

Research Paper

Optimization and CFD-RSM Analysis of a Single-Orifice Oscillatory Flow Reactor for Non-Thermal Pasteurization Process of Milk

Fatemeh Khadivi¹, Kimia Taki¹, Bahram Hosseinzadeh Samani^{1*}

¹ Department of Mechanic of Biosystem, Faculty of Agriculture, University of Shahrekord, Shahrekord, Iran.

Article History	Abstract
Submitted: 2026/01/07 Revised: 2026/01/30 Accepted: 2026/03/11 Published online: 2026/03/21 Keywords: Oscillatory Flow Reactor (OFR), Single Orifice Oscillatory Flow Reactor, Turbulent Kinetic Energy (TKE), Non-thermal Pasteurization	To preserve the nutritional quality of dairy products, non-thermal pasteurization techniques have gained increasing attention. Among these techniques, hydrodynamic cavitation in oscillatory-flow reactors has emerged as an effective option for microbial inactivation. However, previous studies have rarely conducted comprehensive turbulence analyses and have often failed to optimize geometric and operational parameters in such reactors simultaneously. In this study, for the first time, a combined approach of computational fluid dynamics (CFD) using the k-ε turbulence model and response surface methodology (RSM) was employed in a single-orifice oscillatory-flow reactor to evaluate the simultaneous effects of the orifice-to-diameter ratio (d_o/D, 0.4–0.8), oscillation frequency (5–15 Hz), baffle spacing (10–20 mm), and baffle diameter (3–7 mm) on turbulent kinetic energy (TKE), enabling scientific and predictive design optimization. The results showed that oscillation frequency had the greatest influence on the response variables, whereas increasing the baffle diameter had an unfavorable effect on TKE generation. The optimal operating conditions were obtained at an orifice-to-diameter ratio (d_o/D) of 0.4, a frequency of 15 Hz, a baffle spacing of 10 mm, and a baffle diameter of 3 mm. Under these conditions, the maximum TKE was calculated as $0.36683 \text{ (m}^2/\text{s}^2)$ and the average TKE as $0.071449 \text{ (m}^2/\text{s}^2)$. The optimized single-orifice oscillatory-flow reactor, by enhancing turbulent kinetic energy and promoting favorable hydrodynamic cavitation conditions, provided an effective mechanism for the non-thermal inactivation of microorganisms such as <i>E. coli</i> during milk pasteurization, offering a sustainable and efficient alternative to conventional thermal methods while preserving nutritional and quality attributes.

*Corresponding author email:

b.hosseinzadehsamani@gmail.com

ORCID: 

0000-0002-8563-7080



How to cite this paper:

Khadivi, M., Taki, K., and Hosseinzadeh Samani, B. (2026). Optimization and CFD-RSM Analysis of a Single-Orifice Oscillatory Flow Reactor for Non-Thermal Pasteurization Process of Milk. *Journal of Research in Mechanics of Agricultural Machinery*. 38: 73-88. <https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.14860.754> (In Persian)



Authors retain the copyright and full publishing rights. Published by [Shahrekord University](https://www.shahrekord.ac.ir). This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

<https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.14860.754>

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Milk, one of the most nutritious food sources, is rich in protein, fat, vitamins, and minerals, making it an essential component of human diets. However, raw milk provides an ideal environment for microbial growth due to its high moisture and nutrient content, leading to rapid spoilage and potential health risks if not properly processed. Traditional thermal pasteurization, the standard method for ensuring microbial safety and extending shelf life, often results in uneven heat distribution, causing degradation of heat-sensitive compounds and compromising sensory and nutritional quality. These limitations have driven the search for non-thermal alternatives. Hydrodynamic cavitation emerges as a promising, innovative approach, generating localized bubble formation and collapse that produce pressure shocks capable of disrupting microbial structures without causing an overall temperature increase, thereby preserving desirable food properties. Oscillatory flow reactors, particularly single-orifice designs, excel at creating controlled cavitation and enhanced mixing, even at low Reynolds numbers, through reciprocating fluid motion and specialized baffle geometry. Turbulent kinetic energy (TKE) is a key parameter that determines cavitation intensity, mixing efficiency, and microbial inactivation efficacy. Computational Fluid Dynamics (CFD) combined with Response Surface Methodology (RSM) provides a powerful tool for modeling flow dynamics and optimizing reactor geometry to maximize TKE. This study aims to optimize a single-orifice oscillatory flow reactor using CFD-RSM for non-thermal pasteurization of milk. The primary objectives are to achieve maximum TKE through geometric and operational parameter optimization, enhance hydrodynamic cavitation for microbial inactivation, and maintain milk's nutritional and sensory qualities, offering a sustainable alternative to thermal methods.

Material and Methods

This study employed a computational approach integrating CFD and RSM for reactor optimization. A single-orifice

oscillatory-flow reactor with annular baffles was modeled in COMSOL. Turbulence was simulated with the standard k- ϵ model under time-dependent conditions. Milk was treated as the working fluid (density: 1030 kg/m³; viscosity: 0.002 Pa·s). Key independent variables included baffle-to-reactor diameter ratio (d_o/D : 0.4–0.8), oscillation frequency (5–15 Hz), baffle spacing (10–20 mm), and baffle orifice diameter (3–7 mm). Box-Behnken design in Design-Expert software generated experimental runs to optimize maximum and average TKE. For microbial validation, fresh milk samples were sterilized, inoculated with *E. coli*, and processed through the reactor under optimized conditions derived from simulations. Bacterial reduction was assessed via plate counting on MacConkey agar. Milk samples were sourced locally and processed in a controlled laboratory setting. Inoculation and plating were performed in triplicate for accuracy. Optimization relied on 29 RSM runs.

Results and Discussion

CFD-RSM optimization revealed that oscillation frequency exerted the strongest influence on TKE, with significant positive linear and quadratic effects. A higher frequency (15 Hz) markedly increased both the maximum and average TKE by enhancing vortex formation, increasing shear rates, and intensifying oscillatory motion. In contrast, increasing baffle-to-reactor diameter ratio (d_o/D from 0.4 to 0.8) and baffle orifice diameter (3–7 mm) generally reduced TKE by diminishing flow constriction and weakening cavitation intensity at orifice regions. Baffle spacing exerted a mixed influence: closer spacing (10 mm) substantially increased maximum TKE via localized turbulence intensification, whereas wider spacing (up to 20 mm) slightly improved average TKE through enhanced axial dispersion and a more uniform energy distribution. The optimal configuration was determined as $d_o/D = 0.4$, oscillation frequency = 15 Hz, baffle spacing = 10 mm, and baffle orifice diameter = 3 mm. Under these conditions, CFD simulations predicted a maximum TKE of 0.36683 m²/s², concentrated primarily at the baffle orifices where rapid acceleration triggers bubble collapse, and an average TKE of 0.071449

m^2/s^2 , representing a substantial improvement over non-optimized geometries. Contour visualizations confirmed peak TKE localization in orifice zones, validating effective cavitation generation. Microbial validation experiments demonstrated strong inactivation efficacy. Milk samples processed under optimized conditions showed a significant logarithmic reduction in *Escherichia coli* counts, which was directly correlated with elevated TKE levels. Cavitation-induced mechanisms, including high-pressure shocks (megapascal range), high-velocity microjets ($>100 \text{ m/s}$), extreme shear stresses, and localized production of reactive oxygen species ($\bullet\text{OH}$ radicals) disrupted bacterial cell membranes, caused cell lysis, and induced DNA damage without bulk temperature rise. Quality analyses confirmed preservation of key milk attributes. Contents of fat, protein, lactose, and solids-non-fat remained statistically comparable to untreated controls, with negligible changes in pH and overall acidity. No significant degradation of heat-sensitive components was observed, addressing critical limitations of conventional thermal pasteurization such as whey protein denaturation, Maillard reactions, and partial vitamin loss. Regression models exhibited excellent predictive performance ($R^2 > 0.95$), underscoring methodological robustness. The optimized single-orifice oscillatory flow reactor thus generates intense hydrodynamic cavitation sufficient for effective non-thermal pasteurization, with TKE established as a reliable indicator of microbial inactivation potential and process efficiency.

Conclusions

This study successfully optimized a single-orifice oscillatory flow reactor using computational fluid dynamics and response surface methods (CFD-RSM), maximizing turbulent kinetic energy to drive hydrodynamic cavitation for non-thermal milk pasteurization. The identified optimal parameters ($d_0/D = 0.4$, 15 Hz frequency, 10 mm baffle spacing, 3 mm orifice diameter) yield high TKE, enabling effective inactivation of *Escherichia coli* through turbulent flow, mechanical shear, pressure shocks, and reactive species generation,

without compromising milk's compositional quality. The approach offers a sustainable, energy-efficient alternative to thermal methods, preserving heat-sensitive nutrients and sensory properties while ensuring microbial safety. By linking TKE directly to cavitation intensity and inactivation efficacy, this work provides a scalable framework for industrial adoption in dairy processing. Future research should focus on pilot-scale validation, energy consumption analysis, and extension to other liquid foods with varying viscosities and microbial loads. Ultimately, this technology advances non-thermal processing paradigms, contributing to higher-quality, safer dairy products.

Author Contributions

Corresponding Author: Conceptualization, Data Curation, Resources, Writing – Review & Editing, Supervision, Project administration, Funding acquisition.

First Author: Investigation, Methodology, Software, Writing–Original Draft, Visualization.

Second Author: Data Curation, Methodology, Software, Writing – Review & Editing.

Data Availability Statement

Not applicable.

Ethical Considerations

Ethical approval was not required, as the study involved computational simulations and standard microbiological tests on milk samples, without human or animal subjects. The authors confirm adherence to ethical standards, including avoidance of data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct. No generative artificial intelligence tools were used in producing this article.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Funding Statement

The author(s) received no specific funding for this research.



