



Experimental and Numerical Investigation of a Novel Ultraviolet Water Disinfection Reactor with External Lamps

Seyed Mahdi Safavi¹, Amirhossein Hassanpour², Alireza Jalali^{3*}

1. MSc. Student, School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2. PhD. Student, School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

3. Assoc. Prof., Dept of Energy Conversion, School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

(Corresponding Author) arjalali@ut.ac.ir



<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.592599.3567>

Original Paper

Abstract

Ultraviolet disinfection serves as a safe physical method that generates no chemical by-products, making it a highly desirable alternative to traditional water treatment processes. However, conventional submerged reactors encounter severe operational challenges such as significant pressure drops along the fluid path. This study presents the first physical fabrication and comprehensive validation of a novel UV photoreactor featuring a fully segregated architecture. In this configuration, a central quartz water channel is accompanied by two mercury radiation sources situated in the surrounding air and outside the fluid domain. A concentric cylindrical reflector encloses this entire assembly. This specific design optimally reflects the omnidirectional radiation emitted by the mercury lamps back into the fluid domain. To develop a deeper understanding of the transport phenomena, computational fluid dynamics simulations were conducted. These simulations simultaneously integrated flow hydrodynamics, the discrete ordinates radiation model, and first-order inactivation kinetics. To validate the developed model, an experimental setup was constructed and subjected to biodosimetry testing utilizing *Escherichia coli* (strain ATCC 8739). The implementation of a thermal management mechanism based on forced convection stabilized the lamp surface temperature at an optimal 36.3 °C. This stabilization ensured the consistency of the radiant power output. Microbial evaluations revealed that at the maximum operational flow rate of 27.5 liters per minute, the experimental log reduction value was 3.48. This value demonstrates excellent agreement with the calculated numerical value of 3.29. At lower flow rates of 21.7 and 17.6 LPM, complete pathogen inactivation was achieved, exceeding the laboratory detection limit. The numerical model predicted LRVs of 4.10 and 4.93 for these flow rates, respectively. These findings demonstrate that the synergy between direct and reflected radiation significantly enhances the uniformity of the radiation dose. The successful alignment of experimental and numerical data confirms that this segregated reactor design offers a new paradigm for developing efficient and economical water treatment systems with minimal maintenance requirements.

Keywords:

Ultraviolet Water Disinfection, Computational Fluid Dynamics, Decoupled Photoreactor, Biodosimetry, Cylindrical Reflector.



Received: Feb. 17, 2026

Revised: Apr. 4, 2026

Accepted: Apr. 20, 2026

To cite this article:

Safavi, S. M., Hassanpour, A., Jalali, A., 2026. Experimental and numerical investigation of a novel ultraviolet water disinfection reactor with external lamps. *Water and Wastewater*, 37(1), 64-80. <https://doi.org/10.22093/wwj.2026.592599.3567>.

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

Ensuring a safe drinking water supply requires effective disinfection, but traditional chemical methods generate toxic by-products and struggle with resistant pathogens (Adeoba et al., 2024). Consequently, ultraviolet¹ disinfection has emerged as a preferred chemical-free alternative. However, conventional UV reactors rely on submerged lamps, which leads to severe pressure drops, quartz sleeve fouling, and constant maintenance challenges. While placing light sources externally resolves these hydrodynamic issues, implementing such external designs with the high-power cylindrical mercury lamps necessary for industrial applications remains a fundamental challenge. To address this fundamental gap, this study presents the design, fabrication, and computational fluid dynamics validation of a novel UV photoreactor with a fully segregated architecture. The system features a central quartz water channel surrounded by two external mercury lamps, all enclosed within a concentric cylindrical reflector. This specific configuration overcomes critical engineering challenges by optimally reflecting omnidirectional radiation into the fluid domain and implementing a thermal management mechanism to stabilize lamp temperatures for maximum efficiency. Ultimately, this research demonstrates that the segregated cylindrical architecture provides a new paradigm for developing highly efficient, economical, and low-maintenance water treatment systems.

2. Methodology

The core innovation of this research is a novel water disinfection configuration where radiation sources are positioned outside the fluid flow to maximize the effective dose and improve *Escherichia coli* inactivation. In this design, a central quartz water channel is surrounded by two external UV mercury lamps and enclosed by a concentric cylindrical reflector, with the precise geometric dimensions detailed in Table 1. The physical reactor was constructed using a polyvinyl chloride tube lined with reflective aluminum foil, which demonstrated a 49% reflectance at the target 254 nanometer wavelength. To maintain optimal lamp radiation efficiency, a forced aircooling mechanism was implemented, successfully stabilizing the lamp surface temperature at approximately 36.3 °C. For the experimental

Table 1. Geometric dimensions of the simulated photoreactor

Parameters	Value (mm)
Total length of the photoreactor	560
Diameter of the reflector	300
Diameter of the central quartz water channel	46
Diameter of the UV lamp	28
Distance from the lamp surface to the quartz channel surface	46
Total length of the photoreactor	560
Diameter of the reflector	300

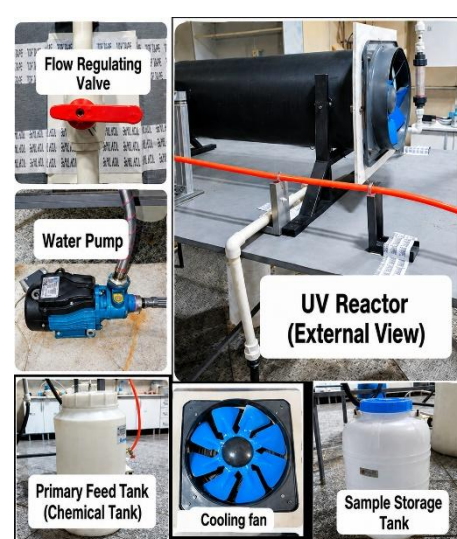


Fig. 1. Experimental arrangement for the biosimetry evaluation

validation, a closed loop biosimetry circuit was developed, as illustrated in Fig. 1, utilizing distilled water and *Escherichia coli* ATCC 8739 at an initial concentration of one million colony forming units per milliliter. The system was tested at three different flow rates of 17.6, 21.7, and 27.5 LPM², with collected samples carefully handled in strict darkness to prevent photoreactivation prior to incubation and colony counting. Complementing this extensive experimental setup, computational fluid dynamics simulations were employed to model the multiphysics nature of the reactor. This numerical approach integrated Reynolds averaged Navier-Stokes equations for flow hydrodynamics, the discrete ordinates model for radiation transport (Sobhani and Shokouhmand, 2017), and first order Eulerian kinetics for pathogen inactivation

¹ Ultraviolet (UV)

² Liters Per Minute (LPM)



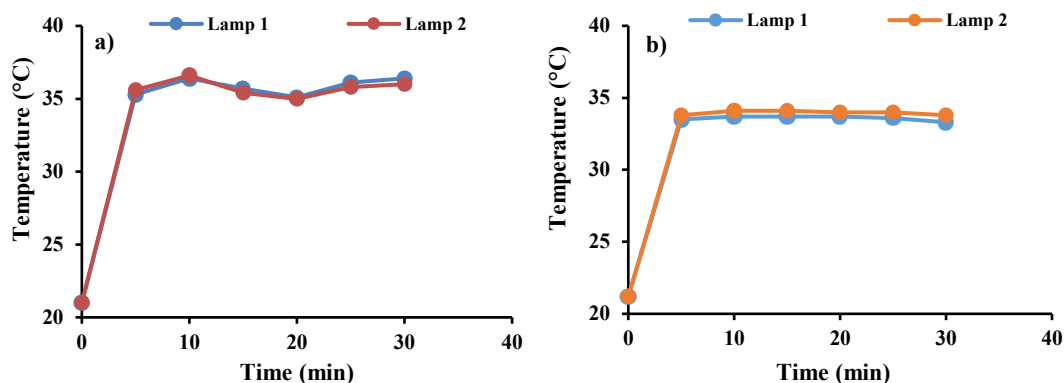


Fig. 2. Experimental temperature profiles of the UV lamp surface at positions: (a) adjacent to, and (b) far from the cooling fan over time

(Sanz et al., 2007). Finally, a rigorous grid independence study utilizing the grid convergence index method confirmed that the selected mesh resolution provided highly accurate numerical results to support the physical experimental findings.

3. Results and discussion

Precise thermal management is essential for optimizing UV photoreactor performance, as temperature fluctuations severely degrade radiometric output due to changes in internal mercury vapor pressure. To prevent the detrimental effects of photon self-absorption, a forced air-cooling system was utilized. The experimental temperature profiles of the lamp surface, presented in Fig. 2, confirm that this mechanism successfully stabilized the temperature at approximately 36.3 °C during continuous operation. Simultaneously, the concentric cylindrical reflector effectively captured and redirected divergent rays back into the central fluid domain, ensuring a highly uniform radiation dose.

The efficacy of this combined thermal and optical design was validated through biological assays, with Table 2 providing a direct comparison between the experimental and simulated log reduction values¹. At the maximum flow rate of 27.5 LPM, the experimental LRV reached 3.48, demonstrating excellent agreement with the calculated numerical value of 3.29. The remarkable consistency between the physical and computational data at this maximum velocity validates the accuracy of the multiphysics model, proving its reliability for predicting reactor behavior across diverse hydrodynamic conditions. Furthermore, at the reduced flow rates of 21.7 and

17.6 LPM, the increased hydraulic retention time led to absolute pathogen inactivation. Specifically, the computational model predicted elevated LRVs of 4.10 and 4.93 for these respective flow rates, providing a mathematical justification for the zero viable colonies observed during the physical experiments. This complete disinfection exceeded the laboratory limit of detection², perfectly aligning with the numerical model predictions and confirming the exceptional performance of the reactor across all tested operational conditions.

Table 2. Comparison of experimental and simulated LRVs at various flow rates

Flow rate (LPM)	Experimental LRV	Simulated LRV
27.5	3.48	3.29
21.7	> LOD*	4.10
17.6	> LOD*	4.93

Note: Complete bacterial inactivation at these flow rates resulted in zero viable colonies on the plates, meaning the true log reduction exceeds the biological assay's LOD.

