



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Hava değişim katsayısının kirleticileri uzaklaştırma performansına etkisinin incelenmesi

## *Investigation of the effect of air change rate on contaminant removal performance*

*Yazar(lar) (Author(s)): Yunus Emre ÇETİN<sup>1</sup>, Mete AVCI<sup>2</sup>, Orhan AYDIN<sup>3</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-0165-2900*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-4994-1488*

*ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-2492-8212*

**Bu makaleye řu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Çetin Y. E., Avcı M. ve Aydın O., "Hava değişim katsayısının kirleticileri uzaklaştırma performansına etkisinin incelenmesi", *Politeknik Dergisi*, 24(2): 453-459, (2021).

**Eriřim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.660484

# Hava Değişim Katsayısının Kirleticileri Uzaklaştırma Performansına Etkisinin İncelenmesi

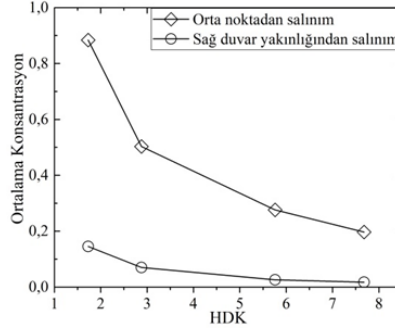
## Investigation of the Effect of Air Change Rate on Contaminant Removal Performance

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Hava değişim katsayısının partikül dağılımına etkisi farklı kirletici konumları için incelenmiştir. / The effect of air change rate on particle dispersion is investigated for different contaminant positions.
- ❖ Hava değişim katsayısındaki artışın kirletici konsantrasyonunu %75 oranında azalttığı tespit edilmiştir. / It is determined that the increase in air change rate decreases the concentration of pollutants by 75%.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada, hava değişim katsayısının partikül dağılımına etkisi farklı kirletici kaynak konumları için deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. / In this study, the effect of the air exchange coefficient on the particle distribution was investigated experimentally and numerically for different pollutant source locations.



Şekil. 9 /Figure. 9

### Amaç (Aim)

Bu çalışmanın amacı kirletici kaynak konumu ve HDK'nın bütünleşik etkisini incelemektir. / The aim of this study is to investigate the combined effect of contaminant source position and ACH.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Deneysel çalışma küçük ölçekli bir model odada yürütülmüş ve kirletici olarak  $0,5 \mu\text{m}$  ebatında partiküller kullanılmıştır. Partikül hareketleri, Lagrange yaklaşımı esas alınarak bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı olan ANSYS Fluent programında modellenmiştir. / Experimental study is conducted in a reduced scale model room and with the diameters of  $0.5 \mu\text{m}$  particles are used as contaminant. Particle movements are modelled based on Lagrangian approach with a computational fluid dynamics software ANSYS Fluent.

### Özgünlük (Originality)

Bu çalışmada kirletici konumu ve HDK'nın bütünleşik etkisi dikkate alınmıştır. / In this study combined effect of contaminant source and air change rate is considered.

### Bulgular (Findings)

Kirletici dağılımları, kirletici konumu ve HDK değerine bağlı olarak farklı dağılımlar sergilemektedir. / Contaminant distributions shows a varying character up to contaminant position and ACH values.

### Sonuç (Conclusion)

Havalandırma tasarımı ele alınırken kirletici noktası ve ana akış bölgesi beraber değerlendirilmelidir. / Contaminant position and main flow region should be evaluated for the ventilation design consideration.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Hava Değişim Katsayısının Kirleticileri Uzaklaştırma Performansına Etkisinin İncelenmesi

(Bu çalışma ULIBTK 2019 kongresinde sunulmuştur. / This study was presented at ULIBTK 2019 congress.)

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Yunus Emre ÇETİN<sup>1\*</sup>, Mete AVCI<sup>2</sup>, Orhan AYDIN<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Arsin Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Türkiye

<sup>3</sup>Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 17.12.2019 ; Kabul/Accepted : 07.04.2020)

## ÖZ

Bu çalışmada, hava değişim katsayısının partikül dağılımına etkisi farklı kirletici kaynak konumları için deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma küçük ölçekli bir model oda üzerinde izotermal akış şartları için yürütülmüş ve kirletici olarak 0,5 µm ebatında partiküller kullanılmıştır. Partikül hareketleri, Lagrange yaklaşımı esas alınarak bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı olan ANSYS Fluent programında modellenmiştir. Ana akış bölgesi dışında yer alan kirleticilerin 12 kata kadar daha yüksek konsantrasyon değerlerine yol açtığı görülmüştür. Bununla beraber, hava değişim katsayısındaki artışın bu bölgedeki kirletici konsantrasyonunu %75 oranında azalttığı tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Hava değişim katsayısı (HDK), partikül dağılımı, kirletici uzaklaştırma.

## Investigation of the Effect of Air Change Rate on Contaminant Removal Performance

### ABSTRACT

In this study, the effect of air change rate on particle dispersion is investigated experimentally and numerically for different contaminant source positions. An experimental study is carried out on a reduced scale model for isothermal flow conditions and 0.5 µm particles are used as contaminants. Particle motions, based on Lagrange approach, are modeled with a computational fluid dynamics (CFD) software ANSYS Fluent. It is found that pollutants outside the main flow region lead to 12 times higher concentration values. In addition, it is determined that the increase in air change rate decreases the concentration of pollutants in this region by 75%.

