



**T.C.**  
**KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**SINIF MEKANINDA İÇ ORTAM HAVA**  
**KALİTESİNİN VE PARTİKÜL**  
**TAHLİYESİNİN DOĞAL HAVALANDIRMA**  
**İLE CFD TEMELLİ ANALİZİ**

**Esin GÜLŞEKER**  
**DOKTORA TEZİ**  
**Mimarlık Anabilim Dalı**

**Temmuz-2025**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Esin GÜLŞEKER tarafından hazırlanan “Sınıf Mekânında İç Ortam Hava Kalitesinin ve Partikül Tahliyesinin Doğal Havalandırma ile CFD Temelli Analizi” adlı tez çalışması 10/07/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Prof. Dr. Serra Zerrin KORKMAZ

.....

#### Danışman

Prof. Dr. Fatih CANAN

.....

#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi Halil SEVİM

.....

#### Üye

Prof. Dr. Hatice Derya ARSLAN

.....

#### Üye

Doç. Dr. Mustafa KORUMAZ

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN  
Enstitü Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Esin GÜLŞEKER

Tarih:10.07.2025

## ÖZET

### DOKTORA TEZİ

# SINIF MEKANINDA İÇ ORTAM HAVA KALİTESİNİN VE PARTİKÜL TAHLİYESİNİN DOĞAL HAVALANDIRMA İLE CFD TEMELLİ ANALİZİ

**Esin GÜLŞEKER**

**Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Mimarlık Anabilim Dalı**

**Prof. Dr. Fatih CANAN**

**2025, 147 Sayfa**

**Jüri**

**Prof. Dr. Fatih CANAN  
Prof. Dr. Serra Zerrin KORKMAZ  
Dr. Öğr. Üyesi Halil SEVİM  
Prof. Dr. Hatice Derya ARSLAN  
Doç. Dr. Mustafa KORUMAZ**

Günümüzde bireyler zamanlarının büyük bir kısmını kapalı mekânlarda geçirmekte olup, iç ortam hava kalitesinin insan sağlığı üzerindeki önemi her geçen gün daha fazla gündeme gelmektedir. Özellikle COVID-19 pandemisi sürecinde, kapalı alanlarda yetersiz havalandırmanın enfeksiyonun hava yoluyla yayılımını ciddi ölçüde artırdığı bilimsel olarak ortaya konmuştur.

Bu bağlamda, bu tez çalışmasının temel amacı; sınıf mekanında pencere sayısı ve konumu gibi mimari tasarım parametrelerinin, virüs partiküllerinin iç mekândaki dağılımına etkisini incelemek ve doğal havalandırma stratejilerinin etkinliğini değerlendirmektir. Çalışmada yalnızca doğal havalandırma koşulları ele alınmış, mekanik havalandırma sistemleri analiz kapsamı dışında tutulmuştur.

Araştırma kapsamında, 30 kişilik teorik bir sınıf modeli oluşturulmuş ve SolidWorks Flow Simulation yazılımı kullanılarak üç boyutlu ortamda farklı pencere konfigürasyon senaryoları değerlendirilmiştir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) temelli analizler yoluyla, enfekte bireyden kaynaklanan COVID-19 virüs partiküllerinin sınıf içerisindeki zamana bağlı yayılımı detaylı biçimde incelenmiştir. Yaz mevsimi (Haziran), Sonbahar mevsimi (Ekim) ve kış mevsimi (Aralık) olmak üzere üç farklı iklimsel senaryo altında, pencere konfigürasyonlarının havalandırma performansı karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Simülasyon sonuçları, pencere sayısı ve açıklık konumlarının sınıf içerisindeki hava dolaşımı ve partikül seyreltme süreci üzerinde belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Özellikle dört pencerenin açık olduğu senaryolarda, partiküllerin sınıftan tahliye süresinin anlamlı düzeyde azaldığı ve havalandırma etkinliğinin arttığı tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, doğal havalandırmanın düşük maliyetli, enerji verimli ve sürdürülebilir bir çözüm olarak enfeksiyon riskinin azaltılmasında etkili olduğunu doğrulamaktadır.

Bu çalışma, mevcut eğitim yapılarının iyileştirilmesine ve gelecekteki okul tasarımlarında sağlıklı iç mekânların oluşturulmasına yönelik somut mimari öneriler sunmaktadır. Ayrıca, yalnızca COVID-19 özelinde değil, gelecekte karşılaşılabilecek benzer pandemilere karşı da dayanıklı ve sağlıklı yapı stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** İç Ortam Hava Kalitesi, Doğal Havalandırma, COVID-19, CFD Simülasyonu, Sınıf Mekanı, Mimari Tasarım, SolidWorks Flow Simulation

## **ABSTRACT**

### **PhD THESIS**

# **CFD-BASED EVALUATION OF INDOOR AIR QUALITY AND PARTICLE DISPERSION IN CLASSROOM SPACE WITH NATURAL VENTILATION**

**Esin GÜLŞEKER**

**Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Architecture**

**Advisor: Assoc. Prof. Dr. Fatih CANAN**

**2025, 147 pages**

#### **Jury**

**Prof. Dr. Fatih CANAN  
Prof. Dr. Serra Zerrin KORKMAZ  
Asst.Prof. Dr. Halil SEVİM  
Prof. Dr. Hatice Derya ARSLAN  
Assoc. Prof. Dr. Mustafa KORUMAZ**

Today, individuals spend a significant portion of their time indoors, and the importance of indoor air quality on human health is increasingly becoming a topic of discussion. Especially during the COVID-19 pandemic, it has been scientifically proven that inadequate ventilation in indoor spaces significantly increases the airborne spread of infection.

In this context, the primary objective of this dissertation is to examine the impact of architectural design parameters such as the number, location, and size of windows on the distribution of virus particles within classroom environments and to evaluate the effectiveness of natural ventilation strategies. This study focuses exclusively on natural ventilation conditions, excluding mechanical ventilation systems from the scope of analysis.

Within the scope of the research, a theoretical classroom model with a capacity of 30 students was developed, and different window opening scenarios were evaluated in a three-dimensional environment using SolidWorks Flow Simulation software. Through Computational Fluid Dynamics (CFD)-based analyses, the time-dependent distribution of COVID-19 virus particles emitted from an infected individual was examined in detail. Under three different seasonal scenarios — summer (June), autumn (October), and winter (December) — the ventilation performance of various window configurations was comparatively analyzed.

Simulation results revealed that the number and location of windows play a decisive role in indoor air circulation and the particle dilution process. In particular, scenarios with four open windows significantly reduced the particle evacuation time from the classroom, indicating an increase in ventilation efficiency. The findings confirm that natural ventilation is an effective, low-cost, energy-efficient, and sustainable solution for reducing infection risk.

This study provides concrete architectural recommendations for improving existing educational buildings and creating healthy indoor environments in future school designs. Moreover, the results contribute to the development of resilient and healthy building strategies, not only for COVID-19 but also for potential similar pandemics that may be encountered in the future.

**Keywords:** Indoor Air Quality, Natural Ventilation, COVID-19, CFD Simulation, Classroom Space, Architectural Design, SolidWorks Flow Simulation

## ÖNSÖZ

Öncelikle, doktora tez sürecim boyunca bilgi birikimi, deneyimi ve yol göstericiliği ile her aşamada bana rehberlik eden, desteğini ve teşvikini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışmanım Prof. Dr. Fatih Canan'a en derin en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez çalışmamın şekillenmesinde kıymetli katkılarını, yapıcı değerlendirmelerini ve yol gösterici önerilerini paylaştan sayın hocalarım Prof. Dr. Serra Zerrin Korkmaz ve Dr. Öğr. Üyesi Halil Sevim'e içten teşekkürlerimi sunarım. Akademik gelişimime sundukları destek, ilham verici bakış açıları ve yapıcı yönlendirmeleri ile her zaman yanımda olan değerli hocalarım Prof. Dr. Hatice Derya Arslan ve Doç. Dr. Mustafa Korumaz'a da gönülden teşekkür ederim.

Bu uzun ve yoğun süreçte, sabrıyla, sevgisiyle ve koşulsuz desteğiyle her zaman yanımda olan kıymetli eşim Mehmet Akif Gülşeker'e minnettarım. Lisansüstü eğitim yolculuğumun her anına tanıklık eden ve bana ilham kaynağı olan sevgili oğullarım Asım ve Hamza'ya ise doktora tezimi gönülden ithaf ediyorum.

Esin GÜLŞEKER  
KONYA-2025

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                              |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>ÖZET .....</b>                                                                            | <b>iv</b>  |
| <b>ABSTRACT.....</b>                                                                         | <b>v</b>   |
| <b>ÖNSÖZ .....</b>                                                                           | <b>vi</b>  |
| <b>İÇİNDEKİLER .....</b>                                                                     | <b>vii</b> |
| <b>SİMGELER VE KISALTMALAR .....</b>                                                         | <b>ix</b>  |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                                                        | <b>1</b>   |
| 1.1. Çalışmanın Amacı ve Önemi .....                                                         | 2          |
| 1.2. Çalışmanın Kapsamı .....                                                                | 3          |
| 1.3. Kaynak Araştırması .....                                                                | 4          |
| 1.4. Çalışmanın Yöntemi .....                                                                | 9          |
| <b>2. İÇ ORTAM HAVA KALİTESİ.....</b>                                                        | <b>11</b>  |
| 2.1. İç Ortam Hava Kirliliği Kaynakları .....                                                | 12         |
| 2.2. İç Ortam Hava Kalitesini Etkileyen Kirleticiler Türleri .....                           | 13         |
| 2.2.1. Kimyasal kirleticiler .....                                                           | 13         |
| 2.2.2. Biyolojik kirleticiler.....                                                           | 14         |
| 2.2.3. Partikül kirleticiler (Fiziksel kirleticiler) .....                                   | 14         |
| 2.3. İç Ortam Hava Kalitesinin İyileştirilmesi .....                                         | 15         |
| 2.4. Kapalı Mekânlarda Kullanıcı Konforu ve İnsan Sağlığı .....                              | 15         |
| 2.4.1. Kapalı mekanlarda çevresel ve kişisel parametreler .....                              | 17         |
| 2.4.2. Covid-19 bağlamında iç ortam hava kalitesi ve doğal havalandırma .....                | 17         |
| 2.5. Doğal Havalandırma .....                                                                | 19         |
| 2.5.1. Doğal havalandırmanın amacı .....                                                     | 19         |
| 2.5.2. Doğal havalandırmanın temel ilkeleri.....                                             | 20         |
| 2.5.3. Doğal havalandırma sistemine etki eden faktörler .....                                | 21         |
| 2.5.4. Yapı kabuğunun doğal havalandırma üzerine etkileri .....                              | 23         |
| <b>3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (CFD) İLE DOĞAL<br/>HAVALANDIRMA SİMÜLASYONU .....</b> | <b>25</b>  |
| 3.1. CFD Simülasyonu.....                                                                    | 25         |
| 3.1.1. CFD tarihçesi .....                                                                   | 25         |
| 3.1.2. CFD analiz sürecinin temel aşamaları .....                                            | 26         |
| 3.1.3. CFD yazılımları ve mimarlıkta kullanımı.....                                          | 27         |
| 3.1.4. SolidWorks Flow Simulation yazılımı .....                                             | 28         |
| 3.2. Modelleme .....                                                                         | 29         |
| 3.3. Simülasyon Çalışması.....                                                               | 32         |
| 3.3.1. Modelin Mesh (Ağ) yapısı ve sayısal çözüm hazırlığı .....                             | 32         |
| 3.3.2. Mesh yoğunluğu ve yerel hassasiyet ayarları .....                                     | 35         |
| 3.3.3. Mesh kalitesi ve hesaplama etkisi.....                                                | 35         |
| 3.3.4. İklim verileri .....                                                                  | 36         |

|                                                                                                  |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.4. Simülasyon Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....                                              | 37         |
| 3.4.1. Yaz mevsimi senaryosu .....                                                               | 38         |
| 3.4.2. Sonbahar mevsimi senaryosu.....                                                           | 68         |
| 3.4.3. Kış mevsimi senaryosu .....                                                               | 96         |
| <b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>                                                   | <b>123</b> |
| 4.1. Partikül Dağılımına Göre Yaz Mevsimi Senaryolarının Karşılaştırılması .....                 | 123        |
| 4.2. Partikül Dağılımına Göre Sonbahar Mevsimi Senaryolarının Karşılaştırılması                  | 126        |
| 4.3. Partikül Dağılımına Göre Kış Mevsimi Senaryolarının Karşılaştırılması .....                 | 129        |
| 4.4. Partikül Dağılımına Göre Yaz – Sonbahar -Kış Mevsimi Senaryolarının Karşılaştırılması ..... | 133        |
| 4.4.1. Hava akımı ve partikül tahliye başarısı.....                                              | 133        |
| 4.4.2. Sıcaklık dağılımı ve termal konfor .....                                                  | 134        |
| 4.4.3. Sürdürülebilirlik açısından değerlendirme.....                                            | 134        |
| 4.5. Tartışma .....                                                                              | 135        |
| <b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>                                                             | <b>137</b> |
| 5.1. Mevcut Eğitim Yapıları için İyileştirme Önerileri .....                                     | 137        |
| 5.2. Yeni Tasarlanacak Eğitim Yapıları için tasarım parametreleri .....                          | 138        |
| 5.3. Araştırma İhtiyaçları ve Gelecekteki Çalışma Alanları .....                                 | 140        |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                                                           | <b>142</b> |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

|                 |                    |
|-----------------|--------------------|
| °C              | : Santigrat derece |
| cm              | : Santimetre       |
| CO              | : Karbonmonoksit   |
| CO <sub>2</sub> | : Karbondioksit    |
| km/sa           | : Kilometre /saat  |
| m <sup>2</sup>  | : Metre            |
| m <sup>2</sup>  | : Metrekare        |
| NO <sub>2</sub> | : Azotdioksit      |

### Kısaltmalar

|        |                                                                                |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------|
| ACH    | : Air Changes per Hour                                                         |
| ASHRAE | : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Associations |
| CAD    | : Computer-Aided Design                                                        |
| CFD    | : Computational Fluid Dynamics Engineers                                       |
| PM     | : Partikül Madde                                                               |
| REHVA  | : Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning             |
| S1     | : Senaryo 1                                                                    |
| S2     | : Senaryo 2                                                                    |
| S3     | : Senaryo 3                                                                    |
| S4     | : Senaryo 4                                                                    |
| S5     | : Senaryo 5                                                                    |
| S6     | : Senaryo 6                                                                    |
| VOC    | : Uçucu Organik Bileşikler                                                     |
| WHO    | : World Health Organization                                                    |

## 1. GİRİŞ

İç mekân hava kalitesi, insan sağlığı, üretkenlik ve genel yaşam konforu üzerinde doğrudan etkili olan temel bir çevresel parametredir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve çeşitli sağlık otoriteleri, bireylerin zamanlarının %80'inden fazla bölümünü kapalı ortamlarda geçirdiğini belirtmekte; bu durum, iç hava kalitesinin gerek bireysel sağlık gerekse kamusal refah üzerindeki etkisini daha da kritik hale getirmektedir (WHO, 2021). Özellikle eğitim yapıları gibi kullanıcı yoğunluğunun yüksek ve kullanım süresinin uzun olduğu yapılarda, hava kalitesinin yönetimi hem pedagojik verimlilik hem de enfeksiyon kontrolü açısından hayati öneme sahiptir.

COVID-19 pandemisi, hava yoluyla taşınan patojenlerin kapalı mekânlarda nasıl yayıldığını ve bu yayılımın önlenmesine yönelik alınması gereken önlemleri küresel çapta gündeme taşımıştır. Bu süreç, iç hava kalitesinin yalnızca termal konfor veya enerji verimliliği açısından değil, aynı zamanda sağlık temelli değerlendirmelerle de ele alınması gerektiğini göstermiştir. Karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ) seviyeleri, partikül madde yoğunluğu, bağıl nem ve hava değişim oranı (ACH) gibi göstergeler, kapalı ortamlarda enfeksiyon riskinin değerlendirilmesinde temel parametreler arasında yer almaktadır (Morawska & Milton, 2020; ASHRAE, 2020).

Sınıf ortamları, kalabalık öğrenci gruplarının uzun süre aynı havayı soluduğu, bu nedenle enfeksiyon riskinin yüksek olduğu iç mekânlardır. Bu bağlamda, doğal havalandırmanın etkili bir şekilde tasarlanması, özellikle de pencere yerleşimi, açıklık sayısı ve yönelimi gibi mimari faktörlerin uygun biçimde kurgulanması, sınıf içi hava akışını iyileştirerek bulaş riskini azaltma potansiyeli taşımaktadır. Ancak mevcut literatürde, doğal havalandırma stratejilerinin sınıf mekânlarında, yerel iklim verileri ve mevsimsel değişkenler dikkate alınarak sistematik biçimde test edildiği çalışmalar son derece sınırlıdır. Bu durum, özellikle COVID-19 sonrası dönemde eğitim yapılarında sağlıklı ve sürdürülebilir iç ortam koşullarının sağlanmasına yönelik tasarım kararları açısından önemli bir araştırma boşluğunu ortaya koymaktadır (Nugrahanti et al., 2024). Bu tez çalışması, iç mekân hava kalitesini iyileştirerek hava yoluyla bulaşan enfeksiyonların yayılımını azaltmaya yönelik kapsamlı bir değerlendirme sunmayı amaçlamaktadır. Çalışmada, Konya ili Meram ilçesine ait meteorolojik veriler kullanılarak yaz, sonbahar ve kış mevsimine ait senaryolar oluşturulmuş; farklı pencere açıklığı konfigürasyonları altında enfekte birey kaynaklı partikül yayılımı ve sıcaklık dağılımları SolidWorks Flow Simulation yazılımı ile modellenmiştir.

Simülasyon verileri, pencere açıklıklarının sayısı ve yerleşiminin sınıf içi hava hareketleri üzerindeki etkisini ortaya koyarken; doğal havalandırmanın belirli senaryolarda etkili, diğerlerinde ise yetersiz kaldığını göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, mevcut eğitim yapılarının tasarım kriterlerine katkı sunmakta ve gelecekte olası pandemilere karşı daha dayanıklı iç mekânlar oluşturulmasına yönelik öneriler geliştirmektedir.

### 1.1. Çalışmanın Amacı ve Önemi

COVID-19 pandemisi, kapalı mekânların sağlık açısından yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmış ve özellikle eğitim yapılarında yeterli havalandırmanın enfeksiyon kontrolündeki kritik rolünü gündeme taşımıştır. Sınıf gibi yüksek kullanıcı yoğunluğuna sahip iç mekânlarda doğal havalandırma olanaklarının etkinliğinin artırılması hem mevcut eğitim yapılarının iyileştirilmesi hem de yeni inşa edilecek eğitim binalarının sağlıklı ve güvenli şekilde tasarlanması açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu tez çalışmasının temel amacı; enfekte birey kaynaklı virüs partiküllerinin sınıf ortamında yayılımını modelleyerek, doğal havalandırma stratejilerinin bulaşıcı hastalıkların kontrolündeki potansiyel etkisini değerlendirmektir. Bu kapsamda, SolidWorks Flow Simulation yazılımı kullanılarak 30 kişilik teorik bir sınıf modeli oluşturulmuş; farklı pencere açıklığı ve yerleşim senaryoları altında COVID-19 kaynaklı virüs partiküllerinin iç mekândaki yayılımı ve taşınımı, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) tabanlı analizlerle incelenmiştir.

Çalışmanın temel hedefi, bulaşıcı hastalıkların sınıf ortamlarında yayılımını azaltmaya yönelik doğal havalandırma çözümlerinin etkinliğini ortaya koymak ve mimari tasarım kararlarının iç mekândaki hava akışı üzerindeki etkisini sayısal olarak değerlendirmektir. Bu doğrultuda, pencere sayısı, konumu ve açıklık düzeni gibi mimari parametrelerin iç ortam hava kalitesi üzerindeki etkileri analiz edilmiş; mekanik havalandırma sistemleri kapsam dışı bırakılarak tamamen pasif çözüm önerilerine odaklanılmıştır.

Bu çalışma aynı zamanda, doğal havalandırma stratejileri kullanılarak COVID-19 ve benzeri hava yoluyla bulaşan virüslerin sınıf ortamlarında yayılımını azaltmaya yönelik sayısal ve görsel veriler sunmakta; enfeksiyon riskini azaltmaya yönelik uygulanabilir ve etkili alternatifler ortaya koyarak bulaşıcı hastalıklarla mücadelede

mimari önlemlerin önemini vurgulamaktadır. Ayrıca, yalnızca pencere yerleşimi, sayısı ve açıklığı gibi mimari unsurların optimize edilmesi yoluyla, mekanik havalandırma sistemlerine ihtiyaç duyulmadan iç hava kalitesinin artırılabilceği gösterilmektedir. Bu yönüyle çalışma, enerji verimliliği ve düşük maliyet kriterlerini karşılayan sürdürülebilir mimari iyileştirme önerileri sunmaktadır.

Elde edilen bulgular, pandemi sonrası dönemde kullanıcı sağlığını gözetten eğitim yapılarının tasarlanmasına katkı sağlamanın yanı sıra, enfeksiyon kontrolünü merkeze alan mimari kararların, iç mekân hava kalitesi üzerindeki etkilerinin nicel olarak ortaya konmasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca, bu araştırma yalnızca COVID-19 özelinde sınırlı kalmamakta; benzer özellikteki olası gelecekteki salgınlara karşı alınabilecek yapısal önlemler açısından da yol gösterici nitelik taşımaktadır. Doğal havalandırmanın sağlık odaklı bina tasarımındaki etkinliğini ortaya koyması, uzun vadeli ve sürdürülebilir bir katkı sağlamaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, doğal havalandırmanın bulaşıcı hastalıkların yayılımını azaltmadaki potansiyelini sayısal analizlerle ortaya koymakta; mevcut eğitim yapılarında farkındalık oluşturmaya ve gelecekteki yapı tasarımlarında sürdürülebilir ve sağlıklı iç mekân stratejilerinin geliştirilmesine katkı sunmayı amaçlamaktadır. Bu yönüyle çalışma, sağlıklı bina tasarımı ve iç ortam hava kalitesi odaklı literatüre özgün bir akademik katkı sağlamaktadır.

## 1.2. Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışma, COVID-19 gibi hava yoluyla bulaşan hastalıkların sınıf ortamlarında yayılımını önlemeye yönelik doğal havalandırma stratejilerinin etkisini analiz etmektedir. Çalışma, tamamen doğal havalandırmaya dayalı çözümleri değerlendirmek amacıyla mekanik havalandırma sistemlerini dışarıda bırakarak, yalnızca mimari tasarım parametrelerine (pencere sayısı, boyutları, konumları vb.) odaklanmıştır.

Simülasyon ortamı olarak, 30 kişilik teorik bir sınıf modeli kullanılmıştır. Bu sınıf modeli, SolidWorks Flow Simulation yazılımı ile üç boyutlu olarak tasarlanmış ve farklı doğal havalandırma senaryoları altında CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde, pencere açıklıklarının sayısı ve konumlarına bağlı olarak, COVID-19 virüs partiküllerinin sınıf içerisindeki yayılımı ve havalandırma etkinliği incelenmiştir.

Çalışmanın kapsamı şu başlıklarla sınırlandırılmıştır:

- Sınıf Ortamının Tanımlanması: Çalışmada, yalnızca 30 kişilik bir sınıf ortamı ele alınmış ve bu ortamda COVID-19 virüs partiküllerinin yayılım davranışları analiz edilmiştir.
- Doğal Havalandırma Parametreleri: Pencere sayısı, konumu gibi mimari unsurlar değerlendirilmiştir. Mekanik havalandırma sistemleri ve filtreleme gibi teknolojiler çalışma dışında bırakılmıştır.
- Hesaplama Süreci: Simülasyonlar, belirli sınır koşulları altında yürütülmüş ve sınıf içerisindeki partikül dağılımı 15 saniyelik bir zaman diliminde analiz edilmiştir.
- Coğrafi Koşullar: Çalışma, genelleştirilebilir sonuçlar sunmakla birlikte, Konya iklim koşulları dikkate alınarak sınırlandırılmıştır. Farklı iklim koşulları kapsam dışında tutulmuştur.

Bu kapsam doğrultusunda, çalışmadan elde edilen bulguların hem mevcut eğitim binalarının iyileştirilmesi hem de yeni eğitim yapılarının tasarımında rehberlik etmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, bu araştırma, yalnızca COVID-19 ile sınırlı kalmayıp, gelecekte oluşabilecek benzer pandemiler için de çözüm önerileri sunmayı amaçlamaktadır.

### 1.3. Kaynak Araştırması

**Etheridge ve Sandberg'in (1996)** bina havalandırmasının teorik temellerini ve ölçüm yöntemlerini kapsamlı şekilde ele alan temel bir kaynaktır. Kitapta, özellikle bina kabuğu üzerindeki açıklıkların hava akışı ve iç mekândaki hava hareketi üzerindeki etkileri detaylandırılmakta, doğal ve mekanik havalandırma yaklaşımlarının bilimsel altyapısı sunulmaktadır.

**Givoni (1998)** tarafından yapılan çalışmada, bina ve kent ölçeğinde iklimin yapı tasarımına etkisi detaylı biçimde ele alınmakta; doğal havalandırma tasarımında rüzgâr yönü, açıklık yerleşimi ve bina geometrisinin kritik öneme sahip olduğu vurgulanmaktadır. Bu kapsamda, doğal havalandırmanın etkinliğini artırmaya yönelik temel tasarım prensipleri literatürde erken dönemde ortaya konmuştur.

**Wu vd. (2007)** çalışmasında, ilkökul sınıflarında doğal havalandırma stratejilerinin etkinliği sayısal simülasyonlar aracılığıyla detaylı biçimde incelenmiştir. Çalışmada, farklı açıklık düzenlemeleri, rüzgâr kuleleri ve çatı tasarımları gibi çeşitli

doğal havalandırma kombinasyonlarının sınıf içerisindeki hava akışı ve taze hava değişim oranları üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. CFD tabanlı simülasyonlar sonucunda, özellikle açıklıkların yerleşimi ve boyutlarının, sınıf içinde etkili hava dolaşımını sağlamada kritik rol oynadığı ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular, sınıf ortamında homojen hava dağılımı ve yeterli taze hava akışı sağlanabilmesi için uygun doğal havalandırma tasarımının gerekliliğini vurgulamaktadır.

**Jones vd. (2010)** çalışmasında, Birleşik Krallık'ta bulunan okul sınıflarında uygulanan doğal havalandırma ve rüzgâr kuleleri sistemlerinin iç hava kalitesi üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, CO<sub>2</sub> konsantrasyonu, sıcaklık ve bağıl nem parametreleri ölçülerek havalandırma performansı analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, rüzgâr kuleleriyle desteklenen doğal havalandırma sistemlerinin, sınıf içerisinde CO<sub>2</sub> seviyelerini düşürmede ve yeterli hava değişimini sağlamada etkili olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, bu sistemlerin enerji tüketimini artırmadan, özellikle yaz ve geçiş mevsimlerinde iç ortam konforunu ve hava kalitesini iyileştirdiği vurgulanmıştır.

**Song ve Meng (2015)**, doğal havalandırma ile mekanik destekli sistemlerin etkilerini Çin'deki okul binalarında incelemişlerdir. Fluent tabanlı CFD simülasyonları kullanarak, bir sınıf içindeki dört farklı havalandırma senaryosunu analiz etmişler; çift sıra pencere açıklıkları, egzoz fanları ve tavan vantilatörlerinin hava akımı ve termal konfor üzerindeki etkilerini karşılaştırmışlardır.

**Almeida vd (2017)** çalışmasında, Portekiz'de yer alan 8 okulun toplam 32 sınıfında gerçekleştirilen kapsamlı bir saha araştırması ile doğal havalandırmanın iç hava kalitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada, CO<sub>2</sub> konsantrasyonu, sıcaklık ve bağıl nem gibi parametreler ölçülmüş; doğal havalandırma etkinliğini artırmaya yönelik pencere açma stratejileri test edilmiştir. Elde edilen bulgular, açıklık kullanımının ve havalandırma protokollerinin iç hava kalitesinin sürdürülebilir şekilde iyileştirilmesinde kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır.

**Palladino vd. (2017)** çalışmasında, okul yapılarında uygulanan doğal havalandırma stratejilerinin iç hava kalitesi üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Farklı bölgelerdeki sınıflarda yapılan ölçümler sonucunda, manuel pencere açma uygulamalarının CO<sub>2</sub> seviyesini kısmen düşürdüğü, ancak dış ortam koşulları ve kullanıcı davranışlarının bu etkinliği doğrudan etkilediği tespit edilmiştir.

**Morales vd. (2019)** çalışmasında, okul sınıflarında iç hava kalitesi ve doğal havalandırma performansı kapsamlı şekilde incelenmiştir. İspanya'daki çeşitli okullarda gerçekleştirilen bu araştırmada, CO<sub>2</sub> konsantrasyonu, sıcaklık, bağıl nem ve hava değişim

oranları uzun süreli ölçümlerle değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, pencere açma sürelerinin ve sıklığının hava değişim oranları üzerinde belirleyici olduğunu, ancak kullanıcı davranışlarının kontrolsüzlüğünün doğal havalandırma verimliliğini olumsuz etkileyebildiğini ortaya koymuştur.

**Heracleous ve Michael (2018)** tarafından yürütülen bu çalışmada, Kıbrıs'ta yer alan bir ortaokul sınıfında, doğal havalandırmanın hem termal konfor hem de iç hava kalitesi üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında, farklı havalandırma stratejileri ve pencere açma düzenleri değerlendirilerek, özellikle kış aylarında optimum hava kalitesine ulaşmak için en etkili çözüm yolları araştırılmıştır. Mevsimsel iç ve dış ortam parametrelerinin izlenmesinin yanı sıra, sıcaklık, bağıl nem ve CO<sub>2</sub> seviyeleri yerinde ölçülerek analiz edilmiştir.

**Heracleous ve Michael'in (2020)** Kıbrıs'ta gerçekleştirdiği çalışma, eğitim yapılarında doğal havalandırmanın termal konfor üzerindeki etkisini hem kış hem de yaz mevsimlerini kapsayan kapsamlı bir saha araştırması yoluyla incelemiştir. Çalışmada, mevsimsel iç ve dış ortam sıcaklık ölçümleri ile anket temelli kullanıcı memnuniyeti değerlendirmeleri bir arada kullanılmıştır.

**Vassella, Heracleous ve Michael (2021)** tarafından yapılan çalışmada, sıcak iklim koşullarında doğal havalandırmanın, çapraz hava akışını destekleyen açıklık düzenlemeleriyle birleştirildiğinde iç mekân sıcaklığını anlamlı ölçüde düşürdüğü ve kullanıcı konforunu artırdığı tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, yaz mevsiminde yalnızca açıklıkların sayısı değil, açıklık konumlandırmasının da büyük önem taşıdığı vurgulanmaktadır.

**Alonso vd. (2021)** COVID-19 salgınının Güney İspanya'daki iki sınıfta kış aylarında iç hava kalitesi (IAQ) ve termal konfor üzerindeki etkilerini incelemiştir. Yerinde ölçümler, hibrit ve doğal havalandırmanın CO<sub>2</sub> konsantrasyonunu azalttığını; ancak termal konforsuzluk oranının yüksek olduğunu ortaya koymuştur.

**He vd. (2021)** tarafından yapılan çalışmada, sınıflarda düşük maliyetli kutu fan hava temizleyicisinin etkinliği CFD analizleriyle değerlendirilmiş; temizleyicilerin hava yoluyla bulaş riskini anlamlı düzeyde azalttığı gösterilmiştir.

**Abbas ve Dino (2022)**, pencere yüksekliği ve baca havalandırmasının COVID-19 yayılımı üzerindeki etkisini incelemiş ve Bernoulli etkisinin iç mekândaki kirletici konsantrasyonunu azaltmada etkili olduğunu ortaya koymuştur.

**Bulut (2022)**, kış aylarında yetersiz pencere havalandırmasına alternatif olarak, pasif bina tasarım ilkelerine uygun hava bacası kullanımını incelemiştir. İstanbul iklim

koşullarında örnek derslik modelinde, pencere altı menfezler ve iç mekâna yerleştirilen hava bacası ile derslik boyunca sürekli ve düşük yoğunluklu havalandırma yapılarak kabul edilebilir hava kalitesinin sağlanabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

**Jia vd. (2022)** tarafından yürütülen çalışmada, akıllı sınıflarda üç farklı mevsimde damlacık bulaşı dağılımı sayısal simülasyonlarla incelenmiştir. Sonuçlar, düşük dış ortam sıcaklığında damlacık bulaş hızının ve iletim mesafesinin arttığını göstermiştir.

**Sutherland ve Ackley (2022)** sistematik literatür taramalarında, yaz ve kış mevsimlerinde doğal havalandırmanın etkinliğinin açıklık yerleşimi, açıklık oranı ve açıklıkların kontrollü kullanımına bağlı olduğunu vurgulamaktadır.

**Tsutsumi ve Lee (2022)** tarafından geliştirilen otomatik pencere açma sistemlerinin, sıcaklık ve rüzgâr değişimlerine bağlı olarak açıklıkları dinamik biçimde ayarlayarak havalandırma performansını artırdığı gösterilmiştir.

**Eşmen (2023)** çalışmasında; enerji etkin tasarım anlayışı çerçevesinde doğal havalandırma stratejilerinin yapı tasarımındaki rolü ele almıştır. Literatür kısmında doğal havalandırmanın tanımı, sistem türleri, etkileyen faktörler ve tasarım kriterleri detaylı şekilde açıklamıştır. Uygulama aşamasında İstanbul'daki Sapphire yapısı örnek alınarak yapı yönelimi, cephe açıklıkları ve kentsel doku gibi parametrelerin doğal havalandırmaya etkisi, BIM tabanlı modelleme (Autodesk Revit) ve CFD analizleri (Autodesk CFD) ile değerlendirmiştir. Çalışma, doğal havalandırmanın sürdürülebilir bina tasarımına katkılarını ve tasarım sürecinde dikkate alınması gereken temel parametreleri ortaya koymaktadır.

**Zhou vd. (2023)** çalışmasında, ilköğretim ve ortaöğretim okullarında iç hava kalitesini iyileştirmek amacıyla geliştirilmiş bir negatif basınçlı havalandırma sisteminin etkinliği değerlendirilmiştir. Araştırmada, birleşik negatif basınç teknolojisinin sınıf ortamlarında doğal havalandırma performansını artırma potansiyeli deneysel ve sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Çalışma kapsamında, farklı havalandırma stratejilerinin CO<sub>2</sub> konsantrasyonu, partikül yoğunluğu ve genel hava değişim oranları üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

**Tuna ve Yetiş (2023)**, mimarlık stüdyolarında iç hava kalitesi ve termal konforun ölçülmesi yoluyla, öğrenci sağlığı üzerindeki etkileri değerlendirmiş ve düşük iç hava kalitesinin rahatsızlığa yol açtığını ortaya koymuştur.

**Al-Jokhadar vd. (2023)**, Ürdün'de mimarlık öğrencilerinin iç ortam çevre kalitesi, sağlık semptomları ve akademik performansı arasındaki ilişkiyi incelemiş; IEQ'nun iyileştirilmesinin akademik başarıyı artırabileceği sonucuna ulaşmıştır.

**Arslan vd. (2024)** çalışmalarında, farklı iklim bölgelerinde TOKİ tip 2+1 konutlarının doğal havalandırma performansını SolidWorks Flow Simulation yazılımı ile incelemiştir. Beş iklim bölgesinde yürütülen analizlerde, yaşam alanlarında etkin hava değişimi sağlandığı ancak mutfakta yetersizlik olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, sıcak iklimlerde balkonların serinletici etki göstermediği, soğuk iklimlerde ise hâkim rüzgâr yönünün ısıtma yükünü artırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

**Nowak-Dziesko, Mijakowski ve Müller (2024)**, geçiş mevsiminde doğal havalandırmanın CO<sub>2</sub> kontrolünde etkili olduğunu, ancak mekanik sistemlere kıyasla sınırlı hava değişim oranı sağladığını belirtmiştir.

**Branco vd. (2024)**, eğitim yapılarında CO<sub>2</sub>, PM ve diğer kirleticiler dâhil olmak üzere hava kalitesini etkileyen temel parametreleri incelemiş ve mevcut literatürdeki teknoloji eksikliği ve araştırma boşluklarını vurgulamıştır.

**Garcia vd. (2024)**, Brezilya’da yükseköğretim sınıflarında doğal havalandırma tasarımının hava yenileme oranına etkisini araştırmış; çapraz havalandırmalı sınıflarda yenileme oranlarının tek taraflı havalandırmaya göre yaklaşık 3,8 kat fazla olduğunu ortaya koymuştur.

**Nugrahanti vd. (2024)**, bina simülasyon yazılımlarını sistematik biçimde karşılaştırmış ve CFD yönteminin hava kalitesi değerlendirmelerinde sunduğu avantajları ortaya koymuştur.

Yapılan araştırmalar, eğitim yapılarında iç hava kalitesi, doğal havalandırma ve partikül yayılımının önemli bir konu olduğunu göstermektedir. Özellikle COVID-19 salgını sonrasında, sınıf ortamlarında havalandırma tasarımının ve partikül hareketinin daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesine yönelik çalışmalar artmıştır (Abbas ve Dino, 2022; Jia vd., 2022). Ancak literatürde, yerel iklim verileri ve farklı mevsimleri dikkate alarak, eğitim yapılarında doğal havalandırma ve partikül yayılımını birlikte değerlendiren kapsamlı çalışmaların sayısı sınırlıdır. Bunun yanında, mimarlık alanında CFD tabanlı analizleri sistematik bir şekilde tasarım sürecine entegre edildiği örneklerle de rastlanmamaktadır (Nugrahanti vd., 2024; McLeod vd., 2022).

2000-2024 yılları arasında yapılan geniş kapsamlı literatür taramasında, doğal havalandırma ile ilgili çalışmaların ağırlıklı olarak CO<sub>2</sub> konsantrasyonu, sıcaklık değişimleri, öğrenci algısı ve hava değişim oranları üzerine yoğunlaştığı görülmektedir (Canha vd. 2013; Zhang vd.2021; Almedia vd (2017); Givoni, 1998; Etheridge & Sandberg, 1996). Harvard Sağlıklı Binalar Programı (2024) ve Avrupa merkezli çeşitli saha çalışmaları ise, çapraz havalandırma stratejilerinin genel etkinliğini ortaya koymuş,

makine öğrenimi ve otomatik pencere kontrol sistemleriyle hava değişiminin artırılabilceğı vurgulanmıştır.

Bununla birlikte, özellikle sınıf ölçeğinde, farklı mevsim senaryolarını esas alan, zamana bağı, üç boyutlu partikül yayılımı ve enfekte birey kaynaklı aerosol dağılımının detaylı şekilde modellendiğı CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğı) tabanlı analizlerin oldukça sınırlı olduğı tespit edilmiştir. Ayrıca, mevcut çalışmaların büyük kısmının Avrupa ve Uzak Doğı iklim verilerine dayalı olduğı; Türkiye'nin özgün iklim koşullarını esas alan sistematik ve sayısal araştırmaların yetersiz kaldığı anlaşılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, Konya Meram ilçesine ait meteorolojik veriler kullanılarak 30 kişilik teorik bir sınıf ortamı oluşturulmuş; farklı mevsimlere ve pencere açıklığı senaryolarına göre enfekte birey kaynaklı partikül yayılımı, SolidWorks Flow Simulation yazılımı aracılığıyla üç boyutlu olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, yalnızca iç ortam hava kalitesi ve konfor değerlendirmeleriyle sınırlı kalmayıp, enfeksiyon riski açısından kritik öneme sahip partikül yayılımı konusuna da ışık tutarak literatüre özgün ve önemli bir katkı sunmaktadır.

Çoğunlukla mühendislik alanında kullanılan bu yazılım, bu çalışmada özgün bir yaklaşımla mimari tasarım sürecine entegre edilmiştir. Böylece hem doğal havalandırma etkinliğinin hem de bulaş riskini azaltmaya yönelik tasarım kararlarının, yerel iklim verileri ve mekânsal düzenlemeler bağlamında sayısal olarak değerlendirilmesine olanak sağlanmıştır. Böylece, çalışma hem eğitim yapılarında doğal havalandırma ve partikül yayılımına dair literatürdeki boşluğa katkı sunmakta hem de mimarlık alanında SolidWorks Flow Simulation yazılımının kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır.

#### 1.4. Çalışmanın Yöntemi

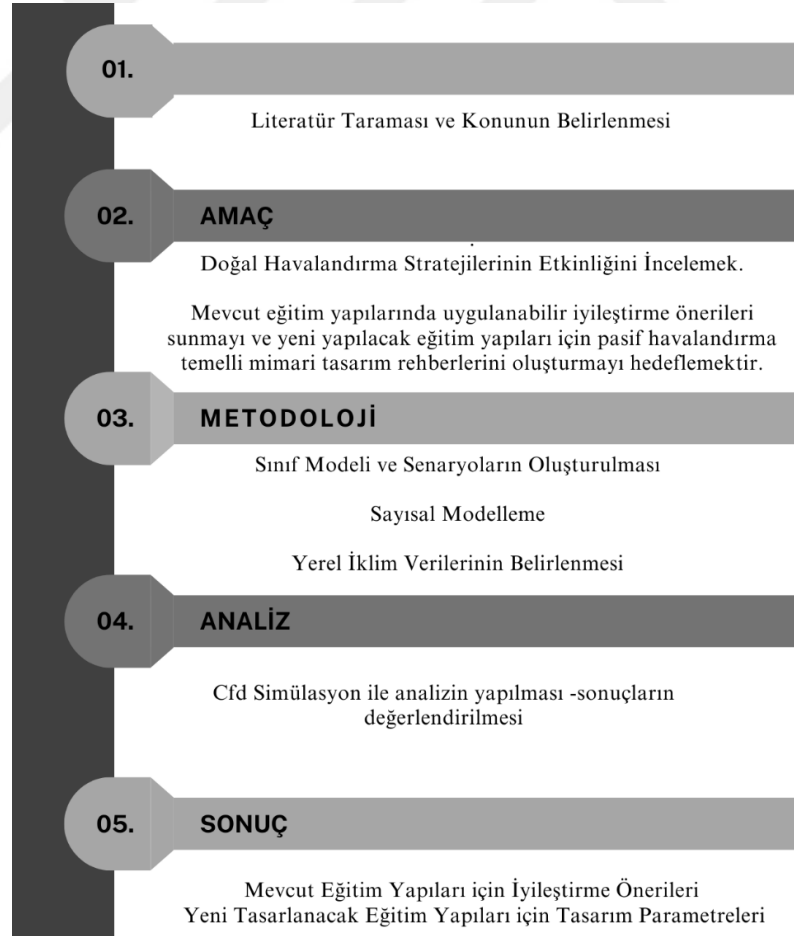
Çalışma sınıf mekanlarında doğal havalandırmanın COVID-19 gibi hava yoluyla bulaşan virüslerin yayılımı üzerindeki etkisini sayısal simülasyon yöntemine odaklanmıştır. Sınıf mekânın simülasyon analizinde şekil 1.1. deki metodoloji uygulanmıştır. Özellikle pencere konumları, boyutları ve sayısındaki değişikliklerin, iç ortam hava hareketleri ve partikül temizleme etkinliği üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Araştırma kapsamında aşağıdaki temel sorulara yanıt aranmıştır:

- Doğal havalandırma koşulları, sınıf ortamlarında COVID-19'un hava yoluyla yayılımını azaltmada etkili bir çözüm sunabilir mi?

- Pencere sayısı, boyutları ve konumları değiştirilerek sınıf içi hava değişim oranı artırıldığında, virüs partiküllerinin dağılımı ve ortamdaki tahliyesi nasıl etkilenir?
- Mevsimsel değişkenler (yaz -sonbahar- kış) doğal havalandırma performansını nasıl değiştirmektedir?

Bu doğrultuda aşağıdaki adımlar izlenmiştir: Sınıf Ortamının Tanımlanması: 30 kişilik teorik bir sınıf ortamının fiziksel özelliklerinin modellenmesi yapıldı. Solidworks Flow Simulation ile Modelleme: Bu sınıf ortamının geometrik modeli SolidWorks programında oluşturuldu. 30 kişilik sınıfta, bir öğrencinin enfekte olduğu ve hapşırduğu esnada ortaya çıkan partiküllerin 15 sn içinde dağılımını göstermektedir. CFD Simülasyonunun Gerçekleştirilmesi: SolidWorks ile oluşturulan sınıf geometrisi, COVID-19 partiküllerinin yayılımının analiz edilmesi için simüle edildi. Doğal havalandırma koşullarının analizi, farklı pencere konumları, sayıları ve havalandırma senaryoları üzerinden simülasyonlar gerçekleştirildi.



**Şekil 1.1.** Çalışmanın Metodoloji

## 2. İÇ ORTAM HAVA KALİTESİ

İç Ortam Hava Kalitesi, kapalı bir mekânda solunan havanın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini ifade eden ve insan sağlığı, konforu ile performansını doğrudan etkileyen kritik bir kavramdır. İç ortam hava kalitesi, genel olarak bir mekândaki kirletici maddelerin seviyeleri, havalandırma etkinliği ve termal konfor koşulları temel alınarak değerlendirilir. Özellikle öğrencilerin yaş grubu itibarıyla dış etmenlere karşı daha duyarlı olmaları, sınıf gibi kapalı ve yoğun kullanılan mekanlarda iç ortam hava kalitesinin önemini daha da artırmaktadır (Mendell vd., 2013).

COVID-19 pandemisi sonrası yapılan çok sayıda araştırma, havalandırma yetersizliğinin ve partikül birikiminin enfeksiyon yayılımını doğrudan etkilediğini ortaya koymuştur (WHO, 2021). Dünya Sağlık Örgütü, sınıf gibi kapalı mekanlarda bulaşıcı virüs partiküllerinin tahliyesi için uygun hava değişim oranlarının sağlanmasının halk sağlığı açısından zorunlu olduğunu vurgulamaktadır.

İç ortam hava kalitesi; sıcaklık, bağıl nem, CO<sub>2</sub> seviyesi, uçucu organik bileşikler (VOC), partikül madde (PM) ve hava hareketliliği gibi fiziksel ve kimyasal değişkenlerin bir bileşimi olarak tanımlanmaktadır (Madureira vd., 2015). Mendell ve arkadaşlarının (2013) Kaliforniya'daki 162 sınıf üzerinde yürüttüğü çok merkezli çalışmada, sınıf havalandırması ile öğrencilerin hastalık nedeni devamsızlık oranları arasında anlamlı bir ilişki bulunmuştur. CO<sub>2</sub> düzeyi 1000 ppm'nin üzerine çıktığında bilişsel işlevlerin azaldığı ve dikkat süresinin kısaldığı birçok çalışmayla doğrulanmıştır (Allen vd., 2016; Chatzidiakou vd., 2015).

Fromme vd. (2008), Almanya'daki devlet okullarında yaptıkları ölçümlerde, düşük hava değişim oranlarına sahip sınıflarda VOC ve PM seviyelerinin dış mekânın 3–5 katı kadar yüksek olduğunu tespit etmiş ve bu kirleticilerin solunum yolu hastalıkları ile ilişkili olduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde Madureira ve arkadaşları (2021), sınıf içi partikül seviyelerinin yüksek olduğu ortamlarda alerjik semptomlar ve astım ataklarının görülme sıklığının arttığını rapor etmiştir.

Literatürde CO<sub>2</sub> düzeylerinin, havalandırma etkinliğinin önemli bir göstergesi olarak kullanıldığı belirtilmektedir. Chatzidiakou vd. (2015), bu parametrenin hem öğrenci yoğunluğunun hem de havalandırma stratejilerinin yeterliliğini değerlendirmede uygun bir gösterge olduğunu savunmuştur.

Eğitim yapılarında iç ortam hava kalitesi, çocuklar ve genç yetişkinlerin günün büyük bir bölümünü bu yapılarda geçirmeleri nedeniyle kritik bir öneme sahiptir.

Öğrenciler, ev dışındaki kapalı alanlar arasında en uzun süreyi genellikle okullarda geçirmektedir. Bu durum, maruz kalınan hava kalitesinin bireylerin sağlığı ve bilişsel gelişimi üzerindeki etkilerini doğrudan artırmaktadır (Bakó-Biró vd., 2012).

Özellikle çocuklar ve ergenler, gelişim çağında oldukları için çevresel faktörlere karşı daha savunmasızdır. Solunum sistemleri henüz tam olarak gelişmediğinden, vücut ağırlıklarına oranla daha fazla hacimde hava solumakta ve bu da onları iç mekân kirleticilerine karşı daha duyarlı hale getirmektedir (Yang vd., 2009; Holtage vd., 2016).

Nitekim yapılan çalışmalar, eğitim yapılarında uzun süreli bulunan bireylerde çeşitli sağlık sorunlarının ortaya çıkabildiğini göstermektedir. Bu sorunlar arasında alerjik reaksiyonlar, astım atakları, hava yolu hassasiyetleri ve bazı kardiyovasküler rahatsızlıklar yer almaktadır (Franchi ve Carrer., 2002; Kim vd. 2004; Cochran Hameen vd., 2020).

Bu nedenle, okullarda iç ortam hava kalitesine yönelik uygun tasarım stratejilerinin benimsenmesi, sadece konfor düzeyinin değil, aynı zamanda öğrenci sağlığının ve öğrenme kapasitesinin korunması açısından da büyük önem taşımaktadır.

Bu bağlamda, literatürdeki bulgular iç ortam hava kalitesinin özellikle eğitim yapılarında sağlıklı bir öğrenme iklimi oluşturulmasında temel belirleyici olduğunu göstermektedir. Ancak mevcut okulların büyük bir kısmında doğal havalandırma sistemleri yeterince etkin kullanılmamakta ve sınıf planlamaları bu gerekliliği dikkate almayacak şekilde tasarlanmaktadır.

## 2.1. İç Ortam Hava Kirliliği Kaynakları

İç ortam hava kirliliği, bireylerin büyük bir kısmını geçirdiği kapalı mekânlarda, sağlığı olumsuz etkileyebilecek kirleticilerin birikmesiyle oluşur. İç hava kalitesinin düşmesine neden olan bu kirleticiler hem dış ortamdan taşınan unsurlar hem de iç mekân kaynaklı emisyonlar yoluyla ortama yayılabilir (Jones, 1999).

İç ortam kirleticileri genel olarak kimyasal, biyolojik ve fiziksel kirleticiler olarak sınıflandırılır. Kimyasal kirleticiler arasında karbon monoksit (CO), azot dioksit (NO<sub>2</sub>), formaldehit, uçucu organik bileşikler (VOC'ler) ve ozon (O<sub>3</sub>) gibi maddeler yer alırken; biyolojik kirleticiler arasında küf sporları, bakteriler, virüsler, polenler ve evcil hayvanlardan kaynaklı alerjenler bulunmaktadır (Godish, 2001). Fiziksel kirleticiler ise genellikle toz partikülleri ve radon gazı gibi unsurlardır.

İç mekânlarda bu kirleticilerin ana kaynakları arasında yapı malzemeleri, mobilyalar, temizlik ürünleri, kişisel bakım ürünleri, sigara dumanı, pişirme faaliyetleri, ısıtma sistemleri ve yetersiz havalandırma yer almaktadır (Hodgson vd., 2000). Özellikle modern binalarda enerji verimliliği amacıyla yapılan yalıtım uygulamaları, hava sirkülasyonunu sınırlayarak kirleticilerin birikmesine neden olabilmektedir (Sundell, 2004).

Ayrıca insan aktiviteleri de önemli bir iç kaynak teşkil etmektedir. Konuşma, öksürme ve nefes alma gibi sıradan eylemler dahi partikül salımına neden olurken, bu durum enfeksiyon riskini artırabilmektedir (Morawska et al., 2009). Bu bağlamda, iç ortam hava kalitesinin değerlendirilmesinde yalnızca fiziksel ortam değil, aynı zamanda kullanıcı davranışları da dikkate alınmalıdır.

Sonuç olarak, iç ortam hava kirliliği, farklı kaynakların etkileşimi sonucu ortaya çıkan çok boyutlu bir sorundur. Bu nedenle etkili kontrol stratejilerinin geliştirilebilmesi için kirletici kaynaklarının doğru bir şekilde tanımlanması ve modellenmesi büyük önem taşımaktadır.

## 2.2. İç Ortam Hava Kalitesini Etkileyen Kirletici Türleri

İç ortam hava kalitesi (IAQ), bireylerin uzun süreli zaman geçirdiği kapalı alanlardaki havanın sağlığa uygunluk düzeyini ifade eder. Özellikle konutlar, ofisler, okullar ve sağlık yapıları gibi iç mekânlarda solunan havanın kalitesi, bireylerin konfor düzeyini ve sağlığını doğrudan etkileyen kritik bir parametredir (Jones, 1999). İç hava kalitesini bozan unsurlar ise “kirletici türleri” olarak adlandırılır ve kaynaklarına göre sınıflandırılarak değerlendirilir.

İç ortam kirleticileri genel olarak **kimyasal**, **biyolojik** ve **partikül (fiziksel)** olmak üzere üç ana grupta incelenir (Godish, 2001).

### 2.2.1. Kimyasal kirleticiler

Kimyasal kirleticiler, yapı malzemeleri, mobilyalar, temizlik ürünleri, boya ve çözücüler gibi kaynaklardan yayılabilir. Yaygın örnekler arasında formaldehit, benzen, karbon monoksit (CO), azot dioksit (NO<sub>2</sub>) ve uçucu organik bileşikler (VOC’ler) yer alır. Bu kirleticiler, solunum problemlerinden kanserojen etkilere kadar uzanan sağlık sorunlarına yol açabilir (WHO, 2010).

### 2.2.2. Biyolojik kirleticiler

Biyolojik kaynaklı kirleticiler; küf, bakteri, virüs, polen ve evcil hayvan döküntüleri gibi mikroorganizma veya organik kökenli partiküllerden oluşmaktadır. Bu tür kirleticiler, özellikle nemli ve yetersiz havalandırılan ortamlarda hızla çoğalmakta ve alerjik reaksiyonlar, astım semptomları ile solunum yolu enfeksiyonlarının ortaya çıkmasına yol açabilmektedir (Douwes et al., 2003). COVID-19 pandemisi ile, biyolojik kirleticilerin yalnızca alerjik etkileri değil, aynı zamanda enfeksiyon riski açısından taşıdığı bulaşıcı özellikler de önem kazanmış ve iç mekân hava kalitesinin halk sağlığı üzerindeki etkisi daha görünür hâle gelmiştir.

### 2.2.3. Partikül kirleticiler (Fiziksel kirleticiler)

Partikül madde (PM), iç mekân hava kalitesini olumsuz etkileyen başlıca kirleticiler arasında yer almakta olup; toz, duman, biyolojik kalıntılar ve sıvı damlacıklar şeklinde ortamda asılı kalan çok küçük taneciklerden oluşmaktadır. Özellikle PM<sub>2.5</sub> ve PM<sub>10</sub> gibi çapı sırasıyla 2,5 mikrometreden ve 10 mikrometreden küçük olan bu partiküller, yüksek solunabilirlik özellikleri nedeniyle insan sağlığı açısından ciddi riskler taşımaktadır. Söz konusu partiküller; pişirme, sigara kullanımı, yakıtlı ısıtma sistemleri gibi iç kaynaklı faaliyetler yoluyla veya dış ortamdan taşınarak iç mekâna girebilmektedir. Yetersiz veya düzensiz havalandırma koşulları altında, bu partiküller ortamda birikmekte ve uzun süre askıda kalabilmektedir. Özellikle kapalı sınıf ortamlarında bu durum hem enfeksiyon riskini artırmakta hem de solunum ve kardiyovasküler sistem üzerinde olumsuz sağlık etkilerine yol açmaktadır. Pope ve Dockery'nin (2006) kapsamlı çalışmalarında da ortaya konulduğu üzere, ince partikül maddeler solunum yoluyla akciğerlerin derin bölgelerine ulaşabilmekte ve burada birikerek, astım, solunum yolu hastalıkları ve kalp-damar sistemi rahatsızlıklarının oluşumunu tetikleyebilmektedir.

Eğitim yapıları gibi yüksek kullanıcı yoğunluğuna sahip alanlarda, partikül konsantrasyonunun etkin şekilde kontrol altına alınabilmesi, büyük ölçüde doğal havalandırma tasarımının başarısına bağlıdır. Bu nedenle, bu tez kapsamında farklı pencere konfigürasyonlarının ve doğal havalandırma stratejilerinin sınıf ortamındaki partikül dağılımı ve seyreltme performansı üzerindeki etkisi detaylı şekilde

değerlendirilmiş; elde edilen bulgular doğrultusunda, iç hava kalitesini sürdürülebilir biçimde iyileştirecek mimari tasarım önerileri geliştirilmiştir.

### 2.3. İç Ortam Hava Kalitesinin İyileştirilmesi

İç ortam hava kalitesi, kapalı mekânlardaki hava bileşenlerinin insan sağlığı, konfor ve genel yaşam kalitesi üzerindeki etkisini ifade etmektedir. Günümüzde bireylerin yaşamlarının büyük bir bölümünü kapalı alanlarda geçirmesi, İç ortam hava kalitesinin önemi ve gerekliliğini artırmıştır (Wargocki & Wyon, 2017). Özellikle eğitim yapıları, ofisler ve sağlık tesisleri gibi yüksek yoğunluklu iç mekânlarda, hava kalitesinin sağlanması hem bireylerin sağlığını korumak hem de bulaşıcı hastalıkların yayılımını önlemek açısından kritik bir unsurdur (Fisk, 2017).

İç ortam hava kalitesinin iyileştirilmesi; havalandırma sistemlerinin etkin tasarımı ve işletilmesi, iç mekân kirleticilerinin kontrolü, partikül madde seviyelerinin azaltılması ve uygun nem koşullarının sağlanması gibi çok boyutlu stratejilerle mümkün olmaktadır (ASHRAE, 2019). Bu bağlamda, mekanik havalandırmanın yanı sıra doğal havalandırma tekniklerinin dengeli ve bilinçli kullanımı hem enerji verimliliği sağlamak hem de iç hava kalitesini artırmaktadır (Etheridge & Sandberg, 1996).

COVID-19 pandemisiyle birlikte, iç ortam hava kalitesinin önemi daha da belirginleşmiş ve özellikle aerosol yoluyla bulaşan hastalıkların kontrolünde havalandırmanın rolü vurgulanmıştır. Havada asılı kalan virüs partiküllerinin seyreltilmesi için artırılmış hava değişim oranları ve etkili partikül filtrasyonu stratejileri geliştirilmiştir (Morawska & Cao, 2020). Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ve benzeri modelleme teknikleri, bu stratejilerin tasarım ve uygulama aşamalarında kritik analizler sunarak etkinliğin artırılmasına katkıda bulunmaktadır.

Sonuç olarak, iç ortam hava kalitesinin iyileştirilmesi, sürdürülebilir bina tasarımı ve kullanıcı sağlığı açısından temel bir gereklilik olup, disiplinler arası yaklaşımlar ile bütüncül çözümler geliştirilmelidir.

### 2.4. Kapalı Mekânlarda Kullanıcı Konforu ve İnsan Sağlığı

Kapalı mekânlarda kullanıcı konforu, fiziksel, psikolojik ve çevresel faktörlerin eş zamanlı etkileşimiyle şekillenen, çok boyutlu ve dinamik bir kavram olarak tanımlanmaktadır. Kullanıcı konforunun sağlanması, yalnızca bireylerin anlık rahatlık

algısı ile sınırlı olmayıp; uzun vadede yaşam kalitesinin artırılması, stres düzeylerinin azaltılması ve mekânın verimli kullanımının teşvik edilmesi açısından da büyük önem taşımaktadır (Zhang et al., 2018). Özellikle eğitim, çalışma ve sağlık yapıları gibi yüksek kullanıcı yoğunluğuna sahip ortamlarda, konforun sağlanması; bireysel performansın, dikkat süresinin ve genel memnuniyetin artırılmasına doğrudan katkı sağlamaktadır. Bu kapsamda, sıcaklık, nem, hava hareketi, aydınlatma, akustik konfor ve iç ortam hava kalitesi gibi çevresel parametrelerin optimum aralıklarda tutulması temel bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır (Fanger, 1970).

İnsan sağlığı açısından değerlendirildiğinde ise, kapalı alanlarda hava kalitesinin rolü hayati bir noktada konumlanmaktadır. Yetersiz havalandırma, iç ortam kirleticilerinin birikimi ve yüksek partikül konsantrasyonları, başta solunum yolu hastalıkları olmak üzere, alerjik reaksiyonlar, baş ağrısı, yorgunluk ve konsantrasyon bozuklukları gibi çeşitli sağlık problemlerine yol açabilmektedir (Sundell, 2004). Eğitim ve çalışma alanlarında bu durumun etkileri, yalnızca bireysel sağlık düzeyi ile sınırlı kalmayıp; grup verimliliği, öğrenme süreci ve akademik/iş performansı üzerinde de olumsuz sonuçlar doğurmaktadır (Seppänen, Fisk & Mendell, 1999). Özellikle öğrenci ve çalışanların uzun süreli olarak kapalı ortamlarda bulunması, iç hava kalitesinin sürdürülebilir biçimde kontrolünü zorunlu kılmaktadır.

