



Numerical Simulation and Comparison of Four Different UVC-LED Reactor Models for Point-of-Use Water Disinfection Using Computational Fluid Dynamics

Saied Moghaddam 

Assist. Prof., Dept. of Food Technology, Faculty of Agricultural Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Pakdasht, Iran
(Corresponding Author) saiedmoghaddam@ut.ac.ir



<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.517963.3484>

Original Paper

Abstract

Drinking water quality and safety are vital factors for public health, and the consumption of contaminated water is one of the main causes of microbial disease transmission. Effective and reliable water disinfection methods at the point of use, especially at the household scale, play an important role in reducing such diseases. This study was conducted with the aim of designing and comparing the performance of four different UVC-LED reactor models for point-of-use water disinfection. To achieve this, Computational Fluid Dynamics was employed to simulate the flow field, mass transfer, and radiation field within the reactors, enabling a detailed assessment of UV distribution and its interaction with the flowing water. In the reactor designs, the influence of internal wall material—specifically polytetrafluoroethylene with diffuse reflectivity and aluminum with specular reflectivity—was investigated to evaluate how surface reflectivity impacts disinfection performance. The results demonstrated that the highest log reduction of *Escherichia Coli* and the most efficient microbial removal occurred in Reactor Type 4 with an aluminum inner surface, achieving a log reduction of 1.64 and a disinfection efficiency of 30.6%. The findings highlighted that both the reactor geometry and wall material play critical roles in ensuring uniform radiation distribution and enhancing overall disinfection effectiveness. This study offers valuable insights and practical guidance for the optimal design of UVC-LED reactors intended for household and point-of-use applications.

Keywords:

Reactor, UVC LED, Water Disinfection, Computational Fluid Dynamics, Point of Use.



Received: Dec. 28, 2024
Revised: Mar. 26, 2025
Accepted: Apr. 24, 2025

To cite this article:

Moghaddam, S., 2025. Numerical simulation and comparison of four different UVC-LED reactor models for point-of-use water disinfection using computational fluid dynamics. *Water and Wastewater*, 36(1), 74-96. <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.517963.3484>.

Use your device to scan and read the article online



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



1. Introduction

Access to safe drinking water remains a global challenge, particularly in rural and decentralized communities. Traditional UV disinfection systems rely on mercury lamps, which face limitations such as bulkiness, warm-up time, and environmental concerns. Recent advances in UVC-LEDs offer compact, durable, and mercury-free alternatives for POU water treatment. However, their efficiency strongly depends on reactor design, LED arrangement, and wall reflectivity. This study aims to fill the knowledge gap by systematically evaluating how these parameters affect UV dose delivery and microbial inactivation in compact reactors.

2. Materials and methods

In this section, four different UVC-LED reactor models were designed and analyzed to evaluate disinfection performance. The objective of the numerical modeling was to simultaneously simulate the flow field, mass transfer, and radiation distribution inside the reactors using Computational Fluid Dynamics¹. The geometry of each model was created and meshed in Gambit software. For each reactor, parameters such as the number of LEDs, geometric dimensions, and wall material (Teflon or aluminum) were considered differently. Fig. 1 presents the geometric design of the four reactor models. The inlet and outlet tube diameters were set to 6 mm. The diameters of Reactors 1, 2, and 4 were 4 cm, while Reactor 3 had a diameter of 1 cm. The lengths of Reactors 1 and 2 were 15 cm and 6 cm, respectively, whereas Reactors 3 and 4 each had a length of 10 cm. In Reactor 2, the outer diameter was 4.7 cm, and the inner diameter (the region exposed to UV radiation) was 4 cm. The directions of the inlet and outlet flows are indicated by arrows in Fig. 1. For Reactors 1 and 2, a single UV-LED with a power output of 25 mW was used, while Reactors 3 and 4 were equipped with two UV-LEDs, each with a power of 12.5 mW.

For the simulation of the UV reactor, the continuity, Navier–Stokes, mass transfer, and radiation equations must be solved simultaneously. The water flow inside the UV reactor is turbulent in nature. The Discrete Ordinates Model² was employed for radiation simulation. The continuity, Reynolds-averaged Navier–Stokes, mass transfer, and radiation equations are expressed as in Equations 1 to 4 (White, 2011; Modest, 2003; Bird et al., 2006)

¹ Computational Fluid Dynamics (CFD)

² Discrete Ordinates Model (DOM)

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}^t \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{u}C) = D \nabla^2 C - K I C \quad (3)$$

$$s \cdot \nabla I(\mathbf{x}, s) + (k + \sigma_s) I(\mathbf{x}, s) = k I_b(T) + \sigma_s \int_{4\pi} \phi(s, s') I(\mathbf{x}, s') d\Omega(s') \quad (4)$$

3. Results and discussion

To investigate the effects of reactor geometry and wall material on disinfection performance, the log reduction values for the four reactor types with PTFE and aluminum walls are presented in Fig. 2. In Reactor Type 1, no significant difference was observed between the two wall materials. Both cases resulted in a log reduction of 0.99, indicating that, in this specific configuration, the wall material was not a determining factor and the radiation distribution within the reactor volume was relatively uniform.

In Reactor Type 2, the PTFE wall yielded better performance, achieving a log reduction of 1.13 compared to 0.83 for the aluminum wall. This result suggests that in the more compact geometry of Type 2, diffuse reflections from the PTFE surface enhanced the radiation distribution throughout the reactor volume.

In contrast, in Reactors Type 3 and Type 4, aluminum walls outperformed PTFE. For Type 3, the aluminum surface resulted in a log reduction of 0.68 compared to 0.45 for PTFE. Similarly, in Type 4, the aluminum wall led to a log reduction of 1.64, exceeding the 1.43 achieved with PTFE. These findings indicate that in more open geometries or those with multiple radiation sources (as in Types 3 and 4), the specular reflections of aluminum more effectively directed UV radiation toward the active region compared to the diffuse reflections of PTFE. In Fig. 3, contours of microorganism concentration, UV intensity, and flow velocity are presented for Reactor Type 4 with PTFE and aluminum walls. In the radiation contours, a notable difference is observed between the two wall materials. With PTFE walls, diffuse reflections promote a more uniform distribution of radiation across the reactor cross-section, ensuring that regions near the walls also receive an adequate UV dose. This feature reduces low-irradiance zones and leads to a more homogeneous energy distribution across the reactor width. In contrast, with aluminum walls, the specular reflections focus the radiation toward the reactor center, while the intensity near



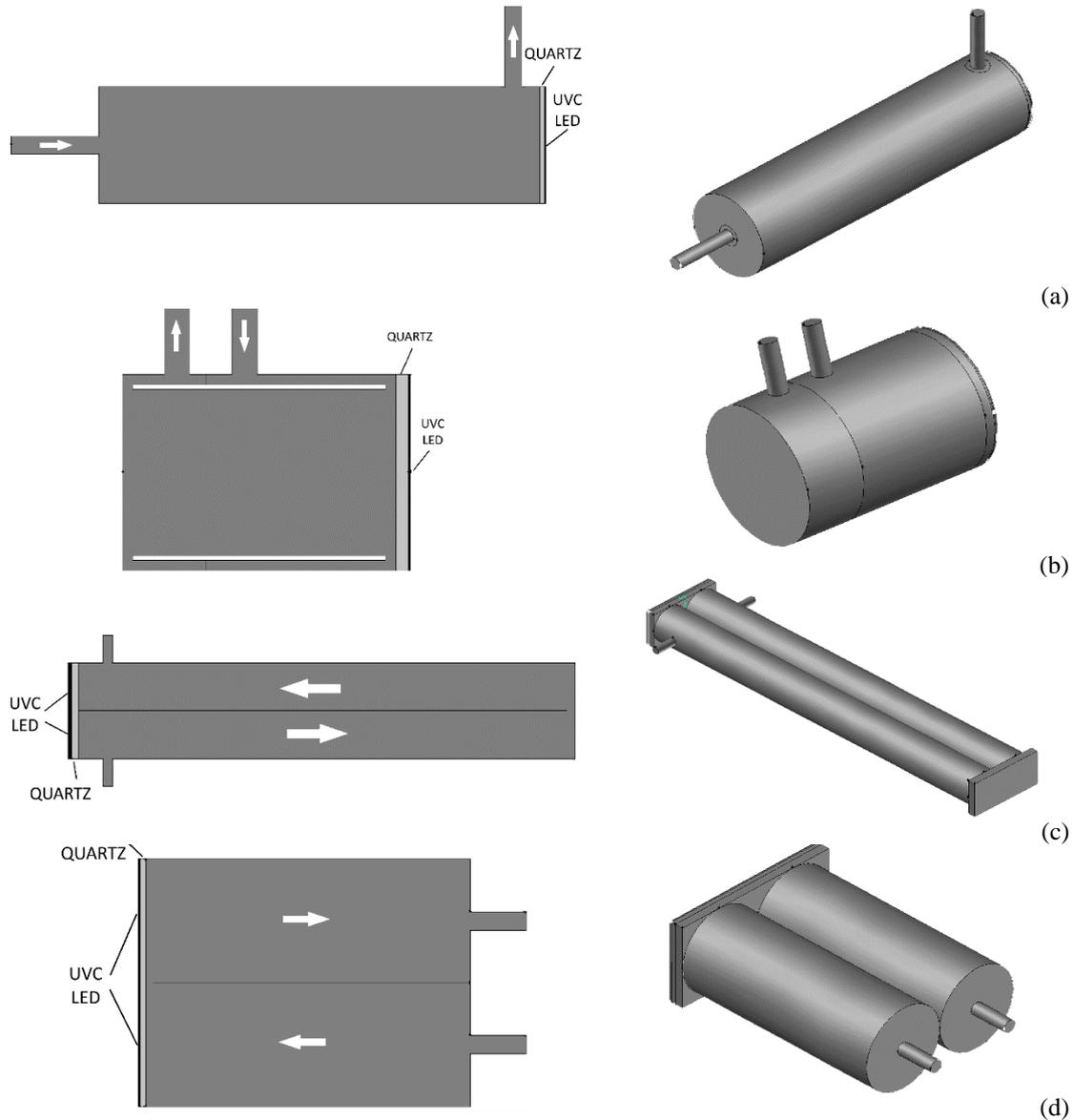


Fig. 1. Four different models of UVC reactor design a) type 1, b) type 2, c) type 3, d) type 4

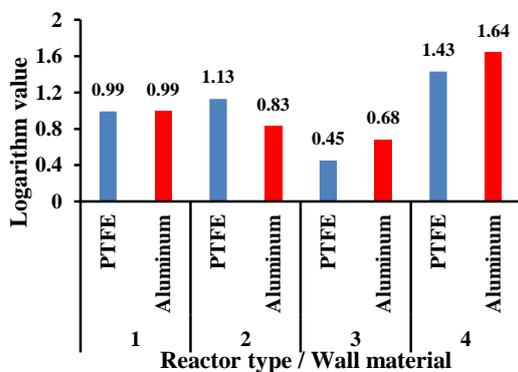


Fig. 2. Comparison of the logarithm value of different reactors with PTFE and aluminum wall materials

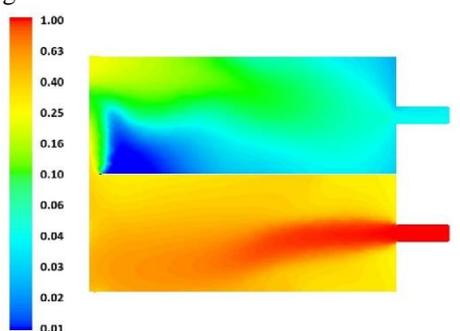
the walls is noticeably lower. However, in this particular geometry, the central concentration of radiation is not a disadvantage; rather, it becomes beneficial due to alignment with the main flow path.

In the microorganism concentration contours, a reduction in concentration from the inlet to the outlet is observed in both cases. For the PTFE wall, the concentration decrease is more uniform across the reactor width, consistent with the evenly distributed radiation. Conversely, with the aluminum wall, the reduction is more pronounced in the reactor center, particularly in the second section, reflecting the focused radiation and increased residence time in that region. This indicates that the majority of the flow passing

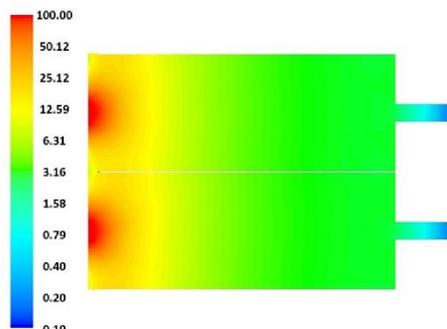


through the central region receives a higher UV dose, resulting in more effective disinfection.

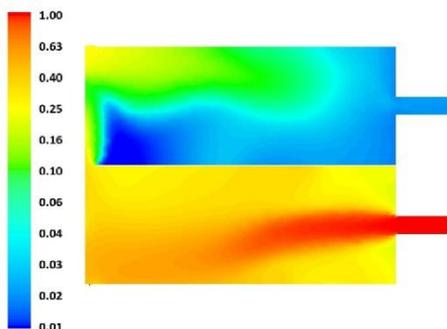
The velocity contours also exhibit a distinct pattern. The flow velocity is highest in the first section of the reactor and decreases in the second section. This reduction in velocity increases the residence time of the fluid in the latter section, which, combined with more effective radiation exposure, plays a critical role in enhancing disinfection efficiency. Specifically, in the aluminum configuration-where radiation is concentrated in the reactor center and the second section-the combination of longer residence time and higher UV intensity allows the microorganisms to absorb more energy, resulting in greater inactivation.



