

# YERDEN ISITMA SİSTEMİNDE PARTİKÜL KAYNAĞININ ODA İÇERİSİNDEKİ SOLUNABİLİR MADDE MİKTARINA OLAN ETKİSİNİN SAYISAL İNCELENMESİ

*Numerical Investigation of the Effect of Particle Source Location on Respirable Particle Concentration under Floor Heating Conditions*

**Mustafa MUTLU**

## ÖZET

Oda ve ofislerde bulunan solunabilir partiküllerin kontrolü ve takibi ortamda bulunan canlıların sağlığı açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle kış mevsiminde kullanılan ısıtma sistemleri, bu partiküllerin dağılımlarını önemli ölçüde etkilemekte ve maruz kalınan partikül yoğunluğunu arttırabilmektedir. Bu çalışmada, enerji tasarrufu açısından yaygın olarak tercih edilen yerden ısıtma sisteminin kullanıldığı bir oda içerisindeki beş farklı boyuttaki (1  $\mu\text{m}$ , 2  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$  ve 10  $\mu\text{m}$ ) partiküllerin dağılımı sayısal olarak incelenmiştir. Bir ortam içerisinde ihtiyaç duyulan taze hava, ısıtma sezonunda yeterli miktarda karşılanamamaktadır. Bu etkiyi incelemek amacıyla oda içerisindeki hava değişim oranı sıfır olarak kabul edilmiş ve buna göre analizler yapılmıştır. Hesaplamalar sonlu hacimler metodu kullanan FLUENT paket programı ile gerçekleştirilmiş ve sonuçlar deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır. Partikül kaynağını oda içerisinde beş farklı konumda bulunması durumu incelenmiştir. Partikül kaynağının konumu, oda içerisindeki solunabilir madde konsantrasyonu üzerinde etkili olduğu gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yerden ısıtma, Partikül dağılımı, Sıcaklık dağılımı, Partikül kaynağı

## ABSTRACT

Control and tracking of respirable particles in residential areas and offices is important regarding to indoor air quality as well as human health. Heating systems used in winter play an important role in distribution of these particles and may increase particle concentration in the environment. In this study distribution of five different sized particles (1  $\mu\text{m}$ , 2  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$  ve 10  $\mu\text{m}$ ) were investigated numerically. In order to investigate zero air change rates in where optimum rates cannot be met during heating season, infiltration rates were neglected. Calculations were made by a commercial software FLUENT and validated by experimental results. Five different particle sources in a room were handled and it is found that, source position has a significant influence on particle concentrations.

**Key Words:** Floor heating, Particle distribution, Temperature distribution, Particle source

## 1. GİRİŞ

Binalarımızda kullandığımız ısıtma sistemleri, yaşam alanlarımızı ısı konfor koşullarına getirmek için dizayn edilmişlerdir. Isıl konfor şartlarının sağlanması, yaşam kalitesi ve enerji verimliliği açısından önemli bir yer tutmakla birlikte ortam içerisindeki bulunan partiküllerin davranışı ve dağılımı ısıtma sistemlerinin tasarımı esnasında dikkate alınmamaktadır. Dünya Sağlık Örgütüne (WHO) göre 10  $\mu\text{m}$  ve daha düşük çaptaki partiküller insan solunum yollarına kadar ulaşabilmekte ve ölüme götürebilecek hastalıklara sebep verebilmektedir [1]. Bu partiküllerin yaşadığımız mekanlardaki dağılımını önemli ölçüde etkileyen parametrelerden biri de evlerde ve çalışma alanlarımızda kullandığımız iklimlendirme sistemleridir. Özellikle ısıtma sistemleri, ortam içerisindeki bu partiküllerin dağılımını önemli ölçüde etkilemektedir.