Son yıllarda tüm dünyayı etkisi altına alan COVID-19 pandemisi, kapalı mekânlarda hava kalitesinin ve havalandırma sistemlerinin taşıdığı kritik önemi daha görünür hâle getirmiştir. Aerosol yoluyla taşınan virüs partiküllerinin bulaş riskini azaltmada etkin havalandırma ve filtrasyon sistemleri hayati bir rol oynamaktadır. Morawska ve Milton (2020) tarafından ortaya konan bilimsel bulgular, kapalı ortamlarda yetersiz hava değişiminin enfeksiyon yayılımını ciddi şekilde artırabileceğini ve bu nedenle konfor parametrelerinin yalnızca termal veya akustik boyutta değil; hijyen, güvenlik ve hava kalitesi boyutlarıyla da ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Dolayısıyla, kapalı mekânlarda kullanıcı konforu ile insan sağlığı arasındaki ilişki, mekânsal tasarım, mühendislik ve çevre sağlığı disiplinlerinin ortak çalışma alanı hâline gelmiştir. Sürdürülebilir, sağlıklı ve güvenli yaşam alanlarının oluşturulabilmesi için, bu iki unsurun dengeli ve bütünleşmiş bir şekilde yönetilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, doğal ve mekanik havalandırma sistemlerinin etkin planlaması, iç mekân tasarımında kirletici kaynaklarının minimize edilmesi ve çevresel parametrelerin bütüncül yaklaşımla kontrol edilmesi gerekmektedir. Gelişmiş modelleme teknikleri, akıllı bina sistemleri ve kullanıcı odaklı tasarım yaklaşımları ile, kapalı mekânlarda

konfor ve sağlık ekseninde bütüncül çözümler üretilmesi, günümüzdeki en öncelikli araştırma ve uygulama alanlarından biri olarak önemini korumaktadır.

#### **2.4.1. Kapalı mekanlarda çevresel ve kişisel parametreler**

Kapalı mekânlarda kullanıcıların konforu ve sağlığı, çevresel ve kişisel parametrelerin karşılıklı etkileşimiyle belirlenmektedir. Çevresel parametreler; sıcaklık, nem, hava hızı, hava kalitesi, aydınlatma ve gürültü gibi fiziksel faktörleri içerirken, kişisel parametreler bireylerin yaş, cinsiyet, metabolizma hızı, giysi kalınlığı ve aktivite düzeyi gibi bireysel farklılıkları kapsamaktadır (Fanger, 1970; Parsons, 2014).

Termal konforun sağlanması, çevresel parametrelerin belirli sınırlar içinde tutulması önem taşımaktadır. Örneğin, sıcaklık ve nem oranı, vücut ısısının dengelenmesinde kritik rol oynarken, hava hareketi konfor hissini doğrudan etkiler (ASHRAE, 2017). Ancak aynı ortamda bulunan bireylerin farklı kişisel özellikleri nedeniyle konfor algıları değişkenlik gösterebilir (Zhang et al., 2018). Bu durum, kapalı alan tasarımlarında kişiselleştirilmiş çözümler geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

İç ortam hava kalitesi ise kullanıcı sağlığı açısından en önemli çevresel parametrelerden biridir. Kirleticiler ve biyolojik partiküller, özellikle hassas gruplarda solunum yolu hastalıklarına ve alerjik reaksiyonlara yol açabilir (Sundell, 2004). Bu nedenle havalandırma sistemlerinin tasarımı ve işletimi hem çevresel parametreleri kontrol etmek hem de bireysel ihtiyaçlara cevap verebilmek amacıyla dikkatle planlanmalıdır.

Sonuç olarak, kapalı mekânlarda çevresel ve kişisel parametrelerin dengeli bir şekilde yönetilmesi, kullanıcıların hem fiziksel konforunu artırmak hem de sağlık risklerini minimize etmek için kritik bir gerekliliktir. Multidisipliner çalışmalar ve gelişen teknolojiler, bu karmaşık etkileşimin optimize edilmesine olanak sağlamaktadır.

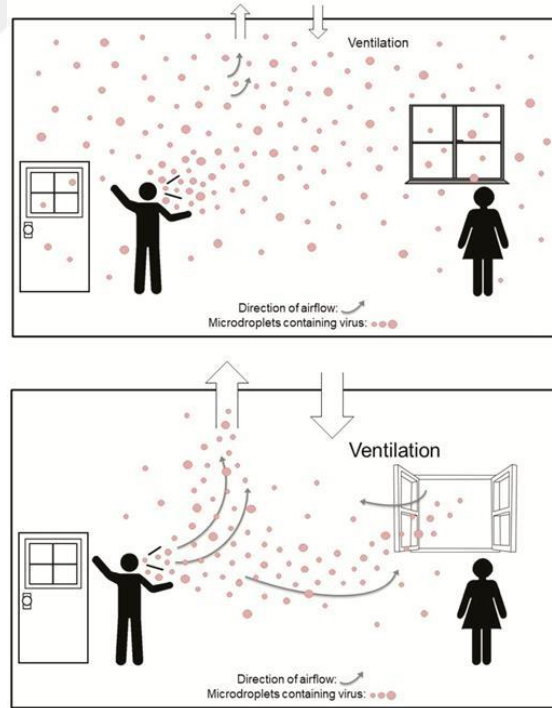
#### **2.4.2. Covid-19 bağlamında iç ortam hava kalitesi ve doğal havalandırma**

2019 aralık ayında Çin’de başlayan COVID-19 pandemisi, kapalı ortamlarda havada taşınan bulaşıcı partiküllerin insan sağlığı açısından ne denli önemli olduğunu açık biçimde ortaya koymuştur. SARS-CoV-2 virüsünün aerosol yoluyla yayılabildiğinin bilimsel olarak kanıtlanması (Morawska & Milton, 2020), iç ortam hava kalitesi

konusunun yalnızca konfor değil, aynı zamanda enfeksiyon kontrolü bakımından da değerlendirilmesini zorunlu hâle getirmiştir (Şekil 2.1.).

Pandemi sürecinde yapılan araştırmalar, özellikle eğitim yapıları gibi uzun süreli kalışın söz konusu olduğu kapalı mekânlarda, havalandırma sistemlerinin etkinliğinin enfeksiyon riski üzerinde belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymuştur (Bhagat et al., 2020). Bu bağlamda, bulaş riski değerlendirmelerinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) analizlerinin kullanımı artmış; partikül yayılımının mekânsal ve zamansal dağılımı detaylı biçimde modellenmiştir.

CFD, virüs taşıyan aerosol partiküllerinin sınıf içindeki hareketini, havalandırma sistemlerinin partikül temizleme verimliliğini ve enfekte bireylerin konumunun etkisini değerlendirmek için yaygın biçimde tercih edilmiştir. Li et al. (2021) tarafından yürütülen bir çalışmada, doğal ve mekanik havalandırmanın COVID-19 bulaşma riski üzerindeki etkisi karşılaştırılmış; mekanik sistemlerin uygun şekilde tasarlanmadığı durumlarda riskin daha da artabileceği vurgulanmıştır. Benzer şekilde, Shen et al. (2020), CFD yardımıyla sınıf ortamında konuşan bir bireyden yayılan partiküllerin hareketini analiz etmiş ve oturma düzeninin risk haritası üzerindeki etkisini ortaya koymuştur.



**Şekil 2.1.** Yetersiz havalandırma ve Yeterli havalandırma bulunan bir kapalı ortamda solunum mikro damlacıklarının dağılımı ( Morawska ve Milton, 2020)

Elde edilen bulgular, kapalı eğitim yapılarında iç hava kalitesinin iyileştirilmesi ve bulaş riskinin azaltılması için havalandırma sistemlerinin sadece varlığıyla değil, aynı zamanda hava akış desenleri ve hava değişim oranları açısından da etkin olması gerektiğini göstermektedir. Bu doğrultuda, COVID-19 sürecinde geliştirilen modelleme yaklaşımları, yalnızca pandemi koşulları için değil, gelecekteki solunum yolu hastalıkları açısından da iç hava kalitesi analizlerine katkı sunmaktadır.

## **2.5. Doğal Havalandırma**

Doğal havalandırma, bina içindeki hava kalitesini iyileştirmek, termal konforu artırmak ve enerji tüketimini azaltmak amacıyla, mekanik bir sisteme ihtiyaç duymadan dış ortamdan gelen hava hareketlerinin kullanıldığı bir tasarım stratejisidir. Bu süreç, rüzgâr etkisi ve termal farklılıklar gibi doğal fiziksel prensipler doğrultusunda, iç ve dış mekânlar arasında hava değişimi sağlanarak gerçekleşir.

Doğal havalandırma, iç mekânlarda mekanik cihazlar kullanılmadan, dış ortamla iç ortam arasında hava hareketinin rüzgâr, sıcaklık farkı (termal sürüklenme) gibi doğal fiziksel etkenlerle sağlanmasıdır (Etheridge & Sandberg, 1996). Bu yöntem, bina içinde hava değişimini sağlamak amacıyla açıklıklar (pencereler, menfezler) aracılığıyla doğal hava akımlarının yönlendirilmesini içerir (ASHRAE, 2017). Doğal havalandırma, enerji tüketimini azaltması ve iç ortam hava kalitesini iyileştirmesi nedeniyle sürdürülebilir yapı tasarımlarında önemli bir rol oynamaktadır (Fisk, 2017).

Mimari bağlamda doğal havalandırma, bir binanın tasarım sürecinde hem çevresel sürdürülebilirlik hem de kullanıcı konforu hedeflerini bir araya getiren önemli bir unsurdur. Bu yaklaşım, bina kabuğunda yer alan açıklıklar (pencere, kapı, havalandırma bacası) ve iç mekândaki hava akışını yönlendiren planlama kararları ile optimize edilir. Doğal havalandırma, bina tasarımına entegre edilen pasif sistemlerin bir parçası olarak, mekanik havalandırma sistemlerine alternatif bir çözüm sunar ve enerji tüketimini önemli ölçüde azaltabilir.

### **2.5.1. Doğal havalandırmanın amacı**

Doğal havalandırma, bina içindeki taze hava dolaşımını sağlayarak iç mekân hava kalitesini artırmayı, enerji tüketimini azaltmayı ve kullanıcı konforunu iyileştirmeyi hedefleyen bir stratejidir. Bu sistem, mekanik ekipman kullanılmaksızın, genellikle rüzgâr etkisi ve termal kaldırma kuvvetlerinden faydalanarak hava akışını sağlamaktadır.

Temel amacı, iç mekânda biriken kirletici maddelerin (karbon dioksit, uçucu organik bileşikler, partikül maddeler gibi) konsantrasyonunu azaltmak ve dışarıdan taze hava getirerek sağlıklı bir solunum ortamı yaratmaktır. Ayrıca, doğal havalandırma, enerji tüketimini en aza indirerek sürdürülebilir bina tasarımı ve düşük karbon salımı hedeflerine katkıda bulunur.

Doğal havalandırma, kullanıcıların termal konforunu sağlarken, bina tasarımı ve yerel iklim koşullarına uygun şekilde planlanarak hem ekonomik hem de çevresel faydalar sunar. Özellikle eğitim yapıları, ofisler ve konutlar gibi uzun süreli kullanım alanlarında doğal havalandırmanın etkinliği, bireylerin sağlık, performans ve genel yaşam kalitesine doğrudan katkı sağlamaktadır.

### 2.5.2. Doğal havalandırmanın temel ilkeleri

Doğal havalandırma, bir bina içerisindeki taze hava akışını sağlamak ve kirli havayı dışarı atmak için rüzgâr etkisi ve termal kaldırma kuvvetlerinden faydalanan bir sistemdir. Etkin bir doğal havalandırma sağlamak için belirli fiziksel ve tasarımsal ilkeler göz önünde bulundurulmalıdır:

**Rüzgâr Etkisi ile Hava Akışı:** Rüzgâr etkisi, doğal havalandırmanın temel güçlerinden biridir. Yapının rüzgâr alan yüzeylerinde oluşan pozitif basınç, havanın içeri girmesini sağlarken, rüzgârın binanın arka tarafında oluşturduğu negatif basınç, havanın dışarı çıkmasını kolaylaştırır. Bu prensip, pencerelerin veya açıklıkların doğru yerleştirilmesiyle optimize edilebilir (ASHRAE ,2021).

**Baca Etkisi:** Baca etkisi, iç ve dış ortam arasındaki sıcaklık farkına bağlı olarak ortaya çıkan termal kaldırma kuvveti sonucunda meydana gelen dikey hava hareketidir. İç ortam havası, dış ortamdan daha sıcak olduğunda yoğunluğu azalır ve yükselerek bina içerisindeki üst açıklıklardan dışarı çıkar. Bu hareket, alt seviyelerdeki açıklıklardan daha soğuk dış ortam havasının içeri girmesine yol açar. Özellikle çok katlı yapılarda, yüksek tavanlı mekânlarda ve shaft, merdiven boşluğu gibi düşey bağlantı elemanlarında baca etkisi daha belirgin hale gelir. Doğal havalandırma tasarımında bu etki, kirli ve ısınmış havanın üstten uzaklaştırılması için avantaj sağlayabilir; ancak kış aylarında kontrolsüz gerçekleştiğinde önemli ısı kayıplarına yol açabilir. Bu nedenle, baca etkisinin mimari tasarım sürecinde yerel iklim koşulları, bina yüksekliği ve açıklıkların konumlandırılması ile değerlendirilmesi gerekmektedir (Linden, 1999). Bu mekanizma, özellikle yüksek

tavanlı binalarda veya çatıda stratejik olarak yerleştirilmiş açıklıklarda etkili bir şekilde kullanılabilir (ASHRAE ,2021).

**Hava Akışı Sürekliliği:** Havalandırmanın etkinliği, hava giriş ve çıkış açıklıkları arasındaki farktan etkilenir. Bu nedenle, açıklıkların uygun boyutta ve yerleşimde olması, hava akışının sürekliliğini ve verimliliğini artırır.

**Doğru Açıklık Tasarımı ve Yerleşimi:** Hava giriş ve çıkış noktalarının optimum yerleşimi, akışın yönlendirilmesinde önemli bir rol oynar. Giriş açıklıkları genellikle rüzgârın yoğun olduğu bölgelere, çıkış açıklıkları ise yüksek basınç farkı oluşturabilecek alanlara yerleştirilmelidir.

**Yerel İklim Koşulları:** Doğal havalandırma tasarımı, yerel iklim koşullarına uygun olarak yapılmalıdır. Örneğin, sıcak bölgelerde çapraz havalandırma tercih edilirken, soğuk bölgelerde ısı kaybını en aza indiren baca etkisi kullanılabilir.

**Hava Akışı Yollarının Engellenmemesi:** İç mekânda hava akışını engelleyecek mobilya veya diğer engellerin bulunmaması önemlidir. Havanın serbestçe dolaşabilmesi için iç mekân düzenlemelerinin havalandırmaya uygun şekilde yapılması gerekmektedir.

**Kontrollü Havalandırma:** Doğal havalandırma sisteminin verimli çalışması için açıklıklar, kullanıcıların ihtiyaçlarına göre kontrol edilebilir olmalıdır. Bu, hava akışını optimize etmek ve enerji verimliliğini artırmak için önemlidir.

Bu temel ilkeler hem mevcut binaların iyileştirilmesi hem de yeni yapıların tasarımında etkili bir doğal havalandırma sistemi oluşturulmasını sağlar. Doğal havalandırma, sürdürülebilir ve enerji verimli bina tasarımı açısından vazgeçilmez bir unsurdur.

### 2.5.3. Doğal havalandırma sistemine etki eden faktörler

Doğal havalandırma, rüzgâr ve termal kaldırma kuvveti gibi çevresel etkilere dayanarak yapı içerisindeki hava sirkülasyonunu sağlama prensibine dayanan pasif bir havalandırma yöntemidir. Bu sistemin etkinliği; fiziksel, çevresel ve tasarımsal birçok faktörden doğrudan etkilenmektedir (Clements-Croome, 2014; Etheridge & Sandberg, 1996). Aşağıda doğal havalandırma sistemine etki eden başlıca faktörler özetlenmiştir:

**Rüzgâr Hızı ve Yönü:** Rüzgâr, doğal havalandırmanın en temel itici gücüdür. Rüzgârın hızı ve yönü, bina çevresindeki basınç dağılımını değiştirerek iç mekâna giren ve çıkan hava miktarını doğrudan etkiler. Bu nedenle, açıklıkların hâkim rüzgâr yönüne uygun olarak konumlandırılması, sistemin verimliliğini önemli ölçüde artırır (Givoni,

1998). Özellikle bölgesel hâkim rüzgâr yönünün bilinmesi, açıklıkların planlanmasında ve yönlendirilmesinde kritik rol oynamaktadır.

**Termal Farklılıklar (Baca Etkisi):** İç ve dış ortamlar arasındaki sıcaklık farkı, termal kaldırma kuvvetini oluşturur. Bu durum, özellikle soğuk iklim bölgelerinde, sıcak havanın yükselerek doğal hava sirkülasyonu sağlamasına olanak tanır. Baca etkisinden maksimum düzeyde faydalanabilmek için uygun açıklık tasarımları yapılmalıdır (Awbi, 2017). Ayrıca baca etkisinin güçlü olduğu koşullarda, doğal havalandırma yalnızca yaz aylarında değil, geçiş ve kış mevsimlerinde de etkin biçimde kullanılabilir.

**Açıklıkların Boyutu ve Yerleşimi:** Havalandırma açıklıklarının büyüklüğü ve konumu, hava değişim oranını ve akış yönünü belirleyen en önemli unsurlardandır. Yeterli büyüklükte ve doğru konumlandırılmış açıklıklar, hava akışını optimize eder (Etheridge & Sandberg, 1996). Çapraz havalandırma sağlanabilmesi için açıklıkların zıt cephelerde veya uygun köşe bölgelerde planlanması gerekmektedir.

**Binanın Konumu ve Çevresel Faktörler:** Bina çevresindeki diğer yapılar, bitki örtüsü ve topografik özellikler, doğal havalandırmanın etkinliğini etkileyebilir. Yoğun yapılaşmanın olduğu bölgelerde hava akışı azalabilir; açık alanlara yakın konumlandırılan binalarda ise doğal havalandırma daha etkin çalışır (Givoni, 1998). Ayrıca, çevresel engellerin rüzgâr hızını kesici veya yön değiştirici etkisi, tasarım aşamasında dikkate alınmalıdır.

**İç Mekân Düzeni:** Mobilyaların, bölmelerin ve diğer iç mekân elemanlarının yerleşimi, hava akış yollarını doğrudan etkiler. Bu nedenle, iç mekân tasarımı yapılırken hava dolaşımını engellemeyecek şekilde düzenleme yapılmalıdır (Clements-Croome, 2014). Özellikle büyük ölçekli sınıf, konferans salonu veya cami gibi yapılarda, iç mekân düzenlemesi hava akım paternlerini ciddi şekilde değiştirebilir.

**Yerel İklim Koşulları:** Doğal havalandırmanın performansı, bölgenin sıcaklık, nem ve rüzgâr profiline bağlı olarak değişir. Sıcak ve nemli iklimlerde çapraz havalandırma daha etkin olurken, soğuk iklimlerde ısı kaybını azaltmaya yönelik tasarım önlemleri alınmalıdır (Givoni, 1998). İklim verilerine bağlı olarak açıklık büyüklüğü, sayısı ve açılma-kapanma mekanizmalarının optimize edilmesi gerekmektedir.

**Bina Geometrisi ve Yüksekliği:** Binanın şekli ve yüksekliği hem rüzgâr hem de termal akıştan faydalanma kapasitesini etkiler. Yüksek binalar, baca etkisini daha iyi kullanabilirken, yatayda geniş yapıların rüzgâr yönlendirmesi zorlaşabilir (Awbi, 2017). Ayrıca köşe bölgelerin, açıklık yerleşiminde rüzgâr yönlendirme açısından avantaj sunduğu bilinmektedir.

**Havalandırma Sistemine Entegre Tasarımlar:** Güneş bacaları, rüzgâr kuleleri ve benzeri pasif sistemler, doğal havalandırmayı destekleyen unsurlardır. Bu tür sistemlerin bütünleştirilmesi, özellikle sıcak iklimlerde hava akışını artırarak konfor ve enerji verimliliği sağlar (Clements-Croome, 2014). Bu bütünleşmiş sistemler, bağımsız açıklıklara oranla daha yönlendirilmiş ve kontrollü hava sirkülasyonu oluşturur.

**Sezonluk Değişimler:** Mevsimsel değişimler, doğal havalandırmanın performansını doğrudan etkiler. Yaz aylarında serin hava sağlamak, kış aylarında ise ısı kaybını önlemek için açıklıkların kontrol edilebilir olması gerekmektedir (Etheridge ve Sandberg, 1996). Otomatik açılır-kapanır sistemler veya yönlendirilebilir açıklıklar, mevsimsel adaptasyonu artıran önemli tasarım unsurlarıdır.

**Hava Sızdırmazlığı:** Bina kabuğunun sızdırmazlığı, istenmeyen hava hareketlerini önleyerek doğal havalandırmanın daha kontrollü ve verimli çalışmasını sağlar. Aksi durumda, sistem performansı düşebilir (Awbi, 2017). Bununla birlikte, gereğinden fazla sızdırmaz bir bina kabuğu, kontrollü açıklıklar dışında hava değişimini engelleyebileceği için optimum denge gözetilmelidir.

Tüm bu faktörlerin dikkate alınarak tasarlanması, doğal havalandırma sisteminin etkinliğini artırır; bu da hem iç mekân konforunu yükseltir hem de enerji verimliliği açısından önemli katkılar sağlar. Günümüzde sürdürülebilir bina tasarımının vazgeçilmez unsurlarından biri olarak doğal havalandırma, çevre dostu ve düşük maliyetli bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Özellikle pandemi süreci sonrasında, iç mekân hava kalitesinin önemi artmış; doğal havalandırmanın sağlık, konfor ve enerji tasarrufu açısından öncelikli bir tasarım kriteri olarak ele alınması gerekliliği daha da belirgin hâle gelmiştir.

#### 2.5.4. Yapı kabuğunun doğal havalandırma üzerine etkileri

Yapı kabuğu, bir binanın çevresiyle olan fiziksel, termal ve hava akımı etkileşimini sağlayan en temel unsurlardan biridir. Doğal havalandırma açısından yapı kabuğu, hem iç mekândaki hava dolaşımını yönlendiren hem de dış ortam koşullarını iç mekâna taşıyan bir geçiş katmanı olarak işlev görür (Givoni, 1998; Awbi, 2017). Bu nedenle yapı kabuğunun tasarımı, doğal havalandırma performansını doğrudan etkileyen kritik bir tasarım parametresi olarak ele alınmalıdır.

Yapı kabuğunun doğal havalandırma üzerindeki etkileri aşağıdaki başlıklarda incelenebilir:

**Açıklıkların Konumu ve Boyutu:** Yapı kabuğunda yer alan pencere, kapı ve havalandırma açıklıkları, doğal havalandırmanın etkinliğini doğrudan belirleyen unsurlardır. Doğru konumlandırılmış ve yeterli büyüklükte tasarlanan açıklıklar, özellikle çapraz havalandırmayı ve baca etkisini destekleyerek iç mekânda etkili hava değişimini sağlar (Etheridge ve Sandberg, 1996; Givoni, 1998). Özellikle hâkim rüzgâr yönü dikkate alınarak cephelerde geniş açıklıklar oluşturulması, hava girişini optimize ederken, üst bölgelerde konumlandırılan çıkış açıklıkları ise sıcak havanın tahliyesine katkı sağlar.

**Malzeme Seçimi ve Termal Performans:** Yapı kabuğunu oluşturan malzemelerin ısı geçirgenlik özellikleri, iç mekânın termal dengesini ve havalandırma performansını doğrudan etkiler. İyi yalıtılmış bir kabuk, istenmeyen hava sızmalarını azaltırken, kontrollü hava giriş-çıkışının sağlanmasına olanak tanır. Ayrıca, nefes alabilen malzeme kullanımı, doğal havalandırmayı destekleyerek iç mekânda nem kontrolünü de kolaylaştırır (Clements-Croome, 2014).

**Cephe Tasarımı ve Aerodinamik Etkiler:** Yapı kabuğunun geometrisi ve cephe tasarımı, rüzgârın bina yüzeyindeki davranışını ve basınç dağılımını etkiler. Aerodinamik açıdan uygun tasarlanmış cepheler, rüzgâr hızını artırarak doğal havalandırma performansını iyileştirebilir. Örneğin, eğimli çatı formları veya uygun yüzey geometrisi, rüzgârın istenilen bölgelerde toplanmasını ve hava akışının yönlendirilmesini sağlar (Awbi, 2017; Givoni, 1998).

**Güneş Kontrol Elemanları ve Havalandırma:** Cepheye entegre edilen güneş kırıcılar, pergolalar ve hareketli paneller, sadece gün ışığını kontrol etmekle kalmaz; aynı zamanda hava akışını yönlendirme potansiyeline de sahiptir. Bu tür elemanlar, termal konforu artırırken doğal havalandırma stratejilerini destekleyebilecek şekilde tasarlanmalıdır (Clements-Croome, 2014).

**Bölgesel ve İklimsel Uyum:** Yapı kabuğunun doğal havalandırmaya katkısı, bölgesel iklim koşulları ve hâkim rüzgâr yönleri dikkate alınarak tasarlanmalıdır. Sıcak ve nemli iklimlerde geniş açıklıklar ve çapraz havalandırma öncelikli tasarım yaklaşımları tercih edilirken, soğuk iklimlerde ısı kaybını azaltacak daha kontrollü açıklıklar uygulanmalıdır (Etheridge & Sandberg, 1996; Givoni, 1998).

Sonuç olarak, yapı kabuğu, doğal havalandırma stratejilerinin temel unsurlarından biri olarak ele alınmalı; çevresel veriler, kullanıcı konforu ve enerji verimliliği dikkate alınarak tasarlanmalıdır. Doğru tasarlanmış bir yapı kabuğu, doğal havalandırma kapasitesini artırarak hem sağlıklı iç ortam koşulları sağlar hem de binanın enerji tüketimini azaltır.

### 3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (CFD) İLE DOĞAL HAVALANDIRMA SİMÜLASYONU

#### 3.1. CFD Simülasyonu

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD), akışkanların (sıvı ve gazların) hareketlerini, fiziksel ve kimyasal özelliklerini matematiksel modeller ve sayısal yöntemler kullanarak bilgisayar ortamında simüle eden bilim dalıdır (Versteeg & Malalasekera, 2007). CFD, fiziksel deneylerle elde edilmesi zor veya maliyetli olan akışkan davranışlarının anlaşılmasını sağlar. Bu yöntemler sayesinde mühendisler, araştırmacılar ve tasarımcılar, karmaşık akışkan sistemlerini dijital ortamda analiz ederek performanslarını optimize edebilirler.

CFD, akışkanların hız, basınç, sıcaklık ve yoğunluk gibi parametrelerinin uzay ve zamandaki değişimini hesaplayarak, özellikle mühendislik, çevre bilimleri, biyomedikal alanlar ve mimarlık gibi disiplinlerde önemli uygulamalara sahiptir. Mimarlıkta CFD, bina tasarımlarında doğal havalandırma sistemlerinin tasarlanması, iç ortam hava kalitesi analizleri, rüzgâr etkilerinin modellenmesi ve yangın güvenliği simülasyonlarında kullanılmaktadır (Blocken, 2015).

Doğal havalandırma simülasyonlarında CFD kullanımı, hava akışının, basınç dağılımının, sıcaklık değişimlerinin ve kirletici taşınımının üç boyutlu ve zamana bağlı olarak analiz edilmesine imkân tanır. Bu yaklaşım, rüzgâr etkisi, sıcaklık farkı ve mekânsal düzen gibi faktörlerin iç ortam hava hareketine etkilerini ayrıntılı biçimde incelemeye olanak verir. CFD simülasyonları sayesinde farklı tasarım senaryoları, deneysel çalışmalara kıyasla daha kısa sürede, daha düşük maliyetle ve tekrarlanabilir koşullar altında değerlendirilebilir. Böylece doğal havalandırma sistemlerinin performansını önceden öngörmek ve olası iyileştirmeleri belirlemek mümkün hale gelir.

##### 3.1.1. CFD tarihçesi

CFD'nin gelişimi, bilgisayar teknolojilerinin evrimiyle doğrudan ilişkilidir. II. Dünya Savaşı sırasında geliştirilen ENIAC, elektronik veri işleme kapasitesine sahip ilk bilgisayar olarak 1940'ların ortasında bilim dünyasına kazandırılmıştır. ENIAC, 167 metre karelik bir alanı kaplayan ve 30 ton ağırlığında olan büyük bir cihaz olmasına rağmen, o zamana kadar el ile yapılan karmaşık hesaplamaların çok daha hızlı

yapılmasını sağlamıştır (Bhattacharyya vd., 2021). Bu gelişme, akışkanların hareketini matematiksel olarak tanımlayan Navier-Stokes denklemlerinin sayısal olarak çözülmesi yolunda ilk adım olmuştur.

1950’lerde CFD’in gelişimi ABD’de Los Alamos ve Livermore ulusal laboratuvarlarında hız kazanmıştır. Bu laboratuvarlarda yapılan çalışmalar, nükleer araştırmalar başta olmak üzere yüksek performans gerektiren pek çok fiziksel problemi çözmek için büyük bilgisayarlar kullanılmıştır. Bu dönemde, deformasyon gösteren ortamlarda akışkanların davranışlarını modelleyen karmaşık sayısal kodlar geliştirilmiştir. Bu metodolojiler, Livermore’lu bilim insanları Alder, Fernbach ve Rotenberg tarafından derlenen ve Academic Press tarafından yayımlanan “Methods in Computational Physics” kitap serisinde sistematik bir şekilde sunulmuştur. 1967’den itibaren ise “Journal of Computational Physics” dergisi, CFD alanındaki bilimsel gelişmelerin merkezi yayın organı olmuştur (Van Leer, 1999).

1970’lerde sonlu farklar, sonlu elemanlar ve sonlu hacim yöntemlerinin geliştirilmesi ile CFD’nin çözüm kapsamı genişlemiş ve karmaşık geometrilere uygulama imkânı doğmuştur. 1990’lardan itibaren ise paralel işlemcilerin kullanımı ve yüksek performanslı bilgi işlem (HPC) teknolojilerindeki gelişmeler, çok daha büyük ve detaylı CFD simülasyonlarının yapılabilmesini sağlamıştır. Günümüzde, CFD alanı hem akademik hem de endüstriyel uygulamalarda ayrılmaz bir araç olarak kullanılmaktadır.

### 3.1.2. CFD analiz sürecinin temel aşamaları

CFD analizleri belirli adımlar izlenerek gerçekleştirilir. Bu adımların her biri, simülasyonun doğruluğunu ve güvenilirliğini doğrudan etkiler. CFD analizleri belirli adımlar izlenerek gerçekleştirilir. Bu adımların her biri, simülasyonun doğruluğunu ve güvenilirliğini doğrudan etkiler.

**Geometrinin Oluşturulması:** İlk aşama, analiz yapılacak akışkan ortamın veya fiziksel yapının üç boyutlu sayısal modelinin CAD programları aracılığıyla hazırlanmasıdır. Model, gerçek sistemi mümkün olduğunca doğru yansıtmalıdır.

**Mesh (Ağ) Oluşturma:** Geometri, küçük hücrelere (mesh) bölünür. Mesh kalitesi, hücre sayısı ve tipi (yapısal, yapısal olmayan) analiz sonuçlarının hassasiyetini belirler. İnce mesh, daha doğru sonuçlar sağlar ancak hesaplama süresini artırır.

**Fiziksel Modellerin Seçimi:** Akışkanın türü, türbülans modeli (örneğin k- $\epsilon$ , LES), ısı transferi ve kimyasal reaksiyonlar gibi ilgili fiziksel süreçler belirlenir. Bu aşama, simülasyonun gerçekçi olabilmesi için önemlidir.

**Sınır Koşullarının Tanımlanması:** Akışın giriş ve çıkış noktaları ile yüzeylerin özellikleri ve koşulları tanımlanır. Örneğin, sabit hız giriş koşulu veya sıcaklık sınırı gibi.

**Sayısal Çözüm:** Navier-Stokes denklemleri ve seçilen fiziksel modeller, bilgisayar ortamında sayısal yöntemlerle çözülür. Genellikle iteratif yöntemler kullanılarak denklemlerin yakınsaması sağlanır.

**Sonuçların Analizi ve Doğrulama:** Simülasyon sonuçları, görselleştirme teknikleri ile incelenir. Ayrıca, deneysel veriler veya literatürle karşılaştırılarak doğruluk kontrolü yapılır.

### 3.1.3. CFD yazılımları ve mimarlıkta kullanımı

CFD analizleri için çok sayıda yazılım geliştirilmiştir. Akademik ve endüstriyel kullanıma uygun olan ANSYS Fluent, Solidworks Flow Simulation, OpenFOAM, COMSOL Multiphysics, SimScale, STAR-CCM+, FloEFD ve Autodesk CFD gibi yazılımlar yaygın şekilde tercih edilmektedir (Çizelge 3.1.). Bu yazılımlar, geniş fiziksel model çeşitliliği, kullanıcı dostu arayüzler ve güçlü hesaplama altyapıları ile karmaşık akış problemlerinin modellenmesini mümkün kılar.

**Çizelge 3.1.** CDF yazılımları

| Program Adı                       | Geliştirici       | Özellikler ve Kullanım Alanları                                                                                                          |
|-----------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ANSYS Fluent</b>               | ANSYS Inc.        | Yaygın kullanılan, ileri düzey analizler. Otomotiv, havacılık, enerji alanlarında kullanılır. Mimarlık ve makine tasarımı için idealdir. |
| <b>OpenFOAM</b>                   | OpenCFD Ltd.      | Açık kaynak, araştırma ve akademiye yaygın. Paralel işlemeye uygundur.                                                                   |
| <b>COMSOL Multiphysics</b>        | COMSOL Inc.       | Çoklu fiziksel etkileşim simülasyonları için uygundur.                                                                                   |
| <b>STAR-CCM+</b>                  | Siemens           | Otomotiv ve denizcilikte kullanılır. Akışkan-yapı etkileşimi simülasyonlarında güçlüdür.                                                 |
| <b>SimScale</b>                   | SimScale GmbH     | Bulut tabanlıdır, küçük ölçekli firmalar için uygundur.                                                                                  |
| <b>Autodesk CFD</b>               | Autodesk          | Mimarlıkta ısı yayılımı ve havalandırma için kullanılır. Revit ile entegredir.                                                           |
| <b>SolidWorks Flow Simulation</b> | Dassault Systèmes | Kullanıcı dostu arayüz, temel CFD analizleri, mimarlık ve makine tasarımı için idealdir.                                                 |
| <b>FloEFD</b>                     | Siemens           | SolidWorks ve Creo ile bütünleşmiş çalışır, tasarıma gömülü analiz sağlar.                                                               |

Mimarlık disiplininde CFD, özellikle bina içi hava akışının modellenmesi, doğal havalandırma stratejilerinin optimize edilmesi, iç hava kalitesinin iyileştirilmesi ve yangın dumanının yayılımının incelenmesi gibi alanlarda kritik bir araçtır. Bu analizler sayesinde enerji verimliliği artırılırken, bina kullanıcılarının konfor ve güvenliği sağlanmaktadır (Blocken, 2015). Özellikle sürdürülebilir tasarımda, rüzgâr yüklerinin ve çevresel akışların analiz edilmesi, yapıların performansını artırmak için vazgeçilmezdir.

### 3.1.4. SolidWorks Flow Simulation yazılımı

SolidWorks Flow Simulation yazılımı, CAD ile tam entegrasyon sağlayan güçlü bir CFD aracıdır. Bu yazılım, SolidWorks tasarım ortamı içinde doğrudan akış analizleri yapma imkânı sunar. Kullanıcı dostu arayüzü ve otomatik mesh oluşturma özellikleri sayesinde, mühendisler ve mimarlar karmaşık akış problemlerini daha kısa sürede çözebilirler. Isı transferi, türbülans analizi ve çok fazlı akış simülasyonları gibi geniş uygulama alanları mevcuttur. Tasarım sürecinin erken aşamalarında CFD sonuçlarına ulaşmak, revizyonların ve optimizasyonların hızlı yapılmasına olanak tanır (SolidWorks, 2023).

#### 3.1.4.1. SolidWorks Flow Simulation yazılımı genel kullanım adımları

Bu çalışmada kullanılan SolidWorks Flow Simulation yazılımı, sıvı ve gaz akışlarının, ısı transferinin ve ilgili fiziksel süreçlerin üç boyutlu olarak simüle edilmesine olanak tanıyan kapsamlı bir analiz aracıdır. Yazılım, özellikle mühendislik ve mimarlık disiplinlerinde tasarım sürecine entegre edilerek, ürün veya mekân performansının önceden değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. SolidWorks Flow Simulation'ın genel kullanım adımları aşağıda özetlenmiştir.

- **Geometri Modelinin Hazırlanması:** Analiz yapılacak model, SolidWorks CAD ortamında oluşturulur veya mevcut bir model üzerine gerekli düzenlemeler yapılır. Modelleme sırasında akış analizinin sağlıklı sonuç verebilmesi için akışkanın geçeceği tüm hacmi kapsayan kapalı hacim (enclosure) tanımı yapılmalıdır.
- **Flow Simulation Eklentisinin Aktifleştirilmesi:** Flow Simulation modülünün kullanılabilmesi için üst menüden Tools> Add-ins sekmesine girilir ve "SolidWorks Flow Simulation" kutucuğu işaretlenerek eklenti aktif hale getirilir.

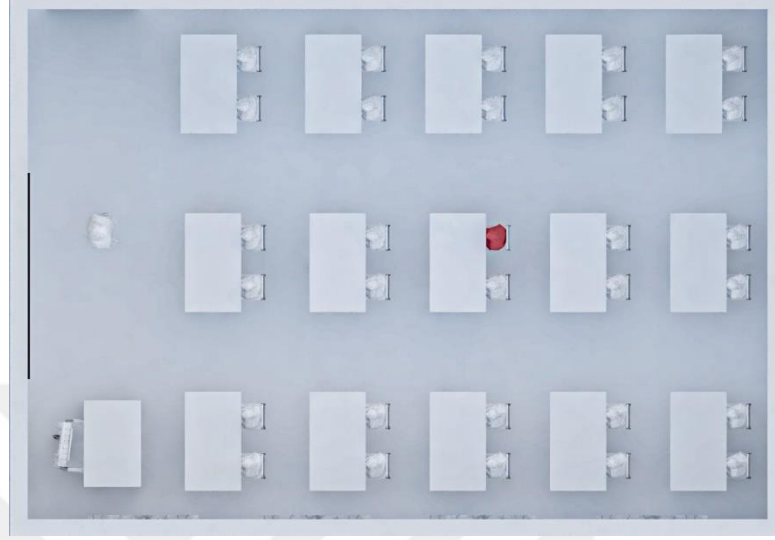
- **Yeni Proje Başlatılması:** Flow Simulation sekmesi üzerinden Wizard (Sihirbaz) seçeneğiyle yeni bir analiz başlatılır. Analiz türü (iç akış veya dış akış), birim sistemi, yerçekimi etkisi gibi temel fiziksel parametreler bu aşamada belirlenir.
- **Malzeme ve Akışkan Tanımlamaları:** Modelde yer alan katı parçaların malzeme özellikleri ve akışkan ortam (hava, su, karbondioksit vb.) tanımlanır. Bu tanımlar, analiz doğruluğunu ve gerçekçiliğini doğrudan etkiler.
- **Sınır Koşullarının Belirlenmesi:** Model üzerinde giriş (velocity inlet, pressure inlet), çıkış (environment pressure), duvarlar ve gerekirse simetri yüzeyleri gibi sınır koşulları atanır. Isı transferi içeren analizlerde, sıcaklık ve ısı akısı gibi parametreler de eklenir.
- **Mesh (Ağ Yapısı) Oluşturulması:** Hesaplama doğruluğunu etkileyen ağ yapısı (mesh) otomatik veya manuel olarak oluşturulur. Karmaşık geometriler veya detaylı analiz gerektiren bölgelerde ağ yoğunluğu artırılabilir.
- **Analizlerin Çalıştırılması:** Tüm hazırlıkların ardından Run komutu ile simülasyon başlatılır. Simülasyon süresi, modelin karmaşıklığı ve mesh yoğunluğuna bağlı olarak değişkenlik gösterebilir.
- **Sonuçların İncelenmesi ve Değerlendirilmesi:** Analiz tamamlandıktan sonra elde edilen sonuçlar; basınç dağılımı, hız konturları, sıcaklık dağılımı, akış çizgileri ve kesit düzlemleri gibi görsel çıktılar üzerinden yorumlanır. İhtiyaç halinde farklı senaryolar arasında karşılaştırmalı analiz yapılabilir.
- **Raporlama ve Görsel Çıktıların Alınması:** Analiz sonuçları istenilen formatlarda (HTML, Word, PDF) raporlanabilir. Görsel çıktılar yüksek çözünürlükte dışa aktarılabilir ve akademik çalışmalarda veya teknik raporlarda kullanılabilir.

Bu genel adımlar, farklı senaryo ve tasarım ihtiyaçlarına göre uyarlanabilmekte ve SolidWorks Flow Simulation yazılımının esnek yapısı sayesinde geniş bir uygulama alanı sunmaktadır.

### 3.2. Modelleme

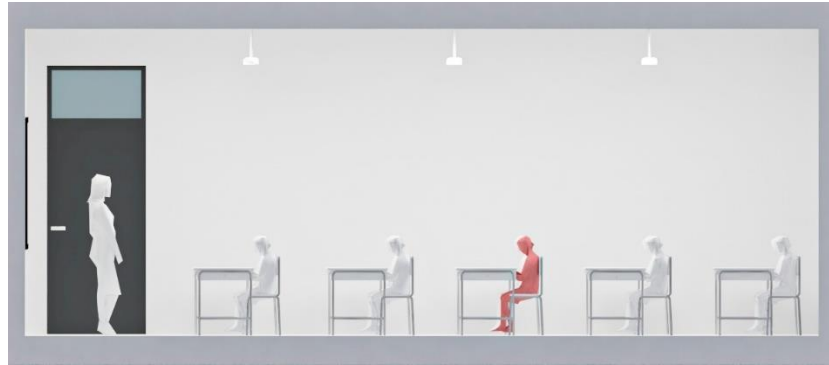
Ortaokul dersliklerinde uygun hava kalitesini sağlamak amacıyla mevcut durum analiz edilmiş ve alternatif çözüm önerileri geliştirilmiştir. Çalışma da kullanılan teorik sınıf modeli, Millî Eğitim Bakanlığı Yatırımlar ve Tesisler Dairesi Başkanlığı tarafından hazırlanan “Eğitim Yapıları Mimari Proje Hazırlanması Genel İlkeleri” (Url-1) esas

alınarak tasarlanmıştır. Bu kapsamda, standartlara uygun bir derslik tasarım planı Şekil 3.1.'de sunulmaktadır. Teorik Sınıf; 8x6m ebatlarında 3,2 m yüksekliğinde 30 öğrenci için düşünülmüştür.



Şekil 3.1. Teorik sınıf plan

Çalışmada kullanılan sınıf modeli, gerçekçi bir oturma düzeni ve kullanıcı yerleşimi esas alınarak oluşturulmuştur. Enfekte birey, sınıfın orta sırasındaki bir öğrenci olarak oturur pozisyonda modellenmiş ve görselde kırmızı renkle belirtilmiştir. Diğer öğrenciler de oturur durumda konumlandırılmıştır.



Şekil 3.2. Teorik sınıf yatay kesit

Öğretmen ise ders anlatımı sırasında sınıfın ön kısmında ayakta yer almaktadır. Bu yerleşim senaryosu, sınıf içi hava hareketlerinin ve partikül yayılımının gerçeğe en yakın şekilde incelenmesine olanak sağlamaktadır. Bu bağlamda virüs partiküllerinin

çıkış yüksekliği 1,20 m olarak kabul edilmiştir. Şekil 3.2.ve Şekil 3.3.’te tasarlanan teorik sınıf modelinin yatay kesiti ve perspektifi gösterilmektedir.



**Şekil 3.3.** Teorik sınıf perspektif

Çalışmada kullanılan sınıf modeli 8x6 m boyutlarında 3,2 m yükseklikte tasarlanmıştır. Uzun cephe alanı aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır:

$$\text{Cephe} = 8 \text{ m} \times 3,2 \text{ m} = 25,60 \text{ m}^2$$

Pencereler iki kanatlı olup yalnızca tek kanadı açılır konumda modellenmiştir.

Tek kanat açıklık alanı:

$$\text{Pencere} = 0,50 \text{ m} \times 1,20 \text{ m} = 0,60 \text{ m}^2$$

Açıklık oranı (AO) ise şu formül ile belirlenmiştir:

$$\text{AO (\%)} = (\text{Toplam Açıklık Alanı} / \text{Cephe Alanı}) \times 100$$

Kapı ölçüleri 1,00 m × 2,20 m olmakla birlikte, derslik kapısı koridora açıldığından ve koridorun taze hava ile beslenmediği varsayıldığından, kapı alanı doğal havalandırma açıklık oranı hesaplamalarına dâhil edilmemiştir.

**Çizelge 3.2.** Senaryolara Göre Açıklık Alanı ve Oranları

| Senaryo | Pencere Açık Kanat Sayısı | Toplam Açıklık Alanı (m <sup>2</sup> ) | Açıklık Oranı (%) |
|---------|---------------------------|----------------------------------------|-------------------|
| S1      | 0                         | 0                                      | 0                 |
| S2-S5   | 1                         | 0,60                                   | 2,34              |
| S3-S4   | 2                         | 1,20                                   | 4,69              |
| S6      | 4                         | 2,40                                   | 9,38              |

Bu hesaplamalar sonucunda, tek pencere senaryoları (%2,34) ASHRAE 62.1 ve REHVA tarafından önerilen minimum %4–5 doğal havalandırma açıklık alanı gerekliliğinin oldukça altında kalmaktadır. İki pencere senaryoları (%4,69) önerilen eşige yakın değerler sunmakta, dört pencere senaryosu (%9,38) ise bu değer yaklaşık iki katına ulaşmaktadır (Çizelge 3.2.). Açıklık oranının artması, özellikle çapraz havalandırma koşullarında hava değişim oranını ve partikül tahliye performansını belirgin şekilde artırmaktadır.

### 3.3. Simülasyon Çalışması

Simülasyon süreci, SolidWorks Flow Simulation yazılımı kullanılarak yürütülmüştür. Öncelikle sınıf ortamının geometrisi modellenmiş, ardından çözüm alanı düzenli dörtgen hücrelerden oluşan mesh ile bölünmüştür. Sınır koşulları ve senaryo parametreleri tanımlandıktan sonra, partikül yayılımı ve hava akışı çözümleri gerçekleştirilmiş, sonuçlar analiz edilmiştir.

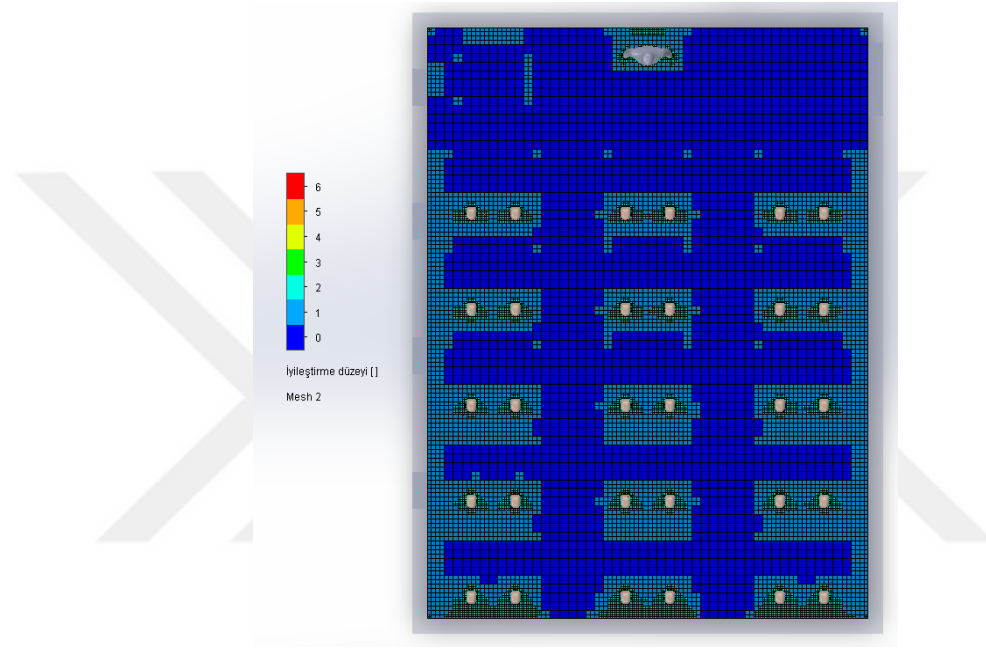
#### 3.3.1. Modelin Mesh (Ağ) yapısı ve sayısal çözüm hazırlığı

Simülasyon çalışmasına başlamadan önce, teorik sınıf modeli SolidWorks Flow Simulation yazılımında detaylı bir şekilde oluşturulmuştur. Bu modelde sınıfın fiziksel yapısı, sıra düzeni ve öğrencilerin konumları, senaryoya uygun olarak tasarlanmıştır. Sınıfın mekânsal düzeni, analiz doğruluğunu artırmak amacıyla gerçekçi bir şekilde modellenmiştir.

Modelleme işlemi tamamlandıktan sonra, simülasyonun en kritik adımlarından biri olan meshleme sürecine geçilmiştir. Meshleme, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ve diğer sayısal analiz yöntemlerinde, çözüm alanının küçük ve basit geometrik hücrelere bölünmesi işlemidir. Bu işlem, karmaşık fiziksel problemin bilgisayar ortamında nümerik olarak çözülmesine olanak sağlar. Mesh yapısı, çözümün doğruluğu, kararlılığı ve hesaplama verimliliği üzerinde doğrudan etkili olup, uygun hücre tipi ve yoğunluğunun seçimi kritik öneme sahiptir (Versteeg ve Malalasekera, 2007). Genel olarak mesh tipleri, düzenli ve düzensiz olarak sınıflandırılır; düzenli meshler özellikle karmaşık olmayan geometrilerde çözüm stabilitesi ve hız açısından avantaj sağlarken, düzensiz meshler karmaşık geometri uygulamalarında esneklik sunar (Ferziger ve Perić, 2002).

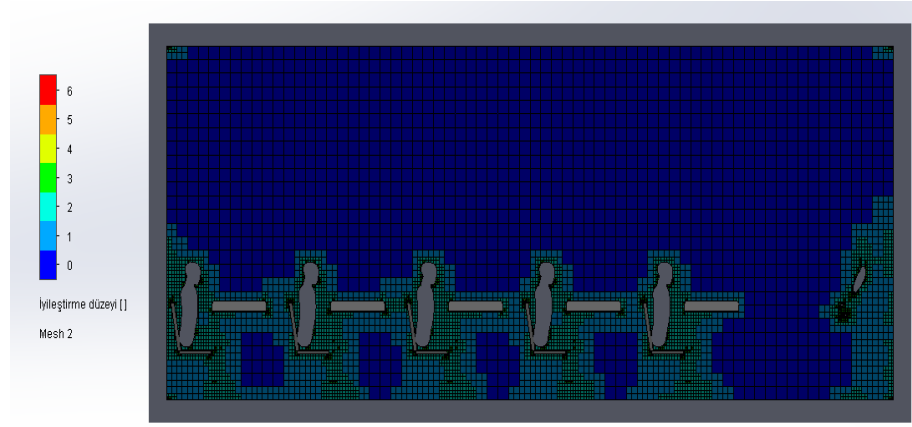
Hücrelerin boyutları ve dağılımı, analiz sonuçlarının güvenilirliği için dikkatlice belirlenmiştir. Daha ince bir mesh yapısı, hesaplama hassasiyetini artırırken işlem süresini de uzatmaktadır. Bu nedenle, kritik bölgelerde daha yoğun bir mesh yapısı tercih edilirken, daha az önem taşıyan bölgelerde daha geniş hücreler kullanılmıştır.

Meshleme sürecinde kullanılan parametreler, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) analizi için uygun olan ideal hücre yapısını oluşturmayı hedeflemiş ve simülasyon sonuçlarının hem doğruluk hem de verimlilik açısından optimize edilmesini sağlamıştır.



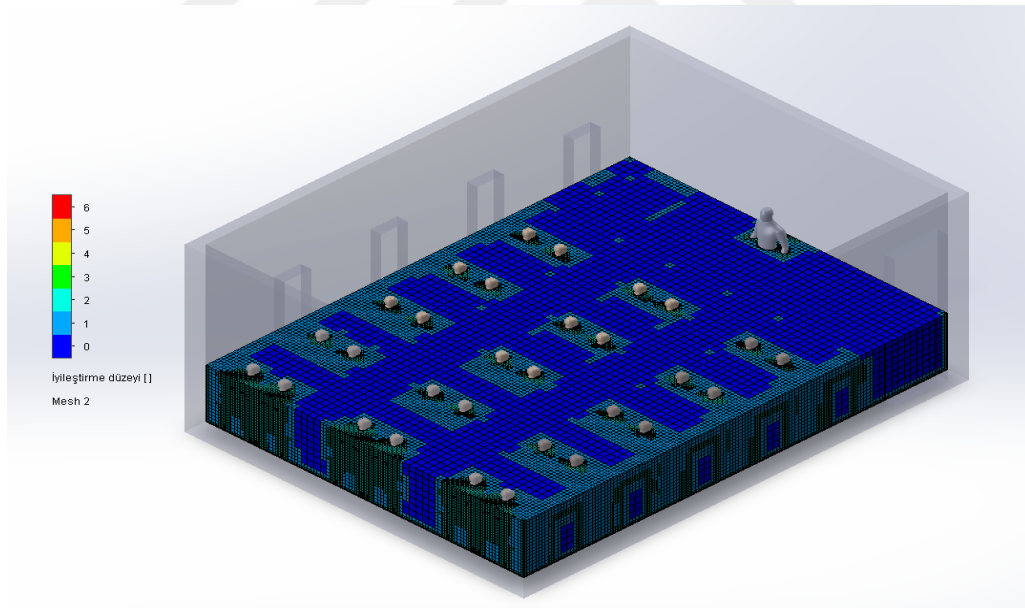
Şekil 3.4. Meshleme yapılan sınıf planı

Şekil 3.4.'te yer alan sınıf planı sayısal modelleme için oluşturulan mesh yapısını göstermektedir. Model, yaklaşık 6×8 m taban alanına ve 30 kişilik öğrenci kapasitesine sahip, pencere açıklıkları ve iç donanımları tanımlanmış bir sınıf ortamını temsil etmektedir. Hesaplama alanı, yalnızca aynı boyutta dörtgen hücrelerden oluşan düzenli bir mesh yapısı ile oluşturulmuştur. Kullanılan bu düzenli mesh yapısı hem laminar hem de türbülanslı akışların simülasyonlarında sayısal çözümün kararlılığını ve doğruluğunu artırmakta, aynı zamanda hesaplama süresini ve işlem yükünü azaltarak analizlerin daha verimli bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır (Ferziger ve Perić, 2002; Versteeg ve Malalasekera, 2007).



Şekil 3.5. Meshleme yapılan sınıf yatay kesiti

Söz konusu mesh yapısı, sınıfın tüm yatay düzlemini kapsayacak şekilde düzenlenmiş ve öğretmen masası, oturma sıraları ve diğer mimari elemanları detaylı bir şekilde içermektedir. Şekil 3.5. ve Şekil 3.6. da ise çözüm ağı (mesh yapısı) yapılan sınıfın yatay kesiti ve perspektifi gösterilmektedir.



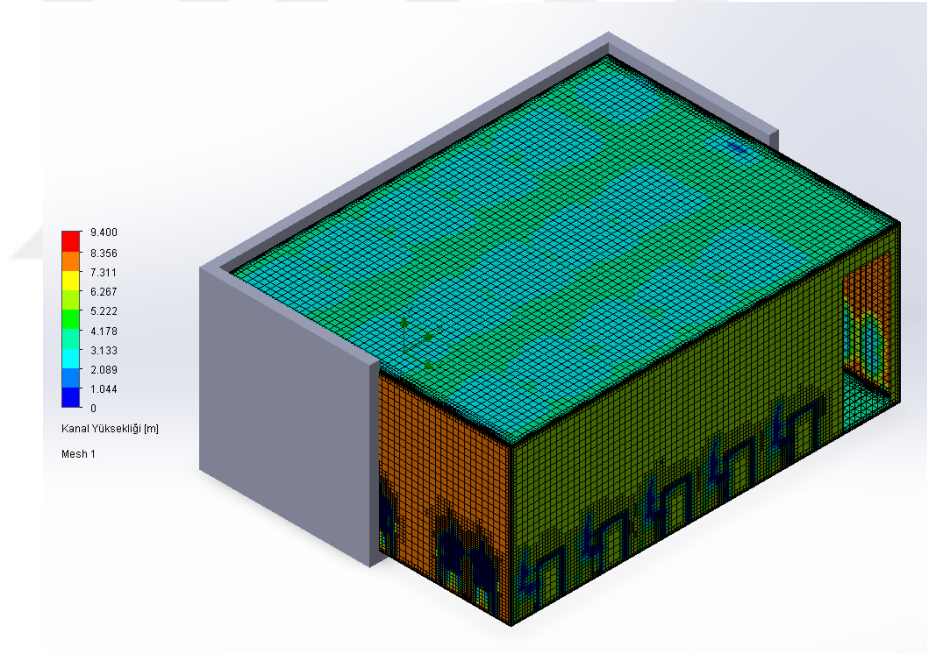
Şekil 3.6. Meshleme yapılan sınıf perspektifi

### 3.3.2. Mesh yoğunluğu ve yerel hassasiyet ayarları

Bu yerel yoğunlaştırma, özellikle aerosol yayılımı ve konvektif ısı transferinin yüksek gradyan gösterdiği bölgelerde çözüm kararlılığını ve doğruluğunu artırmak amacıyla yapılmıştır. Kritik bölgelerde hücre boyutu 1m'ye kadar düşürülürken, sınıf genelinde ise ortalama hücre boyutu 3–8 m aralığında tutulmuştur.

Şekil 3.7.'de renk skalası kullanılarak gösterilen hücre boyutları, mesh yoğunluğunu ifade etmektedir. Turuncu ve kırmızı tonlar, pencere açıklıkları, aerosol kaynak noktası (enfekte öğrenci) ve öğrenci oturma bölgeleri gibi daha detaylı çözüm gerektiren alanlarda kullanılmış yoğunlaştırılmış mesh bölgelerini göstermektedir.

Yeşil ve mavi tonlarla temsil edilen bölgeler, genellikle akışın homojen olduğu ve çözüm doğruluğu açısından daha az hassasiyet gerektiren alanlara karşılık gelmektedir.



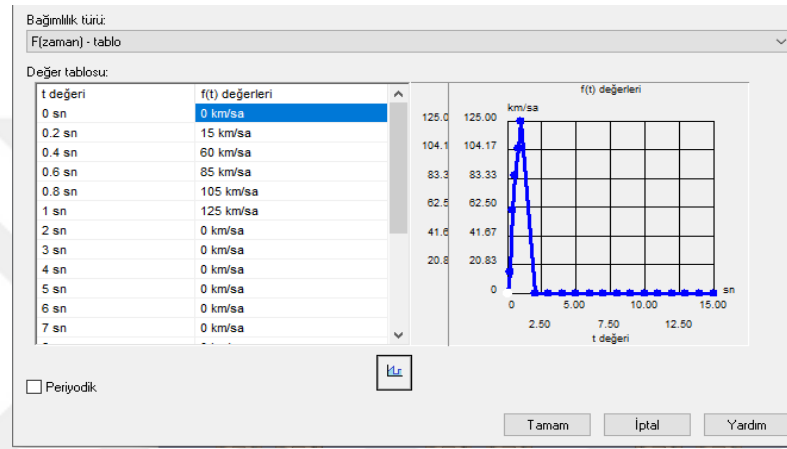
Şekil 3.7. Mehleme yapılan sınıf hücre ağı

### 3.3.3. Mesh kalitesi ve hesaplama etkisi

Ağ yapısının bu şekilde bölgelere göre optimize edilmesi, hem hesaplama süresinin makul düzeyde kalmasını sağlamakta hem de fiziksel olarak anlamlı sonuçlar elde edilmesine olanak tanımaktadır. Ortalama ağ yoğunluğu ve çözüm ağırlığı açısından bakıldığında, model yaklaşık olarak 500.000 ila 1.000.000 hücre aralığında

yapılandırılmıştır. Bu, zamana bağlı partikül dağılım analizleri için yeterli mesh çözünürlüğü sağlamaktadır (Moukalled, Mangani, & Darwish, 2016).

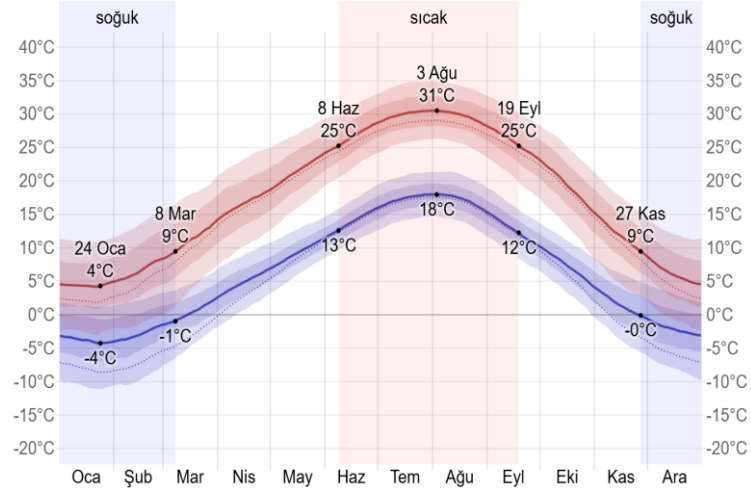
Şekil 3.8.'de hapsirme anında oluşan hız değişimini gösteren zaman-hız grafiği gösterilmiştir. Hapsirme başlangıcında hız 0 km/sa iken, 0.2 sn'de 15 km/sa'ye, 0.4 sn'de 60 km/sa'ye, 0.8 sn'de ise yaklaşık 105 km/sa'ye ulaşmakta ve 1 sn civarında pik değer olan 125 km/sa'ye erişmektedir. 2 sn'den itibaren hız tekrar sıfıra dönmektedir. Bu sonuçlar, hapsirmanın yüksek momentumlu ve kısa süreli bir hava akımı oluşturduğunu göstermektedir.