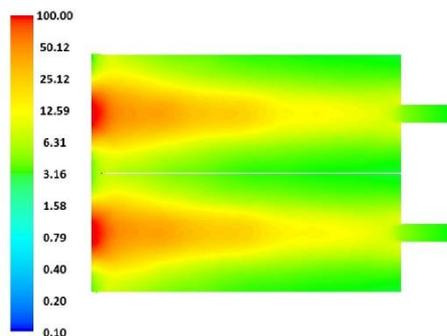
(a)



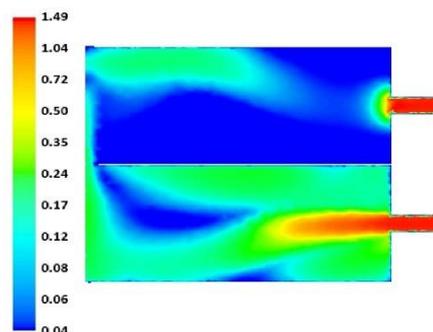
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 3. Contour of concentration, UVC radiation and velocity in the type 4 reactor a) concentration in PTFE wall, b) UVC radiation in PTFE wall, c) concentration in aluminum wall, d) UVC radiation in aluminum wall, e) velocity

4. Conclusions

The results showed that Reactor Type 4 with an aluminum wall achieved the highest microbial log reduction ($\log = 1.64$). In terms of radiation distribution, effective residence time, and optimal flow guidance, it outperformed the other configurations. In contrast, in more compact reactors such as Type 2, the PTFE wall-with its diffuse reflectance-provided a more homogeneous radiation distribution and exhibited better performance compared to aluminum.

Comparison with previous studies also indicated that even with low-power light sources and a limited number of LEDs, significant disinfection efficiency can be achieved through optimized geometric design and appropriate wall material selection. Therefore, the findings of this study can serve as scientific guidance for designing small-scale, practical UVC-LED reactors for household and point-of-use applications.





شبیه‌سازی عددی و مقایسه چهار مدل مختلف راکتور UVC-LED برای ضدعفونی آب در محل مصرف با روش دینامیک سیالات محاسباتی

سعید مقدم

استادیار، گروه فناوری صنایع غذایی، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران
(نویسنده مسئول) saiedmoghaddam@ut.ac.ir



<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.517963.3484>

مقاله پژوهشی

چکیده

کیفیت آب آشامیدنی و ایمنی آن از عوامل حیاتی سلامت عمومی محسوب می‌شوند و مصرف آب آلوده یکی از عوامل اصلی انتقال بیماری‌های میکروبی است. روش‌های مؤثر و قابل‌اعتماد ضدعفونی آب در محل مصرف، به‌ویژه در مقیاس خانگی، نقش مهمی در کاهش بیماری‌ها دارند. این پژوهش باهدف طراحی و مقایسه عملکرد چهار مدل مختلف راکتور UVC-LED برای ضدعفونی آب در محل مصرف انجام شد. در راستای این هدف، از روش دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی جامع میدان جریان، انتقال جرم و میدان تابش درون راکتورها بهره گرفته شد تا توزیع تابش و نحوه برخورد آن با جریان عبوری از راکتور به‌دقت بررسی شود. در طراحی هندسی راکتورها، تأثیر جنس دیواره داخلی با در نظر گرفتن دو ماده مختلف شامل تفلون با خاصیت بازتاب پخش‌شده و آلومینیوم با خاصیت بازتاب آینه‌ای، به‌منظور ارزیابی اثر انعکاس نور بر کارایی فرایند ضدعفونی بررسی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان داد که بیشترین کاهش لگاریتمی جمعیت باکتری اشرشیاکلی و بالاترین میزان کارایی فرایند، مربوط به راکتور نوع ۴ با دیواره آلومینیومی است (مقدار کاهش لگاریتمی $\log=1.64$ و کارایی حذف میکروبی برابر با $30/6\%$ درصد). بررسی‌ها حاکی از آن است که جنس دیواره و هندسه راکتور دو عامل کلیدی در توزیع یکنواخت تابش در سراسر حجم جریان و در نتیجه افزایش اثربخشی ضدعفونی هستند. یافته‌های این پژوهش می‌توانند به‌عنوان راهنمایی علمی و عملی برای طراحی بهینه راکتورهای ضدعفونی مبتنی بر UVC-LED در مقیاس خانگی و محل مصرف استفاده شوند.

واژه‌های کلیدی:
راکتور، LED فرابنفش، ضدعفونی آب، دینامیک سیالات محاسباتی، محل مصرف



دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۸

اصلاح: ۱۴۰۴/۱/۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۲/۴

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به‌صورت آنلاین استفاده کنید



برای ارجاع به این مقاله به‌صورت زیر اقدام فرمایید:

مقدم، س.، ۱۴۰۴، شبیه‌سازی عددی و مقایسه چهار مدل مختلف راکتور UVC-LED برای ضدعفونی آب در محل

مصرف با روش دینامیک سیالات محاسباتی. آب و فاضلاب، ۳۶(۱)، ۹۶-۷۴

<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.517963.3484>



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



۱- مقدمه

از شبیه‌سازی عددی^۱ بررسی شدند. هدف این پژوهش، تحلیل تأثیر شکل هندسی، تعداد LEDها و جنس دیواره داخلی (تفلون و آلومینیوم) بر عملکرد ضد عفونی و کارایی راکتورها در محل مصرف بود. نتایج این پژوهش می‌تواند به بهینه‌سازی طراحی راکتورهای فرابنفش خانگی و قابل حمل کمک کند.

در سال‌های اخیر استفاده از راکتورهای LED فرابنفش بررسی شده است. نگوین و همکاران یک سیستم تصفیه فاضلاب خانگی غیرمتمرکز را با استفاده از LED فرابنفش و به روش آزمایشگاهی بررسی کردند. این راکتور با نرخ‌های جریان مختلف از ۱۰ تا ۵۰ میلی‌لیتر در دقیقه کار می‌کرد که منجر به دوزهای فرابنفش اعمال شده به ترتیب از ۴۷/۸ تا ۶۹/۴ میلی ژول بر سانتی‌متر مربع شد. این دوزها برای غیرفعال کردن کلیفرم‌های کل در فاضلاب کافی هستند تا دستورالعمل‌های استفاده مجدد از آب برای کشاورزی را هم برای محصولات غذایی فراوری شده و هم برای محصولات غیر غذایی رعایت کنند (Nguyen et al., 2019).

کوشان و همکاران عملکرد فتوراکتورهای LED فرابنفش استوانه‌ای ساخته شده از مواد بازتابنده فرابنفش را برای ضد عفونی آب با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی تجزیه و تحلیل کردند. در این کار پیکربندی‌های معمولی از جمله U، L و S شکل بررسی شدند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که فتوراکتورهای U و S شکل برای فتوراکتورهای ساخته شده از مواد بازتابنده فرابنفش می‌توانند از L شکل بهتر عمل کنند. همچنین انتخاب مناسب طول، شعاع و مکان LED می‌تواند منجر به کاهش لگاریتمی ۴ برای اشرشیاکلی در یک راکتور S شکل با یک LED، ۲۵ میلی وات شود (Kooshan et al., 2022).

هسلینگ و همکاران یک سیستم ضد عفونی آب کوچک مبتنی بر ترکیب یک LED، ۲۵ میلی وات با طول موج ۲۸۵ نانومتر و یک لوله کوارتز کوتاه با سطح مقطع مستطیلی را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که برای آب لوله‌کشی شفاف، غلظت باکتری اشرشیاکلی را می‌توان حداقل تا سه مرتبه بزرگی تا دبی جریان حدود ۲۰ لیتر در ساعت کاهش داد. همچنین در آب خاکستری حداکثر دبی برای چنین کاهش کمی کمتر از ۳ لیتر در ساعت است (Hessling et al., 2016).

یکی از عوامل اصلی انتقال بیماری‌های میکروبی در جهان، مصرف آب آلوده است. در مناطق شهری و روستایی، به ویژه در کاربردهای خانگی، کیفیت آب در محل مصرف اهمیت زیادی دارد و سیستم‌های ضد عفونی مؤثر و قابل اطمینان در این حوزه مورد توجه قرار گرفته‌اند. در میان روش‌های مختلف ضد عفونی، استفاده از اشعه فرابنفش (UV) به دلیل عملکرد سریع، عدم استفاده از مواد شیمیایی و عدم تولید فراورده‌های جانبی مضر، بسیار مورد توجه قرار دارد.

اشعه فرابنفش در سه بازه UVA، UVB و UVC دسته‌بندی می‌شود که ناحیه UVC با طول موج ۲۰۰ تا ۲۸۰ نانومتر به دلیل توانایی در تخریب DNA میکروارگانیسم‌ها، مناسب‌ترین بازه برای ضد عفونی است. دو منبع رایج تولید اشعه UVC عبارت‌اند از لامپ‌های جیوه‌ای و LEDهای فرابنفش. با وجود اینکه لامپ‌های جیوه‌ای در گذشته کاربرد فراوانی داشتند، اما مشکلات زیست‌محیطی ناشی از وجود جیوه، نیاز به پیش‌گرمایش و اندازه بزرگ آن‌ها، سبب شده که فناوری LED فرابنفش به‌عنوان جایگزینی مناسب مطرح شود. LEDهای فرابنفش دارای مزایای متعددی از جمله مصرف انرژی کم، اندازه کوچک، عدم نیاز به پیش‌گرمایش و عدم تولید آلاینده‌های شیمیایی هستند.

در سال‌های اخیر، طراحی و توسعه راکتورهای LED فرابنفش برای ضد عفونی آب مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. با این حال، اغلب مطالعات به‌خصوص در زمینه تأثیر هندسه راکتور و جنس دیواره داخلی، تمرکز محدودی بر پارامترهای طراحی راکتور داشته‌اند. این در حالی است که هندسه راکتور مستقیماً بر میدان جریان، زمان ماند، الگوی تابش و نواحی مرده تأثیر می‌گذارد و در نهایت بر کارایی ضد عفونی اثرگذار است. همچنین جنس دیواره داخلی راکتور با تعیین ویژگی‌های بازتاب نور (پخش یکنواخت یا بازتاب آینه‌ای) می‌تواند شدت تابش در نقاط مختلف را تغییر دهد و بر کاهش جمعیت میکروبی تأثیر بگذارد.

با توجه به موارد فوق، نیاز به مطالعه‌ای سیستماتیک برای بررسی ترکیب هندسه و جنس دیواره در راکتورهای UVC-LED، تحت شرایط عملیاتی یکسان احساس می‌شود. در این پژوهش، چهار مدل مختلف از راکتورهای فرابنفش LED طراحی و با استفاده

¹ Computational Fluid Dynamics (CFD)



مختلف از جمله اشرفیاکلی وجود دارد (Matsumoto et al., 2019).

اگاما و همکاران تأثیر چیدمان LED فرابنفش را بر میزان غیر فعال سازی اشرفیاکلی و کیو بتا در یک راکتور حلقه‌ای شکل بررسی کردند. بیشترین مقدار لگاریتم میکروبی در دبی ۸۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه برای فاصله بین LEDهای ۲۰ میلی‌متر رخ داد و مقدار آن بیشتر از $\log 5$ بود (Oguma et al., 2016).

وانگ و همکاران تأثیر پنج پیکربندی کانال جریان را بر کارایی ضد عفونی آب در یک راکتور LED فرابنفش بررسی کردند. نتایج این پژوهش تأثیر پیکربندی را بر افزایش مقدار دوز ارائه می‌دهد و می‌تواند به عنوان یک راهنما در طراحی کانال جریان برای راکتورهای LED فرابنفش در ضد عفونی آب استفاده شود (Wang et al., 2023).

با وجود پژوهش‌های متعدد در زمینه ضد عفونی آب با استفاده از راکتورهای UVC-LED، اغلب مطالعات تمرکز خود را به صورت جداگانه بر یک یا چند پارامتر مانند دبی جریان، توان LED یا طول موج معطوف کرده‌اند. برخی پژوهش‌ها مانند (Wang et al., 2023, Wu et al., 2021) چارچوب‌های طراحی سیستماتیکی را پیشنهاد کرده‌اند، اما تأکید آن‌ها بیشتر بر تأثیر عوامل جداگانه بوده است و بررسی هم‌زمان اثرات ترکیبی پارامترها در یک مدل جامع انجام نشده بود. همچنین در اکثر مطالعات، جنس دیواره راکتور یا ثابت فرض شده یا نقش آن در بازتاب تابش UVC به صورت سطحی بررسی شده است. به طور خاص، خلأ علمی مشهودی در بررسی هم‌زمان هندسه راکتور، چیدمان LED و جنس دیواره داخلی در شرایط عملیاتی یکسان وجود دارد. این در حالی است که این سه عامل به صورت برهم‌کنش‌دار^۱ می‌توانند بر توزیع شدت تابش، میدان جریان، زمان ماند و در نهایت اثربخشی غیر فعال سازی میکروارگانیسم‌ها تأثیرگذار باشند.

