



BİR OFİS ORTAMINDA UZAK UV-C (222 NM) İLE HAVA DEZENFEKSİYONU: SAYISAL ÇALIŞMA

Air Disinfection with Far-UVC (222 nm) in an Office Environment: Numerical Study

Fatih Atcı
Yunus Emre Çetin
Orhan Aydın

ÖZET

COVID-19 da dahil olmak üzere birçok bulaşıcı hastalığa sebep olan patojenlerin ofis, sınıf ve hastane odası gibi kapalı ortamlarda hava yoluyla yayıldığı bilinmektedir. Bu nedenle, bu ortamlarda patojenlerin kontrol altına alınması, halk sağlığı açısından önemlidir. Bu çalışmada, Uzak Ultraviyole C (222 nm) ışınları kullanılarak bir ofis odası havasının dezenfeksiyonu sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal analizde, ticari bir akışkanlar mekaniği yazılımı olan Ansys Fluent kullanılmıştır. Ofis ortamı içerisindeki üç boyutlu hava akışı ve patojen partikül hareketi, sırasıyla, RNG k- ϵ türbülans modeli ve ayrık faz modellemesi (DPM) ile belirlenmiştir. Işınlama modellemede, ayrık ordinatlar DO (Discrete Ordinates) ışınım modeli kullanılmıştır. Hava dezenfeksiyon etkinliği, patojen partiküllerin ortam içerisinde geçirdiği süre ve bu süre boyunca maruz kaldığı ışınımı dikkate alan bir kod yardımıyla hesaplanmıştır. Hava değişim katsayısının dezenfeksiyon etkinliğini önemli ölçüde değiştirdiği ve Uzak UV-C kaynaklı hava dezenfeksiyon sistemlerinin düşük hava değişim katsayısına (HDK) sahip ortamlarda daha etkin olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: İç ortam hava kalitesi, Uzak UV-C, Hava dezenfeksiyonu, UV doz.

ABSTRACT

It is known that pathogens that cause many infectious diseases, including COVID-19, spread through air in closed environments such as office, classroom and hospital room. Therefore, controlling pathogens in these environments is important for public health. In this study, disinfection of an office room air by using Far Ultraviolet C (222 nm) rays is numerically investigated. In the numerical analysis, Ansys Fluent, a commercial fluid mechanics software is used. Three-dimensional airflow and pathogen particle movement in the office environment are determined using RNG k- ϵ turbulence model and discrete phase modeling (DPM), respectively. In radiation modelling, the discrete ordinates DO (Discrete Ordinates) radiation model is used. Air disinfection efficiency is calculated with a code that takes into account the time the pathogen particles spend in the environment and the radiation they are exposed to during this time. It is observed that the air change rate significantly changes the disinfection efficiency and the air disinfection systems with Far UV-C are more effective in environments with low air change rate (ACH).

Key Words: Indoor air quality, Far UV-C, Air disinfection, UV dose

1. GİRİŞ

Son yıllarda tüm dünyayı etkisi altına alan COVID-19 salgını milyonlarca ölüme sebep olmuş, ulusal sağlık sistemlerini alt üst etmiş ve küresel ekonomiyi olumsuz etkilemiştir [1]–[5]. COVID-19 salgını da dahil olmak üzere birçok bulaşıcı hastalık, kapalı ortamlarda hava yoluyla yayılmaktadır. Ortam içerisinde enfekte bir kişinin öksürmesi, hapşırması, konuşması ve hatta nefes alıp vermesi durumunda, birçok biyoaerosol (patojen partikül) yayılmakta ve ortam havasına karışmaktadır [6], [7]. Ortam havasına karışan biyoaerosollerin diğer sakinler tarafından solunması durumunda bu kişiler enfekte olabilmektedir [8]–[12]. Kalabalık insan gruplarının bir araya geldiği ortamlarda hava yoluyla bulaşma riski, özellikle ortamın yeterince havalandırılmadığı durumlarda daha da artmaktadır [13], [14]. Kapalı ortamlarda bulaş riskini azaltmak için ortam içerisindeki biyoaerosol yayılımı kontrol altına alınmalıdır.

Uzak UV-C 200 ila 230 nm dalga boyu aralığında antiseptik ultraviyole-C radyasyonu olarak bilinmektedir ve en yaygın bilinen kaynağı Kripton Klorür [KrCl] eksimer lambalarıdır. Bu lambalar genellikle Uzak Ultraviyole C (200-230 nm) bölgesinde ve ekseriyeti 222 nm dalga boyunda ışınım yapmaktadır. Bu dalga boyundaki ışınlar patojenlerin doğrudan DNA/RNA'sına hasar vererek onları etkisiz hale getirmektedir [15]. KrCl eksimer lambaları ile yapılan laboratuvar deneylerinde; gram pozitif ve gram negatif bakterileri, ilaca dirençli bakterileri, influenza virüslerini ve SARS-CoV-2 virüsü de dahil olmak üzere insan koronavirüslerini mikrop öldürücü özelliği ile etkisiz hale getirdiği gösterilmiştir [15]. On yıllardır hava ve yüzey dezenfeksiyonu amaçlı kullanılan ancak kanserojen ve kataraktojen olan geleneksel UV-C'nin (254nm) aksine, son yapılan çalışmalar Uzak UV-C'nin (222nm) insanların bulunduğu ortamlarda kullanımının daha güvenli olduğunu ifade etmektedir [16]–[21]. Bu durum, Uzak UV-C teknolojisinin insanların kalabalık olarak bulunduğu sınıf, hastane odası, ofis ve toplu taşıma araçları gibi kapalı ortamlarda hava dezenfeksiyonu amaçlı kullanım potansiyelinin olduğunu ortaya koymaktadır. Uzak UV-C'nin laboratuvar ölçekli yapılan deneylerinde farklı patojen sınıflarını etkisiz hale getirdiği ve hastalıkların yayılmasını azaltmada etkili olduğu kanıtlanmış olsa da pratik uygulamalara yönelik; lamba konumu, hava değişim katsayısı ve havalandırma yöntemi vb. gibi parametreleri dikkate alarak performans değerlendirmesi yapan çalışmaların yapılması önemlidir.

