

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ORCID : - - -**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /**

**Tezin Savunma Tarihi : / /**

**Tez Danışmanı :**

**ORCID : - - -**

**Trabzon**

## ÖNSÖZ

Günümüzde insanlar zamanlarının %90'ından fazlasını kapalı ortamlarda geçirmektedirler. Havada bulunan ve bulaşıcı birçok hastalığa neden olan patojenlerin (virüs, bakteri ve mantar) kapalı ortamlarda yayılmaları iç hava kalitesinin sağlanması yolunda önemli bir problem teşkil etmektedir. Özellikle son günlerde Yeni Tip Koronavirüs (Covid-19) salgının tüm dünyayı etkisi altına alması, bulaşıcı hastalıklara verilen önemin daha da artmasına neden olmuştur. İç ortam hava kalitesinin iyileştirilmesi; insan sağlığı, iş kaybı ve tıbbi tedaviler nedeniyle ortaya çıkan ekonomik kayıplar açısından da büyük önem arz etmektedir. Dolayısı ile söz konusu patojenlerin ortam havasından uzaklaştırılması veya etkisiz hale getirilerek ortam havasının sağlık açısından tehlike barındırmayan bir yapıya kavuşturulması büyük önem taşımaktadır.

Havalandırma kanallarında UVC lambaların kullanımı, hava yolu ile iç ortama taşınan patojenlerin inaktivasyonunu sağlayarak iç hava kalitesinin iyileştirilmesinde ve bulaşıcı hastalıkların kontrol altına alınmasında tercih edilen etkili bir yöntemdir. Bu sistemlerin etkin bir şekilde tasarlanması enerji tüketimi ve dezenfeksiyon performansı açısından oldukça önemlidir.

Bu çalışma kapsamında, bir havalandırma kanalı içerisinde farklı UVC lamba yerleşim konumları ve kanal cidarlarının farklı yansıma oranları için ilgili sistemlerin dezenfeksiyon performansı sayısal olarak incelenmiştir.

Yüksek lisans eğitimim süresince desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mete AVCI' ya ve Öğr. Gör. Dr. Yunus Emre ÇETİN' e teşekkürlerimi bir borç bilirim. Bu süreçte yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Mehmet SAĞLAM' a, Arş. Gör. Soner BİRİNCİ' ye ve Arş. Gör. Aleyna AĞIRMAN başta olmak üzere tüm TFL ekibine teşekkür ederim.

Öte yandan, hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini her an yanımda hissettiğim aileme sonsuz teşekkür ederim.

Fatih ATCI  
Trabzon, 2020

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Kanal İçi UVC Sistemlerinde Lamba Konumunun ve Yansıma Oranının Dezenfeksiyon Performansı Üzerindeki Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Mete AVCI’ nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 22/06/2020

Fatih ATCI

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Biyolojik Kirleticiler .....	2
1.3. Hava Filtrasyon ve Dezenfeksiyon Yöntemleri .....	2
1.3.1. Filtrasyon / Filtreleme .....	4
1.3.2. Ultraviyole Antiseptik Işınım.....	5
1.4. UVC Hava Dezenfeksiyon Sistemleri.....	9
1.4.1. Kanal-İçi UVC Sistemler .....	9
1.4.2. Üst-Oda UVC Sistemler .....	11
1.4.3. Resirkülasyonlu UVC Sistemler .....	13
1.5. Kanal İçi UVC Sistemlerinin Performans Karakteristikleri.....	14
1.6. Kanal İçi UVC Sistemlerinin Dezenfeksiyon Performansını Etkileyen Faktörler.....	17
1.7. Kanal İçi UVC Sistemlerinin Dezenfeksiyon Performansının Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler.....	19
1.8. Literatür Araştırması .....	20
1.9. Tezin Amacı ve Kapsamı .....	23
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	25
2.1. Sayısal Çalışma .....	25
2.1.1. Geometrik Modelin Oluşturulması.....	25
2.1.2. Hava Akışının Modellenmesi.....	27

2.1.3.	Partikül Hareketinin Modellenmesi.....	29
2.1.4.	UV Lamba Işınım Alanının Modellenmesi .....	30
2.1.5.	UV Doz Hesabı .....	34
2.1.6.	Sınır Koşulları .....	36
2.1.7.	Ağ Yapısı.....	38
2.1.8.	Sayısal Modelin Doğrulanması .....	40
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	42
3.1.	Hız Alanlarının İncelenmesi.....	42
3.2.	UV Işınım Alanlarının İncelenmesi .....	45
3.3.	UV Doz Dağılımlarının İncelenmesi.....	50
3.4.	Ortalama UV Doz Miktarlarının İncelenmesi .....	54
3.5.	Bağıl Doz Etkinlik Oranlarının İncelenmesi .....	58
4.	SONUÇLAR.....	64
5.	ÖNERİLER .....	67
6.	KAYNAKLAR.....	68
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

KANAL İÇİ UVC SİSTEMLERİNDE LAMBA KONUMUNUN VE YANSIMA  
ORANININ DEZENFEKSİYON PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN  
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Fatih ATCI

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Mete AVCI  
2020, 74 Sayfa

Bu çalışmada, 45°'lik daralma elemanı sonrası kare kesitli havalandırma kanalında konumlandırılan UV lambalarının dezenfeksiyon performansı sayısal olarak incelenmiştir. UV lamba eksen konumu (Z01-Z1), lambalar arası mesafe (H1-H7) ve kanal cidar yansıma oranı (%0 ve %25) değişken parametreler olarak dikkate alınmış ve her bir parametrenin dezenfeksiyon performansı üzerindeki ayırık ve bütünleşik etkisi araştırılmıştır. Sayısal çalışmada, hava hareketlerinin çözümlenmesinde Standart  $k - \varepsilon$  türbülans modeli kullanılmıştır. Belirlenen akış alanı içerisinde her bir partiküle ait yörüngeler ayırık faz modeli (DPM- Discrete Phase Modeling) kullanılarak belirlenmiştir. Kanal içerisindeki lamba diziliminin oluşturduğu ışınım alanı ayırık ordinatlar (DO-Discrete Ordinates) ışınım modeli kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca, kanal içerisinde takibi yapılan her bir partikülün maruz kaldığı UV doz hesaplanmıştır.

Ele alınan değişkenler kapsamında sırasıyla hız alanları, UV ışınım alanları, UV doz dağılımları, ortalama UV doz miktarları ve BDE oranları üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır. İncelenen tüm durumlarda aynı sayıda ve güçte UV lamba kullanılmasına rağmen sistemlere ait hız ve UV ışınım alanı, UV doz dağılımı, ortalama UV doz miktarı ve BDE'nin lambaların kanal içerisindeki yerleşim durumuna ve kanal cidar yansıma oranına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir

**Anahtar Kelimeler:** Kanal-içi UVC sistemleri, Hava dezenfeksiyonu, UV lamba konumu ve dizilimi, Yansıma oranı, UV doz.

Master Thesis

## SUMMARY

### NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF LAMP POSITION AND REFLECTIVITY ON DISINFECTION PERFORMANCE OF IN DUCT UVC SYSTEMS

Fatih ATCI

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Mechanical Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Mete AVCI  
2020, 74 Pages

In this study, disinfection performance of UV lamps that are positioned after a 45° contracting component in a square cross sectioned ventilation duct are investigated numerically. Axial positions of UV lamps (Z01-Z1), distance between lamps (H1-H7) and duct reflectance (0% and 25%) are considered as the main parameters and the each and combined effect of these parameters on disinfection performance are investigated. In the numerical analysis, air flow distribution is solved with Standard  $k - \varepsilon$  turbulence model. Trajectory of each particle followed in the obtained flow domain are specified with using discrete phase modeling (DPM). Irradiation field formed by in-duct lamps are specified by using discrete ordinates method. Also, UV dose exposure of each particle tracked is calculated.

In this respect, assessments are conducted in terms of air velocity fields, UV radiation fields, UV dose distributions, average UV dose values and RDE (Relative dose effectiveness) values, respectively. Although identical number and power of lamps are employed in each case, it is determined that air velocity and UV irradiation fields, UV dose distributions and RDE values shows varying characters up to lamp positions and duct wall reflectivity.

**Key Words:** In-duct UVC systems, Air disinfection, UV lamp position and array, Reflectivity, UV dose.



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.	Havalandırma sisteminde olası mikrobiyolojik kirlenme kaynakları ve yolları (Dönmez, 2002). .....	3
Şekil 2.	Elektromanyetik spektrum (Capetillo, 2015). .....	7
Şekil 3.	Tipik bir UV lambaya ait şematik görünüm (Ashrae, 2012). .....	8
Şekil 4.	Düşük-Orta Basıncılı UV lambaların ışınım spektrumu (Kowalski, 2009). .....	9
Şekil 5.	Kanal içi UVC hava dezenfeksiyon sistemine ait uygulama örneği .....	10
Şekil 6.	Soğutma serpantin yüzeylerinde UVC uygulaması öncesi (solda) ve sonrası (sağda) (URL-2, 2019). .....	11
Şekil 7.	Üst oda hava dezenfeksiyon sistemlerinde kullanılan UVC lamba armatürleri; (a) tavan uygulaması, (b) yan duvar uygulaması (URL-3, 2019). .....	12
Şekil 8.	Üst-oda UVC sistemine ait şematik resim (Kowalski, 2009). .....	13
Şekil 9.	Resirkülasyonlu UVC sistemler; (a) taşınabilir, (b) tavana monte edilebilir (URL-4). .....	14
Şekil 10.	Tek kademeli azalım modeli örneği .....	16
Şekil 11.	Kanal geometrisi ve UV lamba konumlarına ait şematik görünüm .....	26
Şekil 12.	1/8'lik kısmın açısal ayrıklaştırılması .....	31
Şekil 13.	Açısal koordinat sistemi .....	32
Şekil 14.	Saydam olmayan duvarda ışınım enerji dengesi .....	32
Şekil 15.	Dağınık yansımaya ait şematik görünüm .....	33
Şekil 16.	Düzgün yansımaya ait şematik görünüm .....	33
Şekil 17.	Hesaplama bölgesi sonunda takibi yapılan her bir partikülle ait ilgili verileri içeren örnek hesaplama dosyası görüntüsü .....	35
Şekil 18.	Partiküllerin UV ışınım bölgesinden geçerken almış oldukları doz miktarlarına ait örnek bir şematik görünüm. ....	36
Şekil 19.	Hesaplama bölgesine uygulanan ağ yapısı .....	39
Şekil 20.	Test bölgesine ait şematik görünüm .....	40
Şekil 21.	Tüm lamba konfigürasyonları için kanal merkez düzlemi üzerindeki eş hız alanları .....	44
Şekil 22.	Z=0.1m'deki tüm lamba dizilim durumlarına ait kanal merkez düzlemi üzerinde gösterilen eş ışınım alanları; (a) %0 yansımaya, (b) %25 yansımaya .....	47
Şekil 23.	Z=0.6m'deki tüm lamba dizilim durumlarına ait kanal merkez düzlemi üzerinde gösterilen eş ışınım alanları; (a) %0 yansımaya, (b) %25 yansımaya .....	48

Şekil 24. Z = 1m'deki tüm lamba dizilim durumlarına ait kanal merkez düzlemi üzerinde gösterilen eş ışınım alanları; (a) %0 yansımaya, (b) %25 yansımaya .....	49
Şekil 25. Tüm lamba konfigürasyonlarına ait ortalama UV doz miktarları; (a) %0 yansımaya oranı, (b) %25 yansımaya oranı.....	55
Şekil 26. İki farklı yansımaya oranı için tüm lamba konfigürasyonlarına ait ortalama UV doz miktarları .....	57
Şekil 27. Tüm lamba dizilim durumlarına ait bağıl doz etkinlik (BDE) oranları; (a) %0 yansımaya durumu, (b) %25 yansımaya durumu .....	59
Şekil 28. %0 yansımaya durumunda Z1 lamba eksen konumundaki lamba dizilim durumları için kanal çıkışında referans doz değeri ( $\geq 23.39 \text{ J/m}^2$ ) ve üzerinde doza maruz kalan partiküllerin şematik görünümü.....	62
Şekil 29. İki farklı yansımaya durumu için Z1H1 ve Z1H7 konfigürasyonlarında referans doz değeri ve üzerinde ( $\geq 23.39 \text{ J/m}^2$ ) doza maruz kalan partiküllerin kanal çıkış kesitindeki şematik görünümü.....	63

## TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. UV lamba konumlarına bağlı oluşturulan geometrik konfigürasyonlar.....	27
Tablo 2. Türbülans modeline ait katsayılar .....	29
Tablo 3. Ortalama UV doz miktarı üzerinden gerçekleştirilen ağdan bağımsızlık çalışmasına ait sonuçlar .....	40
Tablo 4. Test bölgesine ait ortalama UV doz miktarları .....	41
Tablo 5. %0 yansımada tüm lamba dizilim durumları için hesaplanan değişim katsayısı değerleri .....	52
Tablo 6. %25 yansımaya için tüm lamba dizilim durumları için hesaplanan değişim katsayısı değerleri .....	53
Tablo 7. %25 yansımaya durumunda Z01H2 ve Z01H7 konfigürasyonlarına ait ortalama UV doz, değişim katsayısı ve BDE oranları. ....	61

## SEMBOLLER DİZİNİ

### Kısaltmalar

BDE	: Bağlı Doz Etkinliği
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
RTD	: Radyatif Transfer Denklemi
UV	: Ultraviyole

### Semboller

$\alpha$	: yutma katsayısı
$C_d$	: partiküller için sürüklenme katsayısı
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$	: k- $\varepsilon$ türbülans modeli sabitleri
$d_p$	: partikül çapı [m]
D	: uv doz miktarı [J/m <sup>2</sup> ]
$f_d$	: dağılık fraksiyon
$F_D$	: gevşeme zamanının tersi [1/s]
$F_e$	: partiküle etki eden ek kuvvetler
$g$	: yerçekimi ivmesi [m/s <sup>2</sup> ]
$G_k$	: ortalama hız gradyanına bağlı türbülans kinetik enerji üretimi
$G_b$	: kaldırma kuvvetlerine bağlı türbülans kinetik enerji üretimi
H	: düşey konum [m]
I	: birim alandaki ışınım/radyasyon miktarı [W/m <sup>2</sup> ]
$I_\lambda$	: konum ve yöne bağlı ışınım şiddeti [W/m <sup>2</sup> ]
$I_{b\lambda}$	: siyah cismin ışınım şiddeti [W/m <sup>2</sup> ]
k	: mikroorganizma UV hassasiyeti [m <sup>2</sup> /J]
$k$	: türbülans kinetik enerjisi
n	: kırılma indisi, toplam partikül sayısı
$N_\theta, N_\varphi$	: açısal ayrıklaştırma parametreleri

$p$	: basınç [Pa]
$Pr_t$	: türbülans Prandtl sayısı
$Re$	: Reynolds sayısı
$s$	: alınan yol [m]
$S$	: mikroorganizmaların hayatta kalma oranı
$S_k, S_\varepsilon$	: kaynak terimleri
$t$	: zaman, mikroorganizmanın UV ışınlarına maruziyet süresi [s]
$T$	: sıcaklık [K]
$T_w$	: duvar yüzey sıcaklığı [K]
$u$	: x doğrultusundaki hız bileşeni [m/s]
$u_j$	: kartezyen koordinatlarda hız bileşeni [m/s]
$u_p$	: partikülün hız vektörü [m/s]
$v$	: y doğrultusundaki hız bileşeni [m/s]
$q_a$	: duvar yüzeyinde soğurulan ışınım
$q_{d,r}$	: duvar yüzeyinden dağınık yansıyan ışınım
$q_i$	: duvar yüzeyine gelen ışınım
$q_{s,r}$	: duvar yüzeyinden düzgün olarak yansıyan ışınım
$w$	: z doğrultusundaki hız bileşeni [m/s]
$x, y, z$	: kartezyen koordinatlar
$Z$	: eksenel konum [m]
$\delta_{ij}$	: kronekar delta

### Yunan Harfleri

$\Omega'$	: katı açısı
$\varepsilon$	: türbülans kinetik enerjisi yayılım oranı
$\varepsilon_w$	: duvar yüzeyi yayma oranı
$\theta$	: kutup açısı
$\theta_i$	: gelen ışının duvarın normaliyile yaptığı açı
$\theta_r$	: yansıyan ışının duvarın normaliyile yaptığı açı
$\lambda$	: dalga boyu [nm]
$\mu$	: akışkanın dinamik viskozitesi [kg/m.s]
$\mu_t$	: türbülans dinamik viskozitesi

$\rho$	: yoğunluk [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_p$	: partikülün yoğunluğu [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	: Stefan-Boltzmann sabiti
$\sigma_k$	: $k$ için türbülans Prandtl sayısı
$\sigma_\varepsilon$	: $\varepsilon$ için türbülans Prandtl sayısı
$\sigma_s$	: yayılım katsayısı
$\Phi$	: faz fonksiyonu
$\varphi$	: azimut açısı
$\xi_1, \xi_2, \xi_3$	: partikülün sürüklenme denklemindeki sabitler

### Üst İndisler

'	: çalkantı değeri
–	: ortalama değeri

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Günümüzde insanlar hayatlarının neredeyse %90'ından fazlasını kapalı mahallerde geçirmektedirler. Bu sebeple, kapalı mahallerdeki hava kalitesi izlenmesi gereken önemli bir parametre olarak ifade edilmektedir. Yapılan birçok çalışma (Awad ve Farag, 1999; Górný ve Dutkiewicz, 2002; Daisey vd., 2003; Obbard ve Fang, 2003) kapalı ortamlardaki havanın dış ortama göre daha fazla kirletici barındırdığını göstermektedir. İç ortam havası; biyolojik kaynaklı mantar, küf, bakteri, virüs vb. biyoaerosoller ile biyolojik olmayan toz ve diğer kirleticiler nedeniyle kirlenmektedir (Ashrae, 2017). Kapalı mekanlardaki bu kirlilik olumsuz konfor şartları ve olası sağlık problemlerinin önünü açmaktadır. Patojen ve kimyasal kaynaklı hava kirliliği, aynı zamanda Dünya Sağlık Örgütü tarafından da günümüzdeki en büyük sağlık risklerinden biri olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla, her türlü kapalı ortam havası içerisinde bulunan ve insan sağlığını tehdit eden biyoaerosollerin halk sağlığı üzerindeki etkisi büyüktür. Havadaki mikroorganizmalar ve yan ürünlerini içeren biyoaerosoller, maruz kalınması durumunda, alerjik reaksiyonlardan şiddetli solunum yolu hastalıklarına kadar çeşitli sağlık sorunlarına neden olabilmektedirler. İnsan sağlığı açısından tehlike arz eden patojenlerin havadaki partiküllere tutunarak yayıldığı bilinen bir olgudur. Bu patojenlerle bulaşan tüberküloz ve benzeri solunum yolu hastalıkları, dünyada her yıl milyonlarca insanın ölümüne neden olmaktadır (URL-1, 2020; FIRS, 2017). Birçok solunum yolu hastalığına sebep olan biyolojik kirleticilerin, ilgili hastalıkların tedavisinde kullanılan ilaçlara karşı sürekli direnç kazanmaları ayrıca büyük bir tehdit oluşturmaktadır (Górný vd., 2002; Fracchia vd., 2006). Hava yoluyla bulaşan bazı patojen mikroorganizmalar ve mikrobiyal toksinlerin kitle imha silahı olarak kullanım potansiyeli biyoaerosoller konusuna verilen önemi daha arttırmıştır. Dünyada 'biyoterorizm' olarak ifade edilen bu tehdit içerisinde, Tularemi etkeni (*Francisella tularensis*), veba etkeni (*Yersinia pestis*), şarbon etkeni (*Bacillus anthracis*) ve çiçek virüsü olası aerosol bırakma metoduyla uygulanabilecek kitle imha silahları olarak gösterilmektedir (Kowalski ve Bahnfleth, 2002; Stetzenbach vd., 2004). Dolayısıyla, söz konusu patojenlerin ortamdan uzaklaştırılması veya ortam havasına girmeden etkisiz hale getirilmesi uygun bir iç hava kalitesinin sağlanması için büyük önem taşımaktadır.

## 1.2. Biyolojik Kirleticiler

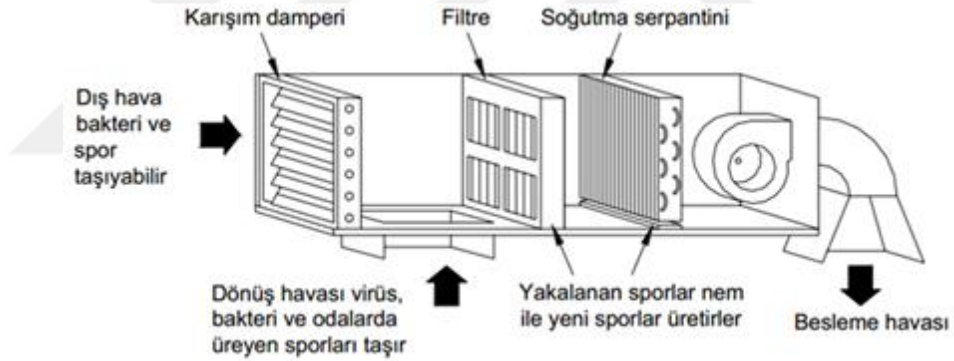
Havada bulunan bakteri, mantar, mantar sporları, virüsler ile polen ve onların bileşenlerini içeren biyolojik kökenli tüm organik maddeler 'biyoaerosol' olarak adlandırılır (Stetzenbach vd., 2004). Bazı mikroorganizma formları biyoaerosoller oluşturabilir ve biyoaerosol formundaki bazı türler ise insan sağlığı açısından tehlike barındırabilirler. Biyoaerosoller iç ve dış ortamda buldukları gibi çeşitli kaynaklardan da çoğalabilirler. Bitkiler, mikroorganizma içeren su birikintileri, hayvanların ve insanların solunum sistemleri biyoaerosoller için birer kaynak formundadır. Ayrıca, binalardaki havalandırma tesisatı, ortam şartları (nem, sıcaklık vb.) mikroorganizmaların büyümesi için elverişli olduğunda ikincil bir biyoaerosol kaynağı haline gelebilmektedir (Ke, 2008). Bakteri, mantar, virüs, polen ve memeli alerjenleri iç ve dış ortam havasında en yaygın görülen biyoaerosollerdir (Burge, 1995; Baron ve Willeke, 2001). İç mahallerde konuşma, öksürme ve hapşırma gibi durumlar sonucu hastalık yapıcı özelliğe sahip biyoaerosoller (patojen) iç ortam havasına karışabilmektedir. Biyoaerosol partikülleri sadece tek bir mikroorganizma hücresinden oluşabildiği gibi birkaç mikroorganizmanın birleşmesi ve hatta toz gibi biyolojik olmayan parçacıklara yapışmış mikroorganizma kümelerinden oluşabilmektedirler. Biyoaerosol parçacıkları genellikle su damlacıklarına yapışırlar. Buharlaşmayla birlikte biyoaerosoller çoğunlukla damlacık çekirdekleri (droplet nuclei) haline kavuşur. Mikron veya mikron altı boyutlara sahip bu çekirdekler havada çok uzun süre asılı kalabilir ve konveksiyonel hava akımları biyoaerosollerin belirli bir alanda yayılmasına neden olur (Beggs, 2003). Havada yayılan biyoaerosoller içerisinde patojen bulunması durumunda ise, biyoaerosoller hava içerisinde hastalık yayıcı birer potansiyel araç haline gelir. Biyoaerosoller çeşitli boyutlarda olabilirler. Bazı virüsler 0,003 ila 0,06 µm çaplarında olmakla beraber, genellikle koloniler veya diğer taneciklere yapışmış olarak bulunurlar. Bakterilerin çoğu 0,4 ila 5 µm çapındadır ve genellikle büyük taneciklerle beraber bulunurlar. Mantar sporları 10 ila 30 µm, polen tanecikleri ise 10 ila 100 µm arasında çaplara sahiptir (Kowalski, 2009).

## 1.3. Hava Filtrasyon ve Dezenfeksiyon Yöntemleri

İnsan sağlığı açısından tehlike arz eden patojenlerin havadaki partiküllere tutunarak yayıldığı bilinen bir olgudur. Bu patojenlerle bulaşan tüberküloz ve benzeri solunum yolu hastalıkları, dünyada her yıl milyonlarca insanın ölümüne ve maddi kayıplara neden



olmaktadır (FIRS,2017). Dolayısı ile söz konusu patojenlerin ortam içerisindeki konsantrasyon miktarının azaltılması, ortamdaki uzaklaştırılması veya etkisiz hale getirilerek ortam havasının sağlık açısından tehlike barındırmayan bir yapıya kavuşturulması uygun bir iç hava kalitesinin sağlanması için büyük önem taşımaktadır. Kapalı mahallerde, ortam havasının iyileştirilmesi için kullanılan yöntemlerin başında havalandırma gelmektedir. Günümüzde havalandırma özellikle mahal içi termal konforu sağlamak için de tercih edilmektedir. Ortama verilen taze hava ile beraber kirleticilerin seyreltilmesi ve konsantrasyon miktarının da azalması beklenmektedir. Ancak, epidemiyoloji çalışmaları havalandırma sistemlerinin iç ortam havasının patojen yükünü arttırabileceğini göstermektedir (Luongo vd., 2016). Diğer bir ifadeyle, dış ortam havasının ve havalandırma ekipmanına ait bileşenlerin kirlilik düzeylerinin de önemli olduğu bilinmelidir. Şekil 1’de bir havalandırma sisteminde görülebilecek mikrobiyolojik kirlilik kaynakları ve yayılım yolları şematik olarak verilmektedir.



Şekil 1. Havalandırma sisteminde olası mikrobiyolojik kirlenme kaynakları ve yolları (Dönmez, 2002).

Bulaşıcı virüs ve bakteriler, iç ortam içerisinde çoğunlukla öksürme ve hapşırma yoluyla insanlardan yayılmakta ve yayılan bu patojenler geri dönüş havası kullanılması halinde tekrar sisteme dahil olabilmektedirler. Hava şartlandırma ünitelerinde bulunan soğutma serpantini ve ona ait yoğuşma tavası, filtreler ve kayışlar gibi birçok kanal elemanı da bu kirliliği arttırabilmektedir. İlgili elemanların kanal içerisinde sürekli yüksek nem değerlerine maruz kalmaları veya bakımlarının düzenli yapılmaması durumunda mikroorganizmalar için konak haline gelmeleri beklenir. Kanal elemanlarında çoğalan ve sonrasında uçarak besleme havasına karışan patojenler iç mekandaki canlılar için çok ciddi bir tehdit oluşturmaktadırlar. Ayrıca, dış ortam havasından sisteme giren patojenler de

havalandırma kanalları ile bütün binaya yayılarak bina içindeki canlıların enfekte olma riskinin daha da artmasına sebep olurlar. Havalandırma sistemlerinden kaynaklı iç ortam havasına sızan patojenlerin, iç ortamlarda ikamet eden insanlar üzerinde bulaşıcı, toksijenik (toxigenic) veya alerjenik (allergenic) olmak üzere çeşitli hastalıklara neden olduğu bilinmektedir (Menzies ve Bourbeau, 1997; Main, 2003; Thrasher ve Crawley, 2009; Cowling vd., 2013; Antusheva vd., 2016).

### **1.3.1. Filtrasyon / Filtreleme**

Kapalı mahaller için havalandırma ve ilişkili diğer süreçlerle ortaya çıkan patojenlerin eliminasyonu günümüzde önemli bir mühendislik problemi olarak tanımlanmaktadır. Hava filtrasyonu günümüzde iç ortam hava kalitesinin kontrolü ve dış ortamdaki bina içine sızmaya çalışan kirleticilerin ortadan kaldırılmasında en yaygın olarak kullanılan hava temizleme yöntemlerinden biridir. Önceleri hava filtrelerinin iklimlendirme (HVAC) sistemleri içerisinde kullanılma amacı; kanal içerisinde havanın ısıtılması, soğutulması veya şartlandırılması için kullanılan ekipmanların yüzeylerinde tutunarak kanal içerisindeki hava akış hızlarını ve ısı transferini etkileyen parçacıkların bu ekipman yüzeylerinde birikimini engellemektir. Zamanla hava filtrelerinin esas kullanım amacı genişlemiş ve iç ortam havasının daha sağlıklı bir hale kavuşturulması bir hedef olarak tanımlanmıştır. Günümüzde ise filtrelerin mekanik olarak havalandırılan binaların havalandırma sistemlerinde kullanımı zorunlu hale gelmiştir. (Fisk vd., 2002).