بهینه‌سازی و تحلیل CFD-RSM یک راکتور جریان نوسانی تک روزنه برای فرآیند پاستوریزه‌کردن غیرحرارتی شیر

فاطمه خدیوی^۱، کیمیا تاکی^۱، بهرام حسین‌زاده سامانی^{*۱}

۱. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۱۰ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۰ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱	به‌منظور حفظ کیفیت تغذیه‌ای محصولات لبنی، روش‌های پاستوریزه‌کردن غیرحرارتی مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این میان، حفره‌زایی هیدرودینامیکی در راکتورهای جریان نوسانی به‌عنوان گزینه‌ای مؤثر برای غیرفعال‌سازی میکروبی مطرح است. با این حال، مطالعات پیشین اغلب بدون تحلیل جامع رفتار آشفتگی، بهینه‌سازی هم‌زمان عامل‌های هندسی و عملیاتی را در این راکتورها انجام نداده‌اند. در این پژوهش، برای نخستین بار از ترکیب مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) با مدل $k-\varepsilon$ و روش سطح پاسخ (RSM) در یک راکتور جریان نوسانی تک‌روزنه استفاده شد تا اثرات هم‌زمان نسبت قطر بافل به قطر (d_0/D) ، $(0/0-4/8)$ ، بسامد (۵-۱۵ هرتز)، فاصله بین بافل‌ها (۱۰-۲۰ میلی‌متر)، و قطر بافل‌ها (۳-۷ میلی‌متر) بر انرژی جنبشی آشفتگی (TKE) بررسی و بهینه‌سازی طراحی به‌صورت علمی و پیش‌بینی‌پذیر انجام شود. نتایج نشان داد که بسامد نوسان بیش‌ترین اثر را بر متغیرهای پاسخ دارد و افزایش قطر بافل‌ها تأثیر نامطلوبی بر تولید TKE ایجاد می‌کند. در نهایت شرایط بهینه (نسبت قطر بافل به قطر راکتور (d_0/D) ۰/۴، بسامد ۱۵ هرتز، فاصله بین بافل‌ها ۱۰ میلی‌متر، و قطر بافل‌ها ۳ میلی‌متر) به‌دست آمد. تحت این شرایط، مقدار بیشینه TKE برابر با $0/36683 \text{ (m}^2/\text{s}^2)$ و میانگین آن برابر با (m^2/s^2) $0/71449$ محاسبه شد. راکتور جریان نوسانی تک‌روزنه بهینه‌شده با افزایش انرژی جنبشی آشفتگی و ایجاد شرایط مطلوب حفره‌زایی هیدرودینامیکی، توانست سازوکار مؤثری برای غیرفعال‌سازی ریزاندامگان‌هایی مانند <i>E. coli</i> در پاستوریزه‌کردن غیرحرارتی شیر فراهم کند و ضمن حفظ خواص تغذیه‌ای و کیفی، جایگزینی پایدار و کارآمد برای روش‌های حرارتی سنتی ارائه دهد.
واژه‌های کلیدی: راکتور جریان نوسانی، راکتور جریان نوسانی تک‌روزنه، انرژی جنبشی آشفتگی، پاستوریزه‌کردن غیر حرارتی.	
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: b.hoseinzadehsamani@gmail.com	
ORCID: ۰۰۰۲-۸۵۶۳-۷۰۸۰	
	

نحوه استناد به این مقاله:

خدیوی، ف.، تاکی، ک. و حسین‌زاده سامانی، ب. (۱۴۰۵). بهینه‌سازی و تحلیل CFD-RSM یک راکتور جریان نوسانی تک روزنه برای فرآیند پاستوریزه‌کردن غیرحرارتی شیر. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی، ۳۸: ۷۳-۸۸.

<https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.14860.754>

مقدمه

شیر، به‌عنوان یکی از کامل‌ترین و پرارزش‌ترین مواد غذایی، منبع غنی از پروتئین، چربی، ویتامین‌ها و مواد معدنی است و بخش جدایی‌ناپذیر از رژیم غذایی انسان را تشکیل می‌دهد (Guetouache et al., 2014). با این وجود، شیر خام به دلیل رطوبت بالا و ترکیبات مغذی فراوان محیطی مناسب برای رشد ریزاندامگان‌هاست و در صورت عدم فرآوری مناسب، به‌سرعت فاسد می‌شود (Ahmad et al., 2019; Taki et al., 2025; Talha Ahmad et al., 2019). از این‌رو، عملیات حرارتی نظیر پاستوریزه‌کردن به عنوان اصلی‌ترین روش حفظ ایمنی و ماندگاری شیر در مقیاس صنعتی و خانگی مطرح شده است (de Souza et al., 2023). پاستوریزه‌کردن حرارتی، روش استاندارد متداول، با این چالش اساسی روبروست که توزیع غیریکنواخت حرارت می‌تواند منجر به تخریب ترکیبات حساس شده و کیفیت حسی و تغذیه‌ای محصول را کاهش دهد (Azizi-Lalabadi et al., 2023; Rabbani et al., 2025). این محدودیت اساسی در روش حرارتی، انگیزه‌ای قوی برای جست‌وجوی جایگزین‌های غیرحرارتی فراهم کرده است. در این میان، حفره‌زایی هیدرودینامیکی به‌عنوان یک نوآوری برجسته پدیدار شده است. حفره‌زایی با ایجاد حباب‌های موضعی و سپس فروپاشی آن‌ها، شوک‌های فشاری تولید می‌کند که ساختار ریزاندامگان‌ها را تخریب کرده و ایمنی محصول را بدون نیاز به افزایش دمای کلی و حفظ خواص مطلوب مواد غذایی تضمین می‌کند (Tang et al., 2024). با وجود مزایای قابل توجه حفره‌زایی، استفاده مؤثر از آن در فرآیندهای صنعتی مستلزم طراحی سامانه‌هایی است که بتوانند این پدیده را به‌صورت پایش‌شده و در مقیاس بزرگ ایجاد کنند. راکتورهای جریان نوسانی در این زمینه، قابلیت بالایی از خود نشان داده‌اند. راکتورهای جریان نوسانی به‌طور خاص برای این منظور توسعه یافته‌اند؛ زیرا با ترکیب حرکت رفت و برگشتی سیال و هندسه‌های طراحی‌شده، قادرند جریان کاملاً آشفته اما با توزیع یکنواخت ایجاد کنند که این آشفتگی در اعداد رینولدز پایین نیز به خوبی برقرار است (McDonough et al., 2019). این آشفتگی ایجاد شده، مستقیماً عامل پایشی فرآیند را تعیین می‌کند.

جریان در راکتورهای نوسانی رفتار پیچیده‌ای دارد و برای ارزیابی کارایی آن، انرژی جنبشی آشفتگی به‌عنوان شاخص اصلی شدت اختلاط و نوسانات جریان در نظر گرفته می‌شود. انرژی جنبشی آشفتگی تعیین‌کننده شدت و محل

تشکیل حباب‌های حفره‌زایی است؛ به نحوی که افزایش انرژی جنبشی آشفتگی منجر به اختلاط قوی‌تر، یکنواختی توزیع حرارت و بهبود کارایی نابودی میکروبی می‌شود (Goger et al., 2018).

از این‌رو، پایش و بهینه‌سازی انرژی جنبشی آشفتگی در راکتور جریان نوسانی، کلید موفقیت در پاستوریزه‌کردن مبتنی بر حفره‌زایی است. برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی این سامانه‌های چندمعیاره، تحلیل‌های عددی ضروری است. مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) ابزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی دقیق میدان‌های جریان و توزیع انرژی جنبشی آشفتگی در هندسه پیچیده راکتور جریان نوسانی ارائه می‌دهد (Bhatti et al., 2020). برای استنتاج روابط عملی و طراحی بهینه، ترکیب این تحلیل‌های عددی با روش سطح پاسخ (RSM) امکان می‌دهد تا تأثیر تغییرات هندسه و عامل‌های نوسان بر انرژی جنبشی آشفتگی و بازدهی نهایی با دقت مشخص شود (Kumar & Bansal, 2013).

لذا، هدف اصلی این پژوهش، اجرای یک راهبرد جامع بهینه‌سازی مبتنی بر CFD-RSM بر روی راکتور جریان نوسانی تک‌روزنه برای پاستوریزه‌کردن شیر است. نوآوری اصلی این پژوهش در ترکیب سه رویکرد مکمل نهفته است. نخست، استفاده از راکتور جریان نوسانی تک‌روزنه به‌عنوان یک پیکربندی هندسی با قابلیت ایجاد آشفتگی مؤثر در اعداد رینولدز نسبتاً پایین مورد بررسی قرار گرفته است. هم‌چنین، به‌کارگیری هم‌زمان شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و روش سطح پاسخ (RSM) امکان تحلیل دقیق اثر عامل‌های هندسی و عملیاتی را بر انرژی جنبشی آشفتگی فراهم کرده است. و هم‌چنین ارتباط میان شدت آشفتگی ایجاد شده در راکتور و کارایی غیرفعال‌سازی میکروبی در فرآیند پاستوریزه‌کردن غیرحرارتی شیر مورد بررسی قرار گرفته است. این رویکرد تلفیقی می‌تواند چارچوبی مناسب برای طراحی و بهینه‌سازی راکتورهای جریان نوسانی در کاربردهای صنایع غذایی فراهم کند. این کار با هدف دستیابی به بالاترین نرخ انتقال حرارت و کارایی پاستوریزه‌کردن (از طریق پایش انرژی جنبشی آشفتگی) و در عین حال، حفظ بیشینه کیفیت محصول نهایی انجام می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

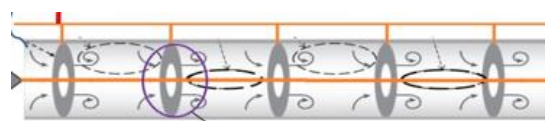
راکتور جریان نوسانی

راکتورهای جریان نوسانی، راکتورهای لوله‌ای هستند که

درون آن‌ها بافل‌های صفحه‌ای حلقوی به فاصله‌های برابر قرار گرفته‌اند. این راکتورها هم قابلیت استفاده در فرآیندهای پیوسته و هم ناپیوسته را دارا هستند. از مزایای این راکتور می‌توان به افزایش انتقال حرارت، انتقال جرم و همچنین اختلاط اشاره کرد (Mazubert, 2014). یکی از انواع راکتورهای نوسانی، راکتور جریان نوسانی تک روزنه است.

