

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**KÜTÜPHANELERDE İÇ HAVA KALİTESİNİN CFD ANALİZ YÖNTEMİYLE
ARAŞTIRILMASI**

Ali Ufuk DİBİÇ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2025

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**KÜTÜPHANELERDE İÇ HAVA KALİTESİNİN CFD ANALİZ YÖNTEMİYLE
ARAŞTIRILMASI**

Ali Ufuk DİBİÇ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2025

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÜTÜPHANELERDE İÇ HAVA KALİTESİNİN CFD ANALİZ YÖNTEMİYLE
ARAŞTIRILMASI

Ali Ufuk DİBİÇ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2025

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÜTÜPHANELERDE İÇ HAVA KALİTESİNİN CFD ANALİZ YÖNTEMİYLE
ARAŞTIRILMASI

Ali Ufuk DİBİÇ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 14/07/2025 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi. Ahmet ÇOŞGUN (Danışman)

Prof. Dr. Afşin GÜNGÖR

Doç. Dr. Tansel KOYUN

ÖZET

KÜTÜPHANELERDE İÇ HAVA KALİTESİNİN CFD ANALİZ YÖNTEMİYLE ARAŞTIRILMASI

Ali Ufuk DİBİÇ

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇOŞGUN

Temmuz 2025; 65 sayfa

Kütüphane yapıları, uzun süreli kullanım, yüksek kullanıcı yoğunluğu, farklı havalandırma koşulları ve korunması gereken arşiv materyalleri nedeniyle iç hava kalitesi (İHK) açısından özel değerlendirmeler gerektiren kompleks kapalı ortamlar arasında yer almaktadır. Kullanıcıların bilişsel performansı, konfor algısı, sağlık durumları ve aynı zamanda kütüphane koleksiyonlarının fiziksel dayanımı doğrudan bu ortam koşullarından etkilenmektedir. Ancak literatürde kütüphane yapılarında gerçekleştirilen iç hava kalitesi çalışmalarının sınırlı sayıda olduğu ve çoğunlukla kısa süreli, sınırlı parametreler üzerine odaklandığı görülmektedir. Bu bağlamda hazırlanan bu yüksek lisans tezinde, kütüphane yapılarında iç hava kalitesi bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiş; saha ölçümleri, mekânsal interpolasyon ve sayısal akışkanlar dinamiği (CFD) modellemesi entegre edilerek kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında Antalya ili sınırlarında yer alan iki farklı kütüphane yapısı seçilmiştir: Antalya Kütüphanesi ve Akdeniz Üniversitesi Merkez Kütüphanesi. Bu iki yapı farklı büyüklüklere, mimari özelliklere, kullanıcı yoğunluklarına ve havalandırma sistemlerine sahip olması nedeniyle karşılaştırmalı analizler için uygun örnekleme oluşturmaktadır. Antalya Kütüphanesi'nde 11 farklı konum, Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi'nde ise 7 farklı konum belirlenmiş ve her konumda üç farklı yükseklik (0,5 m, 1,2 m ve 1,8 m) seviyelerinde detaylı saha ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm parametreleri partikül madde fraksiyonları (PM_{0.3}, PM_{0.5}, PM₁, PM_{2.5}, PM₅, PM₁₀), karbondioksit (CO₂) ve sıcaklık (AT) olarak seçilmiştir. Tüm ölçümler PM ölçüm cihazı PCE-PCO 2 ve CO₂ ölçüm cihazı JD-3002 kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

İstatistik analizlere ek olarak saha verileri Flow-3D yazılımında CFD modellemesi için girdi verisi olarak kullanılmıştır. Modelleme sürecinde kütüphane binalarının mimari planları ve havalandırma sistemlerinin fiziksel özellikleri dikkate alınarak ayrıntılı üç boyutlu geometrik modeller oluşturulmuştur. CFD simülasyonları sayesinde yalnızca partikül yükleri değil, aynı zamanda havalandırma sistemlerinin akış desenleri, durağan bölgeler ve partikül taşınım dinamikleri de detaylı olarak incelenmiştir.

Çalışmanın sonuçları, kütüphanelerde iç hava kalitesi optimizasyonu için bazı uygulama ve araştırma önerilerini de beraberinde getirmiştir. Havalandırma sistemlerinde filtreleme kalitesinin artırılması, CO₂ tabanlı dinamik havalandırma kontrol sistemlerinin devreye alınması, kullanıcı yoğunluğunun yüksek olduğu dönemlerde taze hava

oranlarının artırılması, düzenli HVAC bakım ve filtre değişimlerinin yapılması ve düşük emisyonlu temizlik sistemlerinin kullanılması önerilmektedir. Ayrıca ileri dönem araştırmalar için uzun süreli izleme çalışmaları, partikül kimyasal karakterizasyonları ve kullanıcı sağlığı ile bilişsel performans arasındaki ilişkilerin detaylı şekilde incelenmesi önerilmektedir.

ANAHTAR KELİMELEER: Bağıl nem, Hava kalitesi, Hava sıcaklığı, İç ortam, Kütüphaneler, Partikül madde

JÜRİ: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇOŞGUN

Prof. Dr. Afşin GÜNGÖR

Doç. Dr. Tansel KOYUN



ABSTRACT

INVESTIGATION OF INDOOR AIR QUALITY IN LIBRARIES USING CFD ANALYSIS METHOD

Ali Ufuk DİBİÇ

Master's Degree, Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Ahmet ÇOŞGUN

July 2025; 65 pages

Library buildings are among the complex indoor environments that require special consideration in terms of indoor air quality (IAQ) due to prolonged occupancy, high user density, diverse ventilation conditions, and the presence of archival materials that must be preserved. Users' cognitive performance, comfort perception, and health status, as well as the physical durability of library collections, are directly influenced by these environmental conditions. However, the literature reveals that studies on IAQ in library buildings are limited in number and often focus on short-term observations with a narrow set of parameters. In this context, this master's thesis presents a comprehensive evaluation of indoor air quality in libraries through an integrated approach combining on-site measurements, spatial interpolation, and computational fluid dynamics (CFD) modeling.

Two different library buildings located in Antalya, Türkiye, were selected as the case studies: Antalya Library and the Central Library of Akdeniz University. These buildings were chosen due to their differing sizes, architectural characteristics, user densities, and ventilation systems, making them suitable for comparative analysis. In Antalya Library, measurements were conducted at 11 different locations, while in Akdeniz University Library, 7 locations were selected. At each location, detailed measurements were taken at three different height levels (0.5 m, 1.2 m, and 1.8 m). The measured parameters included particulate matter fractions (PM_{0.3}, PM_{0.5}, PM₁, PM_{2.5}, PM₅, PM₁₀), carbon dioxide (CO₂), and ambient temperature (AT). All measurements were conducted using the PCE-PCO 2 particle counter and the JD-3002 CO₂ meter.

In addition to statistical analyses, the field data were used as input for CFD modeling performed using Flow-3D software. During the modeling process, detailed three-dimensional geometric models were created by incorporating the architectural layouts of the library buildings and the physical features of their ventilation systems. Through CFD simulations, not only particle concentrations but also airflow patterns, stagnant zones, and particle transport dynamics were thoroughly analyzed.

The findings of this study led to several practical and research-based recommendations for optimizing IAQ in libraries. It is recommended to enhance filtration quality in ventilation systems, implement CO₂-based dynamic ventilation control systems, increase the supply of fresh air during periods of high occupancy, ensure regular HVAC maintenance and filter replacement, and employ low-emission cleaning systems. Furthermore, for future research, it is suggested to conduct long-term monitoring studies,

chemical characterization of particulate matter, and detailed investigations into the relationships between IAQ, user health, and cognitive performance.

KEYWORDS: Air quality, Air temperature, Indoor environment, Libraries, Particulate matter, Relative humidity

COMMITTEE: Asst. Prof. Dr. Ahmet ÇOŞGUN

Prof. Dr. Afşin GÜNGÖR

Assoc. Prof. Dr. Tansel KOYUN



ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezi kapsamında gerçekleştirilen çalışma, kütüphane yapılarında iç hava kalitesi (İHK) parametrelerinin detaylı olarak incelenmesi, saha ölçümleriyle birlikte mekânsal interpolasyon ve sayısal akışkanlar dinamiği (CFD) modellemesinin entegrasyonu yoluyla değerlendirilmesini amaçlamaktadır. İç hava kalitesi parametrelerinin yalnızca kullanıcı sağlığı açısından değil, aynı zamanda kütüphane materyallerinin uzun süreli korunması, kullanıcı konforunun sürdürülebilirliği ve bina performansının değerlendirilmesi açısından önemi her geçen gün artmaktadır. Bu çalışma, kütüphanelerde iç hava kalitesinin çok katmanlı ve bilimsel temelli şekilde incelendiği özgün bir araştırma olma özelliği taşımaktadır.

Tez çalışmam boyunca, konu seçiminden veri toplama süreçlerine, analiz ve modelleme aşamalarına kadar her safhada bilgi, tecrübe ve akademik rehberliğini esirgemeyen değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Çoşgun'a en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Kendisi, çalışmanın planlanmasından yürütülmesine, veri analizlerinden yazım aşamasına kadar her zaman yol gösterici ve teşvik edici olmuştur. Akademik disiplini, titiz yaklaşımı ve yapıcı önerileri, çalışmamın sağlıklı şekilde tamamlanmasına büyük katkı sağlamıştır.

Çalışmanın saha uygulamaları sırasında gerekli izinlerin alınması ve uygulama süreçlerinde destek sağlayan Antalya Kütüphanesi ve Akdeniz Üniversitesi Merkez Kütüphanesi yönetimlerine, ilgili birim sorumlularına ve teknik personeline teşekkür ederim. Gerekli cihazların temini ve saha ölçümlerinin gerçekleştirilmesinde destek olan tüm kurumlara ve çalışma arkadaşlarıma da ayrıca teşekkür borçluyum.

Tez izleme komitesinde görev alacak olan değerli öğretim üyelerine ve tez sürecinin değerlendirilmesinde katkı sağlayacak jüri üyelerine de şimdiden şükranlarımı sunarım.

Bu süreçte her zaman yanımda olan, desteğini ve motivasyonunu esirgemeyen aileme, tüm dostlarıma ve çalışma süresince sabır gösteren tüm yakınlarıma minnettarım.

Tez sürecinde elde ettiğim saha deneyimi, veri analizi ve sayısal modelleme tecrübeleri, yalnızca akademik çalışmama değil, aynı zamanda ilerleyen meslekî ve bilimsel çalışmalarım için de değerli bir birikim oluşturmıştır. Bu çalışmanın, kütüphane binalarında iç hava kalitesi üzerine yapılacak ilerleyen akademik araştırmalara ve uygulamalı çalışmalara katkı sağlayacağını ümit etmekteyim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ.....	v
AKADEMİK BEYAN	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	9
2.1. Kütüphanelerde İç Hava Kalitesi Üzerine Yapılan Uluslararası Çalışmaların Bibliyometrik Analiz ile Değerlendirilmesi	9
2.1.1. Bibliyometrik Yöntem	10
2.1.2. Bulgular ve tartışmalar	11
3. MATERYAL VE METOT.....	27
3.1. Çalışma Alanlarının Tanıtımı	27
3.2. Ölçüm Noktalarının Belirlenmesi ve Konumlandırılması.....	27
3.3. Kullanılan Ölçüm Cihazları ve Teknik Özellikleri	27
3.3.1. Partikül Madde Ölçüm Cihazı	27
3.3.2. CO ₂ ve Sıcaklık Ölçüm Cihazı	27
3.4. İstatistiksel Yöntem ve Veri İşleme Süreçleri	28
3.5. Sayısal Akışkanlar Dinamiği (CFD) Modelleme	28
3.5.1. Partikül İzleme	29
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	30
4.1. İstatistik Analiz Yönteminden Bulgular	30
4.1.1. Ölçümlerin Tanımlayıcı İstatistikleri ve Karşılaştırma Sonuçları	30
4.1.2. Ölçümlerin Ülkelere Göre Karşılaştırılması	35
4.1.3. Korelasyon Analizi Sonuçları	37
4.2. CFD Analiz Yönteminden Bulgular	39
4.2.1. Antalya Kütüphanesi	39
4.2.2. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi	51
4.3. Literatürle Karşılaştırmalı Genel Tartışma	59
4.3.1. CFD Model Performansının Literatürle Karşılaştırılması	59

4.3.2. Havalandırma Sistem Tasarımının Etkileri	59
4.3.3. Akdeniz İklimi Koşullarında İç Hava Kalitesi Dinamikleri	60
4.3.4. CFD Modelinin Sınırlılıkları ve Geliştirme Potansiyelleri.....	60
5. SONUÇLAR	61
6. KAYNAKLAR.....	63
ÖZGEÇMİŞ	



AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “**Kütüphanelerde İç Hava Kalitesinin CFD Analiz Yöntemiyle Araştırılması**” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

Tarih 14/07/2025

Ali Ufuk DİBİÇ



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

°C:	Sıcaklık (Santigrat derece)
%RH:	Bağıl nem (Relative Humidity)
CO ₂ :	Karbondiyoksit (ppm cinsinden)
PM:	Partikül Madde (µm çapındaki fraksiyonlar için genel gösterim)
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
AT:	Sıcaklık (Air Temperature)
Δ:	Fark, değişim miktarı
σ:	Standart sapma
M:	Ortalama
r:	Pearson korelasyon katsayısı
CFD:	Sayısal Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics)
IAQ:	İç Hava Kalitesi (Indoor Air Quality)
HVAC:	Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme (Heating, Ventilation and Air Conditioning)
ACH:	Hava Değişim Hızı (Air Changes per Hour)
ppm:	Milyonda bir (Part Per Million)
µg/m ³ :	Metreküpte mikrogram cinsinden kütle yoğunluğu
m ³ :	Metreküp
s:	Saniye

Kısaltmalar

3D:	Üç Boyutlu (Three-Dimensional)
ANOVA:	Varyans Analizi (Analysis of Variance)
ASHRAE:	Amerikan Isıtma, Soğutma ve Klima Mühendisleri Derneği
BEP:	Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği
CFD:	Sayısal Akışkanlar Dinamiği
EEA:	Avrupa Çevre Ajansı (European Environment Agency)
EPA:	Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (Environmental Protection Agency)
Flow-3D:	Kullanılan CFD analiz yazılımı
IAQ:	İç Hava Kalitesi
IDW:	Inverse Distance Weighting (Ağırlıklı Mekansal Enterpolasyon Metodu)
IoT:	Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)
ISO:	Uluslararası Standardizasyon Organizasyonu
PM:	Partikül Madde
SPSS:	İstatistiksel Paket Programı (Statistical Package for the Social Sciences)
STAR-CCM+:	CFD ön işleme ve geometri hazırlama yazılımı
VOC:	Uçucu Organik Bileşikler (Volatile Organic Compounds)
WHO:	Dünya Sağlık Örgütü (World Health Organization)
WoS:	Web of Science (Bibliyometrik analiz veri tabanı)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1. Metodolojinin çerçevesi.....	11
Şekil 2. 2. Konuda en fazla çalışma bulunan yayımlar	12
Şekil 2. 3. Konuda en fazla çalışma bulunan alanlar	14
Şekil 2. 4. Konuda en fazla çalışma bulunan yayın türleri	15
Şekil 2. 5. Konuda en fazla çalışma yayınlayan yayınevleri	16
Şekil 2. 6. Konu hakkında çalışmaların yıllara göre dağılımı.....	17
Şekil 2. 7. Ülkelerin atıf ağırları	18
Şekil 2. 8. Yazarlar arası iş birliğini gösteren ortak yazar bağları	20
Şekil 2. 9. Yazarların atıf analizi.....	21
Şekil 2. 10. Kurumların atıf bağları	22
Şekil 2. 11. En sık kullanılan anahtar kelime bağları.....	23
Şekil 2. 12. Metinlerin bibliyografik eşleşme bağları	24
Şekil 2. 13. Yazarların bibliyografik eşleşme analizi	25
Şekil 2. 14. Ortak atıf yapılan yazarlar arası bağlar	26
Şekil 4. 1. CO ₂ ölçümünün kütüphanelere göre yükseklik düzeyleri	32
Şekil 4. 2. PM _{0,3} ölçümünün kütüphanelere göre yükseklik düzeyleri	33
Şekil 4. 3. PM _{0,5} ölçümünün kütüphanelere göre yükseklik düzeyleri	33
Şekil 4. 4. PM ₁ ölçümünün kütüphanelere göre yükseklik düzeyleri	34
Şekil 4. 5. PM _{2,5} ölçümünün kütüphanelere göre yükseklik düzeyleri	34
Şekil 4. 6. PM ₅ ölçümünün kütüphanelere göre yükseklik düzeyleri	35
Şekil 4. 7. PM ₁₀ ölçümünün kütüphanelere göre yükseklik düzeyleri.....	35
Şekil 4. 8. Antalya'daki kütüphanelerin CO ₂ ölçüm ortalamalarının ülkelere göre karşılaştırılması	36
Şekil 4. 9. Antalya'daki kütüphanelerin PM _{2,5} ölçüm ortalamalarının ülkelere göre karşılaştırılması	37
Şekil 4. 10. Antalya'daki kütüphanelerin PM ₁₀ ölçüm ortalamalarının ülkelere göre karşılaştırılması	37
Şekil 4. 11. Antalya Kütüphanesi, oda 1 — PM konsantrasyon dağılımı, T=324 sn (Flow-3D simülasyonu)	40
Şekil 4. 12. Antalya Kütüphanesi, oda 1 — PM konsantrasyon dağılımı, T=900 sn (Flow-3D simülasyonu)	41
Şekil 4. 13. Antalya Kütüphanesi, oda 1 — PM konsantrasyon dağılımı, T=1800 sn (Flow-3D simülasyonu).....	42
Şekil 4. 14. Antalya Kütüphanesi, oda 1 — PM konsantrasyon dağılımı, T=2700 sn (Flow-3D simülasyonu).....	42
Şekil 4. 15. Antalya Kütüphanesi, oda 1 — PM konsantrasyon dağılımı, T=3600 sn (Flow-3D simülasyonu).....	43
Şekil 4. 16. Antalya Kütüphanesi, oda 2 — PM konsantrasyon dağılımı, T=324 sn (Flow-3D simülasyonu)	44

Şekil 4. 17. Antalya Kütüphanesi, oda 2 — PM konsantrasyon dağılımı, T=900 sn (Flow-3D simülasyonu)	45
Şekil 4. 18. Antalya Kütüphanesi, oda 2 — PM konsantrasyon dağılımı, T=1800 sn (Flow-3D simülasyonu).....	45
Şekil 4. 19. Antalya Kütüphanesi, oda 2 — PM konsantrasyon dağılımı, T=2700 sn (Flow-3D simülasyonu).....	46
Şekil 4. 20. Antalya Kütüphanesi, oda 2 — PM konsantrasyon dağılımı, T=3600 sn (Flow-3D simülasyonu).....	47
Şekil 4. 21. Antalya Kütüphanesi, oda 3 — PM konsantrasyon dağılımı, T=324 sn (Flow-3D simülasyonu)	48
Şekil 4. 22. Antalya Kütüphanesi, oda 3 — PM konsantrasyon dağılımı, T=900 sn (Flow-3D simülasyonu)	48
Şekil 4. 23. Antalya Kütüphanesi, oda 3 — PM konsantrasyon dağılımı, T=1800 sn (Flow-3D simülasyonu).....	49
Şekil 4. 24. Antalya Kütüphanesi, oda 3 — PM konsantrasyon dağılımı, T=2700 sn (Flow-3D simülasyonu).....	50
Şekil 4. 25. Antalya Kütüphanesi, oda 3 — PM konsantrasyon dağılımı, T=3600 sn (Flow-3D simülasyonu).....	50
Şekil 4. 26. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi, kat 1 — PM konsantrasyon dağılımı, T=324 sn (Flow-3D simülasyonu)	52
Şekil 4. 27. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi, kat 1 — PM konsantrasyon dağılımı, T=900 sn (Flow-3D simülasyonu)	52
Şekil 4. 28. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi, kat 1 — PM konsantrasyon dağılımı, T=1800 sn (Flow-3D simülasyonu)	53
Şekil 4. 29. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi, kat 1 — PM konsantrasyon dağılımı, T=2700 sn (Flow-3D simülasyonu)	54
Şekil 4. 30. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi, kat 1 — PM konsantrasyon dağılımı, T=3600 sn (Flow-3D simülasyonu)	54
Şekil 4. 31. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi, kat 2 — PM konsantrasyon dağılımı, T=324 sn (Flow-3D simülasyonu)	56
Şekil 4. 32. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi, kat 2 — PM konsantrasyon dağılımı, T=900 sn (Flow-3D simülasyonu)	56
Şekil 4. 33. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi, kat 2 — PM konsantrasyon dağılımı, T=1800 sn (Flow-3D simülasyonu)	57
Şekil 4. 34. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi, kat 2 — PM konsantrasyon dağılımı, T=2700 sn (Flow-3D simülasyonu)	58
Şekil 4. 35. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi, kat 2 — PM konsantrasyon dağılımı, T=3600 sn (Flow-3D simülasyonu)	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1. 1. Uluslararası standartlarda önerilen CO ₂ sınır değerleri	3
Çizelge 1. 2. Standartlara göre önerilen sıcaklık ve bağıl nem değerleri.....	4
Çizelge 3. 1. Fiziksel model parametreleri	28
Çizelge 4. 1. Ölçümlerin ortalama ve standart sapma değerleri ile normal dağılım varsayımının incelenmesi	30
Çizelge 4. 2. Ölçümlere göre kütüphaneler ve yükseklikler arasındaki farklılıkların incelenmesi	31
Çizelge 4. 3. Antalya'daki kütüphanelerin CO ₂ , PM _{2,5} ve PM ₁₀ ölçümlerinin ülkelere göre karşılaştırılması	36
Çizelge 4. 4. Korelasyon katsayısının değerlendirilmesi	38
Çizelge 4. 5. Ölçümler arasındaki ilişkilerin incelenmesi	38
Çizelge 4. 6. Antalya kütüphanesi 1. oda deneysel ve CFD simülasyon sonuçları	40
Çizelge 4. 7. Antalya kütüphanesi 2. oda deneysel ve CFD simülasyon sonuçları	44
Çizelge 4. 8. Antalya kütüphanesi 3. oda deneysel ve CFD simülasyon sonuçları	47
Çizelge 4. 9. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi 1. kat deneysel ve CFD simülasyon sonuçları	51
Çizelge 4. 10. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi 2. kat deneysel ve CFD simülasyon sonuçları	55

1. GİRİŞ

İç hava kalitesi (İHQ), kapalı ortam havasının insan sağlığı, konfor, performans ve bina sağlığı üzerindeki etkilerini tanımlayan ve çok sayıda fiziksel, kimyasal ve biyolojik parametrenin bütüncül etkileşimini içeren önemli bir çalışma alanıdır. Bireylerin günün yaklaşık %80 ila %90'ını kapalı alanlarda geçirdiği günümüzde, iç hava kalitesinin önemi giderek artmakta ve hem halk sağlığı hem de bina performansı bağlamında stratejik bir araştırma konusu haline gelmektedir.

İç hava kalitesi, yalnızca havada bulunan kirleticilerin varlığıyla sınırlı değildir. Aynı zamanda ortam sıcaklığı, bağıl nem, hava akım hızı, CO₂ konsantrasyonu, uçucu organik bileşikler (VOC), biyolojik kirleticiler, partikül madde (PM) ve iç mekânın havalandırma sistemlerinin etkinliği gibi çok sayıda faktörün kombinasyonunu kapsar.

Dünya Sağlık Örgütü (WHO), Amerikan Isıtma, Soğutma ve Klima Mühendisleri Derneği (ASHRAE), Avrupa Çevre Ajansı (EEA) ve Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayımlanan standartlar ve kılavuzlar, iç hava kalitesi parametrelerinin sınır değerlerini ve değerlendirme yöntemlerini belirlemiş durumdadır. WHO tarafından yayımlanan 2021 yılı güncel kılavuzda partikül maddeler için önerilen sınır değerler özellikle PM_{2.5} ve PM₁₀ fraksiyonları için oldukça düşürülmüş; PM_{2.5} için yıllık ortalama sınır değeri 5 µg/m³ olarak önerilmiştir.

Türkiye’de ise "Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği", "Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği" ve "İç Ortam Hava Kalitesi Rehberi" çerçevesinde sınırlı düzenlemeler bulunmaktadır. Bununla birlikte, iç hava kalitesinin mevzuat kapsamı halen gelişim aşamasındadır ve kütüphane gibi özel kullanım alanları için detaylı parametre sınırları ve kontrol mekanizmaları mevcut değildir.

Partikül madde (PM), atmosferde ve iç mekân havasında askıda bulunan, çapları nanometreden onlarca mikrometreye kadar değişebilen katı ve sıvı parçacıklardan oluşmaktadır. PM'nin iç hava kalitesindeki önemi hem fiziksel özelliklerinden hem de insan sağlığı ve bina sağlığı üzerindeki etkilerinden kaynaklanmaktadır.

Partikül maddeler genel olarak aerodinamik çaplarına göre sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmada temel olarak:

- PM_{0.3} (0.3 µm ve altı)
- PM_{0.5} (0.5 µm)
- PM₁ (1 µm ve altı)
- PM_{2.5} (2.5 µm ve altı)
- PM₅ (5 µm ve altı)
- PM₁₀ (10 µm ve altı)

fraksiyonları kullanılmaktadır. Bu fraksiyonların dağılımı, iç mekânda bulunan kaynaklara, havalandırma etkinliğine, dış ortamdan taşınma ve kullanıcı aktivitelerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.,

Kütüphane ortamları, özel fonksiyonel kullanımları nedeniyle PM açısından farklı ve zengin kaynaklara sahiptir:

- Kitap ve kağıt materyalleri: Kağıtların doğal bozulma süreçleri sonucu ortaya çıkan selüloz tozları ve kimyasal bileşikler PM emisyonuna yol açar.
- Kullanıcı hareketleri: İnsan hareketleri sırasında zeminde biriken partiküller yeniden süspansiyona girerek iç havaya karışır.
- Temizlik faaliyetleri: Elektrikli süpürge ve toz alma işlemleri sırasında PM yeniden yayılabilir.
- Dış ortam transferi: Yetersiz filtrasyon sistemleri veya açık kapı/pencere kullanımı ile dış ortamdaki PM içeri taşınabilir.
- Havalandırma sistemleri: Filtre bakımı yapılmayan HVAC sistemleri PM birikimine ve yayılımına yol açabilir.

Özellikle kütüphane gibi sessiz ve az hareketli ortamlarda, bu kaynaklardan salınan PM uzun süre havada askıda kalabilir ve düşük hava değişim hızları nedeniyle konsantrasyonu zamanla artabilir.

Partikül maddenin sağlık üzerindeki etkileri boyutlarına göre farklılık göstermektedir:

- PM₁₀: Üst solunum yollarında (burun, boğaz, trakea) tutulabilir; alerjik reaksiyonlar, solunum enfeksiyonları ve astım ataklarını tetikleyebilir.
- PM_{2.5}: Akciğer alveollerine kadar inebilir; burada solunum fonksiyonlarını bozabilir, bronşit ve akciğer hastalıkları riskini artırabilir.
- PM₁ ve altı: Kan dolaşımına karışarak sistemik inflamasyon, kardiyovasküler hastalıklar, nörolojik bozukluklar ve kanserojen etkiler oluşturabilir.

WHO, EPA ve ASHRAE gibi kuruluşlar PM_{2.5} ve PM₁₀ için sınır değerler belirlemiştir. WHO 2021 güncellemesine göre:

- PM_{2.5} için yıllık ortalama 5 µg/m³
- PM₁₀ için yıllık ortalama 15 µg/m³

olarak önerilmektedir.

Kütüphanelerde uzun süreli kalış süreleri göz önüne alındığında, bu partiküllerin kronik sağlık riskleri oluşturma potansiyeli oldukça yüksektir. Ayrıca PM'nin kütüphane

materyallerinin fiziksel bütünlüğüne ve raf ömrüne de zarar verebildiği, kitap ve arşivlerin mikrobiyal bozulmasına ortam hazırladığı bilinmektedir.

Karbondioksit (CO₂), kapalı ortamlarda en yaygın izlenen parametrelerden biri olup, doğrudan toksik olmamasına rağmen iç hava kalitesi (IAQ) için önemli bir gösterge parametresidir. Özellikle havalandırma yetersizliklerinin ve kullanıcı yoğunluğunun dolaylı bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir.

Kapalı ortamlarda CO₂'nin temel kaynağı insanlar tarafından gerçekleştirilen metabolik solunumdur. Kullanıcı yoğunluğu arttıkça ortamda biriken CO₂ seviyesi de artmakta; havalandırma yetersizse kısa sürede sınır değerlerin üzerine çıkabilmektedir.

Kütüphane ortamları, çok sayıda kullanıcının uzun süreli bulunması nedeniyle CO₂ birikiminin sıklıkla gözlemlendiği mekânlardır. Özellikle grup çalışma odaları, kapalı etüt salonları ve havalandırması sınırlı bölgelerde CO₂ seviyesi hızla yükselebilmektedir.

Çizelge 1. 1. Uluslararası standartlarda önerilen CO₂ sınır değerleri

Standard	Önerilen CO ₂ Sınırı
ASHRAE 62.1 (2022)	1000 ppm (maksimum iç ortam)
EN 15251 (CEN, Avrupa)	900 ppm (hedef değer)
Türkiye - BEP Yönetmeliği	Belirli sınır değeri bulunmamaktadır
WHO (dolaylı öneri)	Havalandırma yeterliliği kapsamında 1000 ppm altında önerilmektedir

Uzun süre 1000 ppm üzerinde CO₂ seviyelerine maruz kalmak, kullanıcı konforunu ve sağlık durumunu olumsuz etkileyebilmektedir.

Yapılan birçok bilimsel araştırma, CO₂ seviyesinin yalnızca havalandırma göstergesi olmakla kalmayıp aynı zamanda kullanıcıların bilişsel performansını da doğrudan etkilediğini ortaya koymuştur. Satish et al. (2012) ve Allen et al. (2016) gibi çalışmalarda:

- CO₂ seviyesinin 600 ppm → 1000 ppm → 1500 ppm düzeylerine çıkarılmasıyla;
- Karar verme hızında, problem çözme becerilerinde ve dikkat süresinde belirgin düşüşler tespit edilmiştir.

Kütüphane ortamında, özellikle öğrenciler ve akademisyenler açısından bu etkiler daha kritik hale gelmektedir. Düşük CO₂ konsantrasyonlarının korunması, odaklanma, dikkat ve öğrenme verimliliği açısından doğrudan önem taşır.

Yüksek CO₂ konsantrasyonları, doğrudan malzeme hasarına yol açmamakla birlikte, havalandırma yetersizliğini işaret ettiği için diğer kirleticilerin (VOC, PM) artışına zemin hazırlayabilir. Bu durum özellikle arşiv belgeleri, kitap kapakları ve nadir eserlerin bozulma süreçlerini hızlandırabilir.

Sıcaklık ve bağıl nem, yalnızca insan konforu açısından değil; aynı zamanda bina malzemelerinin, arşiv materyallerinin ve özellikle kütüphane koleksiyonlarının korunumu açısından iç hava kalitesinde kritik öneme sahip fiziksel parametrelerdir.