Isıtma sistemlerinin yaşam alanlarında oluşturdukları sıcaklık ve hız dağılımları hem deneysel hem de sayısal olarak birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir [2 – 8]. Günümüzde enerji tüketimi insan hayatında önemli bir yer tutması nedeniyle daha verimli ısıtma sistemlerinin kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Bu sistemlerden biri de yerden veya duvardan ısıtma sistemleridir [9, 10]. Yerden ısıtma sistemlerinin en ciddi dezavantajı oda içerisindeki partikül dağılımına olan etkisi olarak gösterilmesine rağmen bu konu ile ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Golkarfard ve Talebizadeh radyatör ve yerden ısıtma sistemlerinin bir oda içerisindeki 3 – 10 µm çaplarındaki partiküllerin dağılımını nümerik olarak karşılaştırmışlardır [11]. İncelenen bütün çaplardaki maddeler için radyatör kullanılan ısıtma sisteminde partikül yüzdesi yerden ısıtma sistemine göre daha yüksek bulunmuştur. Partiküllerin biriktiği yerler incelendiğinde ise ısıtma sistemine göre farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Yerden ısıtma sisteminde tavanda, radyatör ısıtma sisteminde ise yerde daha fazla partikül biriktiği görülmüştür. Beklenenin aksine radyatör ısıtma sistemi partikülleri oda içerisinde sirküle etmesine nedeniyle partikül miktarının daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır. Gagyte ve ark. havalandırma sistemi ile takviye edilmiş hava ısıtma ve yerden ısıtma sistemlerinin kullanılması durumunda havalandırma etkisinin insanların maruz kaldığı solunabilir kirleticilerin miktarına olan etkisini belirlemeye çalışmışlardır [12]. VOC sensörlerinin kullanıldığı bu çalışmada, yazarlar ısıtma tipinin havalandırma etkenliğine bir etkisi olmadığını, buna karşın yerden ısıtma sisteminin kullanılması durumunda maruz kalınan kirletici miktarının %31 daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Jurelionis ve ark. [13] tarafından yapılan benzer bir çalışmada ise birleşik hava ısıtma sisteminin kullanılması durumunda kirletici konsantrasyonunun arttığını tespit etmişlerdir. Bu durumun da hava değişim oranının artmasıyla çözülemeyeceği belirtilmiştir. Yerden ısıtmanın etkisinin incelendiği bir diğer çalışmada da, soğuk duvarların varlığının yer seviyesinden kaynaklı kirleticilerin uzaklaştırılma etkenliğini arttırdığı dolayısıyla solunabilir kirletici konsantrasyonunu azalttığı görülmüştür [14]. Zhou ve ark. farklı hava giriş hızları ve yüzey sıcaklıkları için 1 µm boyutundaki partikül tutumunu incelemişler ve yerde biriken partikül miktarının hava giriş hızını ve yer yüzey sıcaklığını arttırdıkça azaldığını göstermişlerdir. Partiküllerin tutum süresini yüzey sıcaklığını artırarak %15 daha kısaltılabileceği sonucuna varmışlardır [15]. Dehghan ve Abdolzadeh üç farklı ısıtma sistemini oda içerisinde bulunan bir manken etrafında oluşturdukları partikül konsantrasyonunu CFD metodu ile incelemişlerdir [16]. Mankenin nefes alma bölgesindeki en yüksek partikül konsantrasyonu bütün partikül boyutları için radyatör ile ısıtma sisteminde bulunmuş olup en düşük partikül konsantrasyonu ise süpürgelik ısıtma sisteminde olduğu görülmüştür.

Yerden ısıtma sistemlerinin oda veya ofis içerisindeki partikül dağılımına olan etkilerini inceleyen çalışmalarda mahal içerisindeki havanın standartlara uygun bir şekilde değiştirildiği kabul edilmiştir. Fakat gerçek kullanımda bu ideal hava değişim oranını yakalamak zordur ve kullanıcılar bu duruma gereken özeni göstermemektedirler. Bu nedenle bu çalışmada, hava değişim oranının sıfır olduğu bir odanın içerisinde farklı boyutlardaki partiküllerin dağılımı sayısal olarak incelenmiş ve partikül kaynağının oda içerisindeki konumunun kirletici konsantrasyonlarına olan etkisi araştırılmıştır.

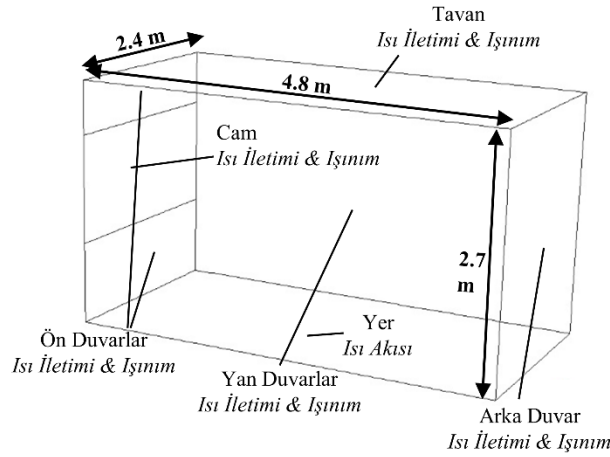
## 2. SAYISAL MODEL ve SINIR KOŞULLARI

Bu çalışmada kullanılan oda geometrisi, Olesen ve ark. [2] tarafından deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği odanın ölçüleri temel alınarak oluşturulmuştur. Diğer araştırmacılar [16 – 20] tarafından da referans alınan bu çalışmanın verileri elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması açısından önemli bir kaynaktır. Analizlerde kullanılan odanın ölçüleri 4.8 m × 2.4 m × 2.7 m olup görünümü Şekil 1’de verilmiştir. Sürekli rejimde 3 boyutlu Navier-Stokes ve enerji denklemi çözülmüş olup gravitasyonel kuvvetler hesaba katılmıştır. Hesaplamalar için ticari kod olan FLUENT yazılımı kullanılmıştır. Havanın yoğunluk dışındaki özellikleri sabit alınmış olup değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Havanın yoğunluğu sıkıştırılmayan-ideal-gaz kabulü yapılarak hesaplanmıştır. Türbülans modeli olarak düşük hızlarda kullanılan ve diğer çalışmalarda da tercih edilen Low-Re k-ε modeli, oda içerisindeki ışınım hesaplamaları için ise S2S radyasyon modeli tercih edilmiştir.

