

Numerical analysis of the Effects of Baffle Height and Angle on Heat Transfer in a Shell and Tube Heat Exchanger using Nanofluids



ARTICLE INFO

Authors

Kafi Javazm M.¹,
Hatami M.^{2*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

² Department of Mechanical Engineering, Esfarayen University of Technology, Esfarayen, Iran.

* Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Esfarayen University of Technology, Esfarayen, Iran.
m.hatami2010@gmail.com

How to cite this article

Kafi Javazm M, Hatami M. Numerical analysis of the effects of baffle height and angle on heat transfer in a shell and tube heat exchanger using nanofluids. Proceedings of the 6th National Conference on Mechanical-Civil Engineering and Advanced Technologies. 2024; 24(11):47-54.

ABSTRACT

In this study, a shell and tube heat exchanger was numerically analyzed using Ansys-Fluent 15.0, a computational fluid dynamics software. Due to their high efficiency, Shell and tube heat exchangers play a significant role in industrial processes. This investigation is concentrated on the effect of two important geometrical entities, baffle height and angle, on heat transfer and fluid flow properties. Precise geometrical modeling of the device and conducting grid-independent and convergent simulations have been of primary steps of this study. The results of these simulations have been compared and evaluated using authentic papers, which showed great compatibility of these results with those of theories. It has been shown that a baffle angle of 30 degrees and a baffle with a cut height of 25% is the most efficient setup. This setup yields better heat transfer and less pressure drop finally resulting in improved thermal efficiency and moderated energy consumption of shell and tube heat exchanger systems. Overall, the results of this investigation show that by employing numerical simulation, more efficient designs are possible for heat exchangers, which will be accompanied by reduced operational costs and improved efficiency in industrial systems.

Keywords Shell and Tube Heat Exchanger, Nanofluid, Baffle Angle, Baffle Height, Heat Transfer Improvement

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه‌نامه مجموعه مقالات ششمین کنفرانس ملی مهندسی مکانیک، عمران و فناوری‌های پیشرفته



تحلیل عددی اثرات ارتفاع و زاویه بافل بر انتقال حرارت در مبدل حرارتی پوسته و لوله با استفاده از نانوسیال



چکیده

در این پژوهش، به بررسی عددی مبدل حرارتی پوسته و لوله با استفاده از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی Ansys-Fluent 15.0 پرداخته شده است. مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله به دلیل کارایی بالا در انتقال حرارت، نقش مهمی در فرایندهای صنعتی دارند. این تحقیق با تمرکز بر دو پارامتر هندسی مهم، یعنی ارتفاع و زاویه بافل‌ها، به تحلیل خصوصیت‌های انتقال حرارت و جریان سیال می‌پردازد. مدل‌سازی دقیق هندسی مبدل و انجام شبیه‌سازی‌های مستقل از شبکه و همگرا، از مراحل اصلی این پژوهش بوده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها با مقاله معتبر مقایسه و اعتبارسنجی شده و نشان‌دهنده تطابق خوب با داده‌های نظری است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که زاویه بافل ۳۰ درجه و بافل با برش بافل ۲۵ درصد، بهینه‌ترین تنظیمات هندسی هستند. این تنظیمات منجر به بهبود انتقال حرارت و کاهش افت فشار می‌شوند که در نهایت به افزایش کارایی حرارتی و کاهش مصرف انرژی سیستم‌های مبدل حرارتی پوسته و لوله می‌انجامد. به‌طورکلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی می‌توان به طراحی بهینه‌تر برای مبدل‌های حرارتی دست‌یافت که این امر کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش بازدهی سیستم‌های صنعتی را به دنبال خواهد داشت.

مشخصات مقاله

نویسنده‌ها

میلاذ کافی جوزم^۱
محمد حاتمی^{۲*}

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین، اسفراین، ایران

* نویسنده مسئول

آدرس: دانشکده مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین، اسفراین، ایران
m.hatami2010@gmail.com

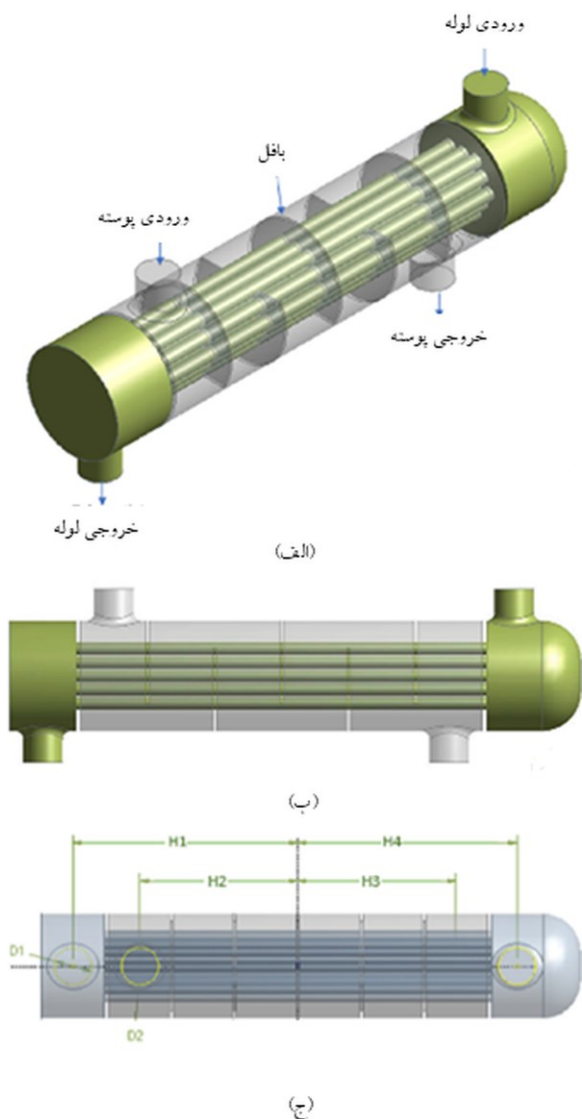
کلیدواژه‌ها مبدل حرارتی پوسته و لوله، نانوسیال، زاویه بافل، ارتفاع بافل، بهبود انتقال حرارت

