

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

HAVALANDIRMA UYGULAMALARINDA KİRLETİCİ DAĞILIMININ
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Makina Yük. Müh. Yunus Emre ÇETİN

ARALIK 2019
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

HAVALANDIRMA UYGULAMALARINDA KİRLETİCİ DAĞILIMININ
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Makina Yük. Müh. Yunus Emre ÇETİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“DOKTOR (MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ)”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :09/12/2019
Tezin Savunma Tarihi :27/12/2019

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Orhan AYDIN

Trabzon 2019

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında
Yunus Emre ÇETİN Tarafından Hazırlanan

HAVALANDIRMA UYGULAMALARINDA KİRLETİCİ DAĞILIMININ
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 10/12/2019 gün ve 1831 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda

DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

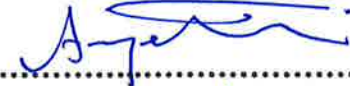
Başkan : Prof. Dr. Orhan AYDIN


.....

Üye : Prof. Dr. Mehmet Emin ARICI


.....

Üye : Prof. Dr. Selçuk Han AYDIN


.....

Üye : Prof. Dr. Mete AVCI


.....

Üye : Doç. Dr. Lütfü NAMLI


.....

Prof. Dr. Asim KADIOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Kapalı mahallerde kirletici dağılımı iç hava kalitesi, bulaşıcı hastalıklar, insan sağlığı, ameliyathaneler, temiz odalar vb. başlıklar altında son dönemde giderek daha çok ilgi çeken bir konu haline gelmektedir.

Mikroçiplerin hayatın her alanda kullanımı, şehirleşme, biyoteknoloji ve sağlık alanındaki hızlı ilerleme ile temiz odalara olan bağımlılığın giderek artması da kirletici dağılımı, havalandırma ve aralarındaki ilişkiyi ele alan süreçlere verilen önemi daha da arttıracaktır.

Bu çalışma kapsamında farklı hava dağıtım sistemlerinde ve çalışma şartlarında kapalı mahallerde kirletici dağılımı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmaların havalandırma uygulamalarında kirletici dağılımı konusunda uluslararası literatüre ve ülke katma değerine önemli düzeyde katkı sağlayacağı ifade edilebilir.

Doktora eğitimim süresince desteğini esirgemeyen danışman hocam sayın Prof. Dr. Orhan AYDIN'a kıymetli yardımlarından ötürü teşekkürlerimi sunarım. Deneysel düzeneğin kurulumu ve ilgili çalışmaların yürütülmesi süreçlerinde büyük katkılar sunarak akademik anlamda gelişmeye yardımlarını yadsıyamayacağım sayın Prof. Dr. Mete AVCI' ya, yine deneysel sistemin kurulumunda yardımcı olan Öğr. Gör. Uğurtan TOYGAR'a, deneysel ölçümler ve sayısal çalışmalarda değerli zamanlarını ayırarak yardımcı olan Arş. Gör. Aleyna AĞIRMAN, Arş. Gör. Soner BİRİNCİ, Arş. Gör. Mehmet SAĞLAM ve Fatih ATCI başta olmak üzere tüm TFL çalışma ekibine teşekkür ederim.

Öte yandan, hayatımın her safhasında her koşulda maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen eşime ve aileme tüm kalbi duygularıyla şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 117M488 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Desteklerinden ötürü TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Doktora tezimi Kerem Yavuz ÇETİN ve Ali Mete ÇETİN beylere ithaf ediyorum.

Yunus Emre ÇETİN
Trabzon, 2019

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum ‘‘HAVALANDIRMA UYGULAMALARINDA KİRLLETİCİ DAĞILIMININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ’’ başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Orhan AYDIN’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gosterdiğimi, çalışma surcinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 27/12/2019

Yunus Emre ÇETİN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Temel Havalandırma Yaklaşımları	4
1.2.1. Karma Havalandırma	5
1.2.2. Deplasmanlı Havalandırma	5
1.3. Literatür Araştırması	6
1.3.1. Hava Değişim Katsayısının (HDK) İncelenmesi	7
1.3.1.1. Hava Değişim Katsayısının Farklı Kirletici Yüklerinde İç Hava Kalitesine Etkisinin İncelenmesi	11
1.3.1.2. Hava Değişim Katsayısı Kirletici Kaynak Konumu İlişkisinin İncelenmesi	12
1.3.2. Menfez Konumu Etkisinin İncelenmesi	12
1.3.3. Deplasmanlı Hava Dağıtım ve Zeminden Isıtma Sisteminin Beraber Kullanıldığı Durumda Kirletici Dağılımının İncelenmesi.....	20
1.4. Tezin Amacı ve Kapsamı	21
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	23
2.1. Deneysel Çalışma	23
2.1.1. Benzerlik Parametreleri	23
2.1.2. Deney Düzeneği	25
2.2. Sayısal Çalışmalar	33
2.3. Havalandırma Performans Ölçütleri.....	37
2.3.1. Ortalama Hava Yaşı	37
2.3.2. Hava Değişim Verimi (HDV)	38
2.3.3. Kirletici Uzaklaştırma Etkinliği (KUE)	38

2.3.4.	Çökeltme Oranı	39
2.4.	Çalışma Parametreleri	39
2.4.1.	Hava Değişim Katsayısının (HDK) İncelenmesi	39
2.4.1.1.	Hava Değişim Katsayısının Farklı Kirletici Yüklerinde İç Hava Kalitesine Etkisinin İncelenmesi	39
2.4.1.2.	Hava Değişim Katsayısı Kirletici Kaynak Konumu İlişkisinin İncelenmesi	41
2.4.2.	Menfez Konumu Etkisinin İncelenmesi	42
2.4.3.	Deplasmanlı Hava Dağıtım ve Zeminden Isıtma Sisteminin Beraber Kullanıldığı Durumda Kirletici Dağılımının İncelenmesi.....	45
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	48
3.1.	Hava Değişim Katsayısının (HDK) İncelenmesi	48
3.1.1.	Hava Değişim Katsayısının Farklı Kirletici Yüklerinde İç Hava Kalitesine Etkisinin İncelenmesi	48
3.1.1.1.	Sayısal Modelin Doğrulanması	48
3.1.1.2.	Hava Hızı ve Konsantrasyon Dağılımının Değerlendirilmesi.....	50
3.1.1.3.	Çıkış Menfezi Konsantrasyon Değerlerinin Değerlendirilmesi	53
3.1.1.4.	Mahal İçi Ortalama Konsantrasyon Değerlerinin Değerlendirilmesi.....	54
3.1.1.5.	Çökeltme Oranının Değerlendirilmesi	56
3.1.2.	Hava Değişim Katsayısı Kirletici Kaynak Konumu İlişkisinin İncelenmesi	57
3.1.2.1.	Sayısal Modelin Doğrulanması	57
3.1.2.2.	Hava Hızı ve Hava Yaşı Dağılımının Değerlendirilmesi	59
3.1.2.3.	Konsantrasyon Dağılımının Değerlendirilmesi.....	60
3.2.	Menfez Konumu Etkisinin İncelenmesi	61
3.2.1.	Sayısal Modelin Doğrulanması	62
3.2.2.	Hava Hızının ve Hava Yaşı Dağılımlarının Değerlendirilmesi.....	66
3.2.3.	Farklı Kaynak Konumlarına Göre Kirletici Dağılımının Değerlendirilmesi	68
3.2.4.	Partikül Seyrelme Sürecinin Değerlendirilmesi	73
3.3.	Deplasmanlı Hava Dağıtım ve Zeminden Isıtma Sisteminin Beraber Kullanıldığı Durumda Kirletici Dağılımının İncelenmesi.....	74
3.3.1.	Sayısal Modelin Doğrulanması	75
3.3.2.	Hava Değişim Veriminin (HDV) Değerlendirilmesi	78
3.3.3.	Giriş Havaasının Partikül Kaynağı Olduğu Durumun Değerlendirilmesi	79
3.3.4.	Kirletici Kaynak Konumlarına Göre Mahal Ortalama Konsantrasyon Değerlerinin Değerlendirilmesi.....	81
3.3.5.	Kirletici Kaynak Konumlarına Göre Solunum Yüksekliği Ortalama Konsantrasyon Değerlerinin Değerlendirilmesi.....	82

3.3.6.	Kirletici Uzaklaştırma Etkinliğinin (KUE) Değerlendirilmesi	84
3.3.7.	Çökeltme Oranının (%) Değerlendirilmesi	86
4.	SONUÇLAR	89
5.	ÖNERİLER	93
6.	KAYNAKLAR.....	94
ÖZGEÇMİŞ		



Doktora Tezi

ÖZET

HAVALANDIRMA UYGULAMALARINDA KİRLETİCİ DAĞILIMININ DENEYSEL
VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Yunus Emre ÇETİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Orhan AYDIN
2019, 105 Sayfa

Bu çalışmada farklı oda boyutları, menfez konumları ve çalışma parametrelerinde kirletici dağılımı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Bu maksatla kirletici dağılımında hava değişim katsayısının (HDK), menfez konumunun ve deplasmanlı hava dağıtım sistemi ile zeminden ısıtmanın beraber kullanıldığı bir uygulamanın etkileri değerlendirilmiştir. Deneysel aşama, küçük ölçekli bir model odada tamamlanmıştır. Çalışma parametreleri, elde edilen sonuçların gerçek boyutlardaki bir oda için de geçerli olması adına benzerlik olgusu değerlendirilerek belirlenmiştir. Akış görüntüleme çalışmaları gerçekleştirilmiş, ayrıca hava hızı, hava sıcaklığı ve konsantrasyon ölçümleri yapılmıştır. Sayısal kısımda hava hareketlerinin çözümlenmesinde $RNG\ k - \varepsilon$ türbülans modeli kullanılmıştır. Belirlenen akış alanı içerisinde partikül yörüngeleri *ayrık faz modeli* (DPM – Discrete Phase Modeling) kullanılarak izlenmiştir. Ayrıca hava yaşı, hava değişim verimi (HDV) ve kirletici uzaklaştırma etkinliği (KUE) hesaplanmıştır.

HDK artışının değişken kirletici yükleri altında ortam havasının ortalama kirletici seviyesini azaltmada yetersiz kalabileceği görülmüştür. Sabit kirletici yükleri için ise HDK artışının ortam havasındaki kirletici konsantrasyon değerini azaltmadaki etkisinin kirletici kaynak konumuna göre değişkenlik arz edeceği belirlenmiştir. Mahal içi kirletici dağılımının menfez konumları ve kirletici pozisyonlarının bir fonksiyonu şeklinde geliştiği tespit edilmiştir. Deplasmanlı hava dağıtım ve zeminden ısıtma sisteminin beraber kullanıldığı bir mahalde kirletici dağılımının işletme parametresi, partikül kaynak yüksekliği ve çıkış menfez konumuna bağlı olarak değişkenlik göstereceği ifade edilebilir.

Anahtar Kelimeler: İç hava kalitesi, Partikül dağılımı, Hava değişim katsayısı, Menfez konumu, Deplasmanlı hava dağıtım sistemi & Zeminden ısıtma

Doctoral Thesis

SUMMARY

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF CONTAMINANT
DISTRIBUTION IN VENTILATION APPLICATIONS

Yunus Emre CETIN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Orhan AYDIN
2019, 105 Pages

In this study, contaminant distribution for different room dimensions, opening positions and operating parameters are investigated experimentally and numerically. For this purpose, the effect of air change rate (air change per hour – ACH), inlet/outlet opening location and displacement ventilated & floor heated environment on contaminant distribution are evaluated. Experimental part is completed in a reduced scale model room. Operating parameters are specified regarding to similarity phenomena so that the results obtained are credible for full scale rooms. Flow visualization studies are carried out besides air velocity, air temperature and concentration measurements. In the numerical part *RNG k – ϵ* turbulence model is used to analyze the air flow distribution. Within the specified flow field particle trajectories are tracked by using discrete phase modeling (DPM). Moreover, air age, air change efficiency (ACE) and contaminant removal effectiveness (CRE) are calculated.

It is seen that increasing ACH may be inadequate in reducing concentration of the air under varying contaminant loads. It is also specified that under constant contaminant load cases the effect of ACH on reducing indoor concentration depends on contaminant source position. It is determined that the contaminant distribution is developed as a function of opening and source locations. It can be stated for a displacement ventilated and floor heated indoor environment that contaminant distribution shows an evolving character up to operating parameter, particle source height and outlet opening position.

Key Words: Indoor air quality, Particle dispersion, Air change rate, Opening position, Displacement ventilation & Floor heating

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. İhtiyaçlar hiyerarşisi	1
Şekil 2. Karma (a) ve deplasmanlı (b) havalandırmaya ait şematikler	5
Şekil 3. Oda 1'e ait şematik resim	25
Şekil 4. Deney düzeneğinin şematik resmi (Partiküller giriş menfezi ile ortama salınıyor).....	27
Şekil 5. Akış görüntüleme sistemine ait şematik resim	28
Şekil 6. Isıtıcı yüzeyine ait sıcaklık dağılımı (x:0-60 cm, y:0 cm, z:30 cm)	29
Şekil 7. Deney düzeneğinin şematik resmi (Partiküller oda içinden ortama salınıyor).....	31
Şekil 8. Deney düzeneği (Oda 1)	31
Şekil 9. Deney düzeneği (Oda 2)	32
Şekil 10. Model oda ve sayısal çalışmada kullanılan ağ yapısı	40
Şekil 11. Oda 1 için 17 menfez kombinasyonuna ait şematik	41
Şekil 12. Menfez konumu etkisinin ele alındığı model oda.....	43
Şekil 13. Menfez konumu etkisinin incelenmesinde değerlendirilen menfez kombinasyonları	44
Şekil 14. Menfez konumu etkisinin incelenmesinde değerlendirilen partikül kaynak konumları	44
Şekil 15. Deplasmanlı hava dağıtımı ve zeminden ısıtma için değerlendirilen oda geometrisi	45
Şekil 16. DHDS&Zeminden ısıtma uygulaması çalışmasında değerlendirilen çıkış menfez konumları (a)O1, (b)O2, (c)O3	46
Şekil 17. DHDS&Zeminden ısıtma uygulaması çalışması için belirlenen noktasal kirletici kaynak konumları.....	47
Şekil 18. Deneysel (sembol) ve sayısal (çizgi) x-hızı değerlerinin karşılaştırılması.....	49
Şekil 19. Deneysel (sembol) ve sayısal (çizgi) boyutsuz konsantrasyon değerlerinin karşılaştırılması	50
Şekil 20. Farklı HDK değerlerinde oda orta düzleminde hız konturları ve akım çizgileri (a)1.73 (b)2.88 (c)5.76 (d)7.68	51
Şekil 21. Sabit partikül debisinde konsantrasyon konturları	52
Şekil 22. HDK ile orantılı partikül debisinde konsantrasyon konturları	52
Şekil 23. (a) Sabit kütleli partikül debisi ve (b) HDK ile orantılı kütleli partikül debisinde çıkış menfezindeki konsantrasyon değerleri	53

Şekil 24.	(a) Sabit kütleli partikül debisi ve (b) HDK ile orantılı kütleli partikül debisinde mahal içi ortalama konsantrasyon değerleri.....	55
Şekil 25.	Partikül çökme oranları.....	56
Şekil 26.	Deneyisel (sembol) ve sayısal (çizgi) (a)x hızı ve (b) boyutsuz konsantrasyon değerleri.....	58
Şekil 27.	Görsel ve vektörel formda akış alanı.....	58
Şekil 28.	Farklı HDK değerlerinde oda orta düzleminde hız konturları ve akım çizgileri (a)1.73 (b)2.88 (c)5.76 (d)7.68.....	59
Şekil 29.	Farklı HDK değerlerinde oda orta düzleminde hava yaşı konturları (a)1.73 (b)2.88 (c)5.76 (d)7.68.....	59
Şekil 30.	Orta noktadan partikül salınımı durumunda konsantrasyon dağılımı.....	60
Şekil 31.	Ana akış bölgesinden partikül salınımı durumunda konsantrasyon dağılımı.....	60
Şekil 32.	Farklı kirletici kaynak durumları için ortalama konsantrasyon değerlerinin artan HDK ile değişimi.....	61
Şekil 33.	Hız vektörü ve akış görselleri. Menfez konumları (a)14, (b)21, (c)35.....	62
Şekil 34.	Deneyisel (sembol) ve sayısal (çizgi) x-hızı değerlerinin karşılaştırılması. Menfez konumları (a)14, (b)21, (c)35.....	64
Şekil 35.	Deneyisel (sembol) ve sayısal (çizgi) boyutsuz konsantrasyon değerlerinin karşılaştırılması. Menfez konumları (a)14, (b)21, (c)35.....	65
Şekil 36.	Menfez konumlarına bağlı olarak oda orta düzleminde elde edilen hız konturları ve akım çizgileri.....	67
Şekil 37.	Menfez konumlarına bağlı olarak oda orta düzleminde elde edilen hava yaşı konturları.....	68
Şekil 38.	Menfez konumlarına bağlı olarak oda orta düzleminde elde edilen konsantrasyon konturları.....	69
Şekil 39.	Solunum yüksekliğinde bulunan kirletici kaynakları durumunda oda orta düzleminde elde edilen konsantrasyon konturları.....	71
Şekil 40.	Çıkış menfezi yakınlığında bulunan kirletici kaynağı durumunda oda orta düzleminde elde edilen konsantrasyon konturları.....	73
Şekil 41.	Partikül seyrelme süreçleri.....	73
Şekil 42.	(a)0.34 m/s ve (b)0.73 m/s için jet görselleri ve hız vektörleri dağılımı.....	75
Şekil 43.	Deneyisel (sembol) ve sayısal (çizgi) x-hızı değerlerinin karşılaştırılması. (a)0.34 m/s, (b)0.73 m/s.....	76
Şekil 44.	Deneyisel (sembol) ve sayısal (çizgi) boyutsuz sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması. (a)0.34 m/s, (b)0.73 m/s.....	77
Şekil 45.	Deneyisel (sembol) ve sayısal (çizgi) boyutsuz konsantrasyon değerlerinin karşılaştırılması. (a)0.34 m/s, (b)0.73 m/s.....	78
Şekil 46.	HDK değerleri.....	79

Şekil 47.	Ortalama konsantrasyon değerleri (a)Mahal, (b)Solunum yüksekliği.....	80
Şekil 48.	Mahal ortalama konsantrasyon değerleri.....	81
Şekil 49.	Solunum yüksekliği ortalama konsantrasyon değerleri	83
Şekil 50.	Kirlenici uzaklaştırma etkinliği (KUE)	85
Şekil 51.	Çökelme oranı (%).....	87



TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.	Farklı uluslararası standartlara göre temiz oda sınıflandırmaları (Ashrae, 2017)	3
Tablo 2.	Hava değişim katsayısını değerlendiren çalışmalar.....	8
Tablo 3.	Giriş/çıkış menfez konumunu inceleyen çalışmalar	13
Tablo 4.	Oda boyutları	25
Tablo 5.	Oda 1 boyutları	26
Tablo 6.	Oda 2 boyutları	26
Tablo 7.	Anemometre özellikleri	30
Tablo 8.	Partikül sayım cihazı özellikleri	30
Tablo 9.	HDK etkisinin incelendiği işletme parametreleri	40
Tablo 10.	HDK ve kirletici konum etkisinin incelendiği çalışma için işletme parametreleri.....	42
Tablo 11.	Menfez konumu etkisi incelemesinde kullanılan işletme parametreleri.....	43
Tablo 12.	DHDS&Zeminden ısıtma uygulaması çalışması için farklı ölçeklere ait çalışma parametreleri.....	45
Tablo 13.	DHDS&Zeminden ısıtma uygulaması çalışmasında küçük ölçekli model odaya ait işletme parametreleri.....	46
Tablo 14.	Hava hızındaki artış oranının ortalama konsantrasyon değerindeki azalışa oranı	55
Tablo 15.	Hava yaşı (s)	68
Tablo 16.	Hava değişim verimi (HDV)	68
Tablo 17.	Mahal içi boyutsuz ortalama konsantrasyon değeri.....	70
Tablo 18.	Solunum yüksekliğinde boyutsuz konsantrasyon değeri.....	70
Tablo 19.	Mahal içi boyutsuz ortalama konsantrasyon değeri.....	72
Tablo 20.	Kirletici uzaklaştırma etkinliği (KUE)	72
Tablo 21.	Partikül seyrelme zamanı (s)	74

SEMBOLLER DİZİNİ

Kısaltmalar

DHDS	Deplasmanlı hava dağıtım sistemi
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
HDK	Hava değişim katsayısı
HDV	Hava değişim verimi
KHDS	Karma hava dağıtım sistemi
KUE	Kirletici uzaklaştırma etkinliği

Semboller

A_r	Arşimet sayısı	
C_p	İlgili alanın ortalama konsantrasyon değeri	kg/m ³
C_e	Çıkış havasının ortalama konsantrasyon değeri	kg/m ³
C_s	Besleme havasının ortalama konsantrasyon değeri	kg/m ³
C_μ	Türbülans model sabiti	
d_p	Partikül çapı	m
E_c	Kirletici uzaklaştırma etkinliği	
F_a	Partikül hareketine etki eden diğer kuvvetler	m/s ²
g	Yer çekimi ivmesi	m/s ²
Gr	Grashof sayısı	
h_0	Oda yüksekliği	m
k	Türbülans kinetik enerjisi	J/kg
K	Ortalama konsantrasyon	kg/m ³
K^*	Boyutsuz ortalama konsantrasyon	
\bar{p}	Basınç	N/m ²
Pr	Prandtl sayısı	
Ra	Rayleigh sayısı	
Re	Reynolds sayısı	
t	Zaman	s
T	Sıcaklık	K
T^*	Boyutsuz sıcaklık	
u	Akışkan hızı	m/s

u_0	Akışkan hızı	m/s
u_p	Partikül hızı	m/s
u', v', w'	Çalkantı hızları	m/s

Yunan harfleri

ρ_0	Akışkan yoğunluğu	kg/m ³
ρ_p	Partikül yoğunluğu	kg/m ³
$\bar{\tau}$	Ortalama hava yaşı	s
τ_n	Nominal zaman sabiti	s
μ	Dinamik viskozite	kg/ms
β	Termal genleşme katsayısı	
ε	Türbülans yutulma oranı	m ² /s ³

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Motivasyon kuramları içerisinde önemli bir yere sahip olan Maslow' un (1943) “kişilerin gereksinimi kuramı” insan ihtiyaçlarının sınırsız olduğunu ve herhangi bir ihtiyacın giderildikten sonra başka bir ihtiyacın ortaya çıkacağını ifade etmektedir. İlgili kuram, hiyerarşik bir forma sahip olup sırasıyla, fiziksel ihtiyaçlar, güvenlik ihtiyacı, ait olma ve sevgi, değer ihtiyacı ve kendini gerçekleştirme basamakları ile kategorize edilmektedir (Şekil 1). Bu hiyerarşide, bireyin üst basamaklara çıkması için alt düzeydeki fiziksel ve güvenlik ihtiyaçları gibi temel ihtiyaçlarını yeterli seviyede karşılaması gerekmektedir.



Şekil 1. İhtiyaçlar hiyerarşisi

“Barınma”, fiziksel ihtiyaçların ana bileşenlerinden birisi olup insan doğası üzerinde belirleyici bir role sahiptir. Sağlıklı ve güvenli bir barınma olanağı, karşılanan diğer fiziksel ihtiyaçlarla beraber bireyin hayatta kalmasını sağlayan temel faktör olarak ifade edilmektedir. Özellikle son yüz yılda artan şehirleşme ile birlikte günlük hayatımızın en az

%80' ini kapalı mahallerde geçirdiğimiz (Singh, 1996; Fisk, 2000; Klepeis vd., 2001) göz önüne alındığında, bu ortamdaki iç hava kalitesinin insan sağlığı üzerinde belirleyici bir rol üstleneceği açıktır. Bu manada, iç hava kalitesi gerek canlılar için gerekse kontrollü ortam gereksinimi olan farklı imalat ve sağlık işlemleri için önemli bir kavram olarak görülmektedir. İç hava kalitesi, hava hızı, sıcaklığı, nemi ve havanın barındırdığı kirletici miktarı gibi farklı değişkenlere bağlıdır. Söz konusu kirleticiler gaz fazında veya katı-sıvı formlarında bulunabilirler. Katı veya sıvı halde havada dağılmış halde bulunan bu partiküller aerosol sistemleri olarak isimlendirilirler. Bu sistemlerdeki partikül oranı kütleli veya hacimsel olarak tüm sistemin %0.0001' inden daha azına tekabül etmektedir (Hinds, 1999). Burada, ana akışkan olan hava taşıyıcı vazifesi görürken hava içinde dağılmış halde bulunan katı, sıvı veya katı-sıvı parçacıklar (partiküller) ikincil faz olarak tanımlanırlar. Akışkanlar mekaniği açısından bu tarz sistemler iki-fazlı akış kavramı içerisinde değerlendirilirler.

20. yüzyılın başlarında aerosollar maddenin gözlemlenebilen en küçük hali olarak ilgi çekmekteydiler. Bu süreçte, aerosol konusunda yapılan çalışmalar daha çok Brown hareketi olarak da tanımlanan difüzyon mekanizmasının anlaşılmasına katkı sunmuştur. 2. Dünya savaşını takiben, özellikle 1970 ve 1980' ler ile beraber, artan çevre bilinci ve hava kirliliğinin insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri aerosol sistemleri üzerindeki çalışmalara önemli bir ivme kazandırmış ve bu ilgi 1980 sonrasında yüksek teknoloji ile ilişkili üretim süreçlerinin ve yarı iletken endüstrisinin gelişmesi ile devam etmiştir. Sonraki dönemdeki çalışmalar ise, çok ince partikülleri (<0.1 µm) ve bu aerosol sistemlerinin global iklim üzerindeki etkilerini de içine alacak şekilde artmıştır. Günümüzde partiküller üzerine yürütülen incelemeler çevreye olan etkilerimizi ve çevrenin bizim üzerimizdeki etkilerini anlamamıza yardımcı olan önemli bir alanı oluşturmaktadır (Hinds, 1999).

Son yıllarda yapılan disiplinler arası araştırmalar, havadaki partiküllerin çeşitli solunum rahatsızlıklarına ve kardiyovasküler problemlere yol açarak belirli hastalıklara yakalanma miktarını ve ölüm oranlarını arttırdığını göstermiştir (Peters vd., 2001; Pope vd., 2002; Dominici vd., 2006; Anderson vd., 2012). Gazlardan farklı olarak temas ettikleri yüzeylere tutunan bu partiküller buldukları yüzey malzemesine zarar verebildikleri gibi (Nazaroff vd., 1990) elektronik cihazlar (Weschler vd., 1996) ve yarı iletken endüstrisi (Schmidt vd., 1997) açısından da tehlike arz etmektedirler.

Özellikle havadaki kirletici miktarının belirli limitler dahilinde tutulmasının gerektiği bu tarz ortamlar kontrollü ortam veya daha özel ismi ile temiz oda olarak tanımlanırlar. ISO (2015) standardında temiz oda havadaki partikül miktarının kirlilik duyarlı işlemlerin başarılı bir şekilde yürütülebilmesi için uygun seviyelerde tutulduğu kapalı bir ortam olarak ifade edilmektedir. Temiz odalar, her bir metreküp hava için izin verilen en yüksek partikül boyutu ve sayısı üzerinden sınıflandırılırlar. Tablo 1’ de farklı uluslararası standartlara bağlı olarak temiz oda sınıfları görülmektedir. Burada, FS 209 standardında görülen 100 veya 1000 değerleri birim hacimde 0.5 µm veya daha üzeri partikül boyutu için izin verilen en yüksek partikül adedini ifade etmektedir. Günümüzde hasta bakım odaları, ameliyathaneler ve yoğun bakım üniteleri gibi alanlar dahi bir temiz oda olarak değerlendirilmektedir (Ashrae, 2017). Temiz odalar, özellikle mikro elektronik devre veya ilaç imalatı, biyoteknoloji sahaları, savunma sanayi, havacılık endüstrisi ve medikal cihaz üretimi gibi yüksek teknoloji ve katma değer barındıran ürün gruplarının geliştirilmesi, tasarımı ve üretimi için çok önemli bir rol oynamaktadırlar.

Tablo 1. Farklı uluslararası standartlara göre temiz oda sınıflandırmaları (Ashrae, 2017)

ISO 14644-1	FS 209D	FS 209E	Britanya BS 5295	Avustralya AS 1386	Fransa AFNOR X44101	Almanya VDI 2083	Japonya JIS B 9920	AB GMP Klavuzu
ISO Class 1							1	
ISO Class 2					-	0	2	
ISO Class 3	1	M1.5	C	0.035	-	1	3	-
ISO Class 4	10	M2.5	D	0.35	-	2	4	-
ISO Class 5	100	M3.5	E / F	3.5	4000	3	5	A/B
ISO Class 6	1000	M4.5	G / H	35	-	4	6	-
ISO Class 7	10000	M5.5	J	350	400000	5	7	C
ISO Class 8	100000	M6.5	K	3500	4000000	6		D
ISO Class 9								

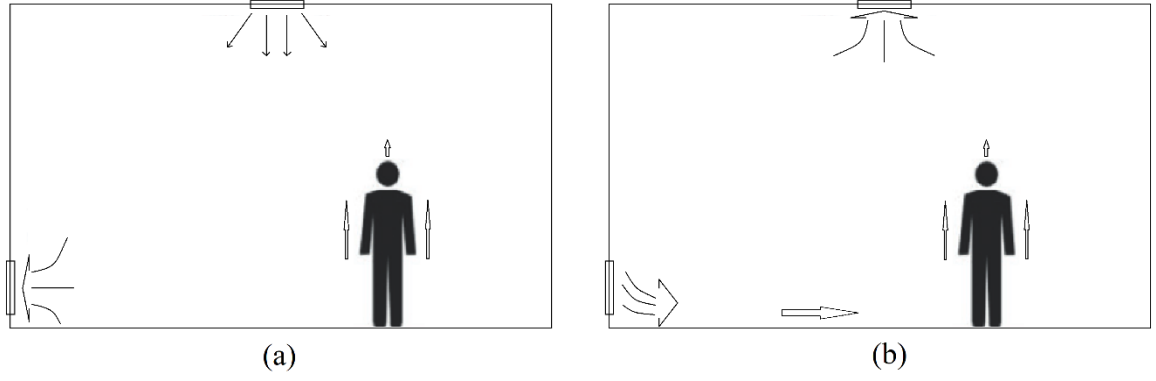
1957’ de fizik dalında Nobel sahibi olan Prof. Dr. Yang Chen-Ning, 2001 yılında yaptığı bir konuşmada, önümüzdeki 30-40 senede bilimsel ve teknolojik alandaki ilerlemenin 3 ana yönde olacağını ifade etmiştir: çiplerin yaygın olarak kullanımı, tıp ve biyolojideki hızlı ilerleme ve biyomühendislik (Xu, 2014). Bu manada, temiz odalar geleceğin planlandığı ve imal edildiği fabrikalar olarak değerlendirilebilir. Ülkemizde de, gelecek hedefleri doğrultusunda, yukarı ifade edilen teknoloji alanlarında yüksek katma

değere sahip ürünlerin yanı sıra bu ürünlerin üretimi için gerekli ortamların planlanma ve işletme süreçlerine ilişkin bir bilgi birikiminin varlığı da önemli hale gelmektedir.

Havalandırma, kapalı mahallerde havadaki kirletici oranının azaltılarak hem insan sağlığı hem de üretim süreçleri açısından uygun değerlerin sağlanması için tercih edilen yöntemlerin başında gelmektedir. Arzu edilen kirletici konsantrasyonu ile beraber termal konforun da mümkün olan en düşük enerji ihtiyacı ile karşılanması başarılı bir havalandırma stratejisi için şarttır. Farklı senaryolara özel olarak tercih edilen pek çok havalandırma yaklaşımı mevcuttur (Etheridge ve Sandberg, 1996; Awbi, 2003). Literatürde hava dağıtım sistemlerinin farklı sınıflandırmalara tabi tutulduğu değerlendirmeler de bulunmaktadır (Cao vd., 2014; Liddament, 2000; Yang vd., 2019).

1.2. Temel Havalandırma Yaklaşımları

Literatürde havalandırma sistemleri; menfez konumları, hava akışına sebep olan etkin parametre (zorlanmış veya doğal kuvvetler) vb. değişkenlere göre sınıflandırılmaktadır. En bilinen iki yaklaşım Şekil 2’de şematik olarak örneklendirilen karma havalandırma ve deplasmanlı havalandırma olarak isimlendirilmektedir (Awbi, 2003). Ayrıca özel olarak solunum yüksekliğinin taze hava ile beslendiği (stratum ventilation) (Cheng ve Lin, 2015; Lin vd., 2005), hava jetlerinin kullanıldığı (impinging jet/confluent jets ventilation) (Karimipannah ve Awbi, 2002; Karimipannah vd., 2008) veya daha özel olarak düzlemsel jetlerin tercih edildiği (protective occupied zone ventilation-POV) (Cao vd., 2013; Cao vd., 2015), kirletici kaynağına yakın ekstra çıkış menfezlerinin yer aldığı (local exhaust ventilation) (Ahmed ve Gao, 2017), kişiye özel menfezlerin bulunduğu (personalized ventilation) (Pantelic vd., 2009; Liu vd., 2019) veya neredeyse tavan büyüklüğünde difüzörlerin kullanıldığı (piston ventilation) havalandırma isimlendirmeleri de literatürde yer almaktadır. Ayrıca, son dönemde besleme havası debisinin zaman bağımlı olarak değiştiği atımlı akış yapısına sahip havalandırma sistemleri de farklı bir havalandırma yaklaşımı olarak literatürde yer almaktadır (Sattari ve Sandberg, 2013; Kabanshi vd., 2016). Bu bölümde kısaca, literatürde kabul gören en genel havalandırma yaklaşımları temel özellikleri ile ifade edilmektedir.



Şekil 2. Karma (a) ve deplasmanlı (b) havalandırmaya ait şematikler

1.2.1. Karma Havalandırma

Karma havalandırma yaklaşımında kirli havanın taze besleme havası ile karışarak havadaki kirletici yoğunluğunun seyreltilmesi hedeflenir. Böylece, tüm mahalde neredeyse eş bir sıcaklık ve kirletici dağılımı elde etmek mümkündür. Karma havalandırma uygulamalarında taze hava menfezleri yüksek hızlı havanın konfor hissiyatını bozmaması için daha çok mahalde bulunanlara direkt etki etmeyecek şekilde odanın üst bölgelerinde bulunur. Konfor ihtiyacının önde olduğu pek çok havalandırma uygulamasında karma havalandırma yaklaşımı tercih edilmektedir. Karma havalandırmada mahal ısıtma/soğutma yükleri üfleme havasının işlenmesi ihtiyacını doğuracağı gibi bu havalandırma sistemi ile homojen bir kirletici dağılımının eldesi bulaşıcı hastalıkların söz konusu olduğu durumlarda dikkat edilmesi gereken bir husus olarak not edilmelidir (Yang vd., 2019).

1.2.2. Deplasmanlı Havalandırma

Deplasmanlı havalandırma sisteminin genel özelliği besleme havasının odanın zemine yakın veya zemin bölgesinden düşük hızlarda ortama verilmesi ve mahal içi genel hava hareketinin oda içinde bulunan ısı kaynakları sebebiyle ağırlıklı olarak doğal taşınım mekanizması ile sağlanmasıdır. Bu tarz sistemlerde besleme havası sıcaklığı mahal ortalamasından birkaç santigrad daha düşüktür. Elde edilen kirletici ve sıcaklık dağılımı karma hava dağıtım sistemindeki gibi homojen değildir. Bu sistemlerde zeminle tavan arasında bir sıcaklık gradyanı oluşmakta ve kirletici dağılımı ise kirletici kaynak konumu ve bu kaynağın ısı kaynaklarıyla ilişkisine göre şekillenmektedir.

Deplasmanlı havalandırma daha çok kirleticilerin ortam havasından daha hafif veya daha sıcak olduğu durumlarda, oda yüksekliğinin 3 metreden daha fazla olduğu yapılarda ve özellikle spor salonu, toplantı odası ve sınıf gibi mahallerde tercih edilmektedir (Kosonen vd., 2017).

1.3. Literatür Araştırması

Bu bölümde konu hakkında yapılan kapsamlı literatür araştırması, incelenen temel değişkenlere bağlı olarak üç ana başlık altında sunulmaktadır. Kaynaklar bölümünde detaylı şekilde ifade edilen ilgili yayınlara ve dergilere dikkat edilirse havalandırma uygulamaları özelindeki araştırmalara öncelik verildiği ve bu çerçevede incelemelerin yapıldığına dikkati çekmek gerekmektedir. Daha açık ifade etmek gerekirse, havalandırma uygulamaları temel ısı transferi ve akışkanlar dinamiği açısından ele alındığında çok daha basit kapsamda konvansiyonel olarak açık bir kavite problemi olarak değerlendirilebilirler. Literatürde de ana akım ısı transferi ve akışkanlar mekaniği problemlerini ele alan dergilerde bu kapsamda üç boyutlu ve iki boyutlu incelemeleri içeren yayınlar bulmak mümkündür (Serrano-Arellano vd., 2013; Rodríguez vd., 2015; Koufi vd., 2017). Hava giriş ve çıkışının yer aldığı, yüzeylerinde veya kavite içi farklı bileşenlerde sabit sıcaklık veya sabit ısı akısı sınır şartlarının tanımlandığı bu çalışmalar her ne kadar giriş kısımlarında havalandırma sistemlerine atıf yapılsa da belirli bir pratikten öte gerçek manada havalandırma uygulamaları açısından bir anlam içermemektedirler. İlgili çalışmalarda değerlendirmeler akışı ve ilişkili süreçleri karakterize eden boyutsuz sayılar (Re, Gr, Nu, Ra, Ar) üzerinden yürütülmekte ve genel yargılar barındırmaktadır. Tam manasıyla havalandırma alanında yapılan çalışmalarda ise gerçek bir oda, ofis, temiz oda, ameliyathane, yoğun bakım odası, toplantı salonu, sınıf vb. spesifik hacimler değerlendirilmektedir. Ayrıca, ele alınan hava dağıtım sistemi (giriş&çıkış menfez konumları, karma veya deplasmanlı hava dağıtım sistemi vb.), ısı kaynakları (zeminden ısıtma, radyant ısıtma, radyatör, mahal içinde bulunan insanlar, lambalar vb.) ve kirletici bileşenleri ise bilinen gerçek uygulamalar çerçevesinde tanımlanmaktadır. Bu çalışmalar ayrıca disiplinler arası (bina fiziği, havalandırma, iklimlendirme, bulaşıcı hastalıklar, biyo güvenlik vb.) bir yapıya sahiptirler. Değerlendirmeler ise genel olarak akışı ifade eden boyutsuz sayılar yerine hava değişim verimi, hava yaşı, kirletici uzaklaştırma etkinliği vb. parametrelere bağlı olarak yapılmaktadır. Bu çalışma kapsamında da tüm kurgu gerçek

havalandırma uygulamaları esas alınarak ve bu kapsamdaki çalışmalara yoğunlaşarak belirlenmiştir.

1.3.1. Hava Değişim Katsayısının (HDK) İncelenmesi

Havalandırma miktarının artırılmasının insan sağlığına olumlu etkileri bilinen bir olgudur (Wargoeki, 2000; Mendell vd., 2013). Kontrollü alanlar olarak bilinen mahallerde standart havalandırma uygulamalarına nazaran çok daha yüksek hava değişim katsayılarının tercih edilmesinin belirli sebepleri vardır. Sağlık sektörü açısından bu durum farklı patojenlerin ortamdaki uzaklaştırılmasını sağlamak için geçerlidir. Temiz oda uygulamalarında ise mevcut standartların tam anlamıyla algılanamayışı veya süreçlerin riske edilmemesi için yüksek hava değişim katsayıları tercih edilmektedir (Mills vd., 2008).

Havalandırma sistemleri bir binanın genel enerji tüketiminde önemli bir rol oynar (Liddament, 2000; Pérez-Lombard vd., 2008). Bir ofis ortamı için bu oranın %40' ı bulabileceği ifade edilmektedir (Gruber vd., 2008). Bu manada, ekonomik işletme şartları açısından, uygun olması halinde, daha düşük hava değişim katsayılarının tercihi değerlendirilebilir bir olgu olarak öne çıkmaktadır. Optimum hava değişim katsayısının tayini, sağlanması gereken iç hava kalitesi değeri özelinde farklı işletme şartları için dikkatli bir şekilde değerlendirilmelidir. Böylelikle enerji maliyetlerinin giderek daha önemli olduğu günümüzde arzu edilen kalite ölçütlerinden taviz vermeden daha ekonomik çözümler sunmak mümkün olacaktır.

