



Numerical investigation of an air cleaning device performance

Muhsin Kılıç^{1*}, Mustafa Mutlu², İsmail Hakkı Saldamlı¹

¹Bursa Uludağ University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Nilüfer, 16059, Bursa, Turkey

²Bursa Uludağ University, Vocational School of Yenişehir İbrahim Orhan, Yenişehir, 16900, Bursa, Turkey

Highlights:

- Performance evaluation of an air cleaning device
- Numerical determination of clean air delivery rate and air age
- Effect of supply air flow rates and angles on the air cleaning performance

Keywords:

- Clean air delivery rate (CADR)
- Air age
- Air cleaning device
- Air purifier
- CFD

Article Info:

Research Article
Received: 13.06.2021
Accepted: 26.11.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.951560

Acknowledgement:

This study was supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK) under project number 218M604. The authors thank TÜBİTAK for their support.

Correspondence:

Author: Muhsin Kılıç
e-mail: mkilic@uludag.edu.tr
phone: +90 533 562 5250

Graphical/Tabular Abstract

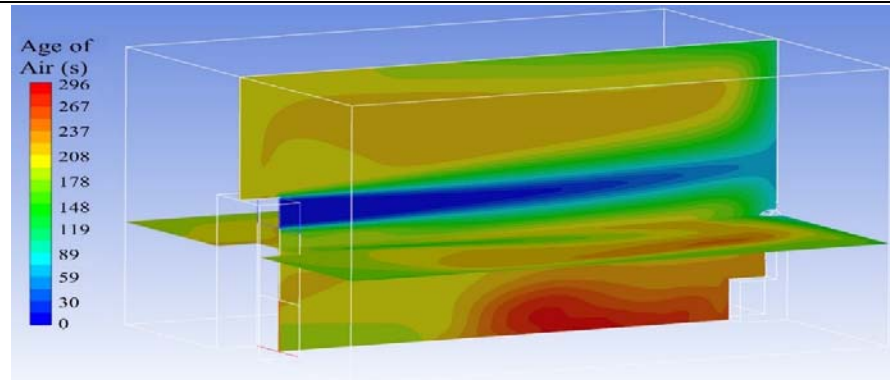


Figure A. Air age distributions in the room for the case of 8,64 m³/min flow rate and 0° blowing angle

Purpose: This study aims to evaluate the air cleaning performance of an air-cleaning device in a room for different operating conditions.

Theory and Methods:

In the calculations, turbulent flow, temperature distribution and natural convection effects were considered with the RNG k-ε model. Three different air blowing rates and three different blowing angles of the air cleaner were considered. In addition, depending on the device's operating conditions, the time-dependent concentration change specified and CADR values of the air cleaning device were calculated by the discrete phase model (DPM) approach. Randomly injected particles were tracked into the indoor air. Considering that droplets in the environment are effective in virus transport, particle sizes of 10 μm in diameter were chosen to determine the movement of droplets in the media.

Results:

In the case of a low flow rate, the air age is high in the circulation region formed in the middle of the room. The increased blowing angle reduces the air age in the room in all cases and provides a more homogeneous distribution. At a high flow rate (8,64 m³/min), the decrease from 100% concentration to 10% concentration at 0°, 30° and 45° blowing angles occurs in 6 minutes, 5 minutes and about 4 minutes, respectively. It can be said that the air cleaner has almost completely cleaned the room after 600 s. On the other hand, it was observed that the most critical area in the room was the regions close to the floor.

Conclusion:

It has been observed that, in addition to the air blowing flow rate of the air cleaning devices used in the closed spaces, the blowing angles also significantly affect the air movement in the volume and accordingly the pollutant or particle movement. It can be concluded that increasing the air blowing flow rate increases the device performance considerably. Air age is an important performance indicator in determining the performance of air cleaners. Clean air delivery rate (CADR) is an important parameter to determine the air cleaning device performance in capturing pollutants or particles in the environment.



Hava temizleme cihazının performansının sayısal incelenmesi

Muhsin Kılıç^{1*}, Mustafa Mutlu², İsmail Hakkı Saldamlı¹

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Nilüfer, 16059, Bursa, Türkiye

²Bursa Uludağ Üniversitesi, Yenişehir İbrahim Orhan Meslek Yüksekokulu, Yenişehir, 16900, Bursa, Türkiye

ÖNEÇİKANLAR

- Bir hava temizleme cihazının performansının incelenmesi
- Temiz hava dağıtım oranının ve hava yaşının sayısal olarak belirlenmesi
- Üfleme debisi ve açısının hava temizleme performansı üzerindeki etkisi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 13.06.2021

Kabul: 26.11.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.951560

Anahtar Kelimeler:

Temiz hava dağıtım oranı
(CADR),

hava yaşı,

hava temizleme cihazı,

hava temizleyici,

HAD

ÖZ

Bu çalışmada içinde oturan insan olan bir odanın havasının temizlenmesinde kullanılan taşınabilir hava temizleme cihazının performansı incelenmiştir. Cihazın temiz hava besleme menfezinden farklı üfleme açıları ve üfleme debilerinin cihazın temizleme performansına etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda hava yaşı ve temiz hava besleme oranı (CADR) parametreleri sayısal olarak hesaplanmıştır. Oda içerisine rastgele dağıtılan partiküllerin ayrık fazlar modeli (DPM) kullanılarak takibi yapılmış ve kirletici konsantrasyonlarının CADR ve hava yaşı ile olan ilişkisi irdelenmiştir. Cihaz üfleme debisi ile birlikte üfleme açısının da önemli bir parametre olduğu görülmüştür. Bununla birlikte hava yaşı yaklaşımının hava temizleme cihazlarının performansını belirlemede kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Hava temizleme cihazının ortamdaki partiküllerin yarısından çoğunu tuttuğu, geri kalan partiküllerin ise odanın diğer yüzeyleri tarafından tutulduğu bulunmuştur.

Numerical investigation of an air cleaning device performance

HIGHLIGHTS

- Performance evaluation of an air cleaning device
- Numerical determination of clean air delivery rate and air age
- Effect of supply air flow rates and angles on the air cleaning performance

Article Info

Research Article

Received: 13.06.2021

Accepted: 26.11.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.951560

Keywords:

Clean air delivery rate
(CADR),

air age,

air cleaning device,

air purifier,

CFD

ABSTRACT

In this study, the performance of a portable air cleaner, which is used to clean the air of a room with a person sitting in it, was investigated. The effects of different blowing angles and flow rates from the air supply vent on the device cleaning performance were investigated. In this context, air age and clean air delivery rate (CADR) parameters were calculated numerically. Randomly distributed particles in the room were tracked using the discrete phase model (DPM) and the relationship of pollutant concentrations with CADR and air age was examined. It has been seen that the blowing angle is an important parameter along with the flow rate. Moreover, it was concluded that the air age approach can be used to determine the performance of air cleaning devices. It has been found that the air cleaning device capture more than half of the particles in the environment, while the remaining particles are captured by other room surfaces.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Evde, iş yerinde kendimizi iyi hissetmemiz ve sağlığımız için temiz hava çok önemlidir. Bununla birlikte insanoğlu olarak yaşam süresinin yaklaşık %90'unu kapalı ortamda geçirdiğimiz için, iç hava kalitesi insan sağlığı ile yakından ilgilidir [1, 2]. Bu yüzden iç ortam havasının temiz olması gerekmektedir. İç ortam havasında bulunan kirletici gazlar ve toz gibi küçük partiküller insan sağlığı için tehdit oluşturabilir [3-5]. Bazı araştırmalar havadaki partikül yoğunluğunun insan ölümleriyle ilişkili olduğunu göstermektedir [6, 7]. 2003 yılındaki ağır akut solunum yolu yetersizliği sendromu (SARS) bu hastalıklardan biridir, çeşitli virüs ve bakteri taşıyan küçük damlacıklar veya partiküller tarafından insana bulaşan salgın hastalıktır [8]. Bununla birlikte ilk defa 2012 yılında Suudi Arabistan'da tanımlanan orta doğu solunum sendromu korona virüsü (MERS-CoV) olarak adlandırılan hastalıkta hava yolu ile bulaşan ölümcül hastalıktır. Bunlara ek olarak Aralık 2019 tarihinde Çin'de meydana gelen COVID-19 son dönemde meydana gelen bu ölümcül hastalıklardan diğer bir tanesidir [9].