هندسه راکتور جریان نوسانی تک روزنه

طراحی راکتور تک‌روزنه شامل بررسی ساختار، عامل‌های طراحی و عوامل مؤثر بر بازدهی آن است. این نوع راکتور به دلیل ویژگی‌های خاص در اختلاط و رفتار جریان، نسبت به راکتورهای سنتی عملکرد بهتری دارد. معمولاً به شکل استوانه‌ای یا مکعبی ساخته می‌شود و می‌توان با طراحی دیواره‌ها و شیب‌های مناسب، جریان مواد را بهینه کرد. در راکتورهای جریان نوسانی تک‌روزنه، یک لوله با بافل‌های منظم و فاصله‌دار وجود دارد که با حرکت رفت و برگشتی پیستون نوسان ایجاد می‌شود. این نوسان موجب افزایش شدت اختلاط و بهبود تماس میان مواد واکنش‌دهنده می‌گردد. رفتار سیال در این راکتورها در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱- شماتیک راکتور جریان نوسانی تک روزنه

ابعاد و هندسه راکتور تأثیر زیادی بر رفتار هیدرودینامیکی و کارایی واکنش‌ها دارد. انتخاب قطر و ارتفاع راکتور، فاصله بین بافل‌ها و قطر بافل‌ها از جمله عوامل مهم در طراحی راکتور هستند. به منظور تعیین ابعاد راکتور، برخی از عامل‌های هندسی، مانند فاصله بین بافل‌ها، اندازه بافل‌ها و ابعاد آن‌ها مورد نیاز است. همچنین، عامل‌های دینامیکی سه بعدی، مانند عدد رینولدز جریان نوسانی، عدد رینولدز جریان خالص و عدد استروهال مورد بررسی قرار گرفت. برای تعیین قطر راکتور از رابطه (۱) استفاده شد. مهم‌ترین عامل در جریان عدد رینولدز جریان نوسانی است، که این عدد شدت اختلاط اعمال شده در درون لوله را نشان می‌دهد.

$$Re_o = \frac{2\pi f \rho D x_0}{\mu} \quad (1)$$

به منظور ایجاد جریان آشفتگی درون راکتور، عدد رینولدز بین 10^2 تا 10^4 نظر گرفته شد (Khadivi et al., 2024).

که در این رابطه D قطر لوله (m) و x_0 دامنه سیال (m)، μ لزجت سیال (Pa.s) و f بسامد نوسان (Hz) است.

از رابطه (۲) می‌توان عدد استروهال را محاسبه کرد. به دلیل آن که در این راکتور جریان نوسانی بدون دخالت جریان خالص اتفاق می‌افتد، عدد استروهال بین 0.8 تا 0.4 است (Zheng & Mackley, 2008).

$$Str = \frac{D}{4\pi x_0} \quad (2)$$

که در این رابطه D قطر لوله (m) و x_0 دامنه سیال (m) است.

عدد رینولدز جریان خالص اضافی در درون لوله نیز به کمک رابطه (۳) به دست می‌آید (Khadivi et al., 2026).

$$Re_n = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (3)$$

در این رابطه، D قطر لوله (m)، μ لزجت سیال (Pa.s)، ρ چگالی سیال (kg/m^3) و u سرعت سیال (m/s) است. رابطه (۴) نیز نسبت سرعت را نشان می‌دهد (Ahmed et al., 2017).

$$\psi = \frac{Re_o}{Re_n} = \frac{2\pi x_0 f}{u} \quad (4)$$

که در این رابطه x_0 دامنه سیال (m)، u سرعت سیال (m/s) و f بسامد نوسان (Hz) است.

نسبت فاصله بین بافل‌ها نیز از رابطه (۵) به دست می‌آید (Taki et al., 2024).

$$\frac{l}{D} = 0.5 - 1.5 \quad (5)$$

اندازه قطر مقاطع همگرایی متوالی لوله نیز به صورت رابطه (۶) است (Zheng & Mackley, 2008; Taki et al., 2024).

$$d_0 = 0.4 D \quad (6)$$

شبیه سازی CFD سامانه

در این بخش از پژوهش شبیه‌سازی تک حالتی با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) انجام شد. شبیه‌سازی در حالت وابسته به زمان انجام گرفت. جریان سیال تحت شرایط توربولانس و مدل آشفتگی $k-\epsilon$ شبیه‌سازی شد. مش‌بندی استفاده شده در این شبیه‌سازی به صورت معمول بوده است. به منظور اطمینان از دقت نتایج، آزمون استقلال از مش انجام شد و شبکه نهایی زمانی انتخاب گردید که تغییرات TKE ناچیز بود. مدل آشفتگی $k-\epsilon$ نیز به دلیل پایداری عددی و عملکرد مناسب در جریان‌های داخلی نوسانی انتخاب شد. معادلات مربوط به انرژی جنبشی آشفتگی در این شبیه‌سازی

انرژی جنبشی ناشی از اثرات تراکم‌پذیری جریان (برای جریان‌های تراکم ناپذیر صفر) است. σ_ϵ نیز اعداد پرانتل متناسب با k و S_k و S_ϵ : هم ترم‌های چشمه قابل تعریف توسط اپراتور هستند.

انرژی جنبشی آشفتگی

انرژی جنبشی آشفتگی (TKE) بخشی از انرژی جنبشی سیال است که از حرکات تصادفی و ناپایدار ذرات ناشی می‌شود و شدت آشفتگی جریان را نشان می‌دهد. این عامل در مهندسی فرآیند و CFD اهمیت زیادی دارد، زیرا بر انتقال جرم و حرارت اثر گذاشته و در راکتورها موجب بهبود اختلاط مواد می‌شود.

انرژی جنبشی آشفتگی به صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود.

$$TKE = \frac{1}{2} (\bar{u}'^2 + \bar{v}'^2 + \bar{w}'^2) \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، u', v', w' به ترتیب انحرافات سرعت در سه جهت مختصات (x,y,z) هستند.

سیال مورد استفاده در پژوهش و شرایط مرزی

در این شبیه‌سازی، محتوای راکتور، شیر کامل در نظر گرفته شده که شامل ۱/۴ درصد چربی و ۳۷ درصد مواد جامد است. از آنجا که شیر یکی از اصلی‌ترین مواد غذایی مورد مصرف انسان است و برای حفظ سلامت نیاز به تصفیه و ضدعفونی دارد، در این پژوهش به‌عنوان سیال مورد بررسی برای فرآیند پاستوریزه‌کردن و از بین بردن ریزاندامگان‌ها انتخاب شده است. در این مطالعه، لزجت شیر برابر با ۰/۰۰۲ پاسکال‌ثانیه و چگالی آن ۱۰۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب فرض شده است. در ورودی راکتور، شرط سرعت نوسانی وابسته به زمان اعمال شده است، که بر اساس رابطه $u(t) = U_0 \sin(2\pi ft)$ تعریف می‌شود، که در آن U_0 دامنه سرعت و f بسامد نوسان جریان ورودی است.

در خروجی راکتور، شرط فشار ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین برای تمامی دیواره‌های راکتور، شرط مرزی بدون لغزش (No Slip) اعمال شده است، به‌طوری‌که سرعت سیال در تماس با دیواره صفر فرض می‌شود.

آماده‌سازی نمونه‌ها و آزمایش‌های میکروبی

به‌منظور بررسی ارتباط میان انرژی جنبشی آشفتگی و کاهش باکتری *E. coli* در شیر، از شیر تازه به‌عنوان محیط آزمایشی

در شرایط 2-D axisymmetric domain حل شد. عامل‌های ورودی شامل نسبت قطر بافل به قطر راکتور، قطر بافل‌ها و فاصله بین بافل‌ها برحسب میلی‌متر و بسامد برحسب هرتز هستند. این عامل‌های ورودی به منظور بررسی تأثیر آن‌ها بر متغیرهای خروجی که شامل بیشینه انرژی جنبشی آشفتگی و میانگین انرژی جنبشی آشفتگی هستند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

مدل توربولانسی K-ε

در این پژوهش برای توصیف جریان سیال از معادلات ناویر-استوکس و دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) استفاده شده است. مدل k-ε به‌عنوان یکی از رایج‌ترین مدل‌های آشفتگی، دو معادله برای انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ تخریب آن (ϵ) حل می‌کند (Motahayerzadeh, 2018). این مدل به دلیل حساسیت به شرایط مرزی و ورودی، گاهی نیازمند تنظیمات ویژه بوده و برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفتیده با تغییرات زیاد مناسب است (Kouhifaiegh et al., 2024; Li et al., 2020). اما دلیل اصلی انتخاب مدل k-ε برای شبیه‌سازی CFD، کارایی و قابلیت اطمینان آن در شبیه‌سازی جریان‌های آشفتیده شدید راکتور نوسانی است. این مدل در ثبت TKE، عالی عمل می‌کند. در حالی که مدل‌هایی مانند SST k- ω دقتی در نزدیکی دیوارها ارائه می‌دهند، k-ε تعادل مؤثری بین دقت و سادگی محاسباتی برقرار می‌کند که برای تمرکز بر دینامیک جریان حجمی ایده‌آل است.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} \quad (8)$$

$$+ G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right\}$$

$$+ C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{K} + S_\epsilon$$

ثابت‌های تجربی عبارت‌اند از:

$$C_{1\epsilon} = 1.44 \quad C_{2\epsilon} = 1.92$$

$$C_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1.0$$

$$\sigma_\epsilon = 1.3$$

که در آن‌ها؛ G_k : تولید انرژی ناشی از گرادیان‌های سرعت متوسط جریان، G_b : تولید انرژی ناشی از بویانسی (برای جریان‌های بدون جاذبه و انتقال حرارت صفر)، و Y_M : تولید