**Tablo 1.** Havanın özellikleri

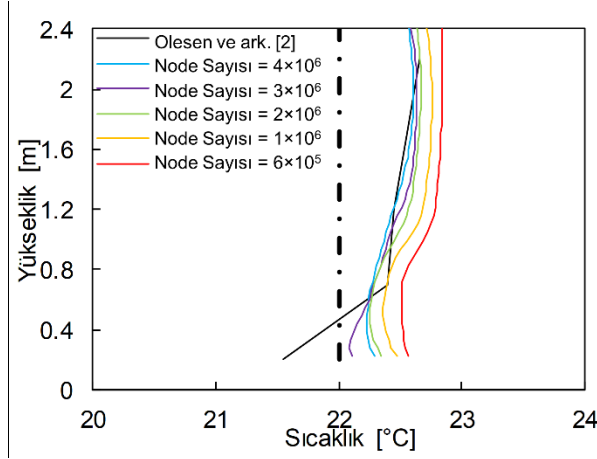
Özgül Isı	1006.43 J/kgK
İletkenlik	0.0242 W/mK
Viskozite	$1.7894 \times 10^{-5}$ kg/ms
Moleküler Ağırlık	28.966 kg/kmol

Odayı çevreleyen duvarların, toplam ısı transfer katsayısı Olesen ve ark. [2] tarafından belirtilen değerler alınmış olup iç yüzeyindeki taşınım ve radyasyon ile olan ısı transferi program tarafından hesaplanmıştır. Dış duvarlar üzerindeki ısı taşınım katsayısı ise  $7 \text{ W/m}^2\text{K}$  olduğu kabul edilmiştir. Dehghan ve Abdolzadeh [16] aynı geometri üzerindeki ısı taşınım katsayılarını hesaplamışlar ve farklı yüzeylerde ısı taşınım katsayısı değişiklik göstermesine karşın ortalama değeri  $7 \text{ W/m}^2\text{K}$  olarak verilmiştir. Dış yüzeylerdeki ısı taşınım ile ısı transferinin yüzey ile dış ortam havası arasında olduğu kabul edilmiştir. Bu hesaplamalarda hem iç hem de dış yüzeyin ısı yalıtım katsayısı 0.9 olarak alınmıştır. Yerden ısıtma sistemindeki ısı girdisi, referans alınan çalışmada [2] elektrik direnç telleri kullanılarak sağlanması nedeniyle sabit ısı akısı olarak modellenmiştir. İç ortam sıcaklığının 296 K, dış ortam 268 K olduğu durumda odadan dış ortama olan ısı transfer miktarı yukarıda bahsedilen değerler kullanılarak hesaplanmış ve ısı akısı değeri  $41.5 \text{ W/m}^2$  olarak belirlenmiştir. Basınç hız ilişkisi için SIPLEC, basınç ayrıklaştırılması için PRESTO! algoritması kullanılmıştır. Momentum, türbülans ve enerji denklemlerinin ayrıklaştırılması için ise ikinci dereceden ayrıklaştırma kullanılmıştır. Süreklilik, momentum ve türbülans için  $10^{-4}$ , enerji için  $10^{-6}$  yakınsama değeri seçilmiştir.

**Şekil 1.** Odanın şekli ve sınır şartları

### 3. DOĞRULAMA

Elde edilen sonuçların geçerliliği amacıyla analizlerden elde edilen sonuçlar literatürdeki deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Ağdan bağımsızlık elde edebilmek amacıyla beş farklı eleman sayısına sahip ağ yapısı ile elde edilen çözümler karşılaştırılmıştır. Şekil 2'de elde edilen verilerin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması yapılmış olup, sonuçların 2 milyon eleman sayısından sonra pek fazla değişmediği gözlenmiştir. Bu nedenle  $2 \times 10^6$  eleman sayısına sahip ağ yapısı tercih edilmiş, analizler bu model ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Sayısal sonuçların literatür ile karşılaştırılması

Sıcaklık değerleri deneysel veriler ile karşılaştırıldığında, değerlerin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Sıcaklık değerlerinin yanında, hız değerleri de karşılaştırılmış ve yerden 0.1 m yükseklikte ölçülen hızlar 0.13 m/s ve 0.14 m/s iken analizlerden hesaplanan değerler sırasıyla 0.14 m/s ve 0.17 m/s olarak bulunmuştur.

#### 4. PARTİKÜL DAĞILIMI

Bu çalışmada, partiküller üzerine kaldırma, sürüklenme, termoforetik ve Brownian kuvvetlerinin etkilediği kabul edilmiştir. Bir parçacık üzerindeki kuvvet dengesi Eş. 1 ile ifade edilebilir.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (1)$$

Bu eşitlikte,  $u$  akışkan hızını,  $u_p$  parçacık hızını,  $\rho$  akışkan yoğunluğunu,  $\rho_p$  parçacık yoğunluğunu,  $F_D(u-u_p)$  birim parçacık başına sürüklenme kuvvetini,  $g$  yerçekimi ivmesini,  $F_x$  birim parça kütlesi başına gelen ekstra kuvvetleri göstermektedir. Bu çalışmada sürüklenme kuvvetinin ( $F_D$ ) hesaplanmasında Stokes' sürüklenme kanunu [21] kullanılarak şu şekilde tanımlanmıştır:

$$F_D = \frac{18\mu}{d_p^2 \rho_p C_c} \quad (2)$$

$C_c$ , Cunningham düzeltme faktörünü göstermekte ve  $\lambda$  ortalama moleküler serbest yolu göstermek üzere şu şekilde hesaplanabilmektedir:

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} (1.257 + 0.4e^{-(1.1d_p/2\lambda)}) \quad (3)$$

Termoforetik kuvvetlerin parçacıklar üzerindeki Talbot [22] tarafından önerilen ifade ile hesaplanmıştır (Eş. 4).

$$F_x = -\frac{6\pi d_p \mu^2 C_s (K + C_t Kn)}{\rho(1 + 3C_m Kn)(1 + 2K + 2C_t Kn)} \frac{1}{m_p T} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4)$$

Bu eşitlikte,  $K$  akışkanın ısı iletim katsayısının parçacık ısı iletim katsayısına oranını ( $k/k_p$ ),  $m_p$  parçacık kütlesini,  $T$  akışkan sıcaklığını,  $\mu$  akışkan viskozitesini göstermektedir.  $C_s$ ,  $C_t$  ve  $C_m$  katsayıları sırasıyla 1.17, 2.18 ve 1.14 olarak alınmıştır.

Brownian kuvveti ise Eş. 5 ile şu şekilde hesaplanmıştır: [23]

$$F_b = \zeta \sqrt{\frac{216uk_B T}{\pi \rho d_p^5 \left(\frac{\rho_p}{\rho}\right)^2 C_c \Delta t}} \quad (5)$$

Bu eşitlikte,  $\zeta$  sıfır ortalamalı Gaussian rastgele sayılarını,  $\nu$  kinematik viskoziteyi,  $k_B$  boltzman sabitini göstermektedir. Gerilmelerden kaynaklı oluşan Saffman kaldırma kuvveti Eş. 6 ile hesaplanmıştır [24].

$$F = \frac{2Ku^{1/2}\rho d_{ij}}{\rho_p d_p (d_{ik} d_{kl})^{1/4}} (u - u_p) \quad (6)$$

Burada  $K$  2.594 ve  $d_{ij}$  deformasyon tensörüdür. Partiküllerin bir hücre içerisindeki konsantrasyonu şu şekilde hesaplanmıştır:

$$C_{cell} = \frac{m_{p,a} \dot{m}_p t}{m_p V_c} \quad (7)$$

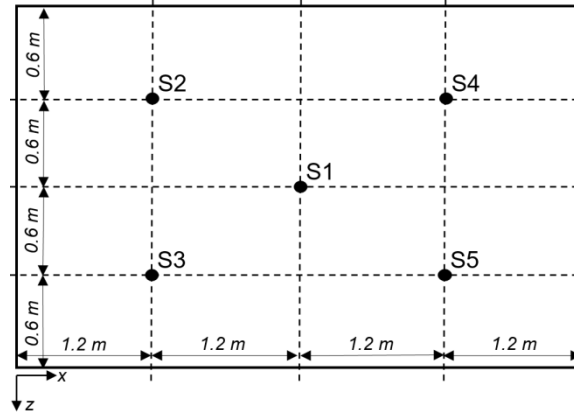
Burada  $m_{p,a}$  bir hücredeki ortalama partikül kütesini,  $\dot{m}_p$  partikülün toplam debisini,  $V_c$  hücrenin hacmini göstermektedir. Bir hücre için hesaplanan konsantrasyon ( $C_{cell}$ ) hacim ağırlıklı ortalaması alınarak bütün oda içerisindeki ortalama partikül konsantrasyonu ( $C_V$ ) belirlenmiştir (Eş. 8).

$$C_V = \frac{1}{V} \sum C_{cell} V_c \quad (8)$$

Sonuçların karşılaştırılması ve farklı boyuttaki partiküllerin konsantrasyonlarının değerlendirilmesi amacıyla hücre konsantrasyonları başlangıç zamanındaki ortalama konsantrasyona oranı alınarak normalleştirilmiştir (Eş. 9).

$$C^* = \frac{C_{cell}}{C_V} \quad (9)$$

Odanın içerisinde beş adet partikül kaynağı tanımlanmış ve bu kaynaklardan yayılan partiküllerin normalleştirilmiş konsantrasyon değerleri verilmiştir. Tanımlanan kaynakların konumları Şekil 3'te verilmiştir.

