J. Energy Conversion
Volume: 10, Issue: 3, 2023: 79-95

نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)

دوره ۱۰، شماره ۳، پائیز۱۴۰۲، ص: ۷۹-۹۵

بررسی عددی تأثیر آشوبگرهای مخروطی شکل ناقص بر بهبود انتقال حرارت مبدل‌های حرارتی لوله‌ای با نانوسیال آب/اکسید زیرکونیوم

علی مهاجر[۱]، محمدحسن نوبختی[۲و*]، علیرضا نظام آبادی[۳]

۱- گروه مهندسی مکانیک، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران.
*۲- گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. m.nobakhti@srbiau.ac.ir
۳- گروه مهندسی مکانیک، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران.

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۵، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۳۱، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۱

چکیده

با توجه به اهمیت بهبود انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی، تأثیر استفاده همزمان از آشوبگرها و همچنین نانوذرات اکسید زیرکونیوم بر انتقال حرارت مبدل حرارتی لوله‌ای به صورت عددی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بدین منظور، در ابتدا یک نوع جدید آشوبگر مخروطی شکل ناقص دارای دو ردیف موازی سوراخ بر روی آن ارائه شده است. سپس، با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی معادلات انتقال حرارت در محدوده اعداد رینولدز 4000 تا 24000 و همچنین میزان نانوذرات اکسید زیرکونیوم از 0.01% تا 0.2% حل شده است. به منظور افزایش دقت مدل‌سازی، نانوسیال به صورت دوفازی شبیه‌سازی شده است. اثر پارامترهایی نظیر تعداد آشوبگرها، تعداد سوراخ‌های آن و کسرحجمی نانوذرات و بر روی میدان جریان، عدد ناسلت میانگین، فاکتور اصطکاک و ضریب عملکرد حرارتی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از آشوبگرهای سوراخ‌دار در مسیر جریان منجر به تغییرات قابل ملاحظه‌ای در مشخصه‌های جریان و انتقال حرارت می‌شود. آشوبگرهای مخروطی سوراخ‌دار با ایجاد جریان‌های گردشی‌مجدد و جدایشی در حضور نانوسیال باعث بهبود انتقال حرارت در نتیجه برهم زدن لایه مرزی حرارتی و ایجاد ختلال بیشتر در جریان سیال در طول مبدل حرارتی لوله‌ای می‌شود. آشوبگرهای ارائه شده در این تحقیق در صورت تعیین مناسب پارامترها می‌تواند عملکرد حرارتی را تا ۷۶ درصد نسبت به لوله صاف افزایش دهند. حداکثر ضریب عملکرد حرارتی برابر 1.76 در حالت M=1، N=1 و Re=4000 به دست آمده است.

* **عهده‌دار مکاتبات:** m.nobakhti@srbiau.ac.ir

کلمات کلیدی: آشوبگرها مخروطی ناقص، نانوذرات اکسید زیرکونیوم، مدل دوفازی، انتقال حرارت، ضریب عملکرد حرارتی.

نحوه استناد به این مقاله: علی مهاجر، محمدحسن نوبختی، علیرضا نظام آبادی. بررسی عددی تأثیر آشوبگرهای مخروطی شکل ناقص بر بهبود انتقال حرارت مبدل‌های حرارتی لوله‌ای با نانوسیال آب/اکسید زیرکونیوم.
مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۲; ۱۰ (۳) : ۷۹-۹۵