آزمایشی ایجاد می‌کند و بر مبنای آن، تعداد آزمایش‌ها و سطوح هر متغیر در هر آزمایش را تعیین می‌نماید. RSM، به‌خصوص زمانی که تعداد متغیرها زیاد باشد، بسیار کارآمد است و به منظور دستیابی به مقادیر بهینه، از حل روابط موجود بهره می‌برد (رابطه ۱۱).

$$Y_i = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \varepsilon \quad (11)$$

که در این رابطه، β_0 ، β_i ، β_{ij} ، β_{ii} ضرایب ثابت، X_i و X_j متغیرهای مستقل فرآیند، ε خطای تصادفی است. در این آزمایش از طرح باکس بنکن استفاده شد و سطوح انتخابی برای متغیرهای مستقل آزمایش مطابق جدول (۱) انتخاب شد و تأثیر عامل‌های مستقل بر نسبت قطر بافل به قطر راکتور (d_0/D)، بسامد (هرتز)، فاصله بین بافل‌ها (میلی‌متر)، و قطر بافل‌ها (میلی‌متر) بررسی شد. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم افزار COMSOL Multiphysics نسخه ۵/۶ و طراحی آزمایش‌ها با نرم‌افزار Design-Expert نسخه ۷ انجام شد.

جدول ۱- سطوح متغیرهای مستقل در آزمایش سطوح کدبندی			
متغیرهای مستقل	۱	۰	۱-
نسبت قطر بافل به قطر راکتور	۰/۸	۰/۶	۰/۴
بسامد (هرتز)	۱۵	۱۰	۵
فاصله بین بافل‌ها (میلی‌متر)	۲۰	۱۵	۱۰
قطر بافل‌ها (میلی‌متر)	۷	۵	۳

نتایج و بحث

در این مطالعه از راکتور جریان نوسانی استفاده شد، که استفاده از این راکتور منجر به همزنی بیشتر و هم‌چنین افزایش انرژی جنبشی (TKE) شد. عامل‌های مهم در این طراحی شامل، نسبت قطر بافل به قطر راکتور (d_0/D)، بسامد (f)، فاصله بین بافل‌ها، و قطر بافل‌ها است. نسبت قطر بافل به قطر راکتور (۰/۴-۰/۸)، بسامد در بازه (۵-۱۵) هرتز، فاصله بین بافل‌ها در بازه (۱۰-۲۰) میلی‌متر، و قطر بافل‌ها هم در بازه (۳-۷) میلی‌متر قرار دارد.

روش سطح پاسخ (RSM)

بهینه‌سازی ابعاد راکتور به‌روش سطح پاسخ انجام شد. متغیرهای مستقل آزمایش شامل نسبت قطر بافل به قطر راکتور (d_0/D)، بسامد، فاصله بین بافل‌ها، و قطر بافل‌ها است.

استفاده شد. نمونه‌های شیر برای حذف کامل ریزاندامگان‌های طبیعی موجود، توسط اتوکلاو در دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس به مدت ۱۵ دقیقه ضدعفونی شدند تا محیطی کاملاً ضدعفونی و پایش‌شده جهت تلقیح باکتری فراهم شود. پس از ضدعفونی‌سازی، نمونه‌ها با محلول باکتری تلقیح شدند. دو نوع نمونه شامل نمونه‌های پایش (شیر تلقیح‌شده بدون تیمار) و نمونه تیمار شده آماده گردید. تمامی آزمایش‌ها در سه تکرار مستقل انجام شدند و نمونه شاهد بدون تیمار برای مقایسه استفاده شد. شمارش میکروبی با روش استاندارد کشت سطحی گزارش شد.

نمونه‌های پایش و تیمار شده بر روی محیط مک کانکی آگار به میزان ۲۵۰ میکرولیتر از هر دقت (سه دقت برای هر نمونه) کشت داده شدند و سپس در دمای ۳۷ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت در انکوباتور قرار داده شدند. فرآیند کاهش جمعیت باکتریایی با استفاده از روش استاندارد شمارش پلیت ارزیابی شد. نمونه‌های تیمار شده پیش از کشت، از طریق راکتور جریان نوسانی تحت شرایط عملیاتی مختلف که بر اساس نتایج شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی برای ایجاد سطوح متفاوت TKE طراحی شده بودند، فرآوری شدند. در هر آزمایش، شیر به مدت ۱۰ دقیقه از میان به گردش درآمد تا تماس مداوم با نواحی حفره‌زایی در پیکربندی‌های مختلف تضمین شود.

مدلسازی و بهینه‌سازی عامل‌های شبیه‌سازی

در این تحقیق، هدف بهینه‌سازی ابعاد هندسی راکتور و بررسی تأثیر متغیرهای مختلف هندسی بر روی عامل‌های خروجی شبیه‌سازی است. روش سطح پاسخ (RSM) به‌دلیل توانایی بالا در تحلیل اثرات متقابل میان متغیرهای متعدد و هم‌چنین کاهش تعداد آزمایش‌ها یا شبیه‌سازی‌های موردنیاز، به‌طور گسترده در بهینه‌سازی فرآیندهای مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مقایسه با روش‌های کلاسیک آزمایش، RSM امکان مدل‌سازی روابط غیرخطی میان متغیرهای طراحی و پاسخ‌های فرآیندی را فراهم می‌کند و از طریق ارائه مدل ریاضی پیش‌بینی‌کننده، تعیین شرایط بهینه سامانه را تسهیل می‌نماید. بدین منظور، از روش منحنی سطح پاسخ (RSM) استفاده شده است. این روش به مدل‌سازی روابط غیرخطی میان متغیرهای ورودی و خروجی پرداخته و فرایند بهینه‌سازی را تسهیل می‌کند. با مشخص کردن حدود بالا و پایین برای هر متغیر و تعداد متغیرها، این روش یک ماتریس

(2024) نشان داد که افزایش بسامد نوسان یکی از مهم‌ترین عوامل در افزایش شدت اختلاط و انتقال جرم در راکتورهای بافل‌دار نوسانی است. نتایج به‌دست آمده در این پژوهش نیز همین روند را تأیید می‌کند.

اثر نسبت قطر بافل به قطر راکتور (d_0/D) و قطر بافل‌ها بر انرژی جنبشی آشفتگی (TKE) (بیشینه و میانگین)
تأثیر d_0/D و قطر بافل‌ها بر انرژی جنبشی آشفتگی (TKE) در یک راکتور جریان نوسانی بسیار اهمیت دارد. نمودار شکل (۲-الف)، روند تغییرات TKE max را در اثر تغییرات d_0/D و قطر بافل‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل (۲-الف) هم مشخص است، با افزایش d_0/D ، TKE max در درون راکتور با شیب ملایم کاهش می‌یابد. هم‌چنین با توجه به نمودار تغییرات نسبت قطر مشخص است که افزایش قطر منجر به کاهش TKE max می‌شود.

برطبق این نمودار می‌توان این‌طور نتیجه گرفت که، با افزایش d_0/D از ۰/۴ به ۰/۶، TKE max، از (m^2/s^2) ۰/۱۷۴۹۰۷ به (m^2/s^2) ۰/۲۳۱۴۴ افزایش پیدا می‌کند، که نشان دهنده افزایش ملایم TKE max است. با افزایش مجدد d_0/D به ۰/۸، TKE max به عدد (m^2/s^2) ۰/۱۲۶۳۱۸ می‌رسد. همان‌طور که از این نمودار مشخص است، افزایش d_0/D تأثیر معکوس بر افزایش TKE max درون لوله دارد. اثر d_0/D بر انرژی جنبشی آشفتگی (TKE) قابل توجه است و بر ویژگی‌های جریان و بازدهی اختلاط تأثیر می‌گذارد.

تحقیقات نشان می‌دهد که تغییرات در قطر لوله می‌تواند منجر به تغییرات قابل توجه در TKE، به‌ویژه در جریان‌های آشفتنه شود. برای d_0/D بزرگ‌تر، جریان ممکن است به‌طور کامل توسعه نیابد، که منجر به اختلاط کارآمدتر و TKE max کم‌تر شود (He & Zhao, 2010). d_0/D بزرگ‌تر ممکن است تشکیلات گردابی محوری و شعاعی برجسته‌تری ایجاد کند که می‌تواند اختلاط را افزایش دهد، اما هم‌چنین ممکن است منجر به توزیع ناهموار TKE شود. در حالی که d_0/D کوچک‌تر می‌تواند max TKE را افزایش داده و اختلاط را بهبود بخشد. هم‌چنین ممکن است منجر به افزایش افت فشار و اتلاف انرژی نیز شوند که نیاز به تعادل بین عملکرد و بازدهی در طراحی راکتور دارد.