Farklı işletme ihtiyaçları ve süreç gereksinimleri göz önüne alındığında optimum hava değişim katsayısının tayini açısından hava değişim katsayısı ile mahal içi kirletici dağılımı ilişkisi detaylı bir biçimde ele alınmalıdır. Bu kapsamda yürütülen çalışmalar Tablo 2'de özet formunda sunulmuştur.

Tablo 2. Hava değişim katsayısını değerlendiren alışmalar.

Yazar	Den. (D) Say. (S)	Havala ndırma yöntemi veya konu	Değişkenler	Kirletici özellikleri	İncelenen değişkenler	Sonuçlar
Wang vd. (2000)	D	KHDS	HDK	Tüm zeminden salınım. Partikül (3.1 µm).	Konsantrasyon	Ortalama konsantrasyon, HDK'nın artışı ile azalmış belirli bir HDK' dan sonra ise yaklaşık olarak sabit kalmıştır. Düşük HDK değerlerinde zemin ile tavan arasında yüksek konsantrasyon farkı görülmüştür. HDK arttıkça konsantrasyon farkı azalmıştır.
Memarzadeh ve Jiang (2000)	S	KHDS	İlave menfez konumu, HDK	Mahal içi kaynak. Gaz.	Konsantrasyon, Enerji tüketimi	Kirletici hassas bölgede ekstra çıkış menfezi bulunmasının önemli olmadığı, düşük HDK değerlerinde de iç hava kalitesinde limitler içinde kalınmasının mümkün olduğu gösterilmiştir.
Lin vd. (2010)	D	KHDS, Temiz oda, Partikül seyrelmesi	Menfez konumu, HDK	Mahal içi kaynaklar. Partikül (0.1 µm).	Hava hızı, Konsantrasyon	Her iki menfezinde tavanda konumlandırıldığı durum önerilmiştir. Ayrıca HDK'nın kirleticileri uzaklaştırmada etkili bir faktör olduğu gösterilmiştir.
Memarzadeh ve Xu (2012)	S	KHDS, İzolasyon odası	Menfez konumu, HDK	Mahal içi kaynak. Gaz (SF ₆).	Konsantrasyon, Konsantrasyon-zaman, Havalandırma etkinliği	Artan HDK değerine rağmen havalandırma etkinliğinin artmadığı gösterilmiştir. Yüksek HDK yerine kaynak- çıkış menfezi ilişkisinin irdelenmesi tavsiye edilmiştir.

Tablo 2'nin devamı

Jin vd. (2012)	D	KHDS, HDK	Menfez konumu, HDK, Kirletici konumu	Mahal içi kaynak. Gaz (SF ₆).	Konsantrasyon, Havalandırma etkinliği	HDK-konsantrasyon ilişkisinin tam anlamı ile ters orantılı olmadığı belirlenmiştir. Birbirine yakın kirletici kaynağı ve çıkış menfezi önerilmiştir. Ek çıkış menfezinin daha iyi bir hava kalitesine katkı sağlayabileceği belirlenmiştir. HDK değerinin eğer bir kirlilik riski ortaya çıkmayacaksa azaltılabileceği ifade edilmiştir.
Faulkner vd. (2013)	D	KHDS	HDK	Giriş menfezind en. Partikül (17.95 µm).	Konsantrasyon	Sabit kirletici yükü değeri için artan HDK ile ortalama konsantrasyon değerinin azalacağı gösterilmiştir. Bu azalım hızının HDK değeri arttıkça azalacağı tespit edilmiştir.
Mousavi ve Grosskopf (2014)	D/S	KHDS	HDK, Partikül boyutu	Mahal içi noktasal kaynak. (0.5-10 µm).	Konsantrasyon, Konsantrasyon- zaman, Çökelme	HDK artışının konsantrasyonu aynı oranda düşüremediği belirlenmiştir.
Faulkner vd. (2015)	D	KHDS	HDK, Partikül çapı, Kirletici konumu	Giriş menfezind en ve oda içi noktasal kaynaklar dan. Partikül (1.9-5.4- 7.9 µm).	Hava hızı, Konsantrasyon	HDK artışı ile küçük çaplı partiküller için konsantrasyon değerinde azalma görülürken daha büyük çaplar için konsantrasyon değerlerinde bir değişiklik olmamıştır.

Tablo 2'nin devamı

Cao vd. (2016)	S	HDK	HDK	Mahal içi kaynak. Gaz (CO ₂).	Hava hızı, Konsantrasyon, Türbülans viskozitesi	Yüksek HDK değerleri ile daha iyi iç hava kalitesi elde edileceği yargısının yanlış olduğu tespit edilmiştir.
Zhuang vd. (2017)	S	KHDS	HDK, Menfez konumu, Partikül çapı	Mahale dağılmış halde. Partikül (0.01-0.1-0.5-1-2.5-5-10 µm).	Hava sıcaklığı, Konsantrasyon-zaman, Çökelme, Çökelme-zaman	Oda içinde tam bir resirkülasyon olanağı sağlayan menfez konumları tavsiye edilmiştir. Küçük partiküller için temizleme sürecinin daha uzun süreceği belirtilmiştir.
Zhou vd. (2017)	D/S	KHDS, Isıtma sistemi	HDK, Zemin sıcaklığı, Menfez konumu	Giriş menfezinden. Partikül (1 µm).	Hava hızı ve sıcaklığı, Konsantrasyon-zaman, Çökelme	Hava hızı veya zemin sıcaklığı arttıkça partikül süpürme hızının arttığı ve zemine düşen partikül sayısının azaldığı gösterilmiştir.
Lv vd. (2018)	D	KHDS	HDK, Menfez konumu, Partikül çapı	Mahal içi noktasal kaynak. (0.5-5.0 µm).	Konsantrasyon-zaman, Çökelme	HDK değerinin ve tercih edilen havalandırma yaklaşımının kirleticileri uzaklaştırmada etkili değişkenler oldukları ifade edilmiştir.
Deng vd. (2018)	D/S	HDK	HDK, Menfez tipi	Mahal içi kaynak. Gaz (CO ₂).	Hava hızı, Konsantrasyon	HDK değerindeki artışın, belirli bir değerin üzerinde, ortalama konsantrasyon seviyesinin azaltılmasında çok etkin olmadığı gösterilmiştir.
Lv vd. (2018)	D	KHDS	HDK, Bağıl nem	Giriş menfezinden. Partikül (1,98 µm).	Konsantrasyon	HDK değerinin arttırılmasının iç ortamdaki ortalama konsantrasyonu çok azaltmadığı daha çok çıkış menfezinde ölçülen konsantrasyon değeri üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir.

Bağıl nemin konsantrasyon üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı ifade edilmiştir.

1.3.1.1. Hava Değişim Katsayısının Farklı Kirletici Yüklerinde İç Hava Kalitesine Etkisinin İncelenmesi

Tablo 2’de verilen çalışmalar detaylı bir şekilde incelendiğinde hava değişim katsayısının mahal içi kirletici kontrolü açısından etkin bir parametre olup olmadığı sorusunun tam anlamı ile açıklığa kavuşturulamadığı anlaşılmaktadır. Ayrıca, mevcut çalışmalarda genellikle mahal içi sabit kirletici yükleri üzerine yoğunlaştığı ve ortama verilen taze havanın her türlü kirleticiden arınmış olarak değerlendirildiği not edilmelidir. Fakat, pratikte havalandırma uygulamalarında mahaldeki kirliliğin kaynağı çoğu zaman dışarıdan ortama verilen hava olarak değerlendirilmektedir (Wallace, 1996; Riley vd., 2002; Hänninen vd., 2005). Ayrıca, dış havanın kirletici yoğunluğunun sabit olmadığı ve gün içinde sürekli değiştiği açıktır (Dobre vd., 2005). Dış ortam havasının tam anlamı ile kirletici partikül ve gazlardan arındırılması için HEPA, ULPA ve aktif karbon filtresi (Liu vd., 2017) gibi bileşenler kullanılmaktadır. Bu tarz pahalı filtreler sıradan bir havalandırma sistemi için standart parçalar değildir ve belirli temizleme verimlerine sahip oldukları için de saf bir hava eldesini garanti edemezler. Hatta filtrelerin pek çok zaman havayı temizlemek yerine uzun kullanımlar sonucu üzerlerinde biriken kirleticilerle ortama verilen havayı daha da kirlettikleri bilinmektedir (Clausen, 2004; Hyttinen vd., 2007; Liu vd., 2017). Sonuç olarak ortama verilen havanın kirleticilerden arındırılmayacağı ve sahip olduğu yükün hava kalitesini önemli düzeyde etkileyebileceği not edilmelidir.

Havalandırma uygulamalarında kabul gören diğer bir ezber ise daha iyi bir iç hava kalitesi için yüksek hava değişim katsayılarının tercih edilmesidir. Bu anlamda, dış ortam havasına ilişkin yukarıda ifade edilen çekinceler de göz önüne alındığında, farklı kirletici yüklerinde hava değişim katsayısının iç hava kalitesine etkisi incelenmesi gereken bir olgu haline gelmektedir.

1.3.1.2. Hava Değişim Katsayısı Kirletici Kaynak Konumu İlişkisinin İncelenmesi

Önceki bölümde verilen literatür özeti, araştırmacıların kirletici kaynak konumundan bağımsız olarak hava değişim katsayısı – ortalama konsantrasyon ilişkisini detaylı bir şekilde incelediğini ortaya koymaktadır. Kirletici kaynak konumu ve hava değişim katsayısının bütünleşik etkisinin dikkate alınmadığı bu yaklaşım, üretilen verilerin uygulamaya aktarılmasını önemli düzeyde kısıtlamaktadır. HDK değerinin iç kirletici kaynakları sebebiyle gelişen konsantrasyon değerini azaltacağı açık olsa da kaynağın konumuna bağlı olarak bunun derecesi değişecektir.

Belirtilen eksikliğin giderilmesine yönelik, hava değişim katsayısının değerlendirilmesinde ikinci olarak hava değişim katsayısı-kirletici kaynak konumu ilişkisi de irdelenmiştir.

1.3.2. Menfez Konumu Etkisinin İncelenmesi

Kapalı mahallerde havalandırma uygulamalarına bağlı olarak kirletici dağılımı farklı formlar sergilemektedir. İlgili ortamlarda kirletici kaynağı ve bu kirleticiden korunması gereken alan veya nokta farklı senaryolara göre değişmektedir. Bir temiz oda veya bir ameliyathane için ana kirletici kaynağı standart şartlarda mahal içindeki insanlar veya cerrahlar olmakla beraber korunması gereken alan farklı noktalarda konumlandırılmış olan ürünler veya hasta yatağıdır. Bir izolasyon odasında veya yoğun bakım ünitesinde ise kirletici kaynağı enfeksiyon sahibi hasta, bu enfeksiyondan korunması gereken ise hasta bakıcı olarak değerlendirilebilmektedir. Bir sınıf veya ofis ortamı göz önüne alınırsa, yine her duruma göre farklı olarak tanımlanabilecek kirletici kaynağı ve bu kirleticiden korunması gereken kişiler veya alanlar (solunum yüksekliği, solunum alanı vb.) söz konusudur. Farklı havalandırma yaklaşımları kullanılarak bu kirleticilerin seyreltilmesi ve ortamdan en kısa sürede uzaklaştırılmaları gerekir.

Tercih edilen yaklaşım ile beraber kirletici dağılımına ve süpürme performansına yön veren değişkenlerden biri de giriş/çıkış menfez konumlarıdır. Literatürde giriş/çıkış menfez konumlarını farklı şart, uygulama ve performans parametrelerine bağlı olarak değerlendiren deneysel ve sayısal pek çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan bir kısmı giriş menfezinin bir kısmı ise çıkış menfezinin kirletici dağılımındaki etkisine odaklanmıştır. Ayrıca karşılaştırmalı olarak aynı geometri üzerinde giriş/çıkış menfez

konumlarının etkilerini inceleyen çalışmalar da bulunmaktadır. Özellikle kirletici dağılımı özelinde giriş ve/veya çıkış menfezinin konum etkilerini ele alan bu çalışmalar Tablo 3'te liste halinde sunulmuştur.

Tablo 3. Giriş/çıkış menfez konumunu inceleyen çalışmalar

Yazar	Den. Say. (D) (S)	Havalandırma yöntemi veya konu	Değişken	Kirletici özellikleri	İncelenen değişkenler	Sonuç
Chen vd. (1992)	S	KHDS, ameliyat hane	HDK, kirletici konumu, menfez konumu, menfez boyutu, ısı kaynaklar	Mahal içi kaynaklardan. Partikül.	Hava hızı, sıcaklık, konsantrasyon	Yüksek HDK ve büyük bir üfleme menfezi önerilmiştir. Çıkış menfezinin ve ısı kaynaklarının partikül dağılımında etkin parametreler olmadıkları ifade edilmiştir.
Chung ve Dunn-Rankin (1998)	D/S	KHDS	Menfez konum, Bölünmüş oda	Gaz (CO ₂).	Hava hızı, Konsantrasyon, Seyrelme süreci	Çalışılan oda geometrisi için giriş çıkış menfezlerinin birbirine dik oldukları durumda en iyi havalandırma performansı elde edilmiştir.
Chung ve Hsu (2001)	D	KHDS	Menfez konum, HDK	Gaz (CO ₂).	Hava hızı, Seyrelme süreci, Havalandırma etkinliği	Menfez konumlarının havalandırma etkinliği için çok önemli olduğu belirtilmiştir. Giriş ve çıkış menfezleri için karşılıklı duvarlarda aynı yükseklik tavsiye ediliyor.
(Maghirang vd., 2001)	D	KHDS	Menfez konum, HDK	İki farklı konum. Partikül (15 µm).	Havalandırma etkinliği	Menfez konumları değerlendirilmiştir. HDK açısından belirli bir sonuca ulaşamamıştır.

Tablo 3'ün devamı

Feigley vd. (2002)	S	KHDS	Menfez konumu, kirletici konumu, kirletici adedi	Farklı konumlar. Gaz.	Konsantrasyon	Farklı çıkış menfez ve kirletici konumları incelenmiştir.
Kobayashi ve Chen (2003)	D/S	DHDS (zemin en)	HDK, Üfleme menfezi sayısı, Oda planı, Soğutma yükü	Mahal içi noktasal kaynak. Gaz (SF ₆).	Hava hızı ve sıcaklığı, Konsantrasyon, Havalandırma etkinliği	Yüksek soğutma yükünde düşük sıcaklık farkı ve kirletici yoğunluğunu sağlayan HDK değeri belirlenmesi gerektiği ifade edilmiştir.
Zhao (2005)	S	KHDS, Temiz oda	Menfez konum, HDK, Kirletici konumu, Partikül çapı	Mahal içi kaynaklardan. Partikül (0.3-20 µm).	Konsantrasyon	Menfez konumunun, HDK değerinin ve kirletici konumunun kirletici dağılımına etki eden parametreler olduğu ifade edilmiştir.
Lin vd. (2005)	S	KHDS, DHDS	Oda geometrisi (Ofis, sınıf, atölye, mağaza)	Gaz (CO ve VOCs).	Konsantrasyon, Ortalama hava yaşı	Çalışılan oda geometrisi ve işletme parametreleri altında iç hava kalitesi açısından DHDS daha uygun bulunmuştur.
Bouilly vd. (2005)	D/S	KHDS, Menfez konumu	HDK, Menfez konumu	Mahal içi kaynak. Partikül (0.3-15 µm).	Konsantrasyon-zaman, Çökeltme oranı	Partikül çapına bağlı olarak menfez konumunun kirletici dağılımı ve çökeltmede etkin olduğu ifade edilmiştir.
Khan vd. (2006)	D/S	KHDS	Menfez konumu, HDK	Mahal içi. Gaz (Propilen).	Konsantrasyon	Menfezlerin aynı dik duvarda konumlandırılması veya karşılıklı duvarlarda tavana yakın konumlandırılması önerilmiştir.

Tablo 3'ün devamı

Cheong ve Phua (2006)	D/S	KHDS, İzolasyon odası	Menfez konumu	Mahal içi noktasal kaynak. Gaz (SF ₆)	Hava hızı, Konsantrasyon- zaman, Çökelme	Oda ve menfez yerleşimlerinin kirletici dağılımında önemli olduğu ifade edilmiştir.
Chang vd. (2007)	S	Bölünmüş oda, partikül çapı	HDK, Menfez konumu, Partikül çapı	Mahale dağılmış halde. Partikül (1-2.5-10 µm)	Hava hızı, Konsantrasyon- zaman, Çökelme	Küçük ebatlı partiküllerin büyük ebatlı partiküllere oranla elimine edilmesinin daha zor olduğu belirlenmiştir. Menfez konumlarının etkisi tartışılmıştır.
Qian vd. (2008)	D/S	KHDS, Hasta odası	Menfez konumu, Kirletici konumu, Partikül çapı	Mahal içi noktasal kaynak. Gaz (N ₂ O)	Hava hızı, Konsantrasyon, Havalandırma etkinliği	Tavsiye edilen HDK değerinde zemin yönünde tek yönlü akış termal etkilerden dolayı sağlanamamıştır. Çıkış menfezi küçük partiküller için tavana yakın büyük partiküller için zemine yakın olarak önerilmiştir.
Pereira vd. (2009)	D	KHDS	Menfez konumu, Partikül çapı	Dış hava kaynaklı kirleticiler. Partikül (0.3- >10µm).	Hava hızı ve sıcaklığı, Konsantrasyon, Havalandırma etkinliği,	Her havalandırma yaklaşımı için farklı hava dağılım sonuçları ve havalandırma etkinliği değerleri elde edilmiştir. Buna bağlı olarak genel bir yargıda bulunulmamıştır.
Ho vd. (2009)	S	KHDS, Ameliyathane	Menfez konumu	Mahal içi kaynaklar. Gaz.	Hava hızı ve sıcaklığı, Konsantrasyon, Havalandırma etkinliği	Giriş menfezinin bulunduğu dik duvarda merkez dikey çizgiyi ortalayacak şekilde konumlanması gerektiği tavsiye edilmiştir. Çıkış menfezi konumu önemsiz olarak ifade edilmiştir.

Tablo 3'ün devamı

Memarzadeh (2009)	S	KHDS	İlave menfez konumu, HDK	Mahal içi kaynak. Gaz.	Konsantrasyon, Enerji tüketimi	Kirletici hassas bölgede ekstra çıkış menfezi bulunmasının önemli olmadığı, düşük HDK değerlerinde de iç hava kalitesinde limitler içinde kalınmasının mümkün olduğu gösterilmiştir.
Li vd. (2009)	D	KHDS, Menfez konumu	Menfez konumu, HDK, Partikül çapı	Giriş menfezinden. Partikül (0.3-5 µm).	Konsantrasyon, Konsantrasyon-zaman	Menfez konumlarının kirletici dağılımında önemli olduğu, HDK değeri azaldıkça büyük partikül çaplarında farklı bir dağılım olduğu ifade edilmiştir.
Yin vd. (2009)	D	KHDS, DHDS, Hasta odası, Menfez konumu	Menfez konumu, HDK, Kirletici tipi (gaz-partikül)	Mahal içi kaynaklar. Gaz (SF ₆), Partikül (1-3µm).	Hava hızı ve sıcaklığı, Konsantrasyon	DHDS için çıkış menfezinin konumuna bağlı olarak KHDS'den daha iyi bir iç hava kalitesine erişildiği gösterilmiştir.
Qian ve Li (2010)	D/S	KHDS, Ekshale aerosol, İzolasyon odası	Menfez konumu	Mahal içi kaynaklar. Gaz (SF ₆), Partikül (>3µm).	Hava hızı ve sıcaklığı, Konsantrasyon, Konsantrasyon-zaman, Çökelme, Havalandırma etkinliği	Çıkış menfezlerinin tavana yerleştirilmesi tavsiye edilmektedir. Büyük çaplı partiküllerin küçük çaplı partiküllere oranla daha çok çökdikleri ifade edilmiştir.
Tung vd. (2010)	S	KHDS, Oda yerleşimi	Menfez konumu, Oda yerleşimi	Mahal içi kaynaklar. Partikül (0.01-100 µm).	Hava hızı, Konsantrasyon, Çökelme	Partiküllerin temiz odadan uzaklaştırılmasında oda yerleşiminin, hava hızının ve menfez konumunun etkili olduğu ifade edilmiştir.

Tablo 3'ün devamı

Lin vd. (2010)	D	KHDS, Temiz oda, Partikül seyrelmesi	Menfez konumu, HDK	Mahal içi kaynaklar. Partikül (0.1 µm).	Hava hızı, Konsantrasyon	Her iki menfezinde tavanda konumlandırıldığı durum önerilmiştir. Ayrıca, HDK'nın kirleticileri uzaklaştırmada etkili bir parametre olduğu gösterilmiştir.
Lu vd. (2011)	D	KHDS, seyrelme	Menfez konumu	Mahal içi kaynak. Partikül (<20 µm)	Hava hızı, Seyrelme süreci	Zemin düzeyinde bulunan slot çıkış menfezler ile çıkış menfezlerinin tavanda bulunduğu duruma göre daha düşük konsantrasyon değerlerine ulaşıldığı görülmüştür.
Memarzadeh ve Xu (2012)	S	KHDS, İzolasyon odası	Menfez konumu, HDK	Mahal içi kaynak. Gaz (SF ₆).	Konsantrasyon, Konsantrasyon-zaman, Havalandırma etkinliği	Artan HDK değerine rağmen havalandırma etkinliğinin artmadığı gösterilmiştir. Yüksek HDK yerine kaynak-çıkış menfezi ilişkisinin irdelenmesi tavsiye edilmiştir.
Jin vd. (2012)	D	KHDS, HDK	Menfez konumu, HDK, Kirletici konumu	Mahal içi kaynak. Gaz (SF ₆).	Konsantrasyon, Havalandırma etkinliği	HDK-konsantrasyon ilişkisinin tam anlamı ile ters orantılı olmadığı belirlenmiştir. Birbirine yakın kirletici kaynağı ve çıkış menfezi önerilmiştir. Ek çıkış menfezinin daha iyi bir hava kalitesine katkı sağlayabileceği belirlenmiştir. HDK değerinin eğer bir kirlilik riski ortaya çıkmayacaksa azaltılabileceği ifade edilmiştir.

Tablo 3'ün devamı

Villafruela vd. (2013)	S	KHDS, izolasyon odası	Menfez konumu, Menfez tipi	Mahal içi kaynak. Partikül (5 μ m).	Konsantrasyon, Çökeltme, Ortalama hava yaşı, Hava değişim verimi, Havalandırma etkinliği	Menfez konumları ve tiplerinin performans ölçütleri üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Çıkış menfezi için hasta yatağı üstü ve giriş menfezi için hasta yatağı önü tavsiye edilmiştir.
Sadrizadeh vd. (2014)	S	KHDS, Ameliyathane	Menfez konumu, HDK, Kirletici konumu	Mahal içi kaynak. Partikül (12 μ m).	Hava hızı ve sıcaklığı, Çökeltme	En iyi menfez konumunun oda yerleşimine ve hava hızına bağlı olarak değiştiği ifade edilmiştir. HDK artışı ameliyat bölgesi için konsantrasyon değerini azaltmıştır.
Huang ve Lin (2014)	S	KHDS, Oda yerleşimi	Menfez konumu, Oda yerleşimi	Mahal içi kaynak. Partikül (7.07 μ m)	Hava hızı, Konsantrasyon	Oda yerleşiminin kirletici dağılımında etkili bir parametre olduğu ifade edilmiştir.
Jurelionis vd. (2015)	D	KHDS, DHDS	Menfez konumu, HDK, Kirletici konumu	Mahal içi kaynak. Partikül (2.5 μ m)	Seyrelme süreci, Ortalama hava yaşı, Hava değişim verimi, Havalandırma etkinliği	Belirli bir sonuç ifade edilmemiş farklı menfez konumlarının hava kalitesi üzerindeki etkileri tartışılmıştır.
Eslami vd. (2016)	S	KHDS	Menfez konumu	Mahale dağılmış halde. Partikül (5 μ m).	Konsantrasyon-zaman, Çökeltme	Menfez konumlarının partikül dağılımında önemli bir parametre olduğu ifade edilmiştir.

Tablo 3'ün devamı

Ahmed vd. (2016)	S	DHDS	Çıkış menfezi konumu	Mahal içi kaynaklar. Partikül (0.7 µm).	Hava hızı ve sıcaklığı, Konsantrasyon, Konfor (PPV-PPD), Enerji tasarrufu	Çalışılan parametreler içinde en iyi iç hava kalitesine çıkış menfezinin tavanda bulunan aydınlatmalara entegre edilmesi ile ulaşılmıştır.
Ning vd. (2016)	D/S	KHDS, Menfez konumu	Üfleme menfezi konumu	Mahal içi kaynak. Gaz (CO ₂).	Hava hızı ve sıcaklığı, Konsantrasyon	Enerji tasarrufu ve kirletici uzaklaştırma performansı açısından üfleme menfezinin kirletici kaynağı yakınında konumlandırılması tavsiye edilmiştir.
Zhuang vd. (2017)	S	KHDS	HDK, Menfez konumu, Partikül çapı	Mahale dağılmış halde. Partikül (0.01-0.1-0.5-1-2.5-5-10 µm).	Hava sıcaklığı, Konsantrasyon-zaman, Çökelme, Çökelme-zaman	Oda içinde tam bir resirkülasyon olanağı sağlayan menfez konumları tavsiye edilmiştir. Küçük partiküller için temizleme sürecinin uzun süreceği belirtilmiştir.
Berlanga vd. (2018)	D	KHDS, İzolasyon odası	HDK, Menfez konumu, Menfez tipi	Mahal içi kaynak. Gaz (R134A).	Hava sıcaklığı, Konfor (PMV-PPD), Hava değişim verimi, Havalandırma etkinliği	HDK değerinin ve menfez konumlarının hava değişim veriminde etkili parametreler oldukları ifade edilmiştir. DHDS'nde farklı konumlar için hava değişim verimi irdelenmiştir.

Yapılan literatür araştırması, kapalı mahallerde kirletici dağılımının giriş/çıkış menfez konumlarına bağlı olarak şekillenen hava akımı ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Bununla beraber, kirletici dağılımı açısından giriş veya çıkış menfezlerinden hangisinin daha önemli olduğu konusunda bir görüş ayrılığı bulunmaktadır. Çalışmaların bir kısmında çıkış menfez konumu etkin parametre olarak ifade edilirken diğer bazı çalışmalarda ise çıkış menfez konumu önemsiz bir değişken olarak ifade edilmektedir. Ayrıca, özellikle son dönem yürütülen araştırmalarda, kirletici

kaynak konumu ile çıkış menfezi arasındaki mesafenin kirletici dağılımı için önemine dikkat çekilmekte ve menfez konumlarının kirletici kaynak konumu ile beraber ele alınması gereken bir parametre olduğu ifade edilmektedir.

Ayrıca, konu kapsamında incelenen çalışmaların temiz oda, ameliyathane, dersane, ofis, izolasyon odası, laboratuvar vb. gibi pek çok farklı mahal yerleşimi ve farklı hava kalitesi önceliklerini dikkate aldığı vurgulanmalıdır. Bu durum, üretilen çıktılarını çalışmaya özel kılmakta diğer bir ifadeyle geliştirilebilir nitelikten uzaklaştırmaktadır. Bu sebeple, daha basit ve sıradan geometrilerde doğrudan giriş/çıkış menfez konumları ve farklı kirletici kaynak pozisyonlarının karma değerlendirmesini içeren kapsamlı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

1.3.3. Deplasmanlı Hava Dağıtım ve Zeminden Isıtma Sisteminin Beraber Kullanıldığı Durumda Kirletici Dağılımının İncelenmesi

Deplasmanlı havalandırma 1980'lerden sonra İskandinav ülkelerinde kullanılmaya başlanan ve son dönemde dünya genelinde yaygınlaşan bir hava dağıtım sistemidir. Deplasmanlı hava dağıtım sisteminde, besleme havası mahal ortalama hava sıcaklığından daha düşük bir sıcaklıkta ve zemin yakınlığından ortama verilir. Mahal içerisinde ısınan ve kirlenen hava tavan yakınlığına konumlandırılmış bir çıkış menfezi vasıtası ile ortamdan uzaklaştırılır. Bu uygulamada havalandırılan odada iki akım bölgesi oluşur; odanın alt kısmında besleme yani besleme doğrultusunda tek yönlü bir akış ve oda üst bölgesinde bir karışım alanı (Etheridge ve Sandberg, 1996).

Literatürde deplasmanlı hava dağıtım sistemlerinin performansını değerlendiren çalışmalar (Berlanga, de Adana, vd., 2018; Brohus ve Nielsen, 1996; Chao ve Wan, 2004; Gao ve Niu, 2007; Hirnikel vd., 2002; Ho vd., 2011; Lee vd., 2009; Lin, Chow, Fong, vd., 2005) ilgili sistemlerin yaşam alanı içerisinde yüksek hava kalitesi sunabildiğini göstermektedirler. Bununla beraber, özellikle küçük çaplı partiküller açısından da deplasmanlı hava dağıtım uygulamalarında kirletici uzaklaştırma performansı yüksek olduğu ifade edilmektedir (Pereira vd., 2009). İlgili sistemlerin kirletici uzaklaştırma performansı kirletici kaynak konumu ile yakından ilişkilidir (He vd., 2005; Zhong vd., 2010; Olmedo vd., 2013; Jurelionis vd., 2015). Bu ilişkiye örnek olarak, hava hareketlerine katkı sunan kaldırma kuvvetleri neticesinde oda alt bölgesinde bulunan kirleticilerin solunum bölgesinde yüksek konsantrasyon değerlerine sebep olması verilebilir

(Salmanzadeh vd., 2012). Ayrıca deplasmanlı hava dağıtım sistemlerinde çıkış menfez konumunun sistem performansına etki ettiği de ifade edilmektedir (Yin vd., 2009; Ahmed ve Gao, 2017). Bu sistemlerde zemin ve tavan arasında oluşabilecek yüksek sıcaklık ve kirletici tabakalaşması da konforu tehdit eden önemli risklerden biri olarak gösterilmektedir (Lau ve Chen, 2007).

Isıtma sezonunda deplasmanlı hava dağıtım sistemlerinin bir ısıtma sistemi ile beraber kullanılması gerekecektir. Bu durumda, termal konforun ekonomik bir çözümlerle sürdürülebilmesi için, son dönemde düşük enerji tüketimleri ile öne çıkan yeni nesil bina uygulamalarında sıklıkla kullanılan zeminden ısıtma tercihi değerlendirilebilir (Causone, Baldin, vd., 2010; Causone, Olesen, vd., 2010). Böylece, zeminle tavan arasında daha düşük sıcaklık farkları oluşacağı gibi daha iyi bir havalandırma performansı elde edilebileceği de belirtilmektedir (Olesen vd., 2011). Deplasmanlı hava dağıtım sistemi ve zeminden ısıtmanın beraber kullanıldığı bu tarz uygulamalarda zemin sıcaklığının etkisi ile besleme havası olması gerekenden çok daha önce ısınabilir. Bu durumda besleme havasının formu bozularak havalandırma performansı da olumsuz etkilenecektir. Skistad'ın (2003) analitik modeli normal şartlar altında bu tarz bir riskin mümkün olmayacağını göstermektedir.

Yapılan literatür araştırmasında, deplasmanlı hava dağıtım sistemi ile zeminden ısıtma uygulamasının bileşik etkisini ele alan ve diğer benzer uygulamalarla karşılaştıran çalışmalar (Baldin, 2008; Causone, Olesen, vd., 2010; Olesen vd., 2011; Ouazia vd., 2011) görülse de bu sistemlerde partikül dağılımını inceleyen kapsamlı bir çalışmaya rastlanmamıştır.

1.4. Tezin Amacı ve Kapsamı

Havalandırılan mahallerdeki kirletici dağılımını bu kirleticilerden etkilenebilecek canlı veya cansız varlıklar açısından dikkat edilmesi gereken bir olgudur. Havadaki kirletici yükü, bulaşıcı hastalıklar ve çalışma performansı gibi insan sağlığı ile ilişkili kavramların yanında ileri teknoloji olarak tanımlanabilecek havacılık, silah veya ilaç sanayi ile ilgili üretim faaliyetlerinin yürütüldüğü ortamlar için de hayati öneme sahiptir. Bu sebeple, ilgili kirleticilerin ortamdaki en kısa sürede başarılı bir şekilde uzaklaştırıldığı havalandırma sistemleri genel olarak havalandırma uygulamalarından beklenen konfor ihtiyacının önüne geçebilir.

Farklı havalandırma yaklaşımları ile ilgili ortamda kirletici konsantrasyonunun izin verilen sınırlar dahilinde tutulması mümkündür. Literatürde de bu havalandırma sistemlerinin performanslarını farklı değişkenlere bağlı olarak inceleyen pek çok çalışma bulunmaktadır. Uygulamada halen oldukça kabul gören yüksek hava değişim katsayısının kesinlikle temiz bir iç ortam yaratacağı algısı, akış formunu karakterize eden giriş&çıkış menfez konumlarının etkisine yönelik çelişkili ifadeler, deplasmanlı havalandırma sistemi ile zeminden ısıtmanın beraber kullanıldığı yeni nesil enerji etkin tasarımlarda kirletici dağılımı çalışmalarının yetersizliği bu tez kapsamında göz önüne alınan çalışma sorularına zemin teşkil etmektedir. Yapılan deneysel ve sayısal incelemeler yukarıda ifade edilen eksiklik ve çelişkilerin giderilmesine yönelik veriler üretmeyi hedeflemektedir.

Deneysel kısımda gerçek boyuttaki bir odada yapılacak çalışmanın getireceği kısıtlar göz önüne alınarak küçük ölçekli bir oda tasarlanmıştır. Çalışma parametreleri üretilecek verilerin gerçek boyutlardaki bir oda için de geçerli olması için boyutsuz değişkenler üzerinden benzerlik olgusu değerlendirilerek belirlenmiştir. Farklı hava hızları, menfez konumları, kirletici pozisyonları ve yükleri ile zemin sıcaklıkları incelenmiştir. Bu bölümde hava hızı ve sıcaklığı ile konsantrasyon ölçümleri gerçekleştirilmiş ayrıca akış alanları fotoğraflanmıştır.

Sayısal çalışma bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı olan ANSYS Fluent 16.0 kullanılarak yürütülmüştür. Kirletici barındıran iki fazlı akış yapısı Euler-Lagrange yaklaşımı ile modellenmiştir. Hava hızı, sıcaklığı ve konsantrasyon değerleri yanında hava yaşı, hava değişim verimi, kirletici uzaklaştırma etkinliği ve çökelme oranı incelenmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Yapılarda havalandırma performansını değerlendirmek için ele alınan farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler başta deneysel ve sayısal olmak üzere analitik veya ampirik modeller, çoklu bölge modelleri ve bölgesel modeller gibi farklı yaklaşımları da içermektedir (Chen, 2009). Deneysel çalışmalar sonucunda hava hızı, sıcaklık veya konsantrasyon dağılımı gibi değerler zaman bağımlı veya kararlı durumlar için elde edilebilmektedir. Fakat deneysel çalışmalar zaman alan ve maliyetli süreçlerdir. Özellikle farklı geometrik ve yapısal değişkenlerin yer aldığı çalışmalarda bu olumsuzluklar daha da önemli hale gelmektedir. Son dönemde oldukça yaygınlaşan hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımları deneysel çalışmalara nazaran daha ekonomik çözümler sunabilmektedirler. Burada not edilmesi gereken ilgili sayısal verilerin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak sayısal yöntemin doğrulanması ihtiyacıdır.

Bu noktada, deneysel yaklaşıma ait yukarıda sözü edilen çekinceleri gidermek için küçük ölçekli bir model kullanılabileceği bilinmelidir. Bunun için ilgili yapının belirli bir ölçekte küçültülmesi ve gerçek ölçekteki odaya ait akış karakterinin küçük ölçekteki model odada muhafaza edilmesi için belirli boyutsuz değerlere dikkat edilmesi gerekir. Söz konusu yaklaşım bir sonraki bölümde kapsamlı olarak ele alınacak olan “Benzerlik parametreleri” üzerinden değerlendirilmektedir. Bu çalışma kapsamında deneysel incelemeler küçük ölçekli bir model oda üzerinde yürütülmüş sonuçlar sayısal yöntemin doğrulanmasında kullanılmıştır.

2.1. Deneysel Çalışma

2.1.1. Benzerlik Parametreleri

Küçük ölçekli model odalarda yürütülecek deneysel çalışmalar, gerçek boyutlardaki çalışmalarla karşılaştırıldıklarında daha ekonomik ve esnek bir çalışma olanağı sunmaktadırlar. Gerçek boyutlardaki odada görülen akış özelliklerinin küçük ölçekli odada da korunması için geometrik, kinematik ve dinamik benzerliğin sağlanması gerekmektedir (Etheridge ve Sandberg, 1996; Awbi, 2003). Bu nedenle akışı ifade eden korunum denklemlerinin boyutsuzlaştırılması ile elde edilen benzerlik parametreleri (Re, Pr, Ar) her

iki ölçekte de aynı değerde olmalıdır (Nielsen, 1999). Partikül dağılımının değerlendirildiği çalışmalarda ise ilgili benzerlik parametrelerine çökme hızı oranı da eklenmelidir (Murakami vd., 1992; Nielsen, 1999).

Havalandırma limitleri dahilinde erişilebilecek sıcaklıklar göz önüne alındığında (hava için $Pr=0.7$ civarında olacaktır) küçük ölçekli model odada akışkan olarak havanın tercih edildiği durum için Pr eşitliğinin kendiliğinden sağlandığı ifade edilebilir. Bu durumda izotermal şartlarda Re , izotermal olmayan şartlarda ise hem Re hem de Ar eşitlikleri her iki ölçek için sağlanmalıdır. Fakat aynı anda hem Re hem de Ar eşitliklerini sağlamak pratikte oldukça zordur.

$$Re = \frac{\rho_0 h_0 u_0}{\mu_0} = \left(\frac{\rho_0 h u}{\mu_0} \right)_M \quad (1)$$

$$\frac{h}{h_0} = \left(\frac{u_0}{u} \right)_M = \text{Ölçek} \quad (2)$$

$$Ar = \frac{\beta g h_0 \Delta T}{u_0^2} = \left(\frac{\beta g h \Delta T}{u^2} \right)_M \quad (3)$$

$$\frac{h}{h_0} = \left(\frac{u^2}{u_0^2} \right)_M = \text{Ölçek} \quad (4)$$

Denklem (1) ve (2)'ye dikkat edilirse sadece Re eşitliği için küçük ölçekte hız artışının yeterli olduğu anlaşılmaktadır. Eğer sıcaklık farkı her iki durumda korunursa Ar eşitliği, Re eşitliğinin tersine, hızın küçük ölçek için azaltılması gerektiğini göstermektedir. Re eşitliği ile istenen yüksek hızda çalışma sağlanarak sıcaklık farkından Ar eşitliğine ulaşmak istenildiğinde ise küçük ölçekte sıcaklık farkının Ölçek³ katı kadar artırılması gerektiği görülecektir. Örnek olarak, gerçek modelde 2 K olan sıcaklık farkı 1:4 ölçekte 128 K olmalıdır. Bu durum pratikte pek çok zorluğu beraberinde getirecektir.

Müllejans' ın (1966) çalışması izotermal olmayan şartlar altında akış yapısını farklı ölçeklerdeki odalar için farklı Re ve Ar değerlerinde incelemektedir. Bulgular, türbülanslı bir akış için benzer akış profillerinin aynı Ar için sağlandığını göstermektedir. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında da izotermal olmayan akış şartları göz önüne alındığında akış benzerliği için sadece Ar eşitliği değerlendirilmiştir.