Buchan vd. [22], iki-boyutlu 3x3 metrelik tek kişilik bir hastane odası içerisinde Uzak UV-C ile insan koronavirüsünün inaktivasyonunu sayısal olarak incelemişlerdir. Uzak UV-C maruz kalma seviyeleri dahilinde oda içerisindeki patojen konsantrasyon miktarında odanın tek başına havalandırılmasına kıyasla %20-57 daha fazla azalma sağlandığı görülmüştür. Xia vd. [23], mekanik olarak havalandırılan bir uçak kabini içerisinde Uzak UV-C (222 nm) hava dezenfeksiyon sisteminin etkinliğini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada 3 farklı hava değişim katsayısı değeri (4, 10 ve 36) dikkate alınmış olup HDK'nın dezenfeksiyon etkinliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Uzak UV-C sisteminin dezenfeksiyon etkinliği havalandırma oranı arttıkça azalmıştır.

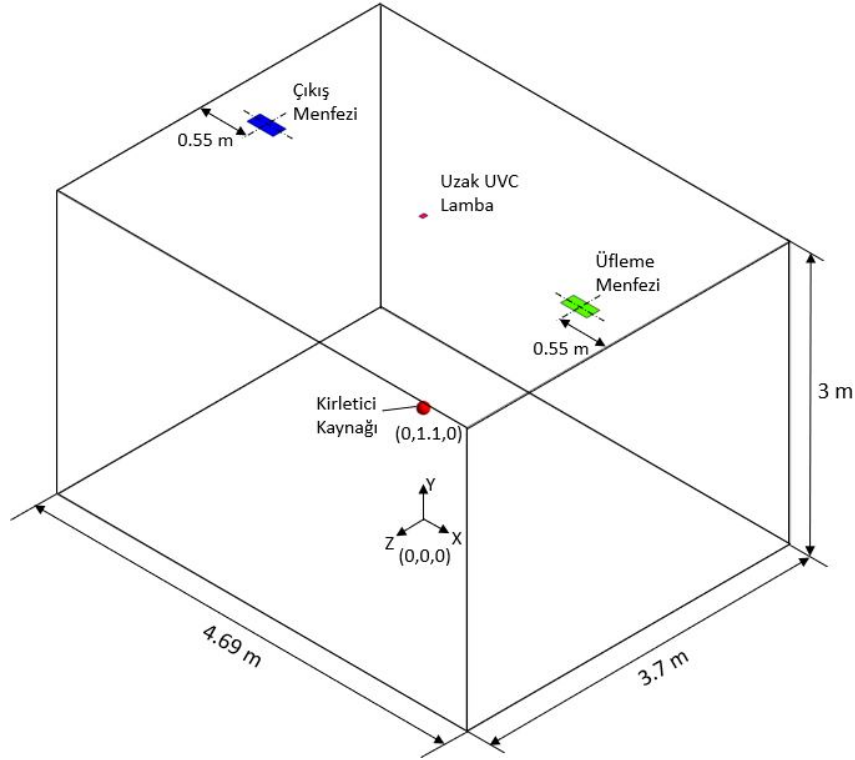
Literatür incelendiğinde konunun güncel olduğu ve konuyla ilgili az sayıda çalışma olduğu görülmektedir. Kapalı ortamlarda Uzak UV-C kaynaklı hava dezenfeksiyon sistemlerinin etkinliğini ele alan çalışmaların, ilgili teknolojinin uygulanması, kullanımı ve benimsenmesine yönelik önemli katkılar sunacağı açıktır.

2. SAYISAL MODEL

2.1. Geometri

Bu çalışmada Karadeniz Teknik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan bir ofisin 1:1 ölçekli geometrisi dikkate alınmıştır. Ofis odası geometrisi 4.69m (uzunluk) x 3.7 m (genişlik) x 3 m (yükseklik) boyutlarına sahiptir. Şekil 1'de görüleceği üzere odanın havalandırılması, tavana simetrik olarak yerleştirilmiş. 0.3 m x 0.15 m boyutlarındaki hava üfleme ve çıkış menfezi ile sağlanmaktadır. 0.45m x 0.6m boyutlarında, 12W gücünde ve 60° aydınlatma açısına sahip bir adet Uzak UVC (222 nm) Kripton Klorür Eksimer lamba tavanın tam ortasına ve yönü aşağıya bakacak şekilde yerleştirilmiştir. Lambaya ait detaylı bilgi literatürde mevcuttur [24]. Çalışmada üç farklı hava değişim

katsayısı (0.7, 3 ve 6 HDK sırasıyla 0.225 m/s, 0.964 m/s, 1.928 m/s) dikkate alınmış olup HDK 'nın Uzak UV-C hava dezenfeksiyon sistem performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.



Şekil 1. Ofis odasının izometrik görünüşü.

2.2. Hava Akışının Modellenmesi

Sayısal analizde hava akışını modellemek için ilgili korunum denklemleri genel formda aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla(\rho\phi\vec{V}) = \nabla(\Gamma_\phi\Delta\phi) + S_\phi \quad (1)$$

Burada, \vec{V} hız vektörü, ρ havanın yoğunluğu, ϕ hız bileşeni (u, v, w), Γ_ϕ difüzyon katsayısı ve S_ϕ kaynak terimi ifade etmektedir. Türbülanslı akış problemleri için bu eşitliklerdeki hız ve basınç değerlerini ortalama ve çalkantı bileşenleri cinsinden ifade etmek gerekir. Bu durumda, ortaya çıkacak türbülans Reynolds gerilmelerini temsil eden ($\rho\overline{u_i u_j}$) teriminin açık formda yazılabilmesi için birçok türbülans modeli bulunmaktadır [25]. Bu çalışmada ofis odası içerisindeki akış alanını çözmek için Reynolds ortalama Navier Stokes denklemleri, RNG k- ϵ türbülans modeliyle birlikte ele alınmıştır. Literatürde RNG k- ϵ türbülans modelinin iç hava akış problemleri için en uygun türbülans modeli olduğu ifade edilmektedir [26]. RNG k- ϵ türbülans modelinde türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans yutulma oranı (ϵ) transport denklemleri ile şu şekilde ifade edilir:

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

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

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

Denklemlerde yer alan μ_T , türbülans viskozitesi şu şekilde ifade edilir:

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

RNG k- ε modelinde model sabitleri $C_{1\varepsilon}=1.42$, $C_{2\varepsilon}=1.68$ olarak dikkate alınmıştır. Navier Stokes denklemleri sonlu hacimler yöntemi ile ayrıklaştırılarak çözülmüştür. Basınç-hız çiftinin çözümünde "Coupled" algoritması, basınç terimi için "Presto" ve diğer tüm terimleri için ayrıklaştırma yöntemi olarak "second-order upwind" kullanılmıştır. Hesaplama yerçekimi etkisi göz önüne alınmıştır. Tüm korunum denklemleri için yakınsama kriteri 10^{-5} olarak belirlenmiştir. Oda içerisinde üfleme menfezi için "Velocity-inlet" (%5 türbülans yoğunluğu) ve çıkış menfezi için "Outflow" sınır koşulları tanımlanmıştır. Ayrıca tüm katı yüzeylerde kaymama (no slip) sınır koşulu öngörülmüştür.

2.3. Partikül Hareketinin Modellenmesi

Hava akış analizi sonrasında elde edilen akış haritası üzerinde patojenlerin takip ettiği rotalar, Lagrange yöntemine bağlı olarak ayrık faz modellenmesi (discrete phase modeling-DPM) yardımı ile incelenmiştir. Ayrık faz model denklemi genel hali aşağıda verilmiştir.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_a \quad (6)$$

Burada, eşitliğin sol tarafındaki terim patojen partikülün sahip olduğu atalet kuvvetini, eşitliğin sağ tarafındaki terimler ise sırasıyla, sürüklenme, yer çekimini ve ısı etki ile ortaya çıkan kaldırma kuvvetini ve diğer olası ek kuvvetleri (Termoforetik kuvvet, Saffman kaldırma kuvveti ve Brownian kuvveti) temsil etmektedir. Ayrıca, ρ_p ve ρ sırasıyla, partikül ve havanın yoğunluğunu, u_p partikül hızını ve u hava hızını göstermektedir [25]. F_D sürekleme kuvveti açık formda aşağıdaki gibidir.

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_d Re_p}{24} \quad (7)$$

Burada; μ havanın moleküler viskozitesini, d_p partikülün çapını ve Re_p partikülün Reynolds sayısını ifade etmektedir. C_d , sürüklenme katsayısıdır ve ξ_1 , ξ_2 , ξ_3 katsayıları ile beraber şu şekilde ifade edilmektedir [27].

$$C_d = \frac{\xi_1}{Re} + \frac{\xi_2}{Re^2} + \xi_3 \quad (8)$$

Akış içerisindeki türbülans dalgalanmalarının partikül dağılımı üzerindeki stokastik etkisi ayrık rastgele yürüyüş modellenmesi (discrete random walk modeling- DRW) ile ele alınmıştır. Akış alanındaki türbülans dalgalanmaları anlık akışkan hızı tarafından şu şekilde tanımlanır:

$$u = \bar{u} + u'(t) \quad (9)$$

$u'(t)$ terimi yerel türbülans parametreleri tarafından türetilmiştir ve şu şekilde ifade edilir:

$$u'(t) = \xi \sqrt{2k/3} \quad (10)$$

Burada, k ve ξ sırasıyla türbülans kinetik enerjisi ve normal dağılımlı rastgele sayıdır [25]. Oda içerisinde oturan bir kişiyi temsilen oda merkezinde zeminden 1,1 m [28] yükseklikte partikül salınımı gerçekleştirilmiştir [29]. Patojenleri temsilen her bir partikülün küresel formda olduğu ve 1000 kg/m^3 yoğunlukta ve ortalama $1 \times 10^{-6} \text{ m}$ ($1 \mu\text{m}$) çapa sahip olduğu öngörülmüştür. Bu boyuttaki partiküller, insanların solunum yoluna girebildikleri için iç ortam hava kalitesi açısından özellikle önemlidir [30]. Hava çıkış menfezinde, oda içerisine salınan partiküllerin akış alanını terk ettiğini ifade eden Escape sınır şartı kullanılmıştır. Her bir durum için oda içerisinde yaklaşık 50.000 adet partikül takibi yapılmıştır.

Uzak UVC Lamba Işınım Alanının Sayısal Modeli

Uzak UVC lambanın ofis odası içerisinde oluşturduğu üç-boyutlu ışınım alanı ayrık ordinatlar ışınım modeli (Discrete ordinates modeling- DOM) kullanılarak modellenmiştir. Ayrık ordinatlar (Discrete Ordinates (DO)) ışınım modeli, ışınım transfer denklemini (Radiative Transfer Equation-RTE) her biri kartezyen sistem içerisinde belirlenmiş \vec{s} vektör yönüyle ilgili, sonlu sayıdaki ayrık katı açı için çözer. Işınım transfer denklemi spektral ışınım şiddetinin bir ortam içerisindeki izlediği yol boyunca değişimini ifade eder [25]. RTE aşağıda verilmiştir.

$$\nabla \cdot (I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (\alpha_\lambda + \sigma_s) I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) = \alpha_\lambda n^2 I_{b\lambda} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (11)$$

Soğurma Yayılma Saçılma

Burada, C_d konum vektörü, \vec{s} yön vektörü, \vec{s}' yayılım yönü vektörü, s alınan yol, α_λ spektral yutma katsayısı, n kırılma indisi, σ_s yayılım katsayısı, $I_{b\lambda}$ siyah cisim ışınım şiddeti, I_λ konum \vec{r} ve yöne \vec{s} bağlı ışınım şiddeti, λ dalga boyu, Φ faz fonksiyonu, Ω' katı açığı ifade etmektedir. Fluent DO model içerisinde malzeme özellikleri, lamba gücü ve açısal ayrıklaştırma parametreleri kullanıcı tarafından tanımlanabilmektedir. Açısal ayrıklaştırma, N_θ ve N_ϕ ve pikselizasyon parametreleri ile kontrol edilmektedir. Açısal ayrıklaştırma ve pikselizasyon sayısal model içerisindeki ışınım dağılımını tanımladığı için önemli parametrelerdir [31]. Mevcut sayısal modelde hesaplama süresi, ışınım dağılımı ve ışın etkisi dikkate alınarak N_θ ve N_ϕ için 8x8, pikselizasyon için 4x4 değerleri kullanılmıştır. Hava homojen bir ortam olarak kabul edilmiş ve havada asılı kalan parçacıkların ışık saçılım etkisi, parçacık hacminin hava hacmine kıyasla önemsiz olduğu için ihmal edilmiştir.