İç ortam havasını temizlemek için çeşitli yöntemler kullanılır. Bunlar; kirletici kaynakları ortadan kaldırmak [10], havalandırma oranını artırmak [11, 12] ve belirli bir alana hava temizleme cihazı koymaktır [13, 14]. Bu yöntemler iç ortam havasını temizler ve sağlığımız için uygun ortam sağlar. İç ortam hava kalitesi iyileştirme sıralamasında en iyi yöntem kirletici kaynakların ortamdaki uzaklaştırılması iken, havalandırma ikinci seçenek ve hava temizleyicilerin kullanımı da üçüncü seçenek olarak kabul edilmektedir. İç ortamda kirletici kaynaklardan biri de insanın kendisi olduğu için bu kirleticileri ortamdaki tamamen uzaklaştırmak mümkün değildir. Havalandırma yöntemlerinden biri olan kapı veya pencere açmak her zaman kullanılabilir bir yöntem olmayabilir. Çünkü havalandırma için açılan kapı veya pencere her zaman iç ortama temiz hava sağlamaz. Özellikle sanayi faaliyetlerinin yoğun olduğu bölgelerde iç ortam havası dış ortam havasından daha temiz olabilir. Bunun yanında havalandırma için açılan kapı veya pencere iç ortamdaki ısı konfor sıcaklığının kaybına da neden olabilir [15]. Bu yüzden hava temizleme cihazının kullanılması diğer yöntemlere göre daha avantajlıdır.

Son yıllarda hava temizleme cihazları ev ve iş yerleri gibi kapalı mekanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak hava temizleme cihazlarının ortam havasında bulunan çeşitli partiküller, uçucu organik bileşenler, çeşitli zararlı organizmalar ve maddelere karşı temizleme etkinliği ve performans değerleri, güvenilir deneysel veriler ve uygun laboratuvar tesislerinin olmaması nedeniyle bilinmemektedir [16]. Bu kapsamda insanların kullandığı kapalı ortamlarda kullanılan bu cihazlar ile ilgili yapılan her çalışma büyük önem taşımaktadır. Yapılan araştırmalar da, hava temizleyicinin kullanılan hacim içindeki konumunun, ortam içinde hava akışını etkileyen ve ortam havasında farklı

temizleme verimliliklerine yol açan ana parametre olduğunu göstermektedir [17]. Hava temizleme cihazlarının uygun bir konuma yerleştirilmesi cihazın verimini üç kata kadar yükseltebilir [14]. Ayrıca hava akışının yönü, üflenen havanın içindeki katı ve sıvı partiküllerin kontrollü bir şekilde dağılımı da cihazın verimini etkilemektedir [8]. Hava temizleme cihazının üfleme yönü yatay ve yukarı olduğunda fazla farklılık göstermez iken, üfleme yönünün aşağı doğru olmasına göre verimi daha yüksektir [13]. Bu parametreleri iyi bir şekilde anlamak için Jin vd. [18], bir hava temizleyicinin konumunun, akış hızının ve hava üfleme yönünün etkilerini sayısal olarak analiz etmiş, hava temizleyicinin üfleme hızının, hava içinde asılı bulunan parçacık konsantrasyonunu etkileyen önemli bir parametre olduğunu bulmuşlardır.

Hava temizleme cihazlarının performansını ölçmek için kullanılan farklı standartlar tanımlanmıştır. Bunlardan biri de temiz hava dağıtım oranıdır (CADR: Clean air delivery rate). CADR, hava temizleyici tarafından odaya verilen temiz havanın dağıtım oranıdır [19]. Hava temizleme cihazlarının etkinliğini ölçmek için, temiz hava dağıtım oranı çoğunlukla uluslararası bir metrik olarak kullanılır [20]. AHAM (Association of home appliance manufacturers) standardında CADR ölçüm yöntemi ve süreçleri tanımlanmıştır [21]. Temiz hava temizleme oranı (CADR) ölçüm yapılan oda içindeki parçacık ve kirleticilerin temizleme cihazının kullanılmasıyla hacimdeki kirletici konsantrasyonunun zamanla değişim oranına bağlı olarak belirlenmektedir. CADR değeri ne kadar yüksekse, iç ortam havasındaki kirleticilerin temizlenme oranı da o kadar yüksek olacaktır. 30 m³ bir hacim için ev aletleri üreticileri birliği (AHAM: Association of home appliance manufacturers) standardında hava temizleme cihazının üfleme debisi sınırı 10,8 m³/min olarak belirlenmiştir [21]. Bu sınırlamadan dolayı üfleme debisi değeri 10,8 m³/min'dan yüksek olan hava temizleme cihazları için 30 m³ hacime sahip test odasında performans testi gerçekleştirilemez. Bu nedenle Kore hava temizleme birliği (KACA: Korea air cleaning association) böyle yerlerde oda hacmini 30 m³'den 50 m³'e yükseltmiştir.

Hava temizleme cihazları için diğer bir parametre de hava yaşıdır (Age of air). Hava yaşı, cihazdan çıkan temizlenmiş havanın hacim içinde tanımlanmış bir noktaya ulaşması için geçen süredir [22, 23]. Hava yaşının yüksek olması, havanın istenilen bölgeye daha geç ulaşması anlamına gelir. Hava temizleme cihazlarından ortama üflenen temiz havanın üfleme menfezinden çıkışından sonraki hacim içinde hareketi ve cihazın emme bölgesine ulaşmasına kadar olan sürenin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Hava temizleme cihazlarında temiz havanın hacim içinde mümkün olduğunca iyi dağılmasının yanında hava yaşının düşük olması istenilen bir durumdur.

İnsanların kullandığı kapalı hacimlerde kullanılan portatif hava temizleme cihazlarının performanslarına yönelik sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmanın amacı içinde insan bulunan odanın havasının temizlenmesinde kullanılan

bir hava temizleme cihazının farklı çalışma koşullarında performansını hava yaşı ve CADR parametreleri kullanılarak değerlendirmektedir. Kapalı hacimdeki hava hızı dağılımı, hava yaşı ve CADR değerleri üç boyutlu hesaplamalı akışkanlar mekaniği (HAD) yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda oda içinde türbülanslı akış, sıcaklık dağılımı ve doğal taşınım etkileri göz önüne alınmıştır. Oda içinde insan ve hava temizleme cihazından kaynaklanan ısı üretimleri göz önüne alınmış, enerji denklemi de çözülerek oda içinde sıcaklık dağılımı ve doğal taşınım etkileri hesaplamalara dahil edilmiştir. Sayısal çalışmada, hava temizleme cihazının üç farklı hava debisi ve üç farklı üfleme açısı dikkate alınmıştır. Ayrıca cihazın çalışma koşullarına bağlı olarak ayrık faz modeli (DPM: Discrete Phase Model) yaklaşımıyla iç ortam havasına rastgele enjekte edilen parçacıkların zamana bağlı konsantrasyon değişimi ve CADR değerleri hesaplanmıştır. Virüs taşınmasında ortamdaki damlacıkların etkili olduğu göz önüne alınarak, partikül boyutları 10 µm çapında seçilmiştir. Farklı çalışma koşulları için bulunan sonuçlar karşılaştırılmış, tartışılmış ve yorumlanmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Çözüm Hacmi Geometrisi ve Matematiksel Modelleme (Solution Volume Geometry and Mathematical Modeling)

Bu çalışmada ele alınan geometri Chen vd. [13] tarafından kullanılan model olup odanın yüksekliği 2,7 m, genişliği 4 m ve derinliği 3,2 m'dir (Şekil 1a). Oda içine oturan bir mankeni bulunmakta ve bu mankenin tam karşısına hava temizleme cihazı konumlandırılmıştır. Hava temizleme cihazının yüksekliği 1,5 m, genişliği 0,6 m ve derinliği 0,3 m'dir. Cihazın hava emiş kısmının boyutları 0,6 m × 0,5 m ve üfleme kısmının boyutları ise 0,6 m × 0,3 m'dir (Şekil 1b).

Oda içindeki hız, basınç ve sıcaklık dağılımını bulabilmek için türbülanslı akış için üç boyutlu zaman-ortalama Navier-Stokes denklemleri (Eş. 1 ve Eş. 2), enerji denklemi (Eş. 3) ve türbülans denklemleri sonlu hacim yaklaşımıyla iteratif olarak çözümlenmiştir. Basınç hız ilişkisi için SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Türbülans modeli olarak RNG k-

ε türbülans modeli kullanılmıştır. Sayısal modellemede sürekli rejim için kütle, momentum ve enerjinin korunumu yasalarının uygulanmasıyla elde edilen korunum denklemleri sırasıyla Eş. 1, Eş. 2 ve Eş. 3 'te verilmiştir.

Kütlenin korunumu

$$\frac{\partial(\rho u_k)}{\partial x_k} = 0 \quad (1)$$

Eş. 1 de ρ akışkanın yoğunluğudur (kg/m^3), u_k (m/s) x_k yönünde hız bileşenidir.