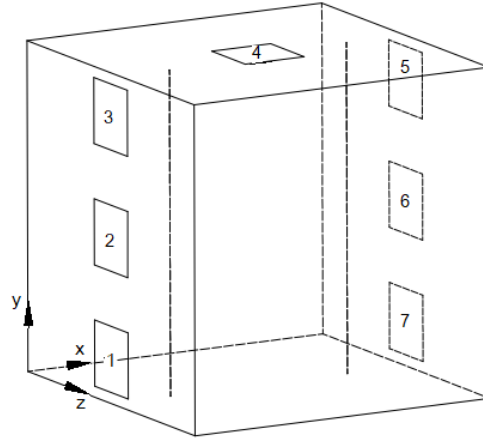
2.1.2. Deney Düzeneği

Çalışma kapsamında belirtildiği üzere deneyler gerçek odaları temsilen küçük ölçekli model odalarda yürütölmüştür. İki farklı ebatta tasarlanan odalar çalışma parametreleri ve deneysel ölçümlerin sağlığı açısından 1:5 ölçeğinde imal edilmişlerdir. Bu ölçek değerine bağlı olarak gerçek oda ve buna karşılık gelen model oda ebatları Tablo 4'te verilmektedir.

Tablo 4. Oda boyutları

	Gerçek oda (x-y-z) (m)	Model Oda (m)
Oda 1	3-3-3	0.6-0.6-0.6
Oda 2	6-3-3	1.2-0.6-0.6

Çalışmada kullanılan deney düzeneği ve test bölgesi farklı menfez konumlarının değerlendirilmesine olanak sunacak şekilde mümkün olduğunca modöler bir yapıda tasarlanmıştır. Proje süresince iki farklı test bölgesi çalışılmış olup Oda 1'e ait şematik şekil 3'te görölmektedir. 60 cm x 60 cm x 60 cm ebatlarında tasarlanan ilk oda şekilden de göröleceği üzere yedi farklı menfez konumuna uygun şekilde dizayn edilmiştir.



Şekil 3. Oda 1'e ait şematik resim

Oda ebatları, Şekil 3'te oda içerisinde kesikli çizgilerle gösterilen ölçüm istasyonları ve menfez konumlarına ait detaylar ile birlikte Tablo 5'te verilmektedir. Benzer notasyonlar dikkate alınarak Oda 2'ye ait ölçüler ise Tablo 6'da ifade edilmektedir.

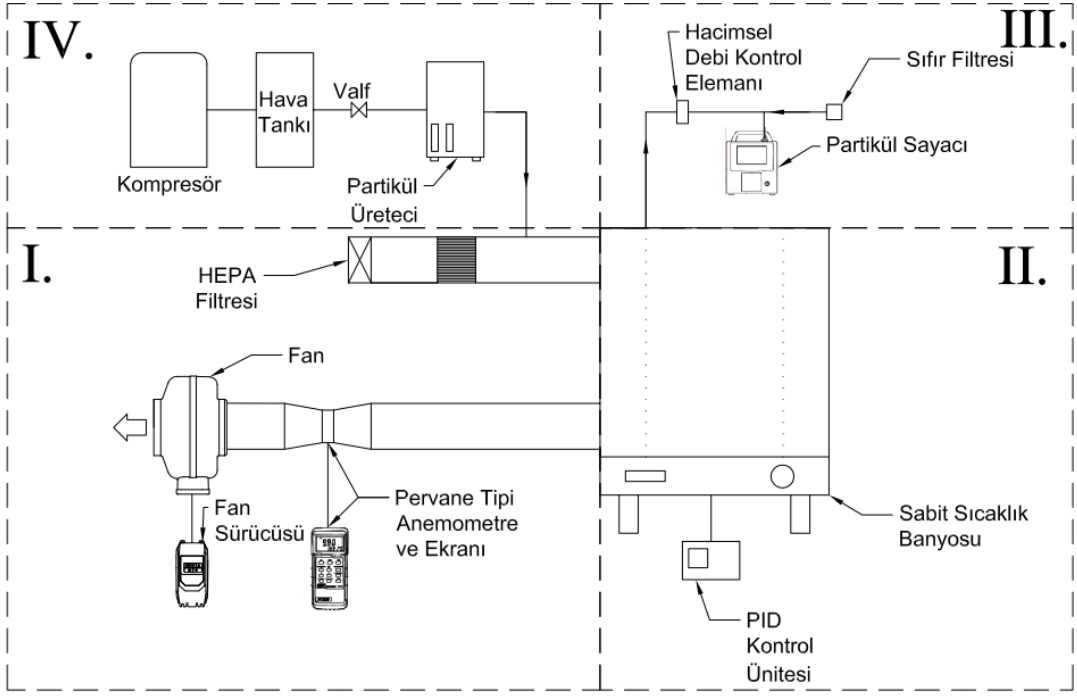
Tablo 5. Oda 1 boyutları

	x (cm)	y (cm)	z (cm)
Oda 1	60	60	60
1 nolu istasyon	12	0-60	30
2 nolu istasyon	48	0-60	30
1.menfez	0	2-14	24-36
2.menfez	0	24-36	24-36
3.menfez	0	46-58	24-36
4.menfez	24-36	60	24-36
5.menfez	60	46-58	24-36
6.menfez	60	24-36	24-36
7.menfez	60	2-14	24-36

Tablo 6. Oda 2 boyutları

	x (cm)	y (cm)	z (cm)
Oda 2	120	60	60
1 nolu istasyon	12.5	0-60	30
2 nolu istasyon	45.5	0-60	30
3 nolu istasyon	74.5	0-60	30
4 nolu istasyon	107.5	0-60	30
1.menfez	0	2-14	24-36
2.menfez	0	24-36	24-36
3.menfez	0	46-58	24-36
4.menfez	25-37	60	24-36
5.menfez	54-66	60	24-36
6.menfez	83-95	60	24-36
7.menfez	120	46-58	24-36
8.menfez	120	24-36	24-36
9.menfez	120	2-14	24-36

Tasarlanan deney düzeneğinin daha iyi anlaşılması bakımından sistem dört alt gruba bölünmüş ve her bir gruba ait bileşenler ve görevleri Şekil 4'te aşağıda sunulmuştur.



Şekil 4. Deney düzeneğinin şematik resmi (Partiküller giriş menfezi ile ortama salmıyor)

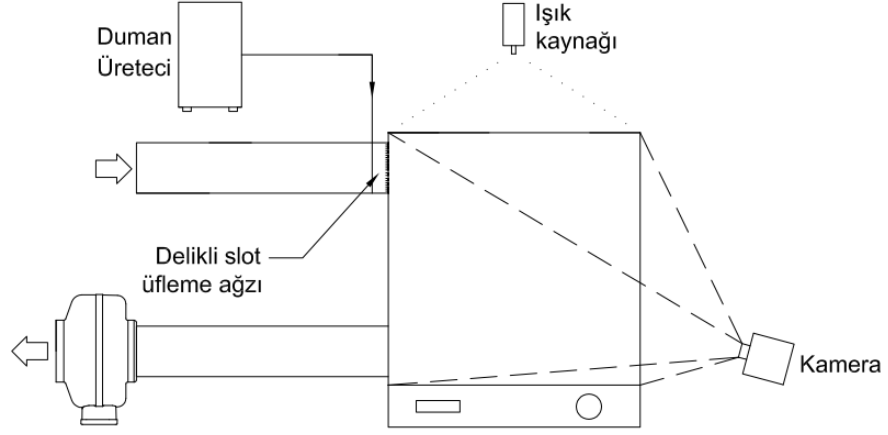
I. Mahal Hava Besleme ve Çıkış Bölgesi

Hava giriş ve çıkış kanalları (her biri 12 cm x 12 cm kesitinde) 5 mm kalınlığında pleksiglas levhaların birbirlerine yapıştırılmaları ile oluşturulmuştur. Bu kanallar çalışılacak olan menfez konfigürasyonuna göre istenen menfez konumlarına vidalanarak sabitlenecek şekilde tasarlanmıştır.

Test bölgesindeki hava akışı için farklı debilerde çalışmaya olanak sunan bir fan (0-420 m³/saat) kullanılmıştır. Kullanılan fanın farklı debilere mümkün olduğunca hassas bir şekilde ayarlanması bir fan sürücüsü (frekans konvertörü - Invertek Optidrive E3) ile gerçekleştirilmiştir. Fan tarafından sunulan hava akışının debisi çıkış kanalında konumlandırılmış olan pervane tipi bir anemometre (Extech instrument-Thermo-anemometer 407113) ile ölçülmüştür. Besleme havası kanalının girişine yerleştirilen bir HEPA filtre yardımı ile test bölgesine giren taze havanın filtrelenmesi sağlanmıştır.

Dumanla akış görüntüleme için gaz yağı ile beslenen bir duman üretici kullanılmıştır. Üretilen duman giriş menfezinde odaya mümkün olan en yakın noktada konumlandırılan slot yapıda ve üzerinde akış yönünde delikler bulunan bir üfleme ağzına iletilmiştir. Bu sayede elde edilen duman iplikçikleri karanlık ortamda farklı noktalarda konumlandırılan ışık kaynağının yardımı ile görselleştirilmiş ve bir fotoğraf makinası

kullanılarak kısa zaman adımlarında görüntülenmiştir. İlgili düzeneğe ait şematik Şekil 5'te görülebilir.



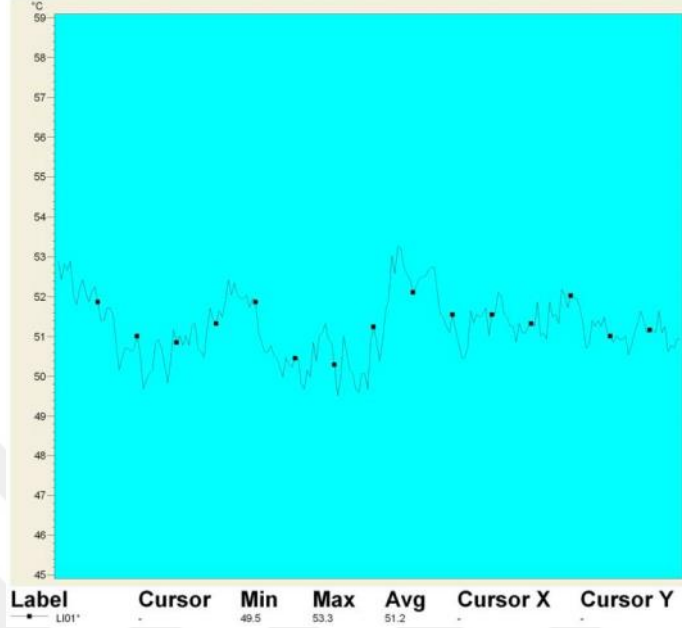
Şekil 5. Akış görüntüleme sistemine ait şematik resim

II. Test Bölgesi

Farklı menfez konumlarının çalışabilmesi için modüler bir şekilde tasarlanan test bölgeleri (Oda1-2) 10 mm kalınlığında pleksiglas levhadan imal edilmiş olup levhalar vidalama tekniği ile birbirine monte edilmiştir. Boşta kalan menfez ağızları biri menfez boyutunda (12 cm x 12 cm) diğeri 14 cm x 14 cm ebatlarında iki kare plakanın birbirine monte edilmesi ile oluşturulan kapaklar ile vidalanarak kapatılmış ve kapaklarda kullanılan conta ile sızdırmazlık sağlanmıştır. İmal edilen odaya ait iç duvar kenarları boyunca ve menfez bağlantı noktalarında silikon kullanılarak olası sızırmalar engellenmiştir.

İzotermal olmayan akış şartlarını sağlamak amacıyla test bölgesinin zemininde özel olarak imal edilen bir sabit sıcaklık banyosu bulunmaktadır. Her biri 2 kW olan 3 ısıtıcı (Oda 2 için imal edilen sabit sıcaklık banyosunda 4 adet ısıtıcı bulunmaktadır) ve Seriola 1510 ısı transfer yağının kullanıldığı sabit sıcaklık banyosu 3 mm kalınlığında paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Çalışılacak zemin sıcaklığının hassas bir şekilde kontrol edilmesi ve ayarlanması maksadıyla ilgili sisteme bir PID kontrol ünitesi bağlanmıştır. PID kontrol ünitesi zemin üzerine yerleştirilen termoelemanlar vasıtası ile yüzey sıcaklığını kontrol etmektedir. Sabit sıcaklık banyosu yüzeyinde homojen bir sıcaklık dağılımı sağlandığından emin olmak maksadıyla ilgili yüzey farklı noktalara termoeleman yerleşimi dışında bir termal kamera (FLIR A 20) ile görüntülenerek Şekil 6'da görüldüğü gibi kontrol edilmiştir.

Görüldüğü üzere yüzey sıcaklığı 51 °C'ye ayarlandığında sistem ± 2 °C mertebesinde istenen sıcaklığı sağlamaktadır.



Şekil 6. Isıtıcı yüzeyine ait sıcaklık dağılımı (x:0-60 cm, y:0 cm, z:30 cm)

III. Ölçüm Ekipmanları

Test bölgesi içinde farklı çalışma şartları altında ilgili ölçüm istasyonlarından hava hızı, sıcaklık ve konsantrasyon ölçümleri gerçekleştirilmektedir. Şekil 4'te sadece partikül ölçümüne ait sistem şematize edilmiştir. Ölçümler ölçüm istasyonu boyunca yedi farklı noktada yapılmaktadır. Hava hızı ve sıcaklığı bir sıcak tel anemometresi probu (Testo 0635 1025) ile okunarak kayıt edilmektedir. Aynı istasyonlarda ve bunun yanında giriş ve çıkış menfezlerinde partikül sayımı iki adet lazer diyot partikül sayım cihazı (Lighthouse 3100, Pmeasuring-Handilaz mini) tarafından ölçülmektedir. Partikül sayım cihazlarında elektrostatik kayıpları azaltmak amacıyla kondaktif örnekleme borusu izokinetik bir ölçüm probu ile beraber kullanılmıştır.

Kullanılan partikül sayıları sabit debide örnekleme toplayan cihazlardır. Fakat test bölgesi içinde hava hızı her noktada farklılık göstermektedir. Bu sebeple partikül sayım cihazının mahalden çektiği örnekleme debisinin kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu maksatla partikül sayım cihazının girişi Şekil 4'te görüldüğü üzere iki kısma ayrılacak şekilde modifiye edilmiştir. Mahalden gelen hava debisi bir hacimsel debi kontrol elemanı

(Cole parmer-32907-73) ile ayarlanmış diğer uca ise bir filtre yerleştirilmiştir. Bunun yanında T-tipi termoelemanlar kullanılarak hava giriş – çıkış sıcaklıkları ve sabit sıcaklık banyosuna ait yüzey sıcaklığı takip edilerek kayıt altına alınmıştır. Kullanılan ölçüm cihazlarına ait özellikler Tablo 7 ve Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 7. Anemometre özellikleri

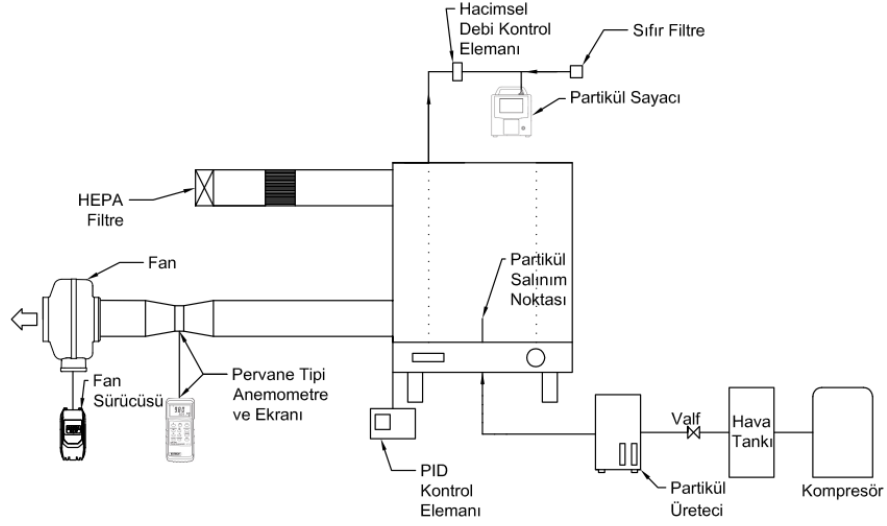
İsim	Model	Ölçüm aralığı	Çözünürlük	Hassasiyet
Pervane tipi anemometre	Extech 407113	0.5-35 m/s	0.01 m/s	±%2
		0/80 °C	0.1 °C	±0.8 °C
Sıcak tel anemometresi	Testo 0635 1025	0-20 m/s	0.03 m/s	±%5
		-20/70 °C	0.1 °C	±0.3 °C

Tablo 8. Partikül sayım cihazı özellikleri

İsim	Ölçüm limiti	Hassasiyet	Debi	Ölçüm aralığı
Lighthouse 3100	35300000 /m3	0.3 µm için %100 >0.45 µm	1 CFM (28.3 LPM)	0.3-25 µm
Pmeasuring Handilaz Mini	70600000 /m3	0.3 µm için %100 >0.45 µm	0.1 CFM (2.83 LPM)	0.3-5 µm

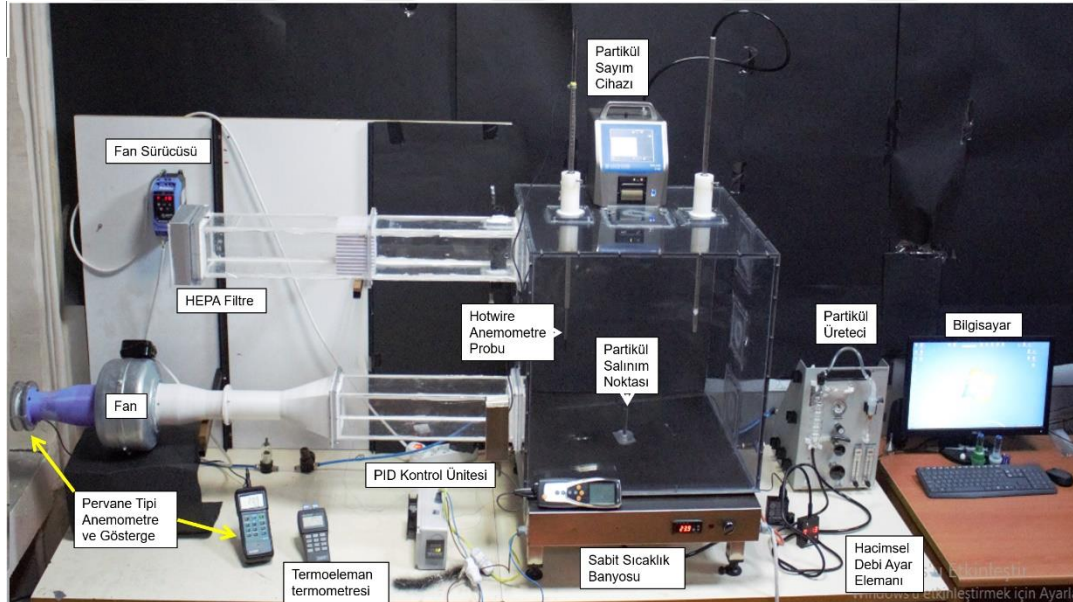
IV. Partikül üretimi

Bu çalışmada PSL (Monodisperse polystyrene latex(1.05 g/cm³) - Thermo Fisher Scientific) partiküller kullanılmıştır. Bir süspansiyon içinde bulunan partiküller saf suda deriştirilerek partikül jeneratöründe yer alan nebulizöre dökülmektedir. Partikül jeneratörü kompresörden gelen hava debisi kontrol edilerek partikül çözeltisini atomize etmektedir. Aerosol haline getirilen partiküller yapılacak çalışmaya göre Şekil 4 ve Şekil 7’de görüldüğü gibi giriş kanalına veya mahal içine verilmiştir.

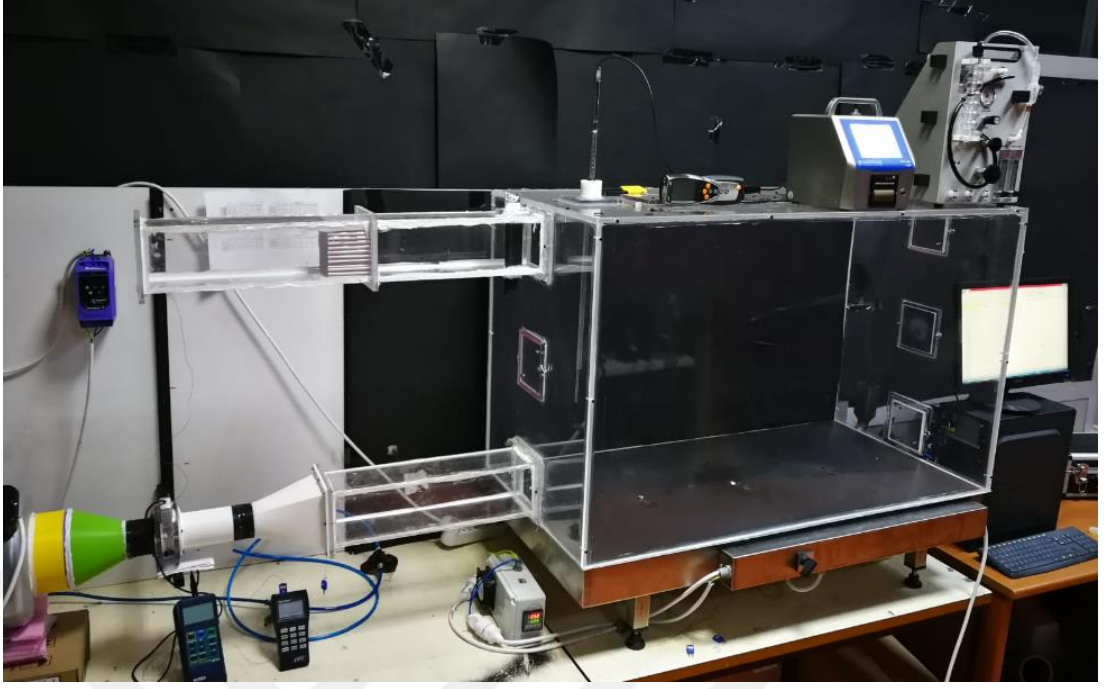


Şekil 7. Deney düzeneğinin şematik resmi (Partiküller oda içinden ortama salınıyor)

Oda 1 ve Oda 2 için test bölgesi ve ölçüm cihazları ile oluşturulan deney düzeneği sırasıyla Şekil 8 ve Şekil 9’da incelenebilir.



Şekil 8. Deney düzeneği (Oda 1)



Şekil 9. Deney düzeneği (Oda 2)

Deneyleer yürütölürken takip edilen prosedür Şu Őekildedir:

- alıŐılabak menfez kombinasyonu ve partiköl salınım pozisyonuna göre deney düzeneği kurulumu gerçekleŐtirilir, deneyin yürütölüleğeği ortamda bir klima vasıtası ile çalışma sıcaklığı sağlanır.
- İzotermal alıŐmalar için hız, izotermal olmayan alıŐma Şartları için hız ve sıcaklık değerleri sırasıyla frekans konvertöru ve PID kontrolör yardımıyla ayarlanır.
- İzotermal olmayan alıŐma Şartları için çıkış menfezinde hava sıcaklığı ve sabit sıcaklık banyosu yüzey sıcaklığı takip edilerek sistemin ısıl dengeye ulaşması beklenir.
- İlk olarak belirtilen istasyonlarda hız ve sıcaklık değerleri okunarak kaydedilir. Okumalar her bir istasyonda ortalama 1 dk boyunca beklenerek üç kez tekrarlanmaktadır.
- Akış görüntölleme sistemi devreye alınarak ilgili çalışma parametreleri için görüntölleme gerçekleŐtirilir.

- Partikül çalışmaları için ilk olarak dengeye ulaşan sisteme HEPA filtre bağlantısı yapılır ve ortaya çıkan basınç kaybı ile düşen hız değerini düzeltmek için frekans konvertörü ile hız değeri ayarlanır.
- Belirlenen ölçüm istasyonlarında, giriş ve çıkış menfezinde ve partikül salınım noktasında partikül değerleri okunarak kaydedilir.

2.2. Sayısal Çalışmalar

Sayısal çalışmalar bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) paket programı olan FLUENT 16.0 ile yürütülmüştür. İlgili program sonlu hacimler yöntemine bağlı olarak kısmi diferansiyel denklemlerin cebirsel denklemler halinde sunulması ve değerlendirilmesini gerçekleştirmektedir. Diğer bir deyişle kullanılacak sayısal yöntem, çözüm bölgesinin küçük kontrol hacimlerine bölünmesi ve akış-ısı geçişi mekanizmalarını karakterize eden kısmi diferansiyel denklemlerin kontrol hacimlerinde integre edilerek (ayrıklaştırma) iteratif olarak çözülmesi esasına dayanır.

Sayısal analizde iki fazlı akış olarak değerlendirilebilecek hava-partikül karışımının çözümü iki farklı süreç olarak değerlendirilmektedir. İlk olarak hava akışını modellemek için Euler yaklaşımına dayanan Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri RNG k-ε türbülans modeli (Yakhot vd., 1992) kullanılarak çözülmüş ve akış alanı hesaplanmıştır. RNG k-ε türbülans modeli havalandırma uygulamalarında sıklıkla tercih edilen bir modeldir (Chen, 1995; Cook ve Lomas, 1998; Kobayashi ve Chen, 2003; Lin, Chow, Wang, vd., 2005; Zhuang vd., 2017). Partikül dağılımını hesaplamak için ise her bir partikülün çözülen akış alanı içerisinde takibine dayanan Lagrange yaklaşımı (ANSYS Inc, 2013; Zhang ve Chen, 2007; Zhao vd., 2008) tercih edilmiştir.

Süreklilik, Navier-Stokes ve enerji denklemleri tam gelişmiş türbülanslı bir akış için genel halde aşağıda ifade edilmektedir. İzotermal olmayan çalışma parametreleri seçildiğinde düşey yöndeki momentum denkleminde akışkanın yoğunluk dışındaki özelliklerinin sıcaklıkla değişmediğini varsayan Boussinesq yaklaşımı kullanılmıştır. Yer çekimi y doğrultusunda -9.81 m/s^2 olarak tanımlanmıştır.

Süreklilik

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

Momentum

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((v + \nu_T) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + g_i \beta (\bar{T} - T_0) \quad (6)$$

Enerji

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{u}_j \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\alpha + \alpha_T) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) \quad (7)$$

Burada, ρ akışkan yoğunluğunu; \bar{u}_i ve \bar{u}_j ($i, j = 1, 2, 3$) sırasıyla x-, y- ve z-doğrultularındaki ortalama akışkan hızlarını; \bar{p} ortalama basıncı; μ ve μ_T sırasıyla viskozite ve türbülans viskozitesini; β termal genleşme katsayısını; \bar{T} akışkan sıcaklığını; T_0 referans sıcaklık değerini; α ve α_t sırasıyla ısı yayılım katsayısı ve türbülans ısı yayılım katsayısını ifade etmektedir. Türbülans “ısı yayılım katsayısı” türbülans Prandtl sayısına bağlı olarak $\alpha_t = \nu_T / \text{Pr}_t$ şeklinde yazılabilir.

Türbülans viskozitesi ν_T RNG k - ϵ türbülans modeli yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$\nu_T = \frac{c_\mu k^2}{\epsilon} \quad (8)$$

İlgili denklemler değerlendirilirken basınç-hız çiftinin çözümünde SIMPLE algoritması (Patankar, 1980), basınç değerinin hesaplanmasında PRESTO! metodu tercih edilmiştir. Momentum, enerji ve türbülans disipasyon oranı için ikinci dereceden ayrıklaştırma (second order upwind) kullanılmıştır. Yakınsama kriteri enerji ve diğer denklemleri için sırasıyla 10^{-8} ve 10^{-5} olarak belirlenmiş ve ayrıca çözüm alanı içerisindeki farklı noktalarda hız, sıcaklık, konsantrasyon vb. değerler takip edilerek yakınsama kontrol edilmiştir. Duvar yüzeylerine yakın bölgede viskoz katmanın hassas bir şekilde çözümlenmesi için bu bölgelerde ağ sıklaştırılarak gelişmiş duvar yaklaşımı (Enhanced Wall Treatment) kullanılmıştır. Katı yüzey yakınlığında sık bir ağ yapısının kullanılması viskoz alt tabakada kinetik enerjinin hassas bir şekilde hesaplanması için önemlidir. Aksi takdirde özellikle küçük partiküller için çökme yüksek çıkacaktır (Ahmed vd., 2016; Lai ve Chen, 2006; Zhao vd., 2004). Menfez giriş ve çıkışları sırasıyla “Velocity inlet” ve “Outflow” sınır şartları ile tanımlanmıştır. Tüm duvarlar için no-slip (kaymama) sınır şartı belirlenmiştir. Buna ek olarak izotermal olmayan çalışma şartları değerlendirilirken ilgili duvar yüzeyleri sabit yüzey sıcaklığı (Constant wall temperature) sınır şartı kullanılarak tanımlanmıştır.

İki fazlı akışların çözümlenmesi için iki farklı yaklaşım tercih edilebilir: Euler-Euler ve Euler-Lagrange yaklaşımları (Li vd., 2015; Zhang ve Chen, 2007). Euler-Lagrange

yaklaşımında her bir partikülün ayrı ayrı takibi simüle edildiği için bu metodun kullanılması partikül hareketi ve konumu hakkında Euler-Euler yaklaşımına göre daha fazla detay sunmaktadır. Bu sebepten ötürü çalışma boyunca Euler-Lagrange metodu, diğer bir deyişle “Ayrık faz modeli (Discrete phase modeling – DPM)”, kullanılmıştır. Söz konusu modelde partikül hareketini ifade eden denklemler Lagrange koordinat sistemi içerisinde çözülürler. Partikül fazının hava fazına oranı %10’ u geçmeyeceğinden partiküllerin hava fazı olarak tanımladığımız birincil faz üzerinde bir etkisi yoktur. Dolayısı ile sadece hava fazının partikül hareketine etki ettiği fakat partikül fazının hava hareketinde bir değişikliğe yol açmadığı (one-way coupling) kabulü yapılabilir (Chen vd., 2006; Crowe vd., 1998). Ayrık faz modeli kullanılırken yapılan diğer kabuller şu şekilde sıralanabilir:

- (a) Hava ve partiküller arası ısı ve kütle transferi göz ardı edilmiştir.
- (b) Partiküller çarptıkları yüzeylere tutunarak ilgili noktada kalacaklardır.
- (c) Çökme sırasında partiküller arasında katmanlaşma oluşmayacaktır.
- (d) Tüm partiküller katı bir küre formundadır.
- (e) Havada partikül-partikül etkileşimi gerçekleşmemektedir.

Lagrange yaklaşımı zamana bağlı momentum denkleminin her partikül için ele alınmasını gerektirir. İlgili denklem şu şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F}_a \quad (9)$$

Denklemin sol tarafı atalet kuvvetini, \vec{u}_p partikülün hız vektörünü ifade etmektedir. Eşitliğin sağ tarafındaki ilk kısım sürüklenme kuvvetidir ve burada F_D gevşeme zamanının tersini (s^{-1}) ve \vec{u} hava hızını temsil etmektedir. Aynı denklemde ikinci terim yer çekimi ve ısı etki ile ortaya çıkan kaldırma kuvvetini temsil eder, burada ρ ve ρ_p sırasıyla havanın ve partikülün yoğunluğunu göstermektedir. Sağ kısımdaki \vec{F}_a terimi partiküle etki edebilecek olası diğer kuvvetleri ifade etmektedir. Bu kuvvetler; basınç gradyanı etkisiyle Saffman’s kaldırma kuvveti, sıcaklık gradyanı sebebiyle termoforetik ve Brownian kuvvetleri olabilir (ANSYS Inc, 2013). Bu çalışmada çalışılan parametreler ve partikül ebatı dikkate alındığında Saffman’nın kaldırma kuvveti ve izotermal olmayan akış şartları için ayrıca termoforetik kuvvet dikkate alınmıştır (Zhao vd., 2004).

Ayrıca, gevşeme zamanı (relaxation time) (F_D) açık formda şu şekilde ifade edilir:

$$F_D = \frac{18\mu C_d Re_p}{\rho_p d_p^2} \frac{1}{24} \quad (10)$$

Burada; μ havanın moleküler viskozitesini, d_p ve Re_p partikülün çapını ve Reynolds sayısını ifade etmektedir. C_d sürüklenme katsayısıdır ve şu şekilde ifade edilmektedir:

$$C_D = \frac{\xi_1}{Re} + \frac{\xi_2}{Re^2} + \xi_3 \quad (11)$$

Türbülanslı bir akış içerisinde yollanan partiküller dalgalanan ve değişen türbülanslı hız alanının etkisiyle oluşan rastgele (stokastik) yörüngeleri takip edecektir. Türbülansın bu etkileri ayrık rastgele yürüyüş (DRW - Discrete random walk) modeli (ANSYS Inc, 2013; Wang vd., 2012) kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu modelde partikül hareketi istatistiksel olarak mantıklı bir dağılım gösterene kadar tekrarlanabilir. Akış alanındaki türbülans dalgalanmaları anlık akışkan hızı tarafından şu şekilde tanımlanır:

$$u = \bar{u} + u'_{(t)} \quad (12)$$

$u'_{(t)}$ terimi yerel türbülans parametreleri tarafından türetilmiştir ve şu şekilde ifade edilir:

$$u'_{(t)} = \zeta \sqrt{2k/3} \quad (13)$$

Özellikle viskoz alt tabakada türbülans kinetik enerjisinin ve buna ek olarak partikül çökme oranının doğru hesaplanabilmesi adına ağdan bağımsızlık durumu farklı ağ yapıları ile değerlendirilmiştir. Aynı zamanda oluşturulan ağ kalitesini incelemek için Çelik vd. (2008)' nin önerdiği ağ yakınsama indeksi (GCI-Grid Convergence Index) kullanılmıştır. Bu metot farklı ağ yapılarında elde edilen çözümlerin ayrıklaştırma duyarlılığını değerlendirmekte ve genelleştirilmiş Richardson ekstrapolasyon yaklaşımına dayanmaktadır. İlgili metot ile farklı iki veya üç ağ yapısı karşılaştırılabilir.

Ağ yakınsama indeksi şu şekilde hesaplanır:

$$GCI_{21} = \frac{1.25}{r_{21}^p - 1} \cdot \left| \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} \right| \quad (14)$$

Burada, r_{21} ($r = h_{orta}/h_{yoğun} > 1.3$ önerilmektedir (Çelik vd., 2008)) ağ sıklaştırma oranı, p doğruluk mertebesi, ϕ_1 ve ϕ_2 farklı ağ yapıları ile elde edilen değerlerdir. Güvenlik faktörü üç farklı ağ yapısı karşılaştırılacaksa yukarıdaki denklemde verildiği üzere 1.25

olarak önerilmektedir (Roache, 1994). Ağ sıklaştırma oranı (r_{21}), temsili ağ boyutu (h) ve doğruluk derecesi (p) aşağıdaki denklemler vasıtası ile hesaplanır.

$$r_{21} = \frac{h_2}{h_1} \quad (15)$$

$$h = \left(\frac{V}{N}\right)^{1/3} \quad (16)$$

$$p = \frac{1}{\ln(r_{21})} \ln \left| \frac{(r_{21}^p - 1)e_{32}}{(r_{32}^p - 1)e_{21}} \right| \quad (17)$$

$$e_{21} = \phi_2 - \phi_1 \quad (18)$$

Burada $h_1 < h_2 < h_3$ olduğuna dikkat edilmelidir. Ayrıca V çözüm alanı hacmini, N toplam hücre sayısını vermektedir. p değeri sabit noktalı iterasyon yaklaşımı ile elde edilmektedir.

2.3. Havalandırma Performans Ölçütleri

Havalandırma sistemlerinin performanslarını değerlendirmek için ortalama hava yaşı (mean age of air), hava değişim verimi (air change efficiency-ACE) ve kirletici uzaklaştırma etkinliği (contaminant removal effectiveness-CRE) değişkenleri kullanılmıştır (Novoselac ve Srebric, 2003; Mundt vd., 2004). İlgili değerlendirme değişkenleri aşağıda sırasıyla açıklanmaktadır.

2.3.1. Ortalama Hava Yaşı

Giriş menfezinden odaya giren havanın belirli bir noktaya ulaşması için gerekli zaman ortalama hava yaşı olarak ifade edilmektedir. Hava yaşı havanın tazeliğinin bir göstergesidir. Ortalama hava yaşı sayısal modelde skaler bir büyüklük olarak tanımlanabilir ve hesaplanması için korunum denklemlerine ek olarak bir konveksiyon-difüzyon denkleminin de çözümü gerekir (Abanto vd., 2004; Chanteloup ve Mirade, 2009).

Bu denklem

$$\frac{\partial \rho \Phi_i}{\partial t} - \nabla(\Gamma_i \nabla \Phi_i) = S_{\Phi_i} \quad (19)$$

$$\Gamma_i = 2.88 \times 10^5 \rho + \frac{\mu_{eff}}{0.7} \quad (20)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada t zamanı (s), ρ akışkan yoğunluğunu (kg/m^3), ϕ_i hesaplanacak skaleri (diğer bir deyişle hava yaşını (τ_i)), Γ_i bu skalere ait difüzyon katsayısını, S_{ϕ_i} kaynak terimi ve μ_{eff} havanın viskozitesini ifade etmektedir.

Ortalama hava yaşının Fluent paket programında çözülmesi için kullanıcı tanımlı bir fonksiyon yazılarak uygulamaya tanıtılmıştır. Ortalama hava yaşı mahalde oluşacak akış karakteristiklerine bağlı olarak hava dağıtım sistemi konfigürasyonunun değerlendirilmesinde kullanılacaktır.

2.3.2. Hava Değişim Verimi (HDV)

Hava değişim verimi (Awbi, 2003; Etheridge ve Sandberg, 1996; Mundt vd., 2004), nominal zaman sabiti (τ_n) ve odanın ortalama hava yaşına ($\bar{\tau}$) bağlı olarak hesaplanacaktır. Odaya ait hava değişim verimi şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$E_a = \frac{\tau_n}{2\bar{\tau}} \times 100 \quad (21)$$

$$\tau_n = V/Q \quad (22)$$

Burada, $V(\text{m}^3)$ odanın hacmi ve $Q(\text{m}^3/\text{s})$ hava debisidir. Hava değişim verimi havanın odanın bütününe süpürme durumuna bağlı olarak 0 ila 100 arasında değişecektir. Eğer odanın belirli bir çıkış menfezi varsa nominal zaman sabiti (τ_n) bu çıkış menfezindeki ortalama hava yaşına (τ_e) eşittir (Sandberg, 1984).

2.3.3. Kirletici Uzaklaştırma Etkinliği (KUE)

Havalandırma sisteminin kirleticileri ortamdan uzaklaştırma performansı kirletici uzaklaştırma etkinliği ile değerlendirilir ve şu şekilde tanımlanır (Sandberg, 1981; Awbi, 2003):

$$E_C = \frac{C_E - C_S}{C_P - C_S} \quad (23)$$

Burada C_E , C_S ve C_P terimleri sırasıyla çıkış menfezindeki, giriş menfezindeki ve etkinliğin hesaplanmak istediği noktadaki veya hacimdeki ortalama kirletici miktarını ifade etmektedir.

2.3.4. Çökelme Oranı

Çökelme oranı şu şekilde tanımlanmaktadır (Lai ve Chen, 2006):

$$\text{Çökelme oranı} = \frac{N_{\text{verilen}} - N_{\text{çıkan}}}{N_{\text{verilen}}} \times 100 \quad (24)$$

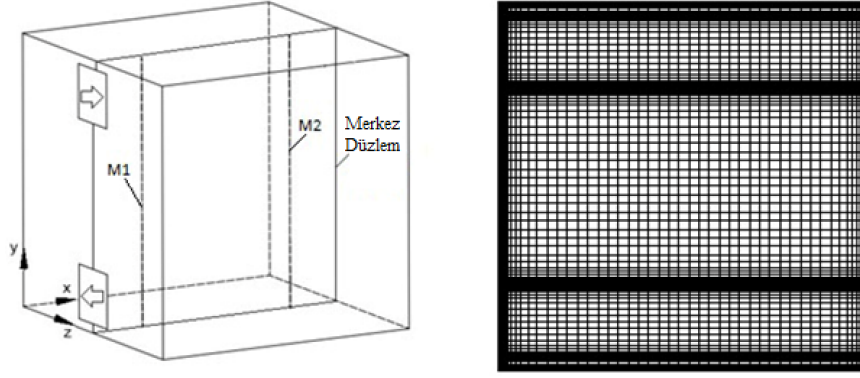
Burada N_{verilen} ve $N_{\text{çıkan}}$ sırasıyla ortama verilen ve ortamdaki çıkan partikül miktarlarını ifade etmektedir.