با توجه به شکل (۲-ب)، با افزایش d_0/D ، TKE ave با شیب بسیار کم افزایش پیدا می‌کند و سپس با افزایش مجدد d_0/D ، TKE ave، روند کاهشی پیدا می‌کند. به‌طوری که با افزایش

بیشینه انرژی جنبشی آشفتگی، میانگین انرژی جنبشی آشفتگی، نیز متغیرهای وابسته آزمایش هستند. در نهایت تجزیه و تحلیل‌های انجام شده، معادله‌های واقعی شده برای هر یک از متغیرهای وابسته استخراج شد. رابطه‌های (۱۳-۱۲)، رابطه‌های واقعی را نشان می‌دهند.

$$\begin{aligned} \text{TKE max} = & -0.88999 + 2.47752 * d_0/D + 0.025772 * f - 0.030062 * B + 0.023517 * C \\ & - 0.026302 * d_0/D * f + 6.56250E-004 * d_0/D * B - 3.64750E-003 * d_0/D * C - 3.85500E-005 * f * B \\ & - 9.70400E-004 * f * C - 1.11625E-003 * B * C - 1.90378 * d_0/D^2 + 2.30985E-003 * f^2 + 4.48750E-003 * B^2 - 3.01540E-004 * C^2 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{TKE average} = & -0.22912 + 0.76356 * d_0/D - 0.013622 * f + 1.44688E-003 * B + 5.38411E-003 * C + 4.84600E-003 * d_0/D \\ & * f - 4.07125E-003 * d_0/D * B - 6.81875E-003 * d_0/D * C - 3.55875E-004 * f * B + 8.47630E-004 * f * C - 1.39250E-005 * B * C \\ & - 0.54879 * d_0/D^2 + 7.00470E-004 * f^2 + 2.97750E-004 * B^2 - 1.95385E-004 * C^2 \end{aligned} \quad (13)$$

با حذف ضرایب غیرمعنی‌دار و بی‌بعد شدن ضرایب باقی‌مانده از رابطه‌های واقعی، روابط کدبندی شده هر متغیر وابسته به‌دست آمد. روابط (۱۴-۱۵) که در ادامه آمده‌اند، به ترتیب نشان دهنده روابط کدبندی شده برای متغیرهای وابسته هستند.

$$\begin{aligned} \text{TKE max} = & +0.23 - 0.024 * A + 0.21 * B - 3.845E-003 * C - 0.015 * D - 0.026 * A * B \\ & + 2.625E-004 * A * C - 3.647E-003 * A * D - 3.855E-004 * B * C - 0.024 * B * D - 0.011 * C * D \\ & - 0.076 * A^2 + 0.058 * B^2 + 0.018 * C^2 - 7.538E-003 * D^2 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{TKE average} = & +0.081 + 6.167E-003 * A + 0.071 * B - 3.572E-003 * C + 0.019 * D + 4.846E-003 * A * B \\ & - 1.628E-003 * A * C - 6.819E-003 * A * D - 3.559E-003 * B * C + 0.021 * B * D - 1.393E-004 * C * D - 0.022 * A^2 + 0.018 * B^2 + 1.191E-003 * C^2 - 4.885E-003 * D^2 \end{aligned} \quad (15)$$

در روابط فوق (A: نسبت قطر بافل به قطر راکتور، B: بسامد، C: فاصله بین بافل‌ها، D: قطر بافل‌ها) است. با توجه به روابط (۱۲-۱۵) می‌توان نتیجه گرفت که بسامد بیش‌ترین تأثیر را بر متغیرهای وابسته داشته است. این نتیجه با نتایج گزارش شده در مطالعات پیشین نیز همخوانی دارد. در پژوهش‌های انجام شده بر روی راکتورهای جریان نوسانی گزارش شده است که افزایش بسامد نوسان باعث افزایش شدت گردابه‌ها و در نتیجه افزایش انرژی جنبشی آشفتگی درون راکتور می‌شود. به‌عنوان مثال، (Kouhifiaegh *et al.*،)

پیدا می‌کند. قطر بافل بزرگ‌تر می‌تواند اختلاط را با افزایش جریان نوسانی قوی‌تر، در نتیجه TKE ave افزایش دهد. مطالعات نشان می‌دهد که ابعاد بهینه بافل می‌تواند منجر به بهبود پراکندگی محوری شود که برای اختلاط مؤثر در راکتورهای بافل نوسانی ضروری است (Mortazavi & Pakzad, 2023). هم‌چنین طبق پژوهشی که (Khadivi *et al.*, 2025) انجام دادند، مشخص شد که با افزایش نسبت قطر بافل به قطر راکتور و قطر بافل‌ها، انرژی جنبشی آشفتگی (بیشینه و میانگین)، روند کاهشی دارد.

اثر بسامد و فاصله بین بافل‌ها بر انرژی جنبشی آشفتگی (TKE) (بیشینه و میانگین)

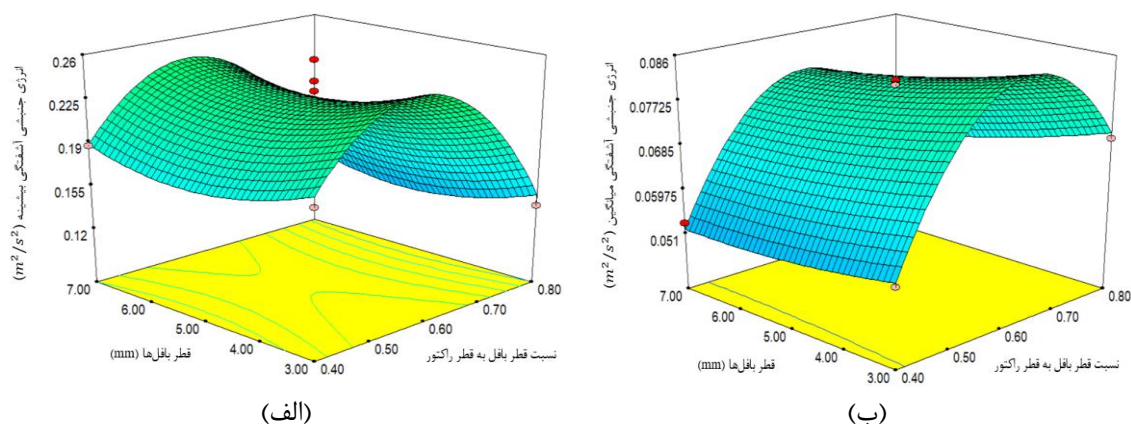
تأثیر بسامد و فاصله بین بافل‌ها بر TKE یکی از موضوعات مهم در طراحی راکتورها و مخازن مختلط است. متغیرهای مذکور می‌توانند به شکل قابل توجهی بر الگوی جریان و توزیع TKE اثر گذار باشند. طبق تحلیل‌های انجام شده، مشخص شد که بسامد بیش‌ترین تأثیر را بر افزایش TKE max داشته است.

مطابق شکل (۳-الف) افزایش بسامد رابطه مستقیمی با افزایش TKE max دارد. به‌طوری‌که وقتی که بسامد از ۵ هرتز به ۱۰ هرتز افزایش می‌یابد، TKE max نیز از $0.7731 \text{ (m}^2/\text{s}^2\text{)}$ به $0.23144 \text{ (m}^2/\text{s}^2\text{)}$ و هم‌چنین هنگامی‌که، بسامد از ۱۰ هرتز به ۱۵ هرتز افزایش پیدا می‌کند، TKE max نیز از $0.23144 \text{ (m}^2/\text{s}^2\text{)}$ به $0.49170 \text{ (m}^2/\text{s}^2\text{)}$ افزایش پیدا می‌کند. تحقیقات نشان داده‌اند که افزایش بسامد جریان می‌تواند به افزایش حداکثر انرژی جنبشی آشفتگی (TKE max) منجر شود. بسامدهای بالاتر تولید گرداب را افزایش می‌دهند، که اختلاط را افزایش می‌دهد و منجر به یک الگوی جریان یکنواخت‌تر، شبیه به جریان پلاگین می‌شود. هم‌چنین جریان نوسانی گرداب‌هایی ایجاد می‌کند که به اختلاط کلی کمک می‌کند و در نتیجه حداکثر TKE را افزایش می‌دهد (Slavnić *et al.*, 2014). با توجه به شکل (۳-ب)، افزایش TKE ave، با افزایش بسامد رابطه مستقیم دارد. به‌طوری‌که هنگامی‌که بسامد از ۵ هرتز به ۱۰ هرتز افزایش می‌یابد، TKE ave از $0.269138 \text{ (m}^2/\text{s}^2\text{)}$ به $0.8085 \text{ (m}^2/\text{s}^2\text{)}$ افزایش می‌یابد.

d_0/D از 0.4 به 0.6 ، TKE ave از $0.5243 \text{ (m}^2/\text{s}^2\text{)}$ به $0.8085 \text{ (m}^2/\text{s}^2\text{)}$ افزایش پیدا می‌کند. هنگامی‌که d_0/D از 0.6 به 0.8 افزایش پیدا می‌کند، TKE ave از $0.8085 \text{ (m}^2/\text{s}^2\text{)}$ به $0.6476 \text{ (m}^2/\text{s}^2\text{)}$ کاهش پیدا می‌کند. اثر d_0/D در راکتورهای جریان متناوب به‌طور قابل توجهی بر میانگین انرژی جنبشی آشفتگی (TKE) تأثیر می‌گذارد. تحقیقات نشان می‌دهد که تغییرات در قطر لوله می‌تواند الگوهای جریان، بازدهی اختلاط را تغییر دهد، که همگی برای بهینه‌سازی عملکرد راکتور حیاتی هستند. نسبت ضخامت به قطر بر TKE تأثیر می‌گذارد. با افزایش این نسبت، TKE تمایل به کاهش دارد، که نشان می‌دهد که قطر روزنه‌های بزرگ‌تر ممکن است تلاطم را کاهش دهد (Heryana *et al.*, 2024). طبق مطالعه‌ای که (Gulsacan *et al.*, 2022) انجام دادند، d_0/D کوچک‌تر می‌تواند سرعت سیال را افزایش دهد و منجر به افزایش TKE به‌دلیل نرخ برش بالاتر و تولید آشفتگی شود.

