



## UV LAMBA UYGULAMALARI VE FARKLI LAMBA YERLEŞİMLERİNİN PERFORMANSA ETKİSİ

Süleyman KAVAS<sup>1\*</sup>, Mustafa Turhan ÇOBAN<sup>2</sup>, Erhan BUDAK<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Üntes Isıtma Klima A.Ş., Ankara, ORCID: 0000-0002-8530-1261

<sup>2</sup>Ege Üniversitesi Müh. Fak. Mak. Müh. Bölümü, İzmir, ORCID: 0000-0003-1873-2640

<sup>3</sup>Klisseff A.Ş., Ankara, ORCID: 0000-0003-1873-2640, ORCID: 0000-0002-2651-3395

### Anahtar kelimeler

### Öz

*Ultraviyole Lamba,  
Şekil Faktörü,  
Dezenfeksiyon, Sayısal  
Modelleme*

*Covid-19 pandemisi ile birlikte gündeme gelen birçok dezenfeksiyon yönteminden biri olan ultraviyole lamba (morötesi lamba) hem ülkemizde hem de dünya genelinde çok yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Buna rağmen bu teknolojinin teorik altyapısı ve dezenfeksiyon amacıyla kullanılması durumunda hesaplama metodolojisi fazla bilinmemektedir.*

*Bu çalışmada ultraviyole lambalar (UV lamba) ile ilgili genel tanımlar verilmiş, tasarım için gerekli olan şekil faktörü, UV dozu, lambanın öldürme oranı gibi değerlerin nasıl hesaplanacağı anlatılmıştır. Ayrıca farklı lamba konfigürasyonlarını ve davranışlarını inceleyebilmek için java programlama dilinde bilgisayar modeli de oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında toplam ışınım gücü aynı olan UV lambalar farklı konfigürasyonlarda bir kesit içerisine yerleştirilerek modellenmiş ve her durumundaki verimleri, şekil faktörleri ve öldürme oranları karşılaştırılmıştır.*

\* Sorumlu yazar; e-posta: [suleymankavas@yahoo.com](mailto:suleymankavas@yahoo.com)  
doi : 10.46399/muhendismakina.1206427

---

## UV LAMP APPLICATIONS AND THE EFFECT OF DIFFERENT LAMP LAYOUTS ON PERFORMANCE

---

---

### Keywords

*Ultraviolet Lamp,  
Shape Factor,  
Disinfection, Numerical  
Modeling*

---

### Abstract

*Ultraviolet lamp, one of the many disinfection methods brought to the agenda with the Covid-19 pandemic has been widely used both in our country and around the world. However, the theoretical background of this technology and the calculation methodology of UV disinfection systems are not well known.*

*In this study, general definitions about ultraviolet lamps (UV lamps) are given and calculation methods of values such as shape factor, UV dose and lamp inactivation rate required for design are explained. In addition, a computer model was created in Java programming language in order to examine different lamp configurations and behaviors. Within the scope of the study, UV lamps with the same total irradiance power were modeled by placing them in a section in different configurations and efficiency, shape factors and inactivation rates were compared in each case.*

---

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 17.11.2022

Kabul Tarihi : 24.04.2023

Research Article

Submission Date : 11.11.2022

Accepted Date : 24.04.2023

---

## **Extended Abstract**

### **Introduction**

Ultraviolet lamp, one of the many disinfection methods brought to the agenda with the Covid-19 pandemic has been widely used both in our country and around the world. However, the theoretical background of this technology and the calculation methodology of UV disinfection systems are not well known.

In this study, general definitions about ultraviolet lamps (UV lamps) are given and calculation methods of values such as shape factor, UV dose and lamp inactivation rate required for design are explained. In addition, a computer model was created in Java programming language in order to examine different lamp configurations and behaviors. Within the scope of the study, UV lamps with the same total irradiance power were modeled by placing them in a section in different configurations and efficiency, shape factors and inactivation rates were compared in each case.

The germicidal effect of UV light is in the wavelength range of about 235-300nm and the wavelength at which UV light is most effective is 265nm. Most of the UV-C lamps used today are low-pressure mercury-type lamps and mostly produce light at a wavelength of 253.7nm.

UV radiation degrades the DNA/RNA of microorganisms, reducing or destroying their activity. Therefore, UV radiation can be used against all kinds of microorganisms, but it is not possible to obtain the same results for every microorganism. The main reason for this is that each microorganism has different resistance to UV radiation. In general, UV radiation is most easily effective against viruses, while bacteria, spores and fungi are more resistant to UV radiation, respectively. It should be noted that there are many exceptions to this generalization. Therefore, while designing the system, the target microorganism should be known and accordingly the amount of radiation and contact time should be determined.

### **Objectives/ Research Purpose**

Main objective of the study is to provide a model for engineers and researchers who work on UV radiation. Thanks to this model, different lamp configurations are analyzed for air stream disinfection. The aforementioned model is generated by dividing the air-duct volume into a finite number of zones. Then direct and reflective three-dimensional irradiance is calculated to predict UV dose for each zone and inactivation rates of microorganisms in the air stream. The model can work for different microorganisms including Corona just by entering its UV rate constant.

### **Materials and Methods**

In order to calculate the effect of the energy emitted from the UV lamp to the environment, the shape factor must first be defined. The shape factor expresses the rate at which the radiation emitted from the surface of an object reaches the surface of another object. To determine the shape factor, two differentially small surfaces in an environment that do not interact with UV radiation are considered. There may be a certain gas between these two surfaces, but it is assumed that this intermediate medium does not participate in energy transfer. After determining the shape factor, the total radiation energy ( $W/m^2$ ) reaching that surface can be calculated.

To inactivate microorganisms, the UV dose must be determined by using radiation energy.

After obtaining the UV dose, the effect of the UV radiation on the microorganism can now be calculated. This calculation is performed in two steps. In the first step, the survival rate of the microorganisms is determined, then the survivors are subtracted from the total population and the inactivation rate of the UV lamp is found.

The microorganism inactivation capacity of UV radiation is a function of distance, time and resistance coefficient. The distance directly affects the amount of radiation falling on the microorganism. The contact time shows how much the living thing is exposed to UV radiation. Another parameter affecting the inactivation rate is the UV radiation resistance coefficient of the microorganism, and as this value increases, the resistance of the organism to UV radiation decreases.

Within the scope of the study, a disinfection system was designed which are composed of UV lamps and an air duct. This air duct is made of galvanized material and lamps were placed in it for different cases. The reflection coefficient ( $\rho$ ) of the galvanized material is taken as 0.57% (Ashrae, 2011). It is accepted that there is a coronavirus with a k coefficient of 0.3512 m<sup>2</sup>/J in the airflow for each case (Kowalski, Walsh and Petraitis, 2020). In the first case, a single UV lamp is placed parallel to the air flow in the duct of 0.62x0.6 section. The duct width (z) is 0.62m, the duct height (H) is 0.6m and the duct length (w) is 1m. The air velocity in the duct is taken as 3 m/s. The same design features were used for the second case, only the UV lamp was placed perpendicular to the flow. In the third and fourth cases, more than one UV lamp were used and the lamps were placed perpendicular to the flow. The design features are the same as in the second case. In the third case, 2 lamps with a total UV power of 25 W, and in the fourth case 3 lamps with a total UV power of 25 W were used and the results of the UV radiation spreading along the duct were examined. The results were examined and compared for each UV lamp configurations and are given in tables and graphics.