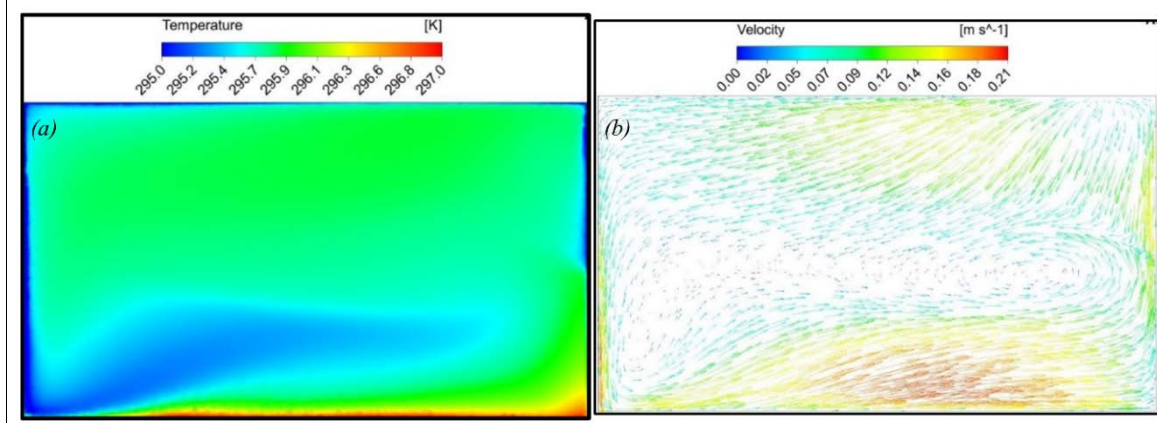


Şekil 3. Oda içerisinde tanımlanan partikül kaynaklarının konumu

## 5. ODA İÇERİSİNDEKİ HIZ VE SICAKLIK DEĞERLERİ

Yerden ısıtma yapılan kapalı bir ortamda oluşan sıcaklık ve hız dağılımı yerçekimsel kuvvetlerin etkisi altında olmaktadır. Oda içerisinde sıcaklık değişimleri çok fazla olmamakla birlikte yere yakın bölgeler diğer bölgelere kıyasla daha sıcak olmaktadır. Fakat odanın ortasında, pencerenin etkisi ile soğuk bir bölge oluşmaktadır (Şekil 4a).

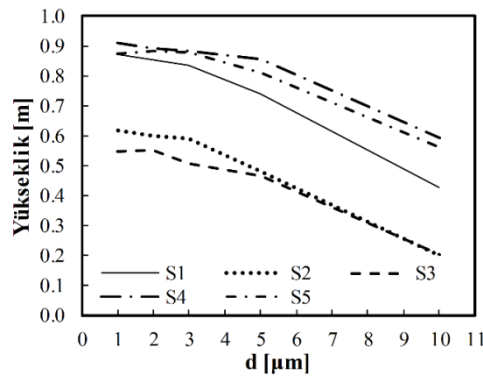
Pencerenin soğuk yüzeyi ile temas eden hava yoğunluk değişimleri nedeniyle yere doğru hareket etmektedir. Yer ile temasta olan havanın ısınması nedeniyle de bu bölgedeki hava yukarı doğru hareket etmektedir (Şekil 4b). Bu iki hava hareketinin birbiriyle etkileşimi sonucu pencere ile temas ederek soğuyan hava, odanın ortasına doğru hareket etmekte ve yaklaşık 1.2 m yükseklikte dönümlü akış oluşturmaktadır. Bu bölgedeki hava hızları oldukça düşmekte ve partikül dağılımı açısından kritik bir bölge oluşturmaktadır. Sıcak yüzey ile temas eden hava ise odanın duvar kısmına doğru itilmekte ve o bölgeden yükselerek tavan ile temas ettikten sonra soğuyarak hareketi yön değiştirmektedir. Myhren ve Holmberg [17], pencereden hava girişi olduğunu kabul ederek yaptıkları çalışmada, yere daha yakın bölgelerdeki havanın daha soğuk olduğunu ve oda içerisindeki hızları daha yüksek olarak hesaplamışlardır. Dönümlü akışın ise odanın pencereye yakın tarafında da değil de duvara yakın tarafta oluştuğu görülmüştür.