4. Conclusions

In conclusion, the development of a novel UV photoreactor with an external lamp architecture successfully eliminates the inherent pressure drop and surface fouling limitations of conventional submerged systems. The integration of forced convection thermal management maintained the mercury lamps at their optimal operating temperature, while the cylindrical reflector maximized optical efficiency by synergizing direct and reflected radiation. The strong alignment between the experimental microbial data and the computational fluid dynamics model confirms the accuracy and reliability of the numerical approach.

¹ Log Reduction Value (LRV)

² Limit of Detection (LOD)



By achieving high log reduction values at maximum flow rates and complete pathogen inactivation at lower speeds, this segregated design proves to be highly effective. Ultimately, this validated computational and experimental

framework demonstrates that the external reflector configuration provides a robust, scalable, and highly efficient engineering solution for modern water disinfection applications.





بررسی تجربی و عددی یک راکتور فرابنفش نوین با لامپ‌های جیوه‌ای خارجی به منظور گندزدایی آب

سید مهدی صفوی^۱، امیرحسین حسن‌پور^۲، علیرضا جلالی^{۳*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- دانشیار، گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران
(نویسنده مسئول) arjalali@ut.ac.ir



<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.592599.3567>

مقاله پژوهشی

چکیده

گندزدایی فرابنفش به عنوان یک روش فیزیکی ایمن و بدون تولید پسماند شیمیایی، جایگزین مطلوبی برای روش‌های سنتی گندزدایی آب محسوب می‌شود. با این وجود، راکتورهای متداول غوطه‌ور با چالش‌های عملیاتی جدی نظیر افت فشار در مسیر سیال مواجه‌اند. این پژوهش برای نخستین بار به ساخت فیزیکی و اعتبارسنجی جامع یک راکتور نوری فرابنفش نوین با معماری کاملاً مجزا پرداخت. در این پیکربندی، یک کانال آب کوارتز در مرکز قرار گرفته و دو منبع تابش جیوه‌ای در محیط هوا و خارج از بستر سیال مستقر شده‌اند که تمامی این مجموعه توسط یک بازتابنده استوانه‌ای هم‌مرکز احاطه می‌شود. این معماری، تابش همه‌جبهه لامپ‌های جیوه‌ای را به صورت بهینه به دامنه سیال بازتاب می‌دهد. به منظور درک عمیق‌تر پدیده‌های انتقال، شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی با ادغام هم‌زمان هیدرودینامیک جریان، مدل تابش احجام مجزا و سینتیک غیرفعال‌سازی مرتبه اول انجام شد. برای اعتبارسنجی مدل توسعه‌یافته، یک مدار آزمایشگاهی ساخته شد و تحت آزمون‌های دوز سنجی زیستی با استفاده از باکتری اشرشیاکلی (سویه ATCC 8739) قرار گرفت. اجرای یک مکانیسم مدیریت حرارتی مبتنی بر جابه‌جایی اجباری، دمای سطح لامپ‌ها را در محدوده بهینه ۳۶/۳ درجه سلسیوس تثبیت کرد که پایداری توان تشعشعی سیستم را تضمین کرد. ارزیابی‌های میکروبی نشان داد که در بالاترین دبی عملیاتی (۲۷/۵ لیتر بر دقیقه)، مقدار لگاریتم کاهش تجربی برابر با ۳/۴۸ است که انطباق بسیار عالی با مقدار محاسباتی ۳/۲۹ دارد. همچنین در دبی‌های پایین‌تر (۲۱/۷ و ۱۷/۶ لیتر بر دقیقه)، غیرفعال‌سازی مطلق پاتوژن‌ها و فراتر از حد تشخیص آزمایشگاهی محقق شد، در حالی که مدل عددی مقدار لگاریتم کاهش را به ترتیب ۴/۱۰ و ۴/۹۳ پیش‌بینی کرد. این نتایج اثبات می‌کند که هم‌افزایی پرتوهای تابش مستقیم و بازتاب‌یافته، یکنواختی دوز تابشی را به شدت بهبود می‌بخشد. تطابق موفقیت‌آمیز داده‌های تجربی و عددی تأیید می‌کند که این معماری نوین می‌تواند با ارائه مزایای ذاتی همچون ارتقای بهره‌وری فوتونی و حذف تجهیزات نوری از مسیر جریان، چشم‌انداز روشنی برای توسعه سامانه‌های کارآمدتر با پتانسیل کاهش مصرف انرژی و تسهیل فرایندهای نگهداری ارائه کند.

واژه‌های کلیدی:

گندزدایی آب با اشعه
فرابنفش، دینامیک سیالات
محاسباتی، راکتور نوری
مجزا، دوز سنجی زیستی،
بازتابنده استوانه‌ای



دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۹

اصلاح: ۱۴۰۵/۱/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۵/۱/۳۱

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

صفوی، س. م.، حسن‌پور، ا.، جلالی، ع.، ۱۴۰۵، بررسی تجربی و عددی یک راکتور فرابنفش نوین با لامپ‌های جیوه‌ای خارجی به منظور گندزدایی آب. *آب و فاضلاب*. ۳۷ (۱)، ۸۰-۶۴.

<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.592599.3567>



© 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

تأمین منابع پایدار و ایمن آب آشامیدنی یکی از چالش‌های اساسی جوامع مدرن است (Adeoba et al., 2024, Rezaei, 2026). Rezaei et al., 2025 در فرایند تصفیه آب، گندزدایی به عنوان سد دفاعی اولیه در برابر پاتوژن‌ها عمل می‌کند (Tsitsifli and Kanakoudis, 2018). اگرچه روش‌های شیمیایی نظیر کلرزنی و ازن‌زنی به‌طور تاریخی استانداردهای غالب این صنعت بوده‌اند، اما تولید محصولات جانبی سمّی (مانند تری هالومتان‌ها و برومات‌ها)، مصرف بالای انرژی و ناتوانی در مهار کامل پاتوژن‌های مقاوم، کاربرد آن‌ها را با نگرانی‌های جدی مواجه ساخته است (Albolafio et al., 2022, Peleato, 2022).

برای غلبه بر این محدودیت‌ها، گندزدایی فرابنفش به عنوان یک روش فیزیکی ایمن و بدون تولید پسماند شیمیایی، به‌طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است (Song et al., 2016). البته باید توجه داشت که ماهیت فیزیکی پرتو فرابنفش سبب می‌شود تا این روش برخلاف مواد شیمیایی، فاقد خاصیت ماندگاری گندزدایی در جریان آب پس از عبور از ناحیه تابش باشد. از این رو، این فناوری غالباً به عنوان سد دفاعی اولیه و پر قدرت در محل تصفیه‌خانه استفاده می‌شود. با این حال، بهینه‌سازی طراحی هیدرولیکی و نوری راکتورهای فرابنفش برای کاهش هزینه‌های عملیاتی و ارتقای کارایی امری ضروری است. در این راستا، دینامیک سیالات محاسباتی به ابزاری استاندارد برای شبیه‌سازی هم‌زمان هیدرودینامیک جریان، میدان تابش و سینتیک غیرفعال‌سازی تبدیل شده است (Kang et al., 2024, Moghaddam et al., 2024, Song and Oguma, 2024, Moghaddam, 2025). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که عملکرد این سامانه‌ها به شدت تابع هندسه فیزیکی و شرایط مرزی اپتیکی راکتور است (Wang et al., 2023, Pourtalebi et al., 2025).

در راکتورهای متداول، استفاده از دیواره‌های جاذب نور مانند فولاد ضد زنگ، موجب افت شدید شدت تابش و ایجاد نواحی تاریک می‌شود (Heidarinejad et al., 2020). به کارگیری سطوح بازتابنده (نظیر آلومینیوم) راهکاری مؤثر برای بازیابی فوتون‌ها و افزایش یکنواختی دوز تابشی است (Li et al., 2017). در حال حاضر، استقرار لامپ‌های پرتو فرابنفش در داخل محفظه‌های کوارتز غوطه‌ور در آب، رویکرد استاندارد، رایج و

کارآمد در صنعت تصفیه آب محسوب می‌شود که به دلیل انتقال مستقیم فوتون‌ها به سیال، منطق مهندسی قدرتمندی دارد. با وجود مزایای اثبات شده، حضور فیزیکی تجهیزات نوری در مسیر جریان می‌تواند در برخی شرایط عملیاتی منجر به افت فشار موضعی و تغییر در هیدرودینامیک سیال شود. علاوه بر این، در سامانه‌های غوطه‌ور، چالش‌های عملیاتی ثانویه‌ای نظیر احتمال رسوب‌گرفتگی سطح خارجی غلاف کوارتز و خطر شکستگی آن در فشارهای بالا وجود دارد. برای پاسخ به این محدودیت‌های خاص و همچنین غلبه بر این چالش‌ها، معماری نوآورانه‌ای پیشنهاد شده که در آن منابع نوری کاملاً از سیال مجزا شده و در محیط هوا قرار می‌گیرند (Hassanpour et al., 2023).

این معماری افت فشار جریان را به‌طور ذاتی حذف می‌کند. همچنین در این پیکربندی، سیال و منابع نوری توسط یک پنجره شفاف و مسطح از یکدیگر جدا می‌شوند. این هندسه مسطح امکان نصب یک تیغه مکانیکی متحرک را به عنوان سیستم خود تمیز شونده فراهم می‌کند. حرکت دورهای این تیغه روی سطح شیشه، رسوبات را بدون نیاز به توقف راکتور پاک می‌کند. در نتیجه، مشکل رسوب‌گرفتگی حل شده و بازدهی نوری سیستم در طول زمان کاهش نمی‌یابد. بررسی پیشینه تحقیقاتی در سطح جهان نشان می‌دهد که ایده جداسازی کامل منابع تابش از مسیر جریان، تاکنون عمدتاً در فاز تئوری و مدل‌سازی‌های عددی ارزیابی شده است (Hassanpour et al., 2023, Seyedin et al., 2024).