Havalandırma sistemlerinde filtre kullanımı, hava kalitesini kontrol etmek ve havayı arındırmak için kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Yapılan çalışmalar, filtrasyon işleminin dış ortam havası içerisinde bulunan patojenlerin havalandırma sistemleri üzerinden binaya sızmalarını önlemede iyi bir yöntem olduğunu ifade etmektedir (Kowalski ve Bahnfleth, 1998; Kowalski ve Bahnfleth, 2002). Fakat gelişmiş hava filtreleri kullanılması halinde bile (HEPA, ULPA vb.) filtreler üzerinde sürekli olarak biriken mikroorganizmalar kanal içerisinde uygun şartlar oluştuğunda (nem, sıcaklık, besin vb.) gelişerek üreyebilir ve filtre edilen havada ekstra kirlenmeye de sebep olabilirler. Böylece, kanal içerisinde hava kalitesinin kontrol altına alınması için kullanılan filtreler önemli bir patojen kaynağı haline gelebilirler (Goswami vd., 1999; Jankowska vd., 2000; Simmons vd., 1997; Chuaybamroong vd., 2010). Ayrıca, ilgili filtreler hava kanalı içerisinde ek bir sürtünme direnci oluşturduklarından istenen hava debisinin sağlanması için daha çok enerji

tüketimi veya daha büyük fanların kullanımını da zorunlu hale getirmektedirler (Fisk vd., 2002). Havalandırma sistemleri içerisinde filtrelerin kullanımına ait tasarımcıya yol gösteren çeşitli kılavuzlar ve filtrelerle alakalı çok sayıda sınıflandırma mevcuttur (Ashrae, 2008).

### 1.3.2. Ultraviyole Antiseptik Işınım

Havalandırma sistemleri içerisinde hava ile taşınan mikroorganizmaları kontrol etmek için kullanılan diğer bir yöntem ise ultraviyole antiseptik ışınım (UVGI-Ultraviolet Germicidal Irradiation) yöntemidir. Ultraviyole (UV) ile hava dezenfeksiyonu, hava içerisindeki biyolojik ve kimyasal kökenli kirleticileri etkisiz hale getirmek için kullanılan alternatif bir yöntemdir. UV ile havanın zararlı mikroorganizmalardan arındırılması işlemi filtrelerin yaptığı işlemde tamamen farklı şekilde gerçekleşmektedir. UV hava dezenfeksiyonunda filtrelemenin aksine kirletici partikül boyutları önemli değildir. Ancak kirleticinin (patojen mikroorganizmanın) biyolojik bileşimi büyük önem arz etmektedir. Özellikle 254 nm dalga boyundaki UVC ışınları, mikroorganizmaların doğrudan DNA/RNA'sına hasar vermekte ve mikroorganizmaların kendini yenileme mekanizmasını durdurarak onları etkisiz hale getirebilmektedir. Ayrıca, bu dalga boyundaki UVC ışınları UVGI (Ultraviolet Germicidal Irradiation) olarak da bilinmektedir. Bu terim daha çok hava ve yüzey dezenfeksiyonunda kullanılan bir ifadedir (IUVA, 2005).

En genel manada, UV teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen hava dezenfeksiyonu şu şekilde özetlenebilir. Hava dezenfeksiyonunda mikrop öldürücü dalga boylarında ışın yayan özel UV lambalar kullanılmaktadır. Bu lambalardan yayılan ışınlar ile bir UV etki alanı oluşturulmaktadır. Dezenfeksiyonu gerçekleştirilecek olan havanın UV etki alanından geçmesi sağlanır. Böylece hava ile beraber taşınan mikroorganizmalar UV ışınlarına doğrudan maruz bırakılır ve her bir mikroorganizma UV etki alanından geçerken bünyelerine belirli miktarda doz alır. Eğer mikroorganizmaların almış olduğu doz miktarı DNA/RNA'larını hasara uğratacak düzeyde ise mikroorganizmaların inaktivasyonu gerçekleştirilmiş olur. Genel olarak UV sistemlerinin etkinliği; oluşturulan UV ışın alanı, hava akışı alanı ve mikroorganizmanın UV ışınlarına olan duyarlılığı gibi çeşitli etkilere bağlıdır. UV sistemlerinin etkinliği ile alakalı daha detaylı açıklama ileriki bölümlerde verilmektedir.

Yapılan çalışmalar UV dezenfeksiyon teknolojisinin hava, su ve yüzeylerde bulunan çeşitli mikroorganizmaların ortadan kaldırılmasında etkili bir yöntem olduğunu

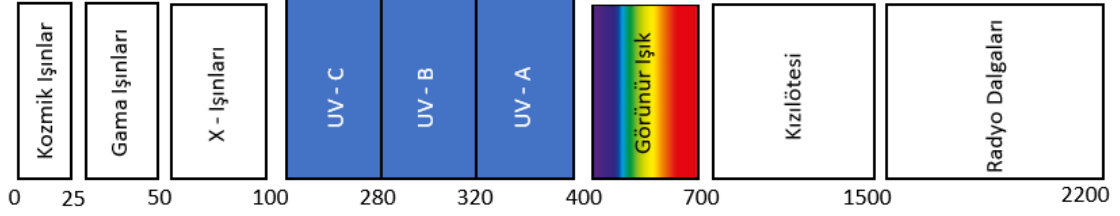
göstermektedir (Kowalski ve Bahnfleth 2000; Bolton, 2000; Fletcher vd., 2003). UV ışınlarının dezenfeksiyon kapasitesinin havadan bulaşan enfeksiyonlara karşı etkili olduğu ve özellikle tüberkülozun bulaşma riskini %70'in üzerinde azalttığı ifade edilmektedir (Escombe vd., 2009). Ultraviyole ışınlarının dezenfeksiyon amaçlı birçok kullanım alanları vardır. UV ışınlarının hava ve yüzey dezenfeksiyonu özelliği ameliyathanelerde, laboratuvarlar ve biyolojik güvenlik kabinlerinde etkilidir. Ayrıca, insanların ortak kullanım alanları; kalabalık olarak bulunduğu kreşler, kafeteryalar, jimnastik salonları, marketler, hastane odaları gibi kapalı yerlerde ve iklimlendirme (HVAC) sistemleri içerisinde havada bulunan patojen mikroorganizmaların sayısını azaltarak hava yolu ile bulaşan hastalıkların yayılımını engellemek için kullanılabilirler. Su dezenfeksiyonunda ise, günümüzde yaygın olarak içme suyu elde etmede ve arıtma tesislerinde kullanılmaya başlanmıştır. Bunun dışında, gıda endüstrisinde birçok gıda maddesi için muhafaza ve dekontaminasyon amacıyla son yıllarda başarıyla uygulanmaktadır.

### **1.3.2.1. UV Işını**

Ultraviyole (UV) ışını; görünür ışıktan kısa, X ışınından uzun dalga boyuna sahip elektromanyetik bir enerjidir. Ultraviyole ışınlarının dalga boyları 10 ile 400 nanometre arasında değişmektedir. Bu ışınlar genel olarak dalga boylarına göre üç alt başlıkta sınıflandırılmaktadır. UV-A 320-400 nm, UV-B 280-320 nm ve UV-C 100-280 nm arasında dalga boyuna sahiptir. Ultraviyole ışınlarının elektromanyetik spektrumdaki yerleri Şekil 2'de gösterilmektedir.

UVC ışını 250-265 nm arası dalga boylarında maksimum antimikrobiyal (germisidal) özelliğe sahiptir. Bu yüzden, ilgili dalga boylarındaki UVC ışınlarına 'mikrop öldürücü UV ışınları (UVGI-Ultraviolet Germicidal Irradiation)' da denmektedir (Kowalski, 2009). Antimikrobiyal özellikte olan UVC ışınları, mikroorganizmaların doğrudan DNA/RNA'sına zarar vererek mikroorganizmaların kendini yenileme ve üreme mekanizmalarını durdurabilmektedir. Yeterli miktarda UVC ışınına maruz kalınması durumunda mikroorganizmalar zararsız hale gelmektedir (Beggs, 2003). Bu yönü ile UVC ışınları virüs, bakteri, mantar ve mantar sporları gibi çeşitli mikroorganizmaların üzerinde dezenfektan olarak kullanılmaktadır (ASHRAE,2012). Mikroorganizmaların dezenfeksiyonunda kullanılan UVC ışınları insanlar açısından da zararlı etkiler gösterebilmektedir. Bu ışınlar uzun süre

maruz kalınması durumunda ciltte yanıklar ve kızarıklar görülmekte ve hatta bazı durumlarda deri kanseri gibi sağlık problemleri ortaya çıkabilmektedir.



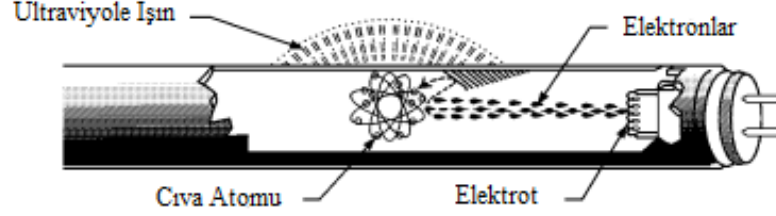
Şekil 2. Elektromanyetik spektrum (Capetillo, 2015).

Bu ışınlar herhangi bir koruyucu gözlük olmadan uzun süre bakılması durumunda ise, gözde katarakt dahil birçok kornea hastalığı ortaya çıkabilmektedir (Kowalski, 2009). Bu yüzden, ilgili dezenfeksiyon sistemlerinin insan sağlığı açısından tehlike oluşturmayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir.

### 1.3.2.2. UV Lambalar

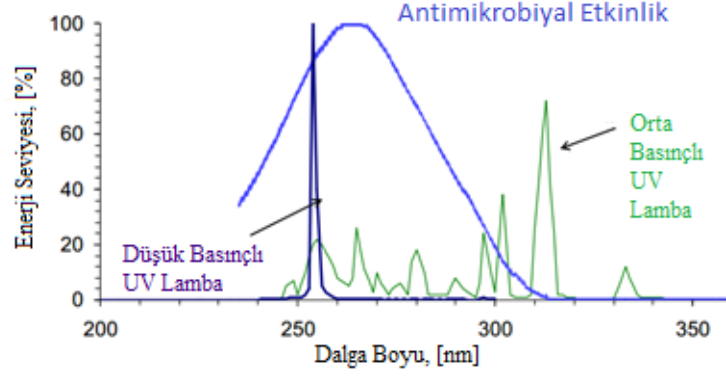
UV ışınlarının doğal kaynağı güneştir. Ancak, bu ışınlar insan yapımı gaz deşarjlı lambalar ile de oluşturulabilmektedir. Bu tür lambalarda ışın üretimi iyonize bir gaz içerisinden elektrik akımının geçirilmesi ile sağlanmaktadır. Yayılan ışığın karakteri kullanılan gaza, gazın basıncına ve elektrik akımının frekansına bağlıdır. UV lambalar argon, neon, ksenon gibi inert gazlar ve bunlara ilave olarak cıva ve sodyum gibi elementlerle doldurulmaktadır (Turhan, 2015). Geleneksel UV lambaların çalışma prensibi, aydınlatma amaçlı kullanılan floresan lambalarla oldukça benzerlik göstermektedir. Bu lambaların içerisinde lamba yandığında buharlaşan cıva bulunmaktadır. Cıva atomları, deşarjdaki elektrik alanının soy gazla çarpışması nedeniyle hızlanır ve uyarılmış hale geçerler. Uyarılmış haldeki cıva atomları çeşitli dalga boylarında ultraviyole ışın yayar. (Kowalski, 2009; Ashrae, 2012). Şekil 3'te ilgili fiziksel mekanizma şematize edilmektedir. Geleneksel UV lambalar ile floresan lambalar arasındaki fark ise floresan lamba iç yüzeylerinin fosforlu bir madde ile kaplı olmasıdır. Bu fosforlu madde istenmeyen dalga boyundaki ışınımı absorblayarak lambanın görünür ışık bölgesinde ışımaya yapmasını sağlar. Ticari olarak kullanılan UV lambalar genel olarak iki kategori altında sınıflandırılabilir. Bunlar; düşük ve orta-basınçlı cıva (LPM ve MPM) lambalardır. Orta basınçlı (13 kPa) cıva

lambalar geniş UV dalga boyları arasında (185- 400nm) ışımaya yapar ve genellikle polikromatik olarak adlandırılır.



Şekil 3. Tipik bir UV lambaya ait şematik görünüm (Ashrae, 2012).

Düşük basınçlı (0.93 Pa) cıva lambalar ise UVC bandı içinde ekseriyeti 253.7 nm olmak üzere daha dar bir aralıkta ışımaya yaparlar ve monokromatik olarak adlandırılırlar. Bu sınıflandırmanın dışında son yıllarda gelişmekte olan lamba teknolojileri arasında UV LED lambalar bulunmaktadır. Işık Yayan Diyot (LED) UV lambalar normal lambalardan çok daha küçüktür. Normal lambaların takılmasına izin verilmeyen alanlara monte edilebilir ve geleneksel UV lambalardan farklı olarak cıva içermezler ve çok daha uzun ömürlüdürler (Bilenko vd., 2004). Bununla birlikte, bu teknoloji hala pahalı ve verimsizdir. Ayrıca, UV LED lambaların hava dezenfeksiyon sistemlerindeki kullanımlarına yönelik çalışmalar (Kim vd., 2018) oldukça yenidir. Hava dezenfeksiyon sistemlerinde yaygın olarak düşük basınçlı cıva buharlı lambalar kullanılmaktadır. Bu lambalar UVC dalga boyu aralığında ışınım yaparlar ve bu aralıkta ışınım enerjilerinin büyük bir kısmını (> %90) 253.7 nm dalga boyunda yayarlar. İlgili dalga boyu en yüksek antimikrobiyal özellik gösteren dalga boyuna (~265 nm) oldukça yakındır (Şekil 4). Kullanım alanına göre çeşitli şekillerde, boyutlarda ve güçlerde UV lambalar bulunmaktadır (Kowalski, 2009).



Şekil 4. Düşük-Orta Basınçlı UV lambaların ışınım spektrumu (Kowalski, 2009).

#### 1.4. UVC Hava Dezenfeksiyon Sistemleri

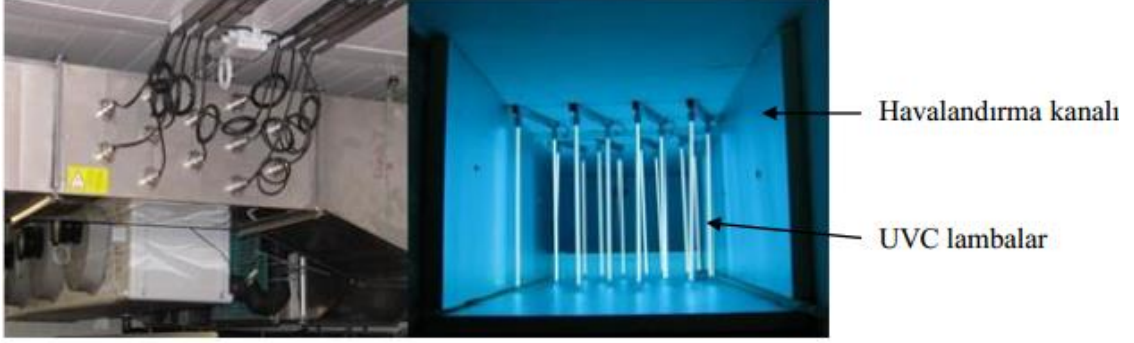
Günümüzde, UVC hava dezenfeksiyon sistemleri hava içerisinde insan sağlığı açısından tehlike barındıran patojenleri etkisiz hale getirmek amaçlı kullanılmaktadır. Bu sistemlerin çalışma prensibi, patojen mikroorganizmaları taşıyan havanın UVC lambalar ile oluşturulan ışınım alanından geçirilmesine dayanmaktadır. Hava ile birlikte taşınan patojenler doğrudan UVC ışınına maruz bırakılarak havanın dezenfeksiyon işlemi gerçekleştirilmiş olur. Günümüzde iç ortam havasını zararlı patojenlerden arındırma işleminde çeşitli UVC sistemler kullanılmaktadır. Bu sistemler genel olarak üç kategoride sınıflandırılabilir.

- Kanal-içi UVC sistemler (In-duct UVC systems)
- Üst-oda UVC sistemler (Upper-Room UVC systems)
- Resirkülasyonlu UVC sistemler (Recirculating stand alone UVC systems)

##### 1.4.1. Kanal-İçi UVC Sistemler

Bu sistemler günümüzde mekanik olarak havalandırılan binaların havalandırma sistemleri içerisinde yer almaktadır. Havalandırma sistemleri içerisinde UVC teknolojisi iki amaçla kullanılmaktadır: (a) Hava dezenfeksiyonu ve (b) Yüzey dezenfeksiyonu. Kanal içi UVC sistemlerinde, hava dezenfeksiyonu bir veya birden fazla sayıda UVC lambanın hava akışının sağlandığı kanal içerisinde doğrudan konumlandırılması ile oluşturulmaktadır (Şekil 5). Çoğu zaman bu sistemler tek-geçiş (single pass) esasına göre tasarlanır. Diğer bir

deyişle, sterilize edilecek olan havanın ilgili UVC donanımlarının bulunduğu yerden bir kez geçeceği düşünülür.



Şekil 5. Kanal içi UVC hava dezenfeksiyon sistemine ait uygulama örneği

İlgili sistemlerde hava genel olarak 2 - 2.54 m/s hızlarda akmaktadır (Kowalski, 2003). Ancak, bazı havalandırma sistemlerinde hava 8 - 10 m/s hızlara ulaşmaktadır (Daly, 1992). Bu sistemlerde hava ile taşınan patojenlerin UVC etki alanından geçerken görece daha düşük konaklama süresi olacağından ilgili sistemlerde daha yüksek miktarlarda UVC ışınımına ihtiyaç duyulur. Ayrıca, kanal içi UVC sistemlerinde UVC lambalar kanal duvarları içerisinde muhafaza edildiğinden insan sağlığı açısından zararlı olan UVC ışınlarının dışarıya sızması söz konusu değildir. Böylece ilgili sistemlerde güçlü UVC lambalar kullanılabilir. Bu durum kanal içi UVC sistemlerini diğer UVC sistemlere göre daha avantajlı kılmaktadır (Kowalski, 2009).

UVC teknolojisinin havalandırma kanalı içerisindeki diğer bir kullanım amacı ise yüzey dezenfeksiyonudur. Bu sistemlerde UVC lambalar, kanal içerisinde soğutma serpantinleri ve filtreler gibi mikrobiyolojik birikmenin olabileceği yüzeylerde yüzey dezenfeksiyonu amaçlı kullanılmaktadır (Firranello vd., 2017). Yüzey dezenfeksiyonunda, UVC lambalar ilgili kanal elemanlarının önüne veya arkalarına konumlandırılarak filtre ve soğutma serpantini yüzeyleri UVC ışınları ile ışımaya altına alınır (Şekil 6). Yüzey dezenfeksiyonunun temel amacı, soğutma serpantini ve filtreler üzerinde biyofilm oluşumunu engelleyerek HVAC sistemlerinde mikroorganizma birikiminden kaynaklı basınç düşümünü azaltmak, soğutma serpantin yüzeylerinden olan ısı transferini iyileştirmek ve kanal içi elemanlarının bakım maliyetini azaltarak enerji tasarrufu sağlamaktır (Blatt, 2006; Kowalski, 2009; Lee vd., 2009). Bu sistemler kanal içerisinde konumlandırıldıkları için ayrıca hava dezenfeksiyonu da sağlamaktadır. Ancak, yüzey dezenfeksiyonu amaçlı



tasarlanan bu sistemler daha düşük güçte UVC lamba kullandıklarından ve çalıştıkları ortam şartları nedeniyle hava dezenfeksiyonu için uygun olmayabilir (Kowalski, 2009; Firrantello, 2016).



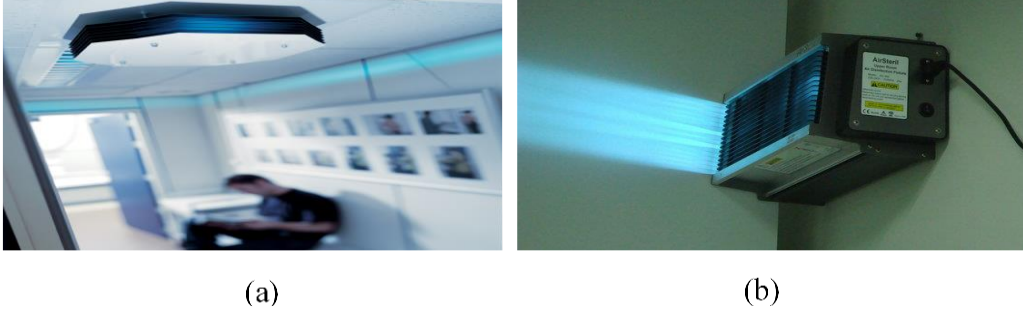
Şekil 6. Soğutma serpantin yüzeylerinde UVC uygulaması öncesi (solda) ve sonrası (sağda) (URL-2, 2019).

Soğutma serpantinlerinin yüzey dezenfeksiyonunda UVC lambalar genellikle soğutma serpantinlerinin hemen öncesinde konumlandırılır. İlgili konumlandırmaya bağlı olarak, ortam genellikle yüksek bağıl nem ( $> \%70$ ) ve yüksek hava sıcaklık ( $> 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) koşullarına sahiptir. Yüksek sıcaklık UVC lambaların performansı açısından fayda sağlarken, yüksek bağıl nem değerlerinde bazı patojen bakteriler UVC ışınlarına daha dirençli hale gelebilmektedir. UVC lambalarının soğutma serpantininin hemen sonrasında konumlandırılması durumunda ise, ortam şartları dezenfeksiyon açısından daha kötü sonuçlar ortaya çıkabilir. Çünkü soğutma serpantin yüzeyinden geçen hava görece daha soğuk olacağından UVC lamba performansını olumsuz olarak etkileyebilir. Ayrıca, her iki konumlandırma durumu için yüksek bağıl nem değeri önemli ölçüde değişmeyecektir. (Capetillo, 2015).

#### 1.4.2. Üst-Oda UVC Sistemler

Üst-oda UVC dezenfeksiyon sistemleri kapalı mahaller (hastane, ameliyathane, okul, kreş, barınak vb. yerler) içerisinde hava ile taşınan ve enfeksiyona sebep olan patojenleri mahal içerisinde etkisiz hale getirmek ve iç ortam havasını içerisinde bulunan canlılar açısından daha steril hale getirmek için kullanılmaktadır (Ashrae, 2015). Herhangi bir üst

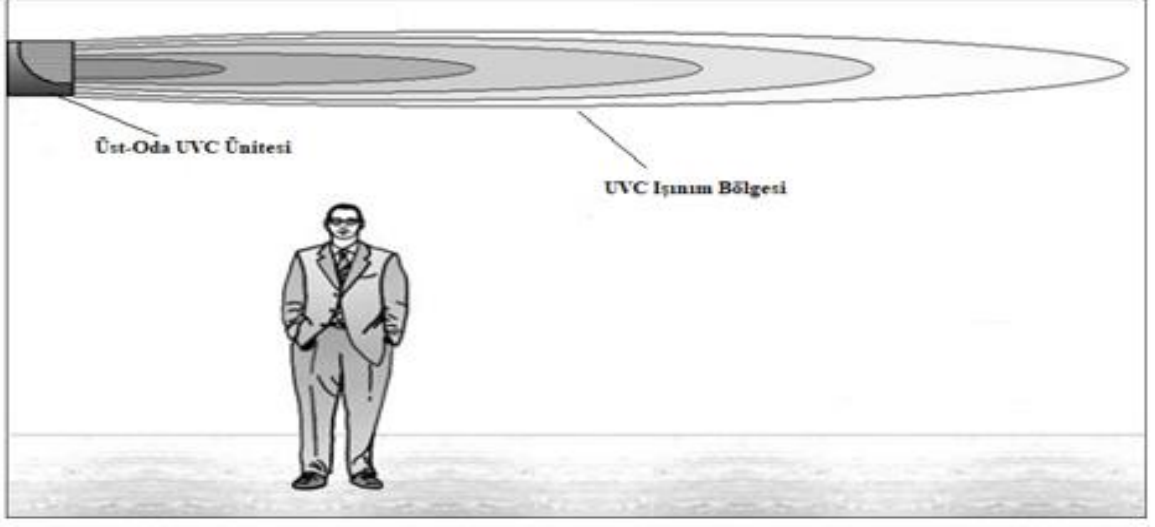
oda UVC dezenfeksiyon sisteminde içerisinde bir veya daha fazla sayıda UVC lamba bulunan cihazlar (armatürler) kullanılmaktadır.



Şekil 7. Üst oda hava dezenfeksiyon sistemlerinde kullanılan UVC lamba armatürleri; (a) tavan uygulaması, (b) yan duvar uygulaması (URL-3, 2019).

Bu armatürler, hava dezenfeksiyonun gerçekleştirilecek olduğu mahalın üst kısmında (tavanda da ya da tavana yakın yan duvarlarda) konumlandırılırlar. Şekil 7’de de görüleceği üzere, ilgili armatürlerin önünde UVC ışınlarını belli bir doğrultuda veya yönde ışınım yapmasına sevk eden yönlendiriciler bulunur. Bu yönlendiriciler sayesinde, insan sağlığı açısından zararlı olan UVC ışınlarının odanın alt bölümüne (mahal içerisinde canlılar ve insanlar tarafından kullanılan kısım) ulaşması engellenmiş olur. Böylece, bu sistemlerde sadece odanın üst kısmında UVC ışınlarının bulunduğu bir bölüm oluşturulur ve gerek zorlanmış gerekse de doğal taşınım etkisi ile odanın alt bölümündeki havanın (hava ile birlikte patojenlerin de) üst bölüme doğru geçişi/sirkülasyonu sağlanır (Gilkeson ve Noakes, 2012) (Şekil 8). Odanın üst bölümüne geçen havanın dezenfeksiyonu sağlanarak tekrar alt bölüme geçişi gerçekleştirilir.

Mahal içerisinde bulunan kişinin sağlığı ve güvenliği açısından üst-oda UVC sistemlerinin tasarımında belirli kıstaslar dikkate alınmalıdır. Oda içerisinde UVC armatürlerinin zeminden en az 2.3m yukarıda konumlandırılması gerekmektedir (Kowalski, 2009). OSHA (Occupational Safety and Health Administration) alt oda bölgesi için birim alandaki UVC ışınım şiddeti değerinin  $0.2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  değerinin üzerinde olmaması gerektiğini vurgulamaktadır. Diğer bir ifadeyle,  $0.2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ’lik UVC ışınımına 8 saat boyunca (bir iş vardiyası) maruz kalınması durumuna karşılık gelen doz miktarı  $58 \text{ J}/\text{m}^2$  olmalıdır. ACGHI (American Conference of Industrial Hygienist) göre ise limit doz değerinin geniş bant aralığındaki UV ışınları için  $30 \text{ J}/\text{m}^2$  ve 254 nm dalga boyundaki UV ışınları için  $60 \text{ J}/\text{m}^2$  olması gerektiğini bildirmektedir (Capetillo, 2015).



Şekil 8. Üst-oda UVC sistemine ait şematik resim (Kowalski, 2009).

### 1.4.3. Resirkülasyonlu UVC Sistemler

UVC lamba içeren oda içi sirkülasyon ünitelerinde, oda içerisindeki hava bir fan yardımı ile hava ünitesi içerisine sürülür ve hava tekrar odaya verilmeden önce UVC ışın alanından geçirilir. Bu sistemler, kanal içi UVC sistemlerinin çalışma prensibi ile oldukça benzerlik göstermektedirler. Kapalı mahallerde iç ortam havasında bulunan ve insan sağlığını olumsuz etkileyen biyolojik kökenli mikroorganizmaların yükünü azaltmak amaçlı olarak kullanılırlar. Bu hava üniteleri taşınabilir veya oda içerisine kalıcı olarak montajlanabilir (Şekil 9). Taşınabilir olması nedeniyle hastane odaları, ofis odaları, uçak kabinleri, asansörler dahil olmak üzere insanlar tarafından kullanılan çeşitli alanlarda kullanım kolaylığı sağlar. Bu cihazlardaki hava akışı ayarlanabilir ve cihaz kapasitesine göre değişiklik göstermektedir (Kowalski, 2009).