Termal konfor, bireylerin kapalı ortamda bulunurken hissettikleri subjektif memnuniyet durumudur. ASHRAE 55 ve ISO 7730 standartlarına göre iç mekânlarda önerilen sıcaklık ve nem aralıkları aşağıdaki gibidir:

Çizelge 1. 2. Standartlara göre önerilen sıcaklık ve bağıl nem değerleri

Parametre	Önerilen Aralık	Referans Standardı
Sıcaklık	22°C – 26°C	ASHRAE 55
Bağıl Nem (RH)	%30 – %60	ASHRAE 55

Kütüphane ortamlarında genelde 23°C civarında sabit sıcaklık ve %45-50 aralığında nem tercih edilmektedir.

Kağıt ve kitap materyalleri higroskopik özellik taşımakta; ortamdaki nem değişimlerine duyarlıdır. Düşük nem (%30 ve altı):

- Kağıt liflerinin kırılmasına,
- Cilt yapıştırıcılarının çatlamasına,
- Sayfa deformasyonuna yol açabilir.

Yüksek nem (%60 ve üzeri):

- Küf ve mantar oluşumuna,
- Mikrobiyal aktivite artışına,
- Mürekkep akmaları ve deformasyonuna neden olabilir.

Özellikle nadir kitap koleksiyonları ve arşiv belgelerinde nem kontrolü, malzeme ömrü açısından kritik bir korunma unsurudur.

Sıcaklığın ani dalgalanmaları, kitap ciltleri, kapak malzemeleri ve kağıt üzerinde termal genleşme-büzülme etkileri yaratarak fiziksel deformasyonlara neden olabilir. HVAC sistemlerinin kontrolsüz çalışması, gece-gündüz sıcaklık değişimleri bu tür hasar riskini artırmaktadır.

Aşırı sıcaklık ve düşük nem:

- Göz kuruluğu, boğaz tahrişi ve cilt kuruması gibi şikayetlere,
- Konsantrasyon ve uyku düzeninde bozulmalara yol açabilir.

Aşırı nem ve yüksek sıcaklık:

- Solunum yolu enfeksiyonlarının artışına,
- Mantar ve küf sporlarının yayılımına,
- Termal rahatsızlık ve düşük performansa sebep olabilir.

Özellikle kütüphane kullanıcılarının uzun süreli kalış süreleri göz önüne alındığında termal konfor parametrelerinin sürekli izlenmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Kütüphaneler, fonksiyonel kullanımı, kullanıcı davranış kalıpları ve barındırdığı özel koleksiyonlar nedeniyle diğer bina tiplerinden ayrılan karmaşık iç hava kalitesi dinamiklerine sahiptir.

Kütüphane kullanıcıları genellikle ortalamanın üzerinde kapalı alan kalış süresine sahiptir. Özellikle final ve sınav dönemlerinde kütüphane yoğunluğu artmakta; kişi başına düşen taze hava oranı düşmektedir. Antalya ve Akdeniz Üniversite kütüphanelerinde yapılan saha gözlemleri de farklı yoğunluk profillerine dikkat çekmektedir.

Yoğun kullanıcı varlığı:

- CO₂ seviyesinin hızla yükselmesine,
- Metabolik ısı yükünün artmasına,
- Solunum kaynaklı nem ve biyolojik partiküllerin yükselmesine neden olmaktadır.

Kütüphanelerde milyonlarca kağıt, kitap ve arşiv materyali bulunmaktadır. Kağıdın doğal yaşlanması sonucu;

- Asit hidrolizi ve oksidasyon süreçleriyle VOC ve PM yayılımı artar,
- Cilt yapıştırıcılarının kimyasal çözünmeleri ek emisyonlara yol açar.

Eski ve nadir kitap koleksiyonları, toz partikülleri ve biyolojik kalıntılar açısından daha yüksek risk taşır. Özellikle düşük hava sirkülasyonu olan depolama alanlarında partikül birikimi kronikleşebilir.

Pek çok kütüphane binasında doğal havalandırmaya ağırlık verilmiş, mekanik sistemlerin kapasitesi düşük tutulmuş ya da sonradan dönüştürülmüştür. Bunun sonucunda:

- Filtrasyon kalitesi düşük kalmakta,

- PM ve CO₂ temizliği sınırlı olmakta,
- Hava değişim hızları (ACH) optimal seviyenin altına inmektedir.

ASHRAE 62.1 standardında kütüphane benzeri okuma salonları için önerilen minimum dış hava debisi kişi başına 10 L/s olarak belirlenmiş olsa da uygulamada bu oran çoğu zaman sağlanamamaktadır.

Temizlik işlemleri sırasında tozların süspansiyona karışmasıyla kısa süreli PM pikleri oluşabilir. Kullanılan ekipmanların (süpürge filtreleri, bezler) kalitesi partikül salınımını doğrudan etkiler. Ayrıca HVAC filtrelerinin düzenli değişmemesi, sistem içi toz birikimine yol açar.

Kütüphane binalarının konumu da iç hava kalitesini etkileyen unsurlar arasındadır. Antalya'da ve Akdeniz Üniversitesi yerleşkesinde yapılan ölçümler:

- Trafik kaynaklı dış ortam PM transferi,
- Rüzgarla taşınan toz partikülleri,
- Polen ve biyolojik kirlenici girişleri açısından önemli etkenler göstermiştir.

Özellikle eski binalarda hava sızdırmazlık seviyelerinin yetersizliği, bu dış kaynakların iç mekâna taşınımını artırmaktadır.

İç hava kalitesi konusu üzerine yapılan çalışmalar, son 20 yılda dünya genelinde ciddi artış göstermiş ve farklı yapı tiplerinde kapsamlı saha çalışmaları, modelleme analizleri ve sağlığa etkileri değerlendirmeleri üretilmiştir.

Gelişmiş ülkelerde yapılan geniş kapsamlı çalışmalarda, ofis binaları, hastaneler, eğitim yapıları, laboratuvarlar ve konutlar üzerinde iç hava kalitesi araştırmaları oldukça yaygındır.

- PM, CO₂ ve VOC yüklerinin bina fonksiyonlarına göre nasıl değiştiği,
 - IAQ'nin bilişsel performans ve üretkenlik üzerindeki etkileri,
 - Havalandırma sistemlerinin tasarım optimizasyonu,
- detaylı şekilde incelenmiştir.

Kütüphaneler ise bu araştırma akımlarında daha sınırlı temsil edilen özel yapı tipleri arasında yer almaktadır. Özellikle gelişmiş ülkelerde British Library (İngiltere), National Archives (ABD) gibi çok nadir koleksiyon barındıran yapılar üzerinde daha çok malzeme koruma odaklı IAQ analizleri yapılmıştır.

Türkiye'de yapılan IAQ çalışmaları büyük ölçüde eğitim sınıfları (ilkokul, lise, üniversite), hastane yapıları ve ofis binaları üzerine odaklanmıştır. Özellikle sınıf ortamlarında çocukların maruz kaldığı PM ve CO₂ seviyeleri, öğretmen ve öğrenci

performansı ile ilişkilendirilmiştir. Ancak kütüphane özelinde yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Bu durum kütüphane özelinde çok parametrelili, uzun süreli saha ölçümleri ve sayısal simülasyon destekli analizlerin bilimsel literatürde önemli bir boşluk olduğunu ortaya koymaktadır.

Vasıf Poladov'un okul binalarında yürüttüğü IAQ ve CFD modellemesi temelli yüksek lisans tezi de, eğitim yapılarındaki IAQ zorluklarının ortaya konması ve CFD analizlerinin nasıl kurgulanabileceği açısından önemli bir örnek teşkil etmiştir.

Bu çalışmada, iç hava kalitesi konusunda literatürde tanımlanan eksiklikleri ve uygulama zorluklarını dikkate alarak, kütüphane binalarında çok parametrelili, zamansal ve mekansal boyutta kapsamlı bir saha çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın özgünlüğü, hem ölçüm parametre çeşitliliği hem de analiz derinliği ile önceki çalışmalardan ayrılmaktadır.

Araştırma Antalya ili sınırları içerisindeki iki farklı kütüphane binasında gerçekleştirilmiştir:

- Antalya Kütüphanesi
- Akdeniz Üniversitesi Merkez Kütüphanesi

Her iki kütüphanede toplam 18 ölçüm konumu belirlenmiş, her konumda üç farklı yükseklik seviyesinden (0.5 m, 1.2 m, 1.8 m) ölçümler gerçekleştirilmiştir. Toplamda yüzlerce noktada detaylı saha verisi toplanmıştır.

Çalışmada ölçülen parametreler şunlardır:

- PM0.3, PM0.5, PM1, PM2.5, PM5 ve PM10 partikül fraksiyonları
- Karbondioksit (CO₂) konsantrasyonu
- Sıcaklık (AT)

Ölçümler hem sabah hem de gün içerisinde yinelenmiş; kullanıcı yoğunluğunun farklılaştığı saat dilimlerinde karşılaştırmalı analiz yapılması sağlanmıştır.

Saha ölçümleri sırasında aşağıdaki cihazlardan ölçümler yapılmıştır.

- PCE-PCO 2 Particle Counter: Çoklu PM fraksiyon ölçümü
- JD-3002 CO₂ Ölçüm Cihazı: CO₂ ve sıcaklık ölçümleri

Her ölçüm yaklaşık 10-15 saniyelik veri toplama süresi ile gerçekleştirilmiş; cihazların üretici kalibrasyonları uygulanmıştır.

Toplanan saha verileri üzerinde:

- Ortalama değer hesaplamaları

- Konuma ve yüksekliğe göre parametrik dağılım analizleri
- Zamansal karşılaştırmalar
- İstatistiksel hata analizleri

yapılmıştır.

Elde edilen saha verileri, ayrıca akışkanlar dinamiği modellemesi için CFD simülasyonlarına altlık oluşturmak amacıyla kullanılmıştır. Simülasyonlar Flow-3D programında gerçekleştirilmiş; 3D çizimler ve modelleme görselleri STAR-CCM+ üzerinden hazırlanmıştır.

Bu çalışma, kütüphane binalarındaki iç hava kalitesini değerlendirmek amacıyla literatürde az sayıda bulunan kapsamlı uygulama örneklerinden biridir. Çalışmanın özgün katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- Kütüphane ortamında çok parametrelili (PM, CO₂, sıcaklık) ve çok noktalı sistematik saha ölçümü
- Türkiye'de kütüphane IAQ'sine özgü ilk mekânsal interpolasyon uygulaması
- Yükseklik bağımlı partikül dağılım analizleri
- CFD modellemesine doğrudan girdi sağlayan saha verisi üretimi
- Literatürdeki mevcut boşluklara somut katkı

2. KAYNAK TARAMASI

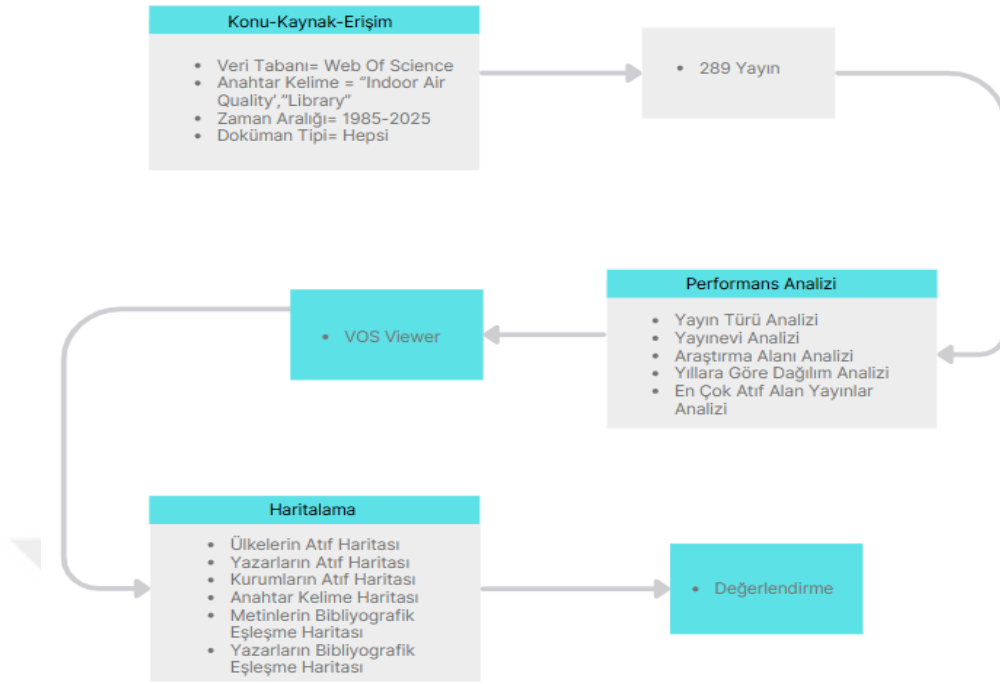
2.1. Kütüphanelerde İç Hava Kalitesi Üzerine Yapılan Uluslararası Çalışmaların Bibliyometrik Analiz ile Değerlendirilmesi

İç hava kalitesi, özellikle kütüphaneler gibi kapalı mekanlarda, hem kullanıcıların sağlığı hem de mekandaki eserlerin korunması açısından büyük bir önem taşımaktadır. Kütüphaneler, toplumun farklı kesimlerinden gelen bireylerin uzun süreler boyunca zaman geçirdikleri, araştırma ve öğrenme faaliyetlerini gerçekleştirdikleri önemli kamusal alanlardır. Bu mekanlarda iç hava kalitesinin optimal düzeyde tutulması, kullanıcıların sağlığı, konforu ve bilişsel performansı üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Aynı zamanda, kütüphanelerde bulunan kitaplar, nadir eserler ve arşiv materyalleri gibi kültürel mirasın uzun süreli korunması da iç hava kalitesi parametreleriyle yakından ilişkilidir. Son kırk yıllık dönemde (1985-2025), kütüphanelerdeki iç hava kalitesine yönelik araştırmalar, teknolojik gelişmeler ve çevresel faktörlere bağlı olarak önemli bir evrim geçirmiştir. Özellikle partikül madde (PM) konsantrasyonları, uçucu organik bileşikler (VOC), biyolojik kirleticiler ve ısıl konfor parametreleri, kütüphane ortamlarının değerlendirilmesinde temel ölçütler olarak öne çıkmaktadır. Güneş ve Kopuz'un (2018) çalışmasında belirtildiği gibi, üniversite kütüphanelerinde belirli elementlerin konsantrasyonları insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratabilmektedir. Bu durum, kütüphanelerde iç hava kalitesinin düzenli olarak izlenmesi ve değerlendirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır (Kuzucuoğlu, 2014). COVID-19 pandemisi süreci de kütüphanelerdeki iç hava kalitesi konusunu yeniden gündeme getirmiştir. Özen ve Öztürk (2022), pandemi döneminde kapı ve pencerelerin kapalı tutulmasının iç hava kalitesini olumsuz etkilediğine dikkat çekerken, Özkan ve Tereci (2022) üniversite kütüphanelerinde enfeksiyon riski ve hava kalitesi üzerinde kapsamlı analizler yapmıştır. Bu dönemde hava kalitesi takibinin önemi daha da belirginleşmiş, kütüphane kullanıcılarının iç hava kalitesine ilişkin memnuniyet anketleri mevcut durumun tespit edilmesine katkı sağlamıştır. Kütüphanelerdeki iç hava kalitesinin incelenmesinde yöntemsel çeşitlilik de dikkat çekmektedir. Geleneksel ölçüm teknikleri yanında, son yıllarda Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) gibi ileri analiz yöntemleri önemli bir rol oynamaya başlamıştır. Hurnik ve arkadaşlarının (2015) belirttiği gibi, CFD simülasyonları, kütüphane gibi karmaşık iç mekanlardaki hava akışı hareketlerini ve kirleticilerle madde dağılımını tahmin etmede etkili bir araç olarak kullanılmaktadır. Bu tür modelleme çalışmaları, havalandırma tasarımının optimizasyonuna ve iç hava kalitesinin iyileştirilmesine yönelik stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca, teknolojik ilerlemeler, kütüphanelerdeki iç hava kalitesinin izlenmesi ve yönetiminde yeni olanaklar sunmaktadır. İnternet of Things (IoT) tabanlı iç hava kalitesi izleme sistemleri, gerçek zamanlı veri akışı sağlayarak iç mekan koşullarının sürekli olarak takip edilmesine imkan tanımaktadır (Üçgün vd., 2020; Jo vd., 2020). Bu sistemlerin yaygınlaşması, kütüphanelerin iç hava kalitesini artırmak ve kullanıcıların sağlığını korumak için önemli bir strateji olarak değerlendirilmektedir. Kütüphanelerde sağlıklı bir iç hava kalitesinin sağlanmasında yapısal faktörler de belirleyici rol oynamaktadır. Demirarslan ve Başak'ın (2018) çalışmasında vurgulandığı gibi, havalandırma sistemlerinin etkinliğinin artırılması büyük önem taşımaktadır. Bunun yanı sıra, kullanılan yapı malzemelerinin seçimi de iç hava kalitesini doğrudan etkilemektedir. Zorlu ve Karadayı'nın (2020) işaret ettiği üzere, yapı malzemeleri iç mekandaki hava kalitesini olumsuz etkileyebilecek çeşitli kimyasallar içerebilmektedir. Bu nedenle, kütüphane tasarımında ve renovasyonunda malzeme seçimine özen gösterilmesi gerekmektedir. Biyolojik kirleticiler de kütüphanelerdeki iç hava kalitesini etkileyen önemli

faktörlerden biridir. Reis-Menezes ve arkadaşlarının (2011) halk kütüphanelerinde yaptığı çalışmada, hem mekanik hem de doğal havalandırma sistemlerinin mantar kontaminasyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Benzer şekilde, Kadayıfçılar (2017) İstanbul Üniversitesi kütüphanesindeki çalışmada, özellikle *Aspergillus* türlerinin varlığına dikkat çekmiş ve bunun hem sağlık hem de kütüphane materyallerinin korunması açısından önemli etkileri olabileceğini vurgulamıştır. Bu makalede, 1985-2025 yılları arasında kütüphanelerdeki iç hava kalitesi araştırmalarının bibliyometrik bir analizi sunulmaktadır. Çalışma, küresel araştırma trendlerinin zamansal değişimini, etkili çalışmaları, başlıca yazarları ve araştırma işbirliği ağlarını incelemektedir. Bibliyometrik analiz yöntemi, bu alandaki bilimsel literatürün yapısal özelliklerini ve gelişim eğilimlerini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu kapsamlı analiz, kütüphanelerdeki iç hava kalitesinin iyileştirilmesine yönelik stratejilerin geliştirilmesine ve gelecekteki araştırma yönelimlerinin belirlenmesine katkı sağlayacaktır.

2.1.1. Bibliyometrik Yöntem

Bu araştırmada, kütüphane ortamlarında iç hava kalitesi konusundaki bilimsel yayınların düzenli incelenmesi için detaylı bir bibliyometrik değerlendirme stratejisi uygulanmıştır. Çalışmanın araştırma metodolojisi üç temel aşamadan meydana gelmektedir. Birinci aşamada veri elde etme ve hazırlama süreci yürütülmüştür. Birincil veri kaynağı olarak Web of Science (WoS) platformu tercih edilmiş ve veri toplama işlemleri Mayıs 2025'te sonuçlandırılmıştır. Tarama yaklaşımı "Indoor Air Quality AND Library" kelime birleşimlerini kapsamaktadır. 1985-2025 dönemi aralığında yapılan literatür taraması, akademik makaleler, konferans sunumları, derleme çalışmaları ve kitap bölümlerini kapsayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu kapsamlı tarama neticesinde 289 bilimsel çalışma belirlenmiş ve veriler tekrarlama kontrolü ile standart hale getirme işlemlerinden geçirmiştir. İkinci aşamada, bibliyometrik değerlendirme VOSviewer (versiyon 1.6.20) program aracılığıyla beş ana kategori üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu kategoriler: yayın değerlendirmesi (yıllık dağılım, belge çeşitleri, kullanılan diller), yazar ve kuruluş incelemesi, uluslararası iş birliği ağ yapıları, alıntı incelemesi ve etki ölçümü ile anahtar terim birlikte görülme değerlendirmesidir. Bu çok açılı analiz metodu, araştırma alanının bibliyometrik özelliklerinin ayrıntılı olarak ortaya konulmasını mümkün kılmıştır. Son aşamada, tematik ve içerik değerlendirmesi yapılmıştır. Bu doğrultuda, minimum 5 defa geçen anahtar terimler kullanılarak birlikte görülme ağları kurulmuştur. Kavramsal gruplama yapıp temel araştırma konuları saptanmış ve zamansal tematik gelişim analizi yürütülmüştür. Verilerin sunumunda ağ analizi yöntemleri kullanılmış olup, sonuçlar etkileşimli harita tekniğiyle görselleştirilmiştir. Bu metodolojik yaklaşım, kütüphanelerde iç hava kalitesi alanının bilimsel yapısını, araştırma eğilimlerini ve iş birliği desenlerini bütünsel bir perspektifle açıklamayı hedeflemektedir.



Şekil 2. 1. Metodolojinin çerçevesi

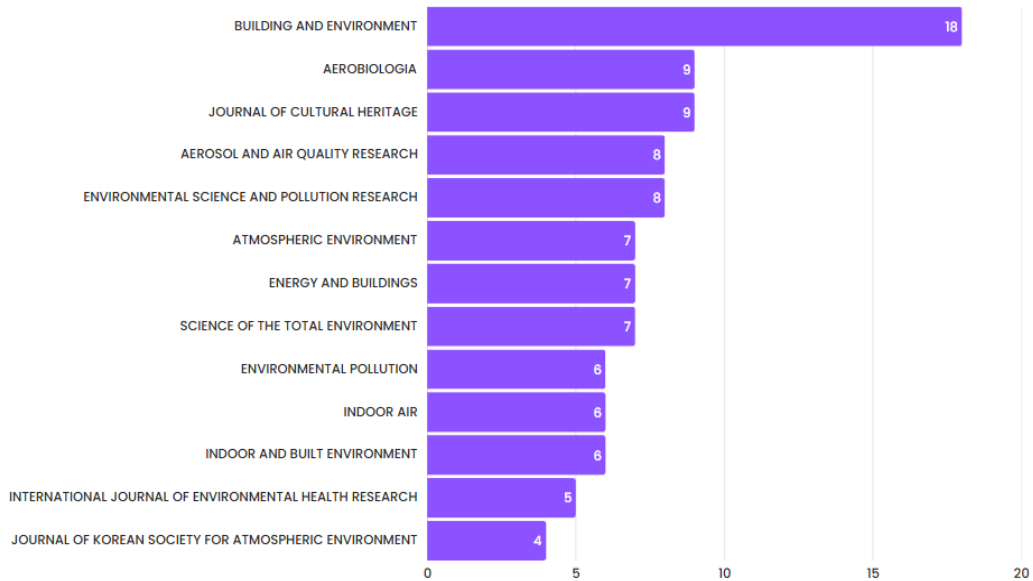
2.1.2. Bulgular ve tartışmalar

Bu bölümde, kütüphanelerdeki hava kalitesi ile ilgili yapılan bilimsel araştırmaların bibliyometrik analizi detaylı bir şekilde incelenmektedir. Çalışmada, bu alandaki akademik yayınların zaman içindeki değişimi, öne çıkan araştırmacılar, önder kurumlar ve ülkeler, baskın araştırma alanları ile bilimsel iş birliği ağları bütüncül bir yaklaşımla ele alınmaktadır. Bibliyometrik değerlendirme sonrasında, kütüphane hava kalitesi alanındaki bilimsel birikim haritalanmış, gelişen araştırma eğilimleri saptanmış ve mevcut araştırma eksiklikleri tanımlanarak akademik dünya için stratejik öneriler sunulmuştur. Araştırma sonuçları, alanın geçmişten günümüze kadarki evrimini ve bugünkü konumunu gözler önüne sererken, ileriye dönük bilimsel çalışmalar için yol gösterici bir kaynak oluşturmaktadır.

2.1.2.1. Kütüphanelerde iç hava kalitesi üzerine küresel araştırma eğilimleri

Bilimsel yayınların dergilere göre dağılımı, kütüphane iç hava kalitesi alanındaki araştırma dinamiklerini kavramak açısından değerli perspektifler sunmaktadır. Bibliyometrik analiz sonuçları, bu alandaki önde gelen dergileri ve yayın yoğunluklarını gözler önüne sermektedir. Analiz bulgularına göre, "Building and Environment" dergisi 18 yayımla alanda lider pozisyonda yer almaktadır. Bu dergiyi, biyolojik partiküllerin hava kalitesine etkilerini inceleyen "Aerobiologia" ve kültürel miras koruma perspektifinden iç hava kalitesini değerlendiren "Journal of Cultural Heritage" dergileri 9'ar yayımla takip etmektedir. Aerosol partikülleri ve hava kalitesi araştırmalarında önemli

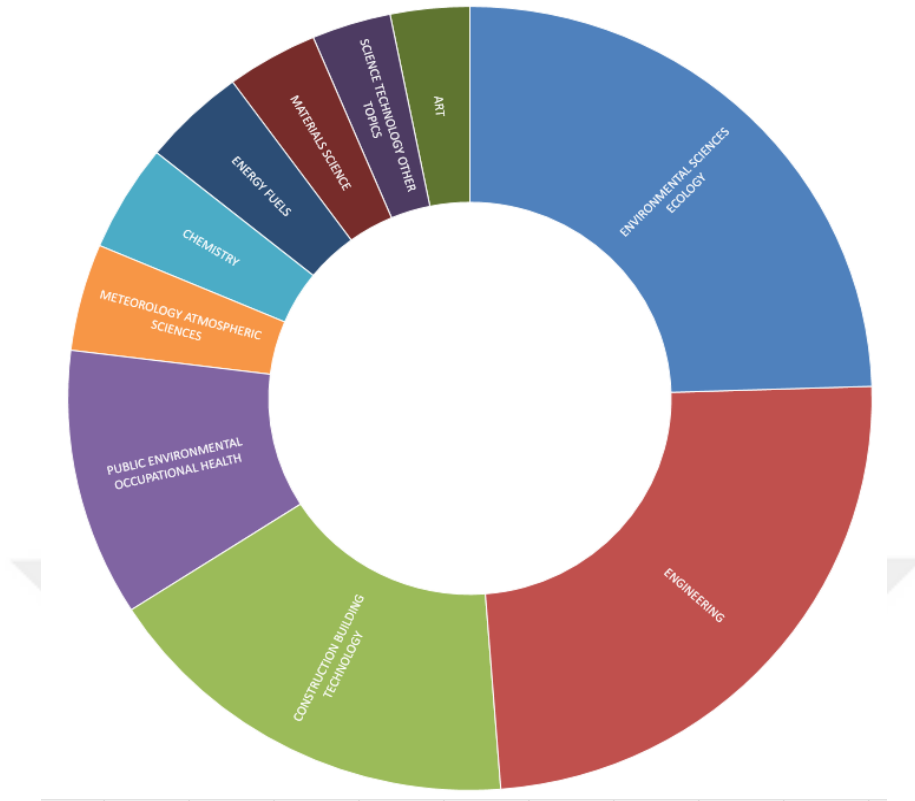
bir kaynak olan "Aerosol and Air Quality Research" ile çevresel bilimler ve kirlilik araştırmalarında öne çıkan "Environmental Science and Pollution Research" dergileri 8'er yayımla üçüncü sırayı paylaşmaktadır. Atmosfer bilimi alanında köklü bir geçmişe sahip "Atmospheric Environment", bina enerji verimliliği ve iç ortam kalitesi konularını ele alan "Energy and Buildings" ve kapsamlı çevre araştırmalarına odaklanan "Science of the Total Environment" dergileri 7'şer yayımla dikkat çekmektedir. İç hava kalitesi araştırmalarının önemli platformlarından "Environmental Pollution", "Indoor Air" ve "Indoor and Built Environment" dergileri 6'şar yayımla önemli katkılar sağlamıştır. Uluslararası çevre sağlığı araştırmalarında önde gelen "International Journal of Environmental Health Research" 5 yayımla listeye dahil olmaktadır. Bu dağılım, kütüphane iç hava kalitesi alanının çok boyutlu yapısını yansıtmakta ve konunun yapı fiziği, çevre bilimleri, halk sağlığı, kültürel koruma ve atmosfer bilimi gibi çeşitli disiplinleri kapsayan geniş bir araştırma yelpazesine sahip olduğunu göstermektedir. Yayın sayılarının çeşitliliği ve dergi spektrumunun genişliği, alanın akademik toplumda gördüğü ilgiyi ve multidisipliner yaklaşımları ortaya koymaktadır. Bu veriler, alanın bilimsel iletişim ağlarının çeşitliliğini sergilemekte ve farklı uzmanlık alanlarından araştırmacıların katkılarını yansıtmaktadır. Özellikle yapı fiziği ve çevre sağlığı odaklı dergilerin ağırlığı, kütüphanelerde iç hava kalitesinin hem teknik hem de sağlık boyutlarının araştırmalardaki kritik önemini vurgulamaktadır.



Şekil 2. 2. Konuda en fazla çalışma bulunan yayımlar

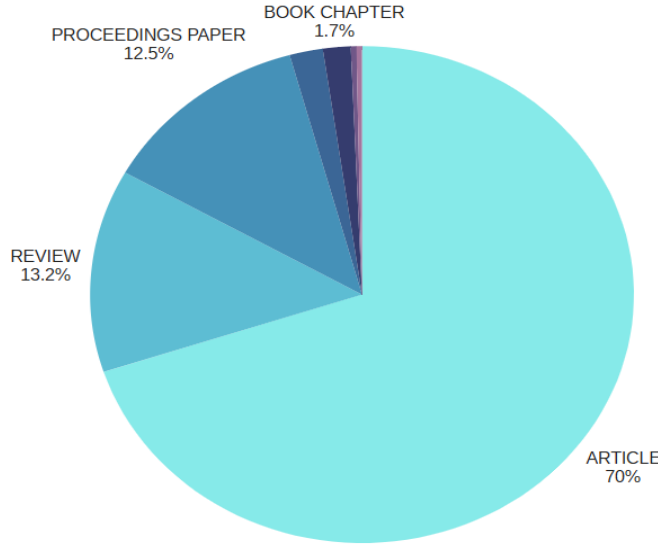
Kütüphane iç hava kalitesi araştırmalarının disiplinler arası dağılımı, konunun çok boyutlu yapısını açıkça ortaya koymaktadır. Şekil 3'te sunulan veriler, bu alandaki çalışmaların geniş bir akademik yelpazede gerçekleştirildiğini göstermektedir. Çevre Bilimleri ve Ekoloji alanı 100 yayımla öncü konumdadır. Bunu 99 yayımla Mühendislik alanı takip etmektedir. İnşaat ve Yapı Teknolojileri 70 yayımla üçüncü sırada yer alırken,

Halk Sağlığı, Çevre ve Meslek Sağlığı kategorisi 45 yayınlı dördüncü sırayı almıştır. Kimya alanındaki 18 yayınlı, iç hava kirleticilerinin analiz yöntemlerinin önemini gösterirken, Meteoroloji ve Atmosfer Bilimleri alanındaki 18 yayınlı, hava dolaşımı ve iklim kontrolü konularına olan ilgiyi yansıtmaktadır. Enerji ve Yakıtlar alanındaki 17 yayınlı, kütüphanelerin enerji verimli havalandırma sistemlerinin önemini vurgularken, Malzeme Bilimi (15) alanındaki çalışmalar iç hava kalitesini etkileyen yapı malzemelerinin araştırıldığını göstermektedir. Sanat alanındaki 13 yayınlı, kültürel değerlerin korunmasında hava kalitesinin rolüne işaret ederken, Bilim ve Teknoloji kategorisindeki 13 yayınlı multidisipliner yaklaşımları temsil etmektedir. Spektroskopi (12) ve Arkeoloji (11) alanlarındaki yayınlar, tarihî kütüphanelerdeki eser koruma açısından iç hava kalitesinin analiz edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Su Kaynakları (10), Bilgisayar Bilimleri (9) ve Jeoloji (9) alanlarındaki araştırmalar, modern izleme sistemleri ve çevresel faktörlerin etkilerini incelemektedir. Yaşam Bilimleri ve Tıp (9), Termodinamik (8) alanlarındaki çalışmalar sırasıyla sağlık etkileri ve ısı konfor konularına odaklanmaktadır. Sanat ve Beşeri Bilimler (6), Biyoteknoloji ve Uygulamalı Mikrobiyoloji (6), Genel Dahiliye (6) ve Telekomünikasyon (6) alanlarındaki yayınlar daha spesifik yaklaşımları temsil ederken, Mimarlık (5) alanındaki çalışmalar tasarım odaklı çözümlere işaret etmektedir. Bu disiplinler arası dağılım, kütüphane iç hava kalitesinin çevre bilimleri, mühendislik, yapı teknolojileri ve halk sağlığı alanlarının kesişiminde yer aldığını ve bütünlük bir yaklaşımla ele alınması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle akıllı havalandırma sistemleri ve sürdürülebilir iç ortam çözümleri gibi yenilikçi yaklaşımların, farklı disiplinlerin iş birliğiyle geliştirildiği görülmektedir. Diğer alanlardaki yayınlar daha düşük sayılarda olmakla birlikte, kütüphane iç hava kalitesinin çok çeşitli uygulama alanlarına sahip olduğunu göstermektedir. Bu geniş disiplin yelpazesi, alanın kompleks yapısını ve farklı uzmanlık alanlarının katkılarının önemini vurgulamaktadır.



