhijith vd., 2022); bir diğeri, mekanik havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinin getirdiği karmaşıklıkların İHK hakkındaki anlayışımızı sınırlayabileceğini ve gelecek araştırmalar için bir sınır teşkil ettiğini not etmektedir (Korsavi vd., 2020). Önerilen çalışmanın mekanik havalandırmalı bir bilgisayar laboratuvarına odaklanması, bu çağrıya doğrudan yanıt vermektedir.

- **İleri Modelleme Tekniklerinin Uygulanması:** Birçok yazar, tanımlayıcı istatistiklerin ötesine geçerek daha ileri modellemeye yönelmeyi önermektedir. Çalışmalarda makine öğrenmesi ve yapay sinir ağları gibi yöntemlerin kullanılmasına yönelik bir çağrı vardır (Poladov, 2024). Hava akışını ve kirletici taşınımını modellemek için HAD (CFD) kullanılmasına yönelik açık öneri de mevcuttur (Çoşgun ve Koyun, 2025, Dibiç, 2025). HAD modellemesini entegre eden önerilen metodoloji, bu ileriye dönük önerilerle mükemmel bir uyum içindedir.

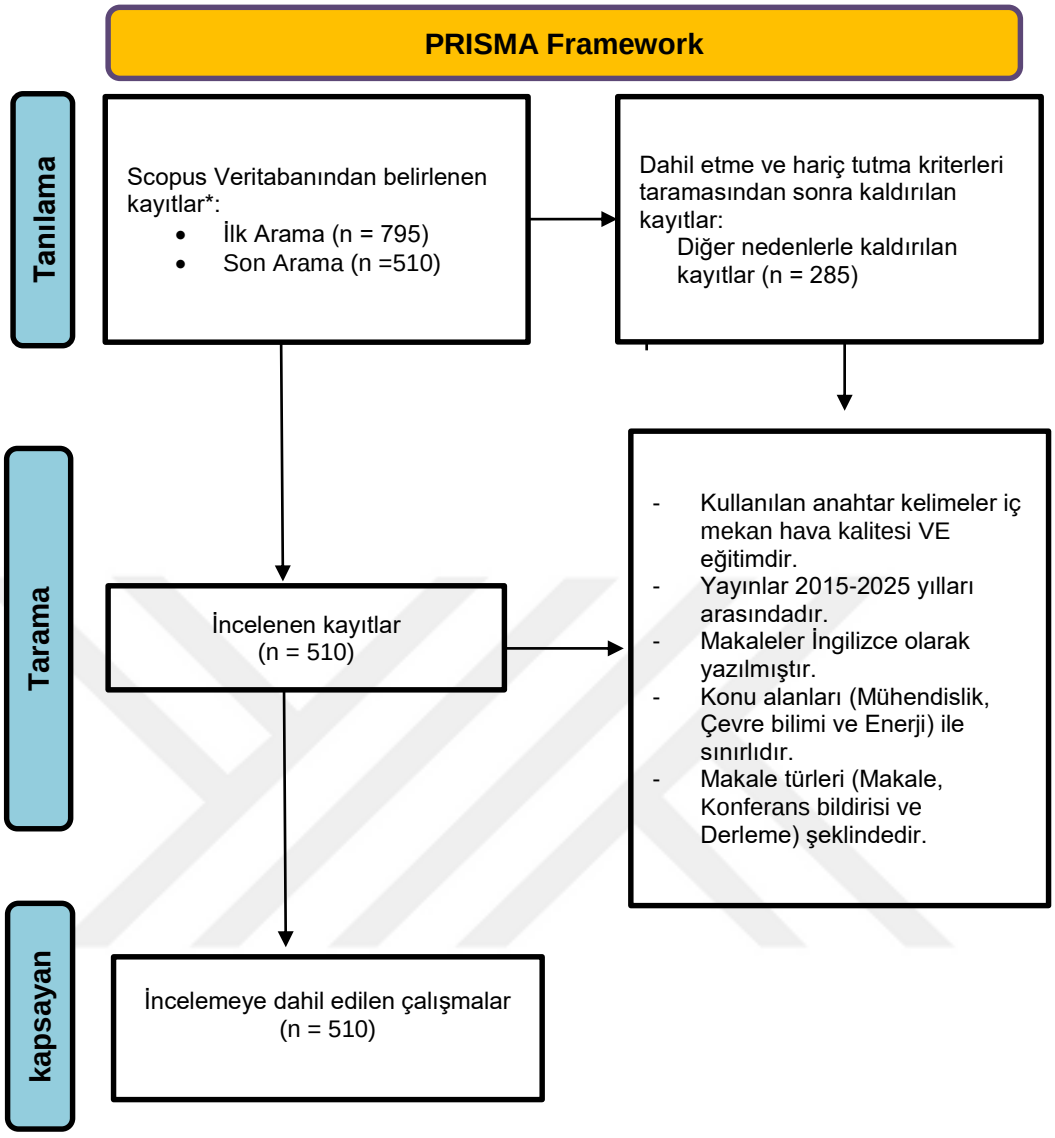
2.6. Bibliyometrik Analiz

2.6.1. Yükseköğretim kurumlarında iç hava kalitesi üzerine uluslararası çalışmaların bibliyometrik analizi

Bu bölüm, araştırma alanının yapısal özelliklerini ortaya koymak amacıyla, Scopus veritabanından elde edilen veri setinin Çizelgeler ve şekiller aracılığıyla görselleştirilmiş detaylı bir değerlendirmesini sunmaktadır.

2.6.1.1. Yöntemsel çerçeve ve veri seçimi

Bu araştırmaya dahil edilen çalışmaların seçim süreci, şeffaf ve tekrarlanabilir bir sistematik derleme sağlayan **PRISMA (Sistematik Derlemeler ve Meta-Analizler için Tercih Edilen Raporlama Öğeleri)** çerçevesi temel alınarak yürütülmüştür. Şekil 2.1 (Prisma framework), bilginin sistematik derlemenin farklı aşamalarındaki akışını göstermektedir.



Şekil 2.1. Prisma çerçevesi

- **Tanımlama (Identification) Aşaması:** Scopus veritabanında "İç Hava Kalitesi" VE "Eğitim" ("Indoor Air Quality" AND "Educational") anahtar kelimeleri kullanılarak yapılan ilk tarama sonucunda 795 dokümana ulaşılmıştır.
- **Tarama (Screening) Aşaması:** Sonuçları 2015-2025 dönemi, İngilizce dili ve belirli konu alanları (Mühendislik, Çevre Bilimleri ve Enerji) ile sınırlandırmak için filtreler uygulanmıştır. Doküman türleri Makale, Konferans Bildirisi ve Derleme ile sınırlandırılmıştır.
- **Dahil Etme (Included) Aşaması:** Belirli dahil etme/hariç tutma kriterlerini (örneğin, ilgisiz konu veya doküman türü) karşılamayan 285 kaydın çıkarılmasının ardından, bibliyometrik analiz için 510 dokümandan oluşan nihai bir set seçilmiştir.

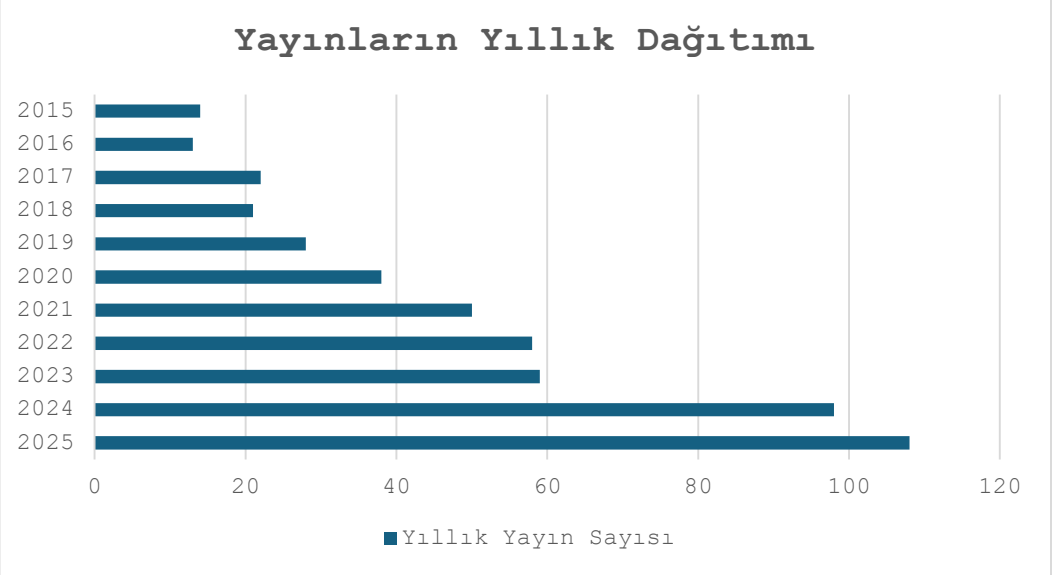
2.6.1.2. Bulguların Analizi

Yayınların yıllara göre dağılımı analizi

Bilimsel üretkenliğin zamansal analizi, konuya duyulan akademik ilginin artışı ve konunun değişen aciliyeti hakkında kritik bilgiler sunmaktadır.

Şekil 2.2, 2015'ten 2025'e kadar eğitim kurumlarında iç hava kalitesi ile ilgili yayınların yıllık dağılımını göstermektedir. Son on yılda belirgin bir artış eğilimi gözlemlenmekte olup, bu durum araştırma çıktılarında istikrarlı bir artışa işaret etmektedir.

- 2015 ile 2019 arasındaki dönem, yayın sayısının 2015'te yaklaşık 14'ten 2019'da 28'e çıkmasıyla kademeli ancak tutarlı bir artış göstermektedir.
- 2020'den itibaren, muhtemelen küresel sağlık endişeleri nedeniyle iç ortam kalitesine yönelik farkındalığın artmasıyla tetiklenen dikkate değer bir ivmelenme gözlenmektedir. Yayın sayısı 2020'de yaklaşık 38'e yükselmiş ve artmaya devam ederek 2021'de yaklaşık 50'ye ulaşmıştır.
- En belirgin artış yakın dönemde gerçekleşmiş olup, 2024 ve 2025 yılları en yüksek araştırma faaliyeti hacmini kaydetmiştir. 2024 yılında yayın sayısı 100'e yaklaşırken, 2025 yılında 100'den fazla dokümanla zirveye ulaşmıştır. Bu çarpıcı artış, alanın şu anda yoğun bir bilimsel sorgulama dönemi geçirdiğini ve bina ve çevre araştırmalarında öncelikli bir alan olarak kendini kabul ettirdiğini göstermektedir.



Şekil 2.2. Yayınların yıllık dağılımı

Küresel dağılım ve ülke performansı

Araştırma üretiminin coğrafi dağılımı, konuya yönelik bölgesel ilginin ve yatırımın temel bir göstergesidir.

Şekil 2.3 (Dünya Haritası), eğitim kurumlarında iç hava kalitesi konusundaki yayınların küresel dağılımını görselleştirmektedir. Haritadaki renk yoğunluğu, araştırmaların ağırlıklı olarak Kuzey Yarımküre'de yoğunlaştığını, Kuzey Amerika, Batı Avrupa ve Doğu Asya'da önemli odak noktaları bulunduğunu vurgulamaktadır.



Şekil 2.3. Yayınların küresel dağılımı

Çizelge 2.3, eğitim kurumlarında iç hava kalitesi araştırma alanındaki en üretken 10 ülkeyi detaylandırmaktadır.

- **İspanya**, New South Wales Üniversitesi (veri setinde işbirlikçi veya bağlı kuruluş olarak not edilmiştir) gibi kurumlardan gelen önemli katkılarla 65 yayınla sıralamada liderdir.
- **Amerika Birleşik Devletleri**, Underwriters Laboratories Inc.'in kilit bir katkı sağlayıcı olarak göründüğü 58 yayınla yakından takip etmektedir.
- **İtalya**, Brescia Üniversitesi'nin önemli bir kurum olduğu 47 yayınla üçüncü sırada yer almaktadır.

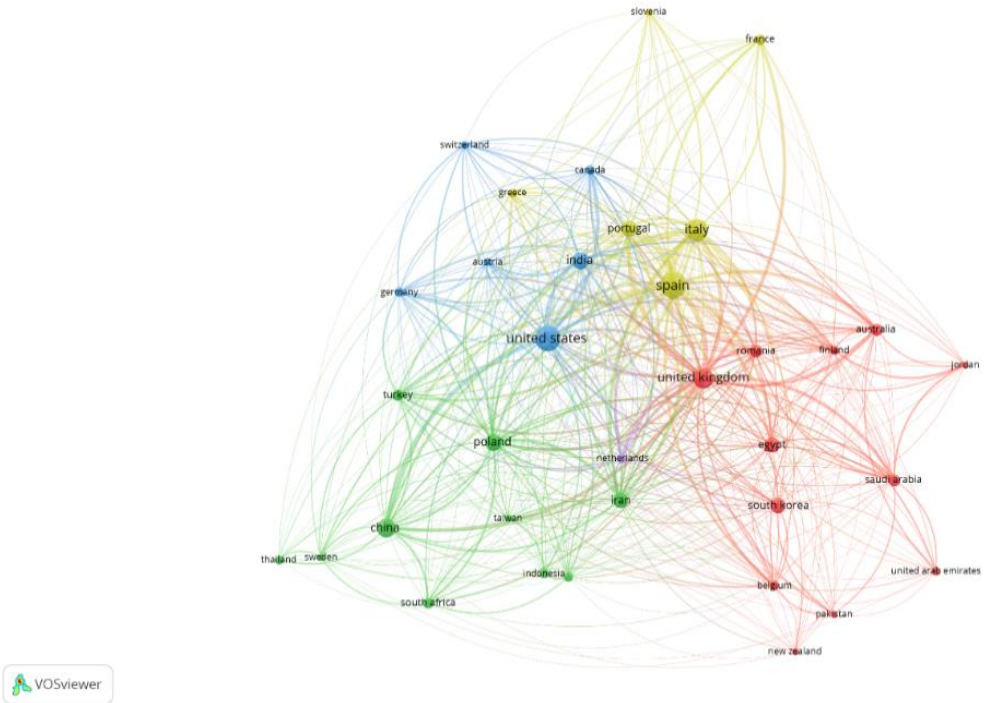
Diğer önemli katkı sağlayanlar arasında Birleşik Krallık (37), Çin (31) ve Hindistan (27) bulunmaktadır. Bu Çizelge, ilk 10 sıranın yarısını işgal eden Avrupa ülkelerinin bu özel araştırma nişindeki hakimiyetini vurgulamaktadır.

Çizelge 2.3. Eğitim kurumlarında iç hava kalitesi araştırmalarında ilk 10 ülke.

Sıra	Ülke	TY	En Belirgin Akademik Kurumlar
1	Spain	65	University of New South Wales
2	United States	58	Underwriters Laboratories Inc
3	Italy	47	University of Brescia
4	United Kingdom	37	University of Birmingham
5	China	31	Beijing Institute of Technology
6	India	27	Dr. B.R. Ambedkar University
7	Poland	26	Silesian University of Technology
8	Portugal	22	University of Porto
9	South Korea	22	Sungkyunkwan University
10	Egypt	21	National Research Centre

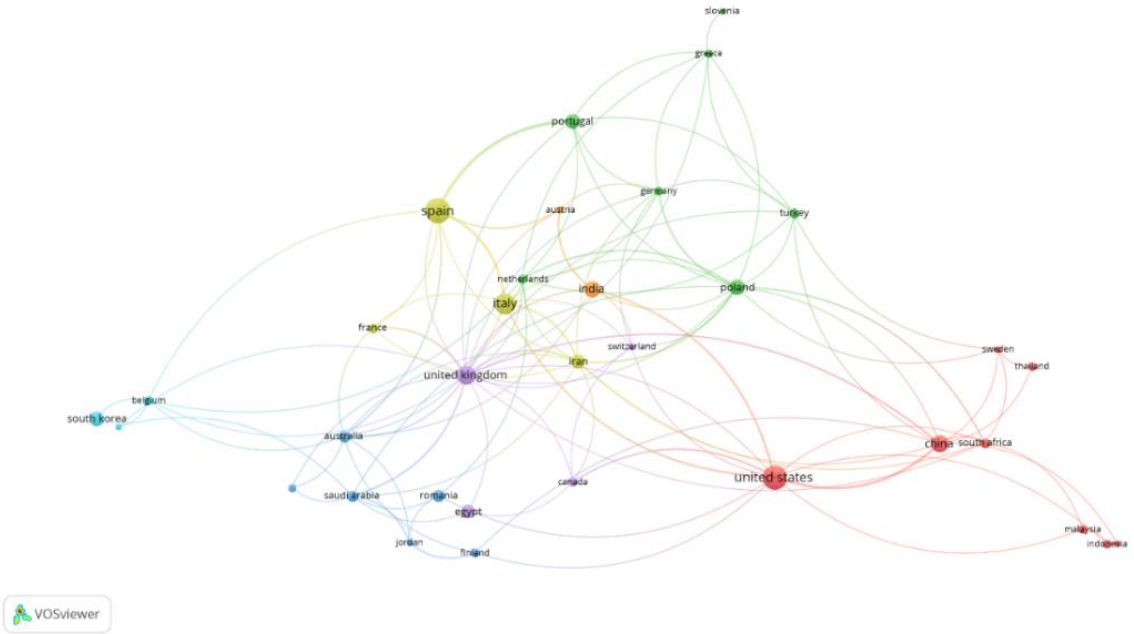
TY= Toplam Yayın.

Şekil 2.4, Ülkelerin Bibliyometrik Eşleşmesini (Bibliometric Coupling) sunmaktadır. Bu ağ haritası, paylaşılan referanslara dayalı olarak ülkeler arasındaki entelektüel bağlantıları ortaya koymaktadır. İspanya, İtalya ve Birleşik Krallık arasındaki güçlü bağlar, Avrupa bağlamında paylaşılan bir teorik temele ve benzer araştırma ilgilerine işaret etmektedir.



Şekil 2.4. Ülkeler arasındaki işbirliğini gösteren bibliyometrik eşleşme bağları

Şekil 2.5, Ülkeler Arasındaki Ortak Yazarlık (Co-authorship) Ağını göstermektedir. Bu şekil, uluslar arasındaki işbirlikçi çabaları vurgulamaktadır. Amerika Birleşik Devletleri ve Birleşik Krallık'ın merkezi konumu, bu ülkelerin uluslararası işbirliği için merkez görevi gördüğünü düşündürmektedir. Çin ve diğer Asya ülkeleri arasında ve ayrıca Avrupa ülkeleri arasında görülen güçlü bağlar, bölgesel araştırma kümelerine işaret etmektedir.



Şekil 2.5. Ülkeler arasındaki işbirliğini gösteren ortak yazarlık bağları

Dergi performansı ve atıf analizi

Yayın mecralarının analizi, alanın disipliner odağı hakkında bilgi sağlamaktadır. Çizelge 2.4, eğitim kurumlarında iç hava kalitesi araştırma alanındaki en ilgili 10 dergiyi listelemektedir.

- **"Building and Environment"**, bina bilimindeki merkezi rolünü yansıtan 4.398 toplam yayın (TP) ve 60.089 toplam atıf (TC) ile önde gelen dergidir.
- **"Sustainability (Switzerland)"**, iç hava kalitesinin sürdürülebilirlik yönüne olan geniş ilgiyi gösteren 53.732 TP ve 432.314 TC ile takip etmektedir.
- **"Science of the Total Environment"**, çevre sağlığı perspektifini vurgulayarak 514.964 TC ile listenin en üst sırasında en yüksek atıf etkisini göstermektedir.
- Diğer önemli dergiler arasında "Journal of Building Engineering" ve "Energy and Buildings" yer almakta olup, bu durum alanın güçlü mühendislik odağını doğrulamaktadır.

Çizelge 2.4. Eğitim kurumlarında iç hava kalitesi araştırmalarında en ilgili 10 dergi

Dergi Adı	TY	TA	Site Score	En Çok Atıf Alan Makale	Atıf Sayısı	Yayıncı
Building and Environment	4,398	60,089	13.7	Resistance reduction method for building transmission and distribution systems based on an improved random forest model: A tee case study	40	Elsevier BV.
Sustainability (Switzerland)	53,732	432,314	8.0	Heavy Metal Pollution in Coastal Environments: Ecological Implications and Management Strategies: A Review	60	Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
Buildings	13,196	67,652	5.1	Advancing Hybrid Fiber-Reinforced Concrete: Performance, Crack Resistance Mechanism, and Future Innovations	23	Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
Atmosphere	6,628	33,011	5.0	Time-Series Data Driven $PM_{2.5}$ Forecasting: From Theoretical Framework to Empirical Analysis	24	Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
International Journal of Environmental Research and Public Health	27,163	244,189	9.0	The Global Burden of Periodontal Disease: A Narrative Review on Unveiling Socioeconomic and Health Challenges	17	Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).

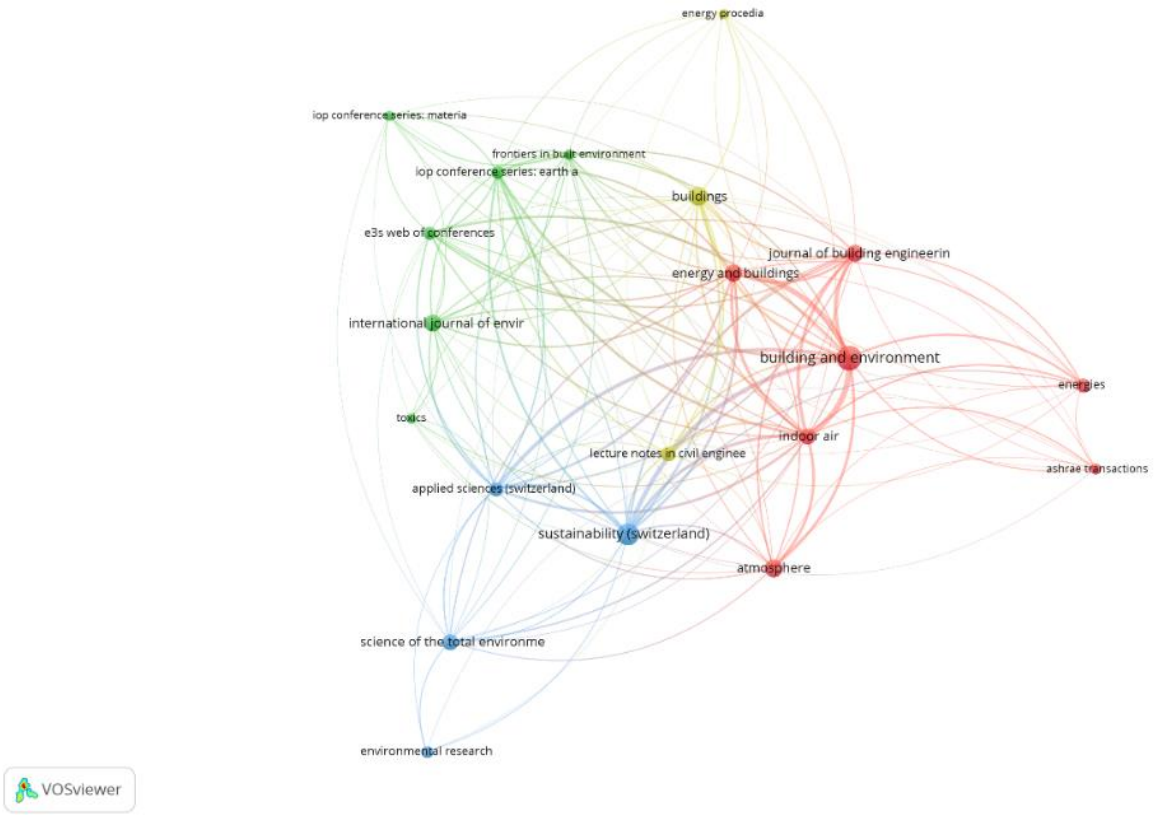
TY= Toplam Yayın, TA = Toplam Atıf.