Şekil 9. Resirkülasyonlu UVC sistemler; (a) Taşınabilir, (b) Tavana monte edilebilir (URL-4).

### 1.5. Kanal İçi UVC Sistemlerinin Performans Karakteristikleri

UVC sistemlerinin performanslarının doğru bir şekilde belirlenmesi; belirli bir mikrobiyal yüke sahip havanın istenilen düzeyde dezenfeksiyonun sağlanması ve uygun sistem tasarımı açısından büyük önem arz etmektedir. Bu kapsamda, literatürde yaygın olarak, ortalama UV doz, UV doz dağılımı ve dezenfeksiyon oranı üzerinden ilgili sistemlere ait performans değerlendirmesi yapılmaktadır. Bunların dışında, ilgili sistemlerin performanslarının değerlendirilmesinde kullanılan diğer bir güncel yaklaşım ise belirli bir referans doz değerinin üzerinde doz alan partikül sayı yüzdesinin (Bağıl Doz Etkinliği) değerlendirilmesi şeklindedir. UVC sistemlerinin performanslarının değerlendirilmesinde bir ölçüt olarak kullanılan bu büyüklükler/yaklaşımlar aşağıda detaylandırılmıştır.

- Ortalama UV Doz Miktarı

UV doz miktarı, hava ile birlikte hareket eden patojen mikroorganizmaların UV ışınlarına ne denli maruz kaldığının bir göstergesidir. Matematiksel formda UV doz terimi,  $D$ ,

$$D = I \times t \quad (1)$$

eşitliği ile tanımlanır. Burada;  $D$ , Mikroorganizmanın maruz kaldığı UV doz miktarını,  $I$ , birim alandaki ışınım/radyasyon miktarını (Irradiance),  $t$  ise mikroorganizmanın UV ışınlarına maruz kalma süresini ifade etmektedir (Kowalski, 2001). Kanal içi UVC sistemlerinde takibi yapılan her bir partikülün, hesaplama bölgesinin sonunda almış olduğu kümülatif UV doz miktarı partikülün sistem içerisinde izlediği yola ve bu yol üzerinde

karşılaştığı UV ışınım miktarına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu bağlamda, ilgili yaklaşımda, takibi yapılan tüm partiküllerin sahip olduğu UV doz miktarlarının aritmetik ortalaması alınarak sisteme ait ortalama UV doz miktarı elde edilmektedir.

- UV Doz Dağılımı

Kanal içerisindeki hız ve ışınım dağılımına bağlı olarak patojen partiküllerce alınan UV doz değerleri farklılık göstermekte ve bunun bir sonucu olarak partikül kümesini temsil eden bir UV doz dağılımı ortaya çıkmaktadır. UV dağılımı kullanılarak yapılan performans değerlendirmesi ilgili dağılımı karakterize eden değişim (varyasyon) katsayısı (standart sapma / aritmetik ortalama) üzerinden yapılmaktadır. İlgili dağılıma ait değişim katsayısı değeri ne kadar küçükse bu durum sistem içerisinde homojen bir doz dağılımının gerçekleştiğini yani süreç boyunca her bir patojen partikülün birbirine yakın değerlerde doz aldığını göstermektedir. UV doz dağılımına ait değişim katsayısının büyük değerler alması, sistemin patojen partiküller üzerinde homojen olmayan bir dozaj uyguladığını göstermektedir. Standart sapma veya değişim katsayısının artışı homojen dağılımdan olan uzaklaşmanın bir ölçüsü olarak değerlendirilmektedir. Fiziksel açıdan her iki büyüklükte bir dağılımın dağılıma derecesi bir başka ifadeyle homojenlik düzeyi hakkında bilgi sunmaktadır.

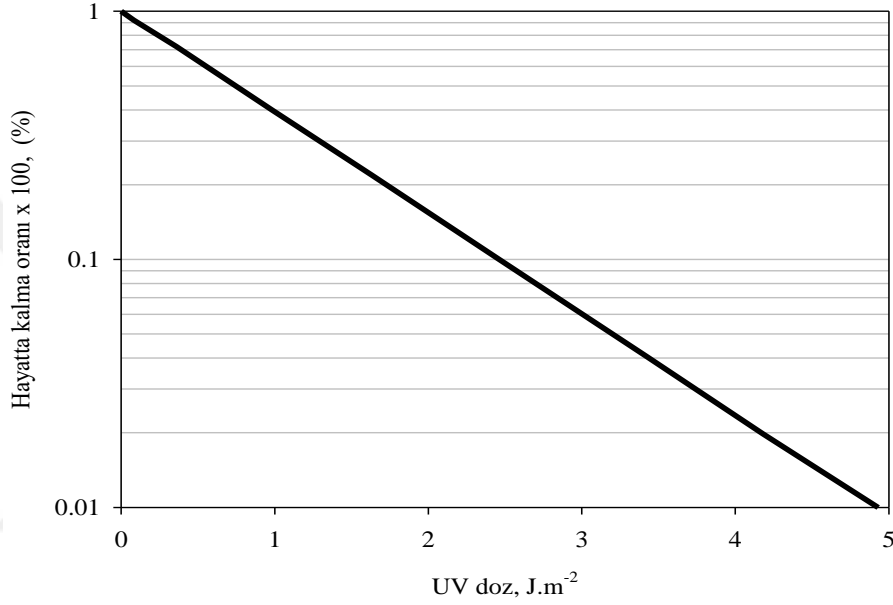
- Dezenfeksiyon Oranı

Dezenfeksiyon oranı, bir mikroorganizmanın belirli bir süre boyunca UV ışınlarına maruz kaldıktan sonra hayatta kalma oranını ifade eder. Dezenfeksiyon oranı hesabında mikroorganizma türüne bağlı olarak çeşitli azalım modelleri (decay models) kullanılmaktadır. Bunlar, tek kademeli, tek kademeli ve ötelemeli (shoulder), iki kademeli, iki kademeli ve ötelemeli ve bu modellerin kombinasyonları şeklindedir (Kowalski, 2009; Capetillo, 2015). Bu azalım modelleri sayesinde belirli bir mikroorganizma için istenilen dezenfeksiyon oranına karşılık gelen UV doz miktarı hesaplanmaktadır.

Tek kademeli azalım modeli (single stage decay model) çoğu mikroorganizma türünü kapsamaması nedeniyle mevcut modeller arasında yaygın bir kullanıma sahiptir. Bu model, genel olarak yeterli doğrulukta sonuçlar sağlamaktadır. Ancak, bazı mikroorganizma türlerinin kompleks bir davranış sergilemesi nedeniyle dezenfeksiyon sürecinin temsilinde doğruluk açısından diğer azalım modelleri tercih edilmektedir. Tek kademeli azalım modeli klasik bir ekspanansiyel azalım modelidir (Şekil 10) ve genellikle çoğu UVC sistem tasarımı için yeterlidir (Kowalski, 2009). UV ışınlarına maruz kalan mikroorganizmalar için tek kademeli azalım denklemi,

$$S = e^{-kD} \quad (2)$$

formunda ifade edilir. Burada;  $k$  mikroorganizmaların UV ışınlarına olan hassasiyeti ya da UV oran sabiti,  $D$  UV doz miktarı,  $S$  mikroorganizmaların hayatta kalma oranı ve  $1-S$  dezenfeksiyon oranı ya da ölüm oranını ifade etmektedir (Kowalski, 2001).



Şekil 10. Tek kademeli azalım modeli örneği

- Bağlı Doz Etkinliği

Kanal içi UVC sistemlerinde takibi yapılan her bir partikülün, hesaplama bölgesinin sonunda almış olduğu kümülatif UV doz miktarı partikülün sistem içerisinde izlediği yola ve bu yol üzerinde karşılaştığı UV ışınım miktarına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Sistem girişinden çıkışına kadar takibi yapılan her bir partikülün bünyesine almış olduğu UV doz miktarlarının toplamı, takibi yapılan toplam partikül sayısına bölünerek (aritmetik ortalamasının alınmasıyla) sisteme ait ortalama UV doz miktarı belirlenmektedir. Sonrasında ise sisteme ait ortalama UV doz miktarı ilgili mikroorganizmaya ait azalım denkleminde yerine yazılarak sistemin dezenfeksiyon oranı tespit edilmektedir. Ancak ilgili sistemlerin tasarım aşamasında bu yaklaşım basit ve pratik olarak görülmesine karşın, sistem performans değerlendirmesini sadece ortalama UV doz üzerinden yapmak sistemlerin yanlış

tasarlanmasına yol açabilmektedir. Daha açık bir ifade ile, sistemin dezenfektan potansiyelinin gereğinden az ya da fazlaca tasarlanması, sistem bütününde yetersiz dezenfeksiyona ya da enerji israfına ve yüksek yatırım maliyetine neden olabilir. Herhangi bir mikroorganizmanın inaktivasyonu için gerekli olan doz miktarından daha fazla doz alması sistem içerisinde enerji israfı olarak nitelendirilebilir. UVC sistemlerine ait performans değerlendirmesinde, sisteme ait ortalama UV dozun yanı sıra sistem içerisinde UV doz dağılımı da bir performans değerlendirme kriteri olarak dikkate alınmaktadır (Capetillo, 2015). Ancak, literatürde, bu sistemlerin nihai performans değerlendirmesinde ilgili kriterlerin hangisinin öncelikli olarak kullanılması gerektiği ile ilgili net bir ifade bulunmamaktadır. Bu noktada ‘bağlı doz etkinliği’ bu sistemlerin performanslarını kıyaslamada bir ölçüt olarak kullanılabilir. İlgili performans ölçütünde sistemin performans değerlendirmesi referans bir doz miktarı üzerinden yapılmaktadır. Sistem içerisinde belirli bir referans doz değerinin üzerinde doz alan partikül sayı yüzdesinin (Bağlı Doz Etkinliği) değerlendirilmesi ile sisteme ait performans belirlenmektedir. Bu referans doz sayesinde sistem üzerinde parametrik olarak yapılan değişimlerin sistem performansı üzerindeki etkisi değerlendirilebilir.

### **1.6. Kanal İçi UVC Sistemlerinde Dezenfeksiyon Performansını Etkileyen Faktörler**

Genel olarak, bir kanal içi UVC sistemin dezenfeksiyon performansı; UV lamba ışınım şiddeti, kanal içerisindeki UV ışınım dağılımı, patojen mikroorganizmaların UV ışınım bölgesinde bulunma süresi (residence time), patojen mikroorganizmanın UV ışınımına olan duyarlılığı, havanın hızı, sıcaklığı ve nem değeri, kanal iç yüzeylerinin yansıtıcılığı, kanal içi hız profili ve lamba konumu gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörler, tekil bazda, UV dezenfeksiyon performansını doğrudan veya diğer faktörler üzerinde etkili olarak dolaylı bir şekilde etkilemektedir.

UV lamba ışınım şiddeti, birim lamba yüzey alanı başına lambanın ürettiği UVC gücü ifade etmekte olup, birimi  $W/m^2$ 'dir. UV ışınım şiddeti lambadan olan mesafeyle değişkenlik göstermektedir. Bu değişim, lambaya yakın bölgelerde artış, lambadan uzaklaştıkça ise eksponansiyel bir azalış şeklindedir. Bu nedenle, kanal içerisinde konumlandırılan UV lamba etrafında üniform olmayan bir ışınım dağılımı söz konusudur. Kanal içerisinde oluşturulan UV ışınım dağılımı, lambanın performansına da doğrudan bağlıdır. UV lambanın performansı kanal içerisindeki havanın hızı ve sıcaklığından etkilenmektedir.

(Lau, 2009; Philips, 2005). Genel olarak, kanal içi UVC dezenfeksiyon sistemleri 2 - 2.54 m/s hava akış hızlarında tasarlanmaktadır (Kowalski, 2003). Lambaya verilen güç sabit olduğunda, lambadan çıkan UVC güç değeri lambanın plazma sıcaklığı ve basıncının bir fonksiyonu haline gelmektedir (Kowalski ve Bahnfleth, 2002). 30 °C'nin altındaki hava sıcaklıklarında ve 60 °C'nin üzerindeki hava sıcaklıklarında çalışan UV lambalar daha kısa bir çalışma ömrüne sahip olmakta, UVC gücünde ise %70'e varan bir azalma meydana gelebilmektedir (VanOsdell ve Foarde, 2002; Lau, 2009). Hava sıcaklık değerlerinin çok düşük veya yüksek olduğu durumlarda, ilgili olumsuzlukların giderilmesine yönelik olarak amalgam lambalar tercih edilmektedir. Bu lambalar sıcaklık değişiminden etkilenmemektedir (Capetillo, 2015).

Kanal içi UVC sistemlerinin performansını etkileyen bir diğer parametre yansımadır. Kanal iç yüzeylerinin yansıtma oranına bağlı olarak kanal içerisindeki UV ışınım yoğunluğu artmakta ve böylece sistem performansında iyileşme sağlanabilmektedir. Kanal iç yüzeylerinden olan yansıtma düzeyini dikkate alarak yapılan uygun tasarımlar ile kanal içerisindeki UV ışınım dağılımının seviyesini kanal boyunca iyileştirmek ve oluşturulan UV ışınım bölgesini daha yoğun bir hale getirerek sistemin performansını artırmak mümkün olmaktadır (Kowalski ve Bahnfleth, 2000).

Kanal içi hava akış hızı, hız profili ve lamba konumu sistem performansını etkileyen diğer önemli etkenlerdir. Kanal içerisinde hava akış hızı ve hız profili, patojen mikroorganizmaların kanal içerisinde bulunma sürelerini ve hareket yörüngelerini etkilemekte böylece patojen mikroorganizmaların bünyesine aldığı UV doz miktarları üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Örneğin; hava akış alanına bağlı olarak UV lambaya çok yakın bir rota üzerinde hareket eden patojen mikroorganizmalar, lambaya uzak bir bölgede hareketini sürdüren patojenlere göre bünyelerine daha fazla UV doz almaktadır (Capetillo, 2015).

Mikroorganizmaların UV ışınları ile olan etkileşimleri karmaşık bir süreçtir ve çevresel (nem ve sıcaklık vb.) ve biyolojik faktörlerin güçlü bir fonksiyonudur (Rentschler, 1942). Bu yüzden araştırmacılar pratik hesaplamalar için bu etkileşim mekanizmasını temsilen mikroorganizma UV hassasiyet değerini dikkate almaktadırlar. Her bir mikroorganizmanın UVC ışınlarına karşı doğal olarak bir hassasiyet değeri vardır. Bu oran; sıcaklık, bağıl nem ve UV doz gibi çevresel faktörlerin kontrol altında tutulduğu bir ortamda, mikroorganizma popülasyonunun UV ışınlarından etkilenme oranı olarak ifade edilir. Yüksek hassasiyet değerine sahip mikroorganizmalar hızlı dezenfeksiyon sergilerken düşük



hassasiyete sahip mikroorganizmalar UV ışığına karşı direnç göstermekte ve dezenfeksiyon işlemleri yavaş olmaktadır. Mikroorganizmalar biyolojik kökenli oldukları için UV ışınlarına karşı gösterdikleri dirençler de farklılık gösterebilir. Ayrıca, bağıl nem faktörü gibi çevre şartları mikroorganizmanın UV hassasiyet değerini ve buna bağlı olarak azalım davranışını (denklemini) değiştirmektedir (Fletcher, 2004). Literatürde bazı mikroorganizmalara ait UV hassasiyet değerleri ve azalım denklemleri mevcuttur (Capetillo, 2015; Kowalski, 2009).

### **1.7. Kanal İçi UVC Sistemlerinin Dezenfeksiyon Performansının Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler**

Kanal içi UVC sistemlerinin dezenfeksiyon performansı deneysel ve sayısal olmak üzere iki farklı yöntemle belirlenmektedir. Deneysel yöntemde, UV lamba/ların kapalı olduğu durumda test bölgesi girişinden ilgili mikroorganizmayı içeren belirli miktarda aerosol salınımı yapılmakta ve test bölgesi çıkışında alınan örnekler ile aktif mikroorganizma sayısı ölçülmektedir. Aynı işlem, UV lambaların açık olduğu durum için de tekrarlanmakta ve UV lamba/ların, açık/kapalı olması durumunda elde edilen mikroorganizma sayıları üzerinden dezenfeksiyon oranı belirlenmektedir. Amerikan Çevre Koruma Ajansı (EPA)'nın gerçekleştirmiş olduğu bir dizi deney, kanal içi UVC hava dezenfeksiyon sistemlerinin performanslarının deneysel olarak belirlenmesinde kullanılan en popüler referans olarak gösterilebilir (EPA, 2006a-h). Ancak bu testler, ilgili sistemler hakkında sadece yüzeysel bir performans değerlendirmesi yapmakta, üç boyutlu hava akışı ile üç boyutlu UV ışınım alanı arasındaki etkileşim mekanizması hakkında derinlemesine bir bilgi vermemektedir. Ayrıca, bu deneylerde hedef mikroorganizmaya ait dezenfeksiyon oranı elde edildikten sonra UVC sisteme ait ortalama UV doz miktarının ( $J/m^2$ ) tespiti için ilgili mikroorganizmaya ait UVC hassasiyet değeri kullanılmaktadır. Diğer bir ifadeyle, deneysel yöntemle elde edilen sonuçlar, göz önüne alınan hedef mikroorganizmanın UVC hassasiyet değerinin doğruluğuna bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bununla birlikte, literatürde mikroorganizmaların UVC hassasiyet değerleri hakkında büyük bir veri varyasyonu mevcuttur (Fletcher vd., 2003; Peccia ve Hernandez, 2004; Ke vd., 2009). Ayrıca, bu tür testleri doğru bir şekilde gerçekleştirebilmek için hava hızı, sıcaklığı, nemi ve mikroorganizma türü gibi operasyonel parametreleri güvenli bir şekilde kontrol altında tutmak gerekmektedir. Çünkü bu parametrelerden herhangi biri, hesaplama sonuçlarını önemli ölçüde değiştirebilmektedir (Capetillo, 2015).

Bu sistemlerin performanslarının değerlendirilmesinde tercih edilen en güncel yöntem ise HAD kullanımınıdır. HAD modellemesi kullanılarak kanal içi UVC sistemlerde kanal iç yüzeylerinden olan yansımalar, gölgelemeler ve kanal içerisindeki üç-boyutlu UV ışınım (irradiation) dağılımı, patojen partiküllerin takip ettiği yörüngeler ve kanal içerisindeki akış gelişimi gibi komplike durumların çözümlenerek partikül yörüngeleri ve partikül yörüngeleri üzerinde bulunan UV ışınım şiddeti arasında bir etkileşim sağlamak mümkündür. HAD modellemesi yaklaşımı UVC su dezenfeksiyon sistemleri (Ho, 2009; Duran, 2010; Chen vd., 2011; Li vd., 2016), üst-oda UVC hava dezenfeksiyon sistemleri (Sung ve Kato, 2011; Gilkeson ve Noakes, 2012; Kanaan, 2019) ve kanal-içi UVC hava dezenfeksiyon sistemlerinin (Capetillo vd., 2014; Capetillo vd., 2015; Yang vd., 2018; Yang vd., 2019) dezenfeksiyon performansını belirlemeye yönelik çalışmalarda başarılı bir şekilde uygulanmaktadır.

### 1.8. Literatür Araştırması

Kanal içi UVC sistemlerin dezenfeksiyon etkinlikleri UV ışınım (irradiation) şiddeti, mikroorganizmaların UV ışınım bölgesinde bulunma süresi, mikroorganizmanın UV ışınımına olan duyarlılığı, havanın hızı, sıcaklığı ve nem değeri, kanal iç yüzeylerinin yansıtıcılığı, kanal içi hız dağılımı ve lamba konumu gibi birçok parametreye bağlıdır. Literatürde bu parametrelerin tekil ya da bütünleşik etkilerini ele alan deneysel ve sayısal çalışmalar bulunmaktadır. İlgili çalışmalar aşağıda özet halinde sunulmuştur.

Ko vd. (2000), bağıl nemin havadaki mikroorganizmaların UV hassasiyet değeri üzerindeki etkisini incelemek için deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. İki farklı mikroorganizma (*Serratia marcescens*, *Mycobacterium bovis* (BCG)) için yapılan çalışmalarda farklı UV doz (57-829  $\mu\text{W}$ ) ve bağıl nem değerlerinde (%25-95) mikroorganizmalara ait UV hassasiyet değerlerini belirlemişlerdir. UV doz miktarının, bağıl nem değerinin ve mikroorganizma türünün mikroorganizmalara ait UV hassasiyet değerinin önemli birer fonksiyonu olduğunu ortaya koymuşlardır. UV doz miktarının artmasıyla mikroorganizmalara ait dezenfeksiyon oranının arttığı ve bağıl nem miktarının artmasıyla UV hassasiyet değerinin azaldığını, yani mikroorganizmanın UV ışığına daha dirençli olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, çalışma parametreleri dahilinde *Serratia marcescens*' un BCG' ye göre UV ışığına daha hassas olduğunu göstermişlerdir.

EPA (2006a-h) çeşitli kanal içi UV hava dezenfeksiyon sistemlerinin etkinliğini deneysel olarak değerlendirmiştir. Çalışmada iki farklı bakteri (*Bacillus atrophaeus* ve *Serratia Marcescens*) ve bir virüse (*MS2 Bacteriophage*) ait dezenfeksiyon oranları incelenmiştir. İlgili mikroorganizmalar aerosol haline getirilerek test kanalına enjekte edilmiştir. Kanal içerisindeki UV dezenfeksiyon sisteminin etkinliğini belirlemek için UV lambaların açık/kapalı olma durumlarında test bölgesinin çıkışından ilgili mikroorganizmalara ait örnekler alınarak mikroorganizmaların hayatta kalma oranları karşılaştırılmış ve her bir örnekleme ait ortalama UV doz miktarları hesaplanmıştır. UV ışınlarına karşı *B. Atrophaeus*' un *S. marcescens*' ten daha dirençli olduğu sonucuna varılmıştır.

Kowalski (2009), UV sistemlerinin performansını sayısal olarak incelemiştir. Çalışma kapsamında, EPA tarafından gerçekleştirilen ve UV lamba sayısının ve yerleşiminin incelendiği deneyleri (EPA, 2006a-h) referans olarak ilgili sistemlere ait ortalama UV doz miktarlarını hesaplamıştır. Işınım alanının hesaplanması için görüş faktörü (view factor) yaklaşımına dayanan ve kanal iç yüzeylerinden yansımaya da dikkate alan sayısal bir kod geliştirilmiş ve UV lambalardan yayılan ışınımın kanal içerisindeki dağılımını belirleyerek sisteme ait ortalama UV ışınım miktarını tespit etmiştir. Patojenlerin bu ışınım alanı içerisinde geçirdikleri süre, kanal içerisinde eş dağılılı hız profili (plug flow) varsayımı yapılarak hesaplanmış ve ortalama UV doz miktarları belirlenmiştir. Lamba gücünün artmasıyla sisteme ait ortalama dozun arttığı belirlenmiştir.

Ryan vd. (2010), UV sistemlerinin etkinliğini belirlemek için deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalar iç yüzeylerinde farklı yansıtma oranlarına (yüksek yansıtıcılığa sahip yüzey kaplama ve normal alüminyum yüzey) sahip yüzey malzemelerinin kullanıldığı bir düzenekte yürütülmüştür. Çalışmada, bağıl nem oranının ve kanal iç yüzey kaplamasının iki farklı mikroorganizma (*Bacillus subtilis* ve *Mycobacterium parafortuitum*) üzerindeki dezenfeksiyon etkisi incelenmiştir. Yüksek yansıtma değerine sahip kanal yüzeylerinin ortalama UV doz miktarını arttırdığı ve düşük bağıl nem değerlerinde patojenlerin UV hassasiyetlerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, deneysel olarak elde edilen dezenfeksiyon oranları sayısal çalışma ile doğrulanmıştır.

Lau vd. (2012), kare kesitli bir kanal içerisinde, kanal iç yüzey yansımalarını da dikkate alarak farklı lamba konfigürasyonları için UVC sistemlerinin etkinliğini incelemiştir. Çalışmada öncelikle UV lambalardan ve yüzey yansımalarından kaynaklanan ışınım

dağılımının tespiti için kanal içerisinde farklı istasyonlardan radyometre ile bir dizi ölçümler alınmış ve ölçüm değerleri sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ardından dört adet UV lambanın akışa paralel ve dik olarak konumlandırıldığı iki farklı senaryo değerlendirilmiştir. Farklı lamba yerleşimleri için birim alandaki ışınım miktarları karşılaştırılmış ve akışa paralel olarak konumlandırılan lamba yerleşim durumunun kanal merkezinde daha üniform bir UV ışınım alanı oluşturduğu sonucuna varılmıştır.

Capetillo vd. (2014), kanal içerisinde UV lamba konumunun dezenfeksiyon performansı üzerindeki etkisini sayısal olarak değerlendirmiştir. Bir adet UV lamba ile yapılan optimizasyon çalışmasında, UV lamba kanal içerisinde kanalın yatay ve düşey doğrultusu boyunca toplamda yedi farklı konumda akışa dik olarak yerleştirilmiş ve kanal girişinde tam gelişmiş hız profili tanımlanmıştır. Lamba konumunun, ortalama UV doz üzerinde belirleyici bir role sahip olduğu belirlenmiştir. Maksimum dezenfeksiyon performansı açısından optimum lamba konumu, merkeze yakın bölge olarak önerilmiştir.

Capetillo vd. (2015) EPA (2006c, e, f)'nin çalışmasını farklı mikroorganizmaları (*Bacillus atrophaeus*, *Serratia Marcescens* ve *Bacteriophage MS2*) da içerecek şekilde sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada, UV lambaların sistem içerisinde oluşturdukları ışınım alanı DO (Discrete Ordinate) ışınım modeli kullanılarak belirlenmiştir. Üç boyutlu akış alanında partikül takibi Lagrange yaklaşımına bağlı olarak sürdürülmüştür. Partikül hareketini ve ışınım alanını dikkate alan bir kullanıcı tanımlı fonksiyon ile her bir partiküle ait doz değeri hesaplanmıştır. İlgili çalışmada tercih edilen sayısal metodun deneysel sonuçlar ile uyumlu sonuçlar verdiği gösterilmiş ve UV sistemlere ait dezenfeksiyon performansı ve optimizasyon çalışmaları için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yaklaşımının elverişli olduğu bildirilmiştir.

Yang vd. (2018), kare kesitli bir kanal içerisinde farklı Reynolds sayılarında ( $4 \times 10^4$  –  $8 \times 10^4$ ) beş farklı patojene (*Serratia marcescens*, *Pseudomonas alcaligenes*, *Escherichia coli*, *Salmonella enterica* ve *Staphylococcus epidermidis*) ait dezenfeksiyon oranını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal modelde kanal girişi boyunca tam gelişmiş akış profili kabulü yapılmıştır. Çalışmada öncelikle her bir patojenin UV hassasiyet değeri farklı doz miktarları için deneysel olarak belirlenmiştir. Ardından farklı Reynolds sayılarında her bir patojen türüne ait dezenfeksiyon oranı deneysel ve sayısal olarak hesaplanmıştır. Reynolds sayısının artmasıyla dezenfeksiyon oranının azaldığı görülmüştür.

Yang vd. (2019), kanal içi UV sistemlerinin etkinliğini deneysel ve sayısal bir çalışmalar ile değerlendirmişlerdir. Sayısal modelde, kanal girişinde hava akışı tam gelişmiş

olarak kabul edilmiştir. Farklı hava hızlarının (3, 4, 5, 6 ve 7 m/s) *E. coli* mikroorganizmasına ait dezenfeksiyon oranı üzerindeki etkisini incelemiştir. Sayısal çalışmada ise kanal iç yüzeylerinden olan yansıma da dikkate alınmıştır. Sayısal sonuçların deneysel değerlerle uyum içinde olduğu görülmüş ve UV lamba boyunun azalmasıyla UV ışınım şiddetinin azaldığı, hava hızının artmasıyla dezenfeksiyon oranının azaldığı ifade edilmiştir.