## Results

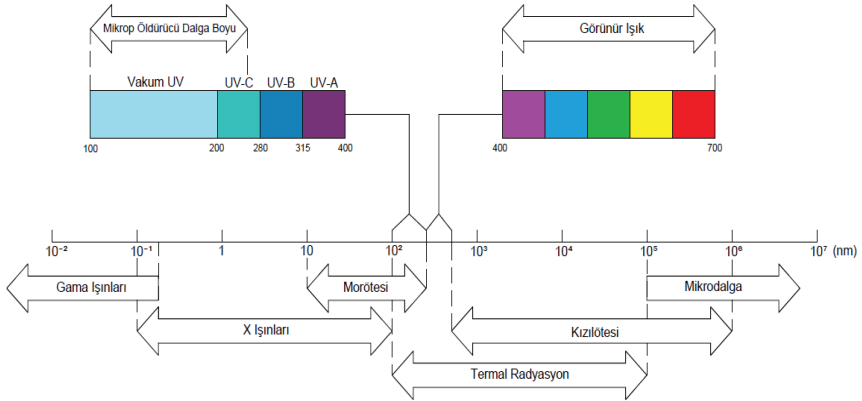
The optimal result is achieved when 3 lamps are spread into the duct perpendicular to the air flow (case 4). However, in this case, some application difficulties will arise as 3 lamps are used instead of single lamp. A very good result was also obtained in Case 1. In this case, even if better values are obtained than vertical lamp placement, the placement of the lamp along the duct (parallel to the air flow) is often not a desirable application in the field. Considering that the lamp life is 9,000-12,000 hours on average, the lamps will need to be replaced every 2-3 years. This change can be made more practical and effortless for lamps placed perpendicular to the air flow. In addition, the fabrication of the module in which the lamps are placed is easier for the lamp configuration perpendicular to the flow.

As the air velocity, in other words, the air flow rate increases (contact time decreases), the inactivation rate decreases. Comparison between Case 1 and 1-A was made to prove this hypothesis. When the air velocity was increased from 3 m/s to 4 m/s, there was a 21% increment in the distances where a 99.99% inactivation rate was achieved.

This study is based on models which are developed from radiative heat transfer models as well as models created by Kowalski et al. (Kowalski et al. 2001, 2005, 2009, 2020). In order to ensure the accuracy of the results obtained using the microorganism inactivation rate model proposed by Kowalski et al., it would be appropriate to examine and compare the models experimentally as well.

## 1. Giriş

Elektromanyetik spektrumun dalga boyu 10 nm ila 400 nm arasında değişen kısmına ultraviyole (UV) ya da morötesi ışınım denmektedir. İnsan gözü 400nm dalga boyunun altındaki ışınları algılayamadığından UV ışınlarını göremeyiz (Balaji, 2014). UV ışınları doğal ve yapay olmak üzere iki farklı kaynak tarafından üretilmektedir. Güneş doğal ve en önemli UV ışını kaynağıyken LED, floresan lambalar ve lazerler suni kaynaklar olarak sınıflandırılmaktadır (Tamuri, Sahar ve Abu Bakar, 2014). Bu çalışmaya konu olan ve UV ışını üretmek amacıyla kullanılan floresan lambalar her ne kadar çok yeni bir teknoloji gibi dursa da geçmişi 100 yıldan fazladır. Evrenin ilk yaratılmasından bugüne var olan UV ışınları ise çok uzun bir süre keşfedilmeyi beklemiştir. Morötesi ışınların varlığını ilk fark eden Alman bilim adamı Johann Wilhelm Ritter olmuştur (Bolton ve Cotton 2014; Ahmad, Christensen ve Baron, 2017).



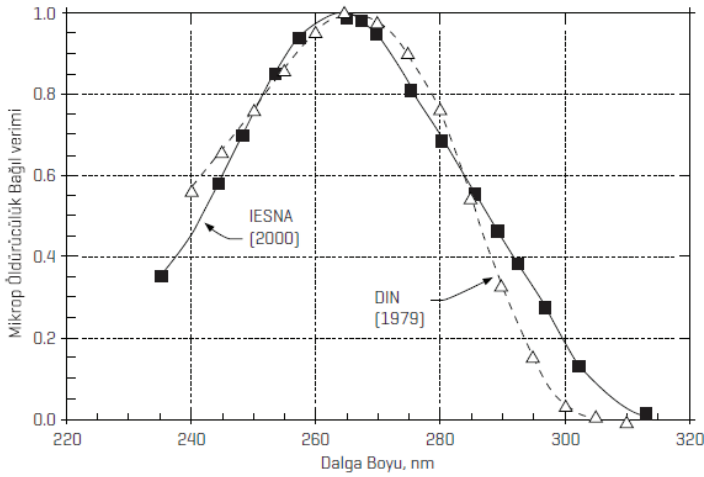
Şekil 1. Elektromanyetik Spektrum

UV ışınları tüm elektromanyetik spektrumun (Şekil 1) 100 ile 400 nm dalga boyu aralığını kapsayan çok küçük bir kısmını oluşturmaktadır ve bu aralıkta dalga boylarına göre dört alt gruba ayrılmaktadırlar. Dalga boylarına göre sınıflandırma Tablo 1'de verilmiştir. A, B, C ve vakum UV olarak ayrılan morötesi ışınımın UV-C kısmı mikrop öldürücü olarak adlandırılmaktadır. Bunun sebebi 200-280nm aralığındaki ışınımın mikroorganizmaların DNA ve RNA'sı tarafından emilmesi- dir (Balaji, 2014). Dolayısıyla, tesisat sektöründe özellikle hava dezenfeksiyonu amacıyla UV-C ışınları kullanılmaktadır.

Tablo 1. UV Işını Sınıflandırması

	Tanımı	Dalga Boyu	Kullanım Alanı
UV-A	Uzun Dalga UV	315-400nm	Solaryum
UV-B	Orta Dalga UV	280-315nm	Tedavi
UV-C	Kısa Dalga UV	200-280nm	Mikrop Öldürücü
V-UV	Vakum UV	100-200nm	Ozon Üretimi - Koku Giderici- Yağ Filtrasyonu

UV ışınının mikrop öldürme etkisi Şekil 2'den de görüleceği gibi yaklaşık 235-300nm dalga boyu aralığındadır. UV ışınının en etkili olduğu dalga boyu ise 265nm'dir. Günümüzde kullanılan UV-C lambaların birçoğu düşük basınçlı cıvalı tip lambalardır ve büyük oranda 253,7nm dalga boyunda ışın üretirler. 253,7nm değeri her ne kadar tepe noktaya yakın olsa da %100 verimle etkili olmadığı Şekil 2'deki grafikten de görülebilir.



Şekil 2. Dalga Boyu-Mikrop Öldürme Etkisi (Ashrae, 2011)

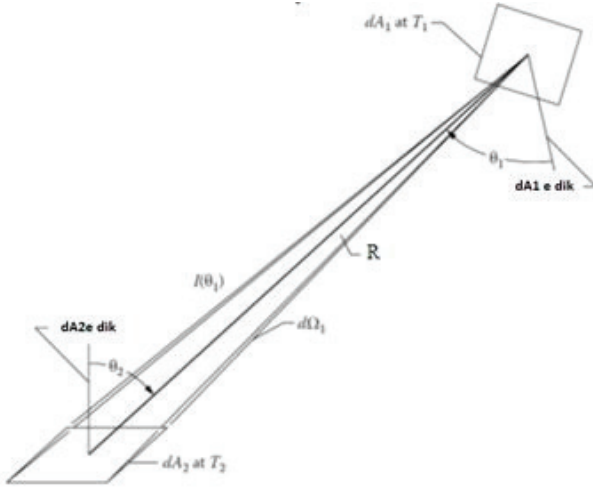
UV ışınımı mikroorganizmaların DNA/RNA'larını bozarak etkinliklerini azaltır veya yok eder. Bundan dolayı UV ışınımı her tür mikroorganizmaya karşı kullanılabilir ancak her mikroorganizma için aynı ölçüde sonuçlar elde etmek mümkün değildir. Bunun en temel sebebi her mikroorganizmanın UV ışınımına karşı farklı direnç göstermesidir. Genel olarak UV ışınımı en kolay virüslere karşı etkiliyken, sırasıyla bakteriler, sporlar ve mantarlar UV ışınımına daha dirençlidir. Bu genellemenin dışına çıkan birçok istisnanın bulunduğu unutulmamalıdır. Bu yüzden sistem tasarımı yapılırken hedef mikroorganizma bilinmeli ve buna bağlı olarak ışınım miktarı ve temas süresi belirlenmelidir.