۱- مقدمه

در عصر حاضر، افزایش ضریب عملکرد مبدل‌های حرارتی به‌ویژه در صنایع گوناگون از اهمیت بسیاری برخوردار است و پژوهشگران به روش‌های مختلف درصد تحقق این هدف برآمده‌اند. باتوجه به اهمیت موضوع، هدف این پژوهش ارتقا راندمان مبدل حرارتی از طریق بررسی ارتفاع و زاویه بافل‌ها است. در این پژوهش، نرخ انتقال حرارت و میزان افت فشار در دو سمت پوسته و لوله مورد بررسی قرار گرفته است. تلاش بر این بوده است تا حالت بهینه‌ای برای مبدل حرارتی که بیشترین میزان انتقال حرارت را همراه با افت فشار مطلوب داشته باشد، شناسایی شود. تاکنون پژوهش‌های فراوانی برای بهبود راندمان مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله انجام شده است. این تحقیق‌ها عمدتاً بر روی هندسه بافل‌ها، هندسه و آرایش لوله‌ها و بررسی تأثیرهای نانوسیال‌ها متمرکز بوده‌اند. در تحقیقی که توسط خلیل بایرام و همکاران^(۱) انجام شده است، اثر فاصله متغیر بافل‌ها بر عملکرد حرارتی مبدل حرارتی پوسته و لوله بررسی شده است. آن‌ها پنج مدل با فاصله مختلف بافل‌ها را مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که فاصله بافل‌ها تأثیر زیادی بر توزیع دما و نرخ انتقال حرارت دارد. مدل با فاصله بافل‌های برابر کمترین افت فشار و بالاترین عملکرد حرارتی را نشان داد. سواناند گایکواد و همکاران^(۲) در شبیه‌سازی عددی، اثر برش و فاصله بافل‌ها، بهینه‌سازی توازن بین افت فشار و ضریب انتقال حرارت را بررسی کردند. نتایج نشان داد که کاهش فاصله بافل‌ها ضریب انتقال حرارت را افزایش می‌دهد، در حالی که افزایش برش بافل افت فشار را کاهش می‌دهد. بهترین عملکرد حرارتی با تعداد کمتر بافل و برش مناسب حاصل شد. راوی گوگولوتو و همکاران^(۳) به بررسی تجربی بافل‌های مارپیچ با زوایای مختلف پرداختند. نتایج نشان داد که بافل‌های مارپیچ با زاویه ۴۰ درجه بهترین عملکرد حرارتی را دارند و افت فشار در سمت پوسته کاهش می‌یابد. نهاد بیچر و همکاران^(۴) به طراحی بافل سه‌منطقه‌ای جدید پرداخته و اثرات آن را بر مبدل‌های حرارتی بررسی کردند. نتایج نشان داد که بافل سه منطقه‌ای باعث کاهش افت فشار و افزایش ظرفیت حرارتی مبدل می‌شود و دوره‌های عملیاتی بلندمدت را تضمین می‌کند. علی‌اکبر عباسیان آرانی و همکاران^(۵) به بهبود عملکرد مبدل حرارتی با آرایش جدید بافل و لوله بیضوی ترکیبی پرداختند. نتایج نشان داد که دسته‌های لوله بیضوی زاویه‌دار بهترین عملکرد حرارتی را دارند و ضریب ارزیابی کارایی (EEC) بهبود یافته است. عماد ام. اس. السعید و همکاران^(۶) اثر بافل‌های سگ‌منتهال منحنی بر عملکرد حرارتی مبدل حرارتی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که بافل منحنی باعث افزایش بهره‌وری و کاهش افت فشار می‌شود و می‌تواند به‌عنوان روشی نویدبخش برای توسعه طراحی موردتوجه قرار گیرد. گوویندراج کومارسان و همکاران^(۷) به تحلیل عددی برش بافل و