اگرچه این شبیه‌سازی‌ها مزایای اپتیکی و هیدرولیکی استفاده از بازتابنده‌های خارجی را به لحاظ تئوری تأیید کرده‌اند، اما با وجود این پشتوانه محاسباتی، یک شکاف علمی و عملی مهم در توسعه این فناوری همچنان پابرجا مانده است. درواقع، تاکنون طراحی، ساخت فیزیکی نمونه آزمایشگاهی و ارزیابی تجربی راکتورهایی که در آن‌ها لامپ‌های پرتو تابنده به‌طور کامل از محیط سیال جدا شده باشند، گزارش نشده است. درواقع، توسعه یک پلتفرم تجربی که بتواند مزایای معماری مجزا را با توان بالای لامپ‌های جیوه‌ای ترکیب کند، همچنان یک ضرورت تحقیقاتی است.

برای پر کردن این شکاف تحقیقاتی، این پژوهش برای نخستین بار به طراحی، ساخت فیزیکی و اعتبار‌سنجی جامع یک راکتور نوری فرابنفش نوین با معماری کاملاً مجزا و استوانه‌ای می‌پردازد. پیکربندی ویژه و منحصر به فرد ارائه شده در این پژوهش، شامل یک



کانال آب کوارتز مرکزی بود. به منظور تأمین دوز تابشی قدرتمند، دو لامپ جیوه‌ای فرابنفش به‌طور کامل در خارج از کانال آب و در دو سمت مخالف آن مستقر شدند. کل این مجموعه، توسط یک بازتابنده استوانه‌ای که به‌صورت کاملاً هم‌مرکز با کانال آب قرار گرفته، احاطه شد. نوآوری بنیادین و نقطه عطف این پژوهش، فراتر از ساخت فیزیکی یک راکتور با معماری لامپ‌های خارجی، در غلبه موفقیت‌آمیز بر دو چالش مهندسی اساسی نهفته بود: نخست، مدیریت اپتیکی دقیق تابش همه‌جهته لامپ‌های جیوه‌ای و بازتاب یکپارچه آن‌ها به دامنه سیال بدون افت انرژی و دوم، اجرای یک مکانیسم مدیریت حرارتی هدفمند برای تثبیت دمای لامپ‌ها و تضمین بالاترین کارایی تشعشعی بود. به‌منظور اثبات صحت عملکرد و درک عمیق‌تر توزیع تابش و جریان، از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی بهره گرفته شد؛ این پژوهش در نظر داشت با ارائه یک پلتفرم مستحکم تجربی و محاسباتی، نشان دهد که معماری استوانه‌ای بازتابنده و مجزا می‌تواند چارچوب جدیدی در طراحی راکتورهای فرابنفش اقتصادی، کارآمد و بدون نیاز به تعمیرات مکرر ایجاد کند.

۲- مواد و روش‌ها (روش پژوهش)

۲-۱- پیکربندی هندسی و چیدمان آزمایشگاهی

نوآوری کلیدی و وجه تمایز اصلی این پژوهش، توسعه یک پیکربندی کاملاً جدید برای سامانه‌های گندزدایی آب بود که در آن منابع تابش در خارج از بستر جریان سیال مستقر شدند. در این طراحی، یک کانال آب از جنس کوارتز با قطر داخلی $4/6$ سانتی‌متر و قطر خارجی 5 سانتی‌متر در مرکز هندسی راکتور قرار گرفت. دو منبع تابش فرابنفش (لامپ‌های جیوه با قطر $2/8$ سانتی‌متر) در فضای خارج از کانال سیال و در فاصله دقیق $4/6$ سانتی‌متری از سطح خارجی کوارتز، با زاویه 180° درجه نسبت به یکدیگر مستقر شدند. تمامی این مجموعه توسط یک بازتابنده استوانه‌ای بزرگ به قطر 30 سانتی‌متر که با محور کانال کوارتز هم‌مرکز بود، احاطه شدند. ابعاد هندسی دقیق تمامی اجزای تشکیل‌دهنده این راکتور در جدول ۱ ارائه شده است.

ابعاد هندسی معرفی شده در این پیکربندی، شامل فاصله لامپ‌ها تا کانال و قطر بازتابنده استوانه‌ای، به‌صورت تصادفی انتخاب نشده‌اند؛ بلکه خروجی مستقیم مطالعات پارامتریک و

بهینه‌سازی‌های پیشین گروه تحقیقاتی هستند (Hassanpour et al., 2023). بررسی‌ها نشان داده است که افزایش بیش‌ازحد فاصله لامپ تا کانال کوارتز، سبب می‌شود پرتوهای بیشتری پیش از ورود به سیال با دیواره بازتابنده برخورد کنند که این امر به اتلاف بخشی از انرژی تابشی و افت کارایی میکروپخش می‌انجامد. از سوی دیگر، در بازتابنده‌های پخش‌نظیر پوشش آلومینیومی حاضر، قطر بازتابنده دارای یک مقدار بهینه است که انحراف از آن موجب کاهش شدت تابش متمرکز بر دامنه جریان می‌شود. همچنین، قطر کانال مرکزی با در نظر گرفتن دبی‌های عملیاتی به‌گونه‌ای کالیبره شده است که ضمن حفظ پروفیل جریان مناسب، زمان‌ماند هیدرولیکی کافی برای نفوذ مؤثر فوتون‌ها به اعماق سیال تضمین شود.

این طراحی سه‌گانه باهدف افزایش دوز مؤثر تابش و بهبود نرخ غیرفعال‌سازی باکتری اشرشیاکلی تبیین شد. رویکردهای کلیدی در این پیکربندی شامل کاهش اتلاف انرژی از طریق بازیافت پرتوهای فرابنفش به کمک سطوح بازتابنده داخلی، بهبود یکنواختی میدان تابش در مقطع جریان و تأمین زمان‌ماند هیدرولیکی کافی متناسب با دبی‌های عملیاتی است. بدین منظور، طراحی مفهومی و هندسه سه‌بعدی راکتور در محیط نرم‌افزار سالیدورکس پیاده‌سازی شد تا مسیر ورود و خروج جریان به‌گونه‌ای هدایت شود که سیال منحصراً از درون لوله کوارتز مرکزی عبور کرده و در یک مسیر مشخص و کنترل شده تحت تابش یکنواخت قرار گیرد. جزئیات پیکربندی راکتور، نحوه استقرار لامپ‌های خارجی نسبت به کانال کوارتز مرکزی و همچنین هندسه محاسباتی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها، در شکل ۱ نشان داده شده است. شایان ذکر است که نمونه‌برداری در خروجی راکتور انجام می‌شود.

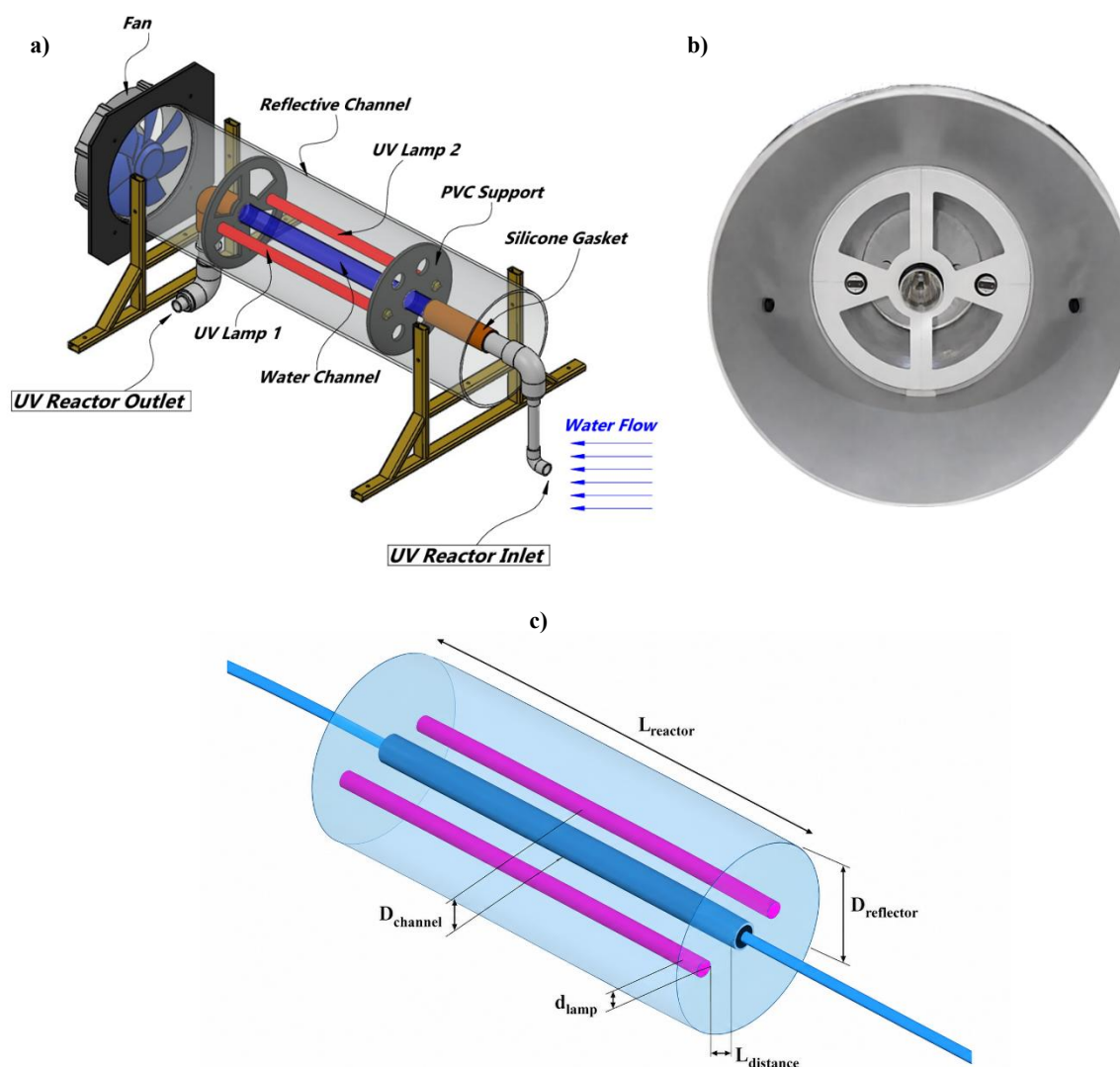
پس از استخراج ابعاد دقیق از مدل سه‌بعدی، فرایند ساخت فیزیکی نمونه آزمایشگاهی با تمرکز بر صلیبت سازه، هم‌محوری قطعات، آب‌بندی هیدرولیکی و ایمنی بهره‌برداری انجام شد. بدنه اصلی راکتور از لوله پلی‌وینیل کلراید با طول 56 سانتی‌متر تهیه شد. دیواره داخلی بدنه به‌صورت یکپارچه با یک فویل آلومینیومی تجاری پوشش داده شد تا به‌عنوان یک مرز بازتابنده پخش‌عمل کند. ارزیابی‌ها با طیف‌سنجی بازتابی نشان داد که این پوشش دارای ضریب بازتاب 49% در طول موج هدف (254 نانومتر) است. لوله کوارتز مرکزی با گذردهی فرابنفش معادل 85% درصد در