Şekil 2. 3. Konuda en fazla çalışma bulunan alanlar

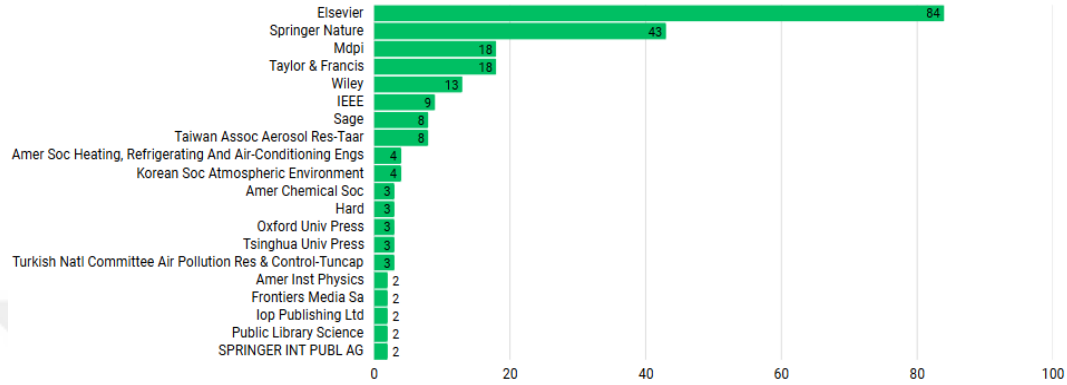
Kütüphanelerde iç hava kalitesi araştırmalarının yayın türlerine göre dağılımı, Şekil 4'te detaylı olarak sunulmaktadır. En yaygın yayın türü 212 (%69.97) yayın ile akademik makaleler olup, bu sayı alandaki bilimsel araştırmaların yoğunluğunu ve orijinal çalışmaların önemini göstermektedir. Derleme makaleleri (Review) 40 yayınlı (%13.20) ikinci sırada yer alarak, alandaki bilgi birikiminin sistematik değerlendirmesine ve mevcut literatürün sentezine verilen önemi vurgulamaktadır. Konferans bildiri makaleleri (Proceedings Paper) 38 yayınlı (%12.54) üçüncü sırada yer almakta, bu da kütüphane iç hava kalitesi alanında bilimsel toplantıların ve konferansların önemli bir bilgi paylaşım platformu olduğunu göstermektedir. Erken erişim (Early Access) kategorisindeki 6 yayın (%1.98), alandaki güncel araştırmaların hızlı bir şekilde bilim dünyasıyla paylaşılma eğilimini gösterirken, kitap bölümleri (Book Chapter) 5 yayınlı (%1.65) daha kapsamlı ve derinlemesine analizlere katkıda bulunmaktadır. Düzeltmeler (Correction) ve yazılım incelemeleri (Software Review) her biri 1 yayınlı (%0.33) alanda bulunan özel format yayınları temsil etmektedir. Bu çeşitlilik, kütüphanelerde iç hava kalitesi alanının farklı bilimsel iletişim kanallarını etkin bir şekilde kullandığını ve araştırma sonuçlarının çeşitli formatlarda paylaşıldığını göstermektedir. Yayın türlerinin bu dağılımı, alanın akademik olgunluğunu, bilgi paylaşımının çeşitliliğini ve araştırma topluluğunun dinamik yapısını yansıtmaktadır. Özellikle orijinal araştırma makalelerinin yüksek oranı (%69.97), kütüphane ortamlarındaki hava kalitesi konusunda aktif araştırma faaliyetlerinin ve çevresel sağlık alanındaki gelişmelerin yoğunluğunu göstermektedir.



Şekil 2. 4. Konuda en fazla çalışma bulunan yayın türleri

Kütüphanelerde iç hava kalitesi araştırmalarının yayıncılara göre dağılımı incelendiğinde, alanın akademik yayıncılık ekosistemindeki çeşitliliği ve dinamikleri net bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Analiz sonuçları, bu aladaki yayıncılık faaliyetlerinin belirli kurumlar etrafında yoğunlaştığını göstermektedir. Elsevier, 84 yayınlı alan yazınında lider konumda bulunmaktadır. Bu rakam, Elsevier'in kütüphane iç hava kalitesi araştırmalarındaki merkezi rolünü ve alandaki güçlü pozisyonunu yansıtmaktadır. Springer Nature, 43 yayınlı ikinci sırada yer almakta ve özellikle çevresel sağlık odaklı araştırmaların yayınlanmasında önemli bir platform sunmaktadır. Açık erişim yayıncılık modeliyle öne çıkan MDPI ve köklü yayınevi Taylor & Francis, her biri 18 yayınlı üçüncü sırada bulunmaktadır. Bu iki yayınevinin eşit varlığı, alandaki araştırma sonuçlarının geniş kitlelere ulaştırılmasında farklı yayıncılık modellerinin önemini vurgulamaktadır. Wiley (13 yayınlı) ve IEEE (9 yayınlı) gibi köklü yayınevleri, alanın geleneksel akademik yayıncılık boyutunu temsil etmektedir. Özellikle dikkate değer olan, Taiwan Association of Aerosol Research-TAAR (8 yayınlı) ve American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (4 yayınlı) gibi uzmanlık alanına odaklı kurumların katkılarıdır. Bu durum, kütüphane iç hava kalitesi araştırmalarının HVAC mühendisliği ve aerosol bilimi alanlarıyla olan yakın ilişkisini ortaya koymaktadır. Korean Society of Atmospheric Environment (4 yayınlı) ve Turkish National Committee Air Pollution Research & Control-TUNCAP (3 yayınlı) gibi ulusal kurumların varlığı, alandaki araştırmaların global kapsamını göstermektedir. Sage (8 yayınlı), American Chemical Society (3 yayınlı) ve Oxford University Press (3 yayınlı) gibi kurumların katkıları, kütüphane iç hava kalitesi araştırmalarının multidisipliner yapısını ve farklı akademik geleneklerden beslenmesini göstermektedir. Frontiers Media SA (2 yayınlı), IOP Publishing Ltd (2 yayınlı) ve Public Library Science (2 yayınlı) gibi açık erişim odaklı yayınevlerinin varlığı, alandaki bilgi paylaşımının demokratik yaklaşımlarını

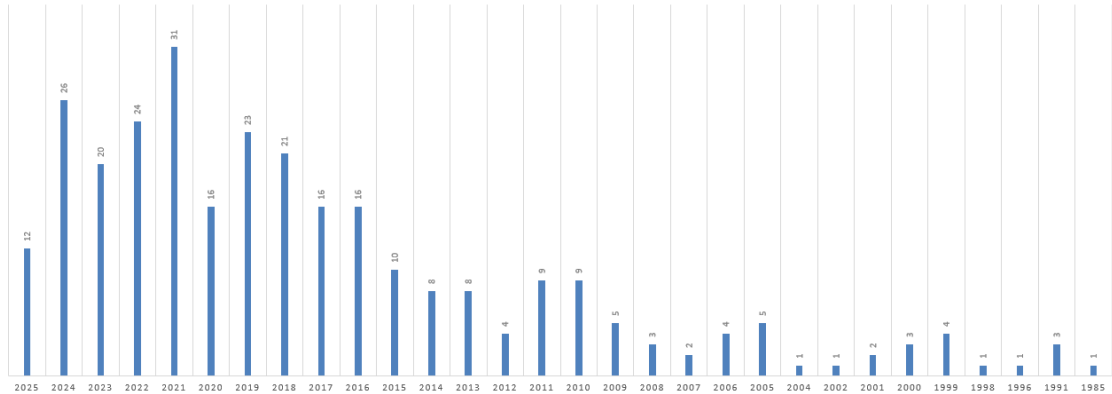
yansıtmaktadır. Bu dağılım, kütüphanelerde iç hava kalitesi araştırmalarının hem geleneksel akademik yayıncılık kanallarında hem de yeni nesil açık erişim platformlarında kendine yer bulduğunu göstermektedir. Ayrıca, yayıncı çeşitliliği, alanın multidisipliner yapısını ve global araştırma ağının genişliğini yansıtmaktadır.



Şekil 2. 5. Konuda en fazla çalışma yayımlayan yayınevleri

Kütüphanelerde iç hava kalitesi alanındaki araştırmaların yıllara göre dağılımı, alanın gelişimini ve artan önemini açıkça ortaya koymaktadır. 1985'ten günümüze uzanan bu gelişim süreci, özellikle son on yılda dikkat çekici bir ivme kazanmıştır. 2025 yılının ilk aylarında bile 12 yayına ulaşılması, alanın dinamik yapısını göstermektedir. Son yıllardaki gelişim oldukça dikkat çekicidir. 2021 yılı 31 yayımla en yüksek seviyeye ulaşırken, -2024'te 26, 2022'de 24 ve 2023'te 20 yayın gerçekleştirilmiştir. Bu sayılar, kütüphane iç hava kalitesi konusunda araştırmacıların artan ilgisini göstermektedir. 2015-2020 dönemi, alanın önemli bir canlanma geçirdiği yıllar olmuştur. 2019'da 23, 2018'de 21 yayın üretilmiş, 2020'de ise pandemi dönemine rağmen 16 yayımla istikrarlı bir seviye korunmuştur. 2017 ve 2016 yıllarında her yıl 16 yayın ile düzenli bir artış gözlenmiştir. 2015'teki 10 yayın, alanın büyüme ivmesinin başlangıcını göstermektedir. 2010-2015 arası dönemde yayın sayıları daha mütevazı seviyelerde seyretmiştir. 2014'te 8, 2013'te 8, 2011'de 9 ve 2010'da 9 yayın ile alanın istikrarlı bir gelişim gösterdiği görülmektedir. 2012 yılında ise 4 yayımla düşük bir seviye kaydedilmiştir. 2000'li yılların başı ve 1990'lar, alanın temellerinin atıldığı dönem olarak dikkat çekmektedir. 2005'teki 5 yayın, 2006'daki 4 yayın ve 1999'daki 4 yayın, alanın erken dönemindeki önemli katkıları temsil etmektedir. 1991'de 3 yayın ve 1985'te 1 yayın ile alanın kökleri oldukça eskiye dayanmaktadır. Son yıllardaki yüksek yayın sayıları, kütüphane kullanıcılarının sağlığına duyulan artan hassasiyet, bina sağlığı kavramının önem kazanması, iç mekan hava kirliliğinin sağlık etkilerinin daha iyi anlaşılması, sürdürülebilir bina tasarımı yaklaşımları ve COVID-19 pandemisinin havalandırma konusundaki farkındalığı artırmasıyla açıklanabilir. Bu gelişim trendi, kütüphanelerde iç hava kalitesi alanının gelecekte de büyümeye ve evrilmeye devam edeceğini göstermektedir. Özellikle son beş

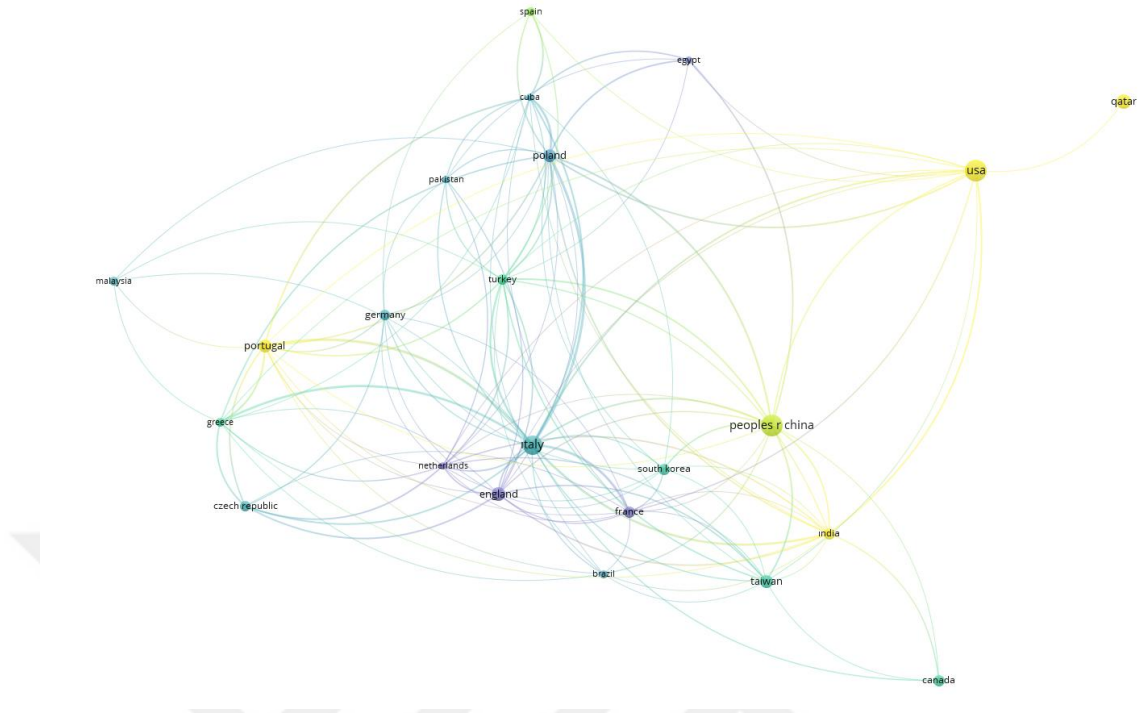
yıldaki yayın sayılarındaki istikrarlı artış, alanın akademik camiada gördüğü ilginin ve kütüphane yönetimindeki pratik uygulamalardaki öneminin bir göstergesidir.



Şekil 2. 6. Konu hakkında çalışmaların yıllara göre dağılımı

2.1.2.2. Kütüphanelerde iç hava kalitesi: bibliyometrik haritalama

Kütüphanelerde iç hava kalitesi alanındaki bilimsel literatürün kapsamlı analizini gerçekleştirmek ve gelecekteki araştırma yönelimlerini belirlemek amacıyla detaylı bir bibliyometrik haritalandırma çalışması yürütülmüştür. Bu haritalandırma süreci, bilimsel yayınların tarihsel gelişimini, araştırmacıların coğrafi dağılımını, yüksek etki yaratan çalışmaları, sık kullanılan kavramsal terminolojiyi ve baskın araştırma kümelerini ortaya çıkarmayı amaçlamıştır. VOSviewer yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen analizler, alanın bilimsel yapısını, işbirliği ağlarını ve konusal evrimini görselleştirmeye olanak sağlamıştır. Atıf ağları ve ortak yazarlık ilişkileri incelenerek, alanın öncü araştırmacıları ve kurumları tespit edilmiş, anahtar kelime birlikte-kullanım analizleri ile de araştırma konuları arasındaki ilişkiler haritalandırılmıştır. Bu sistematik yaklaşım, kütüphanelerde iç hava kalitesi alanındaki bilgi birikiminin mevcut durumunu değerlendirmeye ve gelecekteki araştırma fırsatlarını belirlemeye imkan tanımıştır. Özellikle yükselen araştırma eğilimleri, metodolojik yaklaşımlar ve disiplinler arası iş birliği potansiyelleri açık bir şekilde ortaya konmuştur. Bu kapsamlı haritalandırma çalışması, alandaki bilgi boşluklarının tespit edilmesine, araştırma önceliklerinin belirlenmesine ve gelecekteki çalışmalar için stratejik yönelimlerin planlanmasına katkı sağlamıştır. Ayrıca, kütüphane çevresel sağlığı ve iç mekan hava kalitesi teknolojilerinin kesişimindeki araştırma dinamiklerinin daha iyi anlaşılmasına ve bu alandaki bilimsel bilgi üretiminin sistematik bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımıştır. Haritalandırma sonuçları, kütüphane yönetimi, çevresel mühendislik ve halk sağlığı alanları arasındaki güçlü bağlantıları gözler önüne sermiş, alanın multidisipliner doğasını vurgulamıştır.

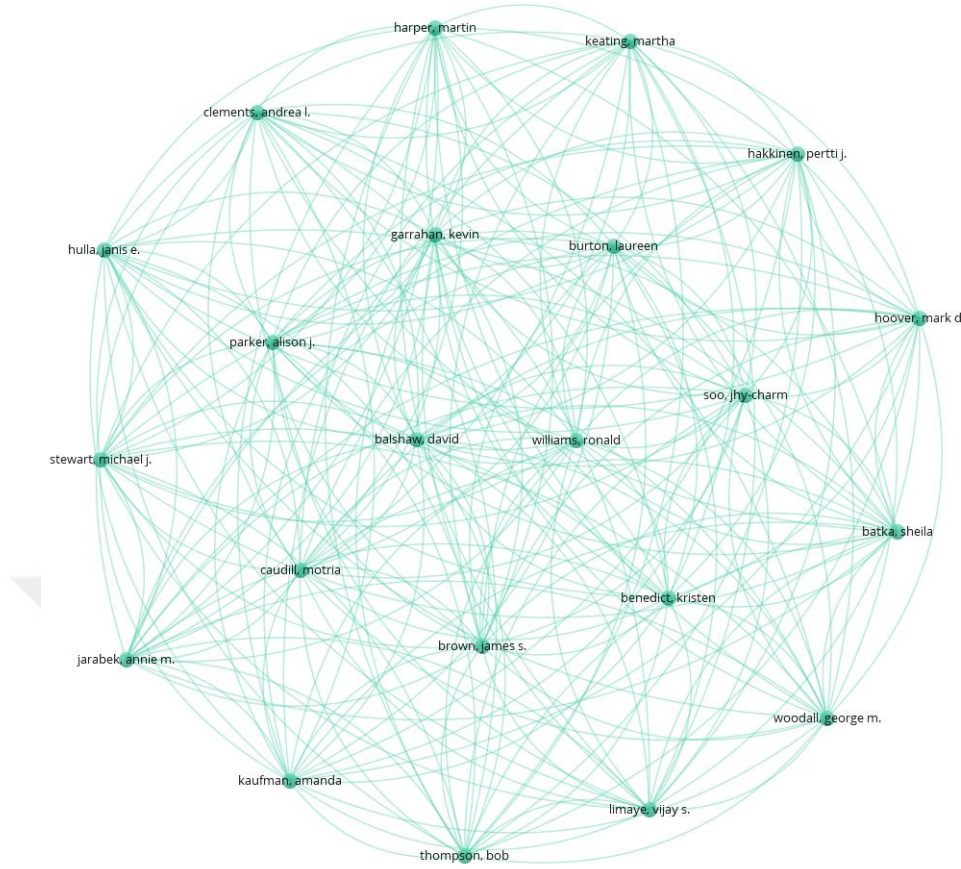


Şekil 2. 7. Ülkelerin atıf ağları

Kütüphanelerde iç hava kalitesi alanındaki araştırmaların ülkelere göre dağılımı, konunun küresel ölçekteki etkisini ve önemini net bir şekilde ortaya koymaktadır. İncelenen veriler, alanda önemli bir etki düzeyine ulaşmış ülkeleri ve bunlar arasındaki iş birliği ağlarını göstermektedir. ABD, 39 yayın ve 959 atıfla alanın lider konumundadır. Bu liderlik, ABD'nin kütüphane bilimi ve çevre sağlığı alanındaki güçlü araştırma geleneklerini ve bu alandaki stratejik odaklanmayı yansıtmaktadır. Çin Halk Cumhuriyeti 38 yayın ve 424 atıfla ikinci sırada yer alırken, İtalya 30 yayın ve 898 atıfla üçüncü sırayı almıştır. Bu üç ülke arasındaki bilimsel üretim ve iş birliği, alanın gelişimine önemli katkılar sağlamaktadır. Katar (18 yayın, 439 atıf), özellikle sıcak iklim koşullarında kütüphane iç hava kalitesi konusundaki araştırmalara önemli katkılar sunmaktadır. İngiltere (15 yayın, 1008 atıf), yayın sayısına göre en yüksek atıf oranına sahip ülke olarak dikkat çeker. Portekiz (14 yayın, 247 atıf) ve Tayvan (14 yayın, 147 atıf) eşit yayın sayısı ile alanda güçlü araştırma altyapıları sunmaktadır. Polonya (13 yayın, 297 atıf), Kanada (11 yayın, 187 atıf) ve Hindistan (11 yayın, 158 atıf) güçlü araştırma altyapıları ve yenilikçi yaklaşımlarıyla dikkat çekmektedir. Avrupa'dan Fransa (10 yayın, 279 atıf), Güney Kore (10 yayın, 129 atıf) ve Türkiye (9 yayın, 244 atıf) önemli araştırma merkezlerine ev sahipliği yapmaktadır. Çek Cumhuriyeti (9 yayın, 220 atıf) ve Almanya (9 yayın, 166 atıf) gibi Orta Avrupa ülkeleri, özellikle bina fiziksel performansı ve havalandırma sistemleri konusunda öne çıkmaktadır. Yunanistan (7 yayın, 129 atıf), İspanya (7 yayın, 129 atıf), Avustralya (7 yayın, 78 atıf), Malezya (7 yayın, 64 atıf) ve Brezilya (6 yayın, 36 atıf) gibi ülkeler de alanda önemli araştırmalara imza atmaktadır. Bu ülkelerin toplam bağlantı güçleri (total link strength), uluslararası iş birliği ağlarındaki

aktif rollerini göstermektedir. İtalya'nın 89 değeriyle en yüksek bağlantı gücüne sahip olması, ülkenin kütüphane iç hava kalitesi konusundaki uluslararası iş birliklerindeki merkezi rolünü vurgulamaktadır. Bu dağılım, kütüphanelerde iç hava kalitesi araştırmalarının küresel karakterini ve farklı bölgelerdeki araştırma dinamiklerini yansıtmaktadır. Özellikle Avrupa ve Kuzey Amerika'nın yüksek performansı ve Asya-Pasifik bölgesiyle kurulan güçlü iş birlikleri, alanın geleceği açısından umut verici bir tablo çizmektedir.

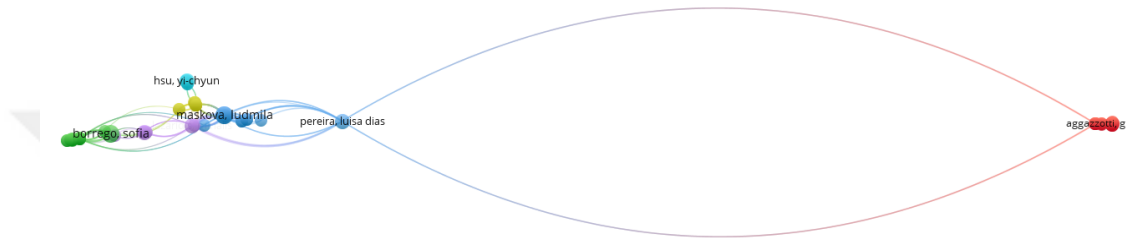
Yazarların ortak yazarlık analizine göre, en fazla bağlantılı ve iş birliği yapan yazarları tespit etmek üzere en az 2 yayın ve en az 5 atıf kriteri belirlenerek ağ haritası oluşturulmuştur. Kütüphanelerde iç hava kalitesi alanındaki önde gelen araştırmacılar ve akademik etkileri, sunulan veriler ve ağ haritasıyla detaylı bir şekilde görselleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, Borrego Sofia 4 yayın ve 175 atıfla en yüksek atıf oranına sahip araştırmacı konumundadır, ancak toplam bağlantı gücünün 4 olması sınırlı iş birliği ağını göstermektedir. Maskova Ludmila ve Smolik Jiri her ikisi de 4 yayın ve 91 atıfla ikinci sırada yer alırken, her ikisinin de 10'luk bağlantı gücüyle aktif iş birliklerine sahip olduğu görülmektedir. Lazaridis Mihalis'in 3 yayın, 96 atıf ve 7'lik toplam bağlantı gücü ile önemli bir konumda yer aldığı, Hsu Ya-Chyun'un ise 3 yayın, 77 atıf ve 6'lık bağlantı gücüyle alandaki etkisini gösterdiği söylenebilir. İki yayınla önemli katkılar sunan araştırmacılar arasında Balocco Carla (47 atıf), Pereira Luisa Dias (32 atıf), Fadli Fodil (149 atıf) ve Meskin Nader (149 atıf) dikkat çekmektedir. Özellikle Fadli Fodil ve Meskin Nader'in 2 yayın ile 149 atıfa ulaşması, çalışmalarının yüksek etkisini göstermektedir. Ağ haritasında görüldüğü üzere, araştırmacılar arasında farklı iş birliği kümeleri oluşmuştur. De Gennaro Gianluigi (115 atıf, 18 bağlantı gücü), Di Gilio Alessia (115 atıf, 18 bağlantı gücü) ve Giungato Pasquale (115 atıf, 18 bağlantı gücü) aynı bağlantı gücüne sahip olmaları güçlü bir iş birliği kümesinin varlığını göstermektedir. Cassar May'in 2 yayın ve 8'lik bağlantı gücü, kola Jana, Strlic Matija ve Dambruoso Paolo Rosario'nun her birinin 2 yayın ve 8'lik bağlantı gücü alandaki farklı araştırma gruplarını temsil etmektedir. Bu görsel analiz, kütüphanelerde iç hava kalitesi alanındaki bilgi üretiminin ve paylaşımının dinamik yapısını ortaya koymaktadır. Farklı renk kodları, araştırmacıların çalışma alanlarındaki tematik yoğunlaşmaları ve alt uzmanlık alanlarını temsil etmektedir. Bu veriler, kütüphane iç hava kalitesi alanındaki araştırmacıların hem üretkenliğini hem de çalışmalarının etki düzeyini göstermekte, özellikle Avrupa merkezli araştırmacılar arasındaki güçlü iş birliklerini vurgulamaktadır.



Şekil 2. 8. Yazarlar arası iş birliğini gösteren ortak yazar bağları

Kütüphanelerde iç hava kalitesi alanındaki atıf ağları ve araştırmacılar arası etkileşimlerin analizi, alanın dinamik yapısını ve gelişim sürecini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Veriler incelendiğinde, Borrego Sofia'nın 4 yayın ve 175 atıfla en yüksek atıf alan araştırmacı olduğu, aynı zamanda 42'lik bağlantı gücüyle alandaki en aktif işbirliği ağına sahip olduğu görülmektedir. Dikkat çeken bir husus, Perdomo Ivette, Fadli Fodil ve Meskin Nader'in her birinin 2 yayın ile 149 atıfa ulaşmış olmalarıdır. Bu durum, kütüphane iç hava kalitesi alanında az sayıda yayımla bile yüksek etki yaratabileceğini göstermektedir. Ancak, Perdomo Ivette'nin 23'lük bağlantı gücü diğer ikisinin 0'lık bağlantı gücüyle belirgin bir kontrast oluşturmaktadır. Oluşturulan ağ haritası, alanın çok boyutlu yapısını ve araştırma kümelerinin dağılımını görselleştirmektedir. Cassar May'in 2 yayın, 119 atıf ve 29'luk bağlantı gücüyle güçlü bir iş birliği ağının merkezi konumunda olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, Cigic Irena Kralj, De Bruin Gerrit, Kolar Jana, Strlic Matija'nın her birinin 2 yayın, 119 atıf ve 29'luk bağlantı gücü ile aynı araştırma kümesinde yer aldıkları anlaşılmaktadır. İtalyan araştırmacıları grubunda Dambruoso Paolo Rosario, De Gennaro Gianluigi, Di Gilio Alessia ve Giungato Pasquale'nin her birinin 2 yayın, 115 atıf ve 14'lük bağlantı gücü ile güçlü bir iş birliği kümesi oluşturdukları görülmektedir. Bu durum, kütüphane iç hava kalitesi araştırmalarında ulusal ve kurumsal iş birliklerinin önemini vurgulamaktadır. Atıf performansı açısından Sodiq Ahmed (2 yayın, 131 atıf), Loiotile Annamaria Demarinis, Marzocca Annalisa,

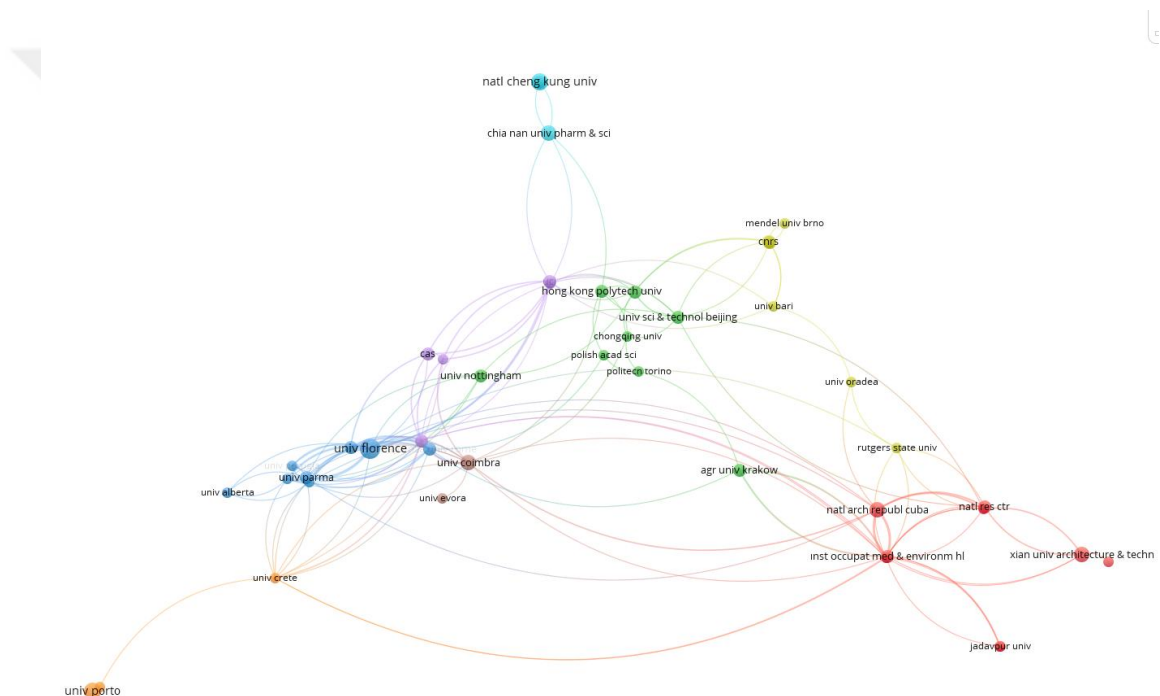
Mazzone Antonio, Palmisani Jolanda, Porcelli Francesca ve Tufino Maria (hepsi 2 yayın, 115 atıf) gibi araştırmacılar dikkat çekmektedir. Ağ haritasındaki bağlantıların yoğunluğu ve dağılımı, kütüphanelerde iç hava kalitesi alanında orta düzeyde bir uluslararası iş birliği ağının varlığını ortaya koymaktadır. Özellikle Avrupa araştırmacıları arasındaki yoğun bağlantılar, bilgi paylaşımının ve ortak araştırma projelerinin varlığını yansıtmaktadır. Bu kapsamlı analiz, alanın belirli araştırma grupları etrafında kümelenme eğiliminde olduğunu ve interdisipliner karakterini ortaya koymakta, çevresel mühendislik, kütüphane bilimi ve halk sağlığı uzmanlarının ortak hedefler doğrultusunda nasıl bir araya geldiğini göstermektedir.



