

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOĞAL HAVALANDIRMALI DERSLİKLERDE CO₂ DAĞILIMININ
SAYISAL İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Özlem FAZLIOĞLU

EKİM 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOĞAL HAVALANDIRMALI DERSLİKLERDE CO₂ DAĞILIMININ
SAYISAL İNCELENMESİ

Özlem FAZLIOĞLU

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 16/ 09 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 10/ 10 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ertan BAYDAR

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Doğal Havalandırılmalı Dersliklerde CO₂ Dağılımının Sayısal İncelenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Prof. Dr. Ertan BAYDAR’a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Yücel ÖZMEN’e, Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR’a, Prof. Dr. Hakkı YAVUZ’a ve Dr. Öğr. Üyesi Emin TUĞCU’ya ve eğitim öğretim hayatımda katkısı olan tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Tez çalışması sürecinde bana desteklerini esirgemeyen Gemi İnşaatı ve Gemi Makine Mühendisliği Bölümü ARGE Laboratuvarında çalışma imkanı tanıyan değerli hocam Doç. Dr. Emre PEŞMAN’a, bilgisi ve arkadaşlığı ile bana destek olan Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Zeki ŞENER’e teşekkür ederim.

Son olarak, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem, babam ve kardeşlerime teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu çalışmada kullanılan hesaplama kaynakları Ulusal Yüksek Başarımlı Hesaplama Merkezi’nin (UHEM) 4013272022 numaralı desteği ile sağlanmıştır.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Özlem FAZLIOĞLU

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Doğal Havalandırmalı Dersliklerde CO₂ Dağılımının Sayısal İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Ertan BAYDAR’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/çözümlemeleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 10/10/2024

Özlem FAZLIOĞLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. TEMEL BİLGİLER.....	1
1.1. Konunun Önemi.....	1
1.2. Kaynak Araştırması	3
1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	9
1.4. İç Ortam Hava Kalitesini Etkileyen Unsurlar.....	10
1.5. İç Ortam Hava Kalitesi Standartları.....	11
1.6. Solunum Kaynaklı CO ₂ Konsantrasyonunun Hesaplanması	13
1.6.1. Kararlı Durumda CO ₂ Konsantrasyonunun Hesaplanması	13
1.6.2. Zamana Bağlı Durumda CO ₂ Konsantrasyonunun Hesaplanması	14
1.7. İç Ortam Havalandırması İçin Kullanılan Yöntemler.....	15
1.7.1. Bina ve İnsan Kaynaklı Kirletici Bileşenlerini Esas Alan Yöntem.....	15
1.7.2. Kişi Sayısı veya Birim Mahal Alanını Esas Alan Yöntem	16
1.7.3. Mahaldeki CO ₂ Seviyesini Esas Alan Yöntem	16
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	17
2.1. Hareket Denklemleri ve Türbülans Modeli	17
2.2. Sayısal Çözümleme.....	20
2.2.1. Akış Alanı Geometrisi.....	20
2.2.2. Ağ Yapısı ve Çözüm Alanı	23
2.2.3. Çözüm Yöntemi	28
2.2.4. Başlangıç ve Sınır Koşulları.....	28
2.3. Sayısal Modelin Doğrulanması.....	29
2.3.1. Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırma	29

2.3.2. Farklı Solunum Çeşitlerinin İç Ortam CO ₂ Konsantrasyonuna Etkisi	32
2.3.3. Derslik Ortamına Farklı Yerlerden Hava Girişinin Etkisi.....	33
2.4. Sayısal Çözümleme Senaryoları	35
2.4.1. Kapı ve Pencere Kapalı Dolu Derslik	35
2.4.2. Kapı ve Pencere Açık Dolu Derslik	36
2.4.3. Ders Sonrası Kapı ve Pencere Açık Boş Derslik	36
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	38
3.1. Kapı ve Pencere Kapalı Dolu Derslikte CO ₂ Konsantrasyonundaki Değişim	38
3.2. Kapı ve Pencere Açık Dolu Derslikte CO ₂ Konsantrasyonundaki Değişim	42
3.2.1. Kapı ve Pencere Açık Dolu Derslikte Regresyon Analizi	53
3.3. Kapı ve Pencere Açık Boş Derslikte CO ₂ Konsantrasyonundaki Değişim	55
3.3.1. Kapı ve Pencere Açık Boş Derslikte Regresyon Analizi	62
4. SONUÇLAR.....	64
5. ÖNERİLER	66
6. KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

DOĞAL HAVALANDIRMALI DERSLİKLERDE CO₂ DAĞILIMININ SAYISAL İNCELENMESİ

Özlem FAZLIOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ertan BAYDAR
2024, 72 Sayfa

Bu tez, Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği binasındaki bir dersliğin iç ortam hava kalitesinin, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak farklı senaryolar için yapılan çözümlemelerle incelenmesine yöneliktir. Sayısal yöntem için ANSYS Fluent 2022 R2 yazılımı, istatistiksel yöntem için ise IBM SPSS Statistics 23 yazılımı kullanılmıştır.

Dersliklerde solunum kaynaklı CO₂ birikimi için farklı senaryolara göre çözümlemeler yapılmıştır. Tüm çalışmalarda 11 farklı senaryo içeren 114 farklı durum göz önüne alınmıştır. Kapı ve pencere kapalı dolu derslik, kapı ve pencere açık dolu derslik ve kapı pencere açık boş derslik durumlarında farklı kişi sayısı, pencere açıklık alanı ve hava değişim oranlarının solunum kaynaklı CO₂ konsantrasyonu üzerinde zamana bağlı etkileri araştırılmıştır. Ayrıca, sayısal çözümlemelerden elde edilen verilerle yapılan regresyon analizi sonucunda, solunum kaynaklı CO₂ konsantrasyonunun etken değişkenlerle olan ilişkisini ifade eden denklemler geliştirilmiştir.

Havalandırma yapılmayan derslikte CO₂ konsantrasyonunun, kişi sayısına bağlı olarak, 10 ila 30 dakika içinde standartlarca kabul edilen 1000 ppm kritik değerin üzerine çıktığı, bir saatlik ders süresi sonunda 4000 ppm değerine ulaştığı belirlenmiştir. Havalandırma yapılan dolu derslikte bir saatlik ders süresince, kişi sayısı ile artan konsantrasyonun 1000 ppm değerinin altında ve biraz üzerinde olduğu görülmüştür. Havalandırılmayan derslikte ders sonrası boş durumda yapılan havalandırmada, pencere açıklık alanı ve hava akış hızına göre 15 ila 60 dakika aralığında atmosferik CO₂ konsantrasyon değeri olan 400 ppm civarına yaklaşılacağı bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Derslik, CO₂ konsantrasyonu, Hava değişim oranı, HAD

PhD. Thesis

SUMMARY

NUMERICAL INVESTIGATION OF CO₂ DISTRIBUTION IN NATURALLY VENTILATED CLASSROOMS

Özlem FAZLIOĞLU

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Ertan BAYDAR
2024, 72 Pages

This thesis is aimed at examining the indoor air quality of a classroom in the Mechanical Engineering building of Karadeniz Technical University with solutions made for different scenarios using the computational fluid dynamics (CFD) method. ANSYS Fluent 2022 R2 software was used for the numerical method and IBM SPSS Statistics 23 software was used for the statistical method.

Analysis was made according to different scenarios for CO₂ accumulation from respiration in classrooms. In all studies, 114 different situations including 11 different scenarios were considered. The effects of different number of people, window opening area and air exchange rates on the amount of CO₂ from respiration were investigated in the cases of occupied classroom with doors and windows closed, occupied classroom with doors and windows open and empty classroom with doors and windows open. In addition, as a result of the regression analysis performed with the data obtained from the numerical solutions, equations expressing the relationship between the CO₂ concentration from respiration and the effective variables were developed.

It was determined that in the unventilated classroom, the CO₂ concentration exceeded the critical value of 1000 ppm accepted by standards within 10 to 30 minutes, depending on the number of people, and reached 4000 ppm at the end of a 1-hour lesson. In the occupied classroom with ventilation, the concentration increased with the number of people during a 1-hour lesson, and was found to be below and slightly above 1000 ppm. In the unventilated classroom, it was found that in the ventilation performed after the lesson in the empty condition, the atmospheric CO₂ concentration value of 400 ppm would be approached within 15 to 60 minutes, depending on the window opening area and airflow rate.

Key Words: Classroom, CO₂ concentration, Air change rate, CFD

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. 2022 yılı ABD sera gazı emisyonları oranı	1
Şekil 2. Atmosferik CO ₂ seviyesinin tarihsel değişimi	2
Şekil 3. Atmosferik sıcaklık anomalisinin tarihsel değişimi	3
Şekil 4. Dersliğin üç boyutlu mimarisi.....	20
Şekil 5. Dersliğin mimari ve fiziki detayları	21
Şekil 6. Dersliğin yan görünüş ölçülendirme detayları	21
Şekil 7. Derslikteki insanlar için geometrik modeller: (a) Ayrıntılı (b) Dikdörtgen prizma	22
Şekil 8. Geometrik modellerde kullanılan pencere tipleri (a) ve (b)	22
Şekil 9. Üç boyutlu ağ hücresi tipleri	23
Şekil 10. Polyhedron ağ yapısı	24
Şekil 11. Çözüm alanı ağ yapısı	24
Şekil 12. (a) Düşey düzlemde ağ yapısı detayı (b) İnsan figürü ağ örüntüsü detayı	25
Şekil 13. Dikdörtgenler prizması şeklindeki insan modeli ağ yapısı	25
Şekil 14. Boş ve farklı sayıda kişi için dersliğin ağ yapısı	26
Şekil 15. Kapı pencere kapalı derslikte ağ yoğunluğunun çözüm üzerindeki etkisi	27
Şekil 16. Kapı pencere açık derslikte ağ yoğunluğunun çözüm üzerindeki etkisi	27
Şekil 17. Ayrıntılı sayısal model için (a) CO ₂ ve (b) Sıcaklık değişimleri	30
Şekil 18. Basitleştirilmiş sayısal model için (a) CO ₂ ve (b) Sıcaklık değişimleri	31
Şekil 19. Farklı solunum çeşitlerinin iç ortam CO ₂ konsantrasyonuna etkisi	33
Şekil 20. Farklı solunum çeşitlerinin iç ortam sıcaklığına etkisi.....	33
Şekil 21. Ortama hava girişinin farklı yerden sağlandığı durumlarda CO ₂ değişimi	34
Şekil 22. Kapı ve pencere kapalı dolu sınıfta farklı yüksekliklerde CO ₂ dağılımları	38
Şekil 23. Kapı ve pencere kapalı dolu derslikte farklı yüksekliklerde hava hızı dağılımları	39
Şekil 24. Senaryo-1 derslik içinde kişi sayısına hacimsel CO ₂ konsantrasyonları.....	40
Şekil 25. Senaryo-1 derslik içindeki kişi sayısına göre sıcaklık değişimi.....	41
Şekil 26. Ders esnasında kapalı sınıf için analitik ve sayısal değişimler	41
Şekil 27. Derslikte 13 kişi olması durumunda, farklı pencere açıklık alanlarında, farklı akış hızları için hacimsel CO ₂ değişimleri (a) 1 m ² (b) 2 m ² (c) 3m ²	43

Şekil 28. Derslikte 19 kişi olması durumunda, farklı pencere açıklık alanlarında, farklı akış hızları için hacimsel CO ₂ değişimleri (a) 1 m ² (b) 2 m ² (c) 3m ²	45
Şekil 29. Derslikte 25 kişi olması durumunda, farklı pencere açıklık alanlarında, farklı akış hızları için hacimsel CO ₂ değişimleri (a) 1 m ² (b) 2 m ² (c) 3m ²	46
Şekil 30. Derslikte 31 kişi olması durumunda, farklı pencere açıklık alanlarında, farklı akış hızları için hacimsel CO ₂ değişimleri (a) 1 m ² (b) 2 m ² (c) 3m ²	48
Şekil 31. Derslikte 37 kişi olması durumunda, farklı pencere açıklık alanlarında, farklı akış hızları için hacimsel CO ₂ değişimleri (a) 1 m ² (b) 2 m ² (c) 3m ²	49
Şekil 32. Dolu derslikte 1 m ² pencere açıklık alanı için analitik ve sayısal CO ₂ değişimleri	51
Şekil 33. Dolu sınıfta 0.25 m/s hızda 13 dakika sonunda CO ₂ 'nin hacimsel dağılımı	52
Şekil 34. Dolu derslikte 0.25 m/s'de 13 dakika sonunda CO ₂ dağılımları	53
Şekil 35. Denklem 26'nın sonuçları ve sayısal sonuçlar için CO ₂ konsantrasyonları	54
Şekil 36. Senaryo 5 (A _p =1 m ²) için CO ₂ konsantrasyonları	57
Şekil 37. Senaryo 6 (A _p =1.5 m ²) için CO ₂ konsantrasyonları	58
Şekil 38. Senaryo 7 (A _p =2 m ²) için CO ₂ konsantrasyonları	58
Şekil 39. Senaryo 8 (A _p =2.5 m ²) için CO ₂ konsantrasyonları	59
Şekil 40. Senaryo 9 (A _p =3 m ²) için CO ₂ konsantrasyonları	59
Şekil 41. Senaryo 10 (A _p =1.9 m ²) için CO ₂ konsantrasyonları	60
Şekil 42. Senaryo 11 (A _p =2.8 m ²) için CO ₂ konsantrasyonları	60
Şekil 43. Boş derslikte, farklı pencere açıklık alanlarında, farklı hava değişim sayıları için hacimsel analitik ve sayısal CO ₂ değişimleri (a) 1 m ² (b) 1.5 m ² (c) 2 m ²	61
Şekil 44. Denklem 27'nin sonuçları ve sayısal sonuçlar için CO ₂ konsantrasyonları	63

TABLÖLAR DİZİNİ

	Sayfa No
Tablo 1. TS EN 15251-2008:01 standardı iç ortam hava kalitesi kategorileri.....	12
Tablo 2. İç ortam için kabul edilebilir CO ₂ konsantrasyonları.....	12
Tablo 3. Farklı ülkelerde sınıflar için önerilen CO ₂ değerleri.....	13
Tablo 4. Derslik donanım aygıtları yüzey sıcaklıkları	29
Tablo 5. İç ortam soluma ve nefes verme havası içeriği	32
Tablo 6. Kapı ve pencere kapalı dolu derslikte CO ₂ değişimi için senaryo	35
Tablo 7. Kapı ve pencere açık dolu derslikte CO ₂ değişimi için senaryolar	36
Tablo 8. Kapı ve pencere açık boş derslikte CO ₂ değişimi için senaryolar.....	37
Tablo 9. Kapı ve pencere kapalı dolu derslik CO ₂ konsantrasyonları.....	40
Tablo 10. Ders esnasında kapı ve pencere açık dolu derslikte farklı hız ve pencere açıklıkları için hacimsel CO ₂ konsantrasyonları	42
Tablo 11. Önceden havalandırılmamış dolu derslikte ders esnasındaki doğal havalandırmada CO ₂ konsantrasyonları	52
Tablo 12. Kapı ve pencere açık boş derslik CO ₂ miktarları	56

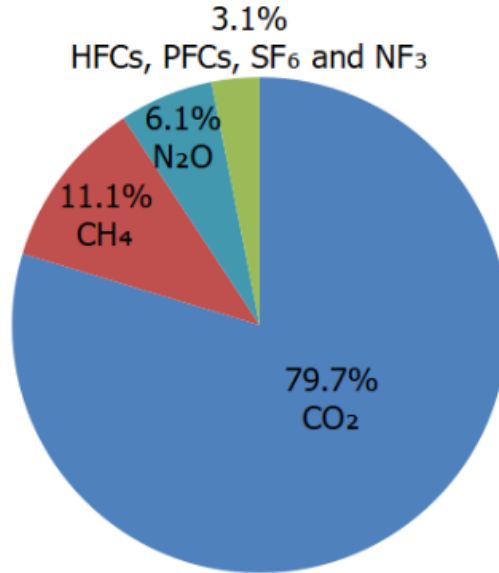
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A_D	: Vücut yüzey alanı, m^2
A_p	: Derslik pencere açıklık alanı, m^2
f	: Solunum frekansı, s^{-1}
M	: Metabolizma hızı, W/m^2
N	: Derslikteki kişi sayısı
n	: Hava değişim oranı, h^{-1}
R	: Solunum katsayısı
t	: Zaman, s
T	: Sıcaklık, $^{\circ}C$
V	: Hava hızı, m/s
$V_{solunum}$	: Soluk verme hızı, m/s
$\forall$	: Hacim, m^3
ASHRAE	: Amerikan Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Birliği
CISBE	: İngiltere Mekanik Tesisat Mühendisleri Birliği
CO_2	: Karbondioksit, ppm
DuBOIS	: Vücut Yüzey Alanı Eşitliği
PDD	: Memnun Olmayanların Yüzdesi
PMV	: Tahmini Ortalama Oy
ppm	: Milyonda bir birim ($1\text{ ml}/m^3$)
RANS	: Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes Denklemleri
RNG	: Renormalizasyon Grubu
SIMPLE	: Basınca bağlı denklem için yarı kapalı yöntem
USEPA	: ABD Çevre Koruma Ajansı
WHO	: Dünya Sağlık Örgütü

1. TEMEL BİLGİLER

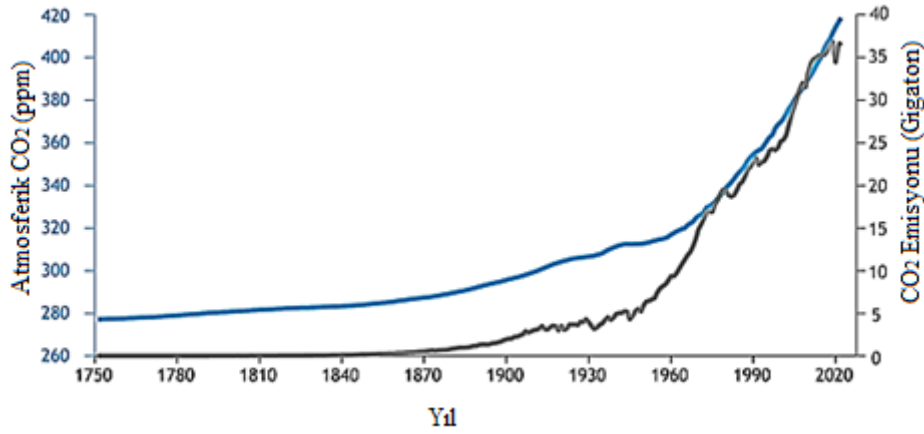
1.1. Konunun Önemi

Yere ve zamana bağılı olarak değişen atmosferik karbondioksit yoğunluğu, insanların yaşamlarının büyük bir kısmını geçirdikleri iç ortamlardaki karbondioksit yoğunluğunun birincil kaynağını oluşturduğu için çok önemlidir. İnsan nüfusunun geçmiş tarihsel dönemlere oranla son dönemlerde oldukça artmasıyla birlikte organik kirleticiler ve insanların artan tüketim ihtiyaçlarını karşılamak için gerekli üretimler sonucu ortaya çıkan inorganik kirleticiler atmosfere zarar vermektedir. Atmosferdeki CO₂ konsantrasyonundaki artış, canlı solunumu gibi organik kirleticilerin yanı sıra, gelişen sanayi ve fosil yakıtların yanması, endüstriyel süreçlerin sonucu olarak ortaya çıkan kimyasallar ve inorganik atıklardan kaynaklanmaktadır (URL-1, 2024). Bunun yanı sıra fotosentez yapan ve atmosferimizi temizleyen ormanların yangınlar sebebiyle gitgide azalması, yanardağların aktif hale geçmesi son yıllarda atmosferde sera etkisinin sürekli arttığını göstermektedir. Şekil 1’de görüleceği üzere atmosferde ısıyı hapseden küresel ısınmaya sebep olan gazlardan en önemlisi CO₂’dir.



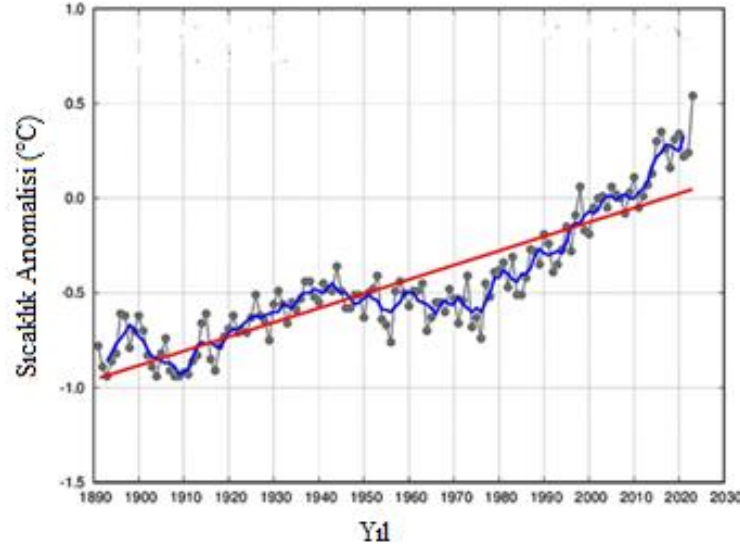
Şekil 1. 2022 yılı ABD sera gazı emisyonları oranı (URL-1, 2024)

İç ortam hava kalitesini etkileyen bir bileşik olan CO₂, normal koşullarda renksiz ve kokusuz bir gaz olup molekül ağırlığı havadan daha fazladır. Havanın ortalama molar kütlesi 28,97 kg/kmol iken CO₂ molar kütlesi ise 44,01 kg/kmol'dür (Çengel & Boles, 2013). Standart atmosfer şartlarında (15,1°C sıcaklık ve 1,01325 bar basınçta) hava ve CO₂ yoğunlukları sırasıyla 1,225 kg/m³ ve 1,839 kg/m³ olmaktadır (URL-2, 2023). Geçmişten günümüze atmosferdeki ortalama CO₂ konsantrasyonunun Şekil 2'de görüldüğü üzere uzun yıllar 280 ppm seviyesinde iken 19. Yüzyıldan itibaren sürekli arttığı, 2024 itibari ile yaklaşık 420 ppm seviyesine ulaştığı görülmektedir (URL-3, 2024). Atmosferde son yüzyılda artan CO₂ seviyesi, iç ortamlardaki CO₂ seviyesinin daha hızlı artmasına sebep olmaktadır. Gelecekte bu durum, kapalı ortamlarda iç ortam hava kalitesini önemli ölçüde etkileyecektir. Bu etkilerin sonuçlarını öngörmek için, CO₂'ye yüksek seviyede maruziyet neticesinde ortaya çıkan bulguların dikkatle değerlendirmesi gerekmektedir.



Şekil 2. Atmosferik CO₂ seviyesinin tarihsel değişimi (URL-3, 2024)

CO₂ konsantrasyonundaki hızlı artış, küresel ısınmanın sebeplerinden biridir. Şekil 3'de atmosferdeki küresel ısınmanın tarihsel değişimi yer almaktadır. Atmosferdeki sıcaklık anomalisinin artışı atmosferdeki CO₂ konsantrasyonunun artışı ile paralellik göstermektedir.



Şekil 3. Atmosferik sıcaklık anomalisinin tarihsel değişimi (URL-4, 2024)

1.2. Kaynak Araştırması

Yapılan araştırmalar iç ortam hava kalitesinin, dış ortam şartlarından daha fazla insan sağlığı üzerinde etkisi olduğunu ortaya koymuştur (Sundell, 2017). Kapalı iç ortamlarda bulunan başlıca gazlar karbondioksit (CO_2), karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO_x), ozon (O_3), kükürt dioksit (SO_2), formaldehit, uçucu organik bileşikler (UOB) ve radondur. Ev, ofis, okul, hastane gibi tüm kapalı ortamlarda insan solunumundan kaynaklı CO_2 konsantrasyonu, iç ortam hava kalitesini etkileyen en önemli parametrelerinden biridir. Kapalı alanlarda CO_2 konsantrasyonunun kolaylıkla ölçülebilmesi ve izlenebilmesi teknolojik olarak mümkündür. Bu nedenle, kapalı bir ortamın CO_2 konsantrasyonu seviyesi, iç ortam kalitesini sağlamak için gerekli havalandırma tipinin ve miktarının belirlenmesinde öncü bir kriter olarak kullanılmaktadır.

Kapalı hacimlerde insan solunumundan kaynaklı CO_2 artışı, ölçülmesi nispeten daha zor diğer partikül ve gaz kirleticilerin yoğunluğu hakkında da fikir vermektedir. Damlacık yoluyla ortam havasına geçen tüberküloz mikrobunun insanları enfekte etme potansiyeli, kapalı bir ortamda solunum kaynaklı CO_2 konsantrasyonu takip edilerek izlenebilir. Özellikle son yıllarda tüm dünyayı etkisi altına alan iç ortam havasında bulunan bulaşıcı virüslerin yarattığı hastalık risklerini önlemek için kolaylıkla ölçümü yapılabilen CO_2 konsantrasyonu yol gösterici olmaktadır. Solunum yolu enfeksiyonlarının hava yolu ile bulaşmasını önlemek için iç ortam havasında taze hava oranının yeterli olması gerekir.

Derslik, toplantı salonları gibi kalabalık ortamlarda CO₂ konsantrasyonu izlenerek havalandırmanın tipi ve miktarı belirlenebilmektedir (Peng & Jimenez, 2021; Rudnick & Milton, 2003).

Kapalı ortamlarda insanlarda CO₂ yoğunluğunun fiziksel ve bilişsel etkilerini incelemek için literatürde farklı araştırma yöntemleri kullanılır. Belirlenen kontrol hacminde yer alan ölçüm cihazı belirli süre boyunca ve belirli periyotlarda insan solunumundan kaynaklı CO₂ konsantrasyonu ölçülerek, subjektif testlerle iç ortam hava kalitesi değerlendirilmektedir. Ayrıca, CO₂ etkisi ile ortamda değişen diğer faktörlerin etkilerinin de göz önüne alınmasının daha doğru bir yaklaşım olduğu belirtilmektedir (Sofuoğlu, Arı, Toksoy & Civan, 2023).

Sınıflarda aşırı CO₂ birikimi, eğitim ve öğretimin verimini, öğrencilerin ve öğretmenlerin bilişsel performansını etkilediğinin belirtildiği çalışmalara sıklıkla rastlanmaktadır (Gaihre, Semple, Miller, Fielding & Turner, 2014; Ferreira & Cardoso, 2014; Muscatiello ve diğ., 2015; Allen ve diğ., 2019). Aynı zamanda CO₂ konsantrasyonunun, ortamda bulunan insanların bilişsel performansına kayda değer bir etkisi olmadığını ifade eden çalışmalar da mevcuttur (Zhang, Wargocki & Lian, 2016; Zhang, Wargocki, Lian & Thyregod, 2017). Mevcut çalışmalardaki bu ayrışmalar, araştırma yöntemlerinden kaynaklanmaktadır. Tüm ölçümlerde kalibrasyonu yapılmış cihazlar kullanılması ve sensörlerin doğru konumlandırılması, iç ortamda başlangıç şartlarının iyi tespit edilmesi ve ölçüm sonucunda iç ortamda CO₂ dışında sıcaklık, nem ve kirleticiler gibi diğer faktörlerin değişimlerdeki belirsizliklerinin giderilmesi ve CO₂ etkisinin değişen faktörlerle beraber değerlendirilmesi ile bu tartışmaların önüne geçilebilecektir (ASHRAE, 2022).

Doğal havalandırma bulunan 60 kişilik sınıfta yapılan ölçümlerde yetersiz havalandırma nedeniyle sınıflarda CO₂ seviyesinin 1000 ppm'den yüksek olmasının, öğrencilerde konsantrasyon eksikliğine sebep olduğu yapılan testlerle belirlenmiştir. (Gaihre, Semple, Miller, Fielding & Turner, 2014). Amerika'da 10 devlet okulunda yapılan ölçüm sonuçlarına göre 1000 ppm'in üzerinde CO₂ düzeyine sahip sınıflarda öğretmenlerde baş ağrısı, yorgunluk, konsantrasyon güçlüğü gibi belirtiler görülmüştür (Muscatiello ve diğ., 2015).

Dersliklerde sıcaklık, nem, karbondioksit, kükürt dioksit, nitrik oksit, azot dioksit, partikül madde, formaldehit ölçümleri yapılarak, iç ortam kalitesi açısından en yoğun kirleticilerin karbondioksit ve partikül madde olduğu; yetersiz havalandırma sebebiyle iç

ortam CO₂ konsantrasyonlarının kısa sürede 1000 ppm değerinin üzerine çıktığı belirtilmiştir (Lee & Chang, 2000).

Al-Hemoud ve diğ. (2017), dersliklerde iç ortam hava kirleticilerine yönelik belirli periyotlarda ölçümler alarak, CO₂ konsantrasyonunun kişi sayısı ile orantılı olarak arttığını, doğal havalandırmalı dersliklerde mekanik havalandırmaya göre yüksek yoğunlukta olduğunu ifade etmişlerdir.

İç ortam hava kalitesinin öğrencilerin okul çalışmaları ve sınavlardaki performanslarına etkileri yönünden, CO₂ konsantrasyonunun 2100 ppm değerinden 900 ppm değerine düşürülmesinin okul ödevleri ve bilişsel performans testlerine göre verimliliklerinin %12 arttığı; 2400 ppm değerinden 900 ppm değerine düşen CO₂ konsantrasyonunun ise sınav başarısını %5 arttırdığı ifade edilmiştir (Wargocki, Porras-Salazar, Contreras-Espinoza & Bahnfleth, 2020).

Alloca ve diğ. (2003), bir öğrenci yurdunda tek taraflı doğal havalandırmaya etki eden kuvvetleri analitik, ampirik ve sayısal olarak modellemiş ve sonuçları irdelemiştir. Sıcaklık farkının sebep olduğu kaldırma kuvveti ile oluşan doğal havalandırmada analitik ve sayısal sonuçlar arasında yaklaşık %10 fark; rüzgar ve kaldırma kuvvetinin beraber itici güç oluşturduğu doğal havalandırma ile ilgili sayısal ve ampirik sonuçlarda ise bu farkın %25 olduğunu belirtmişlerdir.

Üniversite dersliklerinde kış/yaz dönemlerinde iç ortam hava kalitesi ölçümleri gerçekleştirmiştir. Dersliklerin sıcaklık, bağıl nem, CO₂ ve partikül madde ölçüm sonuçlarının uluslararası standartlara uygunluğu Avcı (2014) tarafından irdelemiştir.

Aydın (2021), 16, 28 ve 49 öğrenci kapasiteli sınıflarda sıcaklık, nem, hava hızı, PMV–PPD dağılımları ve ortamın CO₂ konsantrasyon dağılımını sayısal olarak incelemiştir.