Zhang vd. (2020) farklı hava akış hızı (3, 5, ve 6,5 m/s), sıcaklığı (15 – 16 °C, 20 – 21 °C ve 25 – 26 °C), bağıl nemi (%50 – 90) ve kanal yüzeylerinden olan yansımanın sistemin dezenfeksiyon etkinliği üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Hava hızının artmasıyla sisteme ait dezenfeksiyon etkinliğinin azaldığını, hava sıcaklığının lambanın UVC çıkış gücünü etkilediğini ve bununla birlikte ilgili mikroorganizmalara ait UV hassasiyet değerlerini de değiştirerek sisteme ait dezenfeksiyon etkinliği üzerinde belirleyici bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, araştırmacılar bağıl nem değerinin mikroorganizmaların UV hassasiyet değerlerini önemli ölçüde değiştirdiğini vurgulamışlardır. Kanal iç yüzeylerinden olan yansımanın dezenfeksiyon etkinliği üzerindeki etkisi kanal duvarlarının siyah renkle kaplı olma durumu ve galvanize metal sac kullanım durumunda değerlendirilmiş ve siyah renkle kaplı yüzeylerin galvanize metal saca göre daha düşük dezenfeksiyon etkinliği sağladığı sonucuna varmışlardır.

### 1.9. Tezin Amacı ve Kapsamı

İç ortam hava kalitesinin iyileştirilmesi; insan sağlığının korunması, rahatsızlıklardan kaynaklanan iş kaybının azaltılması ve tıbbi tedaviler nedeniyle ortaya çıkan ekonomik kayıpların engellenmesi açısından büyük önem arz etmektedir. Havalandırma kanallarında UVC lambaların kullanımı hava yolu ile taşınan patojenlerin inaktive edilmesini sağlayarak iç hava kalitesinin iyileştirilmesine katkı sunmaktadır. Bu konu kapsamında yapılan detaylı literatür araştırması konunun güncel ve disiplinler arası bir niteliğe sahip olduğunu ve son dönemde araştırmacıların HAD modellemelerini içeren sayısal çalışmalar üzerinde yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, deneysel çalışmaların kanal içerisindeki UV ışınım alanı ve buna bağlı olarak dezenfeksiyon sürecine ait kısıtlı bilgiler sunduğu ve sadece test bölgesinin girişi ve çıkışından alınan mikroorganizma konsantrasyonu üzerinden dezenfeksiyon oranlarını belirlemeye çalıştığı görülmektedir.

Konu kapsamında yapılan literatür araştırması, kanal içerisindeki UV lamba konumu ve pozisyonunun, dezenfeksiyon performansı üzerindeki etkisini ele alan çalışmaların kısıtlı

olduğunu, ayrıca çoklu lamba kullanımı ve kanal içerisindeki yerleşim opsiyonlarının yetersiz bir konfigürasyon aralığında ele alındığını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Ayrıca, yapılan çalışmalarda genellikle düz kanal geometrisinin göz önüne alındığı dikkati çekmektedir. Halbuki uygulamada, havalandırma kanallarında düz kanal dışında, dirsek ve kesit daralması veya genişlemesi içeren düzenlemelerinde yer aldığı bilinmektedir. Fakat, bu değişkenlerin çalışmalara dahil edilmediği göze çarpmaktadır. Kesit daralmasının kanal içerisindeki akış yapısını ve buna bağlı olarak partikül hareket yörüngelerini ve dolayısıyla partiküllerin maruz kaldıkları UV doz miktarını etkileyeceği açıktır. Bu durum, sistemin dezenfeksiyon performansını doğrudan etkileyen bir durum olarak öne çıkmaktadır.

İncelenen sayısal çalışmalarda kanalın giriş kesitinde hidrodinamik açıdan tam gelişmiş veya kanal boyunca eş dağılı bir hız profilinin (plug flow) tercih edildiği görülmüştür. Günlük hayatta havalandırma sistemlerinde kullanılan kanalların uzunlukları yapısal kısıtlardan ötürü çoğu zaman tam gelişmiş hız profilini sağlayacak uzunlukta olamamaktadır. Ayrıca, kanal kesitinin her noktasında uniform hava hızı (plug flow) kabulü de gerçekçi değildir. Kanal ve akış yapıları ile ilgili sözü edilen bu durumlar, hava akışının hidrodinamik gelişme bölgesi içinde bulunduğu çalışma şartlarının da değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Gelişmekte olan akış durumu için farklı kanal geometrileri ve UV lamba konumlarını maksimum dezenfeksiyon performansı açısından ele alan çalışmalara ihtiyaç olduğu görülmektedir. Bu kapsamda, özellikle en düşük enerji tüketimi ile en yüksek dezenfeksiyon eldesi için kanal içerisinde optimum lamba konumunun belirlenmesi önemli bir araştırma sorusu olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, bu tez çalışmasında girişinde 45°'lik bir daralma elemanı (lüle) bulunan kare kesitli bir kanal içerisinde, kanalın yatay ve düşey doğrultusunda farklı lamba konumlarının (yatayda ve düşeyde sırasıyla; 3 ve 7 farklı konum) ve kanal cidarlarından iki farklı yansıma oranının (%0 ve %25) da ele alındığı kapsamlı bir sayısal çalışma yapılarak ilgili parametrelerin dezenfeksiyon performansı üzerindeki etkisinin sistematik bir şekilde incelenmesi amaçlanmıştır.

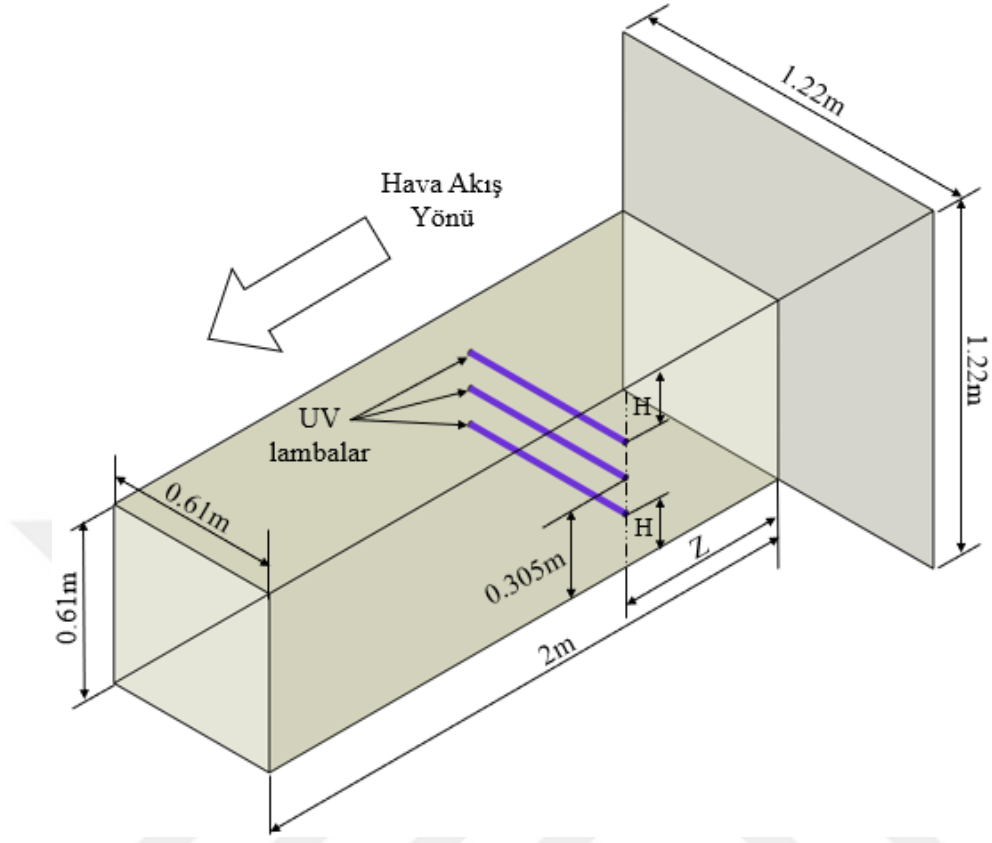
## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Sayısal Çalışma

Bu bölümde, sayısal çalışmada kullanılacak kanal geometrisi, lamba düzenleri, sınır koşulları, ağ yapısı, hava akışı ve patojenleri temsilen partikül hareketinin modellenmesi, UV lambaların çevrelerinde oluşan üç boyutlu ışınım alanının modellenmesi, UV doz miktarlarının hesaplanması ve kullanılan sayısal modelin doğrulanmasına ait bilgiler sunulmaktadır. Sayısal çalışma, bilgisayar destekli bir mühendislik programı olan ANSYS Fluent 15 kullanılarak yürütülmüştür.

#### 2.1.1. Geometrik Modelin Oluşturulması

Model kanalın geometrik boyutları, Amerikan Çevre Ajansı'nın gerçekleştirdiği deneylerde kullandığı kare kesitli kanal boyutları baz alınarak oluşturulmuştur. İncelenen geometri 0.61 m x 0.61 m kare kesitli 2 m uzunluğundaki düz bir kanal ve onunla ilişkilendirilen 45°'lik daralmaya sahip bir lüle elemanından oluşmaktadır. Burada, tercih edilen geometrinin havalandırma uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan bir bağlantı düzeni olduğu not edilmelidir. Benzer şekilde, incelenen kanal düzenlemesi, biyogüvenlik kabinleri, çeker ocaklar ve farklı aspiratör elemanlarında da yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Optimizasyon çalışması, toplamda 3 adet UV lambanın farklı düzenlemeleri (dizilim formları) için yapılmıştır. Bu kapsamda, her biri 18 W gücünde (UVC güç) çapı 1.9 cm uzunluğu ise 61 cm olan silindirik yapıdaki monokromatik (254 nm) UVC lambalar kullanılmıştır. UVC lambalar Şekil 11' de görüldüğü üzere akışa dik olarak kanala yerleştirilmiş ve biri kanal merkezinde sabit olmak üzere diğer iki lambanın kanal cidarlarına olan mesafeleri (H), değişken parametre olarak dikkate alınmıştır. İlgili mesafeler, alt ve üst cidarlar için simetrik bir yapıya sahip olup, toplamda yedi farklı konum (H) üzerinden araştırma yürütülmüştür. Tüm lamba düzenlemeleri için hidrodinamik gelişme bölgesi içerisinde kalmak üzere, üç farklı lamba eksen konumu (Z) ve iki farklı farklı yansıma oranı (%0 ve %25) için performans değerlendirmeleri yapılmıştır. Çalışma kapsamında dikkate alınan hava hızı havalandırma kanalının 0.61 m x 0.61 m kesitli bölümü için ortalama 2.5 m/s olarak belirlenmiştir.



Şekil 11. Kanal geometrisi ve UV lamba konumlarına ait şematik görünüm

Lamba konumlarına bağlı olarak oluşturulan her bir konfigürasyona ait bilgiler Tablo1’de verilmektedir.



Tablo 1. UV lamba konumlarına bağlı oluşturulan geometrik konfigürasyonlar

Konfigürasyonlar	Eksen konumu, Z (m)	Düşey konum, H (m)
Z01H1	0.1	0.0610
Z01H2		0.1017
Z01H3		0.1220
Z01H4		0.1525
Z01H5		0.1830
Z01H6		0.2033
Z01H7		0.2542
Z06H1	0.6	0.0610
Z06H2		0.1017
Z06H3		0.1220
Z06H4		0.1525
Z06H5		0.1830
Z06H6		0.2033
Z06H7		0.2542
Z1H1	1	0.0610
Z1H2		0.1017
Z1H3		0.1220
Z1H4		0.1525
Z1H5		0.1830
Z1H6		0.2033
Z1H7		0.2542

### 2.1.2. Hava Akışının Modellenmesi

Herhangi bir akış probleminin sayısal çözümünde, akışkanlar mekaniğinin genel denklemleri olan süreklilik ve Navier-Stokes denklemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, kanal içerisindeki türbülanslı hava akışı üç boyutlu olarak modellenmiştir. Türbülanslı akış şartları için sırasıyla süreklilik ve Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri, sırasıyla, genel formda aşağıda verilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) \\ & + \rho g_i \end{aligned} \quad (2)$$

Burada momentumun korunumu denkleminde eşitliğin sağındaki üçüncü terim,  $-\rho \overline{u_i u_j}$ , Reynolds gerilmelerini temsil etmekte olup açık formda aşağıdaki gibidir.

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

Burada,  $\delta_{ij}$  ve  $\mu_t$  sırasıyla, kronekar delta terimini ve türbülans viskozitesini ifade etmektedir. Türbülans viskozitesinin açık formu ( $\mu_t$ ),

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

biçiminde yazılabilir. Burada, Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemlerinin çözümünde, Standart  $k - \varepsilon$  türbülans modeli kullanılmıştır (Capetillo, 2015). Standart  $k - \varepsilon$  türbülans modeli, günümüzde birçok mühendislik probleminin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. İlgili türbülans modeline ait transport denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (6)$$

Mevcut denklemlerde yer alan  $G_k$ ,  $G_b$ ,  $\sigma_k$  ve  $\sigma_\varepsilon$ , sırasıyla, ortalama hız gradyanına bağlı türbülans kinetik enerji üretimini, kaldırma kuvvetlerinden kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimini,  $k$  için türbülans Prandtl sayısını ve  $\varepsilon$  için türbülans Prandtl sayısını

temsil etmektedir.  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  ve  $C_{3\varepsilon}$ , model sabitlerini  $S_k$  ve  $S_\varepsilon$ , kaynak terimlerini ve  $Y_M$ , sıkıştırılabilir türbülanslı bölge içindeki türbülans hacim değişiminin toplam yayılım oranına katkısını ifade etmektedir. Standart  $k-\varepsilon$  türbülans modeline ait denklem katsayıları Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Türbülans modeline ait katsayılar

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$C_\mu$	$\sigma_\varepsilon$	$\sigma_k$
1.44	1.92	0.09	1.3	1.0

Sayısal çalışmada, taşınım terimleri için ayrıklaştırma yöntemi olarak second - order upwind, basınç - hız çiftinin çözümünde SIMPLE yaklaşımı tercih edilmiştir. Yüzeylerde, sınır tabakanın çözümlenmesinde standart duvar fonksiyonu (Standart Wall Functions) kullanılmıştır. Navier - Stokes denklemlerinin çözümünde yakınsama kriteri,  $10^{-6}$  olarak dikkate alınmıştır.

### 2.1.3. Partikül Hareketinin Modellenmesi

Hava akışının çözümlenmesinin ardından elde edilen akış haritası üzerinde, patojen partiküllerin takip ettiği rotalar Ayrık faz modellemesi (Discrete phase modelling- DPM) yardımı ile incelenmiştir. Kanal içerisindeki her bir patojen partikül yörüngesi, zamana bağlı momentum denklemini her bir partikül için ele alan Lagrange yaklaşımına bağlı olarak hesaplanmıştır. İlgili denklem aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_e \quad (7)$$

Burada, eşitliğin sol tarafındaki terim  $du_p/dt$  atalet kuvvetini,  $u_p$  partikülün hız vektörünü,  $u$  hava hızını,  $\rho_p$  ve  $\rho$ , sırasıyla, partikülün ve havanın yoğunluğunu göstermektedir. Denklemin sağ tarafındaki ilk terim  $F_D(u - u_p)$ , sürüklenme kuvvetini, ikinci terim  $\frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p}$  yerçekimi ve kaldırma kuvvetini,  $F_e$  ise partiküle etki edebilecek diğer olası ek kuvvetleri (Termoforetik kuvvet, Saffman kaldırma kuvveti ve Brownian kuvveti) temsil etmektedir

(ANSYS, 2013). Ayrıca, gevşeme zamanının tersi (relaxation time),  $F_D$  açık formda aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$F_D = \frac{18\mu C_d Re_p}{\rho_p d_p^2 24} \quad (8)$$

Burada,  $\mu$  havanın moleküler viskozitesi,  $d_p$  partikül çapı ve  $Re_p$  partikül çapına bağlı Reynolds sayısıdır.  $C_d$ , küre şeklindeki partiküller için sürüklenme katsayısını ifade etmekte olup,

$$C_d = \frac{\xi_1}{Re_p} + \frac{\xi_2}{Re_p^2} + \xi_3 \quad (9)$$

formunda ifade edilir. Burada  $\xi_1$ ,  $\xi_2$  ve  $\xi_3$  sabit katsayıları temsil etmektedir (Morsi vd., 1972).  $Re_p$  ise partikül çapına bağlı Reynolds sayısı olup açık formda aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$Re_p = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (10)$$

Akış alanına yollanan partiküller, türbülanslı hız alanının etkisiyle oluşan rastgele (stokastik) yörüngeleri takip etmektedir. Türbülans dalgalanmalarının partikül dağılımı üzerindeki stokastik etkisi ayrık rastgele yürüyüş (Discrete Random Walk- DRW) modeli kullanılarak değerlendirilmiştir.

#### 2.1.4. UV Lamba Işınım Alanının Modellenmesi

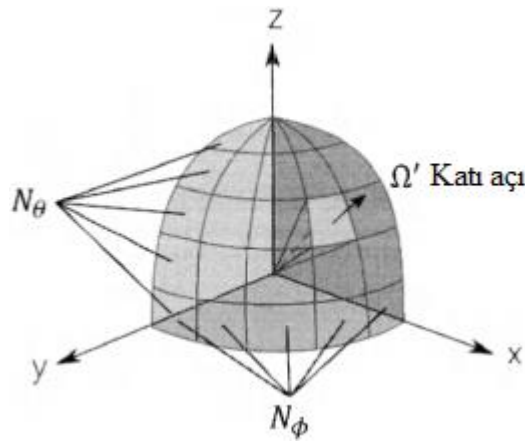
Kanal içi hava dezenfeksiyon sistemlerinde UV ışınımına ait matematiksel modelin seçimi ve kullanımı, performans ve optimizasyon çıktılarını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu çalışmada, UV lambaların kendi çevrelerinde oluşturdukları üç boyutlu ışınım alanı Ayrık ordinatlar ışınım modeli (Discrete ordinates modeling-DOM) kullanılarak modellenmiştir. Ayrık ordinatlar (Discrete Ordinates (DO)) ışınım modeli radyatif transfer denklemini (Radiative transfer-RTD), her biri kartezyen sistemi içerisinde belirlenmiş  $\vec{s}$  vektör yönüyle ilgili sonlu sayıdaki ayrık katı parçacık açıları için çözmektedir. Radyatif

transfer denklemi spektral ışınlam şiddetinin,  $I_\lambda(\vec{r}, \vec{s})$  bir ortam içerisindeki izlediği yol boyunca değişimini ifade eder (ANSYS, 2013).

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

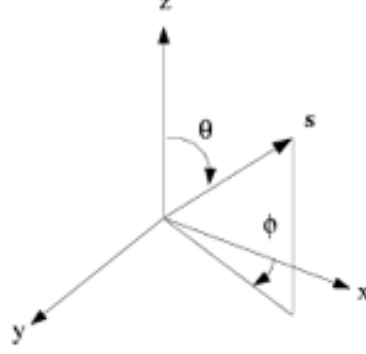
Burada,  $\vec{r}$  konum vektörü,  $\vec{s}$  yön vektörü,  $\vec{s}'$  yayılım yönü vektörü,  $s$  alınan yol,  $\alpha_\lambda$  spektral yutma katsayısı,  $n$  kırılma indisi,  $\sigma_s$  yayılım katsayısı,  $I_{b\lambda}$  siyah cisim ışınlam şiddeti,  $I_\lambda$  konum  $\vec{r}$  ve yöne  $\vec{s}$  bağlı ışınlam şiddetini,  $\lambda$  dalga boyu,  $\Phi$  faz fonksiyonu,  $\Omega'$  katı açığı ifade etmektedir. DO modeli RTD'yi ışınlam şiddeti için yazılmış bir aktarım denklemine dönüştürür ve bu denklemi tüm yönler için çözer. DO en kapsamlı ışınlam modelidir. Bu model saçılmayı, yarı saydam ortamı, yansıtıcı yüzeyleri ve dalga boyuna bağlı geçirmeyi hesaba katmaktadır ve konservatif bir metod olup kaba ayrıklaştırma için ışınlam dengesini sağlayabilmektedir. Bunun yanı sıra, ince ayrıklaştırma yapılarak hassasiyet arttırılabilmektedir (ANSYS, 2013).

Açısal ayrıklaştırma Theta Division ( $N_\theta$ ) ve Phi Division ( $N_\phi$ ) parametreleri ile kontrol edilir. Bu parametreler açısal uzayın her bir 1/8'lik kısmını ayrıklaştırmak için kullanılan kontrol açıların sayısını belirlemektedir (Şekil 12). Her bir ayrık koordinat bir katı açı içerisindeki ışınlamla aynı yöndedir.



Şekil 12. 1/8'lik kısmın açısal ayrıklaştırılması

Şekil 13'te açısal koordinat sisteminde  $\varphi$  ve  $\theta$  açıları görülmektedir. Burada azimut açısı  $0 < \varphi < 2\pi$ , kutup açısı ise  $0 < \theta < \pi/2$  aralığındadır.

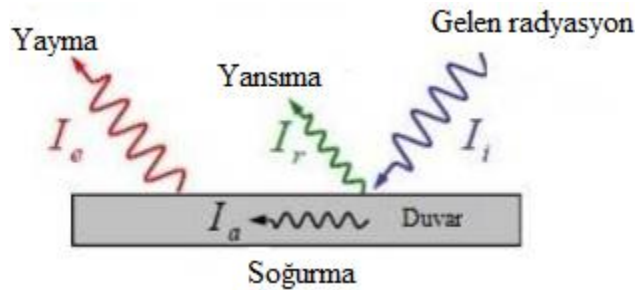


Şekil 13. Açısal koordinat sistemi

DO ışınım modeli, saydam olmayan duvarların her iki yanında da akışkan veya katı ortam olduğu problemleri çözebilmektedir. Saydam olmayan duvar yüzeyine gelen radyasyon enerjisinin bir kısmı duvarı çevreleyen ortama geri yansımakta, bir kısmı da duvar tarafından soğurulmakta olup bu enerji dengesi şu şekilde ifade edilebilir (ANSYS, 2013):

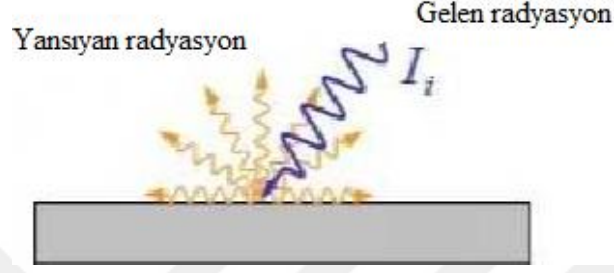
$$I_i = I_r + I_a \quad (12)$$

Şekil 14'te saydam olmayan duvarda ışınım enerji dengesi şematik olarak gösterilmektedir (ANSYS, 2013).



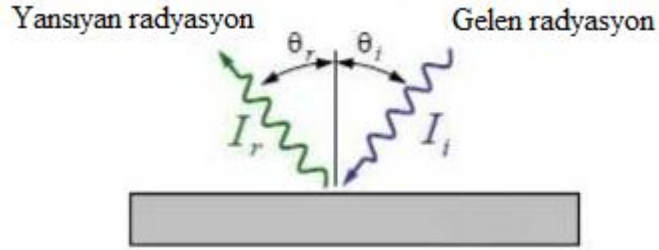
Şekil 14. Saydam olmayan duvarda ışınım enerji dengesi

Duvar yüzeyine gelen ışınım, dağınık (diffuse) ve düzgün (specular) olmak üzere iki farklı formda yansımaktadır. Dağınık ve düzgün yansıyan ışınım değerleri duvar yüzeyinin dağınık fraksiyon,  $f_d$  katsayısı değeri ile belirlenmektedir ve bu terim dağınık yansımının toplam yansımaya oranını ifade etmektedir. Şekil 15'te duvar yüzeyine gelen ışınımın dağınık olarak yansıdığı durum görülmektedir (ANSYS, 2013).



Şekil 15. Dağınık yansımaya ait şematik görünüm

Şekil 16'da yüzeye gelen ışınımın düzgün olarak yansıdığı durum görülmektedir (ANSYS, 2013).



Şekil 16. Düzgün yansımaya ait şematik görünüm

Saydam olmayan duvar yüzeyine gelen ışınım enerjisi  $q_i$  olmak üzere:  
Duvar yüzeyinden ışınım yayımı,

$$q_e = n^2 \varepsilon_w \sigma T_w^4 \quad (13)$$

Duvar yüzeyinden dağınık olarak yansıyan ışınım,

$$q_{d,r} = f_d (1 - \varepsilon_w) q_i \quad (14)$$

Duvar yüzeyinden düzgün olarak yansıyan ışınım;

$$q_{s,r} = (1 - f_d)(1 - \varepsilon_w)q_i \quad (15)$$

Duvar yüzeyinde soğurulan ışınım;

$$q_a = \varepsilon_w q_i \quad (16)$$

denklemleri ile ifade edilir (ANSYS, 2013). Burada  $f_d$  dağınık fraksiyon,  $n$  duvara komşu olan ortamın kırılma indeksi,  $\varepsilon_w$  duvarın yayıcılığı,  $\sigma$  Stefan-Boltzmann sabiti,  $T_w$  duvar yüzey sıcaklığını ifade etmektedir. DO model, bir ortam içerisindeki yüzeylerden kaynaklanan yayılım ve yansımanın yanı sıra ortam içerisindeki yutulmayı, yayılımı ve saçılmayı dikkate alarak bunun sonucunda ortam içerisindeki ışınım şiddetini hesaplamaktadır. Bu model sayesinde farklı geometrik düzenlemelerde ortam içerisindeki lambaların gölgeleme etkileri de göz önüne alınabilmektedir (Ho, 2009). Literatürde gerek su gerekse hava ile alakalı UV dezenfeksiyon sistemlerinin tasarımlarında bu model oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır (Ho, 2009; Capetillo vd., 2015; Li vd., 2016; Long vd., 2019).