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

۱-مقدمه

در سال های اخیر با رشد جمعیت جهان و صنعتی شدن، میزان مصرف انرژی به شدت افزایش یافته و باعث تخلیه منابع انرژی شده است. بر این اساس، صرفه‌جویی در منابع انرژی ضروری است و به همین دلیل تلاش‌ها و بررسی‌های جدی برای اعمال روش‌های مختلف برای افزایش انتقال حرارت در تجهیزات تبدیل انرژی صورت گرفته است. روش‌های تقویتی مختلفی به منظور افزایش انتقال حرارت توسعه داده شده است [۱-۴]. به طور کلی، دو روش مختلف برای افزایش انتقال حرارت از جمله تکنیک‌های غیرفعال [۱-۴] و تکنیک‌های فعال [۵-۱۲] وجود دارد. بر خلاف روش فعال، روش غیرفعال نیازی به نیروی خارجی ندارد. بررسی مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از تجهیزاتی مانند آشوبگرها و نانوسیالات که دارای ویژگی افزایش انتقال حرارت هستند، می‌تواند در عین حفظ عملکرد، باعث کاهش اندازه مبدل حرارتی شود [۱]. کاهش اندازه تجهیزات به دلیل توانایی به حداقل رساندن حجم مورد نیاز سیالات کاری پر هزینه و کاهش نگرانی‌های ایمنی مربوط به حجم کل سیال سیستم حیاتی است.

یکی از انواع آشوبگرهای پرکاربرد مورد استفاده در کاربردهای گرمایی حلقه‌های مخروطی هستند که به دلیل قابلیت نصب راحت، هزینه پائین و کارایی بالا جزو ابزارهای پرکاربرد در زمینه بهبود انتقال گرما هستند [۲, ۳]. این نوع حلقه‌ها برای اولین بار توسط یاکوت و همکاران [۴] استفاده شد. آنها با استفاده از اصل کمینه کردن تولید آنتروپی و بر اساس قانون دوم ترمودینامیک به بررسی عملکرد هندسه ارائه شده پرداختند. دورموش [۵] انتقال گرما و تلفات اگزرژی در حلقه‌های مخروطی برش داده شده را با استفاده از تست‌های آزمایشگاهی بررسی نمود. در مطالعه او هوا به عنوان سیال پایه در نظر گرفته شده و عملکرد این حلقه در محدوده عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰۰ مطالعه شد. پرومونق [۶] با انجام تست‌های تجربی تأثیر قطر حلقه‌های مخروطی را بر مشخصه‌های انتقال گرما مبدل‌های لوله‌ای بررسی کرد. نتایج مطالعه او نشان داده که استفاده از این تجهیزات عدد ناسلت را می‌تواند در حدود ۳۳۳ درصد نسبت به لوله معمولی افزایش دهد. در تحقیقی دیگر، پرومونق و ایمسا [۷] رفتار انتقال گرما در لوله‌های دارای حلقه‌های مخروطی و آشوبگرهای مارپیچ را به صورت تجربی مطالعه کردند. نتایج مطالعه آنها نشان می‌دهد که استفاده همزمان حلقه‌های مخروطی و آشوبگرهای مارپیچ عدد ناسلت را در حدود ۴ تا ۱۰ درصد و راندمان گرمایی را در حدود ۴ تا ۸ درصد نسبت به لوله دارای حلقه‌های مخروطی بهبود می‌بخشد. چن و همکاران [۸] عملکرد آشوبگرهای مخروطی را بر افزایش انتقال مبدل‌های حرارتی مطالعه کردند. عباسپور و همکاران [۹] با استفاده از شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی، مشخصه‌های انتقال گرما در لوله‌های دایروی با حلقه‌های مخروطی را مطالعه کردند. بر اساس نتایج مطالعه آنها مشاهده می‌شود که مدل ارائه شده توسط آنها باعث بهبود حدود ۴/۵۸ درصدی در انتقال گرما می‌شود. ابراهیم و همکاران [۱۰] چیدمان‌های مختلف حلقه‌های مخروطی را در مبدل‌های حرارتی مورد مطالعه قرار دادند و تأثیر مشخصات هندسی را بر عملکرد گرمایی این تجهیزات مطالعه کردند. شبا و همکاران [۱۱] نشان دادند که به ازای مقدار مشخصی برای زاویه رأس مخروطی عملکرد این نوع حلقه‌ها در حالت بهینه قرار می‌گیرد. خیونگ و همکاران [۱۲] با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی عملکرد استفاده از حلقه‌های مخروطی را در مبدل‌های حرارتی دو لوله‌ای مطالعه کردند. آنها در شبیه‌سازی عددی از روش k-ε استفاده نمودند و نشان دادند که استفاده از این نوع آشوبگرها می‌تواند ضریب انتقال حرارت را در حدود ۴/۶۸ درصد نسبت به لوله معمولی بهبود بخشد. در یکی از جدیدترین تحقیقات انجام شده، سریواستاوا و همکاران [۱۳] با استفاده از تحلیل‌های عددی به تحلیل افزایش انتقال حرارت و تولید آنتروپی یک لوله با آشوبگرهای مخروطی و در محدوده رینولدز ۴۰۰۰-۲۰۰۰۰ پرداختند. تحلیل قانون دوم نشان داد که آشوبگرهای مخروطی جامد با نسبت گام به قطر پایین‌تر برای انتقال انرژی بالا در عدد رینولد پایین‌تر مناسب هستند، در حالی که آشوبگرهای مخروطی در اعداد رینولدز بالاتر موثر هستند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