این پژوهش با طراحی و تحلیل چهار مدل مختلف از راکتورهای UVC-LED، تلاش داشت این فاصله را پوشش دهد. این کار نه تنها با مقایسه مدل‌های هندسی متنوع انجام شد، بلکه با در نظر گرفتن دو نوع ماده دیواره (تفلون^۲ و آلومینیوم) و اعمال الگوریتم‌های دقیق شبیه‌سازی، تأثیر ترکیبی پارامترها را بررسی

و و همکاران یک چارچوب سیستماتیک برای طراحی یک راکتور LED فرابنفش به منظور غیر فعال سازی میکروبی برای تصفیه آب در محل مصرف پیشنهاد کردند. تأثیر شش عامل دبی جریان، ضریب جذب آب، جنس دیواره، قدرت تابشی LED، طول موج LED و زاویه تابش LED بر غیر فعال سازی میکروارگانیسم‌ها در این راکتور بررسی شدند. آن‌ها در این کار یک استراتژی بهینه‌سازی پیشنهاد کردند که عملکرد غیر فعال سازی میکروبی را با درک روشنی از پارامترهای اصلی طراحی راکتور و تأثیرات آن‌ها بر یکدیگر به حداکثر می‌رساند (Wu et al., 2021).

کشاورز فتحی و تقی‌پور یک راکتور LED فرابنفش را با روش شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی و آزمایشگاهی بررسی کردند. آن‌ها عملکرد راکتور را برای دو باکتری اشرفیاکلی و ام‌اس ۲ تحت شرایط عملیاتی مختلف، از جمله دبی جریان، رژیم‌های جریان و قدرت تابش ارزیابی کردند. آن‌ها همچنین مفهوم یک سیستم راکتور LED فرابنفش ایده‌آل را پیشنهاد کردند که می‌تواند کارایی هر راکتور را با آن مقایسه کرد (Keshavarzfathy and Taghipour, 2019).

کشاورز فتحی و همکاران یک راکتور LED فرابنفش را با نصب بافل و حاوی ۱۸ LED طراحی کرده و ساختند. آن‌ها عملکرد راکتور را تحت شش آرایش مختلف LED، سه حالت تابش و دبی جریان ۰/۷۵، ۰/۱ و ۲ لیتر بر دقیقه بررسی کردند. در این کار غیر فعال سازی آدنووایروس در دبی ۱ لیتر بر دقیقه از $\log 1/6$ به $\log 4/1$ با اصلاح میدان تابشی افزایش یافت (Keshavarzfathy et al., 2021).

وانگ و لین یک راکتور LED فرابنفش با طول موج ۲۷۸ نانومتر و با پیکربندی کانال ماریپی را برای تصفیه آب آشامیدنی توسعه دادند. آن‌ها اثرات دبی جریان، گام ماریپی و قدرت تابش را برای بهبود کارایی ضد عفونی کردن اشرفیاکلی بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که در تمامی دبی‌های مورد بررسی، راکتور با گام ماریپی ۱۰ میلی‌متر، بیشترین غیر فعال سازی لگاریتم را در بین سه راکتور با گام‌های مختلف به دست آورد (Wang and Lin, 2021).

ماتسوموتو و همکاران از یک LED فرابنفش برای ضد عفونی جریان آزاد آب استفاده کرده‌اند. آن‌ها دریافتند که برای دبی ۱۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه امکان کاهش $\log 3$ برای میکروارگانیسم‌های

¹ Interacting

² Polytetrafluoroethylene (PTFE)



جدول ۱- مقایسه ویژگی‌های مطالعات منتخب پیشین و این پژوهش

Table 1. Comparison of characteristics of previous selected studies and the current research

Innovation / limitation	Parameters studied	Reactor wall material	Reactor geometry	Study type	Reference
Focus on domestic wastewater application	Flow rate, dose	PTFE	Simple	Experimental	(Nguyen et al., 2019)
Various geometries; no wall material analysis	Geometry, dose, power	Aluminum	U, L, S	CFD	(Kooshan et al., 2022)
Small scale; no flow field evaluation	Power, flow rate	Quartz + PTFE chamber	Rectangular	Experimental	(Hessling et al., 2016)
Systematic design framework; lacking CFD	Flow rate, wall material, power, wavelength	PTFE	U-shaped	Statistical modeling	(Wu et al., 2021)
Two bacteria performance; no geometry comparison	Flow rate, power, current	Plexiglass	Cylindrical	CFD + Experimental	(Keshavarzfathy and Taghipour, 2019)
Open channel geometry; no environmental control	Flow rate, log reduction	Glass	Free flow	Experimental	(Matsumoto et al., 2019)
Focus on radiation distribution; not wall material	Helical pitch, power, flow rate	Not specified	Helical	Experimental	(Wang and Lin, 2021)
Two bacteria performance; LED arrangement	LED placement	Quartz	Ring-shaped	Experimental	(Oguma et al., 2016)
Focus on flow field	Flow channel configuration	Not specified	Rectangular channel	Experimental	(Wang et al., 2023)
Combined analysis of wall material and geometry under identical operating conditions	Geometry, wall material, radiation field, efficiency	PTFE and Aluminum	Four different models	CFD	Present study

با توجه به هدف این پژوهش که طراحی راکتورهای UV-LED در مقیاس محل مصرف^۱ برای ضدعفونی آب بود، ابعاد راکتورها به گونه‌ای انتخاب شدند که ضمن حفظ قابلیت نصب در سیستم‌های خانگی، بیشینه دوز تابشی مؤثر و کارایی ضدعفونی حاصل شود. طول، قطر و تعداد LEDها برای هر راکتور باهدف ایجاد میدان تابشی مؤثر و یکنواخت طراحی شدند. نوآوری اصلی در این پژوهش، در طراحی ساختار هندسی متنوع راکتورها و نحوه آرایش منابع نوری بود که باعث تفاوت در عملکرد میکروبی شد. قطر لوله‌های ورودی و خروجی ۶ میلی‌متر در نظر گرفته شدند. قطر راکتورهای نوع ۱، ۲ و ۴ برابر با ۴ سانتی‌متر و راکتور ۳ برابر با ۱ سانتی‌متر بود. طول راکتورهای ۱ و ۲ به ترتیب برابر با ۱۵ و ۶ سانتی‌متر و طول راکتورهای ۳ و ۴ برابر با ۱۰ سانتی‌متر بود. در راکتور نوع ۲، قطر خارجی راکتور ۴/۷ سانتی‌متر و قطر داخلی آن

کرد. در جدول ۱ مقایسه ویژگی‌های مطالعات منتخب پیشین و این پژوهش نشان داده شده است. در مقایسه با پژوهش‌های پیشین، این پژوهش با رویکردی یکپارچه، امکان ارزیابی جامع‌تر از عملکرد راکتورهای فرابنفش در محل مصرف را فراهم می‌کند.

۲- مدل‌سازی عددی و چارچوب حل معادلات در CFD

در این بخش، چهار مدل مختلف از راکتورهای UVC-LED برای بررسی عملکرد ضدعفونی طراحی و تحلیل شده‌اند. هدف از مدل‌سازی عددی، شبیه‌سازی هم‌زمان میدان جریان، انتقال جرم و تابش درون راکتورها با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی است. هندسه هر مدل در نرم‌افزار Gambit ایجاد و مش‌بندی شده است. برای هر مدل، پارامترهایی مانند تعداد LED، ابعاد هندسی و نوع دیواره (تفلون یا آلومینیوم) متفاوت در نظر گرفته شده است. شکل ۱ و جدول ۲ طراحی هندسی چهار مدل راکتور را نمایش می‌دهند.

¹ Point-of-Use

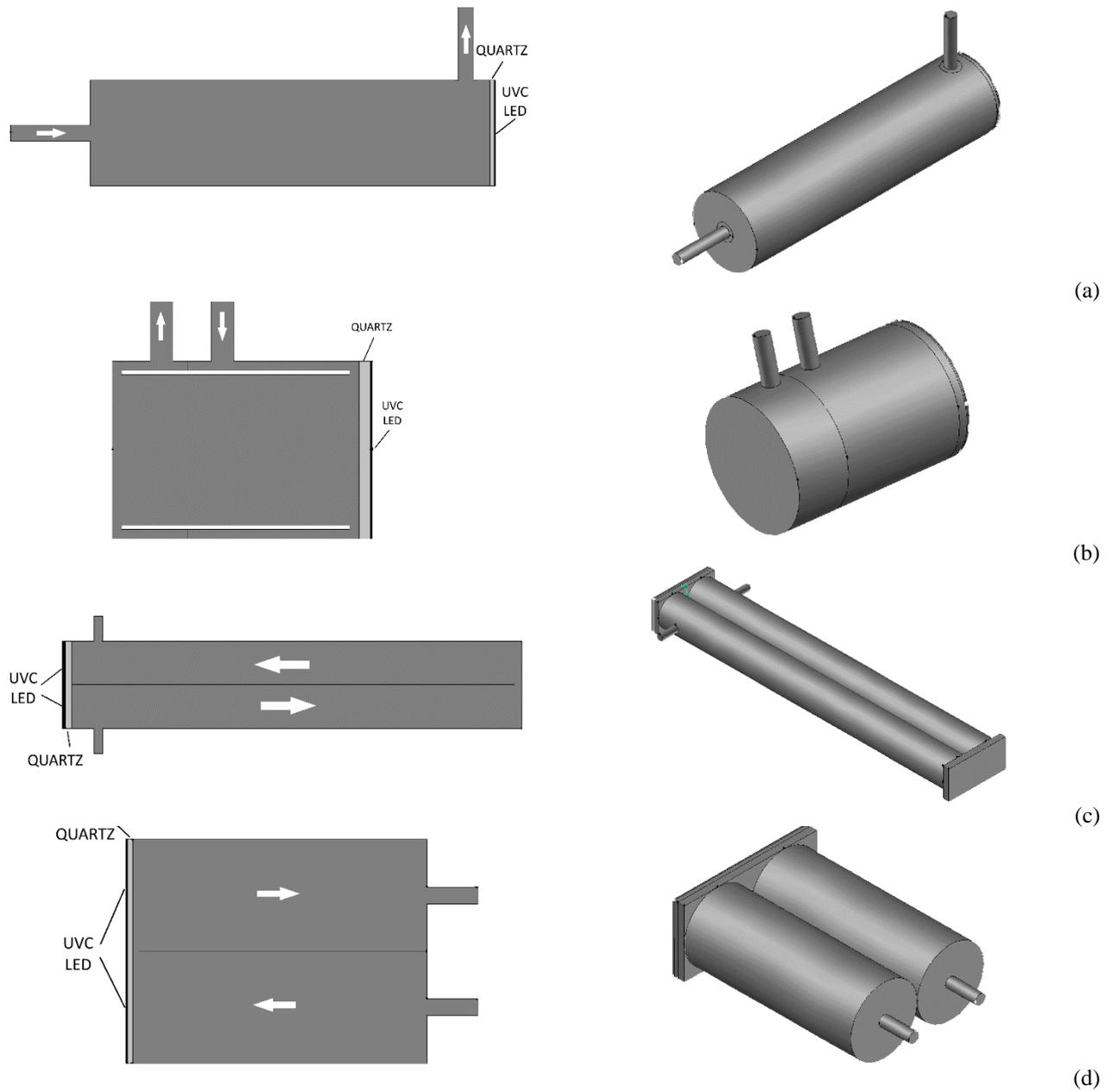


Fig. 1. Four different models of UVC reactor design a) type 1, b) type 2, c) type 3, d) type 4

شكل ١- چهار مدل مختلف طراحی راکتور UVC: نوع ١ (a)، نوع ٢ (b)، نوع ٣ (c)، نوع ٤ (d)

جدول ٢- مشخصات چهار مدل مختلف راکتور UVC

Table 2. Specification of four different models of UVC reactors

Reactor type	Number of LEDs	Reactor diameter (mm)	Reactor length (mm)	LED power (mW)
Type 1	1	40	150	25
Type 2	1	40	60	25
Type 3	2	10	100	12.5
Type 4	2	40	100	12.5



نور فرابنفش را فقط در یک جهت مانند آینه منعکس می‌کند. ضریب انعکاس تفلون و آلومینیوم نیز به ترتیب برابر با ۹۰ و ۸۰ درصد است.

برای شبیه‌سازی راکتور فرابنفش باید معادلات پیوستگی، ناویر-استوکس، انتقال جرم و تشعشع هم‌زمان باهم حل شوند. جریان آب داخل راکتور فرابنفش از نوع جریان آشفته است. برای شبیه‌سازی تشعشع از مدل DOM استفاده شد. معادلات پیوستگی، ناویراستوکس رینولدز میانگین، انتقال جرم و تشعشع مطابق معادلات ۱ تا ۴ است ([White, 2011](#), [Modest, 2003](#), [Bird et al., 2006](#))

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \nabla \cdot \tau^t \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (u C) = D \nabla^2 C - K I C \quad (3)$$

$$(4)$$

$$s \cdot \nabla I(x, s) + (k + \sigma_s) I(x, s) = k I_b(T) + \sigma_s \int_{4\pi} \phi(s, s') I(x, s') d\Omega(s')$$

که در آن‌ها

u سرعت، ρ چگالی، p فشار، μ ویسکوزیته دینامیکی، C غلظت میکروارگانیزم، D ضریب پخش، K ثابت غیر فعال‌سازی میکروارگانیزم، I شدت تشعشع، x بردار مکان، s بردار یکه جهت، k ضریب جذب، σ_s ضریب پخش، I_b تابع انتشار جسم سیاه، ϕ تابع فاز و Ω زاویه فضایی برای بردار جهت s' است.