### 2.1.5. UV Doz Hesabı

Kanal içerisindeki partiküllerin hareket güzergahlarının belirlenmesi ve UV ışınım alanının elde edilmesinin ardından UV doz hesaplaması yapılmıştır. Kanal içerisinde her bir partikülün UV ışın huzmesi alanından geçerken bünyelerine almış olduğu kümülatif UV dozu ( $J.m^{-2}$ ) belirlemek için Ho (2009)'nun yaklaşımına bağlı olarak uyarlanan bir kullanıcı tanımlı fonksiyon (user defined function (UDF)) ilgili paket programa tanıtılmıştır. Bu UDF kod sayesinde kanal içerisinde farklı yörüngeler üzerinde hareketlerini sürdüren belirli fiziksel özelliğe sahip patojen partiküllerin UV etki alanı içerisinde geçerken bünyelerine almış oldukları UV doz miktarları hesaplama bölgesinin sonunda yani kanal çıkışında elde edilebilmektedir. Matematiksel formda doz miktarı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$UV \text{ doz} = dt * \sum_{i=1}^{i=n} \frac{UV_i + UV_{i+1}}{2} \quad (17)$$



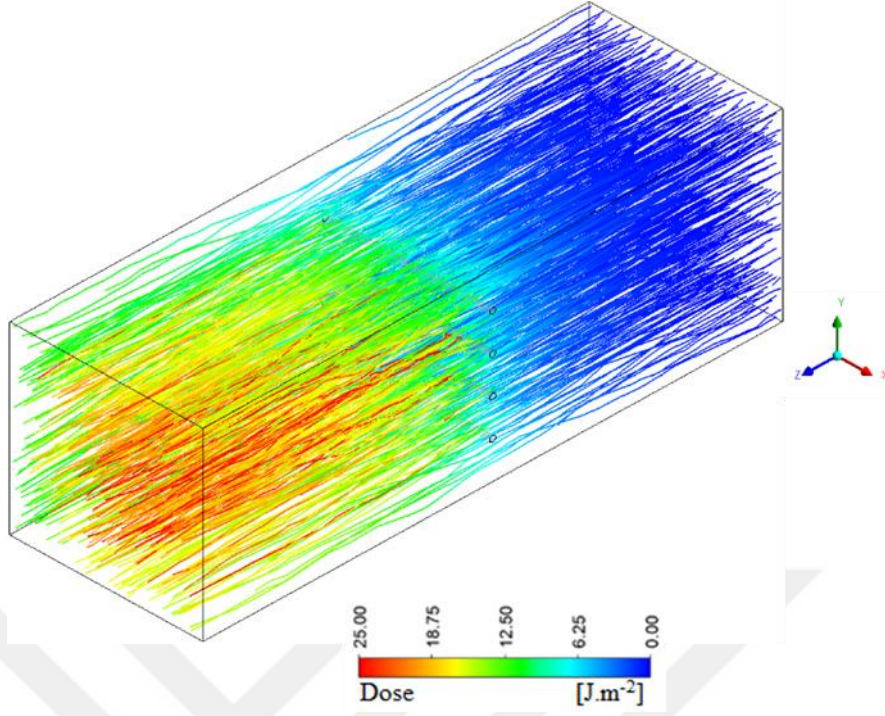
Burada,  $dt$  zaman adımını,  $UV_i$  ve  $UV_{i+1}$  ise sırasıyla ardışık iki zaman adımına ait hesaplama hücrelerindeki UV ışınım şiddetini (birim alandaki radyasyonu) ifade etmektedir. Sisteme ait ortalama UV doz miktarı ise hesaplama bölgesi boyunca takibi yapılan her bir patojen partikülün (mikroorganizmanın) bünyesine almış olduğu dozlar toplamının toplam partikül sayısına ( $n$ ) bölünmesiyle (aritmetik ortalaması alınarak) hesaplanmaktadır (Capetillo, 2015).

$$\text{Sisteme ait ortalama UV doz} = \frac{\sum_i^n UV_{doz}}{n} \quad (18)$$

Örnek bir hesaplama dosyası ve doz alımına ilişkin görseller sırasıyla Şekil 17 ve 18 'de verilmektedir.

outlet	14)													
X0	Y0	Z0	X	Y	Z	U	V	W	diameter	T	time	UV-Dosage	name)	
0	0	0	0.368747	0.032801	2	0.104705	0.24371	2.54638	1.00E-06	1	1.16435	24.5348	injection-0:439)	
0	0	0	0.360261	0.056617	2	0.080488	0.104968	2.26741	1.00E-06	1	1.03622	19.9233	injection-0:524)	
0	0	0	0.483624	0.048228	2	0.457386	0.136136	2.28303	1.00E-06	1	1.11119	23.2358	injection-0:588)	
0	0	0	0.318955	0.101384	2	-0.00599	0.221028	2.39716	1.00E-06	1	1.07999	27.9553	injection-0:609)	
0	0	0	0.369452	0.049527	2	-0.1911	0.153503	2.60907	1.00E-06	1	1.14268	24.4216	injection-0:612)	
0	0	0	0.353603	0.028391	2	0.006277	0.04773	2.47941	1.00E-06	1	1.0492	24.1108	injection-0:614)	
0	0	0	0.421563	0.042754	2	0.062303	0.261771	2.35639	1.00E-06	1	1.16937	21.1445	injection-0:619)	
0	0	0	0.370913	0.006635	2	0.151561	0.205917	1.94253	1.00E-06	1	1.1185	20.5534	injection-0:636)	
0	0	0	0.447991	0.037303	2	0.171666	0.328166	2.5062	1.00E-06	1	1.15067	23.3943	injection-0:640)	
0	0	0	0.507289	0.031638	2	0.205934	-0.11406	2.11329	1.00E-06	1	1.1558	19.9591	injection-0:643)	
0	0	0	0.473641	0.011356	2	-0.05876	0.058432	2.16934	1.00E-06	1	1.18816	24.4007	injection-0:650)	
0	0	0	0.372629	0.002101	2	0.029967	-0.22723	1.74554	1.00E-06	1	1.25284	24.831	injection-0:666)	
0	0	0	0.396913	0.008888	2	-0.17935	0.402384	2.3186	1.00E-06	1	1.15533	24.3274	injection-0:676)	
0	0	0	0.436807	0.015135	2	0.043758	0.005511	2.30138	1.00E-06	1	1.14443	22.9873	injection-0:678)	
0	0	0	0.336797	0.043846	2	-0.46676	-0.23155	2.29073	1.00E-06	1	1.00526	30.3703	injection-0:679)	
0	0	0	0.407393	0.035326	2	-0.09263	0.040707	2.79464	1.00E-06	1	1.05602	19.5541	injection-0:684)	
0	0	0	0.415316	0.027883	2	0.250709	0.154418	2.40892	1.00E-06	1	1.06912	22.154	injection-0:702)	
0	0	0	0.360706	0.029795	2	0.052107	0.183502	3.00048	1.00E-06	1	1.1773	23.1225	injection-0:713)	
0	0	0	0.34947	0.037511	2	-0.30247	-0.01536	2.05879	1.00E-06	1	0.999641	20.1487	injection-0:736)	
0	0	0	0.403028	0.051871	2	-0.03953	-0.2176	2.54976	1.00E-06	1	1.16132	23.6004	injection-0:742)	

Şekil 17. Hesaplama bölgesi sonunda takibi yapılan her bir partikülle ait ilgili verileri içeren örnek hesaplama dosyası görüntüsü



Şekil 18. Partiküllerin UV ışınım bölgesinden geçerken almış oldukları doz miktarlarına ait örnek bir şematik görünüm

### 2.1.6. Sınır Koşulları

Bu kısımda, sayısal modelde kullanılan sınır koşullarına ait bilgiler verilmektedir. Analizde, tüm çalışma koşulları için hava akışının sürekli ve izotermal olduğu varsayılmıştır. Çalışmalarda kanal girişinde hız girişi (*velocity inlet*) ve kanal çıkışında (*outflow*) sınır koşulları uygulanmıştır. Kanal girişinde ortalama hava hızı 0.625 m/s olacak şekilde üniform bir akış profili tanımlanmıştır. Hava akışına ait türbülans parametrelerinin belirlemek için kanal girişindeki hidrolik çap değeri kullanılmış ve türbülans yoğunluğu %10 alınmıştır (Capetillo, 2015). Ayrıca, tüm katı yüzeylerde kaymama (*no slip*) sınır koşulu öngörülmüş ve tüm korunum denklemlerinin çözümü için yakınsama kriteri  $10^{-6}$  olarak tanımlanmıştır.

Patojen mikroorganizmaları temsil eden partiküllerin dış ortam havasından kanala geçiş yapacağı dikkate alınmıştır. Bu yüzden, sayısal modelde kanal giriş yüzeyinde (*inlet*) oluşturulan her bir hücre üzerinden partikül salınımı gerçekleştirilmiştir. Salınan her bir partikülün küresel formda, ortalama  $1 \times 10^{-6}$  m (1  $\mu$ m) çapa ve  $1000 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğa sahip olduğu öngörülmüştür. Kanal çıkışında (*outlet*) partiküllerin akış alanını terk ettiğini ifade eden *Escape* sınır şartı kullanılmıştır. Lagrangian partikül takip modelinde takibi yapılan partikül sayısının, hesaplanan UV doz miktarı ve dağılımının doğruluğu üzerinde etkisi

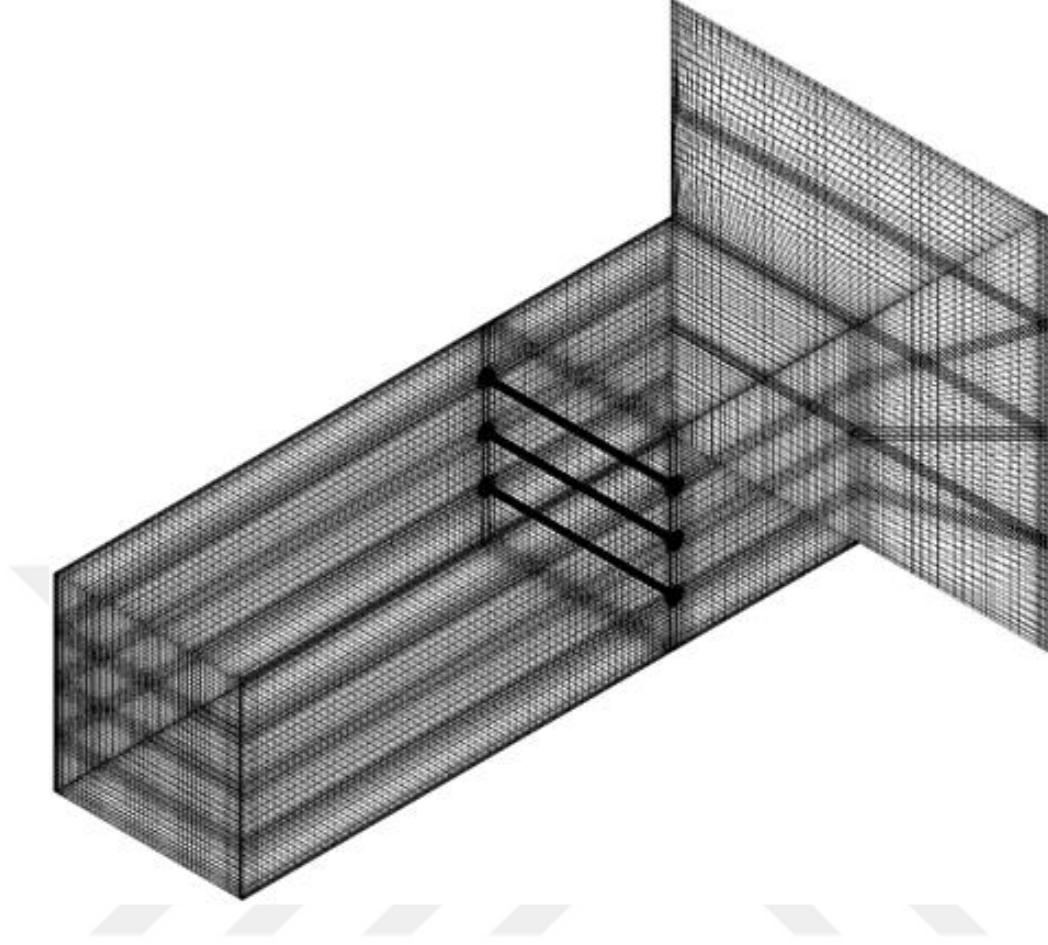
bulunmaktadır (Munoz vd., 2007). Elde edilen sonuçların yeterli doğrulukta ve kararlılıkta olması için üç farklı partikül sayısında (sırasıyla 10000, 15000 ve 20000 adet) değerlendirme yapılmıştır. Yapılan değerlendirme sonucunda 15000 ve üzeri partikül sayısında elde edilen sonuçların değişmediği ve tutarlı bir davranış sergilediği görülmüştür. Bu nedenle, her bir durumda kanal içerisinde 15000 ve üzeri sayılarda partikül takibi yapılmıştır.

Fluent DO model içerisinde malzeme özellikleri, lamba gücü ve açısal ayırıklaştırma parametreleri kullanıcı tarafından tanımlanabilmektedir. Açısal ayırıklaştırma, ( $N_\theta$ ) ve ( $N_\phi$ ) parametreleri ile kontrol edilmektedir. Açısal ayırıklaştırma, sayısal model içerisindeki ışınım dağılımını belirlediği için önemli bir parametredir (Pareek ve Adesina, 2004). Hesaplama bölgesi içerisinde ortalama ışınım değeri aynı kalmasına rağmen, ışınım dağılımı değişkenlik göstermektedir (Capetillo, 2015). Bu bağlamda, model içerisinde açısal ayırıklaştırma için bölüntü değerinin artırılması ile daha eş dağılımlı/dağılmış bir ışınım alanı elde edilebilir. Ancak açısal ayırıklaştırmada ne kadar çok bölüntü değeri uygulanırsa, hesaplama süresi de o denli artacaktır. Mevcut sayısal modelde hesaplama süresi, ışınım dağılımı ve ışın etkisi problemi (ray effect problem) dikkate alınarak ( $N_\theta$ ) ve ( $N_\phi$ ) için 15 x 15 bölüntü değeri uygulanmıştır. Çalışmada, kanal içerisinde ışınım yayılımının sadece lamba yüzeylerinden gerçekleşeceği varsayılmıştır. Her bir UV lamba yüzeyi yarı-saydam (*semi-transparent*) olarak varsayılmış ve her bir lamba yüzeyinden  $494.36 \text{ W/m}^2$ 'lik *diffuse irradiation* tanımlaması yapılmıştır. *Diffuse irradiation* miktarı, lambanın UVC gücünün lamba yüzey alanına bölünmesi ile elde edilmiştir. Kullanılan UVC lambalar monokromatik yapıda olduğundan çalışmada tek bir dalga boyu (254 nm) dikkate alınmıştır (Capetillo, 2015). Sayısal modelde hava homojen bir ortam olarak değerlendirilmiş ve havanın yutma katsayısı ( $a$ ) 0 ve kırılma indisi, ( $n$ ) 1 olarak dikkate alınmıştır (Hoi, 2014). Hava ortamı içerisinde asılı halde bulunan partikül miktarı, havanın hacmine kıyasla ihmal edilebilir düzeydedir (Cassano, 1995). Bu nedenle, ortam içerisinde asılı halde bulunan partiküllerden kaynaklanan ışık saçılım etkisi (light scattering effect) ihmal edilmiştir (Saha vd., 2015). Kanal iç duvar yüzeylerinden yansıma olması durumunda, bu yansımanın dağınık (*diffuse*) yansıma olacağı varsayılmıştır (Capetillo, 2015). Ayrıca, model içerisinde yansımanın etkisi duvarın yayma oranı,  $\varepsilon_w$  ile ifade edilebilmektedir. Çalışmada iki farklı yansıma durumu (%0 ve %25) dikkate alınmış olup her bir durum için yayma oranları, sırasıyla,  $\varepsilon_w=1$  ve  $\varepsilon_w=0,75$  olarak tanımlanmıştır. Çalışmada Radyatif transfer denklemi için yakınsama kriteri  $10^{-6}$  olarak dikkate alınmıştır.

### 2.1.7. Ağ Yapısı

Sayısal analizde nihai çözümlere başlamadan önce, sonuçların ağ yapısından etkilenmemesi için ağdan bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Çalışmada üniform olmayan ağ yapısı kullanılmıştır. Hesaplama alanın çözümünde kullanılacak ağ yapısı ANSYS ICEM CFD yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Tüm hesaplama bölgesi, yapılandırılmış hexahedral elemanlar kullanılarak hücrelere ayrılmıştır. Karmaşık geometrielerde hexahedral elemanların oluşturulması her ne kadar zor olsa da yapılandırılmamış tetrahedral, prizmatik ya da piramidal elemanlarla karşılaştırıldığında daha az eleman sayısı ile daha iyi bir yakınsama davranışı gösterdiğinden ve daha iyi bir ağ kalitesi sağladığından çalışmada hexahedral tipi elemanlar kullanılmıştır (ANSYS, 2013).

Hesaplama bölgesi içerisinde cidara yakın kısımlarda hava akışının (hız gradyanının) daha iyi karakterize edilmesi için bu bölgelerde daha sıkı ağ yapısı tercih edilmiştir. Ayrıca, UV lambalardan yayılan ışınım şiddeti eksponansiyel olarak azalım sergilediğinden UV lambaların bulunduğu kısımlarda da daha sıkı, diğer bölgelerde ise daha geniş bir ağ yapısı tercih edilmiştir. Şekil 19'da hesaplama bölgesi için uygulanan ağ yapısı şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 19. Hesaplama bölgesine uygulanan ağ yapısı

Ağdan bağımsızlık çalışması Z06H4 geometrik konfigürasyonu ve kanal cidarlarından yansımanın olmadığı (%0 yansıma) durum için değerlendirilmiş olup farklı ağ yapılarında ortalama UV doz değerleri üzerinden karşılaştırma yapılmıştır.

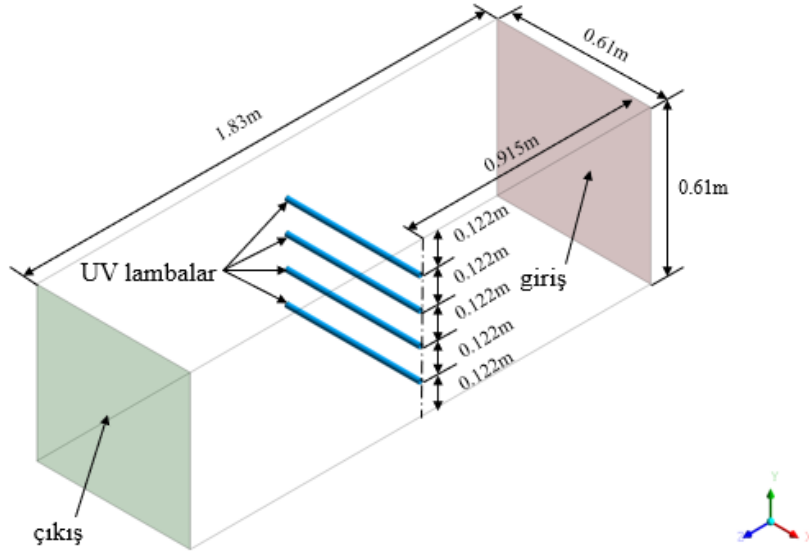
Yürütülen ağdan bağımsızlık çalışmasında üç farklı ağ yapısı (yaklaşık 250 bin, 750 bin ve 1.5 milyon) değerlendirilmiştir. Ortalama UV doz miktarı üzerinden yapılan ağdan bağımsızlık çalışmasına ait sonuçlar Tablo 3'te verilmektedir. Ağdan bağımsızlık çalışmasında 750 bin hücre sayısından sonra değişimlerin ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülmüş ve çalışma bu ağ yapısında sürdürülmüştür.

Tablo 3. Ortalama UV doz miktarı üzerinden gerçekleştirilen ağdan bağımsızlık çalışmasına ait sonuçlar

	250 bin hücre	Değişim %	750 bin hücre	Değişim %	1.5 milyon hücre
<b>Ortalama UV doz (J/m<sup>2</sup>)</b>	26.20	2.42	25.58	0.86	25.36

### 2.1.8. Sayısal Modelin Doğrulanması

Sayısal çalışmada ilgili modelin doğrulanması için EPA (2006e) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmaya ait dört lambalı düzenleme (EPA 600/R-06/051) dikkate alınmıştır. İlgili çalışmada, hava akışı, 0.61m x 0.61m x 7.83 m (en x yükseklik x boy) boyutlarına sahip bir kanal içerisinde gerçekleşmekte ve 6.0 m'de hidrodinamik açıdan tam gelişmiş duruma ulaşmaktadır (2.5 m/s giriş hızı için). Kanalın son 1.83 m'sinde (test bölgesinde), aralarında 0.122 m mesafe olan 4 adet özdeş UV lamba (8.5 W UVC güç ve 1.9cm x 53.82cm, çap x boy) hava akışına dik olarak alt alta konumlandırılmıştır. İlgili geometrik düzenleme Şekil 20'de verilmektedir.



Şekil 20. Test bölgesine ait şematik görünüm

İlgili modelin doğrulanması, literatürde sistemlerin performans değerlendirilmesinde bir ölçüt olarak kullanılan ortalama UV doz miktarı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Mevcut

çalışma ve EPA (2006e) tarafından yapılan çalışmayı referans alan literatürdeki diğer çalışmalara ait ortalama UV doz miktarları Tablo 4’de verilmektedir. İlgili değerler incelendiğinde mevcut çalışmaya ait ortalama UV doz miktarının literatürdeki diğer çalışmalarla uyum içinde olduğu görülmektedir. Bu durum, oluşturulan sayısal modelin tez kapsamında değerlendirilen geometrileri temsilde yeterli duyarlılık ve doğrulukta olduğunu net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Tablo 4. EPA 600/R-06/051 test bölgesine ait ortalama UV doz miktarları

<b>Çalışma</b>	<b>Ortalama UV doz (J/m<sup>2</sup>)</b>
Kowalski (2009)	18
Capetillo (2015)	18.45
Mevcut Çalışma	18.30

### 3. BULGULAR VE İRDELEME

#### 3.1. Hız Alanlarının İncelenmesi

Patojen bir mikroorganizmanın bünyesine aldığı UV doz miktarı, ışınım alanında geçirilen toplam süre ve bu süre zarfında takip edilen rotanın bir fonksiyonudur. Kanal içerisinde oluşabilecek farklı akış alanlarına bağlı olarak partiküller birbirlerine göre farklı hızlarda hareket edecek, düşük hızlarda hareket eden partiküller görece daha uzun süre ışınımına maruz kalarak akış alanını terk ederken daha yüksek doz değerlerine erişmiş olabileceklerdir. Yine aynı süre zarfında partiküllerin takip ettikleri rotaların lambalara göre konumu da toplam doz miktarını etkileyecektir. Bu manada, akış alanı dahilinde izlenen her bir partikülün erişeceği doz değerinin hesaplanabilmesi için havalandırma kanalı içinde oluşacak hız dağılımlarının bilinmesi önem arz etmektedir. Çalışma kapsamında incelenen tüm UV lamba dizilimleri için kanal merkez düzleminde elde edilen eş hız alanları Şekil 21’de verilmektedir.

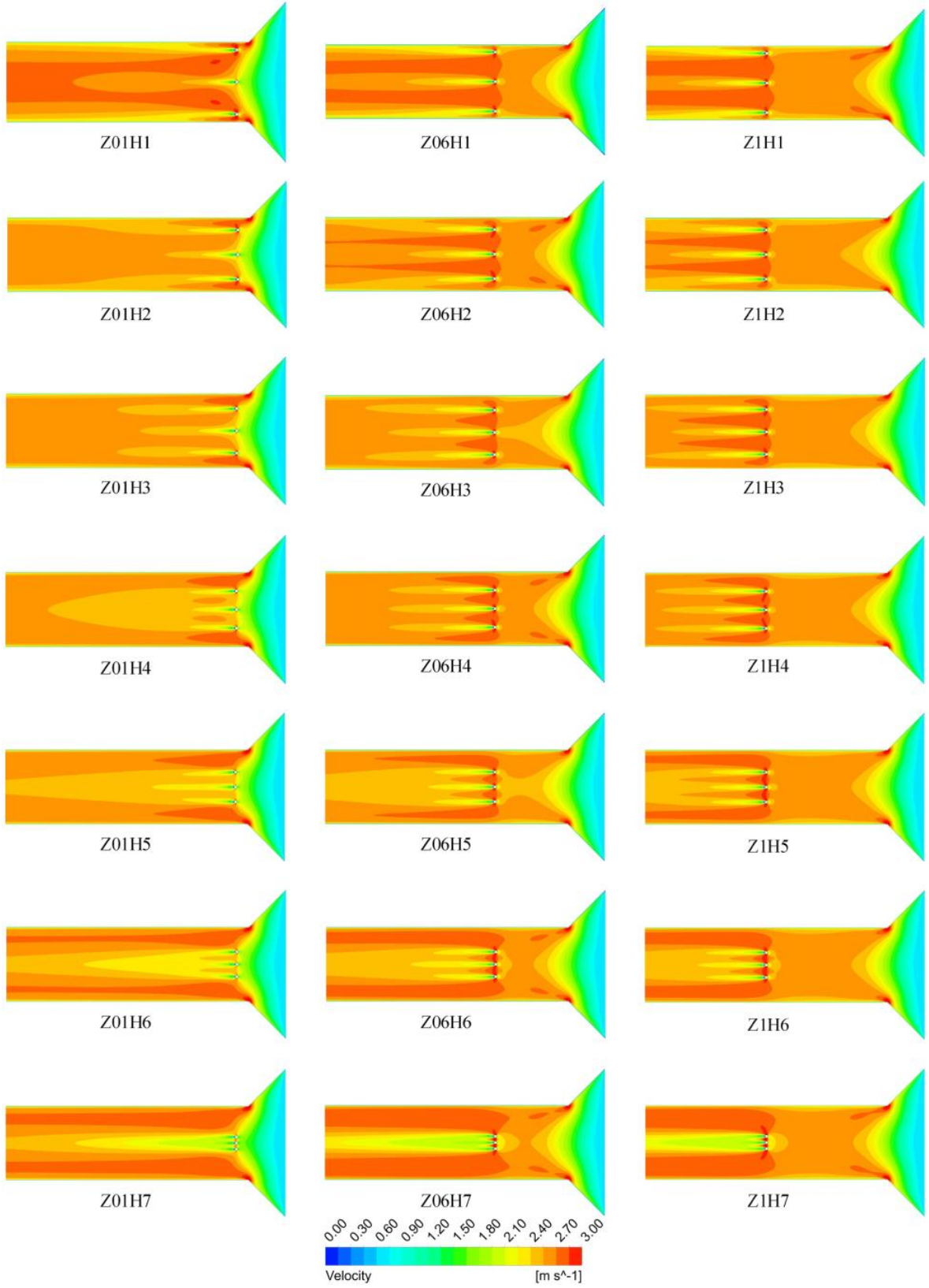
Genel karakter olarak, akış doğrultusunda daralma elemanının bitişi ile beraber beklendiği üzere daha yüksek hız değerlerine ulaşıldığı ve akışın düz kanala yaklaşık parabolik bir formda giriş yaptığı görülmektedir. Bu form lambaların daralma elemanına en yakın bulunduğu Z01 düzenlemesinde lambalar nedeni ile neredeyse düz kanalın girişinde yapısını kaybetmektedir. UV lambaların daralma elemanının sonrasında düz kanal içinde daha uzakta konumlandırıldığı Z06 ve Z1 dizilimlerinde ise ilgili formun lamba varlığına kadar hidrodinamik gelişimini sürdürdüğü görülmektedir.

Tüm dizilimlerde lamba komşuluğu ve sonrasında farklı alt hız bölgelerinin geliştiği ifade edilebilir. Bu bölgelerin oluşumu, büyüklüğü ve geometrisi lamba eksen konumuna (Z01 - Z1) ve lambalar arası mesafeye (H1 - H7) göre değişmektedir. Burada, H1 - H3 lamba dizilimlerinde lambalar arası bölgelerde yüksek hızlara ulaşıldığı ve lambaların daha yakın konumlandırıldığı H4 - H7 konfigürasyonlarında ise yüksek hız bölgelerinin lamba-kanal cidarı arası bölgelere kaydığı görülmektedir. Bu davranış, lamba yüzey komşuluğunda oluşan yüksek dirençli hız sınır tabakanın varlığı ile açıklanabilir. Şekil 21 dikkatli bir şekilde incelendiğinde, lambalar arası mesafelerin fazla olduğu H1 – H3 dizilimlerinde lamba komşuluğunda oluşan sınır tabakaların kesişmediği, diğer bir ifadeyle ilgili bölgelerde yüksek akış dirençlerinin oluşmadığı görülmektedir.



Buna karşın, lambaların birbirine yaklaştırılması ile (H4 - H7 konfigürasyonları) sınır tabaka etkileşiminin baskın hale geldiği ve bunun bir sonucu olarak yüksek akış direncinin momentum transferini kısıtladığı açık bir şekilde görülmektedir. İlgili grafiklerde, lamba eksen konumdan bağımsız olarak, küçük lamba mesafelerinde (H4 - H7) ayrık düşük hız bölgelerinin birleşerek kanal sonuna kadar varlığını sürdürdüğü de net bir şekilde görülmektedir. Hava akışının patojenler için bir akışkan yatak görevi üstlendiği hatırlanacak olursa, homojen bir ışınım alanı için, düşük hız bölgelerince taşınan patojenlerin kanal içerisinde daha uzun süre kalacağı ve böylelikle daha yüksek doz düzeylerine ulaşacağı açıktır. Bu durum, yüksek hız bölgelerince taşınan patojenler için ise düşük doz alımı ile sonuçlanacaktır.

Lamba eksen konumları üzerinden yapılan karşılaştırmada ise, lambaların kanal girişine en yakın olduğu Z01 durumu için Z06 ve Z1 durumlarına kıyasla lamba sonrası bölgede akışın hidrodinamik açıdan önemli düzeyde geliştiği ve kanal çıkışına yakın bölgede daha üniform bir karaktere kavuştuğu görülmektedir.