## 2. Uv Işınımı Hesap Metodolojisi

Bir UV lambadan yayılan ışınımın miktarı ve lambayı çevreleyen hacme dağılan enerji bu kısımda incelenecektir.

### 2.1 Birbirinden Geçirgen (Transparent) Bir Ortamla Ayrılmış İki Yüzey Arasındaki Işınım Şekil Faktörünün Belirlenmesi

UV lambadan ortama yayılan enerjinin etkisini hesaplamak için öncelikle şekil faktörünün tanımlanması gerekmektedir. Şekil faktörü bir cismin yüzeyinden yayılan ışınımın diğer bir cismin üzerine hangi oranda ulaştığını ifade eder. Şekil faktörünü belirlemek için UV ışınımı ile etkileşime girmeyen bir ortamda bulunan iki diferansiyel küçüklükteki yüzey göz önüne alınmaktadır. Bu iki yüzey arasında belli bir gaz olabilir ancak bu ara ortamın enerji transferine katılmadığı varsayılmaktadır.



Şekil 3. İki Diferansiyel Küçüklükteki Yüzey ve Aralarındaki Şekil Faktörü (Howell, Siegel ve Mengüç, 2010)

Bir diferansiyel yüzeyden diğerine ışınım ile enerji geçişi genel olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$dQ_{dA_1-dA_2} = I_1 dA_1 \cos(\theta_1) d\Omega_1 \quad (1)$$

Bu denklemde I ışınımı, Q enerji geçişini, A iz düşüm alanını, dΩ katı açığı ifade etmektedir. Dalga boyu aralığı için ışınım ile enerji geçişi bulunmak isteniyorsa 1 numaralı eşitlik aşağıdaki şekle dönüşür.

$$dQ_{dA_1-dA_2} d\lambda = I_{\lambda,1} d\lambda dA_1 \cos(\theta_1) d\Omega_1 \quad (2)$$

Tüm dalga boylarındaki toplam ışınlama enerjisi ise 3 numaralı eşitlik ile ifade edilebilir.

$$dQ_{dA_1-dA_2} = dA_1 \cos(\theta_1) d\Omega_1 \int_{\lambda=0}^{\infty} I_{\lambda,1} d\lambda \quad (3)$$

3 numaralı eşitlikteki katı açı ( $d\Omega_1$ ), görme alanı ( $dA_2$ ) ve diferansiyel yüzeyler arasındaki mesafenin ( $R$ ) fonksiyonudur.

$$d\Omega_1 = \frac{dA_2 \cos(\theta_2)}{R^2} \quad (4)$$

Katı açı denklemini enerji geçişi denklemine eklersek 1 numaralı eşitlik aşağıdaki şekli alır.

$$dQ_{dA_1-dA_2} = I_1 dA_1 \cos(\theta_1) \frac{dA_2 \cos(\theta_2)}{R^2} \quad (5)$$

$dA_2$  den  $dA_1$  e enerji transferi de benzer olarak ifade edilebilir.

$$dQ_{dA_2-dA_1} = I_2 dA_2 \cos(\theta_2) \frac{dA_1 \cos(\theta_1)}{R^2} \quad (6)$$

Yukarıdaki eşitliklerin ardından şekil faktörünü şu şekilde ifade edilebilir:  $dA_1$  yüzeyinden çıkıp  $dA_2$  yüzeyine gelen enerjinin  $dA_1$  yüzeyinden çıkan toplam enerjiye oranına şekil faktörü denir.

$$dF_{dA_1-dA_2} = \frac{I_1 dA_1 \cos(\theta_1) \frac{dA_2 \cos(\theta_2)}{R^2}}{\pi I_1 dA_1} = \frac{\cos(\theta_1) \cos(\theta_2)}{\pi R^2} dA_2 = \frac{\cos(\theta_1)}{\pi} d\Omega_1 \quad (7)$$

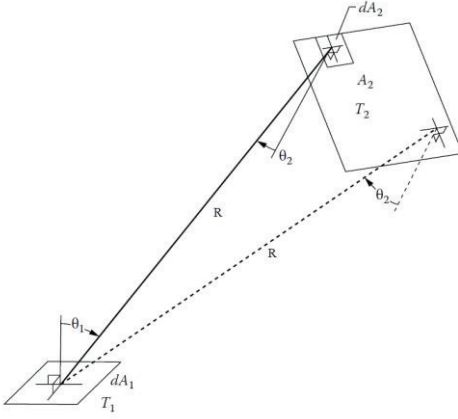
$$dF_{dA_2-dA_1} = \frac{I_2 dA_2 \cos(\theta_2) \frac{dA_1 \cos(\theta_1)}{R^2}}{\pi I_2 dA_2} = \frac{\cos(\theta_1) \cos(\theta_2)}{\pi R^2} dA_1 = \frac{\cos(\theta_2)}{\pi} d\Omega_2 \quad (8)$$

7 ve 8 numaralı denklem birlikte göz önüne alındığında şekil faktörü 9 numaralı denklemle de ifade edilebilir.

$$dF_{dA_1-dA_2} dA_1 = dF_{dA_2-dA_1} dA_2 = \frac{\cos(\theta_1) \cos(\theta_2)}{\pi R^2} dA_1 dA_2 \quad (9)$$

Eğer yüzeylerden biri gerçek yüzey ve ışınlama enerjisi gerçek yüzeyle diferansiyel yüzey arasında transfer ediliyorsa denklemlerin gerçek yüzey için integre edilmesi gerekir.





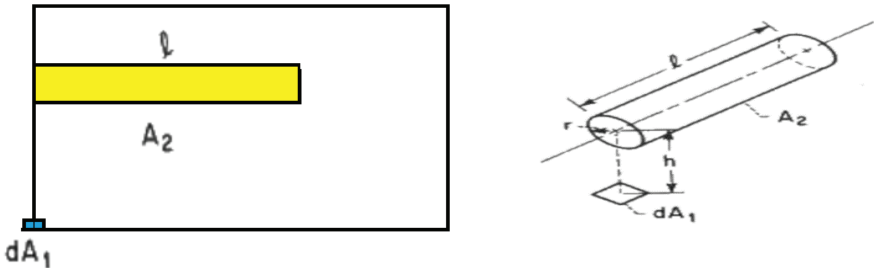
Şekil 4. Diferansiyel Yüzey İle Gerçek Yüzey Arasında Görüş Faktörü (Howell ve diğ. 2010)

9 numaralı denklem integrale edildiğinde 10 numaralı denklem elde edilir.

$$F_{dA_1-A_2} = \int_{A_2} \frac{\cos(\theta_1)\cos(\theta_2)}{\pi R^2} dA_2 = \int_{A_2} dF_{dA_1-dA_2} \quad (10)$$

Görüldüğü gibi bu durumda alan cinsinden integrale ihtiyaç vardır. Bu çalışmada lamba ile kanal yüzeyinin küçük bir parçası arasındaki enerji değişimi ele alınmış ve tüm kanal yüzeyine integrale edilmiştir. Aşağıda, 10 numaralı denklemin integralinin alındığı durumda iki ayrı geometri için şekil faktörleri verilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan morötesi lambalar silindirik şeklindedir ve örnek bir yerleşim Şekil 5'de verilmiştir. Lamba hava akışına paralel olacak şekilde kanalın giriş noktasına yerleştirilmiştir. Lamba boyu  $l$ , kanal yüzeyi üzerindeki diferansiyel alan ise yukarıdaki denklemlerde ifade edildiği gibi  $dA_1$  şeklinde gösterilmiştir.