Çalışmada kullanılan lambanın gücü, Amerikan Devlet Endüstriyel Hijyenistleri Konferansı (ACGIH) tarafından belirlenen Uzak UVC- (222 nm) ışınlarına maruz kalma eşik sınır değerleri dikkate alınarak ayarlanmıştır. 222 nm Uzak UVC ışınlarına 8 saat boyunca maruz kalınmasıyla belirlenen Eşik Sınır Değerler (TLV) cilt ve gözler için sırasıyla 4750 ve 1650 J/m² ya da ışınım miktarı cinsinden sırasıyla 0.057 W/m² ve 0.016 W/m² olarak bildirilmektedir [32]. Çalışmada lamba gücü, ofis içerisinde ayakta duran bir kişinin (1.7 m) maruz kalacağı maksimum ışınım miktarı 0.057 W/m² değeri dikkate alınarak regüle edilmiştir. RTE denklemi için yakınsama kriteri olarak 10⁻⁶ dikkate alınmıştır.

2.4. UV Dozun Hesaplanması

Çalışmada ortam içerisinde partiküllerin hareket güzergahlarının belirlenmesi ve ışınım alanının elde edilmesinin ardından UV doz hesabı yapılmıştır. Oda içerisinde her bir partikülün Uzak UV-C ışın huzmesi bölgesinden geçerken bünyelerine almış olduğu kümülatif UV dozu (J/m²) belirlemek için bir kullanıcı tanımlı fonksiyon (user defined function (UDF)) ilgili paket programa tanıtılmıştır [33]. Bu UDF kod sayesinde oda içerisinde farklı yörüngeler üzerinde hareketlerini sürdüren belirli fiziksel özelliğe sahip patojen partiküllerin UV etki alanı içerisinde geçerken bünyelerine almış oldukları UV doz miktarları ortamı terk edecekleri yere yani hava çıkış menfezine kadar hesaplanmıştır. Matematiksel formda doz miktarı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

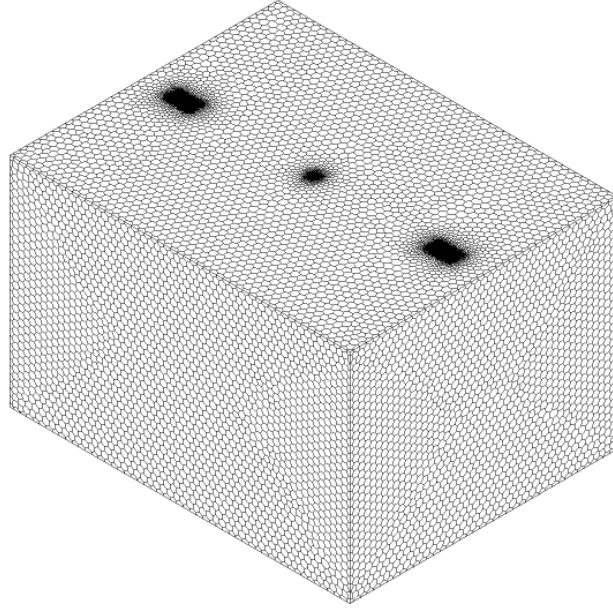
$$UV \text{ doz} = dt * \sum_{i=1}^{i=n} \frac{I_i + I_{i+1}}{2} \quad (12)$$

Burada, dt zaman adımını, I_i ve I_{i+1} ise sırasıyla ardışık iki zaman adımına ait hesaplama hücrelerindeki UV ışınım şiddetini ifade etmektedir. Sisteme (tüm odaya) ait ortalama UV doz miktarı ise hesaplama bölgesi boyunca takibi yapılan her bir patojen partikülün bünyesine almış olduğu dozlar toplamının toplam partikül sayısına (n) bölünmesiyle (aritmetik ortalaması alınarak) hesaplanmaktadır.

$$Ortalama UV \text{ doz} = \frac{\sum_i^n UV \text{ doz}}{n} \quad (13)$$

UV kaynaklı hava dezenfeksiyon sistemlerinin performans değerlendirmesi ortalama UV doz miktarı üzerinden yapılabilmektedir [34], [35].

2.5. Ağ Yapısı ve Ağdan Bağımsız Çözüm

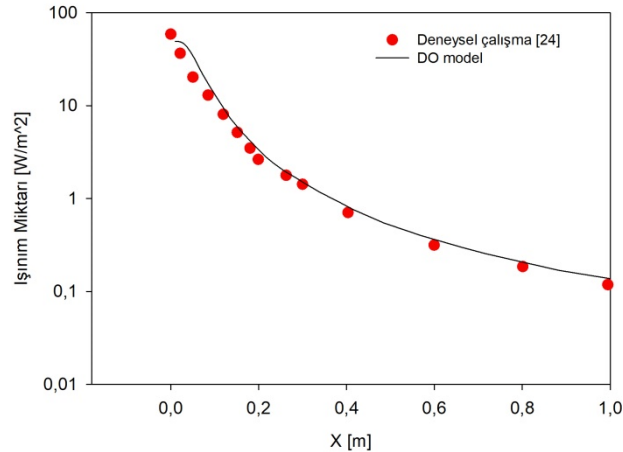


Şekil 2. Ofis odasına uygulanan ağ yapısı.