**Keywords:** Air change rate (ACH), particle dispersion, contaminant removal.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde, insanlar günlük hayatlarının önemli bir kısmını kapalı mahallerde geçirmektedirler. Bu mahallerdeki hava kalitesi insan sağlığını ve çalışma performansını etkileyen önemli bir unsurdur [1]. Hava kalitesini etkileyen değişkenlerden biri solunum yoluyla alveollere nüfuz eden ve farklı hastalıklara yol açan küçük ebatlı partiküllerdir [2,3]. İlgili partiküller ayrıca bakteriler ve virüsler için taşıyıcı bir rol üstlenmekte ve hastalıkların yayılmasına neden olmaktadır. Bu sebeple, uygun havalandırma stratejisinin başta mahalın tipine, kirletici kaynak konumuna ve bu kirleticilerden korunması öncelikli bölgelere göre belirlenmesi gerekmektedir. Hava kalitesini etkileyen bir diğer değişken ise hava değişim katsayısıdır (HDK). Uygulamada genel kanı hava değişim katsayısı ve temiz bir iç ortam arasında her zaman doğru orantılı bir ilişki olduğu yönündedir. Bununla beraber, havalandırma sistemlerinde yüksek hava debileri ile çalışılması işletme

maliyetlerini arttıran bir etken olarak öne çıkmaktadır [4]. Dolayısı ile uygun iç hava kalitesinin en ekonomik şekilde sağlanması için optimum hava değişim katsayısının belirlenmesi gerekmektedir.

Literatürde hava değişim katsayısının kirletici dağılımına etkisini değerlendiren kapsamlı çalışmalar mevcuttur. Wang vd. [5], zemin yüzeyinden partikül (3.1µm) salınımı yapılan bir ortamda HDK değerinin konsantrasyonu azaltacağını deneysel olarak göstermişlerdir. Jin vd. [6] HDK değeri arttıkça konsantrasyon miktarındaki azalmanın aynı oranda olmayacağını ifade etmişlerdir. Memarzadeh ve Xu [7] kirletici uzaklaştırma performansında, HDK dışında kirletici kaynak konumu ve çıkış menfezi arasındaki ilişkinin önemine sayısal bir çalışma ile dikkat çekmişlerdir. Faulkner vd. [8,9] sırasıyla kirletici kaynağının giriş havası ve mahal içi olduğu iki farklı deneysel çalışmada HDK artışının kirletici konsantrasyonu üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca literatürde mekanik havalandırmada hava değişim katsayısına göre oda havasındaki kirleticilerin bertaraf edilmesi için gerekli

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : yecetin@ktu.edu.tr

olan zaman miktarına ilişkin çalışmalar da bulunmaktadır [10,11].

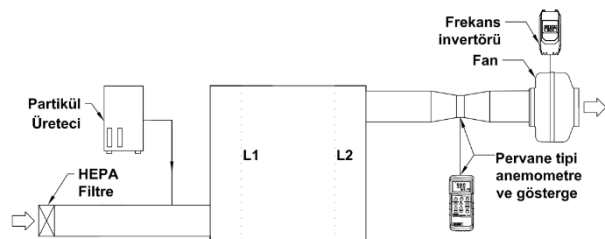
Yukarıda verilen literatür özeti, araştırmacıların kirletici kaynak konumundan bağımsız olarak HDK - ortalama konsantrasyon ilişkisini detaylı bir şekilde incelediğini ortaya koymaktadır. Kirletici kaynak konumu ve HDK'nın bütünleşik etkisinin dikkate alınmadığı bu yaklaşım, üretilen verilerin uygulamaya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

Yukarıda tanımlanan eksikliğin giderilmesine yönelik olarak, bu çalışmada hava değişim katsayısının partikül dağılımına etkisi farklı kirletici kaynak konumlarına bağlı olarak deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma küçük ölçekli bir model odada yürütülmüş ve yapılan ölçümler sayısal sonuçların doğrulanmasında kullanılmıştır. Farklı hava değişim katsayılarında elde edilen kirletici dağılımları ve ayrıca hava yaşı değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların hava değişim katsayısı ile kirletici dağılımı arasındaki ilişkinin daha iyi kavranmasına katkı sunacağı, buna bağlı olarak daha etkin havalandırma sistem tasarımlarına yardımcı olacağı değerlendirilmektedir.

## 2. YÖNTEM (METHOD)

### 2.1 Deneysel Çalışma (Experimental Study)

Deneylerin yürütüldüğü model oda, gerçek boyutlarda bir odayı temsilen, 1:5 ölçeğinde 0.6 m \* 0.6 m \* 0.6 m ebatlarında olup, 10 mm kalınlığında pleksiglass malzemeden imal edilmiştir. Menfez boyutları 0.12 m \* 0.12 m olup menfezlerin merkezleri buldukları duvarların orta dikey çizgileri üzerinde konumlanmıştır. Hava akışı Şekil 1’ de görüldüğü üzere çıkış kanalında yer alan ve bir frekans konvertörü ile sürülen bir fan vasıtası ile sağlanmakta ve pervane tipi bir anemometre (Extech 407113) yardımı ile izlenmektedir. Mahale giren hava, giriş kanalı önünde yer alan bir HEPA filtre ile temizlenmektedir. 0.5 µm ebatında PSL partiküller (1050 kg/m<sup>3</sup>) içeren bir solüsyon partikül üreticinde atomize edilmekte ve giriş havası ile ortama verilmektedir. Hava hızı ve konsantrasyon ölçümleri L1 ve L2 istasyonlarında bir kızgın tel anemometresi (Testo 0635 1025) ve partikül sayım cihazı (Handilaz mini) ile gerçekleştirilmiştir. L1 ve L2 ölçüm istasyonları yakın oldukları duvarlardan 12 cm uzaklıkta yer almaktadırlar.