جدول ۱- ابعاد هندسی راکتور نوری شبیه‌سازی شده

Table 1. Geometric dimensions of the simulated photoreactor

Symbol	Description	Value (mm)
L_{reactor}	Total length of the reactor	560
$D_{\text{reflector}}$	Diameter of the reflector	300
D_{channel}	Diameter of the central quartz water channel	46
d_{lamp}	Diameter of the Ultraviolet lamp	28
L_{distance}	Distance from the lamp surface to the quartz channel surface	46



(c)

Fig. 1. Configuration of the UV photoreactor: (a) the reactor body, (b) cross section view showing external lamp placement and the central quartz water channel, (c) computational geometry for numerical simulations

شکل ۱- پیکربندی راکتور نوری فرابنفش: (a) بدنه راکتور، (b) نمای مقطع عرضی نشان‌دهنده موقعیت لامپ‌های خارجی و کانال آب کوآرتز مرکزی و (c) هندسه محاسباتی برای شبیه‌سازی‌های عددی



غیرفعال سازی پاتوژن های مقاوم تری نظیر کیست های تک یاخته ای بیشتر است. از این رو، مهار موفقیت آمیز این شاخص، حذف قطعی میکروارگانیسم های حساس تر به اشعه را نیز تضمین می کند. محلول استاندارد باکتری به مخزن تغذیه تزریق شد تا غلظت اولیه به یک میلیون واحد تشکیل دهنده کلنی در هر میلی لیتر برسد. انتخاب این غلظت بهینه، ضمن فراهم آوردن دامنه تشخیص گسترده برای ثبت مقدار بالای لگاریتم کاهش، از بروز پدیده محافظت نوری و کاهش نامطلوب شفافیت سیال که در غلظت های بالاتر رخ می دهد، جلوگیری کرد. نمای کلی چیدمان تجهیزات آزمایشگاهی و مدار سیالاتی مورد استفاده برای ارزیابی دوزسنجی زیستی در شکل ۲ نشان داده شده است.

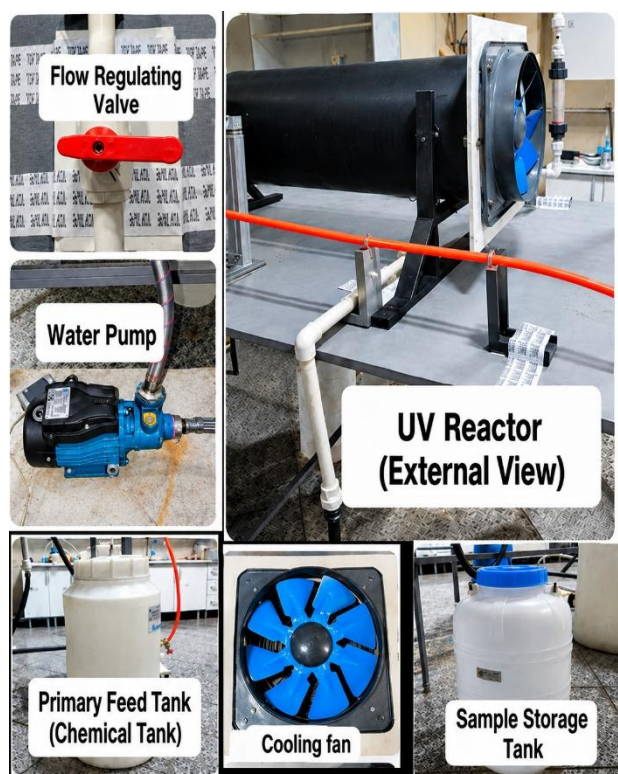


Fig. 2. Experimental arrangement for the biodosimetry evaluation

شکل ۲- چیدمان فیزیکی آزمایشگاهی برای ارزیابی دوزسنجی زیستی

این سامانه در سه دبی جریان متفاوت (۶/۱۷، ۷/۲۱ و ۵/۲۷ لیتر بر دقیقه) ارزیابی شد. کالیبراسیون دقیق نرخ جریان با روش جمع آوری جرمی انجام شد. نمونه برداری در هر دبی در قالب دو تکرار مستقل بیولوژیکی از ورودی و خروجی راکتور انجام شد. با

طول موج هدف تعیبه شد. به عنوان منابع تأمین پرتو، از دو عدد لامپ فرابنفش جیوه ای از نوع کم فشار با طول موج غالب ۲۵۴ نانومتر، توان تابشی ۴/۵ وات، طول قوس ۵۶ سانتی متر و طول عمر اسمی ۹۰۰۰ ساعت بهره گرفته شد. این مجموعه نوری به وسیله نگهدارنده های پلیمری مهارکننده ارتعاش در محفظه مستقر شدند. اتصالات هیدرولیکی نیز با استفاده از رابط های انعطاف پذیر برای جذب نوسانات حرارتی و تضمین آب بندی کامل به مدار متصل شدند.

با توجه به حساسیت بالای کارایی تشعشعی لامپ های جیوه به تغییرات دما، به منظور تثبیت دمای سطح لامپ ها و جلوگیری از افت توان تابشی، از یک مکانیسم خنک کاری با جریان هوای اجباری استفاده شد. برای بهینه سازی سرعت جریان هوای مکشی فن، موازنه انرژی پایا شامل تلفات حرارتی ناشی از جابه جایی و تشعشع (با فرض ضریب گسیلندگی ۰/۹ برای سطح لامپ) در نرم افزار EES مدل سازی و حل شد. نتایج محاسبات نشان داد که با حفظ سرعت جریان هوا در حدود ۴ متر بر ثانیه، دمای سطح لامپ در محدوده ۳۶/۳ درجه سلسیوس تثبیت می شود. این خروجی با داده های تجربی حاصل از ترموکوپل نصب شده بر روی دیواره شیشه ای لامپ (۳۳ تا ۳۶ درجه سلسیوس) تطابق بالایی داشت و پایداری توان تشعشعی سیستم را در بهینه ترین حالت تضمین کرد.

۲-۲- پروتکل دوزسنجی زیستی و ارزیابی میکروبی

به منظور اجرای آزمون های میکروبی و اعتبارسنجی عملکرد راکتور، یک مدار سیالاتی حلقه بسته شامل یک مخزن تغذیه ۱۰۰ لیتری، پمپ گریز از مرکز ۵/۰ اسب بخار و شیرهای کنترل دبی جریان ساخته شد. آب مقطر به عنوان سیال عامل انتخاب شد تا از تداخلات نوری پس زمینه جلوگیری شود. مشخصات فیزیکوشیمیایی آب مورد استفاده شامل شفافیت فرابنفش معادل ۹۸ درصد در طول موج ۲۵۴ نانومتر، pH برابر با ۸/۴ هدایت الکتریکی ۳ میکروزیمنس بر سانتی متر و مقدار کدورت و کربن آلی کل در حد صفر بود. باکتری اشرشیاکلی سویه (ATCC ۸۷۳۹) که توسط آزمایشگاه میکروبیولوژی دانشگاه تهران آماده شده بود به عنوان میکروارگانیسم شاخص انتخاب شد. استفاده از این باکتری به عنوان یک شاخص بیولوژیک، ارزیابی محافظه کارانه ای از عملکرد راکتور ارائه می دهد؛ زیرا دوز فرابنفش لازم برای مهار آن عموماً از دوز مورد نیاز برای

$$a = \frac{-\ln(UVT)}{x} \quad (۴)$$

عملکرد سیستم از طریق ارزیابی مقدار لگاریتم کاهش در شاخص بیولوژیکی هدف، اشرشیاکلی ATCC 8739، کمی سازی می شود. توزیع فضایی پاتوژن های فعال در یک چارچوب مرجع اولیری و با بهره گیری از مکانیسم واکنش مرتبه اول چیک-واتسون به شرح زیر مدل سازی شده است (Sanz et al., 2007)

$$LRV = \log\left(\frac{N_0}{N}\right) = k_{inact}It = k_{inact}D \quad (۵)$$

که در آن

k_{inact} ثابت نرخ غیرفعال سازی است. برای این میکروارگانیسم مشخص، تحت تابش با طول موج ۲۵۴ نانومتر، مقدار این ثابت سینتیکی برابر با ۰/۲۳ مترمربع بر ژول در نظر گرفته شده است (Green et al., 2018). چارچوب جامع ریاضی حاکم بر دوز فرابنفش اعمال شده، انتقال گونه های اولیری و نرخ تخریب حجمی، در مرجع (Seyedin et al., 2024) به تفصیل ارائه شده است. همچنین، انتقال آشفته پاتوژن های فعال با استفاده از عدد اشمیت آشفته برابر با ۰/۷ لحاظ شده است (Andersson et al., 2012).