2.4. Çalışma Parametreleri

2.4.1. Hava Değişim Katsayısının (HDK) İncelenmesi

2.4.1.1. Hava Değişim Katsayısının Farklı Kirletici Yüklerinde İç Hava Kalitesine Etkisinin İncelenmesi

HDK değerinin farklı kirletici yükleri için iç hava kalitesine etkisi Şekil 10'da görülen Oda 1 için 31 menfez kombinasyonu göz önüne alınarak değerlendirilmiştir. Çalışma aralığı ve değerleri gerçek boyutlardaki bir oda için benzerlik parametreleri yardımı ile belirlenmiştir. İlgili parametreler, köşeli parantez içindekiler küçük ölçekli model oda için geçerli olmak üzere, Tablo 9'da verilmiştir. Çalışılan partikül çap aralığı iç hava kalitesi çalışmalarında genel olarak solunabilecek değerler dahilinde ifade edilmektedir. Değerlendirme kolaylığı açısından bulgular kısmında sonuçların gerçek boyutlardaki oda değişkenleri üzerinden verileceği not edilmelidir.



Şekil 10. Model oda ve sayısal çalışmada kullanılan ağ yapısı

Tablo 9. HDK etkisinin incelendiği işletme parametreleri

Re	Ölçek	U ₀ (m/s)	HDK	Çap değeri (µm)				
				0.181 [0.5]	2.188 [5]	4.42 [10]	8.89 [20]	17.8 [40]
				Çökeltme hızı oranı us/u ₀				
6977	1:1 [1:5]	0.036 [0.18]	1.73 [43.2]	5.80E-05	4.50E-03	1.77E-02	7.02E-02	2.80E-01
11629	1:1 [1:5]	0.06 [0.3]	2.88 [72]	3.48E-05	2.70E-03	1.06E-02	4.21E-02	1.68E-01
23257	1:1 [1:5]	0.12 [0.6]	5.76 [144]	1.74E-05	1.35E-03	5.31E-03	2.11E-02	8.40E-02
31010	1:1 [1:5]	0.16 [0.8]	7.68 [192]	1.31E-05	1.01E-03	3.98E-03	1.58E-02	6.30E-02

Bu manada yapılan deneysel çalışma Tablo 9’da verilen değişkenlerin alt ve üst limitleri olan $Re=6977$ ve $Re=31010$ ’ a karşılık gelen hız değerleri ve $0.5 \mu m$ partikül çapı göz önüne alınarak yürütülmüştür.

Çalışmada taze hava için iki farklı partikül yükü incelenmiştir:

(i) Sabit partikül yükü: Kütlesel partikül debisi sabit ve artan hava hızı ile değişmiyor. Bu durumda kütlesel debi oranları hız arttıkça hava lehine gelişecektir.

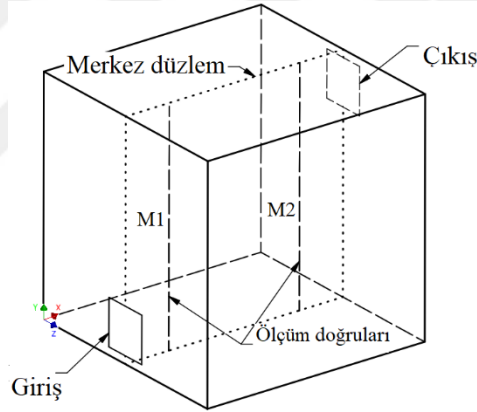
(ii) Oranlı partikül yükü: Kütlesel partikül debisi sabit değil ve hava hızı ile doğru orantılı biçimde artıyor. Sonuç olarak kütlesel debi oranı her durumda aynı ve birim zamanda ortama giren hava değeri de partikül değeri de aynı şekilde artıyor.

Çalışmada herhangi bir ısı kaynak olmadığından simülasyonlar izotermal şartlar da tamamlanmıştır. Ağdan bağımsızlık çalışması Şekil 10’da görülen ağ düzeni korunarak üç farklı hücre sayısında (~ 706 bin, 1.3 milyon ve 2.1 milyon) hız, konsantrasyon ve türbülans kinetik enerjisi değerleri karşılaştırılarak tamamlanmıştır. En sık iki ağ yapısı ile elde edilen sonuçlardaki benzerlik göz önüne alınarak çalışma yaklaşık 1.3 milyon hücre

sayısına sahip ağlarda tamamlanmıştır. Bununla beraber seçilen hücre sayısı için ağ yakınsama indeksi değeri % 6.57' den daha düşük olarak elde edilmektedir. Yine tercih edilen ağ yapısı ve sıklığı için $y^+ < 2$ olduğundan sınır tabakanın hassa bir şekilde çözümlendiği ve partikül-duvar etkileşiminin de doğru sonuçlar vereceği ifade edilebilir.

2.4.1.2. Hava Değişim Katsayısı Kirletici Kaynak Konumu İlişkisinin İncelenmesi

Bu kısımda hava değişim katsayısının partikül dağılımına etkisi farklı kirletici kaynak konumlarına bağlı olarak incelenmektedir. Kirleticilerin ortama giriş havası ile beraber bırakıldığı durumda tek bir hız değeri için deneysel çalışmalar yapılmış ve sonuçlar sayısal yaklaşımın doğrulanmasında kullanılmıştır. Çalışmada tek bir çap değeri ele alınmıştır. İlgili oda konfigürasyonu Şekil 11'de görülmektedir.



Şekil 11. Oda 1 için 17 menfez kombinasyonuna ait şematik

Sayısal çalışmada, farklı HDK değerlerinin kirletici kaynak konumlarına bağlı olarak performansını incelenmiştir. Bu konumlardan biri öngörülen akış alanı da dikkate alınarak odanın tam orta noktası diğeri ise odanın merkezinden geçen yatay hat boyunca sağ duvara 5 cm uzak olacak şekilde ifade edilebilir. Belirlenen işletme parametreleri Tablo 10' da Reynolds sayısı bazında verilmiş olup burada farklı ölçekler için karşılık gelen giriş menfez hızları ve HDK değerleri de sunulmuştur. Deneysel çalışma $Re=23257$ değerinde ve $0.5 \mu m$ partikül çapı için tamamlanmıştır. Burada, dağılım benzerliği açısından, küçük ölçekteki model odada incelenen $0.5 \mu m$ ebatındaki partiküllerin gerçek boyutlardaki odada $0.181 \mu m$ 'ye tekabül ettiği not edilmelidir.

Tablo 10. HDK ve kirletici konum etkisinin incelendiği çalışma için işletme parametreleri

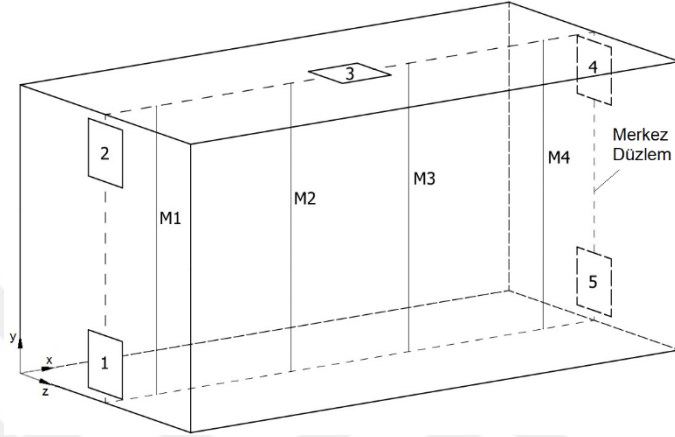
Re	Ölçek (1:1)		Ölçek(1:5)	
	U_0 (m/s)	HDK	U_0 (m/s)	HDK
(a) 6977	0.036	1.73	0.18	43.2
(b) 11629	0.06	2.88	0.3	72
(c) 23257	0.12	5.76	0.6	144
(d) 31010	0.16	7.68	0.8	192

Ağdan bağımsızlık çalışması üç farklı ağ yapısında için yürütülmüştür. Duvar yakınlığında ve giriş ile çıkış boyunca öngörülen hız alanlarına bağlı olarak belirli bölgelerde daha yoğun bir ağ yapısı tercih edilmiş ve ağ yapısına bağlı olarak $y^+ < 1.25$ olarak elde edilmiştir. İlgili ölçüm istasyonlarındaki sonuçların orta sıklıktaki ağ yapısından sonra anlamlı değişiklikler sergilemediği görülmüştür. Toplam simülasyon zamanı ve maliyeti göz önüne alınarak, sayısal çalışmalar 1237860 hücre sayısına sahip bir ağ yapısında sürdürülmüştür.

2.4.2. Menfez Konumu Etkisinin İncelenmesi

Bu bölümde, 10 farklı menfez kombinasyonu ve 3 farklı kirletici kaynak konumuna ilişkin değerlendirmeler yapılmıştır. Deneysel çalışma Şekil 12’de şematik olarak sunulan oda üzerinde 3 farklı giriş/çıkış menfez konfigürasyonu (14, 21, 35 menfez kombinasyonları) için tamamlanmıştır. Tek bir hız ve partikül çap değeri (1:5 için $0.5 \mu\text{m}$ -1:1 için $0.181 \mu\text{m}$ değerine tekabül etmektedir) dikkate alınmıştır. İşletme parametreleri Tablo 11’de görülmektedir. Menfez kombinasyonları Şekil 13’te görüleceği üzere sütunlarda giriş menfezi, ilk satır dışında diğer satırlarda ise çıkış menfezi sabit kalacak şekilde organize edilmiştir. Böylece, farklı giriş ve çıkış menfezlerinin değerlendirilmesi anlamlı bir sıralama kurgusuna bağlı kalarak yürütülmüştür. Menfez kombinasyonlarının başında yer alan sayılar Şekil 12 ile uyumlu olacak şekilde kurgulanmıştır, burada ilk rakam giriş ikinci rakam ise çıkış menfezi numarasını temsil etmektedir. Kirletici kaynak konumları Şekil 14’te görüldüğü üzere giriş menfezi, solunum yüksekliği ve çıkış menfezi yakınlığında olacak şekilde organize edilmiştir.

Menfez konumlarına bağılı olarak partikül arınım süreçleri akış alanına homojen olarak dağıtılmış 500.000 partikülün seyrelme sürecinin izlenmesi ile çalışılmıştır. Bunun için partiküle ait konum, hız, çap vb. değerleri içeren bir liste oluşturularak Fluent'e tanıtılmıştır. İlgili liste Python programlama dilinde yazılan bir kod vasıtası ile oluşturulmuştur.

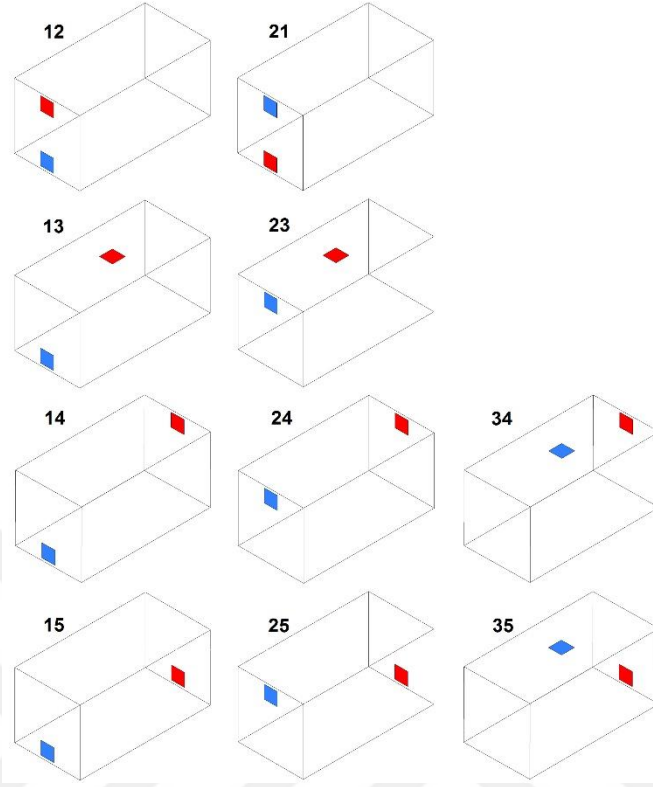


Şekil 12. Menfez konumu etkisinin ele alındığı model oda

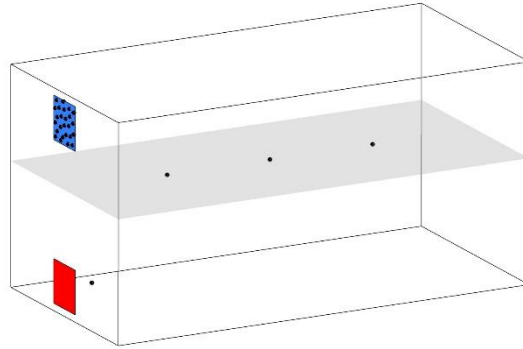
Çalışma izotermal şartlar dikkate alınarak sistem adyabatik kabulü ile yürütülmüştür. Ağdan bağımsızlık çalışması sırasıyla yaklaşık 4.3 milyon, 1.3 milyon ve 457 bin hücre sayısına sahip akış alanları için hız ve konsantrasyon değerlerinin karşılaştırılması ile yapılmıştır. En sık iki ağ yapısındaki ihmal edilebilir farklar ve zaman maliyeti de göz önüne alınarak çalışma yaklaşık 1.3 milyon hücre yapısına sahip ağlar kullanılarak tamamlanmıştır.

Tablo 11. Menfez konumu etkisi incelemesinde kullanılan işletme parametreleri

Ölçek	U_0 (m/s)	Re	HDK	Çökelme hızı oranı
1:5	0.6	23257	72	1.74E-05
1:1	0.12		2.88	



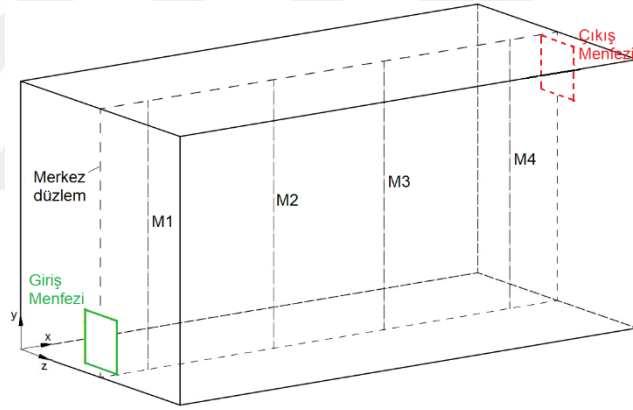
Şekil 13. Menfez konumu etkisinin incelenmesinde değerlendirilen menfez kombinasyonları



Şekil 14. Menfez konumu etkisinin incelenmesinde değerlendirilen partikül kaynak konumları

2.4.3. Deplasmanlı Hava Dağıtım ve Zeminden Isıtma Sisteminin Beraber Kullanıldığı Durumda Kirletici Dağılımının İncelenmesi

Bu bölümde deplasmanlı hava dağıtım sistemi (DHDS) ve zeminden ısıtmanın beraber kullanıldığı bir mahalde kirletici dağılımı farklı senaryolar üzerinden incelenmiştir. Deneysel çalışma Şekil 15’te görülen oda konfigurasyonu için yürütülmüştür. Çalışmada dört farklı hava hızı incelenmiştir. Karakterize edilen gerçek boyutlardaki odaya ait işletme değerleri ve benzerlik parametreleri yardımıyla belirlenen küçük ölçekli model odaya ait değişkenler Tablo 12’de en düşük hava hızı için verilmektedir. En küçük üfleme hızı için akış türbülans sınırları dahilinde olduğundan ve “2.1.1 Benzerlik Parametreleri” bölümünde detaylı olarak ele alındığı üzere ölçekler arası benzerlik Ar eşitliği üzerinden kurgulanmıştır. Küçük ölçekli model odaya ait tüm işletme değerleri Tablo 13’te görülmektedir.



Şekil 15. Deplasmanlı hava dağıtım ve zeminden ısıtma için değerlendirilen oda geometrisi

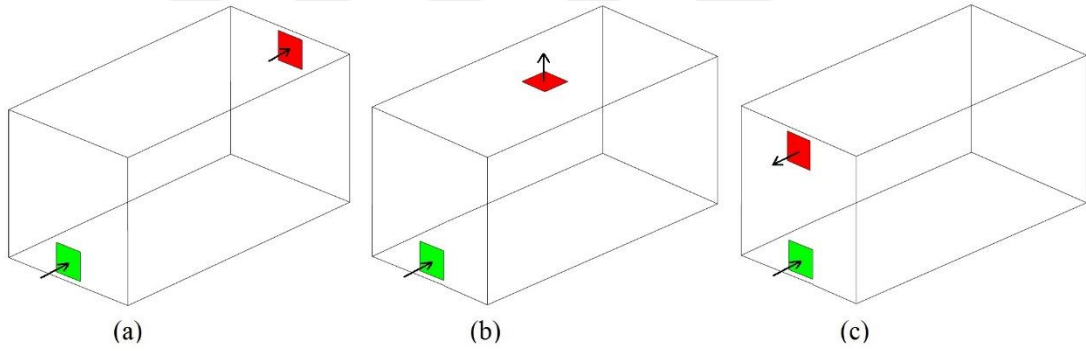
Tablo 12. DHDS&Zeminden ısıtma uygulaması çalışması için farklı ölçeklere ait çalışma parametreleri

	1:1	1:5
h	3	0.6
$\Delta T(=T_{fl} - T_{in})$	6	31
Pr	0.7	0.7
Re	33687	6590
Ar	23.54	23.54

Tablo 13. DHDS&Zeminden ısıtma uygulaması çalışmasında küçük ölçekli model odaya ait işletme parametreleri

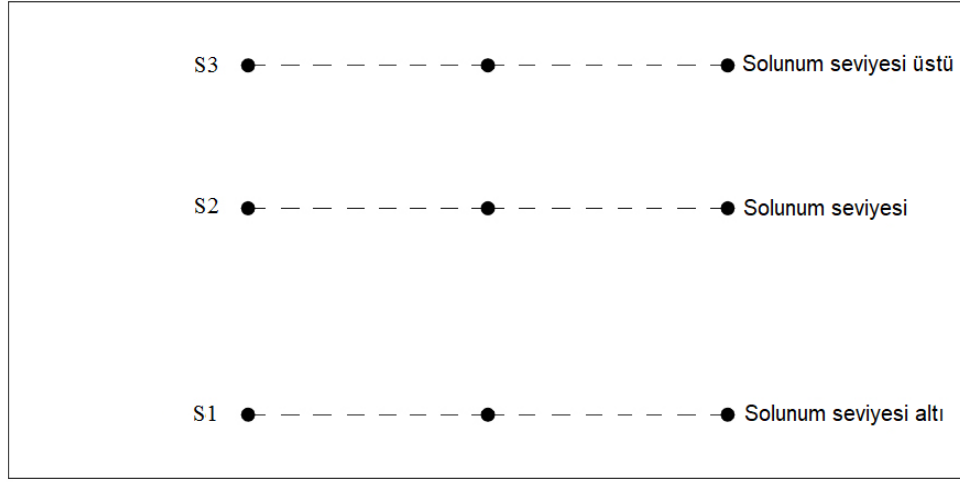
u (m/s)	Re	T_{zemin}	T_{duvar}	T_{giris}	Ar
0.73	28684				1.13
0.53	20544	327 K	296 K	296 K	2.15
0.34	13179				5.21
0.17	6590				23.54

Farklı üfleme hızlarına ek olarak bu bölümde ayrıca çıkış menfez konumunun kirletici dağılımına etkisi de incelenmiştir. İlk konfigürasyon deneysel çalışmadaki menfez konumunu temsil etmek üzere Şekil 16'da tüm çıkış menfez konfigürasyonları görülmektedir.



Şekil 16. DHDS&Zeminden ısıtma uygulaması çalışmasında değerlendirilen çıkış menfez konumları (a)O1, (b)O2, (c)O3

Bu bölümde ayrıca kirletici dağılımı giriş menfezinden ($0.5 \mu\text{m}$) ve Şekil 17'de görüldüğü üzere farklı yüksekliklerde eşit aralıklarla dağıtılmış noktasal kirletici kaynaklarından ($0.5\text{-}5\text{-}10 \mu\text{m}$) olacak şekilde belirlenmiştir. Kaynak konumlarından S2 - Solunum seviyesi gerçek boyutlarda 1.7 m ' yi temsilen (ayakta duran bir insan için solunum alanı içerisinde (ASHRAE, 2016)) model odada 0.34 cm dir. S1 ve S2 yükseltileri ise Şekil 16(a)'da görülen giriş ve çıkış menfezlerinin orta noktasından geçen yatay doğrultu hizasıdır. İlgili doğrular yakınlığında konumlandıkları zemin ve tavan düzlemlerinden 0.08 cm uzaklıktadır. Çalışılan partikül çapları iç hava kalitesi çalışmalarında insan sağlığı açısından özellikle üzerinde durulan değerlerdir (Golkarfard ve Talebizadeh, 2014; Lai ve Wong, 2011; Zhuang vd., 2017).



Şekil 17. DHDS&Zeminden ısıtma uygulaması çalışması için belirlenen noktasal kirletici kaynak konumları

3. BULGULAR VE İRDELEME

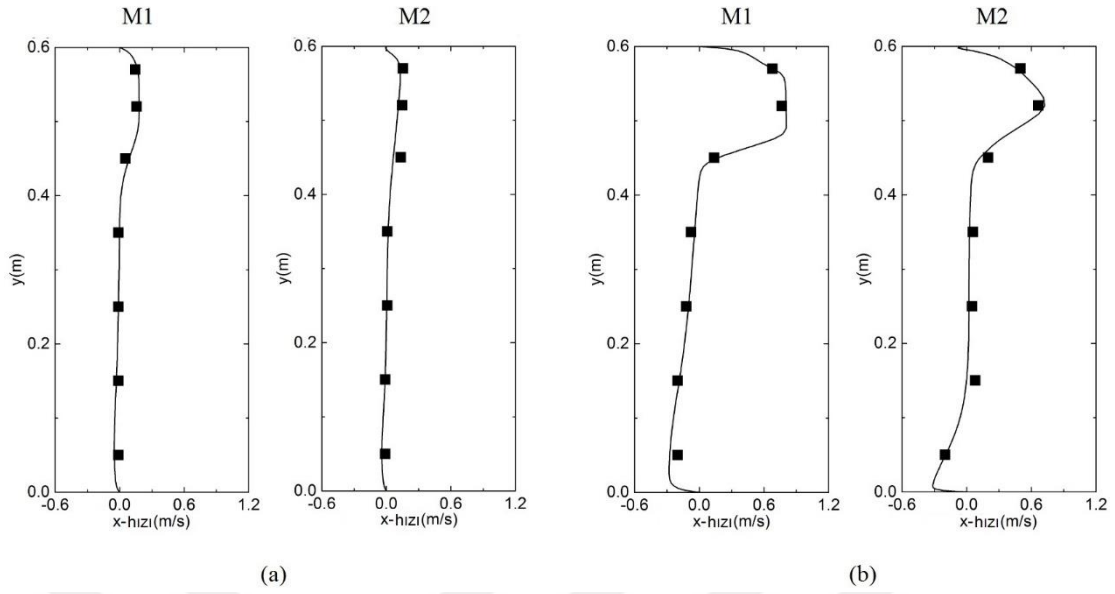
3.1. Hava Değişim Katsayısının (HDK) İncelenmesi

3.1.1. Hava Değişim Katsayısının Farklı Kirletici Yüklerinde İç Hava Kalitesine Etkisinin İncelenmesi

Bu kısımda ilk olarak ölçüm sonuçları ile simülasyon sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ardından doğrulanmış sayısal yaklaşıma bağlı olarak elde edilen mahal içi hava akış dağılımı, konsantrasyon değerleri, partikül çapı ve kirletici yüklerinin etkileri göz önüne alınarak farklı HDK oranları için karşılaştırılmıştır.

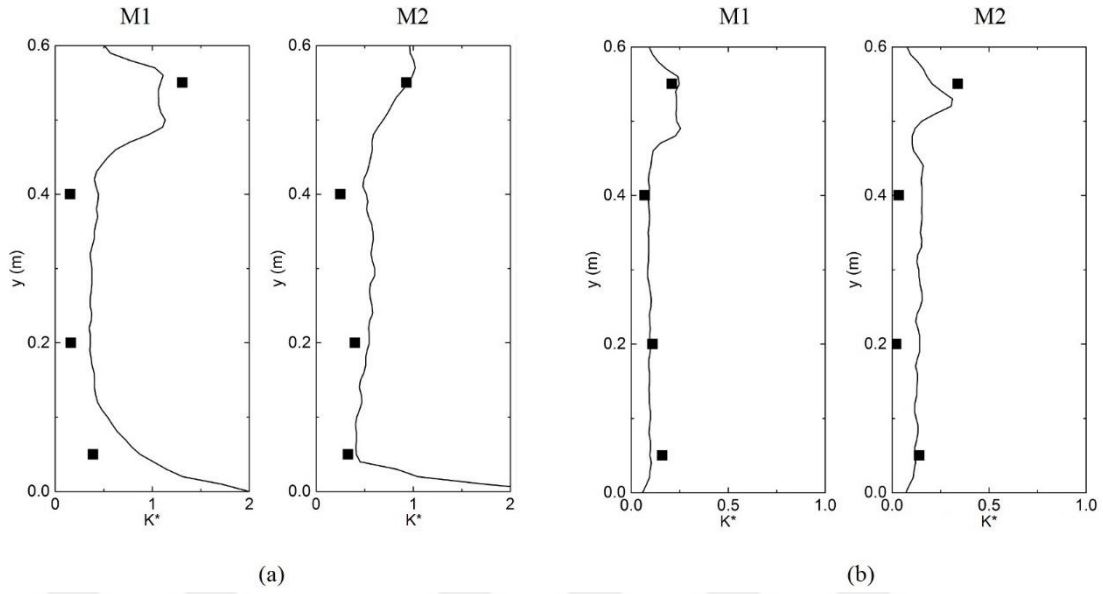
3.1.1.1. Sayısal Modelin Doğrulanması

Daha önce “2.4.1.1 Hava Değişim Katsayısının Farklı Kirletici Yüklerinde İç Hava Kalitesine Etkisinin İncelenmesi” bölümünde ifade edildiği üzere deneysel çalışma ele alınan en yüksek ve en düşük giriş hızı değerleri olan (a) 0.18 m/s ve (b) 0.8 m/s için gerçekleştirilmiştir. İlgili ölçüm değerleri Şekil 18’de sayısal sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Görüldüğü üzere deneysel ölçümler ile simülasyon sonuçları uyum içerisindedir. En yüksek hız değerlerine giriş menfezine daha yakın olan M1 istasyonunda ulaşılmaktadır. Ayrıca her iki istasyon (M1 ve M2) özelinde en yüksek hız değerlerine beklendiği üzere jet bölgesinde ($y > 0.45$) erişilmiştir.



Şekil 18. Deneysel (sembol) ve sayısal (çizgi) x-hızı değerlerinin karşılaştırılması

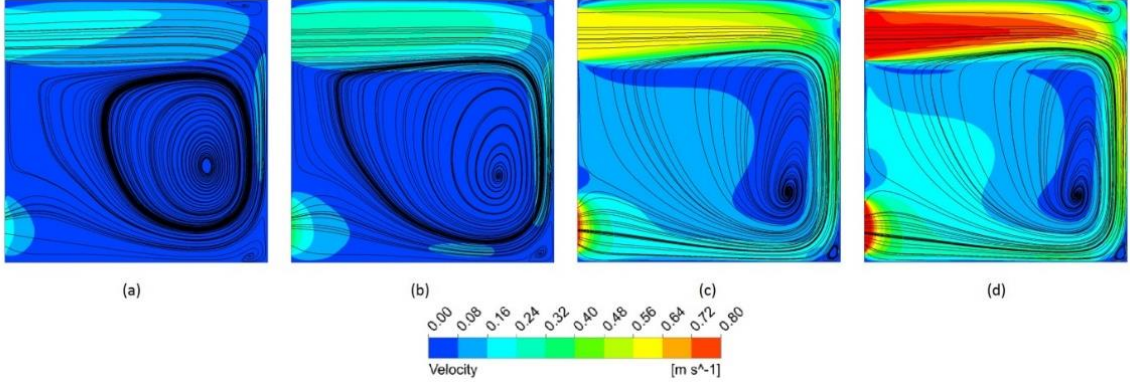
Konsantrasyon değerlerine ilişkin ölçüm ve sayısal sonuçlar Şekil 19'da görülmektedir. Burada boyutsuzlaştırma ilk durum için giriş menfezi konsantrasyon değerine bağlı olarak yapılmıştır. Her iki durumda da giriş menfezi doğrultusunda belirgin bir konsantrasyon yoğunluğu göze çarpmaktadır. Bu durum partiküllerin mahale giriş havası ile verilmesi ile bağdaştırılabilir. Ayrıca ilk durumda zemin yakınlığında bir birikim görülmektedir. Genel olarak ele alındığında sayısal sonuçların deneysel ölçümleri yansıtabildiği ifade edilebilir. Değerler arası fark ilgili ölçüm yaklaşımı için ifade edilen prob konum hassasiyeti ile açıklanmaktadır (Kobayashi ve Chen, 2003; Lau ve Chen, 2007; Rim ve Novoselac, 2010). Sonuç olarak tercih edilen sayısal yaklaşımın elde edilen hız ve konsantrasyon değerleri açısından başarılı cevap verdiği ifade edilebilir



Şekil 19. Deneysel (sembol) ve sayısal (çizgi) boyutsuz konsantrasyon değerlerinin karşılaştırılması

3.1.1.2. Hava Hızı ve Konsantrasyon Dağılımının Değerlendirilmesi

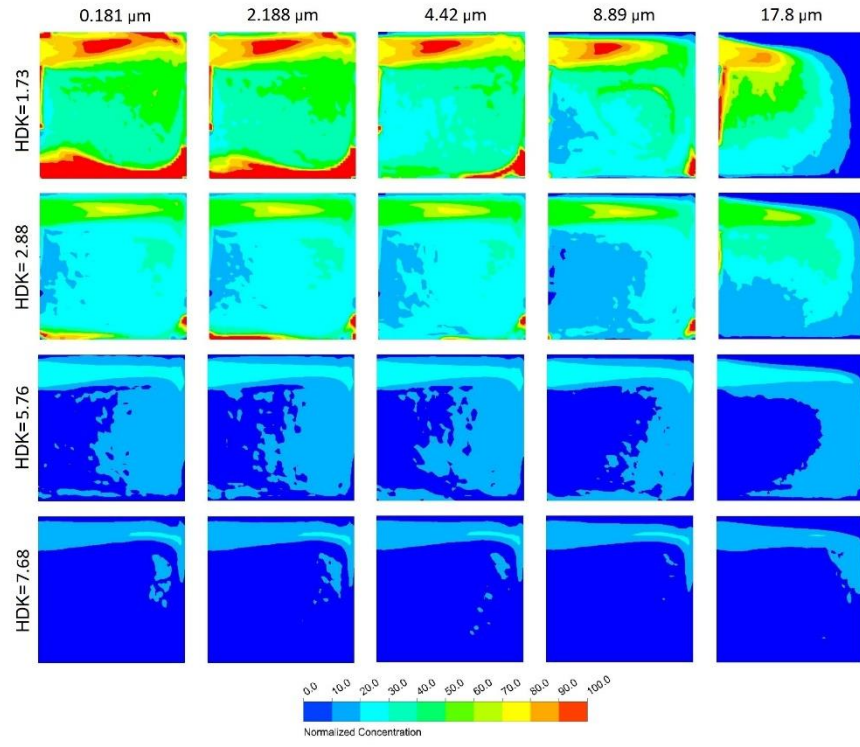
Şekil 20’de farklı HDK değerleri için oda orta düzleminde elde edilen hız konturları ve akım çizgileri görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere, HDK değerindeki artışa bağlı olarak hava jetinin hızı artmakta ve karşı duvar komşuluğunda yüksek hız değerlerine ulaşılmaktadır. Burada ayrıca Coanda etkisi olarak bilinen jetin yakınındaki tavan yüzeyine yapışma eğilimi de görülmektedir. Akım çizgileri incelendiğinde, merkezi oda sağ alt bölgesinde bulunan büyük bir resirkülasyon hücresi görülmektedir. Artan hava hızı ile beraber bu hücre merkezinin kısmen sağa duvara yaklaştığı ifade edilebilir. Ayrıca sağ duvar üst ve alt köşelerinde daha küçük yapıda resirkülasyon hücreleri görülmektedir. Resirkülasyon bölgeleri barındırabilecekleri partikülleri uzun süreler muhafaza ederek iç hava kalitesini olumsuz şekilde etkileyebilirler.



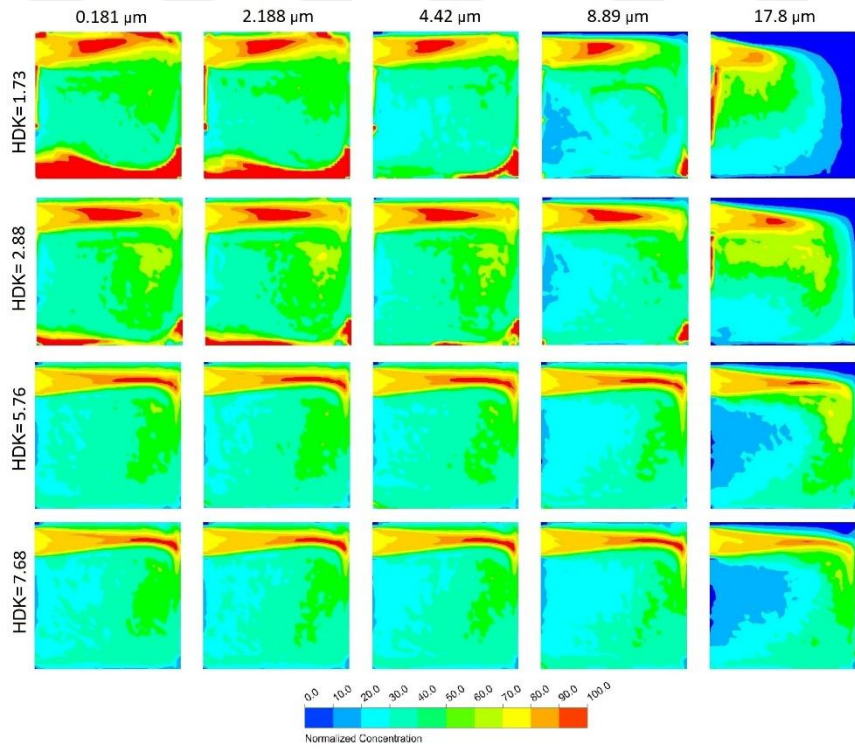
Şekil 20. Farklı HDK değerlerinde oda orta düzleminde hız konturları ve akım çizgileri (a)1.73 (b)2.88 (c)5.76 (d)7.68

Şekil 21'de sabit kütleli partikül debisinde oda orta düzleminde elde edilen konsantrasyon konturları verilmektedir. Konsantrasyon dağılımları, partiküller üfleme havası ile ortama salındıkları için daha önce verilen hız dağılımları ile benzer davranışlar sergilemektedirler. HDK değerindeki artışla beraber tüm partikül çapları için konsantrasyon değerlerinin azaldığı görülmektedir. Sürüklenme kuvvetinin etkin olduğu küçük partiküller hava ile beraber hareket ederken partikül çapı arttıkça yer çekimi kuvvetinin etkisi ile beraber özellikle en büyük partikül için dağılım haritasının akım çizgilerinden ayrıştığı görülmektedir. Bu durumda havanın sahip olduğu momentumun ilgili partikülleri küçük partiküllerde olduğu gibi sürükleyemediği ifade edilebilir.

Kütleli partikül debisinin hava debisi ile orantılı olarak artırıldığı durumda oda orta düzleminde elde edilen konsantrasyon dağılımı Şekil 22'de verilmektedir. Görüldüğü üzere konsantrasyon değerleri sabit kütleli partikül debisi salınımında olduğu gibi HDK değerinin artması ile azalmamaktadır. HDK=1.73 ve 2.88 için küçük partiküllerin oda üst ve alt bölgelerinde biriktiği ifade edilebilir. Benzer birikme davranışı bir önceki şekilde verilen sabit kütleli partikül debisi şartında da görülmektedir. Hava hızının artışına bağlı olarak giriş menfezi boyunca hava jeti içerisinde yer alan konsantrasyon profili jet ile beraber sağ duvara yaklaştıkça daha ince bir form kazanmaktadır. Özellikle en büyük partikül çapı için hava hızı arttıkça artan sürüklenme kuvveti ile partiküllerin daha uzağa taşındığı görülmektedir. Bu noktaya kadar yapılan görsel değerlendirmeye ek olarak sonraki bölümlerde değişen HDK etkisini daha iyi anlayabilmek adına nicel bir değerlendirme yapılmıştır. Burada, sırasıyla çıkış menfezi ve mahal ortalama konsantrasyon değerleri ile çökeltme oranları verilmektedir.



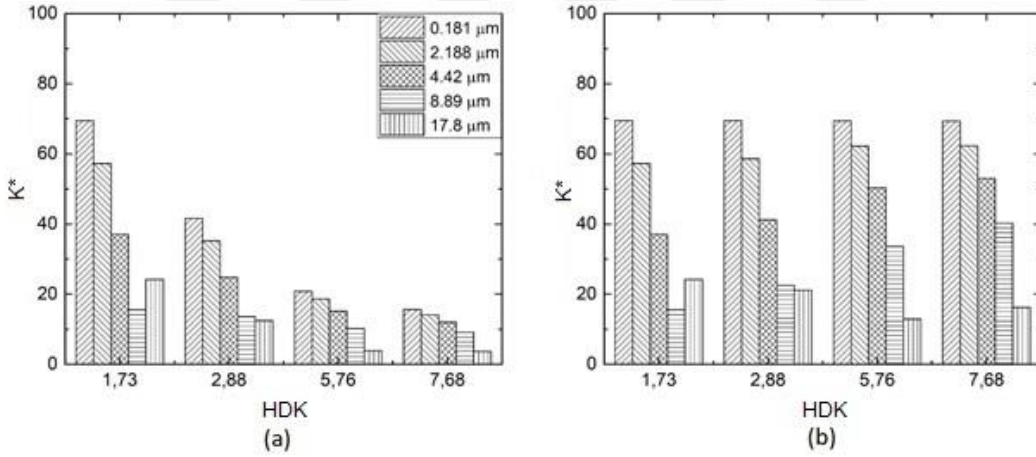
Şekil 21. Sabit partikül debisinde konsantrasyon konturları



Şekil 22. HDK ile orantılı partikül debisinde konsantrasyon konturları

3.1.1.3. Çıkış Menfezi Konsantrasyon Değerlerinin Değerlendirilmesi

Sabit (a) ve HDK ile orantılı (b) kütleli partikül debisi şartlarında, çıkış menfezindeki boyutsuz ortalama konsantrasyon değerleri Şekil 23'te görülmektedir. Sabit partikül debisi için, çıkıştaki ortalama konsantrasyon miktarı artan HDK ile azalmaktadır. Bu durum, sabit partikül yükünün daha çok hava ile seyreltilmesi manasına geldiğinden beklenen bir davranıştır. Çıkıştaki ortalama konsantrasyon değeri partikül çapına bağlı olarak ele alındığında ise, genel olarak çap artışı ile beraber çıkış konsantrasyon miktarının azaldığı ifade edilebilir. Çalışılan en büyük çap ($17.8 \mu\text{m}$) için $\text{HDK}=1.73$ değerinde ilgili eğilim bozulmaktadır. Bu durum, ilgili konsantrasyon haritasında (Şekil 22) görüldüğü üzere, çıkış menfezi yakınındaki yoğun birikimin bir sonucudur. Söz konusu partiküller yüksek HDK değerlerinde artan sürükleme kuvveti neticesinde akış alanında daha ileriye taşındıklarından birikim ortadan kalkmaktadır. Bu durumda diğer tüm HDK değerlerinde artan çap değeri ile konsantrasyon miktarında azalma görülmektedir.