باتوجه به شکل (۲-الف) با افزایش قطر بافل‌ها TKE max با شیب بسیار ملایم کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که با افزایش قطر بافل‌ها از ۳ میلی‌متر به ۵ میلی‌متر TKE max نیز از $0.248559 \text{ (m}^2/\text{s}^2\text{)}$ به $0.23144 \text{ (m}^2/\text{s}^2\text{)}$ کاهش می‌یابد و هم‌چنین با افزایش قطر بافل‌ها از ۵ میلی‌متر به ۷ میلی‌متر TKE max نیز از $0.23144 \text{ (m}^2/\text{s}^2\text{)}$ به $0.240869 \text{ (m}^2/\text{s}^2\text{)}$ افزایش می‌یابد. قطر بافل در راکتورهای جریان نوسانی به‌طور قابل توجهی بر حداکثر انرژی جنبشی آشفتگی (TKE max) در سامانه تأثیر می‌گذارد. تحقیقات نشان می‌دهد که تغییرات در هندسه بافل، از جمله قطر، می‌تواند الگوهای جریان، اتلاف انرژی و بازدهی اختلاط را تغییر دهد. قطر بافل‌ها نقش مهمی در توزیع TKE ایفا می‌کند. با افزایش قطر بافل‌ها، اختلالات قابل توجهی را بر جریان ایجاد می‌کنند و باعث ایجاد آشفتگی و افزایش TKE می‌شوند. قطر بافل بزرگ‌تر می‌تواند تشکیل گرداب را افزایش دهد و منجر به افزایش اختلاط و حداکثر TKE بالاتر شود (Mazubert *et al.*, 2016).

مطابق شکل (۲-ب)، با افزایش قطر بافل‌ها، TKE ave کاهش پیدا می‌کند. به‌طوری‌که وقتی قطر بافل‌ها از ۳ میلی‌متر به ۵ میلی‌متر افزایش پیدا می‌کند، TKE ave نیز از $0.85314 \text{ (m}^2/\text{s}^2\text{)}$ به $0.8085 \text{ (m}^2/\text{s}^2\text{)}$ کاهش و با افزایش مجدد قطر بافل‌ها از ۵ میلی‌متر به ۷ میلی‌متر، TKE ave از $0.8085 \text{ (m}^2/\text{s}^2\text{)}$ به $0.7818 \text{ (m}^2/\text{s}^2\text{)}$ کاهش



شکل ۲- اثر نسبت قطر بافل به قطر راکتور و قطر بافل‌ها بر انرژی جنبشی آشفتگی (بیشینه و میانگین)، الف-ب سطح سه بعدی.

نزدیک‌تر تشکیل گرداب‌ها را افزایش می‌دهند، که برای اختلاط بی‌نظم و اتلاف انرژی حیاتی هستند و منجر به حداکثر TKE بالاتر می‌شوند (Murotani *et al.*, 2024).

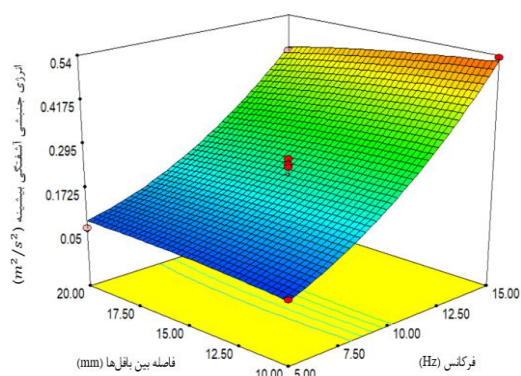
در مقابل، در حالی که فاصله بافل تنگ‌تر می‌تواند TKE و انتقال حرارت را افزایش دهد، ممکن است به دلیل افت فشار بیش‌تر منجر به افزایش مصرف انرژی شود. این مبادله مستلزم ملاحظات طراحی دقیق برای بهینه‌سازی عملکرد بدون متحمل شدن هزینه‌های عملیاتی بیش از حد است. مطابق شکل (۳-ب)، افزایش فاصله بین بافل‌ها باعث افزایش TKE ave با شیب ملایم می‌شود. افزایش فاصله بین بافل‌ها از ۱۰ میلی‌متر به ۱۵ میلی‌متر، TKE ave از $0.0564765 \text{ (m}^2/\text{s}^2)$ به $0.08085 \text{ (m}^2/\text{s}^2)$ افزایش می‌یابد، و همچنین افزایش فاصله بین بافل‌ها از ۱۵ میلی‌متر به ۲۰ میلی‌متر، TKE ave از $0.08085 \text{ (m}^2/\text{s}^2)$ به $0.0948563 \text{ (m}^2/\text{s}^2)$ نیز افزایش پیدا می‌کند. فاصله بین بافل‌ها در یک راکتور جریان نوسانی (OFR) به‌طور قابل توجهی بر میانگین انرژی جنبشی آشفتگی (TKE) در سامانه تأثیر می‌گذارد. فاصله بافل نزدیک‌تر برهم‌کنش بین جریان نوسانی و سیال را افزایش می‌دهد و منجر به چین‌خوردگی و کشش بارزتر سیال می‌شود که باعث اختلاط آشفتگی می‌شود (Murotani *et al.*, 2024).

طبق پژوهشی که (Khadivi *et al.*, 2025) انجام دادند، مشخص شد که بسامد رابطه مستقیمی با انرژی جنبشی آشفتگی دارد. به طوری که با افزایش بسامد انرژی جنبشی آشفتگی (بیشینه و میانگین)، افزایش پیدا می‌کند. در صورتی که با افزایش فاصله بین بافل‌ها، انرژی جنبشی آشفتگی (بیشینه و میانگین)، کاهش پیدا می‌کند.

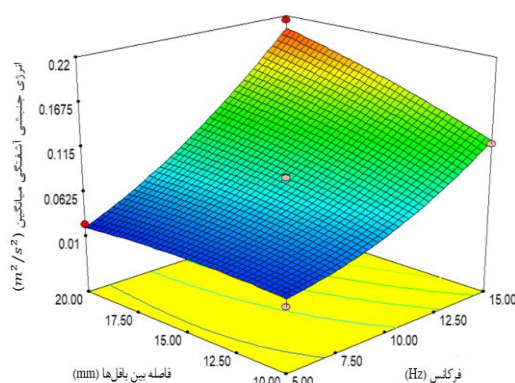
با افزایش مجدد بسامد از ۱۰ هرتز به ۱۵ هرتز، TKE ave از $0.08085 \text{ (m}^2/\text{s}^2)$ به $0.169212 \text{ (m}^2/\text{s}^2)$ افزایش پیدا می‌کند. در راکتورهای جریان نوسانی، بسامد نوسان می‌تواند به تغییر در ساختار ضربه‌ای و تولید انرژی جنبشی منجر شود.

بر اساس مطالعات انجام‌شده، افزایش بسامد نوسان معمولاً باعث افزایش شدت و آشفتگی جریان می‌شود. این موضوع به افزایش TKE میانگین منجر می‌شود. اثر بسامد بر میانگین انرژی جنبشی آشفتگی در یک راکتور جریان نوسانی تک روزه (OFR) قابل توجه است و بر بازدهی اختلاط و عملکرد واکنش تأثیر می‌گذارد. حرکت نوسانی دینامیک سیال را افزایش می‌دهد و منجر به بهبود انتقال جرم و گرما می‌شود که برای بهینه‌سازی عملیات راکتور حیاتی است. بسامدهای نوسان بالاتر، شدت اختلاط را افزایش می‌دهند، و باعث تشکیل حلقه‌های گردابی در حفره‌های بافل می‌شوند که اختلاط شعاعی و محوری را افزایش می‌دهد (Vicente, 2005). طراحی OFR ها را می‌توان با تنظیم بسامد برای دستیابی به سطوح TKE مورد نظر، افزایش سایر فرآیندهای شیمیایی بهینه کرد (Harvey *et al.*, 2001; Kouhifaiegh *et al.*, 2024). با توجه به شکل (۳-الف)، با افزایش فاصله بین بافل‌ها، TKE max روند کاهشی را دارد.

به طوری که وقتی فاصله بین بافل‌ها از ۱۰ میلی‌متر به ۱۵ میلی‌متر افزایش پیدا می‌کند، TKE max از $0.23144 \text{ (m}^2/\text{s}^2)$ به $0.234242 \text{ (m}^2/\text{s}^2)$ کاهش می‌یابد، و هنگامی که فاصله بین بافل‌ها از ۱۵ میلی‌متر به ۲۰ میلی‌متر افزایش پیدا می‌کند، TKE max از $0.23144 \text{ (m}^2/\text{s}^2)$ به $0.204209 \text{ (m}^2/\text{s}^2)$ کاهش پیدا می‌کند. حفره‌های



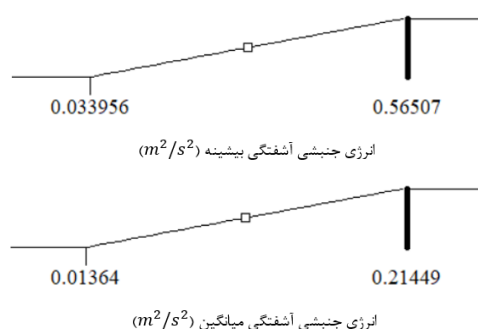
(الف)



(ب)

شکل ۳- اثر بسامد و فاصله بین بافل‌ها بر انرژی جنبشی آشفتگی (بیشینه و میانگین)، الف-ب سطح سه بعدی

بیشینه (m^2/s^2) ۰/۳۶۶۸۳، و انرژی جنبشی آشفتگی میانگین (m^2/s^2) ۰/۰۷۱۴۴۹ است. بعد از به‌دست آمدن نقطه بهینه این آزمایش توسط نرم افزار Design Expert و روش منحنی سطح پاسخ، شبیه‌سازی راکتور جریان نوسانی تک روزه تحت این شرایط بهینه با به روش CFD انجام شد.