Momentumun korunumu

$$\frac{\partial(\rho u_i u_k)}{\partial x_k} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + (\mu + \mu_t) \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k^2} + S_i \quad (2)$$

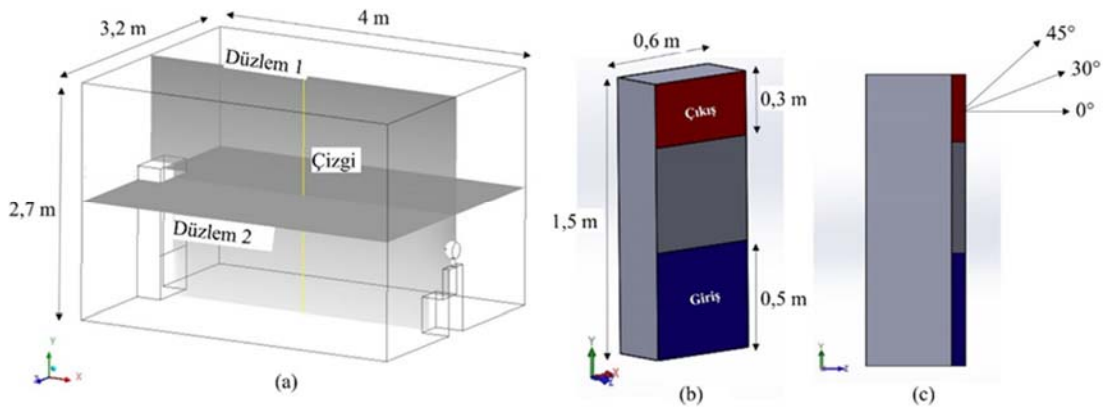
Eş. 2 de p (Pa) statik basınç, μ dinamik viskozite, μ_t türbülans viskozitesi, S_i birim hacim başına cisim kuvvetlerini (kaldırma ve diğer dış kuvvetleri gibi) temsil eden kaynak terimidir.

Enerjinin korunumu

$$\frac{\partial(\rho u_k c_p T)}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_k} \right) + S_k \quad (3)$$

Eş. 3 de c_p (J/kgK) havanın sabit basınçta özgül ısısı, λ (W/mK) havanın ısı iletim katsayısı, T (K) sıcaklık ve S hacimsel kaynak terimidir.

Türbülans modeli olarak iki denklem ile türbülansı modelleyen RNG k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Literatürde bu tür oda içi türbülanslı akışlarda RNG k-ε türbülans modelinin doğrulanmış iyi sonuçlar verdiği rapor edilmiştir [24, 25]. Bu model aynı zamanda otomobil kabini gibi küçük hacimli ortamlarda oluşan hava akışını ve ısıl konfor parametrelerini belirlemek için de başarılı sonuçlar vermişti [26-28]. RNG k-ε türbülans modeli hakkında detaylı bilgi kaynaklarda bulunabilir [29].



Şekil 1. (a) Oda, (b) cihaz boyutları ve (c) cihaz üfleme açıları ((a) Room, (b) device dimensions and (c) device blowing angles)

2.2. Hava Yaşı ve Temiz Hava Dağıtım Oranı (CADR) (Air Age and Clean Air Distribution Rate (CADR))

Bir hava temizleyicinin performansını belirlemede hava yaşı ve temiz hava dağıtım oranı (CADR) parametreleri kullanılmaktadır.

Hava yaşı, bir hava temizleme cihazından çıkan temizlenmiş havanın belirli bir noktaya ulaşması için geçen süredir. Ortalama hava yaşı hava temizleme cihazının farklı çalışma koşullarında iç ortam havasının temizlenme seviyelerini tahmin etmek için hesaplanır. Hava yaşı skalar bir büyüklük olarak hacim içinde çözülmesi gereklidir. Bu amaçla Eş. 1-Eş. 3 ile verilen korunum denklemleri ve türbülans denklemlerine ilave olarak hava yaşının değişken olduğu ilave bir denklem diğer değişkenlerle eş zamanlı çözülmektedir. FLUENT yazılımında kullanıcı tanımlı fonksiyonlar (UDF) yardımıyla ilave bir kod yazılarak hava yaşı denklemleri çözülmüş ve hava yaşı hesaplanmıştır. Hava yaşının hesabında kullanılan denklem Eş. 4'te verilmiştir [30, 31].

$$\text{div}(\rho u_k \tau - \Gamma_\tau \text{grad} \tau) = 1 \quad (4)$$

Burada τ (s) ortalama hava yaşı, Γ_τ difüzyon katsayısıdır.

Hava yaşı oda içindeki havanın hareketi hakkında bilgi vermesine rağmen hava içindeki kirletici ya da partikül konsantrasyonu ve hava hareketi ile etkileşimli olarak partikül hareketi hakkında bilgi vermemektedir. Bu nedenle partikül konsantrasyonu değişimi ve partikül hareketinin hesaplanmasında FLUENT yazılımı içinde yer alan Ayrık Faz Modelleme modülü (DPM: Discrete Phase Model) kullanılmıştır. Oda içinde hız, sıcaklık ve hava yaşı dağılımları sürekli rejimde çözümlendikten sonra bu veriler kullanılarak oda içindeki havaya hacim içinde rastgele olarak homojen şekilde beslenen partiküllerin odadaki hava hareketleri ile etkileşimli olarak konsantrasyon değişimi ve hareketleri geçici rejimde DPM ile hesaplanmıştır. Bu çalışmada çapı 10 μm ve oda havası ortalama sıcaklığında olan 15000 farklı noktadan partiküller, oda içerisine rastgele dağıtılmış olup partiküller üzerindeki kuvvet dengesi çözümlenerek partikül hareketleri belirlenmiştir. Partiküller üzerindeki genel kuvvet dengesi Eş. 5'te verilmiştir.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_t + F_b + F_s \quad (5)$$

Partiküllerin hareketinde, F_s , Safmann kaldırma, F_D , sürüklenme, F_t , termoforetik ve F_b , Brownian kuvvetlerinin etkili olduğu kabul edilmiştir. DPM ve partikül takibi hakkında detaylı bilgi için literatürdeki çalışmalara [32, 33] bakılabilir. Oda içindeki partikül azalma oranı k_e , Eş. 6 baz alınarak konsantrasyondaki azalmanın doğrusal regresyonu ile bulunmuştur (Eş. 7). Bu eşitliklerde $t=0$ anındaki konsantrasyon değeri C_i , herhangi bir t anındaki konsantrasyon ise C_t , kullanılan veri sayısı da n ile gösterilmiştir. k_e 'nin belirlenmesi ile ilgili detaylı bilgi AHAM standardında bulunmaktadır [21].

$$C_t = C_i e^{-k_e t} \quad (6)$$

$$k_e = \frac{S_{xx}}{S_{xy}} \quad (7)$$

Eşitlik 7 de yer alan S_{xx} ve S_{xy} standard sapma değerleri Eş. 8 ve Eş. 9 ile hesaplanmıştır:

$$S_{xy} = \sum_1^n t_i \ln C_{ti} - (1/n) \left(\sum_1^n t_i \right) \left(\sum_1^n \ln C_{ti} \right) \quad (8)$$

$$S_{xx} = \sum_1^n (t_i)^2 - (1/n) \left(\sum_1^n t_i \right)^2 \quad (9)$$

Temiz hava dağıtım oranı (CADR) (m^3/min) Eş. 10 ile hesaplanmaktadır [21]:

$$\text{CADR} = V(k_e - k_n) \quad (10)$$

Burada V test odasının hacmidir (m^3), k_e hava temizleme cihazının çalışması sırasındaki partikül azalma oranıdır ve k_n doğal azalma oranıdır. Küpper vd. [19] k_n değeri için 70 m^3 hacmindeki odada 15 farklı ölçüm yapmıştır. Bu ölçümler çerçevesinde k_n değeri ortalama 0,00531 1/min olarak alınmıştır. Shiue vd. [34] tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise PM2.5 için k_n değeri 0,0057 1/min olarak ölçülmüş, çeşitli VOC'leri içeren Gunschera vd. [35]'nin çalışmasında ise k_n 0,00667 1/min olarak alınmıştır. Bu çalışmada kullanılan 0,00531 1/min değeri literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir. k_e değeri partikül azalma oranı olup oda içerisindeki hız ve sıcaklık dağılımı belirlendikten sonra DPM modeli kullanılarak zamana bağlı partikül takibi yapıldıktan sonra hesaplanmıştır.