Çizelge 2.4. (Devamı)

Dergi Adı	TY	TA	Site Score	En Çok Atıf Alan Makale	Atıf Sayısı	Yayıncı
Journal of Building Engineering	10,836	131,429	12.1	Meso-structural insights into post-peak behaviors of micro steel fiber-reinforced recycled aggregate concrete using in-situ 4D CT and DVC techniques	39	Elsevier BV.
Energy and Buildings	4,133	49,284	11.9	From Nearly Zero-Energy Buildings (NZEBs) to Zero-Emission Buildings (ZEBs): Current status and future perspectives	26	Elsevier BV.
Indoor Air	439	4,221	9.6	Study on the Sterilization Performance of Photocatalysts Used in Indoor Air Purification	28	John Wiley and Sons Inc.
Science of the Total Environment	29,397	514,964	17.5	Adsorption of heavy metals by biochar in aqueous solution: A review	35	Elsevier BV.
Energies	29,243	220,105	7.5	Next Generation of Electric Vehicles: AI-Driven Approaches for Predictive Maintenance and Battery Management	52	Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).

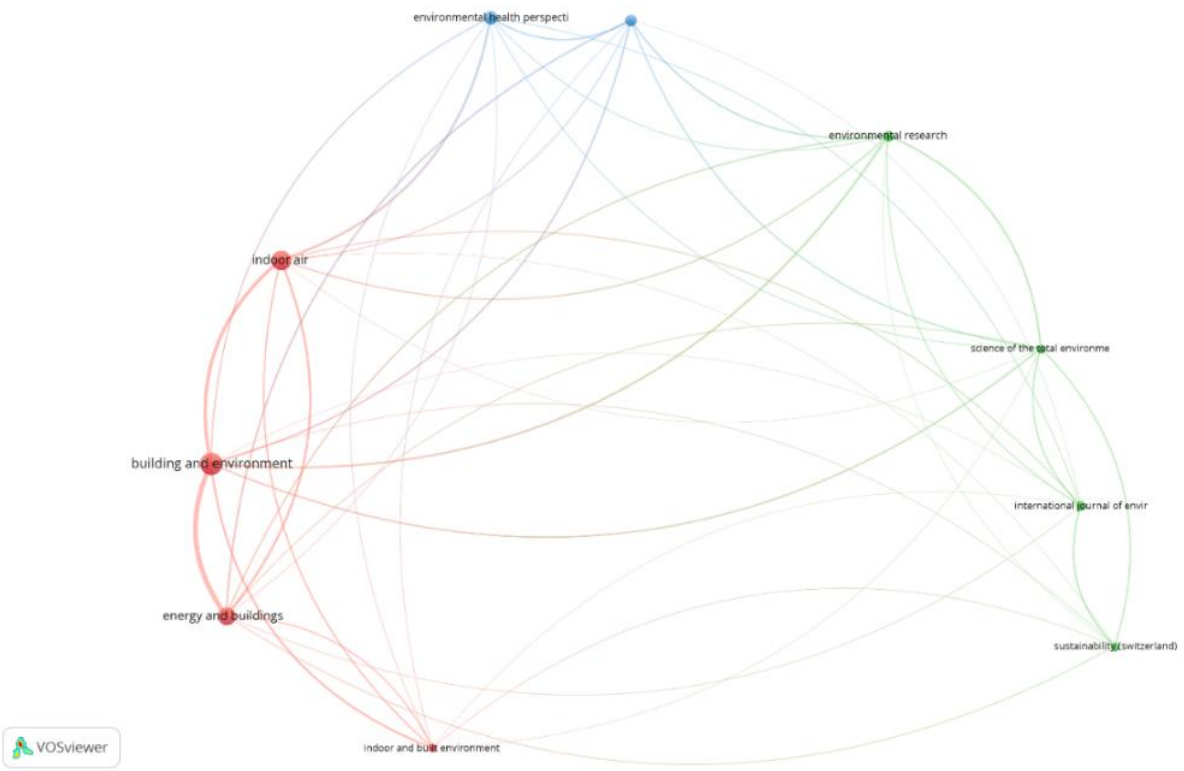
TY= Toplam Yayın, TA = Toplam Atıf.

Şekil 2.6, Dergilerin Bibliyometrik Eşleşmesini göstermektedir. Ağ, bina performansı ve mühendislik çözümlerine odaklanan ortak bir referans havuzunu paylaşan Building and Environment ve Energy and Buildings gibi dergilerin yakından bağlantılı olduğu belirgin kümeleri göstermektedir.



Şekil 2.6. Dergiler arasındaki işbirliğini gösteren bibliyometrik eşleşme bağları

Şekil 2.7, Dergilerin Ortak Atıf (Co-citation) Ağını göstermektedir. Bu harita, bu dergilerin diğer akademisyenler tarafından nasıl birlikte atıf aldığını ortaya koymaktadır. Indoor Air, Building and Environment ve Energy and Buildings arasındaki güçlü bağlar, bu üç derginin bu alandaki araştırmacılar için temel "bilgi tabanını" oluşturduğunu göstermektedir.



Şekil 2.7. Dergiler arasındaki işbirliğini gösteren ortak atıf bağları

Yazar etkisi ve iş birliği

En üretken yazarların incelenmesi, alandaki düşünce liderlerinin belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Çizelge 4.3, eğitim kurumlarında iç hava kalitesi araştırma alanındaki ilk 10 yazarı sıralamaktadır.

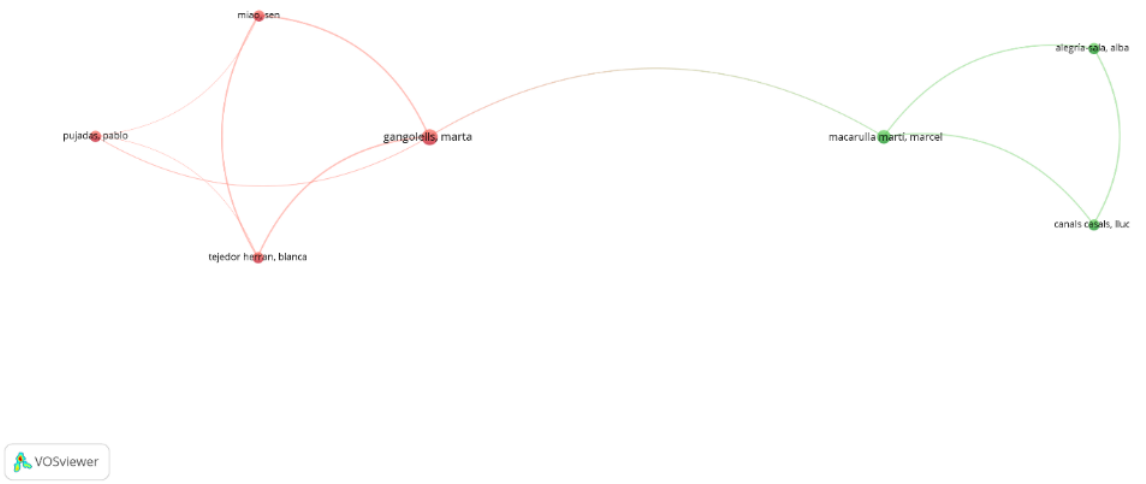
- **Marta Gangolells** (Universitat Politècnica de Catalunya, İspanya), 98 yayın ve 32 h-endeksi ile en üretken yazardır.
- **Dejan Mumovic** (University College London, Birleşik Krallık), 166 yayınla listedeki en yüksek atıf sayısına (4.953 TC) sahiptir ve bu durum yüksek araştırma etkisine işaret etmektedir.
- **Diego P. Ruiz Padillo** (Universidad de Granada, İspanya), 129 yayınla bir diğer önde gelen isimdir.
- **Universidad de Sevilla'dan** (Rafael Suárez, Rocío Escandón) birden fazla yazarın varlığı, İspanya'daki yoğunlaşmış araştırma çabasını vurgulamaktadır.

Çizelge 2.5. Eğitim kurumlarında iç hava kalitesi araştırmalarında ilk 10 yazar.

Yazar Adı	İlk Yayın Yılı	TY	h-endeksi	TA	Mevcut Kurumu	Ülke
Gangolells, Marta	2003	98	32	2,874	Universitat Politècnica de Catalunya	Spain
Aguilar, Antonio J.	2017	42	12	431	Universidad de Granada	Spain
Macarulla Martí,Marcel	2009	83	26	1833	Universitat Politècnica de Catalunya	Span
Martínez-Aires, María Dolores	2010	57	15	913	Universidad de Granada	Spain
Mumovic, Dejan	2005	166	35	4953	University College London	United Kingdom
Ruiz Padillo, Diego P.	1996	129	25	1753	Universidad de Granada, Facultad de Ciencias	Spain
Suárez, Rafael	2003	85	23	1428	Universidad de Sevilla	Spain
De La Hoz-Torres, M. L.	2017	42	12	418	Universidad de Sevilla	Spain
María Calama-González,Carmen María	2018	30	11	284	Universidad de Sevilla	Spain
Escandón, Rocío	2013	29	13	539	Universidad de Sevilla	Spain

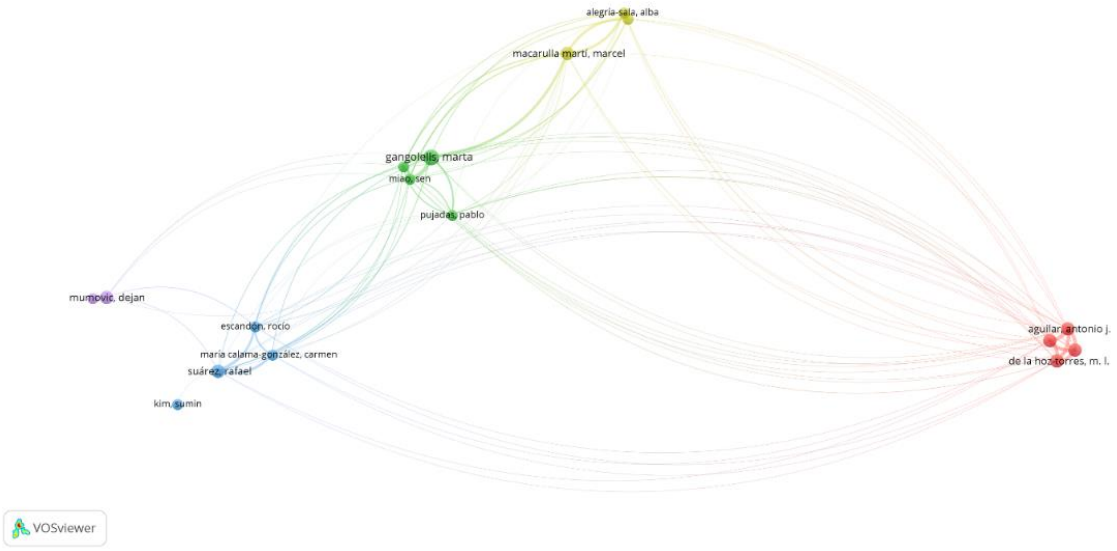
TY= Toplam Yayın, TA = Toplam Atıf.

Şekil 2.8, Ortak Yazarlık Bağlarını görselleştirmektedir. Ağ, özellikle Marta Gangolells ve Marcel Macarulla Martí gibi İspanyol araştırmacılar etrafında belirgin kümeler göstermekte olup, bu durum güçlü yerel işbirliği gruplarına işaret etmektedir.



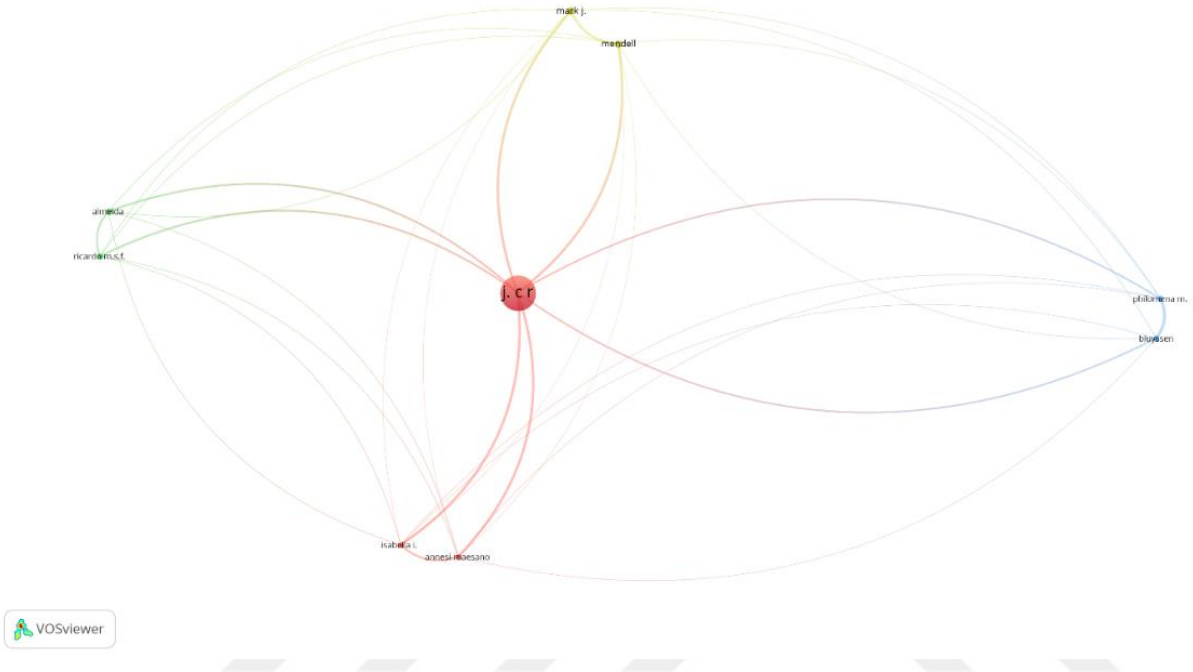
Şekil 2.8. Yazarlar arasındaki işbirliğini gösteren ortak yazarlık bağları

Şekil 2.9, Yazarların Bibliyometrik Eşleşmesini sunmaktadır. Bu şekil, benzer çalışmalara atıfta bulunan yazarları gruplandırmaktadır. Antonio J. Aguilar ve M. L. De La Hoz-Torres gibi yazarların yakınlığı, muhtemelen okullardaki İHK'nin termal konfor veya havalandırma türleri gibi belirli yönlerine odaklanarak aynı teorik paradigma içinde çalıştıklarını göstermektedir.



Şekil 2.9. Yazarlar arasındaki işbirliğini gösteren bibliyometrik eşleşme bağları

Şekil 2.10, Yazarların Ortak Atıf Eşleşmesini göstermektedir. Mendell ve Mark J.'ye bağlı merkezi düğüm J.C.R. (muhtemelen önemli bir referans veya yazar grubuna atıfta bulunmaktadır), bu figürlerin topluluk tarafından en sık atıfta bulunulan temel çalışmaları ürettiğini göstermektedir.



Şekil 2.10. Yazarlar arasındaki işbirliğini gösteren ortak atıf eşleşme bağları

Kurumsal analiz

Çizelge 4.4, eğitim kurumlarında iç hava kalitesi araştırma alanındaki en önemli 10 kurumu listelemektedir.

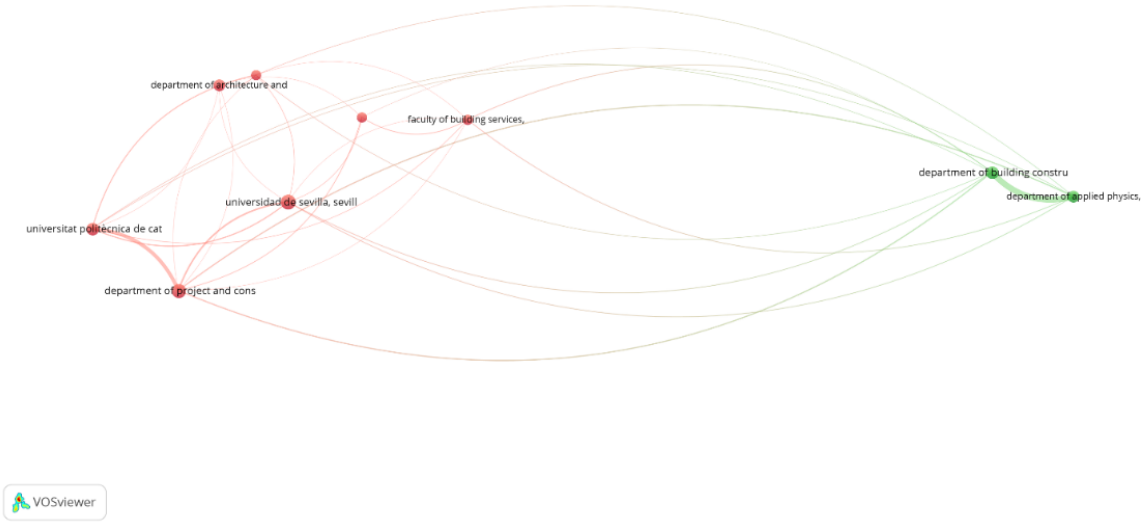
- Universitat Politècnica de Catalunya (İspanya), en iyi yazar sıralamasıyla ilişkili olarak 18 yayınla liderdir.
- Universidad de Sevilla (İspanya) 13 yayınla takip etmektedir.
- Diğer önemli kurumlar arasında University College London (Birleşik Krallık), Universidade do Porto (Portekiz) ve Yonsei Üniversitesi (Güney Kore) bulunmaktadır. İspanyol üniversitelerinin hakimiyeti, bu özel veri setinin ayırt edici bir özelliğidir.

Çizelge 2.6. Eğitim kurumlarında iç hava kalitesi araştırmalarında en önemli kurumlar

Eğitim Kurumu	TY	Ülke
Universitat Politècnica de Catalunya	18	İspanya
Universidad de Sevilla	13	İspanya
Universidade do Porto	9	Portekiz
Yonsei University	9	Güney Kore
University College London	9	Birleşik Krallık
Universidad de Granada	9	İspanya
University of Johannesburg	8	Güney Afrika
The Bartlett Faculty of the Built Environment	8	Birleşik Krallık
Universitatea Tehnica de Constructii Bucuresti	7	Romanya
Politecnico di Milano	7	İtalya

TY = Toplam Yayın.

Şekil 2.11, Kurumların Bibliyometrik Eşleşmesini göstermektedir. Ağ, İspanyol üniversiteleri bünyesindeki Mimarlık Bölümü ile Proje ve İnşaat Mühendisliği Bölümü arasındaki güçlü bağlantıları ortaya koymakta ve bu konuda bölümler arası işbirliğine işaret etmektedir.

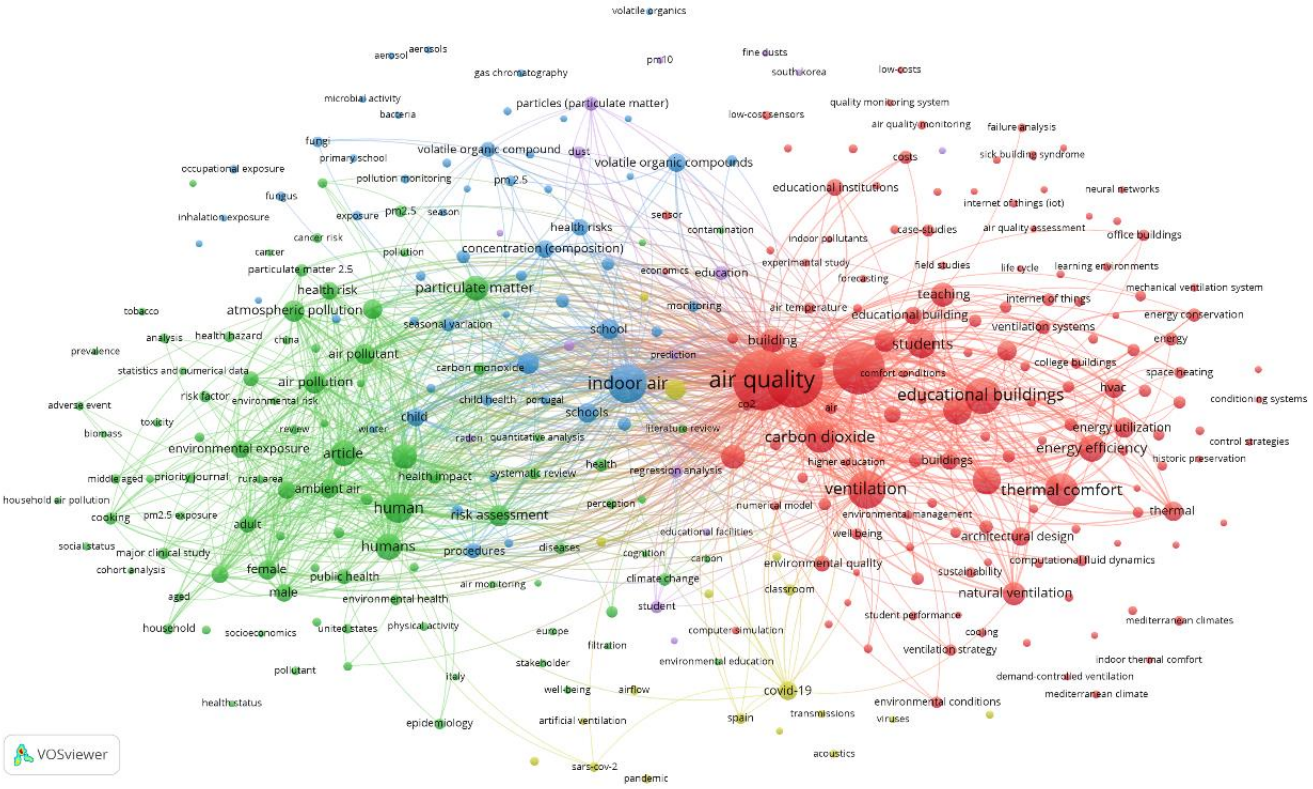


Şekil 2.11. Kurumlar arasındaki işbirliğini gösteren bibliyometrik eşleşme bağları

Anahtar kelime analizi ve araştırma eğilimleri

Anahtar kelimelerin analizi, alanın kavramsal yapısını ve evrimini ortaya koymaktadır. Şekil 2.12, Tüm Anahtar Kelimelerin Birlikte Görülme Sıklığını (Co-occurrence) göstermektedir.

- En büyük düğümler " Indoor Air Quality", " Air Quality", " Carbon Dioxide" ve " Educational Buildings"dır.
- Kırmızı küme, bina ortamına (thermal comfort, ventilation, energy efficiency) odaklanmaktadır.
- Yeşil küme, sağlık ve kirleticileri (particulate matter, health risk, environmental exposure) vurgulamaktadır.
- Ayrı bir düğüm olarak "COVID-19"un varlığı, pandemi ile ilgili araştırmaların önemli bir alt tema olarak ortaya çıktığını göstermektedir.



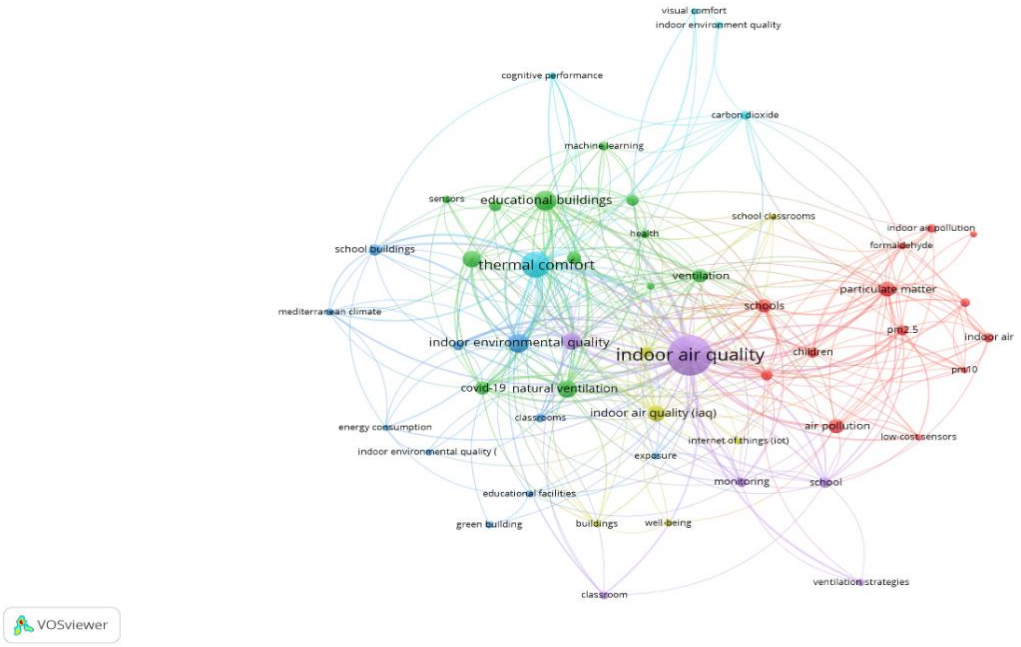
Şekil 2.12. Tüm anahtar kelimeler arasındaki işbirliğini gösteren birlikte görülme (co-occurrence) bağları

Şekil 2.13, Yazar Anahtar Kelimelerine odaklanmaktadır.