Şekil 2. 9. Yazarların atıf analizi

Kütüphanelerde iç hava kalitesi alanında kurumlar arası iş birliği ve atıf ağlarının analizi, VOSviewer kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Veriler incelendiğinde, Qatar University'nin 9 yayın ve 356 atıfla alanın en üretken kurumu olarak öne çıktığı, ancak 0'lık toplam bağlantı gücünün kurumun araştırma ağlarında izole bir konum sergilediğini göstermektedir. Hamad Bin Khalifa University 8 yayın ve 186 atıfla ikinci sırada yer alırken, 3'lük bağlantı gücü sınırlı iş birliği göstermektedir. University of Florence ise 7 yayın ve 170 atıfla üçüncü sırada bulunmakta, 38'lik bağlantı gücüyle alandaki en güçlü iş birliği ağına sahip olduğu görülmektedir. University of Porto (5 yayın, 128 atıf), UC Berkeley (5 yayın, 124 atıf) ve National Cheng Kung University (5 yayın, 82 atıf) gibi kurumların yüksek atıf sayıları, yaptıkları araştırmaların kalitesini ve etkisini yansıtmaktadır. University of Coimbra'nın 4 yayın ve 67 atıfla 22'lik bağlantı gücü, Avrupa kurumları arasındaki güçlü iş birliğini göstermektedir. Ağ haritasında görülen iş birliği kümeleri, kurumların farklı uzmanlık alanlarını yansıtmaktadır. National Architecture & Technology Republic of Cuba'nın 4 yayın ve 175 atıfla 24'lük bağlantı gücü, Latin Amerika bölgesindeki kütüphane çevre sağlığı araştırmalarına katkısını göstermektedir. Chia Nan University of Pharmacy & Science (4 yayın, 41 atıf) ve Xi'an University of Architecture & Technology (4 yayın, 30 atıf) gibi Asya kurumları, özellikle bina fiziksel performansı ve havalandırma sistemleri konularında yoğunlaşmaktadır. University of Strasbourg 1 (3 yayın, 176 atıf) ve UCL (3 yayın, 119 atıf) gibi Avrupa kurumları, kütüphane iç hava kalitesi araştırmalarında güçlü akademik gelenekleri

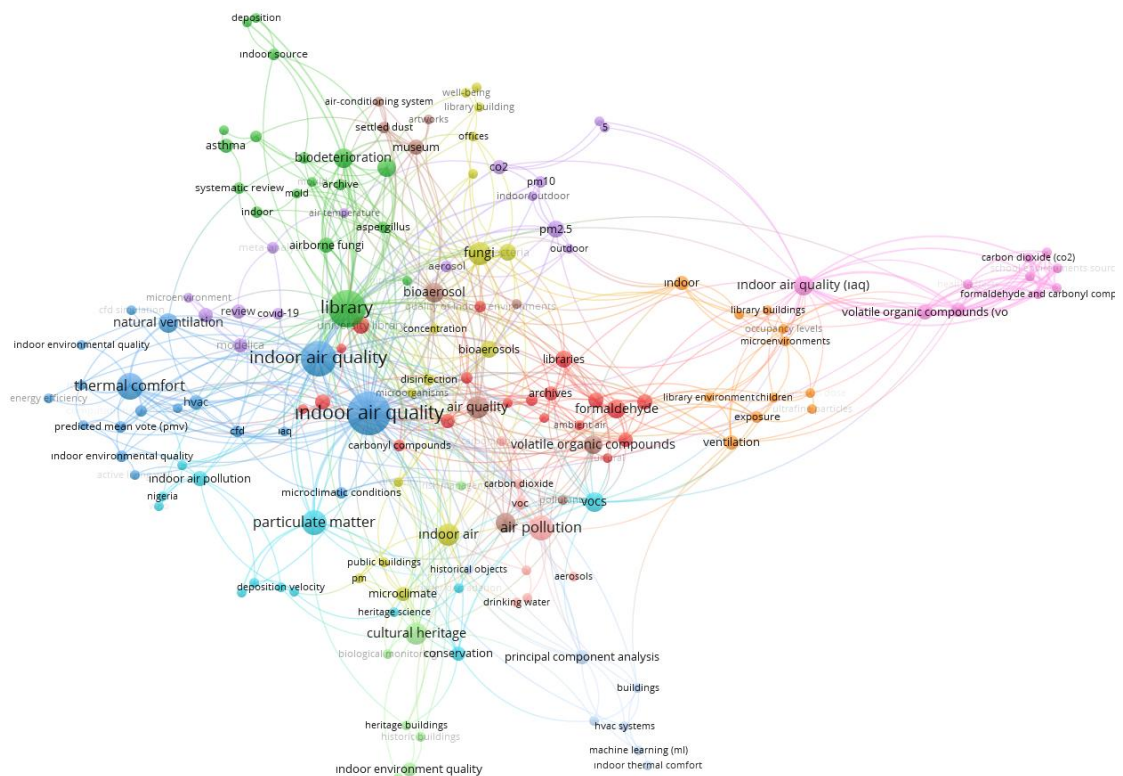
yansıtılmaktadır. University of Bologna (3 yayın, 100 atıf), University of Nottingham (3 yayın, 100 atıf) ve Technical University of Crete (3 yayın, 96 atıf) gibi kurumlar da alanın gelişimine önemli katkılar sunmaktadır. National Institute for Occupational Medicine & Environmental Health (3 yayın, 95 atıf) ve Kun Shan University (3 yayın, 77 atıf) gibi kurumların varlığı, alanın iş sağlığı ve çevre mühendisliği ile olan güçlü bağlantısını ortaya koymaktadır. Bu kapsamlı ağ analizi, kütüphanelerde iç hava kalitesi araştırmalarının kurumsal yapısını ve iş birliği dinamiklerini ortaya koyarken, alanın giderek daha uluslararası ve interdisipliner bir nitelik kazandığını göstermektedir. Özellikle University of Florence'nin merkezi rolü ve diğer Avrupa kurumlarıyla kurduğu güçlü iş birlikleri, alanın gelişim yönünü şekillendirmektedir. Haritadaki renk kodları ve bağlantı çizgilerinin yoğunluğu, özellikle Avrupa ve Kuzey Amerika kurumlarının artan etkisini ve uluslararası iş birliklerinin güçlendiğini göstermektedir.



Şekil 2. 10. Kurumların atıf bağları

Kütüphanelerde iç hava kalitesi alanındaki anahtar kelime analizi, araştırma dinamiklerini ve tematik yapıyı net bir şekilde ortaya koymaktadır. İncelenen veriler doğrultusunda, 'indoor air quality' terimi 38 kullanım ve 76 toplam bağlantı gücüyle en merkezi konumda yer alırken, 'library' 28 kullanım ve 76 bağlantı gücüyle ikinci sırada gelmektedir. 'Thermal comfort' (14 kullanım), 'particulate matter' (13 kullanım) ve 'air pollution' (13 kullanım) gibi terimler, araştırmaların teknik odak noktalarını yansıtmaktadır. Oluşturulan kelime ağı haritasında görülen kümeleşmeler, araştırma alanının farklı boyutlarını ortaya koymaktadır. Merkezdeki 'indoor air quality' terimi etrafında oluşan birincil küme, kütüphane ortamlarındaki hava kalitesi temel

parametrelerini içerirken, 'fungi' (11 kullanım) ve 'bioaerosol' (8 kullanım) etrafındaki ikincil küme, mikrobiyolojik kirleticiler ve biyolojik kontaminasyona odaklanmaktadır. 'Cultural heritage' (10 kullanım) ve 'preventive conservation' (8 kullanım) gibi terimlerden oluşan üçüncü küme, kütüphane koleksiyonlarının korunması ve koruyucu konservasyon üzerine yoğunlaşmaktadır. Anahtar kelimelerin tematik dağılımı ve bağlantıları, alanın çok disiplinli yapısını yansıtmaktadır. 'VOCs' (8 kullanım), 'formaldehyde' (7 kullanım) ve 'volatile organic compounds' (7 kullanım) gibi terimlerin sıklığı, kimyasal kirleticilerin önemini vurgularken, 'natural ventilation' (8 kullanım), 'air quality' (10 kullanım) ve 'indoor environment' (7 kullanım) gibi terimler havalandırma sistemleri ve iç ortam şartlarının kritik rolünü göstermektedir. 'Biodeterioration' (8 kullanım) ve 'bacteria' (6 kullanım) gibi terimler, kütüphanelerde iç hava kalitesinin sadece insan sağlığı değil, aynı zamanda koleksiyon sağlığı açısından da önemli olduğunu vurgulamaktadır. Kelime ağı görselleştirmesi, özellikle kütüphane ortamlarındaki farklı kirletici türlerinin ve bunların hem kullanıcı sağlığı hem de koleksiyon korunması üzerindeki etkileşimlerini ortaya koymaktadır. Haritadaki bağlantıların yoğunluğu ve dağılımı, alanın bütünleşik yapısını ve araştırma temalarının birbiriyle olan ilişkilerini net bir şekilde göstermektedir. 'Indoor air quality (iaq)' teriminin ayrı bir kategori olarak görülmesi, alanın standart terminoloji gelişimi açısından önemli bir gösterge olarak değerlendirilebilir.

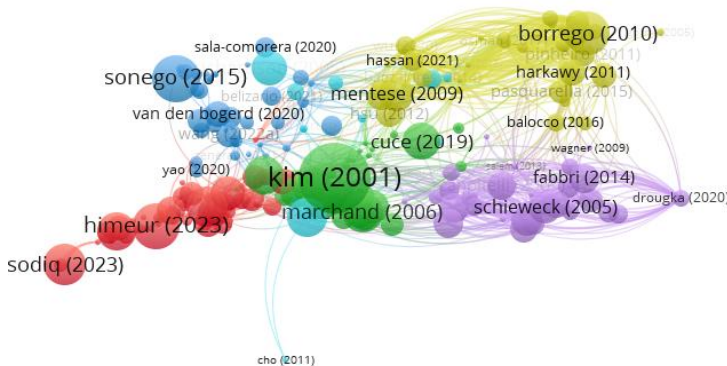


Şekil 2. 11. En sık kullanılan anahtar kelime bağları

Kütüphanelerde iç hava kalitesi alanında yapılan bibliyografik eşleştirme analizi, alandaki etkili çalışmaları ve bunların birbirleriyle olan ilişkilerini ortaya koymaktadır. Atıf verileri incelendiğinde, Kim (2001) çalışması 345 atıfla en yüksek etkiye sahip araştırma olarak öne çıkarken, Sonogo (2015) 156 atıf ve Himeur (2023) 147 atıfla onu takip etmektedir.

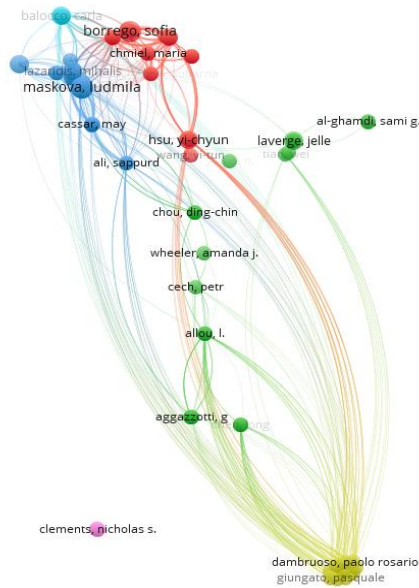
Görsel ağ haritasında, çalışmaların oluşturduğu kümeler ve aralarındaki ilişkiler net bir şekilde görülmektedir. Borrego (2010) çalışması 132 atıf ve 39 toplam bağlantı gücüyle güçlü bir etki yaratırken, Sodiğ (2023) 118 atıf ve 35 bağlantı gücüyle güncel araştırmaların önemini vurgulamaktadır. Marchand (2006) 114 atıf ve 56 bağlantı gücü ile alanın temel referans kaynaklarından biri olarak değerlendirilmektedir. Ağ haritasındaki renk kodları ve bağlantılar, çalışmaların zamansal gelişimini ve tematik yakınlıklarını göstermektedir. De Gennaro (2014) çalışması 108 atıf ile orta düzeyde bir etki gösterirken, 273'lük toplam bağlantı gücü ile ağdaki en yüksek iş birliği değerine sahiptir. Smielowska (2017) 107 atıf ve 121 bağlantı gücüyle önemli bir referans kaynağı haline gelmiştir. Son dönem çalışmalarından Li (2018) 105 atıf, Halios (2022) 103 atıf ve Cuce (2019) 95 atıfla alanın güncel gelişimini yansıtmaktadır. Bu çalışmalar özellikle kütüphane ortamlarındaki hava kalitesi monitoring teknolojilerinde yeni yaklaşımlar ve metodolojiler sunmaktadır.

Erken dönem araştırmalarından Mentese (2009) 83 atıf ve 45 bağlantı gücü, Richardson (2005) 83 atıf ve 10 bağlantı gücü ile alanın temellerinin atılmasında önemli roller oynamıştır. Kumar (2014) 79 atıf ve 87 bağlantı gücü, Yakoo (2009) 73 atıf ve 84 bağlantı gücü ile güçlü iş birliği ağları oluşturmuşlardır. Schieweck (2005) 74 atıf ve 60 bağlantı gücü, Cavalcante (2006) 67 atıf ve 61 bağlantı gücü ile erken dönem çalışmalarının süregelen etkisini göstermektedir. Bu bibliyografik analiz, alanın teorik temellerinin ve araştırma dinamiklerinin gelişimini gösterirken, özellikle son yıllarda kütüphane iç hava kalitesi monitoring teknolojilerinin ve sağlık etkilerinin değerlendirilmesinin artan önemini vurgulamaktadır.



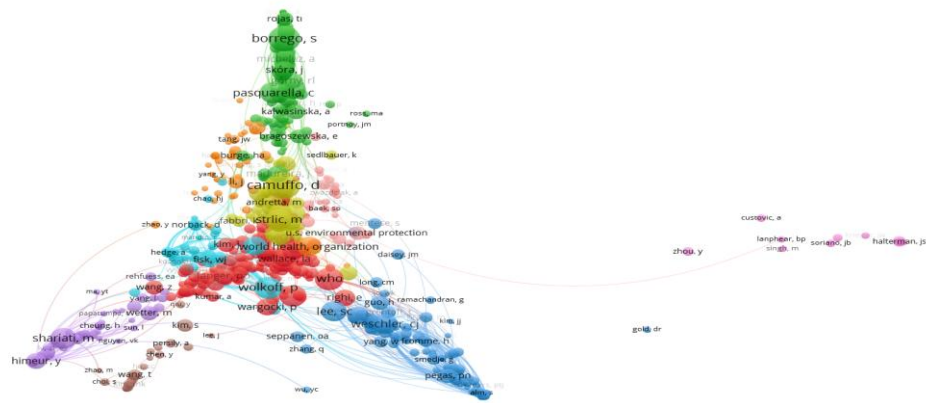
Şekil 2. 12. Metinlerin bibliyografik eşleşme bağları

Kütüphanelerde iç hava kalitesi alanında araştırmacılar arası ortak yazarlık ve iş birliği ağları analizidir. En az 2 yayın kriterini karşılayan araştırmacılar üzerinden yapılan analiz, alandaki öncü isimleri ve iş birliği dinamiklerini ortaya koymaktadır. Yayın performansları incelendiğinde, Borrego Sofia 4 yayın ve 175 atıfla öne çıkarken, 701'lik toplam bağlantı gücü onun geniş iş birliği ağını yansıtmaktadır. Fadli Fodil, Meskin Nader ve Perdomo Ivette her biri 2 yayın ve 149 atıfla ikinci sırada yer alırken, sırasıyla 582, 582 ve 343'lük bağlantı güçleriyle alanda farklı iş birliği düzeylerini göstermektedirler. Ağ haritasında görüldüğü üzere, araştırmacılar arasında belirgin iş birliği kümeleri oluşmuştur. Cassar May (2 yayın, 119 atıf, 533 bağlantı gücü), Cigic Irena Kralj, De Bruin Gerrit, Kolar Jana ve Strlic Matija'nın her biri 2 yayın, 119 atıf ve 533 bağlantı gücüyle güçlü bir araştırma kümesi oluşturmaktadır. İtalyan araştırmacı grubundan Dambruoso Paolo Rosario, De Gennaro Gianluigi, Di Gilio Alessia, Giungato Pasquale, Loiotile Annamaria Demarinis, Marzocca Annalisa, Mazzone Antonio, Palmisani Jolanda, Porcelli Francesca ve Tufino Maria'nın her biri 2 yayın, 115 atıf ve 6458'lik yüksek bağlantı gücüyle kendi alt alanlarında önemli katkılar sunmaktadır. Bu grubun yüksek bağlantı gücü, güçlü bir iş birliği ağının varlığını göstermektedir. Diğer önemli araştırmacılar arasında Sodiğ Ahmed (2 yayın, 131 atıf, 249 bağlantı gücü) bulunmaktadır. Ağ haritasındaki renk kodları ve bağlantı çizgileri, araştırmacılar arasındaki iş birliği yoğunluğunu ve tematik yakınlıkları göstermektedir. Özellikle İtalyan araştırmacılar arasındaki yoğun iş birliği ağı ve uluslararası bağlantılar dikkat çekmektedir. Avrupa araştırmacılarının oluşturduğu yoğun ağ, kütüphanelerde iç hava kalitesi konusundaki araştırmaların koordineli bir şekilde yürütüldüğünü göstermektedir. Bu analiz, kütüphanelerde iç hava kalitesi alanının giderek daha fazla iş birliğine dayalı ve uluslararası bir karaktere büründüğünü göstermektedir. Özellikle Avrupa araştırmacıları arasındaki güçlü bağlantılar, alanın gelişiminde kritik rol oynamaktadır.



Şekil 2. 13. Yazarların bibliyografik eşleşme analizi

Kütüphanelerde iç hava kalitesi alanında yapılan ortak atıf analizi, alandaki etkili araştırmacıları ve aralarındaki ilişki ağlarını detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır. VOSviewer ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre, Camuffo D. 46 atıf ve 1022 toplam bağlantı gücüyle alanın en etkili araştırmacısı olarak öne çıkmaktadır. Borrego S. 40 atıf ve 1526 bağlantı gücüyle ikinci sırada, WHO ise 32 atıf ve 1235 bağlantı gücüyle üçüncü sırada yer almaktadır. Ağ haritasında görülen farklı renkli kümeler, araştırma alanının çeşitli alt uzmanlık alanlarını ve tematik odakları yansıtmaktadır. Wolkoff P. (31 atıf, 1939 bağlantı gücü) en yüksek bağlantı gücüyle merkezi bir konum işgal ederken, Ashrae (29 atıf, 702 bağlantı gücü) ve Pasquarella C. (29 atıf, 726 bağlantı gücü) gibi araştırmacılar kendi alt alanlarında önemli katkılar sunmaktadır. Shariati M. (28 atıf, 1288 bağlantı gücü), Lee SC. (27 atıf, 1119 bağlantı gücü) ve Strlic M. (26 atıf, 480 bağlantı gücü) gibi araştırmacılar, kütüphane iç hava kalitesi alanının farklı boyutlarında öncü çalışmalar yapmışlardır. Weschler CJ. (26 atıf, 1818 bağlantı gücü) yüksek bağlantı gücüyle alandaki güçlü etkisini göstermektedir. Karhovskaberent J. (25 atıf, 791 bağlantı gücü), World Health Organization (24 atıf, 850 bağlantı gücü), Tetreault J. (23 atıf, 525 bağlantı gücü) ve Mendell MJ. (22 atıf, 1254 bağlantı gücü) gibi araştırmacılar da alanın gelişimine önemli katkılar sağlamaktadır. Son dönemde öne çıkan araştırmacılar arasında Morawska L. (20 atıf, 525 bağlantı gücü), Nazaroff WW. (20 atıf, 588 bağlantı gücü) ve USEPA (20 atıf, 709 bağlantı gücü) bulunmaktadır. Schieweck A. (19 atıf, 416 bağlantı gücü), Fenech A. (19 atıf, 470 bağlantı gücü) ve Skora J. (19 atıf, 625 bağlantı gücü) gibi araştırmacılar da kendi uzmanlık alanlarında önemli çalışmalar yürütmektedirler. Ağ haritasındaki bağlantıların yoğunluğu ve renk dağılımı, alandaki iş birliklerinin ve bilgi alışverişinin dinamik yapısını göstermektedir. Özellikle merkezi konumdaki araştırmacıların yüksek bağlantı güçleri, kütüphanelerde iç hava kalitesi alanındaki çalışmaların yüksek düzeyde referans alışverişine dayalı karakterini ortaya koymaktadır. Bu analiz, alanın giderek daha fazla interdisipliner bir yapıya büründüğünü ve çevre mühendisliği, konservasyon bilimi, halk sağlığı ve kütüphane bilimi gibi farklı uzmanlık alanlarından araştırmacıların ortak hedefler doğrultusunda bir araya geldiğini göstermektedir.



Şekil 2. 14. Ortak atıf yapılan yazarlar arası bağlar

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Çalışma Alanlarının Tanıtımı

Bu çalışma Antalya ilinde bulunan iki farklı kütüphane binasında gerçekleştirilmiştir. Çalışma binaları farklı mimari özelliklere, kullanım yoğunluklarına ve fiziksel büyüklüklere sahip olup karşılaştırmalı IAQ analizi için uygun örneklem teşkil etmektedir.

Antalya Kütüphanesi, büyük hacimli bir kamu kütüphanesi olup, araştırma ve grup çalışma salonları, bireysel okuma alanları, arşiv ve depolama bölümlerini içermektedir. Kat planı dikkate alındığında 1. kat maksimum 5060 cm x 4140 cm alan, 2. kat maksimum 5060 cm x 3885 cm toplam kullanım alanına sahiptir.

Akdeniz Üniversitesi Merkez Kütüphanesi, iki katlı ve akademik kullanım amaçlı bir araştırma kütüphanesi olarak hizmet vermektedir. Yapının planlama boyutları 1.ve 2. kat maksimum 3225 cm x 3165 cm alan şeklindedir. Bu binada farklı dönemlerde kullanım yoğunluğuna bağlı olarak değişken iç ortam koşulları gözlemlenmiştir.

3.2. Ölçüm Noktalarının Belirlenmesi ve Konumlandırılması

Her iki kütüphanede ölçüm yapılacak konumlar yapı planına uygun biçimde belirlenmiştir. Antalya Kütüphanesi'nde 11 konum, Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi'nde 7 konum olmak üzere toplamda 18 farklı ölçüm konumu oluşturulmuştur.

Her ölçüm konumunda 3 farklı yükseklikten veri toplanmıştır:

- 0.5 m (oturma pozisyon solunum seviyesini temsil eder)
- 1.2 m (insan solunum seviyesi)
- 1.8 m (ayakta pozisyon üst solunum ve oda üst kotu temsil eder)

Bu sayede partikül ve gaz dağılımının dikey profil üzerindeki davranışı analiz edilmiştir.

3.3. Kullanılan Ölçüm Cihazları ve Teknik Özellikleri

3.3.1. Partikül Madde Ölçüm Cihazı

PCE-PCO 2 Particle Counter

- Ölçüm Fraksiyonları: PM0.3, PM0.5, PM1, PM2.5, PM5, PM10
- Ölçüm Süresi: 10-15 saniye
- Örneklem Akışı: 2.83 L/dk
- Kalibrasyon: Fabrika kalibrasyon sertifikalı

3.3.2. CO₂ ve Sıcaklık Ölçüm Cihazı

JD-3002 CO₂ ve AT Ölçüm Cihazı

- CO₂ Ölçüm Aralığı: 0-5000 ppm

- Sıcaklık Ölçüm Aralığı: 0-50°C
- Doğruluk: ± 50 ppm (CO_2); $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (sıcaklık)

3.4. İstatistiksel Yöntem ve Veri İşleme Süreçleri

İstatistiksel değerlendirmeler IBM SPSS 26.0 programı ile yapılmıştır. Uygulanan analizler:

- **Normallik Testi:** Kolmogorov-Smirnov
- **Gruplar Arası Karşılaştırma:** Mann-Whitney U testi
- **Yükseklik Bazlı Karşılaştırma:** Kruskal-Wallis testi
- **Tanımlayıcı İstatistikler:** Ortalama, Medyan, Standart Sapma, Çarpıklık, Basıklık
- **Korelasyon Analizi:** Pearson ve Spearman korelasyonları (Korelasyon Matrisi ayrıca oluşturulmaktadır).

İstatistiksel analizler non-parametrik yapıda planlanmıştır, çünkü verilerin büyük çoğunluğu normal dağılım göstermemiştir ($p < 0.05$).

3.5. Sayısal Akışkanlar Dinamiği (CFD) Modelleme

İç hava kalitesinin mekânsal ve zamansal değişimini modellemek amacıyla FLOW-3D yazılımı kullanılmıştır. Modelleme süreci şu şekilde ilerletilmiştir:

- Üç ayrı çalışma salonu için 3600 saniyelik simülasyon süresi tanımlanmıştır.
- Simülasyon çıktıları 324 sn, 900 sn, 1800 sn, 2700 sn ve 3600 sn olmak üzere beş farklı zaman dilimi üzerinden değerlendirilmiştir.
- Hacim ağı tabanlı çözümleme yapılmıştır.
- Simülasyon sonuçları deneysel ölçüm ortalamaları ile karşılaştırılarak hata oranları hesaplanmıştır.
- Mekânsal partikül dağılımları ve taşınım paternleri pozitif-x yönlü kesit görselleri üzerinden analiz edilmiştir.

Çizelge 3. 1. Fiziksel model parametreleri

Parametre	Değer
Türbülans Modeli	RNG k- ϵ
Akış Tipi	Kararlı
Simülasyon Süresi	3600 s
Zaman Adımı	0.01 s
Yoğunluk	1.225 kg/m ³
Viskozite	1.81 $\times 10^{-5}$ Pa.s
Partikül Yoğunluğu	1000 kg/m ³
Gravite	9.81 m/s ²

3.5.1. Partikül İzleme

- Euler-Lagrange yöntemi ile partikül taşınımı izlenmiştir.
- $PM_{0.3}$ - PM_{10} boyutlarındaki fraksiyonlar bağımsız olarak simüle edilmiştir.

3.5.2. Çıktı Değerlendirme

- Analizler 324s, 900s, 1800s, 2700s ve 3600s zamanlarında detaylandırılmıştır.
- CFD sonuçları deneysel ölçümlerle kıyaslanarak hata analizleri yapılmıştır.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. İstatistik Analiz Yönteminden Bulgular

Çalışma verileri IBM SPSS Statistics 26.0 (IBM, Armonk, NY, USA) programına aktarılarak analizler tamamlanmıştır. Veriler değerlendirilirken sayısal değişkenler için tanımlayıcı istatistikler (ortalama, standart sapma, medyan) verilmiştir. Uygulanacak analizlere karar verebilmek için öncelikle tüm ölçümlere normal dağılım varsayımı için Kolmogorow Smirnov Testi ($n>30$) uygulanmıştır. Test sonucunda partikül maddeler ve CO₂ ölçümlerinin normal dağılım varsayımını sağlamadığı görülmüştür.

Bu nedenle karşılaştırmalarda nonparametrik testler kullanılmıştır. İki bağımsız grup (kütüphane) arasında ölçümlere göre farklılık olup olmadığı Mann Whitney U Testi ile ikiden fazla bağımsız grup (yükseklik) arasında farklılık olup olmadığı ise Kruskal Wallis Testi ile incelenmiştir. Sayısal iki değişken arasında nedensel olmayan ilişkilerin derecesinin belirlenmesi için Spearman's rho Korelasyon Katsayısı kullanılmıştır.

Araştırma verilerinin analiz süreci üç başlık altında incelenmiştir. İlk olarak ölçümlerin tanımlayıcı istatistikleri verilmiş ve normal dağılım varsayımları incelenmiştir. Daha sonra kütüphaneler arasında ve yükseklikler arasında ölçümlere göre farklılık olup olmadığına bakılmıştır. İkinci aşamada ölçümlerin düzeyleri ülkelere göre karşılaştırılmıştır. Üçüncü aşamada ise ölçümler arasındaki ilişkilere korelasyon analizi ile bakılmıştır.

4.1.1. Ölçümlerin Tanımlayıcı İstatistikleri ve Karşılaştırma Sonuçları

Bu bölümde ilk olarak ölçümlerin ortalama, standart sapma, medyan değerleri verilmiştir. Daha sonra ölçümlerin normal dağılım varsayımını sağlayıp sağlamadığı ve ölçümlere göre farklılık olup olmadığı incelenmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.1. ve Çizelge 4.2.'de sunulmuştur.