2.3. Ağdan Bağımsızlık ve Doğrulama (Network Independence and Verification)

Ağdan bağımsızlık için 4×10^5 , 1×10^6 ve $1,6 \times 10^6$ olmak üzere üç farklı eleman sayısına sahip ağ yapısı kullanılmıştır. Şekil 2'de üç farklı ağ yapısı kullanılarak Şekil 1a'daki düşey çizgi boyunca hesaplanan hız değerleri Chen vd. [13] tarafından yapılan çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 2'de görüldüğü 1 ve 1,6 milyon elemana sahip ağ yapıları ile elde edilen sonuçlar birbirleriyle uyum içindedirler. Ayrıca hesaplanan hız değerleri Chen vd. [13] 'nın sonuçlarıyla oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmektedir. Bu nedenle Şekil 2'de görüldüğü üzere 1 milyon eleman sayısına sahip ağ yapısının literatürdeki veriler ile uyumlu olduğu ve yeterli hassasiyette sonuç verdiği değerlendirilmiştir. Bunlara ilave olarak bu çalışmada kullanılan HAD modeli yazarlara ait yayınlanmış önceki çalışmalarda, [24, 25, 32, 33], başarıyla doğrulanmıştır. Sonuç olarak hesaplamalarda bir milyon ağ yapısının ağdan bağımsız sonuçlar için yeterli olduğu ve HAD modelinin doğrulandığı kabul edilmiştir. Bu çalışma kapsamındaki diğer hesaplamalar bir milyon ağ yapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

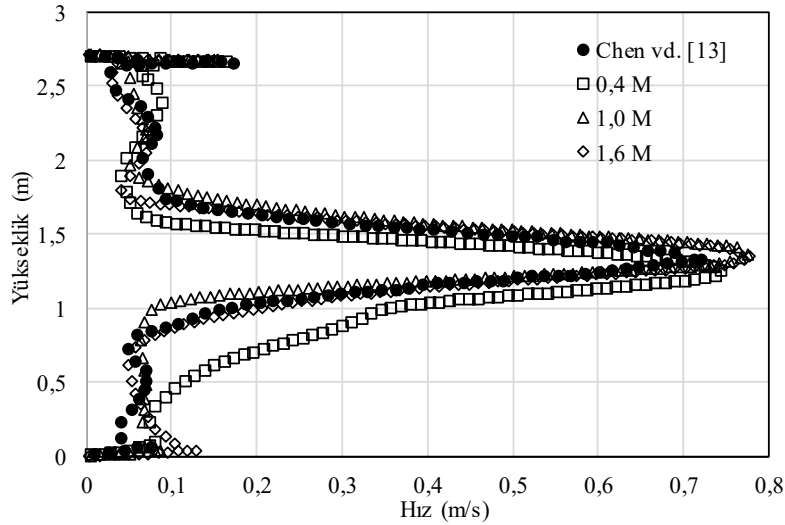
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Oda içindeki hız, basınç, sıcaklık ve hava yaşı dağılımları farklı çalışma koşullarında elde edilmiştir. Hava temizleme cihazı çalışma koşulu olarak 0° , 30° ve 45° olmak üzere üç farklı üfleme açısı (Şekil 1c) ve $2,16 \text{ m}^3/\text{min}$, $4,32 \text{ m}^3/\text{min}$ ve $8,64 \text{ m}^3/\text{min}$ olmak üzere üç farklı üfleme debisi kullanılmıştır. Üfleme debileri üfleme menfezine normal doğrultuda sırasıyla $0,2 \text{ m/s}$, $0,4 \text{ m/s}$ ve $0,8 \text{ m/s}$ olmak üzere üç farklı üfleme hızına karşılık gelmektedir. Hava yaşı üfleme alanında sıfır olarak alınmış, diğer tüm yüzeylerde yüzeye normal gradyan sıfır olarak kabul edilmiştir. Hava temizleme cihazında filtreleme ve cihaz fan motorunun ürettiği ısının cihazdan geçen havaya aktarıldığı kabulüyle üfleme havası sıcaklığı 300 K olarak alınmıştır. Oda, hava temizleme cihazı ve vücut üzerinde sabit yüzey sıcaklığı sınır şartı tanımlanmıştır. Oda duvarları, hava temizleme cihazı ve insan modelinin sıcaklıkları sırasıyla 298 K , 304 K ve 308 K alınmıştır. Diğer katı yüzeylerde adyabatik yüzey sınır şartı kabul edilmiştir.

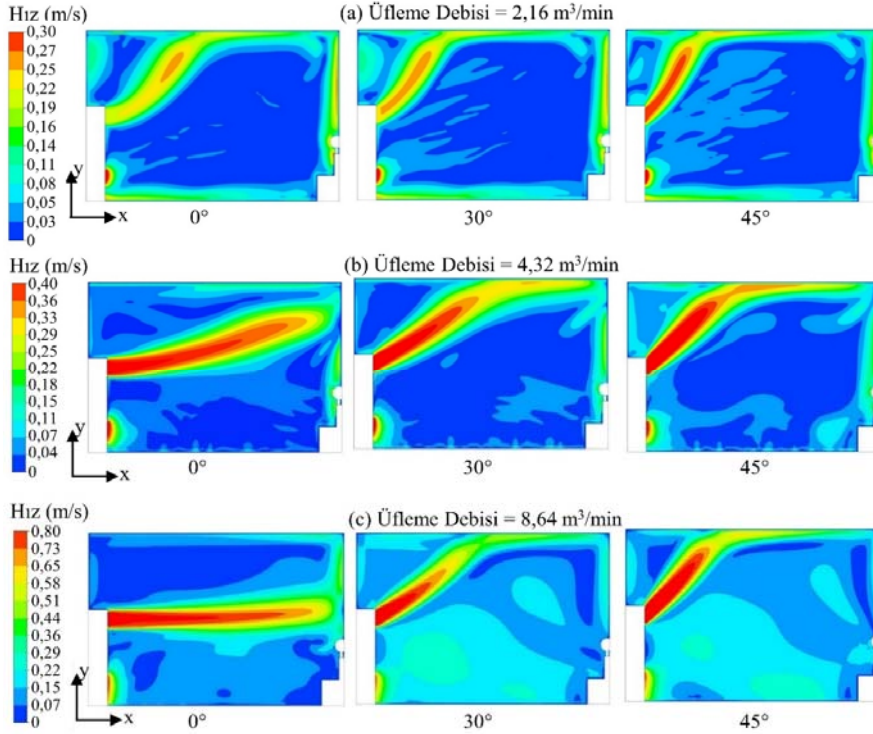
Hesaplanan her bir durum için oda içinde hız, sıcaklık ve hava yaşı dağılımları sürekli rejimde çözümlendikten sonra elde edilen sonuçlar kullanılarak partikül hareketi ve konsantrasyonu geçici rejimde DPM ile hesaplanmıştır. DPM hesaplamaları başlangıcında (sıfır anında) oda hava hacmine $10 \mu\text{m}$ çapında, 1550 kg/m^3 yoğunluğunda ve oda havası ortalama sıcaklığında olan partiküller rastgele olarak belirlenmiş 15000 farklı noktadan $0,001$ saniye içinde beslenmiştir. Hava hacmi içine beslenen partiküllerin odadaki hava hareketleri ile etkileşimli olarak hareketleri ve hacimdeki konsantrasyon değişimi toplam 23 dakikalık süre boyunca 1 saniyelik zaman adımları ile hesaplanmıştır. Ele alınan her bir çalışma koşulu için elde edilen zamana bağlı konsantrasyon değişimleri temiz hava besleme oranı (CADR) değerlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Şekil 3'de farklı temiz hava besleme debileri için oda içinde

düzlem 1'deki hız dağılımları gösterilmektedir. $2,16 \text{ m}^3/\text{min}$, $4,32 \text{ m}^3/\text{min}$ ve $8,64 \text{ m}^3/\text{min}$ üfleme hava debileri, 0° , 30° ve 45° olmak üzere üç farklı üfleme açısı ile oda içine iletilmektedir. Cihaz üfleme debisinin oda içindeki hava sirkülasyonunu değiştirdiği açık bir şekilde görülmektedir. Düşük üfleme hızlarında üflenen hava demeti üzerinde doğal taşınım etkileri görülmektedir, doğal taşınım etkisi insan vücudu üzerinde de görülmektedir. Farklı üfleme debisi yanı sıra üfleme açısı da oda içindeki hava hareketini etkilemektedir. Üfleme açısı 0° olduğunda yani hava çıkışı yatay durumda iken orta ve yüksek debilerde temizlenmiş hava insan modelinin bulunduğu konuma rahat bir şekilde ulaşmaktadır. Orta ve yüksek debilerde yatay olarak ilerleyen temizlenmiş havanın insan modeline ulaşması daha kısa mesafede olduğu gözlemlenmektedir. İnsan yüzey sıcaklığının ortam havasına göre daha yüksek olması nedeniyle vücut civarında doğal taşınım etkisiyle yukarı doğru bir hava hareketinin oluştuğu görülmektedir. İnsan etrafında hız değerlerinin $0,30 \text{ m/s}$ den daha küçük olduğu görülmektedir. Bu durum ısı konfor açısından olumsuz etki teşkil etmemektedir [36]. Açık arttığında ise hava temizleme cihazından çıkan havanın doğrudan insan modeline ulaşmadığı görülmektedir. Cihazdan çıkan havanın hızı arttıkça temizlenmiş hava oda içinde daha yüksek hızlara sahip olmakta ve yüksek sirkülasyon değerlerine sahip olarak daha fazla hacmi taramaktadır.