Şekil 3.8. Hapsirme hızının zamana bağlı grafiği

### 3.3.4. İklim verileri

Bu çalışmada, sınıf ortamındaki hava akımı ve partikül yayılımının mevsimsel farklılıklarını incelemek amacıyla SolidWorks Flow Simulation yazılımında üç farklı mevsim dikkate alınmıştır: Yaz mevsimi (Haziran), Sonbahar mevsimi (Ekim) ve kış Mevsimi (Aralık). Konya iline ait 2020-2024 yıllarının haziran, ekim ve aralık aylarının ortalama sıcaklık ve rüzgâr hızları, Meteoroloji Genel Müdürlüğünden alınmıştır (Şekil 3.9.).



Şekil 3.9. Konya İli Ortalama sıcaklık Grafiği

Çizelge 3.3. Dış ortam sıcaklığı ve rüzgâr hızı verileri

| Dönem/Ay        | Dış Ortam Sıcaklığı (°C) | Rüzgâr Hızı (km/sa) |
|-----------------|--------------------------|---------------------|
| Yaz (Haziran)   | 25                       | 12.2                |
| Sonbahar (Ekim) | 14                       | 11                  |
| Kış (Aralık)    | 1                        | 9                   |

Simülasyon senaryolarında yukarıda Çizelge 3.2.'de gösterilen sıcaklık ve rüzgâr hızı değerleri sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Dış ortam sıcaklığı, doğal havalandırma etkinliğini ve iç ortam sıcaklık dağılımını doğrudan etkileyen temel parametrelerden biri olarak dikkate alınmıştır. Rüzgâr hızı ise doğal havalandırma performansının ve partikül tahliyesinin değerlendirilmesinde kritik rol oynamaktadır.

### 3.4. Simülasyon Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Bu bölümde, üç farklı iklim verileri dikkate alınarak oluşturulan senaryolar doğrultusunda gerçekleştirilen CFD tabanlı simülasyonlardan elde edilen bulgular sunulmakta ve analiz edilmektedir. Hava akımı, partikül dağılımı, sıcaklık değişimleri ve tahliye süreleri gibi temel performans göstergeleri, mevsimsel iklim koşulları ve pencere konfigürasyonları bağlamında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bulgular hem doğal havalandırma etkinliğinin hem de iç ortam hava kalitesinin iyileştirilmesine yönelik tasarım kararlarının belirlenmesi açısından yorumlanmıştır.

### 3.4.1. Yaz mevsimi senaryosu

Yaz mevsimine ait senaryoların oluşturulmasında, Konya ili Meram ilçesine ait haziran ayı ortalama iklim verileri temel alınmıştır. Bu kapsamda dış ortam sıcaklığı, bağıl nem oranı ve hâkim rüzgâr hızları gibi meteorolojik değişkenler göz önünde bulundurularak modelleme gerçekleştirilmiştir. Dış ortam sıcaklığı yaklaşık 25 °C, dış ortam bağıl nem ortalama %40, iç ortam bağıl nem ortalama %50, rüzgâr hızı ise 12,2 km/sa alınarak simülasyonlar bu değerler doğrultusunda yapılandırılmıştır. Sınıf modeli, bölgenin hâkim rüzgâr yönü olan kuzey-kuzeydoğu doğrultusu dikkate alınarak yerleştirilmiş, bu yerleşim, dış ortam hava hareketlerinin doğal havalandırma üzerindeki etkisini daha gerçekçi biçimde yansıtmayı amaçlamaktadır. Senaryolara farklı cephelerde konumlanan sınıflar dahil edilmemiştir.

Simülasyon süresince sınıf ortamı, 30 öğrencinin bulunduğu, 6 × 8 m boyutlarında kapalı bir hacim olarak modellenmiştir. Öğrencilerin oturma düzeni tüm senaryolarda sabit tutulmuş; böylece pencere açıklıklarının konum ve sayısına bağlı olarak ortaya çıkan hava akımı desenlerinin, virüs partiküllerinin yayılımı üzerindeki etkisi, diğer değişkenlerden bağımsız olarak değerlendirilebilmiştir. Tüm senaryolarda pencere açıklıkları, iki kanatlı pencere sistemlerinde yalnızca tek kanadın tamamen açık olması koşulu ile sınırlandırılmıştır. Bu yaklaşım, mevcut eğitim yapılarında yaygın olarak gözlemlenen pencere kullanım biçimlerini temsil etmesi ve modellemede gerçekçi sınır koşullarının sağlanması amacıyla tercih edilmiştir.

Enfekte birey, her senaryoda sınıfın orta noktasında konumlandırılmış olup, solunum eylemi sırasında –özellikle hapşırma anında– ortama yayılan damlacıkların fiziksel özellikleri literatüre dayalı olarak tanımlanmıştır. Bu doğrultuda, damlacıkların başlangıç sıcaklığı 35 °C (Bahramian vd. 2023), bağıl nemi ise %80 olarak belirlenmiştir (Xie vd., 2007). Sınıfta bulunan öğretmen ve diğer öğrencilerin vücut sıcaklığı sabit değer girilip, senaryolara değişken olarak dahil edilmemiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar da kapalı ortamlarda öksürük, konuşma veya solunum yoluyla salınan aerosol partiküllerinin ilk birkaç saniyede yoğun şekilde yayıldığını ve ortam hava akımı ile havalandırma koşullarının bu sürede partikül hareketini doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır (Dbouk & Drikakis, 2020). Bu doğrultuda çalışmada kullanılan 15 saniyelik analiz aralığı, hem virüs partikülünün yayılımının erken evresinin detaylı olarak incelenmesine olanak sağlamakta hem de farklı

havalandırma senaryolarının karşılaştırılmasında literatürle uyumlu, bilimsel bir değerlendirme imkânı sunmaktadır.

Simülasyon çalışmalarında, analiz süresi 15 sn olarak sınırlandırılmıştır. Bu zaman dilimi içerisinde, enfekte bireyden kaynaklanan virüs partiküllerinin sınıf içerisindeki dağılımı, pencere sayısı ve konumu ile oluşturulan 6 senaryo doğrultusunda değerlendirilmiştir. 15 sn olarak tanımlanan analiz ile elde edilen kontur haritaları, partikül konsantrasyonlarının sınıf içerisindeki mekânsal dağılımını ve zamanla gösterdiği değişimi ortaya koymaktadır. Söz konusu görsel çıktılar, enfekte bireyin etkilediği alanın belirlenmesi, virüs partikül yayılım hızının analiz edilmesi ve doğal havalandırma stratejilerinin seyreltme başarısının karşılaştırılmasında temel parametreler olarak dikkate alınmıştır. Oluşturan altı senaryo, Çizelge 3.3.'te detaylı olarak ifade edilmiştir.

Bu bağlamda, yaz mevsim senaryoları, doğal havalandırma potansiyelinin en üst düzeyde olduğu dönem olarak ele alınmış ve dış hava etkisinin enfeksiyon kontrolü üzerindeki katkısı ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

**Çizelge 3.4.** Yaz mevsimi senaryoları

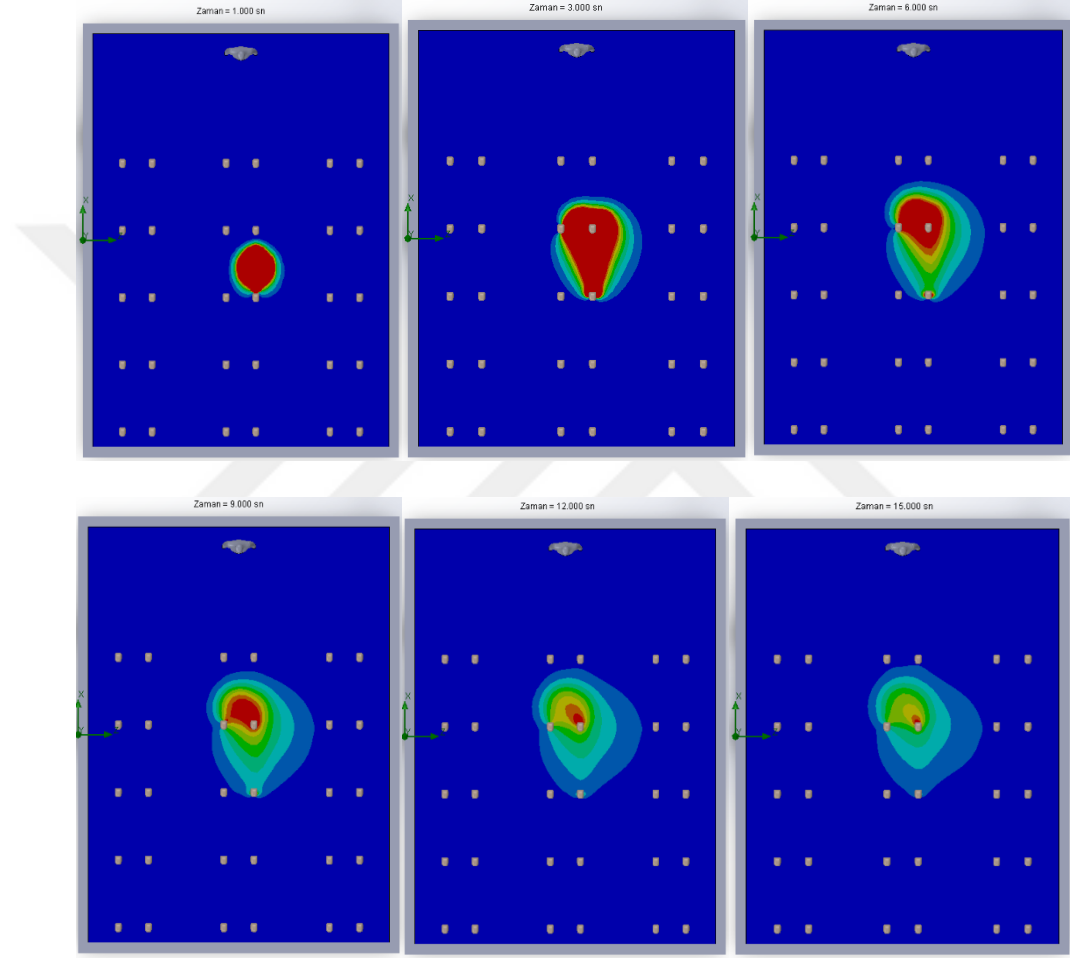
| Senaryo | Pencere konumu | Pencere Açık Sayısı | Kapı   | İç Ortam Hava Sıcaklığı | İç Ortam Bağıl Nem | Dış Ortam Hava Sıcaklığı | Dış Ortam Bağıl Nem | Rüzgâr hızı |
|---------|----------------|---------------------|--------|-------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------|-------------|
| S1      | Hiçbiri        | 0                   | Kapalı | 27 °C                   | %50                | 25 °C                    | %40                 | 12,2 km/sa  |
| S2      | Ön             | 1                   | Açık   | 27 °C                   | %50                | 25 °C                    | %40                 | 12,2 km/sa  |
| S3      | Orta           | 2                   | Açık   | 27 °C                   | %50                | 25 °C                    | %40                 | 12,2 km/sa  |
| S4      | Ön Arka        | 2                   | Açık   | 27 °C                   | %50                | 25 °C                    | %40                 | 12,2 km/sa  |
| S5      | Arka           | 1                   | Açık   | 27 °C                   | %50                | 25 °C                    | %40                 | 12,2 km/sa  |
| S6      | Hepsi          | 4                   | Açık   | 27 °C                   | %50                | 25 °C                    | %40                 | 12,2 km/sa  |

#### 3.4.1.1. Tüm pencereler kapalı (S1)

S1 kapsamında, yaz mevsimine özgü çevresel koşullarda, tüm pencerelerin ve kapının kapalı tutulduğu; doğal havalandırmanın devre dışı bırakıldığı sınıf ortamında, enfekte birey kaynaklı virüs partikül yayılımı analiz edilmektedir. Bu senaryo **kontrol senaryosu** olarak oluşturulmuştur. Bu senaryo, doğal havalandırmanın bulunmadığı

temel koşulu temsil etmekte ve diğer senaryoların etkisi bu referans koşul ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

**Partikül Dağılımı Analizi:** S1 senaryosuna ait partikül dağılım analizi Şekil 3.10.'da görülmektedir. Görsellerde kullanılan kontur haritalarında partikül konsantrasyonu, renk skalası ile ifade edilmiştir. Kırmızı tonlar, yüksek yoğunlukta partikül birikimini; mavi tonlar ise düşük yoğunluklu bölgeleri temsil etmektedir.



**Şekil 3.10.** S1'e ait partikül dağılımı

Zamana bağlı kontur haritalarına göre partikül dağılımı şu şekilde gelişmektedir:

**1 sn:** Enfekte bireyden kaynaklanan partikül bulutu, yüksek konsantrasyonda ve yoğun şekilde kaynağın çevresinde lokalize olarak gözlemlenmektedir. Aerosoller sınırlı bir bölgede askıda kalmakta ve sınıf içerisinde yayılım başlamamıştır.

**3 sn:** Partikül bulutu sınıf içerisinde yatay düzlemde çevreye yayılmaya başlamaktadır. Kısmen dikey hareketlilik gözlemlenmekle birlikte, genel yayılımın yatay

eksende yoğunlaştığı görülmektedir. Partikül konsantrasyonu halen yüksek seviyelerdedir.

**6 sn:** Partiküllerin sınıf içerisinde daha geniş bir alana yayılmaya başladığı ve ortam havası ile karışımın arttığı tespit edilmektedir. Buna rağmen, partikül yoğunluğu kritik seviyelerde kalmaktadır.

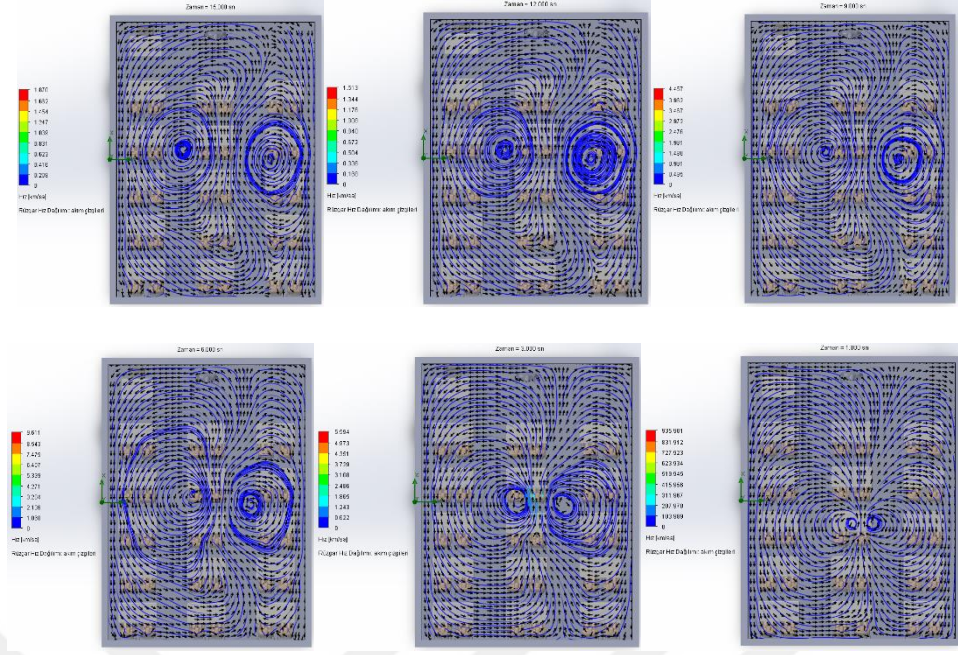
**9 sn:** Partikül dağılımı sınıf genelinde etkisini sürdürmekte olup, belirli bölgelerde partikül konsantrasyonu azalmaya başlamıştır. Ancak aerosollerin sınıf havasında askıda kalma eğilimi devam etmektedir.

**12 sn:** Ortam havası ile karışım süreci ilerlemiş, partikül yoğunluğunda belirgin bir seyrelme gözlemlenmiştir. Ancak tamamen ortamdan uzaklaşma sağlanamamıştır.

**15 sn:** Partiküller sınıf içerisinde geniş alana yayılmış, yoğunluk seviyeleri genel olarak düşmüş olsa da aerosoller sınıf havasında askıda kalmaya devam etmektedir. Yetersiz hava değişimi nedeniyle partikül birikimi riski sürmektedir.

Elde edilen bulgular, sınıf ortamında doğal havalandırma unsurlarının yetersiz veya kapalı tutulduğu durumlarda enfekte bireyden kaynaklanan virüs partiküllerinin uzun süre havada askıda kalabildiğini ve sınıf genelinde yayılabildiğini ortaya koymaktadır. Yetersiz hava değişimi, partikül birikiminin ve çevresel kontaminasyonun artmasına; dolayısıyla enfeksiyon riskinin ciddi şekilde yükselmesine neden olmaktadır.

**Hava Hareketi ve Akış Analizi:** S1 kapsamında, yaz mevsimine özgü çevresel koşullarda tüm pencerelerin kapalı olduğu durumda, sınıf içerisindeki hava hareketlerinin dinamik davranışı analiz edilmektedir. Şekil 3.11.'de sunulan hız vektörleri ve kontur haritaları, sınıf içerisindeki hava hareketinin yönünü ve hız büyüklüğünü ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Görsellerde kullanılan renk skalasında mavi tonlar, düşük hız bölgelerini; kırmızı tonlar ise yüksek hız bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.11. S1'e ait Hava Hareketi ve Akış Dağılımı

**1 sn:** Enfekte birey çevresinde lokalize, düşük enerjili hava hareketlerinin olduğu görülmektedir. Sınıf genelinde anlamlı bir hava akımı henüz gelişmemiştir.

**3 sn:** Küçük ölçekli vorteks yapılarının sınıf içerisinde belirginleşmeye başladığı tespit edilmektedir. Ancak hava hareketi büyük ölçüde sınırlıdır ve düşük hız seviyelerinde seyretmektedir.

**6 sn:** Sınıfın simetrik bölgelerinde iki ana vorteks yapısının (girdap bölgesinin) olduğu görülmektedir. Bu yapıların etkisiyle, sınıf içerisinde hava parçacıkları dairesel hareket etmektedir.

**9 sn:** Vorteks yapıları daha belirgin hâle gelirken, sınıfın köşe ve alt bölgelerinde durağan hava alanlarının olduğu gözlemlenmektedir. Genel hava hızı düşük seviyelerdedir.

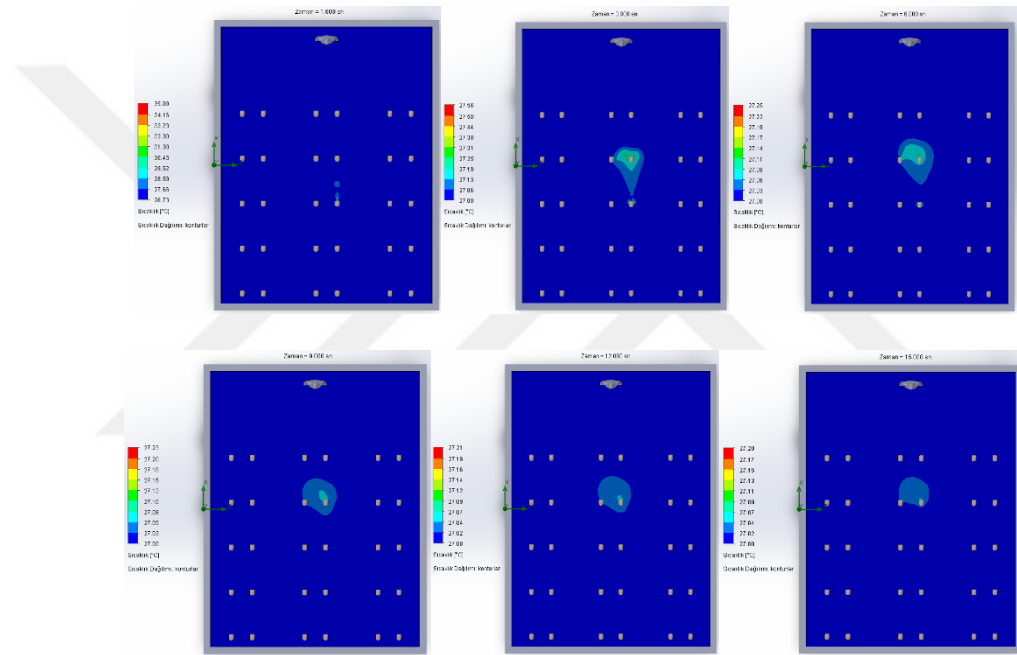
**12 sn:** Sınıf içerisinde hava sirkülasyonunun zayıf kaldığı, özellikle durağan bölgelerde hava değişiminin son derece sınırlı olduğu tespit edilmektedir.

**15 sn:** Vorteks yapılarının sınıf genelinde hâlen etkili olduğu, ancak düşük hava hızı nedeniyle partikül taşınımının kısıtlandığı ve ölü hava bölgelerinin kalıcılığını sürdürdüğü anlaşılmaktadır.

Elde edilen bulgular, sınıf ortamında pencere açıklıklarının veya etkili doğal havalandırma sistemlerinin bulunmadığı koşullarda, iç mekân hava hareketlerinin oldukça sınırlı kaldığını ve düşük hava değişimi nedeniyle ölü hava bölgelerinin oluştuğunu göstermektedir. Bu bölgelerde enfekte bireyden kaynaklanan virüs

partiküllerinin uzun süre askıda kalma eğiliminde olduğu ve bulaş riskini ciddi şekilde artırdığı ortaya konulmuştur.

**Sıcaklık Dağılımı Analizi:** S1 kapsamında, yaz mevsimine özgü çevresel koşullarda tüm pencerelerin kapalı olduğu durumda, sınıf içerisindeki sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir. Zamana bağlı olarak Şekil 3.12’de elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları aşağıda özetlenmektedir. İlgili kontur haritalarında sıcaklık değerleri °C cinsinden ifade edilmekte olup, kırmızı tonlar ortam sıcaklığının üzerinde kalan bölgeleri, mavi tonlar ise sabit iç sıcaklığa yakın veya daha düşük sıcaklık bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.12. S1'e ait sıcaklık dağılımı

**1 sn:** Enfekte bireyin yakın çevresinde, vücut ısısı ve solunum yoluyla yayılan sıcak hava etkisi lokal düzeyde gözlemlenmektedir. Bu aşamada sıcaklık farkı son derece sınırlıdır ve genel ortam sıcaklığı henüz değişim olmamıştır.

**3 sn:** Enfekte bireyden kaynaklanan sıcak hava kütlesi, özellikle yatay düzlemde sınıf içerisine yayılmaya başlamaktadır. Çevresel bölgelerde düşük seviyeli sıcaklık artışı gözlemlenmekte, sıcaklık gradyanları belirginleşmektedir.

**6 sn:** Sıcak hava kütlelerinin sınıf içerisindeki yayılımı devam etmekte, sıcaklık farklılıklarının daha geniş bir alana ulaştığı görülmektedir. Ancak sınıf içerisindeki hava hareketinin zayıf olması nedeniyle bu yayılım sınırlı düzeyde kalmaktadır.

**9 sn:** Sıcak hava kütlesi, yukarı yönlü hareket eğilimi göstermekte; sınıfın üst bölgelerinde sıcaklık artışı gözlemlenmektedir. Ancak sınıf genelinde hava sirkülasyonunun yetersiz olması nedeniyle termal yayılımın etkinliği sınırlı kalmaktadır.

**12 sn:** Sıcak hava kütlelerinin yukarı yönlü taşınma eğilimi sürmekte; ancak sınıf içerisinde düşük hava akımı nedeniyle sıcaklık farklarının dağılımı lokal bölgelerde yoğunlaşmaktadır.

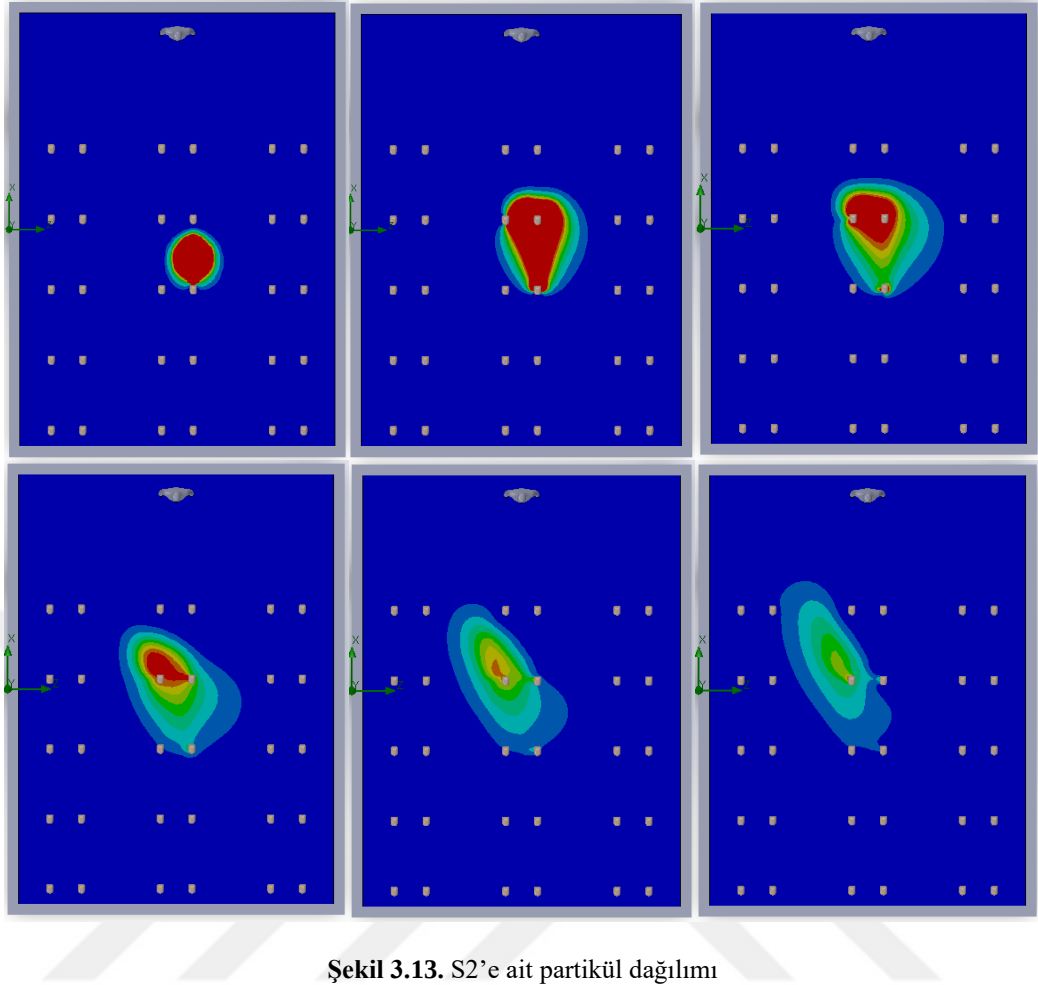
**15 sn:** Termal yayılımın büyük oranda sınırlı kaldığı, sıcak hava kütlelerinin özellikle belirli bölgelerde birikme eğilimi gösterdiği görülmektedir. Genel ortam sıcaklığında anlamlı bir artış oluşmamakla birlikte, enfekte birey çevresindeki termal etkinin devam ettiği tespit edilmiştir.

Elde edilen bulgular, sınıf içerisinde doğal havalandırma hareketi bulunmadığı durumlarda, enfekte birey kaynaklı ısı yayılımının zaman içerisinde sınırlı düzeyde gerçekleştiğini göstermektedir. Yetersiz hava akımı ve düşük seviyeli termal konveksiyon, sıcak hava kütlelerinin etkili şekilde taşınmasını engellemekte; bu durum partiküllerin askıda kalma süresini artırmakta ve belirli bölgelerde yoğunlaşmasına neden olmaktadır. Sıcak hava kütlelerinin yukarıya yönelme eğilimi, sınıf içerisinde etkili hava hareketi bulunmadığında partikül taşınımını desteklememekte; bu durum hem termal konforun hem de enfeksiyon yayılım dinamiklerinin olumsuz yönde etkilenmesine yol açmaktadır.

#### 3.4.1.2. Ön tek pencere açık (S2)

S2 kapsamında, yaz mevsimine özgü çevresel koşullarda, sadece ön tek pencerenin ve kapının açık tutulduğu sınıf ortamında, enfekte birey kaynaklı virüs partikül dağılımı analiz edilmektedir.

**Partikül Dağılımı Analizi:** S2 senaryosuna ait partikül dağılım analizi Şekil 3.3.'te görülmektedir. Görsellerde kullanılan kontur haritalarında partikül konsantrasyonu, renk skalası ile ifade edilmiştir. Kırmızı tonlar, yüksek yoğunlukta partikül birikimini; mavi tonlar ise düşük yoğunluklu bölgeleri temsil etmektedir.



Şekil 3.13. S2'e ait partikül dağılımı

Zamana bağlı kontur haritalarına göre partikül dağılımı şu şekilde gelişmektedir:

**1 sn:** Enfekte bireyden kaynaklanan partikül bulutu, yüksek konsantrasyonda ve yoğun şekilde kaynağın çevresinde lokalize olarak gözlemlenmektedir. Aerosoller sınırlı bir bölgede askıda kalmakta ve sınıf içerisinde yayılım başlamamıştır.

**3 sn:** Enfekte bireyin çevresinde yüksek konsantrasyonlu partikül bulutu oluşmaktadır. Açık pencerenin etkisiyle hava akımı partiküllerin sınıfın ön kısmına doğru yönelmesine neden olmakta, bu yönelim sonucunda partikül yayılımı sınırlı ve tek taraflı gerçekleşmektedir.

**6 sn:** Partikül yayılımı belirginleşmekte, özellikle açık pencerenin etkisiyle sınıfın ön kısmında partikül yoğunluğu artmaktadır. Ancak partiküllerin tamamının ortamdaki uzaklaştırılması açısından mevcut hava akımının yetersiz kaldığı görülmektedir.

**9 sn:** Kontaminasyon alanı sınıfın ön kısmında genişlemeye devam etmekte, açık pencereye yakın bölgelerde partikül yoğunluğu artmaktadır. Bununla birlikte, ortam genelinde hava değişiminin sınırlı kalması partikül seyreltmesini zorlaştırmaktadır.

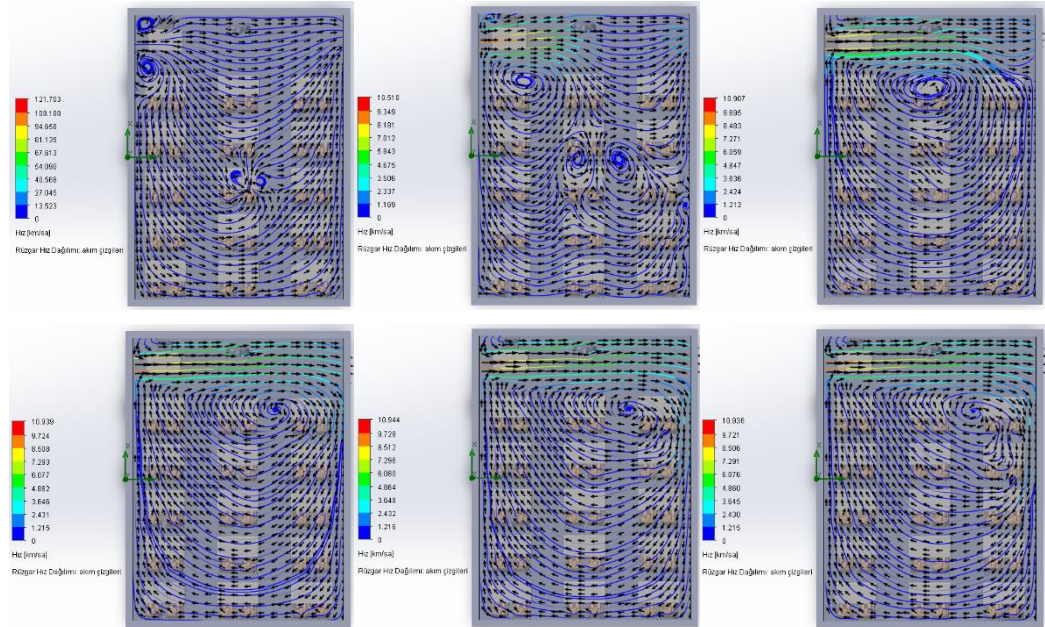
**12 sn:** Partiküllerin yayılımı yavaşlamakta, ancak enfekte bireyin çevresinde hâlen yüksek partikül konsantrasyonunun varlığını sürdürdüğü gözlemlenmektedir.

**15 sn:** Partikül dağılımının büyük oranda durağanlaştığı, ancak sınıf içerisinde özellikle enfekte bireyin çevresinde yoğun partikül birikimi olduğu görülmektedir. Bu durum, yalnızca ön kısımda bulunan tek pencerenin açık tutulduğu bu senaryoda hava değişiminin yetersiz kaldığını ve partikül seyreltmesinin sınırlı düzeyde gerçekleştiğini ortaya koymaktadır.

Elde edilen bulgular, sınıfın yalnızca ön kısmında yer alan bir pencerenin açık tutulduğu durumda, hava akımının partikül yayılımını kısmen yönlendirebildiğini; ancak bulaşma riskini anlamlı düzeyde azaltmak için yetersiz kaldığını göstermektedir. Sınıf içerisinde etkili hava değişimi ve partikül seyreltmesinin sağlanabilmesi için daha fazla pencere açıklığı veya çapraz havalandırma stratejilerinin uygulanması gerekliliği açıkça ortaya konmaktadır.

**Hava Hareketi ve Akış Analizi:** S2 kapsamında, yaz mevsimine özgü çevresel koşullarda sadece tek ön pencerenin açık olduğu durumda, sınıf içerisindeki hava hareketlerinin dinamik davranışı analiz edilmektedir.

Şekil 3.14'te sunulan hız vektörleri ve kontur haritaları, sınıf içerisindeki hava hareketinin yönünü ve hız büyüklüğünü ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Görsellerde kullanılan renk skalasında mavi tonlar, düşük hız bölgelerini; kırmızı tonlar ise yüksek hız bölgelerini temsil etmektedir.



**Şekil 3.14.** S2'e ait hava hareketi ve akış dağılımı

**1 sn:** Açık pencere bölgesinden sınıfa güçlü bir hava girişi başlamaktadır. Hava akışı, sınıfın üst kısmında yatay eksenle ilerlemekte ve tavan seviyesinde vorteks yapısı oluşturmaktadır. Bu durum, serin dış havanın sınıf geneline eşit şekilde yayılmasını engellemekte; akış sınırlı bölgelerde yoğunlaşmaktadır.

**3 sn:** Hava akımı sınıf içerisinde belirginleşmekte, tavanda daha net bir dairesel hareket yapısı oluşmaktadır. Açık pencere bölgesine yakın alanlarda hava hızı yüksek seyrederken, sınıfın iç bölgelerinde türbülans ve yön değiştirmeler gözlemlenmektedir. Ancak arka kısımlarda hâlen durağan bölgeler mevcuttur.

**6 sn:** Sınıfa giren hava, orta bölgelere kadar ilerlemiş; bu süreçte türbülanslı akış yapıları belirginleşmiştir. Özellikle sınıfın arka alanlarında hava hareketi zayıflamakta, düşük hızlı ve durağan hava bölgeleri oluşmaktadır. Lokal girdap yapıları partikül yönelmesini etkileyebilecek şekilde sınıf içerisinde gelişmektedir.

**9 sn:** Hava akımı sınıf içerisinde daha kararlı bir yapıya dönüşmektedir. Ön bölgelerden başlayan hava hareketi, orta kısma kadar etkin bir şekilde ulaşabilmekte; ancak arka ve köşe bölgelerde hâlen düşük hava hızı ve durağanlık söz konusudur. Vorteks yapılarının etkisiyle sınıf içerisinde dairesel hava hareketleri devam etmektedir.

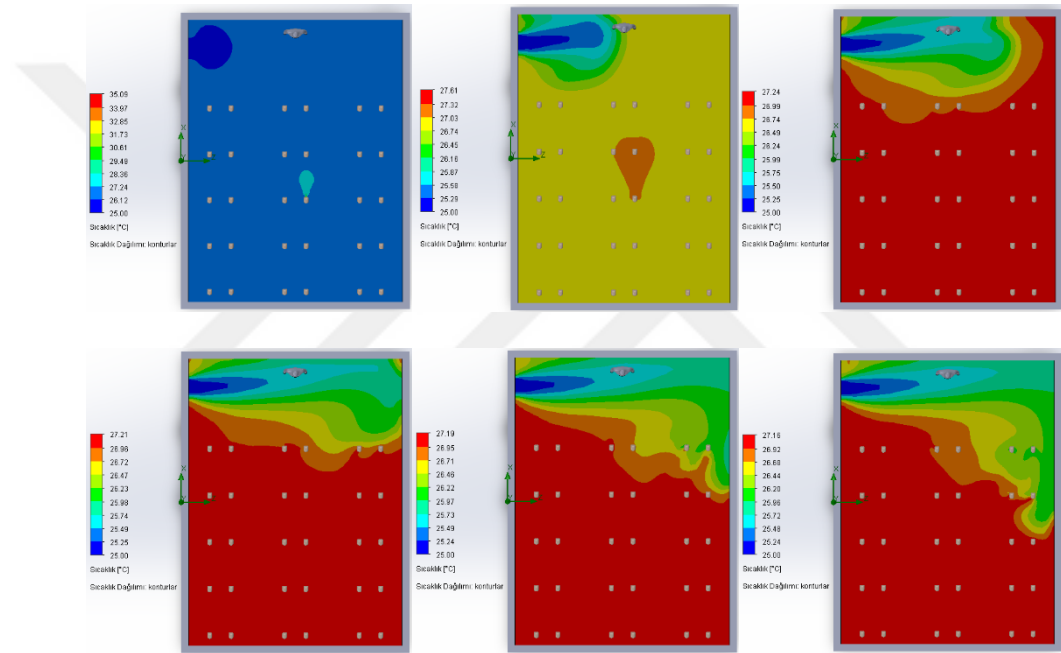
**12 sn:** Sınıf genelinde hava hareketi daha dengeli bir hâl almakla birlikte, köşe ve arka alanlarda durağan bölgelerin varlığı devam etmektedir. Özellikle tavanda ve orta bölgede hâlen dairesel akım yapıları gözlenmekte, bu durum partikül yayılımı ve askıda kalma süresini olumsuz etkileyebilmektedir.

**15 sn:** Sınıf içi hava akımı genel hatlarıyla oturmuş görünse de özellikle arka köşelerde düşük hava hızı ve durağan alanlar dikkat çekmektedir. Tavanda ve sınıfın belirli noktalarında vorteks yapılarının hâlâ varlığını sürdürdüğü görülmektedir. Bu durum, enfekte bireyden kaynaklanan aerosol partiküllerinin bu bölgelerde askıda kalmasına ve tahliye sürecinin yavaşlamasına neden olabilir.

Elde edilen bulgular, yalnızca ön kısımdaki pencere açıklığının sınıf içerisinde sınırlı ve dengesiz bir hava hareketi oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle tavanda ve sınıfın orta kesiminde gelişen vorteks yapılarının, serin dış havanın sınıf geneline etkin şekilde dağılmasını engellediği, arka ve köşe bölgelerde ise düşük hava hızı ve durağan bölgelerin olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, enfekte bireyden kaynaklanan aerosol partiküllerinin özellikle bu durağan alanlarda askıda kalma süresini artırmakta; dolayısıyla partikül tahliyesini geciktirerek bulaşma riskini yükseltmektedir. Elde edilen veriler, etkili ve dengeli bir hava değişiminin sağlanabilmesi için açıklık

konfigürasyonunun dikkatle planlanması gerektiğini ve yalnızca tek taraflı pencere açıklıklarının yeterli düzeyde hava sirkülasyonu sağlayamadığını göstermektedir.

**Sıcaklık Dağılımı Analizi:** S2 kapsamında, yaz mevsimine özgü çevresel koşullarda sadece tek ön pencerenin açık olduğu durumda, sınıf içerisindeki sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir. Zamana bağlı olarak Şekil 3.15'te elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları aşağıda özetlenmektedir. İlgili kontur haritalarında sıcaklık değerleri °C cinsinden ifade edilmekte olup, kırmızı tonlar ortam sıcaklığının üzerinde kalan bölgeleri, mavi tonlar ise sabit iç sıcaklığa yakın veya daha düşük sıcaklık bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.15. S2'e ait sıcaklık dağılımı

**1 sn:** Açık pencere bölgesine yakın alanlarda dış ortamdan giren serin havanın etkisi sınıfın üst bölgelerinde belirgin sıcaklık düşüşüne yol açmaktadır. Pencere çevresinde sıcaklık 24 °C seviyelerine kadar gerilemekte; serin hava yatay doğrultuda sınıf içerisine yayılmaktadır. Sınıfın alt bölgelerinde sıcaklık değişimi ise henüz sınırlı düzeydedir.

**3 sn:** Üst bölgelerdeki düşük sıcaklıklı hava sınıf içerisine ilerlemeye başlamış; pencere tarafında sıcaklık yaklaşık 25 °C seviyelerinde seyretmektedir. Serin hava özellikle üst kotlarda yayılım gösterirken, alt bölgelerde sıcaklık 27 °C seviyesinde kalmaya devam etmektedir. Bu durum, sıcaklık dağılımının henüz homojenleşmediğini ortaya koymaktadır.

**6 sn:** Düşük sıcaklıklı hava kütlesi sınıfın iç bölgelerine daha fazla yayılmakta; üst kotlarda serinleme etkisi belirginleşmektedir. Pencere yakınında sıcaklık 24–25 °C bandına kadar düşerken, sınıfın arka ve alt kısımlarında sıcaklık 26–27 °C seviyesinde korunmaktadır. Bu aşamada sınıf genelinde belirgin sıcaklık gradyanları oluşmuştur.

**9 sn:** Serin hava, sınıfın orta ve arka bölgelerine doğru daha etkili bir şekilde yayılmakta; sıcaklık dağılımında kısmi bir dengelenme gözlemlenmektedir. Ancak arka alanlarda hâlen sıcaklık farklılıkları devam etmektedir. Üst bölgelerde sıcaklık 25 °C seviyesine kadar düşerken, alt ve arka alanlarda sıcaklık 26–27 °C bandında seyretmektedir.

**12 sn:** Sınıf içerisindeki sıcaklık dağılımı daha dengeli bir hâl almaya başlamakta; serin hava etkisi arka bölgelere kadar ulaşmaktadır. Ancak pencere çevresinde sıcaklık hâlen 24–25 °C seviyelerinde kalırken, arka köşelerde sıcaklık farkları devam etmekte ve yaklaşık 26 °C düzeyinde ölçülmektedir.

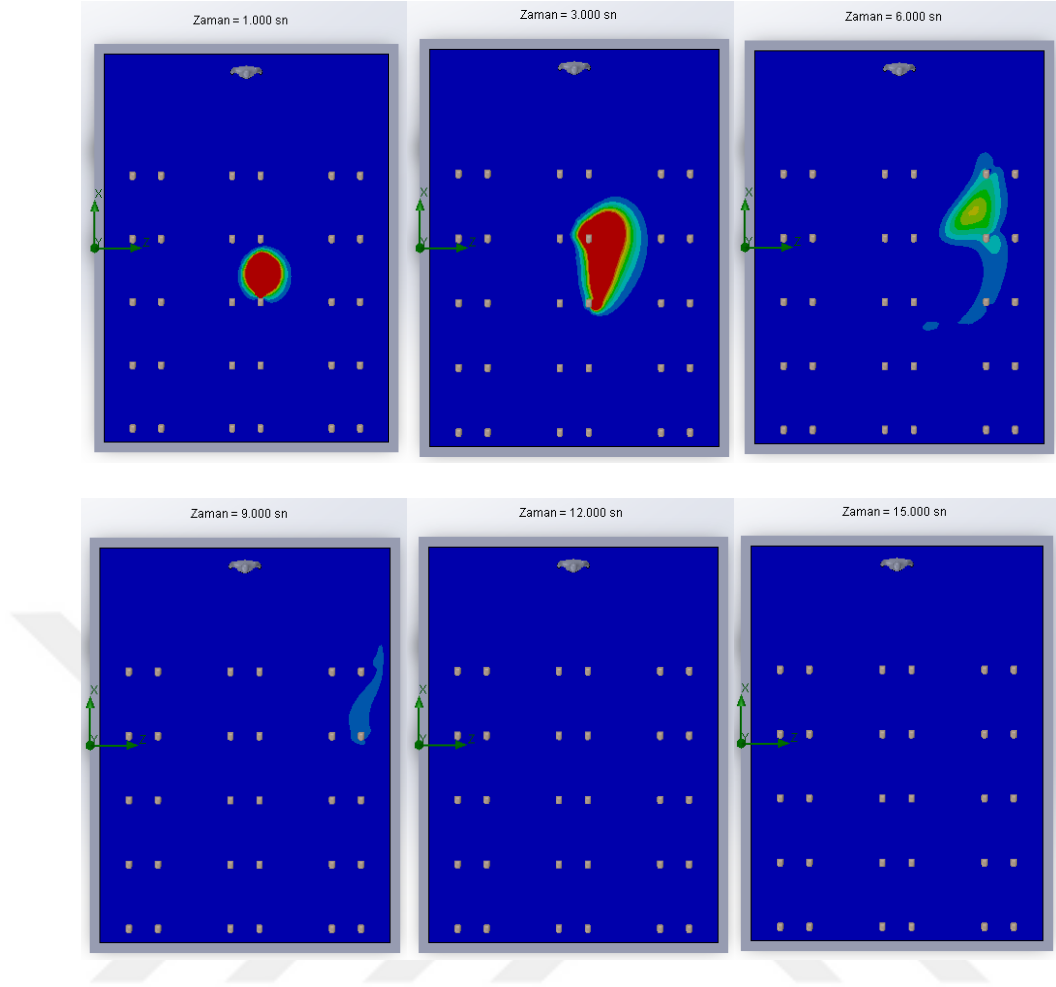
**15 sn:** Sıcaklık dağılımı sınıf genelinde kısmen dengelenmiş olsa da bölgesel farklılıklar hâlen mevcuttur. Pencere tarafında sıcaklık 24–25 °C aralığında seyretmekte; serin havanın yayılımı büyük ölçüde tamamlanmıştır. Buna karşın sınıfın arka ve alt bölgelerinde sıcaklık 26 °C ve üzerinde kalmaktadır. Bu durum, serin havanın etkisinin sınıf geneline tam anlamıyla eşit şekilde dağılmadığını göstermektedir.

Elde edilen bulgular, yalnızca ön pencerenin açık olduğu bu senaryoda, dış ortamdan gelen serin havanın sınıf içerisine tam anlamıyla yayılmadığını ve sıcaklık değişiminin lokalize kaldığını ortaya koymaktadır. Bu yapı, sınıf içerisinde etkili bir havalandırma ve homojen sıcaklık dağılımının sağlanamadığını göstermektedir.

#### 3.4.1.3. Orta iki pencere açık (S3)

S3 kapsamında, yaz mevsimine özgü çevresel koşullarda, orta iki pencerenin ve kapının açık tutulduğu sınıf ortamında, enfekte birey kaynaklı virüs partikül dağılımı analiz edilmektedir.

**Partikül Dağılımı Analizi:** S3 senaryosuna ait partikül dağılım analizi Şekil 3.16.'da görülmektedir. Görsellerde kullanılan kontur haritalarında partikül konsantrasyonu, renk skalası ile ifade edilmiştir. Kırmızı tonlar, yüksek yoğunlukta partikül birikimini; mavi tonlar ise düşük yoğunluklu bölgeleri temsil etmektedir.



Şekil 3.16. S3'e ait partikül dağılımı

Zamana bağlı kontur haritalarına göre partikül dağılımı şu şekilde gelişmektedir:

**1 sn:** Enfekte bireyin çevresinde yüksek konsantrasyonlu ve sınırlı bir alana yayılmış partikül bulutu oluşmaktadır. Yayılım, kaynağa yakın, lokal bir bölgede kalmaktadır.

**3 sn:** Partikül bulutu sınıfın üst kısmına doğru hareket etmektedir. Hava akımının etkisiyle yayılım alanı genişlemekte ve partiküller yukarı yönlü taşınmaktadır.

**6 sn:** Partiküller, sınıfın sağ üst bölgesine doğru yönlendirilmektedir. Bu aşamada partikül yoğunluğunda azalma başlamış; hava akımı etkili bir taşıma ve seyreltme sağlamaktadır.

**9 sn:** Partiküller sınıfın sağ kenarına doğru ilerlemektedir. Hava akımı, partiküllerin sınıftan tahliyesini desteklemektedir.

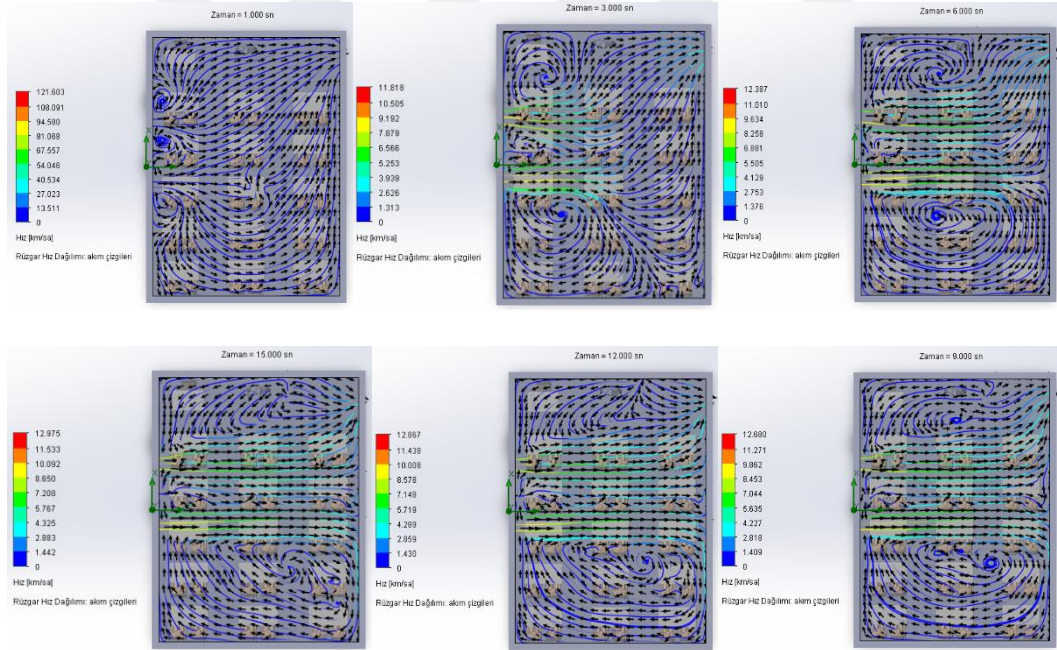
**12 sn:** Sınıfın büyük bölümünde partikül konsantrasyonu belirgin şekilde azalmaktadır. Aerosollerin büyük kısmı ortamdan uzaklaştırılmıştır.

**15 sn:** Sınıf içerisinde partikül varlığına rastlanmamaktadır. Aerosollerin tamamı etkili hava akımı sayesinde ortamdan tahliye edilmiştir.

Elde edilen bulgular, sınıfın orta kısmında yer alan iki pencerenin açık tutulduğu bu senaryoda, etkin bir hava değişiminin sağlandığını ve enfekte bireyden kaynaklanan partiküllerin kısa sürede ortamdan uzaklaştırıldığını ortaya koymaktadır. Pencere açıklıklarının konumlandırılması, hava akışının yönlü ve kontrollü şekilde gerçekleşmesine katkıda bulunmakta; böylece hem bulaş riski azaltılmakta hem de iç ortam hava kalitesi korunmaktadır.

**Hava Hareketi ve Akış Dağılımı Analizi:** S3 kapsamında, yaz mevsimine özgü çevresel koşullarda orta iki pencerenin açık olduğu durumda, sınıf içerisindeki hava hareketlerinin dinamik davranışı analiz edilmektedir.

Şekil 3.17’de sunulan hız vektörleri ve kontur haritaları, sınıf içerisindeki hava hareketinin yönünü ve hız büyüklüğünü ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Görsellerde kullanılan renk skalasında mavi tonlar, düşük hız bölgelerini; kırmızı tonlar ise yüksek hız bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.17. S3’e ait hava hareketi ve akış dağılımı

**1 sn:** Açık pencere açıklıklarından sınıfa giren hava akımı, üst ve alt bölgelerde vorteks yapıları oluşturmaktadır. Hava akımının başlamasıyla, enfekte bireyin bulunduğu orta bölgede hava akımının hızlanmasına ve partiküllerin yayılımının başlamasına zemin hazırlamaktadır.

**3 sn:** Hava akımı, sınıfa giriş yaptıktan sonra yön kazanmakta ve yatay ekseninde düzenli şekilde ilerlemektedir. Üst bölgelerde vorteks yapıları daha belirgin hâle gelirken, orta bölgede partikül taşınımını kolaylaştırabilecek güçlü bir hava hareketi oluşmaktadır.

**6 sn:** Hava akışı sınıf içerisinde kararlı ve yönlü bir yapı sergilemekte; özellikle üst bölgelerdeki dairesel hareketler devam etmektedir. Alt ve orta bölgelerde ise hava akımı daha dengeli ve doğrusal bir şekilde ilerlemektedir. Bu yapı, partikül dağılımının kontrol altına alınmasını kolaylaştırmaktadır.

**9 sn:** Düzenli hava akımı sınıf içerisinde tam olarak oturmuş görünmektedir. Yatay ekseninde sürekli ve dengeli bir taze hava sirkülasyonu sağlanmakta; bu durum, partikül tahliyesi ve sınıf içi hava kalitesinin korunması açısından önemli bir avantaj oluşturmaktadır.

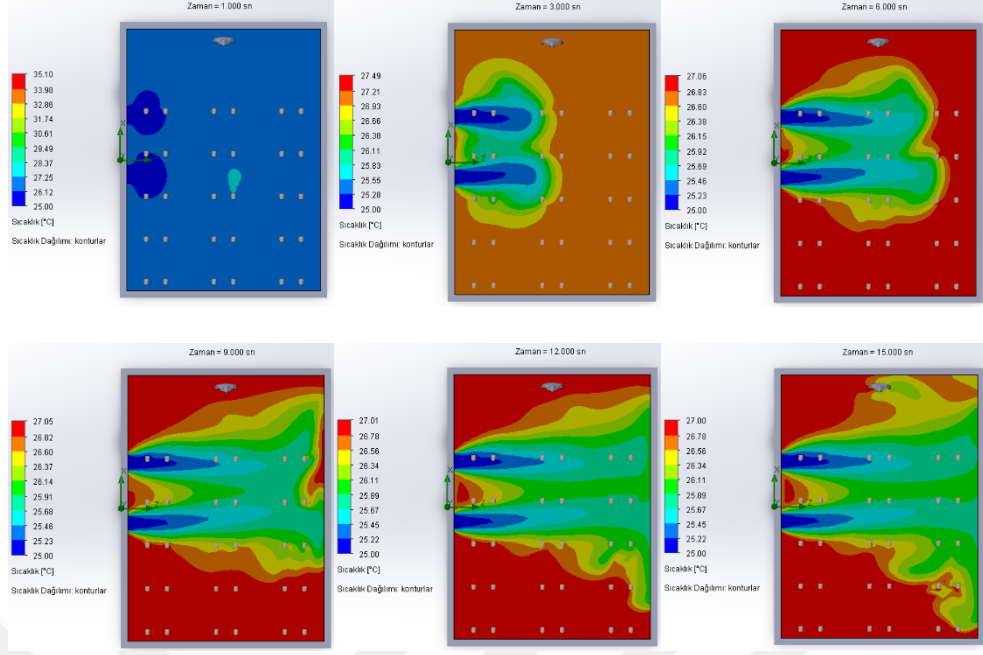
**12 sn:** Sınıf genelinde yatay ekseninde güçlü bir hava akımı yapısı hâkimdir. Girdap yapıları büyük ölçüde ortadan kalkmış, hava akışı dengelenmiş ve partikül taşınımı açısından homojen bir dağılım sağlanmıştır.

**15 sn:** Hava akımı istikrarlı şekilde devam etmekte, sınıfın tüm bölgelerine etkin biçimde ulaşmaktadır. Bu durum, enfekte birey kaynaklı partiküllerin hızlıca ortamdan uzaklaştırılmasını mümkün kılmakta; dolayısıyla etkili bir doğal havalandırma performansı elde edildiğini göstermektedir. Elde edilen bulgular, karşılıklı açıklıkların sınıf içi hava kalitesini artırmada ve partikül tahliyesini hızlandırmada önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Elde edilen bulgular, sınıfın orta kısmında yer alan pencere açıklıklarının sağladığı doğal havalandırmanın, etkili çapraz hava akımı oluşturduğunu ve iç ortam hava kalitesinin iyileştirilmesinde önemli katkı sunduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle düzenli hava sirkülasyonu, enfekte partiküllerin hızlıca seyreltilmesini ve ortamdan uzaklaştırılmasını desteklemekte; böylece hem bulaş riski hem de iç ortam hava kalitesi açısından olumlu sonuçlar elde edilmektedir.

**Sıcaklık Dağılımı Analizi:** S3 kapsamında, yaz mevsimine özgü çevresel koşullar altında sınıfın orta kısmında yer alan iki pencerenin açık tutulduğu durumda iç ortam sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir.

Zamana bağlı olarak Şekil 3.18’de elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları aşağıda özetlenmektedir. İlgili kontur haritalarında sıcaklık değerleri °C cinsinden ifade edilmekte olup, kırmızı tonlar ortam sıcaklığının üzerinde kalan bölgeleri (örneğin 27,3 °C ve üzeri), mavi tonlar ise sabit iç sıcaklığa yakın veya daha düşük sıcaklık bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.18. S3'e ait sıcaklık dağılımı

**1 sn:** Pencere açıklıklarından sınıfa giren serin dış hava akımının etkisiyle, pencere çevresindeki bölgelerde sıcaklık  $25^{\circ}\text{C}$ 'nin altına düşmektedir. Ancak bu serin hava, henüz sınıfın diğer alanlarına yayılmamış, sıcaklık değişimi lokal düzeyde kalmıştır.

**3 sn:** Dış hava akımının sınıf içerisine etkisi belirginleşmiş, serin hava yatay eksende sınıfın daha iç kısımlarına ulaşmıştır. Sıcaklık dağılımında  $25\text{--}26^{\circ}\text{C}$  aralığında genişleyen alanlar gözlemlenmekte, pencere konumuna bağlı olarak etkili bir sıcaklık düşüşü sağlanmaktadır.

**6 sn:** Serin hava, sınıfın sağ tarafına kadar ilerlemiş ve sıcaklık dağılımında homojenleşme eğilimi başlamıştır. Pencere yakınındaki bölgelerde sıcaklık yaklaşık  $25^{\circ}\text{C}$  seviyesinde kalırken, sınıfın geri kalanında sıcaklık  $26,5^{\circ}\text{C}$ 'nin altına düşmüştür. Bu durum, doğal havalandırmanın etkin çalıştığını göstermektedir.

**9 sn:** Sınıfın büyük bölümünde sıcaklık  $25\text{--}26,5^{\circ}\text{C}$  aralığında dengelenmiştir. Dış hava akımı sayesinde sıcaklık farkları azalmış, pencere çevresi daha serin kalırken, sınıfın geri kalanında sıcaklık dengesi sağlanmıştır.

**12 sn:** Sıcaklık dağılımı daha da homojenleşmiş, sınıf genelinde  $27^{\circ}\text{C}$ 'nin altındaki sıcaklık değerleri korunmaktadır. Dış hava etkisi, sıcaklığın tüm alanlarda benzer seviyelere ulaşmasını sağlamış, termal denge artmıştır.