Şekil 5. Hava Kanalı İçinde UV lamba Yerleşimi ve Şekil Faktörü Gösterimi (Hamilton ve Morgan, 1952)

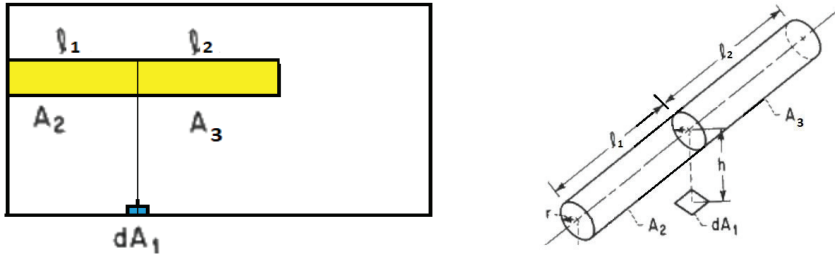
Şekil 5'deki konfigürasyon için gerekli matematiksel ifadeler 11 numaralı eşitlikte verilmiştir.

$$L = \frac{l}{r}, \quad H = \frac{h}{r}, \quad X = (1 + H)^2 + L^2, \quad Y = (1 - H)^2 + L^2 \quad (11)$$

Eşitlik 11 ve 12'de l lambanın boyu, h lamba ile kanal yüzeyi arasındaki dikey mesafe ( $h = \sqrt{x^2 + y^2}$ ) x ve y kartezyen koordinat olarak yüzeyin mesafesi, r lambanın yarıçapıdır. Bu durumda şekil faktörü eşitlik 12 ile ifade edilebilir.

$$F_{dA_1-A_2} = \frac{1}{\pi H} \arctan \frac{L}{\sqrt{H^2-1}} + \frac{L}{\pi} \left[ \frac{x-2H}{H\sqrt{XY}} \arctan \sqrt{\frac{X(H-1)}{Y(H+1)}} - \frac{1}{H} \arctan \sqrt{\frac{(H-1)}{(H+1)}} \right] \quad (12)$$

12 numaralı denklem hareket eden dA1 alanı için lambaya uyarlandığında şekil faktörü şu şekle dönüşmektedir:



Şekil 6. Diferansiyel Yüzeyin Kanal Boyunca Hareket Ettirilmesi Durumu

$$F_{dA_1-(A_2+A_3)} = F_{dA_1-A_2} + F_{dA_1-A_3} \quad (13)$$

$$L_1 = \frac{l_1}{r}, \quad H = \frac{h}{r}, \quad X = (1 + H)^2 + L_1^2, \quad Y = (1 - H)^2 + L_1^2 \quad (14)$$

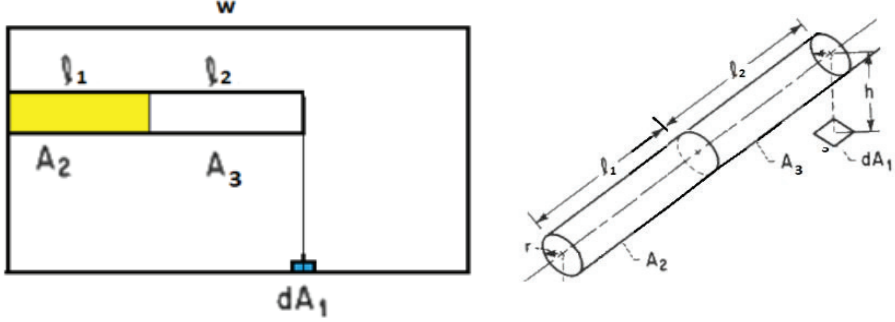
$$F_{dA_1-A_2} = \frac{1}{\pi H} \tan^{-1} \left( \frac{L_1}{\sqrt{H^2-1}} \right) + \frac{L}{\pi} \left[ \frac{X-2H}{H\sqrt{XY}} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{X(H-1)}{Y(H+1)}} \right) - \frac{1}{H} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{(H-1)}{(H+1)}} \right) \right] \quad (15)$$

$$L_2 = \frac{l_2}{r}, \quad H = \frac{h}{r}, \quad X = (1 + H)^2 + L_2^2, \quad Y = (1 - H)^2 + L_2^2 \quad (16)$$

$$F_{dA_1-A_3} = \frac{1}{\pi H} \tan^{-1} \left( \frac{L_2}{\sqrt{H^2-1}} \right) + \frac{L}{\pi} \left[ \frac{X-2H}{H\sqrt{XY}} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{X(H-1)}{Y(H+1)}} \right) - \frac{1}{H} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{(H-1)}{(H+1)}} \right) \right] \quad (17)$$

Yukarıdaki denklem setleri sayesinde lambanın uzunluğu boyunca yayılan UV ışınının kanal yüzeyine etkisi modellenabilmektedir. Lambadan çıkan UV ışınının

lamba boyunun ötesine etkisi ise aşağıdaki denklem setleri ile çözülmektedir. Bu durumda lamba sanki diferansiyel yüzeyin olduğu noktaya kadar uzanmış gibi kabul edilerek model oluşturulmuştur.



Şekil 7. Diferansiyel Yüzeyin UV Lamba Boyunun Ötesinde Olması Durumu

$$F_{dA_1-(A_2+A_3)} - F_{dA_1-A_3} = F_{dA_1-A_2} \quad (18)$$

$$y = l_1 + l_2, \quad L = \frac{y}{r}, \quad H = \frac{h}{r}, \quad X = (1 + H)^2 + L^2, \quad Y = (1 - H)^2 + L^2 \quad (19)$$

$$F_{dA_1-(A_2+A_3)} = \frac{1}{\pi H} \tan^{-1} \left( \frac{L}{\sqrt{H^2-1}} \right) + \frac{L}{\pi} \left[ \frac{X-2H}{H\sqrt{XY}} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{X(H-1)}{Y(H+1)}} \right) - \frac{1}{H} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{H-1}{H+1}} \right) \right] \quad (20)$$

$$L_2 = \frac{l_2}{r}, \quad H = \frac{h}{r}, \quad X = (1 + H)^2 + L_2^2, \quad Y = (1 - H)^2 + L_2^2 \quad (21)$$

$$F_{dA_1-A_3} = \frac{1}{\pi H} \tan^{-1} \left( \frac{L_2}{\sqrt{H^2-1}} \right) + \frac{L}{\pi} \left[ \frac{X-2H}{H\sqrt{XY}} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{X(H-1)}{Y(H+1)}} \right) - \frac{1}{H} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{H-1}{H+1}} \right) \right] \quad (22)$$

18-22 denklemlerinde  $l = l_1$  lambanın boyu,  $y=l_1+l_2$ ,  $dA_1$  alanının konumu (sanal lamba boyu),  $h =$  lambadan dikey mesafe  $h = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,  $r =$  lambanın yarıçapı,  $A_2+A_3 =$  lambanın  $dA_1$  alanını gören yüzeyi ( $\pi r_1$ ),  $dA_1$ : düz yüzeydeki diferansiyel alanı ifade etmektedir.