تأثیر آن بر عملکرد مبدل حرارتی با بافل‌های شیب‌دار پرداختند. نتایج نشان داد که بافل‌های با زاویه شیب ۳۵ درجه و برش ۳۰٪ بهترین عملکرد حرارتی را با حداقل افت فشار دارند. محمد هادی محمدی و همکاران^(۸) به بررسی بهینه‌سازی حرارتی مبدل حرارتی با استفاده از بافل متخلخل پرداختند. نتایج نشان داد که بافل‌های متخلخل با تخلخل کمتر و برش کوچک‌تر باعث افزایش انتقال حرارت و افت فشار می‌شوند. دان وانگ و همکاران^(۹) به بررسی ویژگی‌های حرارتی-هیدرولیکی مبدل حرارتی با صفحه سوراخ‌دار چهارفویلی پرداختند. نتایج نشان داد که این صفحه‌ها می‌توانند بهبود قابل‌توجهی در کارایی و اثرگذاری مبدل‌های حرارتی ایجاد کنند و شرایط خوردگی و رسوب را بهبود بخشند. چولین یو و همکاران^(۱۰) به مطالعه عددی عملکرد انتقال حرارت آشفته مبدل حرارتی با استفاده از مولد گرداب طولی پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از این مولدها می‌تواند کارایی مبدل حرارتی را بهبود دهد و هزینه‌های تولید را کاهش دهد. فتوگا و همکاران^(۱۱) به مطالعه عملکرد حرارتی مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله در جریان مخالف با پیکربندی‌های مختلف لوله پرداختند. در این تحقیق، پیکربندی‌های مثلثی (۳۰ درجه، STHX-T)، مثلثی چرخیده (۶۰ درجه، STHX-RT) و ترکیبی (STHX-C) بررسی شدند. نتایج نشان دادند که پیکربندی STHX-T بیشترین مقدار ضریب انتقال حرارت (U) را داراست و به ترتیب ۲۸٪ و ۲۱٪ افزایش U نسبت به STHX-RT برای پیکربندی‌های STHX-T و STHX-C مشاهده شد. در مطالعات دیگر، محسن امینی و همکاران^(۱۲) اثرات استفاده از پره‌های لوله‌ای بخش‌بندی شده و مارپیچ بر عملکرد حرارتی و راندمان مبدل‌های حرارتی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که پره‌های مارپیچی نسبت به پره‌های عمودی بخش‌بندی شده عملکرد بهتری دارند و عدد ناسلت ۳۵٪ بیشتر است. استفاده از پره‌های مارپیچی با گام کوچک و ارتفاع بزرگ، کارایی مبدل حرارتی را تقریباً ۱۰٪ افزایش می‌دهد. محمدرضا صفاریان و همکاران^(۱۳) به مطالعه ضریب کلی انتقال حرارت و افت فشار در سمت پوسته و لوله مبدل‌های حرارتی با لوله‌های بیضوی پرداختند. نتایج نشان داد که بالاترین ضریب کلی انتقال حرارت به ترتیب برای چیدمان‌های STHX-CT&ET90° و STHX-ET90° به دست آمد و این چیدمان‌ها نسبت به لوله‌های دایره‌ای انتقال حرارت بیشتری دارند. ولی‌الله غضنفری و همکاران^(۱۴) تأثیر لوله‌های پیچ‌خورده و نانوسیال‌ها را بر نرخ انتقال حرارت بررسی کردند. نتایج نشان داد که طول پیچ‌های کوتاه‌تر بهبود انتقال حرارت را فراهم می‌کند و استفاده از نانوذرات مس بالاترین راندمان حرارتی را ایجاد می‌کند، اما افت فشار بیشتری نسبت به دیگر نانوذرات دارد. ابراهیم ای. فتوگا و همکاران^(۱۵) تأثیرات استفاده از لوله‌های فرورفته بر ویژگی‌های انتقال حرارت و جریان سیال در مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله را تحلیل کردند. نتایج نشان داد که لوله‌های فرورفته نسبت به لوله‌های صاف دارای ضریب انتقال حرارت کلی بالاتری

مبدل حرارتی در نرم افزار دیزاین مدلر طراحی شد. این مبدل حرارتی دارای آرایش هندسی ۱۹ عدد لوله و ۵ عدد بافل می‌باشد^(۱۱). هندسه اولیه مورد بررسی، هندسه بافل متداول در اکثر تحقیقاتی صورت گرفته روی مبدل‌های پوسته و لوله است. که این هندسه مبدل حرارتی در شکل ۱ مشاهده می‌شود. سایر اطلاعات مربوط به هندسه مورد بررسی به تفصیل در جدول شماره ۱ بیان شده است. هندسه‌های شبیه سازی شده مورد بررسی این تحقیق نیز در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱) هندسه اولیه مبدل حرارتی^(۱۱)

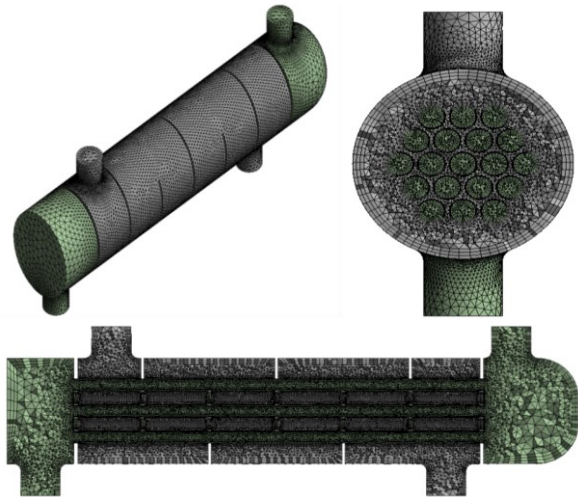
هستند و بهبود حدود ۱۴/۲٪ در ضریب انتقال حرارت کلی مشاهده شد. علی‌حیدری و همکاران^(۱۶) به بررسی نانوسیالات مختلف شامل Au و SiO_2 , Fe , Cu , Fe_2O_3 , CuO , Al_2O_3 با دبی جرمی یکسان در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات به سیال پایه منجر به کاهش ضریب انتقال حرارت و افت فشار می‌شود، اما دمای خروجی پوسته افزایش می‌یابد. همچنین، نانوسیال‌ها پایه اتیلن گلیکول اثربخشی بیشتری نسبت به نانوسیال‌های پایه آب دارند و نانوذرات سیلیکا و طلا به ترتیب بالاترین و پایین‌ترین اثربخشی را داشتند. ایسان شهسوار گلدانلو و همکاران^(۱۷) تأثیر نانوسیالات هیبریدی Fe_3O_4/CNT آب را در مبدل حرارتی با آشفته‌گی‌های تیغه‌ای مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که ضریب عملکرد انرژی (PEC) با افزایش عدد رینولدز و غلظت نانوذرات بهبود می‌یابد و بهترین عملکرد در شرایط مشخصی به دست می‌آید. لحن بلاحسن و همکاران^(۱۸) به مطالعه نانوسیال‌های آلومینا با غلظت‌های مختلف پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش سرعت ورودی و حجمی نانوذرات، انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد. همچنین، حضور مانع‌ها در داخل مبدل‌های حرارتی منجر به بهبود مخلوط شدن سیالات و افزایش کارایی انتقال حرارتی می‌شود. مهدی بهیرایی و همکاران^(۱۹) تأثیر پنج شکل نانوذرات (OS و BL, CY, BR, PL) را بر ویژگی‌های حرارتی و کارایی مبدل حرارتی پوسته و لوله مجهز به بافل‌های ماریچی نردبانی بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که نانوذرات PL بالاترین نرخ انتقال حرارت و افت فشار را دارند، در حالی که نانوذرات OS بالاترین کارایی و شاخص عملکرد را ایجاد می‌کنند.

