



The Effect of Inner Walls Reflection on Microorganisms Inactivation in Water Ultraviolet Reactor using computational fluid dynamics

G. Heidarinejad*, N. Bozorgmehr, M. Safarzadeh

Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran

ABSTRACT: The inner walls reflection of ultraviolet radiation is one of the effective components of the ultraviolet reactor efficiency. In this study, the effect of inner walls reflection of the reactor on the performance of the multi-lamp ultraviolet reactor has been evaluated using ultraviolet dose distribution and log inactivation values of MS2 and *Bacillus subtilis* microorganisms. The simulation of the flow field is performed using the SST $k-\omega$ model and the discrete ordinates model for radiation. The wall reflectivity is in the range of zero (no reflection) to 100 (ideal reflection) percent. In this range of reflections, for the reactor walls with aluminum cover, the reflectivity of 80.5% and 26.1% for the steel wall and ultraviolet transmittance of 87.7% and 78.5% were calculated. For ultraviolet transmittance of 78.5%, the received dose and log inactivation change with increasing reflectivity were very low but for ultraviolet transmittance of 87.7%, there is a tangible increase in these values and the results variation trend for two different flow rate was similar in ultraviolet transmittance of 78.5%. The performance of the reactor was investigated in two different lamp powers and ultraviolet transmittance of 78.5%, which is related to the higher power, the reflectivity effect has become more apparent.

Review History:

Received: 2019-03-03

Revised: 2019-07-04

Accepted: 2019-09-02

Available Online: 2019-09-16

Keywords:

Ultraviolet reactor

Computational fluid dynamics

Discrete ordinates model

Reflection

Bacillus subtilis and MS2 microorganism

1. INTRODUCTION

Ultraviolet (UV) technology is an effective method in the water disinfection process due to its desirable effectiveness in deactivating resistant pathogens and non-production of harmful byproducts [1, 2]. Inactivation of microorganisms in UV disinfection reactors depends on the amount of UV energy received by the microorganism during it passes through the UV reactor. Increasing the reflection of the inner wall is a way to increase the UV energy received by the microorganism. One of the few works in the field of inner walls reflection was the study of Li et al. [3], who investigated the effect of inner walls reflection in two high and ordinary reflective modes on the performance of single-lamp UV reactors and higher radiation rates were observed at high reflectivity.

In the present paper, the effect of the reactor inner walls reflection on the performance of the multi-lamp UV reactor is studied. In this study, the effect of reflection on the UV dose distribution and the log-inactivation values of two microorganisms were evaluated in two UV Transmittance (UVT). One of the highlights of this paper is how different wall reflections under different lamps power and flow rates are steady-state, so as to gain a better understanding of the effect of reflection on disinfection reactor performance.

2. GOVERNING EQUATIONS

The mass and momentum conservation equations are fluid governing equations that are solved under steady-

*Corresponding author's email: gheidari@modares.ac.ir

state, incompressible, isothermal and constant fluid physical properties assumption [4]. The SST $k-\omega$ model is used to simulate turbulent flow [5]. The Discrete Ordinates Model (DOM) has been used for radiation field calculations [6]. The reflection coefficient of the reactor inner walls is calculated from Eq. (1):

$$R = 1 - \varepsilon \quad (1)$$

where ε is the internal emissivity of the wall and R is the reflection coefficient at the wall surface.

Particle tracking is done in the Lagrangian approach [7]. By applying drag, virtual mass and pressure gradient forces in the equilibrium equation of forces applied to each particle, the trajectory of each particle is obtained. [6]. Using the User-Defined Function (UDF) and applying it in Fluent software, the dose of each particle was calculated using the time integral of the radiation intensity [8]. The MS2 coliphage log-inactivation is calculated using the Chick-Watson model and the *Bacillus subtilis* (*B.subtilis*) log-inactivation using the model of Wols's study [5, 9].

3. SIMULATION PROCEDURE

The geometrical model in this study is the cross-flow UV reactor shown in Fig. 1. The inlet pipe diameter is 0.125 m and its length is 50 times the diameter. The outlet pipe diameter is 0.125 m and has a length of 1 m. The main part of the reactor, a cylinder with a diameter of 0.3 meters and a length of 0.15



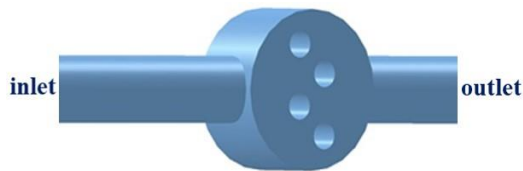


Fig. 1. The geometry of the UV reactor

meters, has four cylindrical pipes of quartz, perpendicular to the flow of the reactor that the diameter of each quartz pipe is 0.0478 m.

The Ansys Fluent 17.2 commercial package was used to simulate the flow field, radiation field and trajectory of the microorganisms. Uniform velocity at the inlet boundary and constant pressure is used at the outlet boundary. The non-slip condition was applied to all walls. To solve the Radiation Transfer Equation (RTE) of each of the polar and azimuthal angles considered for the eighth of the angular space, it was discrete in seven directions. Five pixels were also placed at each control angle. Approximately 5,000 particles were injected into the flow from the inlet of the reactor, and reflect and escape were considered for the walls boundary condition and exit boundary condition, respectively. The discrete random walk model was used to apply the effect of turbulence on the particles [10].

4. RESULTS

The grid of 316,000 cells is the grid independence for this simulation. A comparison of the axial and vertical velocity results obtained from the present numerical model and the Wols's experimental data [9] illustrates the desirable prediction of the flow field, especially for the axial velocity. Also, a comparison of the particles dose distribution of the current numerical model and the experimental data confirms the accuracy of the simulation in the UVT of 78.5%; however, the present numerical model results under the UVT of 87.7% in the minimum dose have a significant discrepancy with the experimental data, which the cause should be searched ineffective parameters on the radiation field.

According to Fig. 2, in the UVT of 78.5, the log-inactivation of both types of microorganisms increases with increasing reflectivity, but the growth is relatively small. The log-inactivation difference for MS2 phage in non-reflection and 100% reflection is about 7% and for B.subtilis is about 8%. In Fig. 3, the log-inactivation of two microorganisms B.subtilis and MS2 can be seen in the UVT of 87.7%. Log-inactivation for both types of microorganisms increased with increasing reflectivity. For MS2 microorganisms, the difference in the absence of internal wall reflection and 100% reflection is about 20%, and for B.subtilis, this difference is 21%. By comparing Figs. 2 and 3, it can be seen that the reflection of the inner walls at higher UVT leads to more log-inactivation.

By decreasing the flow rate from 4.9 to 2.5 m³/h under UVT of 78.5%, the log-inactivation values of microorganisms show very little reflection effect, so that the difference between the non-reflection and 100% reflection for MS2 is about 7% and for B.subtilis 7.7%. By increasing the power from 32 to 46.9 watts at a UVT of 78.5%, the effect of reflection on the log-

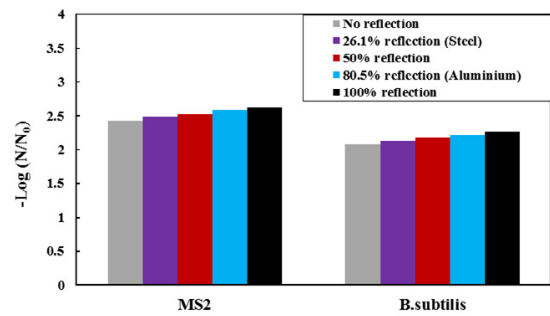


Fig. 2. Log-inactivation values under 78.5% UVT with zero to 100% wall reflection

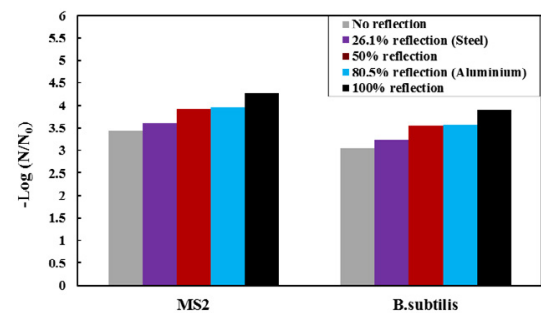


Fig. 3. Log-inactivation values under 87.7% UVT with zero to 100% wall reflection

inactivation values under non-reflection and 100% reflection for MS2 phage was about 7.9% and for B.subtilis 8.6%.

5. CONCLUSION

In this study, the effect of the reflection of the walls which has different values in the range of zero (without reflection) to 100% (ideal reflection) was investigated on the UV reactor performance. The performance of the UV reactor was evaluated under two UVT, two flow rate and two different lamp power for two types of microorganisms. The results showed that the effect of wall reflection on the UV reactor performance under higher UVT (87.7%) was more pronounced. With increasing power, a slight increase in performance indices was observed despite wall reflection. By decreasing the flow rate from 4.9 m³/h to 2.5 m³/h, the effect of wall reflection under UVT of 78.5% did not experience any significant change..

6. REFERENCES

- [1] M. Polo-López, M. Castro-Alfárez, I. Oller, P. Fernández-Ibáñez, Assessment of solar photo-Fenton, photocatalysis, and H₂O₂ for removal of phytopathogen fungi spores in synthetic and real effluents of urban wastewater, *Chemical Engineering Journal*, 257 (2014) 122-130.
- [2] K. Song, M. Mohseni, F. Taghipour, Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: A review, *Water research*, 94 (2016) 341-349.
- [3] W. Li, M. Li, J.R. Bolton, J. Qu, Z. Qiang, Impact of inner-wall reflection on UV reactor performance as evaluated by using computational fluid dynamics: the role of diffuse reflection, *Water research*, 109 (2017) 382-388.
- [4] S. Elyasi, F. Taghipour, Simulation of UV photoreactor for water disinfection in Eulerian framework, *Chemical Engineering*

- Science, 61(14) (2006) 4741-4749.
- [5] D. Liu, C. Wu, K. Linden, J. Ducoste, Numerical simulation of UV disinfection reactors: Evaluation of alternative turbulence models, *Applied mathematical modelling*, 31(9) (2007) 1753-1769.
- [6] H. Li, H. Osman, C. Kang, T. Ba, Numerical and experimental investigation of UV disinfection for water treatment, *Applied Thermal Engineering*, 111 (2017) 280-291.
- [7] B. Wols, D. Harmsen, J. Wanders-Dijk, E. Beerendonk, C. Hofman-Caris, Degradation of pharmaceuticals in UV (LP)/H₂O₂ reactors simulated by means of kinetic modeling and computational fluid dynamics (CFD), *Water research*, 75 (2015) 11-24.
- [8] C. Xu, X. Zhao, G. Rangaiah, Performance analysis of ultraviolet water disinfection reactors using computational fluid dynamics simulation, *Chemical engineering journal*, 221 (2013) 398-406.
- [9] B.A. Wols, *CFD in drinking water treatment*, (2010).
- [10] D.A. Sozzi, F. Taghipour, UV reactor performance modeling by Eulerian and Lagrangian methods, *Environmental science & technology*, 40(5) (2006) 1609-1615.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

GH. Heidarinejad, N. Bozorgmehr, M. Safarzadeh, The Effect of Inner Walls Reflection on Microorganisms Inactivation in Water Ultraviolet Reactor using computational fluid dynamics, Amirkabir J. Mech Eng., 53(Special Issue 1) (2021) 93-96.