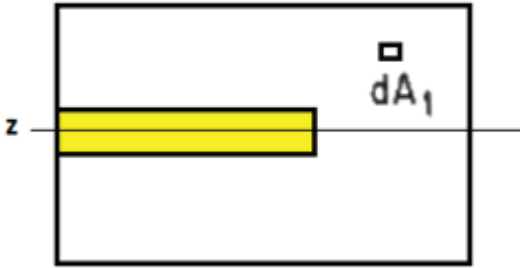
UV lambanın etki alanı hesaplanırken sadece tek bir lamba hesaba katılacaktır. Birden çok lamba olması durumunda bu etki, etki alanları eklenerek elde edilir. Bu durumda tek lambalı bir sistem için kanalın üstten görünüşü Şekil 8'de verilmiştir. Kanal genişliği  $z$  ve kanal uzunluğu  $w$  ile gösterilmiştir. Aynı zamanda duvarlardan yansıyan UV ışınları da hesaba dahil edilmiştir. Duvar yansımaya katsayısı  $\rho$  ile birlikte toplam şekil faktöründeki değişim Denklem 23 ile ifade edilir.

$$\sum F_{dA_1-A_2} = F_{dA_1-A_2} + \rho F_{dA_1-A_2} + \rho^2 F_{dA_1-A_2} + \dots \quad (23)$$

Bu durumda  $dA_1$  yüzeyine erişen toplam ışınım enerjisi ( $W/m^2$ ) diğer bir ifade ile ışıma miktarı Denklem 24 ile bulunabilir.

$$I = \frac{P_{UV}}{\pi r l_1} \sum F_{dA_1-A_2} \quad (24)$$

Burada  $P_{UV}$  lambanın ışınım güç çıktısıdır (W).



Şekil 8. UV Lambanın Bir Kanal Parçası İçindeki Konumu

## 2.2 UV Dozu ve Mikroorganizma Öldürme Oranının Tespiti

Mikroorganizmaların etkisiz hale getirilmesi için öncelikle UV dozunun hesaplanması gerekmektedir. Bunun için kullanılan denklem aşağıda verilmiştir. Denklem 25'de  $D$  UV dozunu ( $J/m^2$ ),  $I$  ışımayı ( $W/m^2$ ) ve  $t$  temas süresini (s) ifade etmektedir. 24 numaralı denklem ile bulunan ışıma değeri Denklem 25'de yerine koyularak UV dozu elde edilir (Kowalski, 2009).

$$D = I.t \quad (25)$$

UV dozu elde edildikten sonra UV ışınının mikroorganizmaya etkisi artık hesaplanabilir. Bu hesaplama iki adımda yapılmaktadır. İlk adımda mikroorganizmaların sağ kalma oranı belirlenir daha sonra toplam popülasyondan sağ kalanlar çıkarılarak UV lambanın öldürme oranı bulunur (Ilkov, 2010)

$$S = e^{-k.D} \quad (26)$$

$$IR=1-S \quad (27)$$

26 ve 27 numaralı denklemlerde  $S$  mikrop popülasyonundaki sağ kalma oranını,  $k$  UV katsayısını ( $m^2/J$ ),  $IR$  ise UV lambanın öldürme oranını (inactivation rate) ifade etmektedir.  $K$  katsayısı her mikroorganizma için deneysel olarak bulunan bir katsayıdır ve mikroorganizmanın UV ışınına direncini ifade etmektedir (Kowalski, 2009).

UV ışınının mikroorganizma öldürme kapasitesi yukarıdaki denklemlerden de görülebileceği gibi uzaklığın, zamanın ve direnç katsayısının fonksiyonudur. Uzaklık mikroorganizmanın üzerine düşen ışımaya miktarını doğrudan etkilemektedir. Temas süresi canlının UV ışınına ne kadar maruz kaldığını göstermektedir. Öldürme oranını etkileyen diğer bir parametre ise mikroorganizmanın UV ışını direnç katsayısı olup bu değer büyüdükçe canlının UV ışınına direnci düşer. 25 numaralı denklem, 26 numaralı denklemde yerine koyulursa

$$S = 1 - e^{-k.I.t} \quad (28)$$

İçinde akış olan bir kanal göz önüne alındığında mikroorganizmalar hava akışıyla kanalda hareket edeceklerdir. Bu durumda toplam zaman sabit değil her adım için değişen bir parametre olarak oluşacaktır. Bu durumda n inci adımda ( $t_n$  zamanındaki) mikrop popülasyonundaki sağ kalma oranı:

$$S_n = e^{-k.I.t_n} \quad (29)$$

$$Q = V.A = \frac{x_n}{t_n} A \quad (30)$$

yazılabilir. Buradan her adımdaki zaman;

$$t_n = \frac{x_n}{Q} A \quad (31)$$

olarak bulunur. Bu ifadeyi yukardaki denklemde yerine koyacak olursak:

$$S_n = kE \frac{x_n}{Q} A \quad (32)$$

32 numaralı denklem elde edilir. Akış esnasında her adımda belli bir mikroorganizma sağ kalma oranı olacağından kümülatif sağ kalma oranı bulunmalıdır. Kümülatif sağ kalma oranı ise Denklem 33 ile hesaplanabilir.

$$SC_n = \prod_{n=0}^N S_n \quad (33)$$

Bu durumda 27 numaralı denkleme benzer olarak kümülatif öldürme oranı:

$$CIR = 1 - e^{-SC} \quad (34)$$

elde edilir. Bu çalışmada kümülatif öldürme oranları hesaplanarak farklı geometriler için sonuçlar elde edilmiştir.

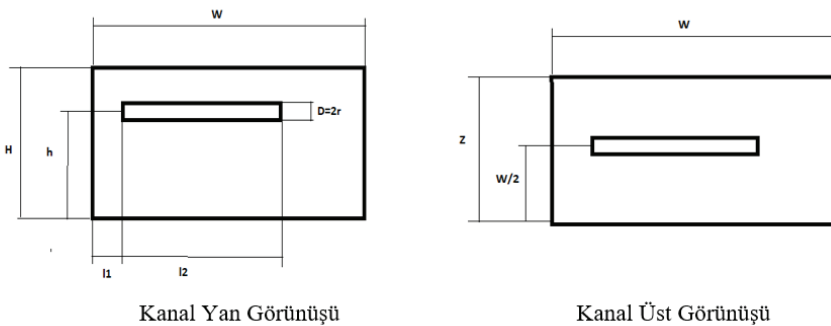
### 3. Değerlendirme

Bu çalışmada bir hava kanalı içine yerleştirilen UV lambalarla bir dezenfeksiyon sistemi tasarlanmış ve farklı UV lamba konfigürasyonları ve farklı parametreler için sonuçlar irdelenmiştir. Sistemin analizi için Java programlama dilinde bir program oluşturulmuş, sonuçlar tablo ve grafik olarak verilmiştir.

Çalışma kapsamında dikdörtgen kesitli galvaniz malzemeden yapılmış bir kanal tasarlanmış ve farklı durumlar için bu kanal içine lambalar yerleştirilmiştir. Galvaniz malzemenin yansıtma katsayısı ( $\rho$ ) %0,57 olarak alınmıştır (Ashrae, 2011). Hava akımı içinde  $k$  katsayısı 0,3512 m<sup>2</sup>/J olan coronavirus olduğu kabul edilmiştir (Kowalski ve diğ. 2020).

Birinci durumda 0,62x0,6 kesitindeki kanal içine tek bir UV lamba hava akışına paralel olacak şekilde yerleştirilmiştir. Kanal genişliği ( $z$ ) 0,62m, kanal yüksekliği ( $H$ ) 0,6m ve kanal boyu ( $w$ ) 1m'dir.