- Harita, " Thermal Comfort" ve " Educational Buildings" arasında doğrudan bir bağlantı olduğunu göstermekte ve kullanıcı konforunun birincil bir araştırma

hedefi olduğunu düşündürmektedir.

- "Internet of Things (IoT)"ve "Low-cost sensors" gibi daha yeni terimler ağda görünmekte ve İHK izleme stratejilerinde teknolojik bir eğilime işaret etmektedir.



Şekil 2.13. Yazar anahtar kelimeleri arasındaki işbirliğini gösteren birlikte görülme (co-occurrence) bağları

Şekil ve Çizelgelerin bu detaylı analizi, eğitim kurumlarında iç hava kalitesi araştırma ortamının sağlam, mühendislik odaklı olduğunu ve başta İspanya olmak üzere Avrupa araştırma merkezleri tarafından önemli ölçüde yönlendirildiğini doğrulamaktadır.

Araştırmaların konu alanlarına göre dağılımı

İç hava kalitesi araştırmalarının çok disiplinli doğası, literatüre katkıda bulunan çeşitli akademik alanların incelenmesini gerektirmektedir. Şekil 2.14, araştırma çalışmalarının farklı konu alanlarına dağılımını sunmaktadır. Veriler, konunun çeşitlilik gösteren bilimsel perspektiflerden ele alındığını ortaya koymakta ve karmaşıklığını doğrulamaktadır.

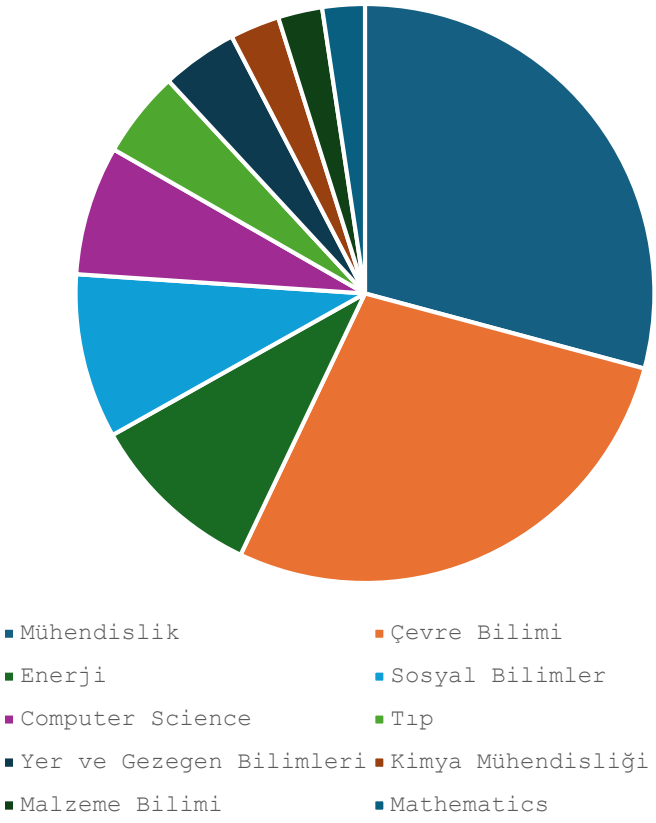
- Mühendislik (Engineering), araştırma çıktısının en büyük payını oluşturmaktadır. Bu hakimiyet, hava kalitesi sorunlarının ele alınmasında havalandırma sistemi tasarımı ve bina performansı analizi gibi teknik çözümlerin kritik rolünü vurgulamaktadır.

- Çevre Bilimleri (Environmental Science), eğitim ortamlarında kirletici ölçümü, maruziyet değerlendirmesi ve ekolojik etkilere odaklanmayı vurgulayarak en büyük ikinci sektörü temsil etmektedir.

- Enerji (Energy) de önemli bir katkı sağlayıcıdır ve okul binalarında iç hava kalitesi iyileştirmelerini enerji verimliliği ile dengelemenin süregelen zorluğunu yansıtmaktadır.

- Diğer önemli disiplinler arasında, muhtemelen sırasıyla insan davranışsal yönlerini ve modern izleme teknolojilerinin (IoT ve Machine Learning gibi) uygulanmasını ele alan Sosyal Bilimler (Social Sciences) ve Bilgisayar Bilimleri (Computer Science) yer almaktadır.

- Tıbbın katkısı, iç hava kalitesi ile öğrenci sağlığı arasındaki doğrudan bağlantının altını çizerken; Yer ve Gezegen Bilimleri (Earth and Planetary Sciences), Kimya Mühendisliği (Chemical Engineering), Malzeme Bilimi (Materials Science) ve Matematik (Mathematics), kirletici dinamiklerini ve malzeme özelliklerini anlamada uzmanlaşmış destek sağlamaktadır.



Şekil 2.14. Araştırma çalışmalarının farklı konu alanlarına göre dağılımı

Bu dağılım, araştırmanın merkezinin mühendislik ve çevre bilimlerine dayalı kalmasına rağmen, enerji sürdürülebilirliği, sağlık ve ileri bilgi işlem teknolojilerini içeren bütünleşik bir yaklaşıma doğru açık bir eğilim olduğunu göstermektedir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Çalışma Alanı ve Fiziksel Alan

Bu çalışma, Akdeniz Üniversitesi Enformatik Bölüm Başkanlığına bağlı bilgisayar laboratuvarlarında yürütülmüştür. Bilgisayar Labaratuvarlarında iç ortam hava kalitesi (İHK) dinamiklerini değerlendirmek amacıyla, laboratuvarın fiziksel boyutları ve mekânsal yerleşimi hassas bir şekilde haritalandırılmıştır. Bu süreç; öğrenci çalışma istasyonlarının, ısı üreten elektronik ekipmanların (bilgisayarlar ve monitörler) ve mevcut Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme (HVAC) menfez ile egzoz konfigürasyonlarının stratejik olarak konumlandırılmasını içermektedir.

İç ortam mikroikliminin kapsamlı bir mekânsal kesitini elde etmek amacıyla, oda genelinde on iki spesifik izleme istasyonu (1A'dan 4C'ye kadar adlandırılmış) belirlenmiştir. Tabakalaşmayı (stratifikasyon) ve oturan ile ayakta duran kullanıcıların solunum bölgelerini değerlendirmek için ölçümler, özellikle farklı yükseklik düzlemlerinde (0,5 m, 1,2 m ve 1,8 m) hedeflenmiştir.

3.2. Yerinde Saha Ölçümleri

Gerçekçi temel durum koşullarını oluşturmak ve sonraki sayısal modeli doğrulamak amacıyla, laboratuvarlarda ampirik veri toplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ortam sıcaklığı, bağıl nem, karbondioksit (CO_2) ve partikül madde konsantrasyonları (özellikle $PM_{0.3}$, $PM_{2.5}$ ve PM_{10}) dahil olmak üzere çevresel parametreler, sürekli izleme sensörleri kullanılarak kaydedilmiştir.

Veriler, tipik çalışma koşullarını (örneğin, ekipmanların aktif olması, tipik havalandırma oranları) temsil eden güçlü bir veri seti sağlamak amacıyla uzun süreli deneysel dönemler içerisinde 4 ay boyunca (Ekim 2025'ten Ocak 2026'ya kadar) toplanmıştır. Bu fiziksel ölçümler iki amaca hizmet etmiştir: Burada odanın ampirik istatistiksel temel durumunun belirlenmesi ve doğru bir hesaplamalı dijital ikiz (computational digital twin) oluşturmak için gerekli olan temel sınır koşullarının sağlanmıştır.

3.3. Ölçüm Cihazları ve Teknik Özellikler

Hem ampirik temel durum hem de CFD doğrulaması için yüksek doğrulukta veri toplama sağlamak amacıyla özelleştirilmiş izleme cihazları kullanılmıştır. Bu cihazların teknik özellikleri aşağıda ayrıntılı olarak sunulmuştur:

3.3.1. Partikül madde ölçüm cihazı: PCE-PCO 2

PCE-PCO 2 Parçacık Sayım Cihazı, birden fazla boyut fraksiyonundaki aerosol konsantrasyonlarını izlemek için kullanılmıştır.

- **Ölçüm Fraksiyonları:** $PM_{0.3}$, $PM_{0.5}$, PM_1, $PM_{2.5}$, PM_5 ve PM_{10}
- **Ölçüm Aralığı (Interval):** 10–15 saniye
- **Örnekleme Akış Hızı:** 2,83 L/dk

- **Kalibrasyon:** Fabrika onaylı kalibrasyon standartları.

3.3.2. CO_2 ve sıcaklık ölçüm cihazı: JD-3002

Karbondioksit seviyeleri ve ortam sıcaklıkları, JD-3002 entegre sensörü kullanılarak kaydedilmiştir.

- **CO_2 Ölçüm Aralığı:** 0–5000 ppm (Doğruluk: ±50 ppm)
- **Sıcaklık Ölçüm Aralığı:** 0–50°C (Doğruluk: ±0,5°C)

3.4. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) Kurulumu

İç ortam hava kalitesi ve akış alanının sayısal simülasyonu FLOW-3D yazılımı kullanılarak yürütülmüştür. Hesaplamalı model, kapalı alan içindeki hem akışkan momentumunu hem de termal gradyanları doğru bir şekilde çözmek için üç boyutlu Reynolds-ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemlerini enerji denklemi ile eşleştirerek çözmüştür.

3.4.1. Sınır koşulları ve kaynak terimleri

Sınır koşulları, fiziksel ortamı titizlikle kopyalayacak şekilde atanmıştır. Girişler (menfezler), gerçek HVAC çalışma durumunu yansıtmak amacıyla belirli üfleme hızları ve sıcaklıkları ile tanımlanırken; termal sınır parametreleri, laboratuvar ekipmanı tarafından üretilen duyulur ısı akılarını (sensible heat fluxes) hesaba katmıştır.

Havada asılı duran kirleticilerin dağılımını doğru bir şekilde modellemek için, hesaplama alanındaki partikül madde üretim hızları, laboratuvarlarda fiziksel olarak kaydedilen temel ortam konsantrasyonlarını yansıtacak şekilde tanımlanmıştır. İlgili parçacık boyutları ($PM_{0.3}$, $PM_{2.5}$ ve PM_{10}) için sürekli hacimsel kaynak terimleri, yazılımda yerel olarak (natively) tanımlanmıştır. Bu üretim hızlarının temel sınır koşulları olarak ayarlanması, yerel mekânsal dağılım modellerini değerlendirmeden önce modelin ampirik olarak tutarlı bir temel durum sağlamasını garantilemiştir.

3.4.2. Sayısal çözüm ve yakınsama kriterleri

Simülasyon, üretim kaynakları ile havalandırma egzozu arasında kararlı durum dengesi (steady-state equilibrium) sağlanana kadar akışkan ve parçacık akışının ilerlemesini hesaplamak için zamana bağlı (transient) bir sayısal izleme şeması kullanmıştır. Parçacık birikimleri ve akışkan hızları, on iki fiziksel istasyonun (1A'dan 4C'ye kadar) simüle edilmiş eşdeğerlerinde sürekli olarak izlenmiştir. Yakınsama, simülasyonun son 100 zaman adımı (time-step) analiz edilerek doğrulanmış; küresel sıcaklık ve toplam mekânsal parçacık sayısına ait kalıntıların (residuals) minimum standart sapma ile kararlı hale gelmesi sağlanmıştır.

3.5. İstatistiksel Yöntemler ve Veri Analizi

İstatistiksel analizler IBM SPSS 26.0 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uygulanan analizler şu şekildedir:

1. **Tanımlayıcı İstatistikler:**
    - **Ortalama ve Medyan:** Merkezi eğilim ölçüleri.
    - **Standart Sapma:** Veri değişkenliği ölçüsü.
    - **Basıklık ve Çarpıklık (Skewness & Kurtosis):** Dağılım şekli ölçüleri.
    - **Min/Maks:** Değer aralığı.
2. **Normallik Testi:**
    - **Kolmogorov-Smirnov (K-S) Testi:** Verilerin normal (Gauss) bir dağılım izleyip izlemediğini belirlemek için kullanılmıştır. Tüm laboratuvarlardaki örneklem büyüklüğü (N) 30'dan büyük olduğu için (**N > 30**) bu test tercih edilmiştir.
    - **Anlamlılık Düzeyi (Sig. / p-değeri):** $p < 0,05$ değeri, verilerin normal dağılmadığını gösterir (sıfır hipotezinin reddi).
3. **Kruskal-Wallis H Testi:** Deney verilerinde laboratuvarlar arasındaki ve ölçüm yükseklikleri (0,5 m, 1,2 m, 1,8 m) arasındaki farkları incelemek için kullanılmıştır.
4. **Karşılaştırmalar ve Korelasyon Analizi:** Her bir laboratuvar için karşılaştırmalar ve korelasyon analizi yapılmıştır. Analiz şunları içermektedir:
    - **Spearman Korelasyon Analizi:** Çevresel değişkenler (CO_2, Sıcaklık ve Nem) ile Partikül Madde (PM) boyutları arasındaki ilişkileri belirlemek için kullanılmıştır.
    - **İç Ortam - Dış Ortam Karşılaştırması (Mann-Whitney U Testi):** İç ortam koşullarının dış ortam koşullarından önemli ölçüde farklı olup olmadığını belirlemek için kullanılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. İstatistiksel Yönteme Genel Bakış

Bu çalışmadaki istatistiksel analizler IBM SPSS Statistics yazılımı (Sürüm 26.0) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar laboratuvarlarından toplanan İç Ortam Hava Kalitesi (İHK) verilerini analiz etmek amacıyla sistematik bir yaklaşım uygulanmıştır. Verilerin merkezi eğilimi ve değişkenliği; ortalama, medyan, standart sapma, çarpıklık (skewness), basıklık (kurtosis), minimum ve maksimum değerleri içeren tanımlayıcı istatistikler aracılığıyla başlangıçta özetlenmiştir.

İncelenen her bir laboratuvardaki örneklem büyüklüğü (N) 30'u aştığı için, veri dağılımının normalliğini doğrulamak amacıyla Kolmogorov-Smirnov (K-S) testi uygulanmıştır. Normal olmayan bir dağılıma işaret eden sıfır hipotezinin reddedilme kriteri, 0,05'in altındaki bir anlamlılık düzeyi (p-değeri) olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, karşılaştırmalı analizler için parametrik olmayan (non-parametric) testlerin seçilmesini zorunlu kılmış; bu doğrultuda değişkenler arasındaki ilişkileri incelemek amacıyla Spearman Korelasyon Analizi'nin yanı sıra Mann-Whitney U Testi ve Kruskal-Wallis H Testi kullanılmıştır.

4.2. Normallik Testi Sonuçları

CO_2, sıcaklık, nem ve partikül madde (PM) dağılım parametreleri her bir laboratuvar için ayrı ayrı analiz edilmiştir.

4.2.1. LAB 1

Çizelge 4.1. LAB1 için Normallik Testi ve Tanımlayıcı İstatistik Sonuçları (N=225)

Değişken	Ortalama	Medyan	Std. Sap.	Min	Maks	Çarpıklık	Basıklık	K-S İstat.	K-S Anlam. (p)	Dağılım
CO_2	546.45	492.00	162.51	400.0	1054	1.491	1.808	0.184	0.000	Normal Değil
Sıcaklık (°C)	23.69	23.60	1.60	19.7	26.9	-0.197	-.840	0.085	0.074	Normal
Bağıl Nem (%)	49.59	48.00	7.80	29.2	69.0	0.688	0.142	0.088	0.057	Normal

Çizelge 4.1. (Devamı)

Değişken	Ortalama	Medyan	Std. Sap.	Min	Maks	Çarpıklık	Basıklık	K-S İstat.	K-S Anlam. (p)	Dağılım
$PM_{0.3}$	20630	16652	12405	4630	60271	1.338	0.848	0.153	0.000	Normal Değil
$PM_{2.5}$	356.93	307.00	187.13	81.0	879.0	0.822	-.215	0.150	0.000	Normal Değil
PM_{10}	23.24	20.00	13.21	4.0	74.0	1.059	1.097	0.123	0.002	Normal Değil

LAB1'deki değişkenlerin çoğunluğu, özellikle CO_2 ve tüm partikül madde boyutları ($PM_{0.3}$, $PM_{2.5}$ ve PM_{10}), 0,05 eşiğinin oldukça altında olan 0,000 veya 0,002 p-değerleri ile kanıtlandığı üzere, normal olmayan bir dağılım sergilemiştir (Çizelge 6.1). Örneğin, CO_2 pozitif bir çarpıklık (1,491) ve kayda değer bir değişkenlik (Std. Sap. = 162,51) göstermiştir. Termal konfor parametreleri olan nem ve sıcaklık ise sırasıyla 0,057 ve 0,074 p-değerleri vermiştir. 0,05 değerini hafifçe aşan bu bulgular, LAB1'deki sıcaklık ve nem seviyelerinin normal (Gauss) bir dağılım sergilediğini göstermektedir.

2.2.2. LAB 3

Çizelge 4.2. LAB3 için Normallik Testi ve Tanımlayıcı İstatistik Sonuçları (N=199)

Değişken	Ortalama	Medyan	Std. Sap.	Min	Maks	Çarpıklık	Basıklık	K-S İstat.	K-S Anlam. (p)	Dağılım
CO_2	497.37	461.00	117.07	400.0	873.0	1.842	2.874	0.203	0.000	Normal Değil
Sıcaklık (°C)	23.38	23.90	1.68	19.7	25.9	-0.298	-.131	0.147	0.000	Normal Değil

Çizelge 4.2. (Devamı)

Değişken	Ortalama	Medyan	Std. Sap.	Min	Maks	Çarpıklık	Basıklık	K-S İstat.	K-S Anlam. (p)	Dağılım
Bağıl Nem (%)	47.95	50.00	8.10	29.2	60.6	-0.584	-.782	0.124	0.004	Normal Değil
$PM_{0.3}$	11170	10893	4140	2018	22023	0.129	-.330	0.082	0.134	Normal
$PM_{2.5}$	198.67	175.00	86.42	45.0	588.0	1.203	1.965	0.143	0.001	Normal Değil
PM_{10}	15.52	14.00	9.33	2.0	63.0	1.381	3.282	0.133	0.002	Normal Değil

2,874'lük yüksek basıklık değeri ve geniş kuyruklu bir dağılım ile LAB3'e ait veriler, CO_2 seviyesinin kesinlikle normal olmadığını göstermektedir (p=0,000). Nem ve sıcaklık da normal olmayan dağılımlara sahiptir. Normal olmamaya devam eden daha büyük fraksiyonların ($PM_{2.5}$ ve PM_{10}) aksine, $PM_{0.3}$, 0,134'lük bir p-değerine (>0,05) sahip olup en küçük parçacıkların konsantrasyonunun normal bir dağılım izlediğini göstermiştir.

4.2.3. LAB 5

Çizelge 4.3. LAB5 için Normallik Testi ve Tanımlayıcı İstatistik Sonuçları (N=274)

Değişken	Ortalama	Medyan	Std. Sap.	Min	Maks	Çarpıklık	Basıklık	K-S İstat.	K-S Anlam. (p)	Dağılım
CO_2	548.45	493.00	159.43	400.0	1009	1.272	0.742	0.176	0.000	Normal Değil

Çizelge 4.3. (Devam)

Değişken	Ortalama	Medyan	Std. Sap.	Min	Maks	Çarpıklık	Basıklık	K-S İstat.	K-S Anlam. (p)	Dağılım
Sıcaklık (°C)	23.05	23.25	1.03	19.7	25.0	-0.797	0.563	0.104	0.005	Normal Değil
Bağıl Nem (%)	54.52	55.65	4.66	29.2	63.0	-1.578	5.205	0.134	0.000	Normal Değil
$PM_{0.3}$	16418	16331	4874	5059	31644	0.417	-0.490	0.104	0.005	Normal Değil
$PM_{2.5}$	303.15	294.00	90.52	98.0	586.0	0.403	0.222	0.101	0.007	Normal Değil
PM_{10}	23.45	22.00	9.90	3.0	69.0	0.759	1.307	0.080	0.057	Normal

LAB5'teki neredeyse tüm çevresel değişkenler, 0,05'in önemli ölçüde altında olan p-değerleri ile normal olmayan dağılımlar göstermiştir. CO_2, sıcaklık, nem ve ince parçacıkların tamamı buna dahildir. İncelenen en kaba parçacık fraksiyonu olan PM_{10} ise 0,057'lik bir p-değerine sahiptir. Diğer değişkenlerle karşılaştırıldığında bu sınırda (marginal) çıkan sonuç, bu laboratuvardaki PM_{10} konsantrasyonlarının normal dağılıma oldukça yakın olduğunu göstermektedir.

4.2.4. LAB 6

Çizelge 4.4. LAB6 için Normallik Testi ve Tanımlayıcı İstatistik Sonuçları (N=260)

Değişken	Ortalama	Medyan	Std. Sap.	Min	Maks	Çarpıklık	Basıklık	K-S İstat.	K-S Anlam. (p)	Dağılım
CO_2	502.41	453.50	134.10	400.0	924.0	1.652	1.803	0.223	0.000	Normal Değil

Çizelge 4.4. (Devam)

Değişken	Ortalama	Medyan	Std. Sap.	Min	Maks	Çarpıklık	Basıklık	K-S İstat.	K-S Anlam. (p)	Dağılım
Sıcaklık (°C)	22.94	23.40	1.75	17.9	26.0	-0.799	0.219	0.114	0.002	Normal Değil
Bağıl Nem (%)	50.28	52.15	5.59	26.1	59.3	-1.113	2.169	0.137	0.000	Normal Değil
$PM_{0.3}$	9264	9045	5253	1636	25285	0.822	0.030	0.128	0.000	Normal Değil
$PM_{2.5}$	209.29	201.00	106.88	48.0	667.0	0.897	0.913	0.085	0.043	Normal Değil
PM_{10}	19.16	18.00	11.86	1.0	97.0	1.904	7.763	0.098	0.020	Normal Değil

Veri analizine göre, LAB6 için ölçülen tüm değerler tutarlı bir şekilde normal olmayan dağılım sergilemektedir. CO_2, sıcaklık, nem ve tüm PM fraksiyonları için anlamlılık değerleri (p) sürekli olarak 0,05'ten küçük bulunmuştur. Özellikle PM_{10}, oldukça yüksek bir basıklık (7,763) sergilemiş olup bu durum, büyük olasılıkla kesintili toz yeniden havalanma (resuspension) olaylarının neden olduğu aykırı değerlerin (outliers) veya uç değerlerin varlığına işaret etmektedir.

4.2.5. LAB 7

Çizelge 4.5. LAB7 için Normallik Testi ve Tanımlayıcı İstatistik Sonuçları (N=112)

Değişken	Ortalama	Medyan	Std. Sap.	Min	Maks	Çarpıklık	Basıklık	K-S İstat.	K-S Anlam. (p)	Dağılım
CO_2	514.13	461.50	148.06	400.0	966.0	2.040	2.991	0.232	0.000	Normal Değil
Sıcaklık (°C)	23.92	23.95	1.37	20.0	26.6	-0.263	0.243	0.131	0.040	Normal Değil
Bağıl Nem (%)	50.89	51.30	5.45	40.5	61.6	-0.042	-1.048	0.109	0.127	Normal
$PM_{0.3}$	13502	10693	7965	4378	30179	0.672	-1.087	0.204	0.000	Normal Değil
$PM_{2.5}$	252.94	183.00	137.69	78.0	619.0	0.942	-0.385	0.216	0.000	Normal Değil
PM_{10}	18.69	16.00	10.25	3.0	45.0	0.602	-0.569	0.122	0.066	Normal

LAB7'de CO_2 ve ince parçacıklar ($PM_{0.3}$, $PM_{2.5}$) normal olmayan dağılımlara sahipken (p=0,000); diğer taraftan PM10 (p=0,066) ve nem (p=0,127), 0,05'ten büyük p-değerleri göstererek değişkenlerin normal dağıldığını ortaya koymuştur.