Şekil 4. Odanın orta noktasındaki sıcaklık (a) ve hız (b) dağılımları

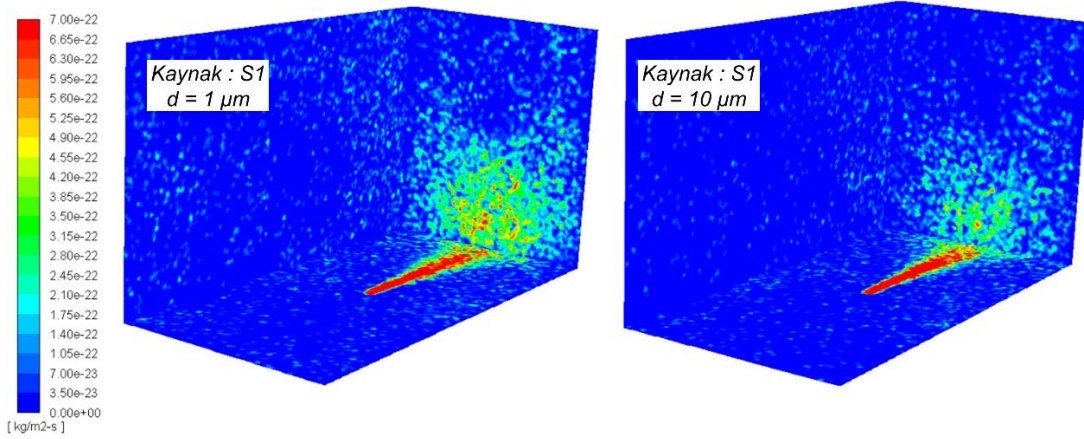
## 6. PARTİKÜL KAYNAĞININ KONUMU VE ODA İÇERİSİNDEKİ KONSANTRASYONLAR

Oda içerisindeki hava hızları ve sıcaklıkları değişkenlik göstermekte ve partiküllerin kaynağının bulunduğu konumdaki hız ve sıcaklık değerleri ortamdaki konsantrasyonları önemli ölçüde etkilemektedir. Odanın arka kısmında bulunan kaynaklardan (S4 ve S5) yayılan partiküller buradaki yukarı yönlü bir hava akışı nedeniyle oda içerisine dağılmaktadır. Buna karşın odanın ön kısmında (pencereye yakın) bulunan kaynaklardan (S2 ve S3) yayılan partiküller yere doğru hareket etmekte ve bu yüzeyde tutundukları için oda içerisindeki konsantrasyon değerleri diğer bölgedeki partikül kaynaklarına kıyasla daha düşük olmaktadır (Şekil 5).



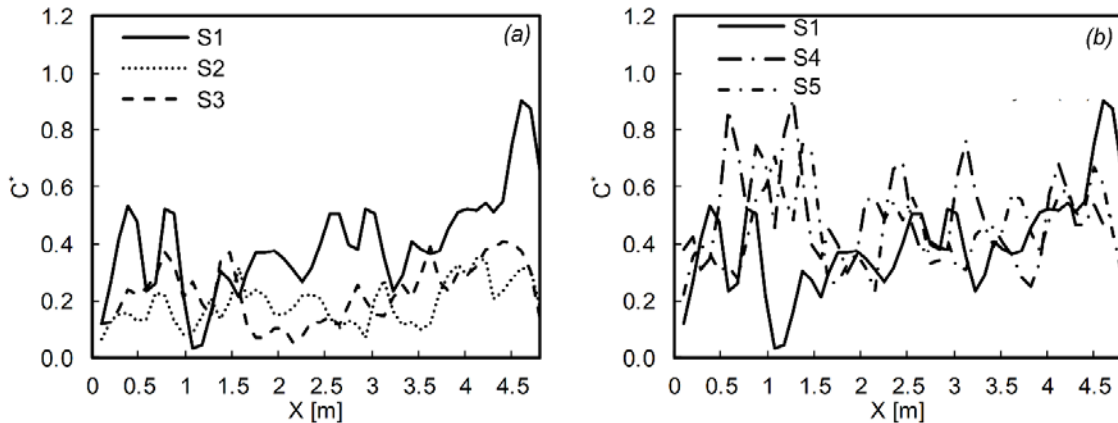
Şekil 5. Normalize edilmiş konsantrasyon değerlerinin partikül çap ile değişimi

Partikül çapının büyümesiyle ortamdaki konsantrasyon miktarının azaldığı gözlenmiştir. Partikül üzerine etkileyen kuvvetlerin çap ile ters orantılı olarak değişmesi nedeniyle (Eş. 2,4 ve 5) partiküller üzerine etkileyen kuvvetler azalmakta ve büyük partiküllerin hareketi kısıtlı olmaktadır. Büyük partiküllere etkileyen kuvvetlerin düşük olması bu partiküllerin hızlarını da düşürmekte ve partiküller ortam içerisinde buldukları konuma en yakın yüzeyde tutulma eğilimi göstermektedir. Şekil 6'da 1  $\mu\text{m}$  ve 10  $\mu\text{m}$  çapındaki partiküllerin yüzeye tutunma oranları gösterilmiştir. Odanın ortasında olan partikül kaynağından yayılan parçacıklar oda içerisindeki hava hareketleri nedeniyle arka duvara doğru hareket etmektedir. Küçük boyuttaki partiküllerin duvar yüzeyinde yapışması daha fazla iken büyük partiküller yere tutunduğu görülmüştür.



Şekil 6. S1 kaynağından yayılan partiküllerin yüzeye tutunma miktarları

Oda boyunca partikül konsantrasyonunu değişimini incelemek amacıyla, odanın ortasında ( $z = -1.2$  m) ve oturan bir insanın ağız konumunu temsil edecek şekilde yerden 1.2 m yükseklikte bir doğru tanımlanmıştır. Bu doğru üzerindeki normalize edilmiş konsantrasyon değerleri Şekil 7'de verilmiştir. Odanın ortasında bulunan kaynaktan yayılan partiküller Şekil 6'da görüldüğü şekilde odanın arkasında birikme göstermekte ve bu bölgelerde partikül konsantrasyonu yükselmektedir. S2 ve S3 kaynağından yayılan partiküller hem S1 kaynağına göre daha düşük konsantrasyon değerlerine sahip hem de x eksenini boyunca değişimin diğer kaynaklara göre daha düşük olduğu söylenebilir. S1 ve S2 konumundaki hava akışının yönü bu değerlerin oluşmasında etken olduğu görülmüştür. S4 ve S5 kaynağından yayılan partiküllerin davranışı ele alındığında ise farklı bir durum ortaya çıkmaktadır. Bu kaynaklardan yayılan partiküller kaynağına yakın bölgelerde yüksek konsantrasyon değerleri oluşturmak yerine odanın pencere tarafına yakın kısımlarda yüksek partikül konsantrasyonuna sebep olmaktadır. Bu kaynaklardan yayılan partiküller hava hareketi ile hemen yükselmekte ve bu hava akımı ile odanın ön tarafına kadar taşındığı görülmüştür. Odanın diğer kısımlarındaki konsantrasyon değerlerinin değişimi ise S1 kaynağı ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 7. Farklı kaynaklardan yayılan partiküllerin yerden 1.2 m yükseklikte oluşturdukları normalize edilmiş konsantrasyon değerlerinin oda boyunca değişimi