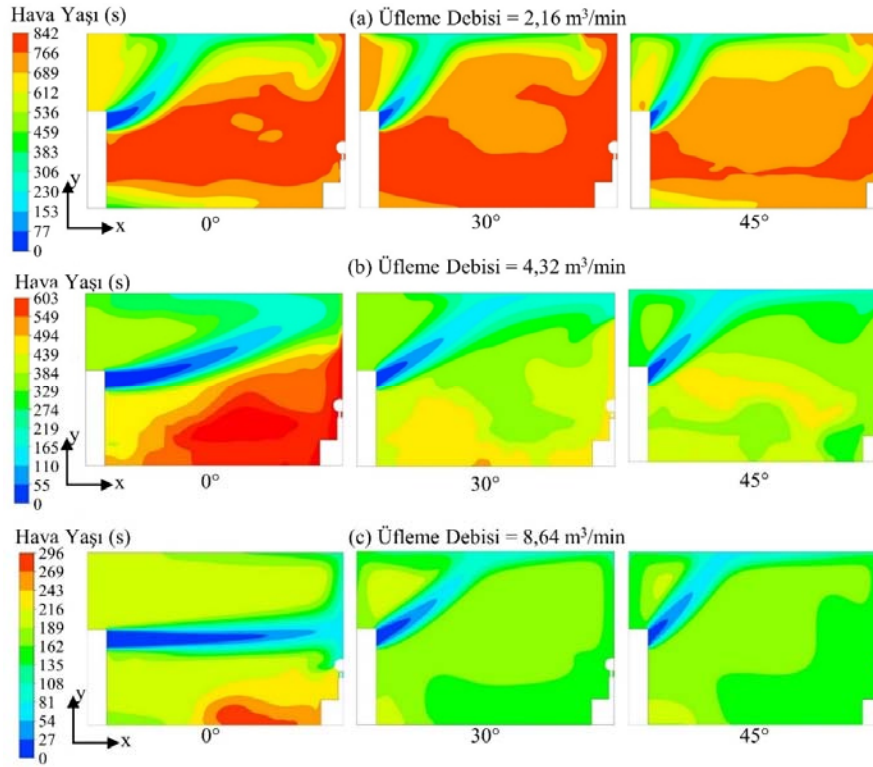
Şekil 4'de $2,16 \text{ m}^3/\text{min}$, $4,32 \text{ m}^3/\text{min}$ ve $8,64 \text{ m}^3/\text{min}$ üfleme debilerinde 0° , 30° ve 45° 'de üfleme açıları için oda içindeki alınan düzlem 1 yüzeyinde hesaplanan hava yaşı dağılımları gösterilmektedir. Farklı üfleme debi ve açıları için hava yaşı dağılımları değişkenlik göstermektedir. Her durum için hava yaşı, hava temizleme cihazının temiz hava üfleme noktalarında odanın orta kısmında oluşan sirkülasyon bölgesinde hava yaşı yüksek değerle almaktadır. Artan üfleme açısı bütün durumlarda oda içinde hava yaşı düşürmekte ve daha homojen bir dağılım sağlamaktadır.



Şekil 2. Farklı ağ yapısındaki hesaplama sonuçlarının Chen vd. [13] 'nin verileriyle karşılaştırılması
(Comparison of calculation results in different mesh structures with the data of Chen et al. [13])



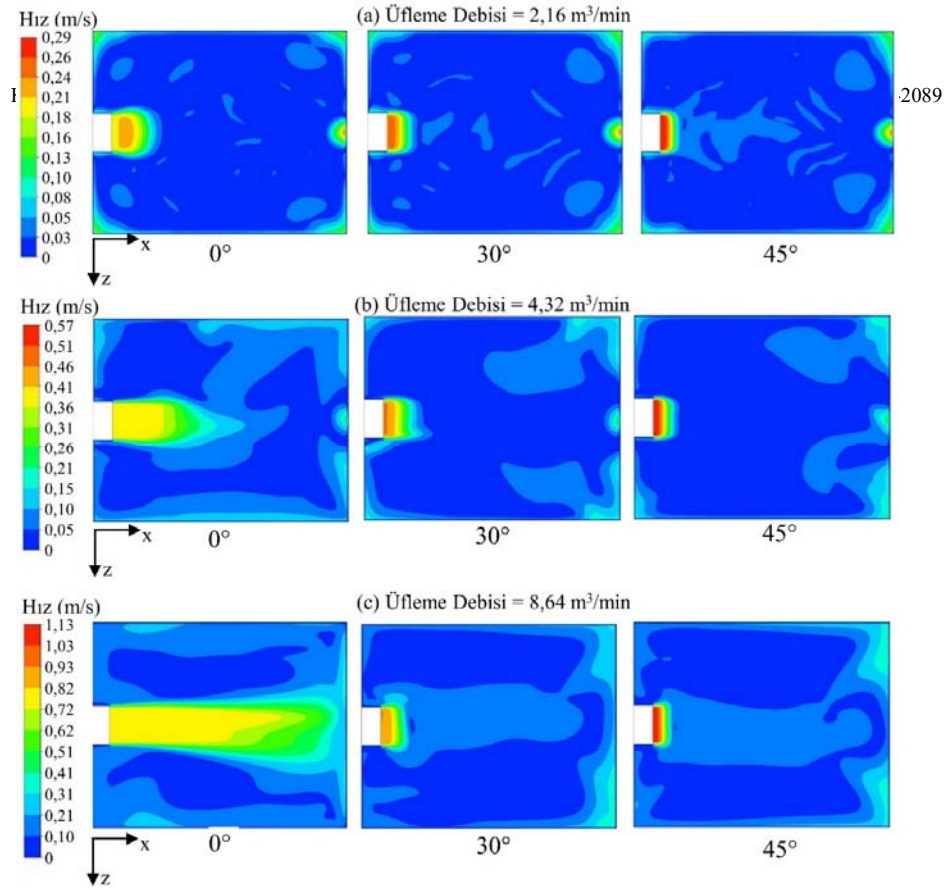
Şekil 3. Farklı temiz hava besleme debileri için oda içinde Düzlem 1 üzerinde hız dağılımları
(Velocity distributions in the room on Plane 1 by different air supply flow rates)



Şekil 4. Farklı temiz hava besleme debileri için oda içinde Düzlem 1 üzerinde hava yaşı dağılımları
(Air age distributions in the room on Plane 1 by different air supply flow rates)

Artan debi ve üfleme hızı hava yaşı değerlerini düşürmektedir ve oda içinde hava sirkülasyonunu

iyileştirmektedir. Şekil 5'de 2,16 m³/min, 4,32 m³/min ve 8,64 m³/min üfleme debilerinde 0°, 30° ve 45°'de üfleme



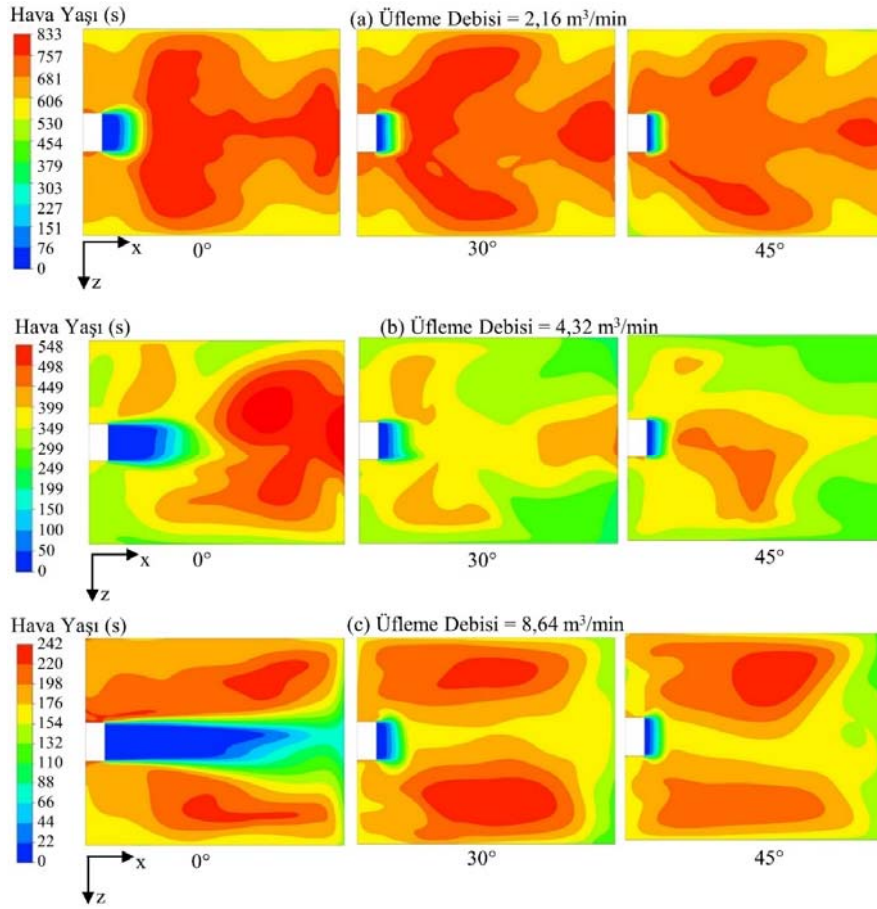
Şekil 5. Farklı temiz hava besleme debileri için oda içinde Düzlem 2 üzerinde hız dağılımları
(Velocity distributions in the room on Plane 2 by different air supply flow rates)

açıları için oda içindeki alınan düzlem 2 (yatay düzlem) yüzeyinde hesaplanan hava yaşı dağılımları gösterilmektedir. Hava dağılımı üfleme menfezine ve yatay üfleme doğrultusuna göre simetrik bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Üfleme açısı arttıkça bu düzlem üzerinde orta bölgede hava hızları azalmaktadır. 0°'de yatay yönde debiye bağlı hız değerlerinin büyüklükleri daha açık görülmektedir.