۲-۴- استقلال از شبکه محاسباتی

برای اطمینان از دقت نتایج عددی، یک تحلیل دقیق حساسیت شبکه انجام شد. دامنه آب با استفاده از شبکه با سازمان شبکه بندی شد. به منظور حل دقیق گرادینان های شدید سرعت در لایه مرزی، از ضریب سوگیری معادل ۲ برای المان های مجاور دیواره راکتور استفاده شد. نمای کلی شبکه محاسباتی تولید شده برای دامنه آب در ورودی راکتور در شکل ۳ قابل مشاهده است.

مقدار متوسط وزنی لگاریتم کاهش در خروجی راکتور به عنوان معیار اصلی ارزیابی کیفیت شبکه انتخاب شد. با استفاده از روش شاخص همگرایی شبکه پیشنهادی توسط Celik و همکاران (Celik et al., 2008)، سه شبکه با تراکم ۶۹۳،۰۰۰ (درشت)، ۱۰۲۰۹،۰۰۰ (متوسط) و ۲۰۱۰۸،۰۰۰ (ریز) المان در دبی ۲۷/۵ لیتر بر دقیقه ارزیابی شدند. مقدار لگاریتم کاهش برای این شبکه های درشت، متوسط و ریز به ترتیب برابر با ۳/۳۳، ۳/۲۹ و

توجه به انجام دو تکرار برای هر آزمایش، برای جلوگیری از خطای آماری در نمونه های کوچک، تحلیل داده ها بر اساس میانگین و انحراف میانگین مطلق انجام شد. نمونه ها فوراً در تاریکی مطلق قرار گرفتند تا از پدیده فعال سازی مجدد نوری جلوگیری شود. پس از کشت سطحی در محیط مولر هینتون آگار و انکوباتور (۲۴ ساعت در ۳۵ تا ۳۷ درجه سلسیوس)، شمارش کلنی ها برای محاسبه لگاریتم کاهش انجام شد.

۲-۳- مدل سازی دینامیک سیالات محاسباتی

شبیه سازی راکتور گندزدایی در ماهیت خود یک مسئله چندفیزیکی است که در سه فاز متوالی انجام می شود: تحلیل هیدرودینامیکی، مدل سازی میدان تابش و سینتیک غیرفعال سازی پاتوژن. برای شبیه سازی جریان تراکم ناپذیر و آشفته درون راکتور، معادلات بقای جرم و اندازه حرکت با استفاده از رویکرد ناویر-استوکس میانگین گیری شده رینولدز حل شدند

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (v \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j}) \quad (۲)$$

برای بستن معادلات، از تقریب بوزینسک به همراه مدل آشفتگی $k - \epsilon$ realizable استفاده شد. ارزیابی توزیع شدت تابش در دامنه محاسباتی نیز توسط مدل جهت های مجزا انجام شد. معادله انتقال تشعشع برای یک طول موج مشخص به صورت معادله ۳ بسط داده شد (Sobhani and Shokouhmand, 2017).

(۳)

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

ضریب جذب سیال (a) مستقیماً از طریق قانون بیر-لمبرت با ضریب گذردهی فرابنفش به صورت معادله ۴ در ارتباط است (Wols et al., 2015)



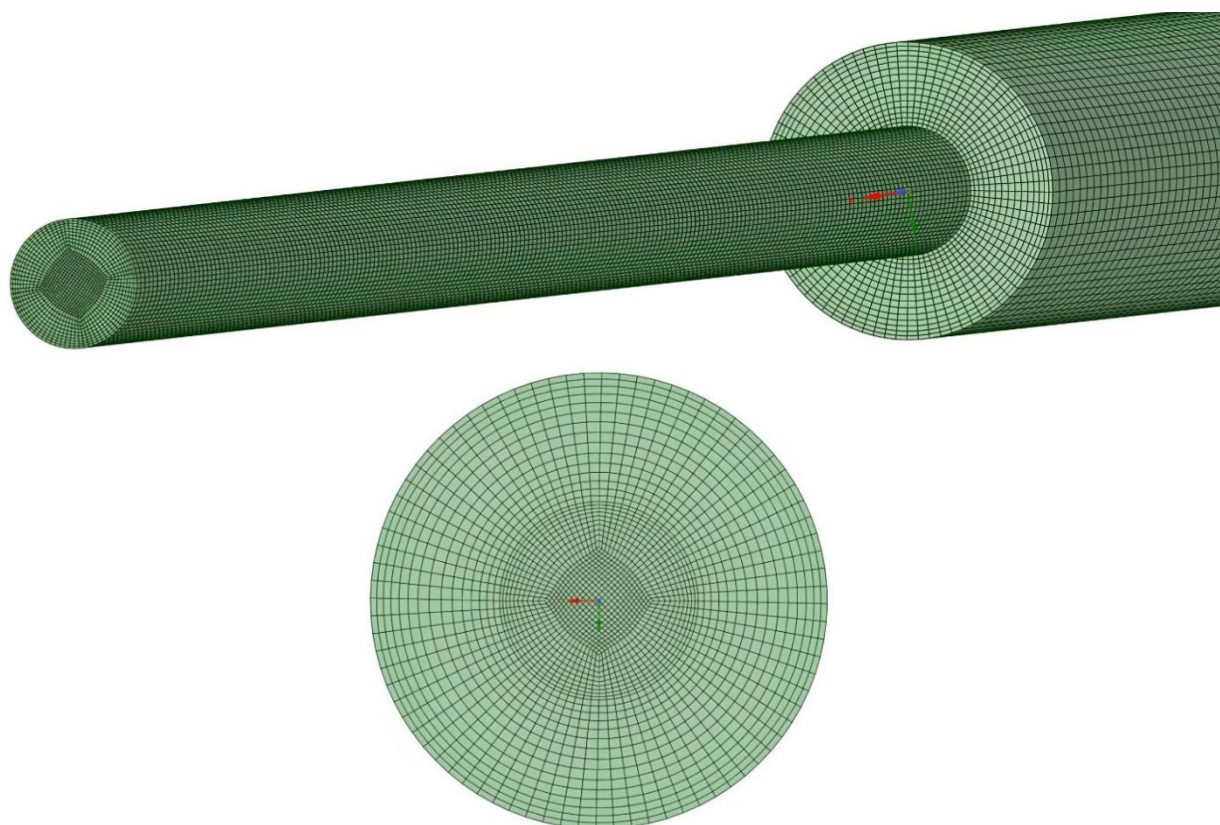


Fig. 3. Final generated computational grid (water domain)

شکل ۳- شبکه محاسباتی تولید شده نهایی (دامنه آب)

محدوده بهینه (معمولاً در حدود ۴۰ درجه سلسیوس) تثبیت شود. هرگونه انحراف از این محدوده دمایی، کارایی سیستم را به دو شکل عمده با افت شدید مواجه می‌سازد:

- کاهش دما (کمتر از محدوده بهینه): با افت بیش‌ازحد دمای سطح لامپ، فشار بخار جیوه در داخل غلاف کاهش می‌یابد. این پدیده منجر به افت چگالی اتم‌های جیوه در مسیر جریان الکتریکی شده و در نتیجه، نرخ برخورد الکترون‌ها با اتم‌های جیوه و میزان برانگیختگی آن‌ها تقلیل می‌یابد. پیامد نهایی این فرایند، کاهش شدید توان رادیو متریک و افت شدت پرتوهای فرابنفش ساطع شده است.

- افزایش دما (بیشتر از محدوده بهینه): در نقطه مقابل، فراتر رفتن دمای سطح لامپ از محدوده بهینه، باعث افزایش بیش‌ازحد تراکم و فشار بخار جیوه می‌شود. با متراکم شدن اتم‌های جیوه، پدیده نامطلوب خودجذبی رخ می‌دهد؛ به این معنا که

۳/۲۸ محاسبه شد. در نهایت، شاخص هم‌گرایی شبکه برابر ۰/۱۲ درصد تأیید کرد که شبکه متوسط با ۱،۲۰۹،۰۰۰ سلول، دقت محاسباتی لازم را با کمترین هزینه پردازشی فراهم می‌کند و نتایج کاملاً از شبکه مستقل هستند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مدیریت حرارتی و ارزیابی تأثیر آن بر عملکرد تابشی

یکی از پارامترهای کلیدی و بسیار تأثیرگذار بر عملکرد گندزدایی راکتورهای فرابنفش، دمای سطح لامپ است. این پارامتر به‌طور مستقیم بر کارایی میکرو بکشی راکتور تأثیر می‌گذارد، زیرا فرایند گسیل پرتوهای فرابنفش در لامپ‌های جیوه‌ای کم‌فشار، کاملاً به فشار بخار داخلی جیوه وابسته بوده که خود تابعی مستقیم از دمای سطح دیواره لامپ است. برای بهره‌گیری از حداکثر کارایی تابش خروجی در طول موج میکرو بکشی، دمای سطح لامپ باید در یک



مشابه، ترموکوپل به مقطع دورتر از فن (سمت ورودی سیال) منتقل شد تا رفتار دمایی در طول محور راکتور نیز پایش شود. نتایج تجربی حاصل از این اندازه‌گیری‌ها و تغییرات زمانی دما در هر دو موقعیت، اثبات‌کننده پایداری سیستم مدیریت حرارتی در طول آزمون‌ها است (شکل ۴).