Çizelge 4. 1. Ölçümlerin ortalama ve standart sapma değerleri ile normal dağılım varsayımının incelenmesi

Ölçümler	Ortalama	Standart Sapma	Medyan	Minimum	Maksimum	Çarpıklık	Basıklık	Kolmogorov Smirnov Testi (p)
CO ₂	407,62	33,941	400,00	400	819	63,30	308,51	0,000
PM _{0,3}	21024,18	20059,821	17443,00	4066	232103	44,45	190,34	0,000
PM _{0,5}	9317,80	8969,474	7676,00	1667	108767	47,53	216,44	0,000
PM ₁	1908,89	1417,408	1529,00	278	15184	30,82	105,51	0,000
PM _{2,5}	443,92	260,671	370,00	90	2322	17,89	37,38	0,000
PM ₅	59,33	36,120	51,00	6	201	10,53	7,33	0,000
PM ₁₀	29,61	19,512	25,00	2	128	12,39	14,41	0,000

Çizelge 4.1. incelendiğinde; CO₂ ölçümünün ortalaması 407,62 ($\pm 33,941$) iken PM_{0,3} ölçümünün ortalaması 21024,18 ($\pm 20059,821$), PM_{0,5} ölçümünün ortalaması 9317,80 ($\pm 8969,474$), PM_{1,0} ölçümünün ortalaması 1908,89 ($\pm 1417,408$), PM_{2,5} ölçümünün ortalaması 443,92 ($\pm 260,671$), PM_{5,0} ölçümünün ortalaması 59,33 ($\pm 36,120$), PM_{10,0} ölçümünün ortalaması ise 29,61 ($\pm 19,512$)’dur. Ölçümlerin normal dağılım varsayımını sağlayıp sağlamadığını belirleyebilmek için Kolmogorow Smirnov Testi ($n > 30$) uygulanmıştır. Test sonucunda partikül maddeler ve CO₂ ölçümlerinin normal dağılım varsayımını sağlamadığı görülmüştür ($p < 0,05$). Ancak, p anlamlılık düzeyi tek başına yeterli bir sonuç değildir. Anlamlılık düzeyi ile çarpıklık-basıklık değerleri ve histogram grafiklerinin de incelenmesi gerekmektedir. Çizelge 4.1.’de Çarpıklık ve Basıklık değerlerinin ± 3 değerinin dışında yer aldığı görülmektedir. Bu değerler SPSS’te standart hataları ile verilir ki, kendi standart hatasına bölünmesi ile elde edilen standartlaştırılmış değer eğer -1,96 ile +1,96 arasında ise dağılımın normalliğinden bahsedilir. Ancak çoğu kaynağa göre çarpıklık ve basıklık katsayısının ± 3 arasında olması dağılımın normal olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4. 2. Ölçümlere göre kütüphaneler ve yükseklikler arasındaki farklılıkların incelenmesi

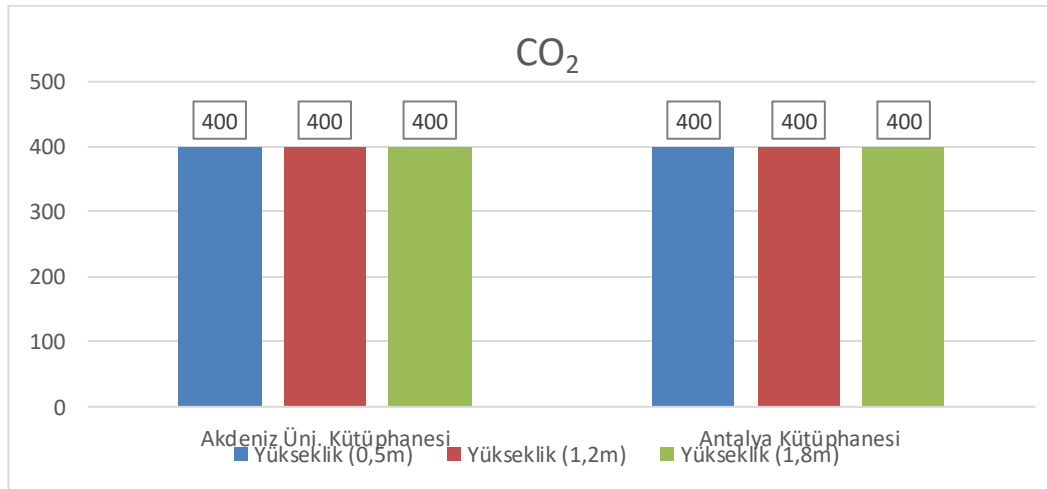
			Yükseklik(0,5m)	Yükseklik (1,2m)	Yükseklik(1,8m)		
Ölçümler	Grup	n	Medyan (Min-Maks)	Medyan (Min-Maks)	Medyan (Min-Maks)	kW	p
CO ₂	1.Akdeniz Üni. Kütüphanesi	147	400 (400-600)	400 (400-819)	400 (400-676)	5,278	0,071
	2.Antalya Kütüphanesi	200	400 (400-578)	400 (400-572)	400 (400-580)	3,646	0,162
	Z		0,309	-0,699	-0,588		
	p		0,758	0,485	0,577		
PM _{0,3}	1.Akdeniz Üni. Kütüphanesi	147	19132 (4944-232103)	16963 (5421-79304)	19328 (4874-59015)	0,326	0,849
	2.Antalya Kütüphanesi	200	17877 (5178-185795)	14733 (5083-75196)	17022 (4066-68377)	0,621	0,733
	Z		-0,396	-0,769	-0,757		
	p		0,692	0,442	0,449		
PM _{0,5}	1.Akdeniz Üni. Kütüphanesi	147	7572 (2079-108767)	7200 (2611-33371)	8674 (2356-25387)	0,741	0,690
	2.Antalya Kütüphanesi	200	7762,5 (2268-81448)	6924 (2226-31580)	8311 (1667-30863)	0,896	0,639
	Z		0,040	-0,327	-0,098		
	p		0,968	0,744	0,922		
PM _{1,0}	1.Akdeniz Üni. Kütüphanesi	147	1340 (554-15184)	1451 (609-5904)	1527 (328-5046)	0,166	0,920
	2.Antalya Kütüphanesi	200	1627,5 (479-11132)	1439 (511-5566)	1845 (278-5515)	1,234	0,540
	Z		0,546	0,330	0,878		
	p		0,585	0,742	0,380		

Çizelge 4.2. (Devamı) Ölçümlere göre kütüphaneler ve yükseklikler arasındaki farklılıkların incelenmesi

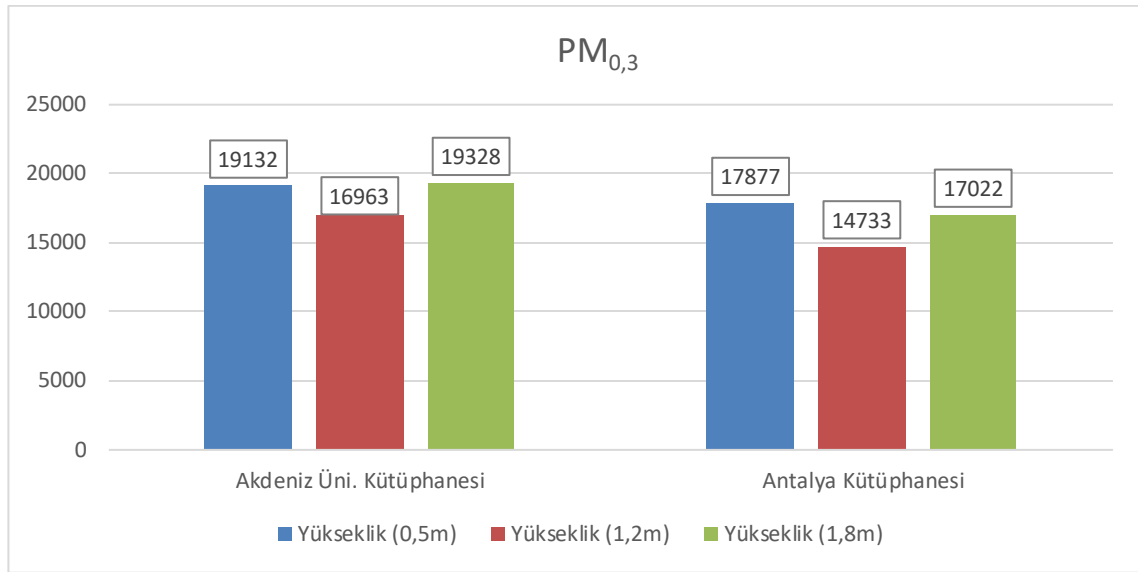
			Yükseklik (0,5m)	Yükseklik (1,2m)	Yükseklik (1,8m)		
Ölçümler	Grup	n	Medyan (Min-Maks)	Medyan (Min-Maks)	Medyan (Min-Maks)	KW	p
PM _{2.5}	1.Akdeniz Üni. Kütüphanesi	147	336 (157-2322)	346 (122-1272)	386 (91-1139)	0,379	0,828
	2.Antalya Kütüphanesi	200	384 (153-1779)	369 (106-1187)	429 (90-1126)	0,660	0,719
	Z		0,922	0,699	0,565		
	p		0,357	0,485	0,572		
PM _{5.0}	1.Akdeniz Üni. Kütüphanesi	147	54 (11-201)	46 (12-179)	51 (7-175)	0,837	0,658
	2.Antalya Kütüphanesi	200	52,5 (19-156)	49 (9-172)	54 (6-157)	0,233	0,890
	Z		-0,639	0,087	0,151		
	p		0,523	0,931	0,880		
PM ₁₀	1.Akdeniz Üni. Kütüphanesi	147	30 (7-128)	22 (4-66)	22 (4-120)	1,924	0,382
	2.Antalya Kütüphanesi	200	26 (6-80)	24 (4-67)	25 (2-91)	0,513	0,774
	Z		-0,750	0,238	0,598		
	p		0,453	0,812	0,550		

Min=Minimum, Maks=Maksimum, KW=Kruskal Wallis Analizi, Z=Mann Whitney U Testi, p=Anlamlılık Düzeyi

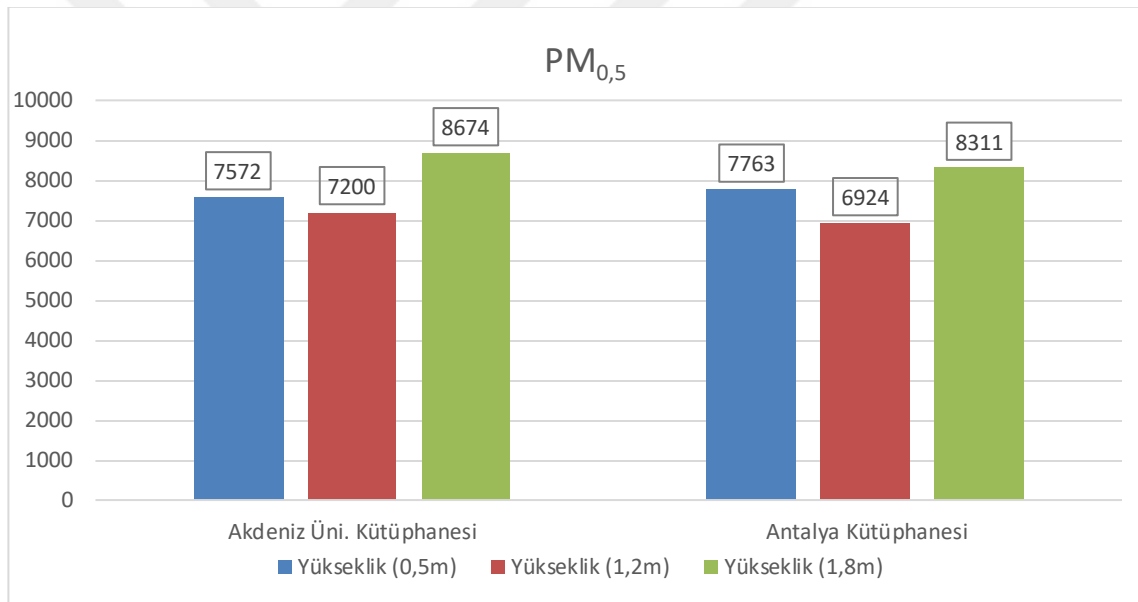
Çizelge 4.2.'de ölçümlere göre kütüphaneler arasında ve yükseklikler arasında farklılık olup olmadığının analiz sonuçları yer almaktadır. Buna göre; kütüphaneler arasında CO₂, PM_{0,3}, PM_{0,5}, PM_{1,0}, PM_{2,5}, PM_{5,0} ve PM₁₀ ölçümlerinin düzeylerine (medyan) göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık görülmemiş (p>0,05) iken yükseklikler arasında da CO₂, PM_{0,3}, PM_{0,5}, PM_{1,0}, PM_{2,5}, PM_{5,0} ve PM₁₀ ölçümlerinin düzeylerine (medyan) göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık görülmemiştir.



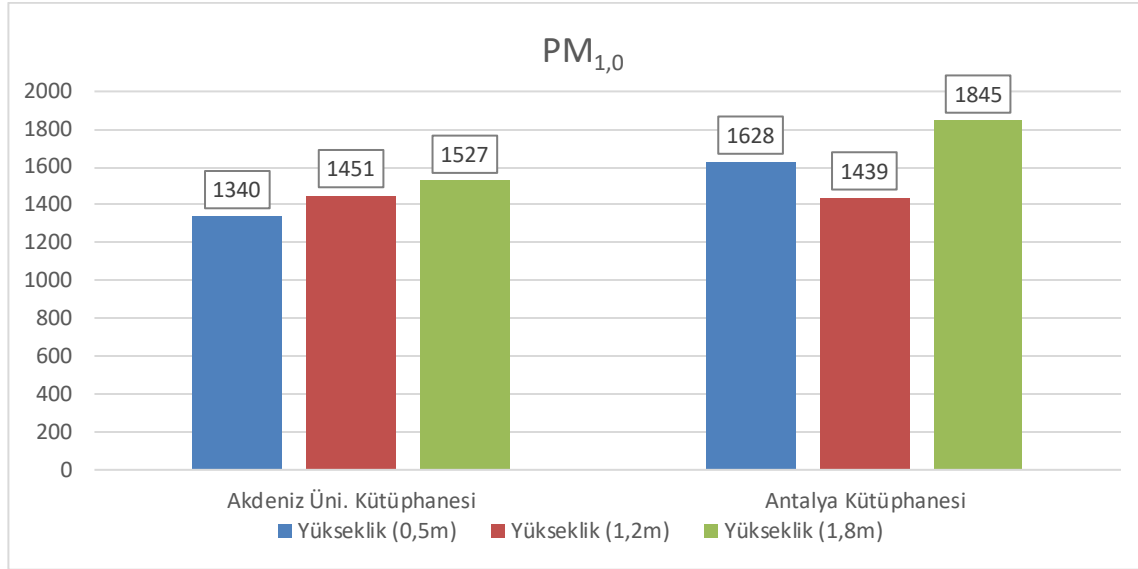
Şekil 4. 1. CO₂ ölçümünün kütüphanelere göre yükseklik düzeyleri



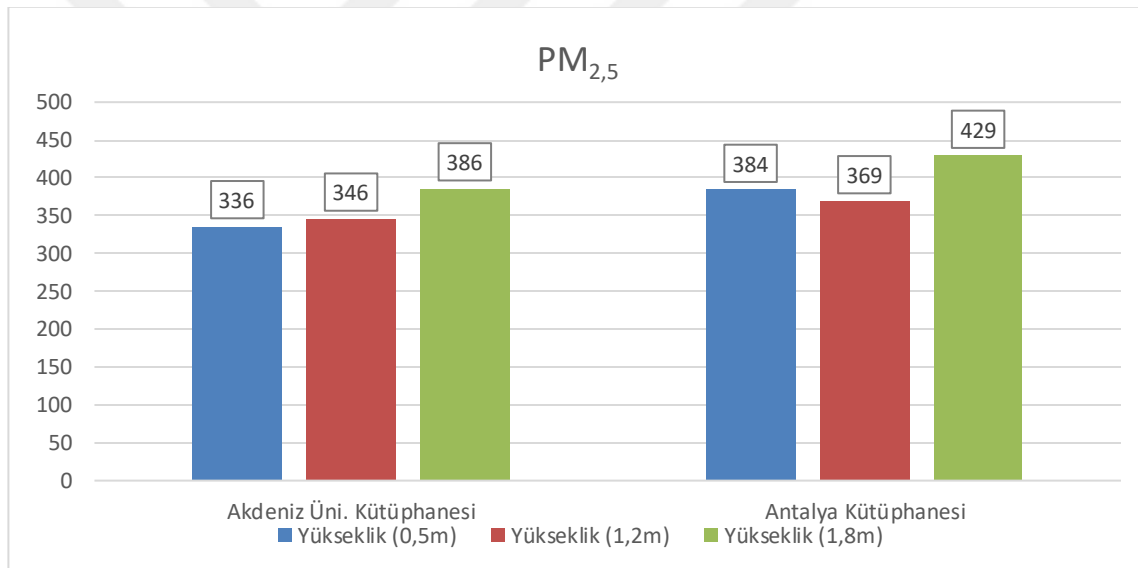
Şekil 4. 2. PM_{0,3} ölçümünün kütüphanelere göre yükseklik düzeyleri



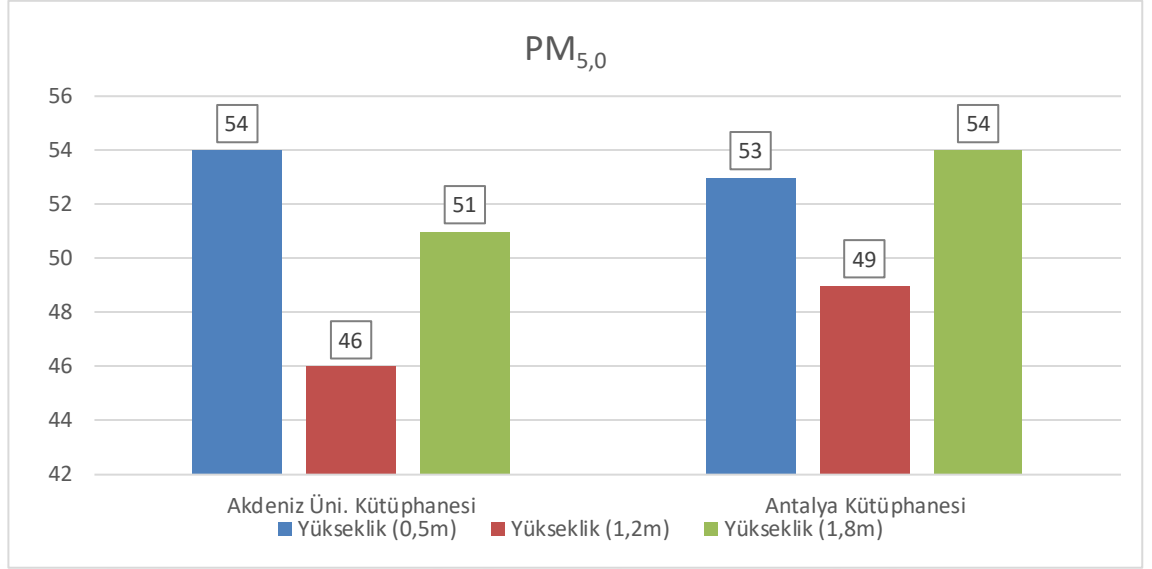
Şekil 4. 3. PM_{0,5} ölçümünün kütüphanelere göre yükseklik düzeyleri



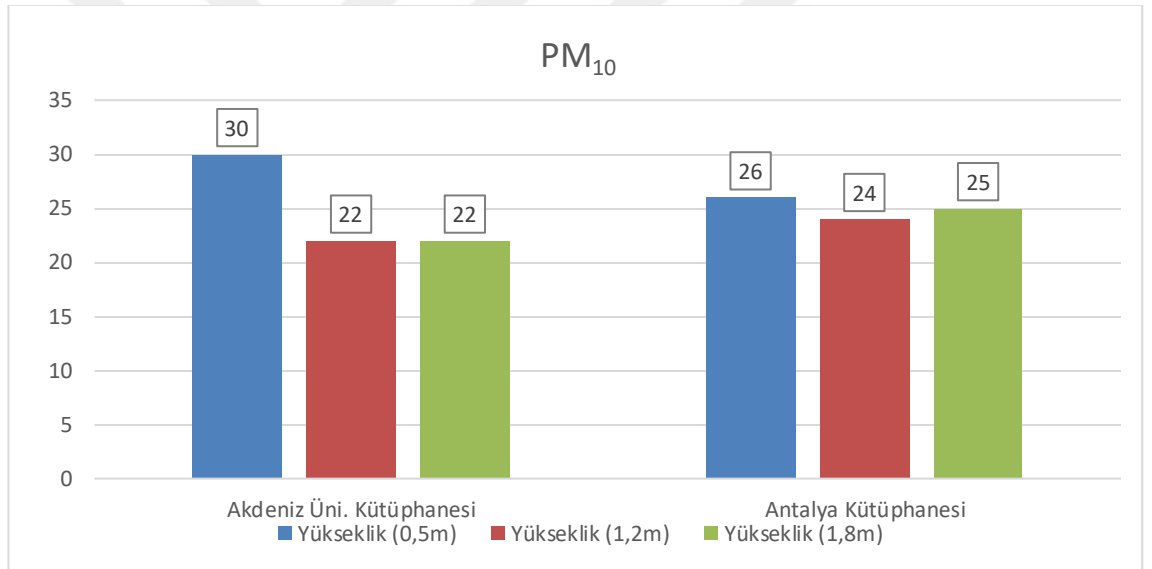
Şekil 4. 4. PM₁ ölçümünün kütüphanelere göre yükseklik düzeyleri



Şekil 4. 5. PM_{2,5} ölçümünün kütüphanelere göre yükseklik düzeyleri



Şekil 4. 6. PM₅ ölçümünün kütüphanelere göre yükseklik düzeyleri



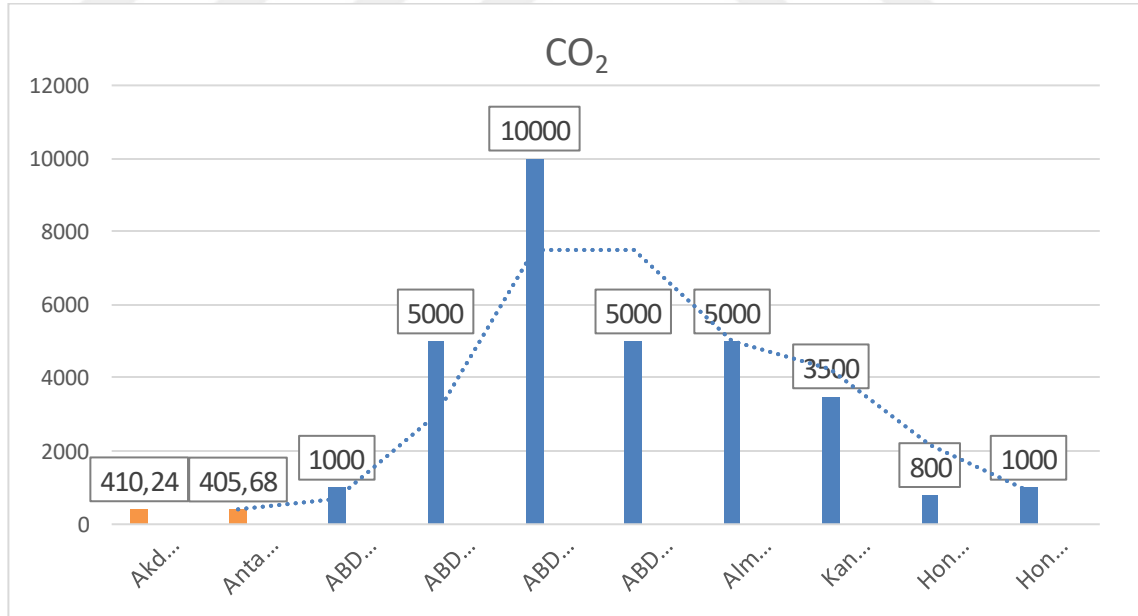
Şekil 4. 7. PM₁₀ ölçümünün kütüphanelere göre yükseklik düzeyleri

4.1.2. Ölçümlerin Ülkelere Göre Karşılaştırılması

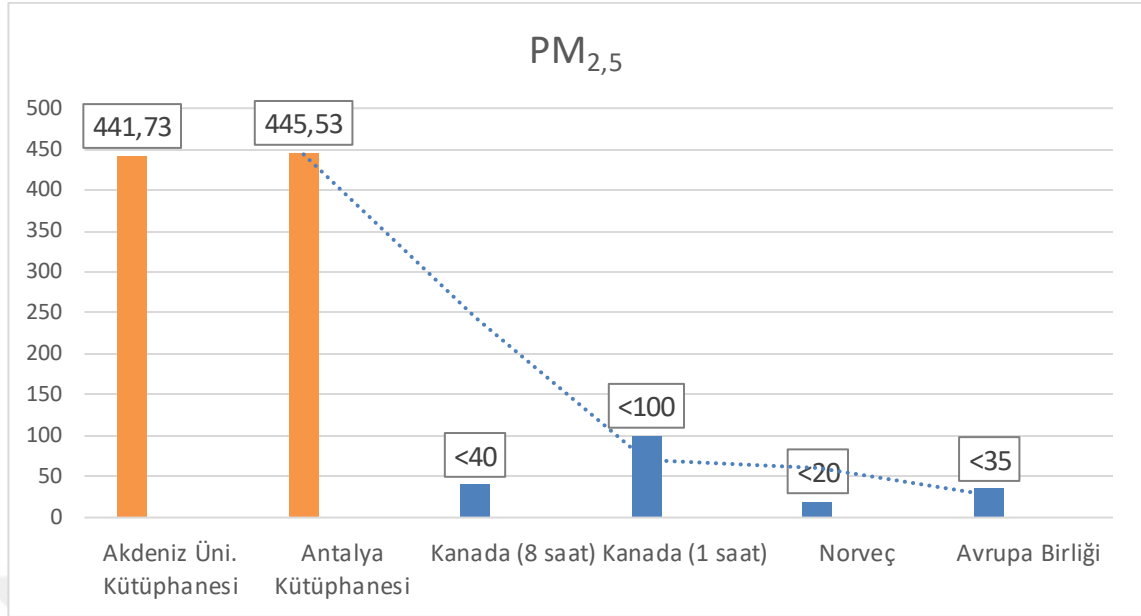
Bu bölümde CO₂, PM_{2,5} ve PM₁₀ ölçümlerinin ortalama değerleri, diğer ülkelerin ortalama değerlerine göre karşılaştırılmış ve grafikler üzerinde sunulmuştur.

Çizelge 4. 3. Antalya'daki kütüphanelerin CO₂, PM_{2,5} ve PM₁₀ ölçümlerinin ülkelere göre karşılaştırılması

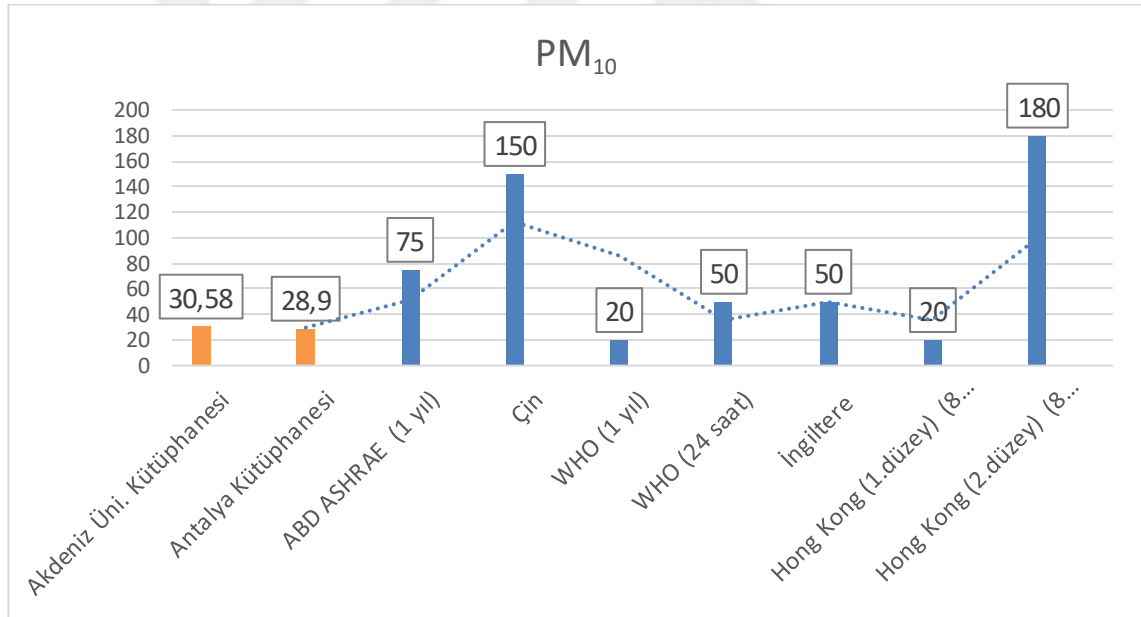
	CO ₂		PM _{2,5}		PM ₁₀
Akdeniz Üni. Kütüphanesi	410,24	Akdeniz Üni. Kütüphanesi	441,73	Akdeniz Üni. Kütüphanesi	30,58
Antalya Kütüphanesi	405,68	Antalya Kütüphanesi	445,53	Antalya Kütüphanesi	28,90
ABD ASHRAE	1000	ABD ASHRAE (1 yıl)	75	Çin	150
ABD NIOSH	5000	Kanada (8 saat)	40	WHO (1 yıl)	20
ABD OSHA	10000	Kanada (1 saat)	100	WHO (24 saat)	50
ABD ACGIH	5000	Norveç	20	İngiltere	50
Almanya MAK	5000	Avrupa Birliği	35	Hong Kong (1.düzye) (8 saat)	20
Kanada	3500			Hong Kong (2.düzye) (8 saat)	180
Hong Kong (1.düzye)	800				
Hong Kong (1.düzye)	1000				



Şekil 4. 8. Antalya'daki kütüphanelerin CO₂ ölçüm ortalamalarının ülkelere göre karşılaştırılması



Şekil 4. 9. Antalya'daki kütüphanelerin PM_{2,5} ölçüm ortalamalarının ülkelere göre karşılaştırılması



Şekil 4. 10. Antalya'daki kütüphanelerin PM₁₀ ölçüm ortalamalarının ülkelere göre karşılaştırılması

4.1.3. Korelasyon Analizi Sonuçları

Korelasyon analizi sayısal iki değişken arasında nedensel olmayan ilişkilerin derecesinin belirlenmesi için kullanılır. Bu derecenin belirlenmesinde iki temel korelasyon katsayısından (Pearson ve Spearman's rho) söz edilebilir. Pearson Korelasyon Katsayısının kullanılabilmesi için değişkenler sayısal olmalı ve normal dağılmalı iken

değişkenlerin normal dağılmadığı durumlarda ise Spearman's rho Korelasyon Katsayısı kullanılmaktadır.

Çalışmada partikül maddeler ve CO₂ ölçümlerinin normal dağılım varsayımı incelenmiş; ölçümlerin normal dağılmadığı görülmüştür. Bu nedenle ölçümler arasındaki ilişkileri incelemek için Spearman's rho Korelasyon Katsayısı kullanılmıştır. Korelasyon analizi sonuçları Çizelge 4.4'te yer almaktadır.

Çizelge 4. 4. Korelasyon katsayısının değerlendirilmesi

r (Korelasyon Katsayısı)	İlişki Düzeyi	İlişki Yönü
0,00 – 0,29	Düşük düzeyde ilişki	r= - ise negatif ilişki r= + ise pozitif ilişki
0,30 – 0,69	Orta düzeyde ilişki	
0,70 – 1,00	Yüksek düzeyde ilişki	

Çizelge 4. 5. Ölçümler arasındaki ilişkilerin incelenmesi

		CO ₂	PM _{0.3}	PM _{0.5}	PM _{1.0}	PM _{2.5}	PM _{5.0}	PM ₁₀
CO ₂	r	1						
	p							
PM _{0.3}	r	0,084	1					
	p	0,120						
PM _{0.5}	r	0,057	0,977	1				
	p	0,290	0,000					
PM _{1.0}	r	0,002	0,854	0,918	1			
	p	0,967	0,000***	0,000***				
PM _{2.5}	r	-0,035	0,683	0,773	0,901	1		
	p	0,510	0,000***	0,000***	0,000***			
PM _{5.0}	r	-0,095	0,377	0,462	0,649	0,840	1	
	p	0,077	0,000***	0,000***	0,000***	0,000***		
PM ₁₀	r	-0,104	0,192	0,270	0,464	0,688	0,892	1
	p	0,053	0,000***	0,000***	0,000***	0,000***	0,000***	

*** $p < 0,001$, $r = \text{Spearman's rho Korelasyon Katsayısı}$, $p = \text{Anlamlılık Düzeyi}$

Çizelge 4.5. incelendiğinde; CO₂ ölçümü ile partikül maddeler arasında istatistiksel olarak anlamlı doğrusal bir ilişki olduğu görülmemiş ($p > 0,05$) iken PM_{0.3} ile PM_{0.5} arasında yüksek düzeyde pozitif yönde ($r = 0,977$; $p < 0,001$), PM_{0.3} ile PM_{1.0} arasında yüksek düzeyde pozitif yönde ($r = 0,854$; $p < 0,001$), PM_{0.3} ile PM_{2.5} arasında orta düzeyde pozitif yönde ($r = 0,683$; $p < 0,001$), PM_{0.3} ile PM_{5.0} arasında orta düzeyde pozitif yönde ($r = 0,377$; $p < 0,001$), PM_{0.3} ile PM₁₀ arasında ise düşük düzeyde pozitif yönde ($r = 0,192$; $p < 0,001$) anlamlı doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür.