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik resmi (Schematic of the experimental setup)

### 2.1 Sayısal Çalışma (Numerical Study)

Sayısal çalışma bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı olan Ansys Fluent paket programı ile gerçekleştirilmiştir. Bu programda, hava akışının modellenmesi akışı karakterize eden korunum denklemlerinin sonlu hacimler yöntemi ile ayrıştırılarak çözümlenmesine dayanmaktadır. Korunum denklemleri en genel haliyle aşağıdaki formda ifade edilebilir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi) + \nabla \cdot (u\varphi) = \nabla \cdot (\Gamma_{\varphi} \nabla \varphi) + S_{\varphi} \quad (1)$$

Burada,  $\varphi$  genel değişken (süreklilik denkleminde 1 momentum denkleminde ise u, v ve w olmaktadır),  $\Gamma_{\varphi}$  difüzyon katsayısı ve  $S_{\varphi}$  kaynak terimi temsil etmektedir.

Türbülanslı akış problemleri için eşitliklerdeki hız ve basınç değerleri ortalama ve çalkantı bileşenleri cinsinden ifade edilir. Bu durumda, ortaya çıkan türbülans Reynolds gerilmelerini temsil eden ( $\rho u'_i u'_j$ ) teriminin açık formda yazılabilmesi için bir çok türbülans modeli bulunmaktadır.

Bu çalışmada, RNG k –  $\epsilon$  türbülans modeli tercih edilmiştir. Bu modelin iç hava akışı problemleri için en uygun türbülans modeli olduğu literatürde [12,13] ifade edilmektedir. RNG k –  $\epsilon$  türbülans modeli, Navier-Stokes denklemlerinin “renormalisation group (RNG)” metodu olarak bilinen bir matematiksel teknikle çözülmesiyle elde edilmiştir. RNG k –  $\epsilon$  türbülans modelinde türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans yutulma oranı ( $\epsilon$ ) transport denklemleri ile aşağıdaki formda ifade edilir:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_{\epsilon}} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3)$$

$$C_{2\epsilon}^* = C_{2\epsilon} + C_{\mu} \frac{\eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \quad (4)$$

Burada,  $\mu_T$  türbülans viskozitesini temsil etmekte olup açık formu

$$\mu_T = \rho C_{\mu} \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

eşitliği ile temsil edilir. Mevcut problem için, model sabitleri  $C_{1\epsilon}=1.42$  ve  $C_{2\epsilon}=1.68$  olarak seçilmiştir.

Basınç-hız çiftinin çözümünde SIMPLE algoritması, kontrol hacmi yüzeyindeki değişkenlerin interpolasyonunda ise ikinci derece yukarı akım şeması tercih edilmiştir. Korunum denklemlerinin çözümü için yakınsama kriteri  $10^{-5}$  olarak seçilmiştir.

Giriş ve çıkış menfezlerinde sırasıyla “Velocity inlet”, ve “Outflow” sınır şartları tanımlanmış, duvar yüzeylerinde

ise kaymama (no slip) sınır koşulu öngörülmüştür. Ayrıca, kapalı hacmin tüm yüzeyleri adyabatik kabul edilmiştir.

Hava akışının çözümlenmesinin ardından elde edilen akış haritası üzerinde partiküllerin takip ettiği rotalar Lagrange metoduna bağlı olarak ayrık faz modellemesi (discrete phase modeling-DPM) yardımı ile incelenmiştir. Partiküllerin küresel formda oldukları, akış sırasında birbirlerine temas etmedikleri, tüm fazın hacimsel olarak %10'unu oluşturdukları ve hava akışı üzerinde herhangi bir etkilerinin olmadığı varsayılmıştır. Partikül yörüngeleri, her bir partiküldeki kuvvet dengesine bağlı olarak hesaplanan hız değeri yardımı ile belirlenmiştir. İlgili kuvvet dengesi açık formda aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2 C_c} (\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F}_a \quad (6)$$

Burada, eşitliğin sol tarafındaki terim partikülün sahip olduğu atalet kuvvetini, eşitliğin sağ tarafındaki terimler ise sırasıyla, sürüklenme, yer çekimi - kaldırma ve diğer olası kuvvetleri temsil etmektedir [14].

Akış içerisindeki türbülans dalgalanmalarının partikül dağılımı üzerindeki stokastik etkisi ayrık rastgele yürüyüş modellemesi (discrete random walk modeling-DRW) ile ele alınmıştır. Bu model, partikül hareketlerinin tutarlı bir dağılım sergileyene kadar izlenmesini esas almaktadır. Akış alanındaki türbülans dalgalanmaları, anlık ve ortalama akışkan hızları cinsinden aşağıdaki formda yazılabilir.