Genelde iklimlendirme sistemlerinde UV lambalar klima santrali vb. cihazların içine veya atış ağızlarına yerleştirilmektedir. Cihaz içinde yeterli alan varsa müdahale kolaylığı olması için cihaz içi tercih edilmekte, diğer türlü cihaza en yakın noktaya kanal içine lambalar konumlandırılmaktadır. Klima santralleri cihaz içi hava akış hızları 2,5m/s değerini aşmayacak şekilde tasarlanmaktadır (Ashrae, 2020). Ancak bu değer uygulamada 3m/s değerine kadar çıkabilmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada da hava akış hızı 3m/s olarak alınmıştır. Ayrıca UV lambaların atış ağızına konması durumunda, daha yüksek hava hızı oluşacaktır. Bu durumu görmek için 4m/s hava hızı için de bir simülasyon yapılmıştır. Tasarım ile ilgili diğer özellikler Tablo 2'de verilmiştir.



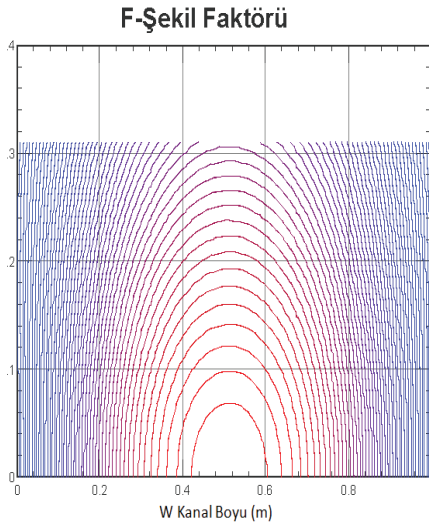
Şekil 9. Durum 1 İçin Lamba Yerleşimi

Tablo 2. Durum 1 ve durum 2 için Sistem Özellikleri

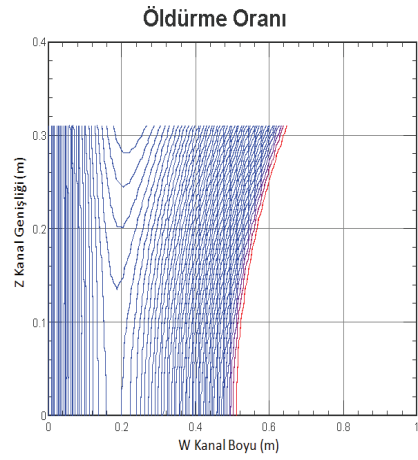
Sembol	Özellik	Değer
D	Lamba çapı (m)	0,019
l1	Lamba başlangıç boşluğu (m)	0,2
l2	Lamba boyu (m)	0,6096
h	Lamba yüksekliği (m)	0,3
H	Kanal yüksekliği (m)	0,6
Z	Kanal genişliği (m)	0,62
W	Kanal boyu (m)	1
V	Kesit hızı (m/s)	3
Q	Hava debisi (m <sup>3</sup> /h)	4017,6
P	Lamba UV gücü (W)	25

Tablo 2'deki değerlerle birlikte Bölüm 2'de ayrıntılı bir şekilde anlatılan hesaplar gerçekleştirildiğinde elde edilen şekil faktörü ve öldürme oranı modelin simetrikliğinden dolayı kanalın yarısı gösterilecek şekilde Şekil 10 ve 11'de verilmiştir. Yapılan hesaplar sonucunda belirtilen virüs 0,66 m kanal boyunda %99,99 oranında etkisiz hale getirilmiştir.

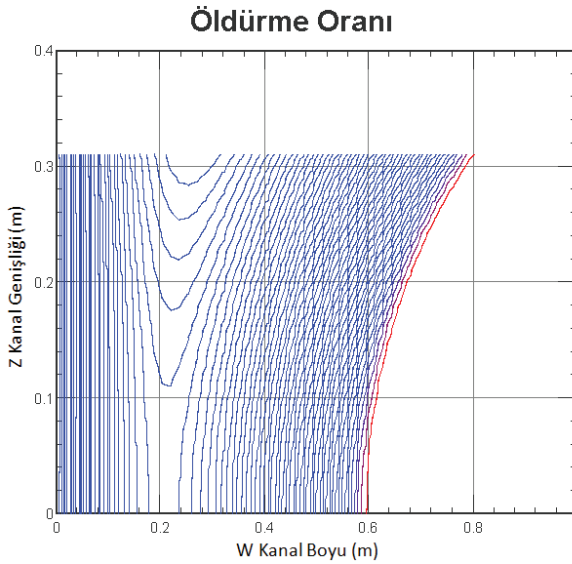
Aynı konfigürasyonda hava hızı 3m/s yerine 4m/s alınarak yüksek hızda UV lamba etkinliğinin nasıl değiştiği de gözlemlenmiştir. Bu durumda %99,99 öldürme oranına ancak 0,80 m kanal boyunda yakalanabildiği görülmüştür. 4m/s için öldürme oranı Durum 1-A olarak Şekil 12'de verilmiştir. Durum 1-A için tüm sistem özellikleri Durum 1 ile aynı alınmış sadece kesit hızı 4m/s değerine yükseltilmiştir.



Şekil 10. Durum 1 İçin Şekil Faktörü



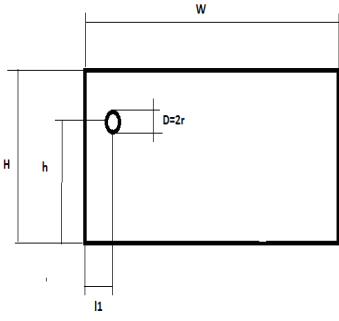
Şekil 11. Durum 1 İçin Öldürme Oranı



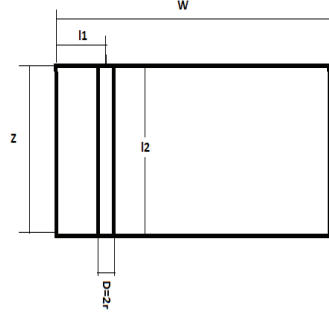
Şekil 12. Durum 1-A (hava hızı 4 m/s) İçin Öldürme Oranı

İkinci durum için de aynı tasarım özellikleri kullanılmış sadece UV lamba akışa dik olarak yerleştirilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen şekil faktörü ve öldürme oranı Şekil 14 ve 15’de verilmiştir. Akışa dik konumda yerleştirilen UV lamba modelinde virüs 0,72m sonra %99,99 oranında etkisiz hale getirilmiştir.