Bakó-Biró ve diğ. (2011), İngiltere’de çoğu doğal havalandırmaya sahip 16 ilköğretim sınıfında yapmış oldukları sıcaklık, hava hızı ve CO₂ konsantrasyonu içeren ölçümler ile iç ortam konfor şartlarının öğrencilerin bilişsel performanslarına etkilerini incelemiştir. Pencereler kapalı olarak yapılan ölçümlerde CO₂ konsantrasyonu çok kısa sürede 3000-4500 ppm seviyesine ulaşarak standartlarda önerilen değerlerin üzerine çıktığını belirlemiştir. Sınıfların CO₂ konsantrasyonunu ölçen ölçüm cihazları ile donatılması ve sınıflara verilen taze havanın öğrenci başına 1 litre/s değerinden, ASHRAE ve CISBE standartlarında yer alan minimum değer olan 8 litre/s değerine çıkarılmasını önermişlerdir.

Batterman (2017), okul dersliklerinde havalandırma için gerekli temiz hava miktarını insan solunumu kaynaklı CO₂ konsantrasyonunu izleyerek, sabit durum, birikme, azalma, geçici kütle dengesi yöntemlerini kullanarak araştırmıştır.

Caciolo ve diğ. (2012), dış ortamdaki rüzgarın iç ortam hava değişim miktarı üzerindeki etkisi için, doğal havalandırılmalı bir evin ikinci katındaki bir oda modellenerek, farklı rüzgâr yönü ve hızlarında odanın hava değişim oranlarını incelemişlerdir.

Dış ortamın sıcaklık, nem, rüzgâr hızı, güneş radyasyonu koşulları göz önünde bulundurularak dört farklı sınıfta farklı havalandırma koşullarında iç ortam hava kalitesi ölçülerek, pencerelerden yapılan doğal havalandırmanın hangi şartlarda uygun olacağı Duarte ve diğ. (2017) tarafından incelenmiştir. Sonbahar, kış ve ilkbahar dönemlerinde 15 günlük periyotlar halinde sınıflar dolu iken CO₂ ölçümleri yapılmıştır. Dış ortam sıcaklıklarının 16°C değerinin üzerinde olduğu hava koşullarında, sınıflarda doğal pencere havalandırmasının; dış ortam hava sıcaklığının 16°C değerinin altında olduğunda mekanik havalandırmanın yapılması önerilmiştir.

Grabe ve diğ. (2014), özel olarak düzenlenmiş bir test odasında farklı pencere modellerinin tek taraflı doğal havalandırma için iç ortam sıcaklığı, CO₂ seviyesi ve hava akış hızı ölçümleri yaparak, her bir pencere konfigürasyonunun havalandırma verimliliğini değerlendirmişlerdir.

Heracleous ve Michael (2019), Güney Avrupa'da bir ortaokul dersliğinin doğal havalandırma altında ısı konfor ve iç ortam hava kalitesi değişimini araştırmışlardır. İç ortam sıcaklığı, nem, hava hızı ve CO₂ konsantrasyonu değerleri ölçülerek, ders esnasında pencerelerin tamamı kapalı ve dinlenme zamanlarında pencereler açık durumda farklı havalandırma konumlarını incelemişlerdir. 25 kişilik sınıflarda CO₂ konsantrasyonunun 20 dakikalık sürede 1000 ppm değerini aştığını belirlemişlerdir.

Hong ve ark. (2017), doğal havalandırmanın, ısıl ortamın oluşturulması ve iç mekan hava kalitesinin iyileştirilmesinde önemli bir unsur olduğu ayrıca, enerji kaynaklarının tüketiminin ve küresel ısınmanın önüne geçilmesinde diğer havalandırma yöntemlerine göre daha avantajlı olduğu belirtilmiştir.

Jiang ve diğ. (2017), bir manken üzerinde soluk alma ve soluk verme akış davranışı üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Solunumun sinüzoidal dalga biçiminde, dakikada 15 kez olduğu göz önüne alınmış, 2 saniyede bir 0,45 litrelik bir hacimle nefes alıp verdiği varsayılmıştır. Parçacık Görüntü Hız Ölçer (PIV) sistemi kullanılarak mankenin solunum bölgesindeki akışın zamana bağlı dağılımları incelenmiştir.

Üniversite dersliklerine yönelik olarak Mehmet Kuş (2007) tarafından yapılan çalışmada, sıcaklık, nem, CO₂ ve partikül madde ile ilgili iç ortam hava kalitesi ölçümleri gerçekleştirilerek uluslararası standartlar ile değerlendirilmiş ve iç ortam hava kalitesini iyileştirecek öneriler sunulmuştur.

Luther ve diğ. (2018), deneysel sonuçları esas alarak sınıflarda CO₂ konsantrasyonunun, kişi sayısı, hava değişim miktarı ve solunum oranına bağlı olarak değişimini ifade etmişlerdir. CO₂ birikimini modellemek için sabit durum yöntemini ve bu yöntemin temel aldığı kütle dengesi denklemini kullanmışlardır. CO₂ birikimini azaltmak için doğal havalandırma yöntemlerini esas alan düşük maliyetli yöntemler önermişlerdir.

Mahyuddin ve diğ. (2024), iki üniversite dersliğindeki hava akışını ve solunum kaynaklı CO₂ dağılımını deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Tavanında rüzgar için girişi olan ve bir penceresi açık doğal havalandırmalı derslikte akış alanı incelenmiştir. Sınıf havalandırmasının rüzgar hızı ve yönü, öğrenci sayısı, aktiviteler ve oturma düzenlemeleri gibi birçok faktörden etkilendiğini belirtilmiştir.

Miao ve diğ. (2023), farklı dış ortam şartlarında doğal havalandırılan dersliklerde tüm yıl boyunca ölçüm yaparak veri setleri oluşturmuş, yapay sinir ağları yöntemi ile geliştirdikleri modelle farklı özelliklere sahip derslikler için CO₂ miktarının tahmin edilebileceğini belirtmişlerdir.

Muelas ve diğ. (2022), İspanya'da bir ilkokulda doğal olarak havalandırılan bir derslik için CO₂ konsantrasyon ölçümlerini, farklı pencere ve kapı açıklıkları ve konumları, tek taraflı ve çapraz havalandırma, öğrenci doluluk oranı gibi etkenleri göz önüne alarak gerçekleştirmişlerdir. Ders süresince sürekli havalandırmanın gerekli olduğunu, pencere ve kapının açık olduğu çapraz havalandırmanın iyi bir havalandırma sağladığı, pencere veya kapının birinin kapalı olması durumunda iç ortam CO₂ konsantrasyonunun arttığını ifade etmişlerdir.

Atina'da okullarda doğal havalandırmalı dersliklerde ders öncesi, sırasında ve sonrasında CO₂ konsantrasyonu ölçümleri, Santamouris ve diğ. (2008) tarafından gerçekleştirilmiştir. Dersliklerin yarısında ortalama iç mekan CO₂ konsantrasyonunun 1000 ppm'den yüksek olduğunu ve ASHRAE Standardı 62 tarafından öngörülen havalandırma seviyelerini karşılamadığını ifade etmişlerdir. Mekanik havalandırmalı dersliklerin doğal havalandırmalı dersliklere göre daha düşük CO₂ konsantrasyonuna sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Schibuola ve diğ. (2016), İtalya’da iki farklı ortaokul dersliklerinde kış sezonunda iç ortam sıcaklığı, nem ve CO₂ konsantrasyonu değerlerini ölçmüşlerdir. Dersliklere CO₂ ölçüm sisteminin kurulması ve doğal olarak havalandırılması önerilmiştir.

Çin’de bir üniversite kampüsündeki dersliklerde iç ortam hava kalitesi ölçümleri, Shi ve diğ. (2017) tarafından gerçekleştirilmiş ve karbondioksit miktarlarının zamana bağlı değişimleri incelenmiştir.

Simova ve diğ. (2016), mekanik havalandırmaya sahip bir bir derslikte, insan solunumunu temel alarak iç ortam CO₂ konsantrasyonundaki değişiklikleri sayısal olarak incelemişlerdir.

Song ve Meng (2015), Çin’de bir okul binasında sınıfların havalandırma koşullarını incelemiş ve havalandırma performansını iyileştirecek çözüm önerileri getirmiştir.

Stazi ve diğ. (2017), doğal havalandırmalı iki bitişik sınıfta iç ortam hava kalitesinin istenilen seviyede tutulmasını uyumlamak için otomatik açılan pencere sistemi tasarlamıştır. Geliştirilen sensörlü çalışan otomatik pencere açıp kapatma sistemi ile düşük CO₂ seviyesinde bir sınıf oluşturma mümkün olduğu ifade edilmiştir.

Tang ve diğ. (2016), Çin’de yüksek katlı binaların yoğun olduğu bir semtteki bir ilköğretim okulu yerleşkesinde farklı dersliklerde yaz ve mevsim geçişlerinde doğal havalandırmanın iç ortam hava kalitesine etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

Villafruela ve diğ. (2013), zaman bağımlı CFD çözümlemesi ile 3 farklı soluk alıp verme hız sınır koşulunu ayrı ayrı incelemişlerdir. Bir insanın solunum hızını sinüzoidal bir fonksiyon olarak ifade eden zamana bağlı sınır koşulunun en gerçekçi koşul olup deneysel veriler ile sayısal modeli karşılaştırılarak doğrulamışlardır.

Zivelonghi ve diğ. (2024), İtalya’da Covid-19 salgını sonrası dönemde mekanik havalandırma sisteminin olmadığı okul binalarında farklı sınıfların iç ortam hava kalitesini iyileştirmek için, iç ortamdaki CO₂ seviyesine bağlı olarak pencerelerin açıldığı tek taraflı durum ile kapı ve pencerelerin birlikte açıldığı çapraz havalandırma durumlarını incelemişlerdir.

Doğal havalandırma ile sabit hava hacimli ve değişken hava hacimli mekanik sistemli havalandırmalı dersliklerde yapılan CO₂ konsantrasyonu ölçümleri sonucunda, mekanik havalandırmanın doğal havalandırmaya göre tercih edilmesi gerektiği belirtilmiştir (Cabovsk’ ve diğ., 2022; Zheng ve diğ., 2022).

Ferrari ve diğ. (2023), İtalya’da bulunan doğal havalandırmalı üç okul binasında, ısıtma sezonunun sonunda CO₂ konsantrasyonu, iç ve dış ortam hava sıcaklıkları ve pencere

açıklığı gibi parametreleri dikkate alarak havalandırma oranlarının iç ortam hava kalitesi ve enfeksiyon riski üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. CO₂ konsantrasyonundaki değişimlere göre belirlenen hava değişimi için, 150 m³ hacmindeki bir derslik için en az 1,5 m²'lik bir pencere açıklık alanı gerektiğini ifade etmişlerdir.

Polonya ve İspanya'da iki farklı iklimde bulunan üniversite binalarında doğal havalandırmaya sahip on farklı derslikte karbondioksit konsantrasyonlarının ölçümleri Krawczyk ve diğ. (2016) tarafından yapılmıştır. Dersliklerin CO₂ konsantrasyonunun tahmini için sıcaklık ve basınç etkisinin yer aldığı bir denklem geliştirerek, standartları karşılamak için gereken minimum hava değişim oranlarının da tahmin edilebileceğini belirtmişlerdir.

1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, dersliklerde solunum kaynaklı CO₂ birikimi ve dağılımını sayısal çözümleme yöntemi ile incelemek, gerekli havalandırma stratejileri ile ortamdan CO₂ tahliyesini sağlayacak ve iç ortam hava kalitesini iyileştirebilecek öneriler sunmaktır. Doğal havalandırma durumunun incelenmesinden elde edilen sonuçlarla, ülkemizdeki okulların dersliklerinde yaygın olan bu havalandırma şekline yönelik mevcut literatüre katkı sağlamaktır.

Kapı ve pencereleri kapalı derslikte, ders sırasında kişi sayısına bağlı solunum sonucu ortaya çıkan CO₂ konsantrasyonlarının zamana bağlı değişimi incelenmiştir.

Ders esnasında zamana bağlı artan solunum kaynaklı CO₂ konsantrasyonu ile eş zamanlı olarak farklı pencere açıklıkları ve hava giriş hızları kullanılarak yapılan havalandırma senaryolarına göre CO₂ konsantrasyonunun zamana bağlı değişimleri için sayısal çözümlemeler yapılmıştır.

Ders sonrası CO₂ konsantrasyonu yüksek dersliğin, farklı pencere açıklıkları ve hava giriş hızları ile öngörülen senaryolar kullanılarak havalandırma sonrası derslikteki CO₂ konsantrasyonunun zamana bağlı değişimi incelenmiştir.

Sayısal çözümlemeler sonucu elde edilen verilerin SPSS programı ile istatistiksel analizi sonucunda, doğal havalandırılan ortamlarda CO₂ konsantrasyonundaki değişimler ile derslikteki kişi sayısı, pencere alanı, havalandırma hızı ve zaman arasındaki ilişkiler matematiksel bağıntılar şeklinde ifade edilmiştir.

1.4. İç Ortam Hava Kalitesini Etkileyen Unsurlar

İnsanlar barınma, eğitim ve çalışma gibi ihtiyaçlarından dolayı hayatlarının büyük bir kısmını genellikle kapalı alanlarda geçirmektedir. Kapalı alanlar, dış ortamdan gelen kirleticiler, iç ortamlardaki insan yoğunluğu ve faaliyetleri sonucunda oluşan kirletici etmenler ile birlikte insan sağlığını olumsuz yönde etkileyen bir iç ortama dönüşebilmektedir. İç ortam hava kalitesini sıcaklık, nem, hava hızı, karbondioksit, partikül madde, uçucu organik bileşikler, azot oksitler, karbon monoksit, ozon, kükürt dioksit, radon, formaldehit gibi birçok madde etkilemektedir (Akai, 2013).

İç ortamdaki hava hızının iç ortam sıcaklığına bağlı olarak, insanlar üzerindeki etkisi değişmektedir. TS EN ISO 7730-2006 standardına göre, dersliklerde insanları rahatsız etmeyecek hava hızlarının yaz mevsiminde 0.12-0.24 m/s aralığında, kış mevsiminde 0.1-0.21 m/s aralığında olması gerektiği belirtilmiştir.

Bir ortam havasındaki partikül madde miktarı, atmosfer havasının kirlilik durumuna, insan yoğunluğuna, bina yapısına, iç ortamlarda kullanılan tefriş malzemelerine, ortamın havalandırma durumu ve temizliğine göre değişkenlik gösterir. Partikül çapı 10 μm 'den daha küçük (PM10) ve 2.5 μm 'den daha küçük (PM2.5) maddeler solunum yoluyla insan vücuduna geçebilmektedir. Dünya Sağlık Örgütü tarafından ortalama 24 saatlik maruziyete göre PM10 için sınır değeri 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ve PM2.5 için ise 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ olarak önerilmektedir.

Uçucu organik bileşikler (VOC), oda sıcaklığında buharlaşabilen karbon bazlı organik kirleticiler olup, en önemlileri formaldehit ve benzendir. Formaldehit, bina malzemeleri ve mobilyalarından sıcaklık, nem ve zamana bağlı olarak iç ortam havasına geçebilen bir kirletici olup Dünya Sağlık Örgütü tarafından 30 dakikalık maruziyet sınır seviyesinin 0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ olması gerektiği bildirilmiştir. Mobilyalarda, boyalarda, vernik, cila, yapıştırıcı, yalıtım ürünleri, plastik ürün ve kaplamalarda kullanılabilen kanserojen bir kirletici olan benzenin iç ortamlarda olmaması önerilmektedir.

Eksik yanma sonucu ortaya çıkan karbon monoksit (CO) ve yüksek sıcaklıklarda oluşan azot oksitler (NOx) genellikle sanayi bölgelerinde ve bina ısıtmasının ve motorlu taşıtların yoğun olduğu şehir merkezlerinde karşılaşılan dış ortam havasında konsantrasyonu yüksek olan kirleticilerdendir. Bu bölgelere yakın okullarda iç ortamlarda ısınma kaynaklı yanma olmadığı sürece bu kirleticiler dış hava kaynaklı olarak değerlendirilmektedir. İç ortamda CO için 1 saatlik sınır değeri 30 ppm'dir.

Kükürt dioksit (SO_2) odun, kömür ve petrol gibi fosil yakıtların yanması sonucu meydana gelen bir yanma ürünü olup endüstriyel tesislerin yoğun olduğu yerlerde dış havaya yayılan zehirli bir gazdır. Bu bölgelere yakın okullarda iç ortam havasında görülebilmektedir. Dünya Sağlık Örgütü, SO_2 'nin 10 dakika maruziyet sınır değerini $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ olarak belirlemiştir.

Ozon (O_3) yüksek miktarda solunduğunda solunum yollarına zarar vermektedir. Dünya Sağlık Örgütü, 1 saatte 0.1 ppm değerinin aşılması gerektiğini belirtmektedir.

Radon (Rd), uranyumun parçalanması ile oluşan topraktan havaya geçen radyoaktif bir gazdır. İç ortamlarda mobilyalardan, boya, vernik gibi kimyasal maddelerden yayılabilmektedir. Dünya Sağlık Örgütü, bir iç ortamda $300 \text{ Bq}/\text{m}^3$ düzeyini aşmamasını tavsiye etmektedir.

1.5. İç Ortam Hava Kalitesi Standartları

Kapalı alanlar için CO_2 gazının etkisi, ilk kez 17. yüzyılda kötü hava olarak ifade edilmiştir. 19. yüzyılda hijyen biliminin kurucusu kabul edilen Pettenkofer, insanlardan kaynaklı CO_2 'nin iç ortamlardaki hava kirliliğinin bir göstergesi olduğunu ifade etmiş ve iç ortamlarda CO_2 konsantrasyonu sınır değerinin 1000 ppm olmasını önermiştir (ASHRAE, 2022).

ABD Mesleki Güvenlik ve Sağlık İdaresi (OSHA), endüstriyel ortamlar dışındaki bir iç ortamda 5000 ppm'in altında CO_2 seviyesinin toksik olmadığını kabul etmektedir (ASHRAE, 2022). İlk kez yayımlanan ASHRAE Standard 62-1989 (Ventilation For Acceptable Indoor Air Quality) standardında iç ortamlarda CO_2 konsantrasyonu sınır değeri olarak 1000 ppm'i önermiş olmasına karşın, yanlış yorumlamaların önüne geçmek için sonraki baskılarında bu değere yer vermemiştir. Ancak, literatürde 1000 ppm değeri ASHRAE kriteri olarak yaygınlaşmıştır.

Her ortam havasında CO_2 dışında küf, formaldehit, ince tozlar gibi diğer inorganik kirleticiler bulunabilmektedir. İç ortamın kullanım durumuna, kullanıcıların fiziksel özellik ve aktivitelerine, kullanıcı yoğunluğuna bağlı taze hava ihtiyacı için genellikle, CO_2 göz önüne alınmaktadır. Uzun süredir uygulamada kullanılan CO_2 İzlemeli Talep Kontrollü havalandırma sistemi ASHRAE tarafından da desteklenmekte olup, kişi başı yaklaşık 8 litre/s havalandırma miktarı önerilmektedir. İç ortam hava kalitesi için gerekli dış hava

miktarı belirlenirken, ortamda bulunan diğer kirleticiler için iç ortamın alanına bağlı bir ilave havalandırma miktarının da göz önüne alınması önerilmektedir.

TS EN 15251 (2008) standardında ise insanların yoğun olarak bulunduğu okul, ofis gibi ortamlarda tercihen kış koşullarında hava kirliliğinin yüksek olabileceği zamanlarda baş hizasında yapılacak CO₂ ölçümleri ve havalandırma debileri için iç ortam hava kalite kategorileri (IEQ), Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. TS EN 15251-2008:01 standardı iç ortam hava kalitesi kategorileri

Kategori	Açıklama
I	Yüksek seviyede beklenti-engelli, hasta, küçük çocuklar gibi özel ihtiyaçları olan, çok hassas ve kırılgan insanlar tarafından kullanılan mekanlar için tavsiye edilir.
II	Normal seviyede beklenti – yeni binalar ve bakım, onarım için kullanılmalı.
III	Kabul edilebilir, orta seviyeli beklenti – var olan binalar için kullanılabilir.
IV	Yukarıdaki kategoriler için, kriterlerin dışında kalan değerler. Bu kategori, sadece yılın sınırlı bir zaman dilimi için kabul edilir olmalıdır.

Tavsiye edilen iç ortam CO₂ değerlendirmesi ise Tablo 2’de yer almaktadır. Kişi başına dış ortam CO₂ konsantrasyon değerine ilave edilecek iç ortam CO₂ konsantrasyon değerlerini göstermektedir. TS EN 15251:2008-1 standardı doğal havalandırma tercih edilen büyük yapıların tüm iç ortamlarında CO₂ ölçümü yapmak yerine, %5-10’unu temsil eden alanlarda ölçümlerin yapılması yeterli olabileceğini ifade etmektedir.

Tablo 2. İç ortam için kabul edilebilir CO₂ konsantrasyonları

Standartlar	Kategoriler			
	Dış ortam değerine ilave iç ortam üst sınır CO ₂ konsantrasyonu seviyeleri (ppm)			
	I	II	III	IV
TS EN 15251-2008	350	500	800	>800
ISO 17772	550	800	1350	<1350
EN 16798	550	800	1350	<1350

Yeşil bina sertifikasyon sistemlerinde iç ortam hava kalitesinde CO₂ konsantrasyonu en önemli parametrelerden biri olup 530-1500 ppm arasında değişen seviyelerde olması beklenmektedir (Wei, Ramalho & Mandin, 2015). Tablo 3’te farklı ülkelerin CO₂ konsantrasyon sınır değerleri verilmiştir.

Tablo 3. Farklı ülkelerde sınıflar için önerilen CO₂ değerleri (Toksoy & Sofuoğlu, 2022)

Ülke	CO ₂ Konsantrasyonu üst sınır değerleri (ppm)
İngiltere	800-1000
Fransa	900
Almanya, İtalya, Finlandiya, Norveç, Danimarka, Litvanya, Kanada, Tayvan, Hong Kong, Japonya, Malezya, Çin, Filipinler, Güney Kore, Portekiz	1000
Hollanda	800/950/1200
İspanya	500 + CO _{2,dış}
İsveç	800 - 1000
Avusturalya	850
Yeni Zelanda	<1000

1.6. Solunum Kaynaklı CO₂ Konsantrasyonunun Hesaplanması

1.6.1. Kararlı Durumda CO₂ Konsantrasyonunun Hesaplanması

Bir insanın solunum esnasında üreteceği CO₂ miktarı vücut yüzey alanına, solunum katsayısına ve metabolizma hızına bağlıdır.

Bir kişinin vücut yüzey alanı (A_D), boyuna (L) ve kilosuna (m) bağlı olup aşağıdaki DuBOIS eşitliğine göre hesaplanır:

$$A_D = 0.202473 m^{0.425} L^{0.725} \quad (1)$$

Bu denklemde boy, m ; kütle, kg birimindedir.

Solunum katsayısı (R), Denklem 2’de görüldüğü gibi, solunum esnasında oluşan CO₂’nin kullanılan O₂’ye oranını ifade eder. Solunum katsayısı karbonhidrat, yağ, protein gibi tüketilen besinlerin içeriğine bağlı olup 0.67-1.2 arasında değişir. Orta düzeyde fiziksel etkinlikler yapan bir yetişkin için solunum katsayısının değeri 0.83 olarak alınır (ASHRAE, 2022).

$$R = \frac{V_{CO_2}}{V_{O_2}} \quad (2)$$

Metabolizma hızı (M), birim zamanda, vücuda alınan besinlerin parçalanarak enerjiye dönüştürülme kapasitesidir. Metabolizma hızı kişiye, yapılan aktiviteye ve ortam şartlarına göre farklılık gösterir. Sakin olarak oturma pozisyonunda bir insanın metabolizma hızı olan

58,2 W/m², metabolizma birimi olarak 1 met şeklinde tanımlanmıştır (ASHRAE, 2021). Metabolizma hızı (M), Denklem 3'deki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir.

$$M = 363.09 (0.23R + 0.77) \frac{V_{O_2}}{A_D} \quad [W/m^2] \quad (3)$$

Kararlı durum çözümlemesinde, metabolizma hızı, solunum katsayısı ve vücut yüzey alanına göre, bir insanın solunum esnasında kullandığı O₂ ve ürettiği CO₂ sırasıyla Denklem 4 ve Denklem 5 de verilmiştir.

$$V_{O_2} = \frac{A_D M}{363.09 (0.23R + 0.77)} \quad [L/s] \quad (4)$$

$$V_{CO_2} = R \cdot V_{O_2} = R \frac{A_D M}{363.09 (0.23R + 0.77)} \quad [L/s] \quad (5)$$

1.6.2. Zamana Bağlı Durumda CO₂ Konsantrasyonunun Hesaplanması

İç ortamda solunum ile dışarıya verilen CO₂ konsantrasyonunu zaman bağlı olarak incelemek için deneysel ve sayısal yöntemler kullanılmaktadır. İnsan solunumu, birçok çalışmada Denklem 6'de verilen sinüzoidal hız fonksiyonu şeklinde tanımlanmıştır (Gao & Niu, 2006; Marr, Spitzer & Glauser, 2008; Villafruela, Olmedo, Ruiz de Adana, Méndez & Nielsen, 2013; Yüce, 2019; Aydın, 2021). Gupta ve diğ. (2010), yapmış oldukları deneyler sonucunda solunum sürecinin en iyi şekilde sinüzoidal bir eğri ile temsil edilebileceğini belirlemişlerdir.

$$V_{sinuzoidal} = V_{max} [\sin(2\pi f \cdot t)] \quad [m/s] \quad (6)$$

Denklemde V, hızı; f, frekansı ve t ise zamanı göstermektedir. Solunum sürecinde nefes alıp verme yolu ağız ve burundur. Sağlıklı bir yetişkinin dakikada solunum sayısı 12-20 aralığındadır (URL-5, 2021). Solunum sayısının dakikada 17 defa olduğu kabul edilerek, soluk verme süreci Denklem 7 ile ifade edilmektedir (Villafruela, Olmedo, Ruiz de Adana, Méndez & Nielsen, 2013).

$$V_{sinuzoidal} = 4.5 [\sin(1.79t)] [m/s] \quad (7)$$

Soluk alma burundan, soluk verme ise ağızdan sağlandığında Denklem 7'ye ilave olarak Denklem 8'da yer alan sınır şartı kullanılmaktadır.

$$V_{soluk\ verme} = \begin{cases} 0, & V_{sinuzoidal} < 0 \\ V_{sinuzoidal}(t), & V_{sinuzoidal} > 0 \end{cases} \quad (8)$$

Solunumda alınan veya verilen hava hacmi ortalama 450 ml (0.00045 m³) olarak alınmıştır (Jiang, Yao, Feng, Sun & Liu, 2017). Buna göre konuşmadan sadece solunum yapan bir yetişkinin ağız açılma alanı yaklaşık 0.92 cm², burun boşluğu alanı ise 0.5 cm² olarak belirlenmiştir (Gupta, Lin & Chen, 2010). Bu çalışmada soluk verme ağızdan olacak şekilde alınmıştır.

Bir iç ortamda CO₂ konsantrasyonunu azaltmanın en etkili yolu havalandırma yapmaktır. Havalandırmayı karakterize eden hava değişim oranı (n), aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$n = \frac{V.A}{V} [1/saat] \quad (9)$$

Bu ifadede V (m/s), hava giriş hızını; A (m²), hava giriş alanını; V(m³), iç ortamın hacmini göstermektedir. Farklı alanlardaki pencere, kapı veya menfezlerden olabilecek hava girişi, farklı iç ortam hacimleri ve farklı hava giriş hızları için hava değişim oranı ile genelleme ve karşılaştırma yapılmaktadır.

1.7. İç Ortam Havalandırması İçin Kullanılan Yöntemler

TS EN 15251 standardına göre bir ortamın havalandırılması için gerekli olan hava miktarının belirlenmesinde üç yöntem kullanılır:

1.7.1. Bina ve İnsan Kaynaklı Kirletici Bileşenlerini Esas Alan Yöntem

Bu yöntemde bir ortamın havalandırılması için gerekli hava debisi, ortamda insan ve bina malzemeleri kaynaklı iki kirletici unsurun toplam kirletici seviyesinin standartlarda belirlenen sınırların altına düşmesini sağlayacak miktarda olmalıdır. Bu yöntemle ofis,

konferans salonu, derslik, alışveriş merkezleri gibi sürekli ikamet edilmeyen binalarda bir mahal için gerekli toplam hava debisi (Q_{top}), aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$Q_{top} = N \cdot Q_i + A \cdot Q_b \quad \left[\frac{\text{litre}}{\text{s}} \right] \quad (10)$$

İfadede Q_i , kullanıcılar için gerekli havalandırma debisini (litre/s·kişi); Q_b , bina malzemeleri için gerekli havalandırma debisi (litre/s·m²); A , mahal taban alanı (m²) ve N , insan sayısını göstermektedir. ASHRAE Standart 62.1 (2016)'da dersliklerde 35 kişi/100 m² kullanıcı yoğunluğu tavsiye edilmiştir. Kullanıcı yoğunluğu belli ise kişi başına dış hava miktarı 5 litre/s·kişi, ortamda bulunan kirleticileri gidermek için ise 0.6 litre/s·m² olarak verilmekte olup taze hava için bu değerlerin toplamının alınması önerilmektedir.

1.7.2. Kişi Sayısı veya Birim Mahal Alanını Esas Alan Yöntem

Bu yöntemde havalandırma debisi, genellikle kişi sayısı ve mahal alanı esasına göre ayrı ayrı hesaplanarak en yüksek olan değer alınarak belirlenir. Kişi sayısına göre yapılan hesaplamada mahaldeki kirletici faktörün tek kaynağı insan olarak öngörülmüştür. Mahal alanına göre yapılan hesaplamada ise kirletici faktör mahaldeki malzeme ve mobilya kaynaklı salınımlardır. İnsanların yoğun olduğu mahallerde taze hava debisi hesaplanırken insan faktörü esas alınmakta; insan yükünün fazla olmadığı buna karşın mahal alanının büyük olduğu mekânlarda ise alan temelli hesaplama yapılabilmekte veya her ikisi birlikte değerlendirilmektedir.

1.7.3. Mahaldeki CO₂ Seviyesini Esas Alan Yöntem

İç ortam hava kalitesi açısından en uygun havalandırma yöntemi, CO₂ konsantrasyonuna göre yapılan havalandırmadır. Bir ortamda CO₂ seviyesi kabul edilebilir 1000 ppm değerini aştığında, dış ortam havasının doğal veya mekanik olarak iç ortama girişi sağlanmaktadır. Doğal havalandırmada iç ortam ile dış ortamın CO₂ konsantrasyonu arasındaki fark; iç ortama verilmesi gereken taze hava debisinin miktarını etkilemektedir. İç ortam ile dış ortam CO₂ seviyeleri arasındaki farkın büyüklüğüne göre, CO₂ konsantrasyonu sınır değerin altına indirmek için iç ortama verilmesi gereken taze hava miktarı değişecektir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Hareket Denklemleri ve Türbülans Modeli

Bu çalışmada sayısal çözümler için ANSYS Fluent paket programı kullanılmıştır. Akış alanının hesaplanmasında kütle, momentum ve enerji korunumu denklemleri çözülmüştür.

Zamana bağlı ve sıkıştırılamaz akışta Kartezyen koordinat sisteminde kütle korunumu ifadesi diferansiyel formda,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (11)$$

şeklindedir.