Genel Normallik Sonucu: Sonuçların büyük bir kısmı, özellikle CO_2 ve partikül madde için normal olmayan dağılımları göstermektedir. Sonuç olarak, bu çalışmanın ilerleyen istatistiksel karşılaştırmalarında parametrik testler yerine parametrik olmayan testler (Mann-Whitney U, Spearman Korelasyonu) kullanılmıştır.

4.3. Laboratuvarlar Arası Değişkenlerin Karşılaştırılması

Çevresel koşulların farklı bilgisayar laboratuvarları arasında anlamlı düzeyde farklılık gösterip göstermediğini belirlemek amacıyla Kruskal-Wallis H Testi kullanılmıştır.

Çizelge 4.6. Kruskal-Wallis Testi Sonuçları: Laboratuvarlar Arası Karşılaştırma

Değişken	Sıra Ort. (LAB 1)	Sıra Ort. (LAB 3)	Sıra Ort. (LAB 5)	Sıra Ort. (LAB 6)	Sıra Ort. (LAB 7)	Ki-Kare	sd	p (Anlam.)	Fark.
CO_2 (ppm)	561.89	477.56	570.38	453.24	510.86	28.310	4	0.000	Evet
Sıcaklık (°C)	582.93	542.07	442.67	463.28	642.86	55.822	4	0.000	Evet
Nem (%)	417.47	417.41	712.66	478.74	499.32	163.817	4	0.000	Evet
$PM_{0.3}$	691.76	406.21	673.15	305.57	471.31	302.575	4	0.000	Evet
$PM_{0.5}$	691.10	391.62	670.50	320.48	470.24	289.910	4	0.000	Evet
PM_1	690.97	367.70	662.25	346.15	473.28	269.587	4	0.000	Evet
$PM_{2.5}$	668.26	354.12	656.90	385.20	464.82	223.717	4	0.000	Evet
PM_5	616.91	370.58	635.23	445.18	451.28	132.087	4	0.000	Evet
PM_{10}	579.29	373.95	625.09	478.21	468.25	95.664	4	0.000	Evet

İncelenen her bir parametre (CO_2, sıcaklık, nem ve partiküller) için Çizelge 6.6'daki Kruskal-Wallis testi bulguları, beş laboratuvar arasında son derece anlamlı farklar ($p < 0,001$) olduğunu göstermektedir. Bu durum, tesisin çevresel kalitesinin değişkenlik gösterdiğini kanıtlamaktadır.

- **Partiküller**: LAB1, ince parçacıklar için en yüksek Sıra Ortalamalarına (örneğin, $PM_{0.3}$ Sıra Ortalaması: 691,76) sahip olmasıyla gösterildiği üzere, en yüksek ultra ince toz konsantrasyonuna sahiptir.
- **Nem**: LAB5, Bağıl Nem için en yüksek Sıra Ortalaması (712,66) ile en nemli ortam olmuştur.
- **Sıcaklık**: LAB7, Sıcaklık için en yüksek Sıra Ortalaması (642,86) ile incelenen laboratuvarlar arasında en sıcak olanıdır.

4.4. Yükseklikler Arası Karşılaştırma (Dikey Dağılım)

Kirleticilerin dikey tabakalaşmasını (stratifikasyonunu) değerlendirmek amacıyla 0,5, 1,2 ve 1,8 metre yüksekliklerde ölçümler alınmıştır.

Çizelge 4.7. Yüksekliğe Göre Kapsamlı İstatistiksel Analiz (Test Anlamlılıkları ve Medyan Değerleri)

LAB	Değişken	Yükselik (0.5m)	Yükselik (1.2m)	Yükselik (1.8m)	KW p (Fark)	MW p (0.5 vs 1.8)
LAB1	**CO_2**	496.0	511.0	483.0	0.411	0.777
	$PM_{0.3}$	17539.5	16040.0	16977.5	0.766	0.967
	$PM_{2.5}$	324.0	306.5	296.5	0.635	0.498
	PM_{10}	23.5	19.5	19.5	0.136	0.087
LAB3	**CO_2**	468.0	477.0	449.5	0.212	0.467
	$PM_{0.3}$	11251.0	9625.5	11510.0	0.412	0.574
	$PM_{2.5}$	190.5	166.0	174.0	0.336	0.685
	PM_{10}	16.0	13.0	15.0	0.186	0.156
LAB5	**CO_2**	505.5	509.0	478.0	0.231	0.422
	$PM_{0.3}$	16401.5	15609.5	17407.5	0.155	0.187
	$PM_{2.5}$	308.0	286.5	306.0	0.344	0.501
	PM_{10}	21.0	25.0	21.0	**0.013***	**0.003***
LAB6	**CO_2**	456.5	472.5	441.0	0.328	0.780
	$PM_{0.3}$	8937.0	9262.5	9578.5	0.204	0.468
	$PM_{2.5}$	176.0	235.0	202.0	**0.034***	0.075
	PM_{10}	15.0	24.0	17.0	**0.000***	**0.047***

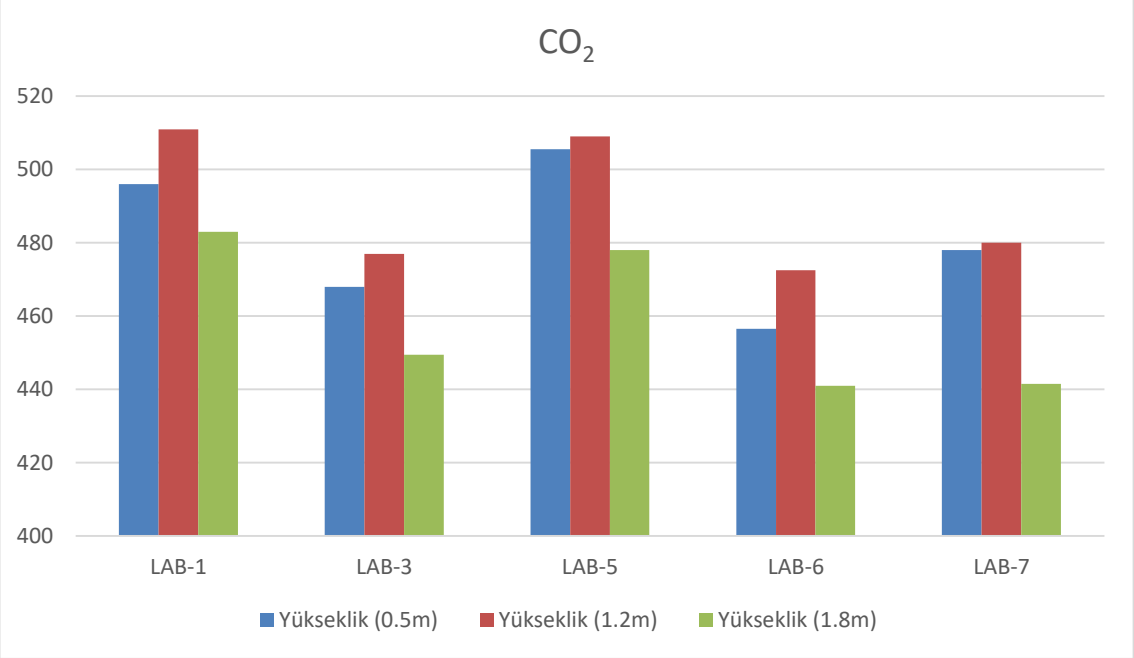
Çizelge 4.7. (Devamı)

LAB7	**CO_2**	480.5	478.0	441.5	0.062	0.517
	$PM_{0.3}$	10541.5	10263.0	10913.0	0.581	0.665
	$PM_{2.5}$	196.0	168.0	193.5	0.493	0.558
	PM_{10}	19.4	18.0	17.0	0.170	0.215

Kruskal-Wallis (KW) ve Mann-Whitney (MW) testlerinin sonuçları; LAB1, LAB3 ve LAB7'deki değişkenlerin büyük çoğunluğu için yükseklikler arasında genellikle istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığını ($p > 0,05$) göstermektedir. Bu durum, söz konusu alanların dikeyde iyi karışmış bir havaya sahip olduğunu düşündürmektedir.

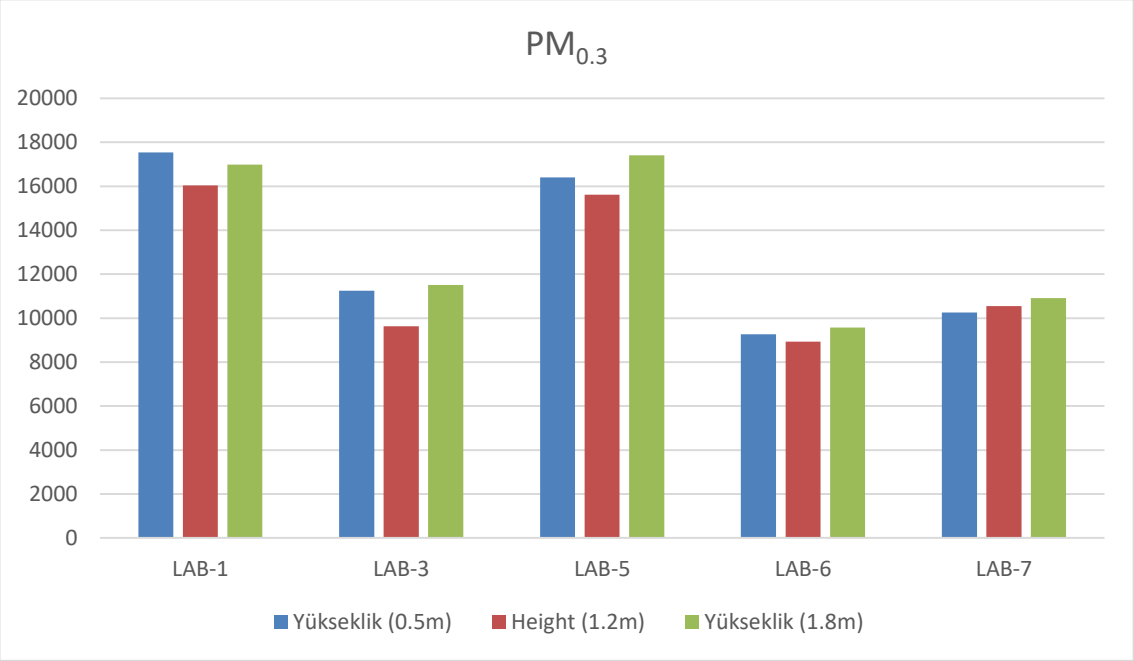
Ancak LAB5 ve LAB6 kayda değer bir tabakalaşma sergilemiştir:

- LAB5: PM_{10} anlamlı bir farklılık göstermiştir ($p=0,013$). 1,8 metre yükseklikte daha yüksek konsantrasyonlar bulunmuş olup bu durum, büyük parçacıkların tavana yakın bölgelerde biriktiğini göstermektedir.
- LAB6: PM2.5 ($p=0,034$) ve PM10 ($p<0,001$) anlamlı farklılıklar sergilemiştir. 1,8 m seviyesinde daha büyük parçacıklar daha yüksek sıralamalara sahip olma eğiliminde olup bu durum dikey tabakalaşmaya işaret etmektedir.



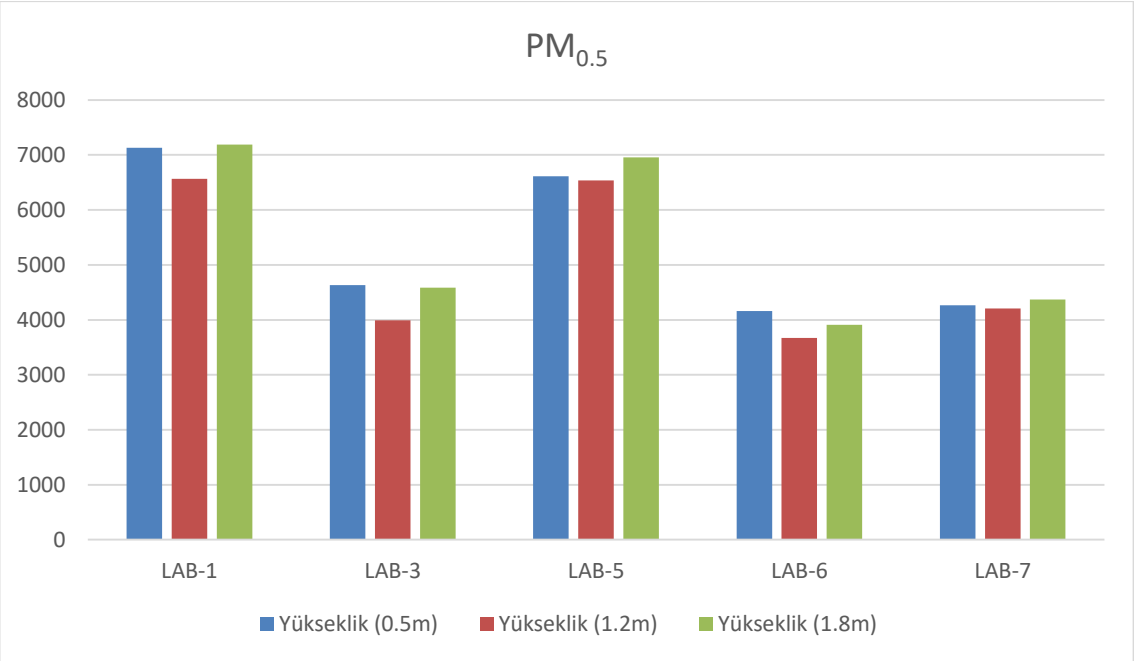
Şekil 4.1. Yüksekliğe Göre CO_2 Seviyelerinin Sütun Grafiği

Tüm laboratuvarlar için üç ölçüm seviyesi boyunca nispeten tutarlı sütun yükseklikleri sergileyen CO_2 grafiği, CO_2'in bu odalarda önemli ölçüde tabakalaşmadığı yönündeki istatistiksel sonucu desteklemektedir.



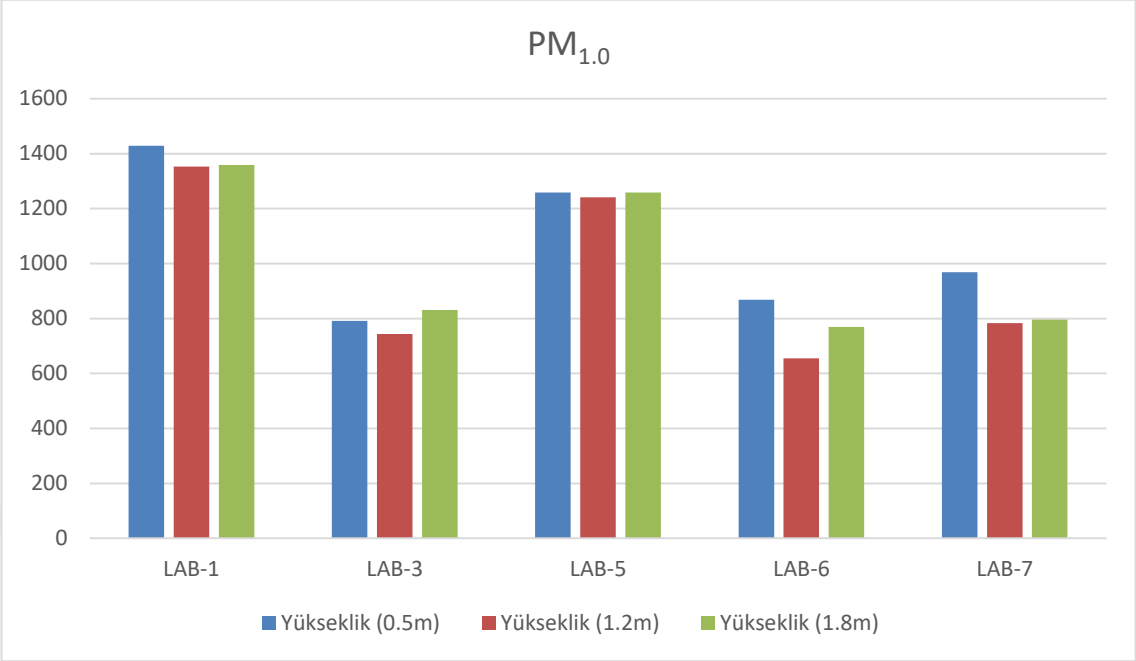
Şekil 4.2. Yüksekliğe Göre $PM_{0.3}$ Seviyelerinin Sütun Grafiği

$PM_{0.3}$ konsantrasyonları tüm yüksekliklerde sabittir. En yüksek genel sütunlarla görüldüğü üzere LAB1 ve LAB5, ince parçacıklar açısından en kirli laboratuvarlardır.



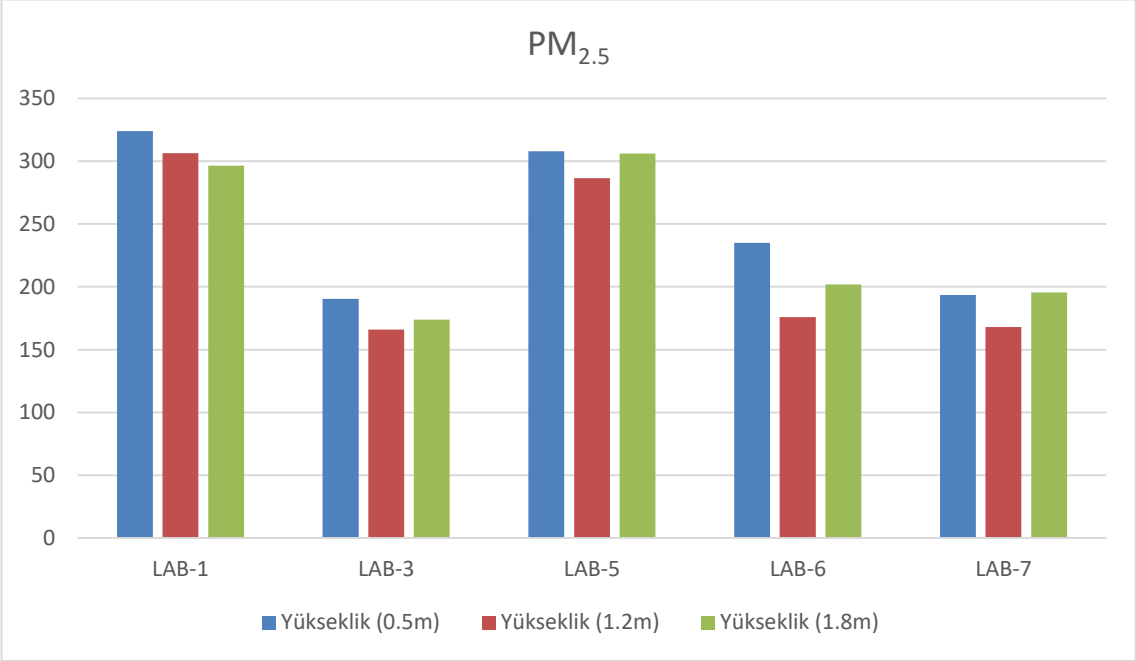
Şekil 4.3. Yüksekliğe Göre $PM_{0.5}$ Seviyelerinin Sütun Grafiği

Dağılım, $PM_{0.3}$'e benzer şekilde dikey olarak tutarlıdır.



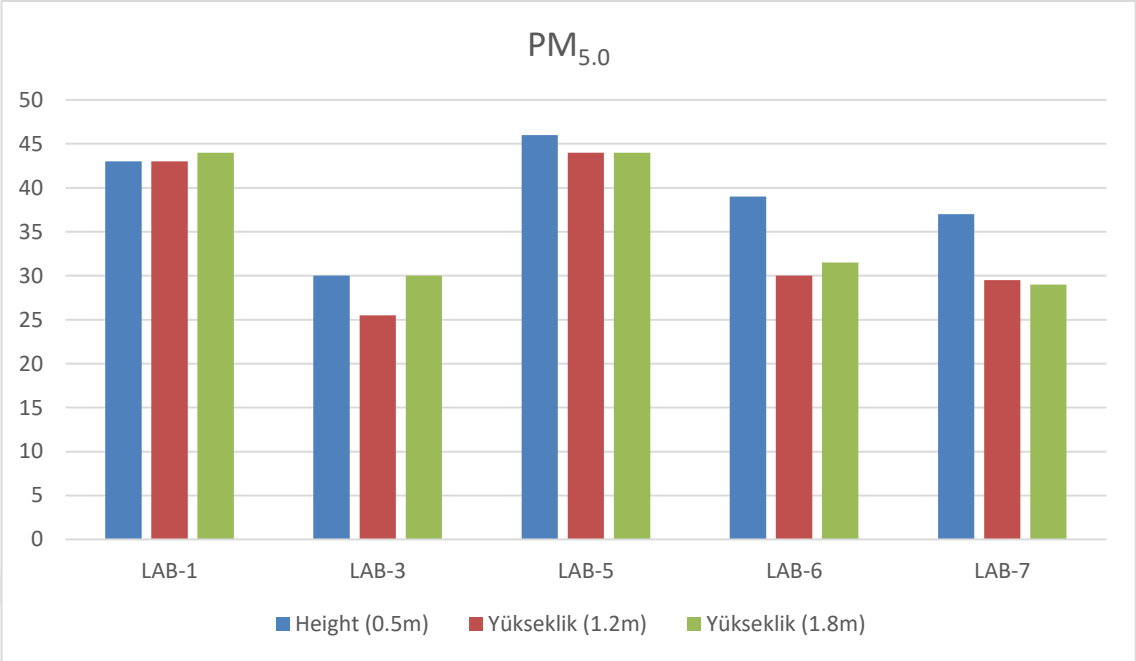
Şekil 4.4. Yüksekliğe Göre $PM_{1.0}$ Seviyelerinin Sütun Grafiği

Dikey bir homojenlik mevcuttur. En büyük konsantrasyon zirveleri LAB1'de görülmektedir.



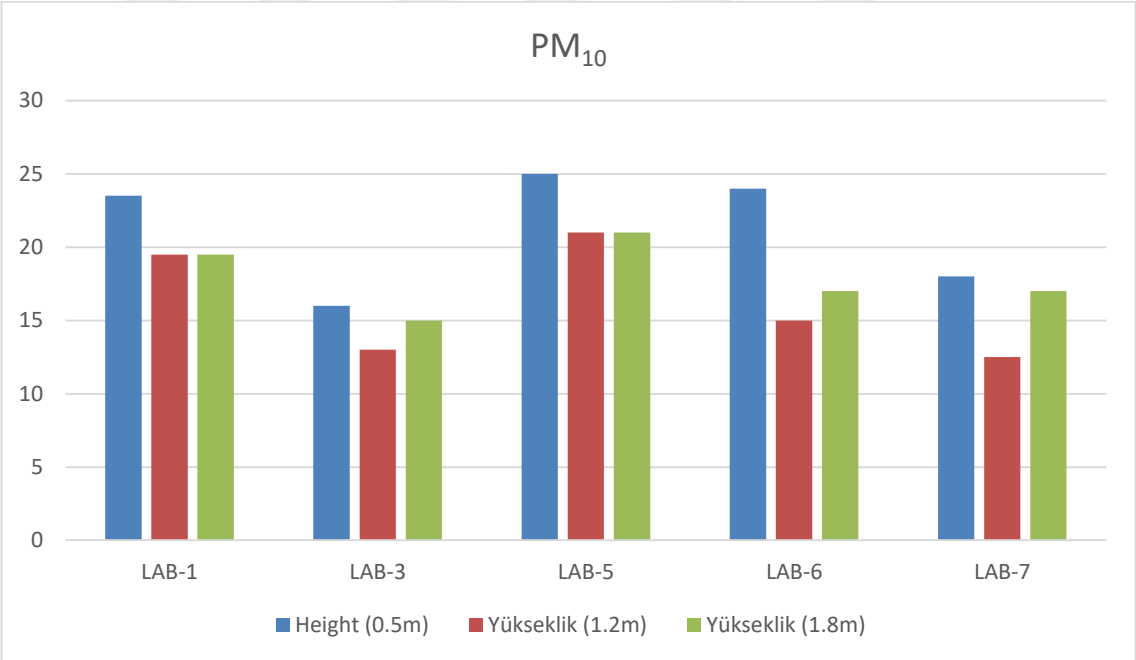
Şekil 4.5. Yüksekliğe Göre $PM_{2.5}$ Seviyelerinin Sütun Grafiği

LAB6'da 1,8 m için açıkça ayırt edilebilen sütun, bu parçacık boyutu için tabakalaşma olduğuna dair istatistiksel sonucu desteklemektedir.