۳-۲- تحلیل میدان تابش و اعتبارسنجی میکروبی مدل محاسباتی

برای درک عمیق‌تر مکانیسم عملکرد راکتور، بررسی توزیع شدت تابش در داخل محفظه ضروری است. تحلیل کانتور شدت تابش در مقطع عرضی میانی راکتور، پویایی نوری این هندسه نوآورانه را به‌خوبی آشکار می‌سازد. در این طراحی، پرتوهای فرابنفش از دو مسیر مجزا به سیال هدف می‌رسند؛ بخش قابل توجهی از پرتوها به‌صورت مستقیم از سطح لامپ‌های خارجی به سمت دیواره کانال کوآرتز مرکزی تابیده و وارد سیال می‌شوند. درعین حال، پرتوهای واگرا که از سمت عقب لامپ‌ها ساطع می‌شوند، هدر رفته و پس از برخورد با بازتابنده استوانه‌ای پیرامون، مجدداً به سمت مرکز راکتور بازتاب می‌شوند. این هم‌افزایی میان پرتوهای تابش مستقیم و پرتوهای بازتاب‌یافته، نه تنها اتلاف انرژی نوری را به حداقل می‌رساند، بلکه یکنواختی توزیع دوز تابشی را در سراسر مقطع جریان آب به‌شدت بهبود می‌بخشد (شکل ۵).

فوتون‌های فرابنفش تولید شده، پیش از آنکه بتوانند از دیواره غلاف شیشه‌ای عبور کرده و به سیال برسند، توسط اتم‌های هم‌جوار جیوه مجدداً جذب می‌شوند. این پدیده نیز به‌نوبه خود افت چشمگیر کارایی خروجی را در پی دارد.

در این زمینه، لامپ‌های جیوه کم‌فشار نوع آمالگام به‌عنوان یک جایگزین تکنولوژیک مطرح می‌شوند. در لامپ‌های آمالگام، برخلاف نوع استاندارد، از ترکیب جامد جیوه با فلزاتی نظیر ایندیوم یا بیسموت استفاده می‌شود که قابلیت کنترل فشار بخار را در محدوده وسیع‌تری از دما دارند و حساسیت سامانه را نسبت به نوسانات حرارتی به‌شدت کاهش می‌دهند. با این وجود، لامپ‌های کم‌فشار استاندارد به دلیل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بسیار کمتر و دسترسی گسترده‌تر، همچنان گزینه‌ای جذاب در کاربردهای صنعتی به شمار می‌روند؛ به این شرط که مانند رویکرد اتخاذ شده در این پژوهش، با طراحی یک سیستم مدیریت حرارتی کارآمد، دمای سطح آن‌ها در محدوده بهینه تثبیت شود. بر این اساس، مدیریت حرارتی دقیق راکتور برای حفظ دمای سطح لامپ‌ها در این محدوده طلایی، پیش‌شرط اساسی برای دستیابی به بالاترین نرخ غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها محسوب می‌شود. در این راستا، پایش مشخصات حرارتی راکتور در دو فاز مستقل عملیاتی انجام شد. در فاز نخست، یک ترموکوپل به مقطع لامپ در مجاورت فن خنک‌کننده متصل شد تا تغییرات زمانی دمای سطح هر دو لامپ فرابنفش ردیابی شود. در فاز دوم و تحت شرایط عملیاتی کاملاً

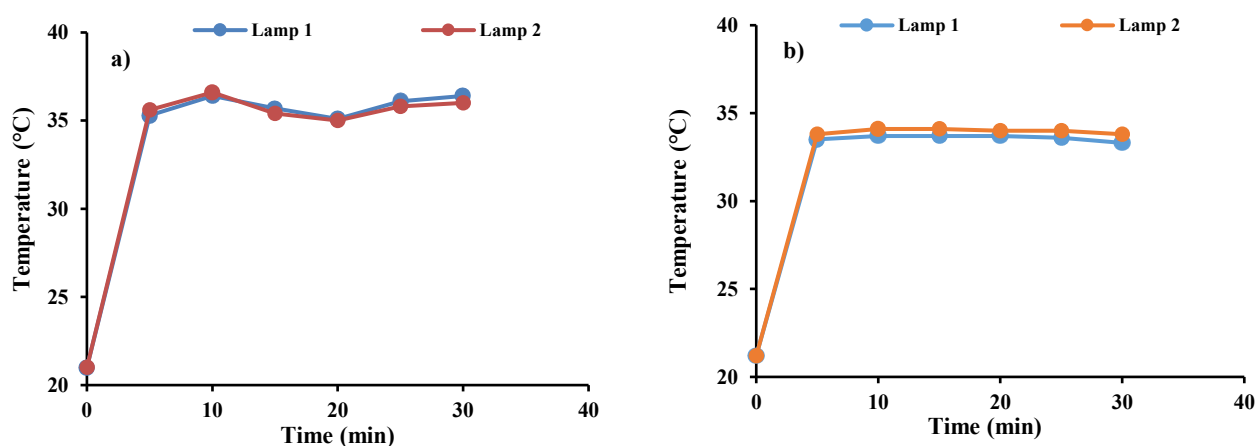


Fig. 4. Experimental temperature profiles of the UV lamp surface at positions: (a) adjacent to, and (b) far from the cooling fan over time

شکل ۴- پروفیل‌های دمایی تجربی سطح لامپ فرابنفش در موقعیت‌های: (a) مجاور و (b) دور از فن خنک‌کننده در طول زمان

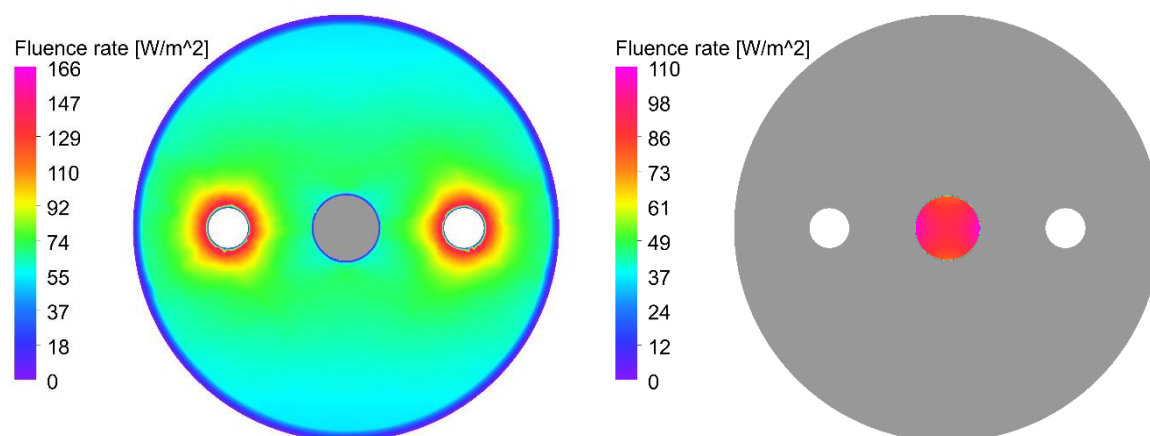


Fig. 5. Simulated fluence rate distribution contour at the middle cross-section of the photoreactor

شکل ۵- کانتور توزیع شدت تابش شبیه‌سازی شده در مقطع عرضی میانی راکتور نوری

جدول ۲- مقایسه مقدار لگاریتم کاهش تجربی و شبیه‌سازی شده در دبی‌های مختلف جریان

Table 2. Comparison of experimental and simulated LRVs at various flow rates

Flow rate (LPM)	Experimental LRV	Simulated LRV
27.5	3.4±0.03	3.29
21.7	> LOD*	4.10
17.6	> LOD*	4.93

*Note: Complete bacterial inactivation at these flow rates resulted in zero viable colonies on the plates, meaning the true log reduction exceeds the biological assay's limit of detection.

مقدار محاسباتی ۳/۲۹ دارد. بروز این اختلاف اندک (حدود ۵ درصد) در مطالعات سیستم‌های چندفیزیکی کاملاً طبیعی بوده و عمدتاً ریشه در رویکرد محافظه‌کارانه نرم‌افزار و عدم قطعیت‌های ذاتی سیستم‌های بیولوژیکی دارد.

از یک‌سو، مدل‌سازی میدان تابش با الگوریتم جهت‌های مجزا به دلیل گسسته‌سازی زاویه‌ای، اثر هم‌افزایی پرتوهای متعدد بازتاب‌یافته از دیواره استوانه‌ای را اندکی کمتر از واقعیت فیزیکی تخمین می‌زند. از سوی دیگر، نوسانات ذاتی در خطاهای شمارش میکروبی و همچنین احتمال حساسیت بالاتر باکتری‌های کشت داده شده در مقایسه با ثابت سینتیکی مرجع مورداستفاده در معادلات، منجر به ثبت لگاریتم کاهش تجربی بالاتری می‌شود. به‌منظور درک بهتر جایگاه عملیاتی این معماری نوین، می‌توان نتایج آن را با یکی از معتبرترین نمونه‌های استاندارد صنعتی، یعنی راکتور حلقوی کلاسیک مقایسه کرد (Sozzi and Taghipour, 2006).

به‌منظور تأیید قابلیت اطمینان و دقت مدل‌سازی‌های عددی و توزیع دوز محاسبه شده، نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی حاصل از آزمون‌های دوزسنجی زیستی اعتبارسنجی شد. کشت‌های میکروبی انجام شده در ظرف‌ها (شکل ۶)، وضعیت نمونه‌ها را پیش از پرتودهی و پس از عبور از راکتور در دبی‌های مختلف به‌خوبی به تصویر می‌کشند.