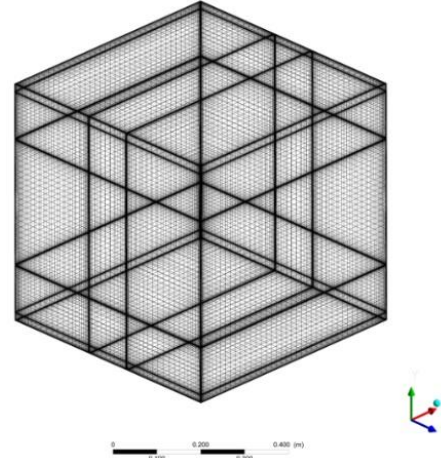
$$u_i = \bar{u} + u'_i \quad (7)$$

$$u'_i = \xi \sqrt{\frac{2k}{3}} \quad (8)$$

Burada,  $\xi$  Gauss olasılık dağılımı ile ifade edilen sabittir. Ayrık faz modeli için, giriş menfezinde “Reflect”, çıkış menfezinde partiküllerin akış alanını terk edeceği göz önüne alınarak “Escape” sınır şartları seçilmiştir. Partiküllerin duvar yüzeylerine teması halinde bu yüzeylerde tutunacağı [15] değerlendirildiği için tüm duvarlarda “Trap” sınır şartı tanımlanmıştır.

Ağdan bağımsızlık çalışması üç farklı ağ yapısında için yürütülmüştür. Şekil 2’ de görüldüğü üzere duvar yakınlığında ve giriş ile çıkış boyunca öngörülen hız alanlarına bağlı olarak belirli bölgelerde daha yoğun bir ağ yapısı tercih edilmiştir. Özellikle duvar-partikül etkileşiminin doğru tahmin edilmesi adına sınır tabakanın hassas bir biçimde ele alınması gerekmektedir. Bunun için gelişmiş duvar fonksiyonu (enhanced wall treatment) seçilmiş ve ağ yapısına bağlı olarak  $y^+ < 1.25$  elde edilmiştir. İlgili ölçüm istasyonlarındaki sonuçların orta sıklıktaki ağ yapısından sonra anlamlı değişiklikler sergilemediği görülmüştür. Toplam simülasyon zamanı

ve maliyeti göz önüne alınarak, sayısal çalışmalar 1237860 hücre sayısına sahip ağ yapısında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Sayısal modelde kullanılan ağ yapısı (Mesh structure of the numerical model)

### 2.3 Çalışma Parametreleri (Cases Studied)

Deneyel çalışma, küçük ölçekli bir model odada, partiküllerin giriş havası ile mahale verildiği durum için tek bir giriş hızı değerinde gerçekleştirilmiştir. Araştırma sonuçlarının gerçek boyutlardaki odalar için de değerlendirilebilir çıktılar vermesini adına benzerlik parametreleri dikkate alınarak akış ve kirletici dağılım benzerliği sağlanmıştır. Isıl etkilerin söz konusu olmadığı bir sistemde akış ve partikül dağılım benzerlikleri için sırasıyla, Reynold sayısı ve çökeltme hızı oranları her iki ölçekte de korunması gerekmektedir [16,17]. Çalışılan dört farklı Reynolds sayısı ( $Re = (u_0 h)/\nu$ ) için her iki ölçekteki üfleme hızları ve HDK değerleri Çizelge 1’de verilmektedir. Burada, dağılım benzerliği açısından, küçük ölçekteki model odada incelenen 0.5  $\mu\text{m}$  ebatındaki partiküllerin gerçek boyutlardaki odada 0.181  $\mu\text{m}$ 'ye tekabül ettiği not edilmelidir.

Sayısal çalışmada, farklı HDK değerlerinin havalandırma performansına etkisini değerlendirmek üzere iki farklı noktadan partikül salınımı ele alınmış ve mahal içi konsantrasyon değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca, artan HDK ile mahaldeki havanın tazeliğinin değişimini göstermek için hava yaşı [18] hesaplanmıştır. Hava yaşı, havanın mahale girdikten sonra belirli bir noktaya gelene kadar geçen süre olarak tanımlanabilir. Akış alanı içinde herhangi bir noktadaki hava yaşı girişte en düşük, ölü bölgelerde ise en yüksek değeri alacaktır. Hava yaşının hesaplanabilmesi için ilgili skaler değişken bir kullanıcı tanımlı fonksiyon (UDF-User defined function) ile programa tanıtılmış ve konveksiyon-difüzyon denkleminin çözümü ile belirlenmiştir. Bu denklem

$$\frac{\partial \rho \Phi_i}{\partial t} - \nabla(\Gamma_i \nabla \Phi_i) = S_{\Phi_i} \quad (9)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada  $t$  zamanı (s),  $\rho$  akışkan yoğunluğunu (kg/m<sup>3</sup>),  $\Phi_i$  hesaplanacak skaleri (diğer bir deyişle hava yaşı ( $\tau_i$ )),  $\Gamma_i$  bu skalere ait difüzyon katsayısını ve  $S_{\phi_i}$  kaynak terimi ifade etmektedir.