Şekil 23. (a) Sabit kütleli partikül debisi ve (b) HDK ile orantılı kütleli partikül debisinde çıkış menfezindeki konsantrasyon değerleri

Hava debisi ile orantılı partikül debisi şartları (b) dikkate alındığında, artan HDK değeri ile çıkış menfezindeki ortalama konsantrasyon değerinin en büyük partikül çapı hariç sürekli arttığı görülmektedir. Artan hava hızı ile beraber ortama giren partikül oranı da arttığı için çıkış menfezindeki konsantrasyon artışı beklenen bir olgudur. Artış oranı $0.181 \mu\text{m}$ için diğer partiküllere oranla daha düşük düzeydedir. $17.8 \mu\text{m}$ için ise HDK değerinin artışı ile çıkış menfezindeki ortalama konsantrasyon değeri $\text{HDK}=5.76$ ' ya kadar

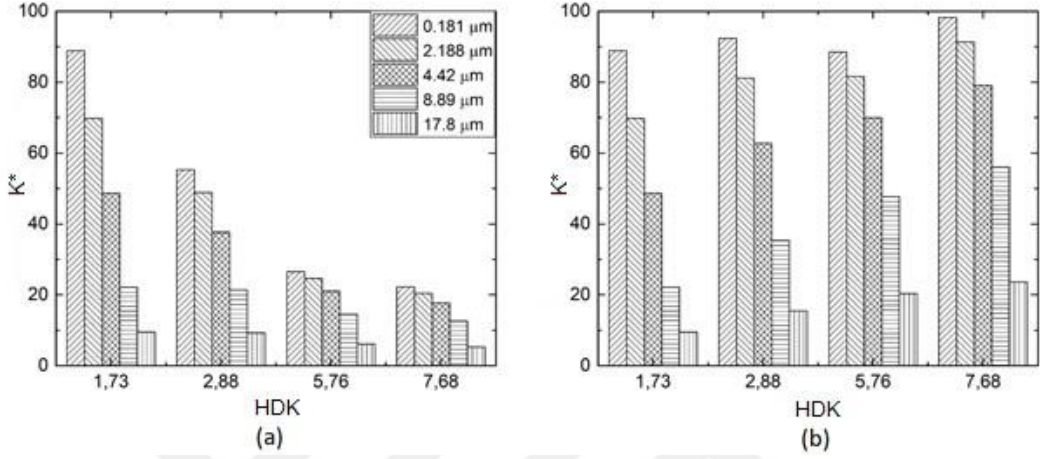
azalmakta sonrasında ise artmaktadır. Daha önce de ifade edildiği üzere, Şekil 22’de verilen konsantrasyon konturlarına dikkat edilirse, 17.8 μm için düşük hızlarda çıkış menfezi yakınlığında çökeltme etkisi ile bir birikim görülmektedir. Bu birikim sebebiyle konsantrasyon değeri HDK=1.73 ve HDK=2.88 için beklenenden fazla çıkmaktadır. Hava hızının artması sonucunda artan sürüklenme kuvveti neticesinde partiküllerin daha uzağa taşınması ve bu birikimin azalması konsantrasyon değerlerindeki azalmanın sebebidir (HDK=1.73-7.76 arası). HDK=5.76-7.68 aralığında ise diğer çap değerlerinde görülen ana artış karakterinin yakalanması ile birikimin tamamen ortadan kalktığı anlaşılmaktadır.

Benzer bir çalışmada Faulkner vd. (2015) 17.95 μm ebatındaki partikülleri giriş menfezi ile ortama vererek çıkış menfezindeki konsantrasyon değerlerini farklı HDK değerlerinde ölçmüşlerdir. İlgili çalışmada, bu çalışmada 17.8 μm için elde edilen değerlerin aksine, HDK değerindeki artışla beraber çıkış menfezindeki konsantrasyon değerlerinin sürekli arttığı ifade edilmiştir. Aynı çalışmada giriş-çıkış menfez yerleşimlerinin karşılıklı dik duvarlarda ve aynı yükseklikte olduğu not edilmelidir. Bu menfez konumları sebebiyle, çalışmamızda görülen çıkış menfezi çevresinde ortaya çıkan birikim tarzı bir olgu ile karşılaşılmamıştır. Hava hızı arttıkça giriş menfezi ile ortama verilen partiküller neredeyse direkt olarak ortamı terk etmişlerdir. Bu noktada HDK değerindeki değişimin her zaman aynı etkileri yaratamayabileceği ve menfez konumlarının da önemli bir değişken olduğu ifade edilmelidir.

3.1.1.4. Mahal İçi Ortalama Konsantrasyon Değerlerinin Değerlendirilmesi

Sabit partikül debisinde (a) ve hava debisi ile orantılı partikül debisi (b) şartlarında mahal içi ortalama konsantrasyon miktarları Şekil 24’te verilmiştir. Sabit partikül debisi (a) durumunda en yüksek konsantrasyon değeri en düşük HDK değerinde 0.181 μm için elde edilmiştir. Ayrıca, çalışılan tüm HDK değerlerinde partikül çapı azaldıkça konsantrasyon miktarının arttığı ve HDK değerindeki artış ile konsantrasyon değerlerinin tüm çaplar için azaldığı ifade edilebilir. Artan HDK ile konsantrasyon değerlerindeki azalma sabit oranlı bir davranış göstermemektedir. Örnek olarak 0,181 μm ele alınırsa, HDK=1.73 ile HDK=2.88 arasında hızdaki artış %66, ortalama konsantrasyondaki düşüş %37.5 düzeyindedir. Bu durumda, hava hızındaki değişim ile konsantrasyon miktarındaki değişimin oranı 1.76 seviyesine ulaşmaktadır. Bu oran hava hızı arttıkça artmakta (HDK=2.88 ile HDK=5.76 için 1.89, HDK=5.76 ile HDK=7.68 için 2.14) ve hava

hızındaki artışın konsantrasyon miktarındaki azalma seviyesini düşürdüğünü göstermektedir. Diğer bir ifadeyle HDK artışı etkinliğini yitirmektedir. İlgili oran diğer partikül çaplarında ise Tablo 14'te verildiği gibi bu davranışa zıt bir karakter sergilemektedir.



Şekil 24. (a) Sabit kütleli partikül debisi ve (b) HDK ile orantılı kütleli partikül debisinde mahal içi ortalama konsantrasyon değerleri

Şekil 24(a)'da görüldüğü üzere en düşük HDK değerinde ortalama konsantrasyon değerleri arasındaki yüksek fark artan HDK ile azalmaktadır. Azalma oranı küçük çaplı partiküller için büyük çaplı partiküllere oranla daha yüksektir. Buna bağlı olarak HDK artışının küçük çaplı partiküller için ortalama konsantrasyon seviyesini azaltmada daha etkin olduğu söylenebilir. Şekil 24(b)'de görüldüğü üzere partikül salınım değeri hava hızı ile orantılı şekilde arttırıldığında mahal içi ortalama konsantrasyon değerleri de her bir partikül çapı için genel olarak artmaktadır. Bu noktada ilgili davranış dikkati çeken bir nokta olmaktadır. Ortama verilen hava ve partikül oranı sabit tutulduğu için ortalama konsantrasyon miktarında bir değişim olmaması beklenecektir. Fakat HDK arttıkça ortalama konsantrasyonda gözlenen artış süpürmenin daha başarısız olduğunu göstermektedir.

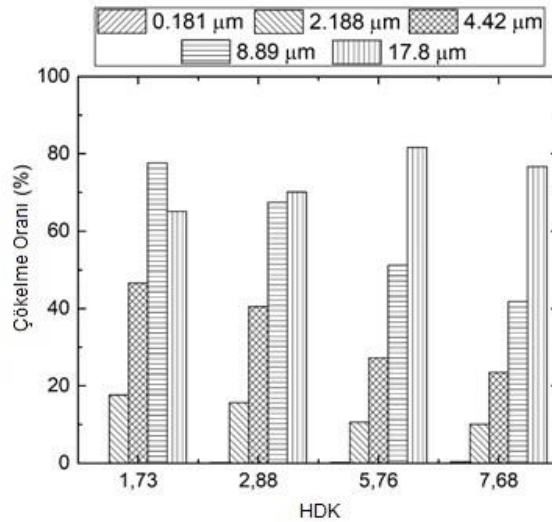
Tablo 14. Hava hızındaki artış oranının ortalama konsantrasyon değerindeki azalışa oranı

	2.18 µm	4.42 µm	8.89 µm	17.8 µm
HDK=1.73-2.88	2.2	2.91	18.53	33
HDK=2.88-5.76	2.017	2.27	3.09	2.94
HDK=5.76-7.68	1.923	2.06	2.58	2.49

Sonuç olarak, artan HDK değerinin her durumda bir seyrelme parametresi olmadığı net bir şekilde görülmektedir. Partikül salınım değerinin değişken olduğu durumda HDK değerini arttırmak daha temiz bir iç ortam yaratmakta yetersiz kalabilmektedir. Bilindiği üzere mahal içi akış alanı giriş-çıkış menfez konumlarına bağlı olarak gelişmektedir. Bu noktada daha derinlemesine bir değerlendirme HDK değerinin yanı sıra hava değişim verimliliği de incelenerek yürütülebilir.

3.1.1.5. Çökeltme Oranının Değerlendirilmesi

Şekil 25’te farklı HDK değerlerinde partikül çökeltme oranları verilmektedir. 0.181 μm için çökeltme oranı % 0.05-0.36 mertebesinde olup bu durum ilgili partiküllerin çıkış menfezi vasıtası ile neredeyse tamamen mahali terk ettiğini göstermektedir. Diğer partikül çaplarında (2.188, 4.42 ve 8.89 μm) HDK değerindeki artışla beraber daha az çökeltme görülmektedir. 17.8 μm için ise çökeltme miktarındaki değişim belirgin bir davranış sergilememektedir. HDK=5.76 değerine kadar çökeltme oranı artış gösterirken bu değerden sonra diğer çap değerlerindeki gibi genel azalış davranışı ortaya çıkmaktadır. Bu durum daha önceki bölümlerde açıklanan çıkış menfezi yakınlığında birikimin bir neticesidir. Akış alanı boyunca düşük momentum neticesinde sürüklenemeyen partiküller çıkış menfezinden ortamı terkederek beklenenden daha düşük bir çökeltme oranına sebep olmaktadır.



Şekil 25. Partikül çökeltme oranları

Hava hızı ve türbülans değerlerinin çökeltme oranında etkili olduğu bilinmektedir (Mosley vd., 2001; Thatcher vd., 2002). Bu ilişkinin bir takım çalışmalarda doğru orantılı (Nomura vd., 1997; Gong vd., 2009; Hussein vd., 2009) olduğu belirtilse de ilgili değişimin ters orantılı olduğunu ifade etmek de (Thatcher ve Layton, 1995) mümkündür. Hatta çökeltme oranı ve hava hızı arasında herhangi bir ilişkinin olmadığını belirten bir çalışma (Howard-Reed vd., 2003) da bulunmaktadır. Literatürdeki bu çelişkili bulgular genel olarak ölçüm yöntemi, partikül tipi, boyutu veya oda geometrisi gibi farklı değişkenlerle ilişkilendirilmektedir. Söz konusu çalışmaların tek bir menfez konumunu içerdiği de not edilmelidir. Bouilly vd.'nin (2005) farklı menfez konumlarını da bir değişken olarak göz önüne alan deneysel ve sayısal çalışmasında ise hava hızı-çökeltme oranı ilişkisinin menfez konumuna bağlı olacak şekilde doğru veya ters orantılı olabileceği gösterilmiştir. Bu manada çökeltme oranına ilişkin yukarıda ifade ettiğimiz bulgular çalıştığımız geometri ve parametreler özelinde değerlendirilmelidir.

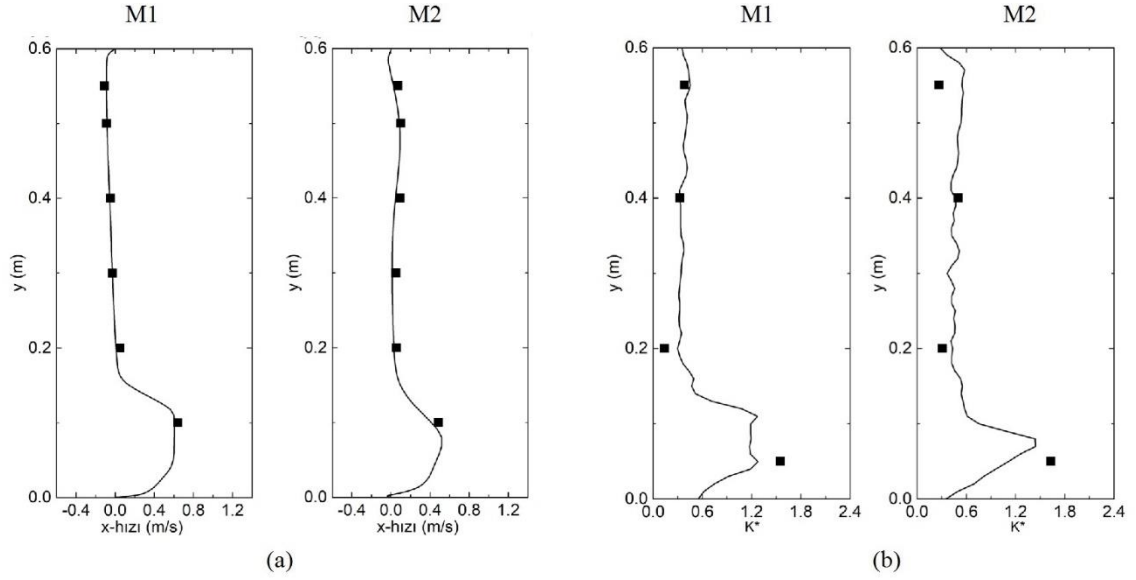
3.1.2. Hava Değişim Katsayısı Kirletici Kaynak Konumu İlişkisinin İncelenmesi

Bu bölümde HDK' nin kirletici dağılımına etkisi mahal içi farklı partikül kaynak konumları açısından değerlendirilmektedir. Sayısal sonuçların deneysel verilerle doğrulanmasının ardından ilk olarak hava dağılımı ve hava yaşı ele alınmıştır. İncelenen akış alanı dikkate alınarak iki farklı kirletici konumu farklı HDK değerlerinde ayrı ayrı değerlendirilerek mahal içi ortalama konsantrasyon değeri karşılaştırılmıştır.

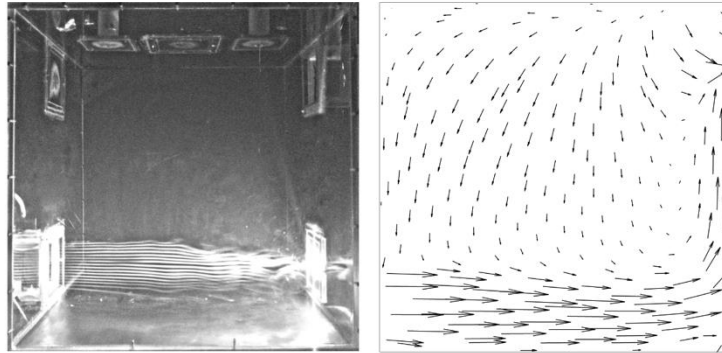
3.1.2.1. Sayısal Modelin Doğrulanması

Tercih edilen sayısal yaklaşımın doğrulanması için ilgili ölçüm istasyonlarında elde edilen deneysel veriler ve simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Ölçümler $Re=23257$ ($u_0=0.6$ m/s) ve 0.5 μ m partiküller için yürütülmüştür: Şekil 26'da sırasıyla, x-hızı ve giriş değerine göre boyutsuzlaştırılmış partikül konsantrasyon değerleri verilmektedir. Görüldüğü üzere yerel hız ve konsantrasyon değerleri birbiri ile yüksek bir uyum içerisindedir. x-hızı değerleri giriş menfezine yakın noktalarda ve menfez iz düşümü boyunca, beklendiği üzere, daha yüksek değerler almakta bu bölge dışında ise hız değerleri sifira yakınsamaktadır. Benzer şekilde, partiküller giriş havası ile mahale verildiklerinden dolayı hava hızının yüksek olduğu bölgelerde yüksek konsantrasyon değerlerine

ulaşmaktadır. Yerel istasyonlar üzerinden yakalanan yüksek uyum, sayısal çözümün ilgili hız ve konsantrasyon alanlarının eldesine gayet başarılı cevap verdiğini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Şekil 27’de akış görseli ve orta ekseninde vektörel formda akış dağılımı görülmektedir. Giriş menfezi doğrultusunda görülen hava jeti yüksek momentum etkisi ile karşı dik duvara doğru hareket etmektedir. Dik duvarla beraber yukarı yönlü bir hareket sergileyen jetin hızı azalmaktadır. Bu alanlar dışında düşük hızlarda aşağı yönlü bir hava hareketinden söz etmek mümkündür.



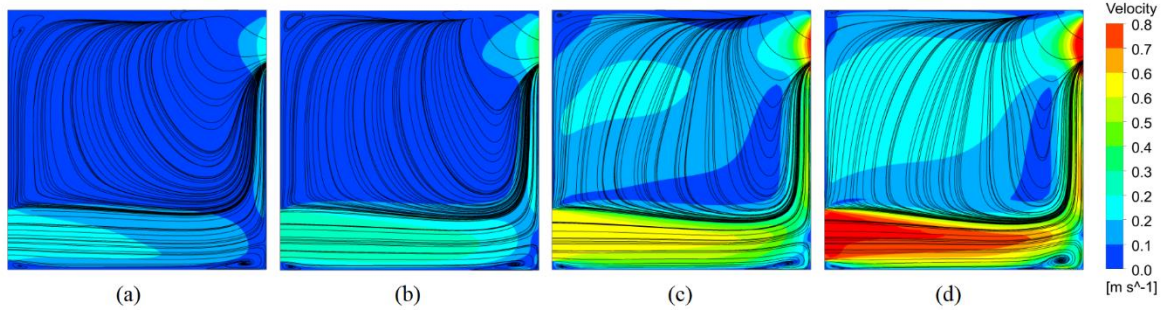
Şekil 26. Deneysel (sembol) ve sayısal (çizgi) (a)x hızı ve (b) boyutsuz konsantrasyon değerleri



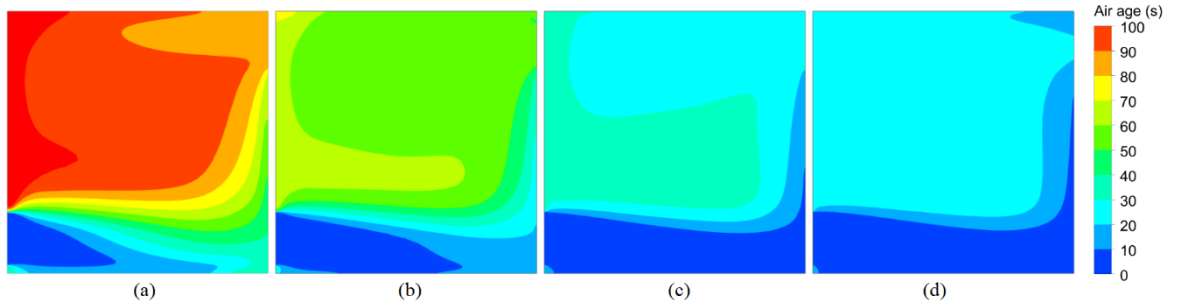
Şekil 27. Görsel ve vektörel formda akış alanı

3.1.2.2. Hava Hızı ve Hava Yaşı Dağılımının Değerlendirilmesi

Farklı HDK değerlerinde oda orta düzleminde elde edilen akım çizgileri Şekil 28'de verilmektedir. Hava hızındaki artışa rağmen hava giriş menfezi boyunca akım çizgilerinin formunda bir değişiklik olmadığı, odanın üst bölgelerinde ise kısmen farklı yönelimler görüldüğü ifade edilebilir. Şekil 29'da verilen eş hava yaşı eğrilerine dikkat edilirse, hava yaşının en küçük değerleri beklendiği üzere giriş menfezi boyunca elde edildiği bununla beraber akım çizgileri ile uyumlu olacak şekilde sağ duvardan çıkış menfezi yüksekliğine kadar olan akım bölgesinde hava yaşının arttığı görülmektedir. Akım çizgilerine ve hava yaşı eğrilerine göre ölü bölgeler olarak tanımlayacağımız odanın sol duvar yakınında hava yaşı en yüksek değeri almaktadır. Hava hızının artışı ile tüm akış alanı için hava yaşında bir iyileşme gözlenmektedir.



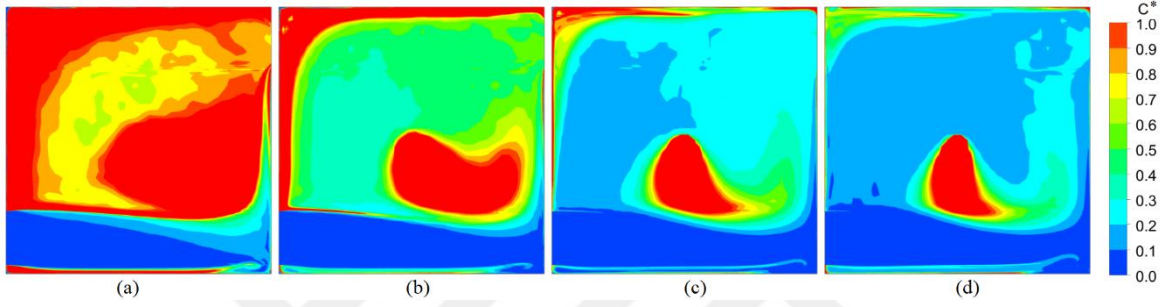
Şekil 28. Farklı HDK değerlerinde oda orta düzleminde hız konturları ve akım çizgileri (a)1.73 (b)2.88 (c)5.76 (d)7.68



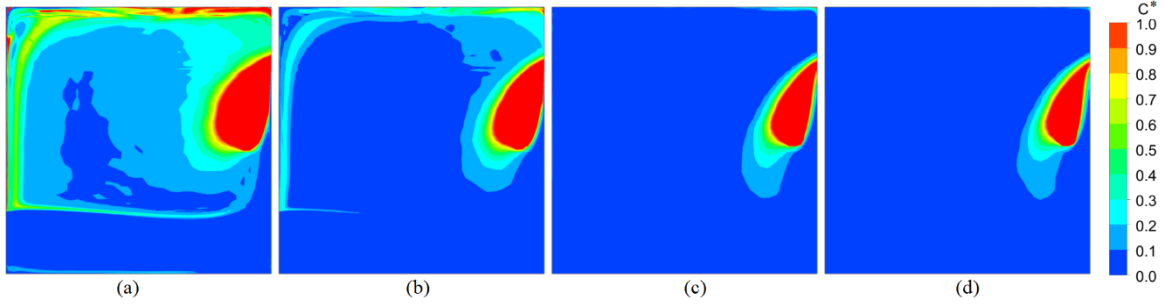
Şekil 29. Farklı HDK değerlerinde oda orta düzleminde hava yaşı konturları (a)1.73 (b)2.88 (c)5.76 (d)7.68

3.1.2.3. Konsantrasyon Dağılımının Değerlendirilmesi

HDK değerlerinin farklı noktalardaki kirletici kaynaklarına bağlı olarak kirletici uzaklaştırma performanslarını karşılaştırmak adına iki farklı noktadan kirletici salınımı değerlendirilmiştir. Bu noktalardan biri incelenen akış alanı da dikkate alınarak odanın tam orta noktası diğeri ise ana akım içerisinde yer alacak şekilde orta noktadan geçen yatay hat boyunca sağ duvara 5 cm uzak olacak şekilde belirlenmiştir.



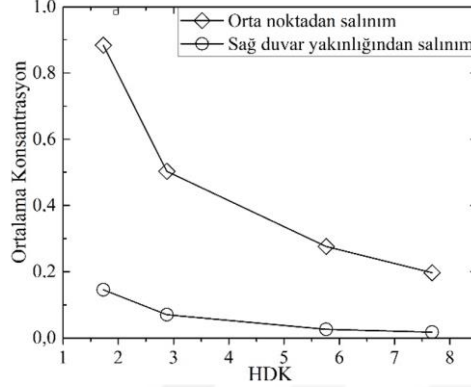
Şekil 30. Orta noktadan partikül salınımı durumunda konsantrasyon dağılımı



Şekil 31. Ana akış bölgesinden partikül salınımı durumunda konsantrasyon dağılımı

Şekil 30 ve Şekil 31’de sırasıyla, oda orta noktasından ve sağ duvar yakınlığından partikül salınımı olması durumlarında oda orta düzleminde elde edilen eş konsantrasyon eğrileri verilmektedir. Konsantrasyon değerleri $Re=1520$ için hava debisi başına düşen konsantrasyon salınım değerine göre normalize edilmiştir. Her iki durumda da, giriş boyunca temiz hava sebebi ile partikül bulunmayan bir bölge olduğu görülmektedir. Mahalin geri kalanında ise, en düşük HDK değerlerinde, konsantrasyon değerlerinin yüksek olduğu artan hava hızı ile beraber kirleticilerin daha iyi bir şekilde uzaklaştırıldıkları ifade edilebilir. Bu noktada, ana akış hattı üzerinde bulunan kirletici durumu için artan HDK ile seyrelmenin daha iyi gerçekleştiği ayrıca yine en düşük HDK

değerinde kirleticinin orta noktada bulunduğu duruma göre daha düşük bir konsantrasyon elde edildiği görülmektedir.



Şekil 32. Farklı kirletici kaynak durumları için ortalama konsantrasyon değerlerinin artan HDK ile değişimi

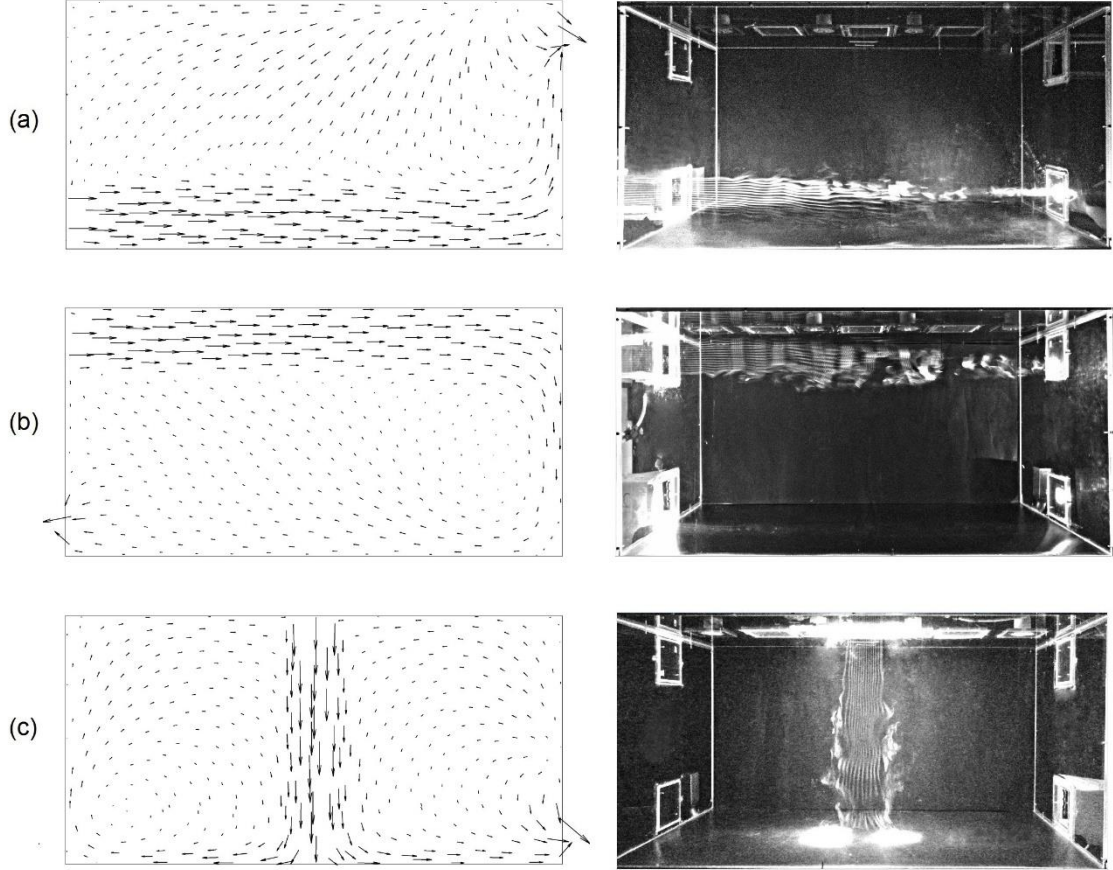
Her iki kirletici salınım konumu için, oda içi ortalama konsantrasyon değerlerinin artan HDK'ye bağlı değişimi Şekil 32'de verilmektedir. Orta noktadan salınım durumu için en düşük HDK değerinde en yüksek konsantrasyon miktarına ulaşılmaktadır. Artan HDK ile beraber yüksek bir düşüş eğilimi gözlenmekte ve en yüksek HDK ile beraber ilk konsantrasyon değerine oranla yaklaşık %75'lik bir iyileşme elde edilmektedir. Bu orana rağmen, orta noktadan kirletici salınımı durumunda hiçbir HDK değerinde ana akış bölgesinde elde edilen ortalama konsantrasyon değerlerine ulaşamadığı vurgulanmalıdır. Sağ duvar yakınından kirletici salınımı durumunda ise ortalama konsantrasyon miktarındaki azalmanın ilk salınım durumuna göre oldukça sınırlı olduğu görülmektedir.

3.2. Menfez Konumu Etkisinin İncelenmesi

Menfez konumu etkisinin farklı kirletici kaynak konumlarına bağlı olarak mahal içi kirletici dağılımına etkisi “2.4.2 Menfez Konumu Etkisinin İncelenmesi” bölümünde detayları verilen konfigürasyonlar ve işletme parametreleri için gerçekleştirilmiştir. Buna bağlı olarak ilk kısımda deneysel ölçümlerin sayısal sonuçları ile karşılaştırması sunulmuştur. Ardından ilk olarak çalışılan 10 farklı menfez konumu altında oluşan hava hızı, hava yaşı dağılımları ve hava değişim verimi (HDV) incelenmiştir. Kirletici kaynak konumlarına bağlı olarak farklı menfez konfigürasyonları ile oluşan konsantrasyon dağılımları karşılaştırmalı olarak irdelenmiş ve son olarak arınım süreçleri ele alınmıştır.

3.2.1. Sayısal Modelin Doğrulanması

İzotermal akış için $Re=23257$ değerinde her üç menfez düzenlemesinde elde edilen akış görüntüleri, hız ve konsantrasyon değerleri sayısal sonuçlarla karşılaştırılarak sırayla Şekil 33, Şekil 34 ve Şekil 35'te verilmiştir.



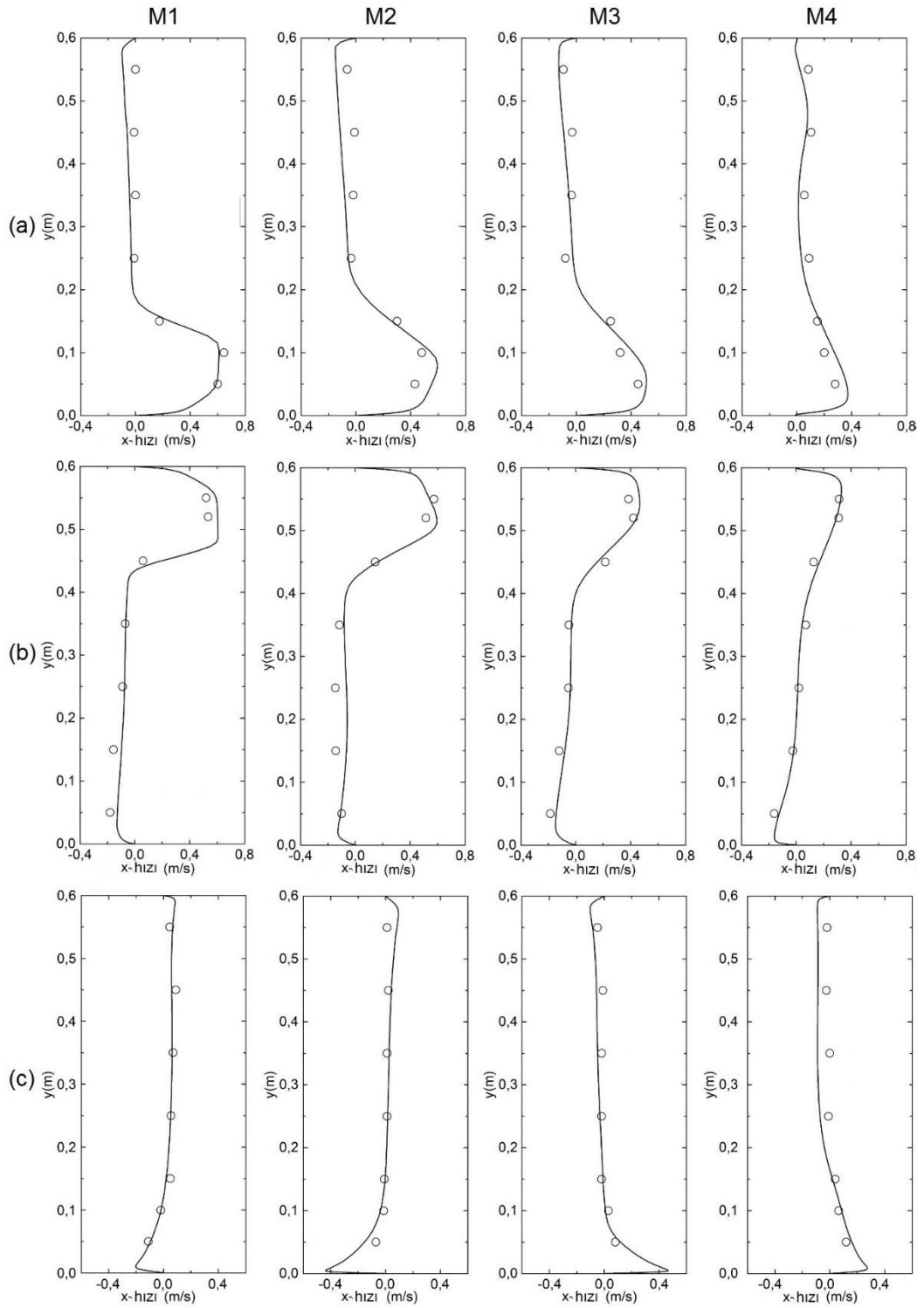
Şekil 33. Hız vektörü ve akış görselleri. Menfez konumları (a)14, (b)21, (c)35

Şekil 33'te verilen akış görüntülerine bağlı olarak izotermal akışta hava jetinin herhangi bir yönelim göstermeden giriş menfezi doğrultusu boyunca ilerlediği görülmektedir. İlgili hız vektörleri yine giriş menfezi boyunca hız değerlerinin beklendiği üzere odadaki diğer bölgelere oranla daha yüksek olduğunu göstermekte olup hava jetine ait görüntüler ile uyumlu görünmektedir.

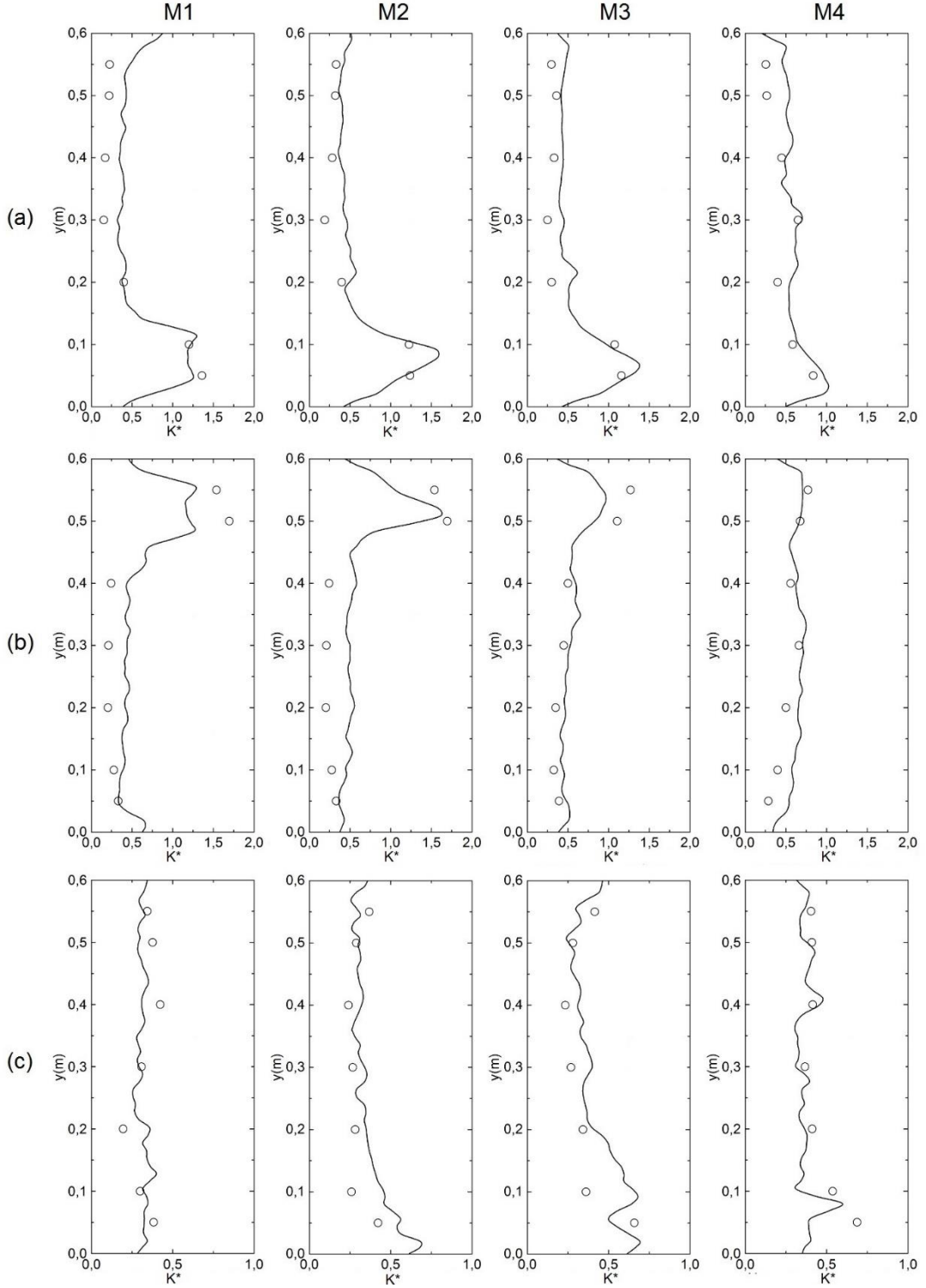
Şekil 34'te (a)14, (b)21, (c)35 menfez konumları için dört farklı ölçüm istasyonunda (M1-M2-M3-M4) ölçülen x-hızı değerleri sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmaktadır. Genel olarak ölçüm değerlerinin sayısal simülasyon sonuçları ile gayet uyumlu olduğu ifade

edilebilir. (a)14 ve (b)21 için giriş menfezi yakınlığında ölçülen yüksek hız değerlerinin giriş menfezinden uzaklaştıkça azaldığı görülmektedir. Aynı iki durum için jet profillerinin Coanda etkisi ile yakınında buldukları yatay yüzeylere yapışma eğilimi açık bir şekilde görülmektedir. Çarpma hava jeti uygulaması benzeri (c)35 için ise beklendiği üzere çarpma bölgesinde en yüksek x-hızı değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. Burada çarpmanın sol bölümünde oluşan hız değerlerinin çıkış menfezinin yer aldığı sağ bölgedeki hız değerlerinden daha düşük olduğu not edilmelidir.

Şekil 35'te ifade edilen konsantrasyon değerleri ise partiküller odaya giriş havası ile verildiğinden ötürü yüksek hız değerlerinin olduğu noktalarda yüksek konsantrasyon değerlerine erişildiğini göstermektedir. Hava jeti benzeri (c)35 durumunda görece en yüksek konsantrasyon değerlerine çarpma bölgesinde (M2 ve M3 istasyonları için $y < 0.2$ m) erişildiği ifade edilebilir. Özet olarak, ölçümler ve sayısal sonuçlar genel olarak birbiri ile uyumlu bir dağılım sergilemektedir. Buna bağlı olarak sayısal yaklaşımın izotermal akış şartları için doğru sonuçlar verdiği ifade edilebilir.