DOI: 10.22060/mej.2019.15916.6226





بررسی اثر بازتاب دیواره‌های درونی مخزن فرابنفش بر غیرفعال‌سازی میکروارگانیزم موجود در آب با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

قاسم حیدری‌نژاد*، نسرين بزرگمهر، محمد صفرزاده

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۲-۱۲-۱۳۹۷
بازنگری: ۱۳-۰۴-۱۳۹۸
پذیرش: ۱۱-۰۶-۱۳۹۸
ارائه آنلاین: ۲۵-۰۶-۱۳۹۸

کلمات کلیدی:

مخزن فرابنفش
دینامیک سیالات محاسباتی
مدل جهت‌های مجزا
بازتاب
میکروارگانیزم باسیلوس سابتیلیس
و ام.اس.دو

خلاصه: بازتاب پرتو فرابنفش از دیواره‌های درونی، از مؤلفه‌های مؤثر بر افزایش کارآمدی مخازن فرابنفش، به شمار می‌آید. در این مطالعه، به ارزیابی میزان تأثیرگذاری مقادیر مختلفی از بازتاب دیواره‌های درونی مخزن، بر عملکرد مخزن فرابنفش چندلامپی، با استفاده از شاخص‌هایی چون دوز دریافتی ذرات و مقادیر لگاریتم غیرفعال‌سازی میکروارگانیزم‌های ام.اس.دو و باسیلوس سابتیلیس، پرداخته شده است. شبیه‌سازی میدان جریان با استفاده از مدل کا-امگا-اس.اس.تی صورت پذیرفته است و برای محاسبات میدان تابش، مدل جهت‌های مجزا در نظر گرفته شده است. مقادیر بازتاب دیواره در بازه‌ای از صفر (بدون بازتاب) تا صد (بازتاب ایده‌آل) درصد قرار داده شده است. در این گستره از بازتاب، برای دیواره مخزن با پوشش آلومینیوم، بازتاب ۸۰/۵ درصد و برای دیواره فولادی، بازتاب ۲۶/۱ درصد در نظر گرفته شد. میزان تأثیرگذاری بازتاب در دو مقدار ضریب گذردهی ۸۷/۷ و ۷۸/۵ درصد، محاسبه شد. برای ضریب گذردهی ۷۸/۵ درصد، مقدار تغییر دوز دریافتی و مقادیر لگاریتم غیرفعال‌سازی با افزایش درصد بازتاب، بسیار اندک بود و روند محسوس افزایش این مقادیر برای ضریب گذردهی ۸۷/۷ درصد، با افزایش درصد بازتاب، به چشم می‌خورد. روند تغییر نتایج مربوط به دو دبی متفاوت در ضریب گذردهی ۷۸/۵ مشابه بود. نحوه عملکرد مخزن در دو توان متفاوت در ضریب گذردهی ۷۸/۵ درصد بررسی شد که در توان بالاتر، میزان اثرگذاری روند افزایشی بازتاب، بیش‌تر مشاهده شد.

۱- مقدمه

با واکنش میان ضدعفونی‌کننده‌ها با مواد آلی، به طور طبیعی در آب شکل می‌گیرند. این ترکیبات به عنوان آلاینده‌های سرطان‌زا شناخته شده‌اند و به همین دلیل مورد توجه قرار گرفته‌اند [۵-۳]. با این حال تابش فرابنفش به‌ویژه در محدوده طول موج‌های ۱۰۰ تا ۲۸۰ نانومتر، به عنوان یک جایگزین گندزدایی کارآمد به شمار می‌آید و می‌تواند باعث کاهش بار میکروبی موجود در یک دوره زمانی کوتاه باشد. بنابراین با کشف اثر بالای پرتو فرابنفش بر غیرفعال‌سازی پاتوژن‌های مقاوم، تمایل روزافزونی به استفاده از فناوری گندزدایی به کمک تابش فرابنفش ایجاد شد [۸-۶]. غیرفعال‌سازی میکروارگانیزم‌ها در مخازن ضدعفونی فرابنفش به میزان انرژی فرابنفش دریافتی میکروارگانیزم در طی عبور در داخل مخزن فرابنفش بستگی دارد

روش‌های گوناگونی از قبیل روش‌های شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی برای تصفیه آب وجود دارد. کلر به دلیل قابلیت دسترسی آسان، هزینه کم، ویژگی اکسیدکنندگی و پتانسیل حذف پاتوژن‌ها، به عنوان اصلی‌ترین این روش‌ها در فرآیند گندزدایی آب کاربرد دارد. با وجود استفاده گسترده کلر در تصفیه آب، عوارض ضدعفونی و یا به عبارتی تولید فرآورده‌های جانبی را به دنبال دارد [۱ و ۲]. فرآورده‌های جانبی از جمله تری‌هالومتان‌ها^۱ و اسیدهای هالوسیتیک^۲

1 Trihalomethane
2 Halocytic Acids

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: gheidari@modares.ac.ir



۶۵ تا ۹۹ درصد قرار داشت. آن‌ها نتیجه گرفتند که دیواره درونی مخزن با جنس آلومینیوم که دارای ضریب بازتابندگی ۸۰/۵ است، به طور برجسته‌ای در بهبود عملکرد مخزن فرابنفش موثر واقع می‌شود. همچنین یکنواخت شدن میدان تابش به شدت به ویژگی بازتاب پخش دیواره برمی‌گردد که به توزیع بهتر تابش می‌انجامد.

لی و همکاران [۱۵]، در سال ۲۰۱۷، اثر بازتاب دیواره‌های درونی را روی عملکرد مخازن تک‌لامپی فرابنفش با تکیه بر نقش بازتاب پخش، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مطالعه نمودند. مدل کالیبره شده جهت‌های مجزا، میدان تابش فرابنفش درون مخزن را با دیواره‌های درونی بازتابنده، محاسبه نمود. دیواره‌های درونی مخزن در دو حالت با بازتابندگی بالا و معمولی قرار داشت. نتایج این مطالعه نرخ تابش بیش‌تر، در حالت دیواره با بازتابندگی بالا نسبت به حالت دیواره با بازتابندگی معمولی را نشان داد.

با توجه به مرور مطالعات پیشین، افراد مختلف با تغییر هندسه سعی در بهبود عملکرد ضدعفونی مخازن فرابنفش داشته‌اند اما می‌توان با اضافه کردن سطوحی با بازتابندگی مناسب روی دیواره‌های درونی مخزن، با هزینه‌ای کم‌تر کارایی ضدعفونی میکروارگانیزم‌ها را افزایش داد. در پژوهش کنونی بررسی عملکرد مخزن فرابنفش جریان متقاطع چندلامپی، با هدف بررسی اثر بازتاب دیواره‌های درونی مخزن، در مقادیر صفر تا صد درصد بازتاب فرابنفش دیواره، مطالعه می‌شود.

در این مطالعه با به کار بردن مدل تابش جهت‌های مجزا، اثر بازتاب بر دوز دریافتی ذرات و مقادیر لگاریتم غیرفعال‌سازی میکروارگانیزم، در دو ضریب گذردهی مورد مطالعه قرار گرفته است. از جمله نکات برجسته این مقاله، نحوه اثربخشی بازتاب‌های مختلف دیواره، در توان لامپ و نرخ جریان مختلف می‌باشد تا به این ترتیب بتوان شناخت بهتری از تاثیر بازتاب بر عملکرد مخزن ضدعفونی پیدا کرد. نکته دیگر در این مقاله، ارزیابی و مقایسه میزان تأثیرپذیری غیرفعال‌سازی میکروارگانیزم‌های باسیلوس سابتیلیس و فاژ MS2، از بازتاب در شرایط گوناگون (دبی، توان لامپ و ضریب گذردهی) است.

۲- معادلات حاکم

چهار گام اساسی حل مسئله مورد مطالعه، شامل پیش‌بینی میدان سرعت، یافتن مسیر ذرات، شبیه‌سازی میدان تابش فرابنفش و ترکیب نتایج زمان ماند ذرات و شدت تابش در هر نقطه از میدان

که دوز فرابنفش^۱ نام دارد [۹]. شبیه‌سازی عددی فرآیند ضدعفونی فرابنفش، در برگیرنده مدل‌های تشعشع برای یافتن توزیع میدان شدت تابش، مدل‌های آشفتگی برای پیش‌بینی میدان جریان و مدل‌های سینتیک غیرفعال‌سازی میکروبی برای نشان دادن پاسخ به تابش دریافتی میکروارگانیزم‌های هدف است [۱۰].

محاسبه میدان تابش یکی از گام‌های اساسی در میزان دوز دریافتی هر ذره است. در سال ۲۰۰۴، لیو و همکاران [۱۱] به ارزیابی هفت مدل محاسباتی برای شبیه‌سازی میدان تابش فرابنفش اطراف یک لامپ پرداخت. یافته‌های آن‌ها، نشان داد که مدل مجموع منابع قطعه‌ای چندگانه^۲ نسبت به سایر مدل‌های تابش دقیق‌تر است ولی هزینه محاسباتی بالایی دارد. هم‌چنین تخمین بالا در نزدیک لامپ و تخمین پایین در نواحی دور از لامپ در مدل جهت‌های مجزا^۳ از دیگر نتایج لیو و همکاران است. این در حالی است که هو [۱۲] در سال ۲۰۰۹، بازتابش و شکست در دیواره‌های کوارتز و نیز اثر بازتابش از سطوح درونی مخزن فرابنفش را مورد بررسی قرار داد. در پژوهش عددی وی، مطالعه لیو و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۰۴، با استفاده از مدل تابش جهت‌های مجزا و پرداختن به جزئیات بیش‌تر این مدل، توسعه داده شد. نتایج نشان دادند که صرف‌نظر کردن از بازتابش و اثر شکست در سطوح داخلی و خارجی منجر به افزایش تابش شبیه‌سازی شده در نزدیک لامپ و کاهش آن در نواحی دور از لامپ می‌شود.

علی‌رغم مطالعات نسبتاً گسترده در حوزه مخازن فرابنفش، کارهای محدودی در زمینه پرداختن به اثر بازتاب دیواره‌های درونی بر بهبود عملکرد مخازن فرابنفش صورت پذیرفته است. در سال ۲۰۱۱، چن و همکاران [۱۳]، با مدل پی-ال^۴ P-1 اصلاح‌شده به حل میدان تابش در مخزن ضدعفونی فرابنفش پرداختند. در این مطالعه، بازتاب از دیواره‌ها سبب افزایش توزیع نرخ تابش به ویژه در نواحی نزدیک دیواره شد و با افزایش ضریب گذردهی اثر بازتاب بر پارامترهای مذکور بیش‌تر دیده شد که اهمیت توجه به بازتاب در سطوح غیرفعال‌سازی بالاتر را نشان می‌دهد.

لی و همکاران [۱۴]، در سال ۲۰۱۲، پژوهش تجربی خود را با سه جنس گوناگون برای دیواره‌های مخزن فرابنفش انجام دادند. ضریب گذردهی فرابنفش آب در آزمایش‌های آن‌ها، در گستره‌ای از

1 UV Dose
2 Multiple Segment Source Summation (MSSS)
3 Discrete Ordinate (DOM)
4 P-1

مقادیر ضرایب σ_k ، β^* ، γ ، β ، σ_ω ، F_1 و $\sigma_{\omega,2}$ موجود در روابط (۳) و (۴)، به صورت زیر است [۱۹].

$$\sigma_k = F_1/\sigma_{k,1} + (1-F_1)/\sigma_{k,2}, \sigma_\omega = F_1/\sigma_{\omega,1} + (1-F_1)/\sigma_{\omega,2}$$

$$F_1 = \tanh(\phi_1^4), \phi_1 = \min[\max(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega^+ y^2}]$$

$$D_\omega^+ = \max[2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10}] \quad (5)$$

$$\gamma_\infty = F_1 \gamma_{\infty,1} + (1-F_1) \gamma_{\infty,2}$$

$$\gamma_{\infty,1} = \frac{\beta_{i,1}}{\beta_\infty^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,1} \sqrt{\beta_\infty^*}}, \gamma_{\infty,2} = \frac{\beta_{i,2}}{\beta_\infty^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,2} \sqrt{\beta_\infty^*}}$$

$$\beta_i = F_1 \beta_{i,1} + (1-F_1) \beta_{i,2}$$

$$\sigma_{k,1} = 1.176, \sigma_{\omega,1} = 2.0, \sigma_{k,2} = 1.0, \sigma_{\omega,2} = 1.168,$$

$$a_1 = 0.31$$

$$\beta_{i,1} = 0.075, \kappa = 0.41, \beta^* = 0.09, \beta_{i,2} = 0.0828$$

نکته‌ای که در توضیح دلیل استفاده از مدل آشفتنی کا-امگا اس. اس. تی در این مقاله باید متذکر شد، این است که محاسبه دقیق‌تر میدان تابش به‌ویژه در نزدیک دیواره لامپ‌ها، نیازمند ایجاد سلول‌های محاسباتی ریزتر است. ریزشدن شبکه نزدیک دیواره، γ نخستین سلول محاسباتی را طوری تغییر می‌دهد که شبکه به دست آمده، مناسب مدلهایی مانند کا-امگا اس. اس. تی است. این مسئله دلیلی شد بر شبیه‌سازی میدان جریان با مدل‌های آشفتنی رینولدز متوسط و مقایسه نتایج با داده‌های تجربی ولز، که در نهایت نتایج مدل کا-امگا اس. اس. تی مطابقت بیشتری با داده‌های تجربی نشان داد. در ضمن این مدل در مطالعات پیشین از جمله کار لیو و همکاران [۱۰] موفق عمل نموده است.