Zamana bağlı ve sıkıştırılamaz akışta momentum korunumu diferansiyel formda, Kartezyen koordinat sisteminde x, y ve z doğrultuları için,

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (12)$$

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \quad (13)$$

$$\rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad (14)$$

şeklinde olup Navier-Stokes denklemleri olarak ifade edilmektedir.

Enerjinin korunumu denklemi diferansiyel formda, Kartezyen koordinat sisteminde

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{k}{\rho C_p} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (15)$$

olarak ifade edilir. k , ısı iletim katsayısını, c_p sabit basınçtaki özgül ısıyı gösterir.

Bu çalışmada, zamana bağlı türbülanslı akışın çözümü için RNG k- ε (Re-Normalization Group) türbülans modeli kullanılmıştır. Bu türbülans modeli, iç ortam hava akışını ve kirletici taşınımını modellemedeki iyi performansı nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Gao & Niu, 2006; Ravikumar & Prakash, 2009; Villafruela, Olmedo, Ruiz de Adana, Méndez, & Nielsen, 2013; Aydın, 2021). Bu modelde türbülans kinetik enerjinin üretimi ve yutulması ile ilgili transport denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (17)$$

RNG k- ε türbülans modeli transport denklemlerinde G_k ve G_b terimleri, ortalama hız değişimleri ve kaldırma kuvvetine sebep olan sıcaklık değişimleri nedeniyle olan türbülans kinetik enerji üretimini göstermektedir. Ayrıca, α_k ve α_ε sırasıyla, k ve ε için invers efektif Prandtl sayılarını göstermektedir. μ_{eff} efektif viskozite, laminar viskozite (μ_{lam}) ve aşağıda verilen türbülans viskozitenin (μ_t) toplamı olarak ifade edilmektedir.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (18)$$

Y_M , sıkıştırılabilir akış durumuyla ilgili bir katsayıyı, S_k ve S_ε kaynak terimlerini ifade etmektedir. Ayrıca, RNG k- ε modelinde ε denklemine ilave olan R_ε terimi,

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \quad (19)$$

ifadesiyle tanımlanmaktadır. Burada

$$\eta = \frac{S_k}{\varepsilon} \quad (20)$$

olarak ifade edilir. Bu modelde kullanılan sabitler $C_{1\varepsilon}=1.42$, $C_{2\varepsilon}=1.68$, $\eta_0=4.38$, $\beta=0.012$ ve $C_\mu=0.0845$ 'dir. (ANSYS Inc, 2022).

Bu çalışmada, belirlenen kontrol hacmi içerisinde havanın içeriği, gerçekte olduğu gibi O_2 , CO_2 , N_2 gazları ve su buharından oluşacak şekilde tanımlanmıştır. Bir akışkan içerisindeki belli kütleli orandaki bileşenler, kimyasal tür olarak ifade edilmektedir. İçeriği ayrı ayrı tanımlanan hava için kütle transport denkleminin genel şekli Denklem 21'de verilmiş olup, Y_i ifadesi hava içindeki i. türün kütleli oranını, $\vec{J}_i$ ise difüzyon akısını göstermektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i \quad (21)$$

Türbülanslı akışlarda Fick Kanunu temel alınarak kütle difüzyonu;

$$\vec{J}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}\right) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (22)$$

şeklinde ifade edilir. Bu denklemde Sc_t türbülanslı akış Schmidt sayısını, μ_t türbülans viskozitesini, $D_{i,m}$ karışımındaki i. türün kütleli difüzyon katsayısını, $D_{T,i}$ termal difüzyon katsayısını, D_t ise türbülanslı yayılımı gösterir.

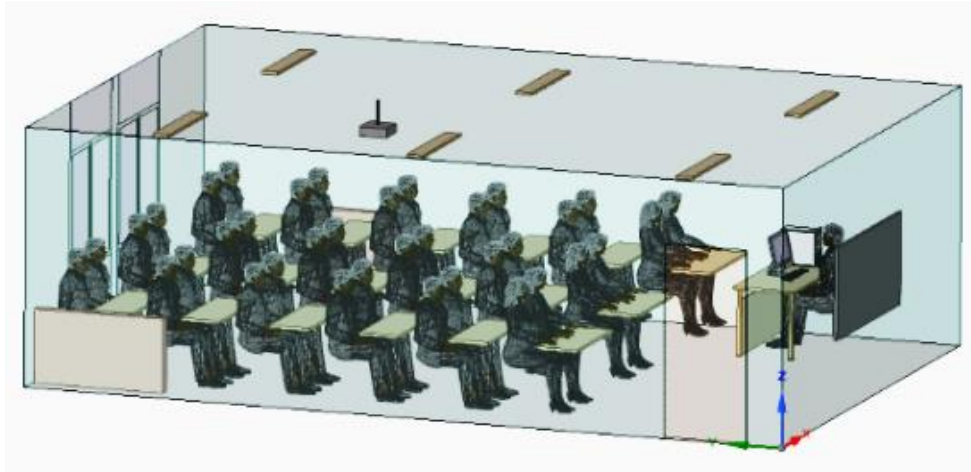
$$Sc_t = \frac{\mu_t}{\rho D_t} \quad (23)$$

Sayısal çözümlemelerde, Sc_t değeri programda varsayılan olarak 0.7 alınmıştır (ANSYS Inc, 2022).

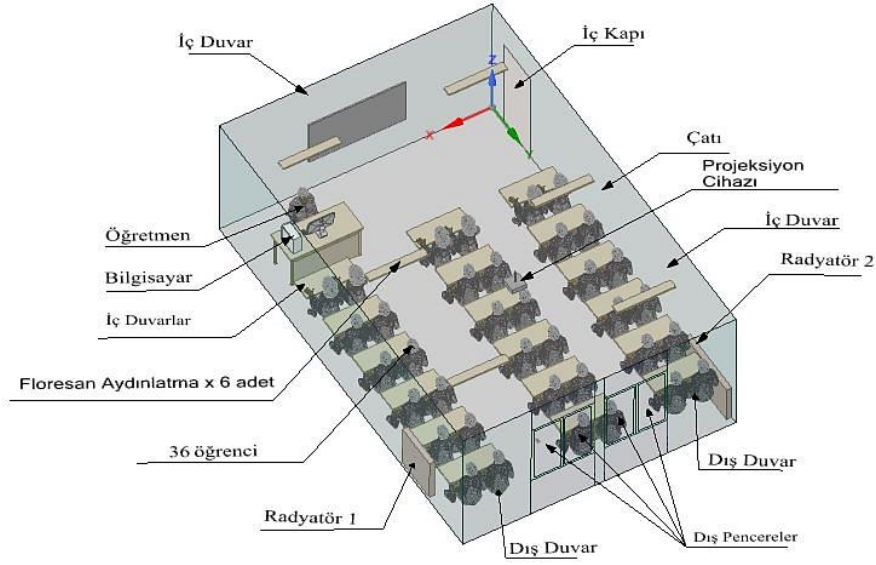
2.2. Sayısal Çözümleme

2.2.1. Akış Alanı Geometrisi

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünde bulunan bir derslik model alınarak gerçekleştirilmiştir. Model derslik 8.5 m uzunluğunda, 5.6 m genişliğinde ve 2.8 m yüksekliğindedir. Dersliğin tüm mimari ölçümleri lazer ölçüm cihazı ile yerinde ölçülerek ANSYS Space Claim programı ile mimari çizim oluşturulmuştur. Derslikte, pencerelerin yer aldığı bir ön duvar dışında kalan tüm duvarlar iç duvar niteliğinde olup sınıf tavanı aynı zamanda bina çatısına denk gelmektedir. Ön duvarda 1.25 m uzunluğunda ve 0.55 m genişliğinde 4 adet pencere bulunmaktadır. Mimaride aydınlatma, bilgisayar, projeksiyon cihazı ve radyatör gibi iç tefrişler belirtilmiş olup ölçüleri bire bir aynı olacak şekilde mimariye eklenmiştir. Şekil 4'te mimarisi verilen Şekil 5'te yapısal ve fiziki detayları belirtilen derslik, 1 öğretmen ve 36 öğrenci ile tam kapasiteli olarak ele alınmıştır. Öğretmen ve öğrenciler 1.70 m boyunda ve 65 kg olacak şekilde kabul edilerek Du Bois vücut yüzey alanı (Burton, 2008) hesabına göre boyutlandırılarak mimaride gösterilmiştir.

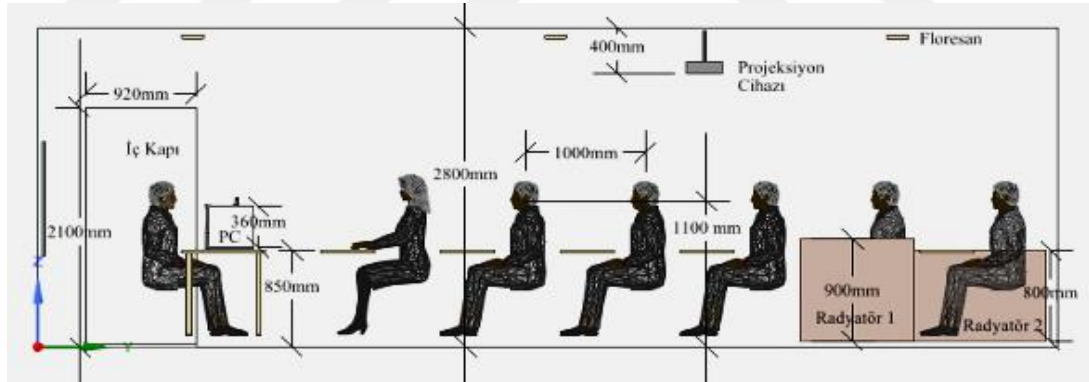


Şekil 4. Dersliğin üç boyutlu mimarisi



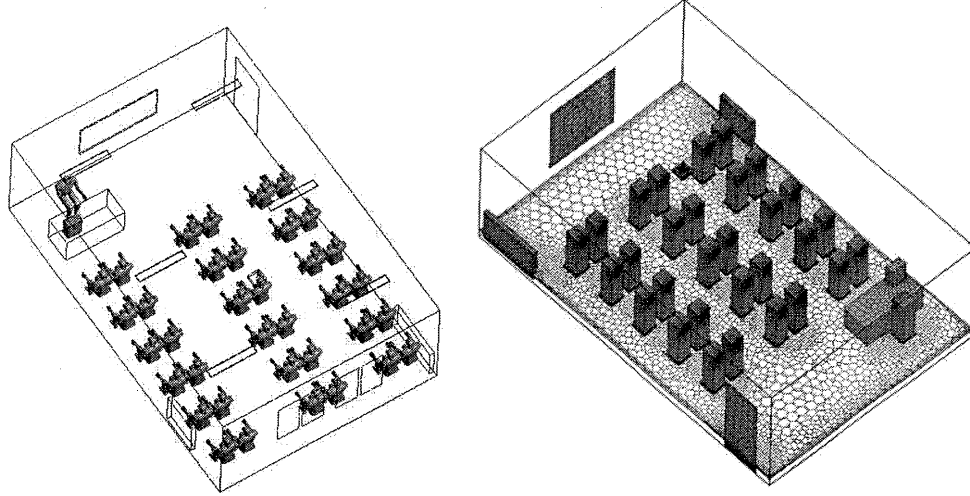
Şekil 5. Dersliğin mimari ve fiziki detayları

Dersliğin yan görünüş ölçülendirme detayları Şekil 6’da verilmiştir. Tüm iç tefriş boyutları ve mimari içindeki yerleri belirtilmiştir. Oturur vaziyette insan modelinin burun hizası yerden 1.1 m olarak alınmıştır (ASHRAE Standard 55, 2017).



Şekil 6. Dersliğin yan görünüş ölçülendirme detayları

Derslik içindeki insanlar önce Şekil 7a’da görüldüğü gibi ayrıntılı şekilde tanımlanmıştır (URL-6, 2021). Ancak, kullanılan geometrilerde ağ kalitesini düşürebilecek gereksiz detaylar ve buna bağlı ağ yoğunluğunun azaltılması yönünden basitleştirme yapılarak, insanlar dikdörtgen prizma biçiminde gösterilmiştir (Şekil 7b). Ayrıca, öğrenci sıralarının iç ortamda hava akışı üzerindeki etkileri ihmal edilerek ağ yoğunluğu azaltılmıştır. Sayısal çözümlemelerde insan vücut yüzey alanı yaklaşık 1.75 m^2 olarak alınmıştır.



Şekil 7. Derslikteki insanlar için geometrik modeller: (a) Ayrıntılı (b) Dikdörtgen prizma

Model dersliğin doğal havalandırılmasına yönelik olarak, mevcut pencere açıklık alanları dışında, farklı geometri ve farklı açıklık alanlarına yönelik senaryolar için yapılan sayısal çözümlemelerde göz önüne alınan pencerelerin boyutları

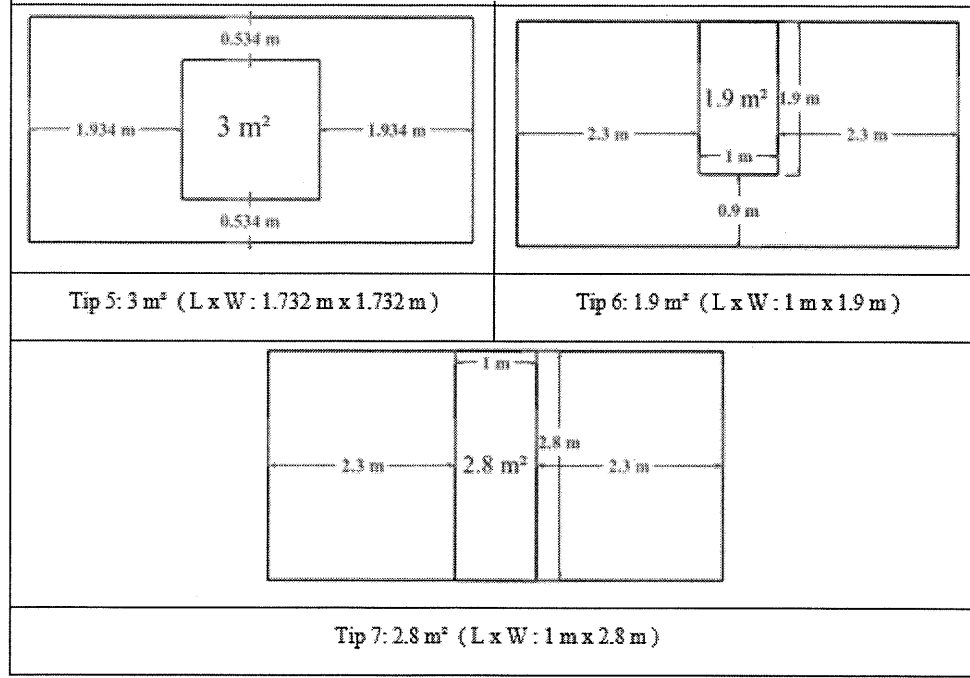
Şekil 8’de gösterilmiştir.

Tip 1: 1 m ² (L x W : 1 x 1 m)	Tip 2: 1.5 m ² (L x W : 1.224 m x 1.224 m)
Tip 3: 2 m ² (L x W : 1.414 m x 1.414 m)	Tip 4: 2.5 m ² (L x W : 1.581 m x 1.581 m)

(a)

Şekil 8. Geometrik modellerde kullanılan pencere tipleri (a) ve (b)

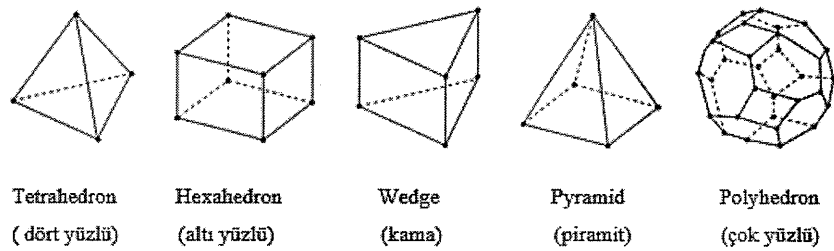
Şekil 8'in devamı



(b)

2.2.2. Ağ Yapısı ve Çözüm Alanı

Çözüm alanının ağ yapısını oluşturmaya yönelik ANSYS Fluent yazılımında üç boyutlu geometrilerde kullanılan ağ hücresi tipleri Şekil 9'da gösterilmektedir.

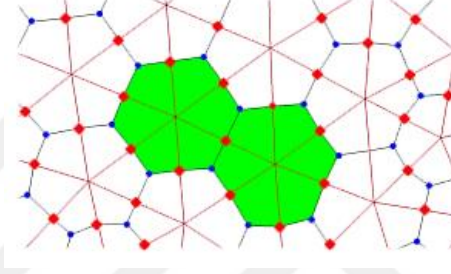


Şekil 9. Üç boyutlu ağ hücresi tipleri

Çözüm alanında diğerlerine göre daha az sayıda ağ hücresi içeren altı yüzlü (hexahedron) ağ örgüsü karmaşık geometriler için uygun olmamaktadır. Dört yüzlü ağ hücreleri (tetrahedron) ise tüm geometrilere uygulanabilen en basit ağ hücre tipi durumundadır. Ancak, tetrahedron ağ hücrelerinin sayısı, hexahedron hücrelere göre

oldukça fazla olmakta ve çözüm yakınsama süresi daha uzun olabilmektedir. Aynı fiziki problem için tetrahedron ağ yapısından en az 3 kat daha az sayıda hücre sayısına sahip olduğundan polyhedron ağlardan oluşan sayısal modelin yakınsaması daha hızlı olmaktadır. Polyhedron ağ hücreleri, çok yüzlü yapısından dolayı çok fazla komşuya sahip olduğundan fiziksel büyüklüklerdeki değişimler daha iyi belirlenebilmektedir (ANSYS Inc, 2022).

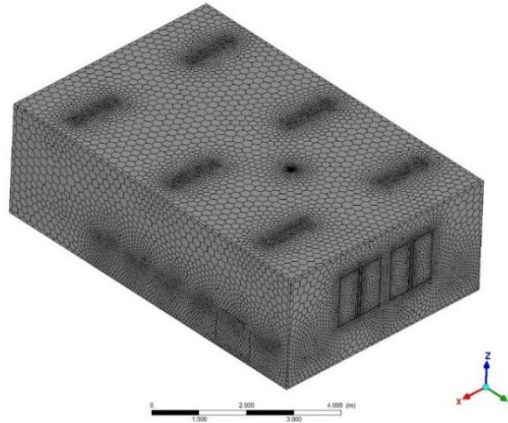
Bu çalışmada, çok yüzlü (polyhedron) ağ hücreleri tercih edilmiştir. Çok yüzlü bir ağ oluşturmak için öncelikle boy en oranı 50 değerini aşmayan bir üçgen ağ oluşturularak, çokyüzlü ağ oluşturma sürecinde Şekil 10'da görüldüğü gibi, yüzey ağındaki üçgen yüzleri altıgen yüzlere dönüştürülmektedir (Sosnowski, Gnatowska, Grabowska, Krzywański & Jamrozik, 2019).



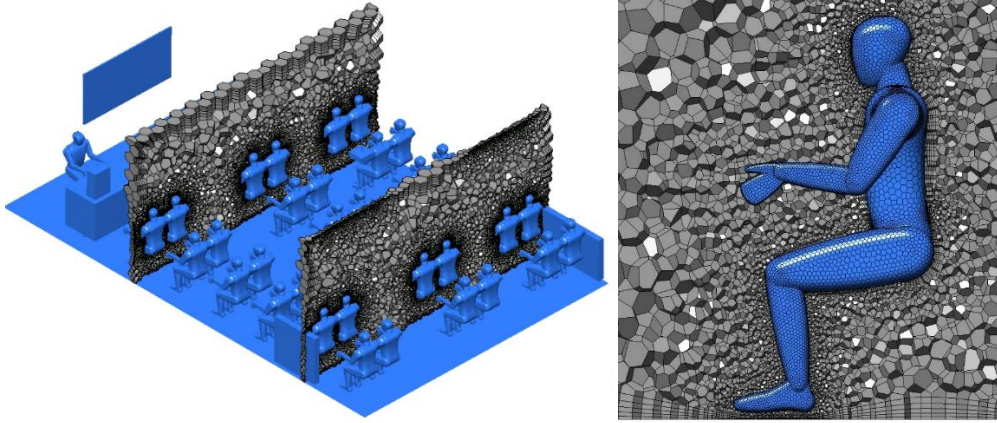
Şekil 10. Polyhedron ağ yapısı

Sonlu hacimler yöntemine göre hücrenin merkezindeki değer alınarak yüzeylerdeki değerler hesaplanıp, akış yönündeki diğer hücreye aktarılır. Başlangıç çözümlemelerinde 6.580.943 polyhedron ağ elemanı kullanılmıştır. Ayrıca, dersliğin katı yüzeyleri ve derslik içindeki her bir insan modelinin etrafında sıklaştırılmış ağ bölgeleri oluşturulmuştur. Ağ örgüsü detayları

Şekil 11 ve Şekil 12'de verilmiştir.

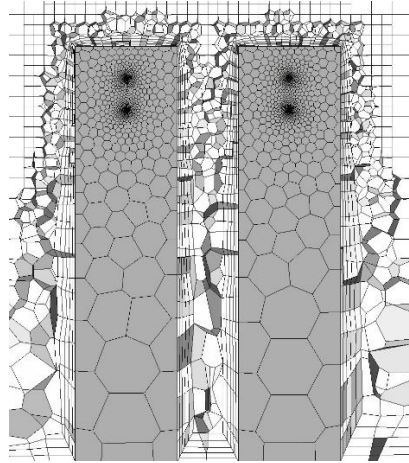


Şekil 11. Çözüm alanı ağ yapısı

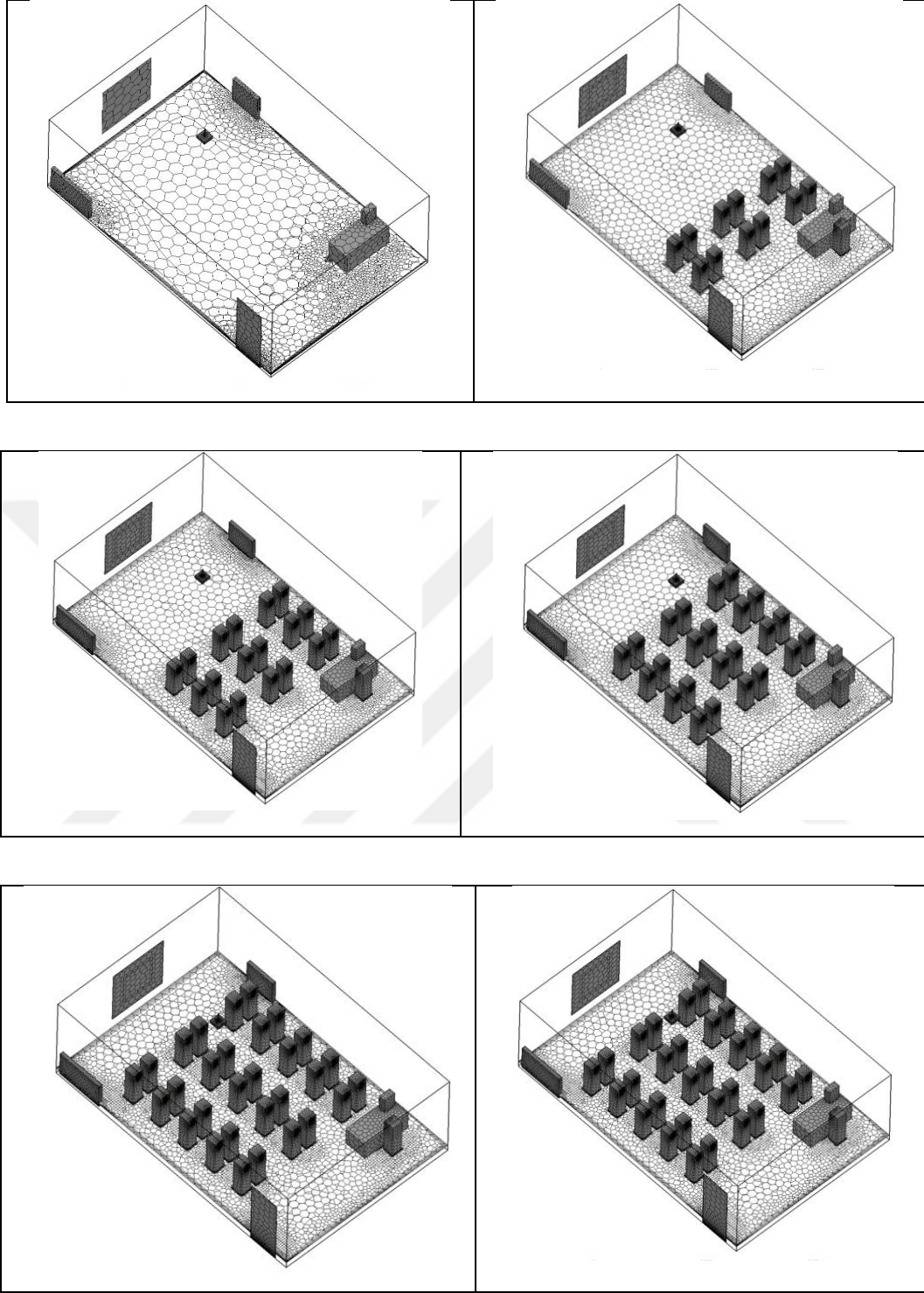


Şekil 12. (a) Düşey düzlemde ağ yapısı detayı (b) İnsan figürü ağ örüntüsü detayı

Yoğun ağ yapısını basitleştirmek için insan modelleri Şekil 13’de görüldüğü gibi dikdörtgenler prizmasına indirgendiğinde, çözüm alanında 1.847.917 çok yüzlü ağ elemanı oluşmaktadır. Boş ve farklı sayıda kişinin olduğu derslikler için ağ yapıları Şekil 14’te verilmiştir. Ders sonrası boş derslik için yapılan sayısal çözümlemelerde, derslik içinde insanlar olmadığından 757.458 çok yüzlü ağ elemanı kullanılmıştır.



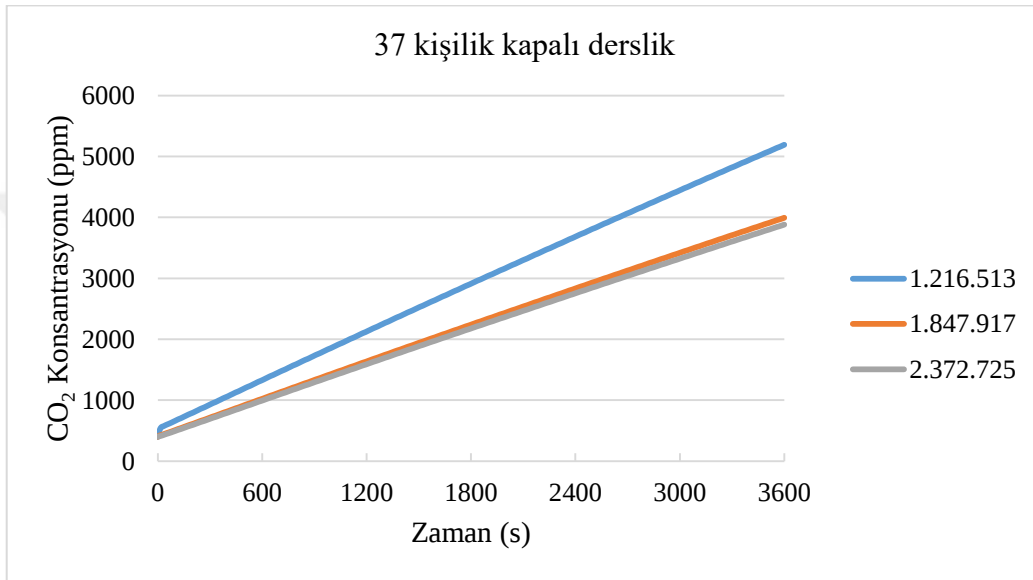
Şekil 13. Dikdörtgenler prizması şeklindeki insan modeli ağ yapısı



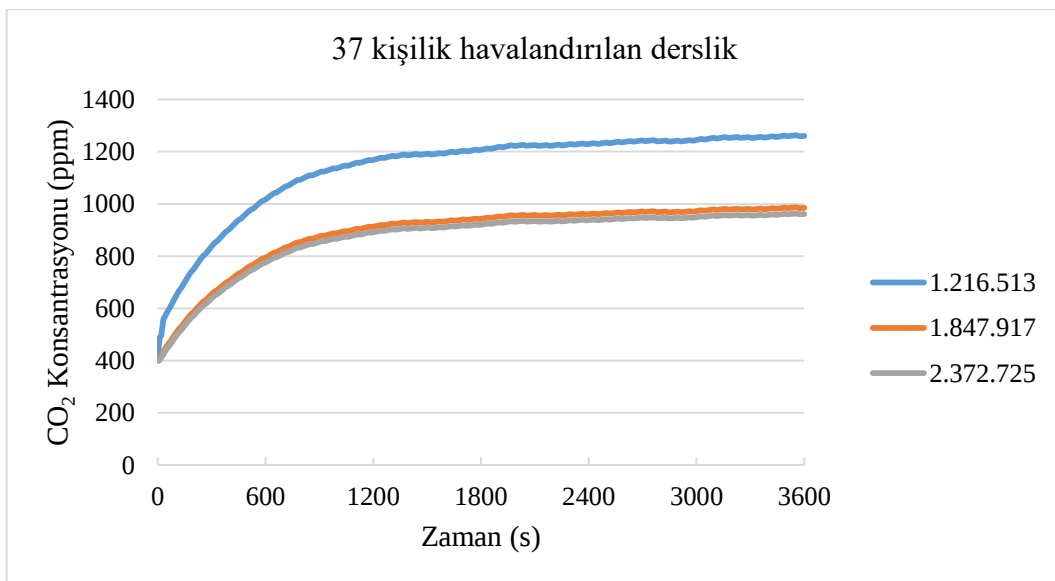
Şekil 14. Boş ve farklı sayıda kişi için dersliğin ağ yapısı

Sayısal çözümleme sonuçlarının ağ yoğunluğuna göre değişebilme durumunu incelemek için, ağdan bağımsızlık çalışması yapılmıştır. 37 kişi bulunan derslikte kapı pencere kapalı ve kapı pencere açık durumlarında üç farklı ağ yoğunluğu için çözümler

gerçekleştirilmiştir. CO₂ konsantrasyonlarının zamanla değişimleri 1.216.513, 1.847.917 ve 2.372.725 ağ yoğunluğu değerleri için Şekil 15 ve Şekil 16 'da verilmiştir. 1.847.917 ve 2.372.725 ağ yoğunluklarında elde edilen CO₂ konsantrasyon değerlerinin birbirine çok yakın olması nedeniyle, sayısal çözümler ağdan bağımsızlığı sağlayacak şekilde 1.847.917 ağ sayısında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 15. Kapı pencere kapalı derslikte ağ yoğunluğunun çözüm üzerindeki etkisi



Şekil 16. Kapı pencere açık derslikte ağ yoğunluğunun çözüm üzerindeki etkisi

2.2.3. Çözüm Yöntemi

Akış alanı, ANSYS Fluent 2022R2 yazılımı ile hesaplanmıştır. Zamana bağlı, sıkıştırılamaz, türbülanslı akış alanında süreklilik, momentum, enerji ve konsantrasyon denklemlerinin çözümleri, sonlu farklar yöntemi için geliştirilmiş basınç-hız temelli SIMPLE (The semi-implicit pressure linked equation) algoritması ile gerçekleştirilmiştir. RNG k- ϵ türbülans modeli ile birlikte, insan modeli için yüksek hassasiyetli “Enhanced Wall Treatment” duvar fonksiyonu kullanılmıştır (Gao & Niu, 2006; Ravikumar & Prakash, 2009; Villafruela, Olmedo, Ruiz de Adana, Méndez & Nielsen, 2013; Aydın, 2021).