Şekil 6'da Düzlem 2 için hava yaşı dağılımları gösterilmektedir. 0°'de düşük debide ve 0,2 m/s hızda üflenen temiz hava, diğer dağılımlara göre hava temizleme cihazının üst ve alt bölgelerine daha geç ulaşmaktadır. Çünkü 0,2 m/s'deki düşük üfleme hızı oda içindeki hava hareketinin de yavaş olmasına neden olmaktadır bu nedenle hava yaşı değerleri diğer debilere göre oldukça düşüktür havanın sirkülasyonu yaklaşık olarak 17 dakikada almaktadır. Ancak şekil 6'da da görüldüğü gibi orta ve yüksek debilerde hava yaşı 4-7 dakika arasındadır. Yani debi ve hız faktörü hava yaşını yaklaşık olarak üç katlık bir oranda etkilemektedir. Artan açı değerlerinin bu düzlemde hava yaşını bir miktar iyileştirdiği söylenebilir. Burada insan modelinin olduğu kısımda (hava temizleme cihazının tam karşısı) hava yaşı 0°deki dağılımlarda diğer açılara göre daha fazladır. Bunun sebebi artan üfleme açısı havanın oda tavanına paralel gidip karşı duvar ve insan üzerinden çevrimini tamamlamasıdır ve oda merkezinde bir sirkülasyon hacmi oluşturmasıdır. Tablo 1'de model alınan oda için hesaplanan ortalama ve maksimum hava yaşı sonuçları verilmiştir. Farklı hız ve açılardaki hava yaşı sonuçları değişiklik göstermektedir. Üfleme debisi arttıkça oda içindeki ortalama ve maksimum hava yaşının önemli

miktarda küçüldüğü görülmektedir. Diğer taraftan, üfleme açısının artması genel olarak hava yaşını çok az miktarda iyileştirmektedir. Üfleme açısının 0° ve hava debisinin 2,16 (m³/min) olduğu durumda ortalama ve maksimum hava yaşı değerleri 661 s ve 847 s olarak en yüksek değerlere sahiptir. 176 s ve 243 s olarak en düşük ortalama hava yaşı değeri üfleme açısının 45° ve hava debisinin 8,64 (m³/min) olduğu durum olarak görülmektedir. Genel olarak artan hava üfleme debisi hava yaşını önemli derecede azaltmaktadır. Artan üfleme açısının ortalama hava yaşını oldukça az oranda küçültmekte olduğu görülmektedir.

Oda içerisine homojen dağıtılmış olan partiküllerin, oda içerisindeki konsantrasyonunun zamanla değişimi farklı çalışma koşulları için Şekil 7'de verilmiştir. Her üç üfleme açısında da yüksek besleme hava debisinde konsantrasyon azalma oranı diğer debilere göre önemli derecede yüksektir. Yüksek debide (8,64 m³/min) %100 konsantrasyon oranından %10 konsantrasyon oranına düşüş 0° üfleme açısında 6 dakika, 30° üfleme açısında yaklaşık 5 dakika ve 45° üfleme açısında yaklaşık 4 dakika olmaktadır. Yüksek debide %0 konsantrasyon oranına 0° üfleme açısında yaklaşık 15 dakika, 30° üfleme açısında yaklaşık 12 dakika ve 45° üfleme açısında yaklaşık 9 dakika olmaktadır. Tüm üfleme açısı değerlerinde düşük (2,16 m³/min) ve orta (4,32 m³/min) besleme debileri için konsantrasyon azalımı birbirine oldukça yakındır. Düşük ve orta debilerde %100 konsantrasyon oranından %10 konsantrasyon oranına düşüş 0° üfleme açısında yaklaşık 10 dakika, 30° üfleme açısında yaklaşık 9 dakika ve 45° üfleme açısında yaklaşık 9 dakika olmaktadır.



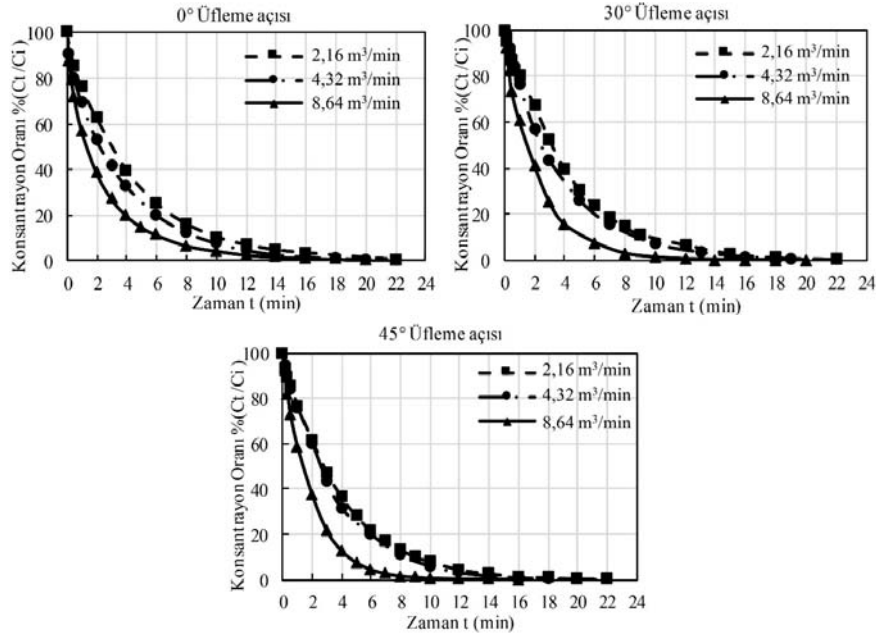
Şekil 6. Farklı temiz hava besleme debileri için oda içinde Düzlem 2 üzerinde hava yaşı dağılımları (Air age distributions in the room on Plane 2 by different air supply flow rates)

Tablo 1. Farklı üfleme açısı ve debiler için hesaplanan ortalama ve maksimum hava yaşı (s) değerleri (Mean and maximum Air Age values at different supply angles and flow rates (m^3/min))

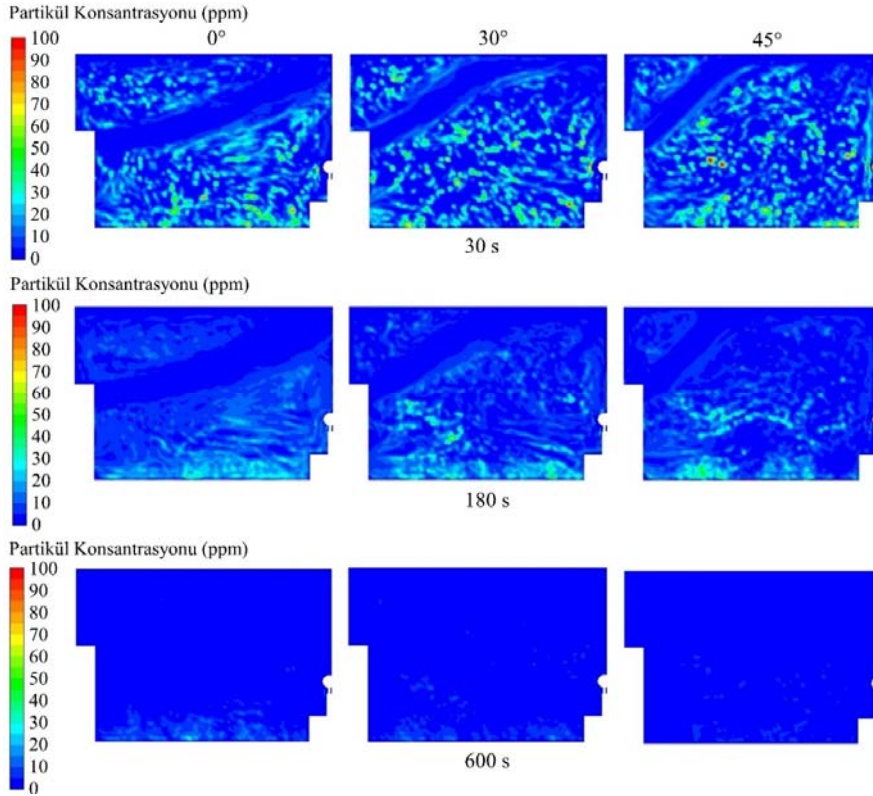
Üfleme Açısı	Üfleme Debisi (m^3/min)					
	2,16		4,32		8,64	
	Hava Yaşı (s)					
	Ortalama	Maksimum	Ortalama	Maksimum	Ortalama	Maksimum
0°	661	847	356	713	195	378
30°	658	844	344	521	181	252
45°	651	791	339	489	176	243