Ağ yapısı Ansys Fluent Meshing programı kullanılarak oluşturulmuş ve ağdan bağımsızlık çalışması 3 HDK durumu için üç farklı ağ sayısında (102 bin, 458 bin ve 875 bin) gerçekleştirilmiştir. Ağdan bağımsız çözümlerde karşılaştırma parametresi olarak ortalama UV doz üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Üç farklı ağ sayısı için elde edilen sonuçların önemli ölçüde değişmediği (< % 1) görülmüş ve çalışmalar 458 bin ağ sayısında yürütülmüştür. Ayrıca tercih edilen ağ yapısında tüm yüzeylerde y^+ değeri $1 \leq y^+ \leq 3$ aralığındadır.

2.6. Sayısal Modelin Doğrulanması

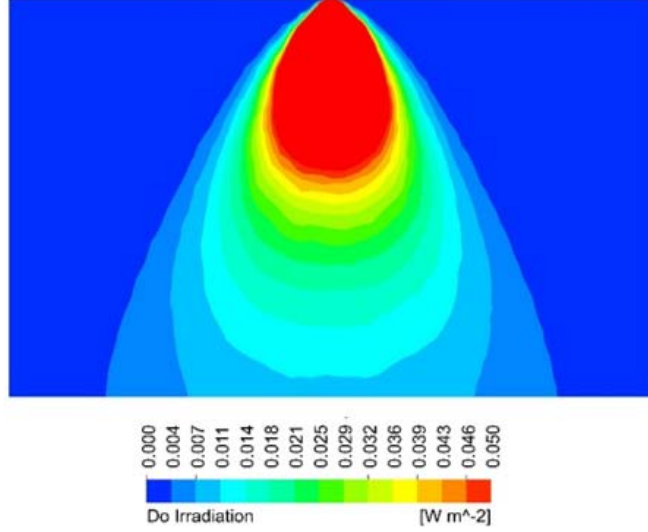
Doğrulama çalışması Uzak UV-C lamba ışınım dağılımı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Işınım modelinin doğrulanmasında Bunchan vd. [24] çalışmasında kullanmış olduğu lamba (12W gücünde bir adet Uzak UVC Kripton Klorür Eksimer lamba (222nm)) dikkate alınmıştır. DO (Discrete Ordinate) model kullanılarak elde edilen ışınım dağılımı ve deneysel veriler karşılaştırmalı olarak Şekil 3'te verilmiştir. İlgili şekil incelendiğinde DO (Discrete Ordinate) model kullanılarak elde edilen sonuçlarının literatürdeki deneysel verilerle yüksek oranda örtüştüğü görülmektedir.



Şekil 3. Uzak UV-C ışınım dağılımlarının karşılaştırılması.

3. BULGULAR

3.1. Uzak UVC Işınım Dağılımının Değerlendirilmesi

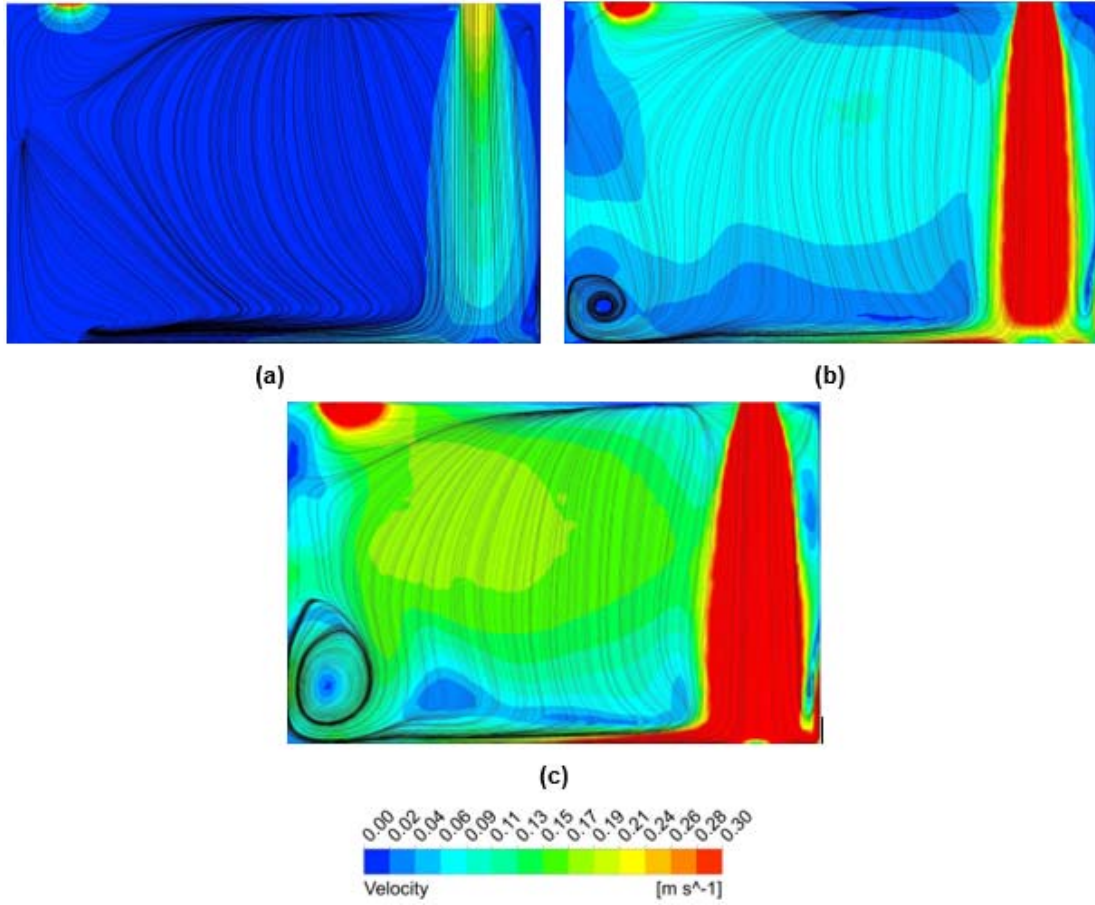


Şekil 4. Oda orta düzlemi üzerindeki Uzak UV-C ışınım dağılımı.