Momentum ve diğer skaler büyüklüklerin (T, k, ϵ , CO₂) transport denklemleri için *second-order upwind* ve basınç için *standart* yaklaşım kullanılmıştır. Değişkenlerin hücre içerisinde değişimleri, en küçük kareler yöntemi ile uyumlanmıştır. Çözüm yakınsama kriteri olarak; hız bileşenleri, k ve ϵ için 10^{-4} ; sıcaklık, CO₂, O₂ ve H₂O derişimleri için ise, 10^{-6} alınmıştır.

2.2.4. Başlangıç ve Sınır Koşulları

Çalışmada üç farklı derslik durumu için gerçekleştirilen çözümlemeler ile ilgili başlangıç ve sınır koşulları aşağıda verilmiştir.

Kapı ve pencere kapalı dolu derslik için, burundan alıp ağızdan verme olarak solunum tipi, başlangıçta iç ortam CO₂ konsantrasyonu değeri 400 ppm, iç ortam havasının 20°C, %37 bağıl nem özelliğinde ideal gaz, insan deri yüzey sıcaklığı 32.5°C ve nefes sıcaklığı 34°C alınmış ve katı yüzeylerde kaymama sınır koşulu kullanılmıştır.

Kapı ve pencere açık dolu derslik için, ağızdan soluk alıp verme şeklinde solunum tipi, başlangıçta iç ortam CO₂ konsantrasyonu değeri 400 ppm, dış ortam CO₂ konsantrasyonu değeri 400 ppm, iç ortam havasının 25°C, %60 bağıl nem özelliğinde ideal gaz, insan deri yüzey sıcaklığı 32.5°C ve nefes sıcaklığı 34°C alınmış ve katı yüzeylerde kaymama sınır koşulu kullanılmıştır.

Kapı ve pencere açık boş derslik için, başlangıçta iç ortam CO₂ konsantrasyonu değeri 4000 ppm, dış ortam CO₂ konsantrasyonu değeri 400 ppm, iç ortam havasının 25°C, %60 bağıl nem özelliğinde ideal gaz alınmış ve katı yüzeylerde kaymama sınır koşulu kullanılmıştır.

İçyapı elemanlarının yüzey sıcaklığı, başlangıçtaki iç ortam hava sıcaklığı değerinde alınmıştır. Ders esnasında yapılan sayısal çözümlemelerde ortam insan, bilgisayar, projeksiyon cihazı, aydınlatma ve radyatörler için Tablo 4’de görüldüğü gibi, yüzey sıcaklıkları tanımlanmıştır. Ders sonrası boş derslik için bu sıcaklık tanımlamaları kullanılmamıştır.

Tablo 4. Derslik donanım aygıtları yüzey sıcaklıkları

Dış duvar, pencere ve çatı	İç duvarlar ve taban	Aydınlatma	Bilgisayar	Projeksiyon cihazı	Radyatör	Duvarlar için yayma katsayısı	İnsan için yayma katsayısı
10°C	20.4°C	38°C	45°C	40°C	60°C	0.9	0.95

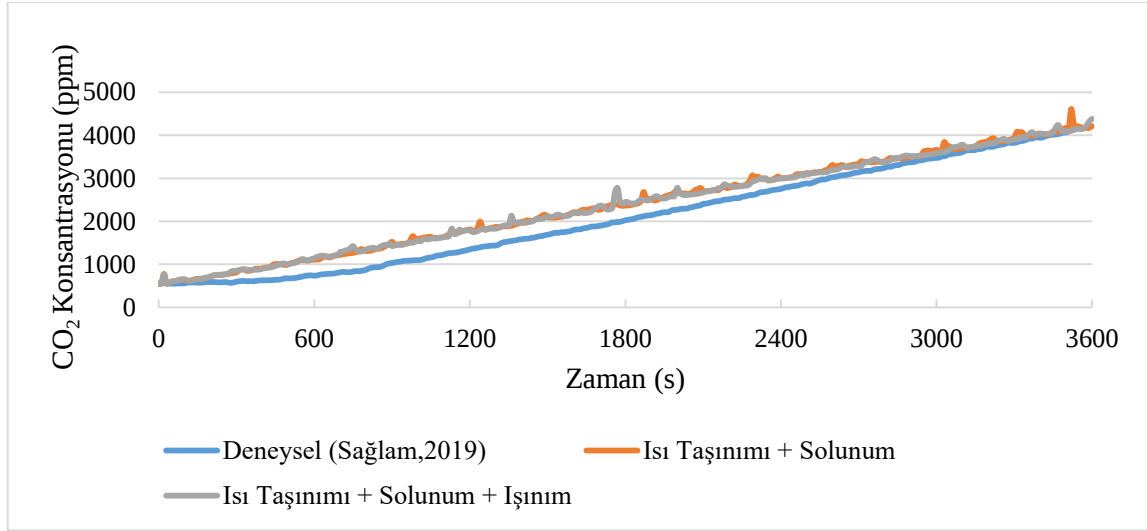
Sayısal çözümlemelerde karışım modelleme yöntemi olarak ‘Species Transport’ modeli ve derslik duvarlarında kaymama sınır koşulu kullanılmıştır.

2.3. Sayısal Modelin Doğrulanması

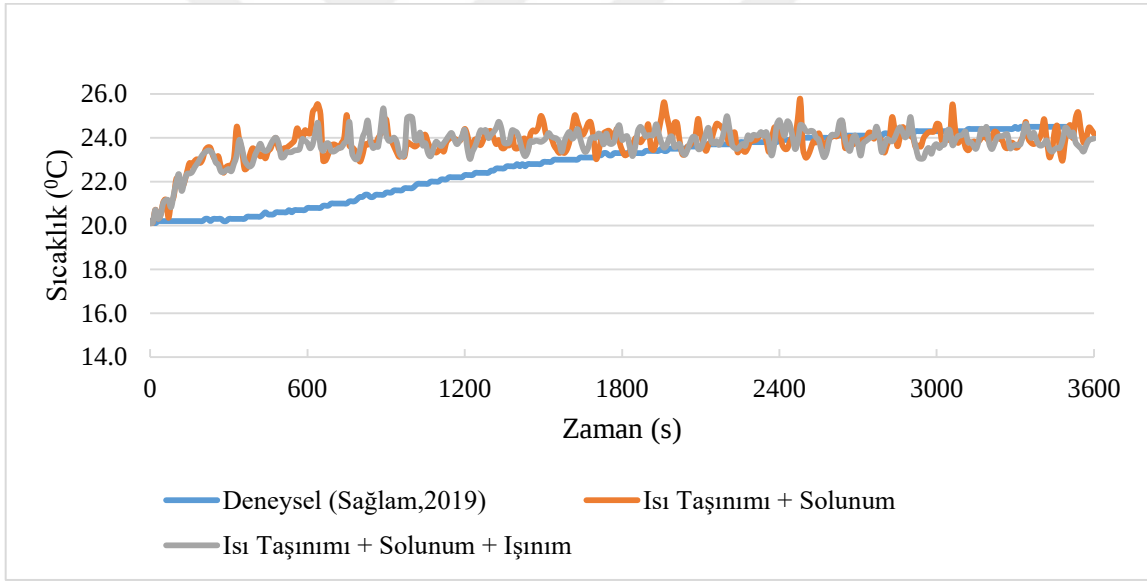
2.3.1. Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırma

Kullanılan sayısal çözümlemelerin sonuçlarının doğrulaması için, Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünde bulunan ve bu çalışmada model alınan derslikte Sağlam (2019) tarafından yapılan ölçümlerle karşılaştırmalar yapılmıştır. Kapı ve pencereleri kapalı dolu derslikte biri ayrıntılı diğeri basitleştirilmiş iki farklı insan modelini içeren sayısal modeller için çözümlemeler yapılmıştır. İnsan solunumu ve ısı taşınımı yanı sıra farklı sıcaklıktaki yüzeylerden kaynaklı ışıının etkisi de göz önüne alınmıştır.

Ayrıntılı insan modeli için yapılan çözümlemelere göre, derslik havasındaki CO₂ ve sıcaklık değişimleri sırasıyla Şekil 17’de gösterilmiştir. Şekil 17a’da CO₂ değişimi için sayısal ve ölçüm sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Şekil 17b’den görülebileceği gibi, sıcaklıktaki değişimi sayısal yöntem ölçüm süresinin ilk yarım saatinde daha yüksek değerlerde tahmin ederken, son yarım saatlik sürede ölçüm değerleri ile örtüşmektedir. Ayrıca, derslik içinde yüzeyler arasında sıcaklık farkı fazla olmadığından, ışıının etkisinin de belirgin bir farklılık göstermediği anlaşılmış ve çözümlemelerde ışıının tipi ısı geçişinin etkisi ihmal edilmiştir.



(a)

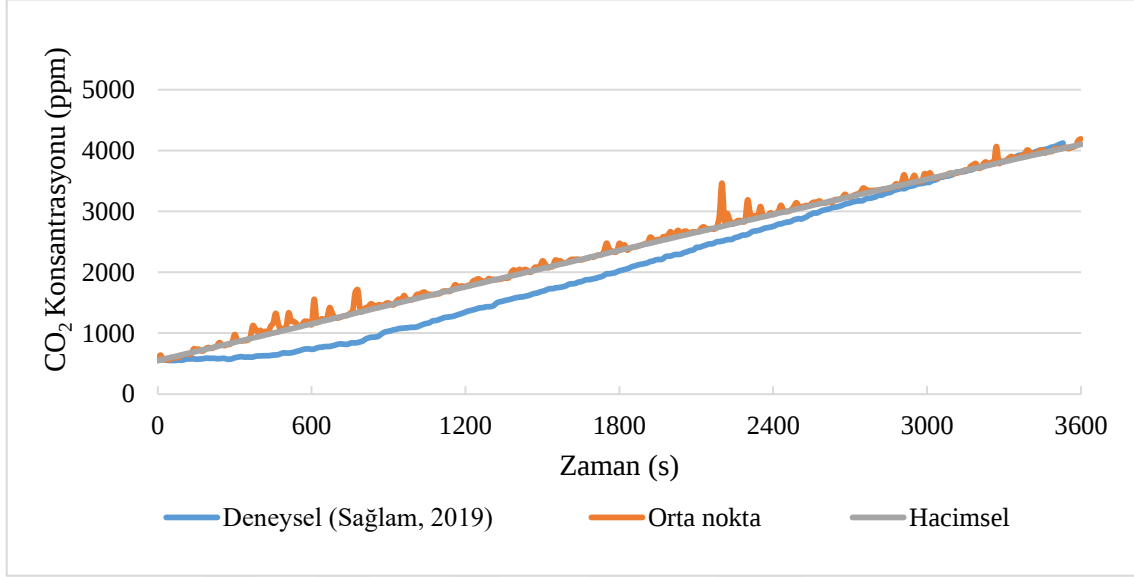


(b)

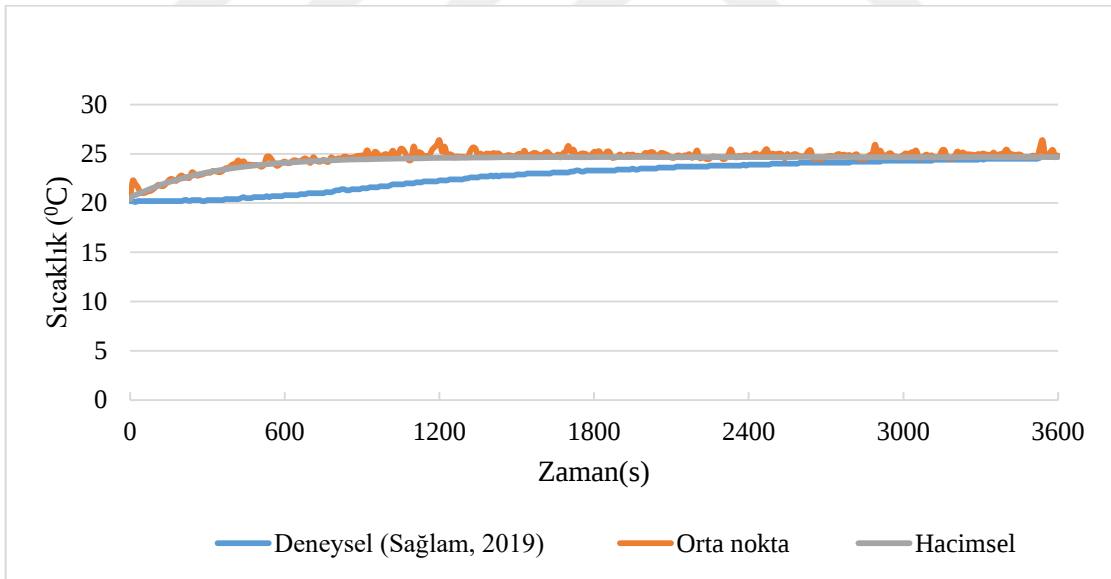
Şekil 17. Ayrıntılı sayısal model için (a) CO₂ ve (b) Sıcaklık değişimleri

Dikdörtgenler prizması şeklinde gösterilen basitleştirilmiş insan modeli için yapılan çözümlemeler ile Sağlam (2019) tarafından yapılan ölçümlerin sonuçları, derslik havasındaki CO₂ ve sıcaklık değişimleri için karşılaştırmalı olarak sırasıyla, Şekil 18a ve Şekil 18b’de gösterilmiştir. Ayrıntılı ve basitleştirilmiş iki farklı insan modelini içeren sayısal modeller için yapılan çözümlemelerin sonuçları büyük oranda birbirine yakındır. Ayrıca, derslik orta nokta değerleri ile ortalama hacimsel değişim değerlerinin çok büyük

oranda çakıştığı görülmektedir. Bu nedenle, çözüm zamanını azaltmak için bu çalışmada ayrıntılı insan modeli içeren model yerine basitleştirilmiş sayısal model kullanılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 18. Basitleştirilmiş sayısal model için (a) CO₂ ve (b) Sıcaklık değişimleri

2.3.2. Farklı Solunum Çeşitlerinin İç Ortam CO₂ Konsantrasyonuna Etkisi

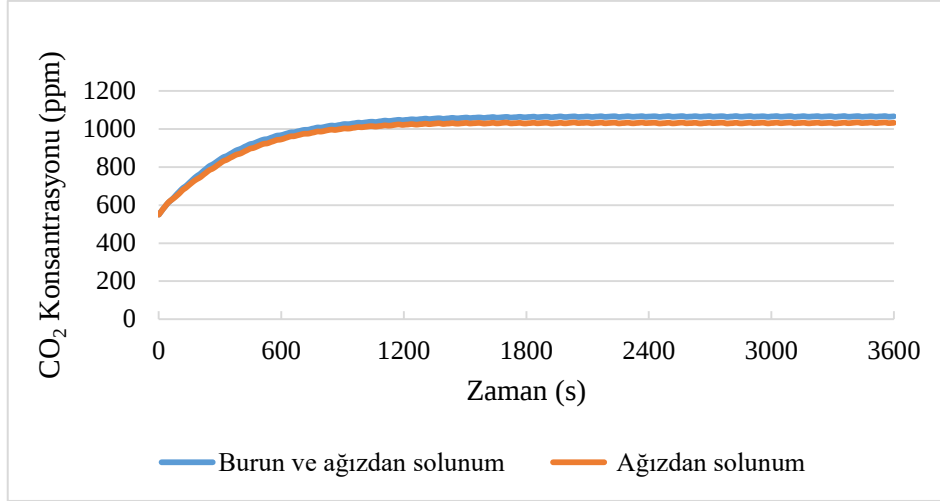
Havayı oluşturan O₂, H₂O (su buharı), CO₂ ve N₂ gazlarının kütleli oranları ve burundan nefes alış, ağızdan nefes veriş havasının içeriği Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. İç ortam soluma ve nefes verme havası içeriği

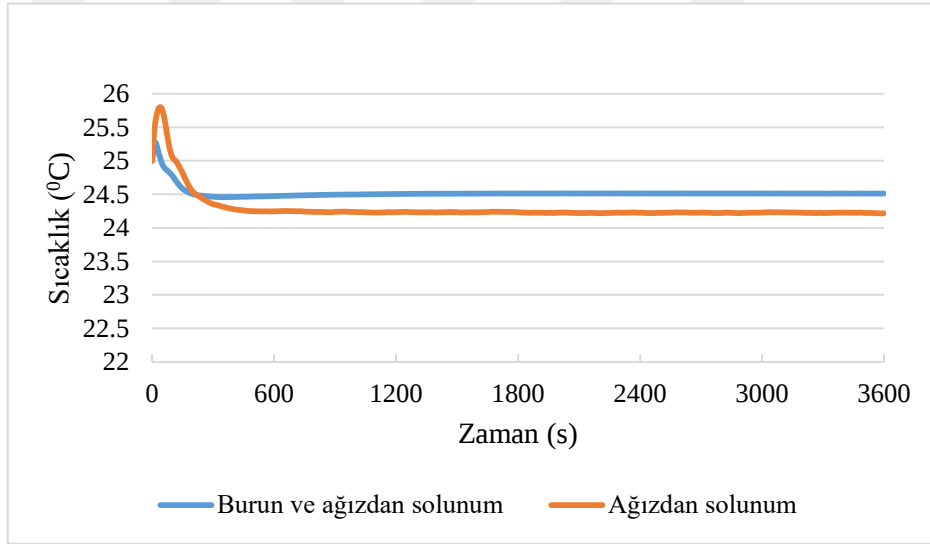
	Başlangıçta iç ortam	Nefes alış	Nefes Veriş
O ₂ [kg/kg hava]	0.21	0.21	0.16
CO ₂ [kg/kg hava]	0.000551	-	0.04
H ₂ O [kg/kg hava]	0.00551	-	0.031

İstirahat halinde olan bir kişinin 1 dakika süresince solunum sayısı, genellikle 15 ile 20 arasındadır. Bu çalışmada 17 kez olduğu varsayılmış olup, bu durum bir saatlik zamana bağlı çözüm için yaklaşık 1000 nefes döngüsüne karşılık gelmektedir. Burun ve ağızın açıklık alanı sırasıyla 0,5 cm² ve 0,92 cm², nefes sıcaklığı 34°C ve nemi % 90 olarak alınmıştır (Gao & Niu, 2006; Villafruela, Olmedo, Ruiz de Adana, Méndez & Nielsen, 2013; Xu, Nielsen, Gong, Liu & Jensen, 2015; Jiang, Yao, Feng, Sun & Liu, 2017). Hesaplamalarda vücut yüzey alanı 1.75 m² olan insan modelleri kullanılmıştır. İnsan deri sıcaklığı 31.5°C~ 33.5°C olarak ifade edildiğinden (Öngel & Mergen, 2009) çözümlerlerde bu değerlerin ortalaması olan 32.5°C alınmıştır.

Kış dönemi kapalı derslikte burundan soluk alma ve ağızdan soluk verme, bahar dönemi kapı ve pencere açık derslik için ağızdan soluk alıp verme şeklinde modellenmiştir. Kapı ve pencere açık derslik için yapılan bir saatlik çözümleme sonucunda CO₂ ve sıcaklık değişimleri Şekil 19 ve Şekil 20’te verilmiş olup, her iki solunum şekli arasında önemli bir farkın bulunmadığı görülmektedir.



Şekil 19. Farklı solunum çeşitlerinin iç ortam CO₂ konsantrasyonuna etkisi

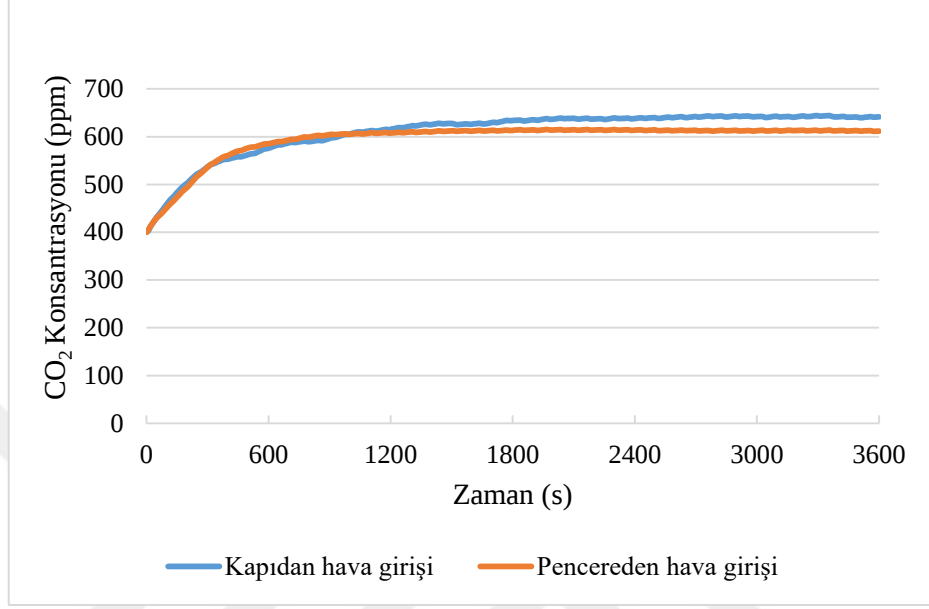


Şekil 20. Farklı solunum çeşitlerinin iç ortam sıcaklığına etkisi

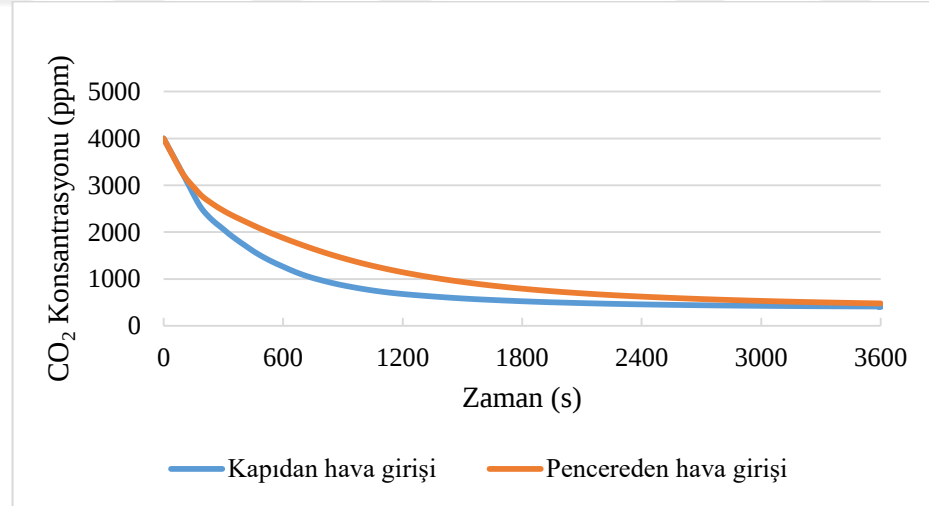
2.3.3. Derslik Ortamına Farklı Yerlerden Hava Girişinin Etkisi

Bir ortama hava girişi kapı ve pencereler gibi farklı açıklıklardan olabilmektedir. Kapalı ortamlarda insanları rahatsız etmeyecek düzeyde hava hızlarının etkisi incelenmiştir. Kapı ve pencere açıklık alanlarının 2 m² ve hava akış hızının 0.15 m/s değerleri için, havanın kapı veya pencereden giriş durumları için yapılan çözümleme sonuçları Şekil 21'de verilmiştir. Şekil 21a'da dolu derslikte ders esnasında kapı ve pencere açıkken, Şekil 21b ise ders sonrası boş derslik için CO₂ değişimlerini göstermektedir. Kapı ve pencereden tersine

giriş çıkışlarda değişim eğiliminin aynı olduğu, ders sonrası boş derslik için 1800 s süresine kadar havanın kapıdan girmesi durumunda CO₂ konsantrasyonunun daha fazla azaldığı görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 21. Ortama hava girişinin farklı yerden sağlandığı durumlarda CO₂ değişimi
(a) Dolu derslik (b) Boş derslik

2.4. Sayısal Çözümleme Senaryoları

Kapalı bir ortamdaki CO₂ konsantrasyon seviyesinin belirlenmesinde biriktirme, sabit durum ve azaltma yaklaşımları kullanılmaktadır (Luther ve diğ., 2018). Biriktirme yaklaşımı, bir derslikteki CO₂ konsantrasyonunun zamana bağlı olarak artması esasına dayanır. Öğrenci sayısındaki ve varsa havalandırma miktarlarında zamana bağlı değişiklikler dikkate alınır. Sabit durum yaklaşımı, CO₂ konsantrasyonunun en yüksek seviyesine ulaştıktan sonraki denge durumu ile ilgilidir. Azaltma yaklaşımı, hava giriş hızı ve ortam havası çıkış alanının incelenmesine yöneliktir. Bu çalışmada yapılan çözümlemelerde, ders esnasındaki biriktirme yöntemi bulguları ile ders sonrası boş derslik için kullanılan azaltma yaklaşımı bulguları değerlendirilmiştir. Sayısal çözümlemeler aşağıdaki üç farklı derslik durumu için gerçekleştirilmiştir:

- a) Kapı ve pencere kapalı dolu derslik
- b) Kapı ve pencere açık dolu derslik
- c) Ders sonrası kapı ve pencere açık boş derslik

Bu derslik durumları için, pencere açıklık alanı, dersliğe giren temiz havanın hızı, derslik içindeki kişi sayısı gibi etkin parametrelerin CO₂ dağılımı üzerindeki etkilerinin incelenmesine yönelik senaryolar oluşturulmuştur.

2.4.1. Kapı ve Pencere Kapalı Dolu Derslik

Kapı ve pencere kapalı dolu derslik için, ders esnasında farklı sayıda öğrencilerin olduğu 5 farklı durum için yapılan çözümleme senaryoları Tablo 6'da verilmiştir. Bu senaryolarda, derslikte bulunan kişilerin sayısı değiştirilerek ortamın hacimsel CO₂ konsantrasyonunun zamanla değişimi incelenmiştir.

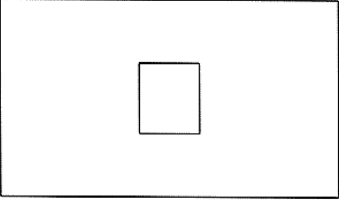
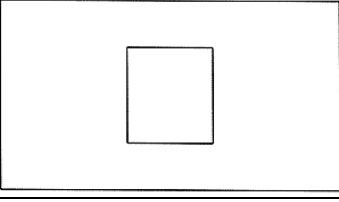
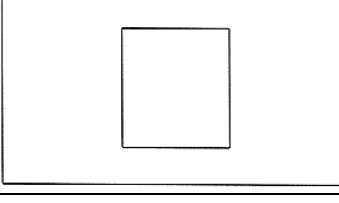
Tablo 6. Kapı ve pencere kapalı dolu derslikte CO₂ değişimi için senaryo

	Derslikteki kişi sayısı
SENARYO 1	37
	31
	25
	19
	13

2.4.2. Kapı ve Pencere Açık Dolu Derslik

Kapı ve pencere açık dolu derslikte; farklı kullanıcı sayıları, farklı hava giriş hızlarının ve pencere açıklık alanlarının CO₂ konsantrasyonundaki zamana bağlı etkisi araştırılmıştır. Bu senaryolarda dört farklı hava giriş hızı ve 3 farklı pencere açıklık alanı için, Tablo 7’de görüleceği üzere, 60 farklı çözümleme yapılmıştır.

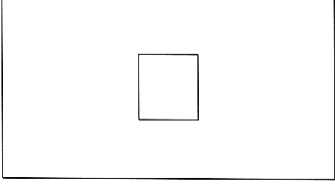
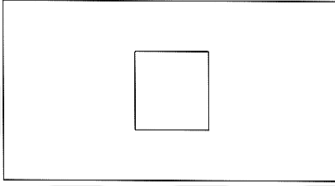
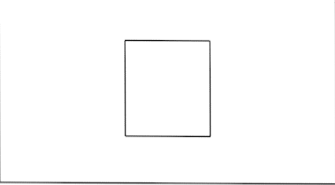
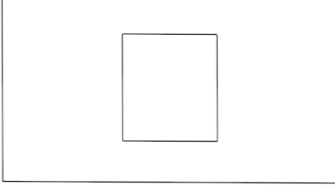
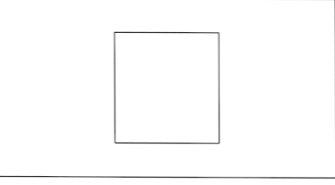
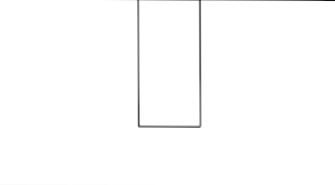
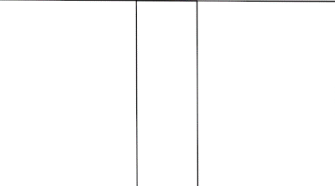
Tablo 7. Kapı ve pencere açık dolu derslikte CO₂ değişimi için senaryolar

	Kişi Sayısı	Pencere		Doğal Havalandırma için Hava Giriş Hızları
		Geometrisi	Açıklık Alanı (m ²)	m/s
SENARYO 2	13 19 25 31 37		1	0.05; 0.1; 0.15; 0.20
SENARYO 3	13 19 25 31 37		2	0.05; 0.1; 0.15; 0.20
SENARYO 4	13 19 25 31 37		3	0.05; 0.1; 0.15; 0.20

2.4.3. Ders Sonrası Kapı ve Pencere Açık Boş Derslik

Ders sonrasında bir sonraki derse kadar verilen dinlenme süresinde, farklı hava giriş hızları ve pencere açıklık alanları için CO₂ konsantrasyonunun zamanla değişiminin araştırılmasına yönelik senaryolar Tablo 8’de verilmiştir.