## 7. SONUÇ

İnsan sağlığına olumsuz etkileri olan partiküllerin oda içerisindeki hareketleri ve konsantrasyon miktarları iklimlendirme cihazları ile yakından ilişkilidir. Bu çalışmada, yerden ısıtma sistemi kullanılan bir oda içerisindeki partiküllerin dağılımı ve bu dağılıma partikül kaynağının nasıl etkilediği sayısal yöntemler kullanılarak araştırılmıştır.

Oda içerisinde sıcaklık gradyanlarının yüksek olmadığı görülmekle birlikte yere yakın bölgeler diğer bölgelere kıyasla daha sıcak hesaplanmıştır. Buna karşın odanın ortasında, pencerenin etkisi ile soğuk bir bölge oluşmaktadır. Oda içerisinde yerden yaklaşık 1.2 m yükseklikte dönümlü akışın olduğu bu soğuk kısım partikül dağılımı açısından en kritik bölgeyi oluşturmaktadır. Odanın arka kısmında bulunan kaynaklardan yayılan partiküller buradaki yukarı yönlü bir hava akışı nedeniyle oda içerisine dağılmaktadır. Buna karşın odanın ön kısmında (pencereye yakın) bulunan bir kaynaktan yayılan partiküller yere doğru hareket etmekte ve bu yüzeyde tutundukları için oda içerisindeki konsantrasyon değerleri diğer bölgedeki partikül kaynaklarına kıyasla daha düşük olmaktadır. Partiküllerin çaplarının da konsantrasyonlar üzerinde etkisi olduğu görülmüş olup çap arttıkça konsantrasyon değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Odanın arka kısmında duvara yakın noktalarda bulunan kaynaklardan yayılan partiküllerin kaynağa yakın bölgelerde yüksek konsantrasyon değerleri oluşturmak yerine odanın pencere tarafına yakın kısımlarda yüksek partikül konsantrasyonuna sebep olmaktadır. Partikül kaynağının bulunduğu konum oda içerisindeki konsantrasyon değerleri açısından önemli olduğu bulunmuştur. Kaynak konumu incelenirken oda içerisindeki hava hareketleri ile birlikte ele alınması gerektiği görülmüştür.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma 118M222 no.lu proje kapsamında Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir. Yazar, desteğinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür eder.

## KAYNAKLAR

- [1] World Health Organization, "Common Pollutants from Household Heating, Cooking and Lighting", <http://www.who.int/airpollution/household/pollutants/combustion/en/> (19.09.2018)
- [2] OLESEN, B. W., MORTENSEN, E., THORSHAUGE, J., & BERG-MUNCH, B., "Thermal Comfort in A Room Heated by Different Methods", ASHRAE Transactions, 86(1), 34-48, 1980.
- [3] WU, X., FANG, L., OLESEN, B. W., & ZHAO, J., "Air Distribution and Ventilation Effectiveness in A Room with Floor/Ceiling Heating and Mixing/Displacement Ventilation", In Proceedings of the 8th international symposium on heating, ventilation and air conditioning (pp. 59-67), Springer, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [4] ABDOLZADEH, M., SARGAZIZADEH, M. S., & DEGHAN, M. H., "Quantitative and Qualitative Energy Assessments of Floor Heating and Skirting Board Heating Systems in A Room", Journal of Energy Engineering, 143(1), 2016.
- [5] CHOLEWA, T., SIUTA-OLCHA, A., & SKWARCZYŃSKI, M. A., "Experimental Evaluation of Three Heating Systems Commonly Used in The Residential Sector", Energy and Buildings, 43(9), 2140-2144, 2011.
- [6] LÉGER, J., ROUSSE, D. R., LE BORGNE, K., & LASSUE, S., "Comparing Electric Heating Systems at Equal Thermal Comfort: An Experimental Investigation", Building and Environment, 128, 161-169, 2018.
- [7] KAZANCI, O. B., SHUKUYA, M., & OLESEN, B. W., "Exergy Performance of Different Space Heating Systems: A Theoretical Study", Building and Environment, 99, 119-129, 2016.
- [8] MAIVEL, M., FERRANTELLI, A., & KURNITSKI, J., "Experimental Determination of Radiator, Underfloor and Air Heating Emission Losses Due to Stratification And Operative Temperature Variations", Energy and Buildings, 166, 220-228, 2018.