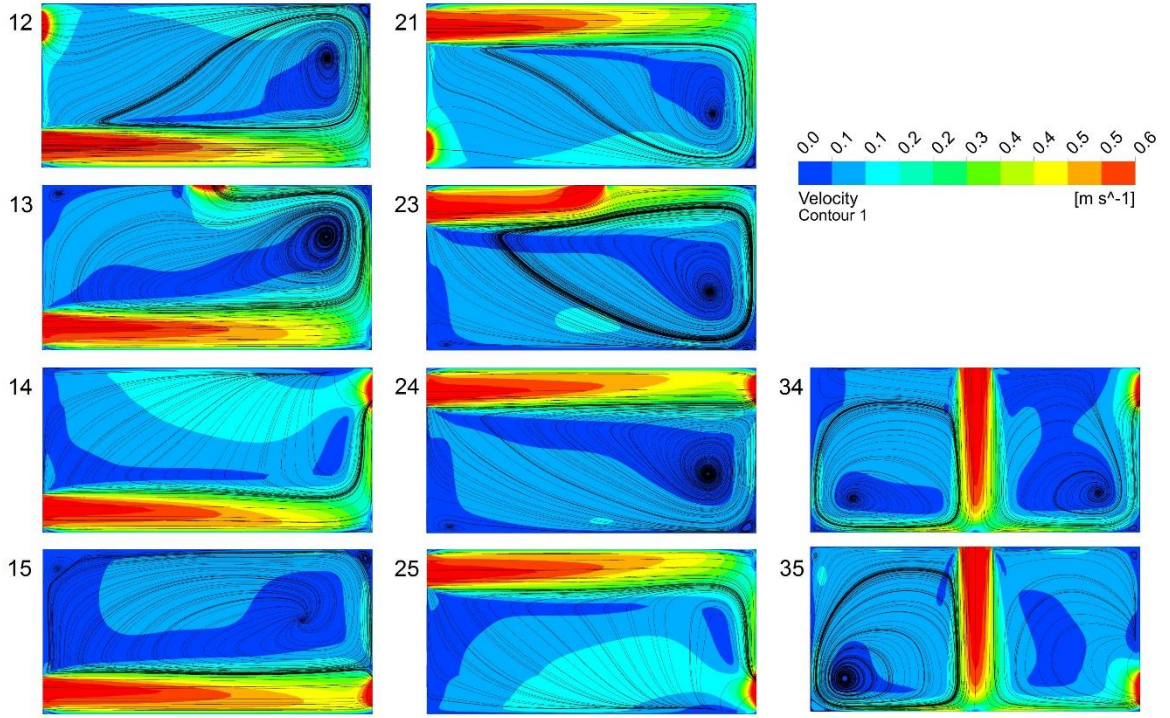
Şekil 34. Deneysel (sembol) ve sayısal (çizgi) x-hızı değerlerinin karşılaştırılması. Menfez konumları (a)14, (b)21, (c)35



Şekil 35. Deneysel (sembol) ve sayısal (çizgi) boyutsuz konsantrasyon değerlerinin karşılaştırılması. Menfez konumları (a)14, (b)21, (c)35

3.2.2. Hava Hızının ve Hava Yaşı Dağılımlarının Değerlendirilmesi

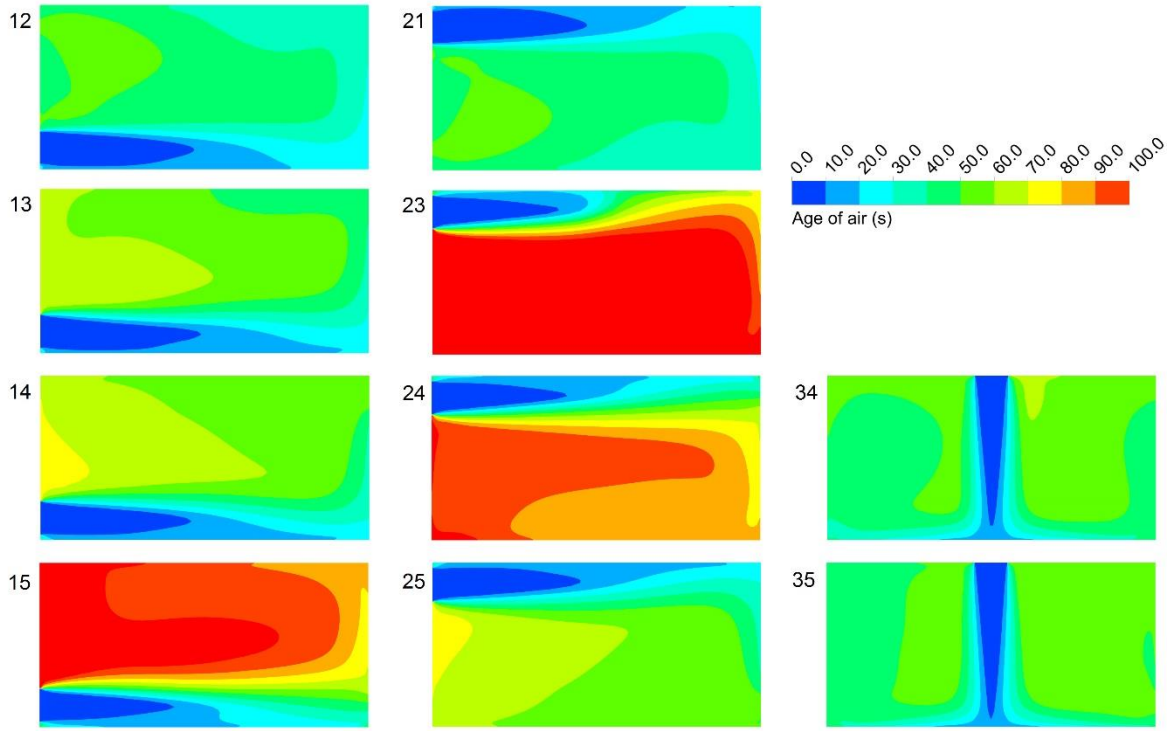
Şekil 36'da çalışılan her menfez konumu durumunda elde edilen hız dağılımı ve akım çizgileri görülmektedir. Görüldüğü üzere hava jeti giriş menfezine bağlı olarak menfez doğrultusunda gelişmektedir. Mahal içinde daha düşük hava hızlarının görüldüğü bölgelerde ise dağılım çıkış menfezi konumuna bağlı olarak şekillenmektedir. Menfezlerin karşılıklı dik duvarlarda konumlandığı 14 ve 25 durumlarında diğer durumlarda görülen resirkülasyon bölgesinin ortadan kalktığı ifade edilebilir. Orta sütundaki 23 durumunda ise çıkış menfezi bir by-pass hattı oluşturmakta ve jetin gelişimini akışı kısa devre yaparak engellemektedir. Benzer şekilde 15 ve 24 durumlarında da karşılıklı duvarlarda aynı yükseklikte konumlanmış giriş çıkış menfezleri hava jetinin etkili bir karışım performansı sergilemesini engellemektedirler. Sağ kolonda görülen çarpan jet uygulamasına benzer akış yapısı mahali ikiye ayırmaktadır. 35 durumunda ise zemin yakınlığında olan çıkış menfezi 34 durumunda görülen resirkülasyon bölgesini ortadan kaldırmıştır. İlgili hava jeti yapısının diğer iki kolonda duvar yakınlığında gelişen jet uygulamalarında olduğu gibi sürtünme kaynaklı momentum kaybı yaşamayacağı not edilmelidir. Bu noktada hava dağılımının genel performansı hava yaşı değerlerine bağlı olarak her bir menfez konfigürasyonunda oluşan hava yaşı dağılımı orta düzlem için Şekil 37'de verilmiştir. 15, 23 ve 24 konfigürasyonları mahal genelinde en yüksek hava yaşı değerleri ile dikkati çekmektedir.



Şekil 36. Menfez konumlarına bağlı olarak oda orta düzleminde elde edilen hız konturları ve akım çizgileri

Tablo 15 ve Tablo 16’da tüm menfez durumları için sırasıyla solunum yüksekliğinde ortalama hava yaşı ve mahal için hava değişim verimi değerleri görülmektedir. Solunum yüksekliğinde en taze hava 12, 21, 34 ve 35 durumlarında elde edilmiştir. Aynı konfigürasyonlar en yüksek hava değişim verimini de sağlamaktadırlar. Daha önce ifade edildiği üzere hava jeti hareketlerinin engellendiği veya sınırlandırıldığı 15, 23 ve 24 durumlarında ise hem ortalama hava yaşı hem de hava değişim verimi için en düşük değerler elde edilmiştir.

Giriş/çıkış menfez konumları açısından değerlendirildiğinde, tam bir resirkülasyona izin verecek şekilde menfezlerin aynı duvarda bulunduğu durumlarda en yüksek havalandırma performanslarına ulaşıldığı ifade edilebilir. Çıkış menfezleri ilk durumda oluşan akım çizgilerini geriye doğru takip ederek giriş menfezine yaklaştıkça oluşan bypass bölgeleri neticesinde havalandırma performansı adım adım azalmaktadır.



Şekil 37. Menfez konumlarına bağlı olarak oda orta düzleminde elde edilen hava yaşı konturları

Tablo 15. Hava yaşı (s)

12	45.87	21	46.01		
13	59.02	23	116.66		
14	65.99	24	96.38	34	47.88
15	100.34	25	64.47	35	50.84

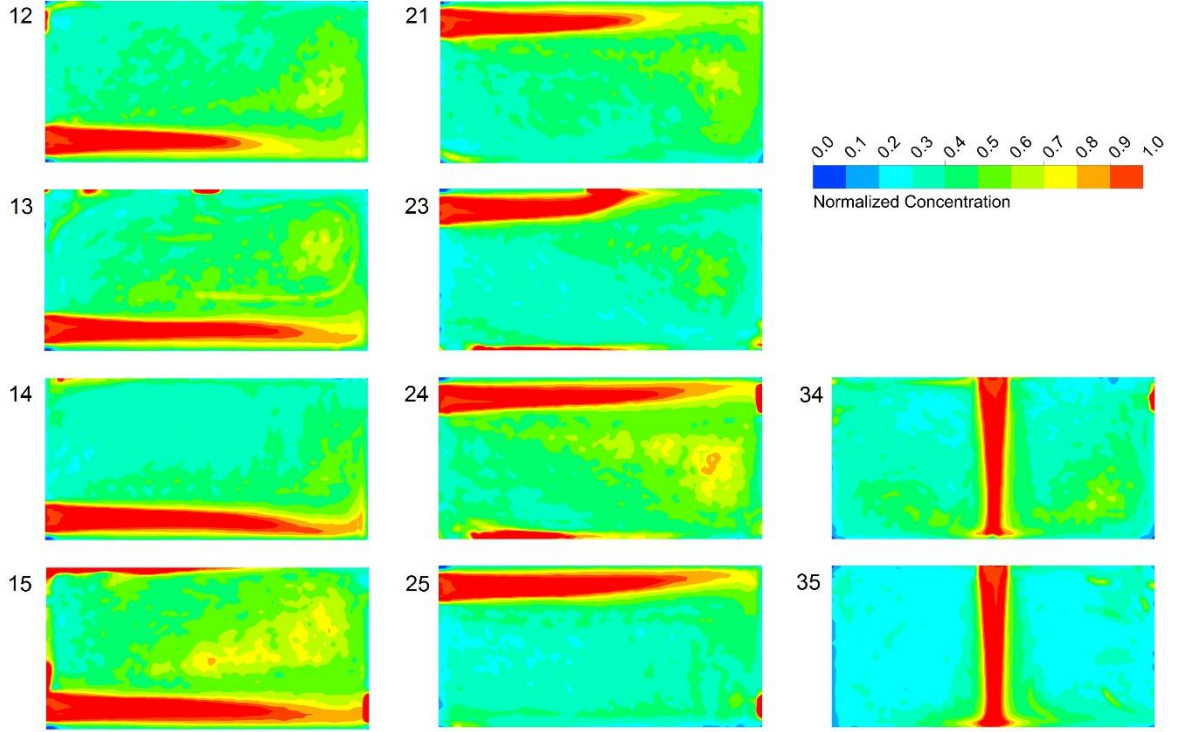
Tablo 16. Hava değişim verimi (HDV)

12	0.586	21	0.587		
13	0.463	23	0.248		
14	0.409	24	0.293	34	0.526
15	0.278	25	0.417	35	0.518

3.2.3. Farklı Kaynak Konumlarına Göre Kirletici Dağılımının Değerlendirilmesi

Kirleticilerin giriş menfezinden üfleme havası ile ortama salındığı durumda oda orta düzleminde görülen konsantrasyon dağılımı Şekil 38’de verilmektedir. Görüldüğü üzere,

sürüklenme kuvveti etkisiyle partiküller ağırlıklı olarak hava akımını takip etmektedirler ve en yüksek konsantrasyon değerleri hava jeti doğrultusunda elde edilmektedir. Şekil 36'da verilen resirkülasyon hücrelerinin bulunduğu bölgelerde ise partikül birikimleri dikkati çekmektedir.



Şekil 38. Menfez konumlarına bağlı olarak oda orta düzleminde elde edilen konsantrasyon konturları

Kirleticilerin giriş havası ile ortama verildikleri durumda, sırasıyla mahal içi ve solunum yüksekliğinde elde edilen konsantrasyon değerleri normalleştirilmiş formda sırasıyla Tablo 17 ve Tablo 18'de verilmektedir. Tablolarda en yüksek değer kısa devre akışının görüldüğü 15 ve 24 durumlarında elde edilmektedir. Şekil 38'de ilk iki kolondaki görseller Tablo 17 ve Tablo 18 ile beraber değerlendirildiğinde resirkülasyon bölgelerinin partikül barınımına katkı sağladıkları ifade edilebilir. Ayrıca resirkülasyon yapısının bulunmadığı 14 ve 25 durumları ile mahal içinde bütün bir resirkülasyon rotasına izin verilen 12 ile 21 durumlarında ise ilk iki kolon için en düşük konsantrasyon değerlerine erişilmektedir. 23 durumu göz önüne alındığında çıkış menfez konumunun hava jetinde olduğu gibi partiküllerin yayılımını engelleyerek mahalden uzaklaştırılmalarına yardımcı olduğu görülmektedir.

Tavandan beslemenin yapıldığı 34 ve 35 durumları hem mahal içi konsantrasyon değeri açısından hem de solunum yüksekliği konsantrasyon değeri açısından değerlendirildiğinde, çalışılan tüm menfez kombinasyonları için en düşük değerleri sunduğu görülmektedir. Bu iki durumda partiküller diğer konfigürasyona oranla hava jeti ile beraber daha kısa bir mesafe kat etmekte ve dolayısı ile bu güzergah üzerinde hava ile daha az etkileşime girmektedirler. Buna ek olarak 35 durumunda çıkış menfez konumu, çarpan hava jeti sonrası oluşan duvar jetinin taşıdığı partiküllerin uzaklaştırılmasına yardımcı olarak tüm kombinasyonlar arasında en iyi kirletici uzaklaştırma performansını sergilemektedir. Buradaki kilit yaklaşım giriş ile mahale giren partiküllerin oluşturulacak en kısa güzergah üzerinden odayı terk etmesinin sağlanmasıdır. Böylece daha düşük konsantrasyon değerlerine ve daha temiz bir iç ortama ulaşıldığı ifade edilebilir.

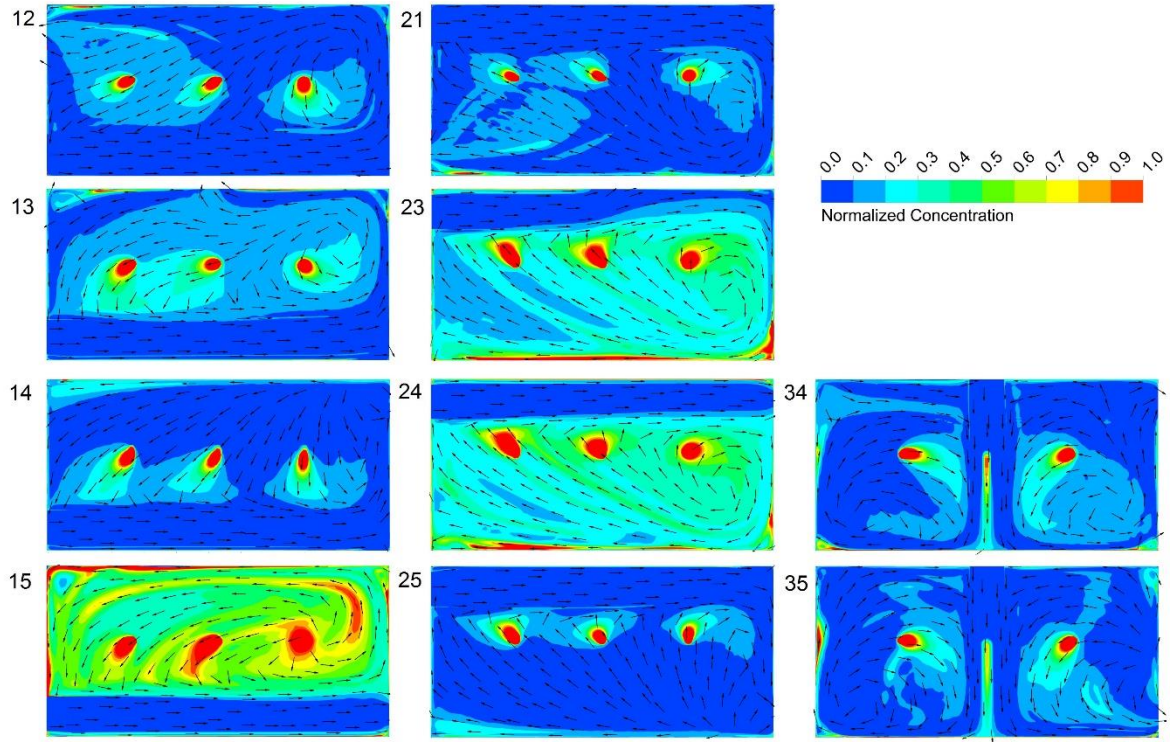
Tablo 17. Mahal içi boyutsuz ortalama konsantrasyon değeri

12	0.45	21	0.46		
13	0.51	23	0.41		
14	0.43	24	0.53	34	0.38
15	0.54	25	0.41	35	0.34

Tablo 18. Solunum yüksekliğinde boyutsuz konsantrasyon değeri

12	0.43	21	0.47		
13	0.51	23	0.42		
14	0.40	24	0.58	34	0.34
15	0.59	25	0.39	35	0.31

Solunum yüksekliğinde bulunan noktasal kaynaklardan partikül salınımı yapıldığı durumda orta düzlemde oluşan konsantrasyon dağılımı ve boyutsuz hız vektörleri Şekil 39'da görülmektedir. İlk iki sütunda görüleceği üzere giriş menfezi boyunca partikülden arınmış bir alan oluşmaktadır. İlgili düzlemin geri kalan ve alansal olarak daha büyük olan kısmında ise konsantrasyon dağılımı çıkış menfezi konumuna göre değişiklik göstermektedir. Bu bölgelerdeki dağılım hız vektörleri yönleri ile benzerlik göstermektedir. Havalandırmanın yetersiz olduğu 15, 23 ve 24 durumlarında ise mahal konsantrasyonu yeteri kadar taze hava ile seyreltilmediği için ilgili konfigürasyonlarda yüksek konsantrasyon değerlerine ulaşıldığı görülmektedir.



Şekil 39. Solunum yüksekliğinde bulunan kirletici kaynakları durumunda oda orta düzleminde elde edilen konsantrasyon konturları

Solunum yüksekliğindeki ortalama konsantrasyon miktarı ve havalandırma sisteminin kirletici uzaklaştırma etkinliği sırasıyla Tablo 19 ve Tablo 20’de verilmektedir. Solunum yüksekliğinde en yüksek konsantrasyon değeri ve en düşük kirletici uzaklaştırma etkinliği tahmin edileceği üzere kısa devre akışlarının görüldüğü 15, 23 ve 24 durumlarında ortaya çıkmaktadır. Bu durumlar arasında ise, kirletici kaynaklarının hava jetinden en uzakta konumlandığı 15 durumu en olumsuz performansı göstermektedir. Duvar jetinin yer aldığı ilk iki kolon içinde en iyi havalandırma performansı bir bütün halinde resirkülasyonun gerçekleştiği 12 ve 21 durumlarında elde edilmektedir.

Giriş menfezinin tavanda bulunduğu 34 ve 35 durumlarında hava jeti yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere orta noktada bulunan kaynaktaki partikülleri zemine doğru süpürmektedir. Diğer kaynaklardan salınan partiküller ise lokal hava hareketleri ile uyumlu bir dağılım sergilemektedir. Tablo 19 ve Tablo 20’ye bağlı olarak nicel bir değerlendirme yapıldığında ise 34 ve 35 durumlarının çalışılan tüm menfez kombinasyonları içerisinde en iyi havalandırma performansını sergilediği anlaşılmaktadır. Buna ek olarak 34 ve 35 durumları arasında ise çıkış menfezinin zemin yakınında olduğu 35 durumu 34 durumundan daha iyi bir havalandırma performansı sağlamaktadır.

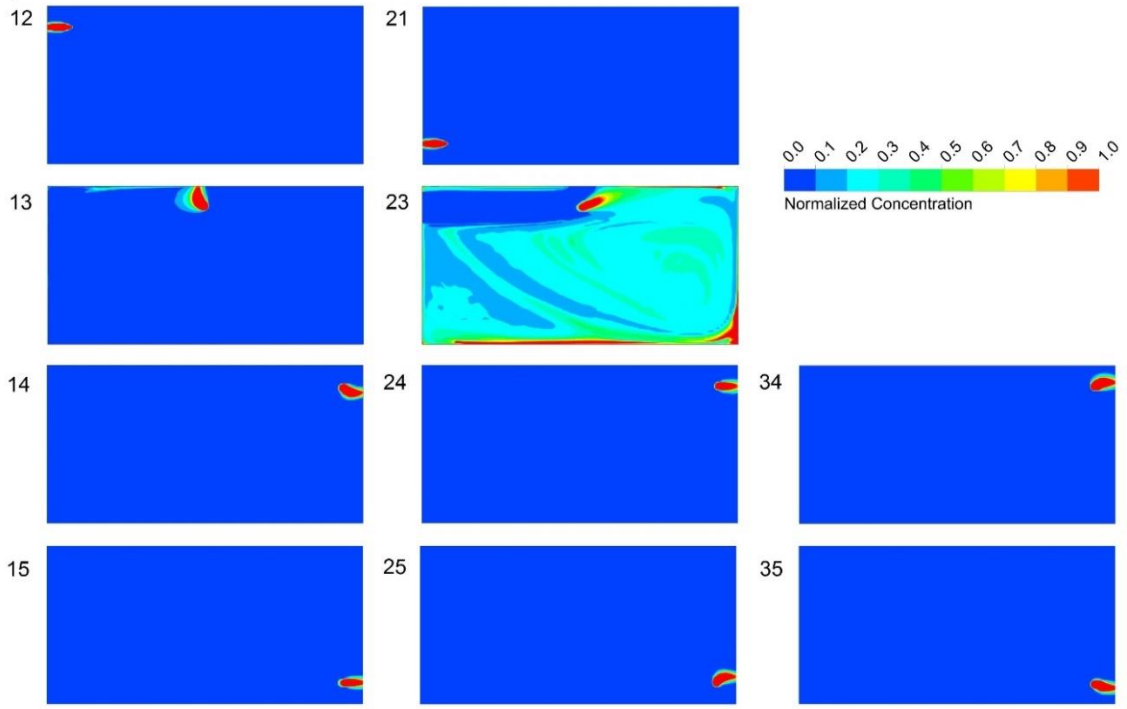
Tablo 19. Mahal içi boyutsuz ortalama konsantrasyon değeri

12	1.06	21	1.05		
13	1.61	23	2.92		
14	1.33	24	3.49	34	0.97
15	5.09	25	1.31	35	0.87

Tablo 20. Kirletici uzaklaştırma etkinliği (KUE)

12	0.96	21	0.93		
13	0.61	23	0.32		
14	0.37	24	0.28	34	0.83
15	0.20	25	0.67	35	0.94

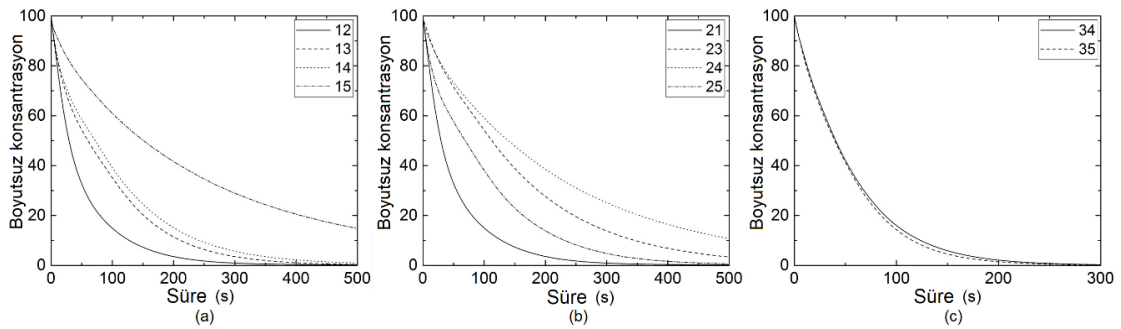
Kirletici kaynak konumu olarak çıkış menfezi yakınlığı ele alındığında ortaya çıkankonsantrasyon dağılımı oda orta düzlemi için Şekil 40'ta verilmektedir. Görüldüğü üzere 23 durumu dışında partiküllerin başarılı bir şekilde mahal havası ile en az temas sağlanarak uzaklaştırıldıkları ifade edilebilir. 23 durumunda ise partikül kaynak konumu çıkış menfezi yakınlığında olmasına rağmen hava jetinin doğrultusuna ve kaynak konumundaki hız dağılımına bağlı olarak partiküller odaya yayılmaktadır. Bu durumda, kirletici kaynak konumunun çıkış menfezi yakınlığında konumlandırılmasının ilgili noktadaki hız dağılımı göz önüne alındığında kirleticilerin etkin şekilde uzaklaştırılmasına yardımcı olabileceği ifade edilebilir.



Şekil 40. Çıkış menfezi yakınlığında bulunan kirletici kaynağı durumunda oda orta düzleminde elde edilen konsantrasyon konturları

3.2.4. Partikül Seyrelme Sürecinin Değerlendirilmesi

Şekil 41’de mahal içine homojen olarak dağıtılmış partiküllerin seyrelme süreçleri görülmektedir. Her bir grafikteki veriler çıkış menfez konumunun seyrelme sürecine etkisini göstermektedir. Daha nicel bir değerlendirme Tablo 21’de verilmiş olup, burada seyrelme zamanı ilk konsantrasyon değerinin %10’una ulaşılmasına kadar geçen süre olarak belirlenmiştir.



Şekil 41. Partikül seyrelme süreçleri

Şekil 41 ve Tablo 21’de görüldüğü üzere giriş ve çıkış menfezlerinin kirletici seyrelme sürecinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Tablo 21’de ilk iki sütunda duvar jeti uygulamaları için verilen seyrelme zamanları arasında en iyi performans giriş ve çıkış menfezlerinin aynı duvarda bulunduğu 12 ve 21 durumları için elde edilmektedir. Yine Tablo 21’den anlaşılacağı üzere çıkış menfez konumunun değişmesi ile beraber seyrelme süreci 5 kat artabilmektedir. Kısa devre akışlarının görüldüğü 15, 23 ve 24 durumlarında ise en yüksek seyrelme zamanları elde edilmiştir. Çalışılan tüm menfez kombinasyonları arasında ise en iyi performans giriş menfezinin tavan ortasında konumlandığı ve serbest hava jetinin yer aldığı 34 ve 35 durumlarında elde edilmiştir. Bunlar arasında ise çıkış menfezinin zemin yakınlığında yer aldığı 35 durumunda 34 durumuna göre kısmi bir iyileşmeden söz edilebilir.

Tablo 21. Partikül seyrelme zamanı (s)

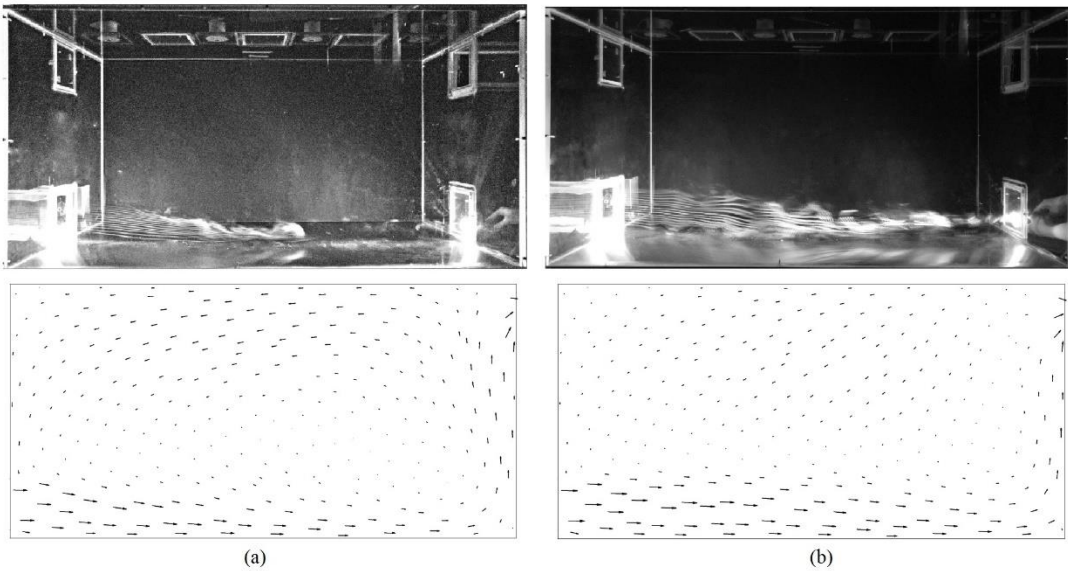
12	128	21	129		
13	211	23	347		
14	242	24	518	34	124
15	630	25	232	35	117

3.3. Deplasmanlı Hava Dağıtım ve Zeminden Isıtma Sisteminin Beraber Kullanıldığı Durumda Kirletici Dağılımının İncelenmesi

DHDS ve zeminden ısıtma uygulamasının beraber değerlendirildiği bu kısımda sayısal yaklaşımın doğrulanması “2.4.3 Deplasmanlı Hava Dağıtım ve Zeminden Isıtma Sisteminin Beraber Kullanıldığı Durumda Kirletici Dağılımının İncelenmesi” bölümünde verilen işletme parametrelerine bağlı olarak iki farklı üfleme hızı değerinde ((a)0.34 m/s, (b)0.73 m/s) tamamlanmıştır. Ardından sisteme ait hava değişim verimi (HDV) ve giriş menfezi ile ortama partikül yüklemesi yapılması durumunda elde edilen ortalama konsantrasyon değerleri karşılaştırılmıştır. Farklı kirletici kaynak konumları ve çıkış menfez pozisyonlarına bağlı olarak hesaplanan mahal ortalama konsantrasyon değeri, solunum yüksekliği için ortalama konsantrasyon değeri, kirletici uzaklaştırma etkinliği (KUE) ve çökeltme oranı sonraki bölümlerde sırayla sunularak kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir.

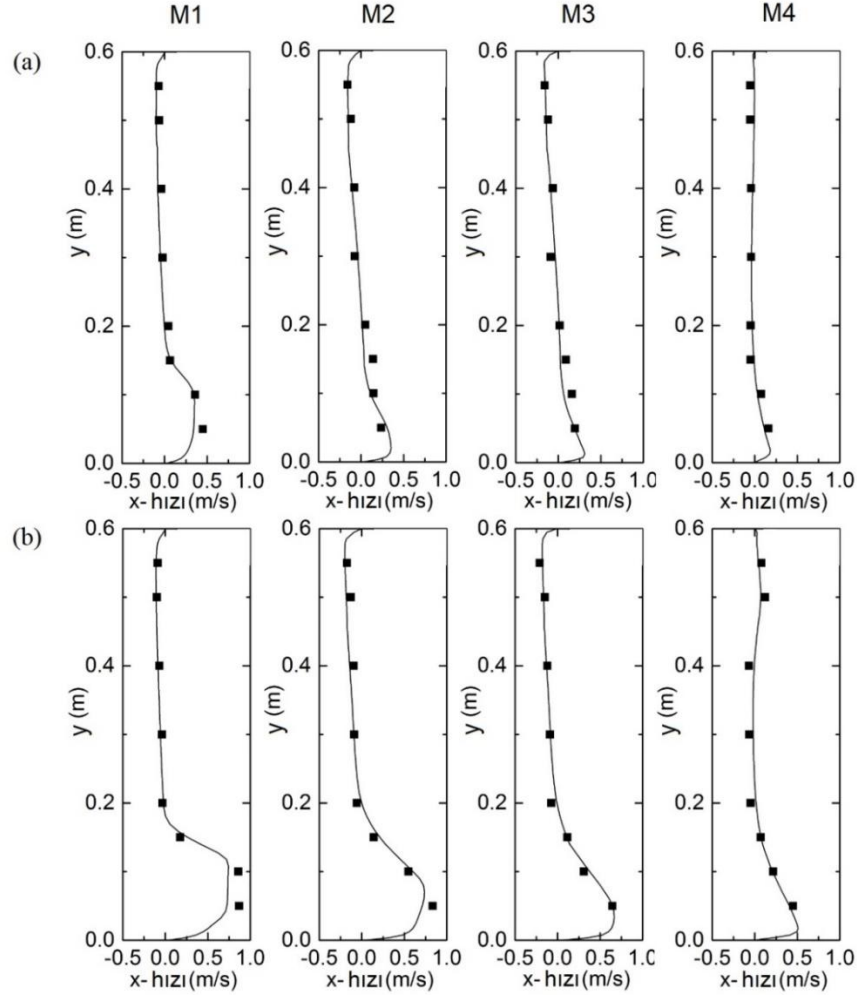
3.3.1. Sayısal Modelin Doğrulanması

Şekil 42’de iki farklı hız değeri için jete ait akış görselleri ve hız vektörleri dağılımı verilmektedir. Görüldüğü üzere hava jete menfezden mahale girdikten sonra hem Coanda etkisi hem de mahal ortalamasına oranla daha soğuk sıcaklığı nedeniyle negatif kaldırma kuvvetinin etkisi ile zemine tutunarak ilerlemektedir. Aynı şekildeki hız vektörlerine dikkat edilirse sağ dik duvara gelen akışkanın yön değiştirerek yukarı yönlü bir hareket sergilediği ve ardından mahali tavan yakınlığında konumlandırılmış çıkış menfezi vasıtası ile terk ettiği anlaşılmaktadır. Şekil 42(b) ele alınırsa daha yüksek hıza ve buna bağlı olarak daha yüksek momentuma sahip akışın yatay yönlü olarak Şekil 42(a)’ya nazaran daha ileriye taşındığı buna bağlı olarak duman yapısının da formunu daha ileri bir noktaya kadar koruyabildiği not edilmelidir. Genel manada hız vektörlerinin akış görselleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Vektör dağılımı incelendiğinde akış alanı boyunca en yüksek hızlara zemin yakınlığında erişildiği oda üst bölgelerinde ise giriş menfezi doğrultusuna oranla çok daha düşük hız değerlerinin yakalandığı anlaşılmaktadır. Hava akışının her iki durumda da giriş menfezi doğrultusunda yatay yönlü baskın bir figür sergilediği bununla beraber üst bölgelerden alt bölgelere neredeyse herhangi bir hava hareketinin olmadığı ifade edilebilir. Ayrıca, Şekil 42(b)’de görülen yüksek üfleme hızlarının gerçek bir uygulama için çeşitli konfor problemlerine yol açabileceği de unutulmamalıdır.

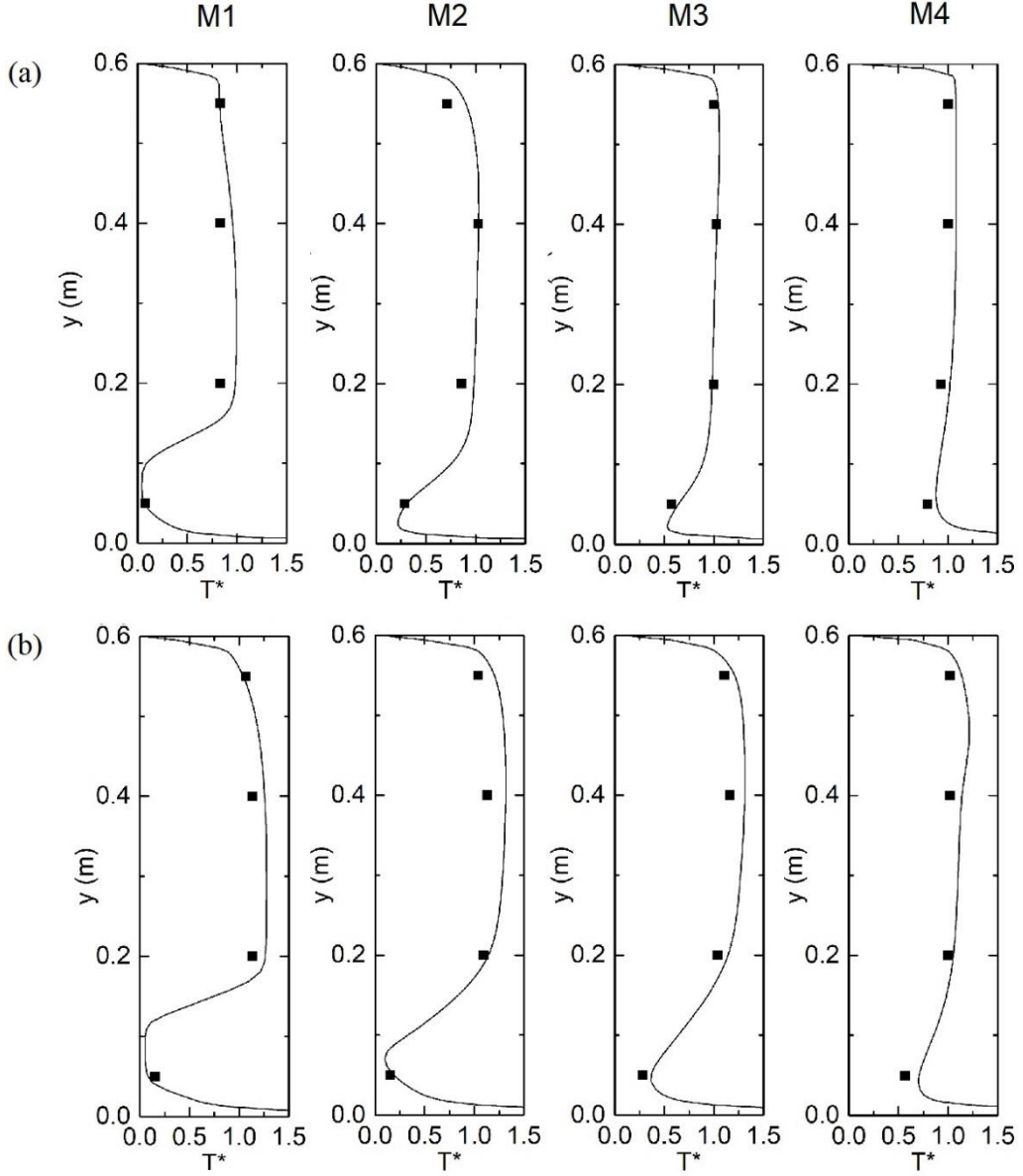


Şekil 42. (a)0.34 m/s ve (b)0.73 m/s için jet görselleri ve hız vektörleri dağılımı

Şekil 43'te (a)0.34 m/s ve (b)0.73 m/s üfleme hızları için elde edilen ölçüm değerlerine sayısal simülasyon sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Şekil 43(b)'de giriş hız değerine bağlı olarak daha yüksek x-hızı değerlerine ulaşıldığı ve bir bütün olarak deneysel sonuçların sayısal sonuçlar ile örtüştüğü açık biçimde görülmektedir. Her iki durumda da giriş menfezinden uzaklaştıkça akışın hız değerinin beklendiği üzere azaldığı anlaşılmaktadır. Şekil 44'te sırasıyla (a)0.34 m/s ve (b)0.73 m/s üfleme hızlarında elde edilen boyutsuz sıcaklık değerleri verilmiştir. Görüldüğü üzere deneysel ve sayısal sıcaklık profilleri birbiri ile uyumlu bir dağılım sergilemektedirler. İlgili dağılım karakteri benzer uygulamalarda elde edilen sıcaklık dağılımları ile de örtüşmektedir (Kosonen vd., 2017).