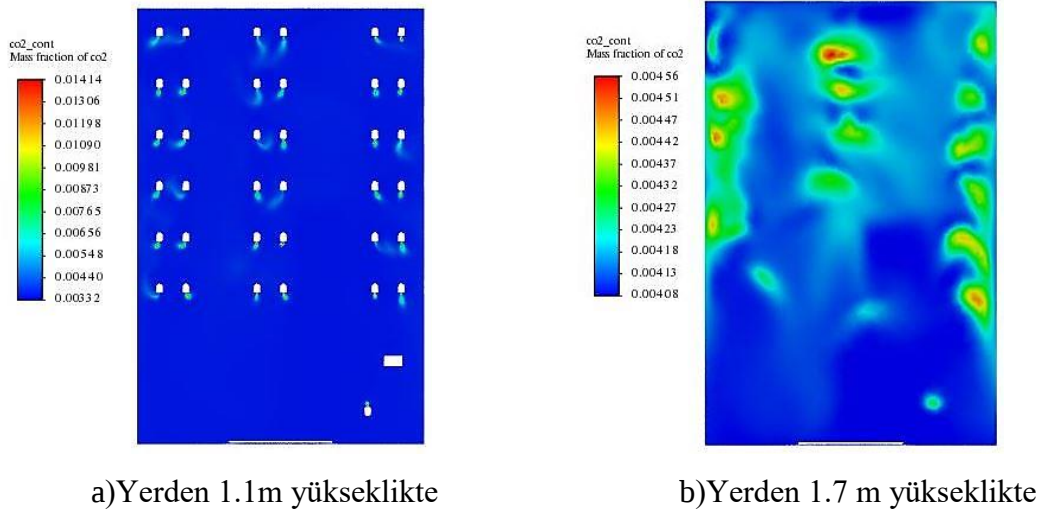
Tablo 8. Kapı ve pencere açık boş derslikte CO₂ değişimi için senaryolar

	Pencere		Doğal Havalandırma için Hava Giriş Hızları
	Geometrisi	Açıklık Alanı (m ²)	(m/s)
SENARYO 5		1	0.05; 0.10; 0.125; 0.15; 0.175; 0.20; 0.25
SENARYO 6		1,5	0.05; 0.10; 0.125; 0.15; 0.175; 0.20; 0.25
SENARYO 7		2	0.05; 0.10; 0.125; 0.15; 0.175; 0.20; 0.25
SENARYO 8		2,5	0.05; 0.10; 0.125; 0.15; 0.175; 0.20; 0.25
SENARYO 9		3	0.05; 0.10; 0.125; 0.15; 0.175; 0.20; 0.25
SENARYO 10		1,9	0.05; 0.10; 0.125; 0.15; 0.175; 0.20; 0.25
SENARYO 11		2,8	0.05; 0.10; 0.125; 0.15; 0.175; 0.20; 0.25

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Kapı ve Pencere Kapalı Dolu Derslikte CO₂ Konsantrasyonundaki Değişim

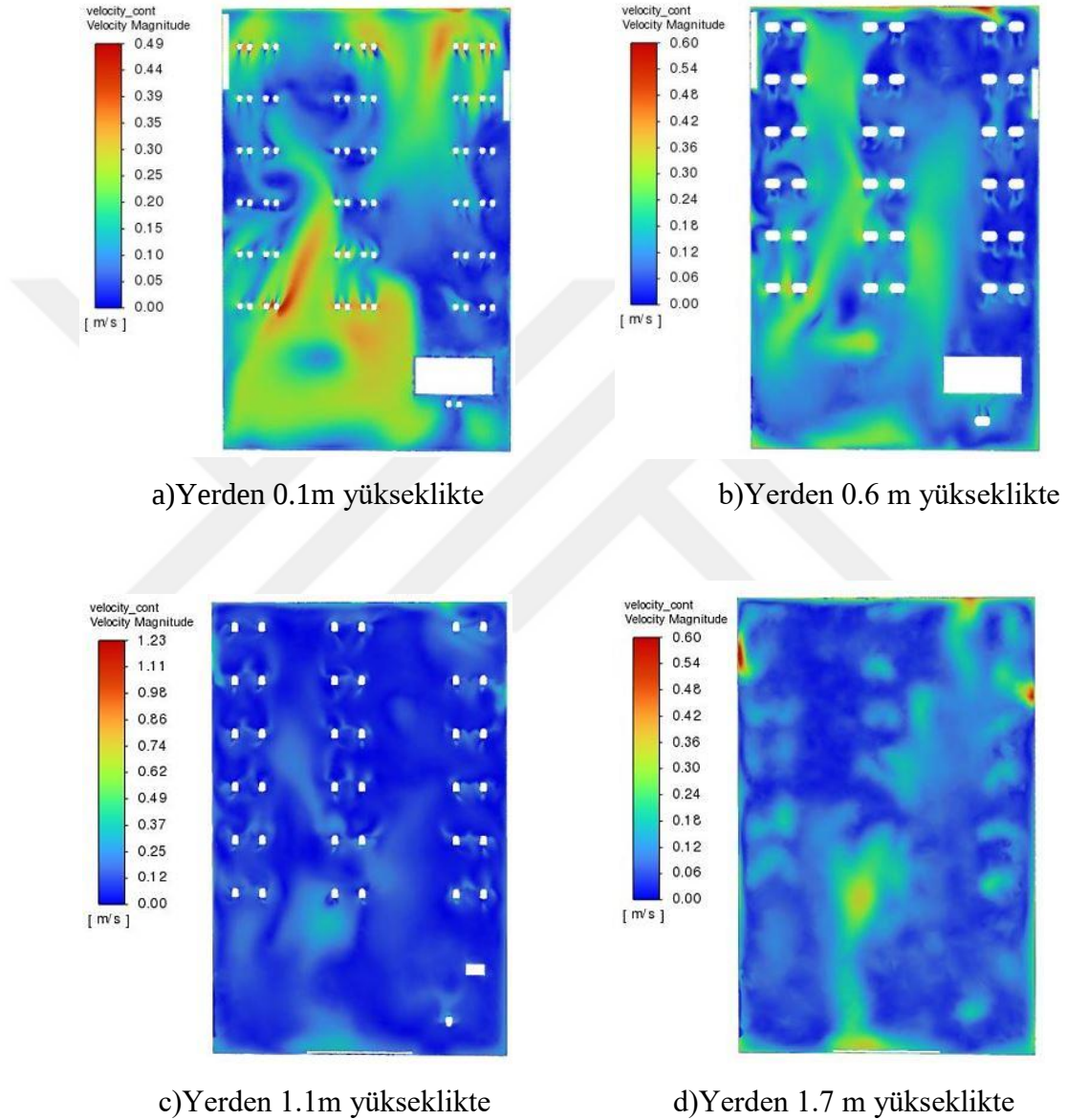
Ayrıntılı insan geometrisinin kullanıldığı sayısal çözümlemede kapı ve pencereleri kapalı olan dolu derslikte bir saat sonunda 1.1m ve 1.7 m yüksekliklerdeki CO₂ konsantrasyonunun hacim ortalamalı dağılımları Şekil 22’de görülmektedir. Oturma ve ayakta duruşta baş hizalarındaki kesitlerde ortalama CO₂ yoğunluğu, mevcut çalışmalarda ve standartlarda belirtilen 1000 ppm sınır değerini aşmakta ve çoğunlukla 4000 ppm değerinin de üzerine çıkmaktadır. Şekil 22a’da yerden 1.1 m yükseklikte, oturma konumunda kişilerin soluk verme hizasına karşılık gelen bölgelerde CO₂ konsantrasyonunun 5000 ppm gibi yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Şekil 22b’de, 1.7 m yükseklikteki kesitte ise CO₂ konsantrasyonu seviyeleri bölgesel olarak azalmakta ve CO₂ konsantrasyonu 4000 ppm değeri civarlarında olacak şekilde dağılmaktadır.



Şekil 22. Kapı ve pencere kapalı dolu sınıfta farklı yüksekliklerde CO₂ dağılımları

Derslik tabanından itibaren farklı yüksekliklerde hava akışı hız dağılımları, Şekil 23’te görülmektedir. Derslik içerisinde insanlardan ve radyatörler nedeniyle sıcaklık farkından kaynaklı doğal taşınımın sonucu bir hava sirkülasyonu meydana gelmektedir. Hız değerlerinin 0.1 m bilek hizasında ve 0.6 m gövde hizasında doğal taşınımdan dolayı arttığı,

1.1 m yükseklikteki kesitte doğal taşınım ile birlikte solunumdan dolayı yüksek seviyeye ulaştığı, 1.7 m yükseklikteki kesitte ise akış hızının azaldığı görülmektedir. 1.7 seviyesindeki kesitte radyatör ızdışım hızasında ısı taşınımı sebebiyle aynı kesitteki diğer bölgelere göre yerel hız artışı meydana gelmektedir.



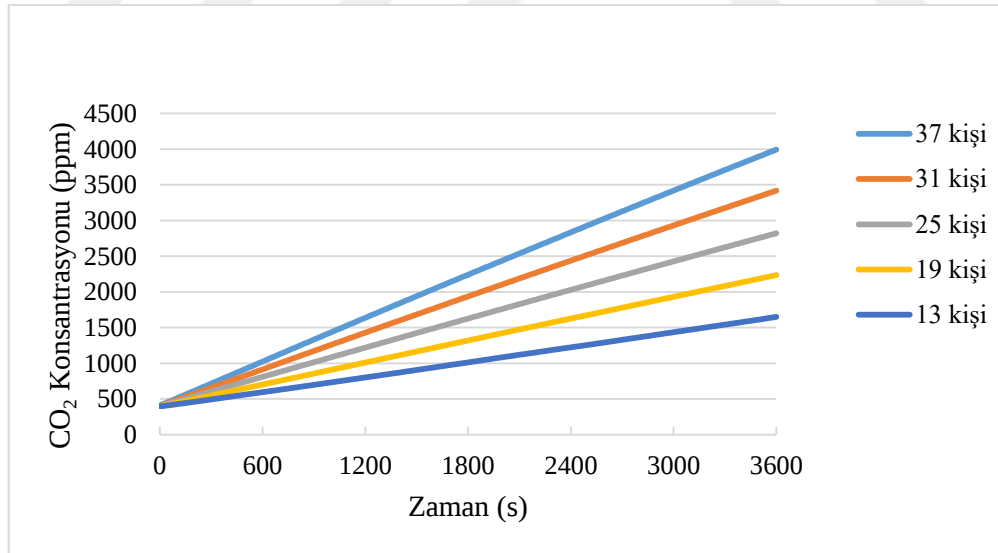
Şekil 23. Kapı ve pencere kapalı dolu derslikte farklı yüksekliklerde hava hızı dağılımları

Kapı ve pencere kapalı dolu dersliğin farklı kullanıcı sayıları için zamana bağlı CO_2 değişiminin incelenmesi için çözümler yapılmıştır. Başlangıçta derslik havasında 400 ppm olan CO_2 konsantrasyonunun bir saat sonunda kapalı iç ortamda solunum kaynaklı artış miktarları, Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. Kapı ve pencere kapalı dolu derslik CO₂ konsantrasyonları

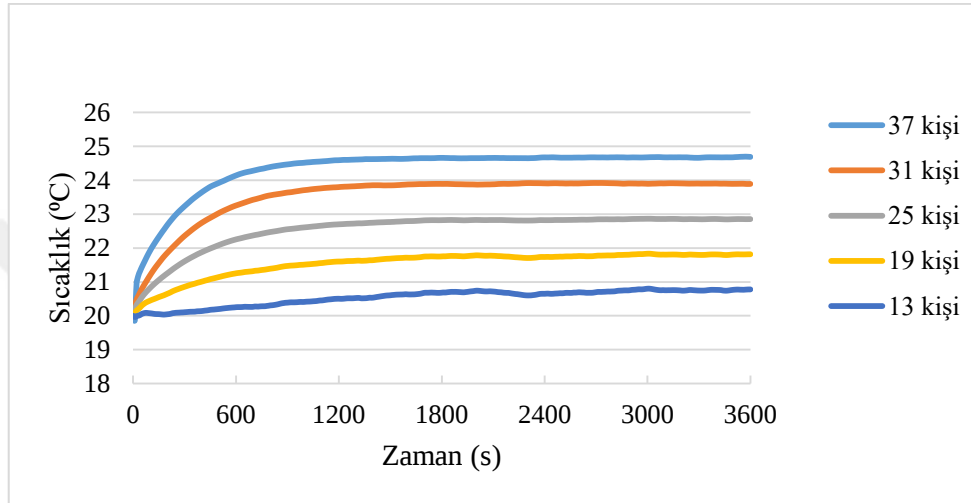
	Derslikteki kişi sayısı	Başlangıçta Derslik Havaasının CO ₂ Konsantrasyonu	Derslik Havaasının Sıcaklığı	Dış Ortam Havaasının Sıcaklığı	Geçen Süre	Dersliğin Hacimsel Ortalamalı CO ₂ Konsantrasyonu
		ppm	°C	°C	dakika	ppm
SENARYO 1	37	400	20	10	60	3994.1
	31	400	20	10	60	3418.8
	25	400	20	10	60	2821.8
	19	400	20	10	60	2235.7
	13	400	20	10	60	1649.6

Şekil 24’de görüldüğü gibi solunum kaynaklı CO₂ konsantrasyonu derslikteki doluluk seviyesine bağlı olarak zamanla artmaktadır. Ders esnasında havalandırmanın yapılamadığı derslikte, iç ortam hava kalitesinin standart ve yönetmeliklerde önerilen sınır değerlerin, öğrenci yoğunluğuna göre, 15-30 dakikada aşıldığı görülmektedir.

Şekil 24. Senaryo-1 derslik içinde kişi sayısına hacimsel CO₂ konsantrasyonları

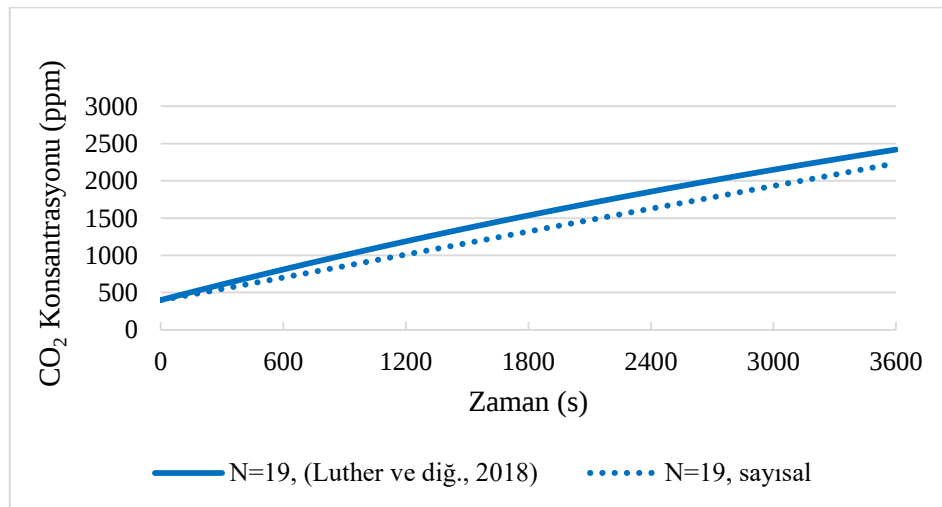
Türkiye’de dış ortam sıcaklığı 15°C’nin altına indiğinde devlet okullarında merkezi ısıtma sistemi devreye girmektedir. Isı kayıplarının azaltılması için genellikle dersliklerde kapı ve pencerelerin kapalı tutulması tercih edilmektedir. Isıtma sistemi, insan solunumu ve dersliklerde kullanılan teknolojik cihazlardan kaynaklı ısı kazançları bir derslikte sıcaklık

artışına sebep olan etkenlerdendir. Model derslik için, ısıtma sistemi ve bilgisayar ve projeksiyon cihazlarının çalışır olduğu durumda taşınım, ışıınım ve solunum mekanizmalarının, farklı kullanıcı sayıları için, iç ortam sıcaklığı üzerindeki etkileri Şekil 25'te gösterilmiştir. Sıcaklık başlangıçtan itibaren artarken, duvar, çatı, pencere gibi yüzeylerden oluşan ısı kayıpları nedeniyle sonraki süreçlerde denge durumuna ulaşmaktadır.



Şekil 25. Senaryo-1 derslik içindeki kişi sayısına göre sıcaklık değişimi

Şekil 26'da kütle dengesi yöntemi kullanılarak kapı ve pencere kapalı 19 kişilik derslikte sabit durum yaklaşım ile Luther, Horan, & Tokede (2018) tarafından elde edilen analitik sonuçlarla, bu çalışmanın sayısal sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 26. Ders esnasında kapalı sınıf için analitik ve sayısal değişimler

3.2. Kapı ve Pencere Açık Dolu Derslikte CO₂ Konsantrasyonundaki Değişim

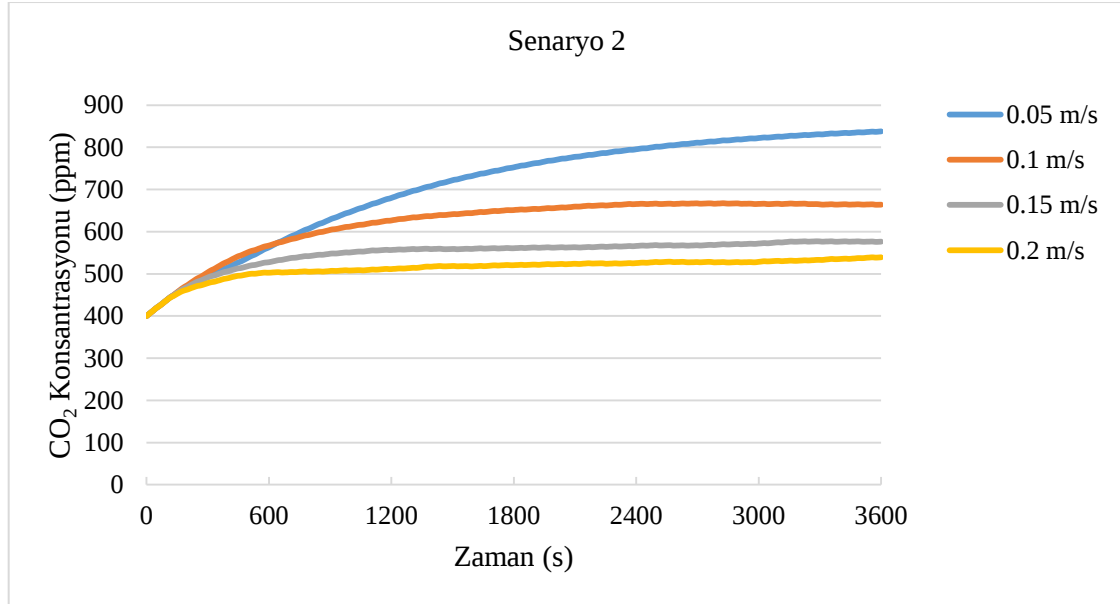
Çalışmanın bu bölümünde, kapı ve pencere açık dolu derslikte; kullanıcı sayısı, giriş havası hızı ve pencere açıklık alanlarının CO₂ konsantrasyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Derslik kapısı 1.932 m² açıklık alanına sahiptir. İnsanları rahatsız etmeyecek 0.05, 0.1, 0.15 ve 0.2 m/s değerindeki hava giriş hızları; 1, 2 ve 3 m² pencere açıklık alanları ve derslikte 13, 19, 25, 31 ve 37 kişi olması durumları için yapılan çözümlemelerin sonuçları Tablo 10'da verilmiştir. ASHRAE (2017) standardına göre iç ve dış ortam arasındaki sıcaklık farkının en fazla 8°C olması önerildiğinden, iç ortam 25°C, dış ortam 18°C alınmış, bu sıcaklık farkından dolayı oluşan doğal havalandırma etkisi de çözümlemelerde hesaba katılmıştır.

Tablo 10. Ders esnasında kapı ve pencere açık dolu derslikte farklı hız ve pencere açıklıkları için hacimsel CO₂ konsantrasyonları

	Pencere Çıkış Açıklığı (m ²)	Kişi Sayısı	Hava Giriş Hızı (m/s)			
			0.05	0.1	0.15	0.20
SENARYO 2	1	13	837	666	576	539
		19	1037	793	656	610
		25	1261	906	729	661
		31	1485	971	815	706
		37	1647	1050	829	697
SENARYO 3	2	13	788	665	565	520
		19	1003	788	641	594
		25	1180	896	681	610
		31	1310	963	762	663
		37	1422	1015	793	675
SENARYO 4	3	13	735	664	557	503
		19	874	771	617	552
		25	1033	847	664	591
		31	1141	955	691	622
		37	1179	985	714	655

Tablo 10'daki verilerden, hava giriş hızı ve pencere açıklık alanı arttıkça CO₂ konsantrasyonunun azaldığı görülmektedir. Bu havalandırmanın dış ortam sıcaklığının uygun olduğu geçiş mevsimlerinde yapılması ısı konfor açısından önerilebilir.

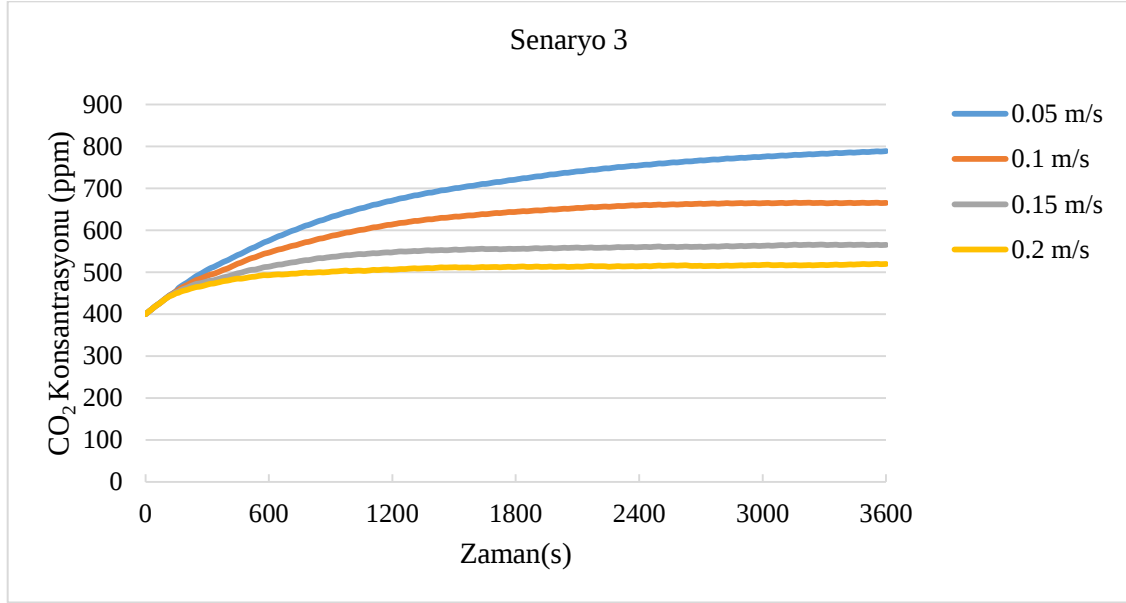
Şekil 27, Şekil 28, Şekil 29, Şekil 30 ve Şekil 31’de sırasıyla, 13,19, 25, 31 ve 37 kişinin bulunduğu derslikte ders esnasında zamana bağlı CO₂ konsantrasyonu değişimleri verilmiştir. Ders süresince artan solunum kaynaklı CO₂ değeri havalandırma ile belli oranda azalmaktadır. Hava giriş hızı 0.05 m/s olan durumda hava değişimi yetersiz kalmış CO₂ konsantrasyonu kritik sınır olarak alınan 1000 ppm değerinin üzerinde iken, 0.1 m/s giriş hızında ise kritik seviyenin civarında seyretmiştir. 0.15 m/s ile 0.20 m/s hız değerlerinde kritik değerin altında olup, sonuçlar birbirine yakındır. 0.15 m/s değerindeki hava giriş hızı, hem iç ortamdaki insanları rahatsız etmeyecek hem de CO₂ konsantrasyonunu kritik seviyenin altında tutma konusunda yeterli olacaktır.



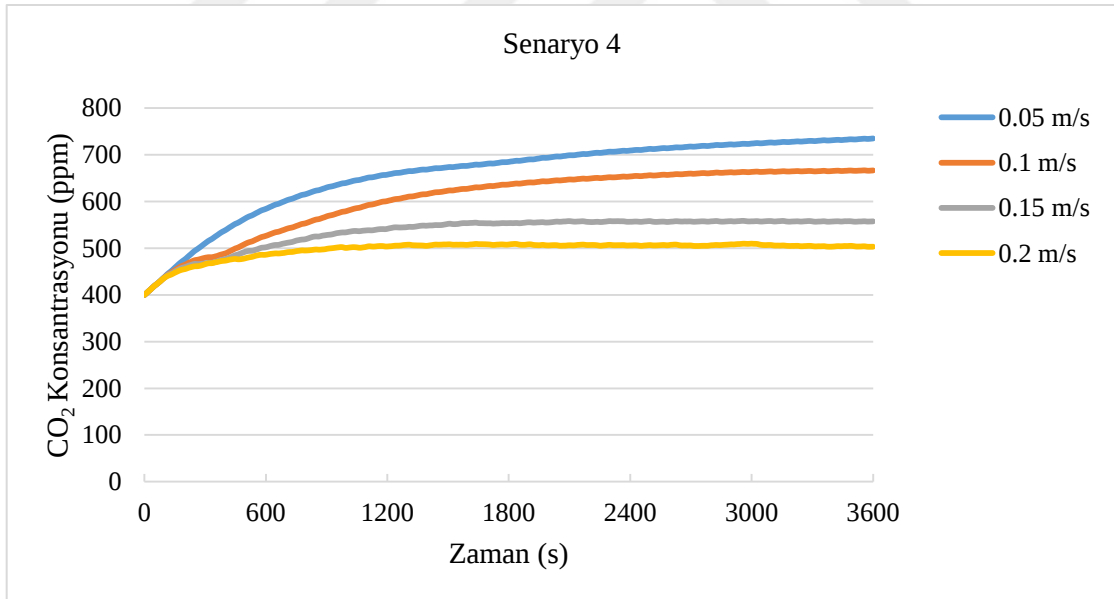
(a)

Şekil 27. Derslikte 13 kişi olması durumunda, farklı pencere açıklık alanlarında, farklı akış hızları için hacimsel CO₂ değişimleri (a) 1 m² (b) 2 m² (c) 3m²

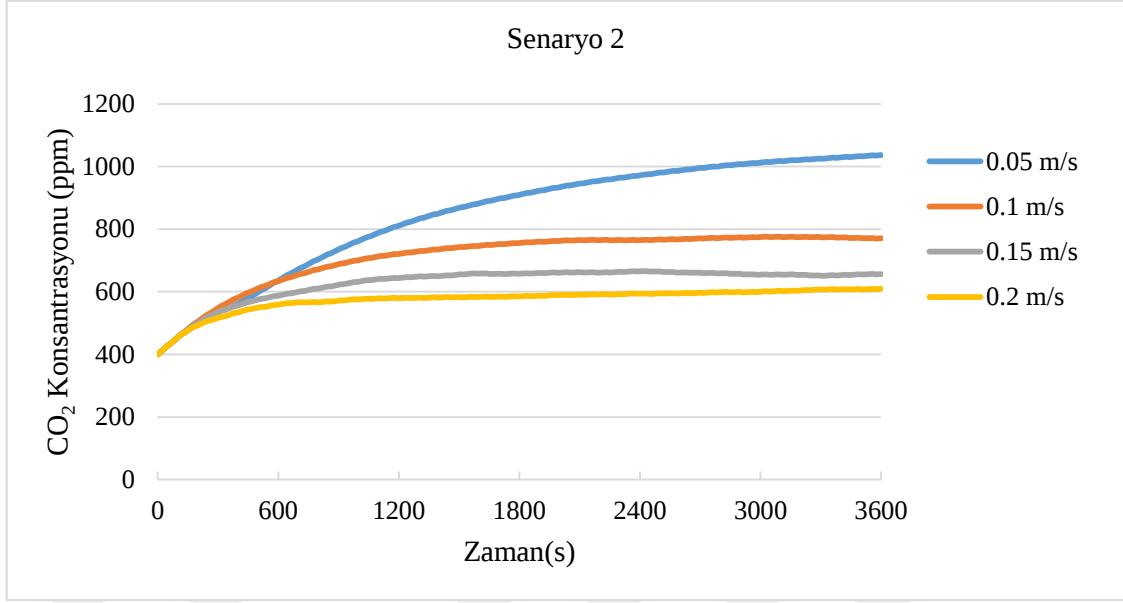
Şekil 27'nin devamı



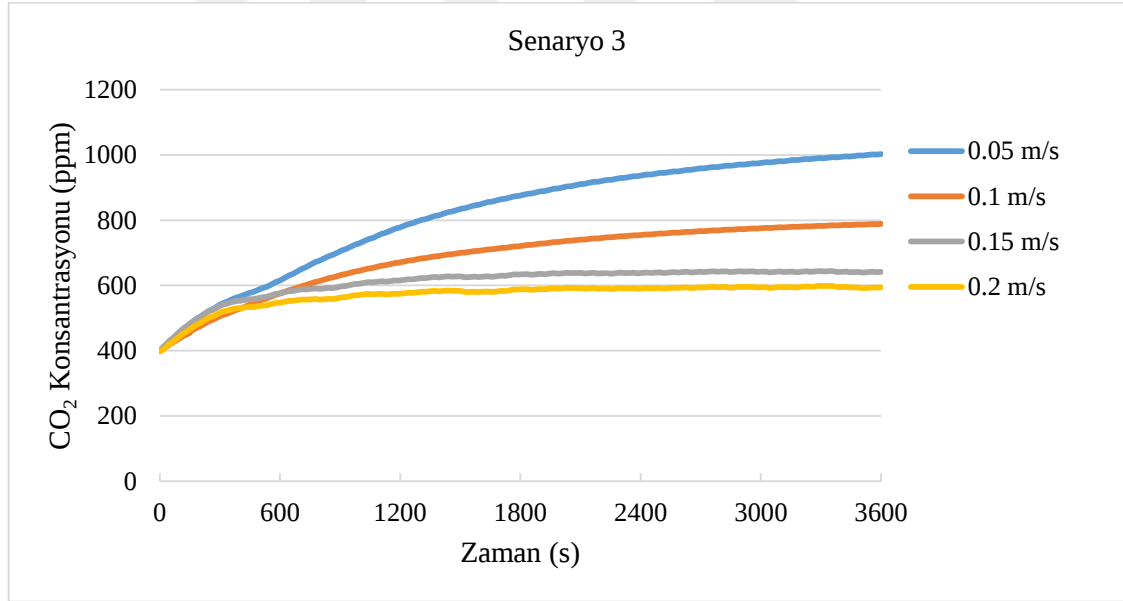
(b)



(c)