جدول ۲، مقایسه مستقیمی میان مقدار لگاریتم کاهش به‌دست آمده از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی ارائه می‌دهد. در بالاترین دبی عملیاتی یعنی ۲۷/۵ لیتر بر دقیقه، مقدار لگاریتم کاهش تجربی در دو تکرار مستقل به ترتیب ۳/۴۵ و ۳/۵۱ به دست آمد که میانگین آن همراه با انحراف مطلق برابر با ۰/۰۳ ± ۳/۴۸ گزارش می‌شود. این انحراف نسبی بسیار ناچیز (کمتر از ۱ درصد)، نشان‌دهنده تکرارپذیری بالای آزمون‌ها و پایداری توان تابشی سیستم است. این مقدار انطباق بسیار عالی و قابل قبولی با



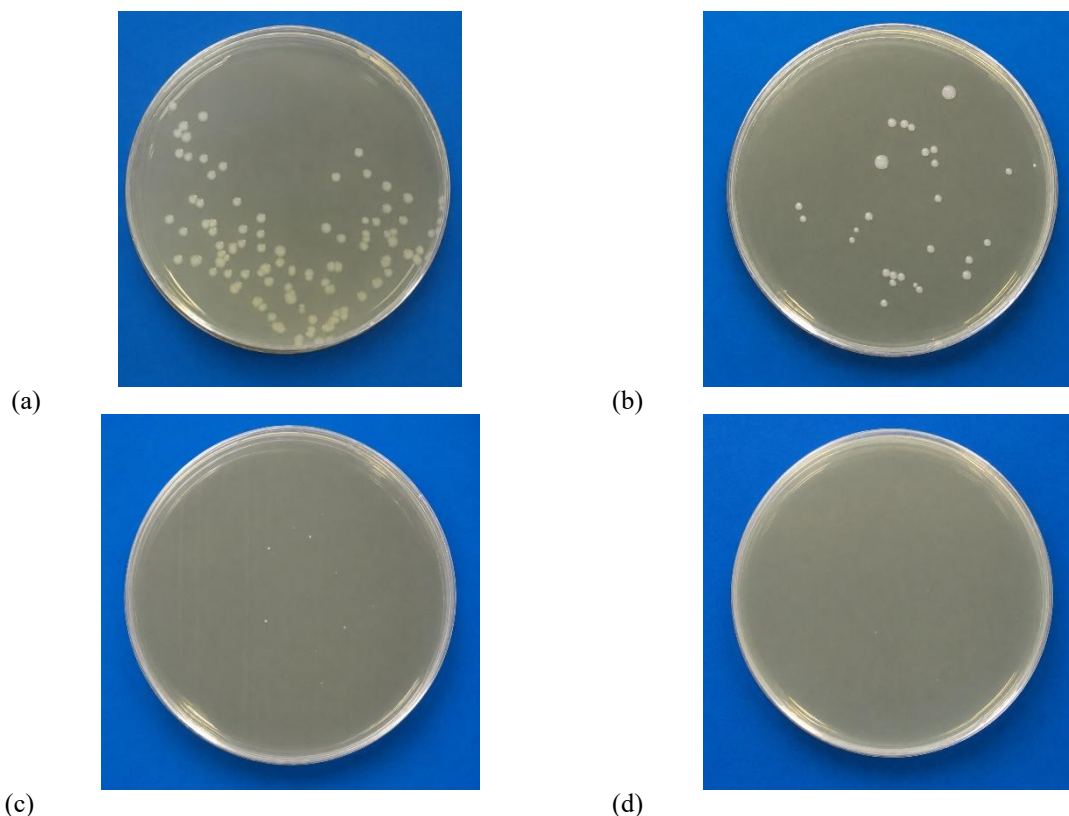


Fig 6. Cultured petri dishes from biological assays. (a) Initial baseline sample taken before UV exposure. Samples taken after UV exposure at flow rates of (b) 27.5 LPM, (c) 21.7 LPM, and (d) 17.6 LPM

شکل ۶- ظروف پتری کشت شده حاصل از آزمون‌های زیستی. (a) نمونه مبنای اولیه پیش از پرتو دهی فرابنفش. نمونه‌های اخذ شده پس از پرتو دهی فرابنفش در دبی‌های (b) ۲۷/۵ لیتر بر دقیقه، (c) ۲۱/۷ لیتر بر دقیقه و (d) ۱۷/۶ لیتر بر دقیقه

جامع تکنو اقتصادی در آینده خواهد بود. با کاهش دبی جریان به مقدار ۲۱/۷ و ۱۷/۶ لیتر بر دقیقه، مدل عددی به‌درستی روند فیزیکی موردانتظار را پیش‌بینی می‌کند. کاهش سرعت سیال، زمان‌ماند را در طول کانال کوارتز افزایش داده و به حجم هدف اجازه می‌دهد تا دوز فرابنفش بیشتری را از لامپ‌های خارجی دریافت کند. در نتیجه، مقدار پیش‌بینی شده برای لگاریتم کاهش در نرم‌افزار به‌ترتیب به ۴/۱۰ و ۴/۹۳ افزایش می‌یابند.

دلیل عدم درج مقدار دقیق تجربی برای این دو دبی پایین در جدول ۲ این است که کارایی گندزدایی واقعی، از حد تشخیص در پروتکل دوزسنجی زیستی فراتر رفته است. این مقدار در پروتکل حاضر معادل لگاریتم کاهش ۳/۷ ارزیابی می‌شود. دلیل فیزیکی وقوع این غیرفعال‌سازی مطلق، ارتباط مستقیم سرعت جریان با زمان‌ماند هیدرولیکی سیال است؛ با طولانی‌تر شدن زمان حضور پاتوژن‌ها در ناحیه تحت تابش، دوز تابشی تجمعی دریافتی به‌شدت

پژوهش مذکور، دستیابی به لگاریتم کاهش ۳/۴ در دبی ۳۷/۸ لیتر بر دقیقه مستلزم به‌کارگیری منبع پرتو با توان تابشی ۳۵ وات بوده است. این در حالی است که در پژوهش حاضر، سیستم مجزا توانسته است در دبی ۲۷/۵ لیتر بر دقیقه، تنها با دریافت مجموع توان تابشی ۹ وات (حاصل از دو منبع ۴/۵ وات) به لگاریتم کاهش ۳/۴۸ دست یابد. این مقایسه به روشنی اثبات می‌کند که استفاده از بازتابنده استوانه‌ای هم‌مرکز و رفع موانع هیدرولیکی، بهره‌وری فوتونی سیستم را به‌شدت ارتقا داده و عملکرد میکروب‌کشی هم‌ترازی را با صرف کمتر از یک‌سوم توان تابشی مرجع فراهم آورده است. این تقلیل محسوس در توان مصرفی، در کنار حذف موانع فیزیکی مسیر جریان که افت فشار سیستم را به حداقل می‌رساند، نشان‌دهنده پتانسیل بالای این معماری در کاهش هزینه‌های عملیاتی نسبت به راکتورهای غوطه‌ور است. با این وجود، اثبات قطعی توجیه اقتصادی در مقیاس صنعتی نیازمند مطالعات



دیویدهای فرابنفش و ارزیابی پوشش‌های بازتابنده جایگزین، می‌تواند پتانسیل و انعطاف‌پذیری عملیاتی این سامانه را در مقیاس صنعتی به‌طور جامع‌تری آشکار سازد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک معماری نوآورانه برای راکتورهای گندزدایی آب با اشعه فرابنفش باهدف غلبه بر محدودیت‌های سامانه‌های سنتی غوطه‌ور توسعه یافت. با خارج کردن لامپ‌های جیوه‌ای از بستر سیال و استفاده از یک کانال کوارتز مرکزی احاطه شده با بازتابنده استوانه‌ای، چالش‌های بنیادین افت فشار هیدرولیکی و رسوب گرفتگی سطوح با امکان استفاده از مکانیسم خود تمیزشونده، برطرف شد. ادغام مدل‌سازی چندفیزیکی دینامیک سیالات محاسباتی با آزمون‌های فیزیکی دوزسنجی زیستی نشان داد که طراحی و اجرای سیستم مدیریت حرارتی مبتنی بر جابه‌جایی اجباری، موفق شده است دمای سطح لامپ‌های جیوه را با دقت در محدوده بهینه (حدود ۳۶ درجه سلسیوس) تثبیت کند. این امر از پدیده مخرب خودجذبی فوتون‌ها و افت توان رادیومتریکی جلوگیری کرده و پایداری کامل سیستم را در طول آزمون‌ها تضمین کرد.

علاوه بر پایداری حرارتی، تحلیل کانتورهای تابش اثبات کرد که پیکربندی بازتابنده استوانه‌ای، با ایجاد هم‌افزایی قدرتمند میان پرتوهای تابش مستقیم لامپ و پرتوهای بازتاب یافته از دیواره‌ها، اتلاف انرژی را به حداقل رسانده و توزیع دوز تابشی یکنواختی را در سراسر مقطع جریان آب فراهم می‌آورد. این توزیع به‌طور مستقیم در نتایج اعتبارسنجی هیدرودینامیکی و میکروبی بازتاب یافت؛ به‌گونه‌ای که مدل عددی کوپل‌شده، انطباق بی‌نظیری با نتایج فیزیکی از خود نشان داد. بررسی‌ها تأیید کرد که حتی در سخت‌گیرانه‌ترین شرایط عملیاتی با دبی ۲۷/۵ لیتر بر دقیقه، سیستم به لگاریتم کاهش تجربی ۳/۴۸ دست یافت. از سوی دیگر، در دبی‌های پایین‌تر (۲۱/۷ و ۱۷/۶ لیتر بر دقیقه)، افزایش زمان ماند سیال در کانال کوارتز منجر به دریافت دوز فرابنفش بالاتر و در نتیجه، غیرفعال‌سازی مطلق پاتوژن‌ها فراتر از حد تشخیص پروتکل دوزسنجی شد.