استفاده از نانوسیال‌ها به‌وضوح تأثیرات مثبتی در افزایش انتقال حرارت مبدل‌های حرارتی دارد. افزون بر این، بررسی ارتفاع و زاویه‌های مختلف بافل‌ها می‌تواند به دستیابی به حد بهینه‌ای از افت فشار و انتقال حرارت منجر شود. پژوهش‌های انجام‌شده معمولاً بر روی یک پارامتر هندسی بافل متمرکز بوده‌اند و این امر نیاز به بررسی همزمان چندین پارامتر هندسی بافل و انتخاب مناسب‌ترین حالت را برجسته می‌سازد. باتوجه به این مسئله، در این پژوهش ابتدا به بررسی مناسب‌ترین ارتفاع بافل پرداخته شده و سپس با همان ارتفاع، زاویه‌های مختلف بافل نیز مورد آزمایش قرار گرفته است.

۲- مدل‌سازی

۲-۱- هندسه

در این تحقیق انتقال حرارت یک مبدل حرارتی پوسته و لوله توسط نانوسیال با هندسه‌های مختلف نظیر تغییرات در ارتفاع بافل‌ها و زاویه بافل بررسی شده است. در محاسبات تمرکز بر روی ویژگی‌های هندسی بافل بوده، که سه بافل کات ۲۵ درصد، ۳۵ درصد و ۱۵ درصد و سه زاویه بافل ۰ درجه، ۱۵ درجه و ۳۰ درجه



شکل ۳) شبکه‌بندی دامنه محاسباتی

۲-۳- معادلات حاکم بر جریان سیال

این زیر بخش به معادلات حاکم که برای این مطالعه استفاده شده‌اند می‌پردازد. برای حل مسئله از معادلات سه‌بعدی ناویر - استوکس (۲،۳،۴)، معادله انرژی (۵،۶) و معادله پیوستگی (۱) و مدل جریان آشفته (k-ε RNG) استفاده شده است که این معادلات به شرح زیر است:

$$\nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho u V) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho v V) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) + \rho g \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\rho w V) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\rho e V) = -p \nabla \cdot V + \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q} + \phi \quad (5)$$

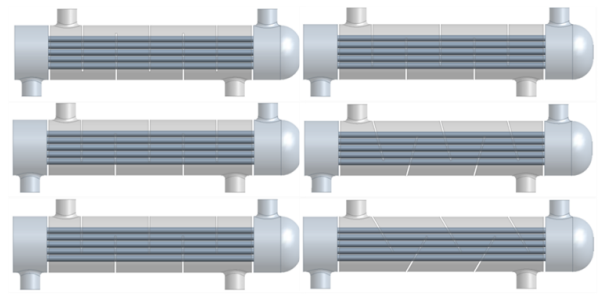
$$\phi = \mu \left[2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \right. \quad (6)$$

$$\left. \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \lambda (\nabla \cdot V)^2 \right]$$

در رابطه ۱ تا ۶ ρ چگالی، p فشار، τ تنش برشی، k ضریب رسانش گرمایی، μ لزجت دینامیکی، \dot{q} شار حرارتی و ϕ اتلاف حرارتی است. u ، v و w به ترتیب نشان دهند سرعت در سه جهت x ، y و z می‌باشد.

۲-۴- فرض‌ها و شرایط مرزی

در این پژوهش جریان سه‌بعدی، پایا، تراکم‌ناپذیر و آشفته همراه با انتقال گرما از فرضیه‌های مورد بررسی هستند. فاز جریان، یک‌فاز مایع است. تابش حرارتی و نیروی مغناطیسی نادیده گرفته شده، خواص ترمودینامیکی سیالات و جامدات ثابت و در مقاله مرجع (11) که اعتبارسنجی با آن انجام شده است از سیال آب درون پوسته و لوله استفاده شده است و جنس دیواره‌ها فولاد بوده است که خواص آب و فولاد ثابت فرض شده‌است. که به تفصیل در بخش‌های بعدی به آنها پرداخته شده، تمامی دیواره‌ها به جز دیواره



شکل ۲) مبدل‌های حرارتی با ارتفاع‌ها و زاویه‌های مختلف بافل

جدول ۱) مشخصات هندسی مبدل حرارتی (11)

عنوان	اندازه	عنوان	اندازه
طول مبدل حرارتی	۷۲۵ میلی‌متر	قطر پوسته	۱۴۰ میلی‌متر
طول پوسته	۵۱۰ میلی‌متر	قطر لوله	۱۶ میلی‌متر
طول لوله	۵۲۰ میلی‌متر	آرایش لوله‌ها	مثلثی
تعداد لوله‌ها	۱۹	تعداد بافل	۵
درصد برش بافل	۳۵٪، ۲۵٪، ۱۵٪	فاصله بین بافل‌ها	۸۵ میلی‌متر
ضخامت بافل	۴ میلی‌متر	زاویه بافل‌ها	۳۰، ۱۵، ۰
D1	۵۰ میلی‌متر	D2	۵۰ میلی‌متر
H1	۳۰۲/۵ میلی‌متر	H2	۲۱۲/۵ میلی‌متر
H3	۲۱۲/۵ میلی‌متر	H4	۲۹۵ میلی‌متر