همچنین تانسور تنش آشفته τ^t مطابق معادلات ۵ و ۶ است ([Lauder and Spalding, 1972](#))

$$(5)$$

$$\tau^t = \mu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left[\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right]$$

$$\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (6)$$

که در آن‌ها

(جایی که نور فرابنفش به سیال می‌تابد) ۴ سانتی‌متر بود. جهت جریان‌های ورودی و خروجی در شکل ۱ با فلش نمایش داده شده‌اند. برای راکتور نوع ۱ و ۲ یک LED فرابنفش با توان ۲۵ میلی‌وات در نظر گرفته شد. همچنین برای راکتور نوع ۳ و ۴ دو LED با توان ۱۲/۵ میلی‌وات قرار داده شد. توان LEDهای استفاده شده در این پژوهش بر اساس محدوده توان رایج در LEDهای UV-C تجاری موجود در بازار انتخاب شد. معمولاً LEDهایی با طول موج ۲۷۵ نانومتر دارای توان خروجی کمتر از ۱۰۰ میلی‌وات هستند. در این پژوهش، از LEDهایی با توان تابشی ۱۲/۵ و ۲۵ میلی‌وات استفاده شد. این مقدار، علاوه بر تأمین شدت تابشی مناسب برای غیر فعال‌سازی میکروارگانیزم‌ها، از نظر قیمت، دسترسی آسان و امکان‌پذیری نصب در راکتورهای کوچک نیز مقرون‌به‌صرفه و عملی هستند.

طول موج LED فرابنفش ۲۷۵ نانومتر و شکل الگوی تابش LED نیز کسینوسی در نظر گرفته شد. الگوی تابش کسینوسی LED در شکل ۲ نمایش داده شده است. این الگو تقریباً خیلی خوبی از الگوی بالن شکل است. الگوی بالن شکل معمولاً الگوی تابشی تعداد زیادی از LEDهای موجود در بازار است ([Moreno et al., 2019](#))

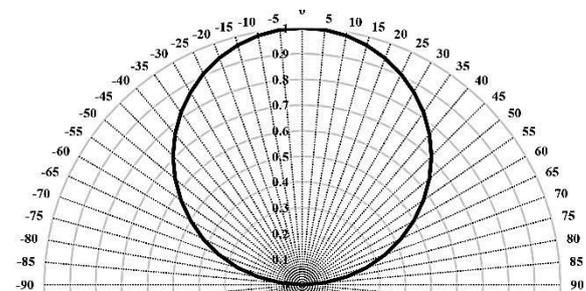


Fig. 2. LED cosine radiation pattern
شکل ۲- الگوی تشعشع کسینوس LED

LED فرابنفش با استفاده از کوارتز از محیط داخل راکتور که آب جریان دارد جدا شده است. کوارتز توانایی عبور نور فرابنفش در ناحیه UVC را دارد. دبی آب ورودی به راکتور ۲ لیتر بر دقیقه و ضریب جذب آب ۹۵ درصد است. برای دیواره‌های راکتور دو جنس تفلون و آلومینیوم باهم مقایسه شدند. تفلون نور فرابنفش را به صورت یکنواخت در همه جهات منعکس می‌کند، اما آلومینیوم



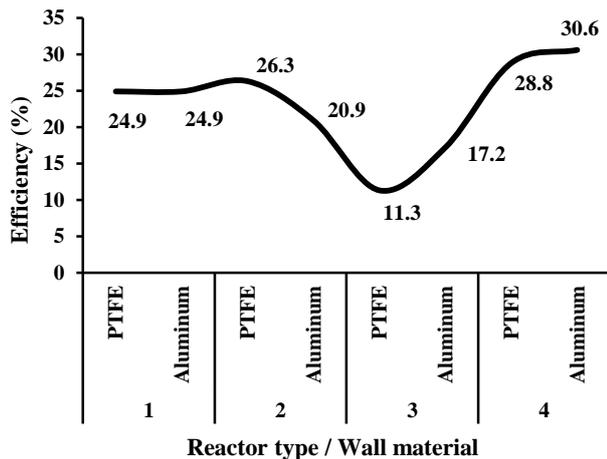


Fig. 3. The relation of the logarithm value according to the applied dose for *Escherichia Coli* bacteria (Kheyrandish, 2018)

شکل ۳- رابطه مقدار لگاریتم با توجه به دوز اعمال شده برای باکتری اشرشیاکلی (Kheyrandish, 2018)

مش بندی شدند. مطابق شکل ۴، از مش پلی هدرآ^۳ برای این کار استفاده شد. تعداد مش های راکتورهای نوع ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب برابر با ۶۱۱۶۷، ۸۴۱۴۴، ۳۰۴۹۲ و ۱۳۷۵۷۷ بود. برای بررسی حساسیت مش، برای هر راکتور سه نوع مش درشت، متوسط و ریز در نظر گرفته شد. در جدول ۳ مقدار لگاریتم و درصد خطا برای این سه نوع مش برای هر راکتور نشان داده شده است. با توجه به این که درصد خطا بین مش متوسط و ریز مقدار کمی است، مش های متوسط برای شبیه سازی در نظر گرفته شده اند.

شرایط مرزی در نظر گرفته شده نیز مطابق جدول ۴ است. در نرم افزار فلوئنت، مدل حل گر بر روی pressure-based قرار داده شده و جریان به صورت پایا در نظر گرفته شده است. در بخش روش های حل نیز از روش SIMPLE برای کوپل فشار و سرعت استفاده شده و همچنین از روش مرتبه دوم برای گسسته سازی معادلات ناویر-استوکس، جرم و تشعشع استفاده شده است. برای ارتباط غیر فعال سازی میکروارگانیسم ها با اعمال دوز تشعشع فرابنفش طبق معادله ۱۰ در معادله انتقال جرم و اعمال الگوی کسینوسی پروفایل تابش LED، کد UDF نوشته شده است. کد استفاده شده برای UDF مطابق زیر است:

μ_t ویسکوزیته آشفته، C_μ ضریب ویسکوزیته آشفته، κ انرژی سینتیک آشفته و ε نرخ اتلاف آشفته است. مدل Realizable $(\kappa - \varepsilon)$ برای شبیه سازی حالت آشفته استفاده می شود. در مدل Realizable $(\kappa - \varepsilon)$ دو معادله برای κ و ε باید به صورت زیر حل شود (Shih et al., 1995)

(۷)

$$\frac{\partial(\rho\kappa u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t/\sigma_\kappa) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] - \rho \overline{u_i u_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon$$

(۸)

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t/\sigma_\varepsilon) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{\kappa + \sqrt{\nu \varepsilon}}$$

(۹)

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta+5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

که در آن ها

C_2 یک عدد ثابت، S_{ij} نرخ متوسط تانسور کرنش، ν ویسکوزیته سینماتیکی، σ_κ و σ_ε عدد پراوتل آشفته برای κ و ε هستند. مقدار C_2 ، σ_κ و σ_ε به ترتیب برابر با ۱، ۱/۹ و ۱/۲ است (FLUENT Manual, 2008) رابطه مقدار لگاریتم برحسب دوز^۱ اعمال شده در آب برای باکتری اشرشیاکلی مطابق شکل ۳ و معادله ۱۰ است (Kheyrandish, 2018). مقدار دوز فرابنفش به عنوان حاصل ضرب متوسط شدت تشعشع (\bar{I}) و زمان در معرض قرار گرفتن سیال (t) در برابر نور فرابنفش در طول راکتور محاسبه می شود

$$\text{Dose} = \bar{I} \times t \quad (10)$$

(۱۱)

$$\text{Log} = \begin{cases} 0.2706 * \text{Dose}, & \text{Dose} < 3.72 \\ 0.8075 * \text{Dose} - 1.9836, & \text{Dose} \geq 3.72 \end{cases}$$

برای حل معادلات ۱ تا ۴ از نرم افزار فلوئنت^۲ استفاده شد. در ابتدا هندسه های راکتورهای مختلف با استفاده از نرم افزار گمبیت

¹ Dose
² Fluent

³ Polyhedra

جدول ۳- بررسی حساسیت مش در راکتورهای ۱-۴ با جنس دیواره PTFE
Table 3. Grid independence study in reactors 1-4 with PTFE wall material

Polyhedra meshes	Logarithm value	Error (%)	Polyhedra meshes	Logarithm value	Error (%)
Reactor type 1			Reactor type 2		
43741	1.21	27	54469	1.32	20
61167	0.99	4	84144	1.13	3
114823	0.95	-	132034	1.10	-
Reactor type 3			Reactor type 4		
21457	0.57	32	86659	1.58	12
30492	0.45	5	137577	1.43	1
65323	0.43	-	210335	1.41	-

جدول ۴- شرایط مرزی برای شبیه‌سازی عددی راکتور UVC

Table 4. Boundary conditions for numerical simulation of UVC reactor

Velocity inlet	Inlet
Constant value (=1)	The concentration of microorganisms in the inlet
Pressure outlet	Outlet
Stationary wall	Reactor wall
Zero diffusive flux	The concentration of microorganisms in the reactor wall
Opaque	Radiation in the reactor wall
Semi-transparent	Radiation in the quartz wall

```
#define SHOULDER 37.2 // Threshold dose
separating low/high region (mJ/cm2)
//Macro for accessing the local irradiation (Discrete
Ordinates DO model)
#define C_DO(c,t)
C_STORAGE_R_XV(c,t,SV_DO_IRRAD,0)
===== //
//DEFINE_SOURCE: Source term
===== //
DEFINE_SOURCE(uv_source, c, t, dS, eqn)
{
real source, K;
real vel_mag, residence_time, local_fluence,
charac_length;
// Step 1: Calculate flow velocity magnitude in the cell
vel_mag = pow(C_U(c,t)*C_U(c,t) +
C_V(c,t)*C_V(c,t) + C_W(c,t)*C_W(c,t), 0.5);
// Step 2: Estimate characteristic cell length (cubic root
of cell volume)
charac_length = pow(C_VOLUME(c,t), 1.0/3.0);
// Step 3: Estimate residence time = length / velocity
residence_time = charac_length / vel_mag;
// Step 4: Calculate local fluence = intensity ×
```

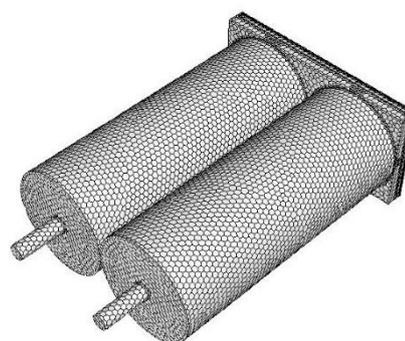


Fig. 4. Mesh appearance in the type 4 reactor
شکل ۴- نمای مش در راکتور نوع ۴

```
#include "udf.h"
===== //
//Constants for dose-response model (two-slope)
===== //
#define K1 0.0623 // Inactivation rate in low-
dose region (cm2/mJ)
#define K2 0.1859 // Inactivation rate in high-
dose region
```



```
// Set angular-dependent reflectivity and
transmissivity
// Reflectivity decreases as angle becomes more
aligned with normal
×specular_reflectivity = 1.0 - factor; // R = 1 -
cos(θ)
×specular_transmissivity = factor; // T =
cos(θ)
}
}
```

همچنین در شبیه‌سازی تشعشع، N_θ و N_ϕ که بیانگر زاویه سمتی^۱ و زاویه قطبی^۲ هستند برابر با ۲۰ و ۵ در نظر گرفته شدند.

۳- صحت‌سنجی

به منظور صحت‌سنجی حل‌گر حاضر، از داده‌های تجربی پژوهش‌ها و همکاران استفاده شد. در این پژوهش، حذف میکروارگانیزم‌های موجود در آب در یک راکتور U شکل با طول ۱۰۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۲۰ میلی‌متر، به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. مطابق شکل ۵، در این راکتور یک LED با توان تابشی ۶۰ میلی‌وات و طول‌موج ۲۶۸ نانومتر در بالا و در راستای محور جریان نصب شده است. جنس دیواره داخلی راکتور کوارتز بود و کل سامانه درون یک محفظه از جنس تفلون با ضریب انعکاس ۹۸ درصد قرار گرفت. همچنین ضریب جذب آب برابر با ۹۶ درصد در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها در چهار نرخ جریان مختلف شامل ۰/۵، ۱/۰، ۱/۵ و ۲/۰ لیتر بر دقیقه انجام شده و میکروارگانیزم هدف، ویروس باکتریوفاژ Qβ بود (Wu et al., 2021).