Şekil 4.6. Yüksekliğe Göre $PM_{5.0}$ Seviyelerinin Sütun Grafiği

Parçacık boyutu arttıkça, LAB5 ve LAB6'da tabakalaşma daha belirgin hale gelmektedir.



Şekil 4.7. Yüksekliğe Göre PM10 Seviyelerinin Sütun Grafiği

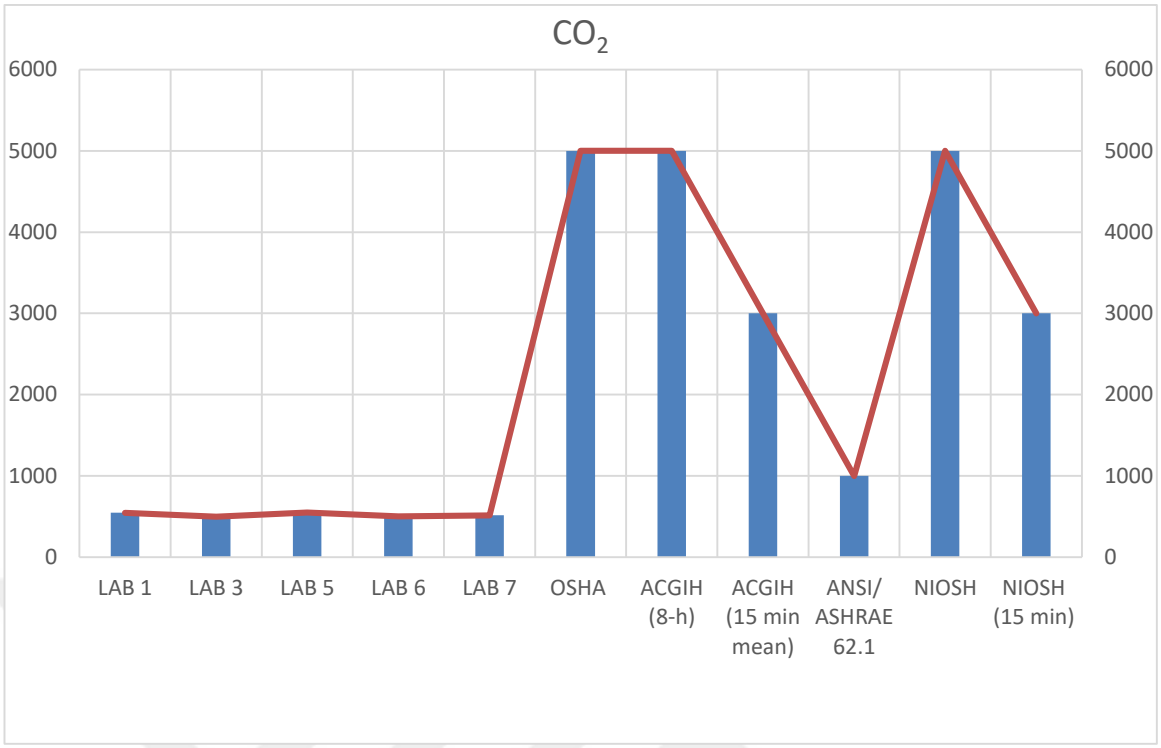
LAB5 ve LAB6'daki tabakalaşma bu grafikte belirgindir; zira 1,2 ve 1,8 metreye ait sütunlar, Çizelge 6.7'deki $p<0,05$ sonuçlarıyla uyumlu olarak 0,5 metreden önemli ölçüde farklılık göstermektedir.

4.5. Ölçümlerin Ülkelere/Standartlara Göre Karşılaştırılması

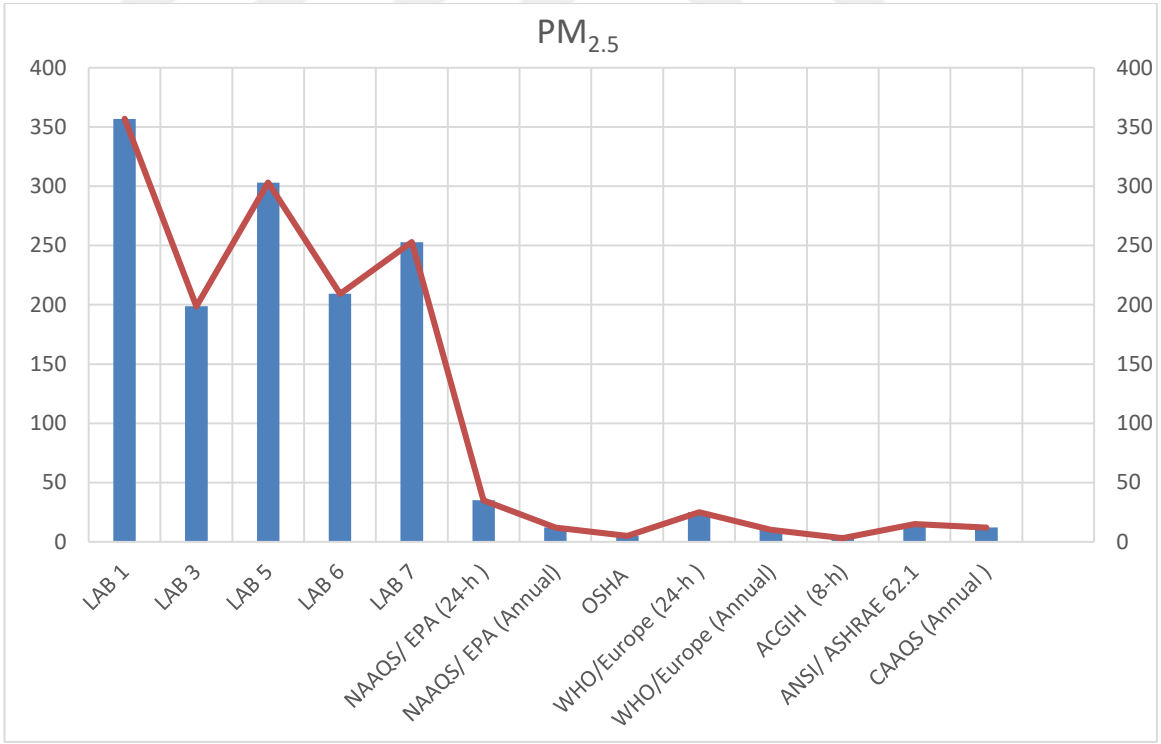
Farklı ulusların ve kuruluşların Uluslararası İç Ortam Hava Kalitesi Kılavuzları ve Standartları, bu bölümde ortalama CO_2, $PM_{2.5}$ ve PM_{10} verileriyle karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.8. CO_2, $PM_{2.5}$ ve PM_{10} Ölçümlerinin İHK Kılavuzları ve Standartları ile Karşılaştırılması

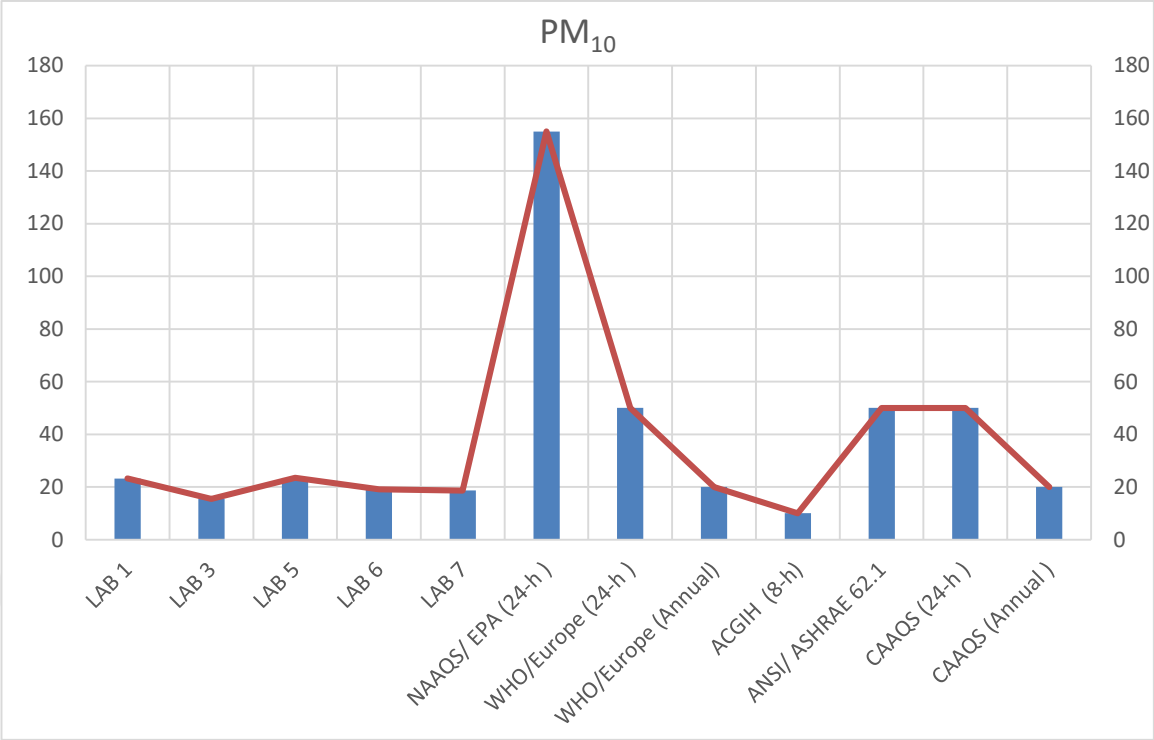
	CO_2	**$PM_{2.5}$**	**PM_{10}**
LAB 1	546.45 ppm	356.93	23.24
LAB 3	497.37 ppm	198.67	15.52
LAB 5	548.45 ppm	303.15	23.45
LAB 6	502.41 ppm	209.29	19.16
LAB 7	514.13 ppm	252.94	18.69
NAAQS/ EPA	N/A	35 (24-saatlik ort.) 12 (Yıllık ort.)	155 (24-saatlik ort.)
OSHA	5000 ppm	5	N/A
WHO/Europe	N/A	25 (24-saatlik ort.) 10 (Yıllık ort.)	50 (24-saatlik ort.) 20 (Yıllık ort.)
ACGIH	5000 ppm (8-saat) 30000 ppm (15 dk ort.)	3 (8-saat)	10 (8-saat)
ANSI/ ASHRAE 62.1	1000 ppm (iç ortam önerisi)	15	50
NIOSH	5000 ppm 3000 ppm (15 dk)	N/A	N/A
CAAQS (SCAQMD)	N/A	12 (Yıllık ort.)	50 (24-saatlik ort.) 20 (Yıllık ort.)



Şekil 4.8. İç Hava Kalitesi Yönergeleri ve Standartları ile CO2 Seviyelerinin Sütun Grafiği



Şekil 4.9. İç Hava Kalitesi Yönergeleri ve Standartları ile PM2.5 Seviyelerinin Sütun Grafiği



Şekil 4.10. İç Hava Kalitesi Yönergeleri ve Standartlarıyla PM10 Seviyelerinin Sütun Grafiği

4.6. Karşılaştırmalar ve Korelasyon Analizi

Korelasyon Katsayısı (r) Değerlendirme Kriterleri:

- 0,70 - 1,00: Güçlü Pozitif İlişki (Biri artarken diğeri de güçlü bir şekilde artar)
- 0,30 - 0,69: Orta Dereceli Pozitif İlişki
- -0,30 ila 0,30: Zayıf Doğrusal İlişki / Doğrusal İlişki Yok
- -0,69 ila -0,30: Orta Dereceli Negatif İlişki
- -1,00 ila -0,70: Güçlü Negatif İlişki (Biri artarken diğeri azalır)

Çizelge 4.9. Spearman Korelasyon Analizi Sonuçları (CO_2, Nem ve PM Karşılaştırması)

Laboratuvar	Değişken	İstatistik	CO_2	Sıcaklık	Nem	$PM_{0.3}$	$PM_{0.5}$	PM_1	$PM_{2.5}$	PM_5	PM_{10}
Lab 1	**CO_2**	r	1	0.49	-0.112	-0.269	-0.267	-0.305	-0.357	-0.418	-0.385
		p		<0.001*	0.101	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	Nem	r	-0.112	-0.306	1	0.585	0.588	0.601	0.575	0.516	0.386
		p	0.101	<0.001*		<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Lab 3	**CO_2**	r	1	-0.436	0.473	0.245	0.197	0.129	0.077	0.056	0.036
		p		<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.006*	0.075	0.289	0.440	0.622
	Nem	r	0.473	-0.212	1	0.666	0.647	0.524	0.462	0.343	0.270
		p	<0.001*	0.003*		<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Lab 5	**CO_2**	r	1	-0.035	0.294	0.128	0.171	0.259	0.397	0.304	0.310
		p		0.575	<0.001*	0.037*	0.005*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	Nem	r	0.294	-0.141	1	0.483	0.520	0.510	0.513	0.470	0.337
		p	<0.001*	0.022*		<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Lab 6	**CO_2**	r	1	-0.040	0.025	-0.062	-0.046	-0.028	-0.023	-0.063	-0.114

Çizelge 4.9. (Devamı)

		p		0.528	0.689	0.323	0.469	0.663	0.714	0.318	0.070
	Nem	r	0.025	0.224	1	0.671	0.678	0.657	0.647	0.447	0.435
		p	0.689	<0.001*		<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Lab7	**CO_2**	r	1	-0.299	0.566	0.533	0.522	0.437	0.475	0.542	0.464
		p		0.002*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	Nem	r	0.566	-0.139	1	0.665	0.668	0.630	0.636	0.615	0.575
		p	<0.001*	0.151		<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

Değişkenler arasındaki Spearman korelasyon katsayıları (r) bu tabloda derlenmiştir.

- **CO_2 İlişkileri:** LAB1'de CO_2 ile PM arasında negatif bir korelasyon (örneğin, PM10 için r = -0,385) görülürken; LAB7'de anlamlı bir pozitif korelasyon (PM10 için r = 0,464) tespit edilmiştir. Bu durum, LAB7'deki kullanıcıların (ana CO_2 kaynağı olarak) muhtemelen parçacıkların yeniden havalanmasında (resuspension) rol oynadığını düşündürmektedir. LAB6'da ise CO_2 ile PM arasında anlamlı bir ilişki (p>0,05) bulunmamıştır.

- **Nem İlişkileri:** Başta LAB1, LAB3, LAB6 ve LAB7 olmak üzere hemen hemen her laboratuvarda nem ile partikül madde arasında anlamlı ve pozitif bir korelasyon ($r > 0,50$, $p < 0,001$) belirlenmiştir. Bu durum, yüksek nem seviyelerinin muhtemelen higroskopik parçacık büyümesinin bir sonucu olarak daha büyük parçacık konsantrasyonları ile ilişkili olduğunu ima etmektedir.

4.7. İç Ortam ve Dış Ortam Hava Kalitesinin Karşılaştırılması

İç ortam koşullarının dış ortam koşullarından anlamlı düzeyde farklılık gösterip göstermediğini belirlemek amacıyla Mann-Whitney U testi uygulanmıştır.

Çizelge 4.10. İç Ortam - Dış Ortam Karşılaştırma Sonuçları

LAB	Değişken	İç Ortam Ortalaması	Dış Ortam Ortalaması	Anlam. (Fark)	Not
LAB1	**CO_2**	552 ppm	400 ppm	Evet	İç ortamda CO_2 birikimi mevcuttur.
	$PM_{2.5}$	361	241	Evet	İç ortam daha fazla parçacığa sahiptir.
	PM_{10}	23.7	12.4	Evet	İç ortamda anlamlı derecede daha fazla toz vardır.
LAB3	**CO_2**	500 ppm	400 ppm	Evet	
	$PM_{2.5}$	198	207	Hayır	İç ortam PM düzeyi dış ortama benzerdir.
	PM_{10}	15.6	12.1	Hayır	
LAB5	**CO_2**	554 ppm	400 ppm	Evet	
	$PM_{2.5}$	306	214	Evet	İç ortam daha yüksektir.
	PM_{10}	23.9	11.7	Evet	İç ortam çok daha yüksektir.
LAB6	**CO_2**	505 ppm	400 ppm	Evet	
	$PM_{2.5}$	210	165	Hayır	
	PM_{10}	19.4	10.6	Evet	İç ortam daha yüksektir (Büyük tozlar).
LAB7	**CO_2**	518 ppm	400 ppm	Evet	
	$PM_{2.5}$	253	243	Hayır	
	PM_{10}	18.8	14.8	Hayır	

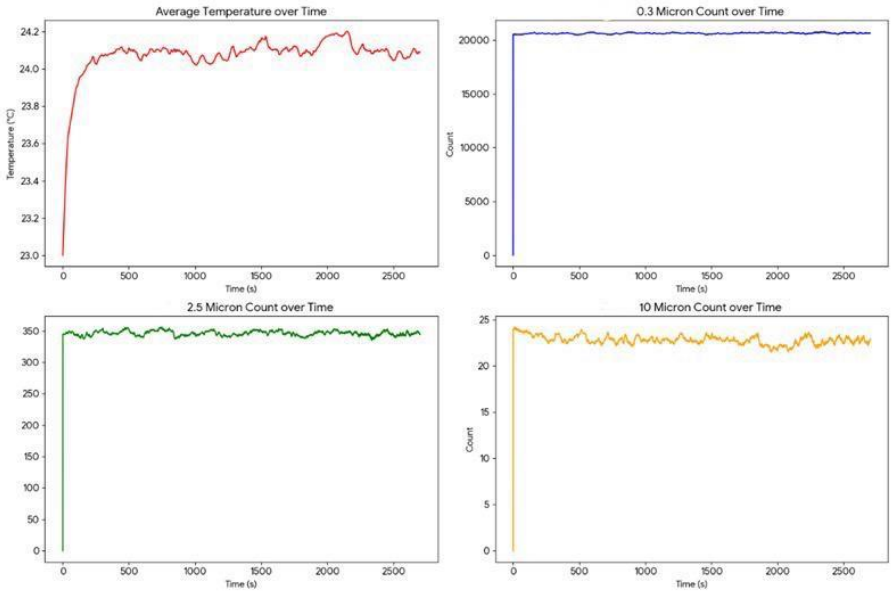
- **CO_2:** İç ve dış ortam CO_2 seviyeleri karşılaştırıldığında, tüm laboratuvarlar önemli ölçüde daha yüksek seviyeler göstermiş ("Anlam: Evet"), bu da doluluk oranının ve sınırlı havalandırmanın etkilerini doğrulamıştır.
- **Partikül Madde:**
  - **LAB1 & LAB5:** Tüm parçacık boyutları için anlamlı bir iç ortam birikimi sergilemiş olup bu durum iç kaynaklı üretim mekanizmalarına veya yetersiz filtrasyona işaret etmektedir.
  - **LAB3 & LAB7:** Dış ortamdaki parçacık seviyelerinden anlamlı bir farklılık göstermemiş ("Anlam: Hayır"), bu da içeri sızma (ingress) ile çökelme (deposition) arasında bir denge olduğunu göstermiştir.
  - **LAB6:** Kaba parçacıkların (PM_{10}) iç ortamda çok daha yüksek olduğu ancak ince parçacıkların ($PM_{2.5}$) dış ortama benzerlik gösterdiği özgün bir model sergilemiştir. Bu durum, zemin tozunun yeniden havalanmasının (floor dust resuspension) yerel spesifik bir kaynak olduğunu düşündürmektedir.

4.8. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) Analizi Bulguları

4.8.1. LAB1 bulguları ve tartışması

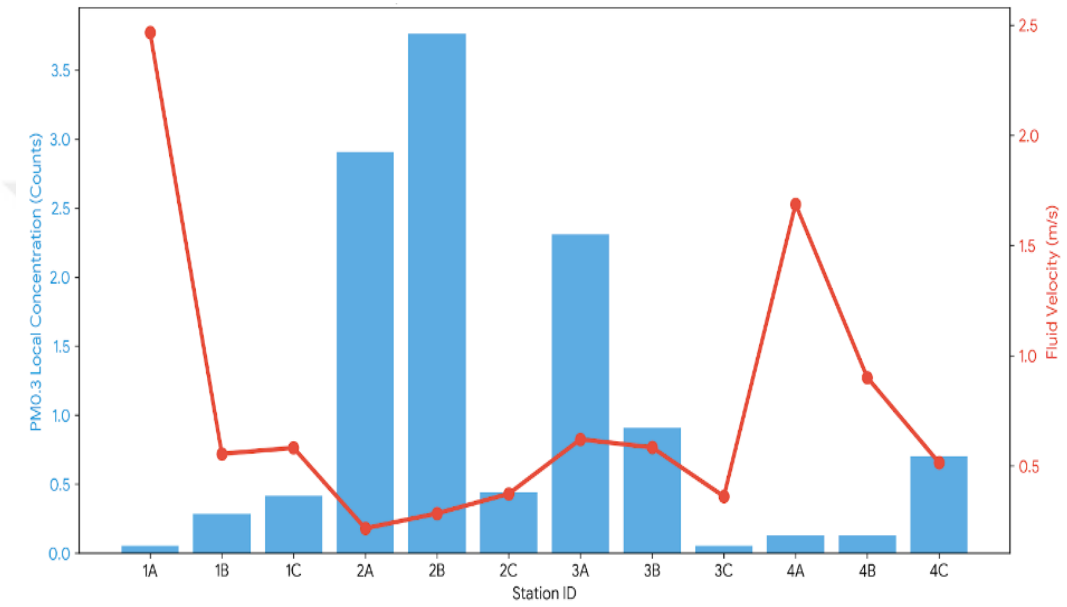
4.8.1.1. Termal ve akış alanı yakınsaması

FLOW-3D aracılığıyla yürütülen hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) modeli, LAB1'in iç ortam hava kalitesini değerlendirmede kararlı durum (steady-state) yakınsamasını başarıyla elde etmiştir. Son 100 zaman adımının (timestep) analizi, ±0.009 °C 'lik ihmal edilebilir bir standart sapma ile dalgalanan küresel ortalama akışkan sıcaklığı sayesinde mükemmel bir sayısal kararlılığa işaret etmektedir. Simüle edilen küresel ortalama sıcaklık 24.10 °C'de yakınsamıştır. Bu sonuç, normal dağılım gösteren 23.69 °C'lik (Std. Sap. = 1,60) ortalama sıcaklığı kaydeden manuel yerinde (in-situ) ölçümlerle olağanüstü bir uyum sergilemektedir.



Şekil 4.11. Laboratuvar 1'in Zamana Bağlı Çevresel Değişken Grafiği

Hız alanının mekânsal dağılımı, havalandırma konfigürasyonu tarafından dikte edilen son derece bölgesel akış dinamiklerini ortaya koymaktadır. Yüksek hızlı besleme havası yolları öncelikle İstasyon 1A ve İstasyon 4A'da gözlemlenmiş olup sırasıyla 2.46 m/s ve 1.68 m/s 'lik tepe akışkan hızları kaydedilmiştir. Aksine, bilgisayar laboratuvarının merkezi bölgesi önemli bir momentum kaybına uğramakta ve bu durum kritik durgunluk (stagnation) bölgelerine yol açmaktadır. Bu merkezi alanlardaki akışkan hızları önemli ölçüde düşerek İstasyon 2A'da en düşük 0.21 m/s ve İstasyon 2B'de 0.28 m/s değerlerini kaydetmiştir.