در این مطالعه، از مدل جهت‌های مجزا برای محاسبات میدان تابش استفاده شده است [۲۰-۲۲]. این مدل، معادله انتقال تابش^۳ را در هر حجم کنترل برای تعداد متناهی از زاویه‌های فضایی برای تابش غیرخاکستری حل می‌شود [۲۳]. در این پژوهش از لامپ فشار پایین استفاده شده است که این نوع لامپ به گسیل تابش تک‌رنگ با طول موج تقریباً ۲۵۴ نانومتر می‌انجامد [۲۴]. در واقع میکروارگانیزم‌ها در این طول موج بیش‌ترین میزان جذب تابش فرابنفش را دارند [۲۵].

حل با هدف محاسبه دوز دریافتی ذرات میکروارگانیزم است. در پایان، دوز محاسبه‌شده، برای یافتن لگاریتم غیرفعال‌سازی به عنوان شاخص عملکرد راکتور، به کار می‌رود که برای این منظور از مدل‌های سینتیک غیرفعال‌سازی هر یک از میکروارگانیزم‌های هدف، استفاده می‌شود. بنابراین، در این بخش به شرح مختصر معادلات حاکم در هر گام، پرداخته می‌شود.

معادله پیوستگی و بقای مومنتوم، معادلات حاکم بر حرکت سیال هستند که با فرض تراکم‌ناپذیری سیال، هم‌دمایی (دمایی حدود ۲۰ درجه سلسیوس در میدان حل) و ویژگی‌های فیزیکی ثابت برای سیال، در شرایط پایا حل می‌شوند [۱۶ و ۱۷]. با توجه به سرعت‌های جریان ورودی، اعداد رینولدز در بازه‌ای از ۷۰۰۰ تا ۱۴۰۰۰ قرار دارد که به ایجاد جریان آشفته می‌انجامد. برای شبیه‌سازی جریان آشفته از مدل آشفتنی کا-امگا اس. اس. تی^۱ استفاده می‌شود [۱۸]. روابط زیر که شامل معادله پیوستگی، بقای مومنتوم، k و ω است، برای شبیه‌سازی میدان جریان استفاده می‌شود:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + v_t) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_k v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + p_k - \beta^* k \omega \quad (3)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\gamma P_k}{\rho v_t} - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_\omega v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right]$$

$$+ 2(1-F_1) \sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (4)$$

در روابط (۱) تا (۴)، ρ چگالی سیال، x_i ($i=1,2,3$) مختصات دکارتی، \bar{u}_i اجزای دکارتی سرعت میانگین، P فشار استاتیکی، v لزجت سینماتیکی، v_t لزجت سینماتیکی آشفتنی، k انرژی جنبشی توربولانسی به ازای واحد جرم، p_k تولید انرژی جنبشی آشفتنی به سبب گرادیان سرعت متوسط و ω نرخ مشخصه اضمحلال^۲ است.

1 k- ω SST
2 Specific Rate of Dissipation

جدول ۱. توابع پاسخ به دوز به کار رفته
Table 1. Applied dose response functions

$N/N_0 = 10^{-(k_1 D + k_2)}$ $k_1 = 0.064 \text{ cm}^2/\text{mJ}.\text{Sec} , k_2 = 0.361$	مدل چیک-واتسون [۱۰] (MS2)
$N/N_0 = (1 - (1 - 10^{-k_1 D})^{10k_2})$ $k_1 = 0.063 \text{ cm}^2/\text{mJ}.\text{Sec} , k_2 = 0.49$	مدل به کار برده شده ولز [۳۲] (باسیلوس سابتیلیس)

جریان متأثر از تغییر قطر در بازه ۰/۵ تا ۱۰ میکرون و تغییر شکل ذرات میکروارگانیزم نیست و در نتیجه، میزان دوز فرابنفش دریافتی ذرات، دچار تغییر محسوس نمی‌شود. همین امر سبب شد که همه ذرات میکروارگانیزم، کروی و با قطر یک میکرون به ورودی مخزن تزریق شوند.

به دلیل نزدیک بودن چگالی آب و ذرات میکروارگانیزم، از نیروی جرم مجازی و گرادیان فشار نمی‌توان صرف‌نظر نمود. نیروی پسا از دیگر نیروهای وارد بر ذرات است [۲۱، ۲۹، ۳۱]. به دلیل این‌که چگالی ذرات بسیار نزدیک به چگالی آب در نظر گرفته شده است [۱۷]، نیروی شناوری ناچیز در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این‌که جریان فاز پیوسته آشفته فرض می‌شود، پخش براونی در مقایسه با پخش آشفته ناچیز است. بنابراین می‌توان نیروی براونی را در معادله نهایی در نظر نگرفت [۲۹].

تابع غیرفعال‌سازی پاسخ به دوز با توجه به نوع میکروارگانیزم متفاوت است. در این پژوهش، برای فاز MS2، رابطه پاسخ به دوز موسوم به مدل چیک-واتسون است که در مطالعه لیو و همکاران استفاده شده است [۱۰]. مدل استفاده شده برای بررسی پاسخ به دوز هاگ‌های باسیلوس سابتیلیس، همان مدل مورد استفاده در کار ولز است [۳۲]. روابط این مدل‌ها در جدول ۱ قابل مشاهده است.

با استفاده از تابع تعریف‌شده کاربر^۱ نوشته شده و به کار بردن آن در نرم‌افزار فلونت، دوز دریافتی هر ذره با استفاده از انتگرال زمانی شدت تابش مطابق رابطه (۹) محاسبه شد [۳۳].

$$D = \int Idt \quad (9)$$

بنابراین با یافتن توزیع دوز ذرات و با به کار بردن رابطه (۱۰)، غیرفعال‌سازی کلی میکروبی حاصل می‌گردد [۱۰].

صرف‌نظر نمودن از پراکندگی تابش ذرات معلق، معادله انتقال تابش به صورت زیر ساده می‌شود [۲۳]:

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s})\vec{s}) + aI(\vec{r}, \vec{s}) = 0 \quad (6)$$

که I شدت تابش، \vec{r} بردار مکان، \vec{s} بردار جهت و a ضریب جذب است.

مقدار بازتاب دیواره‌های مخزن از رابطه (۷) محاسبه می‌شود [۱۵].

$$R = 1 - \varepsilon \quad (7)$$

ε ضریب گسیل درونی مربوط به دیواره و R ضریب بازتاب در سطح است.

بیر-لامبرت ارتباط ضریب گذردهی فرابنفش و ضریب جذب آب را طبق رابطه (۸) بیان می‌کند [۲۶].

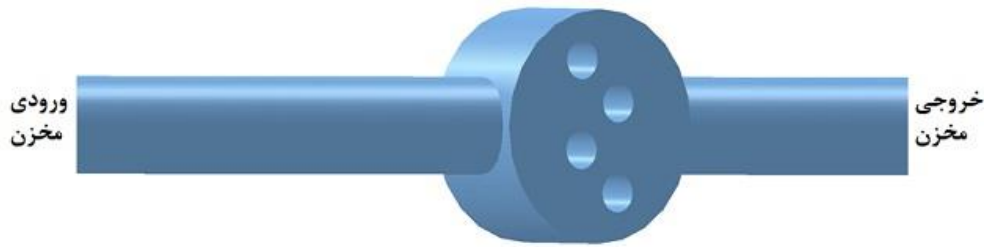
$$UVT = e^{-ax} \quad (8)$$

a ضریب جذب، x فاصله بین دو نقطه در ماده (به ازای یک سانتی‌متر) و UVT ضریب گذردهی فرابنفش است.

به دلیل گسسته بودن فاز ذرات، دیدگاه لاگرانژی برای مسیریابی ذرات استفاده شد [۲۷ و ۲۸]. از این‌رو بعد از به دست آمدن سرعت از حل میدان جریان و با در نظر گرفتن تعادل نیروهای وارد بر تک‌تک ذرات، سرعت و مسیر حرکت هر یک از ذرات به دست می‌آید [۲۱].

ذرات میکروارگانیزم باسیلوس سابتیلیس و باکتیوفاژ MS2 به عنوان میکروارگانیزم‌های هدف در نظر گرفته شدند. نسبت حجمی ذرات، با توجه به قطر میکروارگانیزم‌های هدف، دارای مقدار بسیار کوچک‌تری از یک است. بنابراین می‌توان از اثر ذرات بر یکدیگر و نیز بر میدان جریان چشم‌پوشی کرد [۲۹]. همچنین براساس پژوهش خو و همکاران [۳۰]، اندرکنش ذره بر ذره دیگر و ذره بر میدان

1 User Defined Function (UDF)



شکل ۱. هندسه مخزن فرابنفش
Fig. 1. Geometry of the UV reactor

جدول ۲. مشخصات میکروارگانیسم‌های تزریق شده به مخزن در دیدگاه لاگرانژی [۱۷ و ۳۰]

Table 2. Characteristics of microorganisms injected into the reactor in Lagrangian approach [30, 17]

میکروارگانیسم هدف	قطر (μm)	چگالی (kg / m ³)	تعداد ذرات تزریق شده	دما (کلوین)	شکل ذره	مدل غیرفعال‌سازی
فاز MS2	۱	۱۰۰۰	۵۰۰۰	۲۹۳/۱۵	کروی	چیک-واتسون
باسیلوس سابتیلیس	۱	۱۰۰۰	۵۰۰۰	۲۹۳/۱۵	کروی	مدل ولز

در این مطالعه، شبکه‌بندی مدل هندسی با استفاده از نرم‌افزار مش‌زنی انسیس^۱ انجام پذیرفت. این شبکه‌بندی در لوله‌های ورودی و خروجی به صورت سازمان‌یافته^۲ و در بخش اصلی مخزن به علت پیچیدگی هندسه، شبکه‌ای بدون ساختار ایجاد شد. مدل آشفتگی به کار برده شده، نیاز به $\gamma+$ کم‌تر از یک در نواحی نزدیک دیواره‌ها، دارد؛ بنابراین در مرزها (مانند نزدیک دیواره‌ها و پوشش کوارتز)، شبکه‌بندی لایه‌مرزی در نظر گرفته شد.

برای شبیه‌سازی میدان جریان، میدان تابش و مسیر حرکت میکروارگانیسم‌ها از بسته تجاری انسیس فلونت^۳ بهره گرفته شد. تقریب بالادست مرتبه اول برای گسسته‌سازی ترم‌های جابه‌جایی استفاده شد. در همه حالت‌ها از الگوریتم سیمپل^۴، برای ترکیب سرعت و فشار، استفاده شد [۳۴]. شرط مرزی ورودی سرعت ترکیب به ازای دو دبی $4/9$ و $2/5$ متر مکعب بر ساعت (اعداد رینولدز 7000 و 14000) و در خروجی مخزن شرط مرزی فشار در نظر گرفته شد. شرط عدم لغزش برای همه دیواره‌ها (مانند دیواره‌های مخزن

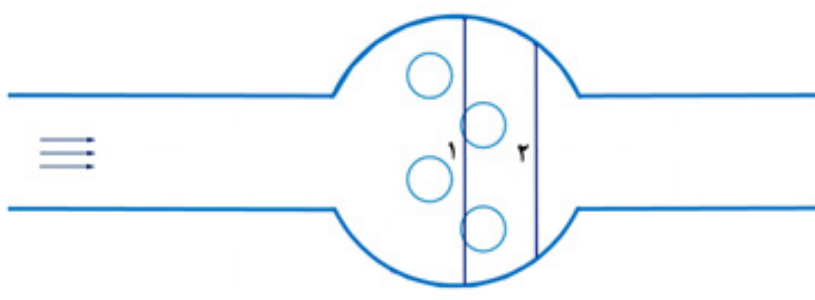
$$\frac{N}{N_0} = \int_0^{\infty} f(D)E(D)dD \quad (10)$$

که در این رابطه، D دوز ذرات بر حسب میلی‌ژول بر سانتی‌متر مربع، $E(D)$ تابع غیرفعال‌سازی پاسخ دوز، N/N_0 نسبت تعداد میکروارگانیسم‌های زنده در خروجی مخزن به تعداد میکروارگانیسم‌های اولیه و $E(D)$ کسر تعداد ذرات را نشان می‌دهد.