PM_{0.5} ile PM_{1.0} arasında yüksek düzeyde pozitif önde ($r=0,918$; $p<0,001$), PM_{0.5} ile PM_{2.5} arasında yüksek düzeyde pozitif yönde ($r=0,773$; $p<0,001$), PM_{0.5} ile PM_{5.0} arasında orta düzeyde pozitif yönde ($r=0,462$; $p<0,001$), PM_{0.5} ile PM₁₀ arasında ise düşük düzeyde pozitif yönde ($r=0,270$; $p<0,001$) anlamlı doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür.

PM_{1.0} ile PM_{2.5} arasında yüksek düzeyde pozitif yönde ($r=0,901$; $p<0,001$), PM_{1.0} ile PM_{5.0} arasında orta düzeyde pozitif yönde ($r=0,649$; $p<0,001$), PM_{1.0} ile PM₁₀ arasında ise orta düzeyde pozitif yönde ($r=0,464$; $p<0,001$) anlamlı doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür.

PM_{2.5} ile PM_{5.0} arasında yüksek düzeyde pozitif yönde ($r=0,840$; $p<0,001$), PM_{2.5} ile PM₁₀ arasında ise orta düzeyde pozitif yönde ($r=0,688$; $p<0,001$) anlamlı doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür.

PM_{5.0} ile PM₁₀ arasında yüksek düzeyde pozitif yönde ($r=0,892$; $p<0,001$) anlamlı doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür.

Deneyssel verilerin SPSS programında yapılan istatistiksel analizlerinde, PM fraksiyonları ile sıcaklık, bağıl nem ve CO₂ konsantrasyonu arasındaki ilişkiler detaylı olarak incelenmiştir. Korelasyon analizleri, özellikle PM_{0.3} ve PM_{0.5} fraksiyonlarının sıcaklık ve CO₂ konsantrasyonlarıyla anlamlı ilişkilere sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, iç mekan partikül konsantrasyonlarının yalnızca dış ortam kaynaklı değil, aynı zamanda kullanıcı sayısı, aktivite düzeyi ve havalandırma etkinliği gibi iç ortam koşullarından da önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir.

Kütüphaneler gibi durağan iç ortam koşullarında, partikül konsantrasyonlarının özellikle PM_{2.5} ve PM₁₀ fraksiyonlarında havalandırma sistemlerinin debisi ve filtrasyon etkinliğiyle doğrudan ilişkili olduğu anlaşılmaktadır.

4.2. CFD Analiz Yönteminden Bulgular

Çalışmada Antalya Kütüphanesi'nde üç farklı çalışma salonunda gerçekleştirilen iç hava kalitesi simülasyonları Flow-3D yazılımı kullanılarak yürütülmüştür. Sayısal modelleme ile elde edilen partikül konsantrasyon değerleri saha ölçümleri ile karşılaştırılarak model doğrulaması yapılmış ve simülasyon sonuçları detaylı olarak değerlendirilmiştir.

4.2.1. Antalya Kütüphanesi

CFD simülasyonları 3600 saniyelik periyot boyunca gerçekleştirilmiş ve partikül dinamikleri belirli zaman aralıklarında analiz edilmiştir.

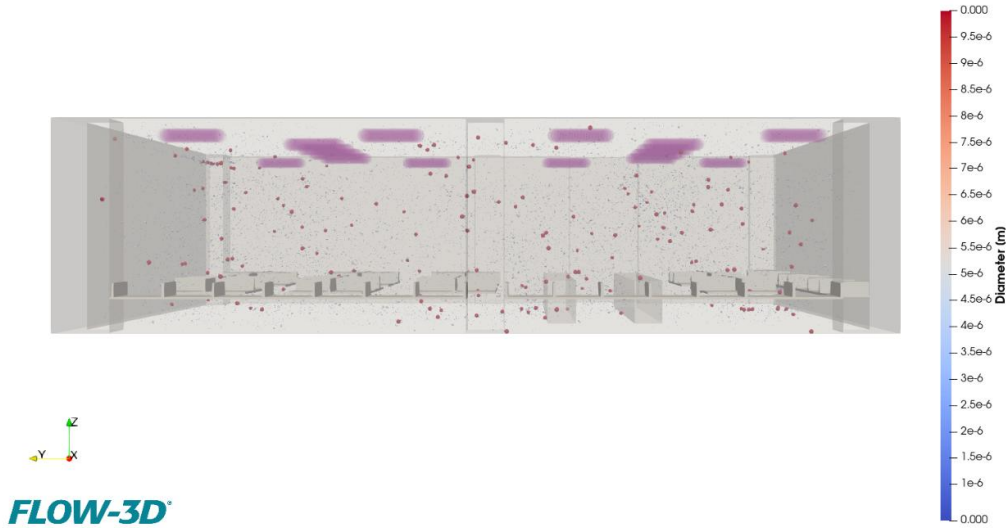
4.2.1.1. Antalya Kütüphanesi 1. Oda (Çalışma Salonu - 1. Kat) CFD ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

Çizelge 4. 6. Antalya kütüphanesi 1. oda deneysel ve CFD simülasyon sonuçları

PM Türü	Deneysel Ortalama	CFD Ortalama
PM _{0.3}	22505,28	26214,33
PM _{0.5}	9947,383	10937
PM _{1.0}	2083,2	2248
PM _{2.5}	486,62	450,33
PM _{5.0}	63,05	57,67
PM ₁₀	33,476	31

Bu çalışma salonunda yapılan ölçümler üç farklı yükseklikte gerçekleştirilmiş olup, her bir yükseklikten elde edilen PM değerlerinin ortalamaları alınarak karşılaştırmalı analiz yapılmıştır. Çizelge 4.6'da deneysel ve CFD simülasyon sonuçları özetlenmiştir.

Time: 323.997 s

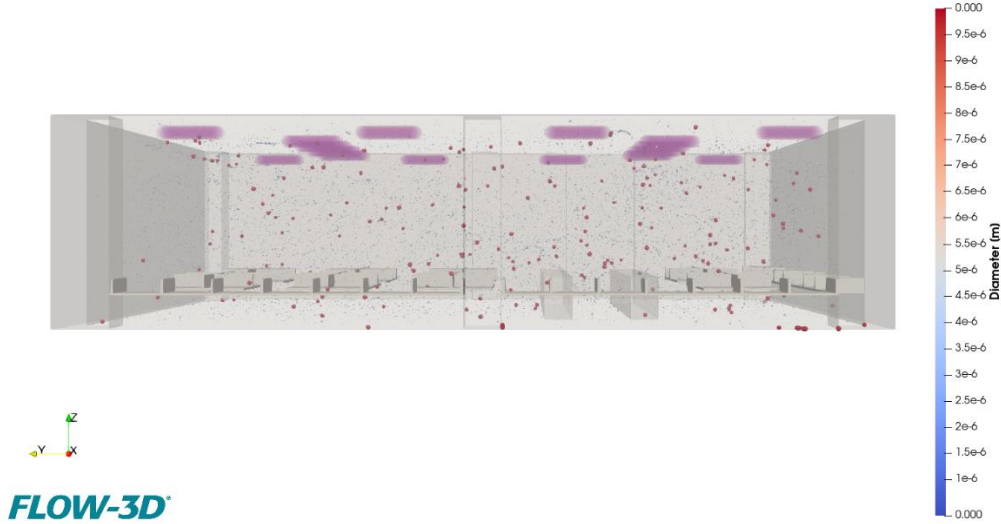


Şekil 4. 11. Antalya Kütüphanesi, oda 1 — PM konsantrasyon dağılımı, T=324 sn (Flow-3D simülasyonu)

Bu erken aşamada, partiküllerin çoğunlukla üst hacimde askıda kaldığı ve dağılımın başlangıç safhasında olduğu görülmektedir. Flow-3D simülasyonunda, tavan bölgesine yakın hava hareketlerinin yoğunluğu nedeniyle partiküllerin alt hacme henüz ulaşmadığı gözlenmiştir. Deneysel verilerde bu sürede PM_{0.3} ve PM_{0.5} gibi küçük çaplı

partikül konsantrasyonlarının daha düşük olması, modelin başlangıç aşamasındaki yayılımı doğru temsil ettiğini göstermektedir. Simülasyon, giriş noktalarındaki partikül üretiminin etkilerini ve doğal konveksiyonla yukarıda yoğunlaşan dağılımı başarılı şekilde yansıtmaktadır.

Time: 900.001 s



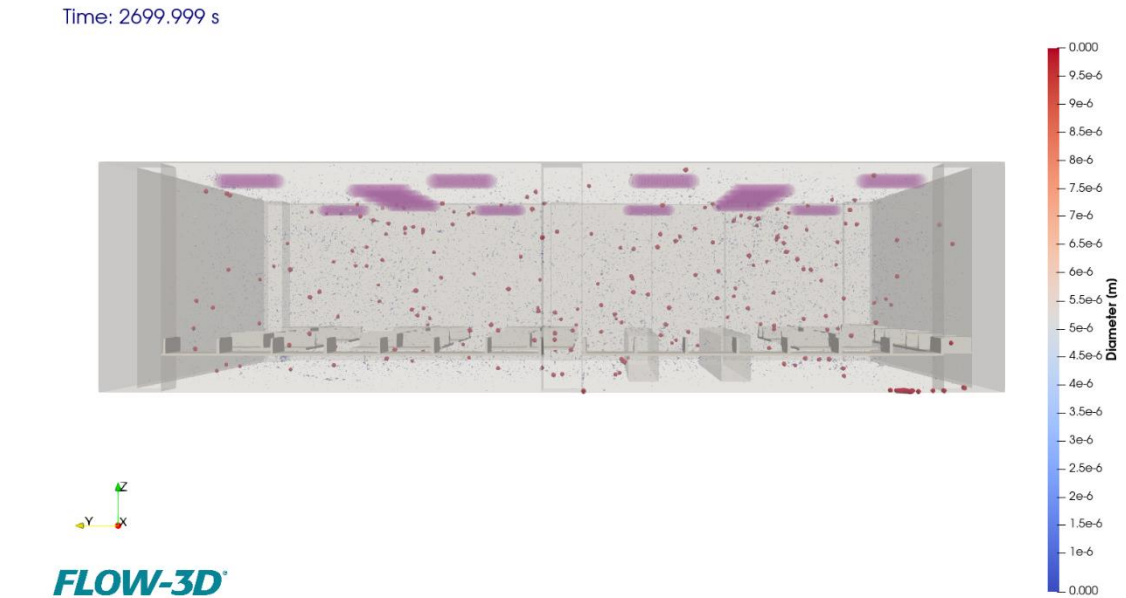
Şekil 4. 12. Antalya Kütüphanesi, oda 1 — PM konsantrasyon dağılımı, T=900 sn (Flow-3D simülasyonu)

900. saniyede partiküllerin hacim boyunca daha dengeli bir şekilde yayılmaya başladığı ve alt hacimlere doğru inişin başladığı gözlemlenmektedir. Özellikle zemine yakın bölgelerde ilk birikim işaretleri görünür hale gelmiş, bu durum doğal yerçekimi etkisinin simülasyon tarafından doğru şekilde işlendiğini göstermektedir. Deneysel ölçümlerde PM2.5 ve PM5 gibi orta boyutlu partiküllerde görülen artış, bu yayılma evresiyle örtüşmektedir. Hacim içi türbülansın sınırlı olmasına rağmen lokal akımların etkisiyle partikül taşınımı desteklenmiş ve model gerçeğe yakın bir atmosfer sunmuştur.



Şekil 4. 13. Antalya Kütüphanesi, oda 1 — PM konsantrasyon dağılımı, T=1800 sn (Flow-3D simülasyonu)

Bu aşamada, partiküllerin hacim içinde daha homojen bir dağılım sergilediği ve özellikle kullanıcı konfor yüksekliği seviyesinde belirgin bir yoğunluk artışı gözlemlendiği anlaşılmaktadır. PM1–PM5 aralığındaki partikül türleri, bu seviyede Flow-3D tarafından isabetli biçimde modellenmiş olup, saha ölçümleriyle yüksek düzeyde benzeşim göstermektedir.



Şekil 4. 14. Antalya Kütüphanesi, oda 1 — PM konsantrasyon dağılımı, T=2700 sn (Flow-3D simülasyonu)

2700. saniyede partikül davranışı dengeli bir yapıya evrilmiş, partikül hareketleri sınırlı kalmış ve ortamda yerleşik bir dağılım profili oluşmuştur. Alt bölgelerde küçük çaplı partiküllerin birikimi, zemine yakın bölgelerdeki hava akımlarının yetersizliğine işaret ederken; bu durum, simülasyonda sınır şartları ve grid hassasiyetinin etkili kullanıldığını gösterir. Deneysel ortalama PM2.5 ve PM10 değerleri de bu denge durumunu desteklemektedir. CFD çıktıları, iç mekânda kalıcı maruziyetin değerlendirilebileceği bir altyapı sunmaktadır.



Şekil 4. 15. Antalya Kütüphanesi, oda 1 — PM konsantrasyon dağılımı, T=3600 sn (Flow-3D simülasyonu)

Simülasyonun son aşamasında partiküllerin dağılımı stabil bir hal almış, ortamda belirgin bir partikül dengesi oluşmuştur. Özellikle PM10 gibi büyük partiküller zemine çökerken, küçük partiküller hâlen askıda kalmakta ve kullanıcı seviyesinde görünür yoğunluklar oluşturmaktadır. Bu durum, uzun süreli iç hava maruziyetinin değerlendirilmesi açısından kritiktir. Flow-3D'nin bu denge durumunu başarıyla modellemesi, sistemin istikrarlı çalıştığını ve simülasyonun iç mekân partikül davranışlarını uzun vadeli analizlerde kullanışlı olduğunu ortaya koymaktadır.

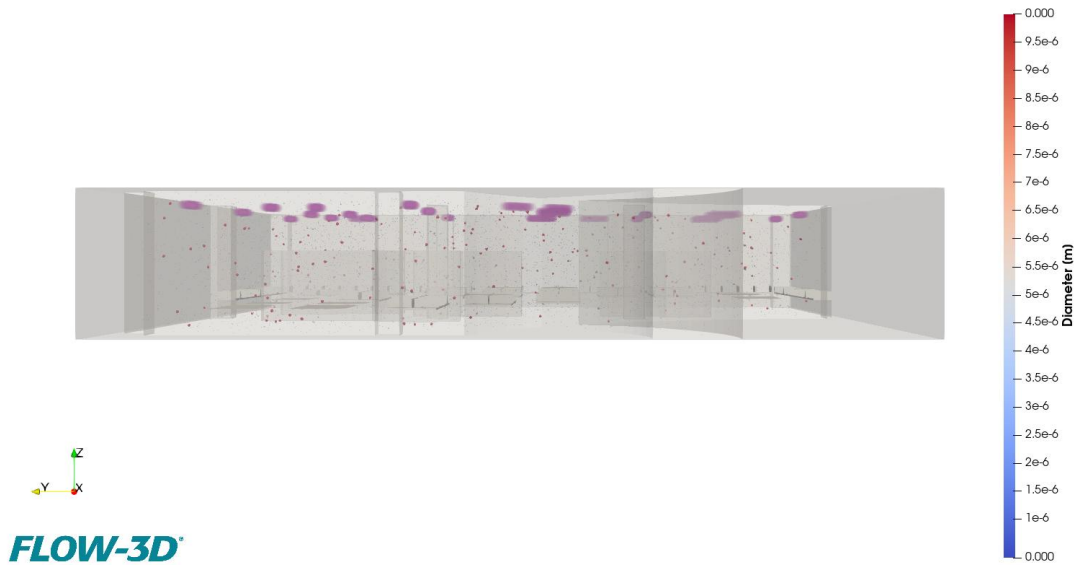
4.2.1.2. Antalya Kütüphanesi 2. Oda (Çalışma Salonu 1 - 1. Kat) CFD ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

Çizelge 4. 7. Antalya kütüphanesi 2. oda deneysel ve CFD simülasyon sonuçları

PM Türü	Deneysel Ortalama	CFD Ortalama
PM _{0.3}	14021,78	17612,773
PM _{0.5}	6853,44	8434,7891
PM _{1.0}	1524	1810,7821
PM _{2.5}	358,44	414,00116
PM _{5.0}	39,22	57,597473
PM ₁₀	20,11	32,398418

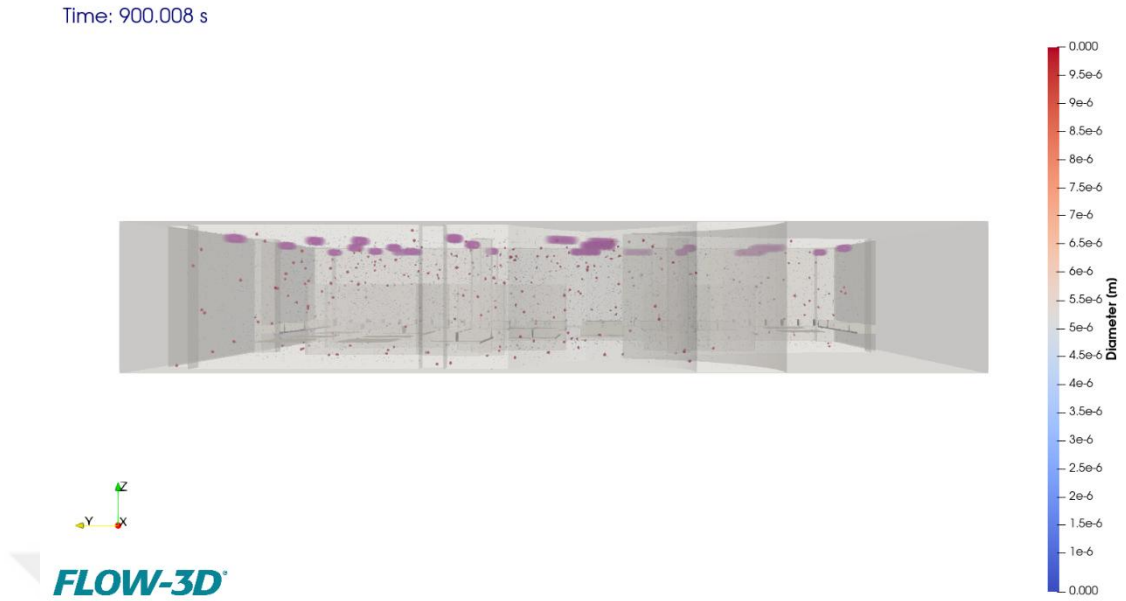
CFD simülasyonları 3600 saniyelik periyot boyunca gerçekleştirilmiş ve partikül dinamikleri belirli zaman aralıklarında analiz edilmiştir.

Time: 324.006 s



Şekil 4. 16. Antalya Kütüphanesi, oda 2 — PM konsantrasyon dağılımı, T=324 sn (Flow-3D simülasyonu)

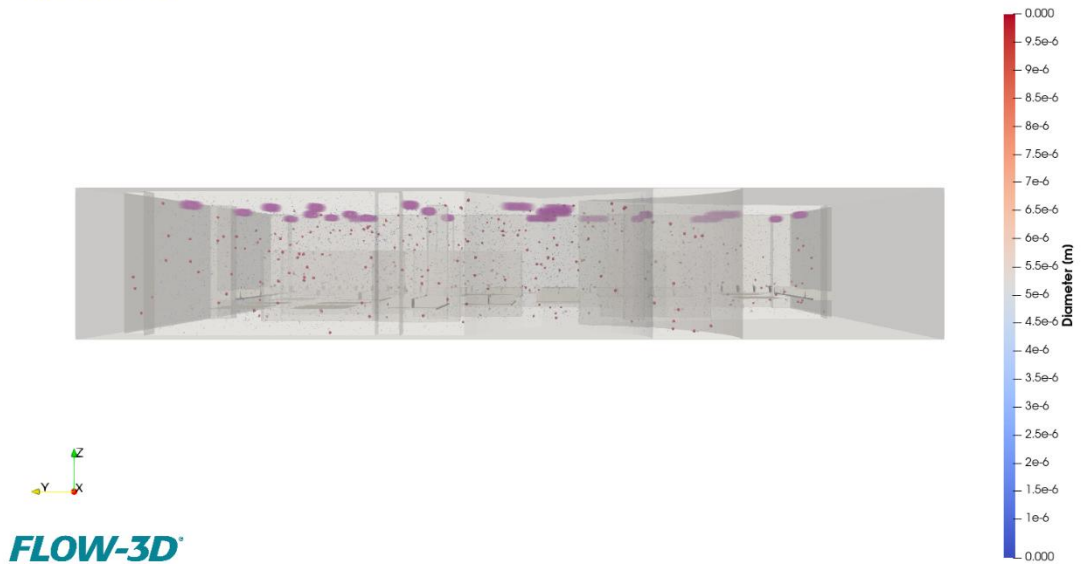
Simülasyonun bu erken safhasında, partiküllerin tavan seviyesine yakın konumlandığı ve henüz hacim içerisine tam olarak dağılmadığı görülmektedir. Özellikle küçük çaplı partiküllerin (PM_{0.3}–PM_{1.0}) doğal konveksiyon etkisiyle üst hacimde birikmeye eğilimli olduğu anlaşılmaktadır. Flow-3D'nin bu erken yayılım davranışını fiziksel olarak doğru biçimde modellediği söylenebilir.



Şekil 4. 17. Antalya Kütüphanesi, oda 2 — PM konsantrasyon dağılımı, T=900 sn (Flow-3D simülasyonu)

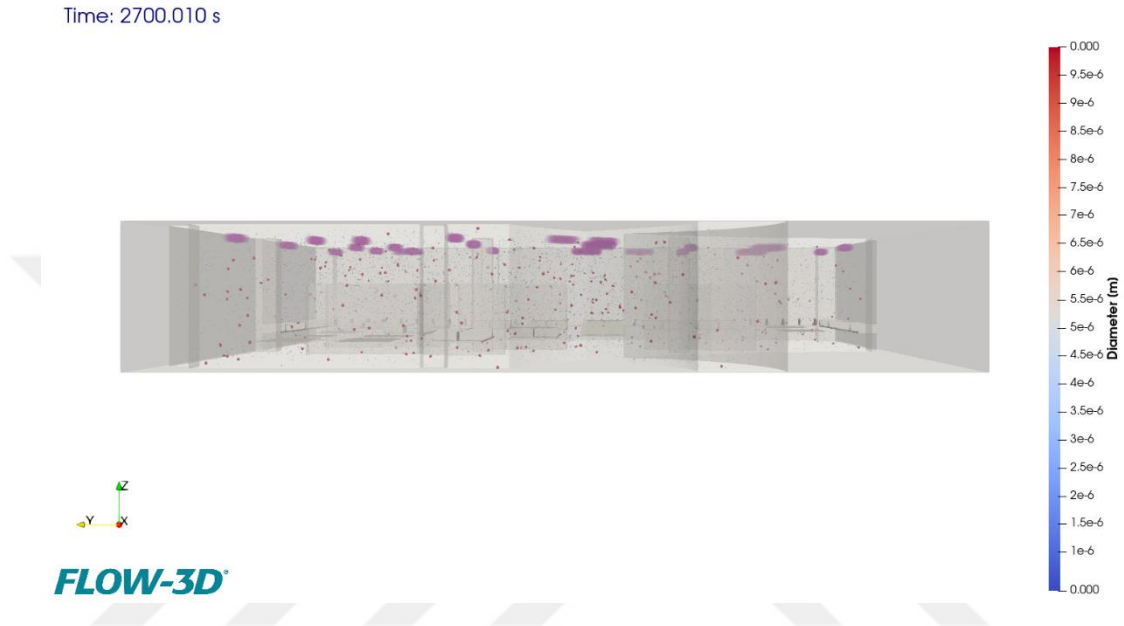
900. saniyede partiküller daha geniş bir hacme yayılmış olup, özellikle odanın merkezine doğru yerleşen bölgelerde konsantrasyon artışı gözlenmektedir. Geniş yüzeyli yerleşim düzeni, hava akımının lokal türbülans oluşturmaya ve partikül taşıma kapasitesinin artmasına neden olmuştur. Bu durum, deneysel olarak PM_{2.5} ve PM₅ değerlerindeki yükselme eğilimiyle örtüşmektedir.

Time: 1799.996 s



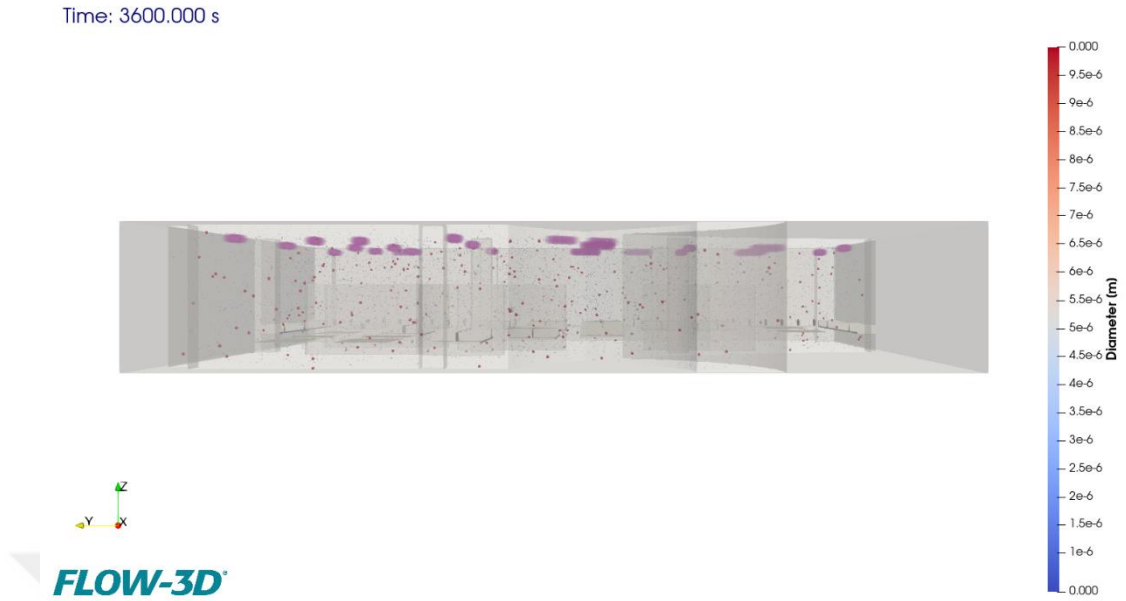
Şekil 4. 18. Antalya Kütüphanesi, oda 2 — PM konsantrasyon dağılımı, T=1800 sn (Flow-3D simülasyonu)

Bu aşamada partikül dağılımı kullanıcı konfor yüksekliğine (yaklaşık 1.2–1.5 m) erişmiş ve yayılım profili daha stabil hale gelmeye başlamıştır. Özellikle küçük ve orta boyutlu partiküllerin (PM1–PM5) kullanıcı seviyesi yüksekliğinde yoğunlaştığı gözlenmektedir. Bu durum, kullanıcı sağlığı açısından kritik olup CFD’nin karar destek sistemi olarak etkinliğini vurgulamaktadır. Ölçüm verilerinde bu yüksekliklerde gözlenen ortalama değer artışları da simülasyonun yeterli düzeyde fiziksel temsili sağladığını göstermektedir.



Şekil 4. 19. Antalya Kütüphanesi, oda 2 — PM konsantrasyon dağılımı, T=2700 sn (Flow-3D simülasyonu)

2700. saniyede sistemdeki partikül dağılımı dengelenmeye başlamış, partikül hareketleri daha kararlı hale gelmiştir. Özellikle zemine yakın bölgelerde orta ve büyük boyutlu partiküllerin (PM5–PM10) birikimi gözlenmektedir. Flow-3D simülasyonu, yerçekimi ve düşük hava akımı bölgelerindeki birikme etkisini doğru şekilde modellemiştir. Bu durum, deneysel ölçümlerde gözlemlenen zemine yakın PM10 yükleriyle benzerlik göstermektedir ve simülasyonun uzun vadeli dağılım eğilimlerini tutarlı biçimde yansıttığını ortaya koymaktadır.



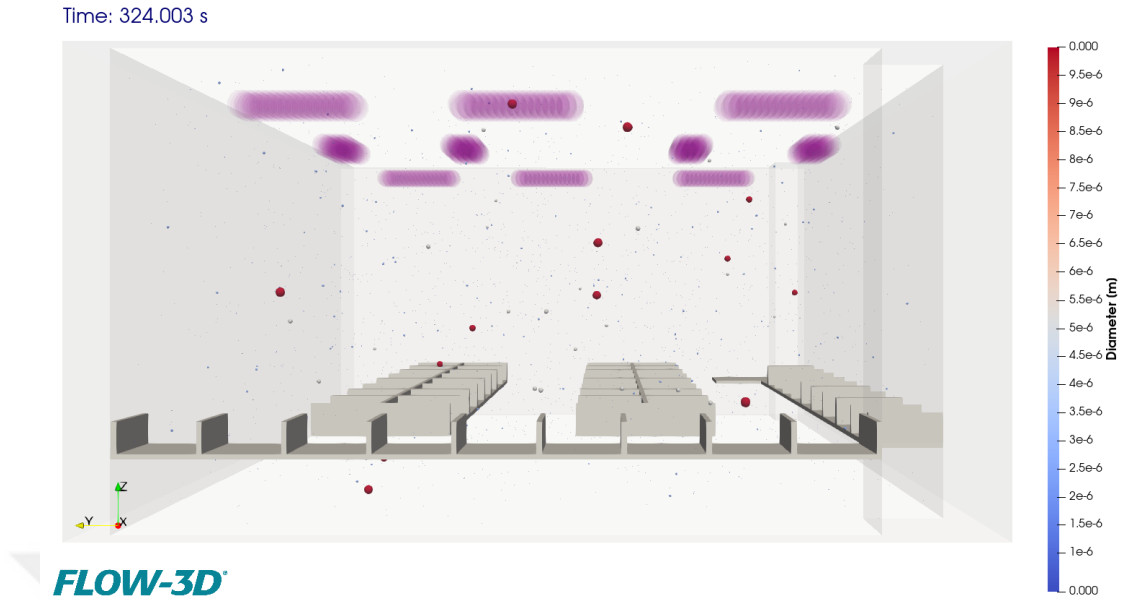
Şekil 4. 20. Antalya Kütüphanesi, oda 2 — PM konsantrasyon dağılımı, T=3600 sn (Flow-3D simülasyonu)

Simülasyonun sonunda partiküllerin dengeli bir dağılım profiline ulaştığı, hem üst hem de alt hacimlerde partikül konsantrasyonlarının stabil seyrettiği görülmektedir. Bu safhada PM_{2.5} ve üzeri partiküller zemine çökerken, PM_{0.3}–PM_{1.0} gibi küçük partiküller kullanıcı yüksekliğinde askıda kalmaya devam etmektedir. Bu durum hem uzun süreli maruziyet hem de sağlık riskleri açısından önemlidir. Flow-3D'nin bu denge durumunu fiziksel olarak gerçekçi şekilde modellemiş olması, hem yazılımın güvenilirliğini hem de iç mekân hava kalitesi değerlendirmesindeki rolünü güçlendirmektedir.