۲-۲- شبکه‌بندی

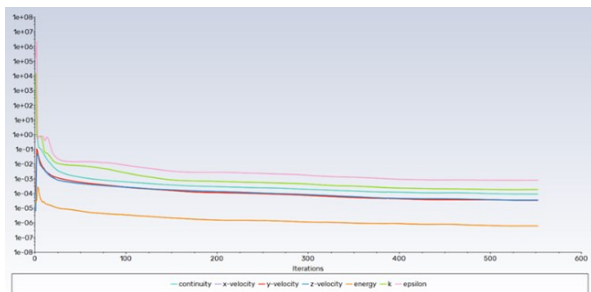
در حل عددی معادلات با مشتقات جزئی، ایجاد شبکه‌بندی مناسب اهمیت ویژه‌ای دارد. یک شبکه‌بندی مناسب می‌تواند حل معادلات را ساده‌تر کند، درحالی‌که یک شبکه‌بندی نامناسب می‌تواند منجر به کاهش کیفیت و عدم همگرایی در محاسبات شود. برای مدل‌سازی دقیق لایه‌های مرزی و تغییر شدید گرادیان‌ها نزدیک دیواره، باید چگالی مش در این نواحی افزایش یابد. درعین‌حال، تعداد المان‌های شبکه نباید بیش از حد زیاد یا کم باشد تا بهینه‌سازی انجام شود. تعداد المان‌های زیاد زمان محاسبات را افزایش می‌دهد و تعداد کم دقت را کاهش می‌دهد. در این پژوهش، از نرم‌افزار آنسیس مشینگ برای ایجاد شبکه‌بندی استفاده شده است. به دلیل پیچیدگی هندسه، از شبکه بدون سازمان چهاروجهی با سایز المان ۱۲ میلی‌متر و بیشینه سایز ۲۴ میلی‌متر استفاده شده است. نواحی نزدیک دیواره‌ها که گرادیان شدید سرعت و فشار دارند، با شبکه‌بندی لایه‌مرزی و المان‌های ریزتر مدل‌سازی شده‌اند. در نواحی حساس، المان‌ها ریزتر و در نواحی کمتر حساس، المان‌ها بزرگ‌تر در نظر گرفته شده‌اند. در نهایت، تعداد المان‌ها به ۳،۵۲۳،۲۵۰ رسیده و نتایج با مقاله مرجع صحت‌سنجی شده است. این شبکه‌بندی در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳) خواص نانوسیال و نانوذره (20)

خواص	نانوذره (آلومینیوم اکسید)	سیال پایه (آب)	نانوسیال
رسانایی گرمایی (W/mK)	۴۰	۰/۶	۰/۶۴۷۷
ظرفیت گرمایی (J/kgK)	۷۶۵	۴۱۸۲	۳۹۲۵/۴۷
لزجت دینامیکی (kg/ms)	-	۰/۰۰۱۰۰۳	۰/۰۰۱۰۵۴۹۶
چگالی (kg/m ³)	۳۹۷۰	۹۹۸	۱۰۵۷/۶۳۶

۲-۶- روش محاسباتی

در این بررسی، برای حل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) از روش حجم محدود در نرم افزار Ansys-Fluent 15.0 استفاده شده است. از روش حلگر سیمپل (SIMPLE) برای جفت سازی سرعت و فشار و حل دستگاه معادله های مومنوم و پیوستگی استفاده شده است. حلگر مبتنی بر فشار و مدل های آشفتگی ک-ا-پسیلون از آن جی به کار گرفته شده اند. گسسته سازی بر اساس سلول مربعی خطی و دقت مرتبه دوم برای معادله های مومنوم، انرژی و سایر معادله ها تنظیم شده است. معیار همگرایی برای تمام معادله ها ۰/۰۰۰۰۱ تنظیم شد و نمودار باقی مانده ها در شکل ۴ نشان داده شده است. پس از حل میدان فشار و سرعت به صورت جفت، بقیه معادله ها نظیر انرژی و آشفتگی به صورت مجزا حل می شوند.



شکل ۴) نمودار باقی مانده ها

۳- اعتبارسنجی

برای بررسی صحت نتایج شبیه سازی عددی از بررسی انجام شده توسط سایر محققان کمک گرفته شده است. محقق های بسیاری به بررسی و ارزیابی عملکرد یک مبدل حرارتی پوسته و لوله پرداختند. پژوهشی که در این بررسی به عنوان مرجع اصلی در نظر گرفته شده توسط ابراهیم ای. فتوگا و همکاران (11) در زمینه عملکرد حرارتی بازایی حرارت زباله در مبدل های حرارتی پوسته و لوله در جریان مخالف با پیکربندی های مختلف لوله است، که نتایج شبیه سازی ها با آن مقایسه شد. در این مطالعه تمرکز بر روی ارتفاع و زاویه بافل مبدل پوسته و لوله می باشد. در شروع شبیه سازی از داده های آرایش مثلثی (۳۰، STHX-T) و ۲۵٪ بافل کات و با زاویه

لوله ها عایق است. که مشخصات فرضیه های کل دامنه محاسباتی در جدول شماره ۲ مشخص شده اند. شرایط مرزی مورد بررسی در این مطالعه به این شرح می باشد. سیال داغ با دبی جرمی ۰/۵ کیلوگرم بر ثانیه با دمای ۶۵ درجه سانتیگراد وارد پوسته می شود و از طرف مخالف سیال سرد با دبی جرمی ۰/۲ کیلوگرم بر ثانیه با دمای ۱۰ درجه سانتیگراد وارد لوله می شود، برای خروجی پوسته و لوله فشار گیج صفر در نظر گرفته شده، شرط عدم لغزش و آدیاباتیک برای تمامی دیواره ها بیرونی فرض شده است. خواص حرارتی هر دو سیال داغ و سرد در دمای میانگین ۳۷/۵ درجه سانتیگراد به دست آمدند (11).