۳- روند شبیه‌سازی

مدل هندسه مورد استفاده در این مطالعه، مخزن فرابنفش جریان متقاطع است که در شکل ۱ نشان داده شده است. قطر لوله ورودی مخزن $0/125$ متر و به منظور دستیابی به جریان کاملاً توسعه‌یافته آشفته، طول آن 50 برابر قطر، در نظر گرفته شده است. قطر لوله خروجی نیز، $0/125$ متر است و طولی معادل 1 متر دارد. بخش اصلی مخزن، یک استوانه با قطر $0/3$ متر و طول $0/15$ متر، دارای چهار لوله استوانه‌ای از جنس کوارتز (پوشش لامپ‌های فرابنفش)، عمود بر جریان مخزن است که قطر هر یک از لوله‌های کوارتز، $0/478$ متر است.

1 Ansys Meshing
2 Structured
3 Ansys Fluent
4 SIMPLE



شکل ۲. خطوط به کار برده شده در محاسبه سرعت
Fig. 2. Lines used in the velocity calculation

آشفته‌گی بر ذرات مدل تصادفی واک^۲ به کار گرفته شد [۳۵]. جدول ۲، مشخصات دو نوع از میکروارگانیزم‌های ورودی به مخزن را نشان می‌دهد.

همان‌طور که پیش از این ذکر شد، در گام نخست، میدان سرعت و در گام دوم مسیر ذرات میکروارگانیزم متأثر از میدان جریان آب، به دست می‌آید. در گام سوم، با حل معادله (۵)، شدت تابش در هر سلول محاسباتی حاصل می‌شود. با ترکیب نتایج مربوط به مسیر ذرات و شدت تابش با استفاده از رابطه (۸)، میزان دوز دریافتی هر ذره در طول مسیر حرکت، محاسبه می‌شود. در واقع محاسبه دوز به عنوان گام چهارم فرآیند حل مسئله، با نوشتن کد در نرم‌افزار فلوئنت صورت گرفته است. لازم به ذکر است که به منظور محاسبه دوز دریافتی ذرات در کد تعریف شده کاربر، طبق رابطه (۹)، انتگرال‌گیری به صورت دوزنقه‌ای انجام شده است. در پایان، با استفاده از دوز دریافتی هر ذره در طی مسیر و هم‌چنین به کار بردن مدل‌های سینتیک غیرفعال‌سازی میکروارگانیزم هدف در رابطه (۱۰) و لگاریتم‌گیری از مقدار به دست آمده از این رابطه، لگاریتم غیرفعال‌سازی محاسبه می‌شود.

۴- نتایج

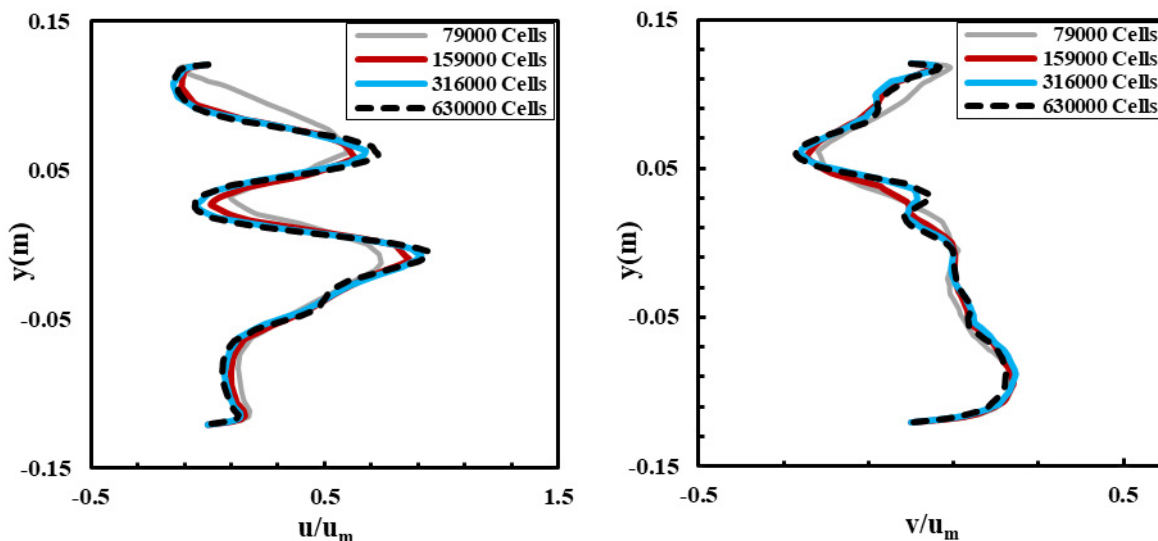
۴-۱- استقلال از شبکه

مطالعه استقلال حل میدان جریان از شبکه محاسباتی در مقطع شماره ۲ نمایش داده شده در شکل ۲، که عمود بر مسیر جریان بر روی صفحه مرکزی مخزن قرار دارد، برای سرعت محوری و عمودی (سرعت‌های بی‌بعد شده با سرعت میانگین در لوله) انجام شده است.

و لامپ‌ها) قرار داده شد. شدت آشفته‌گی جریان کاملاً توسعه یافته درون لوله تقریباً برابر $0.16 \times Re^{-1/8}$ است، با توجه به محدوده عدد رینولدز جریان داخل لوله، این مقدار برای مدل مورد بررسی ۵ درصد در نظر گرفته شد. معیار همگرایی برای معادلات پیوستگی، مومنوم و آشفته‌گی، مقدار باقیمانده کمتر از 10^{-5} است.

برای حل معادله انتقال تابش به کمک مدل جهت‌های مجزا، نیاز به گسسته‌سازی فضای زاویه‌ای است که در این مطالعه، هریک از زوایای قطبی و سمتی که برای یک‌هشتم فضای زاویه‌ای در نظر گرفته می‌شود، در هفت جهت گسسته شد. تعداد پیکسل‌های هر زاویه کنترل نیز پنج قرار داده شد. دو نوع لامپ در این مطالعه استفاده شده است که توان UVC کل مخزن برای یکی ۳۱/۹ وات و برای دیگری ۴۶/۹ وات است. سطح هریک از لامپ‌ها به عنوان جسم نیمه‌شفاف و سطوح دیگر مانند دیواره‌های مخزن فرابنفش مات در نظر گرفته شد. شدت تابش در سطح هر لامپ، برای لامپ نوع اول ۳۵۴ وات بر مترمربع و برای لامپ نوع دوم، ۵۲۰ وات بر مترمربع است. برای سطوح مات، با توجه به مقادیر متفاوت برای بازتاب، مقادیر ضریب گسیل درونی در بازه‌ای از ۰ تا ۱ متغیر است. در هر دو سطح نیمه‌شفاف و مات، مقدار ضریب بازتاب پخش، ۱ قرار داده شد. ضریب گذردهی فرابنفش در این پژوهش ۸۷/۷ و ۷۸/۵ درصد مطابق با آزمایش ولز در نظر گرفته شد. معیار همگرایی برای معادله تابش، مقدار باقیمانده کمتر از 10^{-6} است.

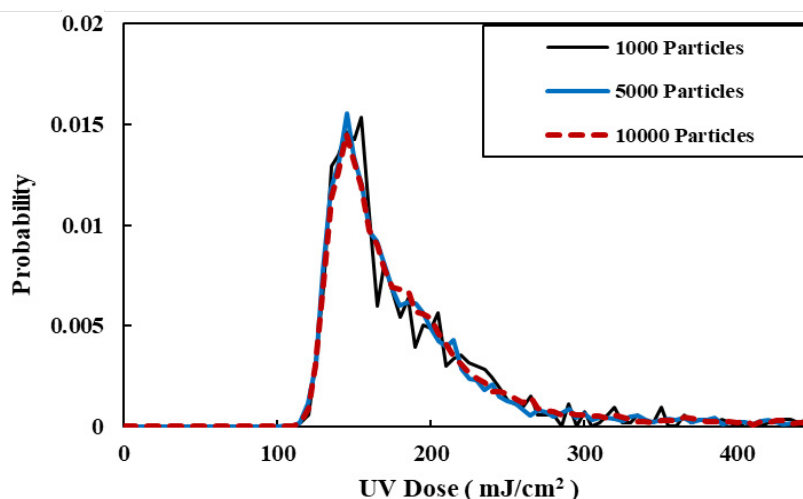
حدود ۵۰۰۰ هزار ذره از ورودی مخزن به درون جریان تزریق شد و شرط مرزی بازتابش در دیواره‌ها در نظر گرفته شد. شرط مرزی خروجی برای ذرات، اسکپ^۱ قرار داده شد. به منظور اعمال اثر



الف- خط ۱

ب- خط ۲

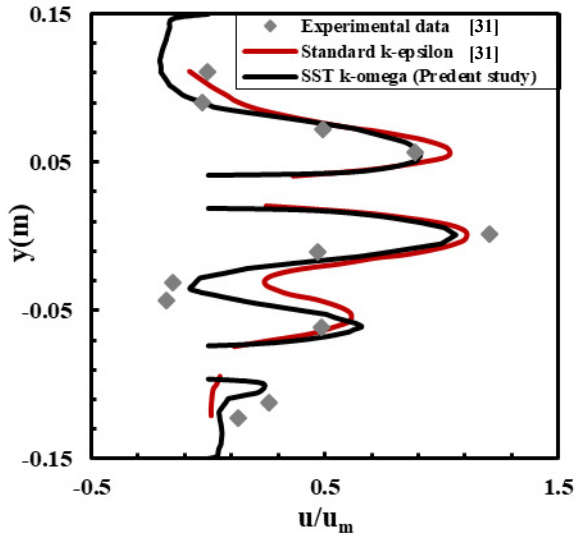
شکل ۳. میدان سرعت عمودی و محوری در چهار شبکه بندی گوناگون
Fig. 3. Axial and vertical velocity field in four different grids



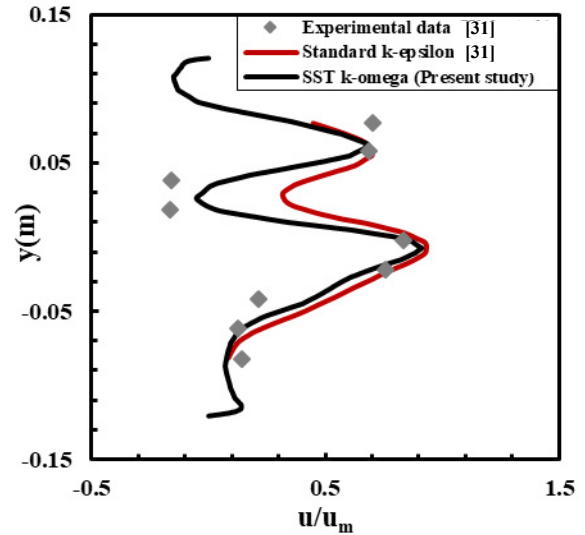
شکل ۴. توزیع دوز دریافتی ذرات در سه حالت از تعداد ذرات تزریق شده
Fig. 4. Particles received dose distribution in three states of number of injected particles