Uzak UVC lambanın oda orta düzlemi üzerinde oluşturduğu ışınım dağılımı Şekil 4'te verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere lambadan yayılan ışınımın odanın tavanından alt bölgesine doğru lamba aydınlatma açısına (60°) bağlı olarak genişlemektedir. Elde edilen eş ışınım konturu değerlendirildiğinde, lamba yüzeyine yakın bölgelerde yüksek olan ışınım şiddetinin lambadan uzaklaştıkça azaldığı net bir biçimde görülmektedir.

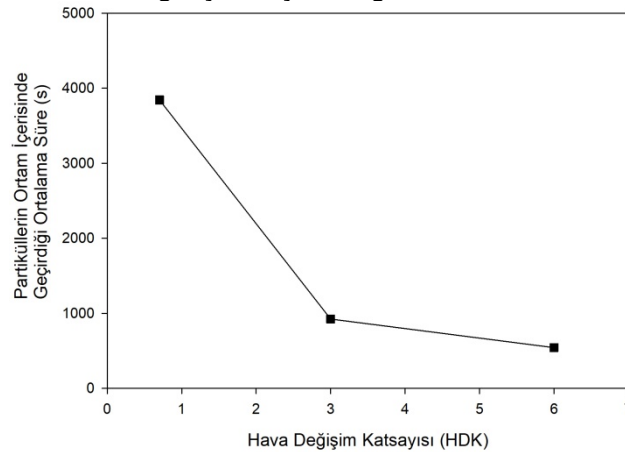
3.2. Hava Hız Dağılımının Değerlendirilmesi

Oda orta düzlemi boyunca farklı HDK değerleri için elde edilen hız konturları ve akım çizgileri Şekil 5'te verilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere, HDK değerindeki artışa bağlı olarak hava jetinin hızı artmakta ve karşı duvar komşuluğunda yüksek hız değerlerine ulaşılmaktadır. Akım çizgileri incelendiğinde, artan hava hızıyla beraber odanın sol alt bölgesinde resirkülasyon hücresinin belirginleştiği ve bu hücre merkezinin kısmen sol duvara doğru yaklaştığı görülmektedir. Ayrıca, sağ duvar alt köşelerinde daha küçük yapıda resirkülasyon hücreleri görülmektedir. Resirkülasyon bölgelerinin içerisine giren partikülleri uzun süreler muhafaza ederek partiküllerin ortam içerisindeki geçirdikleri süreyi artırabileceği vurgulanmalıdır.



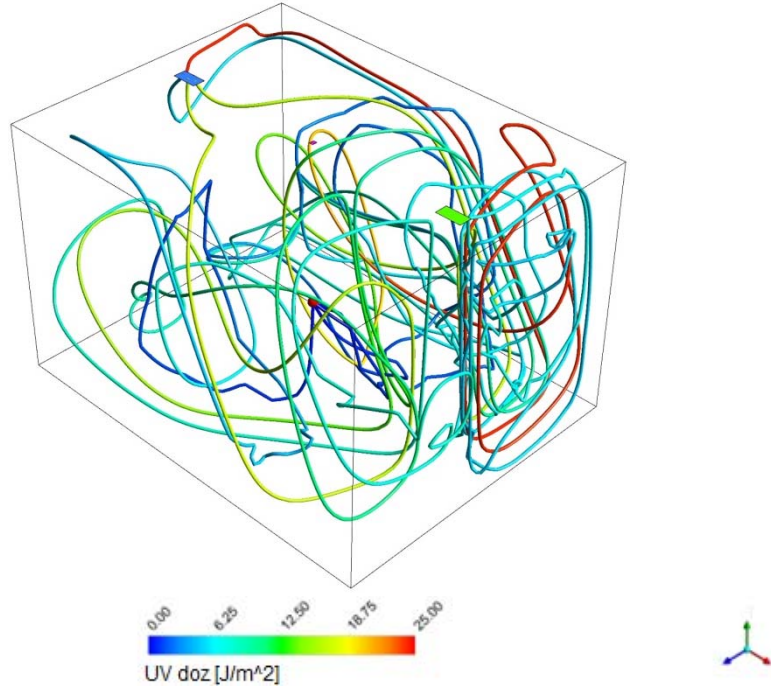
Şekil 5. Farklı HDK değerleri için oda merkez düzlemi üzerindeki eş hız eğrileri ve akım çizgileri. (a) 0.7 HDK (b) 3 HDK (c) 6 HDK

Akış alanları dikkatli bir şekilde incelendiğinde, artan HDK ile oda içerisindeki hava hızlarının daha yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. Partikül taşınımında belirleyici büyüklüğün sürüklenme/yerçekimi kuvveti olduğu hatırlanacak olursa, hava hızındaki artışın sabit yerçekimi kuvveti karşısında bu oranı arttıracak ve partikülün taşınımını hızlandıracak açıktır. Diğer bir deyişle hava hızındaki bu artış, partiküllerin ortam içerisinde geçirdikleri süre üzerinde belirleyici mekanizmayı oluşturmaktadır. Artan hava hızları ile birlikte partiküllerin ortam içerisinde geçirdikleri sürede azalacaktır. Şekil 6'da hava değişim katsayısına bağlı olarak, partiküllerin ortam içerisinde geçirdikleri ortalama süreler sunulmaktadır. İlgili grafik incelendiğinde artan HDK ile birlikte partiküllerin ortam içerisinde geçirdikleri sürenin azaldığı açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 6. Farklı HDK değerleri için partiküllerin ortam içerisinde geçirdiği ortalama süreler.

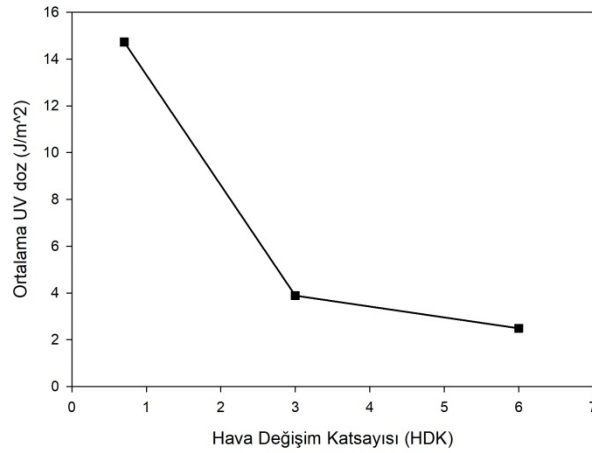
3.3. HDK'nın Hava Dezenfeksiyon Performansı Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi



Şekil 7. Oda içerisine salınan partiküllerin UV doz alım süreci (Görsel için 4 adet partikül ile sınırlı tutulmuştur).