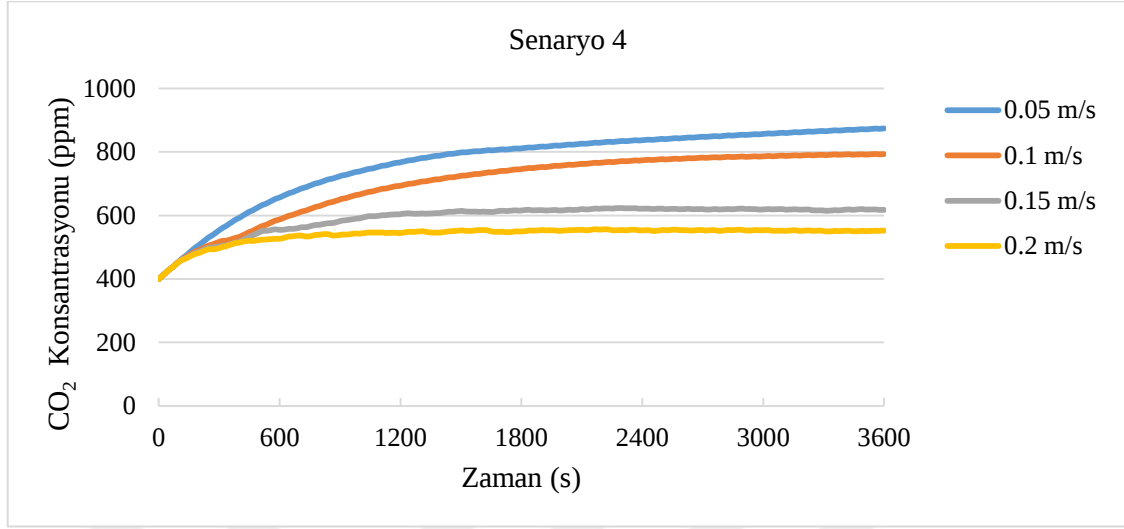
(a)



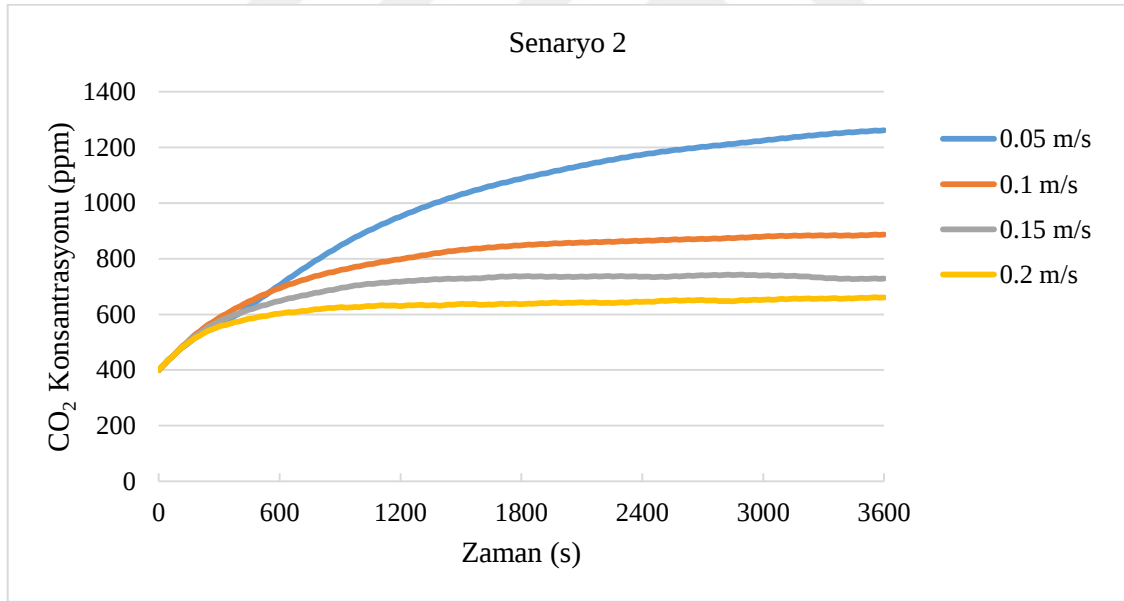
(b)

Şekil 28. Derslikte 19 kişi olması durumunda, farklı pencere açıklık alanlarında, farklı akış hızları için hacimsel CO₂ değişimleri (a) 1 m² (b) 2 m² (c) 3m²

Şekil 28'in devamı



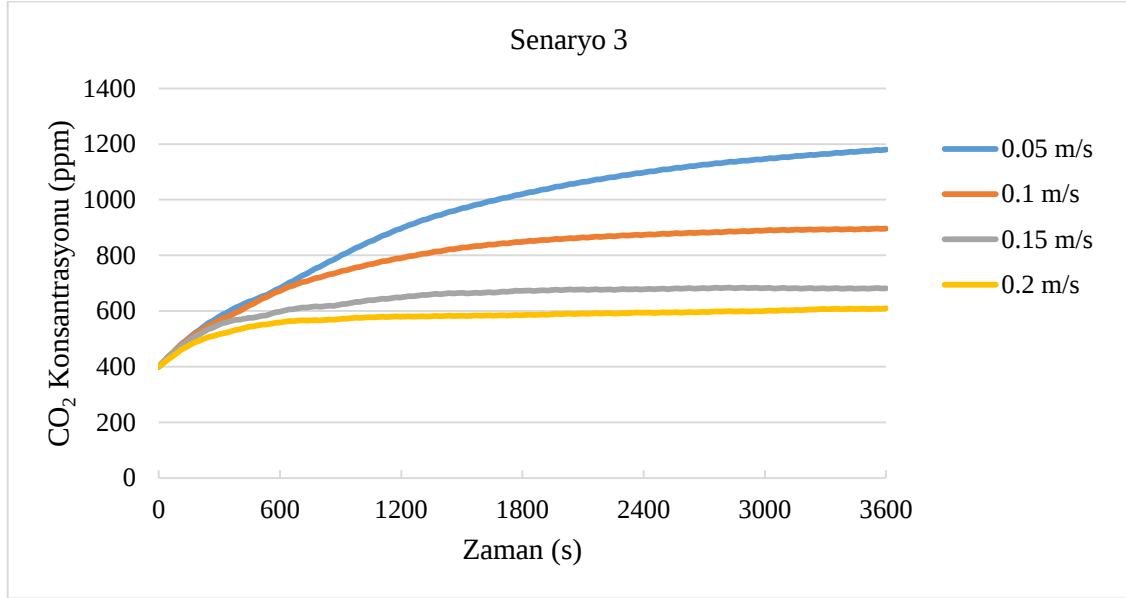
(c)



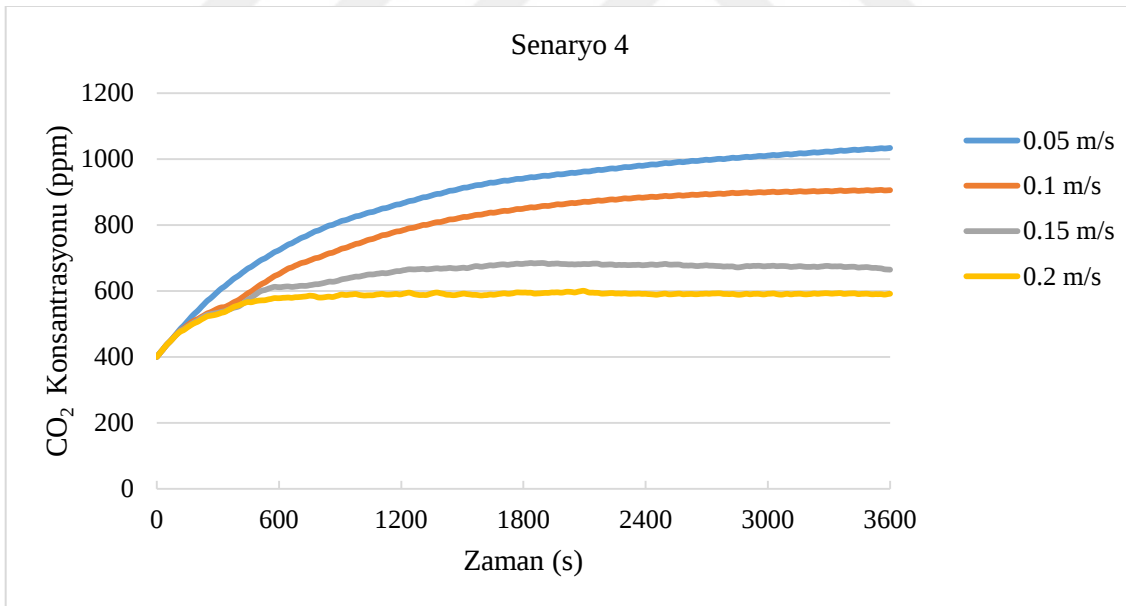
(a)

Şekil 29. Derslikte 25 kişi olması durumunda, farklı pencere açıklık alanlarında, farklı akış hızları için hacimsel CO₂ değişimleri (a) 1 m² (b) 2 m² (c) 3m²

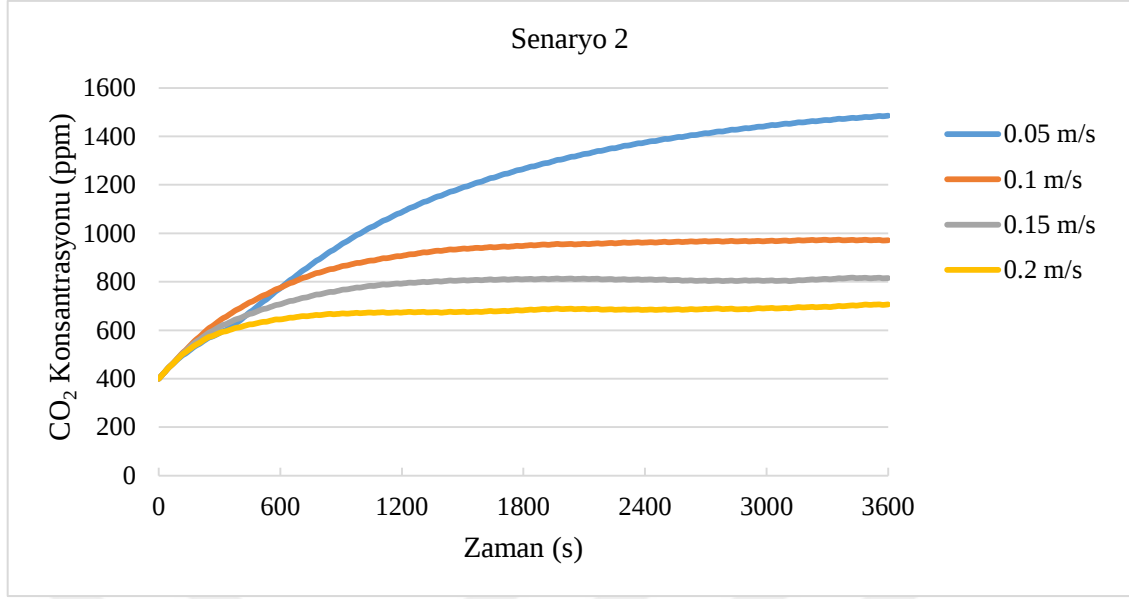
Şekil 29'un devamı



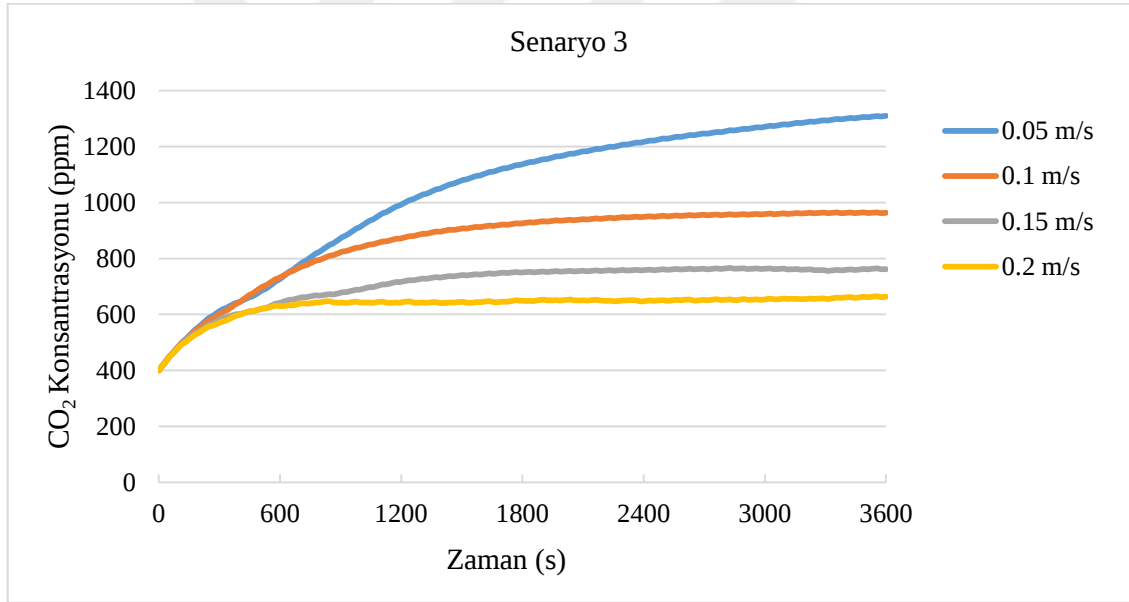
(b)



(c)



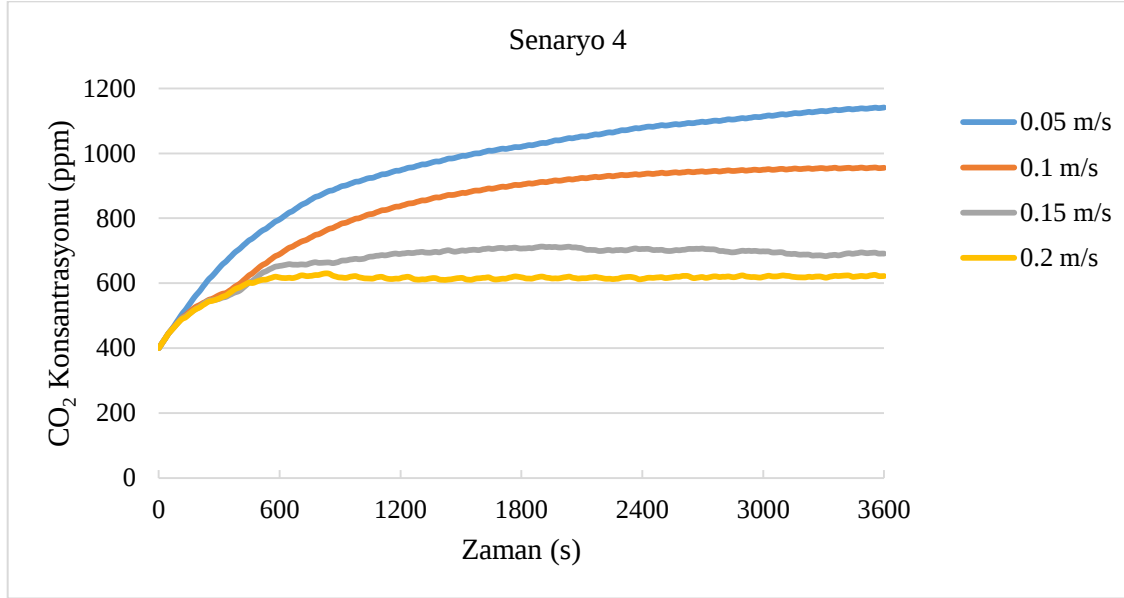
(a)



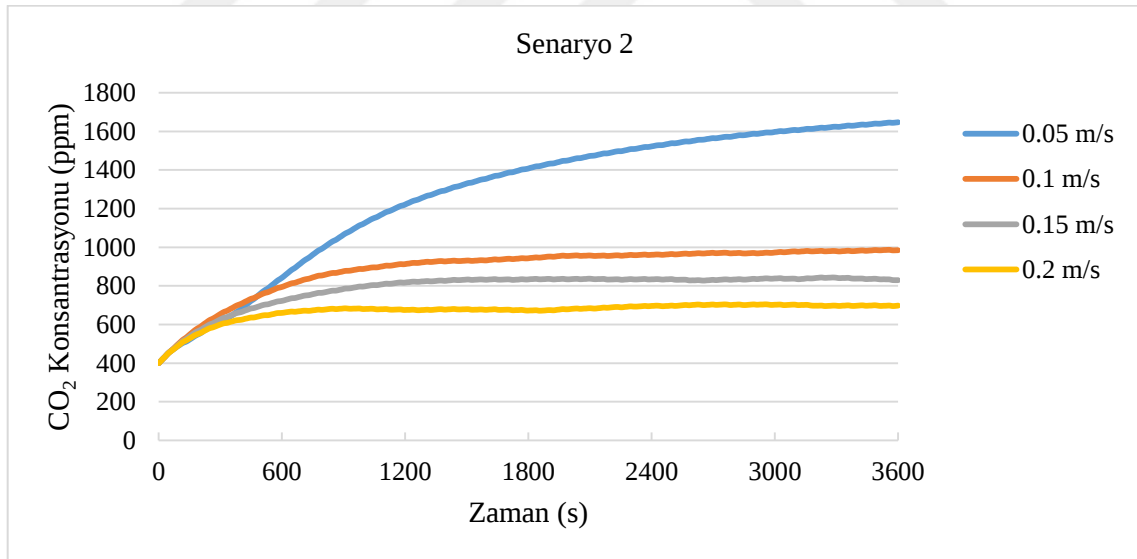
(b)

Şekil 30. Derslikte 31 kişi olması durumunda, farklı pencere açıklık alanlarında, farklı akış hızları için hacimsel CO₂ değişimleri (a) 1 m² (b) 2 m² (c) 3m²

Şekil 30'un devamı



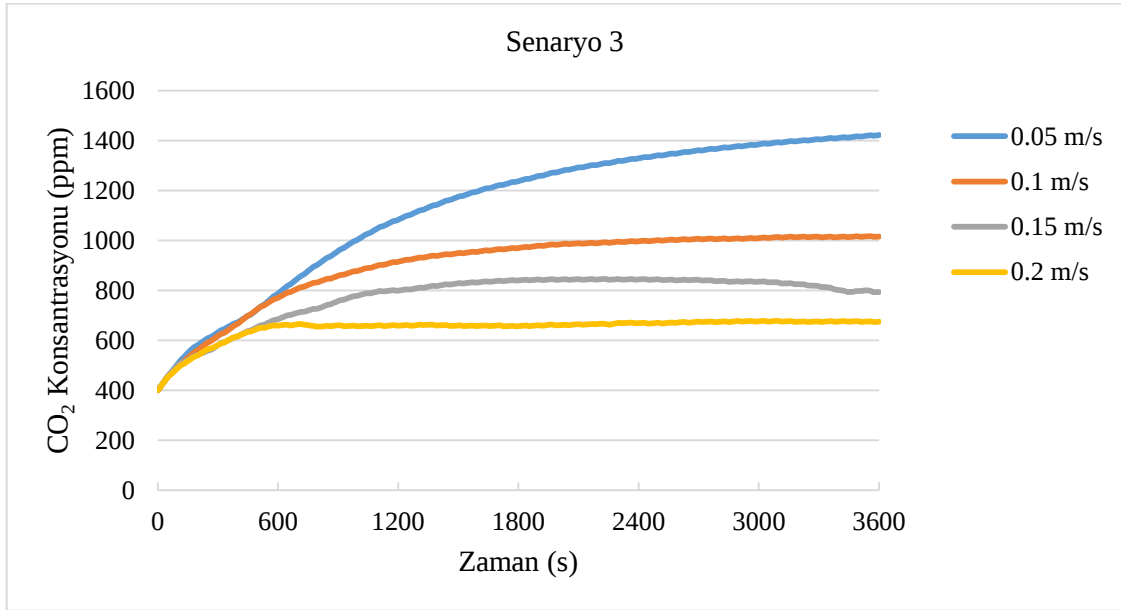
(c)



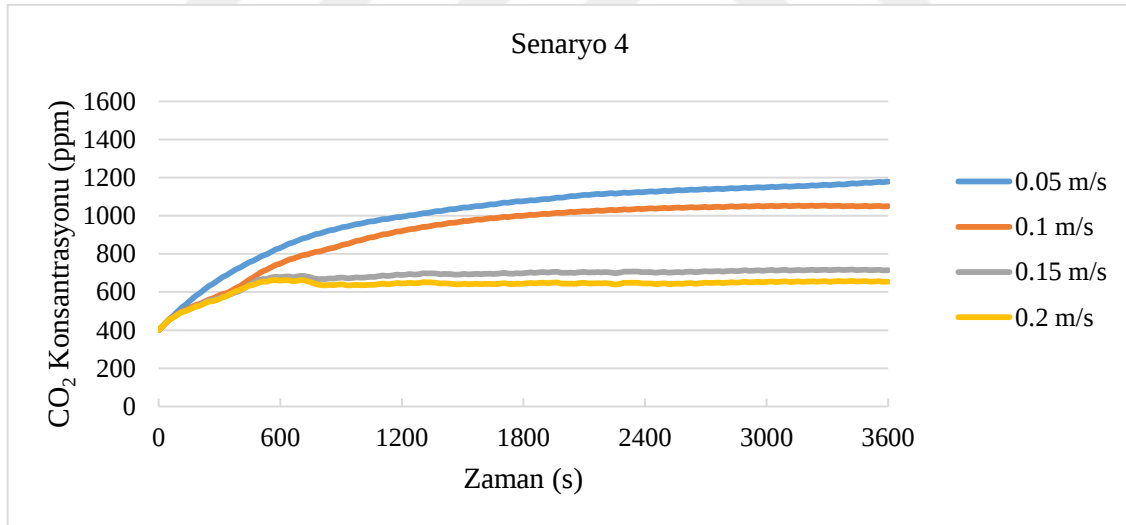
(a)

Şekil 31. Derslikte 37 kişi olması durumunda, farklı pencere açıklık alanlarında, farklı akış hızları için hacimsel CO₂ değişimleri (a) 1 m² (b) 2 m² (c) 3m²

Şekil 31'in devamı



(b)



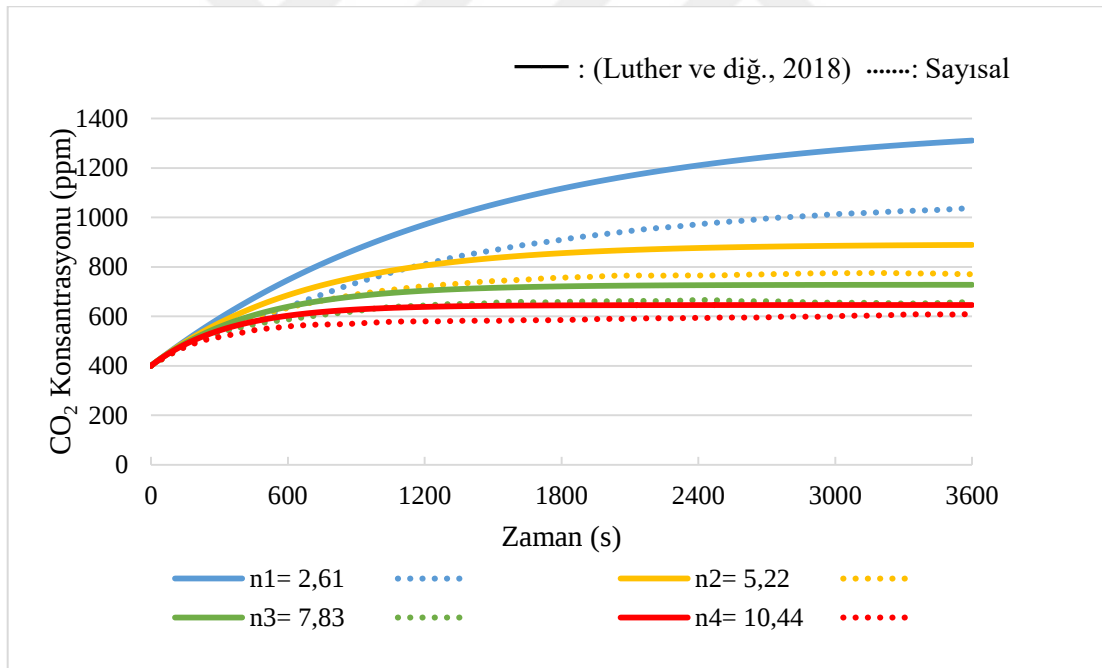
(c)

Luther ve diğ. (2018), literatürde mevcut deneysel sonuçları esas alarak dersliklerde CO₂ konsantrasyonunun zamanla değişimini, derslikteki kişi sayısına, hava değişim miktarına ve solunum oranına bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade etmişlerdir.

$$CO_2(t) = \left(\frac{Ng}{aV}\right) + (CO_{2,\text{çevre}} - CO_{2,\text{başlangıç}})(1 - e^{-at}) + CO_{2,\text{başlangıç}} \quad (24)$$

Bağıntıda N , kişi sayısını; g (ml/dak/kişi), bir kişiden çıkan CO_2 konsantrasyonunu; a (litre/saat), hava değişim oranını; V (m^3), derslik hacmini ve t (s), zamanı ifade etmektedir.

Bu çalışmada havalandırma için kullanılan 0.05, 0.1, 0.15 ve 0.2 m/s değerindeki hava giriş hızları için, Denklem 9'a göre hesaplanan hava değişim oranları sırasıyla, 2.61, 5.22, 7.83 ve 10.44 olmaktadır. Şekil 32'de, kütle dengesi yöntemi kullanılarak kapı ve pencere açık 19 kişilik derslikte farklı hava değişim oranları için sabit durum yaklaşım ile Luther ve diğ. (2018) tarafından elde edilen analitik sonuçlarla sayısal çözümlemelerden bulunan sonuçların birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bu çalışmada kapıdan farklı giriş hızlarında 400 ppm CO_2 içeren taze hava dersliğe gönderilmektedir. Hava değişim oranı arttıkça analitik ve sayısal sonuçlar birbirine yaklaşmaktadır.



Şekil 32. Dolu derslikte 1 m² pencere açıklık alanı için analitik ve sayısal CO_2 değişimleri

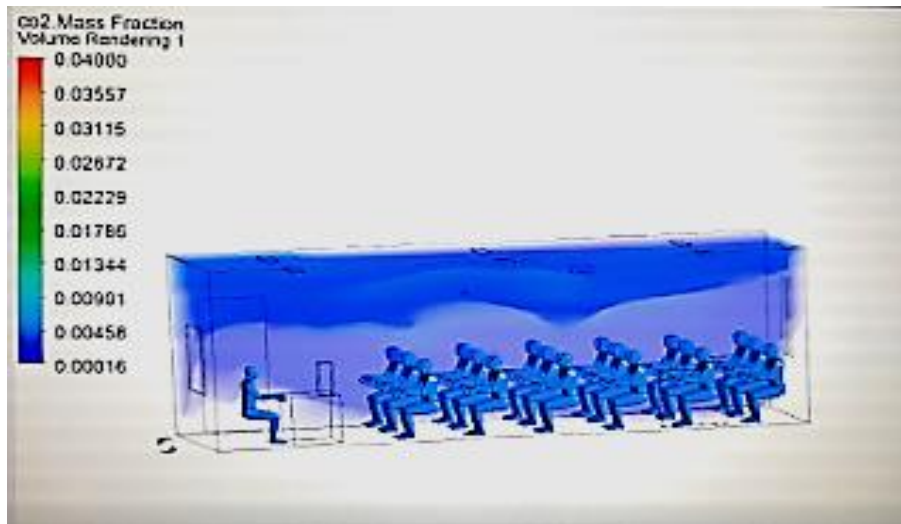
Sağlam (2019) tarafından kapı ve pencereleri kapalı model derslikte yapılan ölçümlerde, başlangıçta 551 ppm olan CO_2 konsantrasyonu bir saatlik ders sonucunda 4123 ppm değerine çıkmaktadır. Derslikte havalandırma yapılmadan tekrar derse başlanıp ve pencerenin ($A_p=1.35 m^2$) açık olması durumunda, bir saat sonunda CO_2 konsantrasyonunun

1000 ppm'in altına düştüğü sürelerle yönelik çözümlemeler yapılmış ve sonuçlar Tablo 11'de gösterilmiştir.

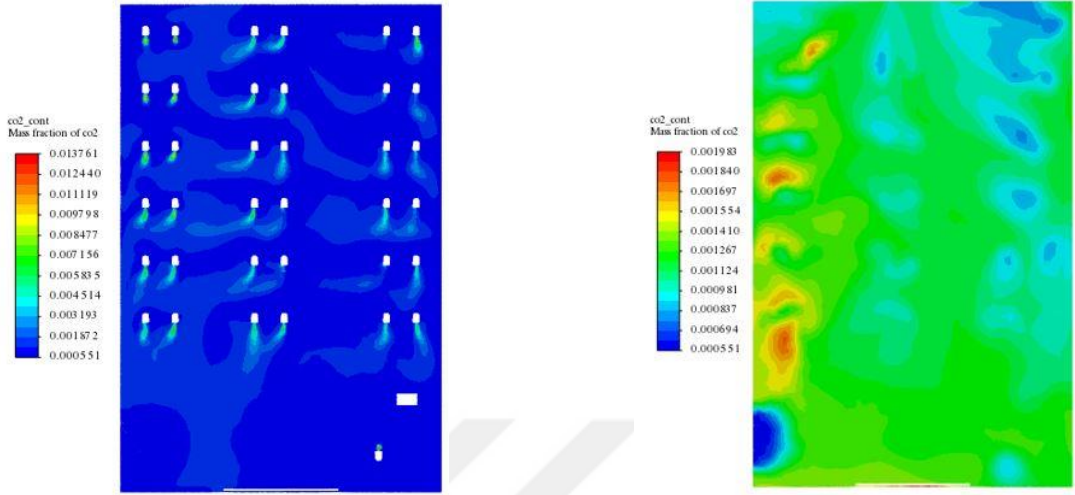
Tablo 11. Önceden havalandırılmamış dolu derslikte ders esnasındaki doğal havalandırmada CO₂ konsantrasyonları

Pencere açıklık alanı	Havanın Kapıdan Giriş Hızı	Giriş havasının CO ₂ Konsantrasyonu	İç ortam havasının CO ₂ Konsantrasyonu	Dersliğin hacimsel ortalamalı CO ₂ Konsantrasyonu	Geçen Süre
m ²	m/s	ppm	ppm	ppm	s
1,35	0.1	551	4123	2163	3600
	0.15	551	4123	1756	3600
	0.25	551	4123	980.5	770
	0.5	551	4123	981.8	310
	0.75	551	4123	948.6	300
	1	551	4123	923.3	250

Ders esnasında 0.25 m/s kapı giriş hızı ve 1.35 m² pencere açıklık alanı durumunda 13 dakikada 980.5 ppm seviyesine inen hacimsel CO₂ konsantrasyon dağılımı Şekil 33'de görülmektedir. Şekil 34'de ise yerden 1.1 ve 1.7 m yükseklikte kesitlerde alansal CO₂ konsantrasyon dağılımı verilmiştir. Şekil 34a soluk verme hızasında CO₂ dağılımını Şekil 34b ise baş hızasında CO₂ dağılımını göstermektedir.