شکل ۴- شرایط مرزی و نقطه بهینه در روش سطح پاسخ

شکل (۵) کانتور تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی را در درون این راکتور تحت شرایط بهینه نشان می‌دهد. شکل (۵) مربوط به تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی (Turbulent Kinetic Energy) در داخل راکتور جریان نوسانی تک روزه است. با بررسی نمودار می‌توان نتیجه گرفت که بیش‌ترین مقدار انرژی جنبشی آشفتگی برابر با (m^2/s^2) ۰/۳۶۶ است که در قسمت های انتهایی راکتور اتفاق می‌افتد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در روزه موجود در بافل‌ها بیش‌ترین انرژی جنبشی آشفتگی اتفاق می‌افتد. تجزیه و تحلیل و افزایش انرژی جنبشی آشفتگی برای ارزیابی کیفیت اختلاط، انتقال حرارت و جرم در سامانه‌های مختلف، از جمله راکتورهای پاستوریزه‌کردن، بسیار مهم است.

بهینه‌سازی فرآیند

در این پژوهش به‌منظور افزایش انرژی جنبشی آشفتگی (بیشینه و میانگین)، بهینه‌سازی در نرم‌افزار Design Expert و به‌روش منحنی سطح پاسخ (RSM) انجام گرفت. چهار متغیر مستقل این آزمایش که شامل d_0/D ، بسامد، فاصله بین بافل‌ها و قطر بافل‌ها است را می‌توان در محدوده مشخص شده و با توجه به شرایط مرزی تغییر داد.

جدول ۲- شرایط بهینه عامل‌های طراحی راکتور جریان نوسانی

متغیر	مقدار بهینه
نسبت قطر بافل به قطر راکتور	۰/۴
فاصله بین بافل‌ها (میلی‌متر)	۱۰
قطر بافل‌ها (میلی‌متر)	۳
بسامد (هرتز)	۱۵
انرژی جنبشی آشفتگی بیشینه (m^2/s^2)	۰/۳۶۶۸۳
انرژی جنبشی آشفتگی میانگین (m^2/s^2)	۰/۵۱۹۲۳۳

در واقع می‌توان این‌طور بیان کرد که هدف از این بهینه‌سازی دستیابی به شرایط عامل‌های ورودی است که منجر به افزایش انرژی جنبشی آشفتگی درون راکتور جریان نوسانی تک روزه است. این بهینه‌سازی نشان داد در شرایطی که d_0/D ، فاصله بین بافل‌ها و قطر بافل‌ها به ترتیب، ۰/۴، ۱۰، و ۳ میلی‌متر باشد و همچنین بسامد برابر با ۱۵ هرتز باشد، انرژی جنبشی آشفتگی بیشینه و میانگین آن به ترتیب برابر (m^2/s^2) ۰/۰۹۹۵۳ و ۰/۵۱۹۲۳۳ است.

نقطه پیشنهادی و شرایط بهینه در نهایت شبیه‌سازی شد و نشان داد که در این شرایط، انرژی جنبشی آشفتگی

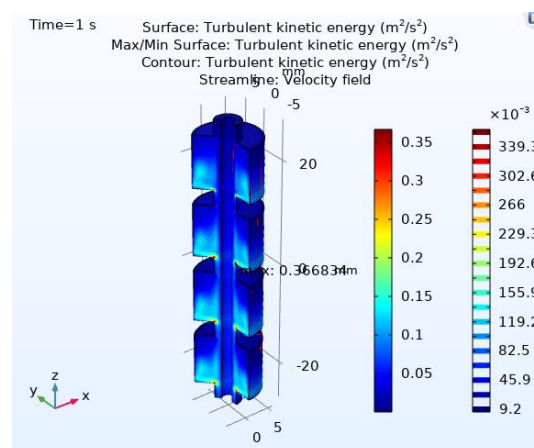
این رویکرد غیرحرارتی، با حفظ ترکیبات حساس به حرارت شیر (مانند ویتامین‌ها و آنزیم‌های بومی)، برتری واضحی نسبت به پاستوریزه کردن حرارتی سنتی دارد که اغلب باعث دناتوره شدن پروتئین‌ها و کاهش کیفیت حسی می‌شود. بنابراین، راکتور جریان نوسانی بهینه‌شده پیشنهادی، گزینه‌ای کارآمد و پایدار برای دستیابی به ایمنی میکروبی شیر در مقیاس صنعتی ارائه می‌دهد.

نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش طراحی و بهینه‌سازی یک راکتور جریان نوسانی تک روزه برای فراهم کردن شرایط مناسب در جهت ایجاد پدیده حفره‌زایی و افزایش انرژی جنبشی آشفتگی در طول فرآیند پاستوریزه کردن است. در این پژوهش به تحلیل عامل‌های هندسی راکتور جریان نوسانی تک روزه (نسبت قطر بافل به قطر راکتور (d_0/D) ، بسامد، قطر بافل‌ها و فاصله بین بافل‌ها) بر انرژی جنبشی آشفتگی (بیشینه و میانگین)، پرداخته شد.

نتایج بهینه‌سازی ابعاد راکتور نشان داد که در بین متغیرهای مستقل این آزمایش بسامد بیش‌ترین تأثیر را بر روی متغیرهای وابسته آزمایش دارد. به منظور به‌دست آوردن ابعاد بهینه راکتور و هم‌چنین محاسبه میزان انرژی جنبشی آشفتگی که در درون راکتور جریان نوسانی تک روزه اتفاق می‌افتد، شبیه‌سازی راکتور مورد نظر به روش (CFD) انجام شد. بر طبق این شبیه‌سازی و هم‌چنین بهینه‌سازی انجام شده، همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، بسامد بیش‌ترین تأثیر را داشته است. و هم‌چنین مشخص شد که قطر بافل‌ها، نسبت قطر بافل به قطر راکتور و فاصله بین بافل‌ها تأثیر مطلوبی بر روی TKE نداشته است. پس از انجام بهینه‌سازی، نسبت قطر بافل به قطر راکتور $0/4$ ، قطر بافل‌ها 3 میلی‌متر، فاصله بین بافل‌ها 10 میلی‌متر و بسامد 15 هرتز به‌دست آمد.

انرژی جنبشی آشفتگی بیشینه و میانگین آن به ترتیب برابر (m^2/s^2) $0/09953$ و $0/519233$ است. نقطه پیشنهادی و شرایط بهینه در نهایت شبیه‌سازی شد و نشان داد که در این شرایط، انرژی جنبشی آشفتگی بیشینه (m^2/s^2) $0/36683$ و انرژی جنبشی آشفتگی میانگین (m^2/s^2) $0/071449$ است. در نهایت، راکتور جریان نوسانی تک‌روزه بهینه‌شده با افزایش انرژی جنبشی آشفتگی از طریق حفره‌زایی هیدرودینامیکی، سازوکار مؤثری برای نابودی ریزاندامگان‌ها مانند *E. coli* در پاستوریزه کردن غیرحرارتی



شکل ۵- کانتور انرژی جنبشی آشفتگی (TKE)، تحت شرایط بهینه

تأثیر انرژی جنبشی آشفتگی بر سازوکار نابودی میکروبی در پاستوریزه کردن غیرحرارتی شیر

نتایج بهینه‌سازی و شبیه‌سازی CFD نشان می‌دهد که افزایش انرژی جنبشی آشفتگی (TKE) در راکتور جریان نوسانی تک‌روزه، از طریق تقویت پدیده حفره‌زایی هیدرودینامیکی و جریان آشفته شدید، سازوکار اصلی نابودی ریزاندامگان‌ها در فرآیند پاستوریزه کردن غیرحرارتی شیر است. در شرایط بهینه (نسبت قطر بافل به قطر راکتور $0/4$ ، بسامد 15 هرتز، فاصله بین بافل‌ها 10 میلی‌متر و قطر بافل‌ها 3 میلی‌متر)، TKE بیشینه به (m^2/s^2) $0/36683$ و میانگین به (m^2/s^2) $0/071449$ می‌رسد که این سطوح بالا، تشکیل و فروپاشی سریع حباب‌های حفره‌زایی را در نواحی روزه بافل‌ها تسهیل می‌کند.

فروپاشی حباب‌های حفره‌زایی منجر به تولید شوک‌های فشاری موضعی (تا چندین مگاپاسکال)، جت‌های مایع با سرعت بالا (بیش از 100 m/s) و تنش‌های برشی شدید می‌شود که مستقیماً بر دیواره سلولی باکتری‌هایی مانند *Escherichia coli* تأثیر گذاشته است. علاوه بر اثرات مکانیکی، حفره‌زایی گونه‌های فعال اکسیژن مانند رادیکال‌های هیدروکسیل ($OH^\bullet$) و تنش‌های حرارتی موضعی کوتاه‌مدت تولید می‌کند که به اکسید شدن غشای سلولی و آسیب DNA منجر می‌شود. آزمایش‌های میکروبی انجام‌شده در این پژوهش تأیید کرد که سطوح بالاتر TKE با کاهش لگاریتمی قابل توجه جمعیت *E. coli* همبستگی مستقیم دارد، بدون اینکه تغییرات معناداری در خواص کیفی شیر (مانند محتوای پروتئین، چربی، لاکتوز و pH) ایجاد شود (Taki et al., 2025).

حمایت مالی

نویسندگان هیچ حمایت مالی خاصی برای انجام این پژوهش دریافت نکرده‌اند.