Oda içerisine salınan partiküllerin UV doz alım süreçleri Şekil 7’de sunulmuştur. Oda içerisine salınan her bir partikül, ortama sıfır UV doz değeri ile girmektedir. Akış yapısına bağlı olarak farklı yörüngeler üzerinde hareket eden partiküller, hareketlerini sürdürdükleri yörüngeler üzerinde konuma bağlı olarak farklı ışınım miktarlarına maruz kalmaktadırlar. Dolayısıyla her bir partikülün aldığı UV doz miktarı değişkenlik göstermektedir. İlgili görsel UV doz alım süreci hakkında detaylı bilgi sunmaktadır.

Farklı HDK için elde edilen ortalama UV doz miktarları Şekil 8’de verilmiştir. Ortalama UV doz miktarları, partikül salım noktasından çıkış menfezine kadar takibi yapılan her bir partikülün almış olduğu kümülatif UV doz değerlerinin aritmetik ortalaması üzerinden hesaplanmıştır. İlgili şekil incelendiğinde, artan HDK değeri ile birlikte ortalama UV doz miktarının azaldığı net bir biçimde görülmektedir. Bu durum literatürde de not edilmiştir [23], [34], [35]. Ortalama UV doz değerindeki bu azalma, artan HDK ile birlikte ortam içerisinde daha yüksek hızların oluşmasına ve dolayısıyla partiküllerin Uzak UVC ışınım bölgesi içerisinde geçirdikleri sürenin azalmasıyla açıklanabilir.



Şekil 9. Farklı HDK değerleri için ortalama UV doz değerleri.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, bir ofis odası havasının Uzak-Ultraviyole C (222 nm) ışınları ile dezenfeksiyonu sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada HDK'nın Uzak UV-C hava dezenfeksiyon sisteminin etkinliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- 60° aydınlatma açısına sahip bir Uzak UV-C lamba kullanılarak elde edilen ışınım dağılımının odanın tamamını kaplamadığı görülmüştür. Daha büyük aydınlatma açılarında sahip lamba kullanımının oda içerisindeki ışınım hacmini ve dolayısıyla dezenfeksiyon etkinliğini arttıracaktır.
- Artan HDK ile birlikte partiküllerin ortam içerisindeki geçirdikleri süre azalmaktadır.
- Uzak UV-C hava dezenfeksiyon sistemlerinin düşük hava değişim katsayısına (HDK) sahip ortamlarda daha etkin olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] R. C. Reiner vd., "Modeling COVID-19 scenarios for the United States", *Nat Med*, c. 27, sy 1, 2021, doi: 10.1038/s41591-020-1132-9.
- [2] H. Xu vd., "Possible environmental effects on the spread of COVID-19 in China", *Science of the Total Environment*, c. 731, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139211.
- [3] C. Rao, "Medical certification of cause of death for COVID-19", *Bulletin of the World Health Organization*, c. 98, sy 5, 2020. doi: 10.2471/BLT.20.257600.
- [4] S. Gautam ve L. Hens, "COVID-19: impact by and on the environment, health and economy", *Environment, Development and Sustainability*, c. 22, sy 6, 2020. doi: 10.1007/s10668-020-00818-7.
- [5] Md. B. Hasan, M. Mahi, T. Sarker, ve Md. R. Amin, "Spillovers of the COVID-19 Pandemic: Impact on Global Economic Activity, the Stock Market, and the Energy Sector", *Journal of Risk and Financial Management*, c. 14, sy 5, 2021, doi: 10.3390/jrfm14050200.
- [6] T. Dbouk ve D. Drikakis, "On coughing and airborne droplet transmission to humans", *Physics of Fluids*, c. 32, sy 5, 2020, doi: 10.1063/5.0011960.
- [7] J. Schijven, L. C. Vermeulen, A. Swart, A. Meijer, E. Duizer, ve A. M. de Roda Husman, "Quantitative microbial risk assessment for airborne transmission of sars-cov-2 via breathing, speaking, singing, coughing, and sneezing", *Environ Health Perspect*, c. 129, sy 4, 2021, doi: 10.1289/EHP7886.
- [8] Y. Li vd., "Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment - A multidisciplinary systematic review", *Indoor Air*, c. 17, sy 1, 2007. doi: 10.1111/j.1600-0668.2006.00445.x.
- [9] L. Morawska, "Droplet fate in indoor environments, or can we prevent the spread of infection?", içinde *Indoor Air*, 2006, c. 16, sy 5. doi: 10.1111/j.1600-0668.2006.00432.x.
- [10] M. Nicas, W. W. Nazaroff, ve A. Hubbard, "Toward understanding the risk of secondary airborne infection: Emission of respirable pathogens", *J Occup Environ Hyg*, c. 2, sy 3, 2005, doi: 10.1080/15459620590918466.
- [11] X. Li, J. Niu, ve N. Gao, "Co-occupant's exposure of expiratory droplets Effects of mouth coverings", içinde *HVAC and R Research*, 2012, c. 18, sy 4. doi: 10.1080/10789669.2011.607879.
- [12] J. Gralton, E. Tovey, M. L. McLaws, ve W. D. Rawlinson, "The role of particle size in aerosolised pathogen transmission: A review", *Journal of Infection*, c. 62, sy 1, 2011. doi: 10.1016/j.jinf.2010.11.010.
- [13] S. L. Miller vd., "Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event", *Indoor Air*, c. 31, sy 2, 2021, doi: 10.1111/ina.12751.
- [14] World Health Organization, "Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19", 2021.
- [15] E. R. Blatchley vd., "Far UV-C radiation: An emerging tool for pandemic control", <https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2084315>, 2022, doi: 10.1080/10643389.2022.2084315.