Şekil 33. Dolu sınıfta 0.25 m/s hızda 13 dakika sonunda CO₂'nin hacimsel dağılımı



(a) Yerden 1.1 m yükseklikte

(b) Yerden 1.7 m yükseklikte

Şekil 34. Dolu derslikte 0.25 m/s'de 13 dakika sonunda CO₂ dağılımları

3.2.1. Kapı ve Pencere Açık Dolu Derslikte Regresyon Analizi

Kapı ve pencere açık dolu derslikte 60 farklı durum için gerçekleştirilen sayısal çözümlerlerden elde edilen verilerin SPSS yazılımı ile istatistiksel analizi yapılmıştır. Sayısal sonuçlara göre, CO₂ konsantrasyonundaki değişim için üssel bir fonksiyon kullanılmıştır. Derslikteki kişi sayısı (N), pencere açıklık alanı (A), hava değişim sayısı (n) ve zaman (t) bağımsız değişkenlerine göre, CO₂ konsantrasyonundaki değişimin ifadesi Denklem 40'da verilmiştir.

$$\text{CO}_2 \text{ değişimi} = 4.086257 (N^{0.857750} A^{-0.206945} n^{-0.710907} t^{0.401191}) \quad (\text{ppm})$$

$$(0.069188)(0.003173) (0.002030) (0.001870) (0.001684)$$

$$(p < 0.01) \quad (p < 0.01) \quad (p < 0.01) \quad (p < 0.01) \quad (p < 0.01) \quad (25)$$

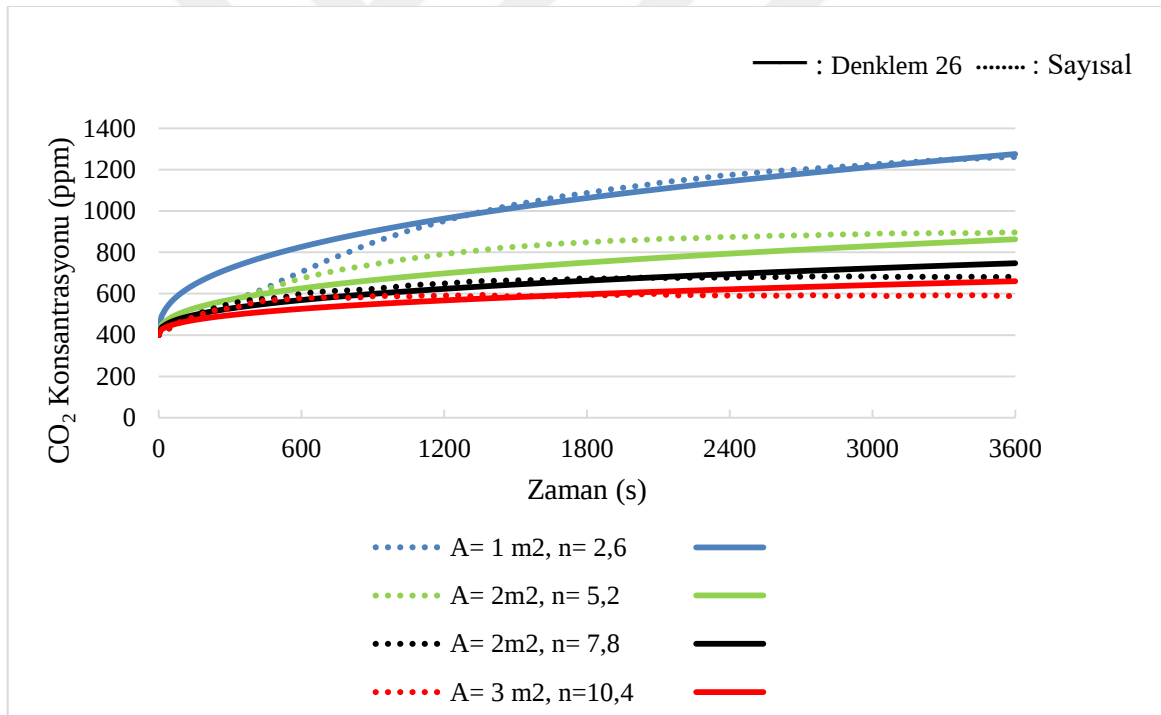
Denklemin alt satırında parantez içindeki değerler katsayıların standart hata değerlerini bir sonraki alt satırındaki p değerleri ise denklemdaki tüm parametreler istatistik açıdan anlamlı olduğunu ifade etmektedir. Yukarıdaki denklemin dört bağımsız

değişkeninin CO₂ konsantrasyonunu belirleme oranı % 93.5 olmaktadır ($R^2=0.935$). Denklemin standart sapması, $S_{y.x} = \pm 54.132$ ppm olarak belirlenmiştir.

Kapı ve pencere açık dolu derslik için farklı iç ortam başlangıç CO₂ konsantrasyon değerinin eklenmesi ile Denklem 26'ya göre, anlık CO₂ konsantrasyonu tahmin edilebilecektir.

$$CO_{2,anlık} = 4,086257(N^{0,857750} A^{-0,206945} n^{-0,710907} t^{0,401191}) + CO_{2,baslangic} \quad (ppm) \quad (26)$$

Kapı ve pencere açık dolu derslik için istatistik olarak bulunan Denklem 26'den elde edilen sonuçlarla sayısal çözümleme sonuçları, Şekil 35'te karşılaştırılmıştır. Hava değişim oranı arttıkça, Denklem 26 sayısal çözümleme sonuçlarını daha iyi ifade etmektedir. Hava değişim oranı 2.6 olan eğriler karşılaştırıldığında, yaklaşık 20 dakikadan sonra bir uyum yakalanmaktadır.



Şekil 35. Denklem 26'nın sonuçları ve sayısal sonuçlar için CO₂ konsantrasyonları

3.3. Kapı ve Pencere Açık Boş Derslikte CO₂ Konsantrasyonundaki Değişim

Ders sonrası boş sınıfta kapı ve pencere açılarak yapılan havalandırmada, farklı hız değerleri ve farklı pencere açıklık alanları için derslik içinde CO₂ konsantrasyonunun zamanla azalma durumuna yönelik çözümlerler gerçekleştirilmiştir. Mevcut çalışmalarda, dersliklerin yoğun kullanımında, ders sonrası CO₂ seviyesinin olması gereken kritik seviyeden 4 kat daha fazla bir seviyeye ulaştığı ifade edilmektedir (Bakó-Biró, Clements-Croome, Kochhar, Awbi & Williams, 2011). Ders sonrası kapı ve pencere açılarak yapılan doğal havalandırma durumu için, model derslikte Sağlam (2019) tarafından ölçülen 4000 ppm CO₂ konsantrasyon seviyesi başlangıç şartı olarak ele alınarak 49 farklı durum için çözümler yapılmıştır.

Farklı hız değerleri ve farklı pencere açıklık alanları için yapılan çözümlerlerde, 4000 ppm değerindeki CO₂ konsantrasyonunun 1000, 800 ve 500 ppm seviyelerinin altına düştüğü en az havalandırma süreleri Tablo 12’de verilmiştir. Tabloda verilen hava giriş hızları (V), pencere açıklık alanı (A) ve derslik hacmini (V) kapsayan hava değişim oranı (n), Denklem 9’da değişken olarak görülmektedir. Tüm senaryolardan görülebileceği gibi, hava giriş hızı ve pencere açıklık alanı arttıkça iç ortamın CO₂ konsantrasyonunun 1000 ppm kritik seviyesinin altına inme süresi kısalmaktadır. Senaryolarda yer alan 0.05 m/s hız değeri iç ortam hava kalitesini sağlaması açısından uzun süreler gerektirmektedir. Dersliklerde ders arası dinlenme süresi en az 15 dakika olduğunda, hava giriş hızının insanları rahatsız etmeyeceği hız olarak değerlendirilen 0.15 m/s olarak alındığı doğal havalandırmada, CO₂ konsantrasyonunun 1000 ppm seviyesinin altına inmesi için pencere açıklık alanının en az 1.5 m² olması gerekmektedir. Ancak, 30 dakika süre sonra 500 ppm seviyesinin altına inebilmektedir.

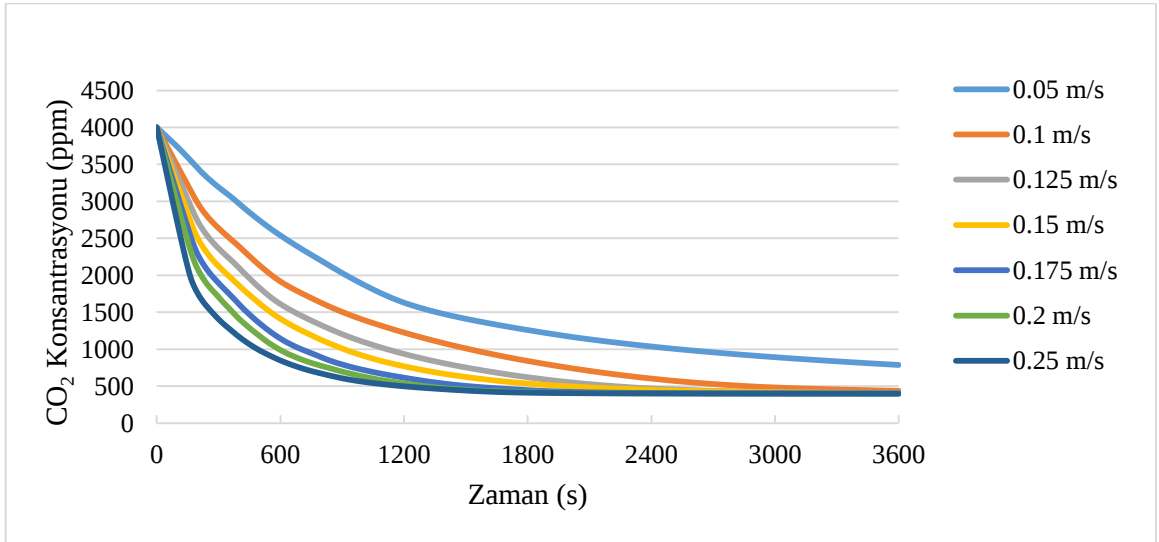
Ders sonrası boş sınıf için ele alınan senaryolar, pencere açıklık alanındaki değişimin de iç ortam CO₂ konsantrasyonundaki azalmayı etkilediğini göstermiştir. Bu etki, dersliğin hacimsel ortalamalı CO₂ seviyesinin 1000 ve 800 ppm’in altına düşmesi için geçen minimum sürelerde özellikle 0.15 m/s’den düşük hızlarda çok daha belirgindir.

Tablo 12. Kapı ve pencere açık boş derslik CO₂ miktarları

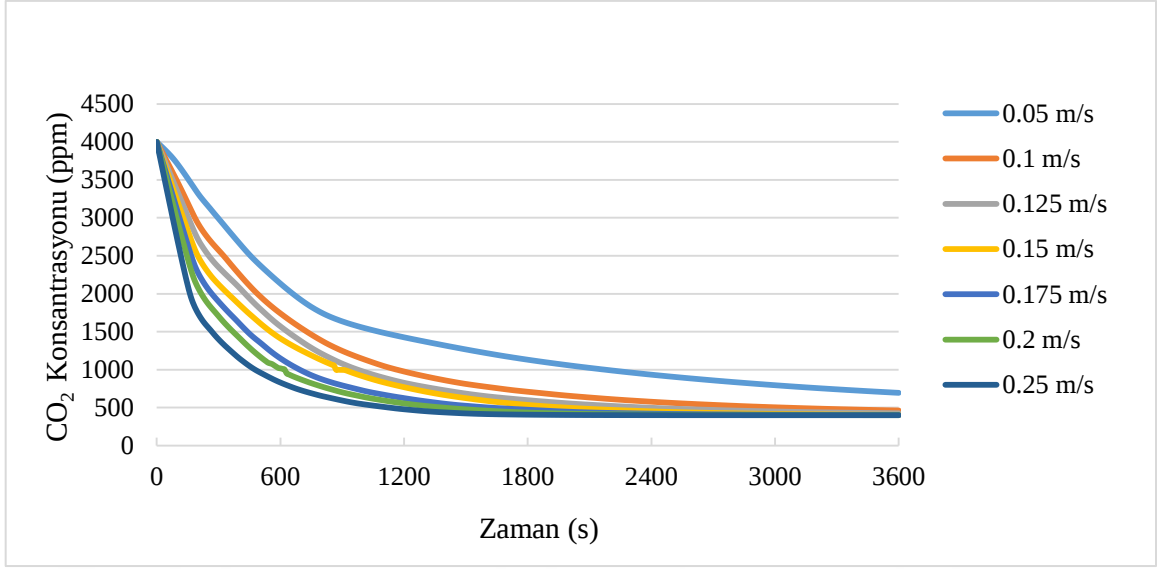
	Pencere açıklık alanı	Havanın Kapıdan Giriş Hızı	Giriş Havasının CO ₂ Miktarı	Başlangıç İç ortam Havası CO ₂ Miktarı	Sınıfın Hacimsel Ortalama CO ₂ Miktarı	<1000 ppm için Geçen Minimum Süre	Sınıfın Hacimsel Ortalama CO ₂ Miktarı	<800 ppm için Geçen Minimum Süre	Sınıfın Hacimsel Ortalama CO ₂ Miktarı	<500 ppm için Geçen Minimum Süre
	m ²	m/s	ppm	ppm	ppm	dak.	ppm	dak.	ppm	dak.
SENARYO 5	1	0.05	400	4000	999.9	42.17	799.4	58.67	-	> 60
		0.1	400	4000	997.8	25.33	797.1	31.50	499.3	51.83
		0.125	400	4000	997.3	18.67	794.8	23.70	498.1	40.83
		0.15	400	4000	989.3	15.17	793.7	19.33	499.3	36.17
		0.175	400	4000	989.9	12.50	793.2	16.00	498.3	27.00
		0.2	400	4000	988.9	11.0	797.6	12.83	497.4	25.17
		0.25	400	4000	993.5	8.17	793.1	10.83	497.7	20.00
SENARYO 6	1,5	0.05	400	4000	997.9	36.33	798.8	49.67	-	> 60
		0.1	400	4000	995.9	19.50	799.7	25.50	499.8	50.83
		0.125	400	4000	994.9	16.33	798.5	20.83	499.7	40.17
		0.15	400	4000	998.6	14.50	793.7	18.00	499.4	33.17
		0.175	400	4000	990.5	11.67	799.8	15.33	499.5	27.67
		0.2	400	4000	991.8	10.50	794.8	12.50	497.8	21.83
		0.25	400	4000	994.6	8.00	796.7	10.50	499.2	18.83
SENARYO 7	2	0.05	400	4000	997.8	32.50	799.9	44.83	-	> 60
		0.1	400	4000	999.1	17.00	798.3	23.50	499.8	48.67
		0.125	400	4000	991.8	13.83	795.1	18.67	499.9	39.67
		0.15	400	4000	998.0	12.83	795.9	16.50	499.8	32.50
		0.175	400	4000	996.2	10.67	793.6	14.83	499.9	26.50
		0.2	400	4000	998.6	10.00	798.9	12.17	498.7	23.33
		0.25	400	4000	997.8	7.83	798.1	10.17	497.8	16.83
SENARYO 8	2,5	0.05	400	4000	997.6	30.50	798.9	42.50	-	> 60
		0.1	400	4000	996.8	15.67	798.8	21.83	499.9	48.50
		0.125	400	4000	996.6	12.83	795.4	18.17	499.4	38.33
		0.15	400	4000	997.5	11.84	798.1	16.17	499.2	33.00
		0.175	400	4000	991.0	9.83	798.3	14.50	499.3	26.67
		0.2	400	4000	987.3	9.17	795.0	11.67	498.5	23.17
		0.25	400	4000	998.0	7.33	791.2	9.00	499.7	16.33
SENARYO 9	3	0.05	400	4000	997.2	27.67	798.7	39.00	-	> 60
		0.1	400	4000	995.8	14.17	797.5	20.83	499.6	47.83
		0.125	400	4000	991.6	12.11	797.0	17.33	499.3	37.17
		0.15	400	4000	997.4	10.67	799.0	14.83	499.0	33.00
		0.175	400	4000	997.3	8.83	797.9	11.67	499.1	25.33
		0.2	400	4000	989.8	8.15	793.8	10.33	499.9	20.00
		0.25	400	4000	991.6	7.00	787.2	9.00	499.6	15.00
SENARYO 10	1,9	0.05	400	4000	998.8	32.00	799.4	45.83	-	> 60
		0.1	400	4000	999.9	18.00	797.3	27.50	499.9	60.00
		0.125	400	4000	999.3	16.10	798.9	20.83	499.3	49.17
		0.15	400	4000	997.1	13.67	795.9	18.83	499.6	40.67
		0.175	400	4000	988.7	11.83	794.2	15.50	499.1	32.50
		0.2	400	4000	987.8	10.67	795.3	13.67	499.2	27.50
		0.25	400	4000	988.5	8.17	795.2	11.00	498.5	19.00
SENARYO 11	2,8	0.05	400	4000	998.1	23.33	796.6	30.67	499.2	59.00
		0.1	400	4000	994.8	17.50	797.6	24.17	499.5	46.83
		0.125	400	4000	994.9	15.50	797.8	22.83	499.9	44.17
		0.15	400	4000	996.4	12.50	799.8	17.50	498.9	35.50
		0.175	400	4000	988.4	10.83	795.2	15.00	499.0	30.00
		0.2	400	4000	991.0	9.67	796.4	13.17	498.0	26.00
		0.25	400	4000	994.7	8.00	793.6	10.17	498.9	19.33

1000 ppm altındaki CO₂ seviyesine bağlı minimum havalandırma süreleri dikkate alınarak belirlenen ders arası dinlenme süresi kullanılırsa, ders başladığında kullanıcıların yoğun olduğu dersliklerde CO₂ konsantrasyonu kısa sürede 1000 ppm'in üzerine çıkabilmektedir. Dış hava şartlarının uygun olduğu mevsimlerde dersliğin önceden 30 dakika havalandırılması veya ders esnasında kapı ve pencere açık olacak şekilde doğal havalandırma ile CO₂ konsantrasyonunun kritik seviyeden daha düşük olması sağlanabilir. Kış sezonunda ise CO₂ konsantrasyonunun 800 ppm değerinin altında seyrettiği durumlardaki sürelerin ders arası dinlenme süresi olarak dikkate alınması yararlı olacaktır.

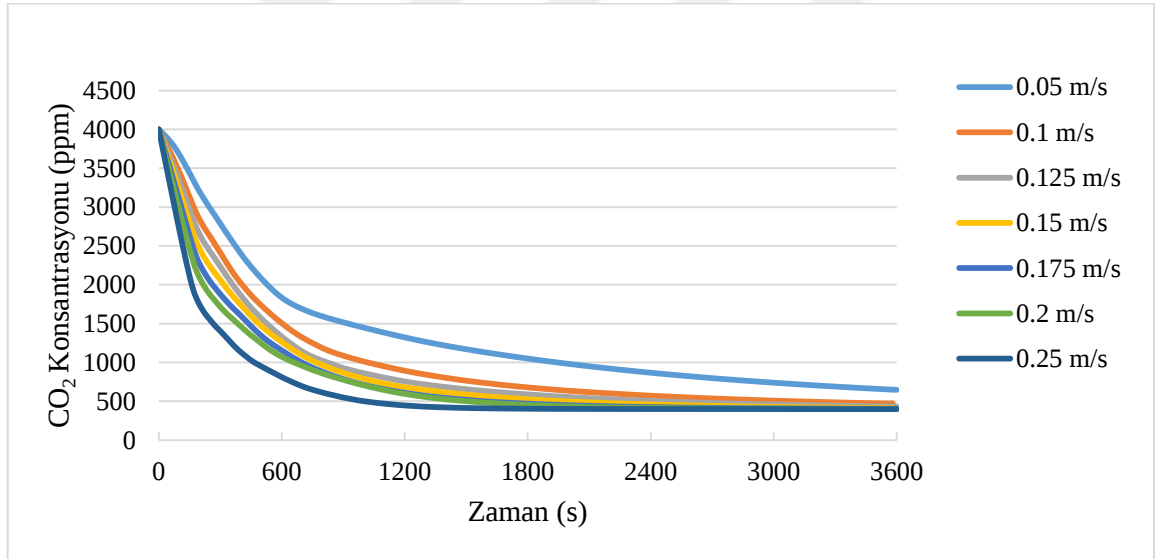
Ders sonrası farklı pencere açıklık alanları ve farklı havalandırma hızlarına göre derslikte zamana bağlı olarak bir saat boyunca CO₂ konsantrasyonundaki değişim Şekil 36-Şekil 42' de verilmiştir. En küçük pencere açıklık alanı olan 1 m² için farklı hızlardaki CO₂ değişim eğrilerinin birbirinden uzak olduğu, çalışılan en büyük pencere açıklığı 3 m² için farklı hızlardaki CO₂ değişim eğrilerinin ise birbirine oldukça yakın kaldığı görülmektedir. Bir saat süre sonunda kapalı sınıfta 4000 ppm olan CO₂ konsantrasyonu dış ortam ve hava giriş değeri olan 400 ppm değerine yaklaşmaktadır.



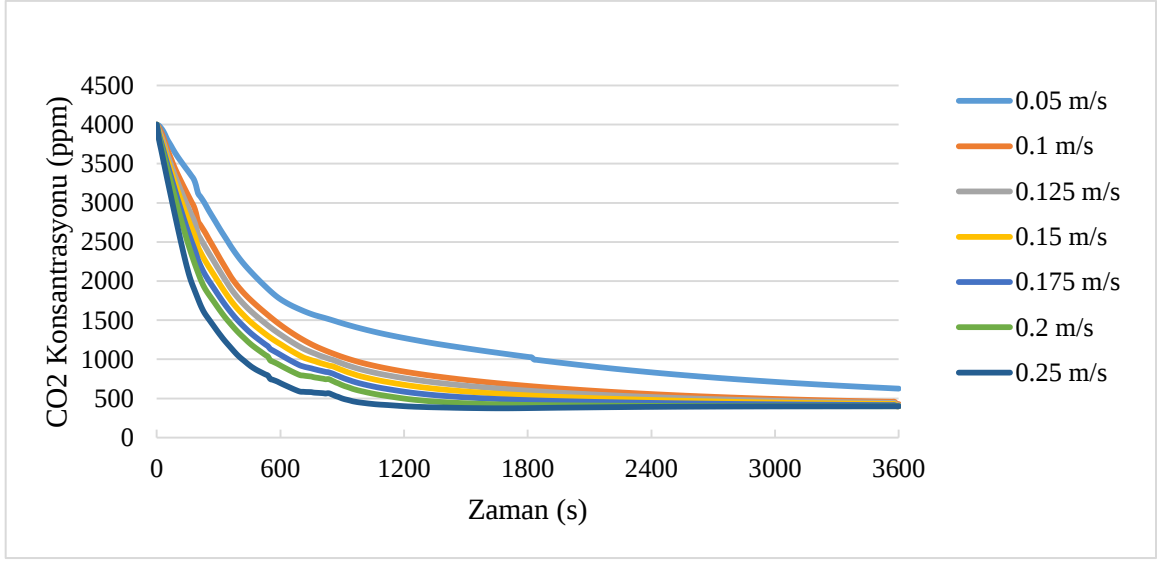
Şekil 36. Senaryo 5 ($A_p=1 \text{ m}^2$) için CO₂ konsantrasyonları



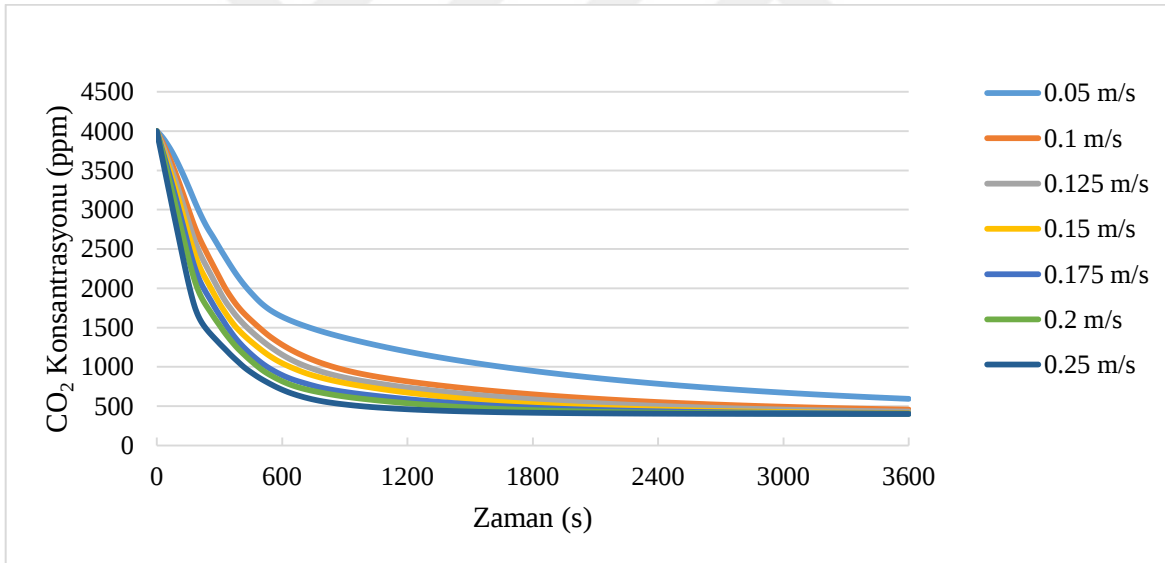
Şekil 37. Senaryo 6 ($A_p=1.5 \text{ m}^2$) için CO₂ konsantrasyonları



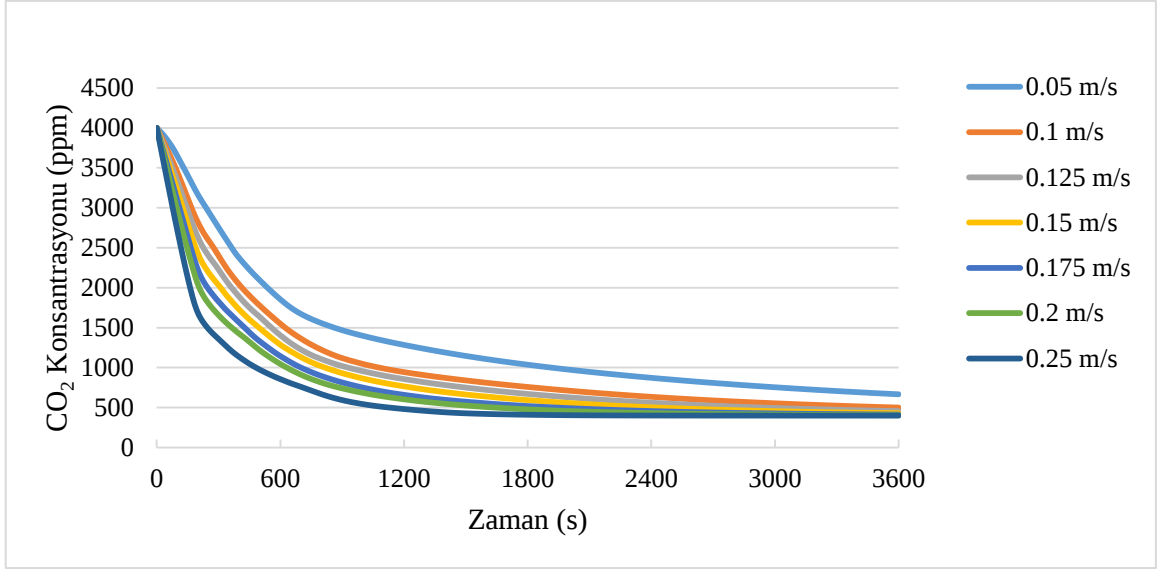
Şekil 38. Senaryo 7 ($A_p=2 \text{ m}^2$) için CO₂ konsantrasyonları



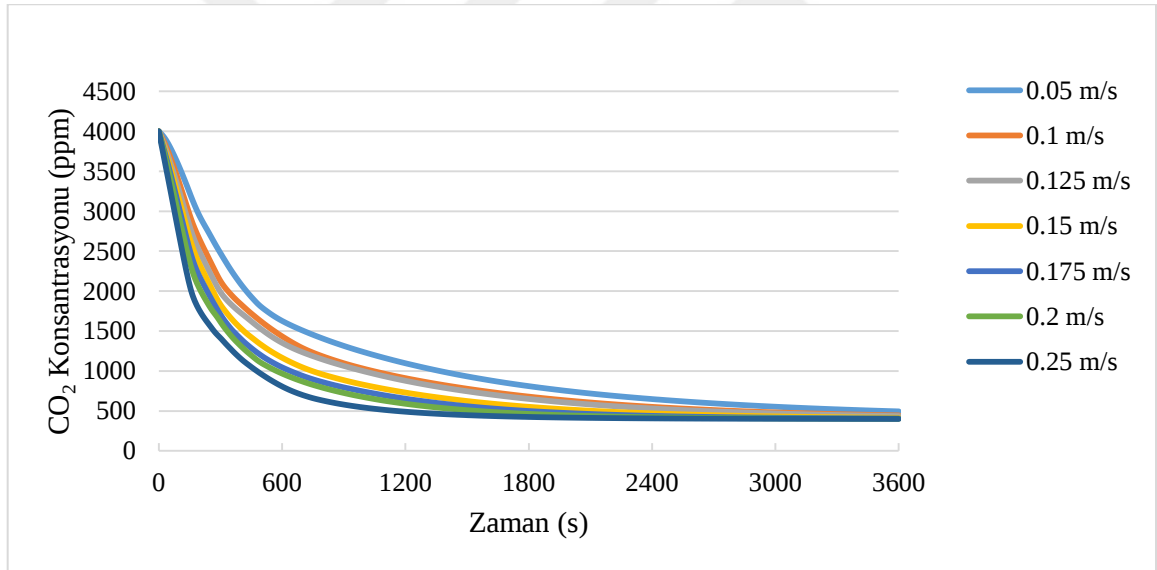
Şekil 39. Senaryo 8 ($A_p=2.5 \text{ m}^2$) için CO₂ konsantrasyonları



Şekil 40. Senaryo 9 ($A_p=3 \text{ m}^2$) için CO₂ konsantrasyonları



Şekil 41. Senaryo 10 ($A_p=1.9 \text{ m}^2$) için CO₂ konsantrasyonları



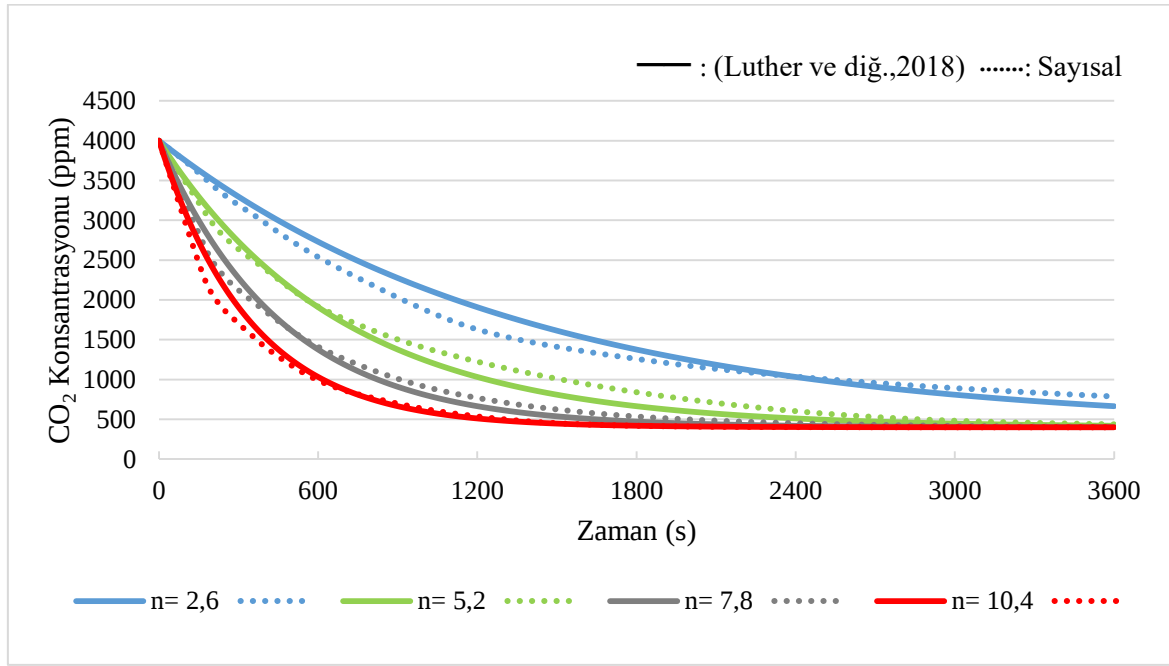
Şekil 42. Senaryo 11 ($A_p=2.8 \text{ m}^2$) için CO₂ konsantrasyonları

Doğal havalandırmada, birbirine yakın kesit alanlarına sahip senaryo 7 (2 m^2 kare pencere) ve senaryo 10 (1.9 m^2 dikdörtgen pencere) karşılaştırıldığında, pencere açıklık alanının en/boy oranının bir veya bire yakın olmasının iç hava kalitesinin iyileştirilmesinde etkili olduğu anlaşılmaktadır.