4.2.1.3. Antalya Kütüphanesi 3. Oda (Çalışma Salonu 2 - 2. Kat) CFD ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

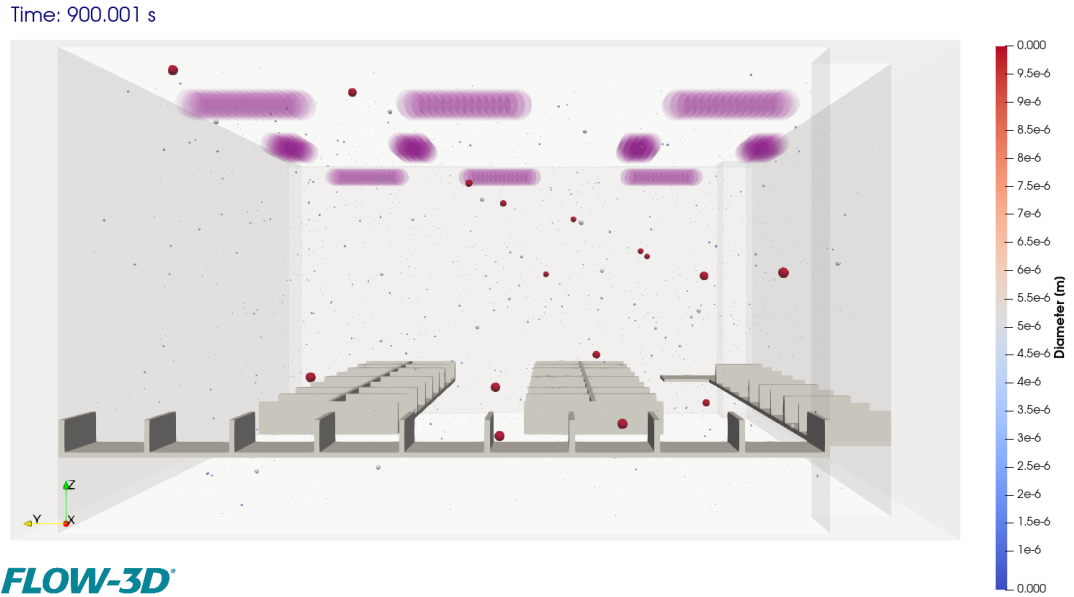
Çizelge 4. 8. Antalya kütüphanesi 3. oda deneysel ve CFD simülasyon sonuçları

PM Türü	Deneysel Ortalama	CFD Ortalama
PM _{0.3}	18627,71	17612,773
PM _{0.5}	7931	8434,7891
PM _{1.0}	1541,71	1810,7821
PM _{2.5}	351,43	414,00116
PM _{5.0}	37	57,597473
PM ₁₀	18,43	32,398418



Şekil 4. 21. Antalya Kütüphanesi, oda 3 — PM konsantrasyon dağılımı, T=324 sn (Flow-3D simülasyonu)

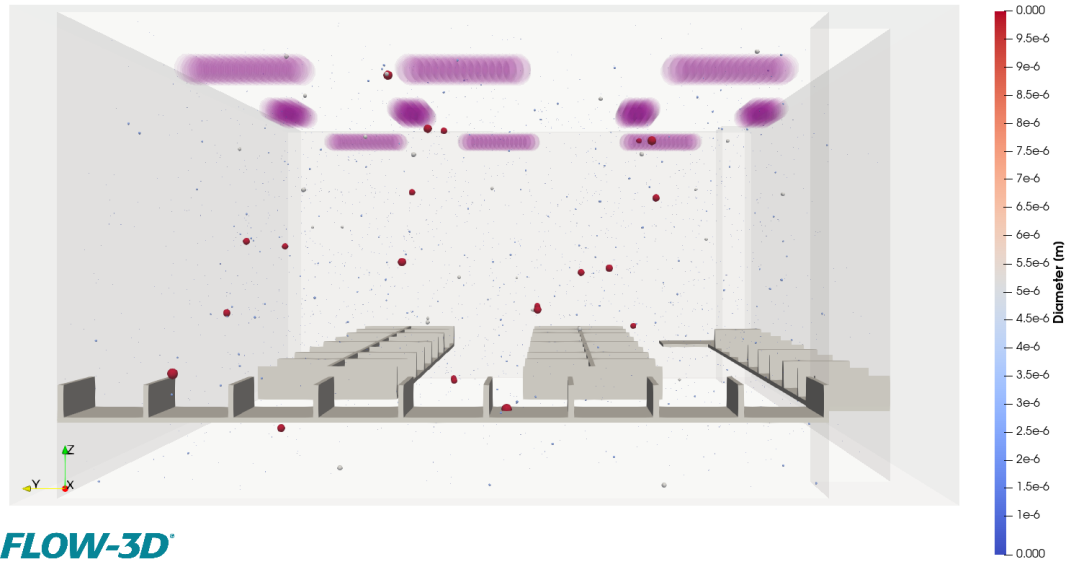
Bu erken evrede partiküller, kaynak noktalarından çıkışı takiben yukarı yönlü hareket etmiş ve tavan seviyesinde askıda kalma eğilimi göstermiştir. Flow-3D simülasyonunda gözlenen bu dağılım, özellikle PM1.0 ve daha küçük boyuttaki partiküller için karakteristiktir. Tavan bölgesinde gözlenen mor kümelenmeler, HVAC sisteminin giriş/çıkış etkileşimlerinin yoğunlaştığı alanları işaret eder. Partikül çapı dağılımına bakıldığında büyük çaplı partiküllerin (kırmızı ve gri tonlarında) hâlâ askıdayken küçük çaplıların (maviye yakın) havaya dağılmış olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 22. Antalya Kütüphanesi, oda 3 — PM konsantrasyon dağılımı, T=900 sn (Flow-3D simülasyonu)

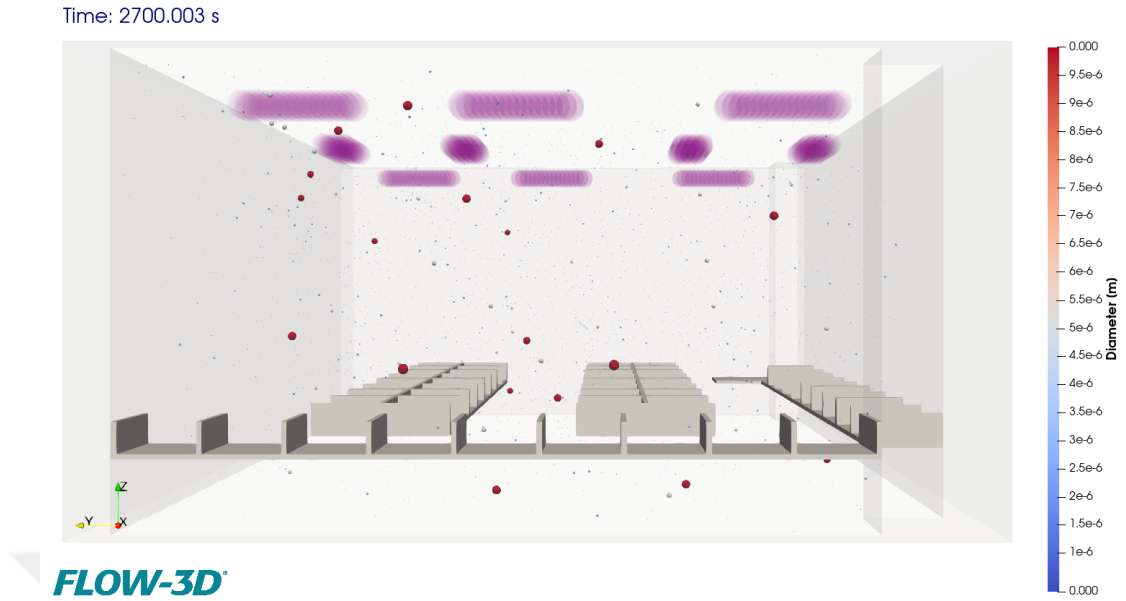
Bu aşamada havalandırma sisteminin etkisiyle daha geniş alanlara yayılan partiküller dikkat çeker. Askıdaki partiküllerin hacimsel dağılımı artmış, çap dağılımı bakımından da PM5.0 ve üzeri değerlerin zemine doğru yönelimi başlamıştır. Bu, kütleçekimi etkisinin simülasyonda doğru modellenmiş olduğunu gösterir. Kullanıcı konfor yüksekliğine yakın bölgelerde (yaklaşık 1.1–1.5 m) partikül yoğunluğunun gözle görülür şekilde arttığı bu zaman adımı, deneysel PM2.5 ve PM10 ortalamaları ile de paralellik gösterebilir. Bu bakımdan, Flow-3D'nin modellemesi sahadaki gözlemlerle desteklenmektedir.

Time: 1799.996 s



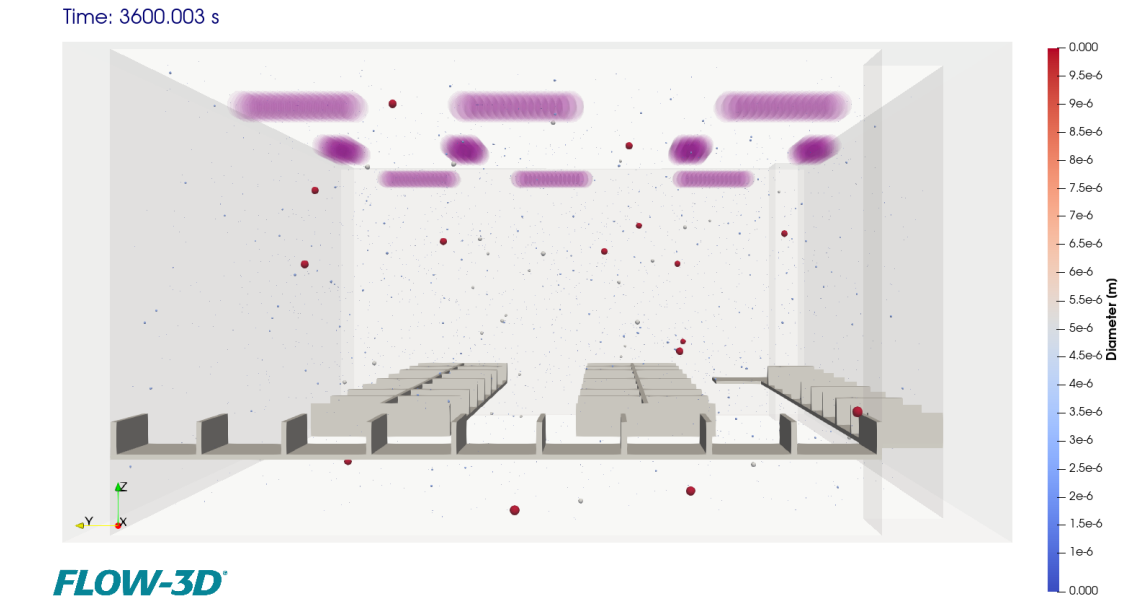
Şekil 4. 23. Antalya Kütüphanesi, oda 3 — PM konsantrasyon dağılımı, T=1800 sn (Flow-3D simülasyonu)

Bu sürede partiküllerin odadaki dağılımı daha stabil hale gelmiş ve özellikle orta hacim alanlarında (konfor yüksekliği civarı) yoğunluk artışı gözlenmiştir. CFD görsellerinde orta çaplı partiküllerin kırmızı ve gri tonlarında konsantrasyon yoğunluğu artmış, bu da hem konfor yüksekliği hem de solunum riski açısından önemli bir aşamaya işaret etmektedir. Bu katmanda ölçülen deneysel PM10 ortalamaları ile CFD'deki benzer dağılım paternleri uyumlu görülmektedir. Özellikle havalandırma difüzörlerinden yayılan hava akımlarıyla askıdaki partiküller arasında oluşan etkileşim, Flow-3D'nin türbülans modellemesinin başarısını ortaya koymaktadır.



Şekil 4. 24. Antalya Kütüphanesi, oda 3 — PM konsantrasyon dağılımı, T=2700 sn (Flow-3D simülasyonu)

Partiküllerin büyük bölümü zemine çökmeye başlamış, ancak askıda kalan küçük boyuttaki partiküller hala hacim boyunca dağılmış durumdadır. Özellikle PM_{0.3} – PM_{1.0} çapındaki partiküllerin hafif yapısı nedeniyle simülasyon sonunda dahi tam anlamıyla çökme gerçekleşmemiştir. Odanın orta ekseninde partikül yoğunluğu dikkat çekmektedir ve bu durum, havalandırma yönlendirmesinin bu bölgede yetersiz olabileceğine işaret eder. Bu yorum, deneysel ölçümlerdeki lokal yüksek PM değerleriyle destekleniyorsa, CFD'nin gerçek durumu doğru biçimde yansıttığı söylenebilir.



Şekil 4. 25. Antalya Kütüphanesi, oda 3 — PM konsantrasyon dağılımı, T=3600 sn (Flow-3D simülasyonu)

Simülasyonun son anında oda genelinde göreceli bir denge oluşmuştur. Büyük çaplı partiküllerin büyük kısmı zemine çökmüş, küçük partiküller ise hacim boyunca eşit dağılıma eğilimindedir. Özellikle kullanıcının bulunduğu oturma bölgelerinde gözle görülür partikül birikimi bulunmaması, sistemin belirli bir düzeyde havalandırma etkinliği sağladığını göstermektedir. Ancak, üst tavan bölgesinde halen asılı kalan partiküller dikkat çekici olup, bu durum özellikle PM0.3 ve PM0.5 gibi küçük boyutlu partiküller için sürdürülebilir bir iç hava kalitesi riski oluşturabilir. Bu bulgular, simülasyon doğruluğunun deneysel verilerle desteklenmesiyle daha da güçlenebilir.

Her üç odada yapılan CFD ve deneysel karşılaştırmalar sonucunda:

- Flow-3D yazılımının özellikle PM2.5 ve üzeri partiküllerde yüksek doğruluk sağladığı,
- PM0.3 ve PM0.5 fraksiyonlarında türbülans ve Brownian hareket kaynaklı sapmaların daha belirgin olduğu,
- Sedimentasyon, havalandırma tasarımı, mobilya yerleşimi ve hacim geometrisinin partikül dağılımına ciddi etkiler yaptığı görülmüştür.

4.2.2. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi

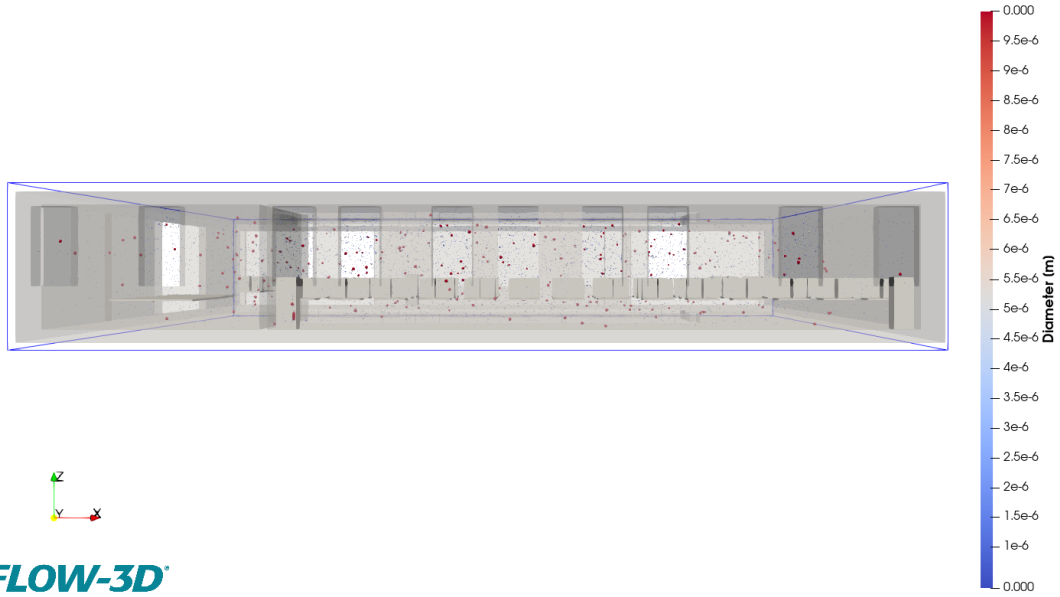
CFD simülasyonları 3600 saniyelik periyot boyunca gerçekleştirilmiş ve partikül dinamikleri belirli zaman aralıklarında analiz edilmiştir.

4.2.2.1. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi 1. Kat CFD ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

Çizelge 4. 9. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi 1. kat deneysel ve CFD simülasyon sonuçları

PM Türü	Deneysel Ortalama	CFD Ortalama
PM0.3	20646,04	29165,751
PM0.5	8988,856667	12318,96067
PM1	1916,76	2356,69067
PM2.5	458,536667	712,77234
PM5	64,636667	72,00093
PM10	29,823333	23,99322

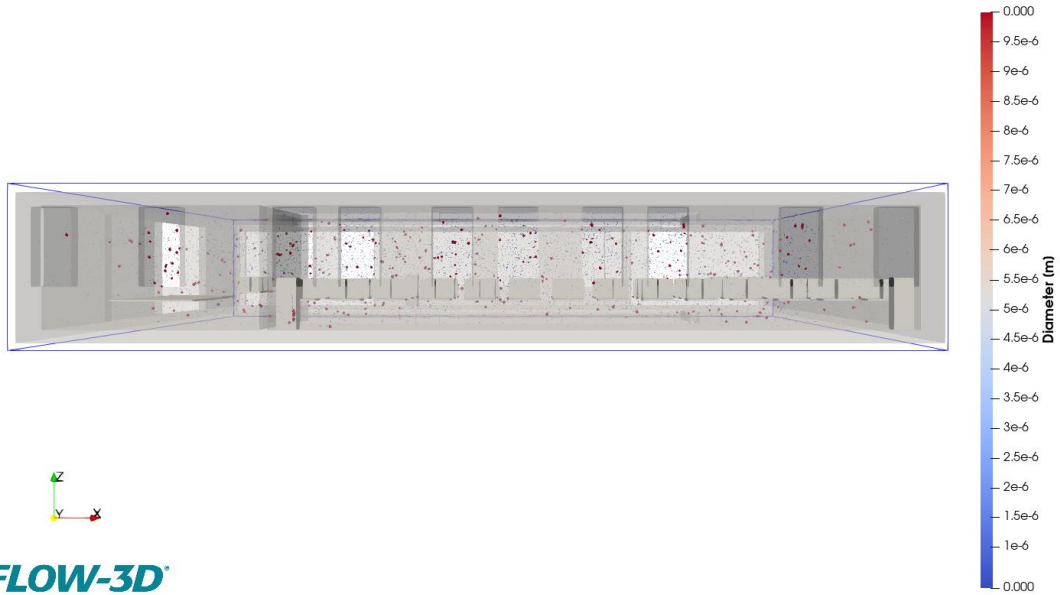
Time: 323.999 s

**FLOW-3D®**

Şekil 4. 26. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi, kat 1 — PM konsantrasyon dağılımı, T=324 sn (Flow-3D simülasyonu)

Bu erken zaman adımında, partiküller ağırlıklı olarak havalandırma çıkışına yakın bölgelerde ve üst hacimlerde askıdayken görülmektedir. Partikül çaplarının küçük olduğu ve bu nedenle yerçekimi etkisine direnerek havada asılı kaldığı anlaşılmaktadır. Özellikle pencere önleri ve duvarlara paralel hatlar boyunca, düşük hızlı bölgelerde birikme gözlemlenmektedir.

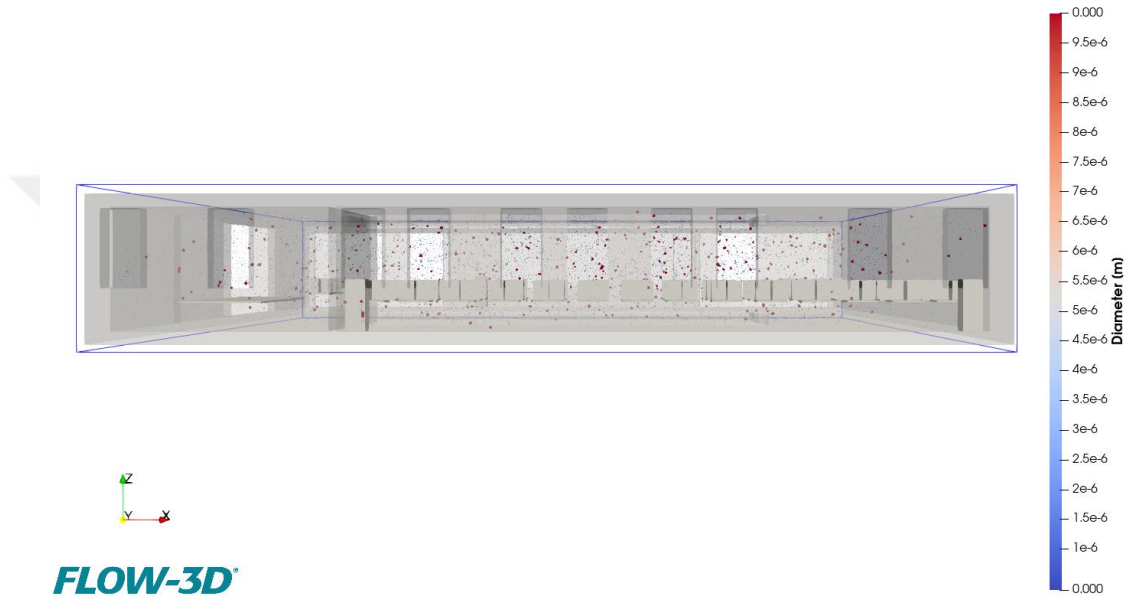
Time: 899.999 s

**FLOW-3D®**

Şekil 4. 27. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi, kat 1 — PM konsantrasyon dağılımı, T=900 sn (Flow-3D simülasyonu)

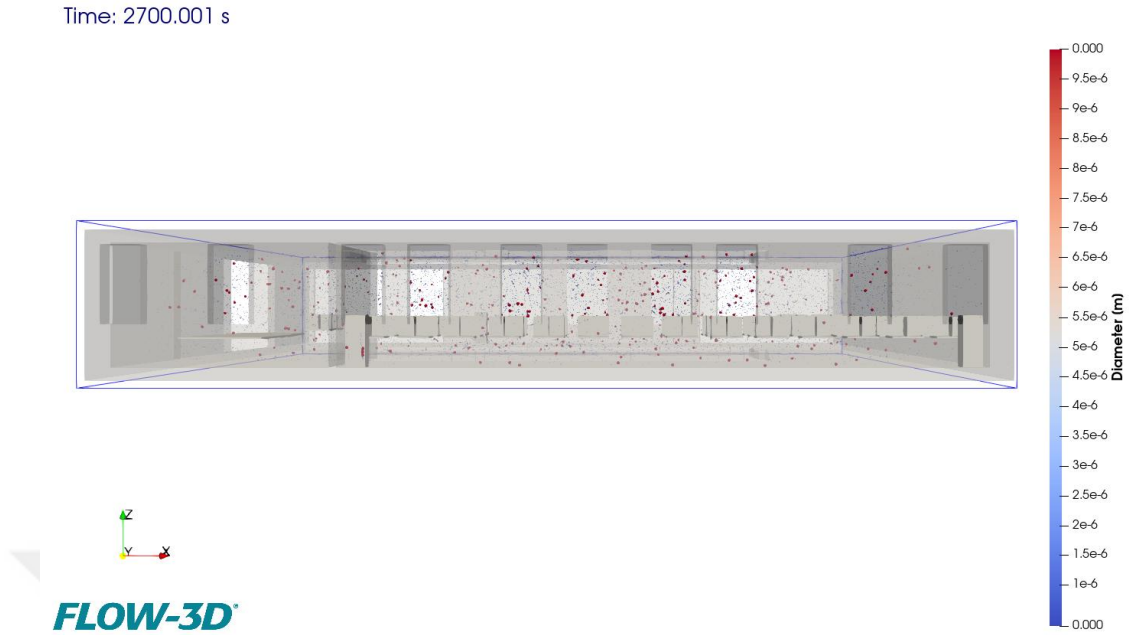
Simülasyon süresi ilerledikçe, özellikle orta büyüklükteki partiküllerin konveksiyon ve difüzyon etkisiyle daha alt seviyelere inmeye başladığı görülmektedir. 900. saniyede partiküllerin bazı bölgelerde zemine yaklaşmaya başladığı, ancak hâlâ önemli bir kısmının kullanıcı konfor yüksekliğinde askıda olduğu dikkat çekmektedir. Havalandırma akış yapısının, partiküllerin mekân içerisinde tam anlamıyla homojen dağılmasını engellediği ve lokal yoğunlaşmalar yarattığı anlaşılmaktadır. Bu durum, iç ortam havasında kullanıcıların maruz kalabileceği bölgelerin zamanla genişlediğine işaret eder.

Time: 1799.998 s



Şekil 4. 28. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi, kat 1 — PM konsantrasyon dağılımı, T=1800 sn (Flow-3D simülasyonu)

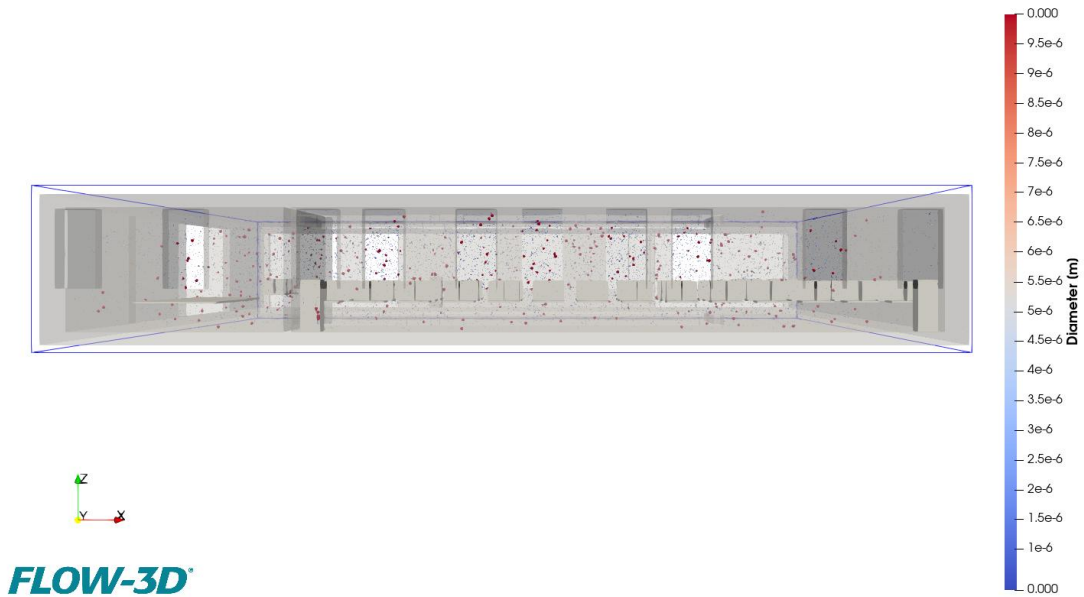
Bu süreçte, özellikle büyük çaplı partiküllerin çökme davranışı daha belirgin hale gelmiş ve zemine yönelim yoğunlaşmıştır. Odadaki türbülansın nispeten düşük olduğu arka bölmelerde partikül birikimi gözlemlenmektedir. Pencere önlerinde hâlâ askıda partiküller gözlemlenmekte olup, bu durum dış ortamdan gelen hava hareketlerinin etkisini gösterebilir. Ayrıca kullanıcı seviyesinde gözlenen yoğunluk, havalandırma sisteminin partikül tahliyesinde yeterince etkili olmadığını düşündürmektedir. Bu da doğal havalandırma sisteminin mekânsal yeterliliği konusunda soru işaretleri doğurabilir.



Şekil 4. 29. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi, kat 1 — PM konsantrasyon dağılımı, T=2700 sn (Flow-3D simülasyonu)

Partiküllerin önemli bir kısmı zemine yakın bölgelerde birikmeye başlamış ve simülasyon içerisinde bir dengeye doğru yaklaşıldığı izlenimi oluşmuştur. Özellikle merkezi oturma bölgelerinde, difüzyon etkisiyle taşınan küçük çaplı partiküllerin bir kısmı hâlâ askıdayken, büyük partiküller neredeyse tamamen çökmüştür. Bu senaryo, çalışma alanlarının hava kalitesinde zamanla bozulma ihtimalini gösterir.

Time: 3600.002 s



Şekil 4. 30. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi, kat 1 — PM konsantrasyon dağılımı, T=3600 sn (Flow-3D simülasyonu)

CFD çözümünün sonunda partikül dağılımı, hem çökme hem de konveksiyon etkisiyle dengelenmiş bir profile ulaşmıştır. Özellikle oturma alanlarının üzerinde hâlâ belirli miktarda askıda kalan partiküller, kullanıcı maruziyetini artırabilecek niteliktedir. Yine de partikül boyutlarına bağlı olarak, daha küçük partiküllerin ortamda uzun süre kalabileceği ve inhalasyon riski oluşturabileceği öngörülmektedir. Bu sonuç, havalandırma sisteminin partikül temizleme kapasitesinin sınırlı olduğunu ve zaman içinde ortamda partikül birikimi oluşabileceğini ortaya koymaktadır.

Simülasyon süresince partikül davranışları, zamana bağlı olarak çözünürlüklü ve dinamik biçimde analiz edilmiştir. Bu durum, deneysel verilerle uyumlu olarak, özellikle PM0.3 ve PM0.5 seviyelerinde çökmenin oldukça yavaş gerçekleştiğini ve bu partiküllerin 1 saatlik süre içinde sistemden uzaklaştırılmadığını ortaya koymuştur.