در شبیه‌سازی انجام شده، هندسه و مشخصات فیزیکی راکتور، محل نصب LED، توان آن و شرایط مرزی ورودی و خروجی مطابق با مشخصات گزارش شده در پژوهش‌ها و همکاران تعریف شدند. مدل تابشی مورد استفاده DOM و معادلات انتقال جرم برای حل میدان غلظت ویروس نیز فعال شدند. برای خواص اپتیکی نیز از ضرایب جذب و انعکاس اعلام شده در آن پژوهش استفاده شده است.

```
residence time
local_fluence = C_DO(c,t) * residence_time;
// Save fluence to UDMI slot 1 for post-processing
C_UDMI(c,t,1) = local_fluence;
// Step 5: Dose-response model (shoulder behavior
with two slopes)
if (local_fluence <= SHOULDER)
{
// For low dose, use K1
C_UDMI(c,t,0) = -log(C_YI(c,t,0)) / K1;
K = K1;
}
else
{
// For high dose, use K2 + correction to match
continuity
C_UDMI(c,t,0) = -log(C_YI(c,t,0)) / K2 +
SHOULDER * (K2 - K1) / K2;
K = K2;
}
// Step 6: Source term for UV inactivation: -K * rho * I
* C
source = -K * C_R(c,t) * C_DO(c,t) * C_YI(c,t,0);
// Derivative of source w.r.t. species concentration
(needed for solver)
dS[eqn] = -K * C_R(c,t) * C_DO(c,t);
return source;
}

===== //
//DEFINE_DOM_SPECULAR_REFLECTIVITY:
Directional reflection with cosine model
===== //
DEFINE_DOM_SPECULAR_REFLECTIVITY(use
r_dom_spec_refl, f, t, nband, n_a, n_b,
ray_direction, en,
internal_reflection,
specular_reflectivity,
specular_transmissivity)
{
real factor, cos_theta;
// Step 1: Calculate the cosine of the angle between
the incident ray and surface normal
cos_theta = NV_DOT(ray_direction, en); // dot
// Step 2: Only apply model when both media
indices are air (example: n_a = n_b = 1)
if (n_a == 1 && n_b == 1)
{
```

¹ Azimuthal Angle

² Polar Angle



جدول ۵- مقایسه مقدار لگاریتم شبیه‌سازی این پژوهش با داده‌های تجربی وو و همکاران (Wu et al., 2021)

Table 5. Comparison of Logarithm value of the simulation of the present work with the experimental data of Wu et al. (Wu et al., 2021)

Flow rate (L/min)	The experimental data of Wu et al.	Simulation of the present work	Percentage error (%)
0.5	3.14	3.31	5.4
1	1.92	1.73	9.8
1.5	1.39	1.23	1
2	1.11	0.97	12.6

نشان داد. این نتیجه نشان می‌دهد که در هندسه فشرده‌تر نوع ۲، بازتاب‌های پخش شده از دیواره PTFE منجر به توزیع مؤثرتر تابش در حجم راکتور شده است. در مقابل، در راکتورهای نوع ۳ و ۴، دیواره آلومینیومی عملکرد بهتری نسبت به PTFE داشت. در نوع ۳، آلومینیوم موجب کاهش لگاریتمی $0/68$ در مقایسه با $0/45$ در PTFE شد، در حالی که دوز تابشی نیز بالاتر بود ($2/5 \text{ mJ/cm}^2$ در مقابل $1/7 \text{ mJ/cm}^2$).

در نوع ۴ نیز، جنس آلومینیوم به کاهش لگاریتمی $1/64$ منجر شد که بالاتر از مقدار $1/43$ در حالت PTFE بود. این نتایج نشان می‌دهد که در هندسه‌های بازتر یا دارای چند منبع تابشی (مانند نوع ۳ و ۴)، بازتاب آینه‌ای آلومینیوم در جهت‌دهی تابش به سمت منطقه فعال کارآمدتر از بازتاب پخش شده PTFE عمل کرده است. بنابراین، اثر جنس دیواره به شدت به هندسه راکتور وابسته است. دیواره‌های بازتابنده از نوع دیفیوز (مانند PTFE) در هندسه‌های فشرده مؤثرتر هستند، در حالی که دیواره‌های آینه‌ای (مانند آلومینیوم) در هندسه‌های کشیده عملکرد بهتری دارند. در مجموع، با در نظر گرفتن هم‌زمان دوز و کاهش لگاریتمی، می‌توان راکتورها را از نظر کارایی ضد عفونی به صورت زیر رتبه‌بندی کرد: نوع ۴ < نوع ۲ < نوع ۳ < نوع ۱. این رتبه‌بندی بیانگر آن است که طراحی بهینه هندسه راکتور همراه با انتخاب درست جنس دیواره می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کارایی ضد عفونی داشته باشد.

در شکل ۸ کانتورهای غلظت میکروارگانیسم‌ها، شدت تابش فرابنفش و سرعت جریان برای راکتور نوع ۱ در دو حالت استفاده از دیواره PTFE و آلومینیومی نمایش داده شده است. در بررسی کانتور تابش فرابنفش مشاهده می‌شود که در حالت استفاده از دیواره تفلونی، توزیع شدت تابش در راستای شعاعی راکتور نسبتاً



Fig. 5. View of the reactor used in the work of Wu et al. (Wu et al., 2021)

شکل ۵- نمایی از راکتور استفاده شده در کار وو و همکاران (Wu et al., 2021)

جدول ۵ نتایج شبیه‌سازی لگاریتم کاهش غلظت ویروس را در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی ارائه می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود، تطابق مناسبی میان نتایج مدل‌سازی و مقدار تجربی مشاهده می‌شود که اعتبار مدل عددی را تأیید می‌کند.

۴- نتایج و بحث

برای بررسی تأثیر طراحی هندسی و جنس دیواره بر عملکرد ضد عفونی، مقدار لگاریتم کاهش غلظت و دوز تابشی دریافت شده (مقدار دوز دریافتی توسط سیال در خروجی راکتور) برای چهار نوع راکتور در دو حالت دیواره PTFE و آلومینیوم، در نمودارهای شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. در راکتور نوع ۱، تفاوت محسوسی میان عملکرد دو جنس دیواره دیده نشد. هر دو حالت منجر به کاهش لگاریتمی برابر با $0/99$ در دوز یکسان mJ/cm^2 شدند، که نشان داد در این پیکربندی خاص، جنس دیواره نقش تعیین‌کننده‌ای نداشته و توزیع تابش در فضای راکتور نسبتاً یکنواخت بود.

در راکتور نوع ۲، دیواره تفلونی (PTFE) با کاهش لگاریتمی $1/13$ نسبت به دیواره آلومینیومی با مقدار $0/83$ عملکرد بهتری



دیواره تفلونی، کاهش غلظت در سطح مقطع یکنواخت تر بوده و نشان دهنده عملکرد بهتر در توزیع دوز تابشی مؤثر است. در حالی که در دیواره آلومینیومی، کاهش غلظت عمدتاً در ناحیه مرکزی راکتور مشاهده می شود و در نواحی نزدیک به دیواره ها به دلیل شدت تابش کمتر، کاهش غلظت ضعیف تری اتفاق افتاد.

کانتور سرعت جریان نشان می دهد که سرعت در نزدیکی ورودی پیشینه است و با حرکت به سمت خروجی کاهش می یابد. این رفتار، ناشی از تبدیل انرژی جنبشی جریان به فشار و همچنین گسترش مقطع جریان در ناحیه راکتور است. سرعت بالاتر در ورودی باعث کاهش زمان ماند سیال شده و در نتیجه فرصت تماس با تابش را محدود می کند.

اگرچه کانتورهای تابش فرابنفش نشان می دهند که در راکتور نوع ۱ توزیع تابش در دیواره تفلونی یکنواخت تر است و در دیواره آلومینیومی تمرکز تابش در مرکز راکتور بیشتر است، اما در عمل کارایی گندزدایی در هر دو پیکربندی تقریباً یکسان بود. این مسئله نشان می دهد که تنها یکنواختی تابش در سطح مقطع نمی تواند به تنهایی معیار تعیین کننده برای کارایی نهایی راکتور باشد. دلیل این پدیده را می توان در نحوه ترکیب و هم پوشانی پارامترهای مؤثر جستجو کرد. اولاً، در دیواره آلومینیومی، اگرچه تابش در نزدیکی دیواره ها کمتر است، اما بخش مرکزی راکتور که بیشترین دوز تابشی را دریافت می کند، محل عبور حجم قابل توجهی از جریان (به ویژه به دلیل شکل توزیع سرعت) است. از کانتور سرعت مشخص است که بیشترین سرعت در مرکز راکتور قرار دارد؛ در نتیجه بخش عمده سیال از ناحیه ای عبور می کند که در آن شدت تابش بالا بوده و این موضوع می تواند باعث جبران افت تابش در نواحی کناری شود. ثانیاً، در دیواره تفلونی که تابش به طور یکنواخت تری توزیع شده است، اگرچه نواحی کم تابش در حاشیه کمتر دیده می شوند، اما شدت تابش در ناحیه مرکزی ممکن است به اندازه تابش متمرکز آلومینیوم بالا نباشد. بنابراین، از دیدگاه مجموع انرژی تابشی جذب شده توسط میکروارگانیزم ها در طول مسیر، دو پیکربندی ممکن است به نتایج نزدیک به هم منتهی شوند. نکته دیگر به هندسه راکتور نوع ۱ بازمی گردد که ساختار نسبتاً ساده ای دارد و فاقد شکست یا انحناهای جریان است. در چنین حالتی، احتمال ایجاد نواحی مرده یا جریان های ثانویه که باعث حبس میکروارگانیزم ها در نواحی با تابش ناکافی شود، کمتر است. این

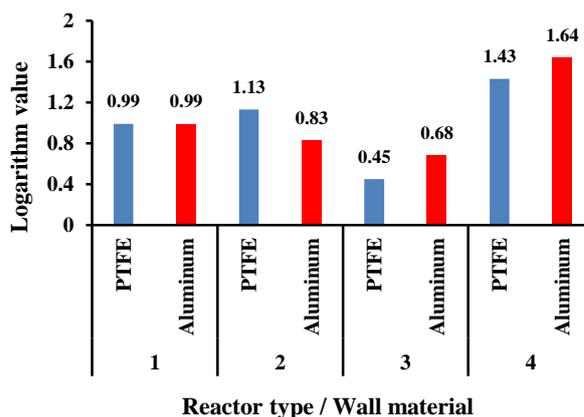


Fig. 6. Comparison of the logarithm value of different reactors with PTFE and aluminum wall materials

شکل ۶- مقایسه مقدار لگاریتم راکتورهای مختلف با جنس دیواره PTFE و آلومینیوم

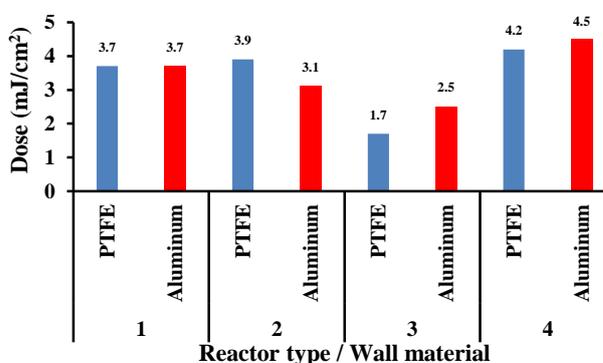


Fig. 7. Comparison of the dose of different reactors with PTFE and aluminum wall materials

شکل ۷- مقایسه مقدار دوز راکتورهای مختلف با جنس دیواره PTFE و آلومینیوم

یکنواخت است. این موضوع ناشی از بازتاب بالا و پراکنده نور توسط ماده PTFE است که موجب کاهش نقاط سایه و توزیع همگن تابش در سطح مقطع راکتور می شود. در مقابل، در راکتور با دیواره آلومینیومی، بازتاب نور بیشتر به صورت جهت دار انجام می شود و در نتیجه شدت تابش عمدتاً در نواحی مرکزی راکتور متمرکز می شود، در حالی که در نزدیکی دیواره ها کاهش محسوسی دارد. این تفاوت در رفتار نوری باعث می شود در دیواره آلومینیومی نواحی ای با دوز تابشی ناکافی شکل گیرد.