- [9] SATTARI, S., & FARHANIEH, B., “A Parametric Study on Radiant Floor Heating System Performance”, *Renewable Energy*, 31(10), 1617-1626, 2006.
- [10] BOJIĆ, M., CVETKOVIĆ, D., MARJANOVIĆ, V., BLAGOJEVIĆ, M., & DJORDJEVIĆ, Z., “Performances of Low Temperature Radiant Heating Systems”, *Energy and Buildings*, 61, 233-238, 2013.
- [11] GOLKARFARD, V., & TALEBIZADEH, P., “Numerical Comparison of Airborne Particles Deposition and Dispersion in Radiator and Floor Heating Systems”, *Advanced powder technology*, 25(1), 389-397, 2014.
- [12] GAGYTE, L., JURELIONIS, A., MARTUZEVICIUS, D., & PRASAUSKAS, T., “Experimental Study of Personal Exposure to Pollutants Released at Floor Level: Floor Heating Vs Air Heating”, 14th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Ghent, Belgium, 3 – 8 July 2016.
- [13] JURELIONIS, A., GAGYTE, L., SEDUIKYTE, L., PRASAUSKAS, T., CIUZAS, D., & MARTUZEVICIUS, D., “Combined Air Heating and Ventilation Increases Risk of Personal Exposure to Airborne Pollutants Released at The Floor Level”, *Energy and Buildings*, 116, 263-273, 2016.
- [14] JURELIONIS, A., STASIULIENE, L., PRASAUSKAS, T., & MARTUZEVICIUS, D., “Dispersion of Indoor Air Pollutants Emitted at Near-Floor Levels in Rooms With Floor Heating and Mixing Ventilation”, *Indoor and Built Environment*, 27(2), 205-218, 2018.
- [15] ZHOU, Y., DENG, Y., WU, P., & CAO, S. J., “The Effects of Ventilation and Floor Heating Systems on The Dispersion and Deposition of Fine Particles in an Enclosed Environment”, *Building and Environment*, 125, 192-205, 2017.
- [16] DEGHAN, M. H., & ABDOLZADEH, M., “Comparison Study on Air Flow and Particle Dispersion in a Typical Room with Floor, Skirt Boarding, and Radiator Heating Systems”, *Building and Environment*, 133, 161-177, 2018.
- [17] MYHREN, J. A., & HOLMBERG, S., “Flow Patterns and Thermal Comfort in A Room with Panel, Floor and Wall Heating”, *Energy and Buildings*, 40(4), 524-536, 2008.
- [18] MYHREN, J. A., & HOLMBERG, S., “Design Considerations with Ventilation-Radiators: Comparisons to Traditional Two-Panel Radiators”, *Energy and buildings*, 41(1), 92-100, 2009.
- [19] HORIKIRI, K., YAO, Y., & YAO, J., “Modelling Conjugate Flow and Heat Transfer in A Ventilated Room for Indoor Thermal Comfort Assessment”, *Building and Environment*, 77, 135-147, 2014.
- [20] MYHREN, J. A., & HOLMBERG, S., “Comfort Temperatures and Operative Temperatures in an Office with Different Heating Methods”, In *Proceedings of the Healthy Buildings*, 2, 47-52, 2006.
- [21] OUNIS, H., AHMADI, G., & MCLAUGHLIN, J. B., “Brownian Diffusion of Submicrometer Particles in The Viscous Sublayer”, *Journal of Colloid and Interface Science*, 143(1), 266-277, 1991.
- [22] TALBOT, L. R. K. R. W. D. R., CHENG, R. K., SCHEFER, R. W., & WILLIS, D. R., “Thermophoresis of Particles in A Heated Boundary Layer”, *Journal of Fluid Mechanics*, 101(4), 737-758, 1980.
- [23] LI, A., & AHMADI, G., “Dispersion and Deposition of Spherical Particles from Point Sources in A Turbulent Channel Flow”, *Aerosol Science and Technology*, 16(4), 209-226, 1992.
- [24] SAFFMAN, P. G. T., “The Lift On a Small Sphere in a Slow Shear Flow”, *Journal of Fluid Mechanics*, 22(2), 385-400, 1965.

## ÖZGEÇMİŞ

### Mustafa MUTLU

1984 yılı Bulgaristan doğumludur. 2007 yılında UÜ. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda 2009 yılında Yüksek Lisans eğitimini tamamlamış ve aynı Anabilim Dalında 2015 yılında Doktora derecesi almıştır. 2009 – 2015 yılları arasında UÜ Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Anabilim Dalı'nda Araş. Gör. olarak görev yapmıştır. 2015 – 2017 yılları arasında Ermetal Otomotiv ve Eşya Sanayi Tic. A.Ş.'de Ar-Ge Mühendisi olarak görev yapan Mustafa MUTLU, 2017 yılından beri Yenişehir İbrahim Orhan Meslek Yüksekokulunda Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. Isı Transferi, Enerji Sistemleri, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ve Isıl Sistemlerin Sayısal Modellenmesi konusunda çalışmalarına devam etmektedir.