- [16] E. Eadie, I. M. R. Barnard, S. H. Ibbotson, ve K. Wood, "Extreme Exposure to Filtered Far-UVC: A Case Study†", *Photochem Photobiol*, c. 97, sy 3, 2021, doi: 10.1111/php.13385.
- [17] R. P. Hickerson vd., "Minimal, superficial DNA damage in human skin from filtered far-ultraviolet C", *British Journal of Dermatology*, c. 184, sy 6, 2021. doi: 10.1111/bjd.19816.
- [18] S. Kaidzu, K. Sugihara, M. Sasaki, A. Nishiaki, T. Igarashi, ve M. Tanito, "Evaluation of acute corneal damage induced by 222-nm and 254-nm ultraviolet light in Sprague–Dawley rats", *Free Radic Res*, c. 53, sy 6, 2019, doi: 10.1080/10715762.2019.1603378.
- [19] N. Yamano vd., "Long-term Effects of 222-nm ultraviolet radiation C Sterilizing Lamps on Mice Susceptible to Ultraviolet Radiation", *Photochem Photobiol*, c. 96, sy 4, 2020, doi: 10.1111/php.13269.
- [20] T. Fukui vd., "Exploratory clinical trial on the safety and bactericidal effect of 222-nm ultraviolet C irradiation in healthy humans", *PLoS One*, c. 15, sy 8 August, 2020, doi: 10.1371/journal.pone.0235948.
- [21] S. Kaidzu vd., "Re-Evaluation of Rat Corneal Damage by Short-Wavelength UV Revealed Extremely Less Hazardous Property of Far-UV-C†", *Photochem Photobiol*, c. 97, sy 3, 2021, doi: 10.1111/php.13419.
- [22] A. G. Buchan, L. Yang, ve K. D. Atkinson, "Predicting airborne coronavirus inactivation by far-UVC in populated rooms using a high-fidelity coupled radiation-CFD model", *Sci Rep*, c. 10, sy 1, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-76597-y.
- [23] T. Xia, K. Guo, Y. Pan, Y. An, ve C. Chen, "Temporal and spatial far-ultraviolet disinfection of exhaled bioaerosols in a mechanically ventilated space", *J Hazard Mater*, c. 436, s. 129241, Ağu. 2022, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2022.129241.
- [24] A. G. Buchan, L. Yang, D. Welch, D. J. Brenner, ve K. D. Atkinson, "Improved estimates of 222 nm far-UVC susceptibility for aerosolized human coronavirus via a validated high-fidelity coupled radiation-CFD code", *Scientific Reports 2021 11:1*, c. 11, sy 1, ss. 1-9, Eki. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-99204-0.
- [25] "ANSYS Fluent Theory Guide 15".
- [26] F. Chen, S. C. M. Yu, ve A. C. K. Lai, "Modeling particle distribution and deposition in indoor environments with a new drift-flux model", *Atmos Environ*, c. 40, sy 2, ss. 357-367, Oca. 2006, doi: 10.1016/j.atmosenv.2005.09.044.
- [27] S. A. Morsi ve A. J. Alexander, "An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems", *J Fluid Mech*, c. 55, sy 2, 1972, doi: 10.1017/S0022112072001806.
- [28] Y. (Don) Guan, A. Ramesh, ve F. Memarzadeh, "The effects of patient movement on particles dispersed by coughing in an indoor environment", *Applied Biosafety*, c. 19, sy 4, 2014, doi: 10.1177/153567601401900401.
- [29] D. al Assaad, C. Habchi, K. Ghali, ve N. Ghaddar, "Effectiveness of intermittent personalized ventilation in protecting occupant from indoor particles", *Build Environ*, c. 128, 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.11.027.
- [30] R. Perez-Padilla, A. Schilman, ve H. Riojas-Rodriguez, "Respiratory health effects of indoor air pollution", *International Journal of Tuberculosis and Lung Disease*, c. 14, sy 9, 2010.
- [31] V. K. Pareek ve A. A. Adesina, "Light intensity distribution in a photocatalytic reactor using finite volume", *AIChE Journal*, c. 50, sy 6, 2004, doi: 10.1002/aic.10107.
- [32] ACGIH, "TLVs and BEIs (2021)", 2021.
- [33] C. K. Ho, S. S. Khalsa, H. B. Wright, ve E. Wicklein, "Modeling UV Disinfection Using Integrated Computational Fluid Dynamics and Discrete Ordinates Radiation Models", *Proceedings of the Water Environment Federation*, c. 2009, sy 1, 2012, doi: 10.2175/193864709793848103.
- [34] C. J. Noakes, P. A. Sleight, L. A. Fletcher, ve C. B. Beggs, "Use of CFD modelling to optimise the design of upper-room UVGI disinfection systems for ventilated rooms", *Indoor and Built Environment*, c. 15, sy 4, 2006, doi: 10.1177/1420326X06067353.
- [35] C. A. Gilkeson ve C. Noakes, "Application of CFD simulation to predicting upper-room UVGI effectiveness", *Photochemistry and Photobiology*, 2013, c. 89, sy 4. doi: 10.1111/php.12013.



ÖZGEÇMİŞ

Fatih ATCI

1994 Milas doğumludur. 2016 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun olmuştur. 2020 yılından itibaren KTÜ Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. 2021 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü'nde başladığı doktora eğitimini halen devam ettirmektedir.

Yunus Emre ÇETİN

Berlin Teknik Üniversitesi Hermann Rietschel Enstitüsü'nde doktora sonrası araştırmacı olarak görev yapmaktadır. Havalandırma, binalarda enerji verimliliği, temiz odalar ve ameliyathaneler gibi kontrollü sahalarda kirletici dağılımı vb. konularda çalışmaktadır.

Orhan AYDIN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim Dalı öğretim üyesidir. Araştırma ilgisi, mikro-elektro-mekanik sistemlerde akış ve ısı geçişi, elektronik soğutma ve enerji depolama gibi konuları kapsamaktadır.