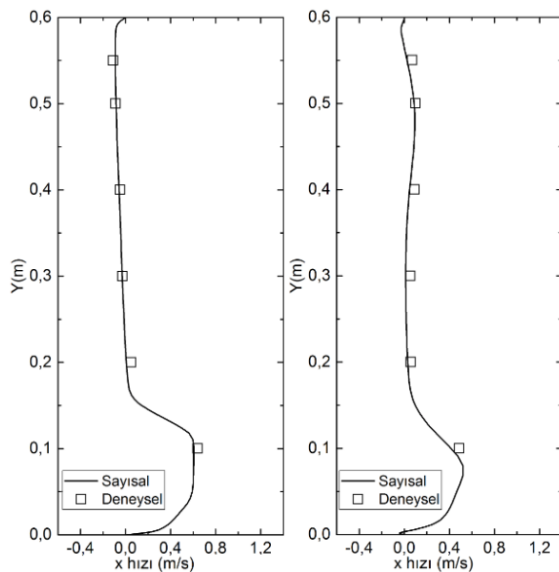
**Çizelge 1.** Çalışma parametreleri (Operating parameters)

|     | Re   | Ölçek     | Giriş hızı<br>(m/s) | HDK<br>(1/saat) |
|-----|------|-----------|---------------------|-----------------|
| (a) | 1520 | 1:1 (1:5) | 0,036 (0,18)        | 1,73 (43,2)     |
| (b) | 2534 | 1:1 (1:5) | 0,06 (0,3)          | 2,88 (72)       |
| (c) | 5068 | 1:1 (1:5) | 0,12 (0,6)          | 5,76 (144)      |
| (d) | 6757 | 1:1 (1:5) | 0,16 (0,8)          | 7,68 (192)      |

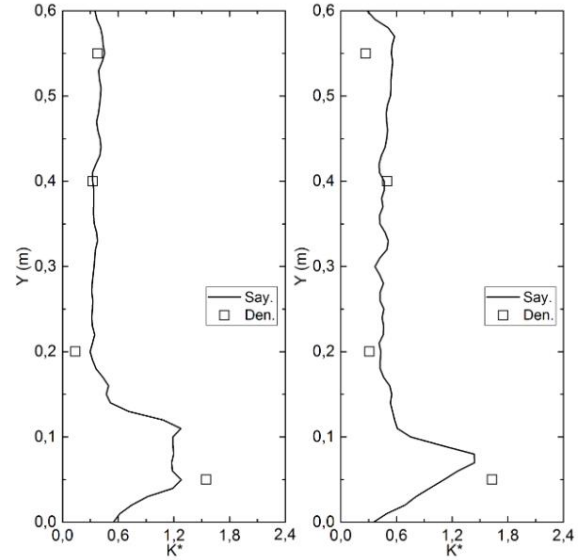
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

#### 3.1. Sayısal Yaklaşımın Doğrulanması (Validation of the Numerical Approach)

Tercih edilen sayısal yaklaşımın doğrulanması için daha önce ifade edilen ölçüm istasyonlarında elde edilen deneysel veriler ve simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 3 ve Şekil 4' te sırasıyla, x-hızı ve giriş değerine göre normalleştirilmiş partikül konsantrasyon değerleri verilmektedir. Görüldüğü üzere yerel hız ve konsantrasyon değerleri birbiri ile yüksek bir uyum içerisindedir. x-hızı değerleri giriş menfezine yakın noktalarda ve menfez iz düşümü boyunca, beklendiği üzere, daha yüksek değerler almakta bu bölge dışında ise hız değerleri sıfıra yakınsamaktadır. Benzer şekilde, partiküller giriş havası ile mahale verildiklerinden dolayı hava hızının yüksek olduğu bölgelerde yüksek konsantrasyon değerlerine ulaşmaktadır. Yerel istasyonlar üzerinden yakalanan yüksek uyum, sayısal çözümün ilgili hız ve konsantrasyon alanlarının eldesine gayet başarılı cevap verdiğini net bir şekilde ortaya koymaktadır.



**Şekil 3.** x-hızı için ölçüm ve simülasyon sonuçları (Measurement and simulation results of the x-velocity magnitudes)



**Şekil 4.** Partikül konsantrasyonu için ölçüm ve simülasyon sonuçları (Measurement and simulation results of the particle concentrations)

#### 3.2 Akım Çizgileri ve Hava Yaşının Değerlendirilmesi (Assessment of Streamlines and Air Age)

Farklı HDK değerlerinde oda orta düzleminde elde edilen akım çizgileri Şekil 5' te verilmektedir. Hava hızındaki artışa rağmen hava giriş menfezi boyunca akım çizgilerinin formunda bir değişiklik olmadığı, odanın üst bölgelerinde ise kısmen farklı yönelimler görüldüğü ifade edilebilir. Şekil 6' da verilen eş hava yaşı eğrilerine dikkat edilirse, hava yaşının en küçük değerleri beklendiği üzere giriş menfezi boyunca elde edildiği bununla beraber akım çizgileri ile uyumlu olacak şekilde sağ duvardan çıkış menfezi yüksekliğine kadar olan akım bölgesinde hava yaşının arttığı görülmektedir. Akım çizgilerine ve hava yaşı eğrilerine göre ölü bölgeler olarak tanımlayacağımız odanın sol duvar yakınında hava yaşı en yüksek değeri almaktadır. Hava hızının artışı ile beraber tüm akış alanı için hava yaşında bir iyileşme gözlenmektedir.