و ۳۱۶ هزار سلول قابل چشم پوشی نباشد. از این رو برای کمینه نمودن اختلاف در نتایج به دست آمده در شبکه بندی های موجود، شبکه بندی حالت ۶۳۰ هزار سلول مد نظر قرار گرفت که با مقایسه سرعت محوری و عمودی، اختلاف بسیار ناچیز در نتایج سرعت حالت ۳۱۶ هزار و ۶۳۰ هزار سلول، مشاهده شد. بنابراین شبکه بندی حالت ۳۱۶ هزار سلول، به دلیل نزدیکی مطلوب نتایج به شبکه بندی حالت ۶۳۰ هزار سلول و نیز کاهش هزینه محاسباتی، شبکه بندی مناسب برای

در شکل ۳، اختلاف سرعت محوری و عمودی در شبکه بندی حالت ۷۹ هزار و ۱۵۹ هزار، به ویژه در نقاطی نزدیک دیواره بالایی روی خط واقع در میدان حل، به خوبی نمایان است. با وجود افزایش تعداد سلول های محاسباتی و دستیابی به شبکه بندی حالت ۳۱۶ هزار سلول، اختلاف سرعت محوری آن نسبت به شبکه بندی حالت پیشین به وضوح دیده می شود و همین موضوع سبب می شود که اختلاف نتایج در شبکه بندی حالت ۱۵۹ هزار سلول



الف- خط ۱



ب- خط ۲

شکل ۵. سرعت محوری داده‌های تجربی و عددی ولز و نتایج عددی کنونی

Fig. 5. Axial velocity of Wols's experimental and numerical data and current numerical results

دیواره، جریان برگشتی (سرعت منفی) را پیش‌بینی نموده است که به دلیل عدم وجود داده اندازه‌گیری شده در این ناحیه، امکان اظهار نظر درباره صحت پیش‌بینی وجود ندارد. همان‌طور که انتظار می‌رفت در بخش‌های میان لامپ‌ها در مقطع ۱، نواحی پرسرعت دیده می‌شود که مدل عددی حاضر به خوبی توانسته است بر داده‌های تجربی منطبق گردد.

در بخشی از مقطع ۱، مطابق با اندازه‌گیری‌های تجربی، جریان برگشتی مشاهده می‌شود و پیش‌بینی کنونی تا حدود نسبتاً مطلوبی توانسته است به این اندازه‌گیری‌ها نزدیک گردد، در حالی که در مدل عددی پیشین انحراف بسیار زیادی از داده‌های تجربی در پیش‌بینی جریان برگشتی دیده می‌شود. در مقطع ۱، در بخش پایینی در نزدیک دیواره مخزن، محاسبه سرعت محوری در مدل عددی کنونی نسبت به مدل ولز بهتر انجام شده است.

مدل حاضر، سرعت محوری در قسمت بالایی مقطع ۲ در نزدیک دیواره را برگشتی محاسبه نموده است. در ناحیه مرکزی جریان مدل کنونی و نیز مدل عددی ولز به خوبی با نتایج تجربی مطابقت دارد ولی همچنان قسمتی از جریان که جریان برگشتی را تجربه می‌کند، نتوانسته با مدل ولز محاسبه گردد و در مدل حاضر گرچه انحراف از داده‌های تجربی دیده می‌شود، ولی در پیش‌بینی جریان برگشتی این

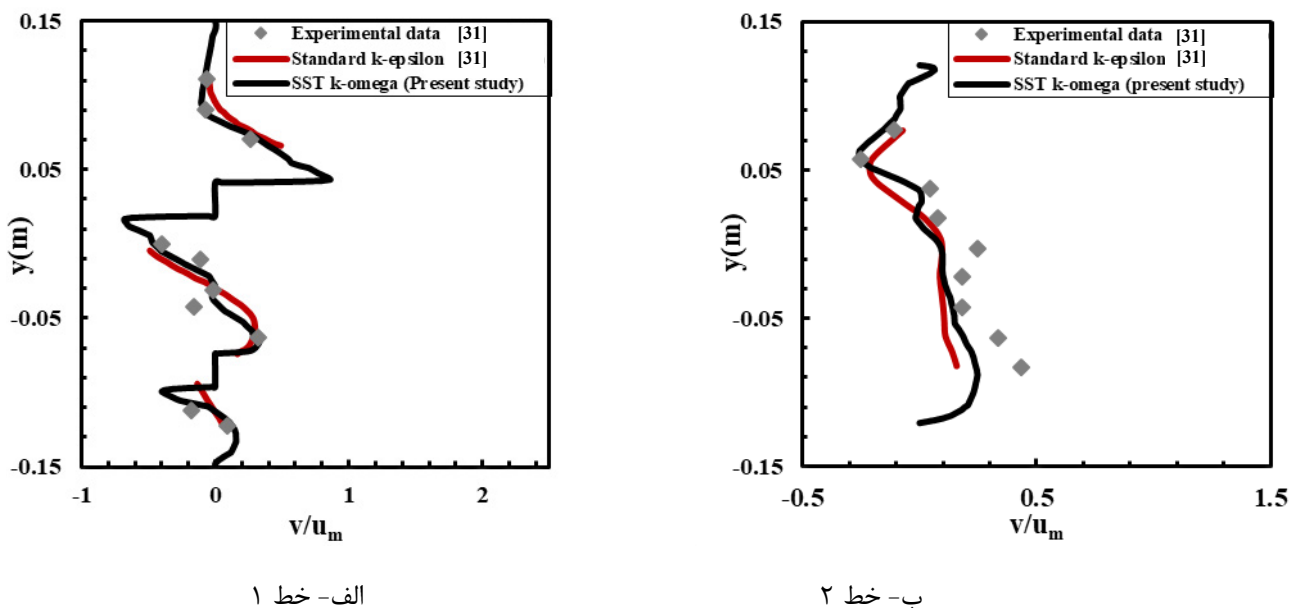
ادامه محاسبات در نظر گرفته شد.

۴-۲- استقلال از تعداد ذرات

بررسی استقلال شبکه از تعداد ذرات، با هدف رسیدن به دقت مطلوب و کاهش هزینه محاسباتی، با استفاده از تزریق ۱ هزار، ۵ هزار و ۱۰ هزار ذره در شبکه‌بندی ۳۱۶ هزار سلول، انجام پذیرفت. بررسی استقلال از تعداد ذرات برای منحنی توزیع دوز دریافتی ذرات مطابق با شکل ۴، انجام شد. منحنی توزیع دوز در حالت تزریق هزار ذره نسبت به ۵ هزار ذره دارای اختلاف است. با افزایش ذرات تزریق شده به ۱۰ هزار و مقایسه با منحنی توزیع دوز ۵ هزار ذره، اختلاف اندکی در دو منحنی مشاهده گردید که تعداد ۵ هزار ذره به عنوان ذرات تزریق شده در ورودی مخزن انتخاب گردید.

۴-۳- راستی‌آزمایی

در شکل‌های ۵ و ۶، در دو مقطع میانی مخزن فرابنفش که در شکل ۲ مشخص شده است، به مقایسه سرعت محوری و عمودی بی‌بعد (بی‌بعد شده با سرعت میانگین در لوله) به دست آمده از مدل آشفتگی کنونی، داده‌های اندازه‌گیری و مدل عددی ولز [۳۲]، پرداخته شده است. مدل آشفتگی کنونی، در قسمت بالایی مقطع ۱ در نزدیک



شکل ۶. سرعت عمودی داده‌های تجربی و عددی ولز و نتایج عددی کنونی
Fig. 6. Vertical velocity of Wols's experimental and numerical data and current numerical results

از مدل عددی ولز، در محدوده دوز پایین، مدل تابش به کار برده شده در مطالعه حاضر (مدل جهت‌های مجزا) و مطالعه عددی ولز (مدل مجموع منابع قطعه‌ای چندگانه) است. در حقیقت در مدل تابشی کنونی، صرف‌نظر کردن از اعمال شکست پرتو فرابنفش در عبور از سطح مشترک هوا-کوارتز و کوارتز-آب و همچنین بازتاب از سطح کوارتز، منجر به افزایش کمینه دوز دریافتی در این پژوهش نسبت به نتایج عددی ولز شده است.

انحراف نتایج عددی حاضر از داده‌های تجربی در ضریب گذردهی ۷۸/۵ درصد (شکل ۷ الف) نسبت به این نتایج در ضریب گذردهی ۸۷/۷ درصد (شکل ۷ ب)، به‌طور مطلوبی کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که منحنی توزیع دوز به دست آمده از مدل آشفستگی کنونی نسبت به مدل عددی ولز از انطباق بهتری با داده‌های تجربی، برخوردار است و با این نتایج دقت مناسب مدل جهت‌های مجزا در ضرایب گذردهی پایین مورد تأیید واقع می‌گردد.

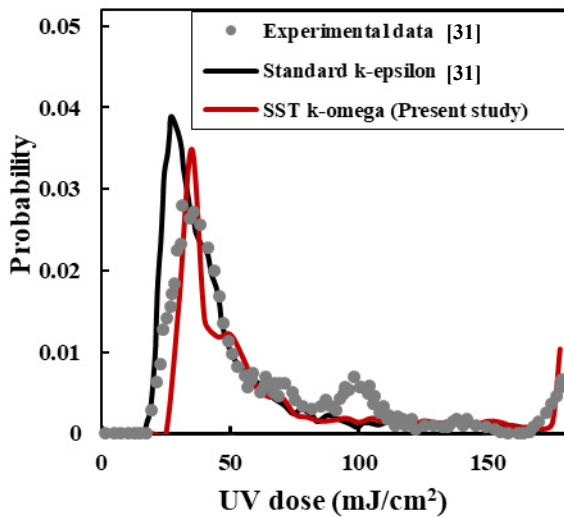
آن‌چه در همه منحنی‌های توزیع دوز دیده می‌شود، قرار داشتن شمار زیادی از ذرات میکروارگانیزم در محدوده دوز پایین است که نشان‌دهنده عبور این ذرات از بخش پرسرعت بین لامپ‌ها است. در مجموع، حضور شمار کم‌تری از ذرات، در بازه‌ای از دوز بالا، از گیر افتادن ذرات در نواحی چرخشی میدان جریان حکایت دارد. مدل

ناحیه توان‌مند ظاهر شده است.

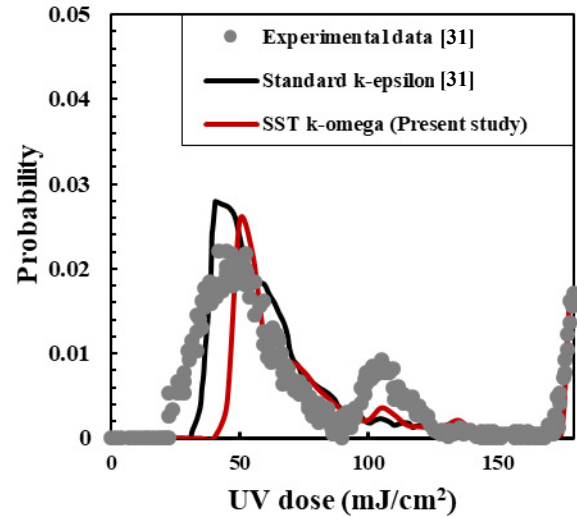
مدل کنونی، سرعت عمودی مقطع ۱ را در نزدیک دیواره بالای مخزن جریان رو به پایین (سرعت عمودی منفی) محاسبه نموده است. در نواحی میانی جریان که محل جریان اصلی است، علی‌رغم پیش‌بینی ضعیف سرعت عمودی، محاسبات انجام شده به نحو بسیار مطلوبی به داده‌های اندازه‌گیری شده ولز نزدیک است. قسمت بالایی در مقطع ۲ نشان‌دهنده حرکت جریان به سمت پایین است و در انتهای مخزن جریانی بالارونده مشاهده می‌شود.