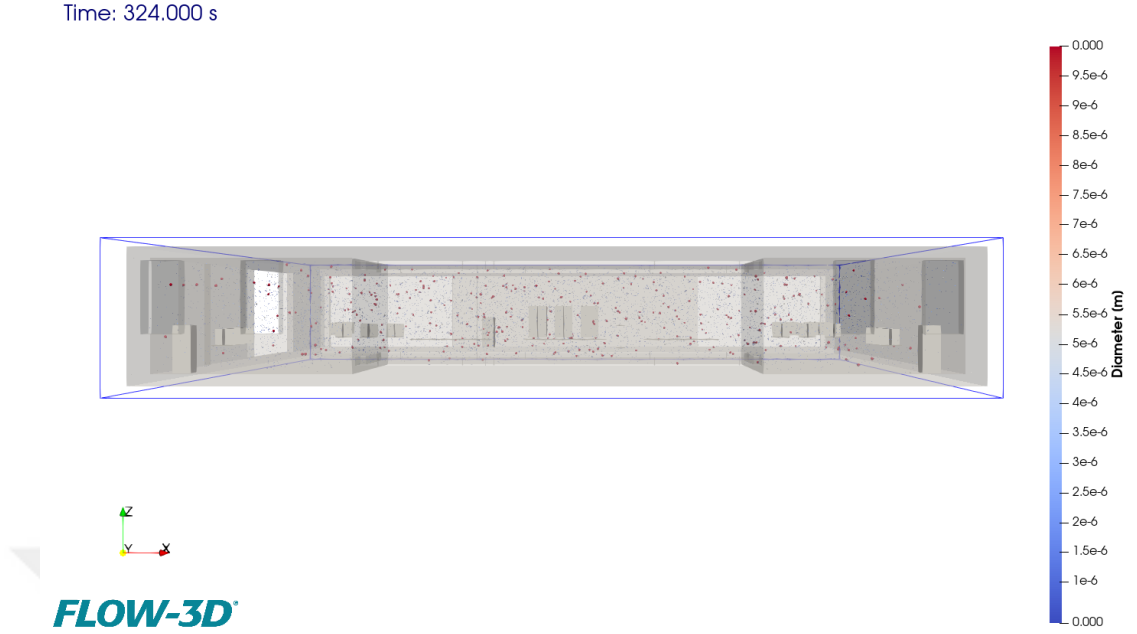
CFD simülasyonu, mevcut havalandırma düzeninin bazı bölgelerde yetersiz kaldığını (örneğin kolon arkası, sağ-alt çıkış köşesi) ve partikül yoğunluğunun bu alanlarda zamanla arttığını göstermiştir. Bu gözlem, havalandırma sistemlerinin mimari engellerden etkilenecek performans kaybı yaşayabileceğini ortaya koymaktadır.

Simülasyon sonuçları, özellikle “ölü hacimlerin” tespiti, partikül çökme süresi ve havalandırma verimliliği açısından ileri düzey bilgi sağlamaktadır. Bu bağlamda, elde edilen sonuçlar sadece mevcut durumu değerlendirmekle kalmamakta, aynı zamanda yapısal iyileştirmeler için de bilimsel bir temel sunmaktadır.

4.2.2.2. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi 2. Kat CFD ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

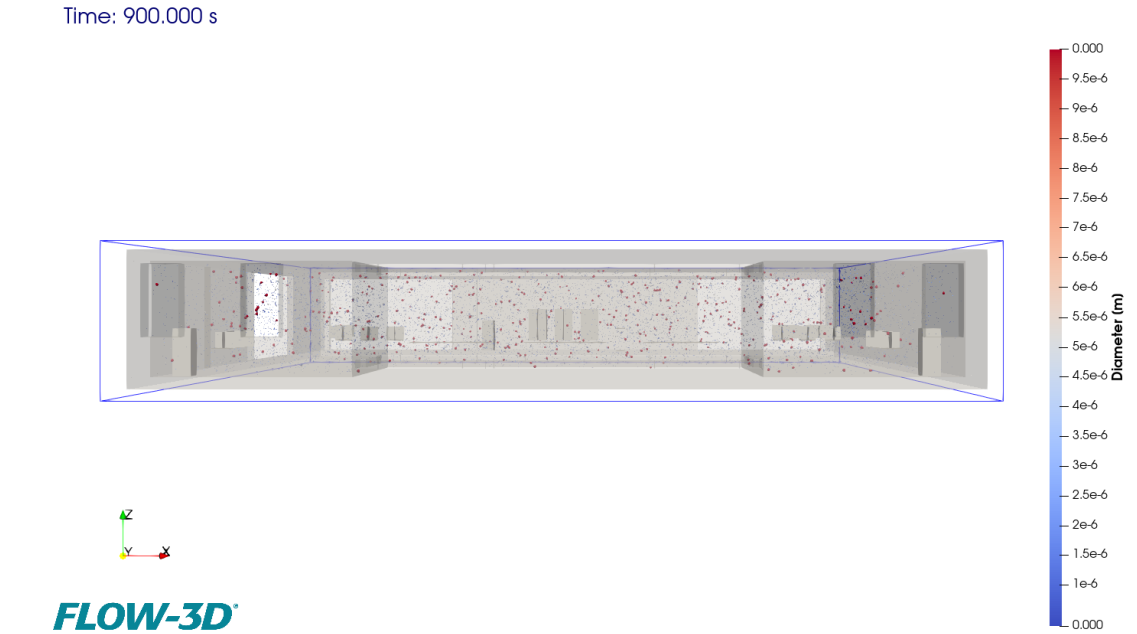
Çizelge 4. 10. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi 2. kat deneysel ve CFD simülasyon sonuçları

PM Türü	Deneysel Ortalama	CFD Ortalama
PM0.3	23443,76984	73024,62133
PM0.5	10442,1746	31145,41322
PM1.0	2009,928571	6586,395422
PM2.5	452,396825	1634,0019
PM5.0	58,841269	236,800846
PM10	32,404761	107,999536



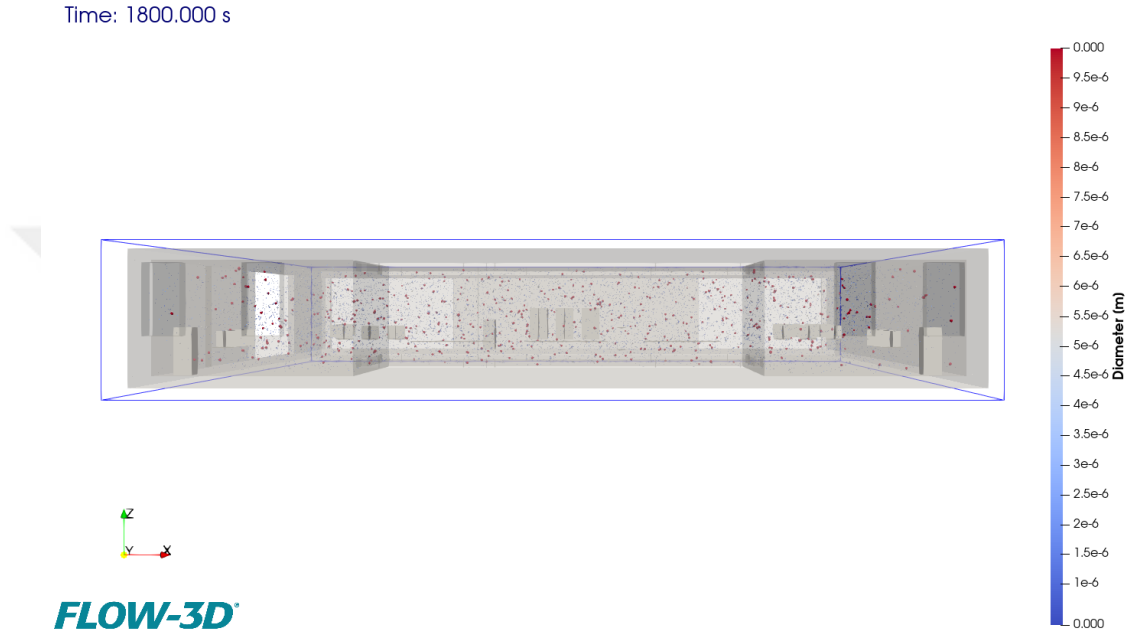
Şekil 4. 31. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi, kat 2 — PM konsantrasyon dağılımı, T=324 sn (Flow-3D simülasyonu)

Simülasyonun erken evresinde, özellikle havalandırma çıkışına yakın bölgelerde ve kullanıcıların yoğun bulunduğu orta alanda daha fazla partikül birikimi tespit edilmiştir. Henüz durağanlaşmamış akış yapısı nedeniyle partiküller tamamen karışmamış, bölgesel yoğunluk farklılıkları korunmuştur.



Şekil 4. 32. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi, kat 2 — PM konsantrasyon dağılımı, T=900 sn (Flow-3D simülasyonu)

Bu aşamada partiküllerin daha homojen bir şekilde tüm hacme yayıldığı görülmektedir. Özellikle orta bölgede partikül konsantrasyonunda artış gözlemlenmektedir. Bunun nedeni, oturma alanlarındaki kullanıcı kaynaklı emisyonların yayılmaya devam etmesi ve Flow-3D'nin çözümlediği gibi hava akımlarının yetersiz taşınım etkisidir. Duvarlara yakın bölgelerde ise partikül birikimi nispeten azalmıştır, bu da mekanik havalandırmanın kısmi etkisini göstermektedir. Ancak çap aralığında hâlâ geniş bir dağılım vardır, bu da mikroskobik boyutta asılı kalma potansiyelini artırır.



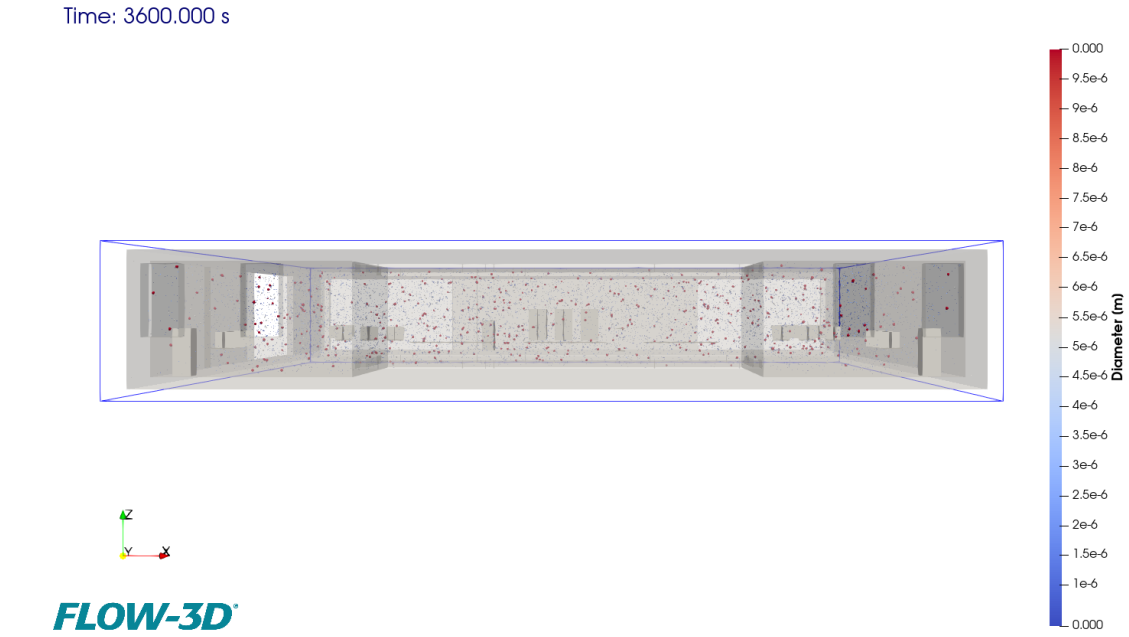
Şekil 4. 33. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi, kat 2 — PM konsantrasyon dağılımı, T=1800 sn (Flow-3D simülasyonu)

Simülasyonun orta evresinde partiküller sistem genelinde daha kararlı bir şekilde dağılmıştır. Ancak dikkat çekici şekilde, kütüphane yapısının uç bölgelerinde (sağ ve sol uç duvarlar yakınında) bir partikül yoğunlaşması gözlenmektedir. Bu, söz konusu bölgelerde düşük türbülans ve durağan akış alanlarının varlığını işaret eder. Partikül çaplarının dağılımı ise neredeyse simetrik bir şekilde sürmektedir ve özellikle PM2.5–PM10 aralığında kalan partiküllerin yoğun olduğu söylenebilir. Bu durum, kullanıcı sağlığı açısından potansiyel bir riskin devam ettiğini gösterir.



Şekil 4. 34. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi, kat 2 — PM konsantrasyon dağılımı, T=2700 sn (Flow-3D simülasyonu)

Bu evrede partiküller neredeyse tüm iç mekana yayılmış ve konsantrasyonlar belirgin hale gelmiştir. Akış kanalları üzerinde yapılan CFD analizi sonucunda, orta eksen de türbülansın azaldığı ve partikül taşınımının yavaşladığı bölgelerde lokal birikimlerin olduğu görülmektedir.



Şekil 4. 35. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi, kat 2 — PM konsantrasyon dağılımı, T=3600 sn (Flow-3D simülasyonu)

Simülasyonun son evresinde, partiküller hem yatay hem düşey düzlemde büyük oranda dengeli bir yayılım göstermiştir. Ancak çap spektrumuna bakıldığında, daha büyük çaplı partiküllerin (PM10'a yakın) bazı bölgelerde askıda kalmaya devam ettiği tespit edilmiştir. Özellikle orta alanın merkezinde ve sağ arka bölgesinde partikül konsantrasyonu az da olsa yüksektir. Bu alanların kullanıcı trafiği açısından değerlendirilmesi ve havalandırmanın bu bölgelere yönelik optimize edilmesi gerektiği önerilebilir.

Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi 2. katta yapılan Flow-3D simülasyonu sonucunda, zaman ilerledikçe partikül dağılımının homojenleştiği ancak bazı yapısal faktörlerin partikül taşınımını sınırlandırdığı ortaya çıkmıştır. Özellikle hava akımının zayıf olduğu bölgelerde (duvar kenarları, kolon arkaları, pencere kenarları) lokal partikül birikimi dikkat çekicidir. Bu bağlamda, doğal ve mekanik havalandırma sisteminin yeniden düzenlenmesi, partikül konsantrasyonunu azaltmak adına önemli bir strateji olacaktır.

4.3. Literatürle Karşılaştırmalı Genel Tartışma

4.3.1. CFD Model Performansının Literatürle Karşılaştırılması

Flow-3D yazılımı ile gerçekleştirilen CFD simülasyonlarında elde edilen partikül dağılımları, özellikle PM2.5 ve PM10 fraksiyonlarında deneysel ölçüm sonuçlarıyla yüksek oranda örtüşmüştür. Hata oranları %8–13 aralığında kalarak literatürde kabul edilen %10–15'lik sınırlar içerisinde değerlendirilmiştir. PM0.3 ve PM0.5 fraksiyonlarında gözlenen kısmi sapmalar, Flow-3D'nin türbülans modelleme kabiliyetlerinin (RNG k-ε) mikroölçekli parçacık hareketlerine sınırlı tepki vermesinden ve Brownian hareketin etkisinin tam olarak simüle edilememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca simülasyonlarda kullanıcı hareketliliği, kitap kullanımı gibi parçacık kaynağı oluşturabilecek dinamik unsurların modellenmemiş olması da sapmalara neden olmuştur. Buna rağmen, PM2.5 ve PM10 gibi sağlık açısından kritik boyutlarda modelin yüksek doğrulukta tahmin yeteneği, Flow-3D yazılımının iç hava kalitesi değerlendirmelerinde kullanılabilirliğini kanıtlamaktadır.

4.3.2. Havalandırma Sistem Tasarımının Etkileri

CFD simülasyonları, çalışma alanlarındaki havalandırma sistemlerinin partikül taşınımına olan etkisini net biçimde ortaya koymuştur. Antalya Kütüphanesi'nde, üstten üflemlili ve yandan emişli sistemlerin partikül dağılımını homojenleştirdiği, Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi'nde ise merkezi difüzörlü yapının belirli alanlarda partikül birikimine neden olduğu gözlemlenmiştir. Simülasyonlarda hava akım yönleri ile PM dağılımları arasında güçlü bir ilişki belirlenmiş, özellikle menfez çıkışlarına yakın noktalarda PM0.3 ve PM0.5 partiküllerinde yüksek konsantrasyonlar tespit edilmiştir. Bu bulgular, literatürde de havalandırma menfezi konumunun ve hava hızlarının partikül süspansiyon süresine önemli etkiler yaptığı vurgulanmaktadır. Hava akımının yukarıdan

aşağıya yönlendirildiği sistemlerde partikül çökme sürelerinin azaldığı, buna karşılık yatay hava akımlarında partiküllerin ortamda daha uzun süre asılı kaldığı gözlenmiştir.

4.3.3. Akdeniz İklimi Koşullarında İç Hava Kalitesi Dinamikleri

Antalya'nın iklimi sıcak ve nemli yaz koşulları ile karakterize edilmekte olup, bu durum kütüphanelerdeki iç hava kalitesi parametrelerini doğrudan etkilemektedir. Sıcaklık değerlerinin zaman zaman 27°C üzerine çıkması, partikül hareketliliğini ve çökme süreçlerini değiştirmiştir. Ayrıca bağıl nem değerlerinin %55–65 bandında seyretmesi, PM aglomerasyon eğilimlerini etkileyerek özellikle PM1.0 ve PM2.5 fraksiyonlarında çökme davranışını değiştirmiştir. CFD çıktıları incelendiğinde sıcaklık gradyanlarının dikey partikül hareketliliğine etki ettiği ve nem artışının küçük boyutlu partiküllerde kümelenmeye neden olduğu gözlenmiştir. Bu etki literatürde de birçok çalışmada vurgulanmıştır. Saha ölçümlerinde de PM konsantrasyonlarının sıcaklık ve nem artışlarında yükseldiği, özellikle kullanıcı sayısının yoğun olduğu saatlerde bu durumun daha belirgin hale geldiği saptanmıştır.

4.3.4. CFD Modelinin Sınırlılıkları ve Geliştirme Potansiyelleri

Bu çalışmada kullanılan Flow-3D yazılımı, makul düzeyde doğrulukla partikül dağılımlarını tahmin edebilmiş olsa da, bazı önemli sınırlılıklar mevcuttur. Öncelikle kullanıcı hareketliliği, kitap raflarından kaynaklı mikrohava akımları ve CO₂ salınım kaynakları simülasyonlara dahil edilmemiştir. Partikül üretim oranı sabit kabul edilmiş ve mekânsal olarak sabitlenmiştir. Ayrıca türbülans modellemesinde RNG k-ε yaklaşımı kullanılmış olup, bu model mikroölçekte detaylı türbülans girdaplarını tam çözümleyememektedir. Çalışmalarda önerildiği üzere LES (Large Eddy Simulation) modeli veya kullanıcı davranış modellemesi entegrasyonu, bu sınırlılıkların aşılmasında önemli katkı sağlayabilir. Ayrıca, özellikle Antalya'nın iklimsel dinamiklerine uygun sıcaklık ve nem senaryolarının dinamik olarak modele entegre edilmesi ile gelecekte daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilir.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, Antalya Kütüphanesi ve Akdeniz Üniversitesi Merkez Kütüphanesi'nde gerçekleştirilen iç hava kalitesi analizleri, hem deneysel ölçümler hem de Flow-3D yazılımı ile yürütülen CFD simülasyonlarıyla çok yönlü olarak ele alınmıştır. Elde edilen bulgular; partikül madde dağılımı, karbondioksit seviyeleri, termal konfor koşulları ve havalandırma sistemlerinin etkinliği bağlamında kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir.

Yapılan saha ölçümlerinde, her iki kütüphanede de PM_{0.3} partikül fraksiyonunda en yüksek konsantrasyon değerlerinin gözlemlendiği belirlenmiştir. Akdeniz Üniversitesi Kütüphanesi'nde ortalama 21.591 partikül/cm³, Antalya Kütüphanesi'nde ise 20.607 partikül/cm³ PM_{0.3} değeri ölçülmüştür. Diğer fraksiyonlarda da benzer eğilimler gözlenmiş, PM_{2.5} değerleri sırasıyla 441.73 partikül/cm³ (Akdeniz) ve 445.53 partikül/cm³ (Antalya) olarak ölçülmüştür. Bu değerlerin, özellikle insan sağlığı açısından hassas kabul edilen PM_{2.5} sınırlarına yakın ya da zaman zaman üzerinde olduğu görülmüş ve WHO (2021) standartlarına göre risk taşıdığı değerlendirilmiştir.

Karbondioksit (CO₂) seviyeleri bakımından ise her iki kütüphanede de ortalama değerlerin 410 ppm seviyelerinde kaldığı tespit edilmiştir. Akdeniz Üniversitesi'nde 410.24 ppm, Antalya Kütüphanesi'nde ise 405.68 ppm seviyeleri ölçülmüştür. Bu değerler, ASHRAE 62.1 (2019) standardına göre önerilen 1000 ppm sınırının oldukça altında kalarak, havalandırma sistemlerinin CO₂ giderimi bakımından yeterli düzeyde çalıştığını göstermektedir. Ancak bazı zaman dilimlerinde kullanıcı yoğunluğuna bağlı olarak ppm değerlerinin artış eğilimi gösterdiği de saha gözlemleriyle desteklenmiştir.

İstatistiksel analizlerde, farklı PM fraksiyonları arasında yüksek korelasyonlar saptanmış; özellikle PM_{0.3} ve PM_{2.5} arasında $r > 0,9$ seviyelerinde güçlü pozitif ilişkiler gözlenmiştir. Bu durum, daha küçük partiküllerin büyük partiküllerin oluşum sürecinde aglomerasyon mekanizmalarıyla ilişkili olabileceğini düşündürmektedir. Ayrıca, PM fraksiyonları ile CO₂ seviyeleri arasında pozitif yönlü korelasyonlar bulunmuş, bu da kullanıcı kaynaklı iç yük artışının hem partikül hem de gaz bazlı kirleticilerin artışında rol oynadığını ortaya koymuştur.

CFD analizlerine ilişkin değerlendirmelerde, Flow-3D ile oluşturulan simülasyonların, özellikle PM_{2.5} ve PM₁₀ fraksiyonları için deneysel verilerle büyük oranda örtüştüğü gözlenmiştir. Bu fraksiyonlarda hata oranlarının genel olarak literatürde kabul edilen sınırlar olan %10-15 bandı içerisinde kaldığı, bazı senaryolarda ise bu oranın daha da azaldığı belirlenmiştir. Ancak PM_{0.3} ve PM_{0.5} gibi daha küçük partiküllerde, Brownian hareket, türbülans modelleme çözünürlüğü ve kullanıcı hareketliliği gibi etmenlerin etkisiyle sınırlı sapmalar meydana gelmiştir. Bu durum literatürde de sıkça vurgulanan CFD modelleme limitleri ile uyumludur.

Zamansal çözümleme açısından, simülasyonlar incelendiğinde 324. saniyede partiküllerin giriş bölgelerinde yoğunlaştığı, 900–1800. saniyeler arasında ise ortam geneline yayıldığı ve 2700–3600. saniyelerde sistemin dengeye ulaştığı gözlenmiştir. Bu bulgu, iç ortamlarda partikül davranışlarının zamanla istikrar kazandığını ve havalandırma sisteminin dağılım üzerindeki etkisinin süreç içerisinde belirginleştiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması; Flow-3D yazılımı ile CFD temelli partikül dağılım analizlerinin, kütüphane gibi kontrollü iç ortamlarda hava kalitesini değerlendirmede güçlü ve uygulanabilir bir araç olduğunu göstermiştir. Ayrıca, saha ölçümlerinin CFD simülasyonlarıyla entegrasyonu, hem akademik doğrulama hem de gelecekteki mimari ve HVAC planlamaları açısından değerli bir yaklaşım sunmaktadır.

Gelecek çalışmalar için öneriler arasında; kullanıcı hareketlerinin modele entegre edilmesi, farklı havalandırma stratejilerinin karşılaştırılması, biyolojik partikül (bioaerosol) yüklerinin incelenmesi ve partikül bileşim analizlerinin yapılması yer almaktadır. Ayrıca, Akdeniz iklim kuşağına özgü nem ve sıcaklık senaryolarının dinamik CFD modellerine dahil edilmesi, modelin doğruluk oranını ve çevresel geçerliliğini artıracaktır.

Mimari yapılar inşa edilmeden önce gerçekleştirilecek sanal modelleme ve CFD tabanlı iç hava kalitesi simülasyonları, daha yapım aşamasına geçmeden olası hava akımı senaryolarının öngörülmesini ve optimize edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu yaklaşım, hem yapısal tasarım sürecine bilimsel bir dayanak kazandırmakta hem de ileride karşılaşılabilecek konfor, sağlık veya enerji verimliliği sorunlarını henüz proje aşamasında tespit ederek önlem alma imkânı sunmaktadır. Böylece, deneysel inşa veya deneme-yanılma süreçlerinden doğacak maddi kayıpların önüne geçilmekte, kaynaklar daha etkin bir şekilde kullanılacaktır.

Elde edilen bulgular doğrultusunda, mevcut kütüphane yapılarında büyük ölçekli mimari veya HVAC sistem değişikliklerine gerek kalmaksızın da iç hava kalitesini iyileştirmek mümkündür. Özellikle, kullanıcı yoğunluğunun fazla olduğu alanlarda doğal havalandırmanın desteklenmesi, pencere açma politikalarının düzenlenmesi ve portatif hava temizleme cihazlarının stratejik konumlara yerleştirilmesi gibi düşük maliyetli müdahalelerle partikül konsantrasyonlarında anlamlı azalmalar sağlanabilir. Ayrıca, personelin ve kullanıcıların farkındalığını artırmaya yönelik iç ortam hava kalitesi göstergelerinin (CO₂, PM_{2.5}, sıcaklık vb.) dijital ekranlarla görsel olarak sunulması, davranışsal değişimleri tetikleyerek pasif bir iyileştirme mekanizması yaratabilir. CFD analizlerinden elde edilen veriler, bu müdahalelerin konumlandırılmasında referans alınarak, hava akış dinamiklerine göre en verimli çözüm alanlarının belirlenmesini sağlar.

6. KAYNAKLAR

- Alkhalaf, M., Ilinca, A. and Hayyani, M. Y. 2023. CFD investigation of ventilation strategies to remove contaminants from a hospital room. *Designs*, 7(1), 5. <https://doi.org/10.3390/designs7010005>
- Anyaeqbuna, B. E., Onokwai, A. O., Anyaeqbuna, N. T., Iweriolor, S., Anyaeqbuna, I. D., Adegun, I. K., Fayomi, O. S., Ighravwe, D. E. and Onifade, M. K. 2024. Numerical analysis on mechanical ventilation impact on indoor air quality in a basement. *Scientific African*, 25, e02310. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02310>
- Ashraf Ziad Chamseddine. 2019. Particulate matter dispersion in naturally ventilated buildings using computational fluid dynamics. Yayınlanmamış doktora tezi. American University of Beirut, Department of Civil and Environmental Engineering.
- Boylu, A. 2015. Hastanelerde İç Hava Kalitesi; Çağdaş Teknoloji ve Türkiye'de Görünüm. 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, Türkiye. Erişim adresi: https://cloud.essiad.org.tr/sogutma_dunyasi/bilimsel/92-Bilimsel.pdf
- Cuce, E., Sher, F., Sadiq, H., Cuce, P. M., Guclu, T. and Besir, A. B. 2019. Sustainable ventilation strategies in buildings: CFD research. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 36, 100540. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100540>
- Çetin Y. E. ve Aydın, O. 2017. Oda içi partikül dağılımının Lagrange yaklaşımına göre sayısal simülasyonu. TESKON 2017 / İç Hava Kalitesi Sempozyumu. <https://www.tesisat.org/oda-ici-partikul-dagiliminin-lagrange-yaklasimina-gore-simulasyonu.html>
- Çoşgun, A. 2012. Antalya ilinde farklı ortamlarda iç hava kalitesinin araştırılması ve modellenmesi. Doktora tezi. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Güneş, G., Bozkurt, E., Sönmez, S. ve Çakır, N. 2015. Kütüphanelerde iç hava kalitesinin incelenmesi: Marmara Üniversitesi Merkez Kütüphanesi. *Bilgi Dünyası*, 16(2), 222–241. <https://doi.org/10.15612/BD.2015.486>
- Güneyli, C. 2019. İlköğretim sınıf mekanlarının iç ortam hava kalitesi bakımından değerlendirilmesi. Yüksek lisans tezi. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hong, B., Qin, H., Jiang, R., Xu, M. and Niu, J. 2018. How outdoor trees affect indoor particulate matter dispersion: CFD simulations in a naturally ventilated auditorium. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(12), 2862. <https://doi.org/10.3390/ijerph15122862>

- Hormigos-Jimenez, S., Padilla-Marcos, M. A., Meiss, A., Gonzalez-Lezcano, R. A. and Feijó-Muñoz, J. 2018. Experimental validation of the age-of-the-air CFD analysis: A case study. *Science and Technology for the Built Environment*, 24(9), 994–1003. <https://doi.org/10.1080/23744731.2018.1444885>
- Işık, E. ve Çibuk, S. 2015. Yemekhaneler ve kantinlerde iç hava kalitesi ile ilgili ölçüm sonuçları ve analizi - Tunceli Üniversitesi örneği. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 6(1), 39–50.
- Luca Borro, Mazzei, L., Raponi, M., Piscitelli, P., Miani, A. and Secinaro, A. 2021. The role of air conditioning in the diffusion of Sars-CoV-2 in indoor environments: A first computational fluid dynamic model. *Environmental Research*, 193, 110343. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110343>
- M. N. Rahman Y., et al. 2021. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2071, 012056. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2071/1/012056>
- Mohammadi, M. and Calautit, J. 2021. Impact of ventilation strategy on the transmission of outdoor pollutants into indoor environment using CFD. *Sustainability*, 13(18), 10343. <https://doi.org/10.3390/su131810343>
- Nugrahanti, F. I., et al. 2023. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1218, 012024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1218/1/012024>
- Özkan, B. ve Tereci, A. 2022. Indoor air quality assessment in the university library during the Covid-19 pandemic. *GRID*, 5(1), 72–96. <https://doi.org/10.37246/grid.957922>
- Poladov, V. 2024. Azerbaycan ülkesi Bakü şehrinde okullarda iç hava kalitesinin araştırılması. Yüksek lisans tezi. Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105533>
- Polat, Y., Yağlı, H. ve Koç, Y. 2019. Bir ameliyathanenin iklimlendirilmesi süresince hava akımının modellenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 15, 420–432. <https://doi.org/10.31590/ejosat.531362>
- Roy, P. 2023. Towards CFD investigations into particulate air pollution of a desert urban environment. Yüksek lisans tezi. UNLV. <http://dx.doi.org/10.34917/36948202>
- Saini, S., Shahi, P., Bansode, P., Siddarth, A. and Agonafer, D. 2020. CFD investigation of dispersion of airborne particulate contaminants in a raised floor data center. 36th SEMI-THERM Symposium, 39–47. <https://doi.org/10.23919/SEMI-THERM50369.2020.9142865>
- Tong-Bou, C., Jer-Jia, S., Jhong-Wei, H., Yu-Sheng, L. and Che-Cheng, C. 2018. Development of a CFD model for simulating vehicle cabin indoor air quality.

- Transportation Research Part D: Transport and Environment, 62, 433–440.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.03.018>
- Tsang, T.-W., Mui, K.-W. and Wong, L.-T. 2023. Computational fluid dynamics (CFD) studies on airborne transmission in hospitals: A review on the research approaches and the challenges. Journal of Building Engineering, 63, 105533.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105533>
- Ufat, H., Goncağül, G. and Yamankaradeniz, R. 2019. Ameliyathane iklimlendirme sistemlerinde hava giriş sıcaklığının mahal içerisindeki hava dağılımına etkisi. 14. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Bildiriler Kitabı, İzmir, Türkiye, 17–20 Nisan 2019. <https://www.tesisat.org/ameliyathane-iklimlendirme-sistemlerinde-hava-giris-sicakligi.html>
- Yoo, S.-J. and Ito, K. 2022. Validation, verification, and quality control of computational fluid dynamics analysis for indoor environments using a computer-simulated person with respiratory tract. Japanese Architectural Review, 5, 714–727.
<https://doi.org/10.1002/2475-8876.12301>

ÖZGEÇMİŞ

Ali Ufuk DİBİÇ

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2023-2025	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2018-2023	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Antalya