Şekil 4.12. LAB1 İstasyonları Genelinde Hız ile PM0.3 Birikimi Karşılaştırmalı Sütun Grafiği

4.8.1.2. Temel durum partikül madde konsantrasyonları

Simülasyon, fiziksel ortamda ölçülen temel durum partikül madde (PM) konsantrasyonları ile güçlü bir nicel uyum göstermiştir. Sayısal model, üretim kaynağı terimleri ile havalandırma egzoz oranları arasında kararlı durum dengesine ulaştığında, CFD modelinden elde edilen küresel ortalamalar yerinde yapılan manuel ölçümlerle yakından eşleşmiştir.

Çizelge 4.11. CFD Temel Durum Parametrelerinin Doğrulanması (LAB 1)

Parametre	Manuel Ölçüm (Ortalama ± Std. Sap.)	CFD Simülasyon Ortalaması (Kararlı Durum)	Mutlak Fark	Yüzdelik Fark
Sıcaklık (°C)	23.69 ± 1.60	24.10	0.41 °C	1.73%
$PM_{0.3}$ (Adet)	20,630 ± 12,405	20,084	546	2.65%
$PM_{2.5}$ (Adet)	356.9 ± 187.1	347.0	9.9	2.77%
PM_{10} (Adet)	23.2 ± 13.2	22.7	0.5	2.15%

Simülasyonda kaydedilen kararlı durum küresel ortalamaları, simülasyonu tanımlayan temel parametrelerin LAB1'in temel emisyon özelliklerini başarıyla yakaladığını ve tüm varyasyonların %3'lük bir fark sınırının altında kaldığını göstermektedir.

4.8.1.3. PM'in mekânsal dağılımı ve istatistiksel dağılımı

Doğrulanmış CFD simülasyonu, manuel veri toplama aşamasında gözlemlenen normal olmayan istatistiksel dağılıma dair kritik açıklamalar sunmaktadır. Manuel verilerin Kolmogorov-Smirnov (K-S) normallik testleri; $PM_{0.3}$, $PM_{2.5}$ ve PM_{10} dağılımlarının önemli ölçüde sağa çarpık (örneğin, $PM_{0.3}$ çarpıklığı = 1,338) ve istatistiksel olarak normal olmadığını ($p < 0,05$) göstermiştir.

FLOW-3D parçacık izleme sonuçları bu istatistiksel varyansı fiziksel olarak açıklamaktadır. Simülasyon, partikül maddenin laboratuvar genelinde homojen bir şekilde dağılmadığını; aksine, belirlenen düşük hızlı durgunluk bölgelerinde yoğun bir şekilde kümelendiğini doğrulamaktadır.

Çizelge 4.12. Kararlı Durumda Mekânsal Hız ve PM Dağılımı (LAB 1)

İstasyon ID	Akışkan Hızı (m/s)	$PM_{0.3}$ Konsantrasyonu	$PM_{2.5}$ Konsantrasyonu	PM_{10} Konsantrasyonu
1A	2.47	0.05	0.00	0.00
1B	0.56	0.29	0.01	0.00
1C	0.58	0.42	0.00	0.00
2A	0.22	2.91	0.04	0.00

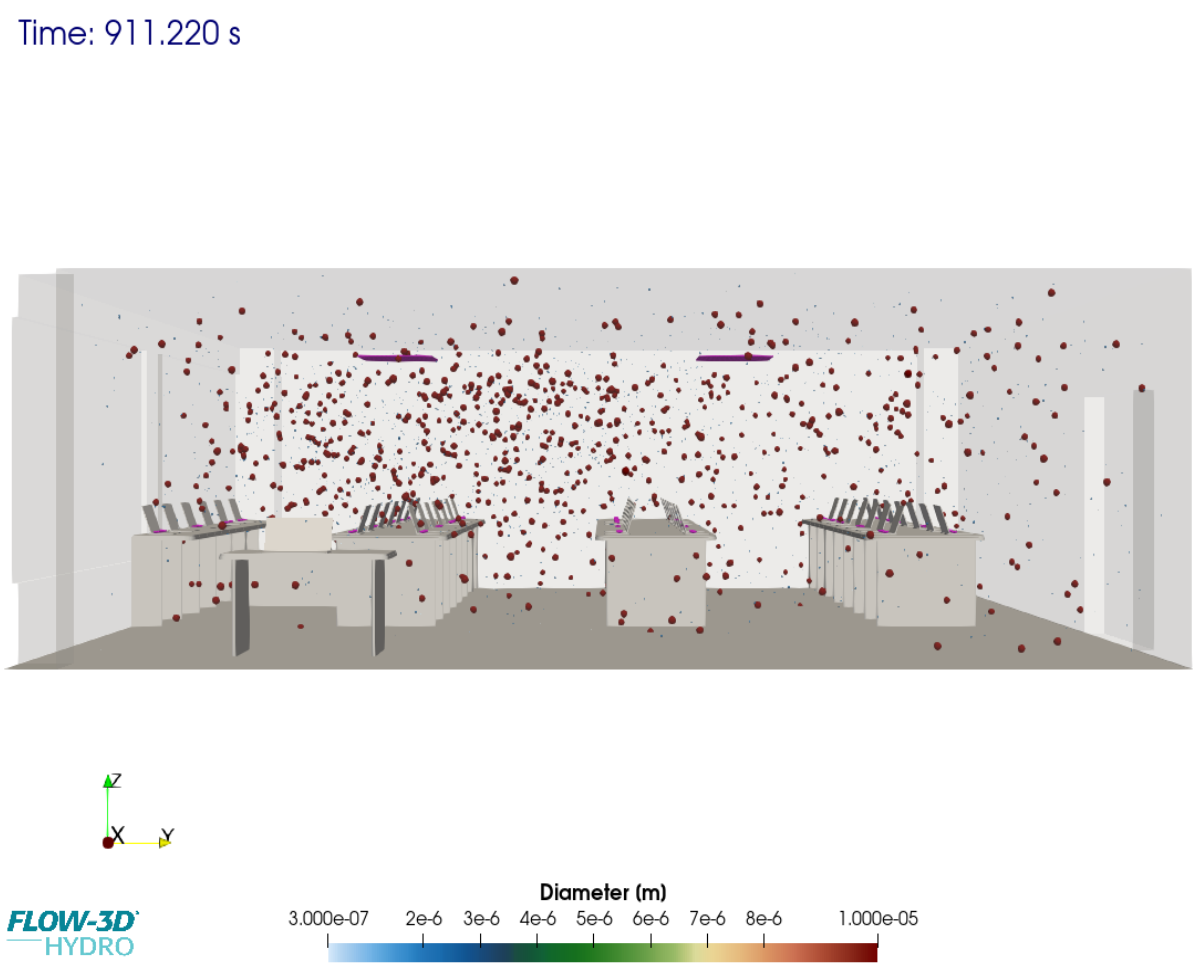
Çizelge 4.12. (Devam)

İstasyon ID	Akışkan Hızı (m/s)	$PM_{0.3}$ Konsantrasyonu	$PM_{2.5}$ Konsantrasyonu	PM_{10} Konsantrasyonu
2B	0.28	3.76	0.07	0.01
2C	0.37	0.44	0.01	0.00
3A	0.62	2.31	0.05	0.00
3B	0.58	0.91	0.01	0.00
3C	0.36	0.05	0.01	0.00
4A	1.69	0.13	0.00	0.00
4B	0.90	0.13	0.00	0.00
4C	0.51	0.70	0.00	0.00

Çizelge 4.12 ve ilgili çift eksenli görselleştirmede ayrıntılı olarak açıklandığı üzere, İstasyon 2B ana birikim düğümü (node) olarak işlev görmekte ve en yüksek yerel PM konsantrasyonlarını sergilemekte, bunu yakından İstasyon 2A ve 3A takip etmektedir. Yüksek hızlı bölgeler (İstasyon 1A gibi) parçacıkları etkili bir şekilde uzaklaştırarak sıfıra yakın yerel sayımlara yol açtığından, fiziksel laboratuvar içindeki sensör yerleşimindeki herhangi bir mekânsal varyasyon yoğun şekilde çarpık veriler üretecektir. Bu nedenle, manuel testlerde kaydedilen aşırı standart sapmalar ve sağa çarpıklık, laboratuvarın merkezi durgunluk bölgelerindeki yetersiz havalandırma ulaşımının doğrudan bir fiziksel sonucudur; bu da hem ampirik ölçümleri hem de CFD modelinin tahmin yeteneğini doğrulamaktadır.

4.8.1.4. Partikül madde dağılımının zamansal-mekânsal evrimi (CFD Görsel Analizi- LAB1)

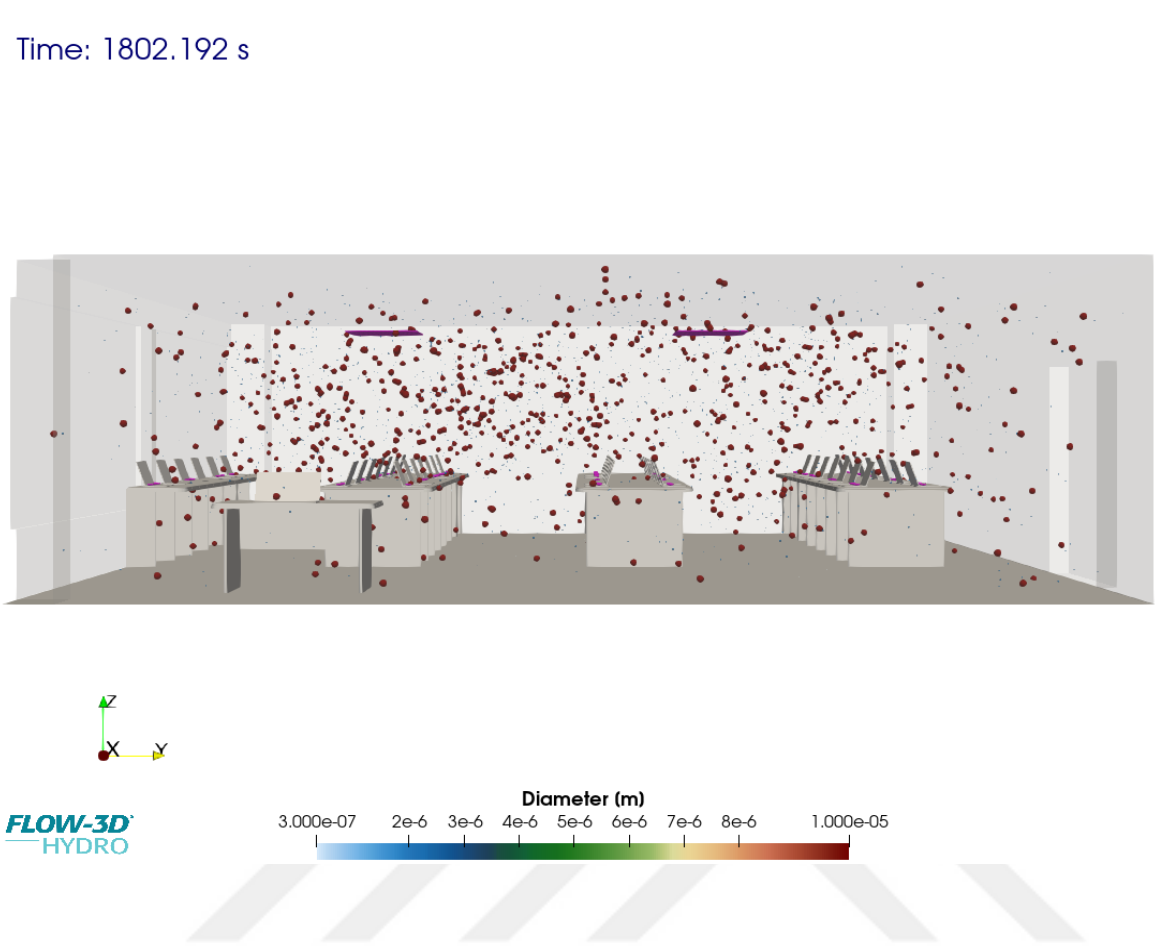
İstatistiki bulguları görsel olarak doğrulamak ve iç ortam kirleticilerinin geçici (transient) davranışını anlamak amacıyla, FLOW-3D hesaplamalı modelinden üç farklı zaman dönüm noktasında partikül madde mekânsal dağılımı çıkarılmıştır: 900 saniye (15 dakika), 1800 saniye (30 dakika) ve 2700 saniye (45 dakika). Elde edilen konsantrasyon konturları, havada asılı parçacıkların uzun bir çalışma süresi boyunca laboratuvarın spesifik hava akışı topolojisiyle nasıl etkileşime girdiğine dair net bir grafik gösterim sağlamaktadır.



Şekil 4.13. Laboratuvar 1 — PM konsantrasyon dağılımı, T=900 sn (Akış 3D simülasyonu)

İlk Dağılım Aşaması (t = 900 s)

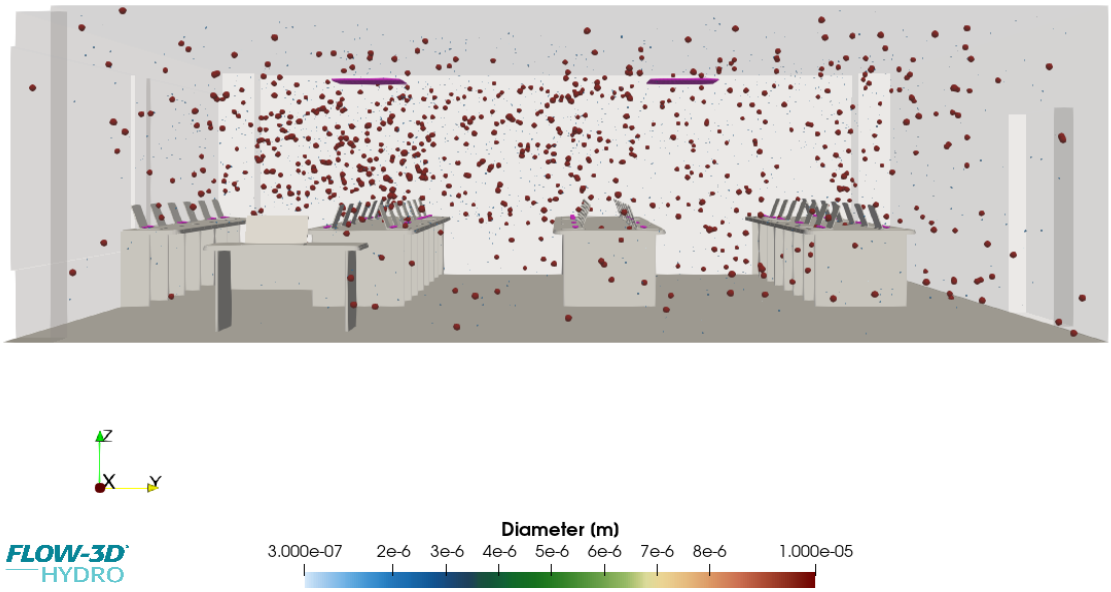
Şekil 4.13, LAB1 içindeki partikül maddenin erken birikim ve dağılım aşamasını göstermektedir. 900. saniyede, iç kaynaklardan gelen sürekli parçacık emisyonu birincil havalandırma akımlarıyla etkileşime girmeye başlar. Kontur haritası, üretim bölgelerinin yakınında oluşan orta düzeyde parçacık konsantrasyonuna sahip yerel cepleri (maviden yeşil/sarı konturlara geçişle gösterilen) sergilemektedir. Ancak, HVAC sistemi ilk yükü aktif olarak seyrelttiği için genel mekânsal hacim nispeten kirlenmemiş durumdadır. Yüksek hızlı besleme havası yolları, ani yerel birikimi önleyen süpürme bölgelerini açıkça oluşturmaktadır.



Şekil 4.14. Laboratuvar 1 — PM konsantrasyon dağılımı, T=1800sn (Akış 3B simülasyonu)

Ara Birikim Aşaması (t = 1800 s)

Simülasyon 1800 saniyeye ilerledikçe (Şekil 6.14), mekânsal dağılımda belirgin bir kayma görünür hale gelir. Erken aşamada gözlemlenen üniform dağılım, son derece tabakalı yatay bölgelere dönüşür. Parçacık konsantrasyonu laboratuvarın merkezi ve arka bölümlerinde önemli ölçüde yoğunlaşır (turuncu ve kırmızı konturlara geçiş). Bu görsel kanıt, besleme havasının "momentum kaybını" açıkça ortaya koymaktadır; taze hava oda merkezine ulaşmadan önce kinetik enerjisini kaybetmekte, bu da parçacıkların bu oda ortası bölgelerde hapsolmasına ve birikmesine neden olmaktadır.



Şekil 4.15. Laboratuvar 1 — PM konsantrasyon dağılımı, T=2700sn (Akış 3B simülasyonu)

Kararlı Durum Dengesi (t = 2700 s)

Şekil 4.15, 2700. Saniyedeki kararlı duruma yakın koşulu yakalamaktadır. Bu aşamada sistem, parçacık üretimi ile havalandırma egzozu arasında dinamik bir dengeye ulaşmıştır. Görsel veriler, önceki bölümlerde elde edilen istatistiksel bulguları mükemmel bir şekilde desteklemektedir:

1. **Yatay Durgunluk:** Koyu kırmızı hacimsel bulutlar, durgunluk bölgelerinin fiziksel konumlarıyla (daha önce istatistiksel olarak İstasyon 2A, 2B ve 3A olarak tanımlanan) mükemmel bir şekilde eşleşmektedir. Odanın merkezindeki hava, birincil havalandırma döngüsünden etkili bir şekilde kesilmiştir; bu da bu alanlarda oturan kullanıcılar için maksimum yerel kirletici maruziyeti ile sonuçlanmaktadır.

2. **Açık Havalandırma Yolları:** Aksine, besleme havası difüzörlerinin hemen yakınındaki alanlar (koyu mavi konturlarla karakterize edilen) partikül maddeden neredeyse tamamen arınmış durumdadır; bu da sağlanan toplam hava hacmi yeterli olsa bile, oda geometrisi boyunca dağılımının son derece verimsiz olduğunu doğrulamaktadır.

3. **Dikey Karışım:** Özellikle yoğun birikim bölgelerinde (kırmızı bulutlar), kirletici dağılımı hacimsel olarak kalın görünmekte, zeminden solunum bölgelerine doğru

dikey olarak uzanmaktadır. Bu görsel yayılım, LAB1'in 0,5 m, 1,2 m ve 1,8 m yükseklikleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir tabakalaşma olmaksızın dikeyde iyi karışmış bir havaya sahip olduğu sonucuna varan Bölüm 6.4'teki Kruskal-Wallis testi sonuçlarını desteklemektedir. LAB1'deki parçacıklar dikey olarak değil, yatay olarak havuzlanmaktadır.

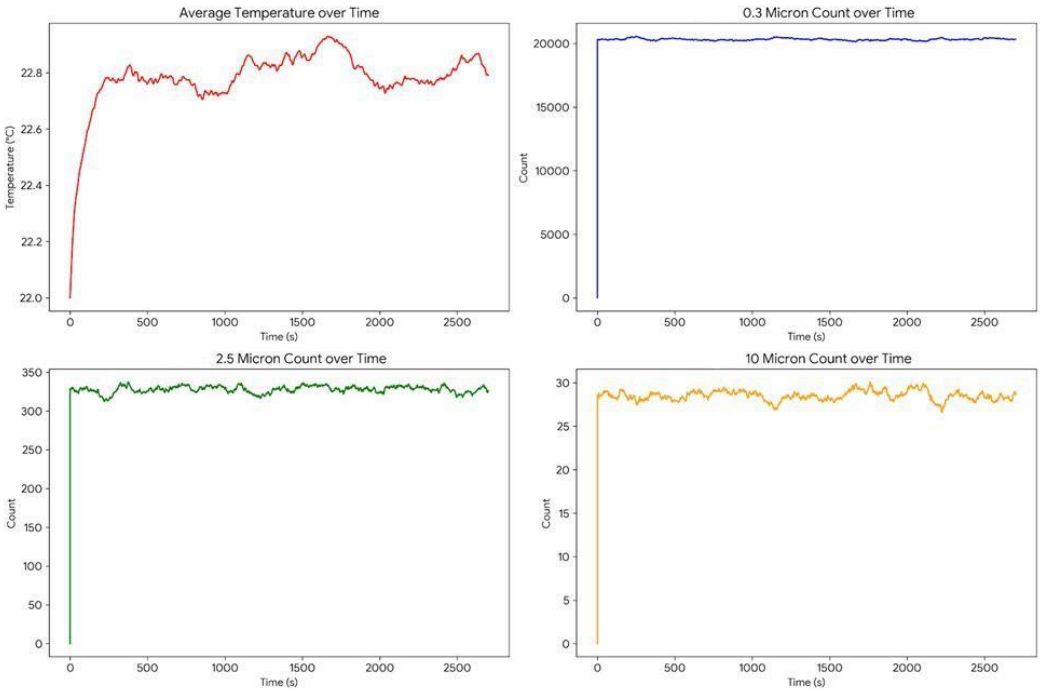
Görsel Analizin Sonucu

Zamansal-mekânsal görsel analiz, LAB1'deki zayıf iç ortam hava kalitesinin kesinlikle yetersiz toplam havalandırma hacminin bir sonucu olmadığını, aksine hava dağıtımındaki ciddi bir geometrik başarısızlık olduğunu doğrulamaktadır. HVAC konfigürasyonu merkezdeki işgal edilen bölgelere nüfuz edememekte, bu da aynı oda içinde merkezde oturan kullanıcıların çevredekilerden çok daha yüksek kirletici yüklerine maruz kaldığı belirgin mikro ortamlar yaratmaktadır.

4.8.2. LAB 6 bulguları ve tartışması

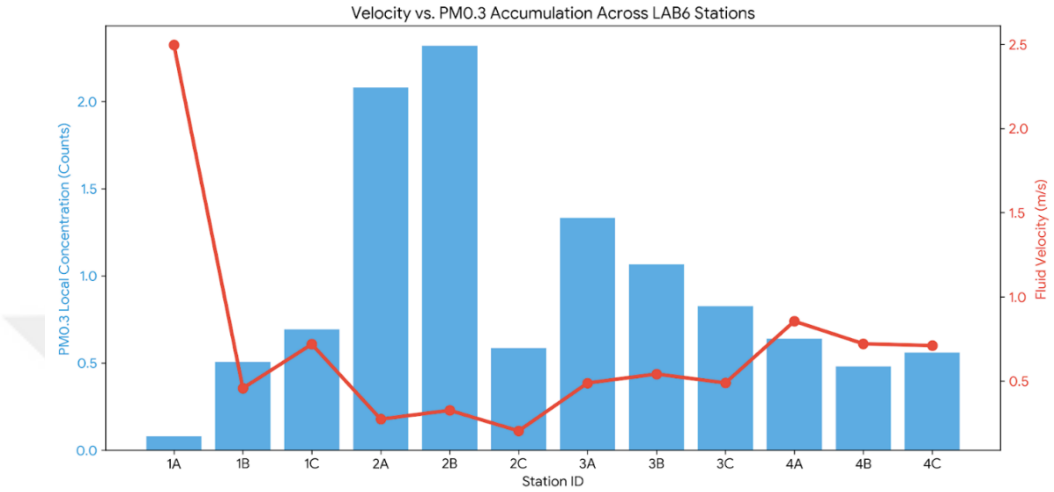
4.8.2.1. Termal ve akış alanı yakınsaması

LAB6 için FLOW-3D aracılığıyla yürütülen hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli, yüksek sayısal kararlılıkla kararlı durum yakınsamasını elde etmiştir. Son 100 zaman adımının analizi, küresel ortalama akışkan sıcaklığının ±0.011 °C'lik ihmal edilebilir bir standart sapma ile 23.18 °C'de stabilize olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, 22,94 °C'lik bir ortalama sıcaklık (Std. Sap. = 1,75) kaydeden LAB6'ya ait manuel yerinde ölçümlerle yakından örtüşmektedir.