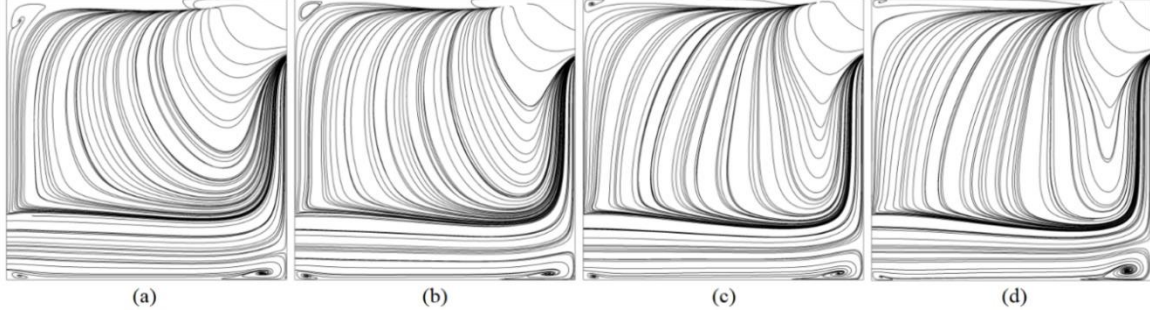
#### 3.3. Konsantrasyon Dağılımı (Concentration Distribution)

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

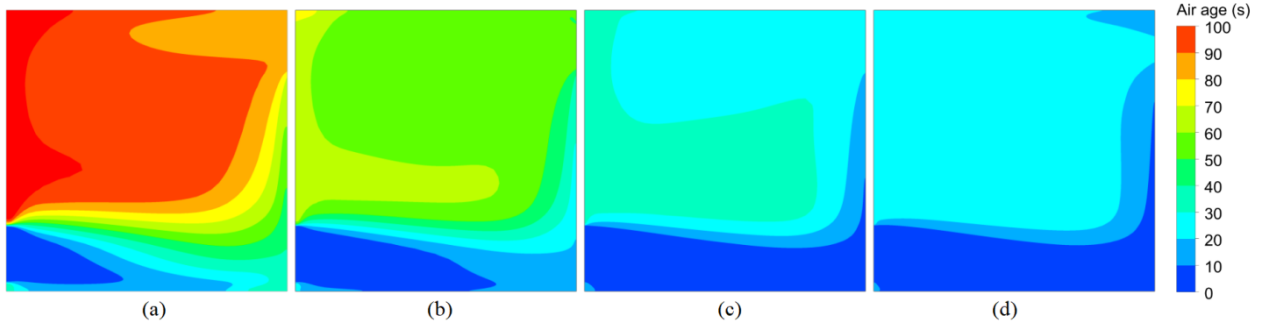
Şekil 7 ve 8' de sırasıyla, oda orta noktasından ve sağ duvar yakınlığından partikül salınımı olması durumlarında oda orta düzleminde elde edilen eş konsantrasyon eğrileri verilmektedir. Konsantrasyon değerleri Re=1520 için hava debisi başına düşen konsantrasyon salınım değerine göre normalize edilmiştir. Her iki durumda da, giriş boyunca temiz hava

sebebi ile partikül bulunmayan bir bölge oluştuğu görülmektedir. Mahalin geri kalanında ise, en düşük HDK değerlerinde, konsantrasyon değerlerinin yüksek olduğu artan hava hızı ile beraber kirleticilerin daha iyi bir şekilde uzaklaştırıldıkları ifade edilebilir. Bu noktada, ana akış hattı üzerinde bulunan kirletici durumu için artan

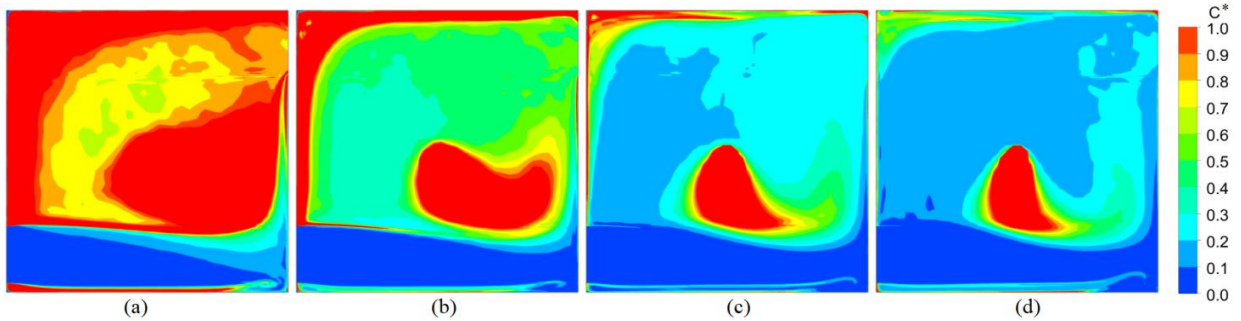
HDK ile seyrelmenin daha iyi gerçekleştiği ayrıca yine en düşük HDK değerinde kirleticinin orta noktada bulunduğu duruma göre daha düşük bir konsantrasyon elde edildiği görülmektedir.