در شکل‌های ۷ الف و ب، مقایسه توزیع دوز دریافتی ذرات که با استفاده از مدل آشفستگی کا-امگا-اس.اس.تی محاسبه شده است با داده‌های به دست آمده از آزمایش پرتونگاری لاگرانژی^۱ و بررسی عددی ولز [۳۲]، در مقادیر ضریب گذردهی فرابنفش ۷۸/۵ و ۸۷/۷ درصد، قابل مشاهده است. تفاوت میان دیدگاه‌های مدل‌سازی در محدوده دوز پایین محسوس است، با این حال روند کلی توزیع دوز دریافتی محاسبه‌شده در مدل آشفستگی مورد مطالعه با داده‌های تجربی و نتایج عددی ولز مشابهت دارد. از آن جا که میدان جریان پیش‌بینی‌شده کنونی به اندازه‌گیری‌های تجربی ولز، با دقت بسیار بالایی نزدیک است، منشأ انحراف منحنی توزیع دوز مدل‌های کنونی

1 Lagrangian Actinometry



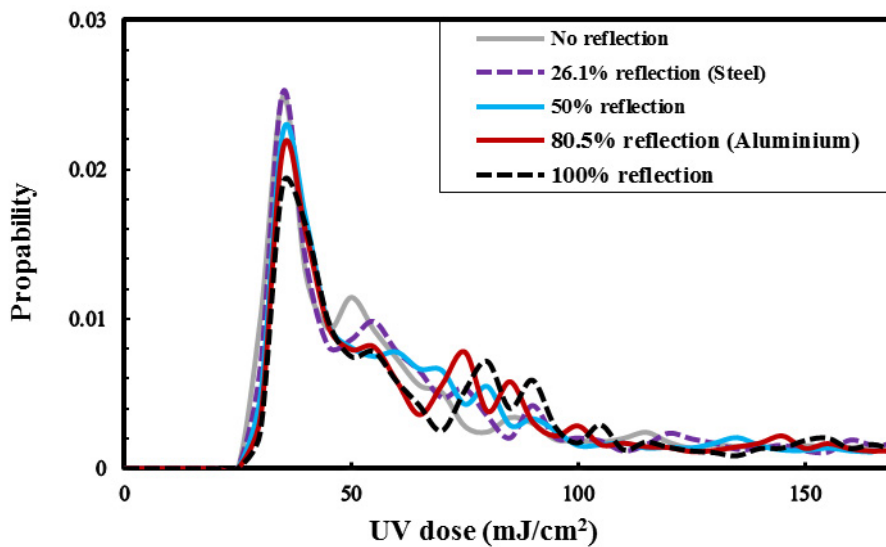
الف- ضریب گذردهی ۷۸/۵ درصد



ب- ضریب گذردهی ۸۷/۷ درصد

شکل ۷. توزیع دوز فرابنفش داده‌های تجربی و عددی ولز و نتایج عددی کنونی

Fig. 7. UV dose distribution of Wols's experimental and numerical data and current numerical results



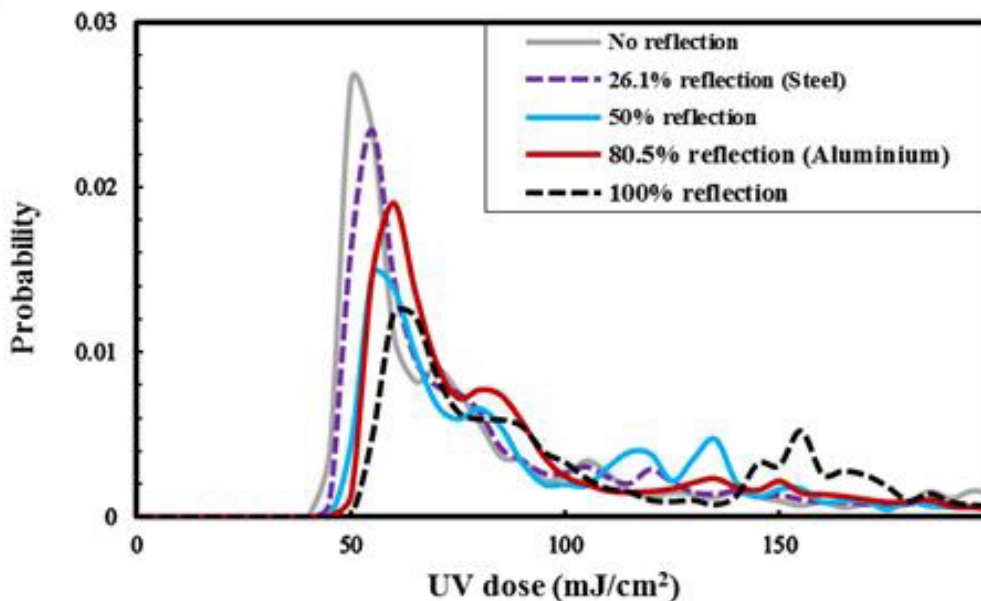
شکل ۸. توزیع دوز فرابنفش در ضریب گذردهی ۷۸/۵ درصد با مقادیر صفر تا صد درصد بازتاب دیواره

Fig. 8. UV dose distribution under 78.5 percent VVT with values of zero to 100 percent wall reflection

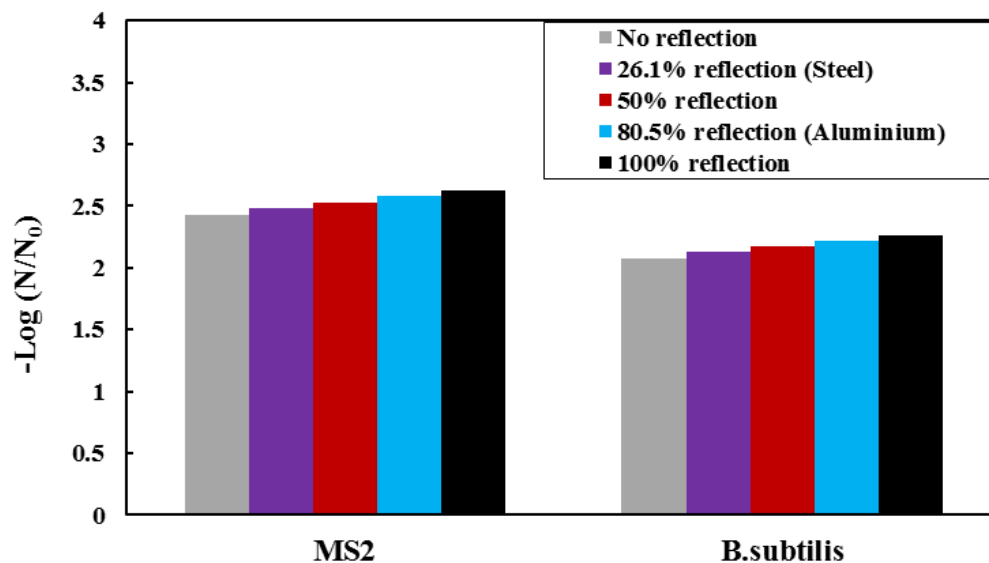
بیشتر جریان، در مدل‌های عددی است. در هر دو ضریب گذردهی، قله منحنی توزیع دوز در مدل عددی ولز بلندتر از داده‌های تجربی است، در حالی که در منحنی مربوط به شبیه‌سازی کنونی به قله منحنی در اندازه‌گیری تجربی نزدیک است. کمینه دوز دریافتی محاسبه شده در مدل عددی ولز بیش از این کمینه در اندازه‌گیری‌های تجربی است و در مدل‌های عددی حاضر، میزان کمینه دوز بیش‌تر شده است.

حاضر، توانسته است در محاسبات دوز بالا، به نتایج تجربی نزدیک‌تر گردد که توانایی پیش‌بینی نواحی پرخشی را در مدل کا-امگا اس. اس. تی، نشان می‌دهد.

نکته دیگر در بازه دوز پایین در منحنی‌های توزیع دوز مدل‌های عددی کنونی و مدل عددی ولز، باریک‌تر بودن منحنی‌ها نسبت به منحنی داده‌های تجربی است و دلیل این موضوع پیش‌بینی اختلاط



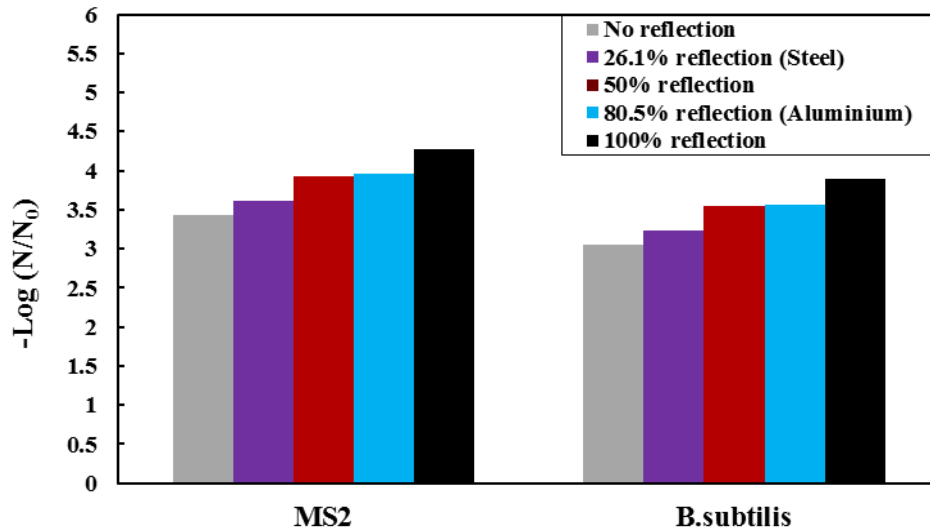
شکل ۹. توزیع دوز فرابنفش در ضریب گذردهی ۸۷/۷ درصد با مقادیر صفر تا صد درصد بازتاب دیواره
 Fig. 9. UV dose distribution under 87.7 percent UVT with values of zero to 100 percent wall reflection



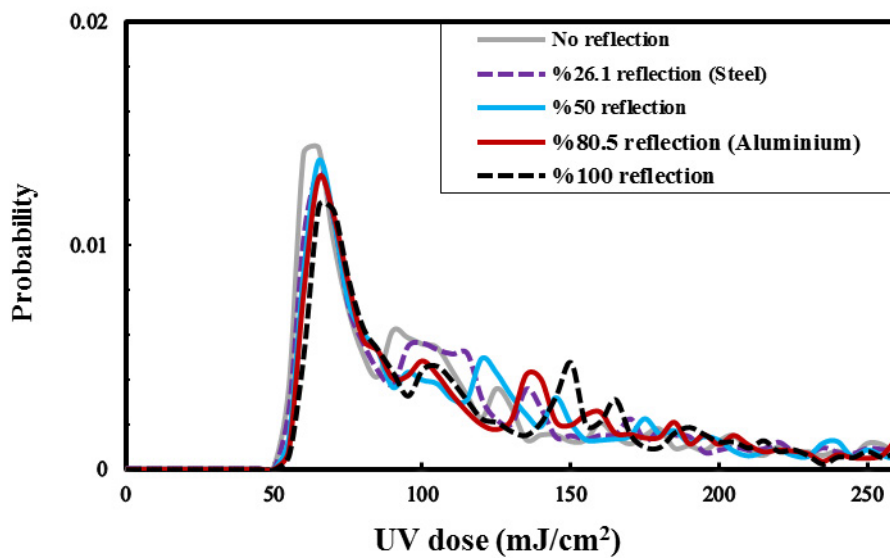
شکل ۱۰. مقادیر لگاریتم غیرفعال سازی در ضریب گذردهی ۷۸/۵ درصد با مقادیر صفر تا صد درصد بازتاب دیواره
 Fig. 10. Log-inactivation values under 78.5 percent UVT with values of zero to 100 percent wall reflection

ایجاد قله ثانویه‌ای در محدوده دوز ۸۰ میلی ژول بر سانتی مترمربع دیده می‌شود که با افزایش بازتاب در مقادیر ۸۰ و ۱۰۰ درصد، این قله نمود بیش تری می‌یابد. قله ثانویه در آزمایش شماره سه و لوز در دوز حدود ۹۷ میلی ژول بر سانتی مترمربع مشاهده می‌شود. بنابراین قله دوم ایجاد شده در آزمایش سوم و لوز، اثر بازتاب دیواره‌های درونی را نمایان می‌سازد.