**15 sn:** Sınıf içerisindeki sıcaklık dağılımı büyük ölçüde homojen hâle gelmiş, sıcaklık değerleri tüm alanlarda  $27^{\circ}\text{C}$ 'nin altında seyretmektedir. Dış ortamdan gelen

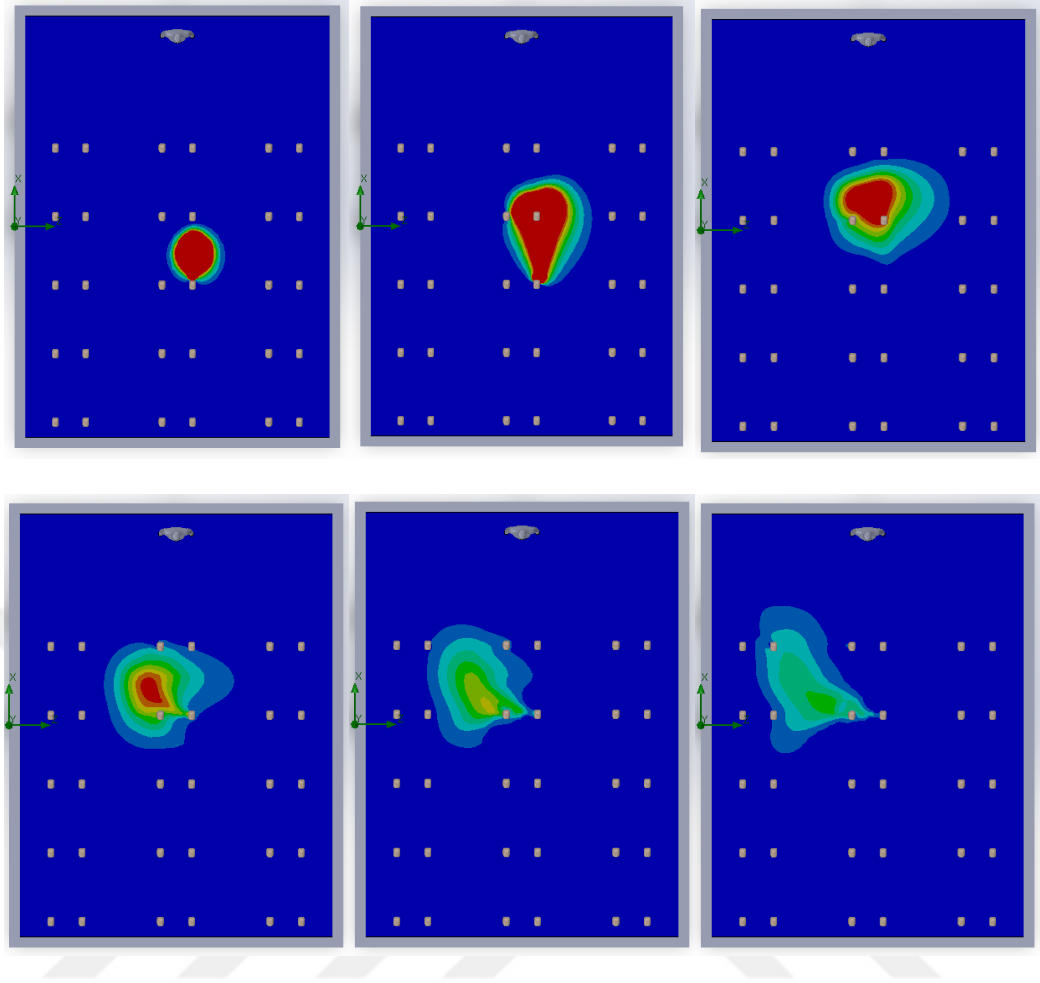
serin havanın sınıf genelinde düzenli ve dengeli şekilde yayılması, doğal havalandırmanın etkili bir biçimde çalıştığını ve termal konforun sağlandığını göstermektedir.

Elde edilen bulgular, sınıfın orta kısmındaki iki pencere açıklığının sağladığı doğal havalandırmanın, sıcaklık dağılımında homojenlik sağladığını ve yaz mevsiminde sınıf içi termal konforun artırılmasına katkı sunduğunu ortaya koymaktadır. Pencerelerin konumlandırılmasının, iç mekâna taze hava girişini ve sıcaklık dengesini optimize eden önemli bir parametre olduğu görülmektedir.

#### **3.4.1.4. Baş – son iki pencere açık (S4)**

S4 kapsamında, yaz mevsimine özgü çevresel koşullar altında sınıfın ön ve arka cephelerinde yer alan iki pencerenin açık tutulduğu durumda, enfekte bir bireyden kaynaklanan virüs partiküllerinin dağılımı analiz edilmektedir.

**Partikül Dağılımı Analizi:** S4 senaryosuna ait partikül dağılım analizi Şekil 3.19.'da görülmektedir. Görsellerde kullanılan kontur haritalarında partikül konsantrasyonu, renk skalası ile ifade edilmiştir. Kırmızı tonlar, yüksek yoğunlukta partikül birikimini; mavi tonlar ise düşük yoğunluklu bölgeleri temsil etmektedir.



Şekil 3. 19. S4'e ait partikül dağılımı

Zamana bağlı kontur haritalarına göre partikül dağılımı şu şekilde gelişmektedir.

**1 sn:** Enfekte bireyin bulunduğu noktada, yüksek konsantrasyona sahip kompakt bir partikül bulutu oluşmuştur. Partiküller henüz sınıf içerisinde yayılmamış, kaynak çevresinde lokalize kalmıştır.

**3 sn:** Partikül bulutu, enfekte bireyin çevresinden başlayarak sınıf içerisine yayılmaya başlamıştır. Özellikle dikey ve hafif yatay yönde hareket gözlenmekte; ancak partikül konsantrasyonu hâlen yüksek seviyededir.

**6 sn:** Partikül yayılımı sınıf içerisinde belirgin hâle gelmiş, özellikle yatay ekseninde sol tarafa doğru bir yönelme oluşmuştur. Partikül konsantrasyonu kademeli şekilde azalmaya başlamış; düşük yoğunluklu bölgeler ortaya çıkmaktadır.

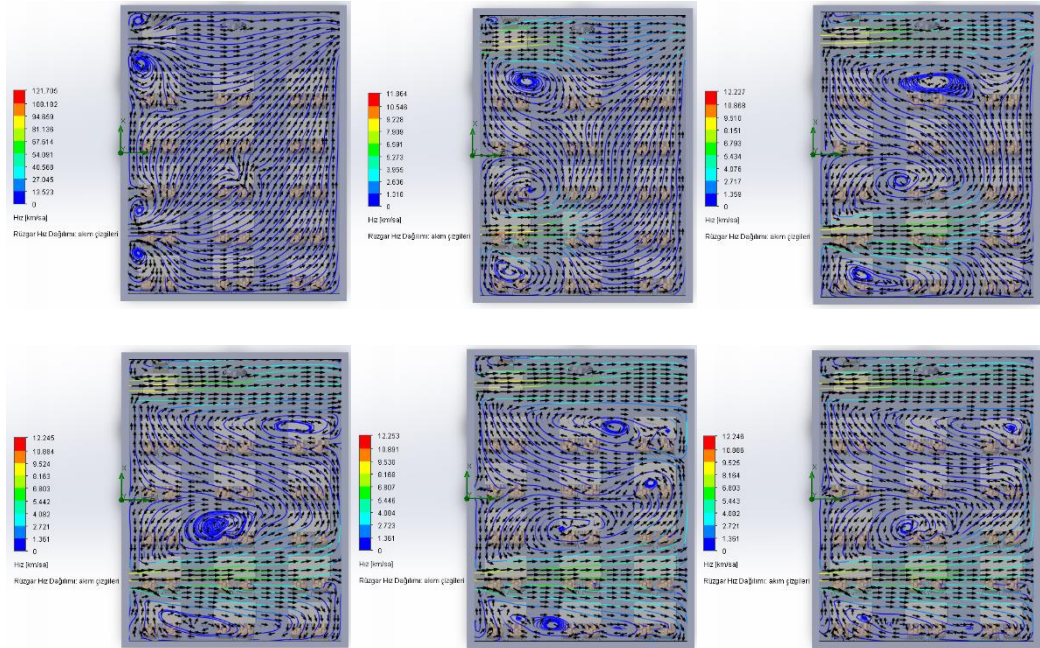
**9 sn:** Sınıfın sol tarafında partikül dağılımı daha geniş bir alana yayılmış, konsantrasyon belirgin şekilde azalmıştır. Partiküllerin büyük kısmı seyreltmeye başlamış, yüksek yoğunluklu bölgeler sınırlı alanda kalmıştır.

**12 sn:** Partikül bulutunun daha da seyrelerek sınıf içerisinde düzensiz bir yayılım sergilediği görülmektedir. Düşük yoğunluklu partiküller sınıfın farklı bölgelerine ulaşmış, partikül konsantrasyonu genel olarak azalmıştır.

**15 sn:** Partikül dağılımı sınıfın büyük bölümüne yayılmış; ancak partikül yoğunluğu oldukça düşük seviyelere inmiştir. Sınıf genelinde partiküller seyreltildiği için enfeksiyon riski potansiyel olarak azalmıştır. Bu durum, havalandırma etkisinin partikül seyreltme ve tahliyesine katkı sağladığını göstermektedir.

Elde edilen bulgular, sınıfın ön ve arka bölgelerinde konumlanan iki pencerenin açık tutulduğu bu senaryoda, sınıf içerisinde yönlü ve belirgin bir hava hareketi oluştuğunu ve enfekte bireyden kaynaklanan partiküllerin kısa sürede ortamdan uzaklaştırıldığını ortaya koymaktadır

**Hava Hareketi ve Akış Dağılım Analizi:** S4 kapsamında, yaz mevsimine özgü çevresel koşullarda sınıfın ön ve arka cephelerinde yer alan iki pencerenin açık tutulduğu durumda oluşan hava akımı davranışları ve hız dağılımı analiz edilmektedir. Şekil 3.20’de sunulan hız vektörleri ve kontur haritaları, sınıf içerisindeki hava hareketinin yönünü ve hız büyüklüğünü ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Görsellerde kullanılan renk skalasında mavi tonlar, düşük hız bölgelerini; kırmızı tonlar ise yüksek hız bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.20. S4’e ait hava hareketi ve akış dağılımı

**1 sn:** Pencere açıklıklarından sınıfa giriş yapan hava, sınıfın ön ve üst bölgelerinde hız kazanmakta, ancak akış hâlâ yönsüz ve düzensiz bir yapıdadır. Üst köşe bölgelerinde ve sınıf ortasında küçük çaplı vorteks yapılarının ilk izleri görülmektedir. Hava hareketinin sınıf genelinde yayılımı sınırlıdır.

**3 sn:** Hava akımı belirginleşmiş, özellikle üst bölgelerde ve orta kısımda daha düzenli vorteksler oluşmaya başlamıştır. Akım çizgileri, sınıfa giren havanın öncelikle üst kısımlarda yoğunlaştığını, ardından sınıf içerisine dağılmaya başladığını göstermektedir. Ancak arka bölgelerde hava hareketi hâlen zayıftır.

**6 sn:** Üst kısımda ve orta bölgelerde belirgin vorteks yapıları gelişmektedir. Havanın sınıf içerisine girişinden sonra alt-arka bölgelere doğru yönlenmeye başladığı gözlenmektedir. Ancak köşe bölgelerde hâlen durağan hava alanları mevcuttur.

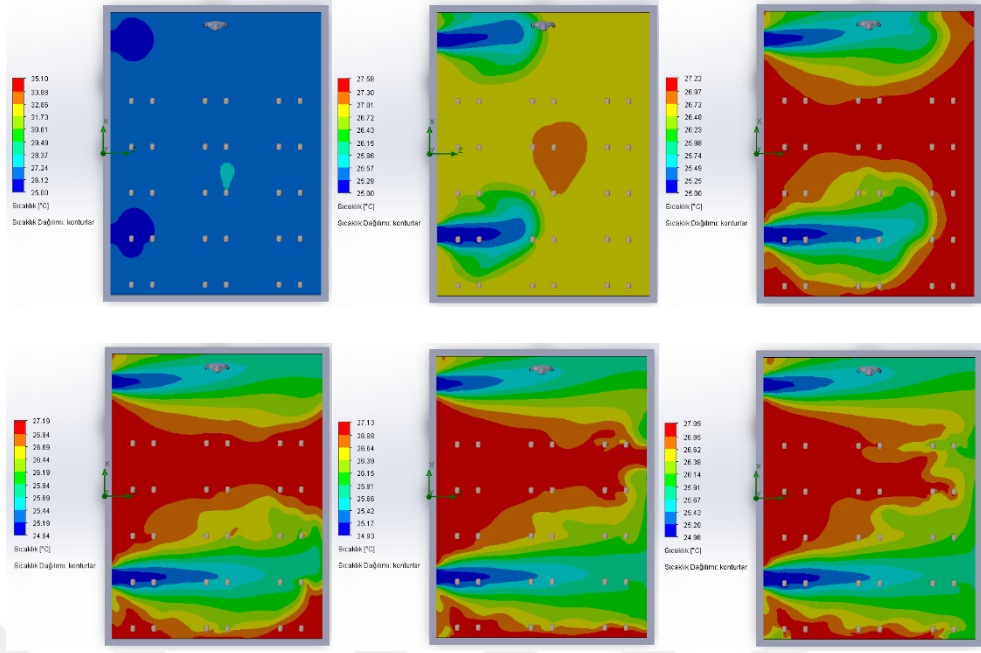
**9 sn:** Hava hareketi daha düzenli bir yapıya kavuşmuş; sınıfın ön ve orta bölgesinde etkili hava sirkülasyonu sağlanmıştır. Vorteks yapılarının sınıfın üst kısımlarında yoğunlaştığı, arka kısımlarda ise akım hızının düşük kaldığı görülmektedir. Özellikle sınıf köşelerinde durağan hava bölgeleri devam etmektedir.

**12 sn:** Hava girişinden itibaren sınıfın büyük bölümünde yatay eksende yönlü bir hava hareketi oluşmuştur. Bununla birlikte, sınıfın arka ve köşe bölgelerinde düşük hızlı alanlar ve dairesel akımların etkisiyle ölü hava bölgeleri dikkat çekmektedir.

**15 sn:** Hava akışı sınıf genelinde stabil bir hâle gelmiş; yönlü ve düzenli bir akım yapısı oluşmuştur. Ancak sınıfın arka köşelerinde ve belirli bölgelerde düşük hızlı hava hareketi ve durağan alanlar gözlenmektedir. Vorteks yapıların etkisiyle sınıf içerisinde hâlen dairesel hava hareketleri mevcuttur.

Elde edilen bulgular, ön ve arka pencerelerin eş zamanlı açılmasıyla sağlanan çapraz havalandırma sayesinde sınıf içerisinde etkin ve sürekli bir hava akışı oluşturulduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle orta ve arka bölgelerde gelişen sirkülasyon yapıları, enfekte partiküllerin tahliyesine katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, vorteks merkezlerinde geçici partikül birikimi riski devam etmektedir.

**Sıcaklık Dağılımı Analizi:** S4 kapsamında, yaz mevsimine özgü çevresel koşullarda sınıfın ön ve arka cephelerinde yer alan iki pencerenin açık tutulduğu durumda, iç ortam sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir. Zamana bağlı olarak Şekil 3.21’de elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları aşağıda özetlenmektedir. İlgili kontur haritalarında sıcaklık değerleri °C cinsinden ifade edilmekte olup, kırmızı tonlar ortam sıcaklığının üzerinde kalan bölgeleri, mavi tonlar ise sabit iç sıcaklığa yakın veya daha düşük sıcaklık bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.21. S4'e ait sıcaklık dağılımı

**1sn:** Pencerelerden sınıfa henüz serin hava girişi yeni başlamıştır. Sıcaklık dağılımı büyük ölçüde homojendir; sınıf genelinde sıcaklık yaklaşık 27 °C civarındadır. Ancak pencere çevresinde küçük ve sınırlı düşük sıcaklıklı bölgeler oluşmaya başlamıştır.

**3sn:** Serin dış hava akımı, özellikle pencere çevresinde etkisini artırmıştır. Sınıfın ön ve arka bölgelerinde, pencere açıklıkları hizasında sıcaklık 25 °C'ye kadar düşerken, sınıfın orta kesiminde sıcaklık yüksek kalmaktadır. Sıcaklık dağılımında belirgin gradyanlar oluşmaya başlamıştır.

**6 sn:** Serin hava sınıfa daha derin şekilde nüfuz etmiş, ön ve arka bölgelerde sıcaklık düşüşü geniş alanlara yayılmıştır. Özellikle pencere hizasında sıcaklık 24–25 °C seviyesine kadar gerilemiştir. Sınıfın orta kısımlarında ise sıcaklık 26,5 °C ve üzerindedir. Bu durum, sıcaklık dağılımının hâlen homojen olmadığını göstermektedir.

**9 sn:** Düşük sıcaklıklı hava, sınıfın orta bölgelerine ulaşmış, genel sıcaklık dağılımı daha dengeli hâle gelmiştir. Özellikle sınıfın yatay ekseninde, pencereler arası bölgede sıcaklık 25–26 °C seviyelerinde dengelenmiştir. Orta ve köşe bölgelerde ise sıcaklık kademeli olarak değişim göstermektedir.

**12 sn:** Serin havanın sınıf içerisine daha etkin biçimde yayılması sonucunda, sıcaklık gradyanları azalmıştır. Ön ve arka bölgelerde düşük sıcaklıklı alanlar korunurken, sınıfın orta kısmında da sıcaklık düşüşü gözlemlenmektedir. Genel olarak, sıcaklık dağılımı homojenleşmeye başlamıştır.

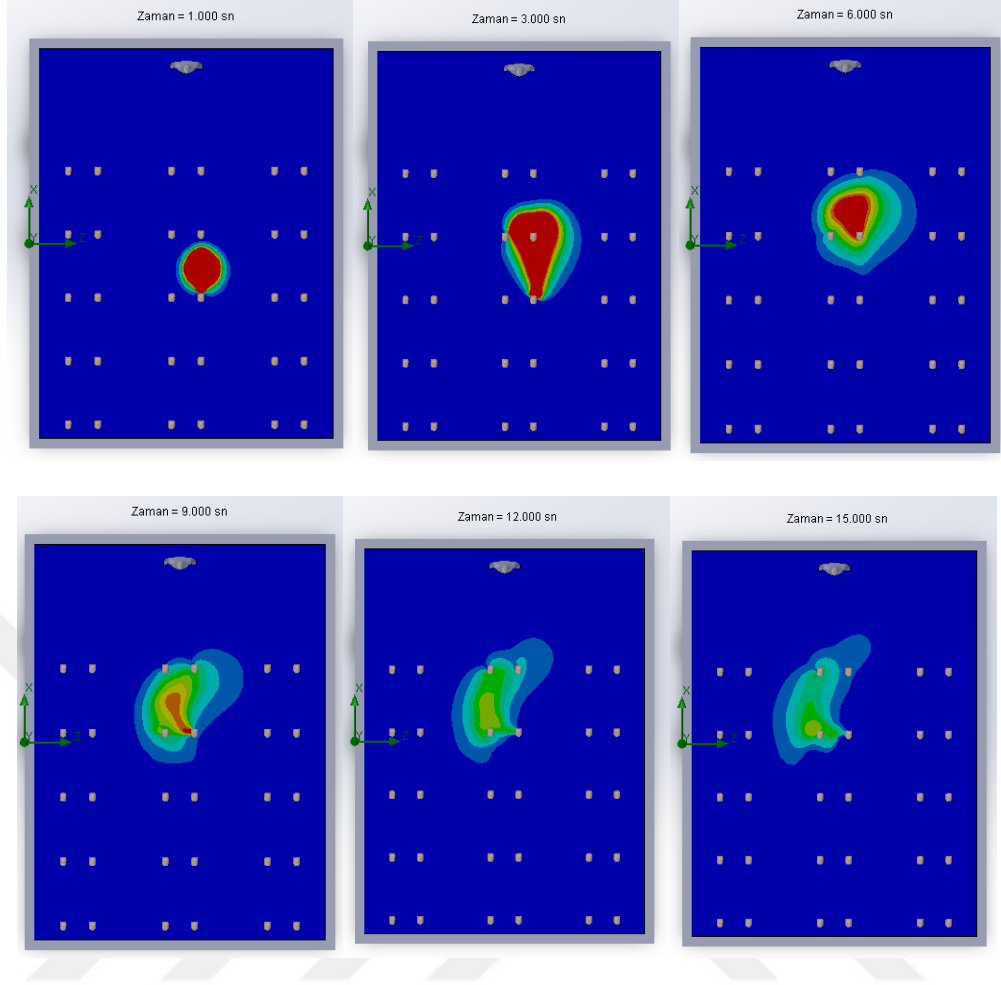
**15 sn:** Sınıf genelinde sıcaklık dağılımı dengelenmiştir. Özellikle pencere açıklıkları hizasında 24–25 °C aralığında düşük sıcaklık bölgeleri kalıcı hâle gelmiştir. Sınıfın tamamında sıcaklık 26,5 °C'nin altına gerilemiş, böylece termal konfor koşulları büyük ölçüde iyileştirilmiştir. Sıcak hava bölgeleri ise sınıfın köşe ve tavan üst kısımlarında sınırlı kalmıştır.

Elde edilen bulgular, ön ve arka cephede yer alan pencere açıklıklarının oluşturduğu çapraz havalandırmanın sınıf içerisinde iç ortam sıcaklık dengesine önemli ölçüde katkı sunduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, özellikle sınıfın merkez bölgelerinde sıcak hava birikimi olasılığı, havalandırma etkinliğinin tüm alanlara eşit şekilde dağılmadığını ve sınıf içerisindeki yerleşim düzeninin havalandırma performansı üzerinde etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

#### **3.4.1.5. Arka tek pencere açık (S5)**

S5 kapsamında, yaz mevsimine özgü çevresel koşullarda yalnızca sınıfın arka tek pencerenin açık tutulduğu durumda enfekte birey kaynaklı virüs partikül dağılımı analiz edilmektedir.

**Partikül Dağılımı Analizi:** S5 senaryosuna ait partikül dağılım analizi Şekil 3.22.'de görülmektedir. Görsellerde kullanılan kontur haritalarında partikül konsantrasyonu, renk skalası ile ifade edilmiştir. Kırmızı tonlar, yüksek yoğunlukta partikül birikimini; mavi tonlar ise düşük yoğunluklu bölgeleri temsil etmektedir.



Şekil 3.22. S5'e ait partikül dağılımı

Zamana bağlı kontur haritalarına göre partikül dağılımı şu şekilde gelişmektedir:

**1 sn:** Enfekte bireyin çevresinde yüksek yoğunluklu ve lokalize bir partikül bulutu oluşmaktadır. Bu erken aşamada, partikül yayılımı büyük ölçüde kaynağa yakın sınırlı bir bölgede kalmaktadır.

**3 sn:** Sınıfın üst bölgelerinde yayılım eğilimi gözlenirken, partikül bulutunun yönü kademeli olarak sınıfın ön kısmına doğru değişmektedir.

**6 sn:** Partiküllerin büyük bölümü sınıfın ön kısmına doğru taşınmakta; özellikle üst kotlarda belirgin bir yönlenme oluşmaktadır. Bu durum, arka kısımda yer alan pencerenin oluşturduğu hava akışının, partikülleri ön bölgeye doğru sürüklediğini göstermektedir.

**9 sn:** Partikül bulutu sınıfın ön bölgelerine doğru daha geniş bir yayılım göstermektedir. Ön kısımda partikül yoğunluğu artarken, sınıfın arka ve orta bölümlerinde konsantrasyon kademeli olarak azalmaktadır. Hava hareketinin yönlendirici etkisi bu aşamada net şekilde hissedilmektedir.

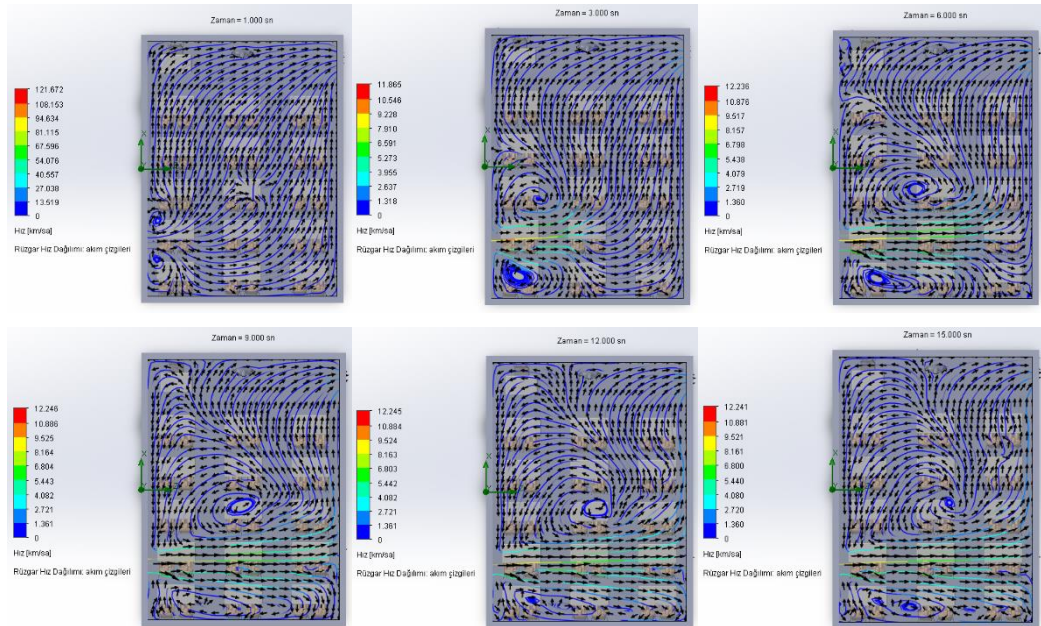
**12 sn:** Partiküllerin büyük kısmı sınıfın ön kısmına taşınmış durumdadır. Ön bölgelerde partikül yoğunluğu yüksek seviyelere ulaşırken, sınıfın arka ve orta bölgelerinde partikül konsantrasyonu büyük ölçüde azalmıştır. Bu aşamada hava akımı, partiküllerin yönlendirilmesine katkı sağlamakta ancak etkili bir tahliye süreci hâlen tam olarak gerçekleşmemektedir.

**15 sn:** Sınıfın ön kısmında partikül yoğunluğu kısmen azalmış olsa da hâlen belirli bölgelerde partikül varlığı devam etmektedir.

Elde edilen bulgular, arka tek pencerenin açık tutulduğu bu senaryoda, sınıf içerisinde kısmi ve yönlü bir hava akımı oluştuğunu göstermektedir. Arka pencereden kaynaklanan hava hareketi, enfekte bireyden salınan partiküllerin ön bölgeye doğru taşınmasına neden olmuş; ancak sınıf genelinde etkin ve dengeli bir hava sirkülasyonu sağlanamamıştır. Özellikle ön bölgelerde partikül birikimi devam etmiş ve tam anlamıyla etkili bir tahliye süreci gerçekleşmemiştir.

#### Hava Hareketi ve Akış Dağılımı Analizi:

S5 kapsamında, yaz mevsimine özgü çevresel koşullarda yalnızca sınıfın arka penceresinin açık tutulduğu durumda oluşan hava akımı davranışları ve hız dağılımı analiz edilmektedir. Şekil 3.23'te sunulan hız vektörleri ve kontur haritaları, sınıf içerisindeki hava hareketinin yönünü ve hız büyüklüğünü ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Görsellerde kullanılan renk skalasında mavi tonlar, düşük hız bölgelerini; kırmızı tonlar ise yüksek hız bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.23. S5 'e ait hava hareketi ve akış dağılımı

**1 sn:** Sınıfın ön kısmından, kapalı pencere tarafına yakın bölgeden düşük hızlı bir hava akımı giriş yapmaktadır. Bu akış, sınıfın üst kotlarında geniş ölçekli vorteks oluşturarak, üst bölgelerde belirgin bir hava sirkülasyonu meydana getirmektedir. Alt kotlarda ise hava akımı zayıf seyretmekte ve hafif içe doğru kıvrılmaktadır.

**3 sn:** Sınıfın sol alt köşesinde belirgin bir vorteks yapısı oluşmakta; bu bölgede hava hareketi zayıflamakta ve durağan alanlar ortaya çıkmaktadır. Genel hava akımı sınırlı kalmakta; özellikle açık pencere yönüne doğru etkili ve sürekli bir akış henüz oluşmamaktadır.

**6 sn:** Hava akımı sınıfın sağ tarafında ve arka duvar boyunca yön kazanmakta, bu bölgede belirgin ve yönlü bir hava hareketi meydana gelmektedir. Ancak sınıfın orta ve ön bölgelerinde hava akımı hâlâ zayıf kalmakta, sınıf genelinde akış dağılımı homojen olmayan bir yapı sergilemektedir.

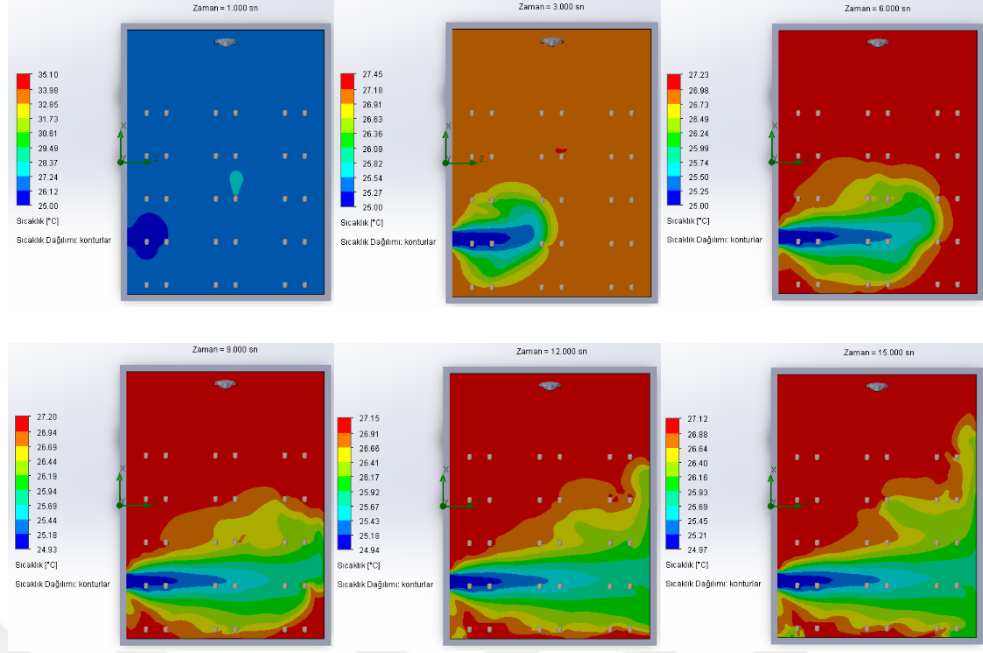
**9 sn:** Sınıfın sol üst köşesinde kuvvetli bir sirkülasyon yapısı gelişmekte; bu bölgede hava, sınıf içerisinde dairesel bir hareket modeli izlemektedir. Dairesel hava hareketi, akımın belirli bölgelerde sınıf içerisinde hapsolmesine neden olmakta; akışın sınıfın geneline dengeli biçimde yayılmasını engellemektedir.

**12 sn:** Hava akımı sağ alt köşeye yönelmekte ve sınıfın arka kısmında bulunan açık pencere doğrultusunda kısmi bir çıkış eğilimi göstermektedir. Ancak sınıfın merkezinde devam eden dairesel hava hareketi, sınıf içerisindeki hava akımının tamamen yönlendirilmesini ve tahliye etkisinin artmasını engellemektedir.

**15 sn:** Sınıf genelinde karmaşık, çok yönlü ve dairesel akım yapıları hâkimdir. Açık pencere doğrultusunda sınırlı düzeyde hava çıkışı devam etmektedir; ancak hava akımının büyük kısmı sınıf içerisinde sirküle olmakta, bu da homojen ve etkili bir hava değişiminin sağlanmasını sınırlamaktadır.

Elde edilen bulgular, yalnızca arka kısımdaki tek pencerenin açık tutulduğu bu senaryoda, sınıf içerisinde düzensiz ve dengesiz bir hava hareketi oluştuğunu ortaya koymaktadır.

**Sıcaklık Dağılımı Analizi:** S5 kapsamında, yaz mevsimine özgü çevresel koşullar altında sınıfın yalnızca arka kısmında yer alan pencerenin açık tutulduğu durumda sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir. Zamana bağlı olarak Şekil 3.24'te elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları aşağıda özetlenmektedir. İlgili kontur haritalarında sıcaklık değerleri °C cinsinden ifade edilmekte olup, kırmızı tonlar ortam sıcaklığının üzerinde kalan bölgeleri (örneğin 27,3 °C ve üzeri), mavi tonlar ise sabit iç sıcaklığa yakın veya daha düşük sıcaklık bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.24. S5'e ait sıcaklık dağılımı

**1 sn:** Sınıf genelinde sıcaklık homojen ve yüksektir. Sol alt köşede belirgin bir soğuk hava girişi gözlenmektedir. Bu durum, arka pencereden sınıfa serin hava girişinin başladığını ve havanın sınıfın alt sol kısmına doğru ilerlediğini göstermektedir.

**3 sn:** Soğuk hava akımı sınıfın ortasına ulaşmakta ve burada yoğunlaşmaktadır. Sıcaklık dağılımı, enfekte bireyin bulunduğu bölgede soğumanın başladığını ve dış havanın iç ortam havasıyla kısmen karıştığını ortaya koymaktadır.

**6 sn:** Soğuk hava akımı, sınıfın sağ tarafına doğru doğrusal ve dar bir koridor şeklinde yayılmaktadır. Bu durum, hava akışının kontrollü ancak sınırlı şekilde sınıf içerisinde ilerlediğini ve sıcaklık farklarının belirgin şekilde oluştuğunu göstermektedir.

**9 sn:** Soğuk hava sınıfın alt yarısında geniş bir yayılım göstermektedir. Üst bölgelerde ise sıcak hava hâkimiyetini korumaktadır. Bu tabakalaşma, sınıf içerisinde yeterli dikey sirkülasyonun oluşmadığını, serin havanın zemin seviyesinde kaldığını ve sıcak havanın üst bölgelerde biriktiğini göstermektedir.

**12 sn:** Sınıfın alt bölgelerinde sıcaklık 24.9–25,5 °C aralığında seyretmekte, üst bölgelerde ise yaklaşık 27 °C sıcaklık korunmaktadır. Bu durum, sıcak havanın yükseldiğini ve soğuk havanın zemin seviyesine yerleştiğini doğrulamaktadır.

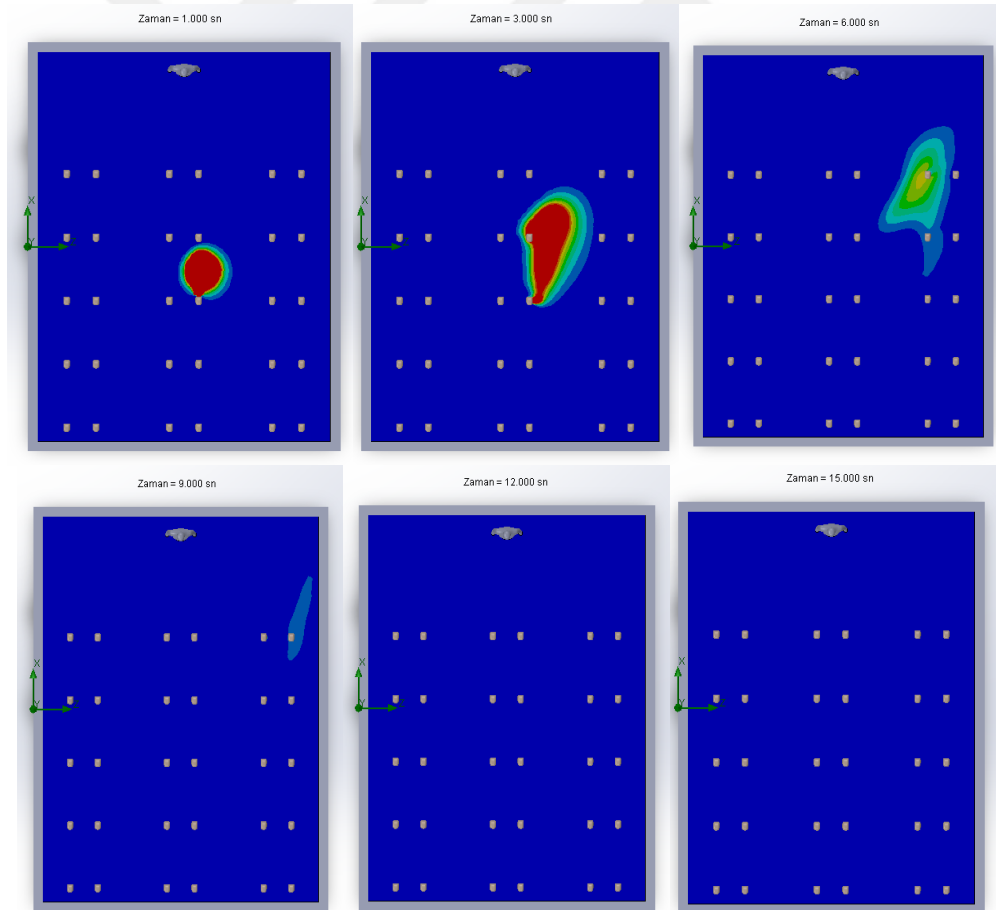
**15 sn:** Sıcaklık dağılımı büyük oranda sabitlenmektedir. Alt bölgede kalıcı bir soğuk hava kitlesi oluşmakta; üstte sıcak hava varlığını sürdürmektedir. Bu yapı, sınıf içerisinde hava karışımının yetersiz kaldığını ve hava değişiminin sınırlı olduğunu göstermektedir.

Elde edilen bulgular, sadece arka pencerenin açık tutulduğu bu senaryoda, sınıf içerisinde yeterli türbülans oluşmadığını ve hava girişinin zayıf kaldığını ortaya koymaktadır.

#### 3.4.1.6. Dört pencere açık (S6)

S6 kapsamında, yaz mevsimine özgü çevresel koşullar altında sınıfın dört pencerenin açık tutulduğu durumda enfekte bireyden kaynaklı partikül dağılımı analiz edilmektedir.

**Partikül Dağılımı Analizi:** S6 senaryosuna ait partikül dağılım analizi Şekil 3.27.'de görülmektedir. Görsellerde kullanılan kontur haritalarında partikül konsantrasyonu, renk skalası ile ifade edilmiştir. Kırmızı tonlar, yüksek yoğunlukta partikül birikimini; mavi tonlar ise düşük yoğunluklu bölgeleri temsil etmektedir.



Şekil 3.25. S6'ya ait Partikül Dağılı

Zamana bağılı kontur haritalarına göre partikül dağılımı şu şekilde gelişmektedir:

**1 sn:** Enfekte bireyin çevresinde yüksek konsantrasyonlu, lokalize ve simetrik bir partikül bulutu oluşmaktadır. Bu aşamada aerosoller henüz hava akımı etkisiyle taşınmamış, sınıf içerisinde yayılım gerçekleşmemiştir.

**3 sn:** Partikül bulutu sınıfın üst kısmına ve sağ tarafına doğru yönelmeye başlamaktadır. Çapraz hava akımı, partikülleri enfekte birey etrafından hızlı bir şekilde uzaklaştırmakta; kırmızı tonlar ile temsil edilen yüksek yoğunluk bölgesinin merkezde hızla daraldığı gözlenmektedir.

**6 sn:** Partiküller, sağ üst köşeye doğru taşınmakta ve büyük oranda dağılmaktadır. Kontur haritalarında mavi ve yeşil tonların artışı, aerosol konsantrasyonunun seyredildiğini göstermektedir. Bu durum, çapraz doğal havalandırmanın partikül tahliyesini etkin şekilde başlattığını ortaya koymaktadır.

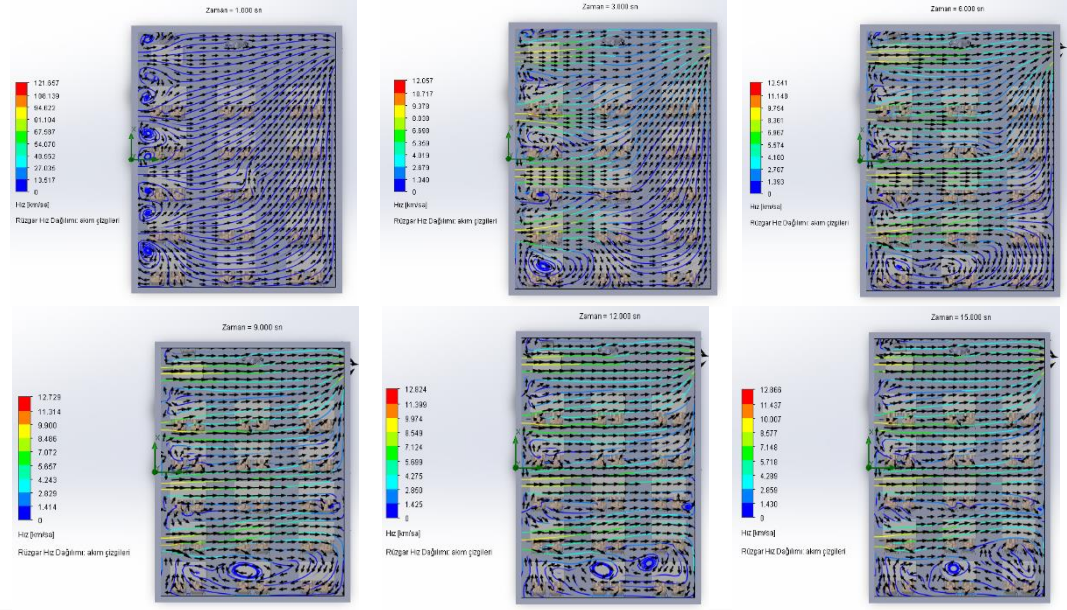
**9 sn:** Sınıfın büyük bölümü temizlenmektedir. Sadece sağ üst köşede, hava tahliyesi yönünde, düşük yoğunluklu sınırlı miktarda partikül kalmaktadır.

**12 sn:** Partikül yoğunluğu neredeyse sıfıra inmektedir. Etkili hava akımı sayesinde sınıf içerisindeki tüm aerosoller ortamdan uzaklaştırılmaktadır.

**15 sn:** Sınıf içerisinde partikül kalmamakta, ortam tamamen temizlenmiş görünmektedir.

Elde edilen bulgular, dört pencerenin açık tutulduğu bu senaryoda çapraz doğal havalandırmanın, enfekte birey kaynaklı aerosollerin sınıf içerisinde yayılmadan hızlı bir şekilde ortamdan uzaklaştırılmasını sağladığını açıkça ortaya koymaktadır. Yüksek hava değişim oranı ve etkili akış yönlendirmesi sayesinde; Partiküller ortamda kalıcı olmamakta, Bulaşma riski minimuma indirilmekte, Temiz hava kısa sürede tüm hacme yayılmaktadır.

**Hava Hareketi ve Akış Dağılım Analizi:** S6 kapsamında, yaz mevsimine özgü çevresel koşullar altında sınıfın dört penceresinin açık tutulduğu durumda oluşan hava akımı davranışları ve hız dağılımı analiz edilmektedir. Şekil 3.26'da sunulan hız vektörleri ve kontur haritaları, sınıf içerisindeki hava hareketinin yönünü ve hız büyüklüğünü ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Görsellerde kullanılan renk skalasında mavi tonlar, düşük hız bölgelerini; kırmızı tonlar ise yüksek hız bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.26. S6 ‘ya hava hareketi ve akış dağılımı analizi

**1 sn:** Sınıfın alt ve üst bölgelerinde vorteks yapıları oluşmakta; ancak orta bölgeye belirgin bir hava girişi başlamaktadır. Birden fazla yönden giriş yapan hava akımları, sınıfın orta hattında birleşerek hava dolaşımını başlatmaktadır.

**3 sn:** Hava akımı daha düzenli bir yapıya kavuşmakta; pencereler arasında belirgin çapraz yönlü bir hava akışı oluşmaktadır. Alt ve üst bölgelerde küçük ölçekli döngüler gözlenirken, ana hava akımı yatay doğrultuda sınıf boyunca ilerlemektedir.

**6 sn:** Hava akımı, sınıf genelinde neredeyse doğrusal bir hava koridoru şeklinde yönlendirilmektedir. Hız dağılımı, hava akımının sınıf genelinde dengeli olduğunu ortaya koymaktadır.

**9 sn:** Çapraz havalandırmanın tam etkisi ortaya çıkmakta; üstten giren ve alttan çıkan hava akımları sınıfın tamamını kapsamaktadır. Döngülerin etkisi azalmış, hava akışı büyük ölçüde laminar özellik kazanmaktadır.

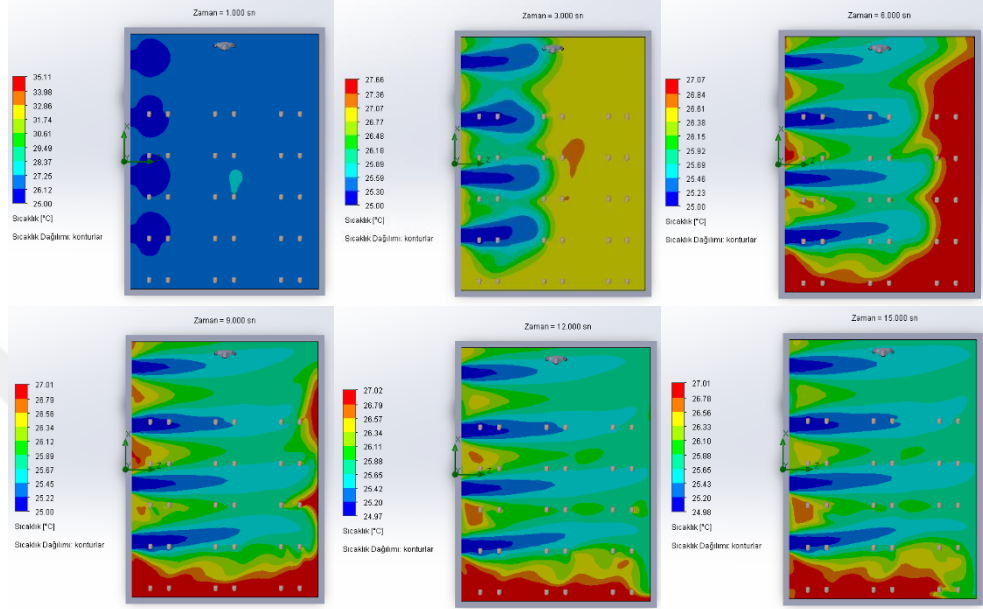
**12 sn:** Hava akımı stabil hale gelmektedir. Dört pencere arasında gerçekleşen hava transferi etkili ve sürekli bir şekilde sürmektedir.

**15 sn:** Alt bölgelerde sınırlı sayıda küçük girdap yapıları dışında, tüm sınıfta kontrollü ve yönlü bir hava sirkülasyonu hakimdir.

Elde edilen bulgular, dört pencere açık olması durumunda, sınıf içerisindeki hava akımı üzerinde son derece verimli sonuçlar doğurduğunu ortaya koymaktadır.

**Sıcaklık Dağılımı Analizi:** S6 kapsamında, yaz mevsimine özgü çevresel koşullar altında sınıfın dört penceresinin açık tutulduğu durumda sıcaklık dağılımı analiz

edilmektedir. Zamana bağlı olarak Şekil 3.27’de elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları aşağıda özetlenmektedir. İlgili kontur haritalarında sıcaklık değerleri °C cinsinden ifade edilmekte olup, kırmızı tonlar ortam sıcaklığının üzerinde kalan bölgeleri, mavi tonlar ise sabit iç sıcaklığa yakın veya daha düşük sıcaklık bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.27. S6’ ya ait sıcaklık dağılımı

**1 sn:** Sınıf genel sıcaklığı oldukça yüksektir. Mavi tonlar ile temsil edilen yeni giren serin hava, pencere yönüne karşılık gelen sol kenarlardan sınıfa giriş yapmaktadır.

**3 sn:** Sınıfın sol kısmında belirgin bir serin hava tabakası oluşmaktadır. Sağ ve üst bölgelerde sıcak hava varlığını sürdürmektedir. Sıcaklık farkları artmakta ve hava karışımı başlamaktadır.

**6 sn:** Serin hava sınıfın büyük bölümüne yayılmakta, sol kenardan giren hava sağ tarafa doğru ilerleyerek sınıf genelinde uzanan yatay soğuk hava kuşakları oluşturmaktadır. Sıcak hava ise üstte ve arka bölgelerde sınırlı kalmaktadır.

**9 sn:** Sınıf içerisindeki sıcaklık daha homojen bir yapıya ulaşmaktadır. Serin hava hemen hemen tüm bölgelere yayılmış; termal tabakalaşma büyük oranda azalmış, üstteki sıcak hava sirkülasyona katılmıştır.

**12 sn:** Hava akımı etkisiyle serin hava sınıfın tamamını sarmakta, sıcaklık farkı minimum seviyeye inmektedir. Ortam sıcaklığı 25-26 °C aralığında dengelenmektedir.

**15 sn:** Sıcaklık dağılımı tamamen dengelenmekte ve neredeyse tüm sınıfta homojen bir sıcaklık yapısı oluşmaktadır.

Elde edilen bulgular, dört pencerenin açık tutulması sayesinde sınıf içerisindeki serin hava girişlerinin tüm bölgelere dengeli şekilde dağıldığını, sıcak havanın ise yükselerek ortamdan uzaklaştırıldığını ortaya koymaktadır. Bu durum, sıcaklık farklarının minimuma indirilmesine ve homojen bir sıcaklık yapısının sağlanmasına katkı sunmaktadır.

### 3.4.2. Sonbahar mevsimi senaryosu

Sonbahar mevsimine ait senaryoların oluşturulmasında, Konya ili Meram ilçesine ait ekim ayı ortalama iklim verileri temel alınmıştır. Bu kapsamda dış ortam sıcaklığı, bağıl nem oranı ve hâkim rüzgâr hızları gibi meteorolojik değişkenler göz önünde bulundurularak modelleme gerçekleştirilmiştir. Dış ortam sıcaklığı yaklaşık 14 °C, dış ortam bağıl nem ortalama %60, iç ortam bağıl nem ortalama %50, rüzgâr hızı ise 11 km/sa alınarak simülasyonlar bu değerler doğrultusunda yapılandırılmıştır. Sınıf modeli, bölgenin hâkim rüzgar yönü olan kuzey-kuzeydoğu doğrultusu dikkate alınarak yerleştirilmiş, bu yerleşim, dış ortam hava hareketlerinin doğal havalandırma üzerindeki etkisini daha gerçekçi biçimde yansıtmayı amaçlamaktadır. Senaryolara farklı cephelerde konumlanan sınıflar dahil edilmemiştir.

Simülasyon süresince sınıf ortamı, 30 öğrencinin bulunduğu, 6 × 8 m boyutlarında kapalı bir hacim olarak modellenmiştir. Öğrencilerin oturma düzeni tüm senaryolarda sabit tutulmuş; böylece pencere açıklıklarının konum ve sayısına bağlı olarak ortaya çıkan hava akımı desenlerinin, virüs partiküllerinin yayılımı üzerindeki etkisi, diğer değişkenlerden bağımsız olarak değerlendirilebilmiştir. Tüm senaryolarda pencere açıklıkları, iki kanatlı pencere sistemlerinde yalnızca tek kanadın tamamen açık olması koşulu ile sınırlandırılmıştır. Bu yaklaşım, mevcut eğitim yapılarında yaygın olarak gözlemlenen pencere kullanım biçimlerini temsil etmesi ve modellemede gerçekçi sınır koşullarının sağlanması amacıyla tercih edilmiştir.

Enfekte birey, her senaryoda sınıfın orta noktasında konumlandırılmış olup, solunum eylemi sırasında –özellikle hapşırma anında– ortama yayılan damlacıkların fiziksel özellikleri literatüre dayalı olarak tanımlanmıştır. Bu doğrultuda, damlacıkların başlangıç sıcaklığı 35 °C (Bahramian vd. 2023), bağıl nemi ise %80 olarak belirlenmiştir (Xie vd., 2007). Sınıfta bulunan öğretmen ve diğer öğrencilerin vücut sıcaklığı sabit değer girilip, senaryolara değişken olarak dahil edilmemiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar da kapalı ortamlarda öksürük, konuşma veya solunum yoluyla salınan aerosol partiküllerinin ilk birkaç saniyede yoğun şekilde yayıldığını ve ortam hava akımı ile havalandırma koşullarının bu sürede partikül hareketini doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır (Dbouk & Drikakis, 2020). Bu doğrultuda çalışmada kullanılan 15 saniyelik analiz aralığı, hem virüs partikülünün yayılımının erken evresinin detaylı olarak incelenmesine olanak sağlamakta hem de farklı havalandırma senaryolarının karşılaştırılmasında literatürle uyumlu, bilimsel bir değerlendirme imkânı sunmaktadır.

Simülasyon çalışmalarında, analiz süresi 15 sn olarak sınırlandırılmıştır. Bu zaman dilimi içerisinde, enfekte bireyden kaynaklanan virüs partiküllerinin sınıf içerisindeki dağılımı, pencere sayısı ve konumu ile oluşturulan 6 senaryo doğrultusunda değerlendirilmiştir. 15 sn olarak tanımlanan analiz ile elde edilen kontur haritaları, partikül konsantrasyonlarının sınıf içerisindeki mekânsal dağılımını ve zamanla gösterdiği değişimi ortaya koymaktadır. Söz konusu görsel çıktılar, enfekte bireyin etkilediği alanın belirlenmesi, virüs partikül yayılım hızının analiz edilmesi ve doğal havalandırma stratejilerinin seyreltme başarısının karşılaştırılmasında temel parametreler olarak dikkate alınmıştır. Oluşturan altı senaryo, Çizelge 3.4'te detaylı olarak ifade edilmiştir.

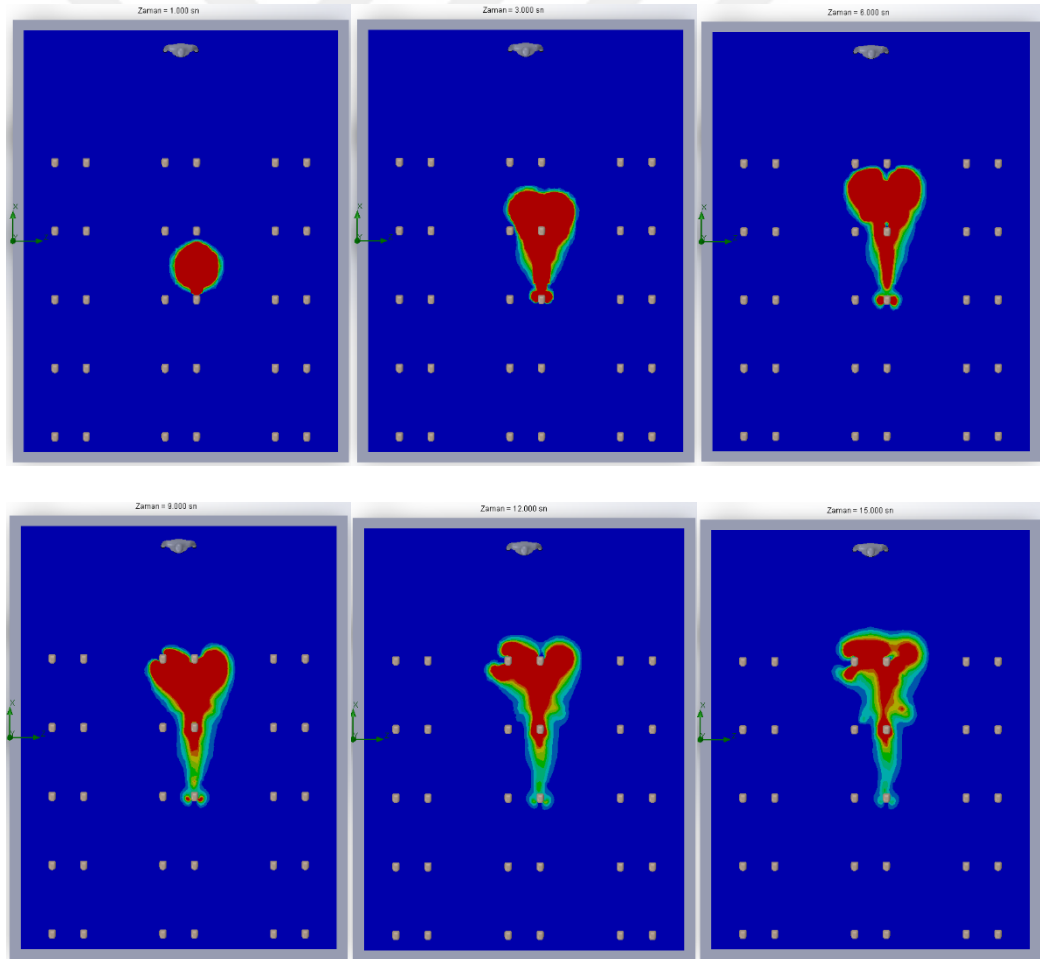
**Çizelge 3.5.** Sonbahar mevsimi senaryoları

| Senaryo   | Pencere konumu | Pencere Açık Sayısı | Kapı   | İç Ortam Hava Sıcaklığı | İç Ortam Bağıl Nem | Dış Ortam Hava Sıcaklığı | Dış Ortam Bağıl Nem | Rüzgâr hızı |
|-----------|----------------|---------------------|--------|-------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------|-------------|
| Senaryo 1 | Hiçbiri        | 0                   | Kapalı | 20 °C                   | %50                | 14 °C                    | %60                 | 11 km/sa    |
| Senaryo 2 | Ön             | 1                   | Açık   | 20 °C                   | %50                | 14 °C                    | %60                 | 11km/sa     |
| Senaryo 3 | Orta           | 2                   | Açık   | 20 °C                   | %50                | 14 °C                    | %60                 | 11 km/sa    |
| Senaryo 4 | Ön-Arka        | 2                   | Açık   | 20 °C                   | %50                | 14 °C                    | %60                 | 11 km/sa    |
| Senaryo 5 | Arka           | 1                   | Açık   | 20 °C                   | %50                | 14 °C                    | %60                 | 11km/sa     |
| Senaryo 6 | Hepsi          | 4                   | Açık   | 20 °C                   | %50                | 14 °C                    | %60                 | 11km/sa     |

### 3.4.2.1. Tüm pencereler kapalı (S1)

S1 kapsamında, sonbahar mevsimine özgü çevresel koşullarda, tüm pencerelerin ve kapının kapalı tutulduğu; doğal havalandırmanın devre dışı bırakıldığı sınıf ortamında, enfekte birey kaynaklı virüs partikül yayılımı analiz edilmektedir. Bu senaryo **kontrol senaryosu** olarak oluşturulmuştur. Bu senaryo, doğal havalandırmanın bulunmadığı temel koşulu temsil etmekte ve diğer senaryoların etkisi bu referans koşul ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

**Partikül Dağılımı Analizi:** S1 senaryosuna ait partikül dağılım analizi Şekil 3.28’de görülmektedir. Görsellerde kullanılan kontur haritalarında partikül konsantrasyonu, renk skalası ile ifade edilmiştir. Kırmızı tonlar, yüksek yoğunlukta partikül birikimini; mavi tonlar ise düşük yoğunluklu bölgeleri temsil etmektedir.



Şekil 3.28. S1’e ait partikül dağılımı

Zamana bağılı kontur haritalarına göre partikül dağılımı şu şekilde gelişmektedir:

**1 sn:** Partikül salımı başladıktan hemen sonra, enfekte bireyin bulunduğu sınıf merkezinde kırmızı yoğunluklu, simetrik ve kompakt bir partikül bulutu oluşmuştur. Yayılım neredeyse sabit kalmakta, dış etkenlerle yön değiştirmemektedir. Bu, sınıf içerisinde hava akımının olmadığını açıkça göstermektedir.

**3 sn:** Partikül bulutu genişlemeye başlamış ancak hâlen merkezi bir formda kalmaktadır. Yayılımın aşağı yönlü olduğu, ancak herhangi bir yönlü hava akımıyla taşınmadığı gözlemlenmektedir. Sınıfın diğer bölgelerine herhangi bir partikül ulaşımı henüz gerçekleşmemiştir.

**6 sn:** Partikül yoğunluğu sınıf ortasında artmış ve alt bölgelere doğru sınırlı bir yayılım göstermeye başlamıştır. Ancak sınıf genelinde dağılım hâlâ çok düşüktür. Dağılımın şekli, dış akış etkisinin yokluğunda sadece yerel momentumla gerçekleştiğini göstermektedir.

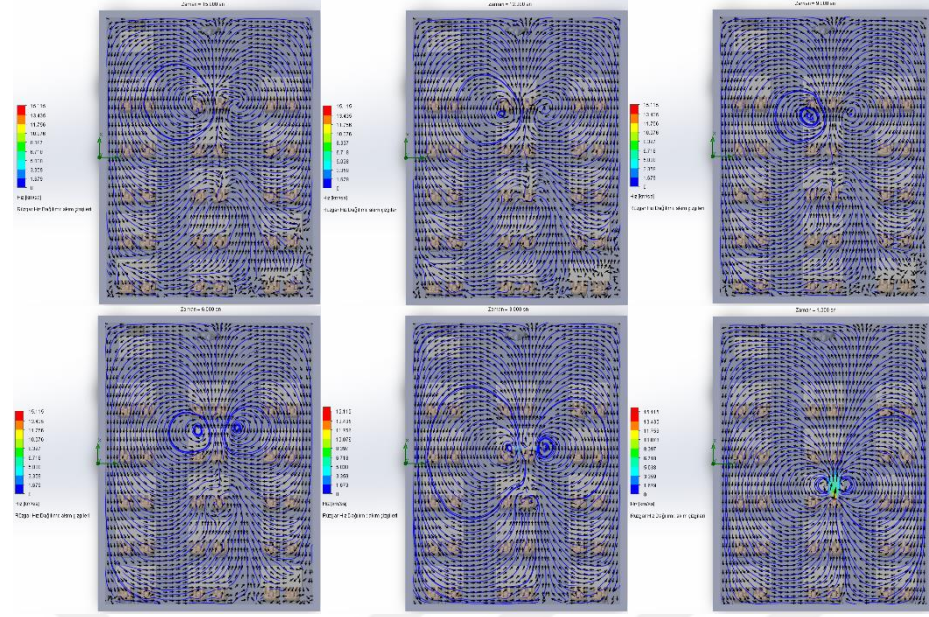
**9 sn:** Partikül bulutu daha belirgin bir hacim kazanmış, ancak bulunduğu bölgede dairesel yayılmaya devam etmektedir. Pencere kapalı olduğu için herhangi bir tahliye veya seyreltme gerçekleşmemektedir. Yoğunluk merkezde yüksek, çevrede düşüktür.

**12 sn:** Partiküller sınıfın merkezinden çevreye doğru genişlemeye başlamıştır. Ancak bu yayılım oldukça yavaştır ve homojen değildir. Yönlü bir hava akımı olmadığından partiküller sınıfın büyük bölümünde askıda kalmaktadır.

**15 sn:** Son zaman adımı partikül bulutunun sınıfın alt orta bölgelerine doğru yayıldığı görülmektedir. Bununla birlikte, dağılım sınıfın geneline hâlâ ulaşmamıştır. Kırmızı alanlar hâlen oldukça geniş ve yoğunluğun yüksek olduğunu göstermektedir.