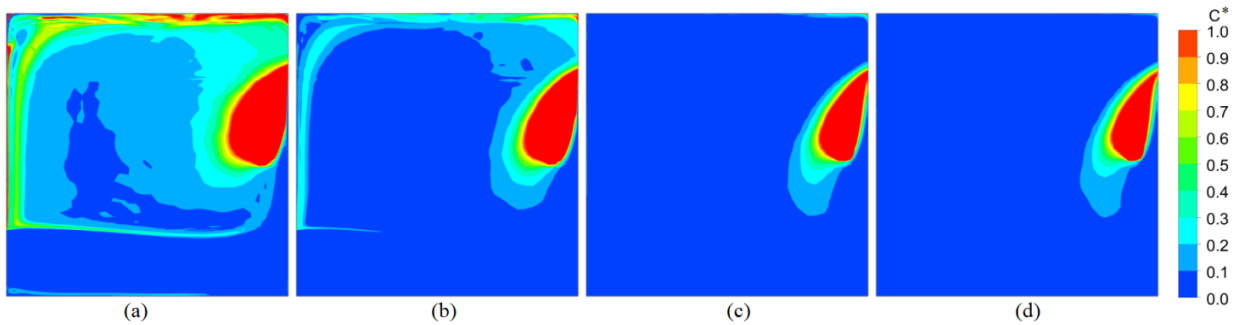
Şekil 5. Farklı HDK değerlerinde elde edilen akım çizgileri (Streamlines for different air change rate values)



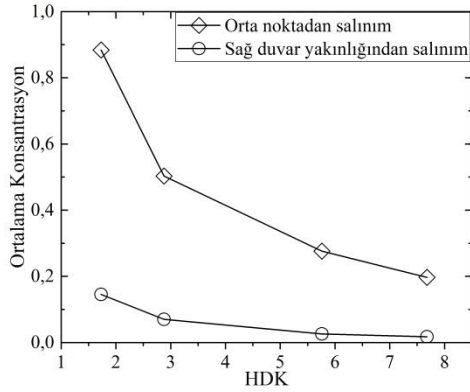
Şekil 6. Farklı HDK değerlerinde elde edilen hava yaşı dağılımları (Age of air values for different air change rates)



Şekil 7. Orta noktadan partikül salınımı durumunda konsantrasyon dağılımı (Concentration distribution in case of contaminant release from the mid point)



Şekil 8. Ana akış bölgesinden partikül salınımı durumunda konsantrasyon dağılımı (Concentration distribution in case of particle release from the main flow region)



**Şekil 9.** Farklı kirletici kaynak durumları için ortalama konsantrasyon değerleri (Average concentration values of the room for different release cases)

Her iki kirletici salınım konumu için, oda içi ortalama konsantrasyon değerlerinin artan HDK'ye bağlı değişimi Şekil 9' da verilmektedir. Orta noktadan salınım durumu için en düşük HDK değerinde en yüksek konsantrasyon miktarına ulaşılmaktadır. Artan HDK ile beraber yüksek bir düşüş eğilimi gözlenmekte ve en yüksek HDK değerinde ilk konsantrasyon değerine oranla yaklaşık % 75 oranında bir iyileşme elde edilmektedir. Bu orana rağmen, orta noktadan kirletici salınımında hiçbir HDK değerinde sağ duvar yakınından kirletici salınımı durumunda elde edilen ortalama konsantrasyon değerlerine ulaşamadığı vurgulanmalıdır. Sağ duvar yakınından kirletici salınımı durumunda ise ortalama konsantrasyon miktarındaki azalmanın ilk salınım durumuna göre oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Her bir HDK değerinde, farklı kirletici kaynak konumlarına bağlı olarak elde edilen ortalama konsantrasyon değerleri karşılaştırıldığında ise aradaki farkın 6 ila 12 kat arasında değiştiği anlaşılmaktadır.

## 6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, HDK'nın hava ve kirletici dağılımı üzerindeki etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Dört farklı HDK değeri ve iki farklı kirletici kaynak konumu için kapsamlı analizler yapılmıştır. Sonuçlar akım çizimleri, hava yaşı ve kirletici dağılımı üzerinden irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlar özet halinde aşağıda verilmektedir.

- Akım çizimleri artan HDK' dan bağımsız olarak benzer dağılımlar sergilemektedir.
- Hava yaşı artan HDK ile azalmaktadır.
- Kirletici dağılımları, kirletici kaynak konumu ve HDK değerine bağlı olarak tamamen farklı dağılımlar sergilemektedirler.
- Genel karakter olarak, artan HDK değeri ile ortalama konsantrasyon miktarı azalsa da azalma oranı ana akış bölgesi içerisinde yer alan kirletici durumunda sınırlı bir seviyede kalmakta diğer bölgelerde yer alan kirletici kaynakları durumunda ise daha belirgin olmaktadır.

- Bir havalandırma tasarımı ele alınırken kirletici kaynak noktasının ana akış bölgesi içinde yer alması veya akışın kaynak bölgesini içine alacak şekilde kurgulanması en iyi iç hava kalitesini sağlaması açısından önerilebilir.