Oda içerisine homojen dağıtılmış olan partiküllerin, oda içerisindeki dağılımının zamanla değişimi Şekil 8’de verilmiştir. Hava temizleme cihazının 600 s sonunda odayı neredeyse tamamen temizlediği söylenebilir. Buna karşın oda içerisindeki en kritik bölgenin yere yakın kısımlar olduğu görülmüştür. Özellikle 0° üfleme açısında yerden yaklaşık 0,5 m yüksekliğe kadar olan kısımda partiküller 600 s sonunda bile halen bulunabilmektedir. Buradan üfleme açısının oda içerisindeki partikül dağılımı üzerinde etkili olduğu ve partiküllerin nerede yoğunlaşacağını üfleme açısı ile yakından ilişkili olduğu söylenebilir. Tablo 2’de üç farklı üfleme debisi ve üç farklı üfleme açısı olmak üzere Eş. 6-Eş. 9 kullanılarak hesaplanan k_c ve Eş. 10 kullanılarak hesaplanan CADR değerleri verilmiştir. Sonuçlara göre 45° üfleme açısı ve yüksek hava debisi olduğu durumda CADR

değeri 18,06 m^3/min ile en yüksek değere sahiptir. Ancak düşük debi ve 0°’lik açı ile ortama verildiğinde 7,80 m^3/min ile en düşük değere sahip olduğu görülmektedir. Ortam havası içindeki partiküllerin yakalanmasında ortamdaki hava hareketlerinin etkisinin oldukça önemli olduğu görülmektedir. Bu kapsamda partikül yakalanma değerlerinin Tablo 1 de verilen hava yaşı ile orantılı olduğu değerlendirilebilir. Bu sonuçların çalışmada ele alınan 10 μm çapındaki partiküller için olduğu vurgulanmalıdır. Farklı çap ve yoğunluktaki partiküllerin hava ile etkileşimlerinin farklı olabileceği göz önüne alınmalıdır. Ayrıca AHAM standardınca tanımlanan CADR değerlerinin modellenen (oda ve hava temizleme cihazı) tüm sistem için olduğuna dikkat edilmelidir. Tablo 3 bu çalışmada incelenen tüm çalışma koşullarında cihaz tarafından ve çözüm hacmi



Şekil 7. Farklı temiz hava besleme açıları için oda içinde partikül konsantrasyon oranının zamanla değişimi (Particle concentration ratio changes with time in the room by different air supply angles)



Şekil 8. Farklı temiz hava besleme açıları için oda içinde Düzlem 1 üzerinde partikül konsantrasyonlarının dağılımı (Particle concentration distributions in the room on Plane 1 by different air supply angles)

içindeki katı yüzeyler üzerinde yakalanan partiküllerin 22 dakikalık süre sonundaki oranlarını vermektedir. Bu çalışmada incelenen çalışma koşullarında hava temizleme cihazının %35,8 ila %51,9 oranında hacimdeki partikülleri

yakaladığı görülmektedir. Diğer partiküller katı yüzeyler üzerinde tutulmaktadır ve bunların yeniden ortam havasına karışma olasılığı mevcuttur. Tüm durumlarda hava temizleme cihazından sonra en fazla tavanda partiküllerin

Tablo 2. Farklı açı ve debilerde k_c (1/min) ve CADR değerleri (m^3/min) (k_c ve CADR values at different supply angles and flow rates (m^3/min))

Açı	Üfleme Debisi (m^3/min)					
	2,16		4,32		8,64	
	k_c (1/min)	CADR (m^3/min)	k_c (1/min)	CADR (m^3/min)	k_c (1/min)	CADR (m^3/min)
0°	0,231	7,80	0,275	9,32	0,356	12,12
30°	0,238	8,04	0,286	9,70	0,456	15,58
45°	0,259	8,77	0,290	9,84	0,528	18,06

Tablo 3. Partiküllerin hava temizleme cihazınca emilme ve yüzeylere tutunma oranları (Air cleaner intake and surface deposition ratios of the particles)

Debi (m^3/min)	Açı	Cihaz	Taban	Ön Duvar	Arka Duvar	Sol Duvar	Sağ Duvar	Tavan	İnsan	Cihaz Yüzeyi
2,16	0°	44,0%	0,0%	7,9%	11,2%	7,9%	8,8%	11,5%	5,2%	3,6%
	30°	44,6%	0,0%	7,9%	8,9%	8,6%	9,2%	11,7%	4,8%	4,2%
	45°	44,2%	0,0%	9,1%	8,0%	8,8%	8,7%	12,8%	4,5%	3,8%
4,32	0°	40,3%	0,0%	5,4%	16,2%	7,7%	11,1%	6,8%	10,7%	1,9%
	30°	44,0%	0,0%	6,8%	11,0%	7,6%	8,2%	12,2%	8,2%	1,9%
	45°	51,9%	0,0%	6,2%	6,8%	7,5%	6,2%	16,3%	2,6%	2,5%
8,64	0°	35,8%	0,0%	3,8%	12,5%	10,8%	12,0%	20,6%	3,1%	1,3%
	30°	49,2%	0,0%	5,1%	4,9%	8,9%	8,9%	19,9%	1,0%	2,1%
	45°	45,0%	0,0%	4,8%	3,7%	7,5%	10,5%	25,4%	0,6%	2,5%

yakalandığı görülmektedir. Gerek üfleme havasının açıldırılması ve gerekse doğal taşınım etkileri daha fazla partikülün tavan ile temasine neden olmaktadır ve dolayısıyla bu yüzey üzerinde tutunmaktadır. Diğer taraftan beklenenin aksine taban üzerinde ihmal edilebilecek düzeyde partikül yakalandığı görülmektedir. Bu durum cihazın emme hattının tabana yakın olması ve hava hareketinin taban yüzeyi üzerinde diğer bölgelere nazaran daha etkili olması olduğu değerlendirilebilir. Düşük ve orta üfleme debilerinde yüksek üfleme açısı değerlerinde hava temizleme cihazınca tutulan partikül oranı diğer açılara göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek hava debisinde hava hızlarının fazla olması ortam içinde partiküllerin saçılımını arttırdığı ve cihaz tarafından yakalanma oranının bundan etkilendiği görülmüştür.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada içinde oturan bir insan olan oda modellenmiş ve oluşturulan bu modelin tam karşısına hava temizleme cihazı yerleştirilmiştir. Sayısal olarak hava yaşı ve CADR değerlerinin hesaplanması için uygulanan model ve yöntem tanıtılmış ve modellenen bir hava temizleme cihazının farklı çalışma koşullarında performansını hava yaşı ve CADR parametreleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Hesaplamalarda oda içinde RNG k-ε modeli ile türbülanslı akış, sıcaklık dağılımı ve doğal taşınım etkileri göz önüne alınmıştır. Oda içinde insan ve hava temizleme cihazından kaynaklanan ısı üretimleri göz önüne alınmış, enerji denklemi de çözülerek oda içinde sıcaklık dağılımı ve doğal taşınım etkileri hesaplamalara dahil edilmiştir. Çalışmada, hava temizleme cihazının üç farklı hava üfleme debisi ve üç farklı üfleme açısı dikkate alınmıştır. Ayrıca cihazın çalışma koşullarına bağlı olarak ayrık faz modeli (DPM: Discrete

Phase Model) yaklaşımıyla iç ortam havasına rastgele enjekte edilen parçacıkların zamana bağlı konsantrasyon değişimi ve CADR değerleri hesaplanmıştır. Virüs taşınmasında ortamdaki damlacıkların etkili olduğu göz önüne alınarak, ortam içinde damlacıkların hareketini belirlemek için partikül boyutları 10 μm çapında seçilmiştir. Bu çerçevede yapılan analizler ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- İnsanların kullandığı kapalı hacimlerde kullanılan hava temizleme cihazlarının hava üfleme debisi ve hızlarının yanında üfleme açılarının da hacim içindeki hava hareketini ve buna bağlı olarak kirletici ya da partikül hareketini de önemli derecede etkilediği görülmüştür. Hava üfleme debisinin artmasının cihaz performansını önemli derecede arttırdığı görülmüştür. Ele alınan çalışmada seçilen üfleme debileri ve buna bağlı üfleme hızlarının insan konforunu etkilemeyecek düzeyde küçük (yaklaşık 0,3 m/s) olabileceği belirlenmiştir.
- Hacim içinde havanın hareketi, saçılımı ve oda içindeki kalış süresinin “hava yaşı” kullanılarak belirlenebileceği gösterilmiştir. Hava temizleme cihazlarının performansını belirlemede hava yaşının önemli bir performans göstergesi olduğu gösterilmiştir.
- Kirletici konsantrasyonu ve partiküllerin ortam havası ile etkileşiminin ayrık faz modeli (DPM) kullanılarak zamana bağlı tahmin edilebileceği gösterilmiştir.
- Temiz hava besleme oranının (CADR) hava temizleme cihazlarının ortamdaki kirletici ya da partiküllerin yakalanmasındaki performansını belirlemede önemli bir parametre olduğu gösterilmiştir.
- CADR değeri ve partikül yakalama değerlerinin artan üfleme debisi ile kuvvetli, artan üfleme açısı ile göreceli olarak daha zayıf bir orantıya sahip olduğu gösterilmiştir.