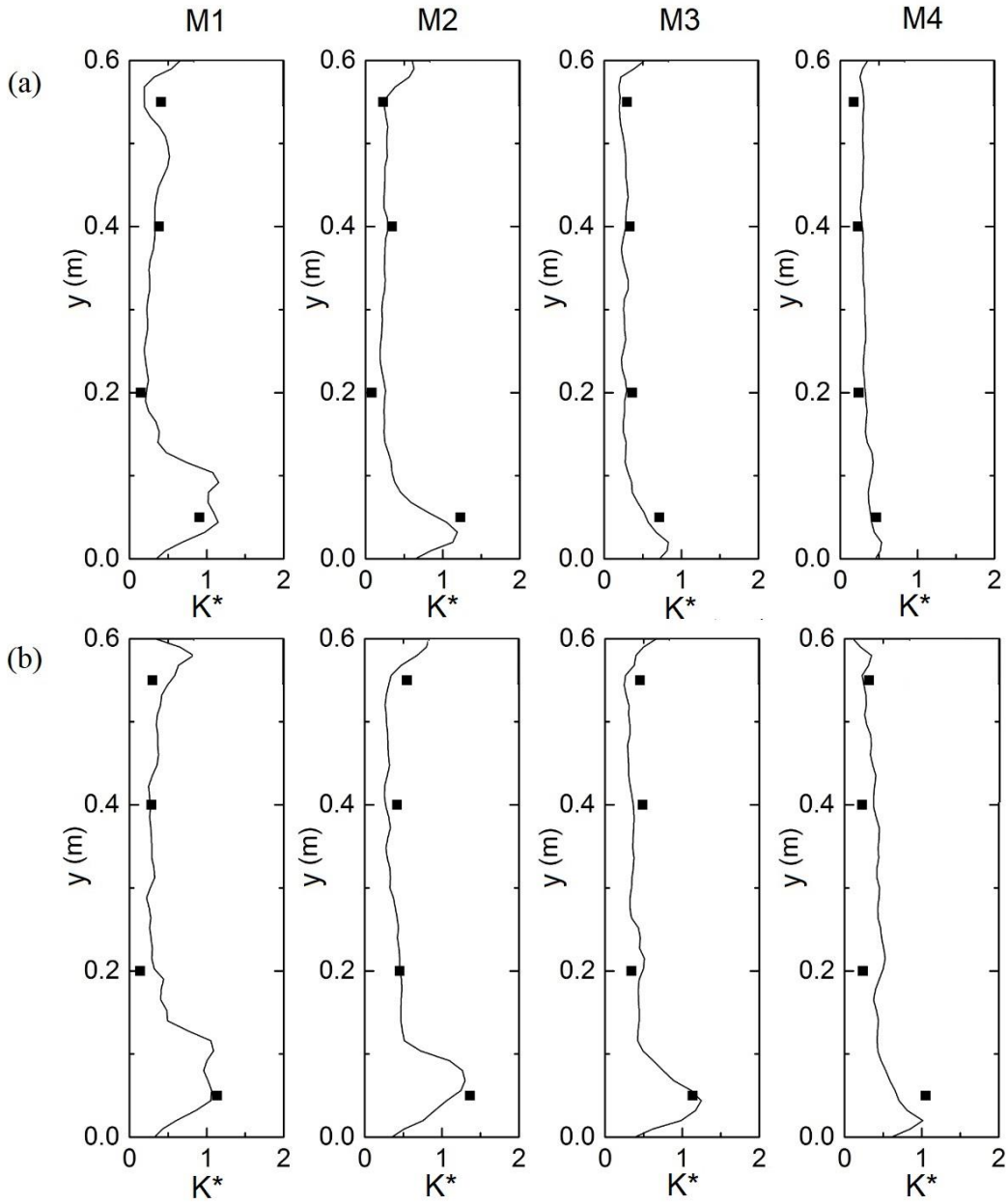


Şekil 43. Deneysel (sembol) ve sayısal (çizgi) x-hızı değerlerinin karşılaştırılması. (a)0.34 m/s, (b)0.73 m/s



Şekil 44. Deneysel (sembol) ve sayısal (çizgi) boyutsuz sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması. (a)0.34 m/s, (b)0.73 m/s

Dört farklı ölçüm istasyonu için sırasıyla (a)0.34 m/s, (b)0.73 m/s üfleme hızlarında elde edilen partikül ölçüm ve takip çıktıları Şekil 45'te verilmektedir. Görüldüğü üzere ana jet doğrultusu dışında tüm akış alanı içinde benzer konsantrasyon değerlerine ulaşılmaktadır. Konsantrasyon değerleri her iki durumda da Şekil 43'te verilen x-hızı dağılımları ile benzer bir figür göstermektedir. Bu sonuçlara bağlı olarak deneysel ölçüm ve sayısal simülasyon sonuçlarının tutarlı olduğu dolayısı ile belirlenen sayısal yaklaşımın her iki faz için de güvenilir sonuçlar üretebildiği ifade edilebilir.

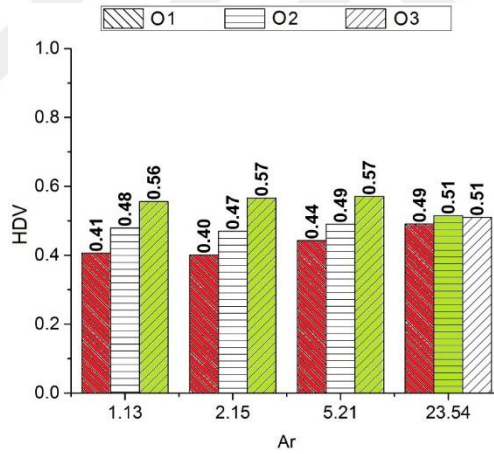


Şekil 45. Deneysel (sembol) ve sayısal (çizgi) boyutsuz konsantrasyon değerlerinin karşılaştırılması. (a)0.34 m/s, (b)0.73 m/s

3.3.2. Hava Değişim Veriminin (HDV) Değerlendirilmesi

Bir havalandırma sisteminin en önemli özelliklerinden birisi de mahaldeki havayı temizleyebilme yetisidir. Şekil 46'da farklı menfez konumları için farklı işletme parametrelerinde elde edilen HDV değerleri görülmektedir. Her bir Arşimet değerindeki en iyi ve en kötü değerler sırasıyla yeşil ve kırmızı ile renklendirilmişlerdir. Görüldüğü üzere, $Ar=1.13-5.21$ aralığında en iyi hava değişim performansına menfezlerin aynı dik duvarda

buldukları O1 konfigürasyonu ile erişilmektedir. Aynı aralıkta O3 konfigürasyonu en zayıf HDV değerini sergilemektedir. Dikkat edilirse yine aynı aralık için hava hızından bağımsız olarak O2 ve O3 konfigürasyonlarında benzer HDV değerleri elde edildiği anlaşılmaktadır. O1 menfez konum için ise $Ar=5.21$ değerinde kısmi bir iyileşmeden bahsetmek mümkündür. En düşük hava giriş hızının söz konusu olduğu $Ar=23.54$ değerinde ise menfez konumundan bağımsız olarak benzer değerler ortaya çıkmaktadır. Genel kanı hava hızı arttıkça kirleticilerin daha etkin bir şekilde süpürüleceğinin beklenmesi yönünde olsa da burada elde edilen sonuçlar bu beklentinin doğru olmadığını ortaya koymaktadır. Diğer bir deyişle besleme hava hızının artırılması HDV değerini çıkış menfez konumuna göre olumlu veya olumsuz etkileyebilmektedir. Burada ayrıca özellikle O1 menfez konumu için $Ar=1.13-5.21$ aralığında HDV değerinin klasik bir deplasmanlı havalandırma sistemi için bahsedilen (Mundt vd., 2004) HDV değerinden düşük olduğu da not edilmelidir. Bu durum yine menfez konumlarına bağlı olarak gelişmiş bir kısa devre akışını işaret etmektedir.

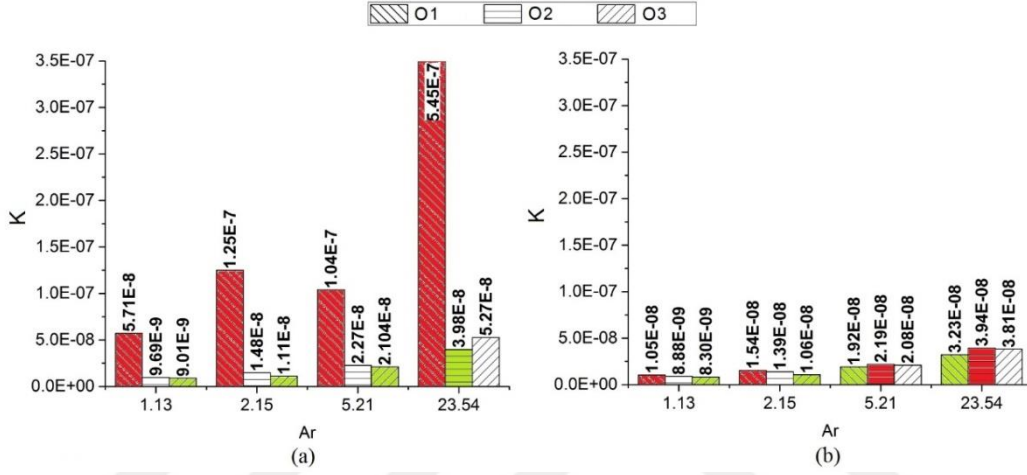


Şekil 46. HDV değerleri

3.3.3. Giriş Havaasının Partikül Kaynağı Olduğu Durumun Değerlendirilmesi

Giriş havası ile ortama $0.5 \mu\text{m}$ partiküllerin gönderildiği durumda menfez konumları ve işletme parametrelerine bağlı olarak sırasıyla tüm oda ve solunum yüksekliğinde hesaplanan ortalama konsantrasyon değerleri Şekil 47’de görülmektedir. Bu bölümde sunulan tabloların daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla her bir Arşimet değerinde en yüksek konsantrasyon değeri kırmızı en düşük konsantrasyon değeri ise yeşil ile renklendirilmiştir.

Genel karakter olarak konsantrasyon miktarlarının Arşimet sayısı ile arttığı anlaşılmaktadır. Çalışmada Arşimet sayısı giriş hız değeri değiştirilerek modifiye edilmektedir. Bu durumda düşük hız değerlerinde (yüksek Ar değerlerinde) akış açısından doğal taşınım kuvvetlerinin etkinliği artarken sabit partikül yüküne sahip kapalı bir mahale daha az temiz hava verilerek seyrelme etkisi de azaltılmaktadır. Dolayısı ile Arşimet değeri ile konsantrasyon değerleri aynı anda artış göstermektedir.



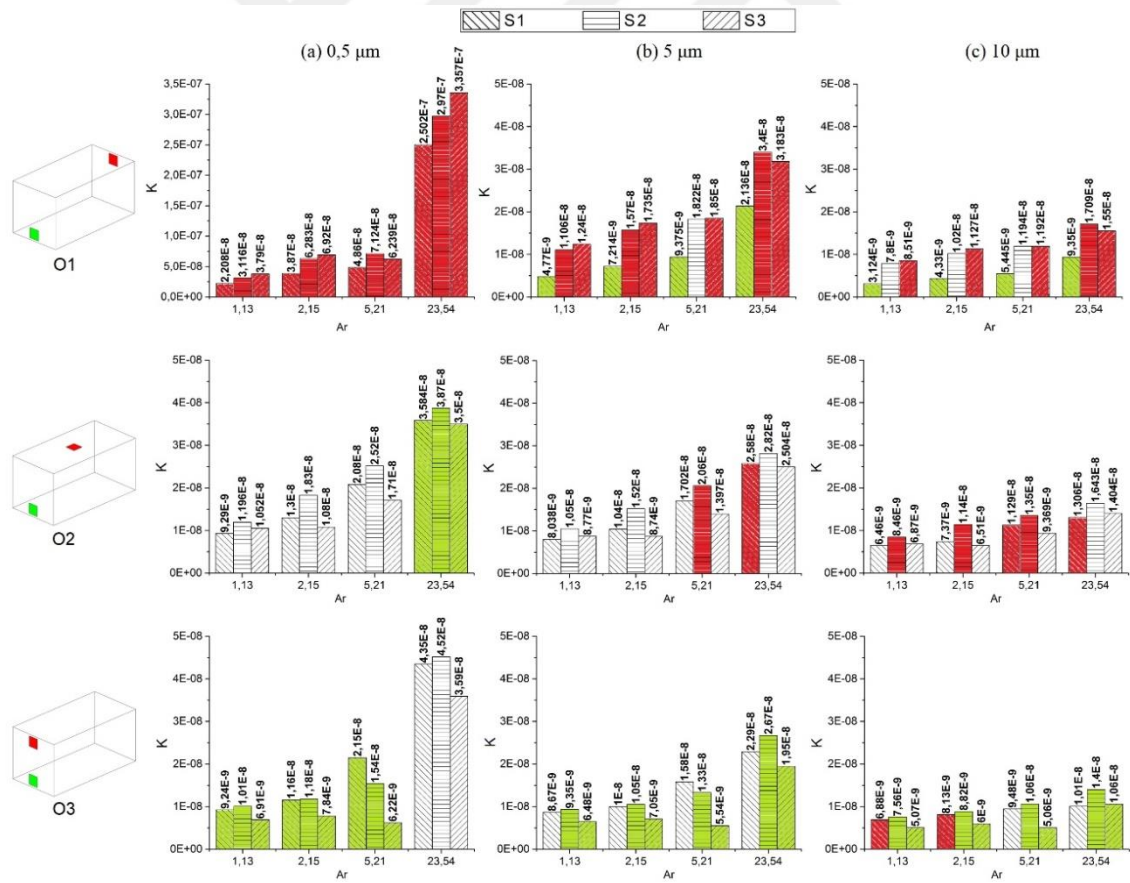
Şekil 47. Ortalama konsantrasyon değerleri (a)Mahal, (b)Solunum yüksekliği

Çıkış menfez konumları açısından Şekil 47’de bir değerlendirme yapıldığında ise en yüksek konsantrasyon değerine O1 menfez konumu için $Ar=23.54$ noktasında ulaşıldığı görülecektir. Aynı şekilde en düşük konsantrasyon ise O3 konfigürasyonu için $Ar=1.13-5.21$ aralığında ve O2 konfigürasyonu için ise $Ar=23.54$ değerinde elde edilmektedir. Şekil 47(b)’de verilen solunum yüksekliğine ait konsantrasyon değerleri özellikle $Ar=5.21$ ve 23.54 değerlerinde Şekil 47(a)’dan tamamen farklı bir davranış sergilemektedir. İlgili Arşimet değerlerinde solunum yüksekliğinde en düşük konsantrasyon değerlerine O1 menfez konumları ile erişilirken aynı menfez konumu açısından en yüksek mahal ortalama konsantrasyon değerleri yakalanmaktadır. İfade edilen bu uyumsuzluk gerek mahal ortalama konsantrasyon değerleri ile gerekse de solunum yüksekliği gibi belirli alanlara ait konsantrasyon değerleri ile tüm havalandırma sistemi için yapılacak genel değerlendirmelerin hatalı olabileceğini işaret etmektedir. Şekil 47(b)’de $Ar=1.13$ ve 2.15 ’te konsantrasyon sıralaması Şekil 47(a) ile benzeşmektedir. İlgili aralıkta en yüksek konsantrasyon değerlerine O1 en düşük konsantrasyon değerlerine ise O3 konfigürasyonu ile ulaşılmaktadır. Bu verilere bağlı olarak kirleticilerin mahal havası ile ortama verildikleri

durum değerlendirildiğinde O1 menfez konumunun en yetersiz performansa yol açtığı ifade edilebilir.

3.3.4. Kirletici Kaynak Konumlarına Göre Mahal Ortalama Konsantrasyon Değerlerinin Değerlendirilmesi

Şekil 48’de tüm menfez konumları ve kirletici kaynak konumları için elde edilen ortalama konsantrasyon değerleri verilmektedir. İlgili şekil dokuz farklı grafikten meydana gelmektedir. Burada satırlar farklı menfez konumlarının sütunlar ise farklı partikül çaplarını ifade etmektedirler. Ayrıca her bir kolonda eş Arşimet değerleri üzerinden menfez konumlarının etkisi en düşük konsantrasyon değerlerinin yeşil en yüksek değerlerin ise kırmızı ile renklendirilmesi neticesinde karşılaştırılmıştır. Benzer dizim ve değerlendirme yapısı bundan sonraki bölümlerde de korunmuştur.



Şekil 48. Mahal ortalama konsantrasyon değerleri

Şekil 48’de görüldüğü üzere ortalama konsantrasyon değerleri partikül çapı arttıkça azalmakta ve Arşimet sayısı arttıkça ise artmaktadır. Arşimet sayısına bağlı olarak gözlenen artış oransal olarak bakıldığında 5 ve 10 μm partiküller için 0.5 μm partiküllere göre daha sınırlıdır. Partikül çapı arttıkça yer çekimi kuvvetine bağlı olarak güçlenen çökme eğilim söz konusu davranışla alakalıdır. Burada genel anlamda ortalama konsantrasyon değerlerinin menfez konumu ve çap değerine bağlı olarak birbirinden farklı davranışlar sergilediği de görülmektedir.

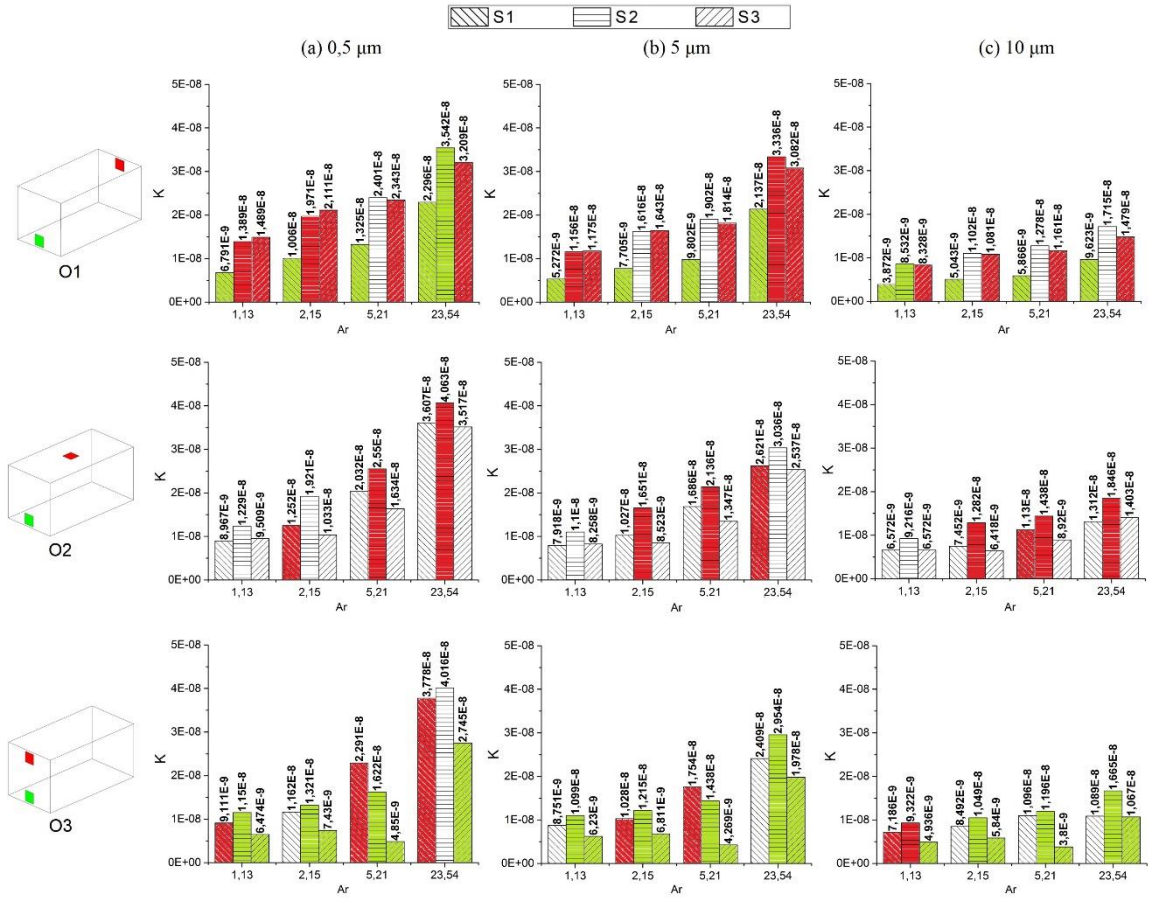
Giriş/çıkış menfezlerinin aynı dik duvara konumlandırıldığı O1 konfigürasyonunun, çalışılan tüm Ar sayısı ve çap değerleri için, en başarılı cevabı solunum yüksekliğinin altında yer alan kirleticiler (S1) için verdiği anlaşılmaktadır. Buna rağmen aynı konfigürasyon 0.5 μm için $Ar=5.21$ ve 10 μm için $Ar=23.54$ dışında en kötü performansı solunum yüksekliği üzerindeki partikül kaynakları (S3) ile sergilemektedir. O2 menfez konumu için ise solunum yüksekliği dışında yer alan diğer kaynak konumları için (S1-S3) daha başarılı sonuçlar elde edildiği not edilebilir. Buna ek olarak, O3 konfigürasyonunun ise solunum yüksekliği üzerinde yer alan kirleticileri (S3) sistemden uzaklaştırmada diğer kirletici kaynak konumlarını sistemden uzaklaştırmaya göre daha uygun olduğu söylenebilir.

Sonuç olarak aynı çap ve Arşimet sayısı için O3 menfez düzeninin ortalama konsantrasyon değerleri göz önüne alındığında en uygun menfez konumunu teşkil ettiği anlaşılmaktadır. Burada önemli bir istisna O2 menfez konumu için $Ar=23.54$ değerinde 0.5 μm partikül çapı için görülmektedir. O1 konfigürasyonu ise özellikle 0.5 μm özelinde değerlendirilen tüm işletme parametrelerinde en yüksek konsantrasyon değerlerine sebep olmaktadır.

3.3.5. Kirletici Kaynak Konumlarına Göre Solunum Yüksekliği Ortalama Konsantrasyon Değerlerinin Değerlendirilmesi

Bir önceki kısımda ele alınan mahal içi ortalama konsantrasyon değerleri havalandırma sistemi ve kirletici dağılımına ilişkin bir fikir verse de insan sağlığı açısından solunum yüksekliğindeki konsantrasyon değerleri daha önemli olarak tanımlanırlar. Bu sebeple bu bölümde Şekil 49’da verilen solunum yüksekliğindeki ortalama konsantrasyon değerleri üzerinde durulacaktır.

Genel olarak önceki bölümlerde de açıklandığı üzere konsantrasyon değerleri Arşimet sayısındaki artışla artan bir değer sergilemektedirler. Partikül salınımının sabit tutulduğu bir mahalde besleme hava miktarının azaltılması neticesinde konsantrasyon değerinin artması beklenen bir gelişme olacaktır. Partikül çapı arttıkça çökelme etkisine bağlı olarak ilgili artış oranı daha sınırlı bir seviyede kalmaktadır. Ayrıca, solunum yüksekliğinde en yüksek konsantrasyon değerine genel olarak kirleticilerin de bu yükseklikte bulunduğu durumlarda erişildiği belirtilmelidir.



Şekil 49. Solunum yüksekliği ortalama konsantrasyon değerleri

Şekil 49'dan anlaşıldığı üzere O1 konfigürasyonu eğer kirleticiler zemin yakınında konumlandırılmışsa (S1), solunum yüksekliği açısından en iyi performansı sergilemektedir. Aynı menfez konumu için en yüksek konsantrasyon değerine ise 0.5 ve 5 µm için Ar=1.13 ve Ar=2.15'te solunum yüksekliği üzerindeki partikül kaynakları (S3) ile erişilmektedir. Bu Arşimet değerlerinin üzerinde ise en yüksek konsantrasyon kirleticilerinde aynı yükseklikte bulunduğu durumda (S2) ortaya çıkmaktadır. 10 µm çapındaki partiküller için

ise Arşimet sayısından bağımsız olarak en yüksek konsantrasyon her zaman solunum yüksekliğindeki partikül kaynakları ile mümkün olmaktadır.

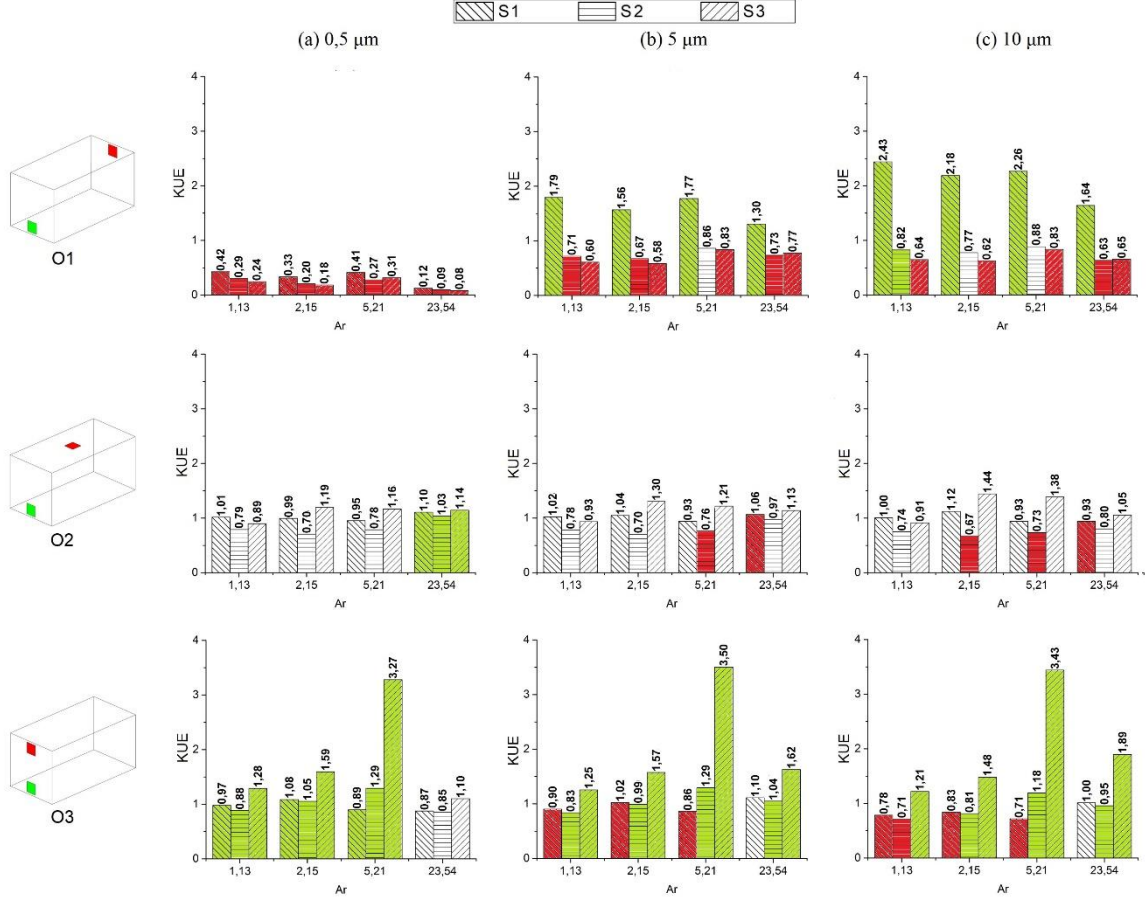
Çıkış menfezinin tavan ortasında konumlandığı O2 menfez konumu ile en yüksek konsantrasyon değerine her zaman, tüm çap ve Arşimet sayıları için, kirletici kaynağının solunum yüksekliğinde (S2) olduğu durumlarda erişilmektedir. Aynı menfez pozisyonunun en başarılı performans değerine 0.5 µm ve 5 µm ebatındaki partiküllerin tavana yakın kaynak konumlarından (S3) akış alanına bırakıldıkları durumlarda erişilebilmektedir. 10 µm çapındaki partiküller için ise kaynak konumuna bağlı olarak genel bir davranıştan söz etmek mümkün değildir.

O3 menfez konumunun tercih edilmesi durumunda ise solunum seviyesinin en az tavan yakınlığındaki kirletici kaynaklarından (S3) etkileneceği belirtilebilir. Solunum yüksekliğinde hesaplanan ortalama konsantrasyon değerleri menfez konumlarına bağlı olarak karşılaştırıldıklarında ise O3 menfez düzeninin solunum yüksekliği ve üzerindeki kirleticiler için en uygun seçenek olacağı anlaşılmaktadır. Buna ek olarak O1 menfez konfigürasyonu ise zemin seviyesindeki kirleticiler değerlendirilirse en uygun seçenek olarak öne çıkmaktadır. Fakat aynı menfez düzeninin diğer kirletici yükseklikleri için genellikle en başarısız performansı sergilediği de belirtilmelidir. Ayrıca konsantrasyon değerleri bir bütün olarak ele alınıp karşılaştırıldığında O2 menfez yerleşiminin ortalama bir yeterlilik sergileyeceği ifade edilebilir.

3.3.6. Kirletici Uzaklaştırma Etkinliğinin (KUE) Değerlendirilmesi

Çalışılan sistemin kirletici uzaklaştırma kapasitesi kirletici uzaklaştırma etkinliği (KUE) üzerinden hesaplanmış ve Şekil 50’de verilmiştir. Görüldüğü üzere KUE değerleri belirgin bir karakter sergilememekte ve sonuçlar menfez konumları, çap değerleri ve işletme parametrelerine göre ciddi şekilde değişiklikler göstermektedir. 0.5 µm partikül çapı dikkate alınır ise tüm partikül kaynak konumları için en kötü performans O1 konfigürasyonu ile elde edilmektedir. Burada menfez pozisyonlarına bağlı olarak mahal içinde oluşan hava akışının diğer menfez pozisyonları ile elde edilecek hava akış dağılımları ile karşılaştırıldığında son derece yetersiz kaldığı anlaşılmaktadır. Aynı değişkenler için Şekil 48’de görülen yüksek konsantrasyon değerleri de bu olguyu desteklemektedir. O1 menfez yerleşimi ile diğer çap değerleri (5 µm ve 10 µm) değerlendirildiğinde görece daha yüksek KUE değerlerine erişildiği ifade edilebilir. Bu

değişimin zemin yakınlığındaki kirletici kaynakları açısından önemli düzeyde olduğu da Şekil 50’de açıkça görülmektedir. O1 özelinde ayrıca kirletici konum seviyesi yükseldikçe KUE değerlerinin azaldığı da göze çarpmaktadır.



Şekil 50. Kirletici uzaklaştırma etkinliği (KUE)

O2 menfez konumu ile elde edilen kirletici uzaklaştırma etkinlikleri partikül çapından bağımsız olarak benzer dağılımlar sergilemekte ve değerlerde seyretmektedirler. İlgili menfez konumu genel olarak en başarılı performansı sırasıyla en üst (S3) ve en alt (S1) seviyede bulunan kirletici kaynak konumları için göstermektedir. Aynı menfez konumunun solunum seviyesinde yer alan kirleticiler (S2) için ise diğer kirletici konumları ile karşılaştırıldığında başarılı olamadığı görülmektedir.

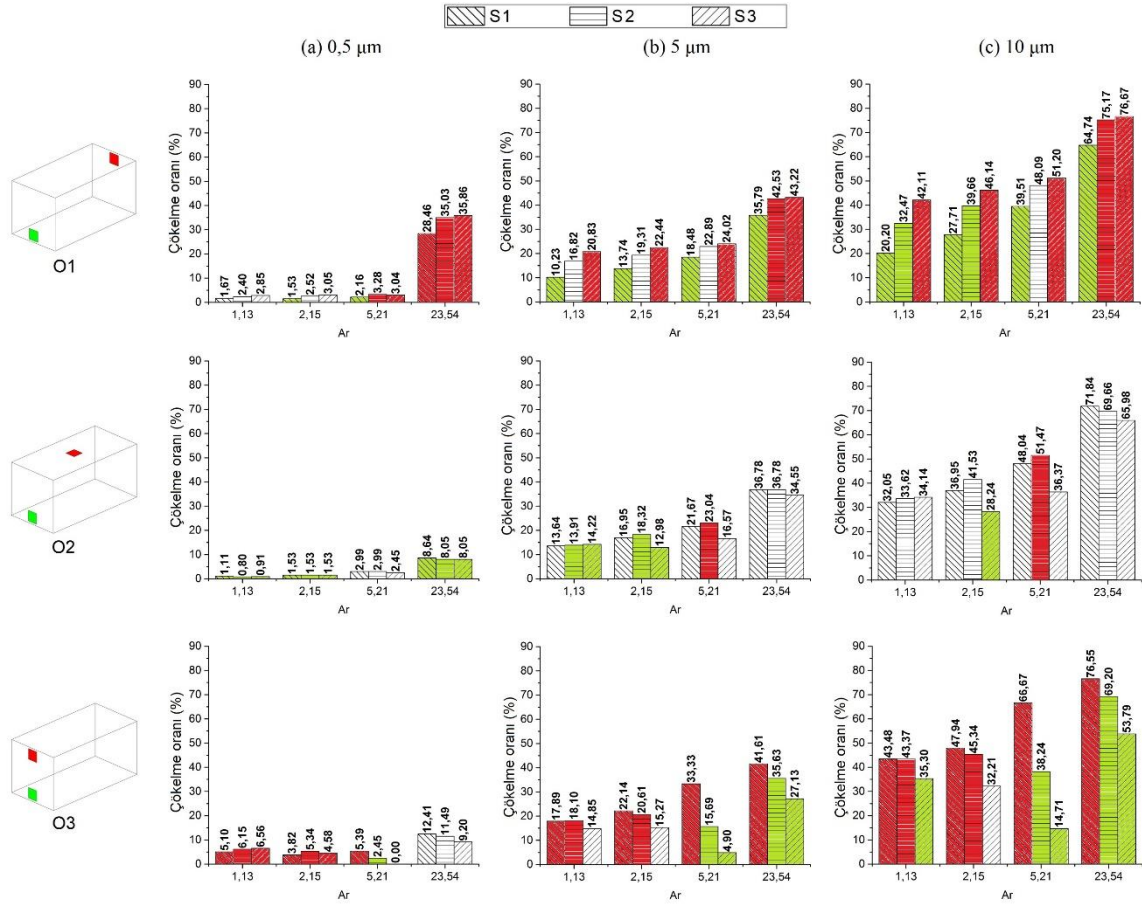
O3 menfez konumu değerlendirildiğinde tüm çap değerleri için en yüksek KUE değerine tavan seviyesinde (S3) yer alan kirleticiler için erişildiği görülmektedir. Ayrıca diğer iki kirletici konumu (S1 ve S2) karşılaştırıldığında Ar=5.21 değeri dışında alt

seviyede bulunan kirletici konumları için kısmen daha yüksek KUE değerleri dikkati çekmektedir.

Menfez konumlarının etkisini aynı çap değerleri için ele aldığımızda ise genel olarak O3 menfez konumunun en yüksek KUE değerlerini barındırdığı görülmektedir. Ayrıca O1 menfez yerleşiminin 5 ve 10 μm çapında ve zemin yakınlığından salınan partiküller (S1) için değerlendirilebilir bir seçenek olduğu anlaşılmaktadır. Aynı menfez yerleşimi diğer salınım yükseklikleri göz önüne alındığında ise genellikle en yetersiz performansı sergilemektedir. Diğer yandan O2 menfez konumu ortalama bir KUE performansı ortaya koymakta bununla beraber 0.5 μm partikül çapında ve $Ar=23.54$ değerinde O3 konumu ile elde edilen değerden kısmen daha yüksek bir KUE değerine ulaşmaktadır. Ayrıca O2 menfez yerleşimi 5 μm ve 10 μm için birkaç Arşimet değerinde tüm menfez konumları arasında en düşük KUE değerini vermektedir.

3.3.7. Çökelme Oranının (%) Değerlendirilmesi

Havalandırılan kapalı bir mahalde havadaki partikül miktarının azalması partiküllerin çıkış menfezi vasıtası ile ortamı terk etmeleri veya temas ettikleri yüzeylere tutunmaları ile (çökelme) gerçekleşmektedir. Her iki şekilde de konsantrasyon değeri azalsa da partiküllerin buldukları yüzeye zarar verebilme veya herhangi bir şekilde tekrar havaya karışma ihtimali sebebiyle tercih edilen durum ortamı hava ile terk etmeleridir. Dolayısı ile çökelme oranları (%) dikkati çeken bir parametredir. Bu çalışma kapsamında da incelenen değişkenlere bağlı olarak hesaplanan çökelme oranları Şekil 51’de verilmektedir.



Şekil 51. Çökeltme oranı (%)

Şekil 51’de görüldüğü üzere genel karakter olarak artan partikül çap değeri ile beraber yer çekimi kuvvetlerinin etkisi ile çökeltme oranları artmaktadır. Çalışılan tüm çap değeri ve menfez konumları içinde en düşük çökeltme oranı 0.5 µm için özellikle Ar=1.13-5.21 aralığında elde edilmektedir. En yüksek çökeltme miktarı ise 10 µm ebatındaki partiküllerde O1 menfez düzeninde ve Ar=23.54 değerinde %76 olarak hesaplanmaktadır.

Çökeltme oranları menfez konumlarına bağlı olarak karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde ise çıkış menfez konumunun çökeltme üzerinde partikül kaynak konumuna bağlı olarak etkili bir değişken olduğu görülmektedir. O1 menfezi için kirletici kaynak konumları zemine yaklaştıkça daha düşük çökeltme oranlarının yakalandığı ifade edilebilir. Ayrıca diğer iki menfez düzeni ile karşılaştırıldığında O1 menfezi ile zemin yakınlığından partikül salınımı (S1) için genel olarak en düşük çökeltme oranlarına ulaşıldığı anlaşılmaktadır. Yine O1 menfez yerleşimi ile tavan yakınlığından salınım yapılması durumunda (S3) en yüksek çökeltme oranlarının ortaya çıktığı da not edilmelidir.

Çıkış menfezinin tavan orta noktasında bulunduğu O2 düzeninde en düşük çökeltim performansı 0.5 µm ebatındaki partiküller için sergilenirken 5 µm ve 10 µm partikül

değerlerinde ise diğer iki menfez konumuna nazaran ortalama bir çökeltme oranı görülmektedir. O3 menfez yerleşiminde özellikle 5 µm ve 10 µm için solunum yüksekliği üzerindeki kaynaklarla diğer menfez konumlarına göre neredeyse en düşük çökeltme oranlarının yakalandığı not edilmelidir. Aynı menfez yerleşiminde çökeltme oranları O1'in aksine kaynak konumu yükseldikçe azalmaktadır. Kaynak konumlarına göre değerlendirildiğinde ise O1 menfez düzeninin düşük seviyedeki kirletici kaynakları açısından çökeltme oranı noktasında diğer menfez düzenleri ile karşılaştırıldığında yetersiz olduğu anlaşılmaktadır.



4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, günümüzde gerek insan sağlığı gerekse farklı imalat uygulamaları açısından iç hava kalitesinin en önemli parametrelerinden birini teşkil eden havadaki kirletici varlığı ve dağılımı ele alınmıştır. Bu manada kapalı mahallerde farklı havalandırma uygulamaları ve bunlara etki eden önemli değişkenler çerçevesinde deneysel ve sayısal değerlendirmeler yapılmıştır.

Deneysel çalışmalar, küçük ölçekli model odalar üzerindeki çıktıların gerçek boyuttaki uygulamalar için de geçerli olması için benzerlik parametreleri göz önüne alınarak farklı sınır şartları için yürütülmüştür. Deneysel çalışmalar kapsamında akış alanları fotoğraflanmış ayrıca hava hızı, hava sıcaklığı ve partikül konsantrasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İlgili çalışma sonuçları tercih edilen sayısal yaklaşımın doğrulanmasında kullanılmıştır. Sayısal analizler bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı olan ANSYS Fluent 16.0 ile tamamlanmıştır. İki fazlı bir yapı olarak değerlendirilen hava – partikül sistemi sırasıyla Euler ve Lagrange metotları ile çözümlenmiştir. Bu kısımda yukarıda ifade edilen ölçüm değişkenlerine ek olarak hava yaşı, hava değişim verimi, kirletici uzaklaştırma etkinliği ve çökeltme oranı da incelenmiştir.