Şekil 21. Tüm lamba konfigürasyonları için kanal merkez düzlemi üzerindeki eş hız alanları

### 3.2. UV Işınım Alanlarının İncelenmesi

Lamba düzenlemelerine bağlı UV ışınım alanları iki farklı yansımaya oranı (%0 ve %25) üzerinden Z01, Z06 ve Z1 lamba eksen konumları için sırasıyla, Şekil 22, 23 ve 24' te karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

İlgili ışınım alanları dikkatli bir şekilde incelendiğinde, genel karakter olarak, tüm yansımaya ve lamba dizilim durumlarında ışınım şiddetinin lamba komşuluğunda yüksek değerler aldığı ve lambadan uzaklaştıkça kademeli bir azalış sergilediği görülmektedir. Her bir lamba özelinde değerlendirildiğinde elde edilen ışınım alanının dairesel bir formda olduğu özellikle H1 ve H2 konfigürasyonlarında görülmektedir. Lambaların birbirlerine yaklaştırılması durumunda (H1'den H7'ye) kanal merkezindeki ışınım şiddetinin giderek arttığı bununla beraber kanal cidarına yakın bölgelerde ışınım şiddetinin azaldığı görülmektedir. Buna bağlı olarak, H1 konfigürasyonunda elips bir yapı sergileyen bütünlük ışınım alanının lambaların birbirine yaklaştırılmasıyla H7 konfigürasyonunda kısmen dairesel bir görünüm kazandığı ifade edilebilir. Burada, kanal içerisindeki UV ışınım şiddeti ve dağılımının kanal içerisinde hava akışına bağlı olarak farklı yörüngelerde hareket eden patojen partiküllerin almış oldukları UV doz miktarları üzerinde belirleyici etkiye sahip olacağı hatırlanmalıdır. Bu bağlamda, kanal içerisinde UV ışınım yoğunluğunun daha fazla olduğu bölgelerde hareket eden partiküllerin, hareketini lambalardan uzak bir bölgede sürdüren partiküllere göre süreç boyunca daha yoğun bir UV ışınımına maruz kalarak bünyelerine daha fazla UV doz alacağı değerlendirilebilir.

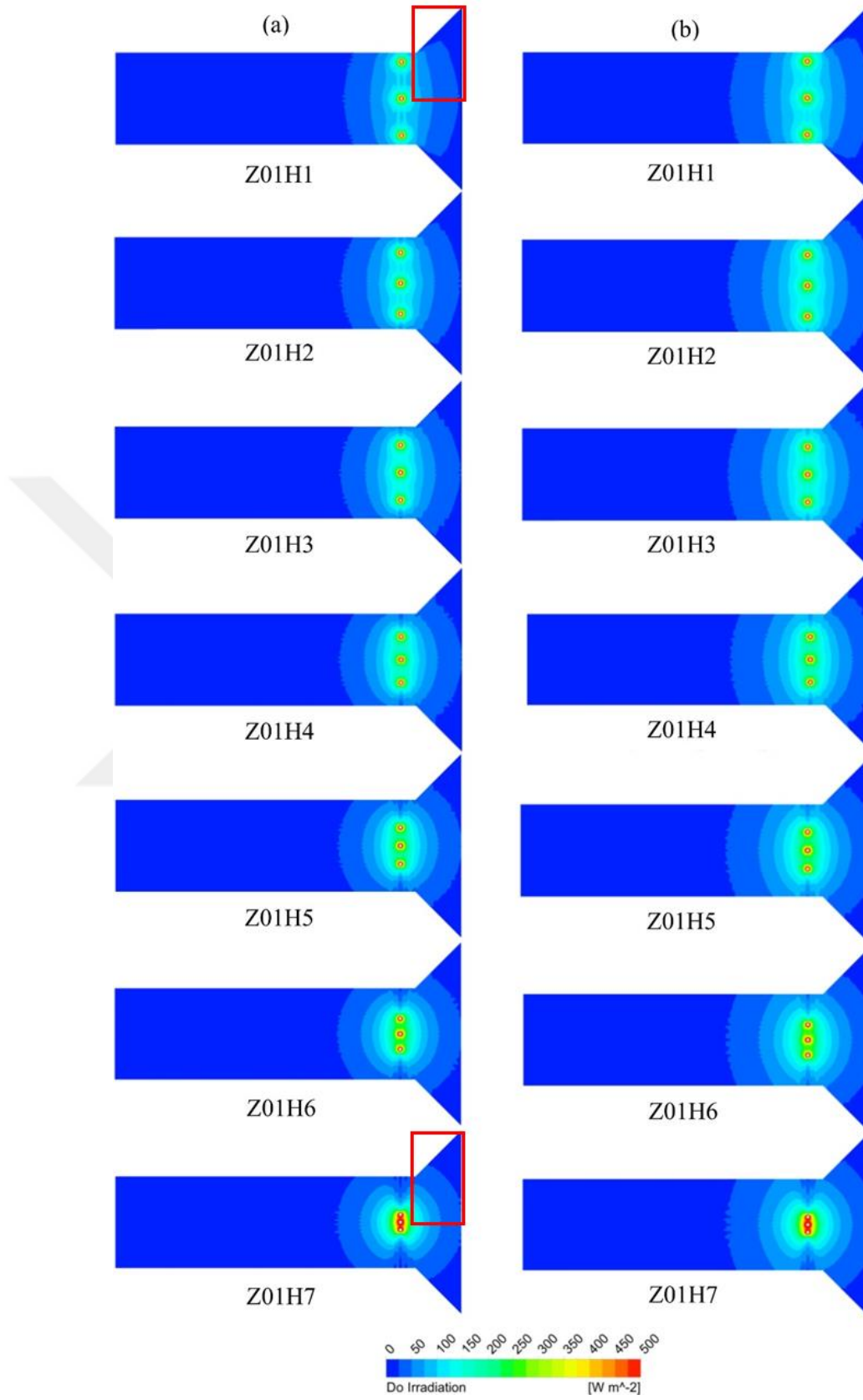
Kanal cidarlarından olan yansımanın ışınım alanı üzerindeki etkisi göz önüne alındığında, tüm lamba yerleşim durumlarında yansımaya oranının artmasıyla (%0 → %25) birlikte, kanal içerisinde daha yoğun bir UV ışınım alanı oluştuğu ve UV ışınım alanının kanal boyunca genişlediği net bir biçimde görülmektedir. Bu durum, %0 yansımaya oranında cidarlar tarafından soğurulan ışınımın bir kısmının %25 yansımaya oranında tekrar kanal içine gönderilmesiyle açıklanabilir. Bu davranışın, patojen partiküllerinin kanal içerisinde geçirdikleri süre boyunca maruz kaldıkları UV ışınım miktarını artıracak ve böylelikle, daha fazla UV doz alımına katkı sunacağı açıktır.

Şekil 22'de ifade edilen Z01 lamba eksen konumunda, düz kanal kesitinden daha geniş bir yapıda olan daralma elemanı nedeniyle, Şekil 23 ve Şekil 24' e göre kısmen daha geniş bir ışınım alanı ortaya çıkmaktadır. Aynı konfigürasyonda H1 diziliminde daralma elemanı cidarında görülen ve Şekil 22'de kırmızı dikdörtgen ile işaretlenen bölge, yakınında bulunan

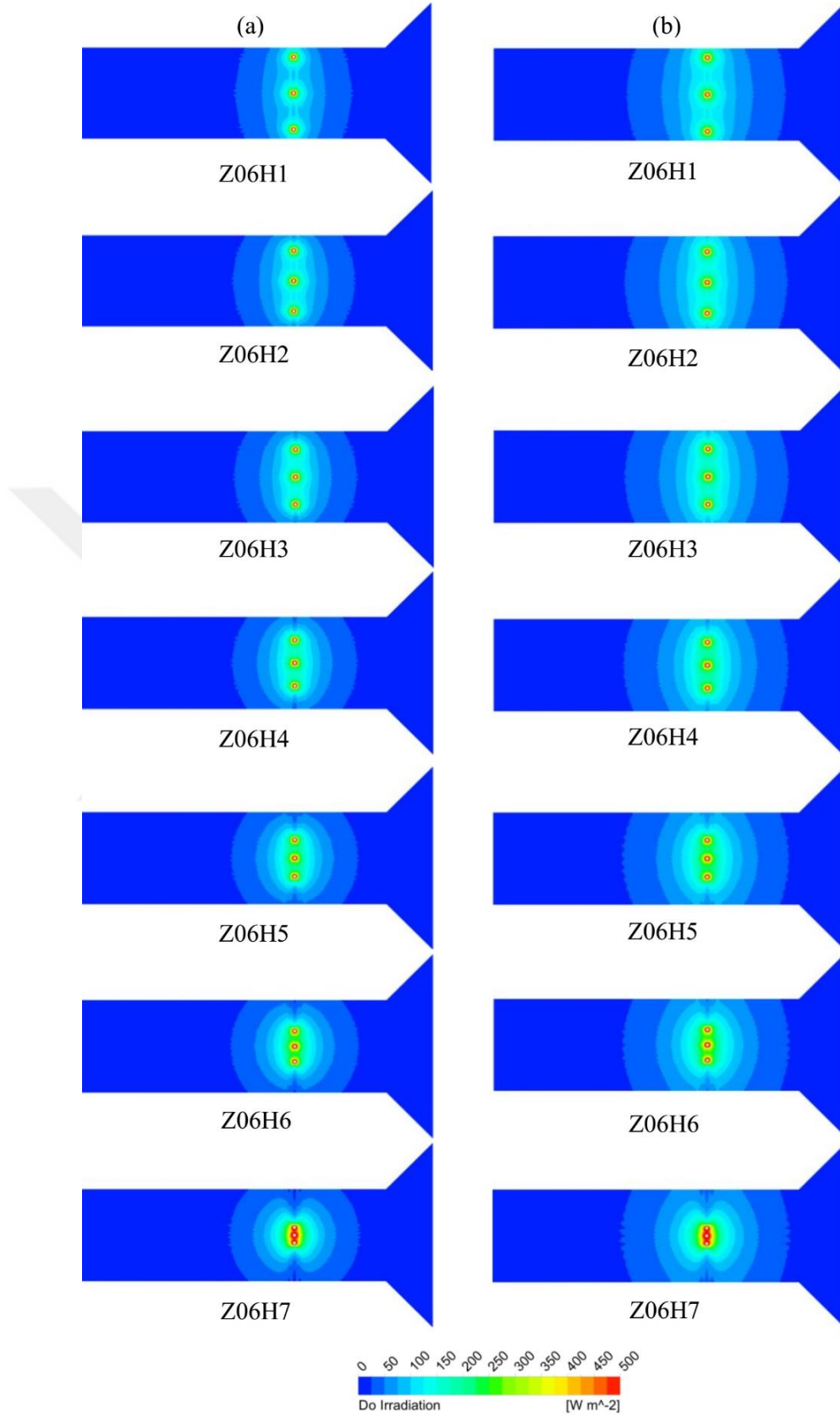
lambanın görüş açısında bulunmadığından, düşük ışınım değerine maruz kalmaktadır. Bu durum lambaların birbirine yaklaşması ile ilgili bölge yakınındaki lambanın uygun görüş açısını kazanması neticesinde ortadan kalkmaktadır.

Şekil 23 ve 24' de lamba eksen konumları üzerinden bir karşılaştırma yapılırsa Z06 ve Z1 değerlerinde elde edilen ışınım alanlarının aynı H değeri için tamamen eş bir ışınım dağılımı sergilediği ifade edilebilir. Kısacası, belirli bir yansıma durumu için, herhangi bir H değerinde elde edilen ışınım alanı Z06 ve Z1 lamba eksen konumlarında tamamen aynı kalmaktadır. İlgili lamba eksen konumlarındaki bu ortak davranış, ışınımın sadece geometrik bazlı olması diğer bir ifadeyle akış alanından bağımsız bir davranış sergilemesi ile açıklanabilir.

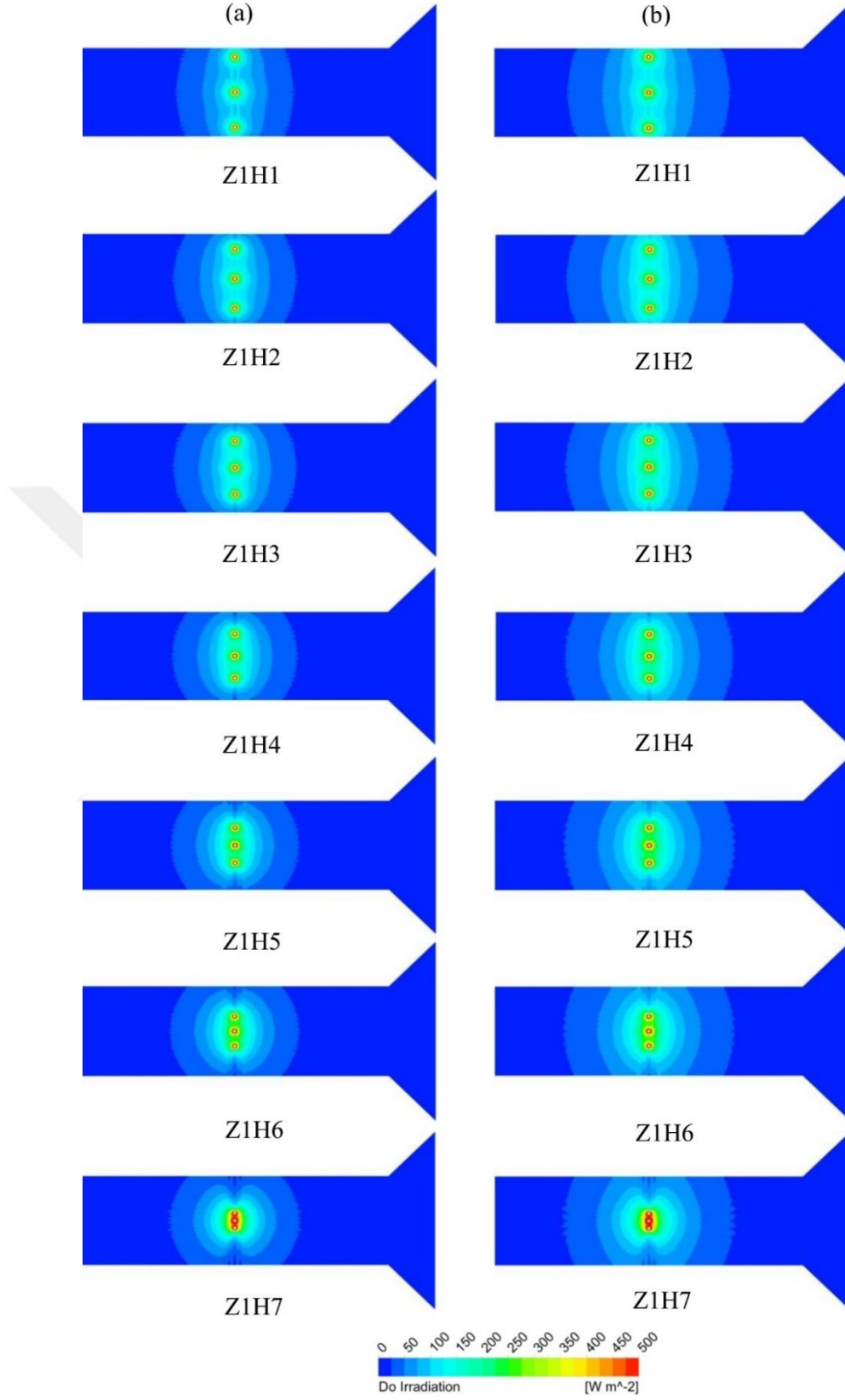




Şekil 22.  $Z=0.1\text{m}$ 'deki tüm lamba dizilim durumlarına ait kanal merkez düzlemi üzerinde gösterilen eş ışınım alanları; (a) %0 yansımaya, (b) %25 yansımaya



Şekil 23.  $Z=0.6\text{m}$ 'deki tüm lambda dizilim durumlarına ait kanal merkez düzlemi üzerinde gösterilen eş ışınım alanları; (a) %0 yansımaya, (b) %25 yansımaya



Şekil 24.  $Z = 1\text{m}$ 'deki tüm lamba dizilim durumlarına ait kanal merkez düzlemi üzerinde gösterilen eş ışınım alanları; (a) %0 yansıtma, (b) %25 yansıtma

### 3.3. UV Doz Dağılımlarının İncelenmesi

Her bir lamba düzenlemesine ait UV doz dağılım çıktıları ortalama doz, standart sapma ve değişim (varyasyon) katsayısı üzerinden Tablo 4 ve 5'te verilmektedir. Burada, standart sapmanın aritmetik ortalamadan olan mutlak uzaklığı, değişim katsayısının ise standart sapma / aritmetik ortalama oranını temsil ettiği not edilmelidir. Fiziksel açıdan her iki büyüklükte bir dağılımın dağılım derecesi bir başka ifadeyle homojenlik düzeyi hakkında bilgi sunmaktadır. Standart sapma veya değişim katsayısının artışı homojen dağılımdan olan uzaklaşmanın bir ölçüsü olarak değerlendirilmektedir.

Yansıma oranının % 0 olması durumuna ait doz dağılım çıktıları incelendiğinde, tüm lamba eksen konumları için değişim katsayılarının H3 lamba diziliminde en küçük değerini aldığı görülmektedir (Tablo 4). Bu durum, UV doz dağılım homojenliği açısından, ilgili lamba diziliminin lamba eksen konumdan bağımsız olarak, tüm konfigürasyonlara en başarılı cevabı verdiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, en yüksek değişim katsayısının (en kötü doz dağılım performansının) lamba eksen konumuyla değiştiği, Z01 için H1, Z06 ve Z1 için H7'de ilgili değere ulaşıldığı görülmektedir. Her bir lamba eksen konumu kendi içinde değerlendirildiğinde ise, ortak karakter olarak, değişim katsayısının H1-H3 aralığında azaldığı, H3'te minimum değerine ulaştığı ve sonrasında (H3-H7 aralığında) sürekli bir artış sergilediği görülmektedir. Ayrıca, maksimum doz dağılım performansı açısından, optimum lamba dizilimine (H3) ait değişim katsayısının lamba eksen konumunun artışıyla (Z01→Z1) daha düşük değerlere ulaşması diğer bir önemli sonuç olarak ortaya çıkmaktadır. Doz dağılımına ilişkin bu davranışlar, hız ve ışınım alanlarının bütünleşik etkisi ile açıklanabilir. Homojen bir doz dağılımı için, akış alanı içerisindeki yüksek hız bölgelerinin yüksek şiddetli ışınım alanlarıyla, benzer şekilde düşük hız alanlarının ise düşük şiddetli ışınım alanlarıyla desteklenmesi gerekmektedir. Burada, her bir bağımsız partikülün yolculuğu boyunca yaklaşık eşit düzeyde doz alması ana amaçtır. İlgili mekanizmaya, lamba dizilimi açısından H3, lamba eksen konumu açısından ise Z1 en başarılı cevapları vermektedir.

Benzer şekilde, % 25 yansıma oranına ait doz dağılım performans çıktıları Tablo 5'te verilmektedir. Tüm lamba konumlarına ait doz dağılımları, genel karakter olarak, % 0 yansıma oranı ile örtüşmektedir. Bununla birlikte, % 0 yansıma oranına kıyasla % 25 yansıma oranının daha düşük değişim katsayılarına (yüksek doz dağılım homojenliğine) cevap verdiği görülmektedir. İlgili davranış, % 0 yansıma oranında kanal cidarları tarafından



soğurulan ışınım miktarının % 25 yansıma oranında belirli ölçüde tekrar kanal içine yönlendirilmesi ile açıklanabilir. Bu durumun, özellikle cidar komşuluğunda hareketini sürdüren düşük hızlı partiküllerin doz alımına katkı sunacağı açıktır.

Burada, partikül doz dağılımı homojenliğinin UVC destekli bir dezenfeksiyon sisteminin performans değerlendirmesinde nihai bir ölçüt olarak dikkate alınamayacağı vurgulanmalıdır. Bu aşamada, patojen hassasiyet düzeyine bağlı olarak partikül başına alınması gereken asgari doz miktarı ve mevcut konfigürasyonun sağladığı doz miktarı arasındaki nicel ilişki belirleyici olmaktadır.



Tablo 5. %0 yansımada tüm lamba dizilim durumları için hesaplanan değişim katsayısı değerleri

Konfigürasyonlar (%0 Yansıma)		Ortalama UV doz (J/m <sup>2</sup> )	UV doz standart sapma (J/m <sup>2</sup> )	Değişim katsayısı (standart sapma /Ortalama doz) x 100, (%)
<b>Z01</b>	<b>H1</b>	24.17	15.97	66.06
	<b>H2</b>	25.04	9.43	37.66
	<b>H3</b>	25.25	9.25	36.62
	<b>H4</b>	25.31	9.99	39.47
	<b>H5</b>	25.92	11.32	43.68
	<b>H6</b>	27.17	12.61	46.41
	<b>H7</b>	30.10	17.30	57.48
<b>Z06</b>	<b>H1</b>	23.82	6.50	27.28
	<b>H2</b>	24.29	6.39	26.29
	<b>H3</b>	25.26	6.58	26.05
	<b>H4</b>	25.58	7.08	27.67
	<b>H5</b>	26.44	8.81	33.31
	<b>H6</b>	26.77	9.59	35.82
	<b>H7</b>	26.93	13.37	49.65
<b>Z1</b>	<b>H1</b>	23.39	5.76	24.64
	<b>H2</b>	23.97	5.81	24.23
	<b>H3</b>	24.45	5.59	22.86
	<b>H4</b>	24.90	6.93	27.82
	<b>H5</b>	25.40	8.31	32.71
	<b>H6</b>	25.81	9.21	35.70
	<b>H7</b>	26.56	12.88	48.50

Tablo 6. %25 yansıma için tüm lamba dizilim durumları için hesaplanan değişim katsayısı değerleri

Konfigürasyonlar (%25 Yansıma)		Ortalama UV doz (J/m <sup>2</sup> )	UV doz standart sapma (J/m <sup>2</sup> )	Değişim katsayısı (standart sapma /Ortalama doz) x 100, (%)
<b>Z01</b>	<b>H1</b>	31.92	20.77	65.08
	<b>H2</b>	32.45	11.34	34.95
	<b>H3</b>	32.64	10.73	32.88
	<b>H4</b>	32.51	11.09	34.12
	<b>H5</b>	33.25	12.52	37.67
	<b>H6</b>	34.45	13.73	39.86
	<b>H7</b>	37.29	18.40	49.35
<b>Z06</b>	<b>H1</b>	33.51	7.79	23.23
	<b>H2</b>	34.02	7.38	21.70
	<b>H3</b>	34.91	7.09	20.31
	<b>H4</b>	35.21	7.57	21.49
	<b>H5</b>	36.01	9.34	25.94
	<b>H6</b>	36.15	10.13	28.02
	<b>H7</b>	36.57	14.15	38.69
<b>Z1</b>	<b>H1</b>	33.25	7.09	21.33
	<b>H2</b>	33.82	6.62	19.57
	<b>H3</b>	34.39	6.00	17.45
	<b>H4</b>	34.66	7.04	20.30
	<b>H5</b>	35.07	8.35	23.81
	<b>H6</b>	35.37	9.16	25.89
	<b>H7</b>	35.77	13.37	37.38

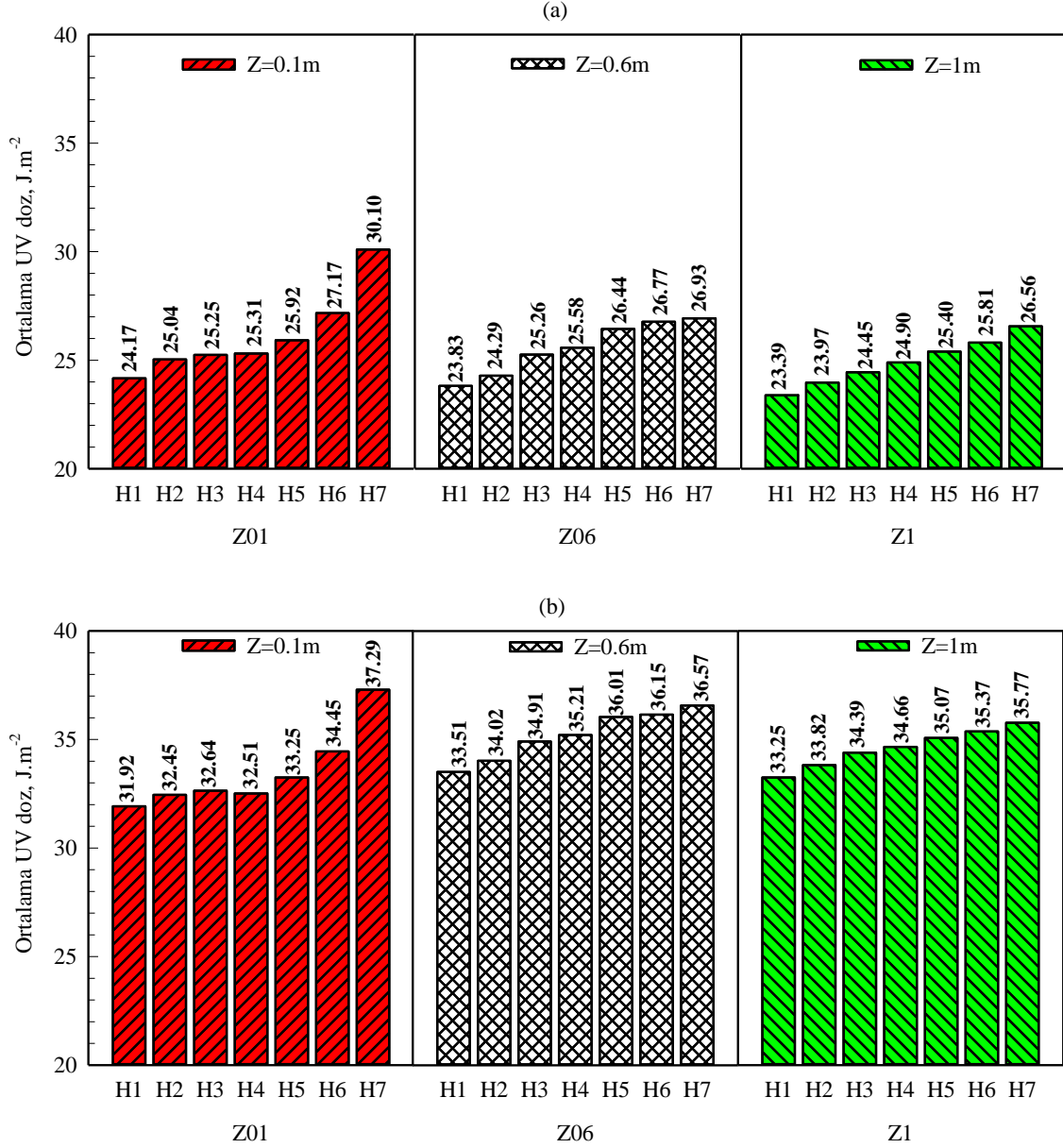
### 3.4. Ortalama UV Doz Miktarlarının İncelenmesi

Ortalama UV doz miktarı, kanal girişinden çıkışına kadar takibi yapılan her bir partiküle ait kümülatif UV doz miktarlarının aritmetik ortalaması üzerinden hesaplanmaktadır. Her bir lamba eksen konumu için lamba dizilimi (H1 – H7) ve yansıma oranlarının (%0 ve %25) ortalama UV doz üzerindeki etkisi sırasıyla Şekil 25 ve 26'da sunulmaktadır.

Yansıma oranının % 0 değeri için ulaşılan ortalama doz miktarları incelendiğinde, her bir lamba eksen konumu için, ortak karakter olarak, lambalar arası mesafenin azalmasıyla (H1→ H7) ortalama UV doz miktarlarının belirgin bir artış sergilediği görülmektedir. Nicel olarak, ilgili ortalama doz düzeyi Z01 lamba eksen konumunda H1 dizilimi için  $24.17 \text{ J/m}^2$  ve H7 dizilimi için  $30.10 \text{ J/m}^2$  seviyelerinde olup iki değer arasındaki artış oranı yaklaşık %25 düzeyindedir. Benzer şekilde, Z06 ve Z1 lamba eksen konumları için en düşük ortalama doz değerlerine sırasıyla  $23.83 \text{ J/m}^2$  ve  $23.39 \text{ J/m}^2$  olarak H1 diziliminde, en yüksek ortalama doz miktarı değerlerine ise sırasıyla,  $26.93 \text{ J/m}^2$  ve  $26.56 \text{ J/m}^2$  olarak H7 diziliminde ulaşılmaktadır. Z06 ve Z1 konumları için ilgili ortalama UV doz değerleri arasındaki artış oranı %13 ve %14 düzeyindedir. Bu davranış, lamba diziliminin güçlü bir fonksiyonu olan UV ışınım alanı ve şiddeti ile açıklanabilir. H7 diziliminin lambaların birbirine en yakın olduğu durumu temsil ettiği hatırlanacak olursa, mevcut dizilimin kanal merkezinde daha yoğun UV ışınım alanı oluşturacağı (Şekil 22 – 24) ve dolayısıyla, kanal merkez komşuluğunda hareketini sürdüren partiküllerin yoğun UV ışınım nedeniyle yüksek UV doz değerlerine maruz kalacağı açıktır. Böylece, görece daha yüksek miktarlarda UV doza maruz kalan partiküller sistemin ortalama UV doz miktarında artışa neden olmaktadır. Bu davranışının aksine, H1 dizilimde (lambalar arası mesafenin en büyük olması durumu) kanal içerisindeki yoğun ışınım alanı etkisini yitirmekte ortalama doz miktarı azalmaktadır (Şekil 22 – 24).