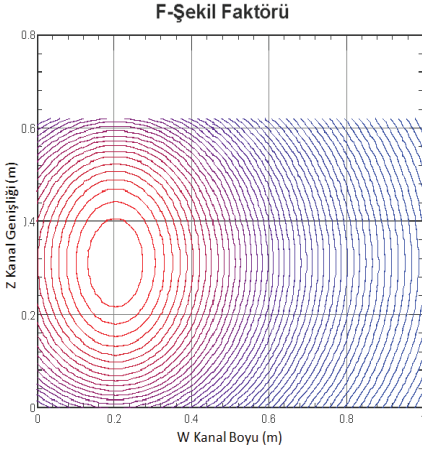


Kanal yan görünüşü

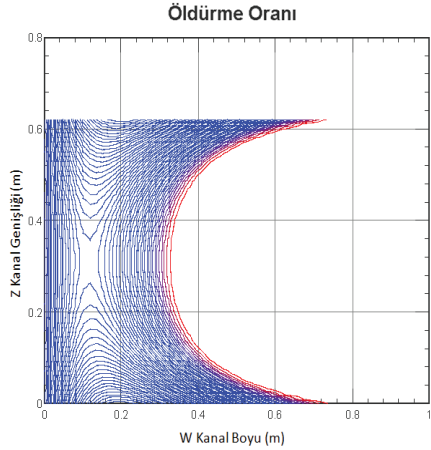


Kanal üst görünüşü

Şekil 13. Durum 2 İçin Lamba Yerleşimi



Şekil 14. Durum 2 İçin Şekil Faktörü

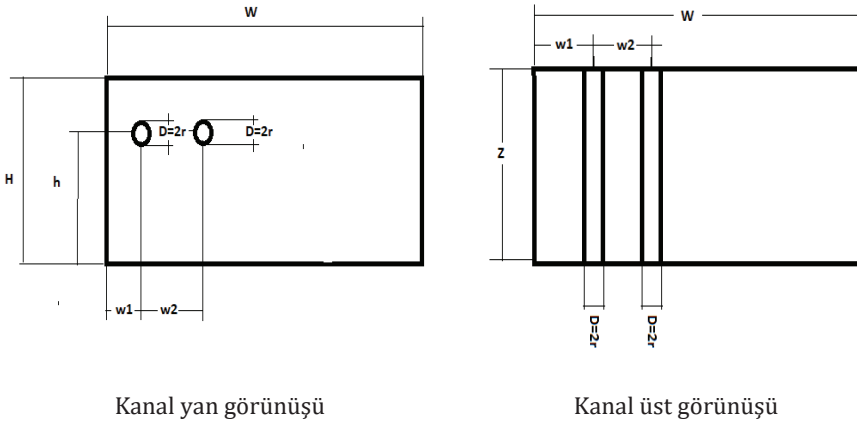


Şekil 15. Durum 2 İçin Öldürme Oranı

Üçüncü ve dördüncü durumda birden fazla UV lamba kullanılmış ve lambalar akışa dik olarak yerleştirilmiştir. Tasarım özellikleri ikinci durum ile aynıdır. Üçüncü durumda toplam UV gücü 25W olan 2 lamba, dördüncü durumda ise toplam UV gücü 25W olan 3 adet lamba kullanılarak UV ışınlarının kanal boyunca yayılması durumundaki sonuçlar incelenmiştir.

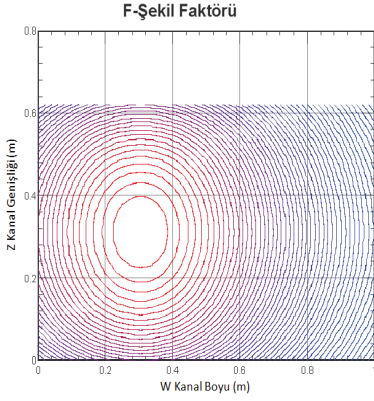
Tablo 3. Durum 3 İçin Sistem Özellikleri

Sembol	Özellik	Değer
D	Lamba çapı (m)	0,019
w1	Lamba başlangıç boşluğu (m)	0,2
W2	Lambalar arası mesafe (m)	0,2
l2	Lamba boyu (m)	0,6096
h	Lamba yüksekliği (m)	0,3
H	Kanal yüksekliği (m)	0,6
Z	Kanal genişliği (m)	0,62
W	Kanal boyu (m)	1
V	Kesit hızı (m/s)	3
Q	Hava debisi (m <sup>3</sup> /h)	4017,6
P	Toplam lamba UV gücü (W)	25

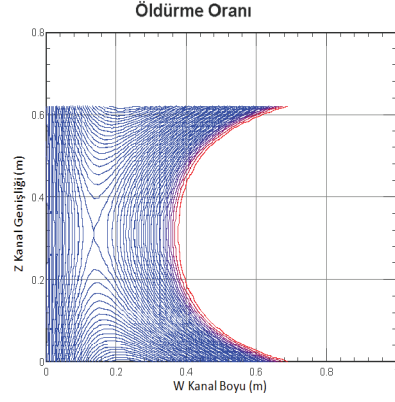


Şekil 16. Durum 3 İçin Lamba Yerleşimi

Durum 3 için sistem özellikleri Tablo 3'te, lamba yerleşimi Şekil 16'da ve elde edilen şekil faktörü ile öldürme oranı ise Şekil 17 ve 18'de verilmiştir.



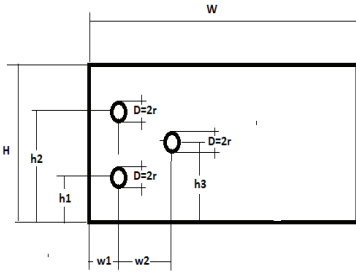
Şekil 17. Durum 3 için F-Şekil Faktörü



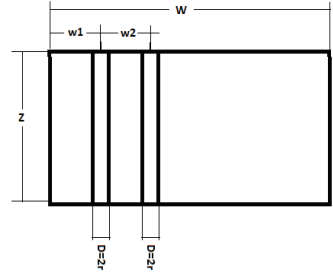
Şekil 18. Durum 3 için Öldürme Oranı

3. durum için analiz sonucunda 0,69m kanal boyunda %99,99 öldürme oranı elde edilmiştir.

Son incelenen durumda toplam ışınım gücü 25W olan 3 adet UV lamba aynı kanal içine Şekil 19'da gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Buradaki amaç 3 lambanın iki sıra halinde kullanılması durumunda öldürme oranındaki değişimi görmektir.



Kanal yan görünüşü



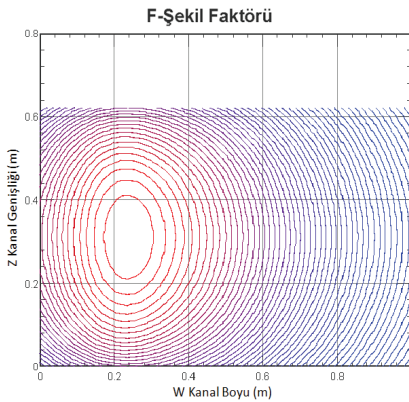
Kanal üst görünüşü

Şekil 19. Durum 4 için Lamba Yerleşimi

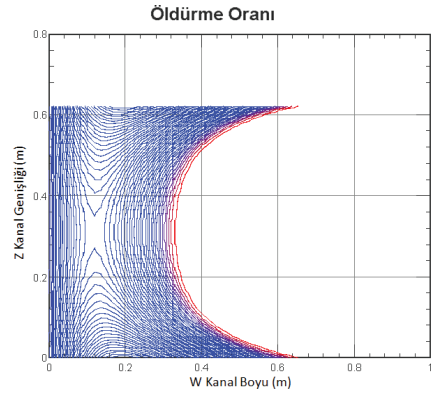
Durum 4 için sistem özellikleri ve lambalar arası uzaklıklar Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Durum 4 İçin Sistem Özellikleri

Sembol	Özellik	Değer
D	Lamba çapı (m)	0,019
w1	Lamba başlangıç boşluğu (m)	0,2
w2	Lambalar arası mesafe (m)	0,2
l2	Lamba boyu (m)	0,6096
h1	1.lamba yüksekliği (m)	0,2
h2	2.lamba yüksekliği (m)	0,4
h3	3.lamba yüksekliği (m)	0,3
H	Kanal yüksekliği (m)	0,6
Z	Kanal genişliği (m)	0,62
W	Kanal boyu (m)	1
V	Kesit hızı (m/s)	3
Q	Hava debisi (m <sup>3</sup> /h)	4017,6
P	Toplam lamba UV gücü (W)	25



Şekil 20. Durum 4 İçin Şekil Faktörü



Şekil 21. Durum 4 İçin Öldürme Oranı

4. durumda %99,99 öldürme oranına 0,63m kanal boyunda ulaşılmıştır. Diğer konfigürasyonlarla karşılaştırıldığında en iyi sonuç bu durum için elde edilmiştir. Bunun sebebi UV lambaların kanal içine yayılması ve yansımanın da etkisiyle ışınımın kanal boyunca etki etmesidir.