Deneysel ve sayısal aşamada elde edilen sonuçlar araştırma konuları ile ilişkili olarak özet halinde aşağıda verilmiştir.

Hava değişim katsayısının farklı kirletici yüklerinde iç hava kalitesine etkisi:

- 1- Çalışılan tüm HDK değerleri için mahal içinde benzer akım çizgileri gözlenmiştir. Bu durum akışın izotermal yapısı ile yakından ilişkilidir. Ayrıca akış alanı içerisinde farklı konumlarda resirkülasyon hücrelerinden söz etmek mümkündür.
- 2- Yer çekimi kuvvetinin neredeyse ihmal edilebilir olduğu küçük çaplı partiküller için (1.181 ve 2.188 μm) benzer konsantrasyon dağılımları elde edilmiştir. Partikül çap değeri arttıkça, artan yer çekimi kuvveti etkisi ile konsantrasyon dağılımında büyük farklılıklar görülmüştür.
- 3- Çıkış menfez konumuna bağlı olarak büyük çaplı partiküller için genel karakteristiği yansıtmayan sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum yüksek HDK değerlerinde artan sürüklenme kuvveti ile ortadan kalkmıştır.

- 4- Mahal içi ve çıkış menfezi için ortalama konsantrasyon değerleri sabit partikül yükü altında artan HDK neticesinde azalmıştır. Sabit partikül yükü durumu için bu durum ortamın kirletici değeri aynı tutulurken daha çok hava ile seyreltilmesi manasına gelmekte olup beklenen bir olgudur.
- 5- Partikül yükü HDK değeri ile orantılı olarak arttırıldığında mahal içi ve çıkış menfezi için ortalama konsantrasyon değerleri artmıştır. Ortama giren hava ve kirletici değerlerinin oranları sabit tutulduğunda ortamdaki yoğunluğun değişmemesi beklenirken bu durum kirletici salınımının değişken bir karakter gösterdiği durumlarda artan HDK değerinin beklenen etkiyi yaratamayabileceğini göstermektedir. Genel olarak artan HDK değeri ile ortamdaki kirletici yoğunluğunun da artması aynı süreçte akış alanının etkinliğinin azalması ile açıklanabilir ve burada hava değişim verimi de değerlendirilmelidir.
- 6- Literatürdeki genel bulguların aksine çökelme oranının artan HDK değeri ile azaldığı anlaşılmıştır. Bu kapsamda ele alınan diğer çalışmalar çökelme oranının HDK değeri yanında menfez konumlarına da bağlı olduğunu işaret etmektedir.

Hava değişim katsayısı kirletici kaynak konumu ilişkisi:

- 1- Çalışma kapsamında ele alınan değişkenler dahilinde artan HDK ile ortalama hava yaşı azalmıştır.
- 2- Kirletici dağılımları, kirletici kaynak konumu ve HDK değerine bağlı olarak tamamen farklı dağılımlar sergilemiştir.
- 3- Genel karakter olarak, artan HDK değeri ile ortalama konsantrasyon miktarı azalsa da azalma oranı ana akış bölgesi içerisinde yer alan kirletici durumunda sınırlı bir seviyede kalmakta diğer bölgelerde yer alan kirletici kaynakları durumunda ise daha belirgin olmaktadır.
- 4- Bir havalandırma tasarımı ele alınırken kirletici kaynak noktasının ana akış bölgesi içinde yer alması veya akışın kaynak bölgesini içine alacak şekilde kurgulanması en iyi iç hava kalitesini sağlaması açısından önerilebilir.

Menfez konumu etkisi:

- 1- Oda içinde oluşacak akış alanının yapısında hem giriş hem de çıkış menfez konumları son derece önemlidir.

- 2- Değerlendirilen çalışma şartları içinde en yüksek hava değişim verimi menfezlerin aynı dik duvarda konumlandıkları durum için elde edilmektedir.
- 3- Kısa devre akışına sebep olacak menfez konumlarına dikkat edilmeli ve bu durumda en düşük havalandırma performansı değerleri elde edileceği not edilmelidir.
- 4- Besleme havası ile kirletici girişi durumunda solunum yüksekliği ve mahal için en düşük ortalama konsantrasyon değerine giriş menfezinin tavanda olduğu durum için erişilmiştir.
- 5- Solunum yüksekliğindeki kirleticilerin bu alandaki etkisi ilgili kaynaklardan birinin tavanda konumlandırılmış giriş menfezi içinde tutulması ile en aza indirgenmiştir. Aynı kirletici kaynak konumları için en yüksek kirletici uzaklaştırma etkinliği değerlerine ise menfezlerin aynı dik duvarda konumlandırıldığı durumda ulaşılmıştır.
- 6- Çıkış menfezi – kirletici kaynak pozisyonlarının birbirlerine yakın konumlandırılmaları kirleticilerin mahal içine dağılmalarını büyük oranda engelleyerek iç hava kalitesine katkı sunmuştur.
- 7- Ortam havasına eşit oranda dağılmış halde bulunan kirleticilerin en kısa sürede seyreltilmesi tavan merkezinde konumlandırılan giriş menfezi ile sağlanmıştır.

Deplasmanlı hava dağıtım ve zeminden ısıtma sisteminin beraber kullanıldığı durumda kirletici dağılımı:

- 1- En yüksek hava değişim verimi 0.51-0.57 aralığında O3 konfigürasyonu ile sağlanmıştır.
- 2- Tüm menfez opsiyonları (O1-O3) için artan üfleme hızı (artan Arşimet sayısı) ile benzer HDV değerlerine (0.50) erişilmiştir.
- 3- Besleme havası ile partikül salınımı durumunda ortalama konsantrasyon açısından en kötü çıkış menfezi opsiyonu O1 olarak belirlenmiştir. Buna karşın aynı partikül salınım durumu için solunum yüksekliğinde en yüksek konsantrasyon değerine O2 ile $Ar=23.54$ değerinde ulaşılmıştır.
- 4- En düşük mahal ortalama konsantrasyon değerlerine O1 menfezi için S1 kirletici konumunda, O3 menfezi için ise S3 kirletici konumunda erişilmiştir. Ayrıca, diğer menfez konumları ve kirletici kaynak yükseklikleri ile erişilen konsantrasyon

değerleri karşılaştırıldığında genel olarak O3 menfez düzeni ile en iyi iç hava kalitesinin sağlandığı ifade edilebilir.

- 5- Solunum yüksekliğinde en düşük ortalama konsantrasyon değeri zemin yakınlığındaki kirleticiler için O1 menfez konumu ile sağlanırken diğer yüksekliklerdeki kirletici konumları için O3 menfez konumu uygun bir opsiyon olmaktadır.
- 6- Kirletici uzaklaştırma etkinliği (KUE) ele alındığında O1 menfez konumu S1 seviyesinden 5 ve 10 μm partiküllerin salınım durumları dışında diğer tüm çalışma şartları için en düşük değerleri vermektedir. Bu manada en yüksek KUE değerlerinin O3 ile 0.8-3.5 aralığında elde edildiği not edilmelidir.
- 7- En düşük çökme oranı O1 menfez konumu ve 0.5 μm partiküller için elde edilirken en yüksek çökme oranına %76 ile 10 μm çapındaki partiküller ile ulaşılmıştır. Çökme oranı değerleri genel olarak çıkış menfez konumu ve aynı partikül çapı için salınım yüksekliğine göre farklılık arz etmektedir.

5. ÖNERİLER

Bu çalışmada uygulamada sıklıkla karşılaşılan hava dağıtım sistemleri, hava değişim katsayısı, menfez konumu ve zeminden ısıtmanın yer aldığı bir uygulama göz önüne alınarak mahal içi kirletici dağılımı özelinde farklı senaryolar kapsamında incelenmiştir. Gelecekte bu konuda yürütülecek çalışmalar için aşağıda listelenen önerilerin dikkate alınması daha yenilikçi sonuçların üretilmesi için faydalı olacaktır.

- 1- Kirletici dağılımları karma hava dağıtım sistemi veya deplasmanlı hava dağıtım sistemi dışında son dönemde öne çıkan farklı hava dağıtım sistemlerinin (Yang vd., 2019) yer aldığı mahaller için değerlendirilebilir.
- 2- Kirletici konumu ve yükünün zamanla değiştiği dinamik süreçler çalışmalara dahil edilebilir.
- 3- İç hava kalitesine olumlu tesiri ifade edilen (Fallenius vd., 2013) fakat bu alanda çalışmaların oldukça sınırlı olduğu atımlı akış şartlarını ele alan çalışmalar kirletici dağılımı odağında incelenebilir.
- 4- Son dönemde çalışmaların yoğunlaştığı ve disiplinler arası bir alan olan mahal sakinleri arası bulaşıcı hastalık etkileşimi (Ai ve Melikov, 2018) farklı hava dağıtım sistemleri özelinde değerlendirilebilir.
- 5- Yine disiplinler arası bir konu olarak bulaşıcı hastalıklar ve ilgili patojenlerin farklı havalandırma şartlarında ultraviyole antiseptik ışınım (UVGI-ultravioleto germicidal irradiation) yöntemi (Memarzadeh ve Jiang, 2000; Noakes, 2004; Zhu vd., 2014) ile inaktivasyonu çalışmalara dahil edilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Abanto, J., Barrero, D., Reggio, M. ve Ozell, B., 2004. Airflow modelling in a computer room, Building and Environment, 39, 12, 1393–1402.
- Ahmed, A. Q. ve Gao, S., 2017. Numerical investigation of height impact of local exhaust combined with an office work station on energy saving and indoor environment, Building and Environment, 122, 194–205.
- Ahmed, A. Q., Gao, S. ve Kareem, A. K., 2016. A numerical study on the effects of exhaust locations on energy consumption and thermal environment in an office room served by displacement ventilation, Energy Conversion and Management, 117, 74–85.
- Ai, Z. T. ve Melikov, A. K., 2018. Airborne spread of expiratory droplet nuclei between the occupants of indoor environments: A review, Indoor Air, 28, 4, 500–524.
- Anderson, J. O., Thundiyil, J. G. ve Stolbach, A., 2012. Clearing the Air: A Review of the Effects of Particulate Matter Air Pollution on Human Health, Journal of Medical Toxicology, 8, 2, 166–175.
- ANSYS Inc, 2013. *Ansyes Fluent Theory Guide ANSYS Inc., USA (C. 15317)*. Canonsburg, PA.
- Ashrae, 2017. *Ashrae Design Guide for Cleanrooms* (1. baskı). Atlanta: Ashrae.
- Ashrae, 2016. Ashrae Standard 62.1-2016 Ventilation for acceptable air quality,.
- Awbi, H. B., 2003. *Ventilation of buildings Ventilation of Buildings: Second Edition* (2. baskı). London: Spon press.
- Baldin, F., 2008. *An experimental study of comfort and air distribution in a room with radiant floor heating/codling and displacement ventilation*, Yüksek Lisans Tezi, Technical University of Denmark.
- Berlanga, F. A., de Adana, M. R., Olmedo, I., Villafruela, J. M., San José, J. F. ve Castro, F., 2018. Experimental evaluation of thermal comfort, ventilation performance indices and exposure to airborne contaminant in an airborne infection isolation room equipped with a displacement air distribution system, Energy and Buildings, 158, 209–221.
- Berlanga, F. A., Olmedo, I., de Adana, M. R., Villafruela, J. M., José, J. F. S. ve Castro, F., 2018. Experimental assessment of different mixing air ventilation systems on ventilation performance and exposure to exhaled contaminants in hospital rooms, Energy and Buildings, 177, 207–219.

- Bouilly, J., Limam, K., Béghein, C. ve Allard, F., 2005. Effect of ventilation strategies on particle decay rates indoors: An experimental and modelling study, Atmospheric Environment, 39, 27, 4885–4892.
- Brohus, H. ve Nielsen, P. V., 1996. Personal exposure in displacement ventilated rooms, Indoor Air, 6, 3, 157–167.
- Cao, G., Nielsen, P. V., Jensen, R. L., Heiselberg, P., Liu, L. ve Heikkinen, J., 2015. Protected zone ventilation and reduced personal exposure to airborne cross-infection, Indoor Air, 25, 3, 307–319.
- Cao, G., Awbi, H., Yao, R., Fan, Y., Sirén, K., Kosonen, R. ve Zhang, J., 2014. A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings, Building and Environment, 73, 171–186.
- Cao, G., Kandzia, C., Müller, D., Heikkinen, J., Kosonen, R. ve Ruponen, M., 2013. Experimental study of the effect of turbulence intensities on the maximum velocity decay of an attached plane jet, Energy and Buildings, 65, 127–136.
- Cao, S. J., Zhu, D. H. ve Yang, Y. B., 2016. Associated relationship between ventilation rates and indoor air quality, RSC Advances, 6, 112, 111427–111435.
- Causone, F., Baldin, F., Olesen, B. W. ve Corngnati, S. P., 2010. Floor heating and cooling combined with displacement ventilation: Possibilities and limitations, Energy and Buildings, 42, 12, 2338–2352.
- Causone, F., Olesen, B. W. ve Corngnati, S. P., 2010. Floor heating with displacement ventilation: An experimental and numerical analysis, HVAC&R Research, 16, 2, 139–160.
- Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J., Coleman, H. ve Raad, P. E., 2008. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications, Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, 130, 7, 0780011–0780014.
- Chang, T. J., Kao, H. M. ve Hsieh, Y. F., 2007. Numerical study of the effect of ventilation pattern on coarse, fine, and very fine particulate matter removal in partitioned indoor environment, Journal of the Air and Waste Management Association, 57, 2, 179–189.
- Chanteloup, V. ve Mirade, P. S., 2009. Computational fluid dynamics (CFD) modelling of local mean age of air distribution in forced-ventilation food plants, Journal of Food Engineering, 90, 1, 90–103.
- Chao, C. Y. ve Wan, M. P., 2004. Experimental study of ventilation performance and contaminant distribution of underfloor ventilation systems vs. traditional ceiling-based ventilation system, Indoor Air, 14, 5, 306–316.

- Chen, F., Yu, S. C. M. ve Lai, A. C. K., 2006. Modeling particle distribution and deposition in indoor environments with a new drift-flux model, Atmospheric Environment, 40, 2, 357–367.
- Chen, Q., 1995. Comparison of different k- ϵ models for indoor air flow computations, Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals, 28, 3, 353–369.
- Chen, Q., 2009. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications, Building and Environment, 44, 4, 848–858.
- Chen, Q., Jiang, Z. ve Moser, A., 1992. Control of Airborne Particle Concentration and Draught Risk in an Operating Room, Indoor Air, 2, 3, 154–167.
- Cheng, Y. ve Lin, Z., 2015. Experimental study of airflow characteristics of stratum ventilation in a multi-occupant room with comparison to mixing ventilation and displacement ventilation, Indoor Air, 25, 6, 662–671.
- Cheong, K. W. D. ve Phua, S. Y., 2006. Development of ventilation design strategy for effective removal of pollutant in the isolation room of a hospital, Building and Environment, 41, 9, 1161–1170.
- Chung, I.-P. ve Dunn-Rankin, D., 1998. Using numerical simulation to predict ventilation efficiency in a model room, Energy and Buildings, 28, 1, 43–50.
- Chung, K.-C. ve Hsu, S.-P., 2001. Effect of ventilation pattern on room air and contaminant distribution, Building and Environment, 36, 9, 989–998.
- Clausen, G., 2004. Ventilation filters and indoor air quality: a review of research from the International Centre for Indoor Environment and Energy, Indoor Air, 14, s7, 202–207.
- Cook, M. J. ve Lomas, K. J., 1998. Buoyancy-driven displacement ventilation flows: Evaluation of two eddy viscosity turbulence models for prediction, Building Services Engineering Research and Technology, 19, 1, 15–21.
- Crowe, C., Sommerfeld, M. ve Tsuji, Y., 1998. *Multiphase Flows with Droplets and Particles*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Deng, H. Y., Feng, Z. ve Cao, S. J., 2018. Influence of air change rates on indoor CO₂ stratification in terms of Richardson number and vorticity, Building and Environment, 129, 74–84.
- Dobre, A., Arnold, S. J., Smalley, R. J., Boddy, J. W. D., Barlow, J. F., Tomlin, A. S. ve Belcher, S. E., 2005. Flow field measurements in the proximity of an urban intersection in London, UK, Atmospheric Environment, 39, 26, 4647–4657.
- Dominici, F., Peng, R. D., Bell, M. L., Pham, L., McDermott, A., Zeger, S. L. ve Samet, J. M., 2006. Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases, Journal of the American Medical Association, 295, 10,

1127–1134.

- Eslami, J., Abbassi, A., Saidi, M. H. ve Bahrami, M., 2016. Effect of supply/exhaust diffuser configurations on the contaminant distribution in ultra clean environments: Eulerian and Lagrangian approaches, Energy and Buildings, 127, 648–657.
- Etheridge, D. ve Sandberg, M., 1996. *Building Ventilation: Theory and Measurement* (1. baskı). John Wiley & Sons Inc.
- Fallenius, B. E. G., Sattari, A., Fransson, J. H. M. ve Sandberg, M., 2013. Experimental study on the effect of pulsating inflow to an enclosure for improved mixing, International Journal of Heat and Fluid Flow, 44, 108–119.
- Faulkner, W. B., Memarzadeh, F., Riskowski, G., Hamilton, K., Chang, C. Z. ve Chang, J. R., 2013. Particulate concentrations within a reduced-scale room operated at various air exchange rates, Building and Environment, 65, 71–80.
- Faulkner, W. B., Memarzadeh, F., Riskowski, G., Kalbasi, A. ve Ching-Zu Chang, A., 2015. Effects of air exchange rate, particle size and injection place on particle concentrations within a reduced-scale room, Building and Environment, 92, 246–255.
- Feigley, C. E., Bennett, J. S., Khan, J. Lee, E., 2002. Performance of deterministic workplace exposure assessment models for various contaminant source, air inlet, and exhaust locations, American Industrial Hygiene Association Journal, 63, 4, 402–412.
- Fisk, W. J., 2000. Health and productivity gains from better indoor environments and their relationship with building energy efficiency, Annual Review of Energy and the Environment, 25, 537–566.
- Gao, N. P. ve Niu, J. L., 2007. Modeling particle dispersion and deposition in indoor environments, Atmospheric Environment, 41, 18, 3862–3876.
- Golkarfard, V. ve Talebizadeh, P., 2014. Numerical comparison of airborne particles deposition and dispersion in radiator and floor heating systems, Advanced Powder Technology, 25, 1, 389–397.
- Gong, L., Xu, B. ve Zhu, Y., 2009. Ultrafine particles deposition inside passenger vehicles, Aerosol Science and Technology, 43, 6, 544–553.
- Gruber, E. ;, Plessner, S., Dusée, R., Sofronis, I., Lima, P., Rivière, P. ve Rialhe, A., 2008. *Deliverable D26: Report on the project results. Technical report, EL-TERTIARY project, Intelligent Energy-Europe*. Tarihinde adresinden erişildi https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/el-tertiary_el_tertiary_final_report_en.pdf
11.10.2018

- Hänninen, O. O., Palonen, J., Tuomisto, J. T., Yli-Tuomi, T., Seppänen, O. ve Jantunen, M. J., 2005. Reduction potential of urban PM_{2.5} mortality risk using modern ventilation systems in buildings, Indoor Air, 15, 4, 246–256.
- He, G., Yang, X. ve Srebric, J., 2005. Removal of contaminants released from room surfaces by displacement and mixing ventilation: Modeling and validation, Indoor Air, 15, 5, 367–380.
- Hinds, W. C., 1999. *Aerosol Technology: Properties, Behaviour, and Measurements of Airborne Particles* (2. baskı). John Wiley & Sons Inc.
- Hirnikel, J. D., Lipowicz, P. J. ve Lau, R. W., 2002. Predicting contaminant removal effectiveness of three air distribution systems by CFD modeling, ASHRAE Transactions, 108, 350–359.
- Ho, S. H., Rosario, L. ve Rahman, M. M., 2009. Three-dimensional analysis for hospital operating room thermal comfort and contaminant removal, Applied Thermal Engineering, 29, 10, 2080–2092.
- Ho, S. H., Rosario, L. ve Rahman, M. M., 2011. Comparison of underfloor and overhead air distribution systems in an office environment, Building and Environment, 46, 7, 1415–1427.
- Howard-Reed, C., Wallace, L. A. ve Emmerich, S. J., 2003. Effect of ventilation systems and air filters on decay rates of particles produced by indoor sources in an occupied townhouse, Atmospheric Environment, 37, 38, 5295–5306.
- Huang, C. H. ve Lin, P. Y., 2014. Influence of spatial layout on airflow field and particle distribution on the workspace of a factory, Building and Environment, 71, 212–222.
- Hussein, T., Hruška, A., Dohányosová, P., Džumbová, L., Hemerka, J., Kulmala, M. ve Smolík, J., 2009. Deposition rates on smooth surfaces and coagulation of aerosol particles inside a test chamber, Atmospheric Environment, 43, 4, 905–914.
- Hyttinen, M., Pasanen, P., Björkroth, M. ve Kalliokoski, P., 2007. Odors and volatile organic compounds released from ventilation filters, Atmospheric Environment, 41, 19, 4029–4039.
- ISO, 2015. Cleanrooms and associated controlled environments: Classification of air cleanliness by particle concentration, *International Standard*.
- Jin, H., Li, Q., Chen, L., Fan, J. ve Lu, L., 2009. Experimental analysis of particle concentration heterogeneity in a ventilated scale chamber, Atmospheric Environment, 43, 28, 4311–4318.
- Jin, M., Memarzadeh, F., Lee, K. ve Chen, Q., 2012. Experimental study of ventilation performance in laboratories with chemical spills, Building and Environment, 57, 327–335.

- Jurelionis, A., Gagyte, L., Prasauskas, T., Čiužas, D., Krugly, E., Šeduikyte, L. ve Martuzevičius, D., 2015. The impact of the air distribution method in ventilated rooms on the aerosol particle dispersion and removal: The experimental approach, Energy and Buildings, 86, 305–313.
- Kabanshi, A., Wigö, H., Ljung, R. ve Sörqvist, P., 2016. Experimental evaluation of an intermittent air supply system – Part 2: Occupant perception of thermal climate, Building and Environment, 108, 99–109.
- Karimipannah, T. ve Awbi, H. B., 2002. Theoretical and experimental investigation of impinging jet ventilation and comparison with wall displacement ventilation, Building and Environment, 37, 12, 1329–1342.
- Karimipannah, T., Awbi, H. B. ve Moshfegh, B., 2008. The Air Distribution Index as an Indicator for Energy Consumption and Performance of Ventilation Systems, Journal of the Human-Environment System, 11, 2, 77–84.
- Khan, J. A., Feigley, C. E., Lee, E., Ahmed, M. R. ve Tamanna, S., 2006. Effects of inlet and exhaust locations and emitted gas density on indoor air contaminant concentrations, Building and Environment, 41, 7, 851–863.
- Klepeis, N. E., Nelson, W. C., Ott, W. R., Robinson, J. P., Tsang, A. M., Switzer, P. ve Engelmann, W. H., 2001. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): A resource for assessing exposure to environmental pollutants, Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, 11, 3, 231–252.
- Kobayashi, N. ve Chen, Q., 2003. Floor-supply Displacement Ventilation in a Small Office, Indoor and Built Environment, 281–291.
- Kosonen, R., Melikov, A., Mundt, E., Mustakallio, P. ve Nielsen, P. V., 2017. *REHVA Guidebook No. 23, Displacement ventilation*. Brussels: REHVA.
- Koufi, L., Younsi, Z., Cherif, Y. ve Naji, H., 2017. Numerical investigation of turbulent mixed convection in an open cavity: Effect of inlet and outlet openings, International Journal of Thermal Sciences, 116, 103–117.
- Lai, A. C.K. ve Wong, S. L., 2011. Expiratory aerosol transport in a scaled chamber under a variety of emission characteristics: An experimental study, Aerosol Science and Technology, 45, 8, 909–917.
- Lai, A. C. K ve Chen, F., 2006. Modeling particle deposition and distribution in a chamber with a two-equation Reynolds-averaged Navier-Stokes model, Journal of Aerosol Science, 37, 12, 1770–1780.
- Lau, J. ve Chen, Q., 2007. Floor-supply displacement ventilation for workshops, Building and Environment, 42, 4, 1718–1730.

- Lee, K., Zhang, T., Jiang, Z. ve Chen, Q., 2009. Comparison of airflow and contaminant distributions in rooms with traditional displacement ventilation and under-floor air distribution systems, ASHRAE Transactions, 115 Part 2, 306–321.
- Li, X., Yan, Y., Shang, Y. ve Tu, J., 2015. An Eulerian-Eulerian model for particulate matter transport in indoor spaces, Building and Environment, 86, 191–202.
- Liddament, M. W., 2000. A review of ventilation and the quality of ventilation air, Indoor Air, 10, 3, 193–199.
- Lin, T., Tung, Y.-C., Hu, S.-C. ve Lin, C.-Y., 2010. Effects of the Removal of 0.1 μm Particles in Industrial Cleanrooms with a Fan Dry Coil Unit (FDCU) Return System, Aerosol and Air Quality Research, 10, 6, 571–580.
- Lin, Z., Chow, T. T. ve Tsang, C. F., 2005. Stratum ventilation? A conceptual introduction, *Proceedings of the 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, 4-9 September 2005*. Beijing, China.
- Lin, Z., Chow, T. T., Fong, K. F., Tsang, C. F. ve Wang, Q., 2005. Comparison of performances of displacement and mixing ventilations. Part II: Indoor air quality, International Journal of Refrigeration, 28, 2, 288–305.
- Lin, Z., Chow, T. T., Tsang, C. F., Fong, K. F. ve Chan, L. S., 2005. CFD study on effect of the air supply location on the performance of the displacement ventilation system, Building and Environment, 40, 8, 1051–1067.
- Lin, Z., Chow, T. T., Wang, Q., Fong, K. F. ve Chan, L. S., 2005. Validation of CFD model for research into displacement ventilation, Architectural Science Review, 48, 4, 305–316.
- Liu, G., Xiao, M., Zhang, X., Gal, C., Chen, X., Liu, L. ve Clements-Croome, D., 2017. A review of air filtration technologies for sustainable and healthy building ventilation, Sustainable Cities and Society, 32, 375–396.
- Liu, J., Dalgo, D. A., Zhu, S., Li, H., Zhang, L. ve Srebric, J., 2019. Performance analysis of a ductless personalized ventilation combined with radiant floor cooling system and displacement ventilation, Building Simulation.
- Lu, Y., Yoshino, H., Takaki, R., Kurihara, G., Lu, Y., Yoshino, H. ve Kurihara, G., 2011. Effect of ventilation strategies for removing indoor house dust: An experimental and simulation study, 17, 4, 410–418.
- Lv, Y., Wang, H. ve Wei, S., 2018. The transmission characteristics of indoor particles under two ventilation modes, Energy and Buildings, 163, 1–9.
- Maghirang, R. G., Jerez, S. B. ve Predicala, B. Z., 2001. Relative ventilation effectiveness in a mechanically ventilated airspace under isothermal conditions, Transactions of the ASAE, 44, 3, 691–696.

- Maslow, A. H., 1943. A theory of human motivation., Psychological Review, 50, 4, 370–396.
- Memarzadeh, F., 2009. Effect of reducing ventilation rate on indoor air quality and energy cost in laboratories, Journal of Chemical Health and Safety, 16, 5, 20–26.
- Memarzadeh, F. ve Jiang, J., 2000. Methodology for minimizing risk from airborne organisms in hospital isolation rooms, ASHRAE Transactions, 106, 733–749.
- Memarzadeh, F. ve Xu, W., 2012. Role of air changes per hour (ACH) in possible transmission of airborne infections, Building Simulation, 5, 1, 15–28.
- Mendell, M. J., Eliseeva, E. A., Davies, M. M., Spears, M., Lobscheid, A., Fisk, W. J. ve Apte, M. G., 2013. Association of classroom ventilation with reduced illness absence: A prospective study in California elementary schools, Indoor Air, 23, 6, 515–528.
- Mills, E., Shamshoian, G., Blazek, M., Naughton, P., Seese, R. S., Tschudi, W. ve Sartor, D., 2008. The business case for energy management in high-tech industries, Energy Efficiency, 1, 1, 5–20.
- Mosley, R. B., Greenwell, D. J., Sparks, L. E., Guo, Z., Tucker, W. G., Fortmann, R. ve Whitfield, C., 2001. Penetration of Ambient Fine Particles into the Indoor Environment, Aerosol Science and Technology, 34, 1, 127–136.
- Mousavi, E. S. ve Grosskopf, K. R., 2014. Ventilation Rates and Airflow Pathways in Patient Rooms: A Case Study of Bioaerosol Containment and Removal, Annals of Occupational Hygiene, 59, 9, 1190–1199.
- Müllejjans, H., 1966. *Über die Ähnlichkeit der nicht-isothermen Strömung und den Wandübergang in Räumen mit Strahl Lüftung. Forschungsber. des Landes NRW, no. 1656, Westdeutscher Verlag, Köln. The similarity between non-isothermal flow and heat transfer in mechanically ventilated room.*
- Mundt, E., Mathisen, H., Nielsen, P. ve Moser, A., 2004. *REHVA Guidebook No. 2, Ventilation effectiveness*. Brussels: REHVA.
- Murakami, S., Kato, S., Nagano, S. ve Tanaka, Y., 1992. Diffusion characteristics of airborne particles with gravitational settling in a convection-dominant indoor flow field, ASHRAE Transactions, 98, pt 1, 82–97.
- Nazaroff, W. W., Salmon, L. G. ve Cass, G. R., 1990. Concentration and Fate of Airborne Particles in Museums, Environmental Science and Technology, 24, 1, 66–77.
- Nielsen, P. V., 1999. *Lecture Notes on Scale-Model Experiments*. [http://vbn.aau.dk/en/publications/lecture-notes-on-scalemodel-experiments\(d5ffe240-a869-11da-8341-000ea68e967b\).html](http://vbn.aau.dk/en/publications/lecture-notes-on-scalemodel-experiments(d5ffe240-a869-11da-8341-000ea68e967b).html) 10.10.2017

- Ning, M., Mengjie, S., Mingyin, C., Dongmei, P. ve Shiming, D., 2016. Computational fluid dynamics (CFD) modelling of air flow field, mean age of air and CO₂ distributions inside a bedroom with different heights of conditioned air supply outlet, Applied Energy, 164, 906–915.
- Noakes, C. J., 2004. Modelling the Performance of Upper Room Ultraviolet Germicidal Irradiation Devices in Ventilated Rooms: Comparison of Analytical and CFD Methods, Indoor and Built Environment, 13, 6, 477–488.
- Nomura, Y., Hopke, P. K., Fitzgerald, B. ve Mesbah, B., 1997. Deposition of particles in a chamber as a function of ventilation rate, Aerosol Science and Technology, 27, 1, 62–72.
- Novoselac, A. ve Srebric, J., 2003. Comparison of air exchange efficiency and contaminant removal effectiveness as IAQ indices, ASHRAE Transactions, 109 Part 2, 339–349.
- Olesen, B. W., Simone, A., Krajčák, M., Causone, F. ve De Carli, M., 2011. Experimental study of air distribution and ventilation effectiveness in a room with a combination of different mechanical ventilation and heating/cooling systems, International Journal of Ventilation, 9, 4, 371–383.
- Olmedo, I., Nielsen, P. V., de Adana, M. R. ve Jensen, R. L., 2013. The risk of airborne cross-infection in a room with vertical low-velocity ventilation, Indoor Air, 23, 1, 62–73.
- Ouazia, B., Tardif, M., Macdonald, I., Thompson, A. ve Booth, D., 2011. In-situ performance of displacement ventilation system in Canadian schools with radiant heating systems, ASHRAE Transactions, 117, Part 2, 207–219.
- Pantelic, J., Sze-To, G. N., Tham, K. W., Chao, C. Y. H. ve Khoo, Y. C. M., 2009. Personalized ventilation as a control measure for airborne transmissible disease spread, Journal of The Royal Society Interface, 6, suppl_6, 715-726.
- Patankar, S. V., 1980. *Numerical heat transfer and fluid flow*. New York: Hemisphere Publishing Corporation.
- Pereira, M. L., Graudenz, G., Tribess, A. ve Morawska, L., 2009. Determination of particle concentration in the breathing zone for four different types of office ventilation systems, Building and Environment, 44, 5, 904–911.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J. ve Pout, C., 2008. A review on buildings energy consumption information, Energy and Buildings, 40, 3, 394–398.
- Peters, A., Dockery, D. W., Muller, J. E. ve Mittleman, M. A., 2001. Increased particulate air pollution and the triggering of myocardial infarction, Circulation, 103, 23, 2810–2815.

- Pope, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K. ve Thurston, G. D., 2002. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution., JAMA, 287, 9, 1132–1141.
- Qian, H. ve Li, Y., 2010. Removal of exhaled particles by ventilation and deposition in a multibed airborne infection isolation room, Indoor Air, 20, 4, 284–297.
- Qian, H., Li, Y., Nielsen, P. V. ve Hyldgaard, C. E., 2008. Dispersion of exhalation pollutants in a two-bed hospital ward with a downward ventilation system, Building and Environment, 43, 3, 344–354.
- Riley, W. J., McKone, T. E., Lai, A. C. K. ve Nazaroff, W. W., 2002. Indoor particulate matter of outdoor origin: Importance of size-dependent removal mechanisms, Environmental Science and Technology, 36, 2, 200–207.
- Rim, D. ve Novoselac, A., 2010. Ventilation effectiveness as an indicator of occupant exposure to particles from indoor sources, Building and Environment, 45, 5, 1214–1224.
- Roache, P. J., 1994. Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies, Journal of Fluids Engineering, 116, 3, 405–413.
- Rodríguez, N. A., Hinojosa, J. F. ve Xamán, J., 2015. Comparative Study Between Experimental Data and Numerical Results of Turbulent Mixed Convection in a Ventilated Cavity, Journal of Heat Transfer, 137, 5, 054501.
- Sadrizadeh, S., Holmberg, S. ve Tammelin, A., 2014. A numerical investigation of vertical and horizontal laminar airflow ventilation in an operating room, Building and Environment, 82, 517–525.
- Salmanzadeh, M., Zahedi, G., Ahmadi, G., Marr, D. R. ve Glauser, M., 2012. Computational modeling of effects of thermal plume adjacent to the body on the indoor airflow and particle transport, Journal of Aerosol Science, 53, 29–39.
- Sandberg, M., 1981. What is ventilation efficiency?, Building and Environment, 16, 2, 123–135.
- Sandberg, M., 1984. The multi-chamber theory reconsidered from the viewpoint of air quality studies, Building and Environment, 19, 4, 221-223.
- Sattari, A. ve Sandberg, M., 2013. PIV Study of Ventilation Quality in Certain Occupied Regions of a Two-Dimensional Room Model with Rapidly Varying Flow Rates, International Journal of Ventilation, 12, 2, 187–194.
- Schmidt, F., Gartz, K. ve Fissan, H., 1997. Turbulent particle deposition on a horizontal circular plate, Journal of Aerosol Science, 28, 6, 973-984.
- Serrano-Arellano, J., Xamán, J. ve Álvarez, G., 2013. Optimum ventilation based on the ventilation effectiveness for temperature and CO2 distribution in ventilated

- cavities, International Journal of Heat and Mass Transfer, 62, 1, 9–21.
- Singh, J., 1996. Impact of indoor air pollution on health, comfort and productivity of the occupants, Aerobiologia, 12, 2, 121–127.
- Skistad, H., 2003. Floor heating and displacement ventilation, *Cold Climate HVAC 2003*. Trondheim, Norway.
- Thatcher, T. L., Lai, A. C. K., Moreno-Jackson, R., Sextro, R. G. ve Nazaroff, W. W., 2002. Effects of room furnishings and air speed on particle deposition rates indoors, Atmospheric Environment, 36, 11, 1811–1819.
- Thatcher, T. L. ve Layton, D. W., 1995. Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence, Atmospheric Environment, 29, 13, 1487–1497.
- Tung, Y. C., Hu, S. C., Xu, T. ve Wang, R. H., 2010. Influence of ventilation arrangements on particle removal in industrial cleanrooms with various tool coverage, Building Simulation, 3, 1, 3–13.
- Villafruela, J. M., Castro, F., San José, J. F. ve Saint-Martin, J., 2013. Comparison of air change efficiency, contaminant removal effectiveness and infection risk as IAQ indices in isolation rooms, Energy and Buildings, 57, 210–219.
- Wallace, L., 1996. Indoor Particles: A Review, Journal of the Air and Waste Management Association, 46, 2, 98–126.
- Wang, M., Lin, C.-H. ve Chen, Q., 2012. Advanced turbulence models for predicting particle transport in enclosed environments, Building and Environment, 47, 40–49.
- Wang, X., Zhang, Y., Zhao, L. Y. ve Riskowski, G. L., 2000. Effect of ventilation rate on dust spatial distribution in a mechanically ventilated airspace, Transactions of the ASAE, 43, 6, 1877–1884.
- Wargoeki, P., 2000. The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms and productivity, Indoor Air, 10, 4, 222–236.
- Weschler, C. J., Shields, H. O. ve Shah, B. M., 1996. Understanding and Reducing the Indoor Concentration of Submicron Particles at a Commercial Building in Southern California, Journal of the Air and Waste Management Association, 46, 4, 291–299.
- Xu, Z., 2014. *Fundamentals of Air Cleaning Technology and Its Application in Cleanrooms* (1. baskı). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Yakhot, V., Orszag, S. A., Thangam, S., Gatski, T. B. ve Speziale, C. G., 1992. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique, Physics of Fluids A, 4, 7, 1510–1520.

- Yang, B., Melikov, A. K., Kabanshi, A., Zhang, C., Bauman, F. S., Cao, G. ve Lin, Z., 2019. A review of advanced air distribution methods - theory, practice, limitations and solutions, Energy and Buildings, 202, 109359.
- Yin, Y., Xu, W., Gupta, J., Guity, A., Marmion, P., Manning, A. ve Chen, Q., 2009. Experimental Study on Displacement and Mixing Ventilation Systems for a Patient Ward, HVAC&R Research, 15, 6, 1175–1191.
- Zhang, Z. ve Chen, Q., 2007. Comparison of the Eulerian and Lagrangian methods for predicting particle transport in enclosed spaces, Atmospheric Environment, 41, 25, 5236–5248.
- Zhao, B., 2005. Numerical Investigation of Particle Diffusion in a Clean Room, Indoor and Built Environment, 14, 6, 469–479.
- Zhao, B., Yang, C., Yang, X. ve Liu, S., 2008. Particle dispersion and deposition in ventilated rooms: Testing and evaluation of different Eulerian and Lagrangian models, Building and Environment, 43, 4, 388–397.
- Zhao, B., Zhang, Y., Li, X., Yang, X. ve Huang, D., 2004. Comparison of indoor aerosol particle concentration and deposition in different ventilated rooms by numerical method, Building and Environment, 39, 1, 1–8.
- Zhong, K., Yang, X. ve Kang, Y., 2010. Effects of ventilation strategies and source locations on indoor particle deposition, Building and Environment, 45, 3, 655–662.
- Zhou, Y., Deng, Y., Wu, P. ve Cao, S.-J., 2017. The effects of ventilation and floor heating systems on the dispersion and deposition of fine particles in an enclosed environment, Building and Environment, 125, 192–205.
- Zhu, S., Srebric, J., Rudnick, S. N., Vincent, R. L. ve Nardell, E. A., 2014. Numerical Modeling of Indoor Environment with a Ceiling Fan and an Upper-Room Ultraviolet Germicidal Irradiation System., Building and environment, 72, 116–124.
- Zhuang, C., Yang, G., Long, T. ve Hu, D., 2017. Numerical comparison of removal and deposition for fully-distributed particles in central- and split-type air-conditioning rooms, Building and Environment, 112, 17–28.

ÖZGEÇMİŞ

Yunus Emre ÇETİN, 1984 yılında Trabzon'da doğdu. Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2008 yılında bölüm üçüncüsü olarak mezun oldu. 2008-2011 yılları arasında GEA Isısan'da proje mühendisi olarak çalıştı. 2012-2014 yılları arasında KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Eğitimini tamamlayıp Doktora eğitimine başladı. 2011 yılı sonundan itibaren KTÜ Arsin Meslek Yüksekokulu Elektrik ve Enerji Bölümü'nde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Halen aynı göreve devam etmekte olup, İngilizce bilmektedir.