Bu senaryo, sınıf ortamında pencere veya herhangi bir hava değişim sisteminin bulunmadığı durumda partikül yayılımının büyük ölçüde kaynak çevresinde yoğunlaştığını ve uzun süre havada asılı kaldığını göstermektedir. 15 saniyelik sürede partiküllerin belirli bir bölgede yoğunlaşarak sabit kalması, enfeksiyon riskinin maksimum seviyede olduğunu göstermektedir.

**Hava Hareketi ve Akış Dağılım Analizi:** S1 kapsamında, sonbahar mevsimine özgü çevresel koşullarda tüm pencerelerin kapalı olduğu durumda, sınıf içerisindeki hava hareketlerinin dinamik davranışı analiz edilmektedir. Şekil 3.29'da sunulan hız vektörleri ve kontur haritaları, sınıf içerisindeki hava hareketinin yönünü ve hız büyüklüğünü ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Görsellerde kullanılan renk skalasında mavi tonlar, düşük hız bölgelerini; kırmızı tonlar ise yüksek hız bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.29. S1'e ait hava hareketi ve akış dağılımı

**1 sn:** Sınıfın merkezinde çok zayıf hava hareketleri oluşmuş; bu hareketler büyük ölçüde ısı farkları ve sınıf içi objelerin etkisiyle oluşan doğal konveksiyon kaynaklıdır. Dolaşım simetrik, ancak sınırlıdır.

**3 sn:** Vorteks hava hareketleri sınıfın merkez eksenini boyunca belirginleşmiştir. Fakat bu türbülanslar dışarıdan yönlendirilen bir hava akımı olmadığı için kendi çevresinde dönen, kapalı döngüler şeklindedir. Hava sınıf içerisinde yer değiştirmemekte, sadece lokal olarak hareket etmektedir.

**6 sn:** Sınıfın alt ve üst bölgelerinde döngüsel hava hareketleri güçlenmiş, ancak yönsüz kalmıştır. Hava akımı sınıfın genelinde sirkülasyon oluşturmak yerine lokal bölgelerde iç içe geçen türbülanslar hâlinde gelişmektedir.

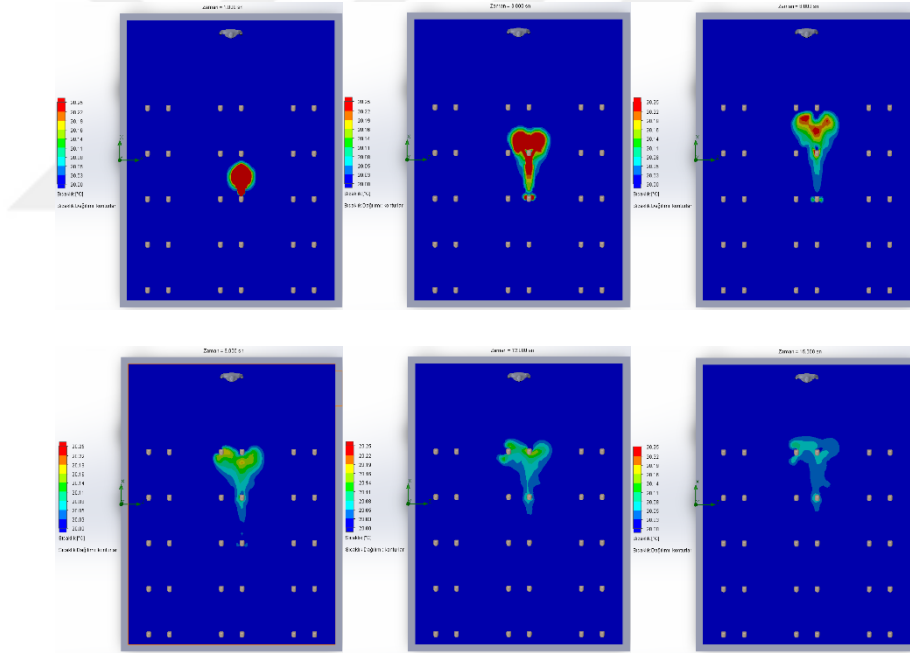
**9 sn:** Hareketlerin çoğu sınıfın merkezine yakın bölgelerde yoğunlaşmıştır. Hava, sınıfın içindeki kapalı sistem içerisinde dairesel hareket etmektedir. Dış hava girişi olmadığı için hava sürekli kendi içerisinde dolanmakta, taze hava sirkülasyonu oluşmamaktadır.

**12 sn:** Simülasyon ilerledikçe vorteks yapıları belirgin hale gelmiş; fakat sınıfın geneline yayılan bir akış hâlâ oluşmamıştır.

**15 sn:** Sınıf genelinde hava hâlâ durağan sayılabilecek bir yapıdadır. Döngüsel hareketler sınıfın ortasında yoğunlaşmakta; ancak giriş-çıkış olmadığından bu döngüler havanın tazelenmesine hizmet etmemektedir. Rüzgâr hızı son derece düşük kalmıştır.

Tüm pencerelerin kapalı tutulduğu bu senaryoda, iç mekândaki hava statik, yönsüz ve düşük hızlı bir yapı sergilemiştir. Bu yapılandırma, sınıf içerisinde hava değişim oranının neredeyse sıfıra yakın olduğunu göstermekte; enfekte birey kaynaklı partiküllerin ortamdan uzaklaştırılmasının mümkün olamayacağını ortaya koymaktadır. Bu bulgular, doğal havalandırmanın enfeksiyon kontrolü açısından vazgeçilmez olduğunu bir kez daha vurgulamaktadır.

**Sıcaklık Dağılımı Analizi:** S1 kapsamında, sonbahar mevsimine özgü çevresel koşullarda tüm pencerelerin kapalı olduğu durumda, sınıf içerisindeki sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir. Zamana bağlı olarak Şekil 3.30’da elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları aşağıda özetlenmektedir. İlgili kontur haritalarında sıcaklık değerleri °C cinsinden ifade edilmekte olup, kırmızı tonlar ortam sıcaklığının üzerinde kalan bölgeleri, mavi tonlar ise sabit iç sıcaklığa yakın veya daha düşük sıcaklık bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.30. S1'e ait sıcaklık dağılımı

**1 sn:** Enfekte bireyin bulunduğu merkez noktada, ortam sıcaklığından hafif daha yüksek ( $\sim 20,3$  °C) bir sıcak hava bölgesi oluşmuştur. Bu lokal sıcaklık artışı, kişinin solunum yoluyla ortama yaydığı ısıyı temsil etmektedir. Sınıfın geri kalanı homojen şekilde 20 °C düzeyindedir.

**3 sn:** Sıcak hava, sınıfın merkezinden yukarıya ve aşağıya doğru yayılmaya başlamıştır. Ancak herhangi bir hava akımı olmadığı için bu yayılım yönsüz ve dar bir bantta gerçekleşmektedir. Sıcaklık farkı sınırlı kalmıştır.

**6 sn:** Sıcaklık dağılımı genişlemekte; fakat dağılım simetrik ve lokal bir yayılım şeklindedir. Kırmızıdan sarıya geçiş, sıcak havanın yukarı çıkma eğilimini ve ardından çevresine dağılmaya çalışmasını göstermektedir. Isı, sınıfın genelinde hâlâ sabittir.

**9 sn:** Sıcak hava kütlesi daha belirgin bir form kazanmış ve yukarı doğru yükselmeye devam etmiştir. Alt bölgelerde hâlâ sıcaklık farkı oluşmamış, ısı yayılım büyük ölçüde merkezde kalmıştır. Sınıfın köşelerinde ısı değişimi neredeyse yoktur.

**12 sn:** Sıcak hava hareketi sınıf içerisinde küçük çaplı girdaplar oluşturmaya başlamıştır. Ancak bu hareketin yönü rastgeledir; dış akım desteği olmadığından sıcak hava belirli bölgelerde sıkışıp kalmaktadır.

**15 sn:** Zaman ilerledikçe sıcak hava daha geniş bir alana yayılmaya başlamış; ancak genel sıcaklık dağılımı hâlâ büyük ölçüde merkezde yoğunlaşmıştır. Sınıfın üst orta bölgelerinde sarı-yeşil geçişli sıcaklık alanları oluşmuştur. Fakat bu bölgelerde de ısı farkı çok sınırlıdır.

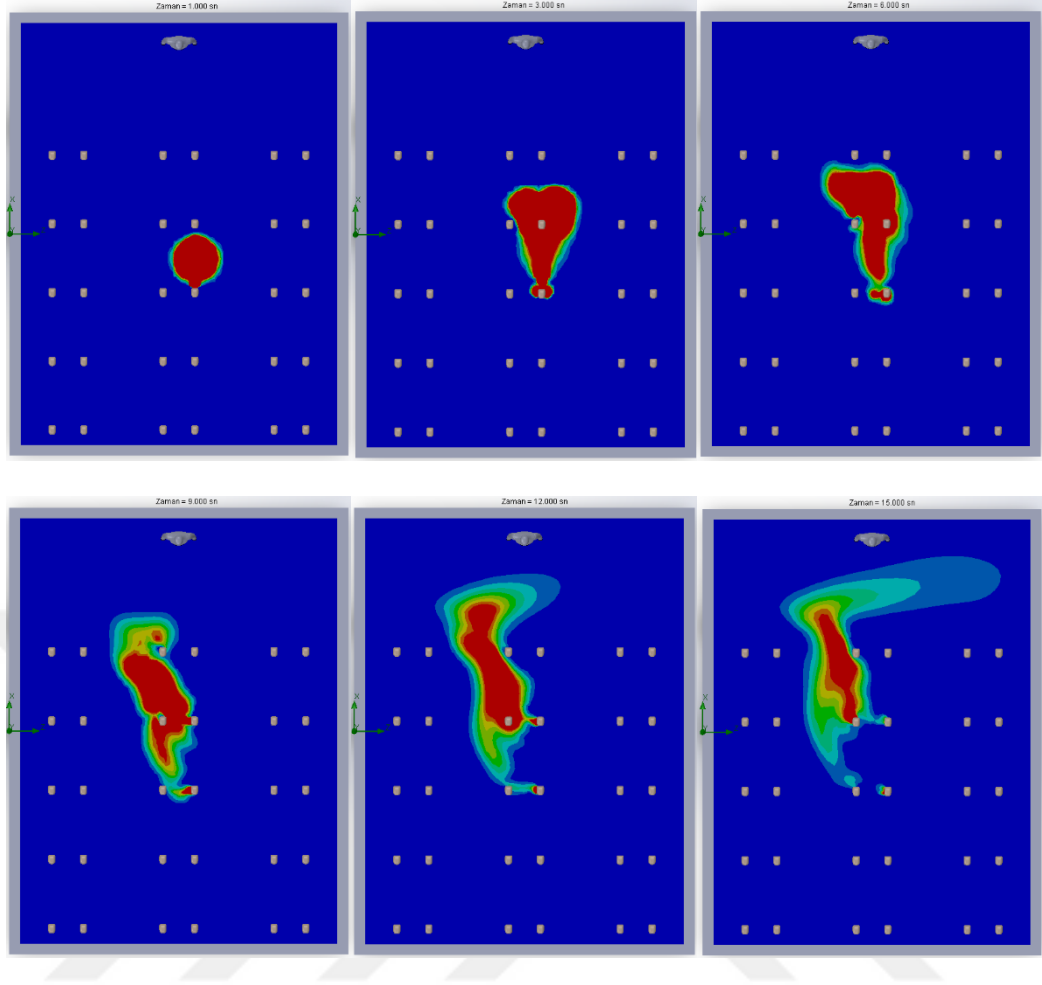
Hava hareketinin olmayışı, sıcak havanın dikey ekseninde sınırlı yayılmasına ve sınıf genelinde sıcaklık farkı oluşmamasına neden olmuştur.

Geçiş mevsiminde tüm pencerelerin kapalı olduğu bu senaryoda, iç mekân ısı konfor koşulları durağan kalmakta, ısı değişimi yalnızca enfekte bireyin çevresiyle sınırlı olmaktadır. Bu durum, sıcak hava ile yayılan enfekte partiküllerin de sınıf genelinde dağılmadan uzun süreli askıda kalabileceğine işaret eder. Bu senaryo, doğal havalandırma eksikliğinin hem hava kalitesi hem de ısı denge açısından ne denli kritik olduğunu vurgulamaktadır.

#### 3.4.2.2. Ön tek pencere açık (S2)

S2 kapsamında, sonbahar mevsimine özgü çevresel koşullarda, sadece ön tek pencerenin ve kapının açık tutulduğu sınıf ortamında, enfekte birey kaynaklı virüs partikül dağılımı, hava hareketi ve sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir.

**Partikül Dağılımı Analizi:** S2 senaryosuna ait partikül dağılım analizi Şekil 3.31’de görülmektedir. Görsellerde kullanılan kontur haritalarında partikül konsantrasyonu, renk skalası ile ifade edilmiştir. Kırmızı tonlar, yüksek yoğunlukta partikül birikimini; mavi tonlar ise düşük yoğunluklu bölgeleri temsil etmektedir.



Şekil 3.31. S2'e ait partikül dağılımı

Zamana bağlı kontur haritalarına göre partikül dağılımı şu şekilde gelişmektedir:

**1 sn:** Aerosol bulutu, enfekte bireyin çevresinde simetrik ve kompakt bir yapıda, yüksek yoğunlukta lokalize olmuştur. Dağılım sınırlı bir hacme sahip olup, partiküller henüz sınıf genelinde yayılmamıştır.

**3 sn:** Partikül yayılımı yatay düzlemde genişlemeye başlamış; açık pencerenin etkisiyle partiküller sınıfın ön bölgesine doğru yönelmiştir. Dış hava akımı partikülleri iç hacimde taşımakta; ancak tahliye etkisi halen sınırlı kalmaktadır.

**6 sn:** Partikül bulutu, açık pencerenin yönlendirdiği hava akımı doğrultusunda sınıfın ön kısmında yoğunlaşmakta ve kontaminasyon alanı genişlemektedir. Ancak ortam genelinde tam bir hava değişimi sağlanamadığından partikül tahliyesi yetersizdir.

**9 sn:** Hava akımı ile yönlenen partikül bulutu sınıfın sol ön kesiminde belirgin şekilde yoğunlaşmakta; bazı bölgelerde dönel (girdap) hareketler oluşmaktadır. Bu aşamada partikül konsantrasyonunda kademeli bir seyrelme eğilimi gözlemlenmektedir.

**12 sn:** Partikül yayılımı sınıf içerisinde daha geniş bir alana ulaşmış, ancak belirli bölgelerde yoğunluk korunmaktadır. Özellikle sınıfın orta ve arka kısımlarında hava akımının yetersizliği dikkat çekmektedir.

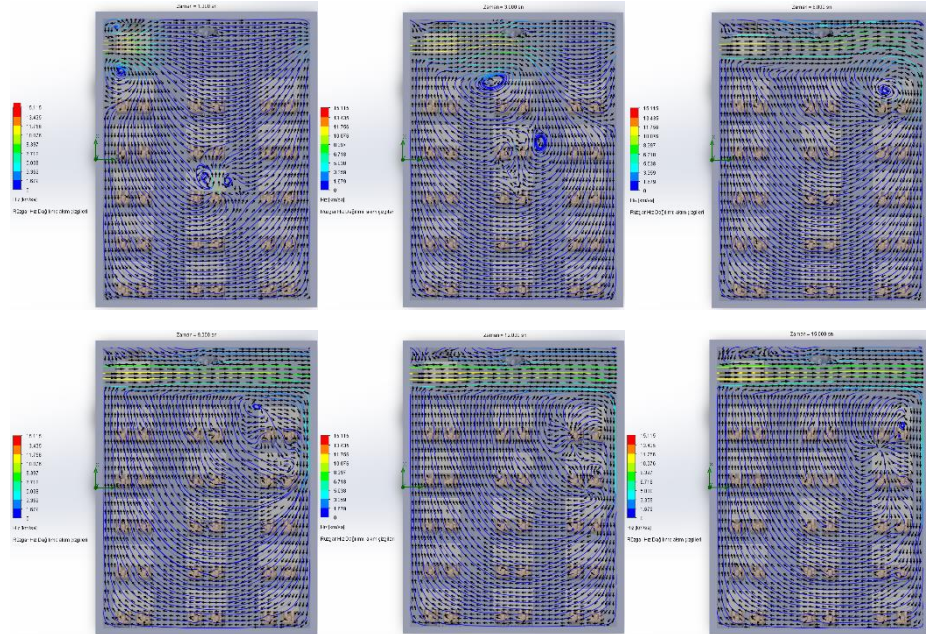
**15 sn:** Partiküller sınıf geneline yayılmış; buna rağmen sınıfın bazı bölgelerinde, özellikle orta ve ön kısımlarda yüksek partikül yoğunluğu devam etmektedir. Bu durum, mevcut havalandırma düzeninin partikül tahliyesinde yetersiz kaldığını göstermektedir.

Zaman ilerledikçe kırmızı alanların kısmen azaldığı, mavi bölgelerin arttığı gözlemlenmekte; bu durum, partiküllerin sınıf genelinde yayıldığını ancak havalandırma yetersizliği nedeniyle tamamen ortamdaki uzaklaştırılamadığını ortaya koymaktadır.

Ekim ayına ait sonbahar mevsimi koşullarında, dış ortam ile iç ortam sıcaklık farkının görece düşük olması, doğal hava sirkülasyonunu sınırlandırmıştır. Açık konumda tutulan tek pencere, partikül dağılımını yönlendirmiş olsa da etkili bir tahliye sağlayamamıştır.

**Hava Hareketi ve Akış Dağılım Analizi:** S2 kapsamında, sonbahar mevsimine özgü çevresel koşullarda sadece tek ön pencerenin açık olduğu durumda, sınıf içerisindeki hava hareketlerinin dinamik davranışı analiz edilmektedir.

Şekil 3.32’de sunulan hız vektörleri ve kontur haritaları, sınıf içerisindeki hava hareketinin yönünü ve hız büyüklüğünü ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Görsellerde kullanılan renk skalasında mavi tonlar, düşük hız bölgelerini; kırmızı tonlar ise yüksek hız bölgelerini temsil etmektedir.



**Şekil 3.32.** S2’ye ait hava hareketi ve akış dağılımı

**1 sn:** Sınıfa yalnızca ön cephedeki açıklıktan sınırlı miktarda hava girişi başlamıştır. Bu giriş, sadece pencere çevresindeki küçük bir bölgeyi etkilemekte olup, sınıf genelinde anlamlı bir hava sirkülasyonu henüz oluşmamıştır. Akım yönü sınıf içerisine doğru ilerlemekte ancak düşük hızlı ve dengesizdir.

**3 sn:** Hava girişi devam etmekte; ancak akım hâlâ sınırlı bir bölgede etkili olmaktadır. Sınıfın orta ve arka kısımlarında anlamlı bir hava hareketi oluşmamış; genel akış zayıf kalmıştır.

**6 sn:** Giriş bölgesine yakın bölgelerde belirgin lokal dönel akış yapıları (girdaplar) gelişmiştir. Ancak bu girdaplar sınırlı alanlarda kalmakta ve hava akımı sınıfın orta ve arka bölgelerine etkin biçimde ulaşamamaktadır. Hava dolaşımı düzensiz ve simetrik değildir.

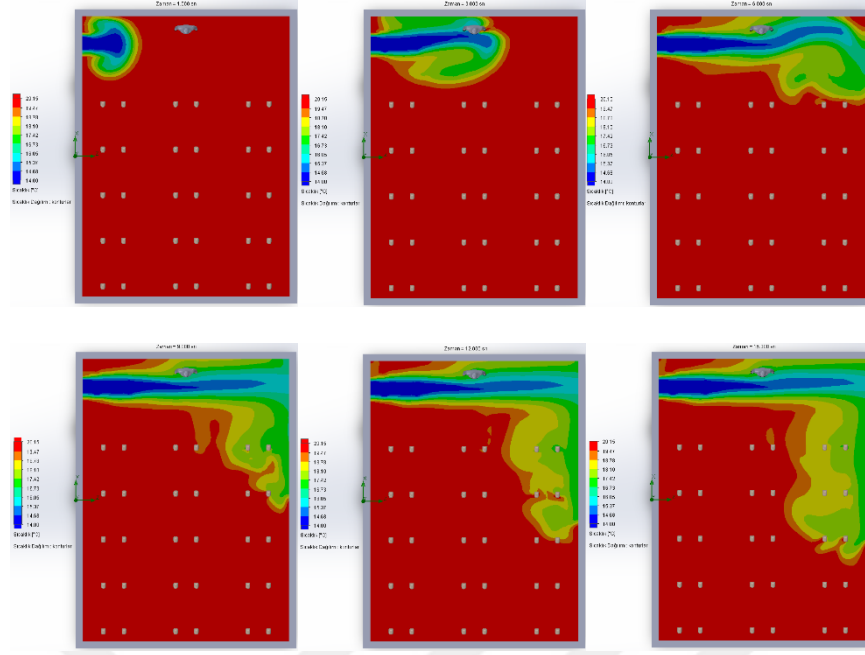
**9 sn:** Açık pencere çevresinde hava hareketinin kısmen artış gösterdiği gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, sınıfın arka yarısında ve köşe bölgelerde hava akımı hâlâ minimum seviyede kalmakta; ölü hava alanlarının oluştuğu tespit edilmektedir.

**12 sn:** Hava akışı, sınıf içerisine girdikten sonra dönel hareketlerle bir süre dolanmakta; ancak sınıf genelinde dengeli ve yönlü bir akış yapısı hâlen oluşmamaktadır. Hava çıkış yönü belirginleşmediği için etkili hava değişimi sağlanamamaktadır.

**15 sn:** Hava hareketinin ön kısımda yoğunlaştığı, ancak sınıfın orta ve arka bölgelerinde düşük hızlı, yönsüz ve sınırlı etkili bir hava yapısının sürdüğü görülmektedir. Özellikle köşe bölgelerde durağan hava alanlarının varlığı dikkat çekmektedir.

Bu senaryoda, yalnızca ön cephede bulunan tek pencerenin açık olması nedeniyle sınıf içerisindeki hava akışı zayıf kalmış, yönsüz ve sınırlı etkili bir yapı sergilemiştir. Akım çizgileri, dönel hareketlerin belirli bir bölgede yoğunlaştığını; renk skalası ise çoğunlukla mavi ve yeşil tonların baskın olduğunu, dolayısıyla hava hızının düşük seviyede kaldığını göstermektedir.

**Sıcaklık Dağılımı Analizi:** S2 kapsamında, sonbahar mevsimine özgü çevresel koşullarda sadece tek ön pencerenin açık olduğu durumda, sınıf içerisindeki sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir. Zamana bağlı olarak Şekil 3.33'te elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları aşağıda özetlenmektedir. İlgili kontur haritalarında sıcaklık değerleri °C cinsinden ifade edilmekte olup, kırmızı tonlar ortam sıcaklığının üzerinde kalan bölgeleri, mavi tonlar ise sabit iç sıcaklığa yakın veya daha düşük sıcaklık bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.33. S2'e ait sıcaklık dağılımı

**1 sn:** Sınıf genelinde sıcaklık dağılımı büyük ölçüde homojendir. İç ortam sıcaklığı yaklaşık 20 °C düzeyindedir. Soğuk hava girişi henüz sınıf içerisine nüfuz etmemiştir.

**3 sn:** Açık pencere üzerinden giren serin dış hava, sınıfın ön ve üst kısmında düşük sıcaklıklı bir bölge oluşturmaya başlamıştır. Bu alan, yaklaşık 16–18 °C aralığında seyretmekte olup, tavan hizasında ve sınırlı bir bölgede etkili olmaktadır.

**6 sn:** Serin hava kütesinin etkisi artmakta, tavan hizasında daha geniş bir alana yayılım göstermektedir. Ancak bu etki hâlen sınıfın üst kotlarıyla sınırlı kalmakta; öğrencilerin bulunduğu alt seviyelerde anlamlı bir sıcaklık değişimi görülmemektedir.

**9 sn:** Soğuk hava kütlesi sınıfın ön kısmından başlayarak üst kotlarda sınıf içerisine doğru yayılmakta; ancak orta ve arka bölgelerde sıcaklık değişimi sınırlı düzeyde kalmaktadır. Alt bölgelerde sıcaklık büyük ölçüde sabitliğini korumaktadır.

**12 sn:** Üst kotlarda soğuk hava yayılımı devam etmekte; özellikle tavan seviyesinde sıcaklık düşüşü daha belirgin hâle gelmektedir. Buna rağmen, sınıfın alt kısımlarında sıcaklık farkı minimum düzeyde kalmaktadır.

**15 sn:** Serin hava, sınıfın üst kotlarında daha geniş bir alana yayılmıştır. Ancak sınıf genelinde hâlen belirgin bir sıcaklık dengesizliği mevcuttur. Özellikle alt seviyelerde sıcaklık korunmakta; üst kotlarda ise soğuma devam etmektedir.

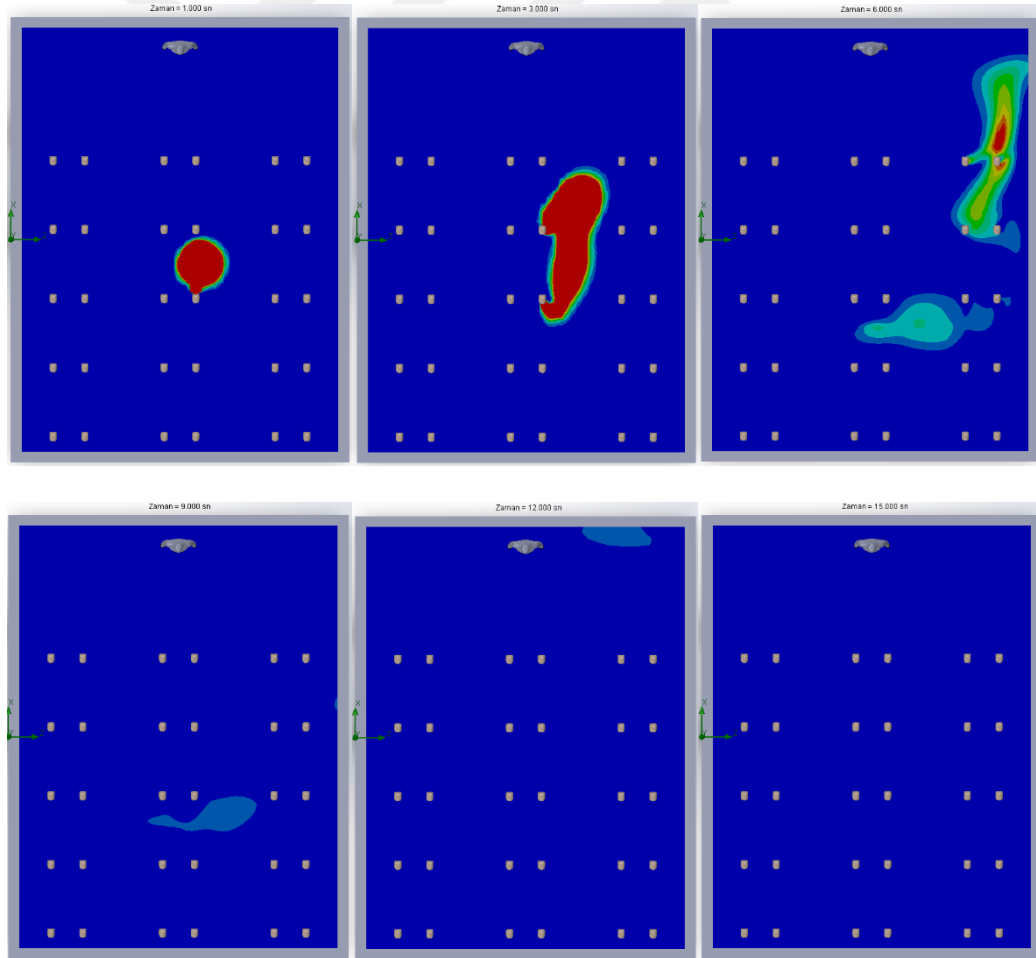
Bu senaryoda, enfekte bireyin yaydığı daha sıcak hava kütlesi sınıfın merkezinde lokalize kalırken; pencere açıklığından giren dış hava, yukarıdan içeri sızarak sınıf

içerisinde termal dengesizlikler yaratmaktadır. Bu sıcaklık farklılıkları, hem termal konfor koşullarını olumsuz yönde etkilemekte hem de hava akımı desenlerini dolaylı olarak değiştirerek partikül taşınımı üzerinde etkili olmaktadır.

#### 3.4.2.3. Orta iki pencere açık (S3)

S3 kapsamında, sonbahar mevsimine özgü çevresel koşullarda, orta iki pencerenin ve kapının açık tutulduğu sınıf ortamında, enfekte birey kaynaklı virüs partikül dağılımı, hava hareketi ve sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir.

**Partikül Dağılımı Analizi:** S3 senaryosuna ait partikül dağılım analizi Şekil 3.34'te görülmektedir. Görsellerde kullanılan kontur haritalarında partikül konsantrasyonu, renk skalası ile ifade edilmiştir. Kırmızı tonlar, yüksek yoğunlukta partikül birikimini; mavi tonlar ise düşük yoğunluklu bölgeleri temsil etmektedir.



Şekil 3.34. S3'e ait partikül dağılımı

Zamana bağılı kontur haritalarına göre partikül dağılımı şu şekilde gelişmektedir:

**1 sn:** Aerosol bulutu enfekte bireyin çevresinde yüksek yoğunlukta, simetrik ve lokal bir yapıdadır. Bu aşamada havalandırmanın yönlendirici etkisi henüz gözlemlenmemektedir.

**3 sn:** Partikül bulutu dikey yönde uzayarak sınıfın tavan seviyesine doğru hareket etmeye başlamıştır. Konsantrasyon hâlen oldukça yüksek seviyededir ve yayılım sınırlı alanla sınırlı kalmaktadır.

**6 sn:** Ortada konumlandırılmış iki pencerenin oluşturduğu çapraz hava hareketi etkisini göstermeye başlamıştır. Partiküller, hava akımıyla birlikte sınıfın sağ üst bölgesine doğru yoğun biçimde taşınmaktadır. Aynı zamanda sol alt bölgede de parçacıkların yayılım eğilimi görülmektedir. Bu durum, hava akımının yönlendirilmiş ve etkin şekilde çalıştığını ortaya koymaktadır.

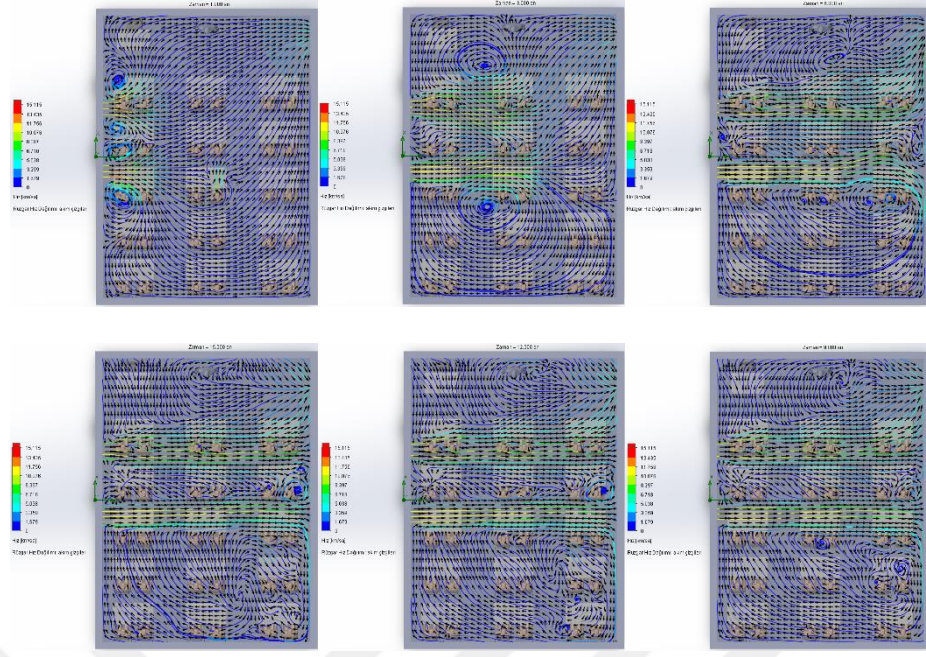
**9 sn:** Partikül konsantrasyonu belirgin şekilde azalmış, aerosoller sınıfın sağ üst ve sol alt köşelerine düşük yoğunlukta dağılmıştır. Kırmızı bölgelerin yerini büyük ölçüde mavi-yeşil tonlar almıştır. Bu aşamada partiküllerin önemli bir kısmı havalandırma yoluyla ortamdaki uzaklaştırılmıştır.

**12 sn:** Sınıf içerisindeki partikül yoğunluğu oldukça düşük seviyelere inmiş; kalan az miktarda partikül, sınıfın üst bölgelerine ve köşelere dağılmış durumda bulunmaktadır. Konsantrasyonun büyük oranda seyreltiği görülmektedir.

**15 sn:** Sınıf içerisinde partikül görünürlüğü tamamen ortadan kalkmış veya çok düşük düzeyde seyretmektedir. Bu durum, çapraz ve merkezi konumlu pencere açıklıklarının partikül tahliyesinde yüksek performans sağladığını ortaya koymaktadır.

Elde edilen bulgular, doğal havalandırmada pencere yerleşiminin etkinliğini açık biçimde ortaya koymaktadır. Ortada konumlandırılmış iki pencerenin eş zamanlı açık tutulması, sınıf içerisinde dengeli ve yönlendirilmiş bir hava akımı oluşturmakta; bu da partikül yayılımını hem yatay hem de dikey düzlemde hızlı bir şekilde dağıtarak seyreltmektedir. Aerosollerin kısa sürede sınıf dışına yönlendirilmesi, enfeksiyon riskinin azaltılmasında önemli bir başarı olarak değerlendirilmelidir.

**Hava Hareketi ve Akış Dağılım Analizi:** S3 kapsamında, sonbahar mevsimine özgü çevresel koşullarda orta iki pencerenin açık olduğu durumda, sınıf içerisindeki hava hareketlerinin dinamik davranışı analiz edilmektedir. Şekil 3.35'te sunulan hız vektörleri ve kontur haritaları, sınıf içerisindeki hava hareketinin yönünü ve hız büyüklüğünü ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Görsellerde kullanılan renk skalasında mavi tonlar, düşük hız bölgelerini; kırmızı tonlar ise yüksek hız bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.35. S3'e ait hava hareketi ve akış dağılımı

**1 sn:** Açık olan orta iki pencereden sınıfa hava girişi başlamış, pencerelerin hizasında doğrusal yönlü ve sınırlı bir akış oluşmuştur. Bu aşamada hava hareketi yalnızca pencere açıklıkları çevresinde yoğunlaşmakta, sınıfın diğer bölgelerinde anlamlı bir akım oluşmamaktadır.

**3 sn:** Hava akışı sınıfın merkez eksenini boyunca ilerlemeye devam etmektedir. Ancak alt ve üst bölgelerde belirgin dönel akış yapıları (girdaplar) oluşmaya başlamıştır. Bu girdaplar, sınıf içerisindeki hava hareketini bölgesel olarak bozmakta ve akım yönünü kısmen değiştirmektedir.

**6 sn:** Dönel akış yapılarının etkisi daha belirgin hâle gelmiş, sınıfın orta eksenini boyunca hava hareketi sürerken, alt ve üst köşelerde durağan hava alanları oluşmaya başlamıştır. Akım yönünün homojen olmadığı ve hava değişiminin sınırlı kaldığı görülmektedir.

**9 sn:** Orta açıklıkların etkisiyle sınıfın merkez hattında hava akışı nispeten güçlü seyrederken, ön ve arka bölgelerde düşük hızlı alanlar belirginleşmiştir. Köşe noktalarında ve sınıfın uç bölgelerinde hava hareketinin yetersiz olduğu tespit edilmektedir.

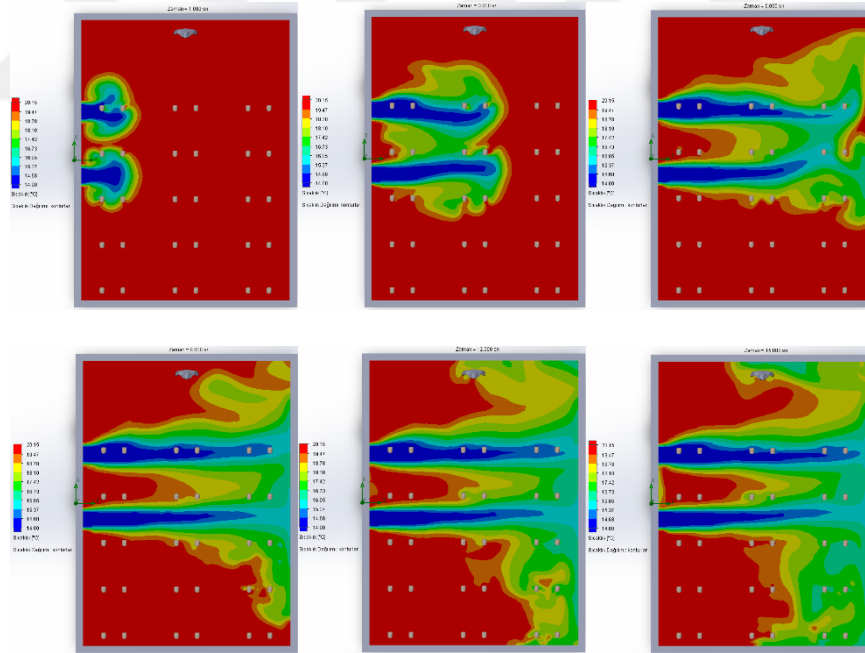
**12 sn:** Merkezi bölgedeki hava sirkülasyonu devam etmektedir. Ancak sınıfın ön ve arka bölgelerinde düşük hava hareketi alanları genişlemiştir. Özellikle köşe bölgelerde ölü hava alanlarının kalıcı hâle geldiği gözlemlenmektedir.

**15 sn:** Hava akışının büyük ölçüde sınıfın orta eksenine sınırlı kaldığı; ön, arka ve köşe bölgelerde ise düşük hız seviyelerinin devam ettiği görülmektedir. Hava değişiminin tüm sınıf genelinde eşit ve homojen şekilde gerçekleşmediği açıkça ortaya çıkmaktadır.

Elde edilen bulgular, orta kısımdaki iki pencerenin açık tutulduğu bu senaryoda sınıf içerisinde yerel ancak sınırlı etkili bir hava akışı oluştuğunu göstermektedir. Açıklıkların konumu nedeniyle hava hareketi büyük ölçüde sınıfın merkez hattı boyunca etkili olmuş; ön ve arka bölgelerde yeterli düzeyde sirkülasyon sağlanamamıştır.

**Sıcaklık Dağılımı Analizi:** S3 kapsamında, sonbahar mevsimine özgü çevresel koşullar altında sınıfın orta kısmında yer alan iki pencerenin açık tutulduğu durumda iç ortam sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir.

Zamana bağlı olarak Şekil 3.36'da elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları aşağıda özetlenmektedir. İlgili kontur haritalarında sıcaklık değerleri °C cinsinden ifade edilmekte olup, kırmızı tonlar ortam sıcaklığının üzerinde kalan bölgeleri, mavi tonlar ise sabit iç sıcaklığa yakın veya daha düşük sıcaklık bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.36. S3'e ait sıcaklık dağılımı

**1 sn:** Ortadaki iki açık pencereden sınıfa giren serin dış hava, simetrik bir şekilde sınıfın orta bölgesinden içeriye yayılmaya başlamıştır. Her iki yanda da mavi renkli soğuk hava kütleleri oluşmuş; dış hava akımı hem üst hem de alt kottan sınıf içerisine girmektedir.

**3 sn:** Dış hava akışı belirginleşmiş, sınıfın orta hattı boyunca soğuk hava yayılımı artmıştır. Özellikle pencere hizasında 15–17 °C aralığında düşük sıcaklık bölgeleri oluşmuş; buna karşın sınıfın üst ve köşe alanlarında sıcak hava etkisini sürdürmektedir.

**6 sn:** Dış hava akımı sınıfın iç bölgelerine doğru yayılmaya devam etmekte; sınıfın orta zonlarında sıcaklık 15–17 °C seviyelerine kadar düşmüştür. Alt kotlarda, oturma seviyesinde belirgin sıcaklık farklılıkları oluşmaya başlamış; köşe ve üst bölgelerde sıcak hava birikimi gözlemlenmektedir.

**9 sn:** Dış hava etkisi sınıfın merkezine kadar ilerlemiş; düşük sıcaklık alanları iç mekâna daha derin şekilde nüfuz etmiştir. Pencereleere yakın bölgelerde sıcaklık 14–15 °C düzeyine gerilemiş, ancak sınıfın uç ve köşe bölgelerinde hâlen sıcak hava kütleleri bulunmaktadır.

**12 sn:** Soğuk hava kütleleri sınıf içerisinde daha homojen şekilde dağılmaya başlamış; orta bölgedeki sıcaklık düşüşü belirginleşmiştir. Ancak sıcak hava, sınıfın üst ve köşe bölgelerinde etkisini sürdürmektedir.

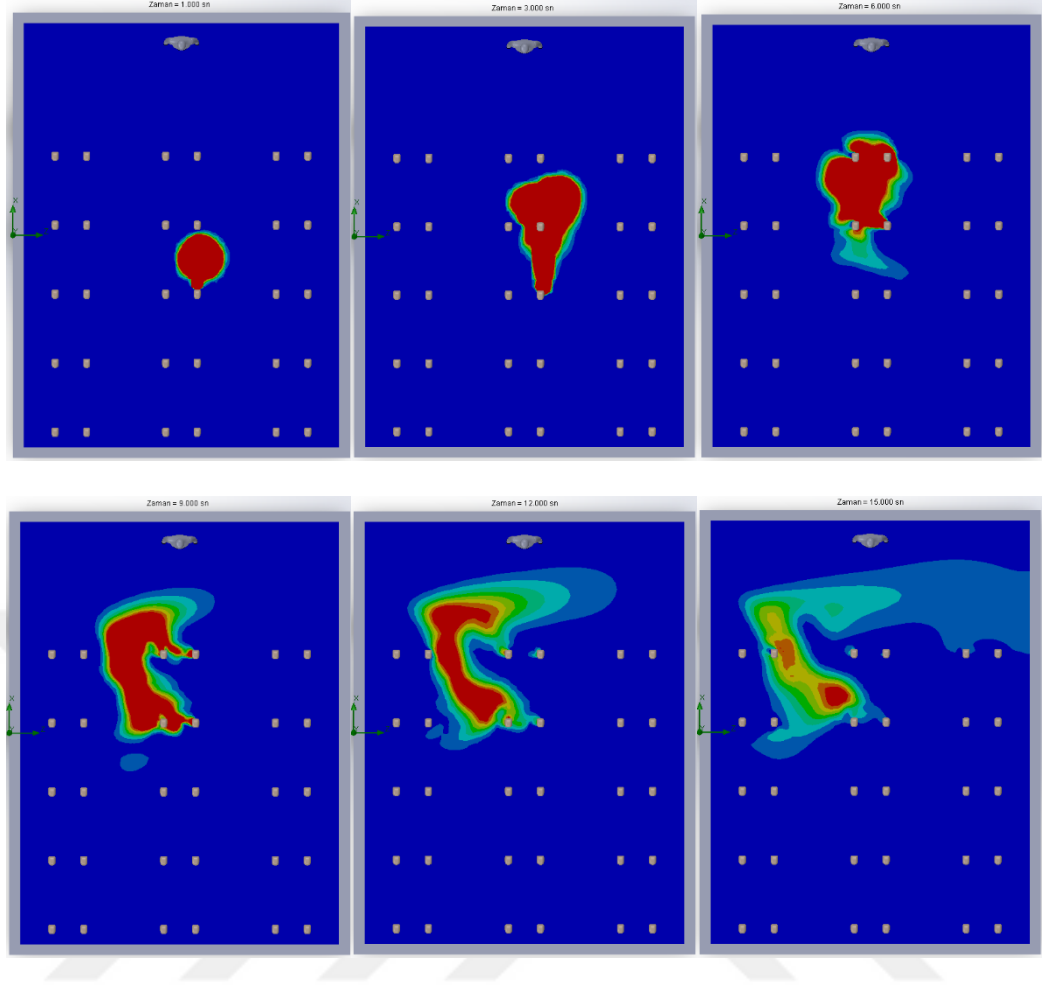
**15 sn:** Sınıfın orta kısmında soğuk hava etkisi devam etmekte; düşük sıcaklık bölgeleri sınıfın daha geniş bir alanına yayılmıştır. Buna rağmen, özellikle köşe bölgelerde sıcaklık yüksek seviyelerde kalmakta ve sıcak-soğuk dengesizliği sürmektedir.

Elde edilen bulgular, ortadaki iki pencerenin açık olduğu bu senaryoda dış havanın sınıf içerisine daha yönlendirilmiş ve dengeli şekilde dağıldığını göstermektedir. Soğuk hava, sınıfın orta bölgesinde belirgin bir akım oluşturmakta; bu durum hem hava değişim oranını artırmakta hem de sıcaklık gradyanının daha kontrollü biçimde şekillenmesini sağlamaktadır.

#### **3.4.2.4. Baş – son iki pencere açık (S4)**

S4 kapsamında, sonbahar mevsimine özgü çevresel koşullar altında sınıfın ön ve arka cephelerinde yer alan iki pencerenin açık tutulduğu durumda, enfekte birey kaynaklı virüs partikül dağılımı, hava hareketi ve sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir.

**Partikül Dağılımı Analizi:** S4 senaryosuna ait partikül dağılım analizi Şekil 3.37’de görülmektedir. Görsellerde kullanılan kontur haritalarında partikül konsantrasyonu, renk skalası ile ifade edilmiştir. Kırmızı tonlar, yüksek yoğunlukta partikül birikimini; mavi tonlar ise düşük yoğunluklu bölgeleri temsil etmektedir.



Şekil 3.37. S4'e ait partikül dağılımı

Zamana bağlı kontur haritalarına göre partikül dağılımı şu şekilde gelişmektedir:

**1 sn:** Partikül bulutu enfekte bireyin etrafında yoğun ve simetrik bir yapıdadır. Yayılım henüz çevresel hava akımı tarafından yönlendirilmemiştir.

**3 sn:** Partiküller dikey olarak yükselerek genişlemeye başlamış; ancak yönlendirilmiş akım etkisi henüz sınırlıdır. Yoğunluk merkezi sınıfın ortasında kalmaktadır.

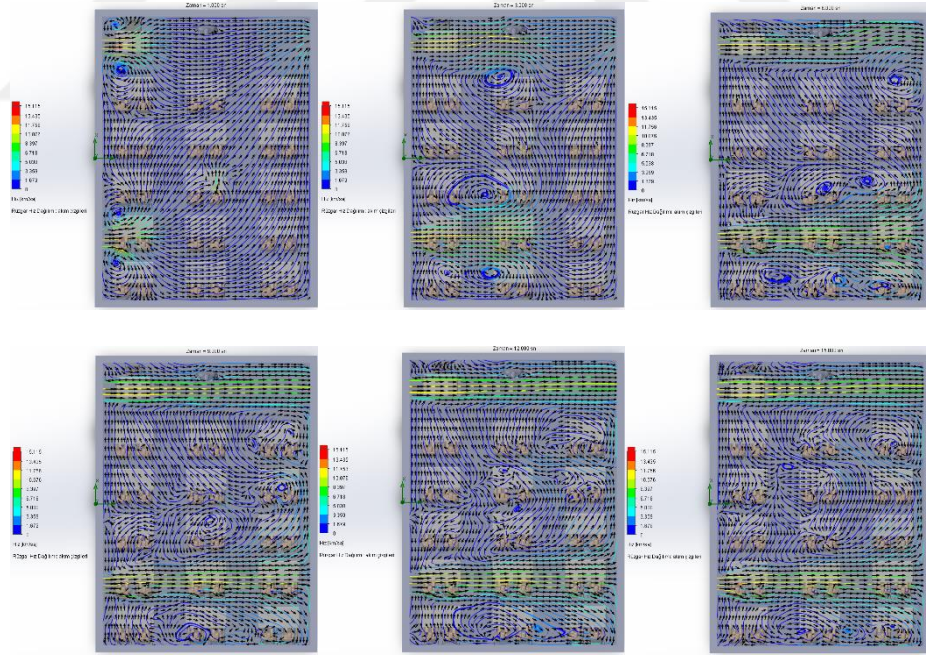
**6 sn – 9 sn:** Açık pencerelerden kaynaklanan hava hareketi belirginleşmiş; partikül bulutu sola doğru kayarak sınıfın ön-orta alanlarına taşınmıştır. Bu aşamada partikül şekli asimetrik bir form almaya başlamıştır ve yayılımda yönlendirici etkiler gözlenmektedir.

**12 sn:** Partikül bulutu geniş bir alana yayılmış, rüzgâr etkisiyle dağılım yönü belirgin biçimde sola ve yukarıya kaymıştır. Renk skalasında kırmızı alanların dış kenarlarında yeşil-mavi tonlar oluşarak konsantrasyonun azaldığı görülmektedir.

**15 sn:** Partiküllerin büyük kısmı sınıfın sol üst ve arka bölgesine taşınmış; mavi tonların baskın hale geldiği bu evrede partikül konsantrasyonu önemli ölçüde seyrelmiştir. Tahliye yönünün sınıfın arka tarafına kaydığı görülmektedir.

Bu senaryo, sınıfın her iki uç cephesinde açık pencere bulunmasının hava hareketi açısından önemli bir avantaj sağladığını göstermektedir. Sınıf boyunca oluşan doğrusal hava akımı, partiküllerin ortada kalmasını engellemiş ve onları belirli bir akış yönüne doğru taşımıştır. Ancak ortada oturan enfekte bireyin pozisyonuna yakın olan öğrenciler, erken yayılım fazında partiküllere daha fazla maruz kalma riski taşımaktadır.

**Hava Hareketi ve Akış Dağılım Analizi:** S4 kapsamında, sonbahar mevsimine özgü çevresel koşullarda sınıfın ön ve arka cephelerinde yer alan iki pencerenin açık tutulduğu durumda oluşan hava akımı davranışları ve hız dağılımı analiz edilmektedir. Şekil 3.38’de sunulan hız vektörleri ve kontur haritaları, sınıf içerisindeki hava hareketinin yönünü ve hız büyüklüğünü ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Görsellerde kullanılan renk skalasında mavi tonlar, düşük hız bölgelerini; kırmızı tonlar ise yüksek hız bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.38. S4’e ait hava hareketi ve akış dağılımı analizi

**1 sn:** Açık olan baştaki ve sondaki pencere açıklıklarından sınıfa giriş yapan hava, doğrusal bir hareketle içeri yönelmiştir. Akış henüz dengeli değildir; ancak giriş-çıkış aksında potansiyel hava geçişi gözlemlenmeye başlamıştır.

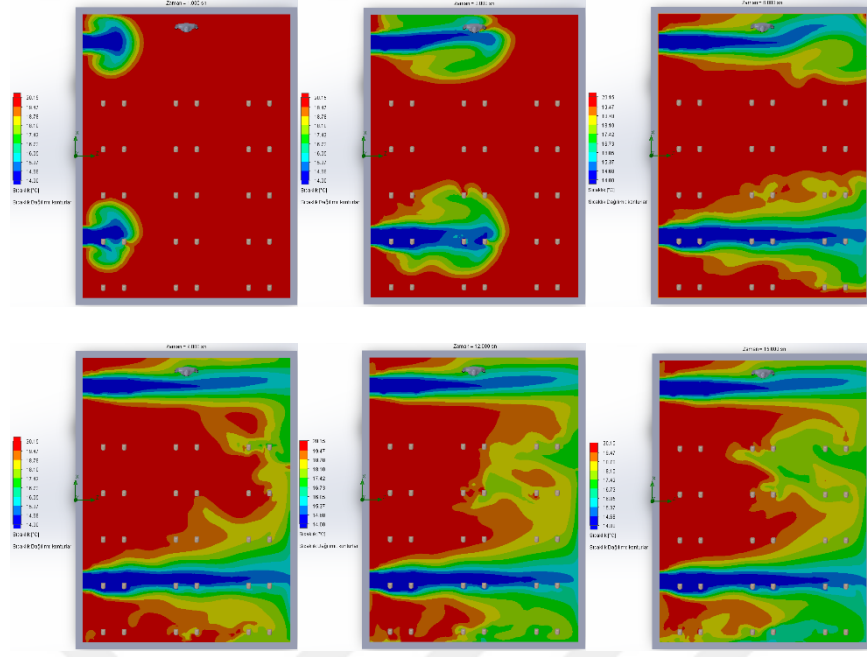
**3 sn – 6 sn:** Baş ve son pencereler arasındaki karşılıklı açıklıklar, belirgin bir yönlü hava akışı oluşturmaya başlamıştır. Hava, sınıfın ön kısmından girerek merkezi bölgeden geçmekte ve arka açıklıktan dışarı çıkmaktadır. Bu sırada sınıf içinde vorteks yapıları gelişmektedir.

**9 sn –12 sn –15 sn:** Hava akışı artık daha oturmuş ve süreklilik kazanmıştır. Giriş ve çıkış noktaları arasında yönlü ve kesintisiz bir hava akımı hâkimdir. Ancak bu akım sınıfın merkez eksenini boyunca yoğunlaşmakta, yan bölgelere sınırlı ölçüde yayılmaktadır. Bazı köşe bölgelerde hâlâ düşük hızlı sirkülasyon alanları oluşmaktadır.

Bu konfigürasyonda, açık pencere yerleşiminin karşılıklı (ön ve arka) olması, hava akımının belirli bir akış hattı boyunca yönlenmesini sağlamıştır. Ancak hava, daha çok orta aks boyunca hareket etmekte; sınıfın yan taraflarında hava akımı zayıf kalmaktadır.

Sonbahar mevsimi koşullarında, yalnızca en baştaki ve en sondaki pencerelerin açık olduğu bu senaryo, sınıf içerisinde belirgin ve yönlü bir hava akışı sağlayarak doğal havalandırma etkinliğini artırmıştır.

**Sıcaklık Dağılımı Analizi:** S4 kapsamında, sonbahar mevsimine özgü çevresel koşullarda sınıfın ön ve arka cephelerinde yer alan iki pencerenin açık tutulduğu durumda, iç ortam sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir. Zamana bağlı olarak Şekil 3.39’da elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları aşağıda özetlenmektedir. İlgili kontur haritalarında sıcaklık değerleri °C cinsinden ifade edilmekte olup, kırmızı tonlar ortam sıcaklığının üzerinde kalan bölgeleri, mavi tonlar ise sabit iç sıcaklığa yakın veya daha düşük sıcaklık bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.39. S4'e ait sıcaklık dağılımı

**1 sn–3 sn:** Açık pencerelerden içeri giren serin hava, sınıfın ön ve arka kısımlarında düşük sıcaklık bölgeleri oluşturmuştur. Soğuk hava bu bölgelerde sınırlı kalmakta ve orta alanda belirgin bir sıcaklık değişimi henüz gözlemlenmemektedir.

**6 sn:** Soğuk hava kütleleri sınıfa daha fazla yayılmakta ve hem ön hem de arka cepheden giren hava akımları sınıfın merkezine ulaşmaktadır. Bu aşamada 16–18 °C bandında bir sıcaklık düşüşü sınıfın orta bölümünde hissedilmeye başlanmıştır.

**9 sn –12 sn:** Soğuk hava, sınıfın alt ve üst bölgelerine yayılmakta; iki pencereden içeri giren akımlar birleşerek sınıf boyunca yatay bir soğuk hava hattı oluşturmaktadır. Sıcaklık gradyanı sınıfın ortasına kadar ulaşmış; alt seviyelerde 15–17 °C seviyeleri oluşmuştur.

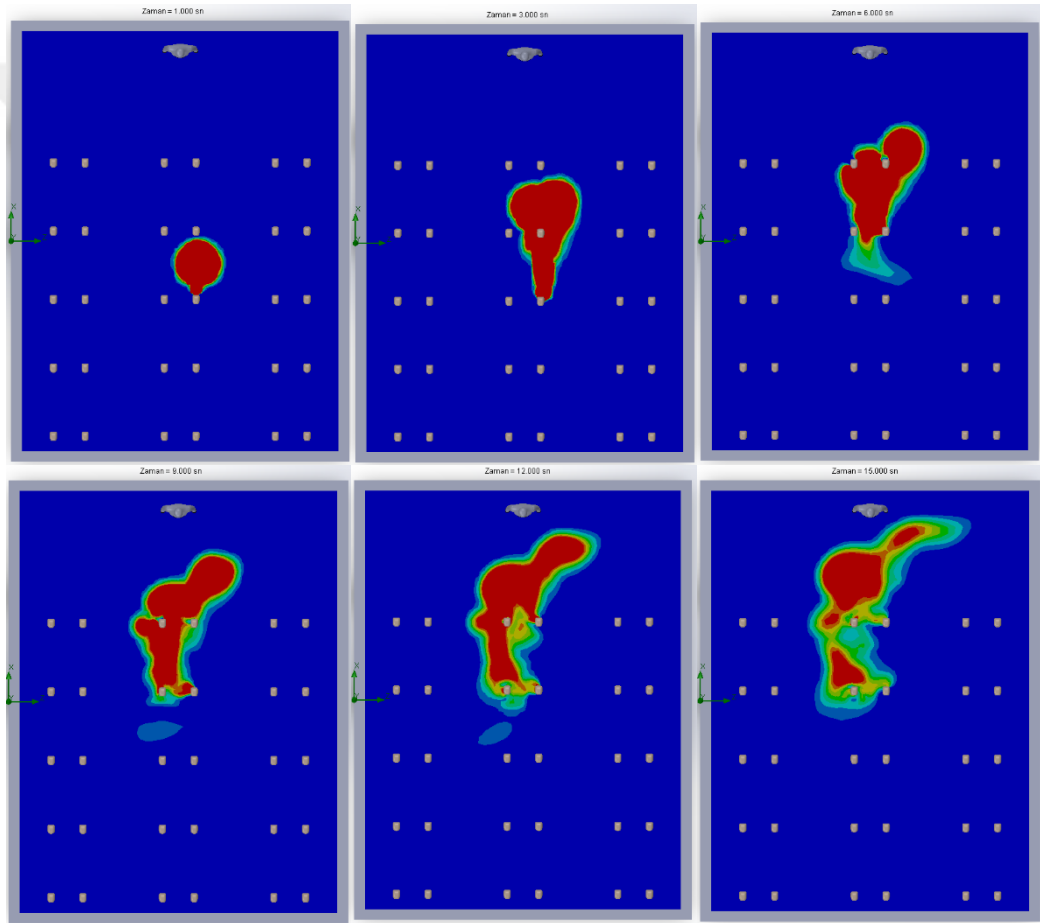
**15 sn:** Serin dış hava sınıfın neredeyse tüm alanına yayılmış; özellikle oturma seviyelerinde ve orta bölümlerde sıcaklık 16–17 °C düzeylerine kadar inmiştir. Termal denge açısından sınıf genelinde daha dengeli bir dağılım sağlanmış ancak iç ortam sıcaklığı ideal konfor sınırlarının altına yaklaşmıştır.

En başta ve en sonda bulunan pencere açıklıkları, sınıf içerisinde belirgin bir doğrusal hava hareketi oluşturmuş ve bu hareket sayesinde sıcaklık dağılımı homojenleşmiştir. Dış ortamdan gelen serin havanın sınıf boyunca etkili biçimde yayılması hem hava değişim oranının artırılmasına hem de partikül tahliyesinin desteklenmesine olanak tanımaktadır.

### 3.4.2.5. Arka tek pencere açık (S5)

S5 kapsamında, sonbahar mevsimine özgü çevresel koşullarda yalnızca sınıfta arka tek pencere açık tutulduğu durumda enfekte birey kaynaklı virüs partikül dağılımı, hava hareketi ve sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir.

**Partikül Dağılımı Analizi:** S5 senaryosuna ait partikül dağılımı analizi Şekil 3.40'ta görülmektedir. Görsellerde kullanılan kontur haritalarında partikül konsantrasyonu, renk skalası ile ifade edilmiştir. Kırmızı tonlar, yüksek yoğunlukta partikül birikimini; mavi tonlar ise düşük yoğunluklu bölgeleri temsil etmektedir.



Şekil 3.40. S5'e ait partikül dağılımı

Zamana bağlı kontur haritalarına göre partikül dağılımı şu şekilde gelişmektedir:

**1 sn:** Partikül bulutu, enfekte bireyin çevresinde simetrik ve kompakt bir şekilde yüksek konsantrasyonda lokalize olmuştur. Hava akımı henüz yönlendirici bir etki oluşturmamıştır.

**3 sn:** Bulut dikey olarak uzamaya başlamış; ancak sınıf genelinde yayılım hâlâ sınırlı ve merkez ağırlıklıdır. Pencere açıklığının etkisi hissedilmemektedir.