## SEMBOLLER (SYMBOL)

### Kısaltmalar (Abbreviations)

|      |                                 |
|------|---------------------------------|
| HAD  | Hesaplamalı akışkanlar dinamiği |
| HEPA | High efficiency particulate air |
| HDK  | Hava değişim katsayısı          |
| PSL  | Polystyrene latex               |

### Latin harfleri (Latin letters)

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ | Türbülans model sabitleri                                |
| $C_C$                                | Cunningham düzeltme faktörü                              |
| $C_\mu$                              | Türbülans model sabiti                                   |
| $d_p$                                | Partikül çapı (m)  |
| $F_a$                                | Partikül kütlesi başına ek kuvvetler (m/s <sup>2</sup> ) |
| $g$                                  | Yer çekimi ivmesi (m/s <sup>2</sup> )                    |
| $h$                                  | Menfez boyutu (m)  |
| $k$                                  | Türbülans kinetik enerjisi (J/kg)                        |
| $G$                                  | Türbülans modelindeki ek terimler                        |
| $Re$                                 | Reynold sayısı ( $= (u_0 h) / \nu$ )                     |
| $S_\varphi$                          | Kaynak terim   |
| $t$                                  | Zaman (s)  |
| $u$                                  | Akışkan hızı (m/s)                                       |
| $u_0$                                | Giriş menfezi üfleme hızı (m/s)                          |
| $u_p$                                | Partikül hızı (m/s)                                      |
| $u', v', w'$                         | Çalkantı hızları (m/s)                                   |

### Yunan Harfleri (Greek letters)

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| $\varepsilon$                  | Türbülans yutulma oranı (m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ) |
| $\varphi$                      | Genel değişken  |
| $\mu$                          | Dinamik viskozite (kg/ms)                                 |
| $\xi$                          | Normal dağılımlı rastgele bir sayı                        |
| $\rho$                         | Akışkan yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )                    |
| $\rho_p$                       | Partikül yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )                   |
| $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ | Model sabitleri   |
| $\Gamma_\varphi$               | Difüzyon katsayısı  |

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma TÜBİTAK 117M488 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK' a teşekkür ederiz.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.



**YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)**

**Yunus Emre ÇETİN:** Deneysel ve sayısal çalışmalar, sonuçların analizi, ilk taslak metin.

**Mete AVCI:** Taslağın revizyonu.

**Orhan AYDIN:** Taslağın revizyonu.

**ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)**

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Jones A.P., "Indoor air quality and health", *Atmospheric Environment*, 33: 4535–4564, (1999).
- [2] Pope C.A. ve Dockery D.W., "Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect", *Journal of the Air and Waste Management Association*, 56: 709–742, (2006).
- [3] Thurston G.D., Burnett R.T., Turner M.C., Shi Y., Krewski D., Lall R., Ito K., Jerrett M., Gapstur S.M., Ryan Diver W. ve Arden Pope C., "Ischemic heart disease mortality and long-term exposure to source-related components of U.S. fine particle air pollution", *Environmental Health Perspectives*, 124: 785–794, (2016).
- [4] Kircher K., Shi X., Patil S. ve Zhang K.M., "Cleanroom energy efficiency strategies: Modeling and simulation", *Energy and Buildings*, 42: 282–289, (2010).
- [5] Wang X., Zhang Y., Zhao L.Y. ve Riskowski G.L., "Effect of ventilation rate on dust spatial distribution in a mechanically ventilated airspace", *Transactions of the ASAE*, 43: 1877–1884, (2000).
- [6] Jin M., Memarzadeh F., Lee K. ve Chen Q., "Experimental study of ventilation performance in laboratories with chemical spills", *Building and Environment*, 57: 327–335, (2012).
- [7] Memarzadeh F. ve Xu W., "Role of air changes per hour (ACH) in possible transmission of airborne infections", *Building Simulation*, 5: 15–28, (2012).
- [8] Faulkner W.B., Memarzadeh F., Riskowski G., Hamilton K., Chang C.Z. ve Chang J.R., "Particulate concentrations within a reduced-scale room operated at various air exchange rates", *Building and Environment*, 65: 71–80, (2013).
- [9] Faulkner W.B., Memarzadeh F., Riskowski G., A. Kalbasi A. ve Ching-Zu Chang A., "Effects of air exchange rate, particle size and injection place on particle concentrations within a reduced-scale room", *Building and Environment*, 92: 246–255, (2015).
- [10] Bulut H., Havalandırma ve İç Hava Kalitesi Açısından CO2 Miktarının Analizi, *X.Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Bildiriler Kitabı*, 1679–1689, (2011).
- [11] Bas E., "Indoor Air Quality in the Building Environment", Business News Pub Co, (1993).
- [12] Posner J.D., Buchanan C.R. ve Dunn-Rankin D., "Measurement and prediction of indoor air flow in a model room", *Energy and Buildings*, 35: 515–526, (2003).
- [13] Zhang Z., Zhang W., Zhai Z.J. ve Chen Q., "Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD: Part 2—comparison with experimental data from literature", *HVAC and R Research*, 13: 871–886, (2007).
- [14] ANSYS Inc, "Ansys Fluent Theory Guide", Canonsburg, PA, (2013).
- [15] Hinds W.C., "Aerosol Technology: Properties, Behaviour, and Measurements of Airborne Particles", 2nd ed., John Wiley & Sons Inc., (1999).
- [16] Awbi H., "Ventilation of buildings", 2nd ed., Spon press, London, (2003).
- [17] Nielsen P.V., "Lecture Notes on Scale-Model Experiments", (1999). [http://vbn.aau.dk/en/publications/lecture-notes-on-scalemodel-experiments\(d5ffe240-a869-11da-8341-000ea68e967b\).html](http://vbn.aau.dk/en/publications/lecture-notes-on-scalemodel-experiments(d5ffe240-a869-11da-8341-000ea68e967b).html)
- [18] Mundt E., Mathisen H., Nielsen P. ve Moser A., "REHVA Guidebook No. 2, Ventilation effectiveness", REHVA, Brussels, (2004).