جدول ۲) خواص حرارتی آب و فولاد (11)

عنوان	اندازه
رسانایی گرمایی آب	۰/۶ (W/mK)
ظرفیت گرمایی آب داغ	۴۱۸۲/۵ (J/kgK)
ظرفیت گرمایی آب سرد	۴۱۸۰ (J/kgK)
لزجت دینامیکی آب	۰/۰۰۱۰۰۳ (kg/ms)
چگالی آب	۹۹۸ (kg/m ³)
رسانایی گرمایی فولاد	۱۶/۲۷ (W/mK)
ظرفیت گرمایی فولاد	۵۰۲/۴۸ (J/kgK)
چگالی فولاد	۸۰۳۰ (kg/m ³)

۲-۵- نانوسیال

نانوسیال یک نوع سیال نوآورانه است که با ترکیب مواد نانومتری مانند نانوذرات، نانولوله ها و نانوسیم ها با یک سیال پایه ایجاد می شود. این نوع سیالات دارای خواص بهبود یافته ای مانند رسانندگی گرمایی، نفوذپذیری گرمایی، گرانبوی و ضرایب انتقال حرارت هستند. در مطالعه حاضر، از نانوسیال آلومینیوم اکسید با غلظت حجمی ۲ درصد در آب به عنوان سیال درون لوله استفاده شده است و خواص آن با استفاده از معادلات مربوطه (۷، ۸، ۹، ۱۰) تعیین شده اند (20). خواص نانو ذره و نانو سیال در جدول شماره ۳ نشان داده شده است.

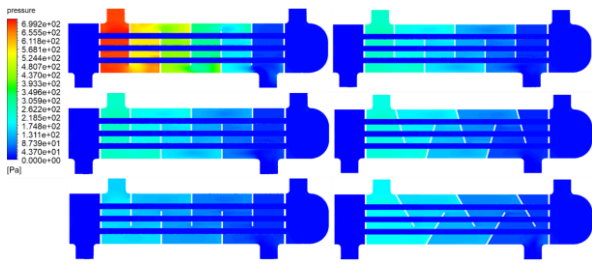
$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_s \quad (7)$$

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (8)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_s \quad (9)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f - 2\phi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + 2\phi(k_f - k_s)} \quad (10)$$

در روابط بالا پایین نویس های f ، nf و s به ترتیب نشان دهنده ی نانوسیال، سیال پایه و نانو ذره هستند. ρ چگالی، μ لزجت دینامیکی، C_p ظرفیت گرمایی، k ضریب رسانش گرمایی و ϕ غلظت حجمی نانوسیال است.

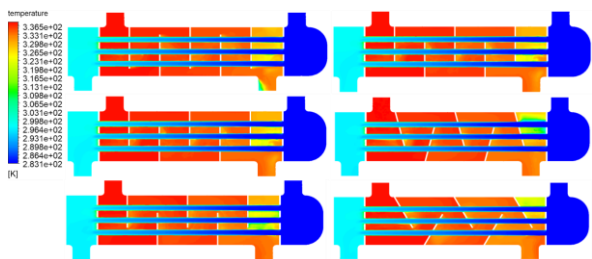


شکل ۶ توزیع فشار در هندسه‌های مختلف

۴-۳-۴ دما

کانتورهای دما برای مبدل حرارتی در ارتفاع‌های مختلف در شکل ۷ نمایش داده شده است. برای بافل کات ۱۵ درصد، گرادیان دمایی در نزدیکی بافل‌ها بیشتر است که این نشان‌دهنده انتقال حرارت مؤثر در این مناطق است. در نواحی مرکزی بین دو بافل، دما یکنواخت است که حاکی از تلاطم و مخلوط شدن مناسب سیال است. شیب تغییر دما در بافل کات ۱۵ درصد بیشتر است که بیانگر انتقال حرارت بیشتر است. در بافل کات ۳۵ درصد، گرادیان دما و پخش سیال کمتر است و بافل کات ۲۵ درصد در حالت تعادل قرار دارد.

کانتورهای دمای مبدل حرارتی در زوایه‌های مختلف بافل‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. شیب تغییر دما در زاویه بافل صفر درجه بیشترین است که نشان‌دهنده انتقال حرارت بیشتر است. اما شیب تغییر دما و یکنواختی دما در زاویه بافل ۳۰ درجه تفاوت چندانی با زاویه بافل صفر درجه ندارد.



شکل ۷ توزیع دما در هندسه‌های مختلف

با توجه به بررسی‌های انجام شده بر روی کانتورهای دما، سرعت و فشار در بخش بالا و مشاهده نمودارهای نرخ انتقال حرارت و افت فشار که در شکل ۸ و شکل ۹ نمایش داده شده‌اند، به این نتیجه می‌رسیم که در بین ارتفاع‌های بافل مختلف بیشترین میزان انتقال حرارت مربوط به بافل کات ۱۵ درصد است و کمترین آن به بافل کات ۳۵ درصد اختصاص دارد. بافل کات ۲۵ درصد نیز حد متعادلی را در این میان نشان می‌دهند. از سوی دیگر، بیشترین افت فشار نیز مربوط به بافل کات ۱۵ درصد است. با کاهش ارتفاع بافل، افت فشار نیز کاهش می‌یابد. به صورتی که کمترین افت فشار را بافل کات ۳۵ دارد. همچنین در بین زوایه‌های بافل مختلف بیشترین میزان انتقال حرارت مربوط به زاویه بافل صفر درجه است

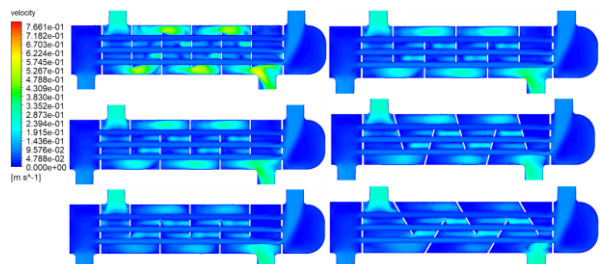
بافل صفر نسبت به راستای عمودی، استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی اولیه به ترتیب زیر می‌باشد:

دمای خروجی پوسته ۳۳۲/۵۷ کلوین به دست آمده و فشار ورودی پوسته ۲۴۱/۵۶ پاسکال به دست آمده و این مقادیر به ترتیب با مقاله مرجع ۰/۲۸ درصد و ۰/۳۵ درصد اختلاف دارند. به طور کلی نتایج به دست آمده تطابق خوبی را با نتایج پژوهش مرجع داشته است.