Lamba eksen konumunun ortalama doz miktarı üzerindeki etkisi lamba dizilimi açısından en yüksek ortalama doz değerine cevap veren H7 durumu için incelendiğinde; Z01H7 konumunda en yüksek, Z1H7 konumunda ise en düşük ortalama UV doz değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. İlgili ortalama UV doz değerleri arasındaki değişim oranı %13 mertebesinde. Bu davranış, Z1 konumuna kıyasla Z01 konumunda (kanal girişine en yakın lamba eksen konumu) daralma elemanına doğru genişleyen ışınım alanı ve ilgili bölgedeki daha düşük hızların varlığı ile açıklanabilir. Şekil 21 incelendiğinde, Z01H7

konumu için kanal merkezi komşuluğunda Z06H7 ve Z1H7 konumlarına kıyasla daha düşük hız bölgelerinin varlığı net bir şekilde görülmektedir. Bu durumda, Z01H7 konumu için görece daha yavaş hareket eden partiküllerin bünyelerine daha fazla doz alacağı ve böylece, sistemin ortalama UV doz miktarının artacağı ifade edilebilir.



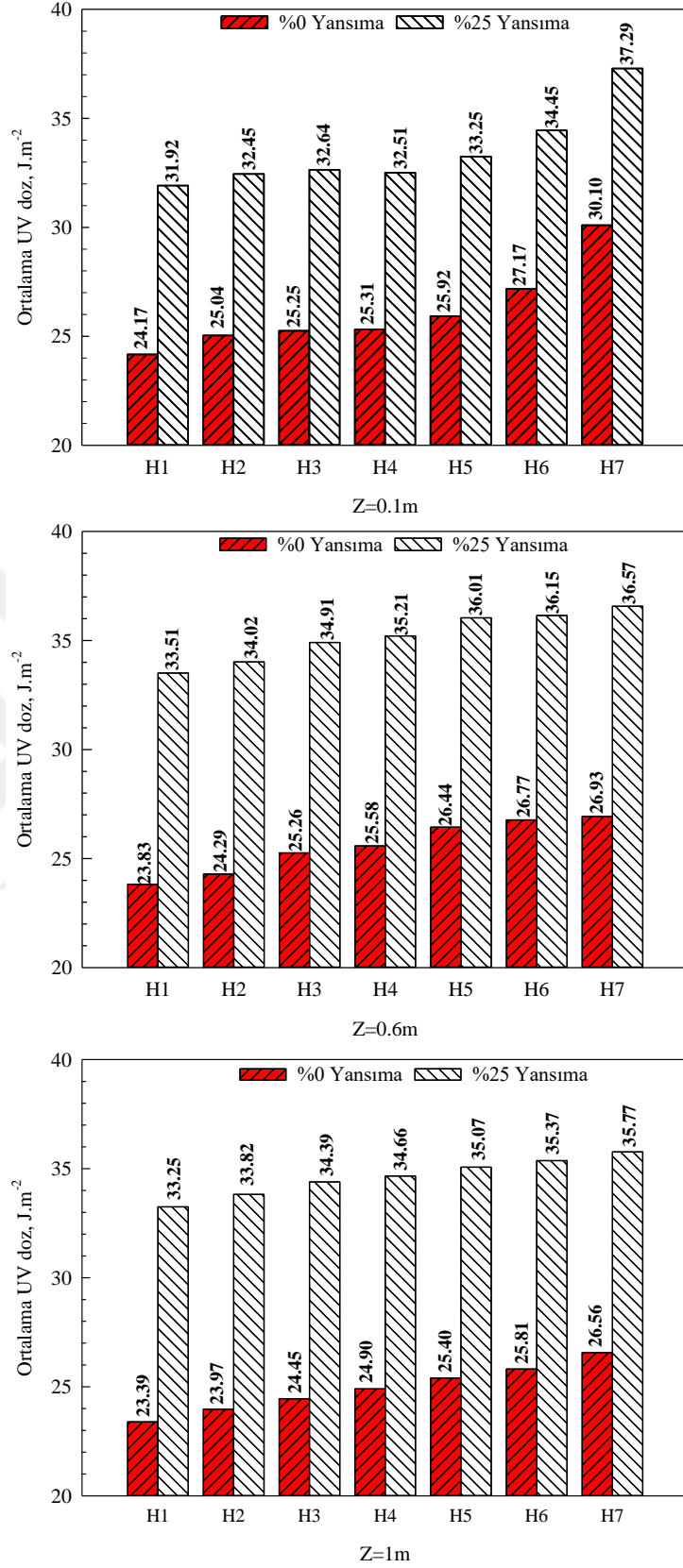
Şekil 25. Tüm lamba konfigürasyonlarına ait ortalama UV doz miktarları; (a) %0 yansım oranı, (b) %25 yansım oranı

Yansım oranının %25 değeri için tüm lamba konumlarına ait ortalama UV doz miktarları Şekil 25 (b)' de verilmektedir. Genel karakter olarak, lamba dizilimi ve lamba

eksen konumunun ortalama UV doz miktarı üzerindeki etkisi %0 yansımaya oranıyla örtüşmektedir. Benzer şekilde, % 25 yansımaya oranında da en yüksek ortalama UV doz miktarına H7 durumunda, en düşük UV doz miktarına ise H1 durumunda ulaşılmaktadır. Nicel olarak, aynı lamba eksen konumları için bu oran Z01, Z06 ve Z1’de sırasıyla %17, %9 ve %8 mertebelerindedir. Lamba eksen konumu açısından da, benzer şekilde, en yüksek ortalama UV doza cevap veren H7 diziliminin sırasıyla Z01, Z06 ve Z1’de daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. Mevcut yansımaya oranında (%25) H7 düzenlemesinin lamba eksen konumları üzerindeki yerleşimine bağlı olarak ulaşılan maksimum doz artış düzeyi %4 seviyesindedir.

Tüm lamba dizilim durumları için yansımaya oranının (%0 ve %25) ortalama UV doz miktarı üzerindeki etkisi farklı lamba eksen konumları üzerinden karşılaştırmalı olarak Şekil 26’da sunulmaktadır. İlgili şekil dikkatli bir biçimde incelendiğinde, %0 yansımaya oranına kıyasla %25 yansımaya oranı için tüm lamba konfigürasyonlarına ait ortalama UV doz miktarlarının daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. Yansımaya oranına bağlı ortalama doz üzerindeki bu artış, lamba dizilimine bağlı olarak Z01’de %23 ile %32 arasında, Z06’da %35 ile %40 arasında ve Z1’de ise yaklaşık %34 ile %42 arası mertebelerde değişmektedir. Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere, ortalama UV doz miktarlarındaki bu artış kanal iç yüzeylerindeki yansımaya oranının artmasıyla birlikte kanal içerisindeki UV ışınım şiddeti ve alanında oluşan iyileşmenin bir sonucudur.

Burada, partikül doz dağılımı ile benzer şekilde, ortalama UV doz miktarının UVC destekli bir dezenfeksiyon sisteminin nihai performans değerlendirmesinde tek başına bir ölçüt olarak dikkate alınamayacağı vurgulanmalıdır. Bu aşamada, patojen hassasiyet düzeyine bağlı olarak partikül başına alınması gereken asgari doz miktarı ve ortalama doz arasındaki nicel ilişki belirleyici olmaktadır.



Şekil 26. İki farklı yansima oranı için tüm lamba konfigürasyonlarına ait ortalama UV doz miktarları

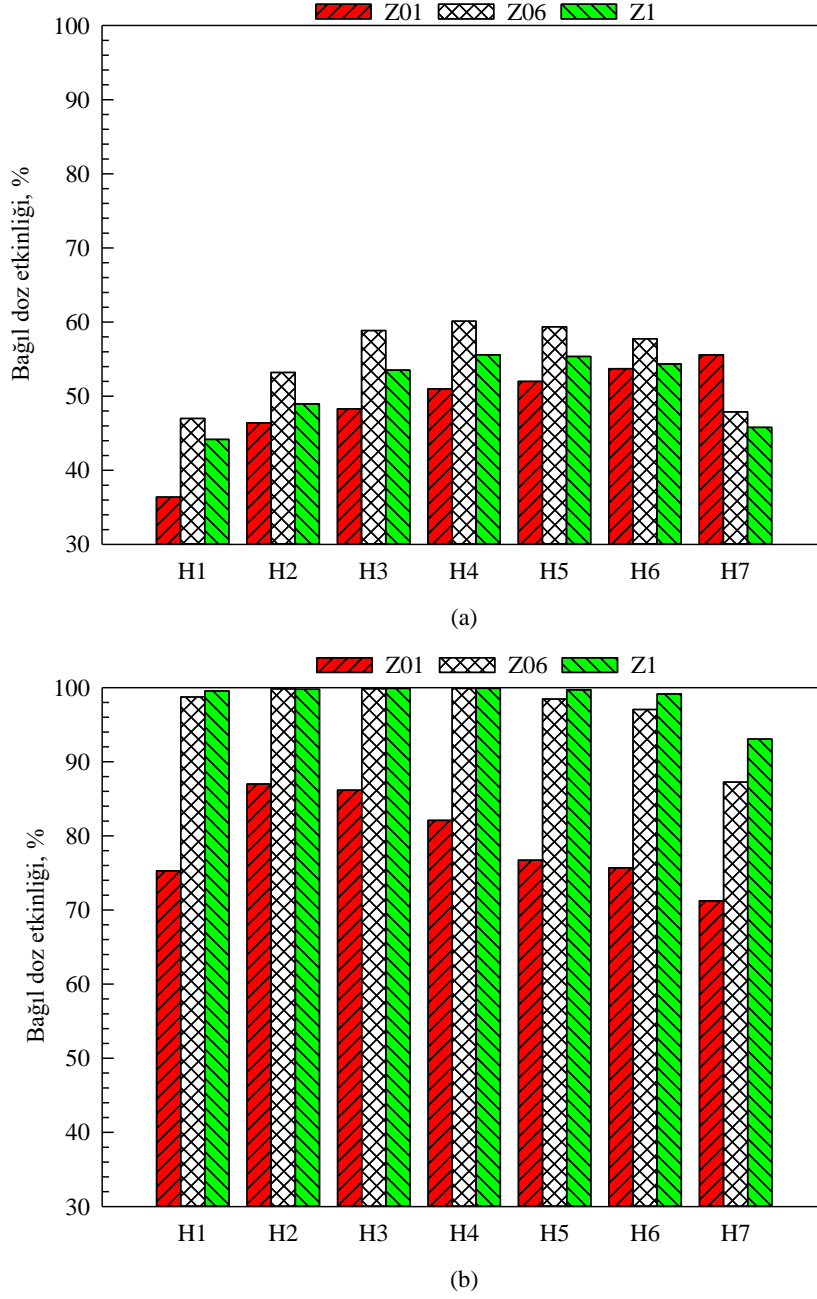
### 3.5. Bağıl Doz Etkinlik Oranlarının İncelenmesi

Lamba eksen konumu ve diziliminin bağıl doz etkinliği oranı (BDE) üzerindeki etkisi % 0 ve % 25 yansıma oranları için sırasıyla Şekil 27 (a) ve (b) de verilmektedir. Burada, BDE'nin seçilen bir referans değer (doz) üzerinde doz alan partiküllerin toplam partikül sayısı içerisindeki yüzdesel oranı temsil ettiği hatırlanmalıdır. Referans doz seçiminde, çalışılan lamba konfigürasyonlarının cevap verdiği en düşük ortalama UV doz miktarı (% 0 yansıma oranı için Z1H1 konumunda  $23.39 \text{ J/m}^2$ ) baz alınmış ve bu değer üzerinde doza sahip partiküllerin inaktif olduğu varsayılmıştır (Capetillo, 2015)

Yansıma oranının % 0 değeri için her bir lamba eksen konumunda (Z01, Z06 ve Z1) lambalar arası mesafenin (H1'den H7'ye) azalmasıyla BDE'nin önemli ölçüde değiştiği görülmektedir. İlgili değişimler, Z01 konumu için sürekli artış Z06 ve Z1 için ise ortak karakter olarak sırasıyla artış ve azalış şeklindedir. Şekil 27 (a) dikkatli bir şekilde incelendiğinde, Z01 lamba eksen konumu için artış hızının H1-H2 arasında yüksek bir gradyana sahip olduğu, H2-H7 arasında ise giderek sönmüldüğü görülmektedir. Nicel olarak, BDE oranı açısından H1 ve H7 arasında % 53 düzeyinde bir iyileşme sağlanmaktadır. Bu davranış, daha önceki bölümlerde de belirtildiği üzere, H7 lamba dizilimi için daralma elamanına doğru etkin genişleme gösteren ışınım alanının bir sonucudur. Burada, lambalar arası büyük mesafeler için alt ve üst cidar komşuluğundaki lambaların görüş açılarının kanal cidarları tarafından önemli düzeyde kısıtlandığı hatırlanmalıdır (Şekil 22 a).

Z06 ve Z1 lamba eksen konumları ise, lamba dizilimi üzerinden BDE oranına benzer bir şekilde cevap vermektedir. Bu ortak davranış, BDE'nin sırasıyla H1-H4 arasında artışı, H4'te maksimum değerine ulaşması ve H4-H7 arasında azalması şeklindedir. Nicel olarak, H1-H4 arasındaki artış Z06 ve Z1 konumları için sırasıyla % 27 ve % 25 düzeyindedir. Burada, H4 lamba diziliminin (lambaların homojen dizilim aralıklarına sahip olduğu konfigürasyon) hem Z06 hem de Z1 lamba eksen konumları için en yüksek BDE oranına cevap vermesi dikkat çekici bir bulgudur. Bu davranış, diğer lamba dizilimlerine kıyasla H4'te ulaşılan yaklaşık üniform hız alanıyla açıklanabilir. Şekil 21 dikkatli bir şekilde incelendiğinde, H4 lamba diziliminde ayrık formdaki düşük hız bölgelerinin yaklaşık eşit uzunlukta olduğu, benzer şekilde lambalar arası ve lamba kanal cidarı arasında oluşan maksimum hızların birbirine yakın değerler aldığı net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca, mevcut dizilim için lambalar arası mesafenin eşit olması ve bunun bir sonucu olarak daha homojen bir ışınım alanına ulaşılması diğer önemli etken olarak ön plana çıkmaktadır.





Şekil 27. Tüm lamba dizilim durumlarına ait bağıl doz etkinlik (BDE) oranları; (a) %0 yansımaya durumu, (b) %25 yansımaya durumu

Lamba eksen konumları kendi içinde karşılaştırıldığında, H7 haricindeki tüm lamba dizilimleri için, Z06 lamba eksen konumunun sırasıyla Z1 ve Z01'e kıyasla daha yüksek BDE oranlarına cevap verdiği görülmektedir. Bu davranış, önceki bölümlerde vurgulandığı üzere, hız ve ışınım alanının bütünleşik etkisiyle açıklanabilir.

Yansımaya oranının %25 durumuna ait BDE oranı dağılımları Şekil 27 (b)'de verilmektedir. Tüm lamba konfigürasyonları için, yansımaya oranının artışıyla (%0 → %25)

BDE oranları önemli düzeyde bir artış sergilemektedir. Nicel olarak ilgili BDE oranları, %0 yansıma durumunda %36 - %60 arasında değişirken yansımanın % 25 olması durumunda BDE oranları % 71 - % 100 bandına taşınmaktadır. Bu davranış, bölüm 3.2.'de de bahsedildiği üzere, kanal cidarları tarafından akış alanına tekrar yönlendirilen ek ışınım ile açıklanabilir. Şekil 22, 23 ve 24'te sunulan ışınım alanları incelendiğinde, lamba komşuluğunda en yüksek değerine haiz olan ışınım şiddetinin lambadan uzaklaştıkça (kanal cidarına yaklaştıkça) azaldığı net bir şekilde görülmektedir. Bu durum, kanal cidar komşuluğundaki oldukça büyük hacimden geçen partiküllerin asgari düzeyde doz alımını önemli seviyede kısıtlamakta ve BDE oranının azalmasına neden olmaktadır. Yansıma oranının % 25'e çıkartılmasıyla, bu olumsuzluk belirli düzeyde bertaraf olmakta, diğer bir ifadeyle ilgili bölgedeki yansıma kaynaklı ek ışınım doz alım sürecine önemli düzeyde katkı sunmaktadır.

Mevcut yansıma oranı (%25) için en yüksek BDE oranlarına, lamba diziliminden bağımsız olarak, sırasıyla Z1, Z06 ve Z01 lamba eksen konumlarında ulaşılmaktadır. Lambalar arası mesafe açısından ise, Z01 konumu için H2 lamba dizilimi Z06 ve Z1 için ise H4 lamba dizilimi en yüksek BDE oranı cevabını vermektedir. Bununla birlikte, Z06 ve Z1 lamba eksen konumları için H7 dışındaki tüm lambalar arası mesafelerde (H1-H6) BDE oranının yaklaşık aynı değere yakınsadığı, diğer bir ifadeyle yansıma oranındaki artışın lambalar arası mesafenin BDE oranı üzerindeki etkisini önemli düzeyde sönümlediği gözle çarpılmaktadır. Z01 lamba eksen konumu için ise, % 25 yansıma oranında, lambalar arası mesafenin halen BDE oranının güçlü bir fonksiyonu olduğu görülmektedir. Yansıma oranının artışına bağlı olarak, BDE oranının verdiği bu cevap '3.3. UV doz dağılım eğrilerinin incelenmesi' başlığı altında irdelenen homojen UV doz dağılımının (değişim oranı) bir sonucudur. İlgili değişim oranları dikkatli bir şekilde incelendiğinde, lamba eksen konumunun Z01'den Z1'e kaydırılması ile UV doz homojenlik düzeylerinin önemli düzeyde arttığı görülmektedir. Burada dikkati çeken bir diğer önemli bulgu ise, patojen inaktivasyonu açısından, BDE oranları ile ortalama UV doz miktarı çıktıların örtüşmemesidir. Nicel bir örnek olması açısından Z01 lamba eksen konumunda H2 ve H7'ye bağlı ortalama UV doz, değişim katsayısı ve BDE oranları karşılaştırmalı olarak Tablo 7'de verilmektedir. İlgili değerler incelendiğinde, ortalama UV doz açısından H2 lamba diziliminin H7'ye kıyasla daha yüksek değerler sunduğu, buna karşın BDE oranları açısından ise tersi bir durumun söz konusu olduğu görülmektedir. Bu davranış, patojen inaktivasyonu açısından ortalama UV doz miktarının tek başına bir nihai performans ölçütü olarak değerlendirilemeyeceğini, diğer

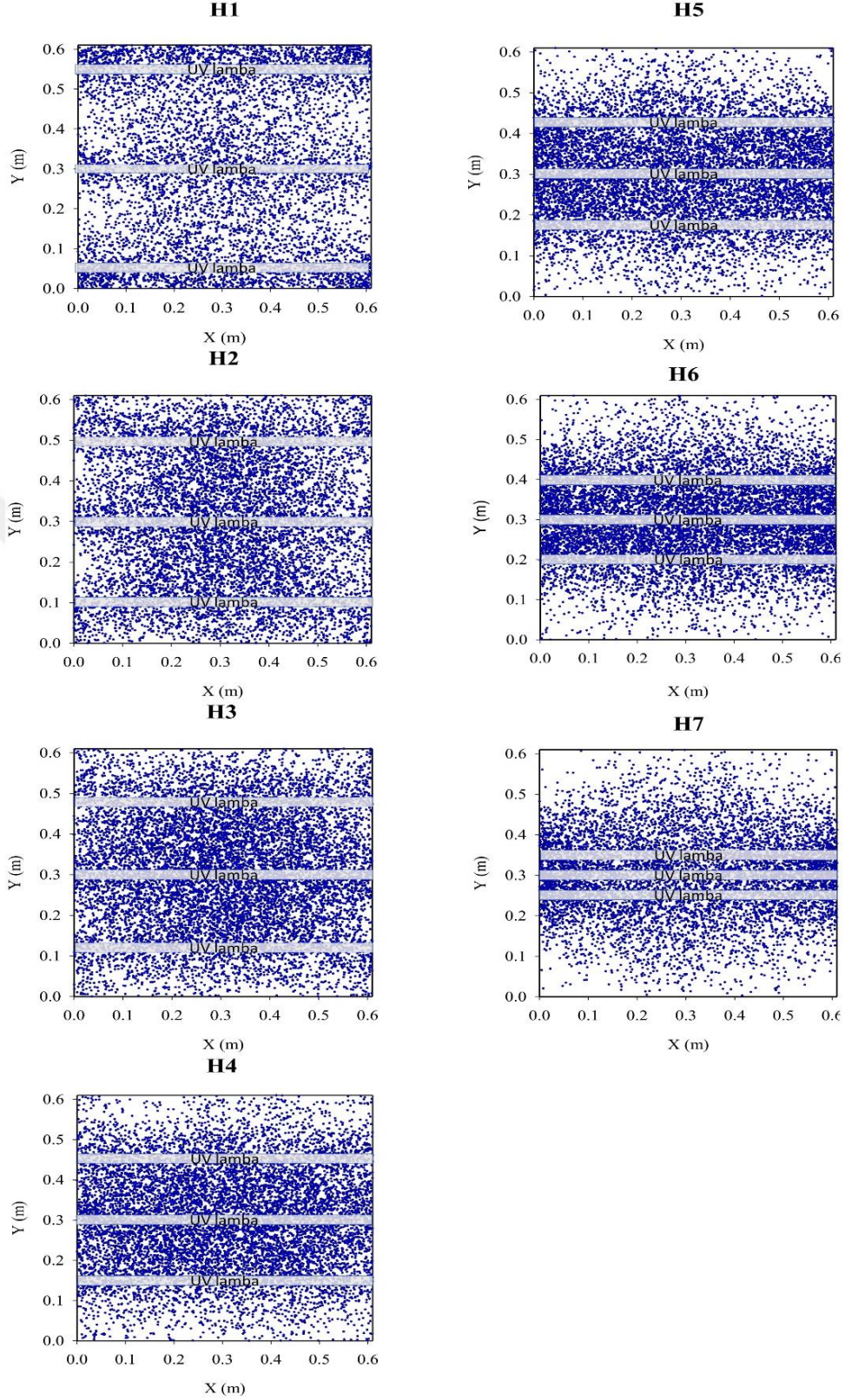
bir ifadeyle değişim katsayısıyla birlikte ele alınması gerektiğini net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Tablo 7. %25 yansıma durumunda Z01H2 ve Z01H7 konfigürasyonlarına ait ortalama UV doz, değişim katsayısı ve BDE oranları.

Konfigürasyonlar (%25 Yansıma)		Ortalama UV doz miktarı (J.m <sup>-2</sup> )	UV doz standart sapma (J.m <sup>-2</sup> )	Değişim katsayısı (%)	BDE oranı (%)
Z01	H2	32.45	11.34	34.95	87
	H7	37.29	18.40	49.35	71

BDE oranının patojen inaktivasyon performansı üzerindeki etkisinin daha net olarak anlaşılmasına yönelik temsili bir lamba eksen konumuna (Z1) ait doz dağılım haritaları Şekil 28 ve 29’da verilmektedir. İlgili haritalar kanal çıkış kesiti üzerinden sunulmuş olup, sadece referans doz ve üzerindeki doza sahip (inaktif olmuş,  $\geq 23.39$  J/m<sup>2</sup>) partiküllere yer verilmiştir.

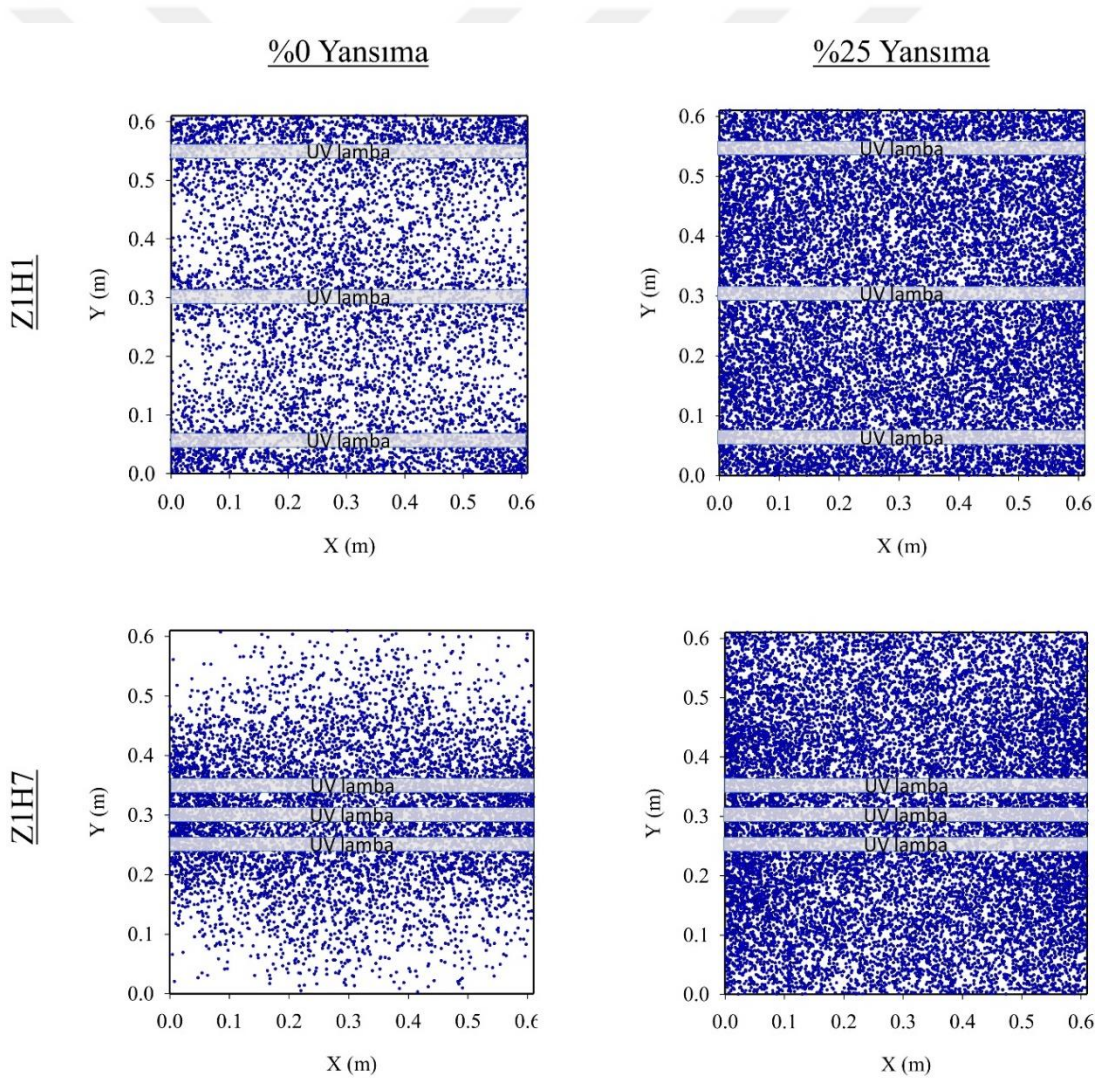
Şekil 28 ve 29 incelendiğinde, genel karakter olarak, inaktive olan partiküllerin lamba komşuluğunda yoğunlaştığı, lambadan uzaklaştıkça dağılımın seyreltik bir karakter sergilediği açıkça görülmektedir. Bu davranış, beklenildiği üzere, lamba komşuluğundaki yüksek ışınım şiddeti ve düşük hız bölgeleri varlığının bir sonucudur. Şekil 21’de sunulan hız alanları karşılaştırıldığında, nicel açıdan en düşük BDE oranına cevap veren H1 lamba düzenlemesinin lamba-kanal cidar arası bölgede oldukça düşük hızlara cevap verdiği net bir şekilde görülmektedir. Yüksek ışınım ve düşük hız alanlarının bir sonucu olarak, ilgili bölgeden geçen partiküller daha yüksek doz değerlerine ulaşmaktadır. Lambalar arası bölgelerde ise, düşük ışınım nedeniyle partiküller yeterli doz düzeyine ulaşmamaktadır. Lambalar arasındaki mesafenin azalmasıyla, inaktivasyon bölgesi kanal kesiti bütününde önce homojen (H2-H4) bir dağılıma kavuşmakta sonrasında ise (>H4) kanal merkezinde yoğunlaşmaktadır. Lambalar arası mesafeye bağlı bu davranış, lambalar arası mesafenin azalmasıyla (H2-H4) hızın önce üniform bir yapıya yakınsaması sonrasında ise (>H4) kanal orta bölgesinde şiddetini kaybederek lamba-cidar arası bölgeye kayması ile açıklanabilir.