منابع

- Ahmad, T., Aadil, R. M., Ahmed, H., ur Rahman, U., Soares, B. C., Souza, S. L., Pimentel, T. C., Scudino, H., Guimarães, J. T., & Esmerino, E. A. (2019). Treatment and utilization of dairy industrial waste: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 88, 361-372.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.04.003>
- Ahmed, S. M., Phan, A. N., & Harvey, A. P. (2017). Scale-up of oscillatory helical baffled reactors based on residence time distribution. *Chemical Engineering & Technology*, 40(5), 907-914.
<https://doi.org/10.1002/ceat.201600480>
- Azizi-Lalabadi, M., Moghaddam, N. R., & Jafari, S. M. (2023). Pasteurization in the food industry. In *Thermal processing of food products by steam and hot water* (pp. 247-273). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818616-9.00009-2>
- Bhatti, M. M., Marin, M., Zeeshan, A., & Abdelsalam, S. I. (2020). Recent trends in computational fluid dynamics. *Frontiers in Physics*, 8, 593111.
<https://doi.org/10.3389/fphy.2020.593111>
- de Souza, A. B., Xavier, A. A. O., Stephani, R., & Tavares, G. M. (2023). Sedimentation in UHT high-protein dairy beverages: Influence of sequential preheating coupled with homogenisation or supplementation with carbohydrates. *International Dairy Journal*, 137, 105505.
<https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2022.105505>
- Goger, B., Rotach, M. W., Gohm, A., Fuhrer, O., Stiperski, I., & Holtslag, A. A. (2018). The impact of three-dimensional effects on the simulation of turbulence kinetic energy in a major alpine valley. *Boundary-Layer Meteorology*, 168(1), 1-27.
<https://doi.org/10.1007/s10546-018-0341-y>
- Guétouache, M., Guessas, B., & Medjekal, S. (2014). Composition and nutritional value of raw milk. *J Issues Biol Sci Pharm Res*, 2350, 1588.
<http://dx.doi.org/10.15739/ibspr.005>
- Gulsacan, B., Tokgoz, N., Karakas, E. S., Aureli, M., & Evrensel, C. A. (2024). Effect of orifice thickness-to-diameter ratio on turbulent orifice flow: An experimental and numerical investigation. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 151, 107213.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2201834>
- Harvey, A., Mackley, M., & Stonestreet, P. (2001). Operation and optimization of an oscillatory flow continuous reactor. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 40(23), 5371-5377.
<https://doi.org/10.1021/ie0011223>
- He, N., & Zhao, Z.-x. (2010). Theoretical and numerical study of hydraulic characteristics of orifice energy dissipator. *Water Science and Engineering*, 3(2), 190-199.

شیر فراهم می‌کند و با حفظ خواص تغذیه‌ای و کیفی شیر، جایگزینی پایدار و کارآمد برای روش‌های حرارتی سنتی ارائه می‌دهد. این فناوری قابلیت بالایی برای کاربرد صنعتی در تولید شیر ایمن و باکیفیت دارد. بنابراین طراحی بهینه راکتور جریان نوسانی را می‌توان برای استفاده در صنایع غذایی برای پاستوریزه کردن غیر حرارتی شیر و سایر مواد غذایی مایع با حفظ کیفیت تغذیه‌ای به کار برد.

مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است:

- نویسنده اول: انجام تحقیقات، روش‌شناسی، نرم‌افزار، نگارش - پیش‌نویس اولیه، تجسم‌سازی داده‌ها
- نویسنده دوم: روش‌شناسی، نرم‌افزار، نگارش - بازبینی و ویرایش.
- نویسنده سوم (مسئول): مفهوم‌سازی، تأمین منابع، نگارش - بازبینی و ویرایش، نظارت، مدیریت پروژه.

دسترسی به داده‌ها

قابل انطباق نیست.

اصول اخلاقی

تأیید اخلاقی برای این مطالعه ضروری نبود، زیرا پژوهش شامل شبیه‌سازی‌های محاسباتی و آزمایش‌های میکروبیولوژی استاندارد بر روی نمونه‌های شیر بدون استفاده از انسان یا حیوان به‌عنوان سوژه بود. نویسندگان تأیید می‌کنند که به استانداردهای اخلاقی پایبند بوده‌اند، از جمله اجتناب از ساخت داده، تحریف، سرقت ادبی و هرگونه سوءرفتار علمی. هیچ ابزار هوش مصنوعی مولد (مانند Gemini، Claude، ChatGPT و غیره) در فرآیند تولید این مقاله (از جمله نگارش متن، تحلیل داده‌ها، تولید تصویر یا کد یا هر بخش دیگری از محتوا) استفاده نشده است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ گونه منافع مالی رقابتی یا روابط شخصی شناخته‌شده‌ای که ممکن است بر کار گزارش شده در این مقاله تأثیر گذاشته باشد، ندارند.

- reactor: A CFD study. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 101(5), 2878-2895.
<https://doi.org/10.1002/cjce.24672>
- Motahayerzadeh, M., Arab Hosseini, A., Samimi Akhijahani, H., & Khoshachi, M. (2018). (2018). Application of Computational Fluid Dynamics (CFD) in the optimal design of solar dryer absorber plate. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 49(2), 285-294. , 49(2), 285-294.
<https://doi.org/https://doi.org/10.22059/ijbse.2017.240246.664981>
- Murotani, R., Horie, T., Fujioka, S., Komoda, Y., Ohmura, N., Masuda, H., Okita, E., & Yasuda, M. (2024). CFD analysis of laminar mixing mechanism and performance in an oscillatory baffled reactor. *Chemical Engineering & Technology*, 47(8), 1114-1123.
<https://doi.org/10.1002/ceat.202300582>
- Rabbani, A., Ayyash, M., D'Costa, C. D., Chen, G., Xu, Y., & Kamal-Eldin, A. (2025). Effect of Heat Pasteurization and Sterilization on Milk Safety, Composition, Sensory Properties, and Nutritional Quality. *Foods*, 14(8), 1342.
<https://doi.org/10.3390/foods14081342>
- Slavnić, D., Bugarški, B., & Nikačević, N. (2014). Oscillatory flow chemical reactors. *Hemijaska industrija*, 68(3), 363-379.
<http://dx.doi.org/10.2298/HEMIND130419062S>
- Taki, K., Hosseinzadeh Samani, B., & Anasari Ardali, A. (2024). Unleashing the Power of Plasma and Flow: A Novel Cold Plasma-Oscillatory System for Enhanced Continuous Biodiesel Production from Sunflower Oil. *Energy Technology*, 12(3), 2301164.
<https://doi.org/10.1002/ente.202301164>
- Taki, K., Samani, B. H., Izadi, Z., Rostmai, S., & Nazai, F. (2025). Non-thermal inactivation of *Escherichia coli* in milk using a Venturi tube reactor and liquid-phase plasma: A parametric optimization study. *International Dairy Journal*, 167, 106269.
<https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2025.106269>
- Talha Ahmad, T. A., Aadil, R., Haassan Ahmed, H. A., Rahman, U., Soares, B., Souza, S., Pimentel, T., Scudino, H., Guimarães, J., & Esmerino, E. (2019). Treatment and utilization of dairy industrial waste: a review.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.04.003>
- Tang, J., Zhu, X., Jambrak, A. R., Sun, D.-W., & Tiwari, B. K. (2024). Mechanistic and synergistic aspects of ultrasonics and hydrodynamic cavitation for food processing. *Critical reviews in food science and nutrition*, 64(24), 8587-8608.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2201834>
- Vicente, A. (2005). Oscillatory reactors for biotechnological applications.
https://www.researchgate.net/publication/242220747_Oscillatory_reactors_for_biotechnological_applications
- Zheng, M., & Mackley, M. (2008). The axial dispersion performance of an oscillatory flow meso-reactor with relevance to continuous flow operation. *Chemical Engineering Science*, 63(7), 1788-1799.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.12.020>
- <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2010.02.007>
- Heryana, Y. H., Wulandani, D., & Supriyanto, S. (2022). Orifice Analysis in Biodiesel Reactor with Hydrodynamic Cavitation System using Computational Fluid Dynamics. *Jurnal Keteknikaan Pertanian*, 10(1), 85-94.
<https://journal.ipb.ac.id/index.php/jtep/article/view/38998>
- Khadivi, F., Hosseinzadeh Samani, B., Rostami, S., Asghari, M., & Ghatreh Samani, S. (2026). Design, construction, and evaluation of an oscillatory-liquid-phase plasma reactor for biodiesel production from sunflower oil. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 20(1), 165-176.
<https://doi.org/10.1002/bbb.70066>
- Khadivi, F., Samani, B. H., Rostami, S., Taki, K., Asghari, M., & Ghatreh Samani, S. (2025). Optimization and CFD-RSM analysis of single orifice reactor for enhanced biodiesel production. *PloS one*, 20(7), e0326747.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0326747>
- Kouhifaiegh, M., Hosseinzadeh Samani, B., Ebrahimi, R., & Taki, K. (2024). Design and construction of a single orifice oscillatory flow reactor for the continuous production of biodiesel from sunflower oil. *Biofuels*, 15(8), 1041-1050.
<https://doi.org/10.1080/17597269.2024.2330187>
- Kumar, J., & Bansal, A. (2013). Photocatalytic degradation in annular reactor: modelization and optimization using computational fluid dynamics (CFD) and response surface methodology (RSM). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(3), 398-405.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.06.002>
- Li, N., Liu, Y., Li, L., Chang, S., Han, S., Zhao, H., & Meng, H. (2020). Numerical simulation of wind turbine wake based on extended k-epsilon turbulence model coupling with actuator disc considering nacelle and tower. *IET Renewable Power Generation*, 14(18), 3834-3842.
<https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2020.0416>
- Mazubert, A. (2014). *Selection, development and design of a continuous and intensified reactor technology to transform waste cooking oil in biodiesel and biosourced formulations* Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT].
<https://dx.doi.org/10.70675/13ae8615zb042z4f51za3ddz7e2d3e17f8fe>
- Mazubert, A., Fletcher, D., Poux, M., & Aubin, J. (2016). Hydrodynamics and mixing in continuous oscillatory flow reactors—Part I: Effect of baffle geometry. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 108, 78-92.
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2016.07.015>
- McDonough, J., Murta, S., Law, R., & Harvey, A. (2019). Oscillatory fluid motion unlocks plug flow operation in helical tube reactors at lower Reynolds numbers ($Re \leq 10$). *Chemical engineering journal*, 358, 643-657.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.054>
- Mortazavi, H., & Pakzad, L. (2023). Power consumption in a moving baffle oscillatory baffled