۴-۲ بحث و نتایج

۴-۱-۴ سرعت

در شکل ۵ کانتورهای سرعت در برش طولی مبدل حرارتی برای ارتفاع‌ها و زوایه‌های مختلف بافل به تصویر کشیده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که یکنواختی سرعت در پوسته با تغییر درصد کات بافل و زاویه بافل متفاوت است. در بافل کات ۱۵ درصد، سرعت در لبه بافل‌ها بالا و تلاطم بیشتر است که موجب بهبود انتقال حرارت می‌شود. با افزایش درصد کات به ۲۵ و ۳۵ درصد، عدم یکنواختی سرعت کاهش یافته و میانگین سرعت کاهش می‌یابد. در زاویه بافل صفر درجه، سرعت در لبه‌ها بالا و در نواحی مرکزی پایین است که تلاطم بیشتری ایجاد می‌کند. در زاویه ۱۵ درجه، سرعت یکنواخت‌تر و در زاویه ۳۰ درجه، به دلیل نزدیکی لبه بافل به ردیف لوله، سرعت و انتقال حرارت در لبه‌ها افزایش می‌یابد.



شکل ۵ توزیع سرعت در هندسه‌های متفاوت

۴-۲-۴ فشار

بر اساس شکل ۶، کانتور فشار در مقطع طولی مبدل حرارتی نشان می‌دهد که در بین ارتفاع‌های مختلف بافل، در بافل کات ۱۵ درصد، افت فشار و شیب تغییرها فشار بسیار زیاد است که این امر به دلیل ارتفاع زیاد بافل‌ها و مقاومت جریان در برابر آن‌ها است. در مقابل، در بافل کات ۳۵ درصد، افت فشار و شیب تغییرات فشار بسیار کمتر است. بافل کات ۲۵ درصد حد متعادلی از افت فشار و انتقال حرارت را نشان می‌دهند. همچنین، از نظر زاویه بافل، بیشترین شیب تغییر و بالاترین افت فشار مربوط به زاویه بافل صفر درجه است. با افزایش زاویه بافل، مقاومت در برابر حرکت سیال کاهش یافته و افت فشار نیز کمتر می‌شود. به طور خاص، کمترین افت فشار در زاویه بافل ۳۰ درجه مشاهده می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

این پژوهش به بررسی تأثیر ارتفاع و زاویه بافل بر نرخ انتقال حرارت و میزان افت فشار در مبدل حرارتی پوسته و لوله پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد که بافل کات ۱۵ درصد بالاترین نرخ انتقال حرارت و همچنین بیشترین افت فشار را دارد. با این حال، بافل کات ۲۵ درصد با نرخ انتقال حرارتی تقریباً مشابه و افت فشار حدود ۶۰ درصد کمتر، به‌عنوان ارتفاع بهینه بافل پیشنهاد می‌شود. از نظر زاویه بافل، زاویه صفر درجه بالاترین نرخ انتقال حرارت و افت فشار را دارد، در حالی که زاویه ۳۰ درجه با نرخ انتقال حرارتی مشابه و افت فشار کمتر به‌عنوان زاویه بهینه انتخاب می‌شود.

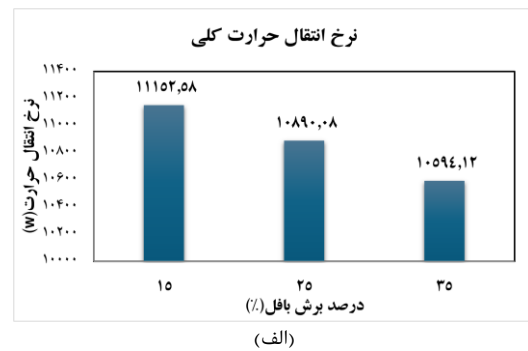
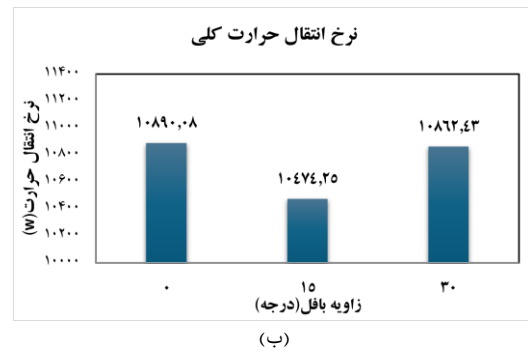
تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.
تعارض منافع: در این مقاله هیچ تعارض منافی برای اظهار وجود ندارد.

منابع مالی: برای این مقاله هیچ منبع مالی وجود ندارد.

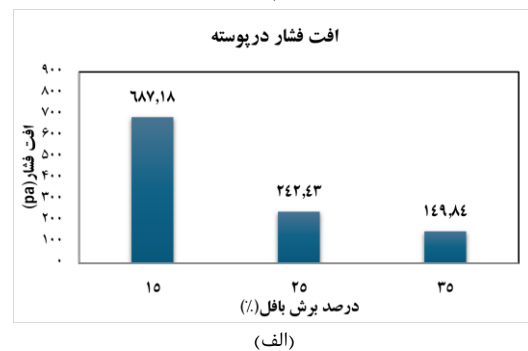
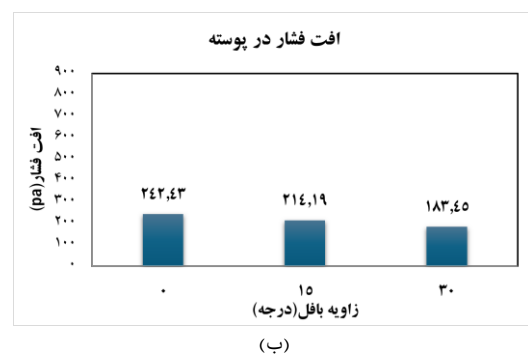
مراجع