در کانتورهای غلظت نیز می توان مشاهده کرد که در هر دو نوع دیواره، غلظت میکروارگانیزم ها در نزدیکی ناحیه ورود سیال به دلیل سرعت بالاتر جریان، بیشتر است و به تدریج با حرکت در طول راکتور و قرار گرفتن در معرض تابش کاهش می یابد. در



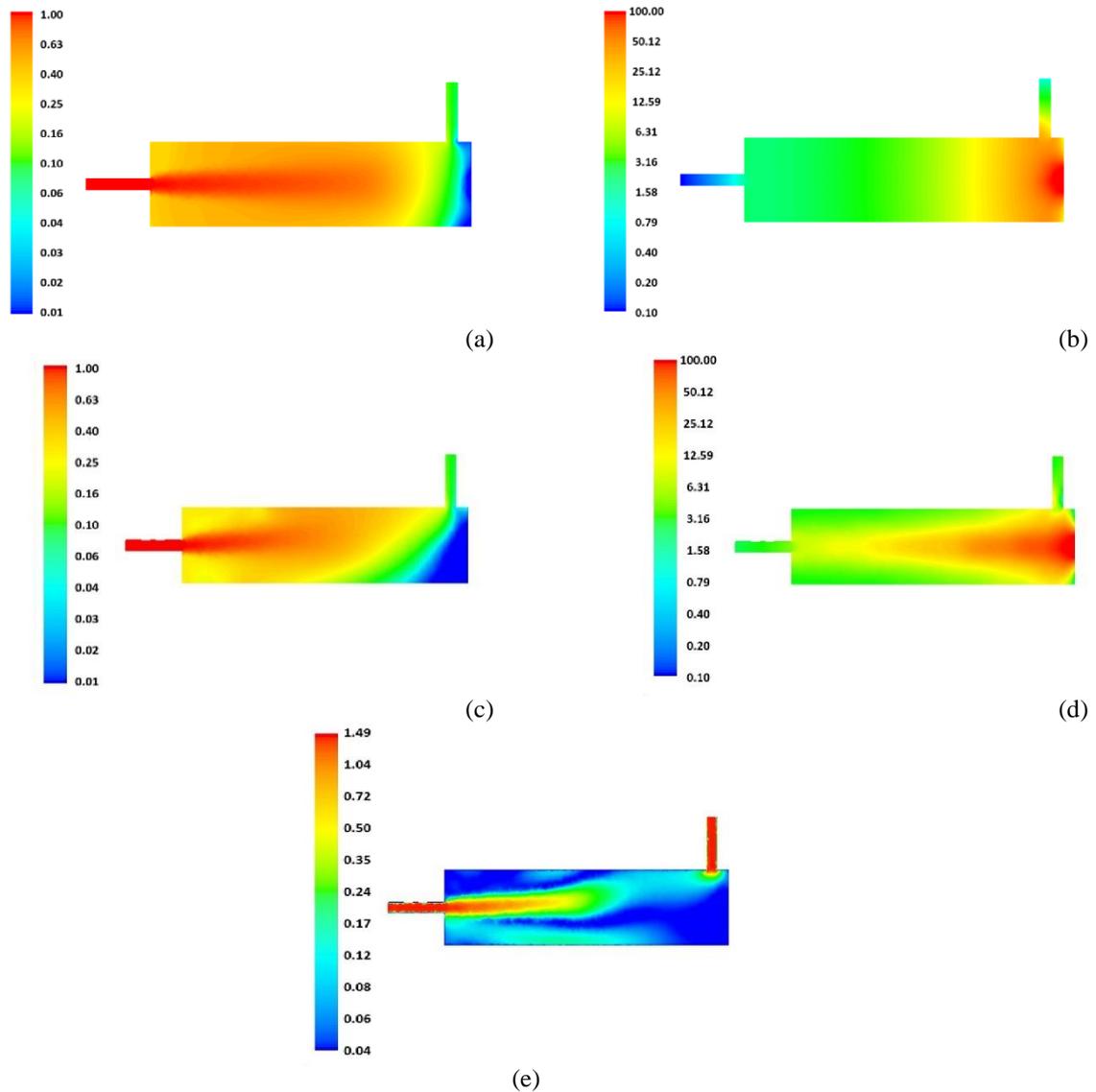


Fig. 8. Contour of concentration, UVC radiation and velocity in the type 1 reactor a) concentration in PTFE wall, b) UVC radiation in PTFE wall, c) concentration in aluminum wall, d) UVC radiation in aluminum wall, e) velocity

شکل ۸- کانتور غلظت، تابش UVC و سرعت در راکتور نوع ۱: (a) غلظت در دیوار PTFE، (b) تابش UVC در دیوار PTFE،

(c) غلظت در دیوار آلومینیوم، (d) تابش UVC در دیوار آلومینیوم و (e) سرعت

سرعت جریان و مسیر حرکت غالب سیال انجام شود تا جمع‌بندی دقیقی از اثر پارامترهای هندسی و نوری حاصل شود.

در شکل ۹ کانتورهای غلظت میکروارگانیزم‌ها، شدت تابش فرابنفش و سرعت جریان در راکتور نوع ۲ برای دو جنس دیواره PTFE و آلومینیومی نمایش داده شده‌اند. بررسی کانتور تابش نشان می‌دهد که در هر دو دیواره، شدت تابش در ناحیه مرکزی بیشتر است؛ با این حال، دیواره PTFE به دلیل بازتاب پراکنده نور، تابش

عامل می‌تواند باعث شود که تأثیر تفاوت جنس دیواره کمتر برجسته شود. در مجموع، این نتایج بیانگر آن است که در هندسه‌های ساده، تأثیر متغیر جنس دیواره ممکن است در حدی نباشد که باعث تغییر معنادار در کارایی کلی شود. این در حالی است که در هندسه‌های پیچیده‌تر یا راکتورهایی با حجم و زمان ماند بیشتر، این تفاوت‌ها می‌تواند برجسته‌تر و تعیین‌کننده‌تر شود. بنابراین، تحلیل عملکرد راکتور باید هم‌زمان با بررسی توزیع تابش،



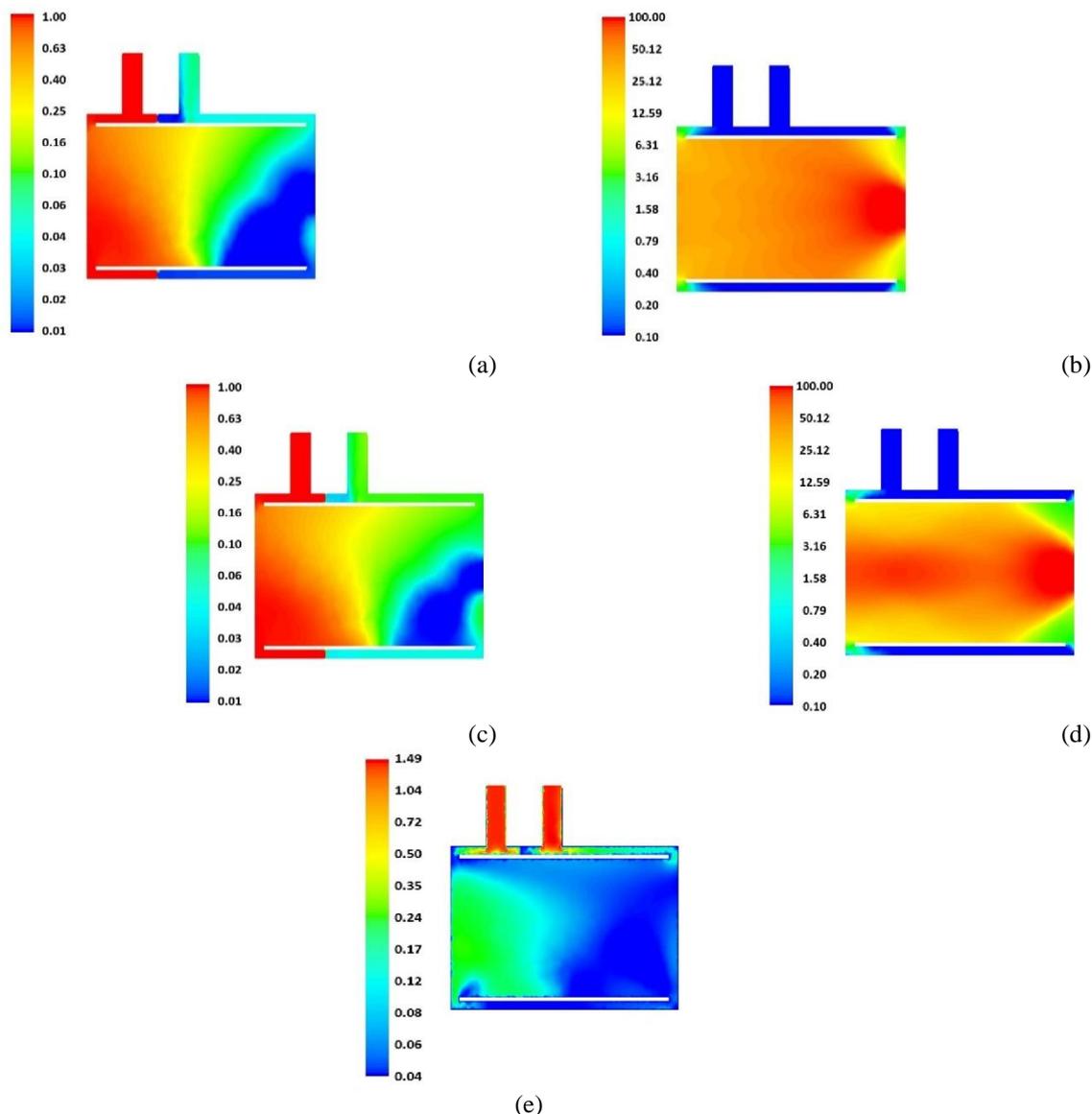


Fig. 9. Contour of concentration, UVC radiation and velocity in the type 2 reactor a) concentration in PTFE wall, b) UVC radiation in PTFE wall, c) concentration in aluminum wall, d) UVC radiation in aluminum wall, e) velocity

شکل ۹- کانتور غلظت، تابش UVC و سرعت در راکتور نوع ۲: (a) غلظت در دیوار PTFE، (b) تابش UVC در دیوار PTFE، (c) غلظت در دیوار آلومینیوم، (d) تابش UVC در دیوار آلومینیوم، (e) سرعت

محدوده تابش مستقیم قرار دارد. به دلیل بازتاب ضعیف‌تر و جهت‌دار بودن نور در آلومینیوم، تابش مؤثر کافی دریافت نمی‌کند. این الگوی تابشی در کانتور غلظت نیز بازتاب یافته است. ناحیه یادشده در سمت راست و بالا و پایین راکتور با رنگ سبز مشخص است که نشان‌دهنده تجمع میکروارگانیسم‌ها است. اندازه این ناحیه در دیواره آلومینیومی بزرگتر است و دلالت بر عملکرد ضعیف‌تر آن در توزیع دوز تابشی دارد. در مقابل، در دیواره تفلونی

یکنواخت‌تری در راستای شعاعی فراهم کرده، درحالی‌که در دیواره آلومینیومی تابش به‌صورت متمرکز در مرکز باقی مانده و در نواحی کناری کاهش شدیدی داشت. یکی از ویژگی‌های بارز در این راکتور، وجود ناحیه‌ای با شدت تابش پایین در بالا و پایین سمت راست راکتور است که در هر دو نوع دیواره وجود دارد، اما در دیواره آلومینیومی شدیدتر و گسترده‌تر است. این ناحیه که در نزدیکی LED و در زاویه خارج از



امتداد راکتور نسبتاً پایدار بوده و بیشترین سرعت در مرکز مقطع راکتور قرار دارد. این الگوی جریان باعث شده بخش قابل توجهی از سیال از ناحیه مرکزی عبور کند. با توجه به اینکه در پیکربندی آلومینیومی، تابش در این ناحیه متمرکزتر و در امتداد راکتور حفظ شده، امکان تماس مؤثرتر بین تابش و سیال فراهم شده است.

مقایسه عملکرد عددی نیز برتری دیواره آلومینیومی را تأیید می‌کند. مقدار شاخص گندزدایی برای دیواره آلومینیومی برابر با ۰/۶۸ بوده، در حالی که برای PTFE این مقدار ۰/۴۵ است. این اختلاف معنادار نشان می‌دهد که در راکتور نوع ۳، توزیع جهت‌دار تابش در آلومینیوم به دلیل حفظ شدت در طول راکتور، نقش مهم‌تری در عملکرد ایفا کرده است.

در شکل ۱۱، کانتورهای غلظت میکروارگانیزم‌ها، شدت تابش فرابنفش و سرعت جریان برای راکتور نوع ۴ در دو حالت استفاده از دیواره‌های PTFE و آلومینیومی نمایش داده شده‌اند. این راکتور دارای هندسه‌ای دوبخشی است که سیال ابتدا وارد بخش اول با سرعت بالا شده و پس از عبور از آن، وارد بخش دوم با سرعت پایین‌تر می‌شود. این ساختار خاص منجر به توزیع متفاوتی از تابش، غلظت و سرعت در مقایسه با راکتورهای پیشین شده است.

در کانتور تابش شکل‌های ۱۱-b و ۱۱-d تفاوت توجهی میان عملکرد دو جنس دیواره دیده می‌شود. در حالت استفاده از دیواره PTFE، بازتاب پخش شونده نور باعث شده تابش به‌طور یکنواخت‌تری در سطح مقطع راکتور توزیع شود و نواحی نزدیک دیواره نیز دوز تابش مناسبی دریافت کنند. این ویژگی منجر به کاهش نواحی کم تابش و توزیع همگن‌تر انرژی نوری در عرض راکتور شده است. در مقابل، در حالت دیواره آلومینیومی، بازتاب جهت‌دار سطح آینه‌ای منجر به تمرکز تابش در مرکز راکتور شده است، در حالی که شدت تابش در نزدیکی دیواره‌ها به شکل محسوسی کمتر است. با این حال، در این هندسه خاص، تمرکز تابش در مرکز نه تنها نقطه ضعف محسوب نمی‌شود، بلکه به دلیل هم‌راستایی با مسیر اصلی جریان به مزیت تبدیل شده است. در کانتورهای غلظت میکروارگانیزم‌ها شکل‌های ۱۱-a و ۱۱-c، کاهش غلظت از ورودی به سمت خروجی در هر دو حالت مشاهده می‌شود. در دیواره PTFE، کاهش غلظت در عرض راکتور یکنواخت‌تر بوده که با توزیع یکنواخت تابش هم‌راستا است؛ اما در حالت دیواره آلومینیومی، کاهش غلظت در مرکز راکتور

این ناحیه محدودتر است که به بازتاب مؤثرتر و یکنواخت‌تر نور نسبت داده می‌شود.