۴-۴- بازتاب دیواره مخزن در ضریب گذردهی متفاوت در شکل ۸، توزیع دوز فرابنفش در ضریب گذردهی ۷۸/۵ درصد، به ازای شرایط گوناگونی از بازتاب نمایش داده شده است. قله منحنی‌های توزیع دوز در همه حالات بازتاب از دیواره‌های درونی در مقدار دوز ۳۵ میلی ژول بر سانتی مترمربع قرار دارند و تغییر محسوسی در بازه دوز پایین در منحنی توزیع دوز وجود ندارد. در حالت بازتاب ۵۰ درصد،



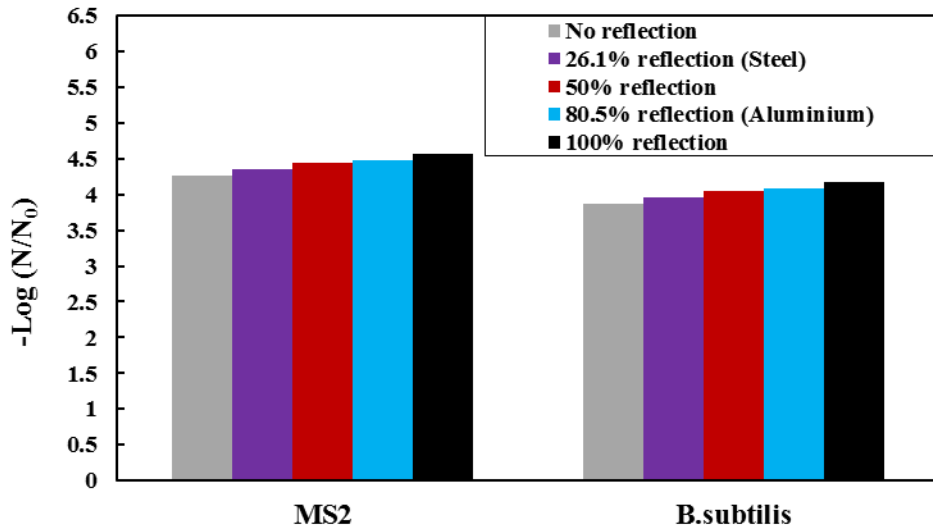
شکل ۱۱. مقادیر لگاریتم غیرفعال سازی در ضریب گذردهی ۸۷/۷ درصد با مقادیر صفر تا صد درصد بازتاب دیواره
 Fig. 11. Log-inactivation values under 87.7 percent UVT with values of zero to 100 percent wall reflection



شکل ۱۲. توزیع دوز فرابنفش در دبی ۲/۵ مترمکعب بر ساعت و ضریب گذردهی ۷۸/۵ درصد با مقادیر صفر تا صد درصد بازتاب دیواره
 Fig. 12. UV dose distribution under 2.5 m³/h flow rate and 78.5 percent UVT with values of zero to 100 percent wall reflection

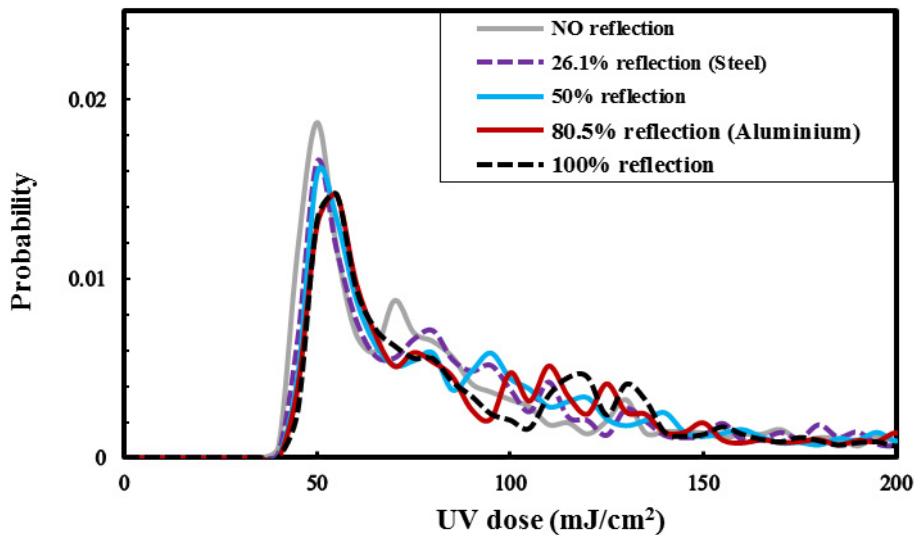
همه حالت‌های بازتاب، قله منحنی توزیع دوز، در بازه‌ای از دوز پایین واقع است. در حالت عدم وجود بازتاب از دیواره‌ها، دوز کمینه دریافتی حدود ۴۰ میلی ژول بر سانتی مترمربع است. با افزایش مقدار بازتاب از دیواره، دوز کمینه دریافتی افزایش می‌یابد به طوری که اختلاف دوز کمینه، در حالت عدم وجود بازتاب و حالت بازتاب صد درصد، ۱۰ میلی ژول بر سانتی مترمربع است.

در شکل ۹، توزیع دوز فرابنفش در ضریب گذردهی ۸۷/۷ درصد به ازای مقادیر متفاوت بازتاب دیواره‌های درونی، نشان داده شده است. روند توزیع دوز دریافتی ذرات در همه حالات بازتاب دیواره درونی گویای این است که اکثر ذرات مقدار دوزی در محدوده کم‌تر از ۱۷۰ میلی ژول بر سانتی مترمربع و به تبع تعداد کم‌تری از این ذرات، دوزهای بیش از ۱۷۰ میلی ژول بر سانتی مترمربع دریافت کرده‌اند. در



شکل ۱۳. مقادیر لگاریتم غیرفعال سازی میکروارگانیسمها در دبی ۲/۵ مترمکعب بر ساعت و ضریب گذردهی ۷۸/۵ درصد با مقادیر صفر تا صد درصد بازتاب دیواره

Fig. 13. Log-inactivation values under 2.5 m³/h flow rate and 78.5 percent UVT with values of zero to 100 percent wall reflection



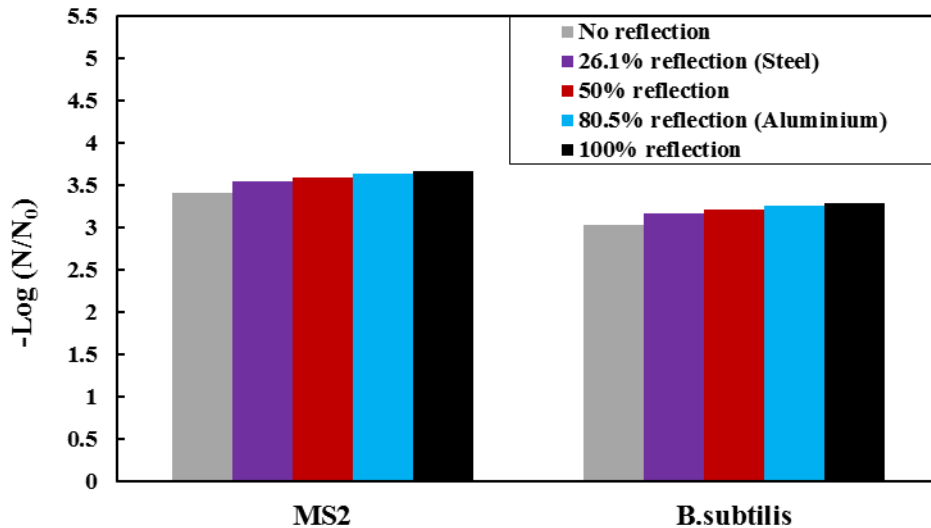
شکل ۱۴. توزیع دوز فرابنفش در توان UVC کلی مخزن با ۴۶/۹ وات و ضریب گذردهی ۷۸/۵ درصد با مقادیر صفر تا صد درصد بازتاب دیواره

Fig. 14. UV dose distribution in the total UVC power of the reactor with 46.9 watts and a of 78.5 percent with zero to 100 percent wall reflection values

دیده می شود که در ضریب گذردهی بالاتر، محدوده دوز دریافتی ذرات در بازه دوز بیش تر واقع است که عملکرد بهتر مخزن فرابنفش را در ضریب گذردهی بالاتر نتیجه می دهد. همچنین اثر بازتاب دیواره ها در بهبود عملکرد مخزن فرابنفش در ضریب گذردهی بالاتر، بیش تر به چشم می خورد.

مطابق شکل ۱۰، در ضریب گذردهی ۷۸/۵، مقادیر لگاریتم

هم چنین با افزایش بازتاب، قله منحنی توزیع دوز به سمت دوزهای بیش تر (۵۰ تا ۶۵ میلی ژول بر سانتی مترمربع) حرکت می کند. در ضریب گذردهی ۸۷/۷ درصد، وجود قله ثانویه برای بازتاب ۱۰۰ درصد در دوز ۱۵۵ میلی ژول بر سانتی مترمربع اتفاق افتاده است که پیش بینی قله دوم با داده های تجربی و لز، اختلاف چشم گیری دارد. با مقایسه منحنی توزیع دوز در ضریب گذردهی ۸۷/۷ و ۷۸/۵ درصد،



شکل ۱۵. مقادیر لگاریتم غیرفعال سازی میکروارگانیزم‌ها در توان UVC کلی مخزن با ۴۶/۹ وات و ضریب گذردهی ۷۸/۵ درصد با مقادیر صفر تا صد درصد بازتاب دیواره

Fig. 15. Log-inactivation values in the total UVC power of the reactor with 46.9 watts and a of 78.5 percent with zero to 100 percent wall reflection values

مترمکعب بر ساعت با ضریب گذردهی ۷۸/۵ درصد نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که منحنی‌های توزیع دوز در هر یک از حالت‌های بازتاب از دیواره‌ها، اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند. در همه حالت‌های بازتاب، بازه دوز کمینه دریافتی حدود ۵۰ تا ۵۵ میلی‌ژول بر سانتی‌مترمربع و قله هر منحنی در بازه ۶۵ تا ۷۰ میلی‌ژول بر سانتی‌مترمربع قرار دارد. بنابراین نقش بازتاب دیواره‌ها در ضریب گذردهی ۷۸/۵، با تغییر دبی جریان چشم‌گیر نبود. در شکل ۱۳، مقادیر لگاریتم غیرفعال سازی میکروارگانیزم‌ها، اثر بازتاب را بسیار اندک نشان می‌دهد به طوری که اختلاف این مقادیر در حالت عدم بازتاب و بازتاب صد درصد برای باکتریوفاژ MS2 حدود ۷ درصد و برای هاگ باسیلوس سابتیلیس ۷/۷ درصد است. افزایش مقادیر دوز دریافتی ذرات و در نتیجه مقادیر لگاریتم غیرفعال سازی در دبی ۲/۵ مترمکعب بر ساعت نسبت به دبی ۴/۹ مترمکعب بر ساعت، از افزایش زمان ماند ذرات در درون مخزن نشأت می‌گیرد.

۴-۶- نقش بازتاب با افزایش توان لامپ

در شکل ۱۴، منحنی توزیع دوز دریافتی ذرات در توان کلی ۴۶/۹ وات با ضریب گذردهی ۷۸/۵ درصد نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که منحنی‌های توزیع دوز با رشد بسیار کوچکی از دوز دریافتی در محدوده دوز پایین در حالت‌های مختلف بازتاب

غیرفعال سازی هر دو نوع میکروارگانیزم با افزایش بازتاب، افزایش می‌یابد ولی این افزایش با رشد نسبتاً اندکی مواجه است. میزان اختلاف لگاریتم غیرفعال سازی برای فاژ MS2 در حالت عدم بازتاب دیواره و بازتاب صددرصد دیواره حدود ۷ درصد و برای هاگ باسیلوس سابتیلیس حدود ۸ درصد است. در شکل ۱۱، لگاریتم غیرفعال سازی دو میکروارگانیزم باسیلوس سابتیلیس و MS2، در ضریب گذردهی ۸۷/۷ درصد مشاهده می‌شود. مقادیر لگاریتم غیرفعال سازی برای هر دو نوع میکروارگانیزم‌ها، با افزایش میزان بازتاب، بیش تر می‌شود. برای میکروارگانیزم MS2، اختلاف مقادیر در حالت عدم وجود بازتاب دیواره‌های درونی و بازتاب صددرصد دیواره، حدود بیست درصد است و برای میکروارگانیزم باسیلوس سابتیلیس، این اختلاف به ۲۱ درصد می‌رسد. نکته دیگری که در ضریب گذردهی ۸۷/۷ درصد دیده می‌شود، اختلاف بسیار اندک مقادیر غیرفعال سازی، در مقادیر بازتاب ۵۰ و ۸۰/۵ درصد است. با مقایسه دو شکل ۱۰ و ۱۱، می‌توان دریافت که بازتاب دیواره‌های درونی در ضریب گذردهی بالاتر به مقادیر لگاریتم غیرفعال سازی بیش تری منتهی شده است؛ همان طور که در صورت عدم وجود بازتاب نیز در ضریب گذردهی بالاتر، عملکرد بهتر مخزن فرابنفش مشاهده می‌شد.