- 1- Bayram H, Sevilgen G. Numerical investigation of the effect of variable baffle spacing on the thermal performance of a shell and tube heat exchanger. Vol. 10, Energies. 2017.
- 2- Gaikwad S, Parmar A. Numerical simulation of the effect of baffle cut and baffle spacing on shell side heat exchanger performance using CFD. Vol. 16, Chemical Product and Process Modeling. 2021. p. 145-54.
- 3- Gugulothu R, Sanke N. Experimental investigation of heat transfer characteristics for a shell and tube heat exchanger. Vol. 11, Energy Harvesting and Systems. 2024.
- 4- Biçer N, Engin T, Yaşar H, Büyükkaya E, Aydın A. Design optimization of a shell-and-tube heat exchanger with novel three-zonal baffle by using CFD and taguchi method. Int J Therm Sci. 2020 Sep 1;155:106417.
- 5- Abbasian Arani AA, Uosofvand H. Double-pass shell-and-tube heat exchanger performance enhancement with new combined baffle and elliptical tube bundle arrangement. Vol. 167, International Journal of Thermal Sciences. 2021.
- 6- El-Said EMS, Elsheikh AH, El-Tahan HR. Effect of curved segmental baffle on a shell and tube heat exchanger thermohydraulic performance: Numerical investigation. Int J Therm Sci. 2021 Jul 1;165:106922.
- 7- Kumaresan G, Santosh R, Duraisamy P, Venkatesan R, Kumar NS. Numerical Analysis of Baffle Cut on Shell Side Heat Exchanger Performance with Inclined Baffles. Heat Transf Eng. 2018 Aug 27;39(13-14):1156-65.
- 8- Mohammadi MH, Abbasi HR, Yavarinasab A, Pourrahmani H. Thermal optimization of shell and tube heat exchanger using porous baffles. Appl Therm Eng. 2020 Apr 1;170:115005.
- 9- Wang D, Wang H, Xing J, Wang Y. Investigation of the thermal-hydraulic characteristics in the shell side of

و کمترین آن به زاویه بافل ۱۵ درجه اختصاص دارد. نرخ انتقال حرارت زاویه بافل ۳۰ درجه تفاوت اندکی با زاویه بافل صفر درجه دارد. از سوی دیگر، بیشترین افت فشار نیز مربوط زاویه بافل ۰ درجه است. با افزایش زاویه بافل، افت فشار نیز کاهش می‌یابد. به صورتی که کمترین افت فشار را زاویه بافل ۳۰ درجه دارد.



شکل ۸) نمودار نرخ انتقال حرارت کلی، الف) بافل کات‌های ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درصد ب) زاویه بافل‌های ۰، ۱۵ و ۳۰ درجه



شکل ۹) نمودار افت فشار در پوسته، الف) بافل کات‌های ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درصد ب) زاویه بافل‌های ۰، ۱۵ و ۳۰ درجه

- heat exchanger with quatrefoil perforated plate. *Int J Therm Sci.* 2021 Jan 1;159:106580.
- 10- Yu C, Zhang H, Zeng M, Wang R, Gao B. Numerical study on turbulent heat transfer performance of a new compound parallel flow shell and tube heat exchanger with longitudinal vortex generator. *Appl Therm Eng.* 2020 Jan 5;164:114449.
- 11- Fetuga IA, Olakoyejo OT, Abolarin SM, Gbegudu JK, Onwuegbusi A, Adelaja AO. Numerical analysis of thermal performance of waste heat recovery shell and tube heat exchangers on counter-flow with different tube configurations. *Alexandria Eng J.* 2023 Feb 1;64:859–75.
- 12- Amini R, Amini M, Jafarina A, Kashfi M. Numerical investigation on effects of using segmented and helical tube fins on thermal performance and efficiency of a shell and tube heat exchanger. *Appl Therm Eng.* 2018 Jun 25;138:750–60.
- 13- Saffarian MR, Fazelpour F, Sham M. Numerical study of shell and tube heat exchanger with different cross-section tubes and combined tubes. Vol. 10, *International Journal of Energy and Environmental Engineering.* 2019. p. 33–46.
- 14- Ghazanfari V, Taheri A, Amini Y, Mansourzade F. Enhancing heat transfer in a heat exchanger: CFD study of twisted tube and nanofluid (Al₂O₃, Cu, CuO, and TiO₂) effects. *Case Stud Therm Eng.* 2024 Jan 1;53:103864.
- 15- Fetuga IA, Olakoyejo OT, Shote AS, Sobamowo GM, Oluwatusin O, Gbegudu JK. Thermal and Fluid Flow Analysis of Shell-and-Tube Heat Exchangers with Smooth and Dimpled Tubes. Vol. 6, *Journal of Advanced Engineering and Computation.* 2022. p. 233.
- 16- Heydari A, Shateri M, Sanjari S. Numerical Analysis of a Small Size Baffled Shell-and-Tube Heat Exchanger Using Different Nano-Fluids. *Heat Transf Eng.* 2018 Jan 20;39(2):141–53.
- 17- Shahsavari Goldanlou A, Sephehrirad M, Papi M, Hussein AK, Afrand M, Rostami S. Heat transfer of hybrid nanofluid in a shell and tube heat exchanger equipped with blade-shape turbulators. Vol. 143, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.* 2021. p. 1689–700.
- 18- Bellahcene L, Sahel D, Yousfi A. Numerical Study of Shell and Tube Heat Exchanger Performance Enhancement Using Nanofluids and Baffling Technique. Vol. 80, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences.* 2021. p. 42–55.
- 19- Bahiraei M, Naseri M, Monavari A. A CFD study on thermohydraulic characteristics of a nanofluid in a shell-and-tube heat exchanger fitted with new unilateral ladder type helical baffles. *Int Commun Heat Mass Transf.* 2021 May 1;124:105248.
- 20- Sheikholeslami M, Hatami M, Ganji DD. Nanofluid flow and heat transfer in a rotating system in the presence of a magnetic field. *J Mol Liq.* 2014 Feb 1;190:112–20.