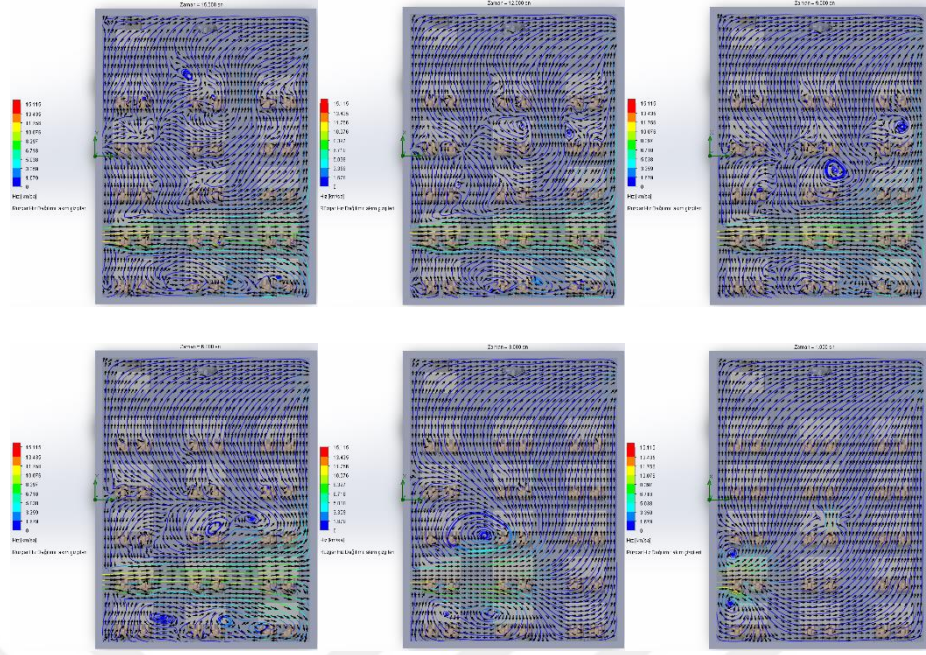
**6 sn – 9 sn:** Arka pencere yönünde zayıf hava hareketi oluşmaya başlamıştır. Partikül bulutu bu akıma paralel olarak sınıfın sol arka bölgesine doğru yönelmiş, ancak büyük ölçüde hâlâ sınıf içinde tutulmaktadır.

**12 sn – 15 sn:** Partikül konsantrasyonu azalmakta ve bulut sınıfın üst-arka bölgesine yayılmaktadır. Ancak hâlen kırmızı alanların varlığını koruması, partiküllerin tam olarak tahliye edilemediğini göstermektedir. Pencerenin konumu partikülleri yönlendirmekte fakat havalandırma etkisi yeterince güçlü değildir.

Bu senaryo, yalnızca arka cephedeki pencerenin açık bırakıldığı bir durumda, hava akışının sınırlı kaldığını göstermektedir. Partikül dağılımı arka yönlü bir yayılım eğilimi göstermiştir ancak, tek açıklıkla sağlanan hava akımı partiküllerin sınıf genelinde seyrelmesini yeterince sağlayamamıştır. Özellikle sınıfın ön ve orta bölgelerinde askıda kalan partiküller bulaş riskinin devam ettiğini göstermektedir.

Sınıfın sadece en arka kısmındaki pencerenin açık olduğu bu doğal havalandırma modelinde, partikül tahliyesi yönlendirilmiş ancak yetersiz düzeyde gerçekleşmiştir. Yayılım yönü, pencere açıklığına doğru yönlendirilmiş olsa da sınıf içinde partikül konsantrasyonunun yüksek kalması, bu havalandırma biçiminin tek başına yeterli olmadığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle, tek cepheli açıklık yerine çapraz veya çoklu pencere stratejileri önerilmeli; havalandırmanın sürekliliği ve yoğunluğu artırılmalıdır.

**Hava Hareketi ve Akış Dağılım Analizi:** S5 kapsamında, sonbahar mevsimine özgü çevresel koşullarda yalnızca sınıfın arka penceresinin açık tutulduğu durumda oluşan hava akımı davranışları ve hız dağılımı analiz edilmektedir. Şekil 3.41’de sunulan hız vektörleri ve kontur haritaları, sınıf içerisindeki hava hareketinin yönünü ve hız büyüklüğünü ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Görsellerde kullanılan renk skalasında mavi tonlar, düşük hız bölgelerini; kırmızı tonlar ise yüksek hız bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.41. S5'e ait hava hareketi ve akış dağılımı analizi

**1 sn:** Arka pencere konumundan sınıfa sınırlı miktarda hava girişi gerçekleşmiştir. Hava akımı doğrudan pencere yönünden içeri girerek arka duvar boyunca ilerlemekte, ancak sınıfın orta ve ön bölgelerine henüz ulaşamamaktadır.

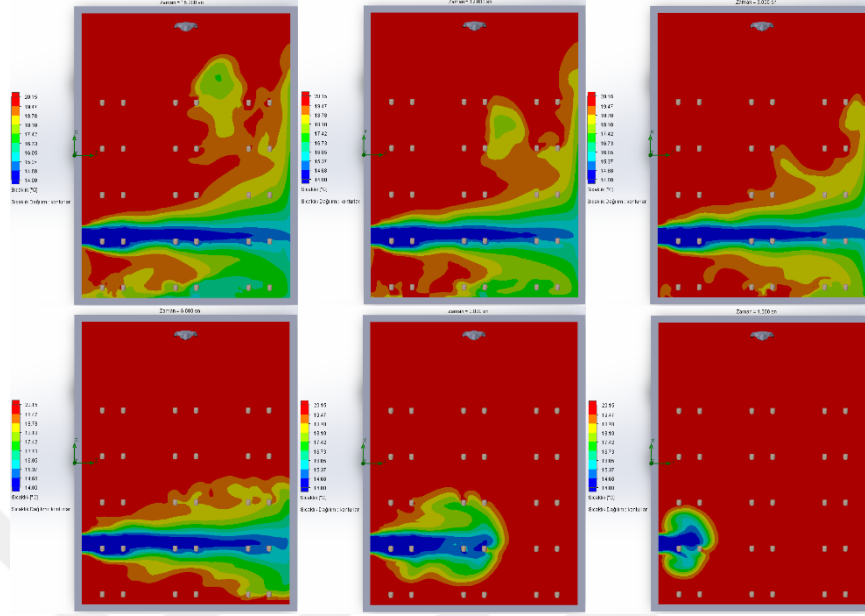
**3 sn- 6 sn:** Pencere girişine yakın bölgelerde dönel hareketler oluşmaya başlamış, ancak bu türbülanslar yerel kalmıştır. Hava akımı düşük hızla sınıfın merkezine doğru yayılmakta, ön kısma ulaşmadan yönünü kaybetmektedir. Sınıfın büyük bölümünde durağan hava kütleleri gözlemlenmektedir.

**9 sn -12 sn- 15 sn:** Giderek artan türbülans etkisiyle arka bölgedeki hava hareketleri belirginleşmiş, ancak akış sınıf geneline homojen şekilde yayılamamıştır. Sınıfın ön yarısında rüzgâr hızı düşük kalmakta, bu bölgelerde ölü hava alanları oluşmaktadır. Genel hava dolaşımı yetersiz, yönsüz ve düşük hızlıdır.

Simülasyon verileri, yalnızca arka tek pencerenin açık olduğu bu senaryoda sınıf içerisindeki hava akımının yönlü bir karakter kazanamadığını göstermektedir. Rüzgâr dağılımı; ön, orta ve üst bölgelerde belirgin bir sirkülasyon sağlayamamakta, akış sınıfın arka kısmında sınırlı döngüler oluşturarak etkisini kaybetmektedir.

**Sıcaklık Dağılımı Analizi:** S5 kapsamında, sonbahar mevsimine özgü çevresel koşullar altında sınıfın yalnızca arka kısmında yer alan pencerenin açık tutulduğu durumda sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir. Zamana bağlı olarak Şekil 3.42'de elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları aşağıda özetlenmektedir. İlgili kontur haritalarında sıcaklık değerleri °C cinsinden ifade edilmekte olup, kırmızı tonlar ortam sıcaklığının

üzerinde kalan bölgeleri, mavi tonlar ise sabit iç sıcaklığa yakın veya daha düşük sıcaklık bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.42. S5'e ait sıcaklık dağılımı

**1 sn:** Sınıf genelinde sıcaklık homojendir ve yaklaşık 20 °C'dir. Sadece arka sol köşede, açık pencereye yakın noktada dış havanın etkisiyle düşük sıcaklık bölgesi oluşmaya başlamıştır.

**3 sn – 6 sn:** Açık arka pencereden giren dış hava, sınıfın arka-alt düzleminde yayılmaya başlamış; bu bölgede 15–17 °C aralığında sıcaklık düşüşü görülmektedir. Sınıfın ön ve üst bölgeleri ise hâlen sıcaklığını korumaktadır.

**9 sn – 12 sn:** Düşük sıcaklık etkisi sınıf içerisine doğru daha belirgin biçimde yayılmış; arka sıradan orta sıraya kadar olan bölgelerde sıcaklık düşmüştür. Ancak bu yayılım yatay düzlemde sınırlı kalmış, üst bölgelerde hâlâ kırmızı renk hâkimdir.

**15 sn:** Soğuk hava sınıfın orta bölümüne kadar ilerlemiş ve bazı bölgelerde sıcaklık 15–16 °C seviyelerine düşmüştür. Ancak ön sıra ve üst kotlarda sıcaklık düşüşü oldukça sınırlıdır. Bu durum, sıcaklık dağılımının sınıf boyunca homojen bir şekilde gerçekleşmediğini ortaya koymaktadır.

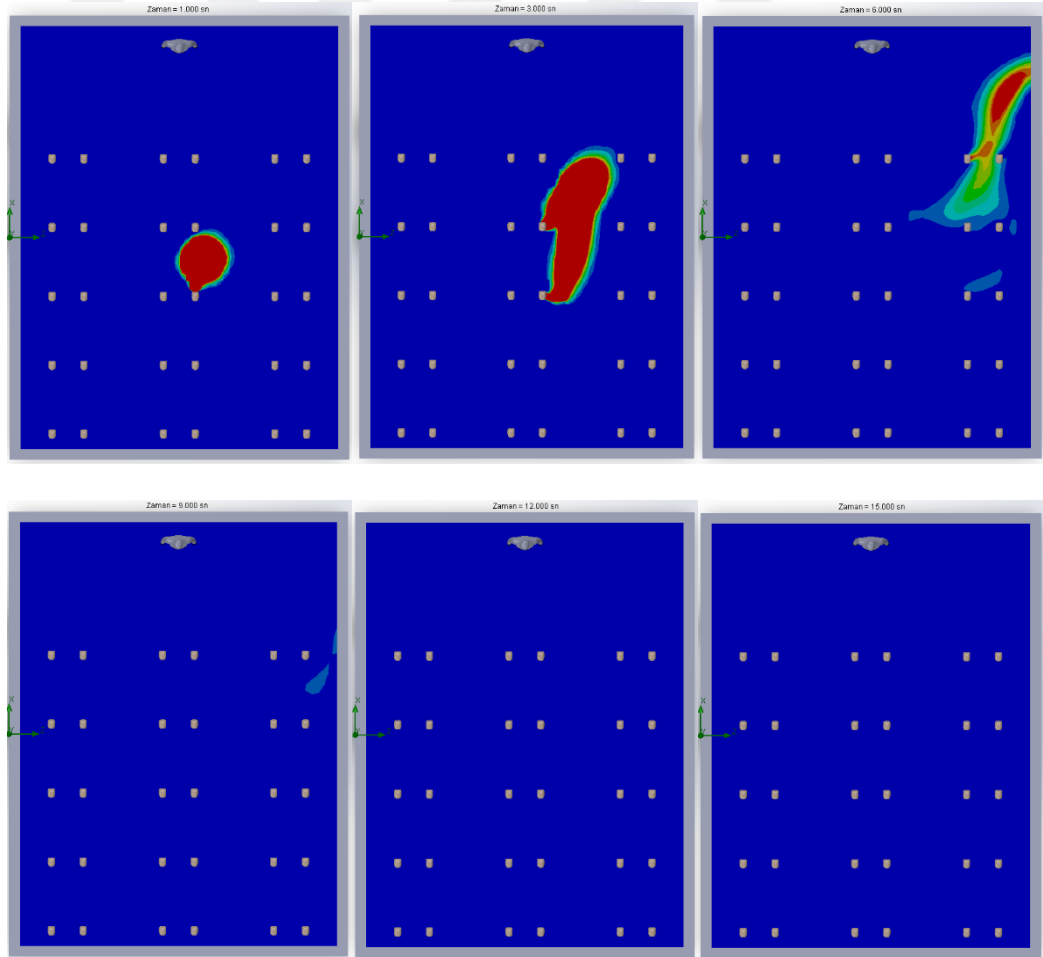
Simülasyon sonuçları, sınıfın yalnızca arka penceresinin açık olduğu durumda hava girişinin sınırlı kaldığını ve bu nedenle sıcaklık düşüşünün yalnızca sınırlı bölgelerde etkili olabildiğini göstermektedir. Düşük sıcaklıklı hava kütlesi arka sıraya yakın bölgelerde yoğunlaşmakta, sınıfın ön ve orta üst bölgelerine yeterince

yayılmamaktadır. Bu durum, termal konfor açısından sınıf içerisinde bölgesel dengesizliklerin oluşmasına neden olmaktadır.

#### 3.4.2.6. Dört pencere açık (S6)

S6 kapsamında, sonbahar mevsimine özgü çevresel koşullar altında sınıfın dört pencerenin açık tutulduğu durumda enfekte bireyden kaynaklı partikül dağılımı, hava hareketi ve sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir.

**Partikül Dağılımı Analizi:** S6 senaryosuna ait partikül dağılımı analizi Şekil 3.43'te görülmektedir. Görsellerde kullanılan kontur haritalarında partikül konsantrasyonu, renk skalası ile ifade edilmiştir. Kırmızı tonlar, yüksek yoğunlukta partikül birikimini; mavi tonlar ise düşük yoğunluklu bölgeleri temsil etmektedir.



Şekil 3.43. S6'ya ait partikül dağılımı

Zamana bağılı kontur haritalarına göre partikül dağılımı şu şekilde gelişmektedir:

**1 sn:** Enfekte bireyden kaynaklanan partikül bulutu, kaynak etrafında yüksek yoğunlukta ve simetrik biçimde lokalize olmuştur. Bu evrede hava akımlarının yönlendirici etkisi henüz sınırlıdır.

**3 sn:** Partikül bulutu dikey ekseninde hareketlenerek tavan seviyesine doğru yönelmiştir. Bu aşamada partikül dağılımı henüz belirgin bir yön kazanmasa da ortam içi yoğunlukta artış gözlemlenmiştir.

**6 sn:** Dört pencerenin eşzamanlı açık olmasıyla oluşan çevresel ve çapraz hava akımları etkisini göstermeye başlamıştır. Partikül bulutu sağ üst bölgeye yönelmiş hem yatay hem dikey düzlemde hızlı bir seyrelme meydana gelmiştir.

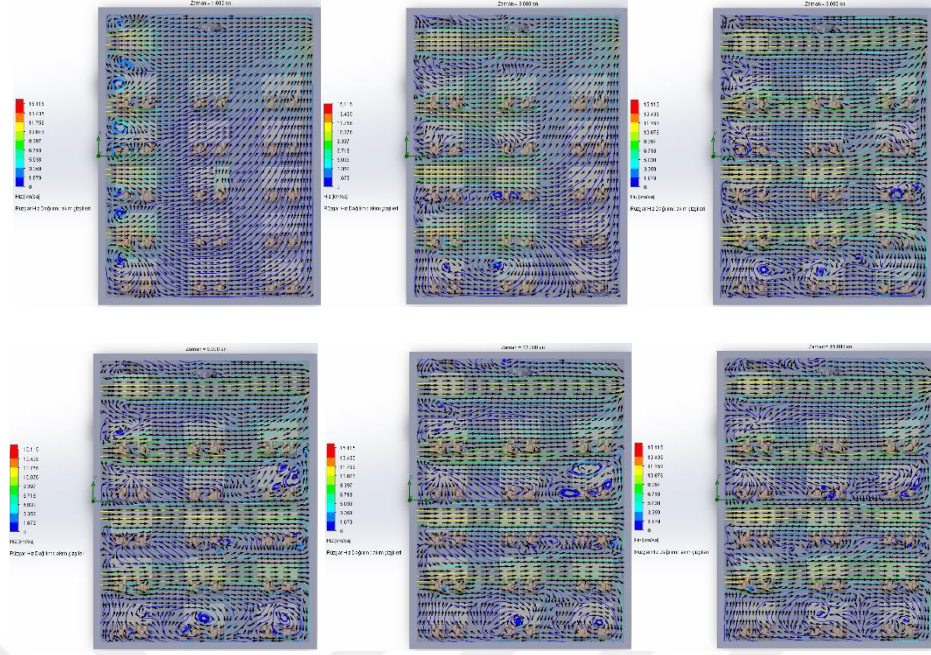
**9–12 sn:** Partiküller sağ kenardaki hava akışıyla sınıf dışına taşınmaya başlanmış; kontur haritalarında yüksek konsantrasyonu temsil eden kırmızı ve yeşil tonlar yerini düşük yoğunluklu mavi bölgelere bırakmıştır.

**15 sn:** Sınıf içerisindeki partikül konsantrasyonu büyük oranda ortadan kalkmıştır. Simülasyon çıktıları, tüm hacimde mavi konturların hâkim olduğunu göstermekte ve partiküllerin etkili bir şekilde ortamdan uzaklaştırıldığını ortaya koymaktadır.

Bu senaryo, çoklu pencere açıklığına dayalı doğal havalandırma stratejisinin, geçiş mevsimi koşullarında dahi yüksek düzeyde etkinlik sağladığını göstermektedir. Oluşan çapraz ve çevresel hava hareketleri, enfekte bireyden yayılan partikül bulutunu hızla seyreltmış ve sınıf içindeki genel partikül konsantrasyonunu kısa sürede minimum düzeye indirmiştir. Havalandırma kaynaklı bu hızlı hava değişimi, enfeksiyon riski açısından belirgin bir azalma potansiyeline işaret etmektedir.

#### **Hava Hareketi ve Akış Dağılım Analizi:**

S6 kapsamında, sonbahar mevsimine özgü çevresel koşullar altında sınıfın dört penceresinin açık tutulduğu durumda oluşan hava akımı davranışları ve hız dağılımı analiz edilmektedir. Şekil 3.44'te sunulan hız vektörleri ve kontur haritaları, sınıf içerisindeki hava hareketinin yönünü ve hız büyüklüğünü ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Görsellerde kullanılan renk skalasında mavi tonlar, düşük hız bölgelerini; kırmızı tonlar ise yüksek hız bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.44. S6' ya ait hava hareketi ve akış dağılımı

**1 sn:** Hava akımı, açık pencere bölgelerinden sınıfa doğru hızla girmeye başlamış; sınıf içinde yönlü ve belirgin bir giriş oluşmuştur. Vorteks yapıları henüz sınırlıdır.

**3sn- 6sn:** Sınıf içindeki hava akımı belirgin biçimde çok yönlü yayılım göstermeye başlamış; özellikle yan cephesi açık pencerelerden gelen akımlar arasında türbülanslı bölgeler oluşmuştur. Dönel hareketler sınıfın orta ve arka bölgelerinde belirginleşmiştir.

**9 sn:** Hava hızının sınıf genelinde homojen şekilde dağılmadığı, bazı alanlarda (özellikle ön-üst bölge ve arka-sağ köşelerde) yön değiştiren hava akımları ile lokal döngülerin olduğu gözlemlenmektedir.

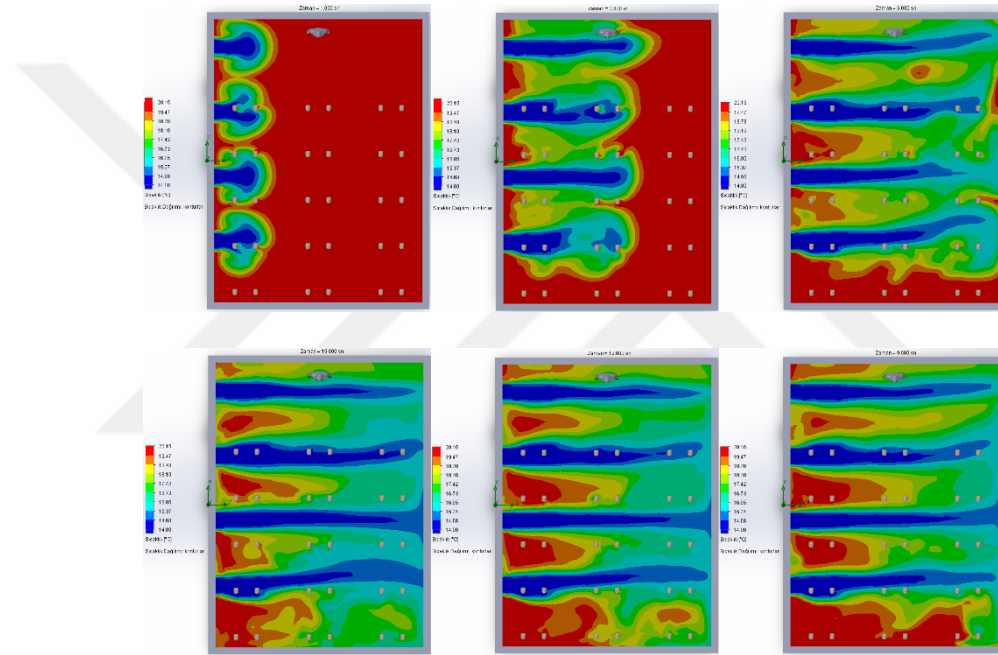
**12 sn:** Hava hareketleri giderek daha karışık hale gelmiş, düşük hızlı bölgeler sınıfın bazı köşelerinde ölü hava alanlarının oluşabileceğini göstermiştir. Ancak genel hava sirkülasyonu sınıf boyunca sürekliliğini korumaktadır.

**15 sn:** Dört farklı pencere açıklığından kaynaklanan hava akışları, sınıf genelinde kompleks bir hava hareketi düzeni oluşturmuştur. Yüksek türbülanslı ve düşük türbülanslı bölgeler sınıf boyunca birlikte yer almakta; bu durum hem partikül seyreltme açısından avantajlı hem de bazı bölgelerde yetersiz hava değişimi açısından riskli olabilir.

Bu konfigürasyonda, çapraz hava akımı mümkün olmuş, ancak pencere sayısının fazlalığı nedeniyle sınıf içerisinde yoğun türbülans ve vorteks oluşumu gözlemlenmiştir.

Sınıfın merkezine yerleştirilmiş enfekte bireyin bulunduğu bölgeden çevreye doğru gerçekleşen hava akımı, partikül seyreltmesine katkı sağlasa da ölü hava bölgeleri riskini tamamen ortadan kaldırmamıştır.

**Sıcaklık Dağılımı Analizi:** S6 kapsamında, sonbahar mevsimine özgü çevresel koşullar altında sınıfın dört penceresinin açık tutulduğu durumda sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir. Zamana bağlı olarak Şekil 3.45'te elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları aşağıda özetlenmektedir. İlgili kontur haritalarında sıcaklık değerleri °C cinsinden ifade edilmekte olup, kırmızı tonlar ortam sıcaklığının üzerinde kalan bölgeleri, mavi tonlar ise sabit iç sıcaklığa yakın veya daha düşük sıcaklık bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.45. S6'ya ait sıcaklık dağılımı

**1 sn:** Dört ayrı pencereden gelen soğuk hava, sınıfın dört köşesinden içeriye doğru yayılmaya başlamıştır. Özellikle sol alt ve üst köşelerde düşük sıcaklıklı (14–16 °C) alanlar gözlemlenmektedir. Sınıfın iç kısmı hâlen 20 °C civarındadır.

**3 sn– 6 sn:** Soğuk hava, sınıf içerisinde yatay düzlemde belirgin bir şekilde yayılmakta ve hava akımı, çoklu açıklıklardan simetrik olarak ilerlemektedir. Oturma seviyesinde yer alan alanlarda 16–18 °C sıcaklık bantları oluşmuştur.

**9 sn – 12 sn:** Dış hava, sınıfın büyük bölümüne yayılmıştır. Sınıf genelinde sıcaklık farklılıkları daha homojen hâle gelmiş; 16–18 °C aralığında geniş alanlar oluşmuştur. Bu evrede hem tavan hem de oturma seviyesi bölgelerinde benzer sıcaklık dağılımları gözlemlenmektedir.

**15 sn:** Sınıfın tamamına yakınında dış hava etkisi hâkimdir. Tüm hacim boyunca sıcaklık 15–18 °C arasında dengelenmiş; sıcak iç hava neredeyse tamamen seyreltilmiştir. Sıcaklık gradyeni düzleşmiş, sınıf genelinde termal denge sağlanmıştır.

Bu senaryo, sınıf genelinde etkin ve dengeli bir doğal havalandırma sağlandığını ortaya koymaktadır. Sıcaklık düşüşü hızlı ve geniş alanlı olmakla birlikte, dağılım eşitliği sayesinde lokal termal rahatsızlıklar minimum düzeyde kalmıştır.

### 3.4.3. Kış mevsimi senaryosu

Kış mevsimine ait senaryoların oluşturulmasında, Konya ili Meram ilçesine ait aralık ayı ortalama iklim verileri temel alınmıştır. Bu kapsamda dış ortam sıcaklığı, bağıl nem oranı ve hâkim rüzgâr hızları gibi meteorolojik değişkenler göz önünde bulundurularak modelleme gerçekleştirilmiştir. Dış ortam sıcaklığı yaklaşık 1 °C, dış ortam bağıl nem ortalama %75, iç ortam bağıl nem ortalama %50, rüzgâr hızı ise 9 km/sa alınarak simülasyonlar bu değerler doğrultusunda yapılandırılmıştır. Sınıf modeli, bölgenin hâkim rüzgâr yönü olan kuzey-kuzeydoğu doğrultusu dikkate alınarak yerleştirilmiş, bu yerleşim, dış ortam hava hareketlerinin doğal havalandırma üzerindeki etkisini daha gerçekçi biçimde yansıtmayı amaçlamaktadır. Senaryolara farklı cephelerde konumlanan sınıflar dahil edilmemiştir.

Simülasyon süresince sınıf ortamı, 30 öğrencinin bulunduğu, 6 × 8 m boyutlarında kapalı bir hacim olarak modellenmiştir. Öğrencilerin oturma düzeni tüm senaryolarda sabit tutulmuş; böylece pencere açıklıklarının konum ve sayısına bağlı olarak ortaya çıkan hava akımı desenlerinin, virüs partiküllerinin yayılımı üzerindeki etkisi, diğer değişkenlerden bağımsız olarak değerlendirilebilmiştir. Tüm senaryolarda pencere açıklıkları, iki kanatlı pencere sistemlerinde yalnızca tek kanadın tamamen açık olması koşulu ile sınırlandırılmıştır. Bu yaklaşım, mevcut eğitim yapılarında yaygın olarak gözlemlenen pencere kullanım biçimlerini temsil etmesi ve modellemede gerçekçi sınır koşullarının sağlanması amacıyla tercih edilmiştir.

Enfekte birey, her senaryoda sınıfın orta noktasında konumlandırılmış olup, solunum eylemi sırasında –özellikle hapşırma anında– ortama yayılan damlacıkların fiziksel özellikleri literatüre dayalı olarak tanımlanmıştır. Bu doğrultuda, damlacıkların başlangıç sıcaklığı 35 °C (Bahramian vd. 2023), bağıl nemi ise %80 olarak belirlenmiştir (Xie vd., 2007). Sınıfta bulunan öğretmen ve diğer öğrencilerin vücut sıcaklığı sabit değer girilip, senaryolara değişken olarak dahil edilmemiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar da kapalı ortamlarda öksürük, konuşma veya solunum yoluyla salınan aerosol partiküllerinin ilk birkaç saniyede yoğun şekilde yayıldığını ve ortam hava akımı ile havalandırma koşullarının bu sürede partikül hareketini doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır (Dbouk & Drikakis, 2020). Bu doğrultuda çalışmada kullanılan 15 saniyelik analiz aralığı, hem virüs partikülünün yayılımının erken evresinin detaylı olarak incelenmesine olanak sağlamakta hem de farklı havalandırma senaryolarının karşılaştırılmasında literatürle uyumlu, bilimsel bir değerlendirme imkânı sunmaktadır.

Simülasyon çalışmalarında, analiz süresi 15 sn olarak sınırlandırılmıştır. Bu zaman dilimi içerisinde, enfekte bireyden kaynaklanan virüs partiküllerinin sınıf içerisindeki dağılımı, pencere sayısı ve konumu ile oluşturulan 6 senaryo doğrultusunda değerlendirilmiştir. 15 sn olarak tanımlanan analiz ile elde edilen kontur haritaları, partikül konsantrasyonlarının sınıf içerisindeki mekânsal dağılımını ve zamanla gösterdiği değişimi ortaya koymaktadır. Söz konusu görsel çıktılar, enfekte bireyin etkilediği alanın belirlenmesi, virüs partikül yayılım hızının analiz edilmesi ve doğal havalandırma stratejilerinin seyreltme başarısının karşılaştırılmasında temel parametreler olarak dikkate alınmıştır. Oluşturan altı senaryo, Çizelge 3.5'te detaylı olarak ifade edilmiştir.

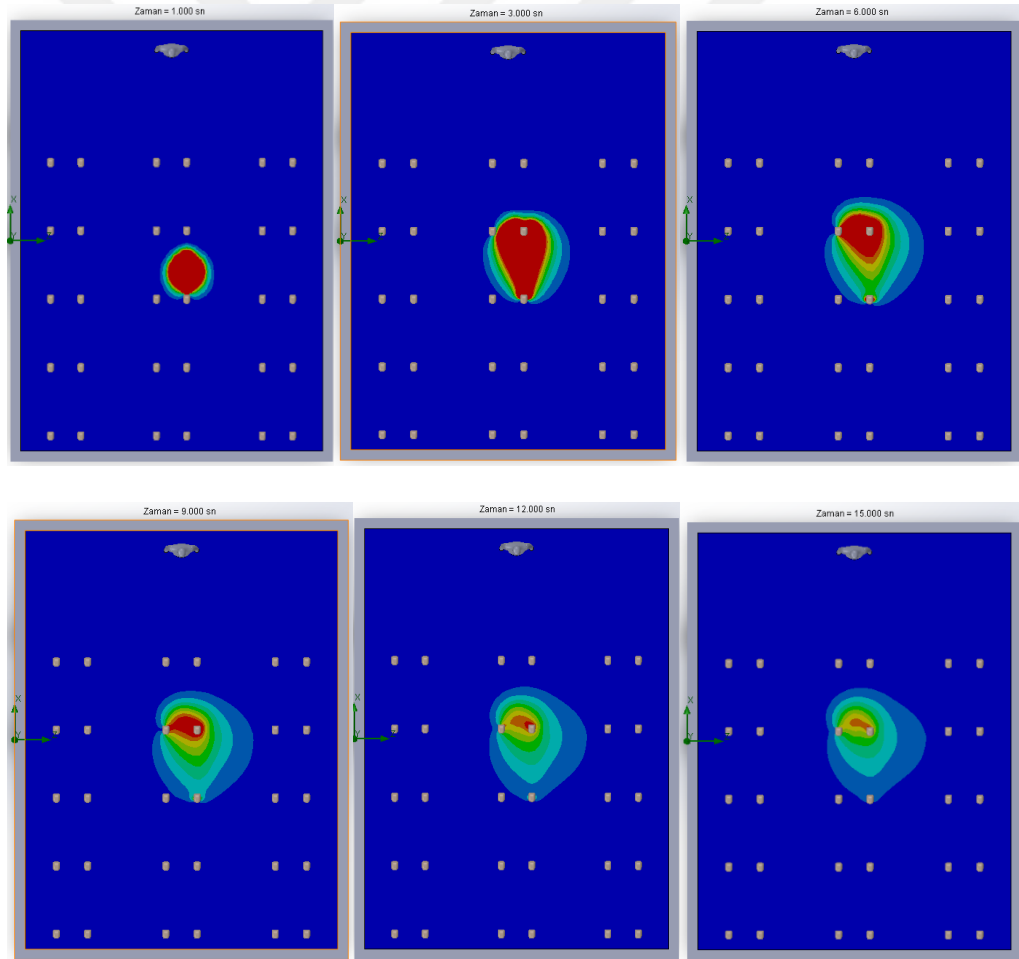
**Çizelge 3.6.** Kış mevsimi senaryoları

| Senaryo   | Pencere konumu | Pencere Açık Sayısı | Kapı   | İç Ortam Hava Sıcaklığı | İç Ortam Bağıl Nem | Dış Ortam Hava Sıcaklığı | Dış Ortam Bağıl Nem | Rüzgâr hızı |
|-----------|----------------|---------------------|--------|-------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------|-------------|
| Senaryo 1 | Hiçbiri        | 0                   | Kapalı | 20 °C                   | %50                | 1 °C                     | %75                 | 9 km/sa     |
| Senaryo 2 | Ön             | 1                   | Açık   | 20 °C                   | %50                | 1 °C                     | %75                 | 9 km/sa     |
| Senaryo 3 | Orta           | 2                   | Açık   | 20 °C                   | %50                | 1 °C                     | %75                 | 9 km/sa     |
| Senaryo 4 | Ön-Arka        | 2                   | Açık   | 20 °C                   | %50                | 1 °C                     | %75                 | 9 km/sa     |
| Senaryo 5 | Arka           | 1                   | Açık   | 20 °C                   | %50                | 1 °C                     | %75                 | 9 km/sa     |
| Senaryo 6 | Hepsi          | 4                   | Açık   | 20 °C                   | %50                | 1 °C                     | %75                 | 9 km/sa     |

### 3.4.3.1. Tüm pencereler kapalı (S1)

S1 kapsamında, kış mevsimine özgü çevresel koşullarda, tüm pencerelerin ve kapının kapalı tutulduğu; doğal havalandırmanın devre dışı bırakıldığı sınıf ortamında, enfekte birey kaynaklı virüs partikül yayılımı analiz edilmektedir. Bu senaryo **kontrol senaryosu** olarak oluşturulmuştur. Bu senaryo, doğal havalandırmanın bulunmadığı temel koşulu temsil etmekte ve diğer senaryoların etkisi bu referans koşul ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

**Partikül Dağılımı Analizi:** S1 senaryosuna ait partikül dağılım analizi Şekil 3.46'da görülmektedir. Görsellerde kullanılan kontur haritalarında partikül konsantrasyonu, renk skalası ile ifade edilmiştir. Kırmızı tonlar, yüksek yoğunlukta partikül birikimini; mavi tonlar ise düşük yoğunluklu bölgeleri temsil etmektedir.



Şekil 3.46. S1'e ait partikül dağılımı

Zamana bağılı kontur haritalarına göre partikül dağılımı şu şekilde gelişmektedir:

**1 sn:** Partiküller enfekte bireyin çevresinde yoğun ve lokalize şekilde asılı kalmaktadır. Herhangi bir yönlü hava akımı bulunmadığından partiküller sabit konumda süspansiyon halinde kalmaktadır.

**3 sn:** Partikül hacmi genişlemekte, yukarı ve yanlara doğru difüzyon göstermektedir. Kontur haritalarında kırmızı tonlar ile temsil edilen yüksek partikül yoğunluğu, merkezi alanda hâlâ belirgin şekilde görülmektedir.

**6 sn:** Partikül bulutu geniş alana yayılmaya devam etmektedir. Ancak ortamda herhangi bir hava akımı veya tahliye mekanizması bulunmadığından, partiküller ortamdaki uzaklaştırılamamaktadır. Bu durum, sınıf içerisinde biriken viral yükün artmasına neden olmaktadır.

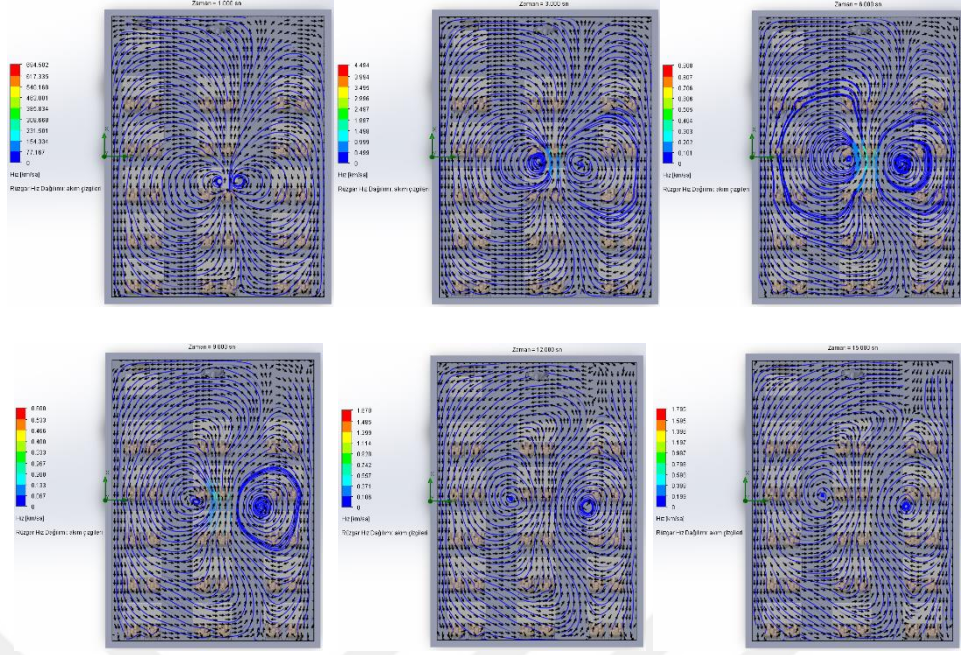
**9 sn ve 12 sn:** Partikül konsantrasyonu kısmen azalsa da sınıfın orta bölgesinde yoğunluk korunmaktadır. Partiküller süspansiyon halinde sınıf içerisinde kalmaya devam etmekte, viral yük solunabilir düzeyde varlığını sürdürmektedir.

**15 sn:** 15 saniye sonunda dahi partiküllerin sınıf içerisinde önemli bir kısmı kalıcı olarak bulunmaktadır.

Bu senaryo, doğal veya mekanik hiçbir havalandırmanın sağlanmadığı, kapalı sınıf ortamlarını temsil etmektedir. Elde edilen bulgular; partiküllerin ortamda birikerek yönsüz ve kontrolsüz şekilde yayılım gösterdiğini, Herhangi bir hava akımı bulunmadığından partiküllerin tahliyesinin mümkün olmadığını, Enfekte bir bireyin bulunduğu sınıf ortamında havalandırma ihmal edildiğinde, diğer bireylerin enfeksiyon riskinin ciddi oranda arttığını ortaya koymaktadır.

**Hava Hareketi ve Akış Dağılımı Analizi:** S2 kapsamında, kış mevsimine özgü çevresel koşullarda sadece tek ön pencerenin açık olduğu durumda, sınıf içerisindeki hava hareketlerinin dinamik davranışı analiz edilmektedir.

Şekil 3.47’de sunulan hız vektörleri ve kontur haritaları, sınıf içerisindeki hava hareketinin yönünü ve hız büyüklüğünü ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Görsellerde kullanılan renk skalasında mavi tonlar, düşük hız bölgelerini; kırmızı tonlar ise yüksek hız bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.47. S1'e ait hava hareketi ve akış dağılımı

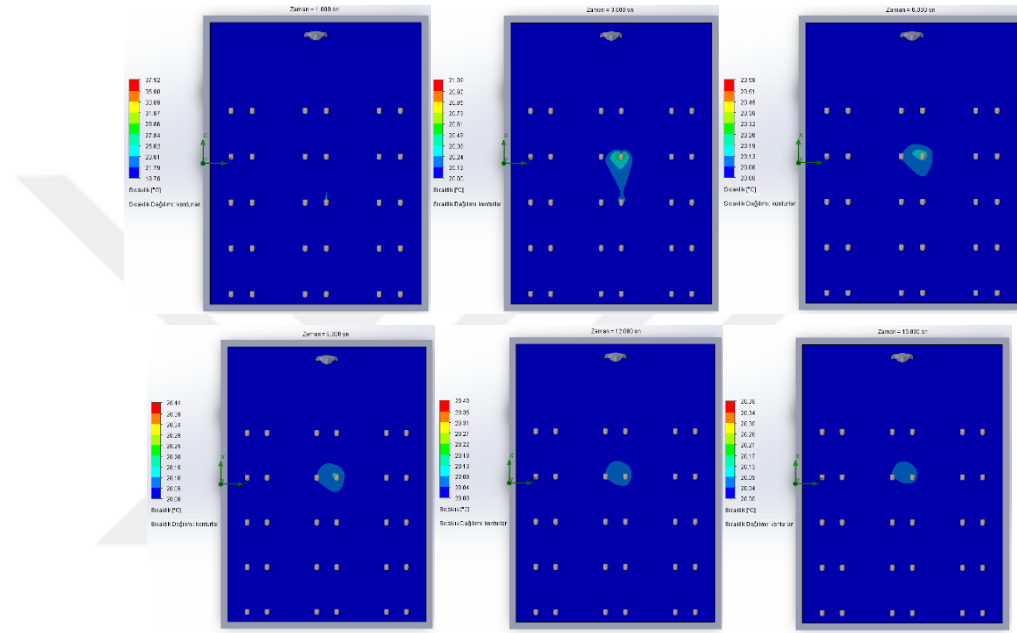
**1 sn–3 sn:** Sınıfın ortasında, düşük hızlı ve dairesel yapıda iki adet iç vorteks oluşmaktadır. Bu döngüsel hava yapıları, partiküllerin sınıf içerisinde hapsolmesine neden olacak şekilde davranmaktadır. Hava hareketi oldukça zayıftır; bu durum, iç ortam havasının büyük ölçüde durağan kaldığını göstermektedir.

**6 sn–9 sn:** Vortekslerin çapı artmakta ancak akış yönü hâlâ lokal dolaşım ile sınırlı kalmaktadır. Hava, sınıfın ortasında dolaşmakta; kenarlara veya dış ortama yönelmemektedir. Renk skalasında da görüldüğü üzere, hava hızları çoğunlukla 0.2–0.8 m/s arasında düşük seviyelerde seyretmektedir.

**12 sn–15 sn:** Vorteks yapıları, sınıfın merkezine yakın bölgelerde kararlı bir şekilde dönmeye devam etmektedir. Hava akışı belirli bir döngüsel yapıya ulaşmakta; ancak ortamda herhangi bir taze hava girişi bulunmadığı için mevcut hava kendini sürekli tekrar etmektedir. Kirli hava sınıf içerisinde dönüp durmakta, tahliye gerçekleşmemektedir.

Elde edilen bulgular, penceresiz veya tümüyle kapalı sınıf ortamlarının enfeksiyon yayılımı açısından ciddi risk taşıdığını ortaya koymaktadır. Yönsüz ve düşük hızlı hava hareketleri, enfekte birey kaynaklı partiküllerin sınıf içerisinde uzun süre asılı kalmasına neden olmaktadır. Ortam havasının yenilenmemesi, partiküllerin tahliyesini engellemekte ve bulaşıcı partiküllerin homojen şekilde sınıfa yayılmasına zemin hazırlamaktadır. Bu durum, diğer bireylerin enfekte partikülleri soluma riskini önemli ölçüde artırmaktadır.

**Sıcaklık Dağılımı Analizi:** S1 kapsamında, kış mevsimine özgü çevresel koşullarda tüm pencerelerin kapalı olduğu durumda, sınıf içerisindeki sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir. Zamana bağlı olarak Şekil 3.48’de elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları aşağıda özetlenmektedir. İlgili kontur haritalarında sıcaklık değerleri °C cinsinden ifade edilmekte olup, kırmızı tonlar ortam sıcaklığının üzerinde kalan bölgeleri, mavi tonlar ise sabit iç sıcaklığa yakın veya daha düşük sıcaklık bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.48. S1'e ait sıcaklık dağılımı

**1 sn:** Sınıf genelinde sıcaklık yaklaşık 20 °C seviyesinde kalmaktadır. Enfekte bireyin bulunduğu bölgenin hemen üst kısmında, lokal ölçekte hafif bir sıcaklık artışı gözlenmektedir. Bu sıcaklık farkı, ortamdan belirgin şekilde ayırt edilememektedir.

**3 sn:** Damlacıkların oluşturduğu lokal sıcaklık farkı daha belirgin hâle gelmektedir. Enfekte bireyin çevresinde hafif bir sıcak hava yoğunlaşması oluşmaktadır. Ancak bu sıcak bölge sabit kalmakta, sınıfın geneline yayılmamaktadır.

**6–15 sn:** Damlacık kaynaklı sıcaklık farkı sınırlı bir bölgede kalmaya devam etmektedir. Sınıf genelinde sıcaklık dağılımı değişmemekte; ortam havası, lokal sıcak hava kütlesiyle yeterli düzeyde etkileşime girememektedir.

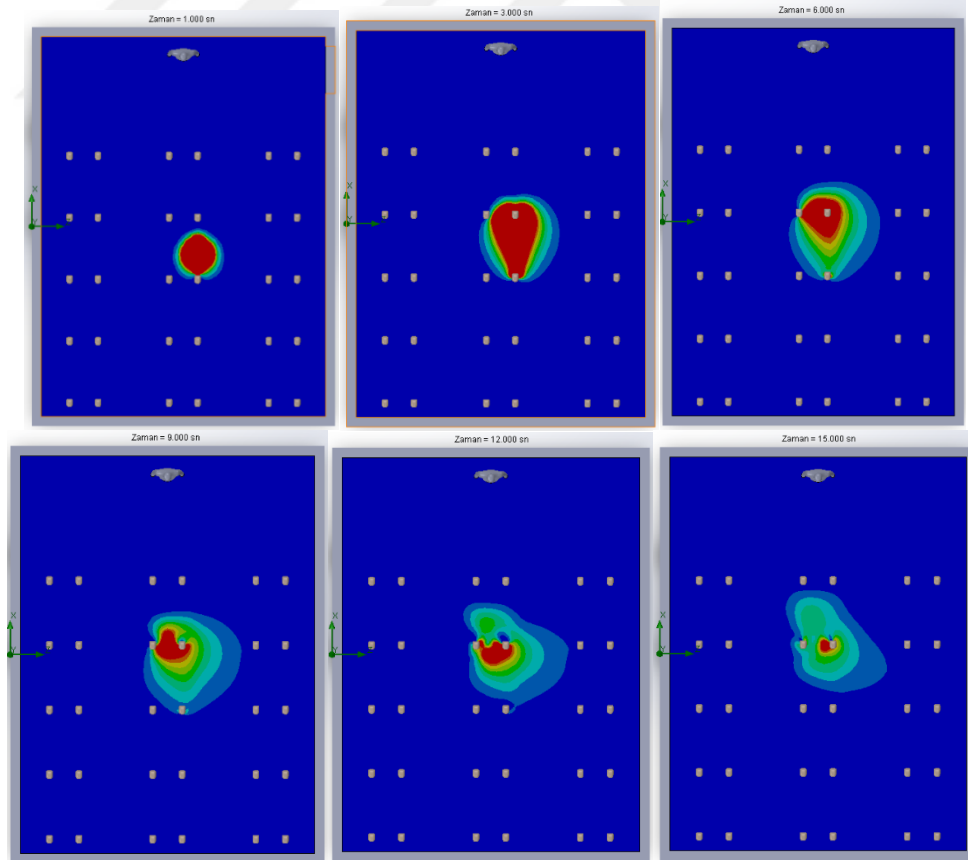
Elde edilen bulgular, kapalı sınıf ortamında doğal hava hareketinin bulunmaması durumunda hem sıcaklık dağılımının durağan kaldığını hem de damlacıkların oluşturduğu termal etkinin ortam havası tarafından absorbe edilemediğini ortaya koymaktadır.

Söz konusu yapısal özellikler, enfekte partiküllerin ortam içerisinde daha uzun süre kalmasına ve bulaş riskinin artmasına zemin hazırlamaktadır. Özellikle soğuk hava koşullarında pencerelerin kapalı tutulduğu sınıf ortamlarında, ısı farklılıklarının doğal hava hareketini tetikleyemediği durumlarda enfeksiyon yayılımı açısından ciddi riskler oluşabilmektedir.

### 3.4.3.2. Ön tek pencere açık (S2)

S2 kapsamında, kış mevsimine özgü çevresel koşullarda yalnızca sınıfın ön tek penceresinin açık tutulduğu durumda, enfekte bir bireyden kaynaklanan partikül dağılımı, hava hareketi ve sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir.

**Partikül Dağılımı Analizi:** S2 senaryosuna ait partikül dağılımı analizi Şekil 3.49’da görülmektedir. Görsellerde kullanılan kontur haritalarında partikül konsantrasyonu, renk skalası ile ifade edilmiştir. Kırmızı tonlar, yüksek yoğunlukta partikül birikimini; mavi tonlar ise düşük yoğunluklu bölgeleri temsil etmektedir.



Şekil 3.49. S2’ye ait partikül dağılımı

Zamana bağılı kontur haritalarına göre partikül dağılımı şu şekilde gelişmektedir:

**1 sn:** Partikül bulutu, kaynağın hemen çevresinde yüksek yoğunlukta lokalize olmuş durumdadır. Dağılım simetrik ve kompakt bir yapıdadır.

**3 sn- 6 sn:** Partikül yayılımı hem yatay düzlemde hem de sınırlı şekilde dikey doğrultuda genişlemektedir. Ön açık pencereden giren dış hava, partikül bulutunu sınıfın iç bölgelerine doğru yönlendirmektedir.

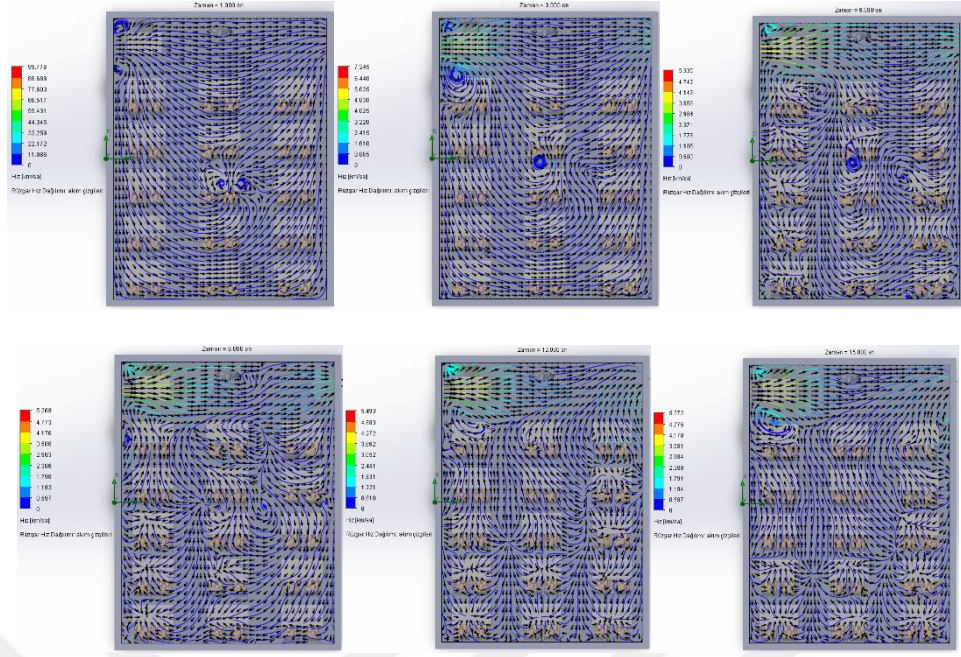
**9 sn-12 sn:** İç hava hareketinin etkisiyle partikül bulutu sınıfın sol ön kısmına doğru kaymakta, yer yer dönel (vorteks) hareketler oluşmaktadır. Bu evrede partikül yoğunluğunda kademeli bir seyrelme gözlenmektedir.

**15 sn:** Partiküllerin büyük bölümü sınıf içerisinde geniş bir alana yayılmış; ancak lokal olarak belirli bölgelerde yüksek yoğunluk devam etmektedir.

Kış koşullarında dış ortam-hava sıcaklığı farkı ve tek bir pencerenin açık olması, sınıf içerisindeki hava hareketlerini sınırlı düzeyde etkilemiştir. Bu senaryoda gözlemlenen hava akımı, partikül yayılımını yönlendirmiş ancak partikül tahliyesini yeterli ölçüde sağlayamamıştır. Özellikle orta ve arka alanlarda hava akımı zayıf kalmakta; bu da enfekte partiküllerin askıda kalmasına ve bulaş riskinin devam etmesine neden olmaktadır.

Sonuç olarak, kış senaryosu kapsamında yalnızca ön tek pencerenin açık tutulduğu durum, hava değişimini sınırlı düzeyde sağlayarak partikül seyrelmesi kısmen mümkün kılmaktadır. Ancak havalandırma yeterince etkili olmadığından, enfeksiyon riski sınıfın belirli bölgelerinde devam etmektedir. Bu nedenle, kış koşullarında doğal havalandırmanın yetersiz kaldığı durumlarda mekanik havalandırma desteği veya pencere yerleşiminin optimize edilmesi önerilmektedir.

**Hava Hareketi ve Akış Dağılımı Analizi:** S2 kapsamında, kış mevsimine özgü çevresel koşullarda sadece tek ön pencerenin açık olduğu durumda, sınıf içerisindeki hava hareketlerinin dinamik davranışı analiz edilmektedir. Şekil 3.50’de sunulan hız vektörleri ve kontur haritaları, sınıf içerisindeki hava hareketinin yönünü ve hız büyüklüğünü ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Görsellerde kullanılan renk skalasında mavi tonlar, düşük hız bölgelerini; kırmızı tonlar ise yüksek hız bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.50. S2'e ait hava hareketi ve akış dağılımı

**1 sn:** Pencere açıklığından sınıfa giren dış hava akışı, sınıfın sol üst köşesinde bir hızlanma bölgesi oluşturmakta ve sınıf içerisine yönelmektedir. Sınıfın merkezinde düşük hızlı bir vorteks oluşmaya başlamıştır.

**3 sn- 6 sn:** Hava akışı sınıf içerisine daha fazla nüfuz etmekte; orta bölgelerde iki simetrik vorteks yapısı belirginleşmektedir. Ancak bu yapıların çevresinde hâlen düşük hızlı, durağan bölgeler gözlemlenmektedir.

**9 sn-12 sn-15 sn:** Vorteksler sınıf içerisine yayılmakta, sınıfın ön kısmında daha yüksek hızlara ulaşılmakta; ancak orta ve arka bölgelerde akım şiddeti sınırlı kalmaktadır. Özellikle 15 sn'de açık pencereden giren hava, sınıfın orta-alt bölgesinde kompleks bir döngü oluşturmaktadır.

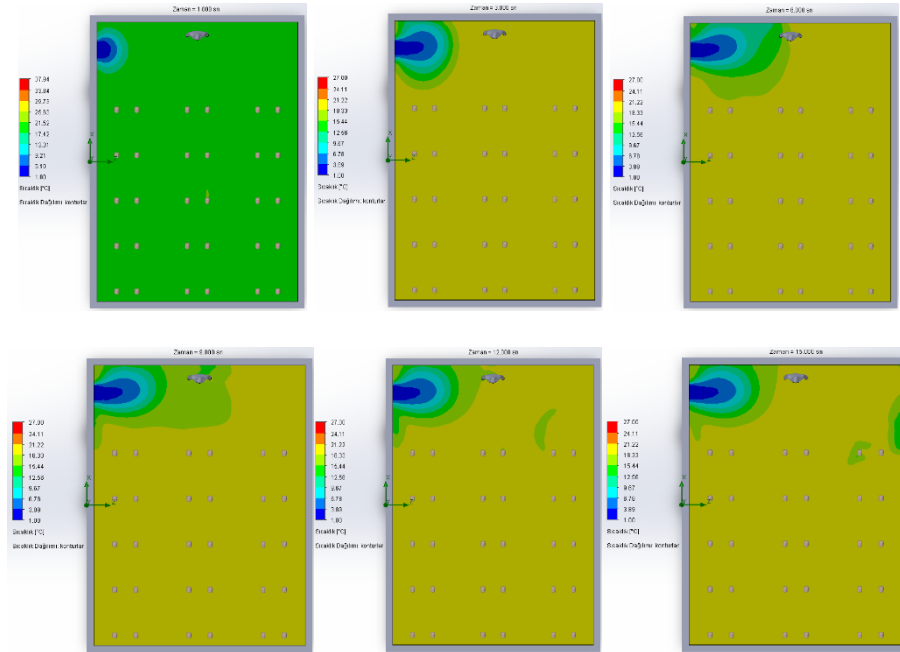
Kontur haritalarında kullanılan renk skalasında, Kırmızı ve turuncu tonlar, yüksek hız bölgelerini, mavi tonlar, düşük hız bölgelerini göstermektedir. Görselde akım çizgileri, hava parçacıklarının yönünü ve girdap hareketlerini detaylı biçimde göstermektedir.

Elde edilen bu zamana bağlı hava hareketi sonuçları, yalnızca ön pencerenin açık tutulduğu koşullarda sınıfa giren hava akımının sınırlı bölgelerde etkili olduğunu, ancak sınıf genelinde homojen bir dağılım sağlayamadığını ortaya koymaktadır. Orta ve arka sıralarda gözlemlenen düşük hava hızları, bu bölgelerde hava sirkülasyonunun zayıf kaldığını ve enfekte partiküllerin askıda kalma süresinin uzayabileceğini göstermektedir.

Ayrıca, vortekslerin iç yapılarında oluşan döngüsel hava hareketi, partikül yayılımını sınıf içinde dairesel biçimde yönlendirmekte; ancak bu hareketin partikül tahliyesine katkısı sınırlı kalmaktadır. Bu bağlamda, doğal havalandırmanın kış koşullarında yetersiz kaldığı ve açık tek pencere ile sağlanan hava girişinin tüm sınıf hacmi için yeterli bir hava değişimi sunmadığı anlaşılmaktadır.

Sonuç olarak, bu senaryo özelinde elde edilen rüzgâr dağılımı verileri, hava hareketlerinin lokal kaldığını, tahliye başarısının sınırlı olduğunu ve enfeksiyon riski açısından düşük hava hızı bölgelerinin kritik rol oynadığını göstermektedir. Bu nedenle, kış aylarında yalnızca pencere açmaya dayalı doğal havalandırma uygulamalarının, enfeksiyon kontrolü açısından yetersiz kalabileceği; ilave mekanik havalandırma sistemlerinin entegrasyonunun gerekli olduğu önerilmektedir.

**Sıcaklık Dağılımı Analizi:** S2 kapsamında, kış mevsimine özgü çevresel koşullarda sadece tek ön pencerenin açık olduğu durumda, sınıf içerisindeki sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir. Zamana bağlı olarak Şekil 3.51’de elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları aşağıda özetlenmektedir. İlgili kontur haritalarında sıcaklık değerleri °C cinsinden ifade edilmekte olup, kırmızı tonlar ortam sıcaklığının üzerinde kalan bölgeleri, mavi tonlar ise sabit iç sıcaklığa yakın veya daha düşük sıcaklık bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.51. S2’ye ait sıcaklık dağılımı

**1 sn:** Sınıf genelinde sıcaklık dağılımı büyük oranda homojendir. İç ortam sıcaklığı yaklaşık 20 °C düzeyindedir ve herhangi bir belirgin soğuk hava girişi henüz gözlemlenmemektedir.

**3 sn- 6 sn:** Açık pencereden giren soğuk dış hava, sınıfın sol üst köşesinde düşük sıcaklıklı bir bölge oluşturmaya başlamıştır. Bu bölge, yaklaşık 8–12 °C aralığında seyretmektedir.

**9 sn- 12 sn -15 sn:** Düşük sıcaklıklı bölge sınıf içerisine doğru ilerlemiş ve yayılım göstermiştir. Ancak bu soğuk hava kütlesi sadece sınıfın ön bölümünde etkili olmakta; orta ve arka bölgelerde sıcaklık büyük ölçüde sabit kalmaktadır.

Simülasyon verileri, sınıfa giren soğuk havanın yalnızca sınırlı bir bölgede etkili olduğunu; sınıfın tamamında homojen bir sıcaklık düşüşü yaratmadığını göstermektedir. Bu durum, hava hareketinin ön bölgede sınırlı kaldığını ve doğal havalandırma ile giren havanın sınıfın tamamına yayılmadığını ortaya koymaktadır.

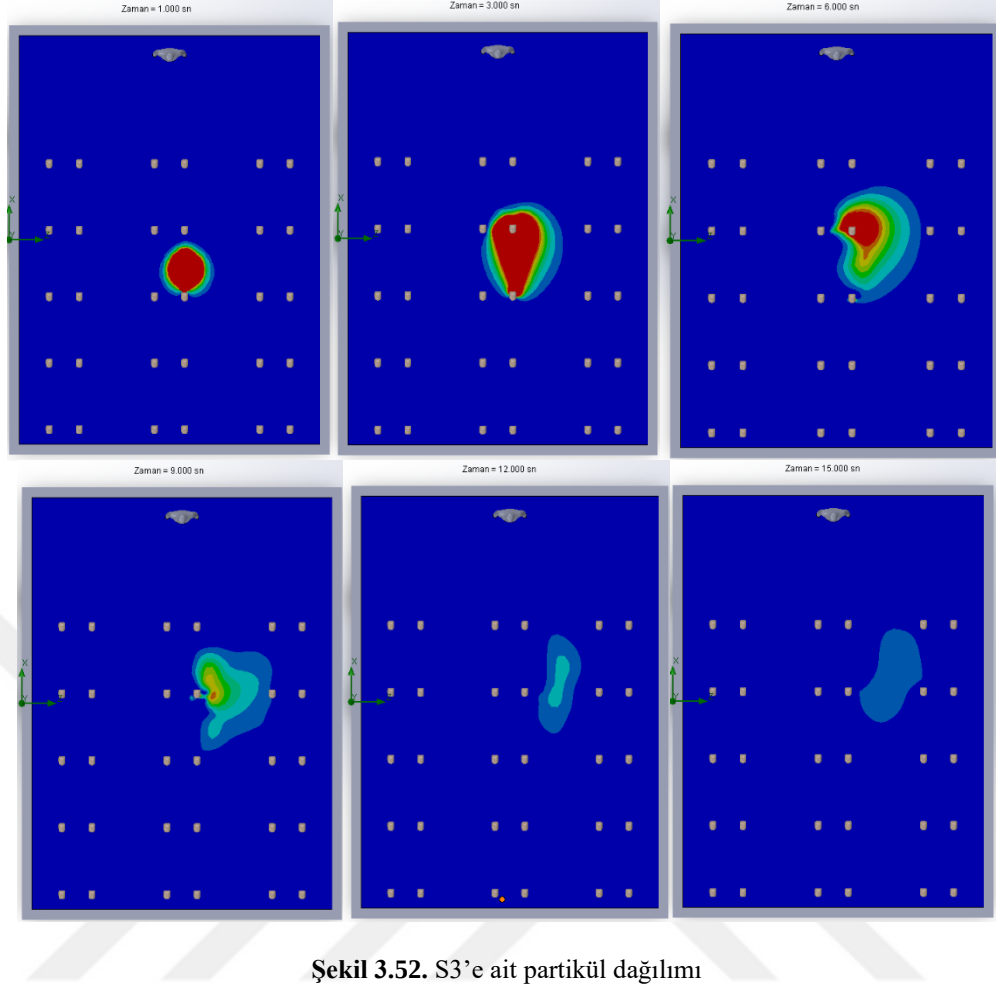
Bu senaryoda enfekte bireyden kaynaklanan sıcak hava kütlesi, sınıfın merkezinde lokal kalmakta; açık pencereden gelen soğuk hava ise yukarıdan içeri girerek yerel sıcaklık dengesizliklerine neden olmaktadır. Bu sıcaklık farklılıkları, termal konforu olumsuz etkilediği gibi, sınıf içerisindeki hava akımlarını da sınırlı ölçüde etkileyerek partikül taşınımı üzerinde dolaylı bir rol oynamaktadır.