Şekil 4.16. Laboratuvar 6'in Zamana Bağlı Çevresel Değişken Grafiği

LAB6'daki hız alanı dağılımı, havalandırma difüzörlerinden kaynaklanan yüksek momentumlu bir birincil akış yolunu ortaya koymakta ve İstasyon 1A'da 2,50 m/s'lik bir tepe hız kaydedilmektedir. Ancak, laboratuvarın merkezi ve alt bölgeleri önemli bir momentum kaybına uğramaktadır. Kullanıcıların bulunduğu alanlarda, akışkan hızları İstasyon 2C'den itibaren en düşük 0,20 m/s değerine düşerek havada asılı duran kirleticilerin yerel olarak birikmesine elverişli koşullar yaratmaktadır.



Şekil 4.17. LAB6 İstasyonları Genelinde Hız ile PM0.3 Birikimi Karşılaştırmalı Sütun Grafiği

4.8.2.2. Temel durum partikül madde konsantrasyonları

LAB6 simülasyonundaki partikül madde için kararlı durum küresel ortalamaları, manuel veri toplama aşamasında ölçülen temel durum konsantrasyonları ile güçlü bir nicel uyum sergilemiştir. İç kaynak terimleri ile havalandırma egzoz oranları arasında sayısal denge sağlandığında, CFD modeli fiziksel laboratuvarın çevresel yükünü başarıyla yansıtmıştır.

Çizelge 4.13. CFD Temel Durum Parametrelerinin Doğrulanması (LAB 6)

Parametre	Manuel Ölçüm (Ortalama ± Std. Sap)	CFD Simülasyon Ortalaması (Kararlı Durum)	Mutlak Fark	Yüzdelik Fark
Sıcaklık (°C)	22.94 ± 1.75	23.18	0.24 °C	1.046%
$PM_{0.3}$ (Adet)	9,264 ± 5,253	9,446	182	1.964%
$PM_{2.5}$ (Adet)	209.29 ± 106.88	204.5	4.79	2.29%
PM_{10} (Adet)	19.16 ± 11.86	18.7	0.46	2.40%

Simüle edilen ve manuel veri setleri arasındaki paralellik, sayısal modelin LAB6 ortamının temel emisyon özelliklerini etkili bir şekilde yakaladığını ve tüm varyasyonların %3'lük bir sınır içinde kaldığını göstermektedir.

4.8.2.3. PM'in mekânsal dağılımı ve istatistiksel dağılımı

Kalibre edilmiş simülasyon, manuel ölçümlerde gözlemlenen normal olmayan istatistiksel dağılım için fiziksel bağlam sağlamaktadır. LAB6 için Kolmogorov-Smirnov (K-S) testleri; $PM_{0.3}$, $PM_{2.5}$ ve PM_{10}'un önemli ölçüde sağa çarpık ve istatistiksel olarak normal olmadığını ($p < 0,05$) göstermiştir.

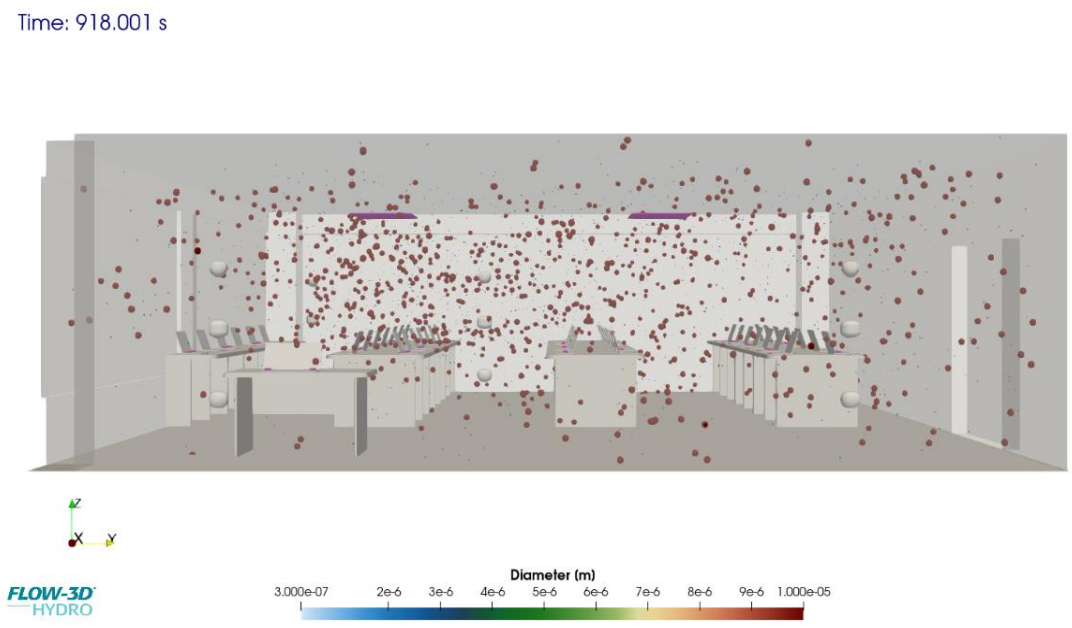
FLOW-3D sonuçları, bu çarpıklığın ciddi **Dikey Tabakalaşma** ve yatay durgunluk bölgelerinden kaynaklandığını ortaya koymaktadır. İnce parçacıklar ($PM_{0.3}$) nispeten dağılmış durumdayken, daha büyük parçacıklar (PM_{10}) düşük hızlı alanlarda havuzlanma eğilimindedir. İstasyon 2B, en yüksek yerel PM konsantrasyonlarını gösteren birincil birikim düğümü olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 4.14. Kararlı Durumda Mekânsal Hız ve PM Dağılımı (LAB 6)

İstasyon ID	Akışkan Hızı (m/s)	$PM_{0.3}$ Konsantrasyonu	$PM_{2.5}$ Konsantrasyonu	PM_{10} Konsantrasyonu
1A	2.50	0.08	0.00	0.00
1B	0.46	0.51	0.01	0.00
1C	0.72	0.69	0.01	0.00
2A	0.27	2.08	0.04	0.00
2B	0.33	2.32	0.03	0.01
2C	0.20	0.59	0.00	0.00
3A	0.49	1.33	0.02	0.00
3B	0.54	1.07	0.02	0.00
3C	0.49	0.83	0.02	0.00
4A	0.86	0.64	0.01	0.00
4B	0.72	0.48	0.00	0.00
4C	0.71	0.56	0.01	0.00

4.8.2.4. Partikül madde dağılımının zamansal-mekânsal evrimi ve tabakalaşması (CFD görsel analizi- LAB6)

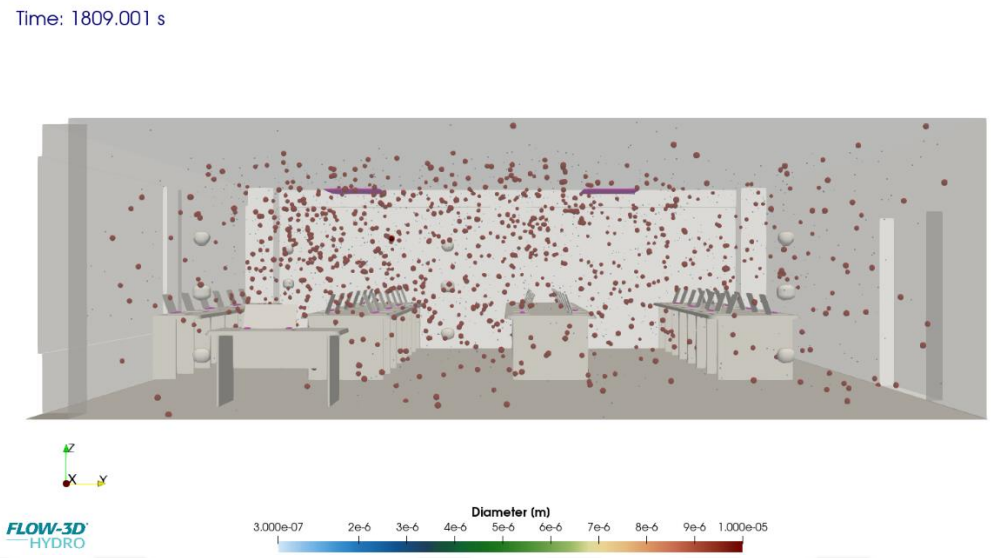
LAB6'nın belirgin istatistiksel bulgularını —özellikle aşırı PM_{10} basıklığını ve anlamlı dikey tabakalaşmayı— görsel olarak doğrulamak amacıyla, partikül maddenin mekânsal dağılımı 900 saniye, 1800 saniye ve 2700 saniyede FLOW-3D modelinden çıkarılmıştır. Elde edilen konsantrasyon konturları, havada asılı parçacıkların uzun bir çalışma süresi boyunca laboratuvarın spesifik termal ve aerodinamik topolojisiyle nasıl etkileşime girdiğine dair net bir grafik gösterim sunmaktadır.



Şekil 4.18. Laboratuvar 6 — PM konsantrasyon dağılımı, T=900sn (Akış 3B simülasyonu)

İlk Dağılım Aşaması (t = 900 s)

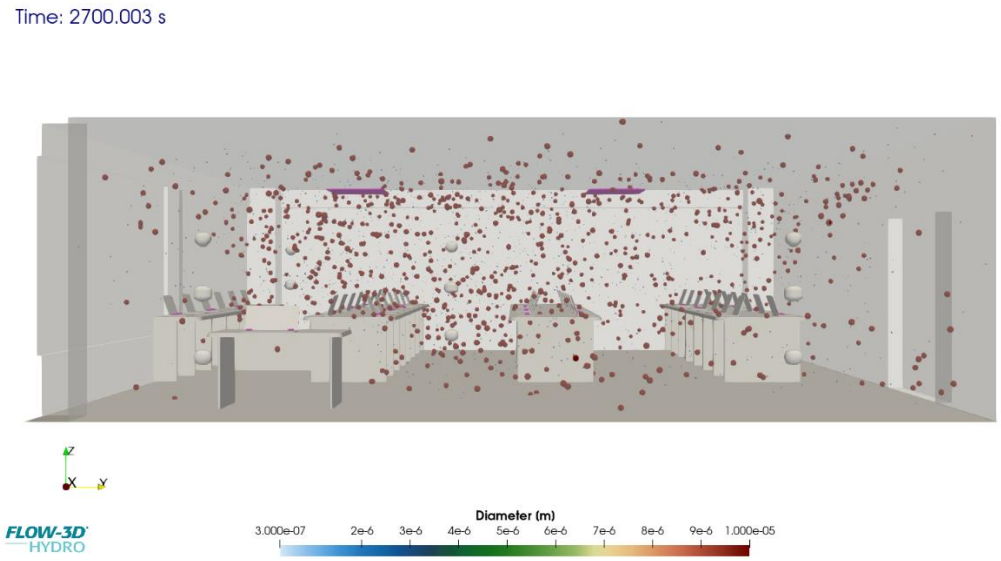
Şekil 4.18, laboratuvar alanının ilk aerodinamik tepkisini yakalamaktadır. Parçacıkların durgunlaşmadan önce nispeten düzgün dağıldığı diğer test ortamlarının aksine LAB6, ani bir yerel türbülans sergilemektedir. Kontur haritası; hem giriş hızları hem de aktif bilgisayar çalışma istasyonlarından yükselen ilk termal bacalar (thermal plumes) tarafından yönlendirilen, alt sınır tabakasından (zemin seviyesi) yukarı doğru kalkan partikül maddeyi göstermektedir. Bu 15 dakikalık işarette, yüksek hızlı besleme havası alanı aktif olarak seyreltmeye çalışmakta, ancak kaba tozun (PM10) belirgin cepleri taze hava akımlarıyla iyice karışmak yerine izole olmaya başlamaktadır.



Şekil 4.19. Laboratuvar 6 — PM konsantrasyon dağılımı, T=1800sn (Akış 3B simülasyonu)

Ara Birikim ve Tabakalaşma Aşaması (t = 1800 s)

1800 saniyeye gelindiğinde (Şekil 6.19), LAB6'nın benzersiz akış dinamikleri görsel olarak belirgin hale gelir. Simülasyon, yoğunlaşmış elektronik ekipman ısı yükü tarafından üretilen güçlü termal yukarı akımları (updrafts) ortaya koymaktadır. Bu termal bacalar, asılı duran partikül maddeyi yukarı doğru taşımaktadır. Ancak, HVAC difüzörlerinden gelen aşağı doğru momentumun yetersiz olması nedeniyle belirgin bir dikey tabakalaşma ortaya çıkmaktadır. Görsel konturlar, daha büyük parçacık fraksiyonlarının odanın üst katmanlarında (1,8 m düzlemine yaklaşırken) hapsolduğunu göstermektedir. Bu görsel kanıt, parametrik olmayan testlerin şiddetli dikey PM_{10} farklılıklarını ($p < 0,001$) doğruladığı önceki bölümlerde belirlenen istatistiksel anlamlılığı mükemmel bir şekilde desteklemektedir.



Şekil 4.20. Laboratuvar 6 — PM konsantrasyon dağılımı, T=2700sn (Akış 3B simülasyonu)

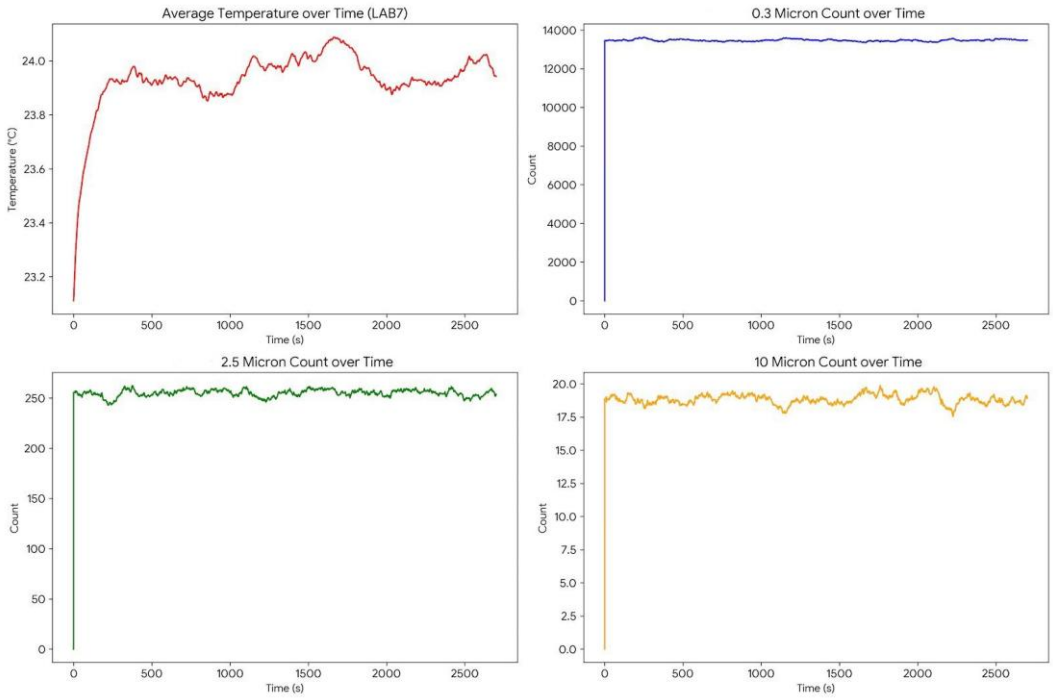
Kararlı Durum Dengesi ve Durgunluk (t = 2700 s)

Şekil 6.20, 45. dakikadaki kararlı durum dengesini göstermektedir. Görsel veriler, manuel veri toplama aşamasında kaydedilen büyük istatistiksel aykırı değerleri (PM_{10} için 7,763'lük basıklık) zarif bir şekilde açıklamaktadır. Parçacıklar çökelmemiş; bunun yerine üst seviye durgunluk bölgelerinde ve merkezi yatay ölü bölgelerde (özellikle İstasyon 2A, 2B ve 3A çevresinde) yakalanmışlardır. HVAC sistemi difüzörlerin hemen yakınını başarıyla temizlemekte (sayımları sıfıra yakın değerlere düşen İstasyon 1A gibi), ancak üst solunum bölgelerinde asılı duran tabakalı toz katmanını dağıtmada tamamen başarısız olmaktadır. Bu durum, sağlanan toplam hava hacmi yeterli olsa bile dağıtım stratejisinin son derece verimsiz olduğunu ve bilgisayarların oluşturduğu termal kaldırma kuvvetinin (buoyancy) üstesinden gelemediğini doğrulamaktadır.

4.8.3. LAB7 bulguları ve tartışması

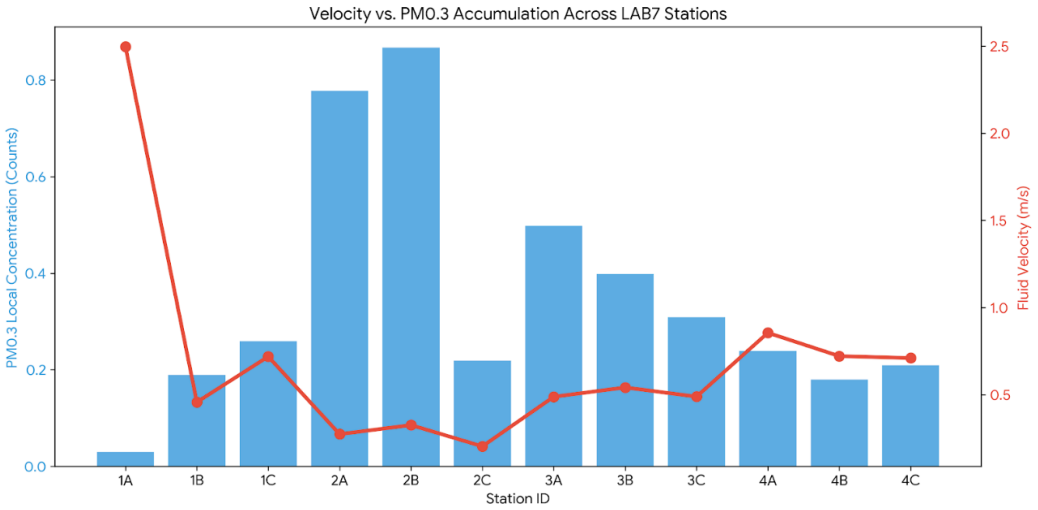
4.8.3.1. Termal ve akış alanı yakınsaması

LAB7 için FLOW-3D aracılığıyla yürütülen hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli, güçlü bir kararlı durum yakınsaması elde etmiştir. Son 100 zaman adımının analizi, manuel yerinde ölçümlerle (ortalama sıcaklık 23,92 °C) eşleşecek şekilde küresel ortalama akışkan sıcaklığının 24,3°C civarında sıkı bir şekilde stabilize olduğunu ve mükemmel bir sayısal kararlılığa işaret ettiğini göstermektedir.



Şekil 4.21. Laboratuvar 7'in Zamana Bağlı Çevresel Değişken Grafiği

Hız alanının mekânsal dağılımı belirgin hava akışı dinamiklerini ortaya koymaktadır. Yüksek hızlı besleme havası yolları öncelikle İstasyon 1A'da gözlemlenmiş ve 2,50 m/s'lik bir tepe akışkan hızı kaydedilmiştir. Aksine, laboratuvarın merkezi ve çevre bölgeleri hızlı bir momentum kaybına uğramıştır. Akışkan hızları İstasyon 2A'da en düşük 0,27 m/s ve İstasyon 2C'den itibaren and 0,20 m/s değerlerine düşerek kirletici birikimine elverişli kritik yatay durgunluk bölgeleri oluşturmuştur.



Şekil 4.22. LAB7 İstasyonları Genelinde Hız ile PM0.3 Birikimi Karşılaştırmalı Sütun Grafiği

4.8.3.2. Temel durum partikül madde konsantrasyonları

Simülasyon, fiziksel ortamda ölçülen temel durum partikül madde (PM) konsantrasyonları ile istisnai bir nicel uyum göstermiştir. Sayısal model kararlı durum dengesine ulaştığında, CFD modelinden elde edilen küresel ortalamalar yerinde yapılan manuel ölçümlerle kusursuz bir şekilde hizalanmıştır.

Çizelge 4.15. CFD Temel Durum Parametrelerinin Doğrulanması (LAB 7)

Parametre	Manuel Ölçüm (Ortalama ± Std. Sap.)	CFD Simülasyon Ortalaması (Kararlı Durum)	Mutlak Fark	Yüzdelik Fark
Sıcaklık (°C)	23.92 ± 1.37	24.3	0.38 °C	1.588%
$PM_{0.3}$ (Adet)	13,502 ± 7,965	13,781	279	2.066%
$PM_{2.5}$ (Adet)	252.94 ± 137.69	261.37	8.43	3.332%
PM_{10} (Adet)	18.69 ± 10.25	19.28	0.59	3.156%

Simüle edilen ve manuel veri setleri arasındaki paralellik, sayısal modelin LAB7 ortamının temel emisyon özelliklerini etkili bir şekilde yakaladığını ve tüm varyasyonların %4'lük bir sınır içinde kaldığını göstermektedir.

4.8.3.3. PM'in mekânsal dağılımı ve istatistiksel dağılımı

Doğrulanmış CFD simülasyonu, LAB7'de gözlemlenen istatistiksel varyans için fiziksel açıklama sağlamaktadır. Manuel verilerin Kolmogorov-Smirnov (K-S) normallik testleri, $PM_{0.3}$ ve $PM_{2.5}$ dağılımlarının sağa çarpık ve istatistiksel olarak normal olmadığını ($p = 0,000$) göstermiştir. Ayrıca, Kruskal-Wallis testi daha önce LAB7'nin anlamlı bir dikey tabakalaşmaya sahip olmadığını ($p > 0,05$) doğrulamıştı; bu da havanın tabandan tavana kadar iyi karışmış olduğu anlamına gelmektedir. Hava dikey olarak iyi karıştığından, aşırı standart sapmalar ve "Normal Değil" çarpıklığı tamamen yatay durgunluktan kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.16. Kararlı Durumda Mekânsal Hız ve PM Dağılımı (LAB 7)

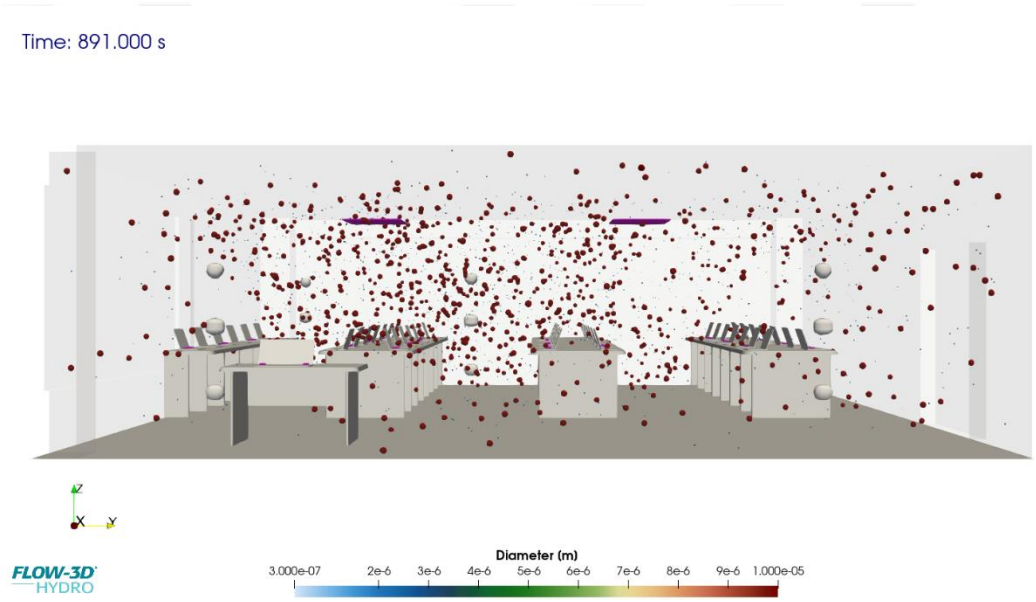
İstasyon ID	Akışkan Hızı (m/s)	$PM_{0.3}$ Konsantrasyonu	$PM_{2.5}$ Konsantrasyonu	PM_{10} Konsantrasyonu
1A	2.50	0.03	0.00	0.00
1B	0.46	0.19	0.03	0.00
1C	0.72	0.26	0.06	0.06
2A	0.27	0.78	0.18	0.13
2B	0.33	0.87	0.14	0.11
2C	0.20	0.22	0.01	0.07
3A	0.49	0.50	0.07	0.11
3B	0.54	0.40	0.07	0.06
3C	0.49	0.31	0.07	0.05
4A	0.86	0.24	0.04	0.03
4B	0.72	0.18	0.02	0.00
4C	0.71	0.21	0.03	0.01

Çizelge 4.16 ve çift eksenli görselleştirmede ayrıntılı olarak açıklandığı üzere, İstasyon 2B ve İstasyon 2A birincil yatay birikim düğümleri olarak işlev görmektedir.