Farklı senaryolar sonucunda zamana bağlı çözümlemelerden elde edilen CO₂ konsantrasyon verileri, Luther, Horan, & Tokede (2018) tarafından oluşturulan analitik

bağıntının sonuçları ile Şekil 43'de karşılaştırılmıştır. Analitik ve sayısal sonuçların uyumlu olduğu, hava değişim oranı arttıkça birbirine yaklaştıkları görülmektedir.

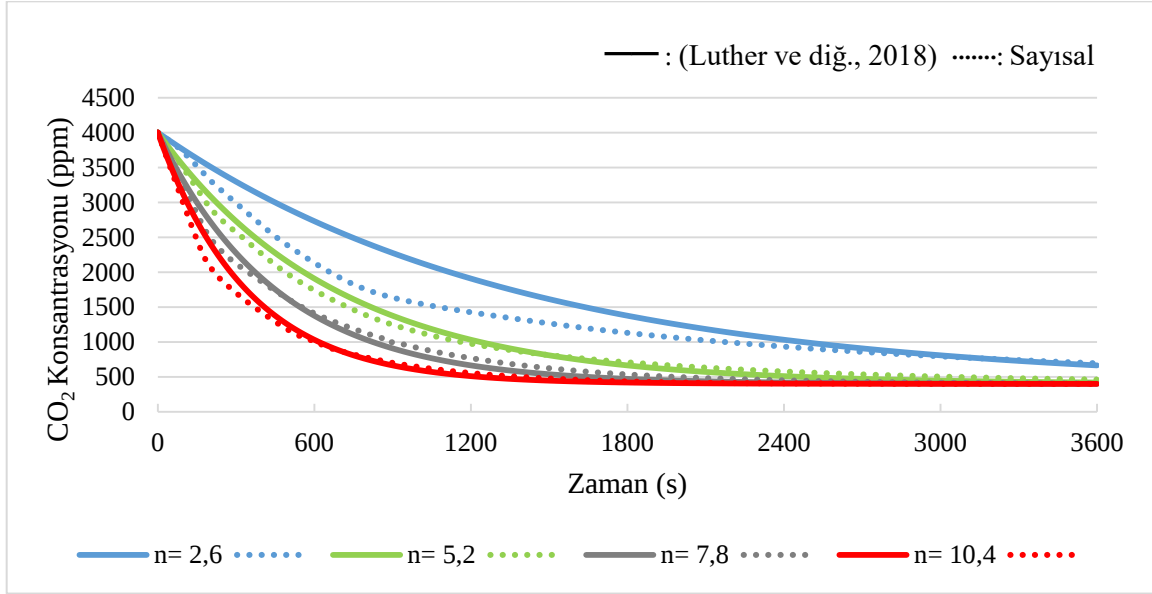
1 m² pencere açıklık alanı için çözümleme sonuçları Şekil 43a'da verilmiş olup, Luther ve diğ. tarafından elde edilen analitik sonuçlar ile uyumludur. Şekil 43b ve Şekil 43c'de sırasıyla 1.5 ve 2 m² pencere açıklık alanı olan senaryolar ele alınmıştır. Hava değişim oranı arttıkça analitik ve sayısal sonuçlar birbirine yaklaşmaktadır. Fakat pencere açıklık alanı arttıkça analitik ve sayısal sonuçlar arasında farklılıklar ortaya çıkmaktadır.



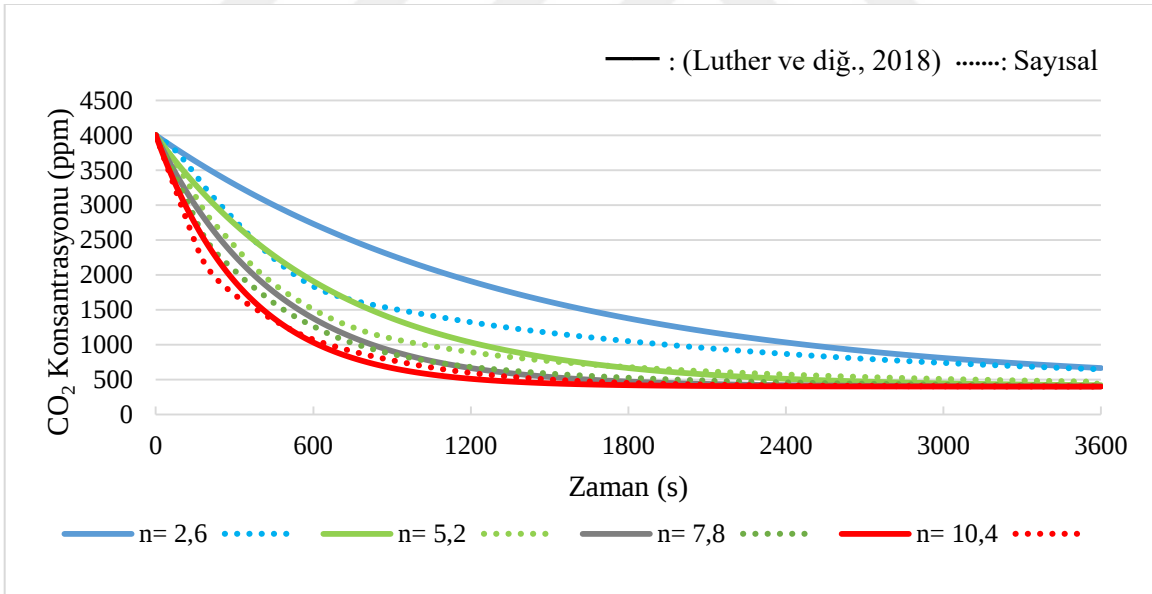
(a)

Şekil 43. Boş derslikte, farklı pencere açıklık alanlarında, farklı hava değişim sayıları için hacimsel analitik ve sayısal CO₂ değişimleri (a) 1 m² (b) 1.5 m² (c) 2 m²

Şekil 43'ün devamı



(b)



(c)

3.3.1. Kapı ve Pencere Açık Boş Derslikte Regresyon Analizi

Ders sonrası boş derslik havalandırmasına yönelik yedi farklı senaryo ve 49 farklı durum için sayısal çözümlerler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilerin SPSS yazılımı ile istatistiksel analizi, 17,689 örneklem kullanılarak yapılmıştır. Pencere açıklık alanı (A), hava

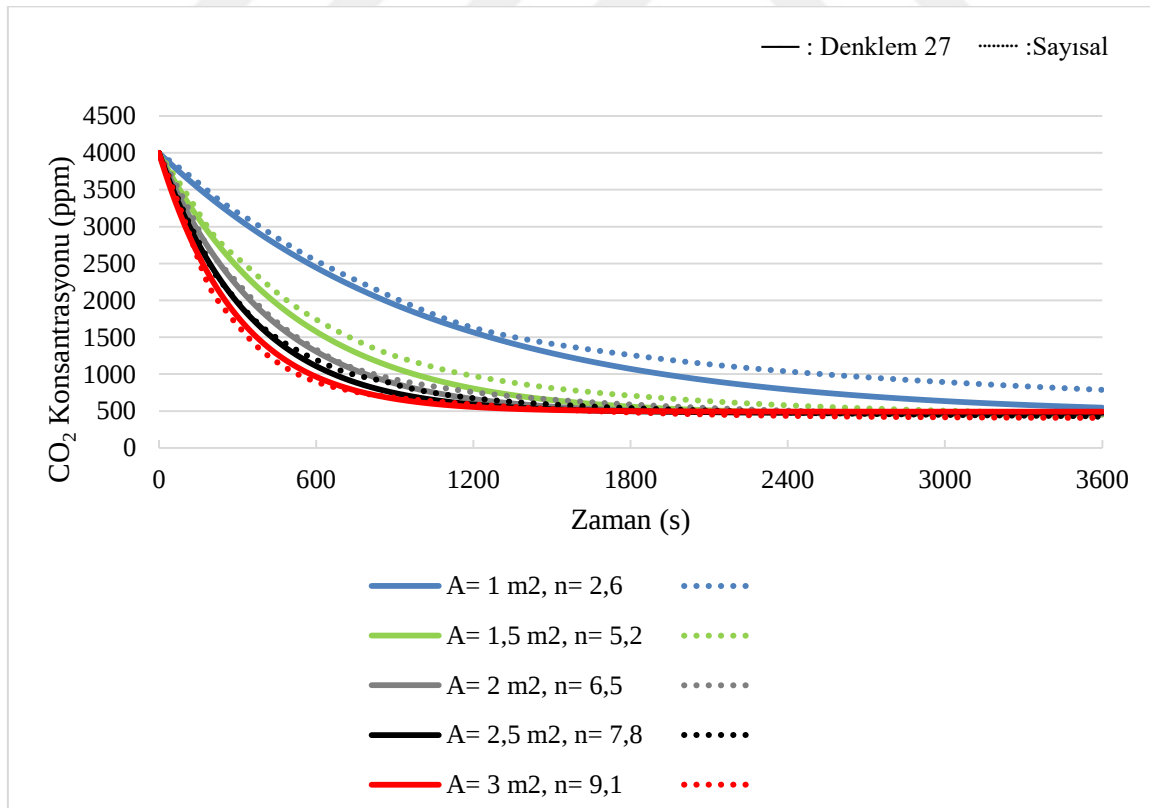
değişim sayısı (n) ve zaman (t) bağımsız değişkenlere göre, bağımlı değişken olan CO₂ konsantrasyonunu belirleyen aşağıdaki ifade bulunmuştur.

$$CO_{2, \text{anlık}} = (30.376027 A + CO_{2, \text{çevre}} - CO_{2, \text{baş}}) (1 - e^{-0.000367 n t}) + CO_{2, \text{baş}} \quad (\text{ppm})$$

$$\begin{array}{ccc} (0.661729) & (0.0000785) & \\ (p < 0.01) & (p < 0.01) & \end{array} \quad (27)$$

İstatistik açıdan elde edilen denklem katsayılarının standart hata değerleri bulunan bağıntının altında yer almaktadır. Denklemdaki p değerlerinin 0.01den küçük olması tüm parametreler istatistik açıdan anlamlı olduğunu ifade etmektedir. Yukarıdaki denklemin üç bağımsız değişkeninin CO₂ konsantrasyonunu belirleme oranı %96 olmaktadır ($R^2=0.96$). Denklemin standart sapması, $S_{y.x} = \pm 149.64$ ppm olarak belirlenmiştir.

Şekil 44’de, Denklem 27’den elde edilen sonuçlar ile sayısal çözümleme sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen istatistik denklemin sayısal sonuçları oldukça iyi temsil ettiği görülmektedir.



Şekil 44. Denklem 27’nin sonuçları ve sayısal sonuçlar için CO₂ konsantrasyonları

4. SONUÇLAR

Derslikler, yoğun kullanımdan dolayı iç ortam hava kalitesinin çoğunlukla düşük olduğu ortamlardır. Dikkat kontrolü, anlama algısı ve öğrenme veriminin düşmemesi için derslik iç ortamında CO₂ konsantrasyonunun 1000 ppm değerinin altında olması gerektiği standartlarca önerilmektedir.

Bu çalışmada, kapı ve pencere kapalı dolu derslik, kapı ve pencere açık dolu derslik ve dersten hemen sonra kapı pencere açık boş derslik durumlarında farklı kişi sayısı, pencere açıklık alanı ve hava değişim oranlarının solunum kaynaklı CO₂ konsantrasyonu üzerinde zamana bağlı etkileri sayısal olarak araştırılmış ve elde edilen çıkarımlar aşağıda verilmiştir:

- İç ortam hava kalitesinin sağlanmasında, genellikle birincil etken parametre olan CO₂ konsantrasyonunun takip amaçlı ölçümleri ve farklı ortam koşullarına göre sayısal olarak modellenmesi ve genelleştirilmesi önem oluşturmaktadır.
- Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen sayısal çözümleme sonuçlarının mevcut deneysel çalışma sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüş ve sonuçların güvenilir ve uygulanabilir olduğu kanaatine varılmıştır.
- Havalandırma yapılmayan derslikte CO₂ konsantrasyonunun, kişi sayısına bağlı olarak, 10 ila 30 dakika içinde standartlarca kabul edilen 1000 ppm kritik değerin üzerine çıkmakta, bir saatlik ders süresi sonunda 4000 ppm değerine ulaşabilmektedir.
- Kapalı kapı ve pencerelerle ders işlenmesi sırasında soluk alıp-verme mesafesi olan yerden 1.1 m yükseklikteki CO₂ konsantrasyonunun dersliğin farklı kısımlarında sınır değerin üstüne çıkabildiği tespit edilmiştir.
- Kapı ve pencere açılarak doğal havalandırma yapılan dolu derslikte kişi sayısı ile artan CO₂ konsantrasyonu, bir saatlik ders süresince 1000 ppm civarına yaklaşmaktadır.
- Havalandırılmayan derslikte hemen ders sonrası boş durumda yapılan havalandırmada CO₂ konsantrasyonu, pencere açıklık alanı ve hava akış hızına göre 15 ila 60 dakika aralığında atmosferik değer civarına inmektedir.

- Ders sonrası dersliğin 0.15 m/s değerindeki bir hızla havalandırılmasında, CO₂ konsantrasyonunun 1000 ppm seviyesinin altına inmesi için 15 dakikalık bir sürenin geçmesi gerektiği, 500 ppm değerine ise 30 dakika sonra geldiği belirlenmiştir.
- Derslik pencere açıklık alanının en az 1.5 m² olması ve iç ortamdaki insanları rahatsız etmeyecek 0.15 m/s değerindeki hava giriş hızının CO₂ konsantrasyonunu kritik seviyenin altında tutma konusunda yeterli olacağı görülmüştür.
- Dersten hemen sonra dersliğin havalandırılmasında pencerelerin en/boy oranının bir ve ya bire yakın olması daha kısa sürede havalandırmaya yardımcı olabilmektedir.
- Bu çalışmadan elde edilen sonuçlardan, dersliklerde doğal havalandırmanın yeterli olmadığı, standart sınır değerlerinin altındaki CO₂ seviyelerinde bir ders ortamı oluşturulmasında, mekanik havalandırmanın yapılması gerektiği anlaşılmaktadır.
- Derslikteki kişi sayısı, pencere açıklık alanı, havalandırma hızı ve zamana göre CO₂ konsantrasyonu için bulunan matematiksel bağıntılarla, CO₂ değerindeki değişim ve gerekli havalandırma işlemleri için tahminlerde bulunulabilecek ve çözümler geliştirilebilecektir.

5. ÖNERİLER

Dersliklerde ısı konfor ve iç ortam hava kalitesinin sağlanmasına yönelik yeterli havalandırma için mimari tasarım aşamaları dikkate alınmalı ve mevcut durumlarda bilimsel araştırmaların sonuçlarına göre düzenlemeler yapılmalıdır.

Bu çalışmada kullanılan senaryolar ve daha fazla hava değişimi miktarları sağlanarak, iç ortam hava kalitesini daha kısa sürede iyileştirecek olan mekanik havalandırmayı da kapsayacak şekilde genişletilerek çözümler yapılabilir.



6. KAYNAKLAR

- Akal, D. (2013). İç Ortam Hava Kirliliği ve Çalışanlara Olumsuz Etkileri. *ÇSGB Çalışma Dünyası Dergisi*, 1(1), 112-119.
- Al-Hemoud, A., Al-Awadi, L., Al-Rashidi, M., Rahman, K. A., Al-Khayat, A. & Behbehani, W. (2017). Comparison of indoor air quality in schools: Urban vs. Industrial 'oil & gas' zones in Kuwait. *Building and Environment*(122), 50-60.
- Allen, J. G., MacNaughton, P., Cedeno-Laurent, J. G., Cao, X., Flanigan, S., Vallarino, J., . . . Spengler, J. D. (2019). Airplane pilot flight performance on 21 maneuvers in a flight simulator under varying carbon dioxide concentrations. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 29, 457-468.
- Allocca, C., Chen, Q. & Glicksman, L. R. (2003). Design analysis of single-sided natural ventilation. *Energy and buildings*, 35(8), 785--795.
- ANSYS Inc. (2022). Ansys Fluent Theory Guide. USA.
- ANSYS Inc. (2022). Ansys Fluent User's Guide. USA.
- ASHRAE. (2016). *ANSI/ASHRAE Standardı 62.1-2016 Kabul Edilebilir Bir İç Hava Kalitesi İçin Havalandırma*. İstanbul: Türk Tesisat Mühendisleri Derneği.
- ASHRAE. (2021). *2021 ASHRAE Handbook*. USA: ASHRAE.
- ASHRAE. (2022). *ASHRAE Position Document on Indoor Carbon Dioxide*. USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE Standard 55. (2017). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2017 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Avcı, A. S. (2014). *Batman Üniversitesi Dersliklerinde İç Hava Kalitesinin Araştırılması*. Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Batman.
- Aydın, K. (2021). *Yüksek Öğrenim Kurumu Öğrencilerinin Başarılarına Isıl Konforun Etkisinin Deneysel ve Nümerik Olarak İncelenmesi*. Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Edirne.
- Bakó-Biró, Z., Clements-Croome, D., Kochhar, N., Awbi, H. & Williams, M. (2011). Ventilation Rates in Schools and Pupils' Performance. *Building and Environment*, 48, 1-9.

- Batterman, S. (2017). Review and Extension of CO₂-Based Methods to Determine Ventilation Rates with Application to School Classrooms. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(145). doi:10.3390/14020145
- Burton, R. F. (2008). Estimating body surface area from mass and height: Theory and the formula of Du Bois and Du Bois. *Annals of Human Biology*, 35(2), 170-184.
- Cabovsk', B., Beko", G., Teli, D., Ekberg, L., Dalenback, J.-O., Wargocki, P., . . . Langer, S. (2022). Ventilation strategies and indoor air quality in Swedish primary school classrooms. *Building and Environment*, 109744.
- Caciolo, M., Stabat, P. & Marchio, D. (2012). Numerical Simulation of Single-Sided Ventilation Using RANS and LES and Comparison with Full-Scale Experiments., 50, s. 202-213.
- Çengel, Y. A. & Boles, M. A. (2013). *Thermodynamics: An Engineering Approach* (7. b.). New York, America: McGraw-Hill Companies .
- Duarte, R., Gomes, M. G. & Rodrigues, A. M. (2017). Classroom Ventilation with Manual Opening of Windows: Findings From A Two-year-long Experimental Study of A Portuguese Secondary School. *Building and Environment*, 124, 118-129.
- Ferrari, S., Bl'azquez, T., Cardelli, R., Angelis, E. D., Puglisi, G., Escand'on, R. & Su'arez, R. (2023). Air change rates and infection risk in school environments: Monitoring naturally ventilated classrooms in a northern Italian urban context. *Heliyon*, 9(9), 19120.
- Ferreira, A. M. & Cardoso, M. (2014). Indoor air quality and health in schools. *J Bras Pneumol*, 40(3), 259-268.
- Gaihre, S., Semple, S., Miller, J., Fielding, S. & Turner, S. (2014). Classroom Carbon Dioxide Concentration, School Attendance, and Educational Attainment. *Journal Of School Health*, 84(9), 569-574.
- Gao, N. & Niu, J. (2006). Transient CFD Simulation of The Respiration Process and Inter-person Exposure Assessment. *Building and Environment*, 41(9), 1214-1222.
- Gupta, J. K., Lin, C.-H. & Chen, Q. (2010). Characterizing Exhaled Airflow From Breathing and Talking Indoor Air. *Indoor Air*, 20, 31-39.
- Heracleous, C. & Michael, A. (2019). Experimental Assessment of The Impact of Natural Ventilation on Indoor Air Quality and Thermal Comfort Conditions of Educational Buildings in the Eastern Mediterranean Region During the Heating period. *Journal of Building Engineering*, 26, 100917.
- Hong, T., Lee, M. & Kim, J. (2017). Analysis of Energy Consumption and Indoor Temperature Distributions in Educational Facility Based on CFD-BES Model. *Energy Procedia*, 105, 3705-3710.

- Jiang, N., Yao, S.-y., Feng, L.-y., Sun, H.-j. & Liu, J.-j. (2017). Experimental Study on Flow Behavior of Breathing Activity Produced by a Thermal Manikin. *Building and Environment*, 123, 200-210.
- Krawczyk, D., Rodero, A., Gładyszewska-Fiedoruk, K. & Gajewski, A. (2016). CO2 concentration in naturally ventilated classrooms located in different climates—Measurements and simulations. *Energy and Buildings*(129), 491-498.
- Kuş, M. (2007). *Şanlıurfa İlindeki Yükseköğretim Kurumları Dersliklerinde İç Hava Kalitesinin İncelenmesi ve Modellenmesi*. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Balıkesir.
- Lee, S. C. & Chang, M. (2000). Indoor and outdoor air quality investigation at schools in Hong Kong. *Chemosphere*(41), 109-113.
- Luther, M. B., Horan, P. & Tokede, O. (2018). Investigating CO2 concentration and occupancy in school classrooms at different stages in their life cycle. *Architectural Science Review*, 61(1-2), 83-95.
- Mahyuddin, N. & Essah, E. A. (2024). Spatial distribution of CO2 Impact on the indoor air quality of classrooms within a University. *Journal of Building Engineering*(89), 109246.
- Marr, D., Spitzer, I. & Glauser, M. (2008). Anisotropy in The Breathing Zone of A Thermal Manikin. *Experiment in Fluids*, 44, 661-673.
- Miao, S., Gangoellis, M. & Tejedor, B. (2023). Data-driven model for predicting indoor air quality and thermal comfort levels in naturally ventilated educational buildings using easily accessible data for schools. *Journal of Building Engineering*(80), 108001
- Muelas, A., Remacha, P., Pina, A., Tizne', E., El-Kadmiri, S., Ruiz, A., . . . Ballester, J. (2022). Analysis of different ventilation strategies and CO2 distribution in a naturally ventilated classroom. *Atmospheric Environment*(283), 119176.
- Muscatiello, N., McCarthy, A., Kielb, C., Hsu, W.-H., Hwang, S.-A. & Lin, S. (2015). Classroom conditions and CO2 concentrations and teacher health symptom reporting in 10 New York State Schools. *Indoor Air*, 25(2), 157-167.
- Öngel, K. & Mergen, H. (2009). Isıl Konfor Parametrelerinin İnsan Vücudundaki Etkilerine Yönelik Literatür Taraması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Tıp Fakültesi Dergisi*, 16(1), 21-25.
- Peng, Z. & Jimenez, J. L. (2021). Exhaled CO2 as a COVID-19 Infection Risk Proxy for Different Indoor Environments and Activities. *Environmental Science and Technology Letters*, 8(5), 392-397.
- Ravikumar, P. & Prakash, D. (2009). Analysis of Thermal Comfort in An Office Room by Varying the Dimensions of The Windows on Adjacent Walls Using CFD: A Case Study Based on Numerical Simulation. *Building Simulation* , 2, 187-196.

- Rudnick, S. N. & Milton, D. K. (2003). Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. *Indoor Air*, 13, 237-245.
- Sağlam, S. (2019). *Farklı Mekanlarda Hava Kalitesinin İncelenmesi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Santamouris, M., Synnefa, A., Assimakopoulos, M., Livada, I., Pavlou, K., Papaglastra, M., ... Assimakopoulos, V. (2008). Experimental investigation of the air flow and indoor carbon dioxide concentration in classrooms with intermittent natural ventilation. *Energy and Buildings* (40), 1833-1843.
- Schibuola, L., Scarpa, M. & Tambani, C. (2016). Natural Ventilation Level Assessment in A School Building by CO2 Concentration Measures. *71st Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, Energy Procedia*, 101, s. 257-264. Turin.
- Shi, S., Man, Y., Wang, Z., Wang, L. & Zhang, X. (2017). On Site Measurement and Analysis on Indoor Air Environment of Classroom in University Campus. *Procedia Engineering*, 205, 2200-2207.
- Simova, I., Markov, D. & Mijorski, S. (2016). Numerical investigation of metabolic CO2 distribution in an occupied ventilated classroom. *Proceedings of 12th International course for young researchers on "Computational Engineering", supported by DAAD, Pamporovo, Bulgaria*, s. 1314-1325.
- Sofuoğlu, S. C., Arı, A., Toksoy, M. & Civan, M. (2023). *Okullarda İç Hava Kirliliği, Sağlık Etkileri ve Sınır Değerler*. Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği (TOBB).
- Song, J. & Meng, X. (2015). The Improvement of Ventilation Design in School Buildings Using CFD Simulation. *9th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC). Procedia Engineering*, 121, s. 1475-1481.
- Sosnowski, M., Gnatowska, R., Grabowska, K., Krzywański, J. & Jamrozik, A. (2019). Numerical Analysis of Flow in Building Arrangement: Computational Domain Discretization. *Applied Sciences*, 9(941), 1-18.
- Stazi, F., Naspi, F., Ulpiani, G. & Di Perna, C. (2017). Indoor Air Quality and Thermal Comfort Optimization in Classrooms Developing an Automatic System for Windows Opening and Closing. *Energy and Buildings*, 139, 732-746.
- Sundell, J. (2017). Reflections on the History of Indoor Air Science, Focusing on the Last 50 Years. *Indoor Air*, 27(4), 703-862.
- Tang, Y., Li, X., Zhu, W. & Cheng, P. L. (2016). Predicting Single-Sided Airflow Rates Based on Primary School Experimental Study. *Building and Environment*, 98, 71-79.
- Toksoy, M. & Sofuoğlu, S. C. (2022). *Karbondioksit ve Sınıflar*. TMMOB Makina Mühendisleri Odası.

- TSE. (2008). Binaların Enerji Performansının Tasarımı ve Değerlendirilmesi için İç Ortam Parametreleri - Bina İç Hava Kalitesi, Isıl Ortam, Aydınlatma ve Akustik. *TS EN 15251*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- URL-1.(2024,Mart 20). <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases> adresinden alındı
- URL-2.(2023, Nisan 24). Fluid Properties: <http://www.mhtl.uwaterloo.ca/properties.html>. adresinden alındı
- URL-3.(2024,Nisan24).https://www-climate.gov.translate.goog/media/14596?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=tr&_x_tr_hl=tr&_x_tr_pto=wa. Climate.gov. adresinden alındı
- URL-4.(2024,Nisan 24). https://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/gwp/temp/ann_wld.html. adresinden alındı
- URL-5.(2021,Ocak11).<https://www.healthline.com/health/normal-respiratory-rate#normal-rate-in-adults> adresinden alındı
- URL-6.(2021, Mart 13). Man Sitting: www.grabcad.com/library/man-sitting adresinden alındı
- Villafruela, J. M., Olmedo, I., Ruiz de Adana, M., Méndez, C. & Nielsen, P. V. (2013). CFD Analysis of The Human Exhalation Flow Using Different Boundary Conditions and Ventilation Strategies. *Building and Environment*, 62, 191-200.
- von Grabe, J., Svoboda, P. & Bäuml, A. (2014). Window Ventilation Efficiency in The Case of Buoyancy Ventilation. *Energy and Buildings*, 72, 203-211.
- Wargocki, P., Porras-Salazar, J. A., Contreras-Espinoza, S. & Bahnfleth, W. (2020). The relationships between classroom air quality and children's performance in school. *Building and Environment*, 173,106749.
- Wei, W., Ramalho, O. & Mandin, C. (2015). Indoor air quality requirements in green building certifications. 92, 10-19.
- Xu, C., Nielsen, P. V., Gong, G., Liu, L. & Jensen, R. L. (2015). Measuring The Exhaled Breath of A Manikin and Human Subjects. *Indoor Air*, 25(2), 188-197.
- Yüce, B. E. (2019). *Ofis Ortamında Türbülanslı Akış Modellerinin Karşılaştırılması ve Çeşitli Isıtma Sistemlerinin Isıl Konfor İndisleri Gagge Modeli Kullanılarak Sayısal Simulasyonu*. Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Bursa.
- Zhang, Wargocki, P. Lian, Z. & Thyregod, C. (2017). Effects of exposure to carbon dioxide and bioeffluents on perceived air quality, self-assessed acute health symptoms, and cognitive performance. *Indoor Air*, 27, 47-64.
- Zhang, X., Wargocki, P. & Lian, Z. (2016). Human responses to carbon dioxide, a follow-up study at recommended exposure limits in non-industrial environments. *Building and Environment*, 100, 162-171.

- Zheng, J., Guo, X., Hu, S., Wu, F., Lao, C., Ma, H., . . . Xu, G. (2022). Study on long-term variation characteristics of indoor CO₂ concentrations based on a data-driven method. *Energy and Buildings*(256),111760.
- Zivelonghi, A. & Kumar, P. (2024). Benefits and thermal limits of CO₂-driven signaled windows opening in schools: an in-depth data-driven analysis. *Energy & Buildings*(303),113621.



ÖZGEÇMİŞ

Özlem FAZLIOĞLU, lise öğrenimini İstanbul Özel Bilfen Lisesi'nde tamamladı. Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden 2004 yılında mezun oldu. 2005-2013 yılları arasında özel sektörde Mekanik Tesisat Proje Mühendisi olarak çalıştı. 2013 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Of Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümüne ÖYP kadrosu ile atanmış olup halen bu görevini sürdürmektedir. 2016 yılında “Örnek Bir Yapıda Enerji Verimliliğinin İncelenmesi ” başlıklı yüksek lisans tezini sunmasının ardından doktora eğitimine başladı. Doktora eğitimine devam etmekte olup, iyi derecede İngilizce bilmektedir.