Sonuç olarak, ön tek pencerenin açık olduğu kış koşullarında, dış ortamdan içeri giren hava sınırlı bölgelerde etkili olmakta; bu da hem sıcaklık homojenliğini bozulmakta hem de hava değişim oranını düşük tutmaktadır. Sıcaklık dağılımı analizleri, partikül taşınımı ve bulaş riski değerlendirmelerinde tamamlayıcı bir gösterge olarak dikkate alınmalı; özellikle düşük sıcaklıklı ölü hava bölgelerinin belirlenmesi enfeksiyon kontrol stratejileri açısından önemsenmelidir.

#### **3.4.3.3. Orta İki Pencere Açık (S3)**

S3 kapsamında, kış mevsimine özgü çevresel koşullarda, orta iki pencerenin ve kapının açık tutulduğu sınıf ortamında, enfekte birey kaynaklı virüs partikül dağılımı, hava hareketi ve sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir.

**Partikül Dağılımı Analizi:** S3 senaryosuna ait partikül dağılım analizi Şekil 3.52’de görülmektedir. Görsellerde kullanılan kontur haritalarında partikül konsantrasyonu, renk skalası ile ifade edilmiştir. Kırmızı tonlar, yüksek yoğunlukta partikül birikimini; mavi tonlar ise düşük yoğunluklu bölgeleri temsil etmektedir.



Şekil 3.52. S3'e ait partikül dağılımı

Zamana bağlı kontur haritalarına göre partikül dağılımı şu şekilde gelişmektedir:

**1 sn:** Enfekte bireyin çevresinde yüksek konsantrasyonlu, lokalize bir partikül bulutu oluşmuştur. Yayılım, kaynağa yakın sınırlı bir bölgededir.

**3 sn- 6 sn:** Partikül bulutu yatay düzlemde sınıf içerisine doğru yayılmakta; orta pencere açıklıklarından giren dış hava akımı, partiküllerin dağılım yönünü sağa doğru yönlendirmektedir.

**9 sn:** Aerosol bulutu sınıfın sağ tarafında daha geniş bir alana yayılmış; partikül konsantrasyonu orta düzeyde kalmakla birlikte dağılım eğrisi asimetric bir yapı göstermektedir.

**12 sn-15 sn:** Partikül yoğunluğu belirgin şekilde seyrelmiş; ancak sınıf içerisinde tamamen tahliye edilemediği görülmektedir. Özellikle orta-arka bölgelerde, düşük konsantrasyonda da olsa aerosol varlığı devam etmektedir.

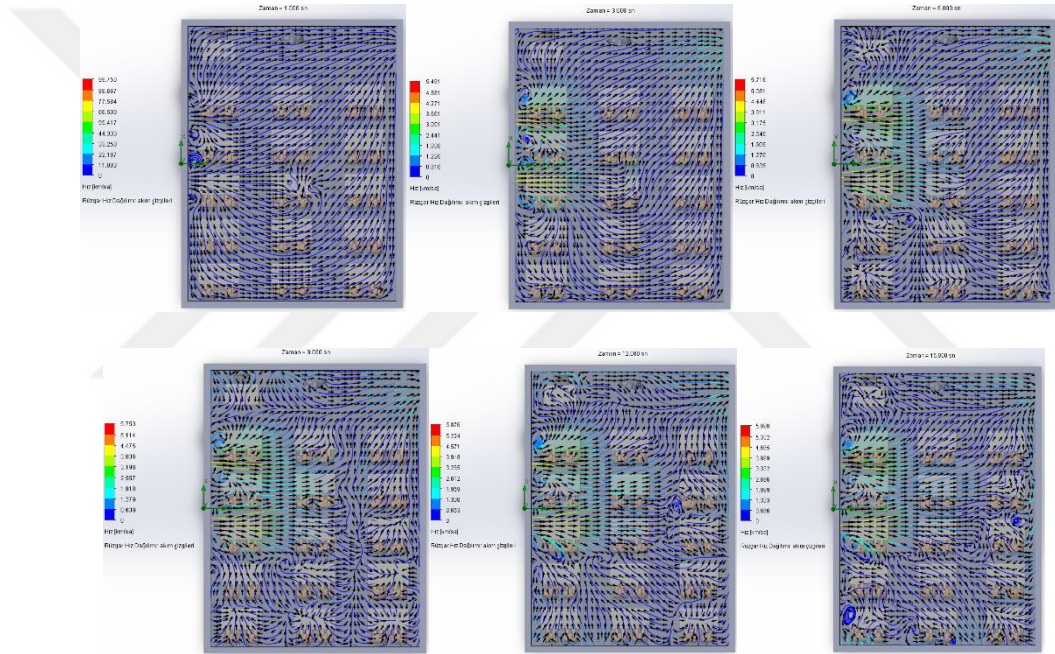
Bu senaryo, orta pencere açıklıklarının sağladığı hava girişi sayesinde enfekte partiküllerin yayılım yönünün değiştirilebildiğini; ancak sınıf genelinde yeterli düzeyde

tahliye sağlanamadığını ortaya koymaktadır. Hava akışının sınıfın merkezinde yoğunlaştığı; arka ve köşe bölgelerde ise durağan bölgelerin oluştuğu gözlemlenmiştir.

### Hava Hareketi ve Akış Dağılımı Analizi:

S3 kapsamında, kış mevsimine özgü çevresel koşullarda orta iki pencerenin açık olduğu durumda, sınıf içerisindeki hava hareketlerinin dinamik davranışı analiz edilmektedir.

Şekil 3.53'te sunulan hız vektörleri ve kontur haritaları, sınıf içerisindeki hava hareketinin yönünü ve hız büyüklüğünü ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Görsellerde kullanılan renk skalasında mavi tonlar, düşük hız bölgelerini; kırmızı tonlar ise yüksek hız bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.53. S3'e ait hava hareketi ve akış dağılımı

**1.sn:** Orta kısımdaki açık pencerelerden sınıf içerisine yönelen hava akışı, giriş noktasında yüksek hızla sınıfa nüfuz etmekte; sınıfın ortasında düşük yoğunluklu, dairesel vorteks yapıları oluşmaya başlamaktadır.

**3.sn- 6.sn:** Orta açıklıklardan giren hava, sınıf boyunca yatay olarak yayılmakta ve geniş vorteks yapıları ile iç hava sirkülasyonunu tetiklemektedir. Hava akımı simetrik ve yoğun merkezli yapıdadır.

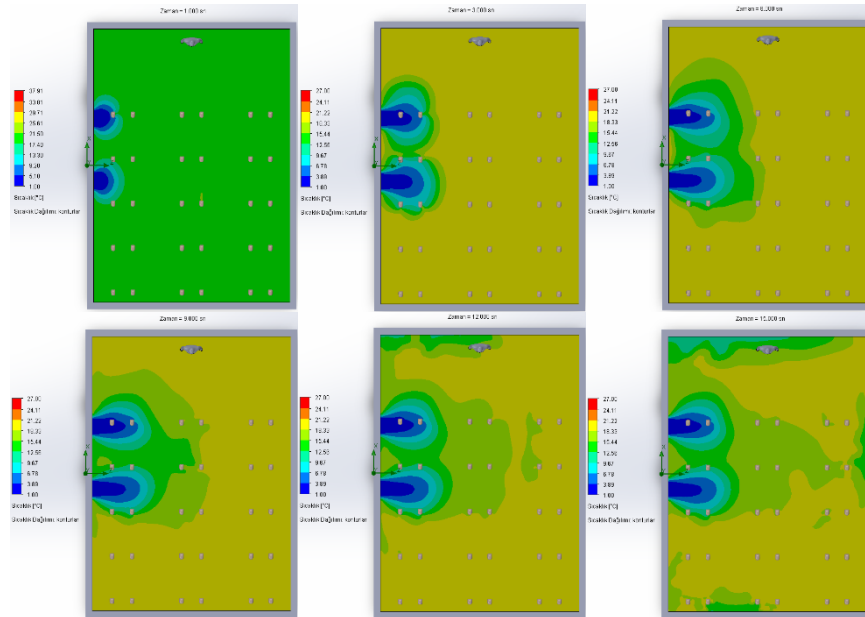
**9.sn-12.sn- 15.sn:** Zaman ilerledikçe vorteks yapılarının sınıfın hem ön hem de arka kısımlarına yayıldığı; ancak hava hızının kenar bölgelerde düştüğü

gözlemlenmektedir. Özellikle 15 sn de sınıf genelinde kompleks ve düşük hızlı türbülans alanları hâkim hale gelmiştir.

Elde edilen zamana bağlı hava hareketi profili, sınıfın orta kısmında yer alan pencere açıklıklarının iç mekâna güçlü bir hava girişi sağladığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, söz konusu hava akışının sınıfın uç bölgelerinde, özellikle arka ve köşe alanlarda, yeterli düzeyde hava değişimi oluşturmakta yetersiz kaldığı görülmektedir. Ayrıca, sınıfın alt kısımlarında durağan hava bölgeleri olduğu tespit edilmiş olup, bu bölgelerde partiküllerin askıda kalma eğilimi artmakta ve dolayısıyla söz konusu alanlar bulaş riski açısından kritik konuma gelmektedir.

Sonuç olarak, bu senaryo, orta pencere açıklıklarının merkezde güçlü hava hareketleri oluşturduğunu; ancak sınıfın tamamında etkili ve dengeli bir hava sirkülasyonu sağlamadığını göstermektedir. Bu nedenle, havalandırma stratejisinin sadece pencere konumu değil, hava akış yollarının optimizasyonunu da içerecek şekilde tasarlanması, bulaş riskinin azaltılması açısından büyük önem arz etmektedir.

**Sıcaklık Dağılımı Analizi:** S3 kapsamında, kış mevsimine özgü çevresel koşullarda orta iki pencerenin açık tutulduğu sınıf ortamında sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir. Zamana bağlı olarak Şekil 3.54'te elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları aşağıda özetlenmektedir. İlgili kontur haritalarında sıcaklık değerleri °C cinsinden ifade edilmekte olup, kırmızı tonlar ortam sıcaklığının üzerinde kalan bölgeleri, mavi tonlar ise sabit iç sıcaklığa yakın veya daha düşük sıcaklık bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.54. S3'e ait sıcaklık dağılımı

**1.sn:** Sınıf genelinde sıcaklık dağılımı homojen ve iç ortam sıcaklığına (yaklaşık 20 °C) yakın seviyededir. Orta pencerelerden dış hava girişi henüz iç ortama anlamlı bir etki yapmamıştır.

**3.sn- 6.sn:** Açık pencere açıklıklarından giren soğuk hava, orta bölgelerde belirgin sıcaklık düşüşlerine yol açmaya başlamıştır. Soğuk hava kütlesi (yaklaşık 8–12 °C), sınıf içerisine dikey ve yatay ekseninde yayılım göstermektedir.

**9.sn- 12.sn:** Soğuk hava akışı sınıfın merkezinden alt bölgelere doğru ilerlemekte; bu bölgelerde sıcaklık farklılıkları daha belirgin hale gelmektedir. Sıcak hava ile soğuk hava arasında oluşan gradyanlar, termal konforu azaltabilecek düzeydedir.

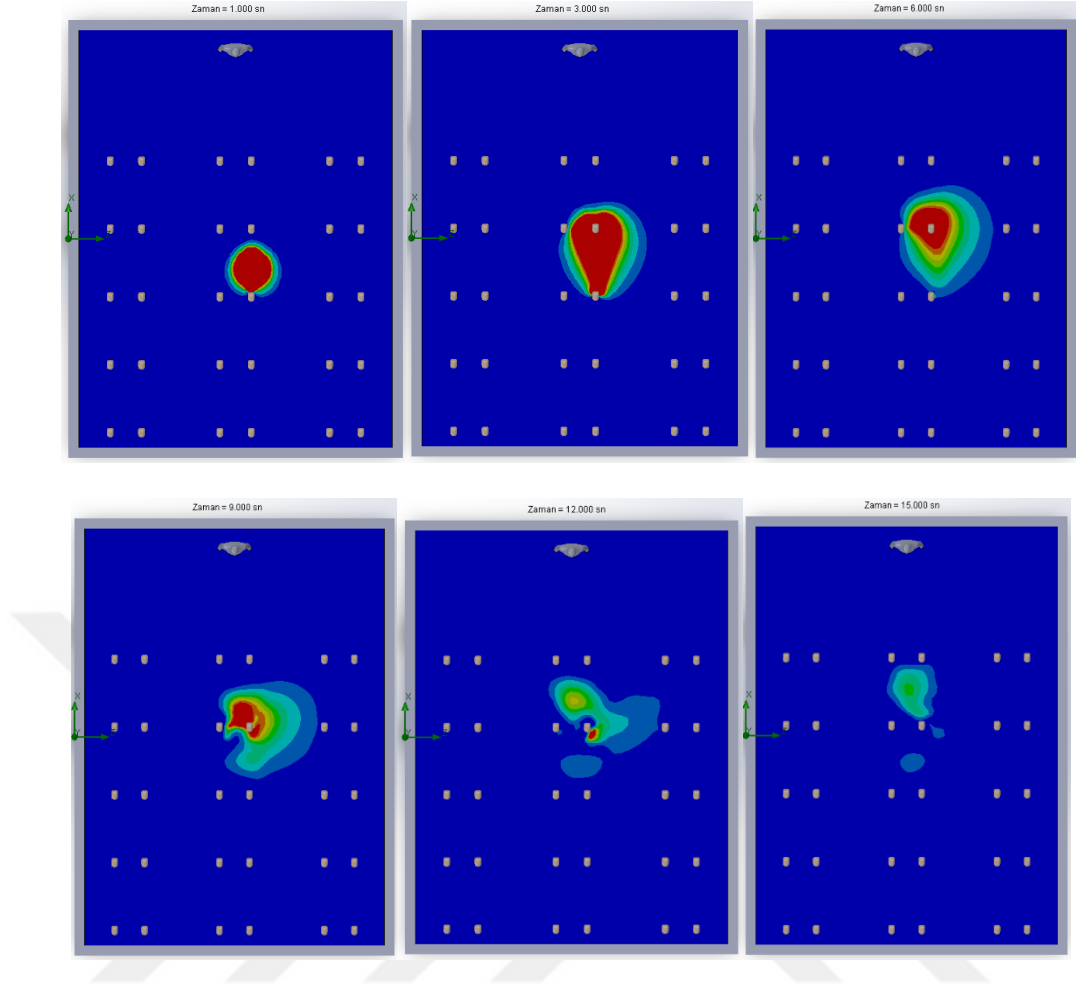
**15.sn:** Orta pencere açıklıkları çevresindeki düşük sıcaklıklı bölgeler sınıf içerisinde yayılmış; ancak hava değişiminin etkisi arka bölgelere tam anlamıyla ulaşamamıştır. Sıcaklık dağılımı, orta alanda soğuma eğilimindeyken sınıfın diğer bölgelerinde büyük ölçüde sabit kalmaktadır.

Bu senaryoda, orta pencerelerden giren dış hava sınıfın merkezinde daha etkili olmuş; ancak arka ve köşe bölgelerde anlamlı bir sıcaklık değişimi oluşturmamıştır. Bu durum, pencere konumunun termal dağılım üzerinde lokal etkili olduğunu, ancak tüm sınıf hacminde homojen bir hava ve sıcaklık değişimi sağlamadığını göstermektedir. Aynı zamanda, bu soğuk hava bölgeleri termal konforu azaltırken, sıcaklık farkları hava hareketi üzerinde etkili olarak partikül taşınımını da dolaylı yoldan etkilemektedir.

#### **3.4.3.4. Baş – son iki pencere açık (S4)**

S4 kapsamında, kış mevsimine özgü çevresel koşullarda sınıfın baş ve son iki pencerenin açık tutulduğu durumda, enfekte bir bireyden kaynaklanan partikül dağılımı, hava hareketi ve sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir.

**Partikül Dağılımı Analizi:** S4 senaryosuna ait partikül dağılım analizi Şekil 3.55'te görülmektedir. Görsellerde kullanılan kontur haritalarında partikül konsantrasyonu, renk skalası ile ifade edilmiştir. Kırmızı tonlar, yüksek yoğunlukta partikül birikimini; mavi tonlar ise düşük yoğunluklu bölgeleri temsil etmektedir.



Şekil 3.55. S4'e ait partikül dağılımı

Zamana bağlı kontur haritalarına göre partikül dağılımı şu şekilde gelişmektedir:

**1 sn:** Enfekte birey etrafında yüksek konsantrasyonda, lokalize bir aerosol bulutu oluşmuştur. Partikül yayılımı henüz sınırlı bir hacimdedir.

**3 sn- 6 sn:** Partikül bulutu hem yatay hem de sınırlı dikey düzlemde yayılmaya başlamıştır. Baş ve sondaki açık pencerelerden giren dış hava akımı, partikül bulutunu sınıfın ön kısmına doğru yönlendirmektedir.

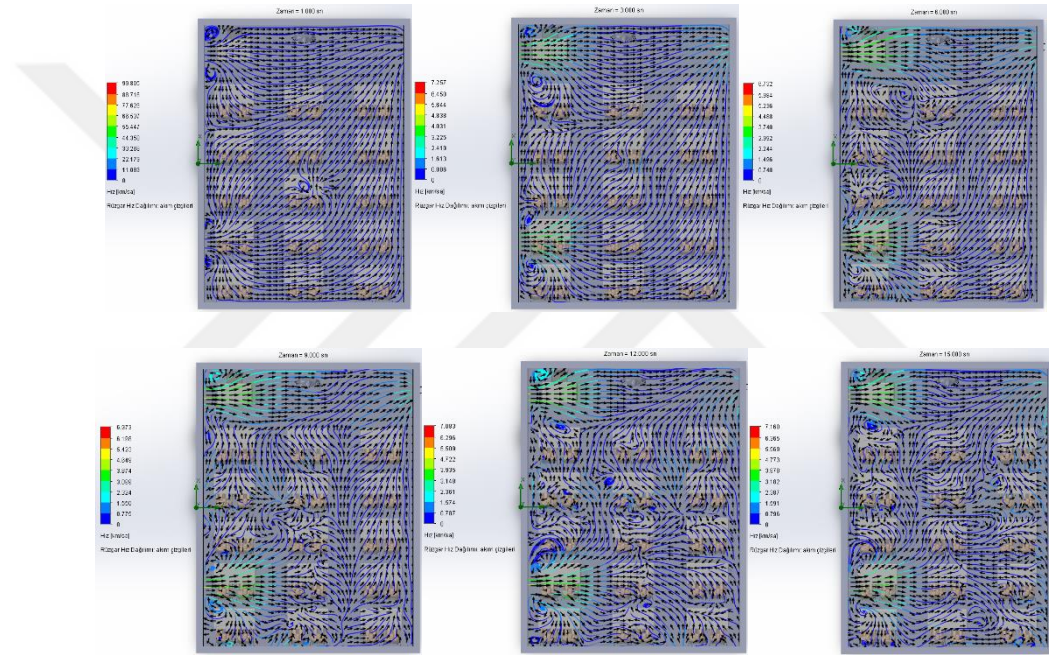
**9 sn:** Hava akımının etkisiyle partikül dağılımı sola kaymakta; şekil asimetrik hale gelmektedir. Partikül yoğunluğu halen orta seviyededir.

**12 sn-15 sn:** Aerosoller sınıf içinde yayılmış ve büyük ölçüde seyrelmiştir. Düşük yoğunluklu partiküller sınıfın farklı noktalarında askıda kalmaya devam etmektedir.

Bu senaryo, sınıfın her iki ucundaki pencere açıklıkları sayesinde hava akışının merkezden kenarlara doğru yönlendiğini göstermektedir. Bu yönlü akış, partikül bulutunun hareket yönünü etkileyerek yayılımın sınıf boyunca sürmesini sağlamıştır.

Ancak, özellikle sınıfın ortasında ve sol arka tarafında oluşan ölü hava bölgeleri, partiküllerin bu alanlarda askıda kalmasına neden olmuş ve tam tahliye sağlanamamıştır

**Hava Hareketi ve Akış Dağılım Analizi:** S4 kapsamında, kış mevsimine özgü çevresel koşullarda sınıfın ön ve arka cephelerinde yer alan iki pencerenin açık tutulduğu durumda oluşan hava akımı davranışları ve hız dağılımı analiz edilmektedir. Şekil 3.56’da sunulan hız vektörleri ve kontur haritaları, sınıf içerisindeki hava hareketinin yönünü ve hız büyüklüğünü ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Görsellerde kullanılan renk skalasında mavi tonlar, düşük hız bölgelerini; kırmızı tonlar ise yüksek hız bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.56. S4’e ait hava hareketi ve akış dağılımı

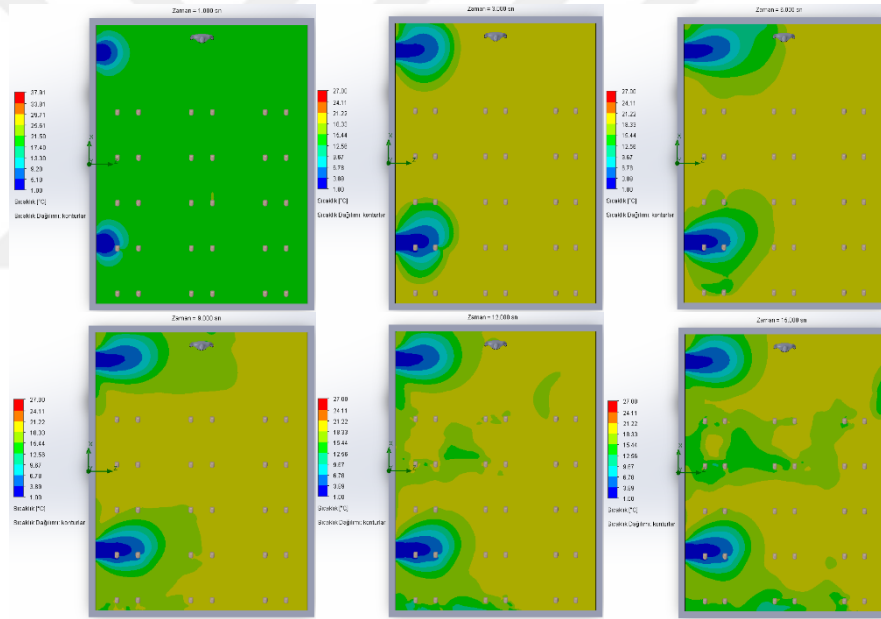
**1 sn:** Baş ve son pencerelerden giren hava akımı, sınıf boyunca doğrusal bir akış yönü oluşturmaya başlamış; orta bölgelerde simetrik vorteks yapıları gözlemlenmiştir.

**3 sn- 6 sn:** Hava akımı sınıfın önünden arkasına doğru belirgin bir doğrusal yön izlemekte; sınıfın ortasında geniş çaplı vorteks yapıları gelişmektedir. Bu yapıların etrafında düşük hızlı sirkülasyon bölgeleri oluşmuştur.

**9 sn-12 sn -15 sn:** Zaman ilerledikçe, vorteksler daha stabil bir hal almakta ve sınıfın genelinde dairesel döngüler hâkim olmaktadır. Ancak akım doğrultusu sınıf boyunca uzanmakta ve pencere hizasında yüksek hız bölgeleri görülmektedir. Akış simetrisi büyük ölçüde korunmuştur. Kırmızı ve turuncu tonlar yüksek hız Bölgelerini, yeşil-mavi tonlar daha durağan akım bölgelerini temsil etmektedir.

Simülasyon sonuçları, baş ve sondaki pencere açıklıkları sayesinde sınıf boyunca doğrusal ve yönlü bir hava akışının sağlandığını; bu akımın sınıfın merkezinden geçen belirgin bir akış eksenini oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Ancak hava akımı kenar bölgelerde ve öğrenci sıralarının arasında yer alan alanlarda hâlen düşük hızlara sahiptir ve bu bölgelerde partikül birikimi veya termal durağanlık yaşanabilir.

**Sıcaklık Dağılımı Analizi:** S4 kapsamında, kış mevsimine özgü çevresel koşullarda sınıfın ön ve arka cephelerinde yer alan iki pencerenin açık tutulduğu durumda, iç ortam sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir. Zamana bağlı olarak Şekil 3.57’de elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları aşağıda özetlenmektedir. İlgili kontur haritalarında sıcaklık değerleri °C cinsinden ifade edilmekte olup, kırmızı tonlar ortam sıcaklığının üzerinde kalan bölgeleri, mavi tonlar ise sabit iç sıcaklığa yakın veya daha düşük sıcaklık bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.57. S4’e ait sıcaklık dağılımı

**1 sn:** Sınıf genelinde sıcaklık dağılımı homojendir. İç ortam sıcaklığı 20 °C civarındadır ve henüz dış ortamdaki gelen soğuk hava iç mekâna etki etmemiştir.

**3 sn-6 sn:** Baş ve sondaki açık pencerelerden gelen dış hava, sınıfın giriş ve çıkış bölgelerinde 8–12 °C aralığında soğuk hava kütleleri oluşturmaktadır. Bu soğuk hava, sınıf içerisine doğru yayılım göstermeye başlamıştır.

**9 sn-12 sn-15 sn:** Zaman ilerledikçe, düşük sıcaklıklı bölgeler sınıf boyunca ilerlemekte, sınıfın orta ve alt bölgelerinde sıcaklık farkları daha belirgin hale

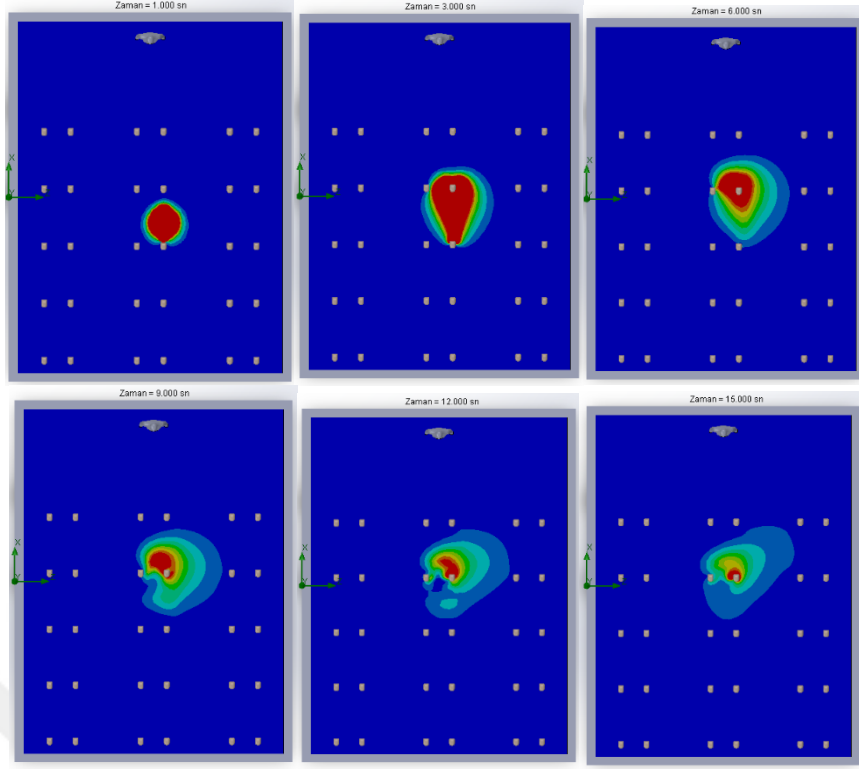
gelmektedir. Ancak hava hareketinin sınıf boyunca dağılma yönünde olması, sıcaklık dağılımının daha dengeli hâle gelmesine katkı sağlamaktadır.

Bu senaryoda gözlemlenen sıcaklık dağılımı, açık pencereler sayesinde dış hava girişinin sınıfın iki ucundan gerçekleştiğini ve bunun doğrusal bir termal gradyan oluşmasına neden olduğunu göstermektedir. Baş ve son açıklıkların sağladığı çift yönlü hava akışı hem soğuk havanın girişini hem de ısınmış iç havanın tahliyesini kolaylaştırmaktadır. Bu durum, diğer senaryolara kıyasla daha dengeli bir sıcaklık yayılımı oluşturmakta ve sıcak hava ile soğuk hava arasında belirgin ayrışmaların önüne geçmektedir.

#### 3.4.3.5. Arka Tek Pencere Açık (S5)

S5 kapsamında, kış mevsimine özgü çevresel koşullarda sınıftaki arka tek pencerenin açık tutulduğu durumda, enfekte bir bireyden kaynaklanan partikül dağılımı, hava hareketi ve sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir.

**Partikül Dağılımı Analizi:** S5 senaryosuna ait partikül dağılım analizi Şekil 3.58’de görülmektedir. Görsellerde kullanılan kontur haritalarında partikül konsantrasyonu, renk skalası ile ifade edilmiştir. Kırmızı tonlar, yüksek yoğunlukta partikül birikimini; mavi tonlar ise düşük yoğunluklu bölgeleri temsil etmektedir.



Şekil 3.58. S5'e ait partikül dağılımı

Zamana bağlı kontur haritalarına göre partikül dağılımı şu şekilde gelişmektedir:

**1 sn:** Enfekte birey çevresinde yüksek konsantrasyonda lokalize bir partikül bulutu oluşmuştur. Bu bulut durağan ve simetrik bir yapı göstermektedir.

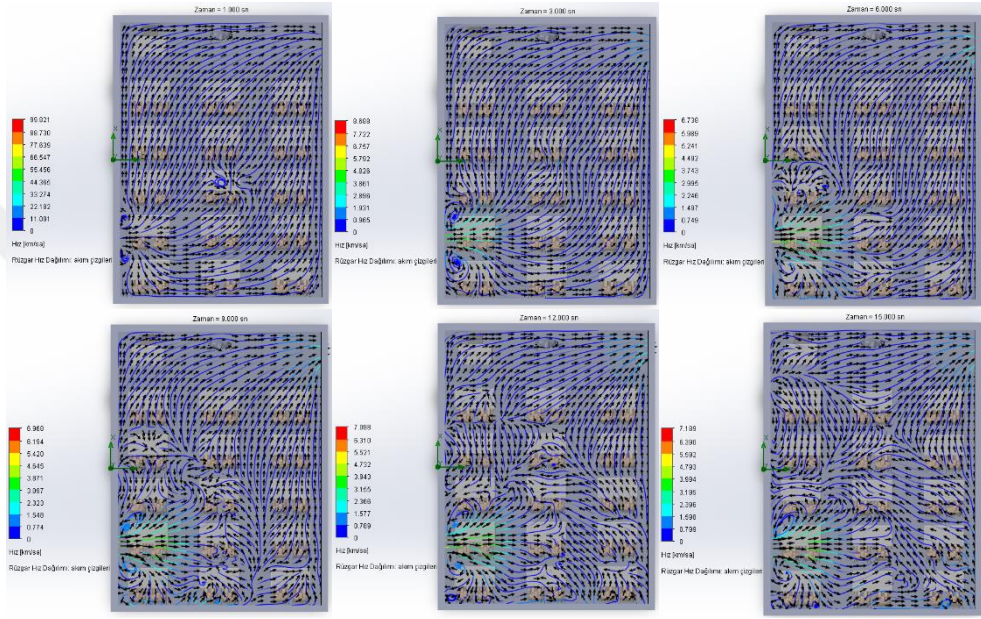
**3 sn-6 sn:** Partikül yayılımı yatay düzlemde sınıf içine doğru genişlemeye başlamıştır. Açık olan arka pencerenin yarattığı hava hareketi nedeniyle partiküller sınıfın arka sol bölgesine yönelmektedir.

**9 sn:** Aerosol bulutu belirgin şekilde sola doğru kaymakta, girdap hareketiyle birlikte yönlü yayılım göstermektedir. Partikül yoğunluğu orta seviyededir.

**12sn- 15 sn:** Partiküller sınıf içerisinde daha geniş bir alana yayılmış ancak hâlen belirli bölgelerde orta düzeyde yoğunluklarını korumaktadır. Dağılım yönü belirgin şekilde arka sol bölgeye doğrudur; bu da hava akımının etkisini açıkça göstermektedir.

Simülasyon sonuçları, sınıfın arka kısmında bulunan tek açık pencere sayesinde sınıf içinde yönlü bir hava hareketi oluştuğunu ve partikül bulutunun sınıfın sol arka bölgesine taşındığını göstermektedir. Ancak bu akışın sınıfın tamamında etkili olmadığı, özellikle ön ve orta bölgelerde partiküllerin sınırlı hareketle askıda kaldığı gözlemlenmiştir. Bu da havalandırmanın sınıfın tüm hacmini yeterince kapsayamadığını ve partikül tahliyesinin lokal kaldığını ortaya koymaktadır.

**Hava Hareketi ve Akış Dağılım Analizi:** S5 kapsamında, kış mevsimine özgü çevresel koşullarda yalnızca sınıfın arka penceresinin açık tutulduğu durumda oluşan hava akımı davranışları ve hız dağılımı analiz edilmektedir. Şekil 3.59’da sunulan hız vektörleri ve kontur haritaları, sınıf içerisindeki hava hareketinin yönünü ve hız büyüklüğünü ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Görsellerde kullanılan renk skalasında mavi tonlar, düşük hız bölgelerini; kırmızı tonlar ise yüksek hız bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.59. S5’e ait hava hareketi ve akış dağılımı

**1 sn:** Arka pencere açıklığından sınıfa yönelen hava girişi henüz sınıfın genelinde etkili değildir. Ancak arka sağ bölgede düşük hızda döngüsel hareketler (lokal vorteks) oluşmaya başlamıştır.

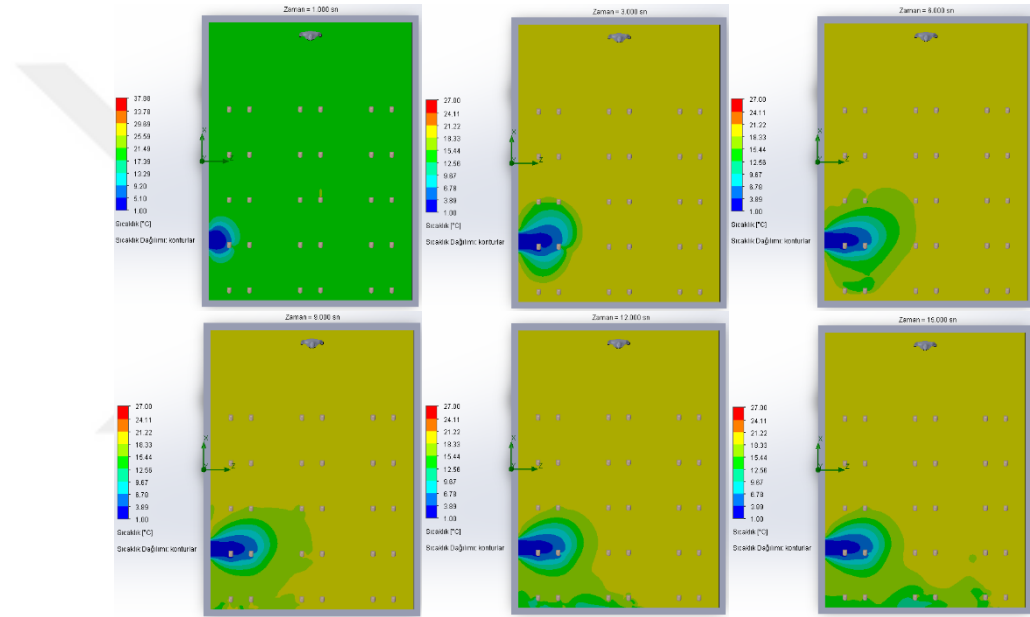
**3 sn- 6 sn:** Hava akımı sınıf içerisine yönelmekte; özellikle sınıfın alt ve arka bölgelerinde belirgin akış çizgileri gözlemlenmektedir. Sınıfın ön ve orta bölümlerinde hava hareketi sınırlı kalmaktadır.

**9 sn- 12 sn- 15 sn:** Girdap yapıları (Vorteks) sınıfın merkezine doğru ilerlemekte, ancak genel hava akımı hâlâ sınıfın arka bölümünde yoğunlaşmaktadır. Ön bölgelerde durağan alanlarının varlığı dikkat çekmektedir. Hava hızı konturları, sınıf boyunca dengeli bir akışın sağlanamadığını göstermektedir.

Sınıfın tamamında etkin bir hava sirkülasyonu oluşturamadığını göstermektedir. Özellikle sınıfın ön kısmında gözlemlenen düşük hız değerleri, bu bölgelerde partikül birikimi riskinin daha yüksek olduğunu işaret etmektedir. Bu yapı, enfekte birey kaynaklı

partikül yayılımının yönlenmesini sınırlı düzeyde etkilemekte; tahliye başarısını düşürmektedir.

**Sıcaklık Dağılımı Analizi:** S5 kapsamında, kış mevsimine özgü çevresel koşullar altında sınıfın yalnızca arka kısmında yer alan pencerenin açık tutulduğu durumda sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir. Zamana bağlı olarak Şekil 3.60'ta elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları aşağıda özetlenmektedir. İlgili kontur haritalarında sıcaklık değerleri °C cinsinden ifade edilmekte olup, kırmızı tonlar ortam sıcaklığının üzerinde kalan bölgeleri, mavi tonlar ise sabit iç sıcaklığa yakın veya daha düşük sıcaklık bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.60. S5'e ait sıcaklık dağılımı

**1 sn:** Sınıf genelinde sıcaklık dağılımı homojen yapıdadır. Ortam sıcaklığı tüm hacimde yaklaşık 20 °C civarındadır. Açık pencereden dış hava girişi henüz iç hacme etki etmemiştir.

**3 sn- 6 sn:** Sınıfın arka kısmındaki pencere açıklığından giren düşük sıcaklıklı dış hava, sınıfın alt sol bölgesinde 8–12 °C aralığında bir soğuk hava bölgesi oluşturmaya başlamıştır. Soğuk hava içeriye doğru ilerlemektedir.

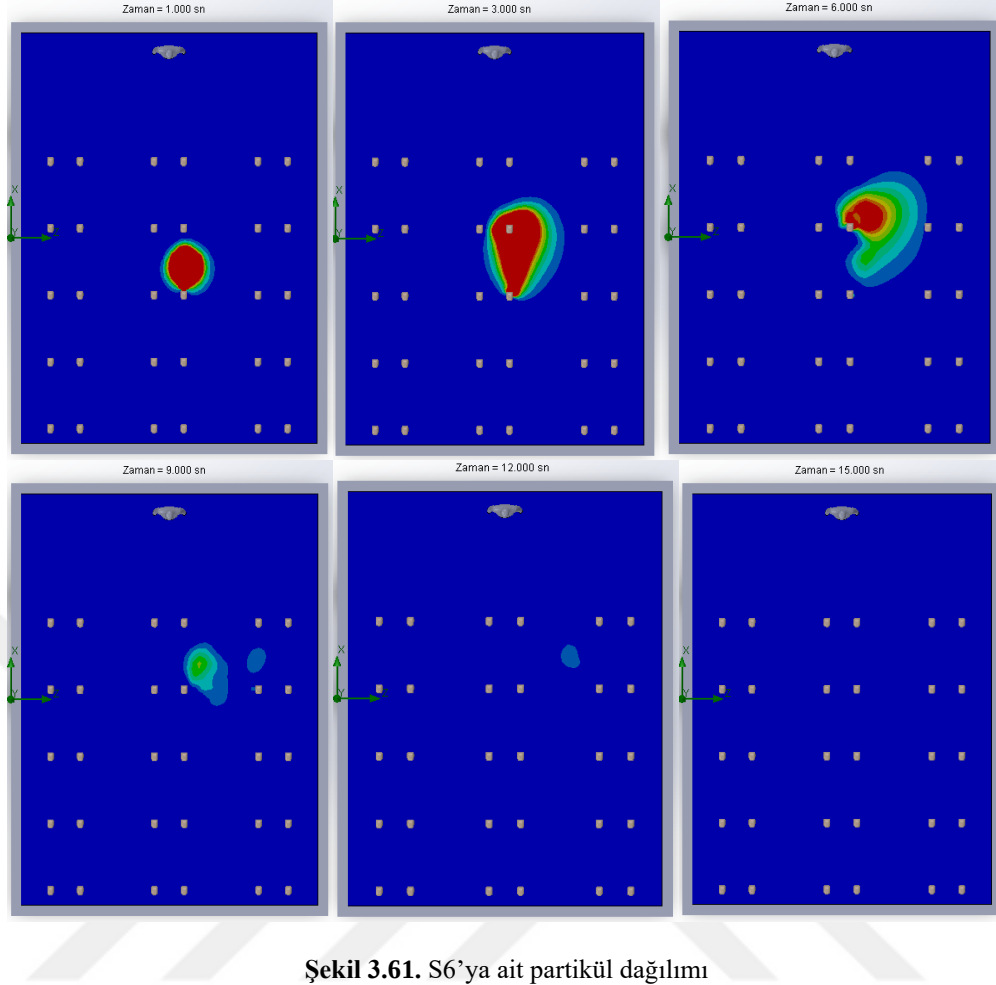
**9 sn-12 sn-15 sn:** Düşük sıcaklıklı hava kütlesi sınıfın arka kısmında yayılmakta, sınıfın ön bölgelerine ulaşmadan etkisini kaybetmektedir. Sıcaklık dağılımı, arka kısımlarda lokal soğuma alanları oluşturmakta; ön kısımlarda ise sıcaklık değişimi gözlenmemektedir.

Simülasyon sonuçları, yalnızca arka pencerenin açık tutulduğu durumda soğuk hava girişinin sınıfın arka bölgesinde yoğunlaştığını ve sıcaklık dağılımının lokal soğuma eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. Hava akımının zayıflığı ve yönsüzlüğü nedeniyle soğuk hava sınıfın tamamına homojen şekilde yayılmamış; bu da sıcaklık farklarının sınıf içinde dengesiz bir şekilde oluşmasına neden olmuştur. Termal konforun sınıfın ön bölgelerinde korunmuş olması, havalandırmanın yetersizliği pahasına elde edilmiştir.

#### **3.4.3.6. Dört pencere açık (S6)**

S6 kapsamında, kış mevsimine özgü çevresel koşullarda sınıftaki dört pencerenin açık tutulduğu durumda, enfekte bir bireyden kaynaklanan partikül dağılımı, hava hareketi ve sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir.

**Partikül Dağılımı Analizi:** S6 senaryosuna ait partikül dağılım analizi Şekil 3.61’te görülmektedir. Görsellerde kullanılan kontur haritalarında partikül konsantrasyonu, renk skalası ile ifade edilmiştir. Kırmızı tonlar, yüksek yoğunlukta partikül birikimini; mavi tonlar ise düşük yoğunluklu bölgeleri temsil etmektedir.



Şekil 3.61. S6'ya ait partikül dağılımı

Zamana bağlı kontur haritalarına göre partikül dağılımı şu şekilde gelişmektedir:

**1 sn:** Partikül yayılımı enfekte kaynağın hemen çevresinde lokalize olup, yüksek konsantrasyonda simetrik bir bulut oluşturmaktadır.

**3 sn -6 sn:** Dört açık pencerenin sağladığı çok yönlü hava hareketiyle birlikte partikül bulutu asimetrik yayılım göstermekte; sağ alt köşeye doğru yönelmektedir. Bu yönelme, hava akışının aktif olarak devreye girdiğini göstermektedir.

**9 sn:** Partikül dağılımı sınıfın sağ kısmında daha geniş bir alana yayılmış ve kırmızı-sarı tonlar azalmış, partikül yoğunluğu seyreلمeye başlamıştır.

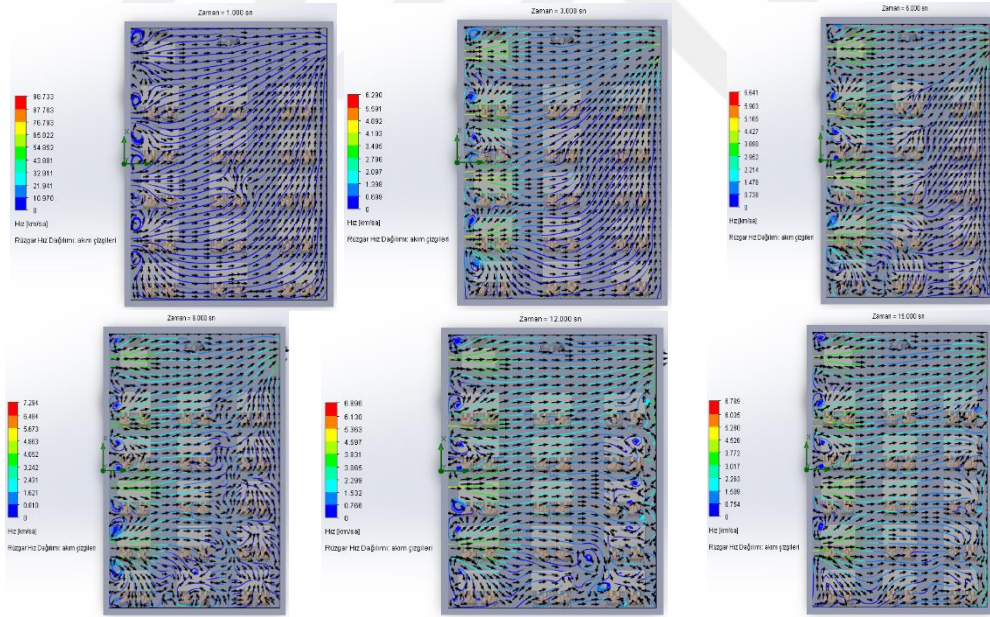
**12 sn -15 sn:** Aerosol konsantrasyonu belirgin şekilde azalmış, partiküller sınıf içinde seyrek şekilde dağılmıştır. Düşük konsantrasyona sahip mavi tonlar sınıfın farklı noktalarında rastgele şekilde konumlanmaktadır.

Bu senaryo, dört pencerenin eşzamanlı açık olmasıyla elde edilen yüksek hava değişim oranının, enfekte birey kaynaklı partiküllerin sınıf içerisinde hızlı şekilde seyreلمesine ve tahliye edilmesine katkı sağladığını ortaya koymaktadır. Hava akımı

yönlü, güçlü ve çok noktalı olduğu için partikül bulutu sınıf içerisinde bir bölgede toplanmamış, hızla dağılmıştır.

Sonuç olarak, bu konfigürasyon, kış senaryoları arasında en başarılı partikül tahliyesini sağlamış durumdadır. Dört pencerenin birlikte açık tutulması, havalandırma verimliliğini ciddi oranda artırmış hem bulaş riskini azaltmış hem de partikül dağılımını minimuma indirmişti. Bununla birlikte, dış ortamın düşük sıcaklığı nedeniyle termal konforun bozulma riski bulunduğundan, bu yapılandırma zaman kontrollü pencere açma stratejileri ya da ısı geri kazanımlı mekanik havalandırma ile desteklenmelidir.

**Hava Hareketi ve Akış Dağılım Analizi:** S6 kapsamında, kış mevsimine özgü çevresel koşullar altında sınıfın dört penceresinin açık tutulduğu durumda oluşan hava akımı davranışları ve hız dağılımı analiz edilmektedir. Şekil 3.62’de sunulan hız vektörleri ve kontur haritaları, sınıf içerisindeki hava hareketinin yönünü ve hız büyüklüğünü ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Görsellerde kullanılan renk skalasında mavi tonlar, düşük hız bölgelerini; kırmızı tonlar ise yüksek hız bölgelerini temsil etmektedir.



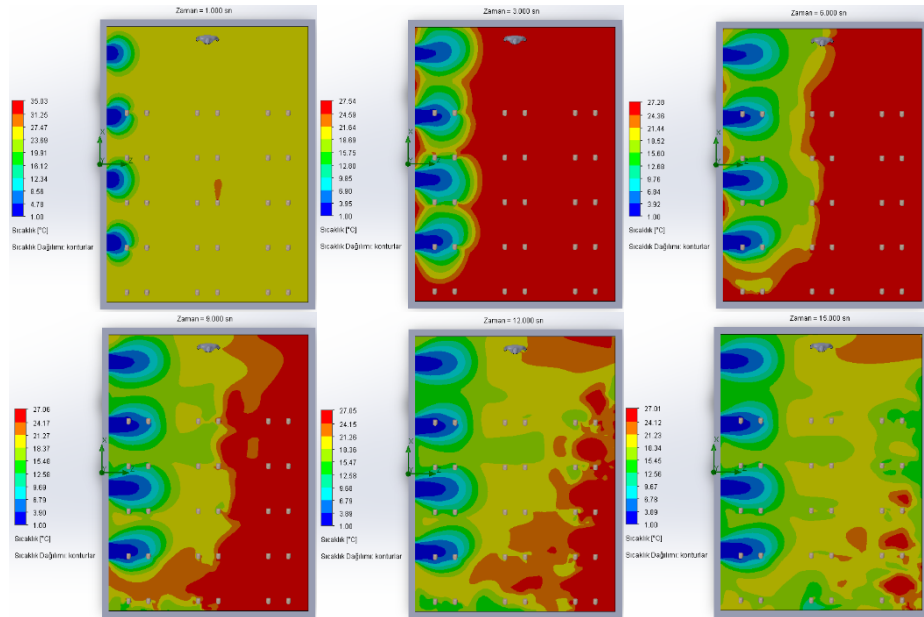
Şekil 3.62. S6’ya ait hava hareketi ve akış dağılımı analizi

**1 sn:** Dört pencere açıklığından sınıfa giren hava, sınıfın ön-arka yönünde çok yönlü bir akış başlatmıştır. Merkezde ilk vorteks çekirdekleri oluşmaya başlamıştır.

**3 sn- 6 sn:** Hava akışı daha belirgin hale gelmiş, sınıfın yatay düzleminde dengeli akım yolları oluşmuştur. Vorteks yapıları sınıfın hem ön hem de arka bölgelerinde yayılım göstermektedir.

**9 sn-12 sn -15 sn:** Zaman ilerledikçe sınıf genelinde güçlü ve düzenli akım çizgileri belirginleşmiştir. Dört pencerenin etkisiyle hava sınıf boyunca ilerlemekte, kenarlarda ve merkezde oluşan girdaplar partikül taşınımını yönlendirmektedir. Kırmızı tonlar hız bölgelerini, yeşil ve mavi tonlar daha durağan bölgeleri temsil etmektedir. Bu senaryoda dört farklı noktadan hava girişi ve/veya çıkışı sağlandığından, sınıf içinde çok yönlü, dengeli ve sürekli bir hava sirkülasyonu oluşmuştur. Hava hareketinin yalnızca belirli alanlarda yoğunlaşmadığı, sınıf genelinde etkili şekilde yayıldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, aerosol tahliyesinin hızlanmasına, ölü hava bölgelerinin en aza indirgenmesine ve bulaş riskinin sınıf genelinde düşürülmesine katkı sağlamaktadır.

**Sıcaklık Dağılımı Analizi:** S6 kapsamında, kış mevsimine özgü çevresel koşullar altında sınıfın dört penceresinin açık tutulduğu durumda sıcaklık dağılımı analiz edilmektedir. Zamana bağlı olarak Şekil 3.63'te elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları aşağıda özetlenmektedir. İlgili kontur haritalarında sıcaklık değerleri °C cinsinden ifade edilmekte olup, kırmızı tonlar ortam sıcaklığının üzerinde kalan bölgeleri, mavi tonlar ise sabit iç sıcaklığa yakın veya daha düşük sıcaklık bölgelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.63. S6'ya ait sıcaklık dağılımı

**1 sn:** Sınıf genelinde iç ortam sıcaklığı homojen şekilde 20 °C civarındadır. Pencere açıklıklarından soğuk hava girişi henüz sınıf içinde etkili değildir.

**3 sn- 6 sn:** Açık pencerelerden giren 1 °C'lik soğuk hava, sınıfın sol bölgesinde belirgin sıcaklık düşüşlerine yol açmıştır. Mavi tonlar, dış hava girişinin oldukça kuvvetli olduğunu göstermektedir. Sıcak ve soğuk hava arasında net gradyanlar oluşmuştur.

**9 sn:** Soğuk hava akımı, iç ortamın sol yarısına yayılmış, sıcaklık gradyanları belirginleşmiştir. Sağ taraf hâlâ sıcak kalmaktadır (kırmızı tonlar), bu durum sıcaklık dengesizliğini göstermektedir.

**12 sn-15 sn:** Sınıfın tamamına yakınında soğuk hava yayılmış, ancak farklı bölgelerde sıcaklıklar hâlâ değişkenlik göstermektedir. Sıcaklık dağılımı heterojen olup, termal konfor bölgesel olarak bozulmuştur.

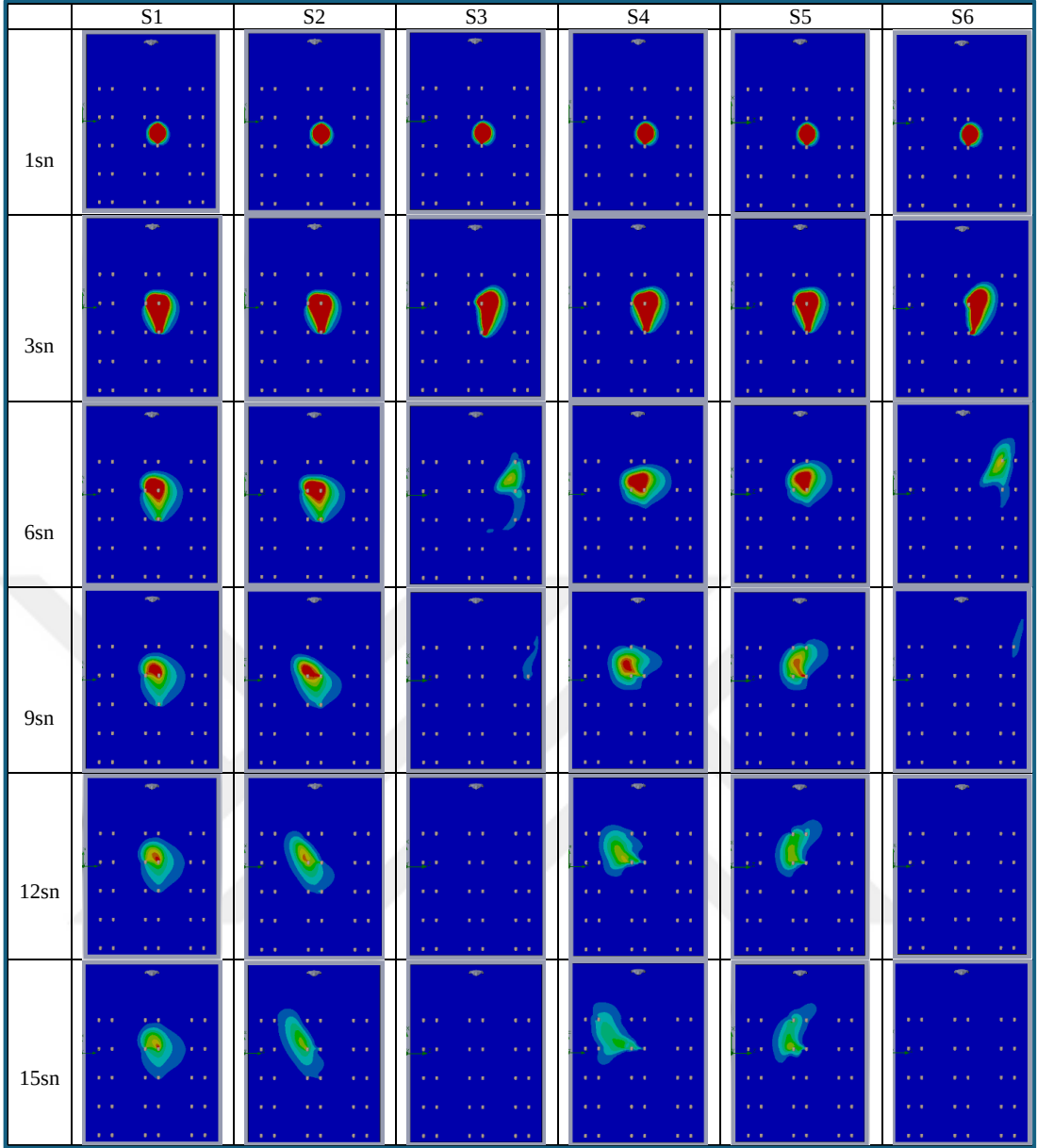
Bu senaryo, dört pencerenin eşzamanlı açık tutulmasının hava değişim oranını önemli ölçüde artırdığını, ancak termal dengenin bozulmasına da yol açtığını göstermektedir. Soğuk hava girişi oldukça etkin olmuş, bu da iç ortamda ani ve asimetrik sıcaklık düşüşlerine sebep olmuştur. Termal gradyanlar sınıfın farklı bölgelerinde farklı konfor koşulları yaratmış; özellikle pencere yakınındaki bölgelerde sıcaklık 10 °C'nin altına kadar düşmüştür.

#### 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, farklı pencere açıklığı konfigürasyonlarına sahip sınıf senaryolarına ilişkin partikül dağılım analizleri, mevsimsel iklim koşulları dikkate alınarak sunulmaktadır. Elde edilen bulgular, her bir mevsim özelinde ayrıntılı biçimde değerlendirilmiş; ayrıca yaz, sonbahar ve mevsimlerine ait senaryolar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu kapsamda, pencere konumlandırmasının hava akımı etkinliği ve enfekte birey kaynaklı partikül yayılımı üzerindeki etkileri detaylı şekilde ortaya konmuştur.

##### 4.1. Partikül Dağılımına Göre Yaz Mevsimi Senaryolarının Karşılaştırılması

Bu bölümde, yaz mevsimine ait senaryolar, sınıf mekânındaki partikül dağılımına göre açıklanmıştır. Şekil 4.1. de senaryoların zamana bağlı değişimi gösterilmiştir. Daha sonra altı senaryo partikül dağılımına göre araştırma sonuçları açıklanmıştır.



Şekil 4.1. Yaz mevsimi senaryolarına ait partikül dağılım simülasyonları

**Tüm Pencereler Kapalı (S1):** Enfekte birey çevresindeki partiküller neredeyse tamamen yerinde kalmış ve dağılmamıştır. Hiçbir yönlü hava akımı olmadığından partiküller sınıf havasına karışmakta ve uzun süre asılı kalmaktadır. En riskli senaryo, bulaşma ihtimali maksimum düzeydedir.

**Ön Tek Pencere Açık (S2):** Hafif yönlü bir akım oluşmuş, partiküller sınıfın sol tarafına hafifçe taşınmıştır. Ancak ortamın büyük kısmı hâlâ kontaminasyona maruz kalmaktadır. Havalandırma etkisi sınırlıdır, partikül temizliği zayıftır.

**Ortadaki İki Pencere Açık (S3):** Partiküller sınıfın merkezi boyunca bir miktar taşınmış, ancak tamamen tahliye edilmemiştir. Hava girişi ve çıkışı aynı düzlemde olduğundan hava hareketi güçlü değildir. Orta düzeyde etkili ancak yeterli değildir.

**Baş ve Son İki Pencere Açık (S4):** Partiküller sağ tarafa yönelmiş, bazı bölgelerde dağılım azalmıştır. Fakat akım hâlâ dengesiz ve sınırlı olup partiküllerin sınıfı terk etmesini tam olarak sağlayamamıştır. İyileştirme sağlar, fakat koruma seviyesi düşüktür.

**Arka Tek Pencere Açık (S5):** Partiküller sınıf içinde taşınmış, yönlendirilmiş ancak ortamdan tam çıkış sağlanamamıştır. Hava akımı var ama partikül dışarı çıkmak yerine sınıf içinde dönmektedir. Yetersiz ve yönsüz hava akışı, bulaş riski devam eder.

**Dört Pencere Açık (S6):** Partiküller tamamen ortamdan uzaklaştırılmıştır. Çapraz hava akımı sayesinde etkili, hızlı ve yönlü partikül tahliyesi gerçekleşmiştir. Açık ara en güvenli ve etkili senaryodur. Bu karşılaştırma açıkça göstermektedir ki: havalandırma yoksa (S1), enfeksiyon riski maksimumdur. Kısmi havalandırmalar (S2, S3, S4, S5), partikül taşınımında belli ölçüde başarı sağlasa da kontaminasyonu ortadan kaldırmakta yetersizdir.

Çift yönlü ve dengeli hava akımı sunan Senaryo 6, hem hız hem de etki açısından tüm diğer senaryolardan üstündür. Bu nedenle sınıf ortamlarında bulaşıcı hastalıkların yayılımını önlemede çapraz doğal havalandırma tartışmasız şekilde en etkin çözüm olarak öne çıkmaktadır.