۴-۵- نقش بازتاب با کاهش دبی جریان

در شکل ۱۲، منحنی توزیع دوز دریافتی ذرات در دبی ۲/۵

- ozonation and electro-peroxone pretreatment of surface water on disinfection by-product formation during subsequent chlorination, *Water research*, -322 (2018) 130 332.
- [2] B.E. García, G. Rivas, S. Arzate, J.S. Pérez, Wild bacteria inactivation in WWTP secondary effluents by solar photo-fenton at neutral pH in raceway pond reactors, *Catalysis Today*, 78-72 (2018) 313.
- [3] S.E. Hrudehy, Chlorination disinfection by-products, public health risk tradeoffs and me, *Water research*, (8)43 2092-2057 (2009).
- [4] L. Bach, E.R. Garbelini, S. Stets, P. Peralta-Zamora, A. Emmel, Experimental design as a tool for studying trihalomethanes formation parameters during water chlorination, *Microchemical Journal*, 258-252 (2015) 123.
- [5] M. Polo-López, M. Castro-Alfárez, I. Oller, P. Fernández-Ibáñez, Assessment of solar photo-Fenton, photocatalysis, and H₂O₂ for removal of phytopathogen fungi spores in synthetic and real effluents of urban wastewater, *Chemical Engineering Journal*, 130-122 (2014) 257.
- [6] A. Nocker, M. Shah, B. Dannenmann, K. Schulze-Osthoff, J. Wingender, A.J. Probst, Assessment of UV-C-induced water disinfection by differential PCR-based quantification of bacterial DNA damage, *Journal of microbiological methods*, 95-89 (2018) 149.
- [7] X. Zhou, Z. Li, J. Lan, Y. Yan, N. Zhu, Kinetics of inactivation and photoreactivation of *Escherichia coli* using ultrasound-enhanced UV-C light-emitting diodes disinfection, *Ultrasonics sonochemistry*, 477-471 (2017) 35.
- [8] J.R. Bolton, C.A. Cotton, *The ultraviolet disinfection handbook*, American Water Works Association, 2011.
- [9] B. Wols, W. Uijttewaal, J. Hofman, L. Rietveld, J. Van Dijk, The weaknesses of $k-\epsilon$ model compared to a large-eddy simulation for the prediction of UV dose distributions and disinfection, *Chemical Engineering Journal*, (2)162 536-528 (2010).
- [10] D. Liu, C. Wu, K. Linden, J. Ducoste, Numerical simulation of UV disinfection reactors: Evaluation of alternative turbulence models, *Applied mathematical modelling*, 1769-1753 (2007) (9)31.
- دیواره‌ها، مواجه هستند. در همه حالت‌های بازتاب، بازه دوز کمینه دریافتی حدود ۴۰ تا ۴۵ میلی‌ژول بر سانتی‌متر مربع و قله هر منحنی در بازه ۵۰ تا ۵۵ میلی‌ژول بر سانتی‌متر مربع قرار دارد. بنابراین اثر چشم‌گیری از بازتاب دیواره‌ها در ضریب گذردهی ۷۸/۵، با افزایش توان لامپ دیده نشد.
- مطابق شکل ۱۵، اثر بازتاب در مقادیر لگاریتم غیرفعال‌سازی میکروارگانیزم‌ها، بسیار اندک مشاهده شد به طوری که اختلاف این مقادیر در حالت عدم بازتاب و بازتاب صد درصد برای فاز MS₂ حدود ۷/۹ درصد و برای هاگ باسیلوس سابتیلیس ۸/۶ درصد است. درصد اختلاف موجود حالت‌های گوناگون بازتاب نسبت به حالت عدم بازتاب در توان لامپ بالاتر در مقایسه با همین مقادیر در دبی ۲/۵ مترمکعب بر ساعت، می‌تواند گویای این مطلب باشد که می‌توان اثر بازتاب را در توان‌های بیش از مقادیر مورد سنجش در این مطالعه، پررنگ‌تر مشاهده نمود.
- ### ۵- نتیجه‌گیری
- در این پژوهش به بررسی اثر مقادیر گوناگون بازتاب دیواره‌های مخزن فرابنفش در بازه صفر (بدون بازتاب) تا صد (بازتاب ایده‌آل) درصد پرداخته شد. عملکرد مخزن فرابنفش، در دو ضریب گذردهی، دو دبی و دو توان لامپ متفاوت برای دو نوع میکروارگانیزم، ارزیابی شد. نتایج به دست آمده نشان داد که اثر بازتاب دیواره‌ها بر بهبود عملکرد مخزن فرابنفش در ضریب گذردهی بالاتر (۸۷/۷ درصد)، پررنگ‌تر است. همچنین به‌طور کلی مشاهده گردید که با افزایش میزان بازتاب دیواره، روند افزایشی برای مقادیر دوز دریافتی و لگاریتم غیرفعال‌سازی میکروارگانیزم‌ها وجود دارد که در ضریب گذردهی بالاتر با رشد بیش‌تری مواجه است. با کاهش دبی جریان از ۴/۹ مترمکعب بر ساعت به ۲/۵ مترمکعب بر ساعت، اثر بازتاب دیواره‌ها در ضریب گذردهی ۷۸/۵ درصد، تغییر محسوسی را تجربه نکرد. با توجه به این که اختلاف دو توان لامپ در نظر گرفته شده به اندازه کافی بالا نیست، میزان تأثیر بازتاب بر بهبود عملکرد مخزن نتوانسته به خوبی نمایان شود، ولی در هر صورت، با افزایش توان، افزایش هر چند اندک شاخص‌های عملکردی با وجود بازتاب دیواره مشاهده شد.
- ### مراجع
- [1] Y. Mao, D. Guo, W. Yao, X. Wang, H. Yang, Y.F. Xie, S. Komarneni, G. Yu, Y. Wang, Effects of conventional

- UV disinfection using integrated computational fluid dynamics and discrete ordinates radiation models, *Proceedings of the Water Environment Federation*, 273-257 (2009) (1)2009.
- [23] F. Crapulli, D. Santoro, C.N. Haas, M. Notarnicola, L. Liberti, Modeling virus transport and inactivation in a fluoropolymer tube UV photoreactor using Computational Fluid Dynamics, *Chemical Engineering Journal*, (2-1)161 18-9 (2010).
- [24] C. Buchner, Modelling of UV disinfection reactors by means of computational fluid dynamics [MS thesis], in, TU-Wien Atominstitut der Osterreichischen Universitäten, Wien, Austria, 2006.
- [25] N.M. Hull, K.G. Linden, Synergy of MS2 disinfection by sequential exposure to tailored UV wavelengths, *Water Research*, (2018).
- [26] B. Wols, D. Harmsen, T. van Remmen, E. Beerendonk, C. Hofman-Caris, Design aspects of UV/H₂O₂ reactors, *Chemical Engineering Science*, 721-712 (2015) 137.
- [27] B. Wols, D. Harmsen, J. Wanders-Dijk, E. Beerendonk, C. Hofman-Caris, Degradation of pharmaceuticals in UV (LP)/H₂O₂ reactors simulated by means of kinetic modeling and computational fluid dynamics (CFD), *Water research*, 24-11 (2015) 75.
- [28] T. Sultan, Z. Ahmad, J. Cho, Optimization of lamp arrangement in a closed-conduit UV reactor based on a genetic algorithm, *Water Science and Technology*, (10)73 2543-2526 (2016).
- [29] J.D. Schwarzkopf, M. Sommerfeld, C.T. Crowe, Y. Tsuji, *Multiphase flows with droplets and particles*, CRC press, 2011.
- [30] C. Xu, X. Zhao, G. Rangaiah, Performance analysis of ultraviolet water disinfection reactors using computational fluid dynamics simulation, *Chemical engineering journal*, 406-398 (2013) 221.
- [31] S. Morsi, A. Alexander, An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems, *Journal of Fluid mechanics*, 208-193 (1972) (2)55.
- [32] B.A. Wols, CFD in drinking water treatment, (2010).
- [33] J. Kuo, C.-I. Chen, M. Nellor, Standardized collimated beam testing protocol for water/wastewater ultraviolet
- [11] D. Liu, J. Ducoste, S. Jin, K. Linden, Evaluation of alternative fluence rate distribution models, *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, (6)53 408-391 (2004).
- [12] C. Ho, Evaluation of reflection and refraction in simulations of ultraviolet disinfection using the discrete ordinates radiation model, *Water Science and Technology*, 2428-2421 (2009) (12)59.
- [13] J. Chen, B. Deng, C.N. Kim, Computational fluid dynamics (CFD) modeling of UV disinfection in a closed-conduit reactor, *Chemical Engineering Science*, (21)66 4990-4983 (2011).
- [14] M. Li, Z. Qiang, J.R. Bolton, W. Ben, Impact of reflection on the fluence rate distribution in a UV reactor with various inner walls as measured using a micro-fluorescent silica detector, *Water research*, (2012) (11)46 3602-3595.
- [15] W. Li, M. Li, J.R. Bolton, J. Qu, Z. Qiang, Impact of inner-wall reflection on UV reactor performance as evaluated by using computational fluid dynamics: the role of diffuse reflection, *Water research*, 388-382 (2017) 109.
- [16] Á. García-Gil, C. Casado, C. Pablos, J. Marugán, Novel procedure for the numerical simulation of solar water disinfection processes in flow reactors, *Chemical Engineering Journal*, (2018).
- [17] S. Elyasi, F. Taghipour, Simulation of UV photoreactor for water disinfection in Eulerian framework, *Chemical Engineering Science*, 4749-4741 (2006) (14)61.
- [18] D.C. Wilcox, *Turbulence modeling for CFD*, DCW industries La Canada, CA, 1998.
- [19] A. Dewan, *Tackling turbulent flows in engineering*, Springer Science & Business Media, 2010.
- [20] A.E. Cassano, O.M. Alfano, Reaction engineering of suspended solid heterogeneous photocatalytic reactors, *Catalysis today*, 197-167 (2000) (3-2)58.
- [21] H. Li, H. Osman, C. Kang, T. Ba, Numerical and experimental investigation of UV disinfection for water treatment, *Applied Thermal Engineering*, -280 (2017) 111 291.
- [22] C.K. Ho, S.S. Khalsa, H.B. Wright, E. Wicklein, Modeling

- environmental bulletin, 5482-5473 (2016) (12)25.
- [35] D.A. Sozzi, F. Taghipour, UV reactor performance modeling by Eulerian and Lagrangian methods, Environmental science & technology, -1609 (2006) (5)40 1615.
- disinfection, Journal of environmental engineering, 779-774 (2003) (8)129.
- [34] Y. Zhang, G. Zhang, P. Wang, Q. Wang, Optimization of microwave induced electrodeless ultraviolet disinfection reactor using computational fluid dynamics, fresenius

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

GH. Heidarinejad, N. Bozorgmehr, M. Safarzadeh, The Effect of Inner Walls Reflection on Microorganisms Inactivation in Water Ultraviolet Reactor using computational fluid dynamics, Amirkabir J. Mech Eng., 53(Special Issue 1) (2021) 375-392.

DOI: 10.22060/mej.2019.15916.6226