کانتور سرعت جریان در این راکتور نشان می‌دهد که سرعت در سمت چپ راکتور بیشتر است که با شکل هندسی خاص راکتور مرتبط است. این افزایش سرعت باعث کاهش زمان ماند سیال در این بخش و در نتیجه کاهش فرصت تماس با تابش می‌شود. همین مسئله منجر به کاهش بازده گندزدایی در این مناطق می‌شود.

با توجه به داده‌های عددی، در راکتور نوع ۲، دیواره PTFE عملکرد بهتری داشته و مقدار شاخص گندزدایی آن (۱/۱۳) بیشتر از آلومینیوم (۰/۸۳) بوده است. این اختلاف قابل توجه، نقش تعیین‌کننده بازتاب مؤثرتر در بهبود دوز تابشی را در هندسه خاص راکتور نوع ۲ نشان می‌دهد.

در شکل ۱۰ کانتورهای غلظت میکروارگانیزم‌ها، شدت تابش فرابنفش و سرعت جریان برای راکتور نوع ۳ نمایش داده شده است. این راکتور دارای هندسه‌ای خطی و ساده است، اما ویژگی‌هایی دارد که بر توزیع تابش و کارایی گندزدایی تأثیرگذار بوده‌اند.

در کانتور تابش مشاهده می‌شود که در پیکربندی با دیواره آلومینیومی شکل ۱۰-d، برخلاف راکتورهای قبلی، شدت تابش در انتهای راکتور نسبت به دیواره تفلونی بیشتر است. این تفاوت می‌تواند ناشی از جهت‌دار بودن بازتاب نور در آلومینیوم باشد که تابش را به صورت متمرکز و مؤثر به سمت پایین دست هدایت کرده است. در مقابل، در دیواره PTFE شکل ۱۰-b، توزیع تابش بیشتر در ابتدای راکتور متمرکز شده و در انتها کاهش یافته است. این موضوع احتمالاً به دلیل بازتاب پخش شونده PTFE است که انرژی نور را در ناحیه ابتدایی مصرف کرده و توان کمتری برای نواحی انتهایی باقی گذاشته است.

این تفاوت تابش به‌وضوح در کانتور غلظت میکروارگانیزم‌ها نیز دیده می‌شود. در دیواره آلومینیومی شکل ۱۰-c، کاهش غلظت میکروارگانیزم‌ها در امتداد طول راکتور پیوسته و عمیق‌تر است و در نواحی انتهایی نیز ادامه دارد. در حالی که در دیواره PTFE شکل ۱۰-a، کاهش غلظت بیشتر در ابتدای راکتور اتفاق افتاده و در انتهای راکتور روند کاهش کندتر شده است. این موضوع به کاهش تابش در انتهای راکتور در این نوع دیواره نسبت داده می‌شود. کانتور سرعت جریان شکل ۱۰-e نشان می‌دهد که جریان در



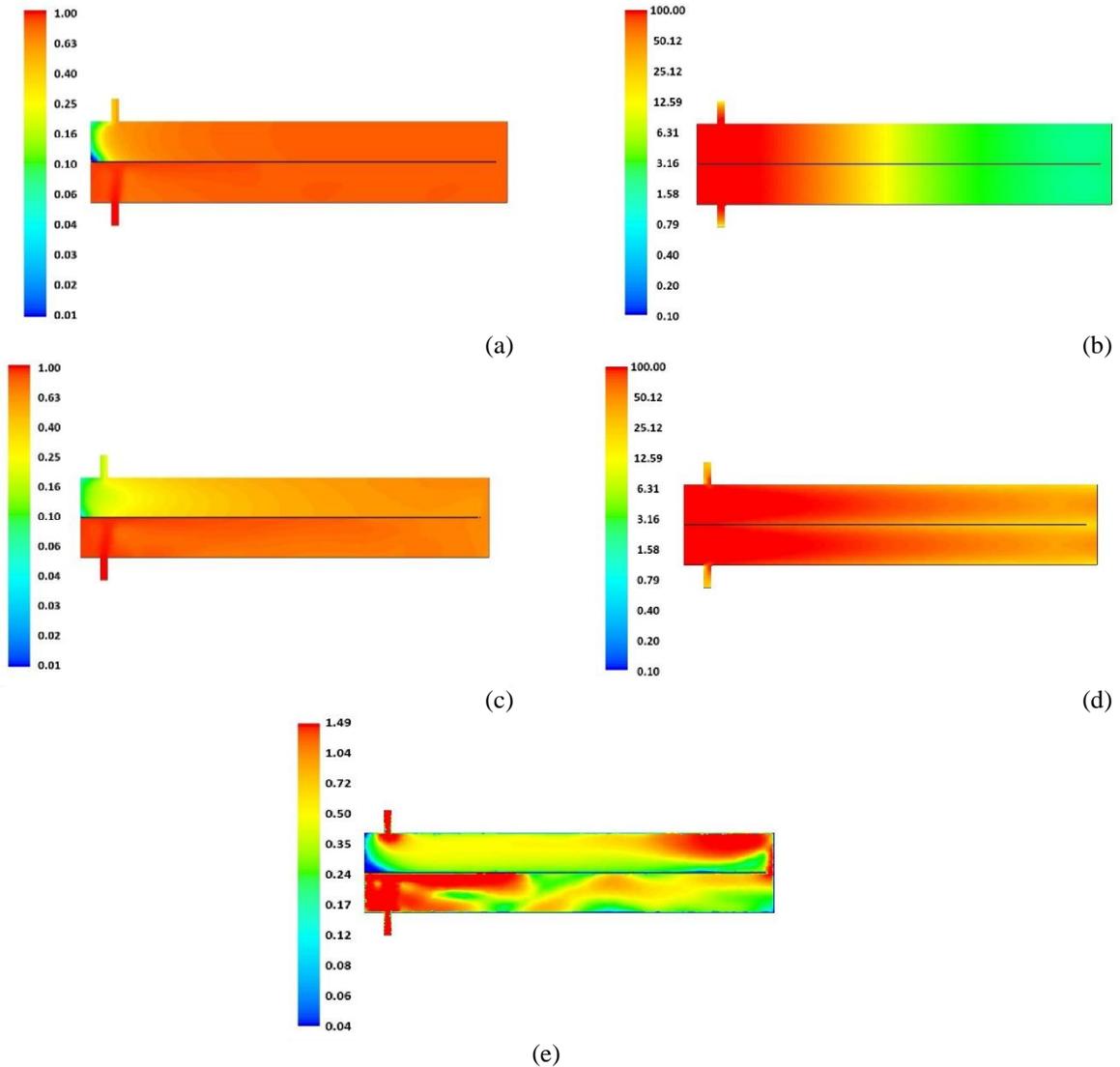


Fig. 10. Contour of concentration, UVC radiation and velocity in the type 3 reactor a) concentration in PTFE wall, b) UVC radiation in PTFE wall, c) concentration in aluminum wall, d) UVC radiation in aluminum wall, e) velocity
 شکل ۱۰- کانتور غلظت، تابش UVC و سرعت در راکتور نوع ۳: (a) غلظت در دیوار PTFE، (b) تابش UVC در دیوار PTFE، (c) غلظت در دیوار آلومینوم، (d) تابش UVC در دیوار آلومینوم، (e) سرعت

کاهش می‌یابد. این کاهش سرعت باعث افزایش زمان ماند سیال در بخش دوم راکتور شده که در کنار تابش مؤثرتر، نقش مهمی در افزایش بازده گندزدایی ایفا کرده است. به طور خاص، در پیکربندی آلومینیومی که تمرکز تابش در مرکز راکتور و بخش دوم بیشتر است، ترکیب زمان ماند طولانی‌تر و شدت تابش بالاتر منجر به جذب مؤثر انرژی تابشی توسط میکروارگانیسم‌ها و افزایش حذف آنها شده است.

و به‌ویژه در بخش دوم شدیدتر است که ناشی از تمرکز تابش در مرکز و افزایش زمان ماند در ناحیه دوم است. این ویژگی نشان می‌دهد که بخش اعظم جریان که از مرکز عبور می‌کند، دوز تابشی بیشتری دریافت کرده و در نتیجه گندزدایی مؤثرتری اتفاق افتاده است. کانتور سرعت جریان شکل e-11 نیز الگوی مشخصی را نشان می‌دهد. سرعت در بخش اول راکتور بیشینه است و در بخش دوم



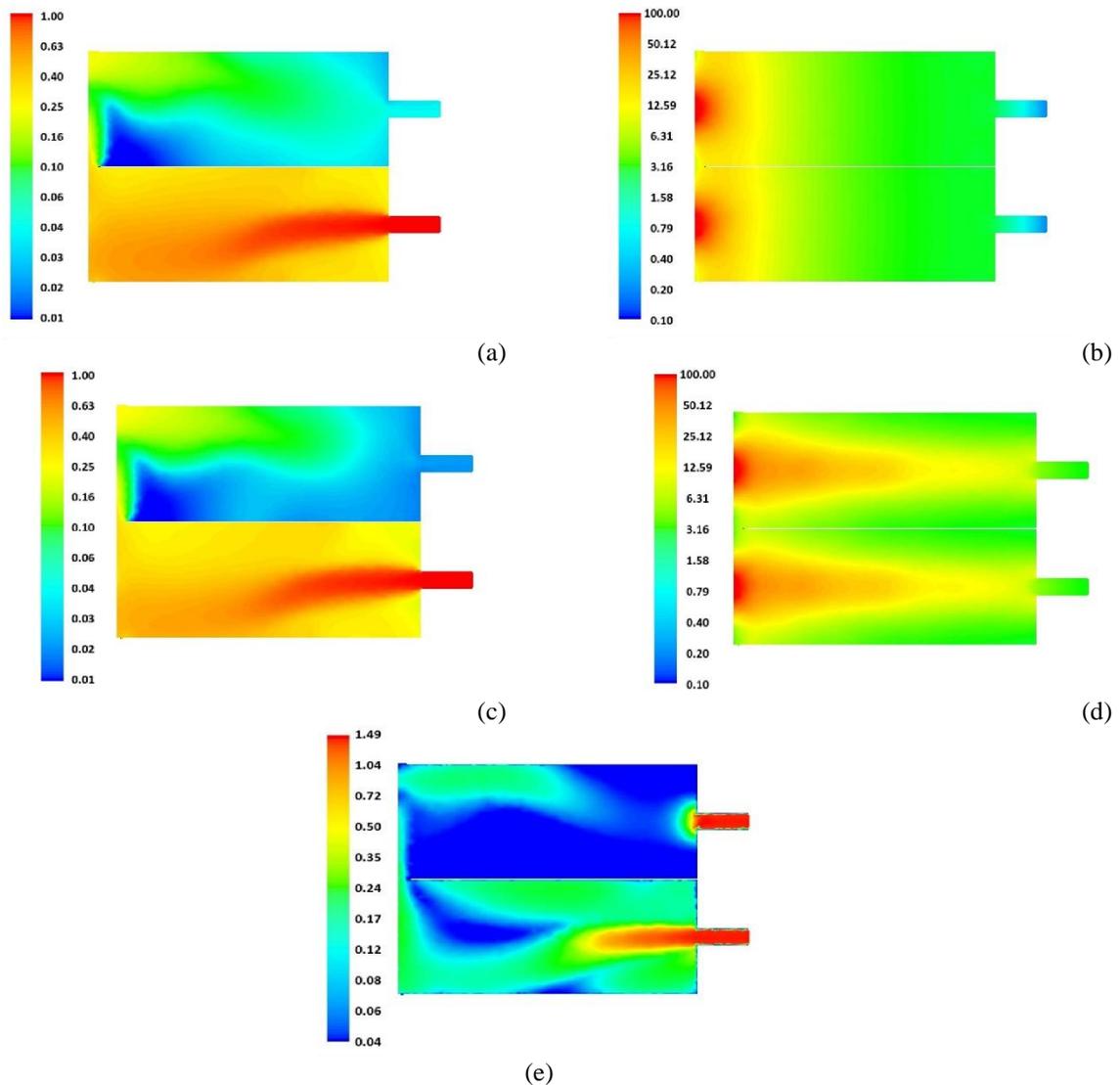


Fig. 11. Contour of concentration, UVC radiation and velocity in the type 4 reactor: a) concentration in PTFE wall, b) UVC radiation in PTFE wall, c) concentration in aluminum wall, d) UVC radiation in aluminum wall, e) velocity

شکل ۱۱- کانتور غلظت، تابش UVC و سرعت در راکتور نوع ۴: (a) غلظت در دیوار PTFE، (b) تابش UVC در دیوار PTFE، (c) غلظت در دیوار آلومینوم، (d) تابش UVC در دیوار آلومینوم، (e) سرعت

کاهش دهد و تابش را به شکل مؤثرتری در حجم فشرده راکتور توزیع کند؛ اما در نوع ۳، دیواره آلومینیومی به دلیل جهت‌دهی مؤثر تابش به انتهای راکتور و هم‌راستایی نسبی با جریان، عملکرد بهتری نسبت به PTFE داشت.