Şekil 28. %0 yansıtma durumunda Z1 lamba eksen konumundaki lamba dizilim durumları için kanal çıkışında referans doz değeri ( $\geq 23.39 \text{ J/m}^2$ ) ve üzerinde doza maruz kalan partiküllerin şematik görünümü

Bunun bir sonucu olarak, küçük lamba mesafelerinde ( $>H4$ ) kanal cidar komşuluğunda hareketini sürdüren partiküller süreç boyunca bünyelerine yeterli miktarda doz alamazken kanal merkez komşuluğunda hareketini sürdüren partiküller bünyelerine gereğinden fazla doz almaktadırlar.

Yansımaya oranının kanal çıkış kesitindeki inaktive olmuş partikül dağılımı üzerindeki etkisi temsili olarak Z1H1 ve Z1H7 lamba dizilimleri üzerinden karşılaştırmalı olarak Şekil 29'da verilmektedir. İlgili doz dağılımları incelendiğinde, her iki lamba konfigürasyonu için yansımaya oranının artmasıyla birlikte kanal çıkışında inaktive olmuş partikül yoğunluğunun önemli düzeyde arttığı net bir biçimde görülmektedir. Bu davranış, daha önceki bölümlerde de belirtildiği üzere, kanal cidarlarından akış alanına yönlendirilen ışınımın bir sonucudur.



Şekil 29. İki farklı yansımaya durumu için Z1H1 ve Z1H7 konfigürasyonlarında referans doz değeri ve üzerinde ( $\geq 23.39 \text{ J/m}^2$ ) doza maruz kalan partiküllerin kanal çıkış kesitindeki şematik görünümü

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 45°'lik daralma elemanı girişine sahip kare kesitli bir kanal içi UVC sistemin dezenfeksiyon performansı sayısal olarak incelenmiştir. UV lamba eksen konumu (Z01-Z1), lambalar arası mesafe (H1-H7) ve kanal cidar yansım oranı (%0 ve %25) değişken parametreler olarak dikkate alınmış ve her bir parametrenin dezenfeksiyon performansı üzerindeki ayırık ve bütünlük etkisi kapsamlı hız alanları, UV ışınım alanları, UV doz dağılımları, ortalama UV doz miktarları ve BDE oranları üzerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda elde edilen önemli sonuçlar ayırık bölümler halinde aşağıda özetlenmektedir:

Hız alanlarının incelenmesi:

1. Lamba eksen konumu (Z01 - Z1) ve lambalar arası mesafenin (H1 - H7) değişimine bağlı olarak akış alanı içerisinde farklı büyüklüklerde alt hız bölgeleri oluşmaktadır.
2. Lambalar arası mesafenin büyük değerlerinde (H1 - H3) lambalar arası bölgelerde yüksek hızlara ulaşılmakta, lambaların birbirine yaklaştırılmasıyla (H4 - H7) ilgili yüksek hız bölgeleri lamba-kanal cidarı arası bölgelere kaymaktadır.
3. Lambaların kanal girişine en yakın olduğu Z01 lamba eksen konumunda Z06 ve Z1 konumlarına kıyasla lambalar sonrası bölgede akış hidrodinamik açıdan önemli düzeyde gelişmekte ve kanal çıkışına yakın bölgede daha üniform bir karaktere kavuşmaktadır.

UV ışınım alanlarının incelenmesi:

1. Tüm lamba konfigürasyonlarında ve yansım oranlarında, genel karakter olarak, ışınım şiddeti lamba komşuluğunda yüksek değerlere ulaşmakta ve lambadan uzaklaştıkça kademeli bir azalım sergilemektedir.
2. Lambaların birbirlerine yaklaştırılmasıyla (H1 → H7) yansım oranı ve lamba eksen konumundan bağımsız olarak kanal merkezinde ışınım şiddeti artmakta, kanal cidar komşuluğunda ise ışınım şiddeti azalmaktadır.
3. Lambaların daralma elemanına en yakın olduğu Z01 lamba eksen konumunda, daralma elemanının daha etkin bir görüş açısı sunması nedeniyle Z06 ve Z1 lamba eksen konumlarına kıyasla daha geniş bir ışınım alanı elde edilmektedir.
4. Yansım oranının artışıyla (%0 → %25) kanal içerisindeki UV ışınım alanı daha yoğun ve etkin bir hacme cevap vermektedir.

UV doz dağılımlarının incelenmesi:

1. Tüm lamba konfigürasyonları için en düşük değişim katsayısına H3 lamba yerleşim planında ulaşılmakta ve ilgili değer lamba eksen konumunun artışıyla (Z0 → Z1) azalmaktadır.
2. Yansıma oranının artışıyla (%0 → %25) doz dağılım homojenliği önemli düzeyde bir iyileşme göstermektedir.

Ortalama UV doz miktarlarının incelenmesi:

1. Tüm lamba dizilim durumları için yansıma oranının (%0 → %25) artışıyla birlikte ortalama UV doz miktarında önemli düzeyde artış sağlanmaktadır. Ortalama UV doz üzerindeki bu artış, nicel olarak Z01'de %23 ile %32 arasında, Z06'da %35 ile %40 arasında ve Z1'de ise yaklaşık %34 ile %42 arasındadır.
2. Lamba eksen konumu ve yansıma oranından bağımsız olarak lambalar arası mesafenin azalmasıyla (H1 → H7) ortalama UV doz miktarı önemli düzeyde artmaktadır. Nicel olarak, ortalama UV doz değerindeki artışlar %0 yansıma durumunda, lamba eksen konumları (Z01, Z06, Z1) için sırasıyla %25, %14 ve %13 düzeylerinde ve %25 yansıma durumu için sırasıyla %17, %9 ve %8 mertebelerindedir.
3. Tüm lamba konfigürasyonları için en yüksek ortalama UV doza H7 lamba diziliminde ulaşılmaktadır.

BDE oranlarının incelenmesi:

1. Tüm lamba konfigürasyonları için yansıma oranının artışıyla (%0 → %25) BDE oranları önemli düzeyde artmaktadır. Nicel olarak BDE oranları % 0 yansıma durumunda %36 - %60 arasında değişirken yansımanın % 25 olması durumunda %71- %100 bandına taşınmaktadır.
2. Z06 ve Z1 lamba eksen konumlarında, yansıma oranından bağımsız olarak, en yüksek BDE oranına H4 lamba diziliminde ulaşılmaktadır. Z01 lamba eksen konumunda ise en yüksek BDE oranına %0 ve %25 yansıma durumu için sırasıyla, H7 ve H2 lamba dizilimlerinde ulaşılmaktadır.
3. Yansıma oranının artışıyla (%0 → %25), Z06 ve Z1 lamba eksen konumlarında, lamba dizilimlerinin BDE oranı üzerindeki etkisi büyük ölçüde sönümlenmektedir. Z01 lamba eksen konumunda ise lamba dizilimi BDE'nin güçlü bir fonksiyonu olarak davranmaktadır.

4. %25 yansıma durumu için en yüksek BDE oranlarına, lamba dizilimden bağımsız olarak, sırasıyla Z1, Z06 ve Z01 lamba eksen konumlarında ulaşılmaktadır.





## 5. ÖNERİLER

1. Çalışmaya farklı hava akış hızları, farklı lamba sayıları ve dizilim durumları (akışa paralel ve açılı konumlandırma) dahil edilerek çalışma genişletilebilir.
2. Günlük hayatta kullanılan havalandırma kanalları düz kanalların yanı sıra dirsek, ani genişleme gibi bağlantı elemanlarını da içermektedir. Bu bağlantı elemanları varlığında kanal içerisinde en yüksek dezenfeksiyon eldesine bağlı olarak optimum lamba yerleşim durumları incelenebilir.
3. Özellikle son yıllarda UVC-LED lambaların hava dezenfeksiyonunda kullanımına yönelik çalışmalar yapılmaktadır (Kim vd., 2018). Bu bakımdan UVC-LED lambalar havalandırma kanallarına dahil edilerek ilgili sistemlere ait performans değerlendirilmesi yapılabilir.
4. Literatürde kanal içi UVC sistem tasarımında göz önüne alınması gereken mikroorganizmalar ve bu mikroorganizmaların inaktivasyonu için gerekli olan UV doz değerleri hakkında yeterli bilgi bulunmamaktadır. İleriki çalışmalar, özellikle havalandırma sistemleri dahilinde yaygın olarak görülen/görülebilecek mikroorganizma türlerinin belirlenmesi ve bu mikroorganizmaların inaktivasyonu için gerekli olan UV doz miktarlarının tespit edilmesi üzerine yapılabilir.
5. Mevcut çalışmada kanal içerisindeki UV ışınım dağılımını elde etmek için DO model kullanılmış ve bu modelde lambanın yaymış olduğu UVC gücün sabit olduğu varsayılmıştır. Ancak, hava hızı ve sıcaklığının lambanın UVC gücünü doğrudan etkilediği bilinmektedir (Zhang vd., 2020; Lau, 2009; Philips, 2005). İleriki çalışmalarda hava hızı ve sıcaklığının lambanın UVC gücü üzerindeki etkisi HAD modellemesine dahil edilerek dezenfeksiyon performansı açısından daha doğru (gerçeğe yakın) sonuçlar elde edilebilir.

## 6. KAYNAKLAR

- ANSYS, 2013. Ansys Fluent 15.0 User's Guide Manual, Ansys Inc., USA.
- Antusheva, E., Mironuk O., Tarasova I., Eliseev P., Plusnina G., Ridell M., Larsson O. ve Mariyandyshev A., 2016. Outbreak Of Tuberculosis In A Closed Setting: Views On Transmission Based On Results From Molecular And Conventional Methods, Journal Of Hospital Infection, 93, 187-190.
- Ashrae, 2008. Air Cleaners for Particulate Contaminants. Ashrae Handbook-HVAC System and Equipment. Atlanta.
- Ashrae, 2012. ASHRAE Handbook-HVAC Systems and Equipment. Chapter 17 Ultraviolet Lamp Systems. Atlanta.
- Ashrae, 2015. ASHRAE Handbook Heating, Ventilating and Air Conditioning Applications. Chapter 60 Ultraviolet Air And Surface Treatment, Atlanta.
- Ashrae, 2017. Ashrae Fundamentals 2017. Chapter 11 "Air Contaminants". Atlanta.
- Awad, A., H., ve Farag S., A., 1999. An Indoor Bio-Contaminants Air Quality, International Journal of Environmental Health Research, 9:4, 313-319.
- Baron, P. A. ve Willeke, K., 2001. Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York.
- Beggs, C., B., Fletcher, L., A., Sleigh, P., A., Kerr, K., G. ve Noakes, C., 2003. An Experimental Method for Determining the UV Susceptibility of Airborne Microorganisms Using an Upper Room UV Field, Proceedings of the 2nd International Congress on Ultraviolet Technologies, Vienna.
- Bilenko, Y., Lunev, A., Hu, X., Deng, J., Katona, T. ve Zhang, J., 2004. 10 Milliwatt Pulse Operation of 265 nm AlGaIn Light Emitting Diodes, Japanese Journal Of Applied Physics, 44, 3, 98-100.
- Blatt, M. H., 2006. Advanced HVAC Systems for Improving Indoor Environmental Quality and Energy Performance of California K-12 Schools; Applications Guide for Off-the-Shelf Equipment for UVC Use, California Energy Commission.
- Bolton, J. R., 2000. Calculation of Ultraviolet Fluence Rate Distribution in an Annular Reactor: Significance of Refraction and Reflection, Wat. Res., 34, 10.
- Burge, H. A., 1995. Bioaerosols in the Residential Environment, in Bioaerosols Handbook, C. Cox and C. Wathes, eds. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 579-591.

- Capetillo, A., 2015. Computational Fluid Dynamic Modeling of In-duct UV Air Sterilisation Systems, Doktora Tezi, University of Leeds.
- Capetillo, A., Noakes, C., J. ve Sleigh, P., A., 2015. Computational Fluid Dynamics Analysis to Assess Performance Variability of In-Duct UV-C Systems, Science and Technology for the Built Environment, 21, 1, 45-53.
- Capetillo, A., Noakes, C., Sleigh, A. ve Khan, A., 2014. In-Duct UVGI Air Sterilisation: Optimisation Study for High Performance Energy Efficient Systems, Proceedings of the 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Hong Kong.
- Cassano, A., E., Martin, C., A., Brandi, R., J. ve Alfano, O., M., 1995. Photoreactor Analysis and Design: Fundamentals And Applications, Ind. Eng. Chem. Res., 34, 47.
- Chen, J., Deng, B., ve Kim, C., 2011. Computational Fluid Dynamics (CFD) Modeling of UV Disinfection in a Closed-Conduit Reactor, Chemical Engineering Science, 66, 21, 4983-4990.
- Chuaybamroong, P., Chotigawin, R., Supothina, S., Sribenjalux, P., Larpkiattaworn, S. ve Wu, C. Y., 2010. Efficacy of Photocatalytic HEPA Filter on Microorganism Removal, Indoor Air, 20, 3, 246-254.
- Cowling, B., J., Ip, D., K., Fang, V., J., Suntarattiwong, P., Olsen, S., J., Levy, J., Uyeki, T., M., Leung, G., M., Malik Peiris, J., S., Chotpitayasunondh, T., Nishiura, H., ve Mark Simmerman, J., 2013. Aerosol Transmission Is An Important Mode Of Influenza A Virus Spread, Nature Communications, 4, 1.
- Daisey J., M., Angell W., J. ve Apte M., G., 2003. Indoor Air Quality, Ventilation and Health Symptoms in Schools: An Analysis of Existing Information, Indoor Air, 13, 53.
- Daly, B., 1992. Woods Practical Guide to Fan Engineering, Colchester, UK, Woods of Colchester.
- Dönmez O., 2002. İç Ortam Hava Kalitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Duran, J. E., 2010. Development of a CFD-Based Model for the Simulation Of Immobilized Photocatalytic Reactors for Water Treatment, Doktora Tezi, The University of British Columbia.
- EPA, 2006a. Biological Inactivation Efficiency by HVAC In-Duct Ultraviolet Light Systems: American Ultraviolet Corp.: U.S. Environmental Protection Agency. Report nr EPA 600/R-06/052.
- EPA, 2006b. Biological Inactivation Efficiency by HVAC In-Duct Ultraviolet Light Systems: Ultraviolet Devices, Inc.: U.S. Environmental Protection Agency, Report nr EPA 600/R-06/049.

- EPA, 2006c. Biological Inactivation Efficiency by HVAC In-Duct Ultraviolet Light Systems:Lumalier.: U.S. Environmental Protection Agency. Report nr EPA 600/R-06/055.
- EPA, 2006d. Biological Inactivation Efficiency by HVAC In-Duct Ultraviolet Light Systems:American Ultraviolet Corp.: U.S. Environmental Protection Agency. Report nr EPA 600/R-06/054.
- EPA, 2006e. Biological Inactivation Efficiency by HVAC In-Duct Ultraviolet Light Systems: Atlantic Ultraviolet Corp.: U.S. Environmental Protection Agency. Report nr EPA 600/R-06/051.
- EPA, 2006f. Biological Inactivation Efficiency by HVAC In-Duct Ultraviolet Light Systems: DustFree.: U.S. Environmental Protection Agency. Report nr EPA 600/R-06/050.
- EPA, 2006g. Biological Inactivation Efficiency by HVAC In-Duct Ultraviolet Light Systems: Novatron, Inc.: U.S. Environmental Protection Agency. Report nr EPA 600/R-06/084.
- EPA, 2006h. Biological Inactivation Efficiency by HVAC In-Duct Ultraviolet Light Systems: Sanuvox Technologies, Inc.: U.S. Environmental Protection Agency. Report nr EPA 600/R-06/053.
- Escombe, A., Gilman, R., Navincopa, M., Ticona, E., Mitchell, B., Noakes, C. ve Evans, C., 2009. Upper-Room Ultraviolet Light and Negative Air Ionization to Prevent Tuberculosis Transmission, PLoS Medicine, 6.
- Firrantello, J., 2016. Energy and Economic Impacts of Ultraviolet Germicidal Irradiation of Cooling Coils, Doktora Tezi, The Pennsylvania State University.
- Firrantello, J., Bahnfleth, W. ve Kremer, P., 2017. Field Measurement and Modeling of UVC Cooling Coil Irradiation for Heating, Ventilating, and Air Conditioning Energy Use Reduction (RP-1738)-Part 1: Field Measurements, Science and Technology for the Built Environment, 24, 6, 588-599.
- FIRS, 2017. The Global Impact of Respiratory Disease, Second Edition (2.baskı), Sheffield, European Respiratory Society.
- Fisk, W., Faulkner, D., Palonen, J. ve Seppanen, O., 2002. Performance and Costs of Particle Air Filtration Technologies, Indoor Air, 12, 4, 223-234.
- Fletcher, L., A., 2004. The Influence of Relative Humidity on the UV Susceptibility of Airborne Gram-Negative Bacteria, IUVA News, 6, 7.
- Fletcher, L., A., Noakes, C. J., Beggs, C., B., Sleigh, P. A. ve Kerr, K., G., 2003. The Ultraviolet Susceptibility of Aerolised Microorganisms and the Role of Photoreactivation, Second international congress of the IUVA, Vienna.

- Fracchia, L., Pietronave, S., Rinaldi, M. ve Martinotti, M., 2006. The Assessment of Airborne Bacterial Contamination in Three Composting Plants Revealed Site-Related Biological Hazard and Seasonal Variations, Journal Of Applied Microbiology, 100, 5, 973-984.
- Gilkeson, C., ve Noakes, C., 2012. Application of CFD Simulation to Predicting Upper-Room UVGI Effectiveness, Photochemistry And Photobiology, 89, 4, 799-810.
- Górny R.I. ve Dutkiewicz J., 2002. Bacterial and Fungal Aerosols in Indoor Environment in Central and Eastern European Countries, Ann Agric Environ Med, 9, 17.
- Goswami, T., K., Hingorani, S., K., Greist, H., Goswami, D., Y. ve Block, S.S., 1999. Photocatalytic System to Destroy Bioaerosols in Air, J. Adv. Oxid. Technol., 4, 185–188.
- Ho, C., K., 2009. Evaluation of Reflection and Refraction in Simulations of Ultraviolet Disinfection Using the Discrete Ordinates Radiation Model, Water Sci Tech., 59, 12, 2421-2428.
- Ho, C., K., 2009. Radiation Dose Modeling in Fluent, WEF Disinfection 2009 Workshop, Modeling UV Disinfection Using CFD, Sandia National Laboratories.
- Hoi, P., C., 2014. Validation of Discrete Ordinate Radiation Model for Application in UV Air Disinfection Modeling, Yüksek Lisans Tezi, Environmental Engineering, Lakehead University, Ontario, Canada.
- IUVA, 2005. General Guideline for UVGI Air and Surface Disinfection Systems. Ayr, Ontario, Canada: International Ultraviolet Association. Report nr IUVA-G01A-2005.
- Jankowska, E., Reponen, T., Willeke, K., Grinshpun, S., A. ve Choi, K. J., 2000. Collection of Fungal Spores on Air Filter Sand Spore Reentrainment From Filters into Air, J. Aerosol Sci., 31, 969–978.
- Kanaan, M., 2019. CFD Optimization of Return Air Ratio and Use of Upper Room UVGI in Combined HVAC and Heat Recovery System, Case Studies in Thermal Engineering, 15, 100535.
- Ke, Q., 2008. Measurement and Numerical Modeling of Microorganism Deactivation of An Annular Ultraviolet Germicidal Air Reactor, Yüksek Lisans Tezi, Environmental Engineering Department of Civil and Environmental Engineering Edmonton, Alberta, Canada.
- Ke, Q., S., Craik, S., A., El-Din, M., G. ve Bolton, J. R., 2009. Development of a Protocol for the Determination of the Ultraviolet Sensitivity of Microorganisms Suspended in air, Aerosol Science and Technology, 43, 6.

- Kim, D. ve Kang, D., 2018, UVC LED Irradiation Effectively Inactivates Aerosolized Viruses, Bacteria and Fungi in a Chamber-Type Air Disinfection System, Applied and Environmental Microbiology, 84, 17.
- Ko, G., First, M., W. ve Burge, H., A., 2000. Influence of Relative Humidity on Particle Size and UV Sensitivity of *Serratia Marcescens* and *Mycobacterium Bovis* BCG Aerosols, Tubercle and lung disease, 80, 12.
- Kowalski, W., 2003. Immune Building Systems Technology, New York: McGraw-Hill.
- Kowalski, W., 2009. Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Kowalski, W., J. ve Bahnfleth, W. P., 2002. Airborne-Microbe Filtration in Indoor Environments, HPAC Heating, Piping, Air Conditioning Engineering, 74, 1, 57-69.
- Kowalski, W., J. ve Bahnfleth, W., P., 1998. Airborne Respiratory Diseases and Mechanical Systems for Control of Microbes, HPAC Heating, Piping, Air Conditioning, 70,7.
- Kowalski, W., J. ve Bahnfleth, W., P., 2000. UVGI Design Basics for Air and Surface Disinfection, HPAC engineering, 10.
- Kowalski, W., J. ve Bahnfleth, W., P., 2000. Effective UVGI System Design Through Improved Modelling, Transactions - American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 106, 10.
- Kowalski, W., J., 2001. Design and Optimization of UVGI Air Disinfection System, Doktora Tezi, The Pennsylvania State University.
- Lau, J., 2009. Lamp and In-Duct Device Modelling for UVGI Systems Performance Prediction, Doktora Tezi, The Pennsylvania State University.
- Lau, J., Bahnfleth, W., Mistrick, R. ve Kompore, D., 2012. Ultraviolet Irradiance Measurement and Modeling for Evaluating the Effectiveness of In-Duct Ultraviolet Germicidal Irradiation Devices, HVAC&R Research, 18, 4, 626-642.
- Lee, B., Bahnfleth, W. ve Auer, K., 2009. Life-Cycle Cost Simulation of In-Duct Ultraviolet Germicidal Irradiation Systems, Proceedings of Building Simulation, 2009 Glasgow, Scotland.
- Li, W., Li, M., Bolton, J., R., ve Qiang, Z., 2016. Configuration Optimization of UV Reactors for Water Disinfection with Computational Fluid Dynamics: Feasibility of Using Particle Minimum UV Dose As A Performance Indicator, Chemical Engineering Journal, 306, 1-8.
- Long, F., Deng, B., Xu, Y., Gao, J. ve Zhang, Y., 2019. Numerical Simulation of the Disinfection Performance in An Annular Reactor with Different Internal Configurations, Journal of Water Process Engineering, 31.

- Luongo, J., C., Fennelly, K., P., Keen, J. A., Zhai, Z., J., Jones, B., W. ve Miller, S., L., 2016. Role of Mechanical Ventilation in the Airborne Transmission of Infectious Agents in Buildings, Indoor Air, 26, 5, 666-678.
- Main, C., E., 2003. Aerobiological, Ecological and Health Linkages, Environment International 29, 2, 347-349.
- Menzies, D., ve Bourbeau, J., 1997. Building-Related Illnesses, New England Journal of Medicine, 337, 21, 1524-1531.
- Morsi, S., A. ve Alexander, A., J., 1972. An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems, Journal of Fluid Mechanics , 55, 193–208.
- Munoz, A., Craik, S. ve Kresta, S., 2007. Computational Fluid Dynamics for Predicting Performance of Ultraviolet Disinfection Sensitivity to Particle Tracking Inputs, Journal of Environmental Engineering and Science, 6, 3, 285-301.
- Obbard, J., P. ve Fang L., S., 2003. Airborne Concentrations of Bacteria in a Hospital Environment in Singapore, Water, Air and Soil Pollution, 44, 1, 333.
- Pareek, V., K., ve Adesina, A., A., 2004. Light Intensity Distribution in A Photocatalytic Reactor Using Finite Volume, AIChE Journal, 50, 6, 1273-1288.
- Peccia, J. ve Hernandez, M., 2004. UV-Induced Inactivation Rates for Airborne Mycobacterium bovis BCG. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 1, 7.
- Philips, 2005. Effects of Air Temperature and Air Velocity on A Model TUV36W-PLL.
- Rentschler, H. ve Nagy, R., 1942. Bactericidal Action of Ultraviolet Radiation on Air-Borne Microorganisms, Journal Of Bacteriology, 44, 85-94.
- Ryan, K., McCabe, K., Clements, N., Hernandez, M. ve Miller, S., L., 2010. Inactivation of Airborne Microorganisms Using Novel Ultraviolet Radiation Sources in Reflective Flow-Through Control Devices, Aerosol Science and Technology, 44, 7, 541-550.
- Saha, R., Zhang, C. ve Ray, M., 2015. Similitude in an Open-Channel UV Wastewater Disinfection Reactor, Journal of Environmental Engineering, 141, 3, 0401 4065.
- Simmons, R., B., Price, D., L., Noble, J., A., Crow, S., A. ve Ahearn, D., G., 1997. Fungal Colonization of Air Filters from Hospitals, Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 58, 900–904.
- Stetzenbach, L., Buttner, M. ve Cruz, P., 2004. Detection and Enumeration of Airborne Biocontaminants, Current Opinion in Biotechnology, 15, 3, 170-174.
- Sung, M. ve Kato, S., 2011. Estimating the Germicidal Effect of Upper-Room UVGI System on Exhaled Air of Patients Based on Ventilation Efficiency. Building and Environment, 46, 11, 2326-2332.

- Thrasher, J., D. ve Crawley S., 2009. The Biocontaminants and Complexity of Damp Indoor Spaces: More than What Meets the Eyes, Toxicology and Industrial Health, 25, 10, 583-615.
- Turhan, O., Y., 2015. Ultraviyole-C Işık Uygulaması Kullanılarak Soğukta Saklanan Gıdaların Kalitelerinin Artırılması, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Vanosdell, D. ve Foarde, K., 2002. Defining the Effectiveness of UV lamps Installed in Circulating Air Ductwork, Arlington, VA: Air-Conditioning and Refrigeration Technology Institute (ARTI).
- Yang, Y., Zhang, H., Nunayon, S., S., Chan, V. ve Lai, A., C., 2018. Disinfection Efficacy of Ultraviolet Germicidal Irradiation on Airborne Bacteria in Ventilation Ducts, Indoor Air, 28, 6, 806-817.
- Yang, Y., Zhang, H., Chan, V. ve Lai, A., C., K., 2019. Development and Experimental Validation of A Mathematical Model for the Irradiance of In-Duct Ultraviolet Germicidal Lamps, Building and Environment, 152, 160-171.
- Zhang, H., Jin, X., Nunayon, S., S., ve Lai, A., C., K., 2020. Disinfection by In-Duct Ultraviolet Lamps Under Different Environmental Conditions in Turbulent Airflows, Indoor Air, 30, 3, 500-511.
- Zhang, Z. ve Chen, Q., 2006. Experimental Measurements and Numerical Simulations of Particle Transport and Distribution in Ventilated Rooms, Atmospheric Environment, 40, 3396–3408.
- URL-1, [www.tballiance.org/why-new-tb-drugs/global-pandemic](http://www.tballiance.org/why-new-tb-drugs/global-pandemic). 6 Şubat 2020
- URL-2, [www.steril-aire.com/uvc-facts/](http://www.steril-aire.com/uvc-facts/). 28 Aralık 2019.
- URL-3, [www.ec21.com/product-details/Upper-Room-UVGI-Air-Disinfection--8646211.html](http://www.ec21.com/product-details/Upper-Room-UVGI-Air-Disinfection--8646211.html). 28 Aralık 2019.
- URL-4, [www.apeksmmedical.com/products/detail/hysafe-air-hava-sterilizasyon-cihazı](http://www.apeksmmedical.com/products/detail/hysafe-air-hava-sterilizasyon-cihazı). 31 Aralık 2019.



## ÖZGEÇMİŞ

Fatih ATCI, 1994 yılında Muğla'nın Milas ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Milas'ta tamamladı. 2012 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 2016 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden Makine Mühendisi unvanı ile mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başlayan Fatih ATCI, İngilizce bilmektedir.