به‌طور کلی این پژوهش با ارائه یک پلتفرم مستحکم تجربی و محاسباتی نشان داد که معماری استوانه‌ای بازتابنده و مجزا، به دلیل

افزایش می‌یابد. این دوز مازاد سبب انهدام کامل و غیرقابل‌بازگشت ساختار ژنتیکی باکتری‌ها شده و جمعیت سلول‌های زنده را در حجم نمونه‌برداری شده به سطحی تقلیل می‌دهد که شمارش آن‌ها از آستانه تشخیص پروتکل آزمایشگاهی خارج می‌شود. از آنجایی که در این حالت امکان محاسبه یک عدد معتبر برای لگاریتم کاهش تجربی وجود ندارد، می‌توان نتیجه گرفت که میزان کاهش واقعی پاتوژن‌ها، بسیار فراتر از آستانه قابل‌اندازه‌گیری در آزمایشگاه بوده است. این غیرفعال‌سازی مطلق، نه تنها یک خلأ آزمایشگاهی محسوب نمی‌شود، بلکه گواهی محکم بر قدرت گندزدایی بی‌نظیر راکتور در دبی‌های پایین‌تر است؛ درحالی‌که تطابق عالی داده‌ها در دبی ۲۷/۵ لیتر بر دقیقه، دقت مدل عددی را در کل بازه عملیاتی تضمین می‌کند. علی‌رغم دستاوردهای پژوهش حاضر در اثبات کارایی این معماری نوین، باید اذعان کرد که این پژوهش به‌عنوان یک گام بنیادین با محدودیت‌هایی همراه بود که مسیر تحقیقات آتی را تبیین می‌کند. نخست آنکه، به‌منظور جلوگیری از تداخلات نوری پس‌زمینه و تمرکز دقیق بر هیدرودینامیک و توزیع پرتوها، ارزیابی‌های تجربی تنها با استفاده از آب مقطر با عبوردهی فرابنفش برابر با ۹۸ درصد انجام شد؛ بنابراین بررسی عملکرد این سامانه در آب‌های کدرتر یا پساب‌های واقعی با ضریب جذب متفاوت، یک ضرورت برای پژوهش‌های آینده است. با این وجود، از منظر تئوری، معماری بازتابنده استوانه‌ای در این راکتور می‌تواند در برابر اثر محافظتی جامدات معلق و عامل کدورت، عملکرد بهتری نسبت به روش‌های شیمیایی و راکتورهای سنتی فرابنفش ارائه دهد. درحالی‌که در روش‌های شیمیایی، ذرات معلق از طریق واکنش و مصرف عامل اکسیدکننده کارایی را می‌کاهند و در راکتورهای متداول فرابنفش سبب ایجاد سایه یک‌طرفه می‌شوند، تابش همه‌جانبه ناشی از بازتابنده استوانه‌ای در این پیکربندی نوین، پرتوها را از زوایای متعدد به سیال می‌رساند. این هم‌افزایی نوری پدیده سایه‌اندازی ذرات معلق را به حداقل رسانده و احتمال برخورد فوتون‌ها با پاتوژن‌های پنهان را به‌طور قابل توجهی ارتقا می‌بخشد. دوم، پارامترهای هندسی راکتور (نظیر قطر کانال و ابعاد بازتابنده)، استفاده از یک پوشش بازتابنده مشخص (آلومینیوم تجاری) و همچنین بهره‌گیری از یک نوع منبع تابش (لامپ‌های جیوه‌ای کم‌فشار)، بر اساس مقدار بهینه اولیه به‌صورت ثابت در نظر گرفته شدند. بررسی تأثیر تغییر مقیاس فیزیکی، جایگزینی منابع تابش با



پژوهش حاضر عدم وجود یک پایلوت شاهد برای مقایسه مستقیم داده‌ها و تعیین دقیق میزان ارتقای کارایی بود. از این رو، توصیه می‌شود در مسیر توسعه این پژوهش، با استقرار یک راکتور شاهد تحت شرایط عملیاتی کاملاً یکسان، ارزیابی مقایسه‌ای و تحلیل‌های جامع‌تری انجام شود.

۵-قردانی

نویسندگان به این وسیله از دانشگاه تهران برای فراهم کردن امکانات و زیرساخت‌های لازم برای انجام این پژوهش قردانی می‌کنند.

خروج تجهیزات نوری از دامنه جریان، پتانسیل بالایی در کاهش افت فشار هیدرولیکی و رفع مشکل رسوب گرفتگی مستقیم لامپ‌ها دارد. اگرچه کاهش توان مصرفی به ۹ وات در برابر نمونه‌های مشابه نشانگر بهره‌وری بالای انرژی است، اما تأیید قطعی قابلیت اطمینان آن در کاربردهای صنعتی، مستلزم انجام مطالعات جامع تکنو اقتصادی و پایش عملکرد رسوب گرفتگی پنجره کوارتز در شرایط واقعی تصفیه‌خانه است. مدل دینامیک سیالات محاسباتی تأیید شده در این پژوهش می‌تواند در آینده به عنوان یک ابزار مهندسی قابل اتکا برای این مقیاس‌پذیری استفاده شود. علاوه بر نیاز به ارزیابی‌های اقتصادی، یکی از محدودیت‌های

References

- Adeoba, M. I., Odjegba, E. E. and Pandelani, T., 2024. Nature-Based Solutions: Opportunities and Challenges for Water Treatment, In Ayeleru, O. O., Idris, A. O., Olubambi, P. A., Eds. *Smart Nanomaterials for Environmental Applications*. Chapter 23. Elsevier, pp. 575-596. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21794-4.00011-9>.
- Albolafio, S., Marin, A., Allende, A., Garcia, F., Simon-Andreu, P. J., Soler, M. A. et al., 2022. Strategies for mitigating chlorinated disinfection byproducts in wastewater treatment plants. *Chemosphere*, 288, 132583. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132583>.
- Andersson, B., Andersson, R., Håkansson, L., Mortensen, M., Sudiyo, R. and Wachem, B. V., 2012. Turbulent Mixing and Chemical Reactions, In Andersson, B., Andersson, R., Håkansson, L., Mortensen, M., Sudiyo, R., Wachem, B. V., Eds. *Computational Fluid Dynamics for Engineers*. Chapter 5. Cambridge University Press, Wiley. pp. 113-142. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139093590.006>.
- Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J., Coleman, H. and Raad, P. E., 2008. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of The ASME*, 130(7), 0780011-0780014. <https://doi.org/10.1115/1.2960953>.
- Green, A., Popović, V., Pierscianowski, J., Biancaniello, M., Warriner, K. and Koutchma, T., 2018. Inactivation of *Escherichia Coli*, *Listeria* and *Salmonella* by single and multiple wavelength ultraviolet-light emitting diodes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 47, 353-361. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.03.019>.
- Hassanpour, A., Jalali, A., Raisee, M. and Naghavi, M. R., 2023. Development and modeling of a novel type of photoreactors with exterior ultraviolet (UV) reflector for water treatment applications. *Scientific Reports*, 13(1), 7696. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34799-0>.
- Heidarinejad, G., Bozorgmehr, N. and Safarzadeh, M., 2020. Effect of highly reflective material on the performance of water ultraviolet disinfection reactor. *Journal of Water Process Engineering*, 36, 101375. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101375>.
- Kang, S., Bae, J., Park, S., Kim, K., Lee, J., Yoon, C. et al., 2024. Design optimization of a cylindrical UV-C LED reactor for effective water disinfection with numerical simulations and test reactor fabrication. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(2), 112366. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112366>.
- Li, W., Li, M., Bolton, J. R., Qu, J. and Qiang, Z., 2017. Impact of inner-wall reflection on UV reactor performance as evaluated by using computational fluid dynamics: the role of diffuse reflection. *Water Research*, 109, 382-388. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.068>.
- Moghaddam, S., 2025. Numerical simulation and comparison of four different UVC-LED reactor models for point-of-use water disinfection using computational fluid dynamics. *Journal of Water and Wastewater*, 36(1), 74-96. (In





- Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.517963.3484>.
- Moghaddam, S., Asadi, M. and Khalili, K., 2024. Investigating the effect of UVC-LED reactor configurations on liquid foods disinfection using computational fluid dynamics. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(2), 112138. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112138>.
- Rezaei, B., Rahmani, F. and Khamforoush, M., 2025. Toward efficient solar-driven photocatalytic treatment of water contaminated with various antibiotics using a porous BiOBr (2D)/UiO-66 (0D) heterojunction nanostructure. *Journal of Water and Wastewater*, 36(2), 23-42. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.535808.3502>.
- Rezaei, M., 2026. Water culture. *Journal of Water and Wastewater*, 36(5), 106-125. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2026.584459.3556>.
- Peleato, N. M., 2022. Application of convolutional neural networks for prediction of disinfection by-products. *Scientific Reports*, 12(1), 612. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03881-w>.
- Pourtalebi, B., Alizadeh, R. and Abdoli, S. M., 2025. Recent advances in industrial photoreactors: a review from design to large-scale applications. *Journal of Water Process Engineering*, 77, 108619. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.108619>.
- Sanz, E. N., Dávila, I. S., Balao, J. A. and Alonso, J. Q., 2007. Modelling of reactivation after UV disinfection: effect of UV-C dose on subsequent photoreactivation and dark repair. *Water Research*, 41(14), 3141-3151. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.04.008>.
- Seyedin, M., Hassanpour, A., Jalali, A. and Raisee, M., 2024. Robust optimization of a novel ultraviolet (UV) photoreactor for water disinfection: a neural network approach. *Chemosphere*, 362, 142788. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142788>.
- Sobhani, H. and Shokouhmand, H., 2017. Effects of number of low-pressure ultraviolet lamps on disinfection performance of a water reactor. *Journal of Water Process Engineering*, 20, 97-105. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.08.021>.
- Song, J. J. X. and Oguma, K., 2024. UV-LED-incorporated showerhead for point-of-use disinfection of drinking water. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(6), 114573. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114573>.
- Song, K., Mohseni, M. and Taghipour, F., 2016. Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: a review. *Water Research*, 94, 341-349. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.03.003>.
- Sozzi, D. A. and Taghipour, F., 2006. UV reactor performance modeling by Eulerian and Lagrangian methods. *Environmental Science and Technology*, 40(5), 1609-1615. <https://doi.org/10.1021/es051006x>.
- Tsitsifli, S. and Kanakoudis, V., 2018. Disinfection impacts to drinking water safety-a review. *Proceedings*, 2(11), 603. <https://doi.org/10.3390/proceedings2110603>.
- 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>.
- Wols, B. A., Harmsen, D. J. H., Van Remmen, T., Beerendonk, E. F. and Hofman-Caris, C. H. M., 2015. Design aspects of UV/H₂O₂ reactors. *Chemical Engineering Science*, 137, 712-721. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.06.061>.