Yüksek hızlı bölgeler (İstasyon 1A) parçacıkları etkili bir şekilde uzaklaştırdığından, odanın merkezine yerleştirilen sensörler (2A/2B) drastically daha yüksek kirletici yükleri kaydedecek ve bu durum yoğun şekilde çarpık, normal olmayan mekânsal verilerle sonuçlanacaktır. Ek olarak, LAB7'de CO_2 ile PM arasında anlamlı bir pozitif korelasyon olduğuna dair manuel istatistiksel bulgu ($PM_{0.3}$ için r = 0,566), bu merkezi, düşük hızlı bölgelerdeki kullanıcı hareketinin durgun hava akımının temizleyemediği yeniden havalanmayı (resüspansiyon) aktif olarak yönlendirdiğini düşündürmektedir.

4.8.3.4. Partikül madde dağılımının zamansal-mekânsal evrimi (CFD görsel analizi-LAB7)

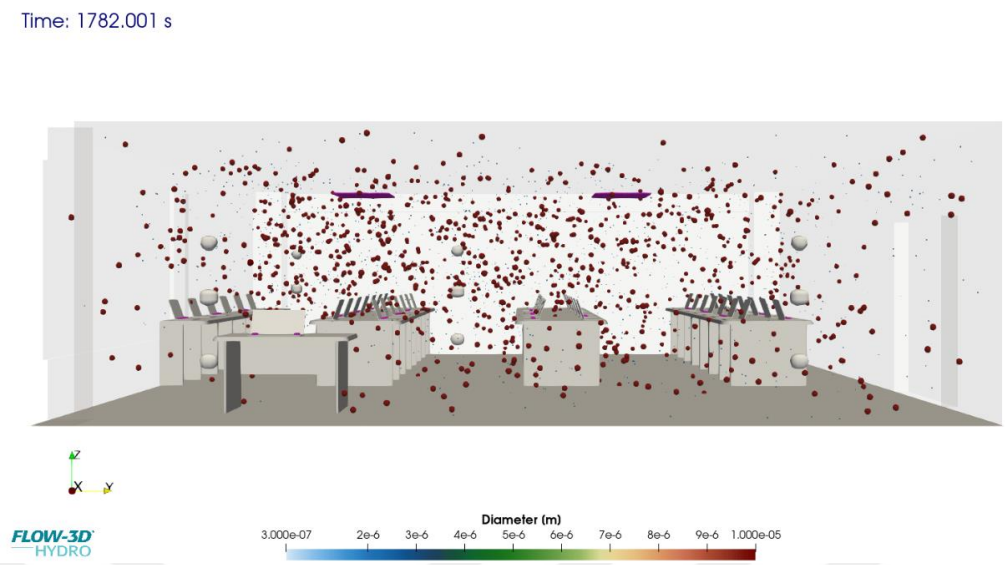
İstatistiki bulguları —özellikle güçlü yatay durgunluğu ve dikey tabakalaşma eksikliğini— görsel olarak doğrulamak amacıyla, partikül maddenin mekânsal dağılımı 900 saniye, 1800 saniye ve 2700 saniyede FLOW-3D hesaplamalı modelinden çıkarılmıştır.



Şekil 4.23. Laboratuvar 7 — PM konsantrasyon dağılımı, T=900sn (Akış 3B simülasyonu)

İlk Dağılım Aşaması (t = 900 s)

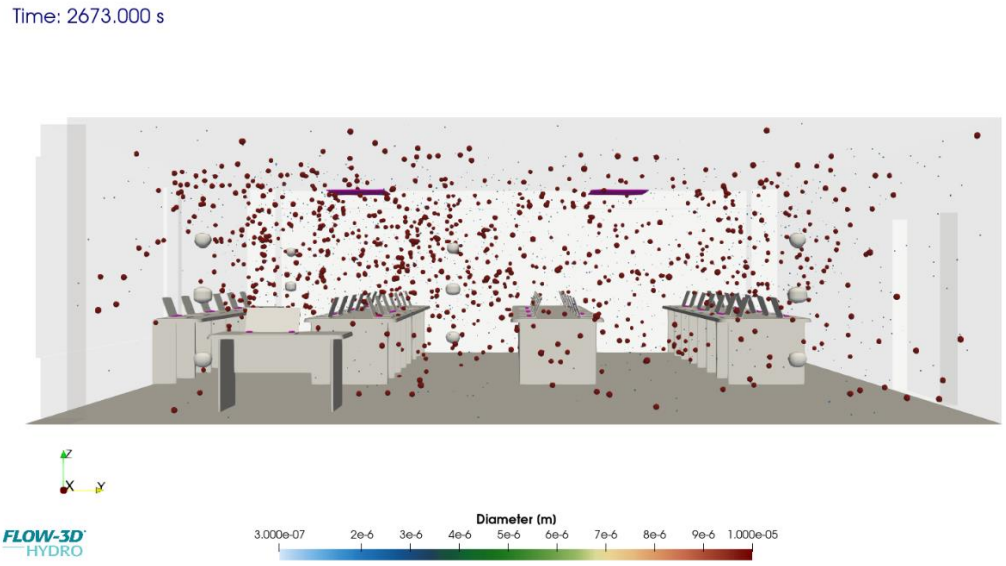
Şekil 4.23 erken dağılım aşamasını göstermektedir. 15. dakikada, sürekli parçacık emisyonu havalandırma akımlarıyla etkileşime girmeye başlar. Kontur haritası yerel üretim bölgelerinin oluştuğunu göstermektedir ancak parçacıklar nispeten dağınıktır. Ani termal yükselme gösteren LAB6'nın aksine, LAB7'deki parçacıklar birincil aerodinamik akış yolları boyunca taşınmaktadır; bu da termal kaldırma kuvvetinin ilk besleme havası momentumuna baskın gelmediğini göstermektedir.



Şekil 4.24. Laboratuvar 7 — PM konsantrasyon dağılımı, T=1800sn (Akış 3B simülasyonu)

Ara Birikim Aşaması (t = 1800 s)

1800 saniyeye gelindiğinde (Şekil 6.24), yatay momentum kaybı görsel olarak belirgin hale gelir. Besleme havası laboratuvarın merkezine doğru hareket ederken kinetik enerjisini kaybettikçe, parçacıkları egzoz menfezlerine taşıma kapasitesini de kaybeder. Sonuç olarak, odanın orta ila arka bölümlerinde belirgin bir yatay "bulut" oluşmaya başlar. Özellikle, bu bulut içindeki parçacıklar zeminden solunum bölgesine kadar nispeten eşit bir şekilde dağılmış olup LAB7'deki havanın dikey olarak iyi karışmış olduğuna dair Kruskal-Wallis bulgularını görsel olarak doğrulamaktadır.



Şekil 4.25. Laboratuvar 7 — PM konsantrasyon dağılımı, T=2700sn (Akış 3B simülasyonu)

Kararlı Durum Dengesi (t = 2700 s)

Şekil 4.25, 45. dakikadaki kararlı duruma yakın koşulu yakalamaktadır. Görsel veriler, çift eksenli grafikte tanımlanan spesifik yerel durgunluğu zarif bir şekilde doğrulamaktadır. Büyük hacimsel partikül madde bulutları merkezi konumlarda (doğrudan İstasyon 2A ve 2B ile eşleşecek şekilde) kalıcı olarak havuzlanmıştır. Besleme difüzörlerinin yakınındaki alanlar (İstasyon 1A) temizdir, ancak odanın merkezi ciddi bir mikro çevresel tehlikeyi temsil etmektedir. Parçacıklar tavanın yakınında tabakalaşmadığı için, bu merkezi istasyonlarda oturan kullanıcılar, asılı duran partikül yükünün tam konsantrasyonuna doğrudan birincil solunum bölgeleri içinde maruz kalmaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, Akdeniz Üniversitesi Enformatik Bölüm Başkanlığına bilgisayar laboratuvarlarındaki çok parametreli iç ortam hava kalitesi (İHK) dinamiklerinin kapsamlı bir değerlendirmesi sunulmuştur. Ekim 2025 ile Ocak 2026 tarihleri arasında (4 ay) beş farklı laboratuvardan elde edilen uzun dönemli deneysel saha ölçümlerinin; ileri İstatistiki Analiz (IBM SPSS 26.0) ve FLOW-3D yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilen Üç Boyutlu Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) modellemesi ile entegre edilmesi sayesinde, Bilgisayar labaratuvarların da öğretim sırasında, sınıf ortamlarına özgü temel mikro-çevresel davranış başarıyla çözümlenmeye çalışılmıştır.

Toplanan deneysel veriler, uluslararası standartlardan kritik sapmalar olduğunu ortaya koymuştur. Kolmogorov-Smirnov testi; karbondioksit (CO_2) ve partikül madde (PM) konsantrasyonlarının son derece çarpık, normal olmayan dağılımlar sergilediğini belirlenmştir. Küresel termal koşullar genel olarak konforlu operasyonel hedeflere (22,9°C ila 24,1°C) yakınsama gösterirken; CO_2 kütle birikimleri, dış ortam temel durum değerlerine kıyasla iç mekân bölgelerinde sistematik olarak zirve yapmış ve bölgesel kullanıcı solunumsal metabolik yüklerinin etkisini doğrudan görülmüştür.

FLOW-3D aracılığıyla yürütülen zamana bağlı (transient) parçacık izleme simülasyonlarının entegrasyonu, bu istatistiksel eğilimler için net bir fiziksel açıklama sağlamıştır. Doğrulanmış hesaplamalı dijital ikizler (computational digital twins), bilgisayar laboratuvarlarındaki zayıf iç hava kalitesinin, yetersiz toplam havalandırma havası besleme hacminden ziyade, öncelikle hava akışı dağıtımındaki geometrik bir başarısızlıktan kaynaklandığını ortaya koymuştur. Yüksek hızlı birincil hava yolları (2,50 m/s 'ye kadar) çevre/çeper bölgeleri etkili bir şekilde süpürmektedir. Ancak, hızlı momentum kaybı odaların merkezinde durgun bölgeler (0,20 m/s ila 0,28 m/s) meydana getirmekte; bu alanlar, havada asılı duran kirleticilerin tehlikeli seviyelerde sürekli olarak durduğu btespit edilmiştir.

LAB6 gibi alanlarda, aktif bilgisayar çalışma istasyonlarından yayılan yoğun termal ısı akıları, baskın konvektif yukarı akımlar (convective updrafts) oluşturarak ince ve kaba toz parçacıklarını üst dikey katmanlara taşımakta ve 1,8 m düzlemine kadar istatistiksel olarak anlamlı bir dikey tabakalaşmaya ($p < 0,034$) neden olmaktadır.

Aksine, LAB1 ve LAB7 gibi alanlarda parçacıklar dikey olarak tabakalaşmamakta ($p > 0,05$), yatay olarak havuzlanmaktadır. Bu parçacıklar, insan hareketinin yeniden havalanmayı (resüspansiyon) aktif olarak tetiklediği ve durgun mekanik hava dağıtımının temizlemede başarısız olduğu merkezi kullanıcı ölü bölgelerinde yoğun bir şekilde birikmekte olduğu belirlenmiştir.

5.2. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Bu çalışma boyunca elde edilen deneysel, istatistiksel ve sayısal kazanımlara dayanarak, yüksek yoğunluklu eğitim HVAC sistemlerinin mühendislik tasarımlarını ve operasyonel uygulamalarını geliştirmek amacıyla aşağıdaki eylemler önerilmektedir:

- **Aerosol Yeniden Dağılımı ve Menfezlerin Hizalaması:** Standart mekanik havalandırma menfezleri, yüksek hızlı havayı doğrudan belirlenen merkezi durgunluk bölgelerine yansıtacak şekilde yeniden konumlandırılmalıdır. Yoğun bilgisayar ekipmanları tarafından üretilen iç konvektif bacaların/akımların üstesinden gelmek; hapsolmuş partikül maddeyi alt seviyedeki egzoz menfezlerinden dışarı çıkmaya zorlayacak hedefli, aşağı doğru bir besleme momentumu gerektirmektedir.

- **Çift Kaynaklı İhtiyaca Göre Kontrollü Havalandırmanın (DCV) Uygulanması:** Yalnızca tek noktalı CO_2 ölçümlerine dayanan geleneksel DCV sistemleri, teknoloji yoğun ortamlar için yetersizdir. Havalandırma yönetimi; hem kullanıcı kaynaklı CO_2 seviyelerini hem de ekipman kaynaklı PM/kimyasal emisyonları ölçen gerçek zamanlı, düşük maliyetli sensör dizilerini entegre eden çift kaynaklı izleme çerçevelerini benimsemelidir. Bu sayede, elektronik cihazların gaz salınımı (off-gassing) yaptığı düşük doluluk dönemlerinde bile temel süpürme/temizleme hava akış hızlarının korunması sağlanır.

- **Makine Öğrenmesi ve Tahmin Edici Dijital İkizlerin Entegrasyonu:** Gelecekteki araştırmalar, tanımlayıcı istatistiksel çerçeveleri tahmin edici kontrollere doğru genişletmelidir. Makine öğrenmesi modellerinin ve yapay sinir ağlarının gerçek zamanlı sensör akışlarıyla entegre edilmesi, HVAC otomasyon sistemlerinin ders programlarına ve bilgisayar sunucu yüklerine bağlı olarak bölgesel kirletici havuzlanmasını dinamik olarak tahmin etmesine olanak tanıyacaktır.

6. KAYNAKLAR

ABHIJITH, K., KUKADIA, V. & KUMAR, P. 2022. Investigation of air pollution mitigation measures, ventilation, and indoor air quality at three schools in London. *Atmospheric Environment*, 289, 119303.

ALLEN, J. G., MACNAUGHTON, P., SATISH, U., SANTANAM, S., VALLARINO, J. & SPENGLER, J. D. 2016. Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: a controlled exposure study of green and conventional office environments. *Environmental Health Perspectives*, 124, 805-812.

ALVES, C., NUNES, T., SILVA, J. & DUARTE, M. 2013. Comfort parameters and particulate matter (PM10 and PM2.5) in school classrooms and outdoor air. *Aerosol and Air Quality Research*, 13, 1521-1535.

ARGUNHAN, Z. & AVCI, A. S. 2018. Statistical evaluation of indoor air quality parameters in classrooms of a university. *Advances in Meteorology*, 2018, 4391579.

BABAYIĞIT, M. A., BAKIR, B., TEKBAŞ, Ö. F., OĞUR, R., KILIC, A. & ULUS, S. 2014. Indoor air quality in primary schools in Keçiören, Ankara. *Turkish Journal of Medical Sciences*, 44, 137-144.

BETUZ, N. E. 2012. Assessment of indoor air quality in crowded educational spaces. Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ).

CAO, X., LI, P., ZHANG, J. & PANG, L. 2022. Associations of human cognitive abilities with elevated carbon dioxide concentrations in an enclosed chamber. *Atmosphere*, 13, 891.

CHAUHAN, B. V., CORADA, K., YOUNG, C., SMALLBONE, K. L. & WYCHE, K. P. 2024. Review on sampling methods and health impacts of fine (PM2.5, ≤ 2.5 μm) and ultrafine (UFP, PM0.1, ≤ 0.1 μm) particles. *Atmosphere*, 15, 572.

CHITHRA, V. & NAGENDRA, S. S. 2014. Impact of outdoor meteorology on indoor PM10, PM2.5 and PM1 concentrations in a naturally ventilated classroom. *Urban Climate*, 10, 77-91.

ÇOŞGUN, A. 2012. Antalya ilinde farklı ortamlarda iç hava kalitesinin araştırılması ve modellenmesi. Balıkesir Üniversitesi.

ÇOŞGUN, A. & KOYUN, T. 2025. Assessment of indoor air quality at a university hospital using CFD and GIS. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-12.

Dibiç, A. U. 2025. Kütüphanelerde İç Hava Kalitesinin CFD Analiz Yöntemiyle Araştırılması. Akdeniz Üniversitesi.

GOKUL, T., KUMAR, K. R., PREMA, P., ARUN, A., BALAJI, P. & FAGGIO, C. 2023. Particulate pollution and its toxicity to fish: An overview. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 270, 109646.

HADDAD, S., SYNNEFA, A., MARCOS, M. Á. P., PAOLINI, R., DELRUE, S., PRASAD, D. & SANTAMOURIS, M. 2021. On the potential of demand-controlled ventilation system to enhance indoor air quality and thermal condition in Australian school classrooms. *Energy and Buildings*, 238, 110838.

HEATING, A. S. O., REFRIGERATING, ENGINEERS, A.-C. & INSTITUTE, A. N. S. 2001. Ventilation for acceptable indoor air quality. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

ISSA, R. Z. 2021. Simülasyon tabanlı karar destek araçlarıyla daha yeşil okul binaları için iç hava kalitesinin iyileştirilmesi: Erbil'de bir vaka çalışması. Bahçeşehir Üniversitesi.

KHAN, A. M., FINLAY, J. M., CLARKE, P., SOL, K., MELENDEZ, R., JUDD, S. & GRONLUND, C. J. 2021. Association between temperature exposure and cognition: a cross-sectional analysis of 20,687 aging adults in the United States. *BMC Public Health*, 21, 1484.

KORSAVI, S. S., MONTAZAMI, A. & MUMOVIC, D. 2020. Indoor air quality (IAQ) in naturally-ventilated primary schools in the UK: Occupant-related factors. *Building and Environment*, 180, 106992.

KUŞ, M. 2007. Şanlıurfa ilindeki yükseköğretim kurumları dersliklerinde iç hava kalitesinin incelenmesi ve modellenmesi. Balıkesir Üniversitesi.

LAZOVIĆ, I. M., STEVANOVIĆ, Ž. M., JOVAŠEVIĆ-STOJANOVIĆ, M. V., ŽIVKOVIĆ, M. M. & BANJAC, M. J. 2016. Impact of CO2 concentration on indoor air quality and correlation with relative humidity and indoor air temperature in school buildings in Serbia. *Thermal Science*, 20, 297-307.

LEE, S., RYU, S.-H., SUL, W. J., KIM, S., KIM, D. & SEO, S. 2024. Association of exposure to indoor molds and dampness with allergic diseases at water-damaged dwellings in Korea. *Scientific Reports*, 14, 135.

MATA, T. M., MARTINS, A. A., CALHEIROS, C. S., VILLANUEVA, F., ALONSO-CUEVILLA, N. P., GABRIEL, M. F. & SILVA, G. V. 2022. Indoor air quality: a review of cleaning technologies. *Environments*, 9, 118.

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, 27-52.

MUSTAȚĂ, D.-M., BISORCA, D., IONEL, I., ADJAL, A. & BALOGH, R.-M. 2025. Real-Time Insights into Indoor Air Quality in University Environments: PM and CO2 Monitoring. *Atmosphere*, 16, 972.

NI, R., SU, H., BURNETT, R. T., GUO, Y. & CHENG, Y. 2024. Long-term exposure to PM2.5 has significant adverse effects on childhood and adult asthma: A global meta-analysis and health impact assessment. *One Earth*, 7, 1953-1969.

ONAT, B., YAŞAR, G., UZUN, B., AYVAZ, C. & ŞAHIN, Ü. A. 2023. Indoor environmental quality in the university laboratories. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29, 642-649.

PARMAKSıZ, K. 2025. Yarı Kurak Bölgedeki Bir Eğitim Kurumunda Termal Konfor Analizi.

POLADOV, V. 2024. Azerbaycan Ülkesi Bakü Şehrinde Okullarda İç Hava Kalitesinin Araştırılması. Akdeniz Üniversitesi.

PORTNOY, J., MILLER, J. D., WILLIAMS, P. B., CHEW, G. L., MILLER, J. D., ZAITOUN, F., PHIPATANAKUL, W., KENNEDY, K., BARNES, C. & GRIMES, C. 2013. Environmental assessment and exposure control of dust mites: a practice parameter. *Annals of Allergy, Asthma & Immunology*, 111, 465.

SADRIZADEH, S., YAO, R., YUAN, F., AWBI, H., BAHNFLETH, W., BI, Y., CAO, G., CROITORU, C., DE DEAR, R. & HAGHIGHAT, F. 2022. Indoor air quality and health in schools: A critical review for developing the roadmap for the future school environment. *Journal of Building Engineering*, 57, 104908.

SANTAMOURIS, M., SYNNEFA, A., ASSSIMAKOPOULOS, M., LIVADA, I., PAVLOU, K., PAPAGLASTRA, M., GAITANI, N., KOLOKOTSA, D. & ASSIMAKOPOULOS, V. 2008. Experimental investigation of the air flow and indoor carbon dioxide concentration in classrooms with intermittent natural ventilation. *Energy and Buildings*, 40, 1833-1843.

SESENA, S., RODRIGUEZ, A. M. & PALOP, M. L. 2022. Indoor air quality analysis in naturally ventilated university training laboratories: a health risk assessment. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 15, 1817-1837.

SETTIMO, G., INDINNIMEO, L., INGLESSIS, M., DE FELICE, M., MORLINO, R., DI COSTE, A., CARRIERA, F., DI FIORE, C. & AVINO, P. 2024. CO2 Levels in Classrooms: What Actions to Take to Improve the Quality of Environments and Spaces. *Sustainability*, 16, 8619.

STABILE, L., BUONANNO, G., FRATTOLILLO, A. & DELL'ISOLA, M. 2019. The effect of the ventilation retrofit in a school on CO2, airborne particles, and energy consumptions. *Building and Environment*, 156, 1-11.

STREINU, D.-R., NEAGOE, O. C., BORLEA, A., ICMA, I., DERBAN, M. & STOIAN, D. 2024. Enhancing diagnostic precision in thyroid nodule assessment: Evaluating the efficacy of a novel cell preservation technique in fine-needle aspiration cytology. *Frontiers in Endocrinology*, 15, 1438063.

SZABADOS, M., CSÁKÓ, Z., KOTLÍK, B., KAZMAROVÁ, H., KOZAJDA, A., JUTRAZ, A., KUKEC, A., OTOREPEC, P., DONGIOVANNI, A. & DI MAGGIO,

A. 2021. Indoor air quality and the associated health risk in primary school buildings in Central Europe–The InAirQ study. *Indoor Air*, 31, 989-1003.

TORRIANI, G., LAMBERTI, G., FANTOZZI, F. & BABICH, F. 2023. Exploring the impact of perceived control on thermal comfort and indoor air quality perception in schools. *Journal of Building Engineering*, 63, 105419.

VILLANUEVA, F., NOTARIO, A., CABAÑAS, B., MARTÍN, P., SALGADO, S. & GABRIEL, M. F. 2021. Assessment of CO2 and aerosol (PM2.5, PM10, UFP) concentrations during the reopening of schools in the COVID-19 pandemic: The case of a metropolitan area in Central-Southern Spain. *Environmental Research*, 197, 111092.

YALCIN, N., BALTA, D. & ÖZMEN, A. 2018. A modeling and simulation study about CO2 amount with web-based indoor air quality monitoring. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 26, 1390-1402.

YETIŞ, A. 2023. Improvement of Indoor Air Quality in Classrooms Based on Age of Air Parameters and Fanger's Predicted Mean Vote Method. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü (İYTE).

YIN, B., FANG, W., LIU, L., GUO, Y., MA, X. & DI, Q. 2024. Effect of extreme high temperature on cognitive function at different time scales: A national difference-in-differences analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 275, 116238.

ZHANG, H. & SRINIVASAN, R. 2020. A systematic review of air quality sensors, guidelines, and measurement studies for indoor air quality management. *Sustainability*, 12, 9045.

ÖZGEÇMİŞ

Mahmoud S S ABUOWDA

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2024-2026	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Dalı, Antalya
Lisans 2018-2023	Gazze İslam Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Filistin