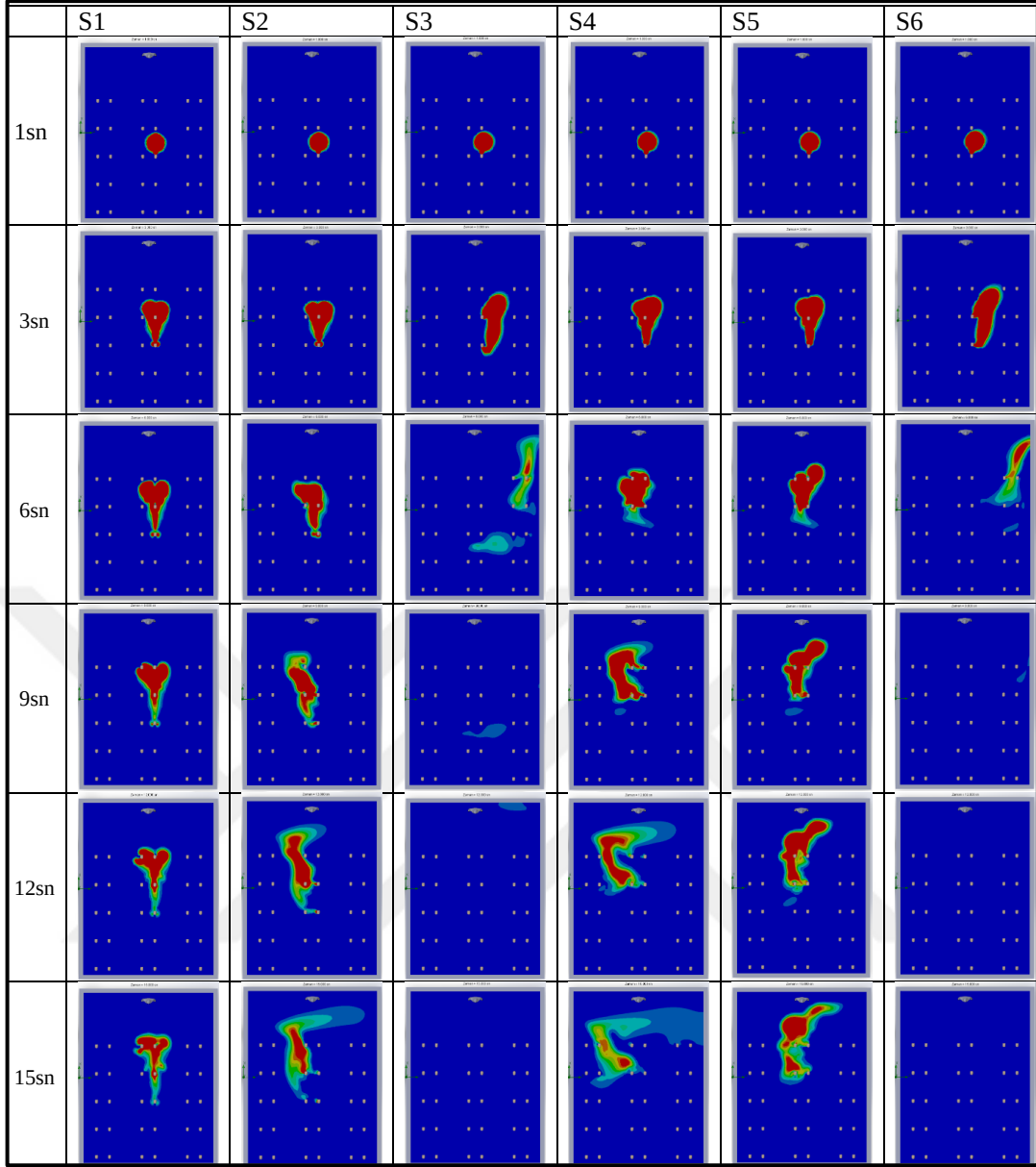
Yaz mevsimine ait senaryolar, sınıf mekânındaki partikül dağılımı, hava akımı ve sıcaklık dağılımı bakımından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Değerlendirme sürecinde, pencere açıklıklarının konumu, sayısına bağlı olarak oluşan hava akımı desenlerinin partikül dağılımına etkileri analiz edilmiş; elde edilen bulgular Çizelge 4.1.'de sunulan çok kriterli karşılaştırma sonuçları ile ilişkilendirilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Yaz mevsimi senaryolarının çok kriterli karşılaştırılması

| Senaryo | Pencere Durumu          | Partikül Dağılımı                                                                                           | Hava Akımı (CFD)                                                                           | Sıcaklık Dağılımı                                                          | Tahliye Başarısı |
|---------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------|
| S1      | Tüm Pencereler Kapalı   | Aerosoller lokal olarak askıda kalır, sınıf içine sınırlı yayılır, hızlı seyrelme olmaz.                    | Hava akımı yok denecek kadar azdır. İç mekânda durağanlık hâkimdir.                        | Homojen sıcaklık – hareketin olmamasından kaynaklı.                        | Çok Düşük        |
| S2      | Ön Tek Pencere Açık     | Partiküller öne yönelir; orta ve arka bölgelerde hâlâ birikme gözlenir.                                     | Ön bölgeden içeriye giren rüzgâr akışı etkili ancak arkaya ulaşmaz.                        | Pencere yakını serinler, arka bölgeler stabil kalır.                       | Düşük            |
| S3      | Orta İki Pencere Açık   | Partiküller orta bölgelerde hızla seyrelir, sınıfın kenarlarında daha uzun süre kalabilir.                  | Merkezde simetrik hava girişleri oluşur; yatay ve hafif dikey akım gözlenir.               | Sıcaklık farkları düşüktür; ortada serinlik gözlemlenir.                   | Orta Düzey       |
| S4      | Arka Tek Pencere Açık   | Partiküller sınıfın orta ve ön kısmında birikir, homojen tahliye sağlamaz.                                  | Hava arkadan sınıfa girer, öne doğru yayılım zayıftır.                                     | Arka bölgeler serinler, ön kısım daha sıcak kalır.                         | Düşük            |
| S5      | Baş ve Son Pencere Açık | Partiküller etkili biçimde sürüklenir ve 15. saniyede belirgin seyreltme gözlenir.                          | Yönlü çapraz hava akımı oluşur, vorteksler merkezde güçlüdür.                              | Hafif sıcaklık farkı – akış yönünde serinlik mevcuttur.                    | Yüksek           |
| S6      | Tüm Pencereler Açık     | Partiküller her yönden dağılır, hızlı tahliye gerçekleşir. Yayılım en az 15 saniyede etkili biçimde azalır. | Çok yönlü ve homojen hava akımı sağlanmıştır; sınıf genelinde güçlü akış çizgileri oluşur. | Sıcaklık farkı azdır; iç ortamın geneli rüzgâr etkisiyle homojenleşmiştir. | Çok Yüksek       |

#### 4.2. Partikül Dağılımına Göre Sonbahar Mevsimi Senaryolarının Karşılaştırılması

Bu bölümde, Sonbahar mevsimine ait senaryolar, sınıf mekânındaki partikül dağılımına göre açıklanmıştır. Şekil 4.2. de senaryoların zamana bağlı değişimi gösterilmiştir. Daha sonra altı senaryo partikül dağılımına göre araştırma sonuçları açıklanmıştır.



Şekil 4.2. Sonbahar mevsimi senaryolarına ait partikül dağılım simülasyonları

**Tüm Pencereler Kapalı (S1):** Sonbahar koşullarında tüm pencerelerin kapalı tutulduğu bu senaryoda, iç ortamda yönlü bir hava akımı oluşmamış, enfekte bireyden yayılan partiküller bulundukları bölgede asılı kalmıştır. Dış hava ile iç hava sıcaklık farkının düşük olması, doğal taşınımı sınırlamış ve partiküllerin ortamda uzun süre kalmasına yol açmıştır. Bu durum, bulaşma riskinin tüm alanlarda yüksek seviyede devam etmesine neden olmuştur.

**Ön Tek Pencere Açık (S2):** Bu senaryoda düşük dış hava hareketi ve iç–dış sıcaklık farkı nedeniyle yalnızca sınıfın ön sol kısmında minimal bir hava akışı oluşmuştur. Hava girişi, iç mekândaki ısınmış havanın üst kotlarda birikmesine yol açmış,

partiküller tavana yakın bölgelerde asılı kalmıştır. Hava giriş gücü yetersiz kaldığı için sınıfın arka ve sağ taraflarında partikül yoğunluğu yüksek seviyede devam etmiştir. Kısmi ve zayıf havalandırma, genel partikül seyreltmesini sağlayamamış, enfekte bireye yakın bölgelerde bulaşma riski sürmüştür.

**Ortadaki İki Pencere Açık (S3):** Orta kısımda bulunan iki pencerenin açılması ile sınıfın merkez hattında sınırlı bir yatay hava akımı oluşmuştur. Bu akım, partiküllerin belirli bir yönde taşınmasını sağlasa da sınıfın ön ve arka bölgelerinde durağan hava alanları oluşmuştur. Hava değişim oranı düşük kaldığından, partikül yoğunluğu bu bölgelerde uzun süre korunmuş ve bulaşma riski ortadan kalkmamıştır.

**Baş ve Son İki Pencere Açık (S4):** Sınıfın ön ve arka kısımlarındaki pencerelerin açılmasıyla kısmi çapraz havalandırma sağlanmış, partiküller belirgin bir yönelme ile taşınmıştır. Ancak dış hava hızının sınırlı olması ve akımın dengesizliği, bazı bölgelerde partikül birikiminin devam etmesine yol açmıştır. Orta seviyede bir seyreltme etkisi görülmüş olsa da bulaşma riski tamamen giderilememiştir.

**Arka Tek Pencere Açık (S5):** Arka kısımda tek pencerenin açılmasıyla oluşan hava akımı, partiküllerin arka tarafa doğru yönelmesine neden olmuştur. Ancak yönsüz ve düşük hızlı hava hareketi, partiküllerin ortamdaki çıkmadan iç mekânda dolaşmasına yol açmıştır. Özellikle ön bölümlerde hava yenilenmesi sınırlı kalmış, bulaşma riski devam etmiştir.

**Dört Pencere Açık (S6):** Ön ve arka cephede yer alan pencerelerin tümünün açılmasıyla çapraz hava akımı sağlanmış, partiküller kısa sürede yönlü olarak ortamdaki tahliye edilmiştir. Sonbahar koşullarında dış hava sıcaklığı ve rüzgâr hızının dengeli olması, bu senaryonun yüksek hava değişim oranı elde etmesini sağlamıştır. Bu konfigürasyon, bulaşma riskini en düşük seviyeye indirmiş ve en etkili senaryo olmuştur.

İki yönlü ve dengeli hava akışı sunan Senaryo 6 ise hem hız hem de etkinlik açısından tüm diğer senaryolara kıyasla en yüksek performansı sergilemiş ve çapraz doğal havalandırmanın bulaşıcı hastalıkların yayılımını önlemede en etkili çözüm olduğunu açıkça göstermiştir.

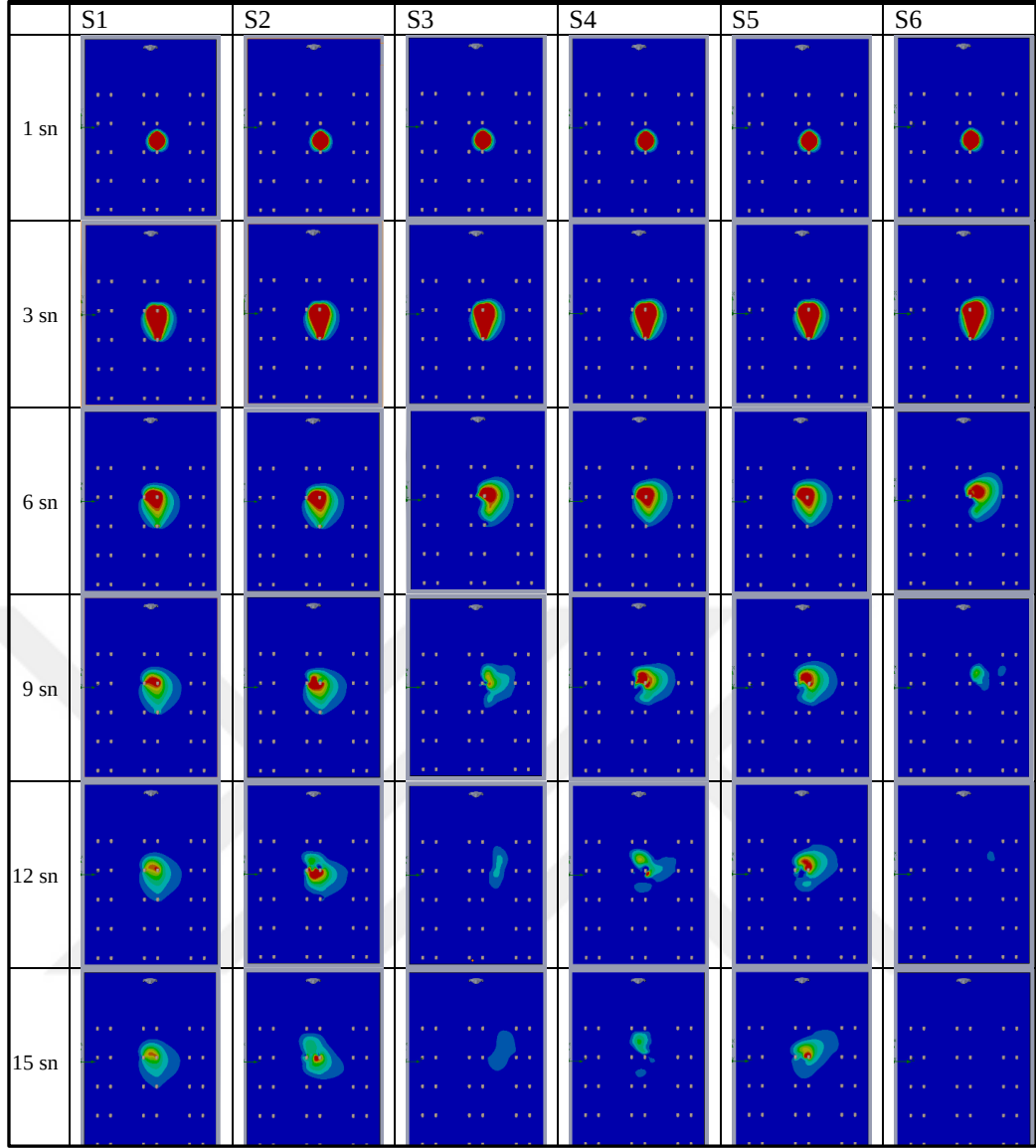
Sonbahar mevsimine ait senaryolar, sınıf mekânındaki partikül dağılımı, hava akımı ve sıcaklık dağılımı bakımından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Değerlendirme sürecinde, pencere açıklıklarının konumu, sayısına bağlı olarak oluşan hava akımı desenlerinin partikül dağılımına etkileri analiz edilmiş; elde edilen bulgular Çizelge 4.2.'de sunulan çok kriterli karşılaştırma sonuçları ile ilişkilendirilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Sonbahar mevsimi senaryolarının çok kriterli karşılaştırılması

| Senaryo | Pencere Durumu          | Partikül Dağılımı                                                       | Hava Akımı (CFD)                                                             | Sıcaklık Dağılımı                                         | Tahliye Başarısı |
|---------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------|
| S1      | Tüm Pencere Kapalı      | Aerosoller askıda kalır, merkezi yayılım görülür, seyreltme sağlanmaz.  | Hava akımı yok denecek kadar azdır. Durgun iç mekân koşulları hâkimdir.      | Homojen sıcaklık – hareket olmadığından fark oluşmaz.     | Çok Düşük        |
| S2      | Ön Tek Pencere Açık     | Partiküller öne sürüklenir; orta ve arka bölgelerde birikme devam eder. | Ön bölgeden sınıfa giren hava orta bölgelerde zayıflar, arkaya ulaşmaz.      | Pencere yakını serinler, arka bölgeler sabit kalır.       | Düşük            |
| S3      | Orta İki Pencere Açık   | Partiküller merkezde seyreler, köşelerde birikme olabilir.              | Simetrik, ancak merkezde sınırlı hava hareketi oluşur; yönsüzdür.            | Sıcaklık farkı düşüktür; kenarlarda ölü alanlar gözlenir. | Orta Düzey       |
| S4      | Arka Tek Pencere Açık   | Partiküller arka bölgede yoğunlaşır, öne taşınmaz.                      | Hava arkadan sınıfa girer, sınırlı öne yönelme görülür.                      | Arka bölge serinler, orta ve ön bölgeler sabit kalır.     | Düşük            |
| S5      | Baş ve Son Pencere Açık | Partiküller sürüklenir ve seyreltme sağlanır, yönlü yayılım görülür.    | Yönlü çapraz hava akımı oluşur, merkezde hava hareketi belirgindir.          | Akış yönünde sıcaklık farkı oluşur, serinlik gözlemlenir. | Yüksek           |
| S6      | Tüm Pencere Açık        | Partiküller kısa sürede yönlü dağılır ve etkili tahliye olur.           | Çift yönlü ve homojen hava akımı sağlanmıştır; etkili sirkülasyon mevcuttur. | Sıcaklık farkı azdır; sınıf içi homojenlik sağlanır.      | Çok Yüksek       |

#### 4.3. Partikül Dağılımına Göre Kış Mevsimi Senaryolarının Karşılaştırılması

Bu bölümde, kış mevsimine ait senaryolar, sınıf mekânındaki partikül dağılımına göre açıklanmıştır. Şekil 4.3. de senaryoların zamana bağlı değişimi gösterilmiştir. Daha sonra altı senaryo partikül dağılımına göre araştırma sonuçları açıklanmıştır.



Şekil 4.3. Kış mevsimi senaryolarına ait partikül dağılım simülasyonları

**Tüm Pencereler Kapalı (S1):** Kış koşullarında tüm pencerelerin kapalı olduğu durumda, sınıf içinde hiçbir hava hareketi oluşmamış, enfekte bireyden yayılan partiküller bulunduğu noktada asılı kalmıştır. Soğuk dış hava nedeniyle pencerelerin açılmadığı bu senaryo, iç ortamda partikül yoğunluğunun hızla artmasına neden olmuş, bulaş riski maksimum düzeye çıkmıştır. Durgun hava koşulları, özellikle ısı farkı kaynaklı doğal taşınımı da engellediğinden partiküller saatlerce ortamda kalabilmektedir. En riskli senaryodur. Hiçbir yönlü hava akımı oluşmadığı için partikül seyreltmesi mümkün olmamış, sınıf genelinde kontaminasyon yayılmıştır.

**Ön Tek Pencere Açık (S2):** Bu senaryoda düşük dış hava hareketi ve iç-dış sıcaklık farkı nedeniyle yalnızca sınıfın ön sol kısmında minimal bir hava akışı

oluşturmuştur. Soğuk hava girişi, iç mekândaki sıcak havanın yukarıda birikmesine yol açmış, partiküller sınıf içinde tavana yakın bölgelerde asılı kalmıştır. Hava giriş gücü yetersiz kaldığı için sınıfın arka ve sağ taraflarında partikül yoğunluğu yüksek seyretmiştir. Kısmi ve zayıf havalandırma, sınıf genelinde partikül seyreltmesini sağlayamamış; enfekte bireye yakın olan bölgelerde bulaşma riski devam etmiştir.

**Orta İki Pencere Açık (S3):** Ortada yer alan iki pencere açıldığında sınıfın orta bölgesinde sınırlı düzeyde hava hareketi oluşmuş; ancak dış ortamın düşük sıcaklığı nedeniyle pencere çevresinde yoğun hava girişine rağmen sınıfın genelinde akış kuvvetli olmamıştır. Hava girişi ve çıkışı aynı yüzeyde yer aldığından, çapraz hava sirkülasyonu sağlanamamış; partiküller yalnızca sınıfın merkezinde sınırlı bir şekilde taşınmıştır. Sınırlı hava hareketi sağlanmış ancak partikül tahliyesi yetersiz kalmıştır. Sıcaklık farkı nedeniyle hava akımı yönsüz ve dengesizdir.

**Baş ve Son İki Pencere Açık (S4):** Aynı cephede bulunan iki pencere açıldığında içeri giren soğuk hava sınıfın sağ tarafına yönelmiş; ancak çıkış noktası bulunmadığı için içeride dönerek dolaşmıştır. Partikül hareketi sağlanmış olsa da sınıf genelinde havalandırma başarısı düşüktür. Hava akımının yönü kararlı olmadığından partiküller bazı bölgelerde birikmiş, sınıfın özellikle arka tarafında kontaminasyon yoğunlaşmıştır. Kısmî iyileşme sağlansa da yönlü ve sürekli bir tahliye akımı oluşmamıştır. Kış koşulları bu senaryonun etkisini daha da sınırlamıştır.

**Arka Tek Pencere Açık (S5):** Bu durumda dışarıya doğru bir çıkış açıklığı sağlanmış ancak hava girişi olmadığı için negatif basınç oluşamamıştır. Soğuk hava nedeniyle pencere çevresi soğumuş, içerideki sıcak hava yükselmiş ve partiküller tavana doğru taşınmıştır. Ancak genel hava hareketi oluşmadığından partikül tahliyesi gerçekleşmemiş, kontaminasyon sınıf içinde dolaşmaya devam etmiştir. Dönüşümlü akım yetersiz kalmıştır. Hava hareketi oluşsa bile partiküller ortamdan çıkamamış; yönsüz, zayıf akım bulaş riskini azaltamamıştır.

**Dört Pencere Açık (S6):** Kış mevsiminde dört pencere açıldığında teorik olarak çapraz havalandırma sağlanabilmiş; ancak düşük dış rüzgâr ve soğuk hava nedeniyle içeriye giriş yapan hava sınıfı hızla soğutmuş ve pencere kapama ihtiyacı doğurmuştur. Akış yönü oluşsa da yeterince kararlı olmamış, bazı bölgelerde durgun hava cepleri oluşmuştur. Partikül tahliyesi yaz mevsimine kıyasla daha yavaş ve sınırlı kalmıştır. En iyi kış senaryosu olmasına rağmen, dış ortam koşulları nedeniyle etkisi kısıtlıdır. Yaz aylarına kıyasla çapraz akım daha az başarılı olmuştur. Kışın konfor kaybı nedeniyle pencere açık tutma süresi de azalmaktadır.

Kış mevsimine ait senaryolar, sınıf mekânındaki partikül dağılımı, hava akımı ve sıcaklık dağılımı bakımından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Değerlendirme sürecinde, pencere açıklıklarının konumu, sayısına bağlı olarak oluşan hava akımı desenlerinin partikül dağılımına etkileri analiz edilmiş; elde edilen bulgular Çizelge 4.3.'te sunulan çok kriterli karşılaştırma sonuçları ile ilişkilendirilmiştir.

**Çizelge 4.3. Kış Mevsimi Senaryolarının Çok Kriterli Karşılaştırılması**

| Senaryo | Pencere Durumu          | Partikül Dağılımı                                                                             | Hava Akımı (CFD)                                                                                                        | Sıcaklık Dağılımı                                                                            | Tahliye Başarısı |
|---------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| S1      | Tüm Pencere Kapalı      | Aerosoller sınıfın merkezinde dairesel olarak askıda kalır, tahliye gerçekleşmez              | Hava hareketi neredeyse yoktur. Sınıf içinde düşük yoğunluklu ve durağan iki vorteks                                    | Sıcaklık dağılımı homojendir; ancak bu, hava hareketinin olmamasından kaynaklanır.           | Çok Düşük        |
| S2      | Ön Tek Pencere Açık     | Partiküller ön kısma yönelir ancak tahliye gerçekleşmez.                                      | Hava akımı sınırlı kalmıştır. Akım, sınıfın ön kısmında etkili olur; orta ve arka bölgelerde ölü hava alanları oluşur.  | Pencere çevresinde lokal soğuma oluşur; termal konfor ön sıralarda bozulur.                  | Düşük            |
| S3      | Orta İki Pencere Açık   | Partiküller orta ve sağ kısımlara yönelir, kısmen tahliye sağlanır.                           | Merkezde belirgin hava akımı oluşur. Vorteks yapıları dengelidir ancak akış yönü sınıf genelinde homojen değildir.      | Orta kısımlarda lokal soğuma, kenar bölgelerde sıcaklık sabit kalır.                         | Orta düzey       |
| S4      | Arka Tek Pencere Açık   | Partikül yayılımı asimetrik, sol arka köşeye doğru kayar; sınıf genelinde tahliye sağlanamaz. | Hava sınıfa arkadan girer, sınıfın sadece alt ve arka kısmında akım oluşur. Ön ve orta bölgelerde hareket çok zayıftır. | Arka bölgelerde ısı kaybı oluşur, ön kısımlarda sıcaklık korunur; termal konfor dengesizdir. | Düşük            |
| S5      | Baş ve Son Pencere Açık | Partiküller yönlü şekilde taşınır, orta hızda seyrelir, tahliye kısmen sağlanır.              | Akış yönlüdür. Hava sınıfın bir ucundan girip diğerinden çıkar. Merkezde geniş vorteksler oluşur.                       | Sıcaklık farkı daha dengelidir, ancak soğuk hava girişi iki bölgede konforu etkiler.         | Orta-yüksek      |
| S6      | Tüm Pencere Açık        | Partiküller hızla yayılır. Etkili tahliye sağlanır.                                           | Çok yönlü ve güçlü hava akışı sağlanmıştır. Sınıf genelinde homojen sirkülasyon oluşur. Vorteksler geniş alana yayılır. | Soğuk hava dört farklı noktadan girdiği için termal dengesizlik artar.                       | Yüksek           |

#### **4.4. Partikül Dağılımına Göre Yaz – Sonbahar -Kış Mevsimi Senaryolarının Karşılaştırılması**

Bu bölümde, yaz (Haziran), sonbahar (Ekim) ve kış (Aralık) mevsimlerine ait senaryolar, partikül dağılımı, hava akımı, termal konfor, sıcaklık dağılımı, sürdürülebilirlik açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizleri ile elde edilen bulgular, farklı iklim koşullarının sınıf içi hava kalitesi ve enfeksiyon riskine etkisini açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

##### **4.4.1. Hava akımı ve partikül tahliye başarısı**

Yaz mevsimine ait senaryolarda, dış ortam rüzgâr hızının 12,2 km/sa seviyesinde olması, pencere açıklıkları aracılığıyla güçlü hava sirkülasyonu sağlanmasına olanak tanımıştır. Özellikle çapraz havalandırmanın mümkün olduğu senaryo 5 ve 6'da enfekte bireyden yayılan partiküller kısa sürede ortamdan uzaklaştırılmış ve 15. saniyede belirgin seyreltme sağlanmıştır. Bu durum, yaz koşullarının doğal havalandırma açısından oldukça elverişli olduğunu göstermektedir.

Sonbahar mevsimine ait senaryolarda, dış ortam rüzgâr hızının 11 km/sa seviyesinde olması, yaz senaryolarına benzer şekilde hava akımı açısından olumlu sonuçlar vermiştir. Ancak dış ortam sıcaklığı yaz aylarına kıyasla daha düşük olduğu için, hava hareketleri sınıf içerisinde daha yoğun girdap yapıları oluşturmuş ve partikül yönelmesi belirli alanlarda daha dalgalı bir dağılım sergilemiştir. Özellikle senaryo 6'da dört pencerenin açık olması sayesinde hızlı ve yönlü hava akımları oluşmuş; partiküller etkili biçimde tahliye edilmiştir. Bununla birlikte, tek pencere açıklığına sahip geçiş mevsimi senaryolarında (örneğin senaryo 2 veya 4), partikül seyreltmesi yetersiz kalmıştır.

Kış mevsimine ait senaryolarda ise dış ortam rüzgâr hızının 9 km/sa düzeyinde olması, sınıf içi hava hareketlerini sınırlamış ve özellikle sınırlı pencere açıklıklarında partikül birikimini artırmıştır. Kapalı ortamı temsil eden senaryo 1 ile yalnızca bir pencerenin açık olduğu senaryolarda, partikül dağılımı büyük ölçüde lokal kalmakta ve tahliye süreci belirgin şekilde yavaşlamaktadır. Bu bulgular, kış koşullarında havalandırma başarımının büyük ölçüde pencere sayısı, yerleşimi ve dış ortamla olan sıcaklık farkına bağlı olduğunu göstermektedir.

#### 4.4.2. Sıcaklık dağılımı ve termal konfor

Yaz mevsiminde iç ve dış ortam sıcaklıkları arasındaki fark düşük olduğundan, pencere açıklıkları termal konforu bozmadan etkin şekilde kullanılmıştır. Sıcaklık kontur haritaları, sınıf içerisinde sıcaklık homojenliğinin korunduğunu ve bölgesel aşırı soğuma ya da ısınma oluşmadığını göstermektedir. Bu nedenle yaz aylarında pencere açıklıkları hem enfeksiyon kontrolü hem de kullanıcı konforu açısından verimli bir strateji olarak öne çıkmaktadır.

Sonbahar mevsimi koşullarında, dış ortam sıcaklığının 14 °C, iç ortam sıcaklığının ise 20 °C seviyelerinde olması, sınıfa giren serin havanın özellikle pencere açıklıklarına yakın bölgelerde sıcaklık düşüşlerine yol açmasına neden olmuştur. Bununla birlikte, bu sıcaklık farkı yaz senaryolarında gözlemlenen sıcaklık düşüşlerine kıyasla daha sınırlı düzeyde kalmış ve kullanıcı konforunu olumsuz etkileyecek kritik seviyelere ulaşmamıştır. Özellikle dört pencerenin açık bırakıldığı senaryolarda, dış ortamdan giren serin hava sınıf içerisine daha homojen ve dengeli biçimde dağılmış; oluşan termal gradyanların etkisi yalnızca belirli bölgelerle sınırlı kalmıştır. Bu durum, geçiş mevsiminde doğal havalandırmanın hem termal konforu koruyacak hem de iç mekân hava kalitesini artıracak şekilde uygulanabileceğini; ancak bunun için pencere açıklıklarının sayısı ve konumlarının dikkatli biçimde planlanması ve yönetilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Kış koşullarında ise dış ortam sıcaklığının 1 °C düzeyinde olması, pencere açıklıklarının sınıfa ani soğuk hava girişine neden olmasına yol açmıştır. Bu durum, sınıf içerisinde belirgin sıcaklık gradyanları oluşturmuş; özellikle pencereye yakın oturan bireyler için termal konforu olumsuz etkilemiştir. Sıcaklık kontur analizleri, bu bölgelerde ısı rahatsızlık yaşandığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle kış mevsiminde doğal havalandırma yalnızca kısa süreli uygulanmalı ya da kontrollü açıklıklarla desteklenmelidir.

#### 4.4.3. Sürdürülebilirlik açısından değerlendirme

Yaz mevsimi senaryolarında doğal havalandırma, pasif bir strateji olarak enerji tüketimine katkı sağlamadan uygulanabilmektedir. Pencere açıklıkları ile elde edilen yüksek hava değişim oranları, enfeksiyon riskini azaltırken enerji verimliliğini de

korumaktadır. Bu durum sürdürülebilir bina tasarımı açısından önemli bir avantaj sunmaktadır.

Sonbahar mevsimi koşullarında ise doğal havalandırma hâlâ etkili olmakla birlikte, serin dış ortam havasının içeri alınması nedeniyle sınırlı düzeyde ısı kaybı yaşanabilmektedir. Bu nedenle geçiş mevsiminde pencere kontrolü, kullanıcı konforunu da gözетerek optimize edilmelidir.

Kış mevsiminde ise pencere açıklıkları ile gerçekleşen havalandırma, yüksek oranda ısı kaybına neden olmakta ve enerji verimliliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle, kış aylarında doğal havalandırma stratejileri, mekanik sistemlerle entegre edilmeli ve tercihen ısı geri kazanımlı sistemler ile desteklenmelidir. Böylece hem hava kalitesi sağlanabilir hem de enerji tüketimi kontrol altında tutulabilir.

#### 4.5. Tartışma

Bu çalışmada elde edilen CFD analiz sonuçları, farklı pencere konfigürasyonları ve mevsim koşullarının sınıf içi virüs partikül dağılımı ile tahliye süresine etkisini ortaya koymuştur. Yaz mevsiminde, özellikle çapraz havalandırmanın sağlandığı senaryolarda partikül tahliye sürelerinin belirgin şekilde kısaldığı ve hava değişim oranlarının yükseldiği görülmüştür. Bu bulgular, REHVA (2021) ve ASHRAE (2020) raporlarında vurgulanan çapraz hava akışının bulaş riskini azaltma etkisini desteklemektedir. Sonbahar mevsiminde, dış ortam sıcaklığının iç ortamdan düşük olması nedeniyle doğal havalandırma hâlâ etkili olmakla birlikte kısa süreli sıcaklık dalgalanmaları kullanıcı konforunu etkilemiştir; bu durum, Fisk ve Chan'ın (2020) doğal havalandırmanın konfor parametreleri ile dengelenmesi gerektiğine dair vurgusuyla uyumludur. Kış mevsiminde pencere açıklıklarının artırılması partikül tahliyesini hızlandırırsa da iç ortam sıcaklığında hızlı düşüşe yol açmış; bu bulgu, Morawska ve ark. (2020) tarafından kış koşullarında ısı geri kazanımlı mekanik havalandırma sistemlerinin önerilmesiyle örtüşmektedir. Ayrıca pencerelerin kapalı olduğu senaryolarda partikül birikiminin lokal bölgelerde yoğunlaştığı ve tahliye sürelerinin uzadığı gözlenmiş, bu durum Buonanno ve ark. (2022) tarafından ifade edilen kapalı ortamların yüksek enfeksiyon riski taşıdığı yönündeki bulgularla paralellik göstermiştir.

Çalışmanın güçlü yönleri arasında, yerel iklim verilerine dayalı modelleme yapılması, üç farklı mevsimde ve çeşitli pencere konfigürasyonlarında karşılaştırmalı analiz gerçekleştirilmesi, SolidWorks Flow Simulation yazılımı ile yüksek çözünürlüklü

hava akımı ve partikül dağılımı simülasyonları yapılması ve bulguların uygulamaya yönelik somut öneriler sunması sayılabilir. Buna karşın, rüzgâr yönü ve hızlarının sınırlı senaryolarla ele alınması, kullanıcı davranışlarının modele entegre edilmemesi, hibrit veya mekanik havalandırma sistemleriyle karşılaştırma yapılmaması ve partikül modellemesinde biyolojik parametrelerin basitleştirilmesi çalışmanın zayıf yönlerini oluşturmaktadır. Bu güçlü ve zayıf yönler dikkate alındığında, çalışma mevcut haliyle eğitim yapılarında doğal havalandırma stratejilerinin mevsimsel olarak optimize edilmesine yönelik bilimsel bir temel sunmakta, ancak ileride daha kapsamlı, değişken rüzgâr koşullarını ve kullanıcı etkileşimlerini içeren çalışmalarla desteklenmesi gerekmektedir.



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

COVID-19 pandemisi, dünya genelinde yaşam tarzını, iş hayatını, eğitim sistemlerini ve seyahat düzenlerini önemli ölçüde değiştirmiş; özellikle kapalı alanlarda sağlık, konfor ve güvenlik konularını gündemin ön sıralarına taşımıştır. Salgın, sosyal izolasyon gereksinimlerini artırmış başta eğitim yapıları gibi birçok önemli yapının erişiminde kısıtlamalara neden olmuştur. Bu durum, bilimsel çalışmaların, mühendislik çözümlerinin ve hükümet politikalarının hastalığın yayılmasını en aza indirmek amacıyla koruyucu stratejiler geliştirmesine sebep olmuştur. Araştırmalar, COVID-19'un hava yoluyla yani aerosol aracılığıyla yayıldığını ve temas yoluyla bulaşmanın, yüzeylere temas eden kişilerin virüsle doğrudan karşılaşması üzerinden hastalıkların yaklaşık %80 oranında aktarıldığını göstermektedir. Bu bağlamda hastalıkların bulaşma olasılığını azaltmak için iç hava kalitesinin sağlanması ve temas yüzeylerinin en aza indirgenmesi önemli stratejilerden kabul edilmektedir.

Sağlıklı binaların tasarımı, etkili bir iç hava kalitesi ve geliştirilmiş fiziksel tasarım özellikleri ile hastalıkların bulaşmasını önleme açısından kritik bir unsurdur. Bu bağlamda aşağıdaki uygulama yöntemleri, mühendislik temsillerine dayalı olarak önerilmektedir.

### 5.1. Mevcut Eğitim Yapıları için İyileştirme Önerileri

Bu çalışmada elde edilen bulgular doğrultusunda, mevcut eğitim yapılarında iç ortam hava kalitesini iyileştirmeye yönelik bazı temel müdahale alanları belirlenmiştir. Özellikle doğal havalandırma sistemlerinin yetersiz kaldığı veya sınıf içi hava sirkülasyonunun düzensiz olduğu senaryolarda hem mimari hem de havalandırma odaklı çeşitli iyileştirme stratejilerinin uygulanması gerekmektedir. Aşağıda, simülasyon sonuçları temel alınarak geliştirilen öneriler sıralanmıştır:

- **Pencere Sayısı ve Yerleşiminin Gözden Geçirilmesi:** Tüm pencerelerin tek bir cephede konumlandığı sınıflarda hava akımı durağanlaşmakta, partikül tahliyesi başarısız olmaktadır. Karşılıklı cephelerde pencere açıklığı bulunan yapılar, çapraz havalandırmayı mümkün kılarak partikül temizliğini hızlandırmaktadır. Mevcut yapılarda, olanak varsa yan cephelere yeni pencere açılımları yapılmalı; mümkün değilse üst açıklıklar (menfez, sabit cam kanatları) kullanılmalıdır.

- **Pencere Tiplerinin ve Açılma Yönlerrinin Revize Edilmesi:** Yan menteşeli ya da üstten açılan pencereler, doğal hava akışını daha verimli yönlendirebilir. Mevcut pencerelerin üst kanatlı, kademeli açılabilir hale getirilmesi, özellikle kış aylarında sınıf içi sıcaklık konforunu koruyarak havalandırma sağlar.
- **Mekanik Destekli Havalandırma (Hibrit Sistemler):** Kış aylarında dış ortam koşulları nedeniyle pencere açma davranışı sınırlanmakta ve doğal havalandırma işlevini yitirmektedir. Bu durumda düşük debili, filtreli mekanik havalandırma sistemleri (örneğin: HEPA filtreli tavan fanları, geri kazanımlı taze hava üniteleri) ile havalandırma desteklenmelidir. Mümkünse CO<sub>2</sub> ve VOC sensörleriyle desteklenen akıllı havalandırma sistemleri entegre edilmelidir.
- **Doğal Havalandırma Kullanım Farkındalığı:** Öğrenciler ve öğretmenlere yönelik doğal havalandırmanın doğru kullanımı hakkında bilgilendirme yapılmalıdır. Günlük ders planlarına pencere açma–kapatma sıklığını içeren basit protokoller entegre edilebilir.
- **Mimari Yenilemeler ve Yapısal Müdahaleler:** Uzun vadede, yeni okul yapılarında pencere konumlandırmaları, cephe yönelimi, sınıf oranları ve tavan yüksekliği gibi tasarım kararlarında havalandırma performansı bir kriter olarak dikkate alınmalıdır. Mevcut yapılar için cepheye ek açıklık kazandırma, cam üstü rüzgâr yönlendirici panel kullanımı, içeride taşınımı artıran düşük hızlı fan sistemleri gibi mimari müdahaleler önerilmektedir.

Bu öneriler, yalnızca mevcut pandemi bağlamında değil, genel anlamda iç ortam sağlığı, konforu ve öğrencilerin öğrenme verimliliği açısından da sürdürülebilir ve uygulanabilir stratejilerdir. Özellikle doğal havalandırmanın rasyonel ve mühendislik temelli kullanımı, mevcut eğitim yapılarının düşük maliyetle önemli ölçüde iyileştirilmesini mümkün kılmaktadır.

## 5.2. Yeni Tasarlanacak Eğitim Yapıları için tasarım parametreleri

COVID-19 pandemisi, iç mekân tasarımında kullanıcı sağlığına odaklanan yaklaşımların ne denli önemli olduğunu bir kez daha ortaya koymuştur. Bu bağlamda, yeni inşa edilecek eğitim yapılarında yalnızca pedagojik gereklilikler değil, iç ortam hava kalitesine duyarlı, doğal havalandırmayı destekleyen ve bulaşıcı hastalıkların yayılımını azaltan tasarım parametreleri dikkate alınmalıdır. Aşağıda, bu yapılarda uygulanması önerilen temel tasarım kriterleri sıralanmıştır:

- **Yönlendirme ve Cephe Planlaması:** Eğitim yapıları hâkim rüzgâr yönü, gün ışığı ve ısı kazancı dikkate alınarak yerleştirilmelidir. Sınıflar mümkünse doğu–batı ekseninde konumlandırılmalı ve karşılıklı cephelerden doğal hava akımı sağlanmalıdır.
- **Pencere Yerleşimi, Sayısı ve Tipolojisi:** Her derslikte en az iki karşılıklı cephede pencere yer almalıdır. Üstten ve yandan açılabilen pencereler tercih edilmeli, hava giriş-çıkış dengesine dikkat edilmelidir. Pencere yerleşimi, sınıf içindeki hava dolaşımını yönlendirecek şekilde kurgulanmalıdır.
- **Tavan Yüksekliği ve Hacim Oranı:** Yüksek tavanlı sınıflar, hava hacmini artırarak partikül yoğunluğunu azaltmaktadır. Minimum tavan yüksekliği 3,2 m, kişi başına düşen hava hacmi ise en az 4 m<sup>3</sup> olmalıdır.
- **Oturma Düzeni ve Sınıf İçi Yerleşim:** Mobilya yerleşimi, hava akımını engellemeyecek şekilde düzenlenmelidir. Sıralar, pencere-kapı hattındaki hava akışını kesmeyecek biçimde yerleştirilmeli, öğrenciler mümkün olduğunca hava akımı doğrultusunda hizalanmalıdır.
- **CO<sub>2</sub> Sensörü Kullanımı ve Entegre Kontrol Sistemleri:** Yeni tasarlanacak eğitim yapılarında karbondioksit (CO<sub>2</sub>) sensörleri, iç ortam hava kalitesinin anlık takibi için standart bir bileşen olarak entegre edilmelidir. Bu sensörler, CO<sub>2</sub> yoğunluğunu ölçerek havalandırma ihtiyacını kullanıcıya bildirebilir (örneğin, görsel LED uyarı sistemleriyle). CO<sub>2</sub> düzeyinin 1000 ppm’yi aşması, sınıf içinde hava kalitesinin düştüğünü gösterir ve pencere açma ya da mekanik havalandırma sistemini devreye alma ihtiyacı doğurur.CO<sub>2</sub> sensörleri, akıllı pencere sistemleri veya mekanik destekli hibrit havalandırma sistemleri ile entegre edilerek otomatik kontrol işlevi görebilir. Bu sistemler, öğretmenlerin ve öğrencilerin iç mekân hava kalitesi farkındalığını artırmakla kalmaz, aynı zamanda iç ortam koşullarını bilimsel veriler ışığında izlenebilir hale getirerek bulaş riski açısından kritik bir avantaj sağlar.
- **Hibrit Havalandırma Sistemleri:** Yalnızca doğal havalandırmaya dayalı sistemler, özellikle kış mevsiminde yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle yeni tasarımlarda, ısı geri kazanımlı düşük debili mekanik havalandırma sistemleri ile doğal havalandırmanın birlikte çalıştığı hibrit modeller önerilmektedir.
- **Malzeme Seçimi ve İç Mekân Bitirme Detayları:**VOC (uçucu organik bileşik) yayılımı düşük malzemeler tercih edilmeli, iç yüzeyler kolay temizlenebilir olmalı ve hava sirkülasyonunu engellemeyecek şekilde tasarlanmalıdır. Tavan ve duvar yüzeyleri, hava yönlendirmeyi destekleyecek düz ve yansıtıcı özellikte olmalıdır.

- **Esnek ve Modüler Tasarım İlkeleri:** Gelecekteki olası pandemilere uyum sağlayabilecek sınıflar için, pencere artırımı, bölünebilirlik, havalandırma sistemine dış müdahale gibi modüler çözümler önceden planlanmalıdır. Hareketli duvar sistemleri, havalandırma ihtiyaçlarına göre yeniden düzenlenebilir hacimlerin tasarımı teşvik edilmelidir.

Yeni tasarlanacak eğitim yapılarında iç ortam hava kalitesi yalnızca konfor değil, sağlık, öğrenme performansı ve sürdürülebilirlik açısından da temel bir kriter olarak değerlendirilmelidir. CO<sub>2</sub> sensörü kullanımı gibi düşük maliyetli ama yüksek etkili teknolojilerin entegrasyonu, bu yapıları daha güvenli ve izlenebilir hale getirecektir. Böylece hem mevcut bulaşıcı hastalık riskleri azaltılacak hem de uzun vadeli sağlıklı öğrenme ortamlarının temelleri atılacaktır.

### 5.3. Araştırma İhtiyaçları ve Gelecekteki Çalışma Alanları

Bu tez çalışması, sınıf mekânında doğal havalandırmanın partikül tahliyesi üzerindeki etkisini inceleyerek, eğitim yapılarında iç ortam hava kalitesi ile partikül dağılımı arasındaki ilişkiyi ortaya koymuştur. Ancak çalışma kapsamında belirli sınırlamalar ve gelecek dönem araştırmaları için önemli açılımlar da mevcuttur.

- **Gerçek Zamanlı Ölçüm Verilerine Dayalı Modellemeler:** Bu çalışmada CFD simülasyonları üzerinden teorik modellemeler gerçekleştirilmiştir. Gelecekteki araştırmalarda, gerçek sınıf ortamlarında yapılacak CO<sub>2</sub>, sıcaklık, nem, PM2.5 gibi sensör bazlı ölçümlerle modelin doğrulanması önem taşımaktadır. Gerçek zamanlı verilerle desteklenen hibrit modeller, simülasyon sonuçlarının geçerliliğini artıracaktır.
- **Farklı Eğitim Kademeleri İçin Sınıf Tipolojilerinin İncelenmesi:** Bu tez ortaokul kademesinde yer alan sınıf mekanına odaklansa da anaokulu, ilkokul ve lise düzeyindeki sınıflar; hacim, kullanıcı yaşı ve hareketliliği bakımından farklı özellikler göstermektedir. Gelecek çalışmalarda bu farklı kullanıcı grupları için özel senaryolar geliştirilmesi önerilmektedir.
- **Mekanik ve Hibrit Havalandırma Sistemlerinin Kıyaslamalı Analizi:** Bu çalışmada sadece doğal havalandırma sistemleri analiz edilmiştir. Ancak özellikle kış aylarında yetersiz kalan bu sistemlere alternatif olarak mekanik ya da hibrit çözümler (ısı geri kazanımlı sistemler, HEPA filtreli hava dolaşımı vb.) gelecekteki çalışmalarda karşılaştırmalı olarak ele alınmalıdır.

- **Viral Yük ve Partikül Davranışlarının Daha Detaylı Modellenmesi:** Bu tezde virüs partikülleri genel bir dağılım modeli ile ele alınmıştır. Oysa enfekte bireyin viral yük düzeyi, hapşırma/öksürme şekli, konuşma süresi gibi değişkenler partikül yayılımını doğrudan etkiler. Viral dinamiklerin, damlacık boyutunun ve buharlaşma–çökme süreçlerinin daha ayrıntılı modellenmesi gelecekteki araştırmalarda önemli katkı sağlayacaktır.
- **Akıllı Kontrol Sistemleri ve Otomasyonun Entegrasyonu:** Gelecekteki çalışmalar, CO<sub>2</sub> sensörlerinden gelen verilerle çalışan otomatik pencere açma sistemleri, hava kalitesine duyarlı fan kontrolü, ya da yapay zekâ destekli ortam yönetim sistemleri gibi teknolojik çözümlerin mimari tasarıma entegrasyonunu ele almalıdır.
- **Fiziksel ve Davranışsal Müdahalelerin Ortak Etkisi:** Sadece fiziksel parametrelerin değil, kullanıcı davranışlarının da hava kalitesi üzerinde etkisi büyüktür. Gelecekteki çalışmalar, pencere açma alışkanlığı, sınıf içi hareketlilik, maske kullanımı gibi değişkenleri içeren insan-temelli modeller geliştirmelidir.
- **Politika ve Yönerge Desteği Oluşturacak Normatif Çıktılar:** Bu tezde elde edilen bulgular, uygulayıcı kurumlara (MEB, yerel belediyeler, mimarlık ofisleri) öneriler sunabilecek niteliktedir. Gelecek çalışmalarda bu tür verilerin yeni yapı standartları, okul tasarım yönetmeliklerine yerel rehberler için normatif temele dönüştürülmesi hedeflenmelidir.

## KAYNAKLAR

- Abbas, G. M. and Gursel Dino, I., 2022, COVID-19 dispersion in naturally-ventilated classrooms: a study on inlet-outlet characteristics. *Journal of Building Performance Simulation*, 15(5), 656-677.
- Allen, J. G., MacNaughton, P., Satish, U., Santanam, S., Vallarino, J. and Spengler, J. D., 2016, Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: a controlled exposure study of green and conventional office environments. *Environmental Health perspectives*, 124(6), 805-812.
- Al-Jokhadar, A., Alnusairat, S., Abuhashem, Y. and Souidi, Y., 2023, The impact of indoor environmental quality (IEQ) in design studios on the comfort and academic performance of architecture students. *Buildings*, 13(11), 2883.
- Almeida, R. M., Pinto, M., Pinho, P. G. and de Lemos, L. T., 2017, Natural ventilation and indoor air quality in educational buildings: Experimental assessment and improvement strategies. *Energy Efficiency*, 10, 839-854.
- Arslan, H. D., Acar Bilgili, S. M., & Doğan, S. (2024). Farklı İlkim Bölgelerinde TOKİ Tip Konutlarının Doğal Havalandırma Analizi. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1), 21-39. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2024.30>
- Ashrae, 2019, *ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019: Ventilation for acceptable indoor air quality*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Ashrae, 2020, *ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2020: Ventilation for acceptable indoor air quality*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Bakó-Biró, Z., Clements-Croome, D. J., Kochhar, N., Awbi, H. B. and Williams, M. J., 2012, Ventilation rates in schools and pupils' performance. *Building and environment*, 48, 215-223.
- Branco, P. T., Sousa, S. I., Dudzińska, M. R., Ruzgar, D. G., Mutlu, M., Panaras, G. and Weersink, A., 2024,. A review of relevant parameters for assessing indoor air quality in educational facilities. *Environmental Research*, 12, 119713.
- Bulut Karaca, Ü. (2022). İlkokul Dersliklerinde İç Hava Kalitesinin İyileştirilmesi Üzerine Bir Araştırma. *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*(33), 60-67. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1018560>
- Buonanno, G., Morawska, L., Stabile, L. and Viola, I. M., 2022, Increasing ventilation reduces SARS-CoV-2 airborne transmission in schools: A retrospective cohort study in Italy's Marche region. *Frontiers in Public Health*, 10, 1087087.

- Canha, N., Almeida, S. M., Freitas, M. C., Täubel, M. and Hänninen, O., 2013, Winter ventilation rates at primary schools: comparison between Portugal and Finland. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 76(6), 400-408.
- Chatzidiakou, L., Mumovic, D. and Summerfield, A., 2015, Is CO<sub>2</sub> a good proxy for indoor air quality in classrooms? Part 1: The interrelationships between thermal conditions, CO<sub>2</sub> levels, ventilation rates and selected indoor pollutants. *Building Services Engineering Research and Technology*, 36(2), 129-161.
- Cochran Hameen, E., Ken-Opurum, B. ve Son, Y. J., 2020, Protocol for post occupancy evaluation in schools to improve indoor environmental quality and energy efficiency. *Sustainability*, 12(9), 3712.
- Dbouk, T. and Drikakis, D., 2020, On respiratory droplets and face masks. *Physics of Fluids*, 32(6), 063303.
- Douwes, J., Thorne, P., Pearce, N. and Heederik, D., 2003, Bioaerosol health effects and exposure assessment: Progress and prospects. *Annals of Occupational Hygiene*, 47(3), 187-200.
- Eşmen, E. (2023). Doğal havalandırma ve doğal havalandırma sistemlerine etki eden faktörlerin benzetim (simülasyon) tabanlı analizi: İstanbul örneği (Yüksek lisans tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Etheridge, D. W. and Sandberg, M., 1996, Building ventilation: theory and measurement (Vol. 50). *John Wiley & sons*, Chichester-UK, 3-36.
- Fanger, P. O., 1970, Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.
- Ferziger, J. H. and Perić, M., 2002, Computational methods for fluid dynamics (Vol. 586). *Springer*, New York, 4-55.
- Fisk, W. J., 2017, The ventilation problem in schools: literature review. *Indoor Air*, 27(6), 1039-1051.
- Franchi, M. and Carrer, P. (2002). Indoor air quality in schools: the EFA project. *Monaldi Archives for Chest Disease*, 57(2), 120-122.
- Fromme, H., Diemer, J., Dietrich, S., Cyrys, J., Heinrich, J., Lang, W. and Twardella, D., 2008,. Chemical and morphological properties of particulate matter (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) in school classrooms and outdoor air. *Atmospheric Environment*, 42(27), 6597-6605.
- Garcia, M. S., Souza, R. V. G. and Silva, F. J., 2023, Towards health and comfort: architectural design and indoor air quality in naturally ventilated classrooms. In International Conference on Recovery, Maintenance and Rehabilitation of Buildings. *Springer Nature Switzerland*, Cham, 403-413.
- Givoni, B., 1998, Climate considerations in building and urban design. *John Wiley & Sons*, New York, 45-78.

- Godish, T., 2016, Indoor environmental quality. *CRC press*, New York, 2-55.
- Harvard Healthy Buildings Program, 2020, How to assess classroom ventilation: A step-by-step guide. *Harvard T.H. Chan School of Public Health*, Boston, 123-125.
- Heracleous, C. and Michael, A. (2019). Field study on the effectiveness of natural ventilation in school buildings: Indoor air quality and thermal comfort assessment. *Energy and Buildings*, 183, 693–705.
- Heracleous, C. and Michael, A., 2020, Thermal comfort models and perception of users in free-running school buildings of East-Mediterranean region. *Energy and Buildings*, 215, 109912.
- Heracleous, C. and Michael, A., 2018, Thermal comfort conditions and air quality in educational buildings in Cyprus during the heating period: the impact of natural ventilation. *Proc. Of 2nd Int. Con. on Sustainable Design of the Built Environment*, London, 1108-1119.
- Hodgson, A. T., Rudd, A. F., Beal, D. and Chandra, S., 2000, Volatile organic compound concentrations and emission rates in new manufactured and site-built houses.
- Holgate, S., Grigg, J., Agius, R., Ashton, J. R., Cullinan, P., Exley, K. and Goddard, A., 2016, Every breath we take: The lifelong impact of air pollution, Report of a working party. *Royal College of Physicians*, London, 4-53.
- Jia, M., Mei, D., Li, J., Liu, Z., Duan, W. and Hou, S., 2022, Analysis of the spread of cough droplets and body deposition fraction in the smart classroom in different seasons. *Hygiene and Environmental Health Advances*, 3, 100015.
- Jones, A. P., 1999, Indoor air quality and health. *Atmospheric Environment*, 33(28), 4535-4564.
- Jones, B., Kirby, R., Bragger, C. and Raw, G., 2010, Indoor air quality in UK school classrooms ventilated by natural and windcatcher systems. *Building and Environment*, 45(11), 2211–2217.
- Kim, J. J., Smorodinsky, S., Lipsett, M., Singer, B. C., Hodgson, A. T. and Ostro, B., 2004, Traffic-related air pollution near busy roads: the East Bay Children's Respiratory Health Study. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 170(5), 520-526.
- Linden, P. F., 1999, The fluid mechanics of natural ventilation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 31(1), 201–238.
- Madureira, J., Paciência, I., Rufo, J., Ramos, E., Barros, H., Teixeira, J. P. and de Oliveira Fernandes, E., 2015, Indoor air quality in schools and its relationship with children's respiratory symptoms. *Atmospheric Environment*, 118, 145-156.
- Mendell, M. J., Eliseeva, E. A., Davies, M. M., Spears, M., Lobscheid, A., Fisk, W. J. and Apte, M. G., 2013, Association of classroom ventilation with reduced illness absence: A prospective study in California elementary schools. *Indoor Air*, 23(6), 515-528.

- Morales, E., Rodríguez, A., Cabeza, L. F., Jiménez, M. J. and Boer, D., 2019, Indoor air quality and ventilation in classrooms: A case study in schools in Catalonia, *Spain. International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(22), 4503.
- Morawska, L. and Cao, J., 2020, Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality. *Environment International*, 139, 105730.
- Morawska, L. and Milton, D. K., 2020, It is time to address airborne transmission of COVID-19. *Clinical infectious diseases: an official publication of the Infectious Diseases Society of America*, ciaa939.
- Morawska, L., Tang, J. W., Bahnfleth, W., Bluyssen, P. M., Boerstra, A., Buonanno, G., and Yao, M., 2020, How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised? *Environment International*, 142, 105832.
- Nowak-Dzieszko, K., Mijakowski, M. and Müller, J., 2024, Simulating the natural seasonal ventilation of a classroom in poland based on measurements of the CO2 concentration. *Energies*, 17(18), 4591.
- Nugrahanti, F. I., Koerniawan, M. D., Wonorahardjo, S., Larasati, D and Sudrajat, I. (2023, November). Building Simulation Software for Indoor Air Quality Research: A Review. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, Bristol, 1218(1), 012024.
- Palladino, S., Cappelletti, F., Romagnoni, P. and Gasparella, A., (2017), The effect of natural ventilation strategy on indoor air quality in schools. *Science of the Total Environment*, 595, 894–902.
- Pope III, C. A. and Dockery, D. W., 2006, Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709-742.
- Parsons, K., 2007, Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance. *CRC press*, New York, 23-61.
- Rehva, 2021, COVID-19 guidance document. Federation of European Heating [online], Ventilation and Air Conditioning Associations. <https://www.rehva.eu/activities/covid-19-guidance>, [Ziyaret Tarihi: 4 Mart 2025].
- Seppänen, O. A., Fisk, W. J. and Mendell, M. J., 1999, Association of ventilation rates and CO2 concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings. *Indoor Air*, 9(4), 226-252.
- SolidWorks Corporation, 2024, Solidworks flow simulation user guide. Dassault Systèmes.
- Song, J. and Meng, X. (2015). The Improvement of Ventilation Design in School Buildings Using CFD Simulation. *Procedia Engineering*, 121, 1475–1481.
- Sundell, J., 2004, On the history of indoor air quality and health. *Indoor Air*, 14, 23-62.

- Sutherland, A., Ackley, A., Phipps, R., Longley, I., MacKenzie, S., Chen, S and Jermy, M., 2022, The Impact of Natural Ventilation during Winter on Thermal Comfort: A Systematic Literature Review.
- Tsutsumi, A., and Lee, S., 2022, Development of an automatic window opening system to control the ventilation rate. *In 17th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, INDOOR AIR 2022*, Finland, 36-67.
- Tuna, K., M. and Yetiş, C. (2023). Determination of the indoor air quality and occupancy satisfaction in architecture studios during model making process. *GRID-Architecture, Planning & Design Journal*, 6(1), 4-36.
- Vassella, P., Heracleous, C. and Michael, A., 2021, The impact of intermittent natural ventilation during winter on indoor air quality in school classrooms. *Building and Environment*, 200, 107964.
- Versteeg, H. K. and Malalasekera, W., 2007, An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method (2nd ed.). *Pearson Education Limited*, New York, 12-32.
- Xie, X., Li, Y., Chwang, A. T. Y., Ho, P. L. and Seto, W. H. (2007). How far droplets can move in indoor environments—revisiting the Wells evaporation–falling curve. *Indoor Air*, 17(3), 211–225.
- Wargocki, P. and Wyon, D. P., 2017, Ten questions concerning thermal and indoor air quality effects on the performance of office work and schoolwork. *Building and Environment*, 112, 359-366.
- World Health Organization, 2010, World health statistics 2010. *World Health Organization*, Geneva, 2-63.
- World Health Organization, 2021, Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19. *World Health Organization*, Geneva, 3-45.
- Wu, H.-H., Wang, F.-J., Chiang, C.-M. ve Lai, C.-M., 2007, Numerical simulations of the natural ventilation design mix of elementary school classrooms. *In Proceedings of the IBPSA International Conference (BS2007)*, Beijing-China, 7-42.
- Yang, Y., Sugimoto, J. D., Halloran, M. E., Basta, N. E., Chao, D. L., Matrajt, L. and Longini Jr, I. M., 2009, The transmissibility and control of pandemic influenza A (H1N1) virus. *Science*, 326(5953), 729-733.
- Zhang, H., Arens, E., Fard, S. A., Huizenga, C., Paliaga, G., Brager, G. and Zagreus, L., 2007, Air movement preferences observed in office buildings. *International journal of Biometeorology*, 51, 349-360.
- Zhang, Z. Y., Yin, W., Wang, T. W. and O'Donovan, A., 2022, Effect of cross-ventilation channel in classrooms with interior corridor estimated by computational fluid dynamics. *Indoor and Built Environment*, 31(4), 1047-1065.

Zhou, K., Li, S. and Cao, R., 2023, Optimal technology innovation of teaching buildings for primary and middle schools based on compound negative pressure ventilation. *Appl Nanosci*, 13, 2037–2048 (2023).

MEB, t/y, Url-1: 2015 eğitim yapıları asgari tasarım standartları kılavuzu [online], Millî Eğitim Bakanlığı, [https://iegm.meb.gov.tr/meb\\_iys\\_dosyalar/2015\\_08/17032245\\_2015asgaritasarmkklavuzu.pdf](https://iegm.meb.gov.tr/meb_iys_dosyalar/2015_08/17032245_2015asgaritasarmkklavuzu.pdf).