5. SİMGELER (SYMBOLS)

C_i	: Başlangıç anındaki konsantrasyon (ppm)
c_p	: Sabit basınçta özgül ısı (J/kgK)
C_t	: t anındaki konsantrasyon (ppm)
k_e	: Hava temizleme cihazının çalışması sırasındaki partikül azalma oranı (1/min)
k_n	: Doğal azalma oranı (1/min)
p	: Statik basınç (Pa)
S	: Kaynak terimi
T	: Sıcaklık (K)
t	: Zaman (min)
u	: Akışkan hızı (m/s)
V	: Odanın hacmi (m ³)
x_k	: Koordinat bileşeni

5.1. Kısaltmalar (Abbreviations)

AHAM	: Ev aletleri üreticileri birliği (Association of home appliance manufacturers)
CADR	: Taze hava sağlama oranı (Clean air delivery rate)
DPM	: Ayrık Faz Modeli (Discrete Phase Model)
HAD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
KACA	: Kore hava temizleme birliği (Korea air cleaning association)
UDF	: Kullanıcı tanımlı fonksiyonlar (User defined functions)
VOC	: Uçucu Organik Bileşikler (Volatile organic compounds)

5.2. Yunan Harfleri (Greek Letters)

Γ_τ	: Difüzyon katsayısı
λ	: Isı iletim katsayısı (W/mK)
μ	: Dinamik vizkozite (Pa.s)
μ_t	: Türbülans vizkozitesi (Pa.s)
ρ	: Yoğunluk (kg/m ³)
τ	: Ortalama hava yaşı (s)

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 218M604 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar desteğinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Klepeis N. E., Nelson W.C., Ott W.R., Robinson J. P., Tsang A. M., Switzer P., Behar J. V., Hern S.C., Engelmann W. H., The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants, *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, 11 (3), 231–252, 2001.
- Lika Çekani M., Mankolli H., The relationship between the air pollution elements and environmental microorganisms: Durres, Albania example, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (2), 607-616, 2017.
- Ardkapan S. R., Afshari A., Bergsøe N. C., and Nielsen P. V., Evaluation of air cleaning technologies existing in the Danish market: Experiments in a duct and in a test room, *Indoor Built Environ.*, 23 (8), 1177–1186, 2014.
- Cao S.-J. and Meyers J., Fast prediction of indoor pollutant dispersion based on reduced-order ventilation models, *Build. Simul.*, 8 (4), 415–420, 2015.
- Esen F., Kayıççı G., Determination of polyaromatic hydrocarbons (PAHs) in indoor and outdoor air samples in Bursa, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (4), 1531-1541, 2018.
- Chen Y., Ebenstein A., Greenstone M., and Li H., Evidence on the impact of sustained exposure to air pollution on life expectancy from China's Huai River policy, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 110 (32), 12936–12941, 2013.
- Ertürk M., Calculation amount of carbon dioxide and sulfur dioxide per capita area, per unit area for the heating period: Example of Izmir, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (1), 319-332, 2021.
- Chen C., Zhao B., Cui W., Dong L., An N., and Ouyang X., The effectiveness of an air cleaner in controlling droplet/aerosol particle dispersion emitted from a patient's mouth in the indoor environment of dental clinics, *J. R. Soc. Interface*, 7 (48), 1105–1118, 2010.
- Şen G., Demirel E., Avcı S., Aladağ Z. Evaluation of effective risk factors in COVID-19 mortality rate with DEMATEL method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (4), 2151-2166, 2021.
- EPA, Healthy Buildings, Healthy People, a Vision for the 21st Century; U.S. Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA., 2001.
- Faulkner W. B., Memarzadeh F., Riskowski G., Kalbasi A., and Ching-Zu Chang A., Effects of air exchange rate, particle size and injection place on particle concentrations within a reduced-scale room, *Build. Environ.*, 92, 246–255, 2015.
- Memarzadeh F. and Xu W., Role of air changes per hour (ACH) in possible transmission of airborne infections, *Build. Simul.*, 5 (1), 15–28, 2012.
- Chen L., Jin X., Yang L., Du X., and Yang Y., Particle transport characteristics in indoor environment with an air cleaner: The effect of nonuniform particle distributions, *Build. Simul.*, 10 (1), 123–133, 2017.
- Kang S. Y., Siegel J., and Novoselac A., Effective positioning of portable air cleaning devices in multizone residential buildings, in *In proceedings of Indoor Air conference*, 17–22 August, 2008.
- Kuas G., Başkaya Ş., Numerical analysis of air motion inside a ventilated office room, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 17 (2), 35-52. 2002.
- Moradi Kashkooli F., Soltani M., Zargar B., Ijaz M. K., Taatizadeh E., and Sattar S. A., Analysis of an indoor air decontamination device inside an aerobiology chamber:

- a numerical-experimental study, *Air Qual. Atmos. Heal.*, 13 (3), 281–288, 2020.
17. Zhang T., Wang S., Sun G., Xu L., and Takaoka D., Flow impact of an air conditioner to portable air cleaning, *Build. Environ.*, 45 (9), 2047–2056, 2010.
 18. Jin X., Yang L., Du X., Yang Y., Particle transport characteristics in indoor environment with an air cleaner, *Indoor Built Environ.*, 25 (6), 987–996, 2016.
 19. Küpper M., Asbach C., Schneiderwind U., Finger H., Spiegelhoff D., and Schumacher S., Testing of an indoor air cleaner for particulate pollutants under realistic conditions in an office room, *Aerosol Air Qual. Res.*, 19 (8), 1655–1665, 2019.
 20. Nelson P. R., Sears S. B., and Heavner D. L., Application of Methods for Evaluating Air Cleaner Performance, *Indoor Environ.*, 2 (2), 111–117, 1993.
 21. AHAM, Method for Measuring the Performance of Portable Household Electric Room Air Cleaners, 2013.
 22. ASHRAE, ASHRAE handbook-fundamentals: chapter 27 ventilation and infiltration., 2005.
 23. Cao G., Awbi H., Yao R., Fan Y., Sirén K., Kosonen R., Jianshun (Jensen), A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings, *Build. Environ.*, 73, 171–186, 2014.
 24. Sevilgen G., Kılıç M., Numerical analysis of air flow, heat transfer, moisture transport and thermal comfort in a room heated by two-panel radiators, *Energy Build.*, 43 (1), 137–146, 2011.
 25. Kılıç M., Sevilgen G., Modelling airflow, heat transfer and moisture transport around a standing human body by computational fluid dynamics, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 35 (9), 1159–1164, 2008.
 26. Sevilgen G., Kılıç M., Transient numerical analysis of airflow and heat transfer in a vehicle cabin during heating period, *Int. J. Veh. Des.*, 52 (1–4), 144–159, 2010.
 27. Sevilgen G., Kılıç M., Investigation of transient cooling of an automobile cabin with a virtual manikin under solar radiation, *Therm. Sci.*, 17 (2), 397–406, 2013.
 28. Sevilgen G., Kılıç M., Three dimensional numerical analysis of temperature distribution in an automobile cabin, *Therm. Sci.*, 16 (1), 321–326, 2012.
 29. Choudhury D., Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulance Modelling, Fluent Inc, Tech. Memo. TM 107, 1993.
 30. Noh K.-C., Oh M.-D., Variation of clean air delivery rate and effective air cleaning ratio of room air cleaning devices, *Build. Environ.*, 84, 44–49, 2015.
 31. Li X., Wang X., Li X., Li Y., Investigation on the relationship between flow pattern and air age, Sixth Int. IBPSA Conf., 423–429, 1999.
 32. Mutlu M., Numerical investigation of indoor air quality in a floor heated room with different air change rates, *Build. Simul.*, 13, 1063–1075, 2020.
 33. Mutlu M., Particle Concentration Comparison of Radiator and Floor Heating Systems under Zero Air Change Rate Condition, *Aerosol Air Qual. Res.*, 21 (11), 1–15, 2021.
 34. Shiue A., Hu S., Tseng C., Kuo E., Liu C., Hou C., Yu T., Verification of air cleaner on-site modeling for PM2.5 and TVOC purification in a full-scale indoor air quality laboratory, *Atmos. Pollut. Res.*, 10 (1), 209–218, 2019.
 35. Gunschera J., Markewitz D., Bansen B., Salthammer T., Ding H., Portable photocatalytic air cleaners: efficiencies and by-product generation, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 23 (8), 7482–7493, 2016.
 36. Kaynakli O., Kılıç M., Investigation of indoor thermal comfort under transient conditions, *Build. Environ.*, 40 (2), 165–174, 2005.