در مقایسه با همه این موارد، راکتور نوع ۴ هم از نظر طراحی هندسی و هم از نظر تطابق تابش و جریان بهینه‌ترین عملکرد را ارائه داده است. نتایج عددی نیز این موضوع را تأیید می‌کنند؛ به طوری که شاخص کاهش لگاریتمی غلظت برای دیواره آلومینیومی

مقایسه راکتور نوع ۴ با سایر راکتورها نشان می‌دهد که این راکتور از نظر عملکرد گندزدایی، برتری قابل توجهی دارد. در راکتور نوع ۱، با وجود توزیع یکنواخت تابش در دیواره PTFE و تمرکز تابش در مرکز در دیواره آلومینیومی، به دلیل هندسه ساده و جریان نسبتاً یکنواخت، تفاوت عملکرد میان دو جنس دیواره محسوس نبوده و شاخص گندزدایی در هر دو حالت برابر با ۰/۹۹ ثبت شده است. در راکتور نوع ۲، عملکرد دیواره PTFE بهتر از آلومینیوم بود، زیرا بازتاب پخش شونده آن توانست نواحی سایه را



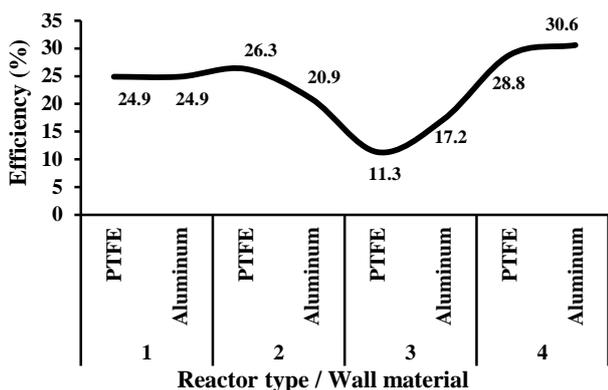


Fig. 12. Comparison of the efficiency of different reactors with PTFE and aluminum wall materials

شکل ۱۲- مقایسه کارایی راکتورهای مختلف با جنس دیواره PTFE و آلومینیوم

شده در این پژوهش، از داده‌های پژوهش‌های وو و همکاران (Wu et al., 2021) و کشاورز فتحی و همکاران (Keshavarzfathy et al., 2021) می‌توان استفاده کرد.

در پژوهش وو و همکاران، از یک LED با توان تابشی ۶۰ میلی وات بهره برده شده است. این راکتور در یک محفظه از جنس تفلون با ضریب بازتاب ۹۸ درصد قرار گرفته است. در شرایط دبی ۲ لیتر بر دقیقه، ضریب جذب آب ۹۶ درصد و باکتریوفاژ $Q\beta$ به‌عنوان شاخص زیستی، کاهش لگاریتمی برابر با $1/11$ گزارش شده است. بر اساس منحنی‌های دوز-پاسخ، این مقدار معادل دوز مؤثر $25/5 \text{ mJ/cm}^2$ برای $Q\beta$ است. با توجه به توان تابشی و شرایط اپتیکی، دوز تئوری ایده‌آل برای این راکتور برابر با 1 mJ/cm^2 محاسبه شد. بنابراین کارایی عملکردی این راکتور حدود $57/8$ درصد است. این عدد نشان‌دهنده بهره‌وری بالا در شرایط آزمایشگاهی و با استفاده از دیواره تفلونی با بازتاب بالا است (Wu et al., 2021) در مقابل، در پژوهش حاضر حداکثر کارایی در راکتور نوع ۴ با دیواره آلومینیومی به دست آمد که برابر با $30/6$ درصد بود ($\log = 1.64$). باید توجه داشت که در طراحی‌های حاضر، ضریب بازتاب دیواره‌ها به‌صورت محافظه کارانه‌تر در نظر گرفته شده است (۹۰ درصد برای تفلون و ۸۰ درصد برای آلومینیوم). با وجود بازتاب کمتر، این راکتور توانسته عملکرد قابل توجهی ارائه دهد.

همچنین در پژوهش کشاورز فتحی و همکاران، طراحی یک راکتور LED با ۱۸ منبع نوری در پیکربندی‌های مختلف انجام شد.

برابر با $1/64$ و برای دیواره PTFE برابر با $1/43$ بوده است که از همه مقادیر ثبت شده در سایر راکتورها بالاتر هستند. همچنین، دوز تابشی دریافتی در خروجی این راکتور نیز بیشتر از سایر انواع بوده است. در مجموع، طراحی دوبخشی، کاهش سرعت در بخش دوم و هم‌راستایی تابش و مسیر جریان در دیواره آلومینیومی، راکتور نوع ۴ را به کارآمدترین گزینه در میان پیکربندی‌های بررسی شده تبدیل کرده است.

برای مقایسه راکتورهای طراحی شده با راکتور ایده‌آل از معادله

۱۱ می‌توان استفاده کرد (Keshavarzfathy and Taghipour, 2019)

$$\text{Dose of ideal reactor} = \frac{P}{Q} \cdot \frac{1}{(\ln 10) \cdot \alpha} \quad (11)$$

$$\text{Efficiency} = \left(\text{Dose} / \text{Dose of ideal reactor} \right) \times 100 \quad (12)$$

که در آنها

P و Q به ترتیب نشان‌دهنده توان LED، دبی سیال و ضریب جذب آب هستند.

مقایسه کارایی چهار نوع راکتور در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که بیشترین کارایی عملکردی مربوط به راکتور نوع ۴ با دیواره آلومینیومی است که به مقدار $30/6$ درصد می‌رسد. این مقدار، بیشترین بازده حذف باکتری در مقایسه با سایر پیکربندی‌ها بوده و نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه طراحی هندسی و جنس دیواره در بهینه‌سازی عملکرد فرایند ضد عفونی است. در مقابل، کمترین کارایی مربوط به راکتور نوع ۳ با دیواره PTFE است که تنها $11/3$ درصد بازده داشته است. این اختلاف عملکرد حاکی از آن است که جنس دیواره و طراحی هندسی به‌صورت هم‌افزا بر کارایی کلی تأثیر می‌گذارند و نمی‌توان هر یک را به‌صورت مستقل ارزیابی کرد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که برای دستیابی به کارایی بالاتر در سیستم‌های UV، ضروری است که طیف وسیع‌تری از طراحی‌های هندسی و جنس دیواره بررسی شوند تا امکان شناسایی ساختارهای بهینه با حداکثر کارایی فراهم شود.

برای ارزیابی علمی و مقایسه‌پذیر کارایی راکتورهای طراحی



نتایج نشان داد که راکتور نوع ۴ با دیواره آلومینیومی، بالاترین کاهش لگاریتمی غلظت میکروارگانیزم ($\log = 1.64$) و بیشترین کارایی عملکردی (۳۰/۶ درصد) را دارد و از نظر توزیع تابش، زمان ماند مؤثر و جهت‌دهی بهینه جریان، نسبت به سایر پیکربندی‌ها برتری داشته است. این در حالی است که در راکتورهای فشرده‌تر مانند نوع ۲، دیواره PTFE با بازتاب پراکنده خود، توزیع همگن‌تری از تابش فراهم کرده و عملکرد بهتری نسبت به آلومینیوم داشته است.

مقایسه با مطالعات پیشین نیز نشان داد که حتی با استفاده از منابع نوری کم قدرت و تعداد محدود LED، می‌توان با طراحی هندسی بهینه و انتخاب مناسب جنس دیواره، به بازده‌های قابل توجهی در فرایند ضدعفونی دست یافت. از این رو، نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان راهنمایی علمی برای طراحی راکتورهای کوچک و پرکاربرد UVC-LED در مقیاس خانگی یا محل مصرف استفاده شود.

در نهایت، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، عوامل دیگری نظیر ضریب جذب‌های بیشتر سیال، خواص نوری دینامیک سیال (مانند جذب وابسته به طول‌موج) و آزمون عملکرد تجربی در مقیاس واقعی نیز بررسی شود تا اعتبار نتایج عددی افزایش یابد و به توسعه سیستم‌های گندزدایی مؤثر و مقرون‌به‌صرفه کمک شود.

۶- قدردانی

به این وسیله نویسنده از دانشگاه تهران برای حمایت‌ها و امکانات ارزشمندشان صمیمانه قدردانی می‌کند.

در بهترین حالت، کارایی ۲۹/۶ درصد برای غیر فعال‌سازی آدنووایروس در دبی ۱ لیتر بر دقیقه گزارش شد (Keshavarzfathy et al., 2021). هرچند این مقدار قابل قبول است، اما در پژوهش حاضر، با استفاده از LEDهایی با توان پایین‌تر (۱۲/۵ و ۲۵ میلی وات) و تعداد کمتر منابع نوری، کارایی نزدیک و حتی در مواردی بهتر (۳۰/۶ درصد) به دست آمده است.

به‌طور کلی، مقایسه این نتایج با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که طراحی هندسی مناسب و بهینه‌سازی موقعیت LEDهایی و جنس دیواره داخلی، حتی با منابع نوری محدود و توان پایین، می‌تواند منجر به عملکرد ضدعفونی مطلوبی شود. برخلاف برخی پژوهش‌های گذشته که تمرکز اصلی بر روی تابش یا نوع میکروارگانیزم بوده، نوآوری اصلی این پژوهش در تحلیل هم‌زمان تأثیر هندسه راکتور و جنس دیواره بر کارایی عملکردی سیستم UV-LED بود.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، چهار مدل مختلف از راکتورهای UVC-LED برای ضدعفونی آب در محل مصرف، با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی، طراحی و شبه‌سازی و مقایسه شدند. تحلیل‌ها شامل بررسی هم‌زمان میدان جریان، انتقال جرم و تابش، تحت شرایط عملیاتی یکسان و با دو جنس مختلف دیواره (PTFE و آلومینیوم) انجام شد. یافته‌های عددی حاکی از آن بود که هندسه راکتور و جنس دیواره به‌صورت برهم‌کنشی بر کارایی گندزدایی تأثیرگذار هستند و نمی‌توان آن‌ها را به‌طور مستقل ارزیابی کرد.

References

- Bird, R. B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N., 2006. Transport Phenomena. Wiley.
- FLUENT Manual, 2008. ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA.
- Hessling, M., Gross, A., Hoenes, K., Rath, M., Stangl, F., Tritschler, H. and Sift, M., 2016. Efficient disinfection of tap and surface water with single high power 285 nm LED and square quartz tube. *Photonics*, 3(1), 7. <https://doi.org/10.3390/photonics3010007>.
- Keshavarzfathy, M. and Taghipour, F., 2019. Computational modeling of ultraviolet light-emitting diode (UV-LED) reactor for water treatment. *Water Research*, 166, 115022. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115022>.
- Keshavarzfathy, M., Hosoi, Y., Oguma, K. and Taghipour, F., 2021. Experimental and computational evaluation of a flow-through UV-LED reactor for MS2 and adenovirus inactivation. *Chemical Engineering Journal*, 407, 127058. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127058>.



- Kheyrandish, A., 2018. Study of the inactivation of microorganisms using UV-LED. Master's Thesis, The University of British Columbia, Canada.
- Kooshan, A. S., Jalali, A. and Chini, S. F., 2022. Performance evaluation of point-of-use UVC-LED water disinfection photoreactors using CFD and response surface methodology. *Journal of Water Process Engineering*, 46, 102545. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102545>.
- Lauder, B. E. and Spalding, D. B., 1972. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, London.
- Matsumoto, T., Tatsuno, I. and Hasegawa, T., 2019. Instantaneous water purification by deep ultraviolet light in water waveguide: *Escherichia Coli* bacteria disinfection. *Water*, 11(5), 968. <https://doi.org/10.3390/w11050968>.
- Modest, M., 2003. Radiative Heat Transfer. Academic Press, London. (Second Edition).
- Moreno, J., Casado, C. and Marugán, J., 2019. Improved discrete ordinate method for accurate simulation radiation transport using solar and LED light sources. *Chemical Engineering Science*, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.04.034>.
- Nguyen, T. M. H., Suwan, P., Koottatep, T. and Beck, S. E., 2019. Application of a novel, continuous-feeding ultraviolet light emitting diode (UV-LED) system to disinfect domestic wastewater for discharge or agricultural reuse. *Water Research*, 153, 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.006>.
- Oguma, K., Kita, R. and Takizawa, S., 2016. Effects of arrangement of UV light-emitting diodes on the inactivation efficiency of microorganisms in water. *Photochemistry and Photobiology*, 92(1), 123-130. <https://doi.org/10.1111/php.12571>.
- Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z. and Zhu, J., 1995. A new k-epsilon eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. *Computers and Fluids*, 24(3), 227-238.
- Wang, C. P. and Lin, W. C., 2021. Combination of ultraviolet-C light-emitting diodes and a spiral-channel configuration in a water disinfection reactor. *Journal of Water Process Engineering*, 42, 102160. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102160>.
- Wang, C. P., Wu, Y. L. and Yang, S. H., 2023. Effect of channel configuration on the water sterilization efficiency of a photoreactor with ultraviolet C light-emitting diodes. *Process Safety and Environmental Protection*, 179, 618-627. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.09.040>.
- White, F. M., 2011. Fluid Mechanics. McGraw Hill.
- Wu, Z., Barua, H., Rylski, J. R., Taylor, J. B. and Kim, J., 2021. A multiple regression model framework for designing a UVC LED reactor for point-of-use water treatment. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 7(8), 1516-1529. <https://doi.org/10.1039/D1EW00215E>.