## Sonuç

Farklı lamba adetleri ve yerleşimleri ile yapılan analizler sonucunda elde edilen değerler Tablo 5'te verilmiştir. Tablo incelendiğinde 3 lambanın akışa dik olarak kanal içine yayılması durumunda (durum 4) en uygun sonuca ulaşıldığı görülebilir. Ancak bu durumda tek bir lamba kullanmak yerine 3 lamba kullanıldığı için elektrik bağlantıları, 2 sıra UV lamba için 2 kızak kullanımı gibi zorluklardan dolayı sahadaki kullanımı çok kolay olmayacaktır. Durum 1'de de oldukça güzel bir sonuç elde edilmiştir. Dik lamba yerleşimine göre daha iyi değerler elde edilmesine rağmen lambanın kanal boyunca (hava akışına paralel) yerleşimi sahada çoğu zaman istenen bir uygulama değildir. Lamba ömürlerinin ortalama 9.000-12.000 saat olduğu düşünülürse ortalama 2-3 yılda bir lambaların değiştirilmesi gerekecektir. Bu değişim akışa dik yerleştirilen lamba durumu için daha pratik ve zahmetsiz yapılabilmektedir. Ayrıca lambaların içine yerleştirildiği hücrelerin imalatı akışa dik lamba konfigürasyonu için daha kolaydır.

Çalışma sonucunda toplam güçleri aynı olmak şartıyla UV lamba sayısı arttıkça daha kısa mesafede %99,99'lük öldürme oranına ulaşıldığı tespit edilmiştir (Durum 2-3-4). Bunun sebebi UV ışınlarının kanal içine yayılması ve yansıma ile birlikte daha fazla etki etmesidir. Akışa paralel yerleştirilen lamba da aslında kanal boyunca yayılan birden fazla lambanın toplamı olarak düşünülebilir. Dolayısıyla akışa paralel yerleştirilen tek bir lamba (Durum 1) akışa dik yerleştirilen bir lamba (Durum 2) ve akışa dik yerleştirilen 2 lamba (Durum 3) durumuna göre daha iyi sonuç vermiştir. Ancak Tablo 5'ten de görüleceği gibi elde edilen sonuçlar birbirinden çok farklı değildir. Aynı hızlarda karşılaştırılan üç farklı konfigürasyon için en iyi seçenek (0,63m) ile en kötü seçenek (0,72m) arasında 9cm'lik bir fark bulunmaktadır.

Kowalski'nin yapmış olduğu benzer çalışmada, akışa paralel ve kanalın bir kenarına yerleştirilen lamba konfigürasyonunun, akışa dik ve kanalın bir kenarına yerleştirilen lamba konfigürasyonuna göre yaklaşık %6 daha etkili olduğu görülmüştür (Kowalski, 2001). Bu çalışmada ise lambalar kanalın ortasına yerleştirilmiş ve akışa paralel lamba konfigürasyonu akışa dik lamba konfigürasyonuna göre %9 daha etkili olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 5. Konfigürasyonların Karşılaştırılması

	Hava Hızı (m/s)	Kanal Kesiti (mxm)	Lamba Adeti	Toplam UV Gücü (W)	%99,99 Öldürme Oranına Ulaşılan Mesafe (m)
Durum-1	3	0,62x0,6	1	25	0,66
Durum-1-A	4	0,62x0,6	1	25	0,80
Durum-2	3	0,62x0,6	1	25	0,72
Durum-3	3	0,62x0,6	2	25	0,69
Durum-4	3	0,62x0,6	3	25	0,63

Yine Tablo 5'te görüleceği gibi hava hızı diğer bir deyişle hava debisi arttıkça (temas süresi azaldıkça) öldürme oranı düşmektedir ve bu beklenen bir sonuçtur. Yüksek hava hızında temas süresi azaldığı için mikroorganizmalar UV ışınına daha az maruz kalmakta ve öldürme oranı düşmektedir. Durum 1 ve 1-A arasındaki karşılaştırma bunun için yapılmıştır. Hava hızınının 3m/s'den 4m/s'e çıkarılması durumunda %99,99 öldürme oranına ulaşılan mesafelerde %21'lik bir artış olmuştur.

Bu çalışmada UV lambaların bir kanal içerisinde farklı konfigürasyonlarda yerleştirilmesi sonucunda öldürme oranlarındaki değişim incelenmiştir. Bu çalışmadaki amaç UV lambaların mikroorganizmalar üzerinde nasıl etki ettiğini veya etki mekanizmasını incelemekten ziyade daha önceki çalışmalar sonucu elde edilen UV lamba ile mikroorganizma öldürme modelleri kullanılarak farklı lamba konfigürasyonlarının öldürme oranlarına etkilerini araştırmaktır. Bu noktadan yola çıkarak ışınımı ısı transferi modelleri ile birlikte Kowalski ve arkadaşlarının çalışmaları (Kowalski ve diğ. 2001, 2005, 2009, 2020) referans alınarak oluşturulmuş modeller üzerinden çalışma yapılmıştır. Kowalski ve arkadaşlarının önerdiği mikroorganizma öldürme oranı modeli ile elde edilen sonuçların doğruluğundan emin olmak için benzer deneyler tekrarlanarak sonuçlar karşılaştırılmalıdır. Bu araştırma ise ayrı bir çalışmanın konusu olacaktır.

### Kaynakça

- Ahmad, S. I., Christensen, L., ve diğ. (2017). *Ultraviolet light in human health, diseases and environment*. Springer.
- Balaji, C., (2014). *Essentials of radiation heat transfer*. Wiley.
- Bolton, J. R. ve Cotton, C. A., (2008). *The Ultraviolet disinfection handbook*. American Water Works Association.

- Hamilton, D.C. ve Morgan, W.R., (1952). *Radiant-interchange configuration factors*, NASA TN 2836.
- Howell, J. R., Siegel R., ve diğ. (2010). *Thermal radiation heat transfer*. Taylor and Francis Group.
- Ilkov, M., (2010). Theoretical model for the UV disinfection system in the operating ward of pzu "Filip Vtori". *Proceedings of the Second Conference on Medical Physics and Biomedical Engineering*.
- Kowalski, W., (2001). Design and optimization of UVGI air disinfection systems, (Doktora tezi), The Pennsylvania State University, The Graduate School, College of Engineering, Pensilvanya, ABD.
- Kowalski, W., (2009). *Ultraviolet germicidal irradiation handbook*, Berlin:Springer-Verlag.
- Kowalski, W., Bahnfleth, W.P., ve diğ. (2005). A Specular model for UVGI air disinfection systems. *IUVA NEWS*, Vol. 7, No. 1. Erişim adresi: [https://www.researchgate.net/publication/228512680\\_A\\_specular\\_model\\_for\\_UVGI\\_air\\_disinfection\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/228512680_A_specular_model_for_UVGI_air_disinfection_systems)
- Kowalski, W., Walsh, T., ve diğ. (2020). 2020 COVID-19 coronavirus ultraviolet susceptibility, Erişim adresi: [https://www.researchgate.net/publication/284691618\\_SARS\\_Coronavirus\\_UV\\_Susceptibility](https://www.researchgate.net/publication/284691618_SARS_Coronavirus_UV_Susceptibility). [https://www.researchgate.net/publication/284691618\\_SARS\\_Coronavirus\\_UV\\_Susceptibility](https://www.researchgate.net/publication/284691618_SARS_Coronavirus_UV_Susceptibility).
- Tamuri, A.R., Sahar, M.A., ve diğ. (2014). Ultraviolet (UV) light spectrum of fluorescent lamps, Conference Paper, doi:<https://doi.org/10.13140/2.1.3114.6886>.
- 2011 ASHRAE Handbook, Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications*, (2011). Chapter 16: Ultraviolet Lamp Systems. ASHRAE.
- 2020 ASHRAE handbook, heating, ventilating, and air-conditioning systems and equipment*, (2020). ASHRAE.