یکی دیگر از روش‌های غیرفعال بهبود انتقال حرارت استفاده از نانوسیالات می‌باشد که از معلق ساختن نانوذرات در یک مایع خالص بوجود می‌آید. از آنجا که نانوذرات فوق‌العاده ریز هستند و سطح ویژه بزرگی دارند [۱۴-۱۶]، زمانی که در مایعات پراکنده می‌شوند، خواص یکتا و منحصربه‌فردی از قبیل ضریب هدایت گرمایی بالا، مدت زمان پایداری بیشتر و فرسایش کمتر در آنها وجود دارد. محققان بسیاری جنبه‌های مختلف نانوسیالات از جمله ضریب هدایت گرمایی آن را که به طرز غیرعادی حتی در غلظت‌های کم نانوذرات بسیار بالاست، مورد بررسی قرار دادند. از اولین مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به مطالعه پاک و چو [۱۷] اشاره نمود. آنها طی یک مطالعه آزمایشگاهی انتقال حرارت جابجایی نانو سیال‌های AL2O3-Water و TiO2- Water را در رژیم جریان آرام و مغشوش مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال‌ها با کسر حجمی ۳٪ نانو ذرات و اعداد رینولدز مشخص تا میزان ۱۲٪ نسبت به سیال پایه آب بیشتر است. جواهرده و همکاران [۱۸] رفتار گرمایی و هیدرودینامیکی جریان آشفته نانو سیال غیرنیوتنی در آرایش جریان مخالف در یک مبدل گرمایی دولوله‌ای مارپیچ را به صورت عددی مطالعه کردند. شریفی‌اصل و همکاران [۱۹] با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی و حل عددی معادلات بقای جرم، بقای ممنتوم و بقای انرژی به شبیه‌سازی عددی انتقال گرما جابه‌جایی در جریان مغشوش غیرنیوتنی نانوسیال در یک لوله افقی مدور پرداختند. نتایج مطالعه آنها نشان می‌دهند که ضریب انتقال گرما با افزایش غلظت نانوذرات و عدد رینولدز افزایش می‌یابد. رادوان و همکاران [۲۰]، انتقال حرارت جریان آشفته و افت فشار نانوسیال آب اکسیدآلومینیوم درون لوله دایره‌ای را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها افزایش ۲۵ درصدی را در ضریب انتقال حرارت مشاهده کردند. Çolak [۲۱] با استفاده از تست‌های تجربی به بررسی ضریب انتقال حرارت نانوسیال آب/اکسید زیرکونیم پرداخته و با استفاده از شبکه عصبی رابطه جدیدی ارائه کردند. در مطالعه آنها پنج کسر وزنی مختلف نانوذرات مورد مطالعه قرار گرفته است. کوپالان و همکاران [۲۲] به مطالعه تجربی مشخصه‌های ترموفیزیکی نانوسیال آب/اکسید زیرکونیم پرداختند. نتایج مطالعه آنها نشان می‌دهد که به ازای ۰/۲ درصد نانوذرات اکسید زیرکونیم، ضریب انتقال حرارت در حدود ۶/۸۹ درصد افزایش می‌یابد.

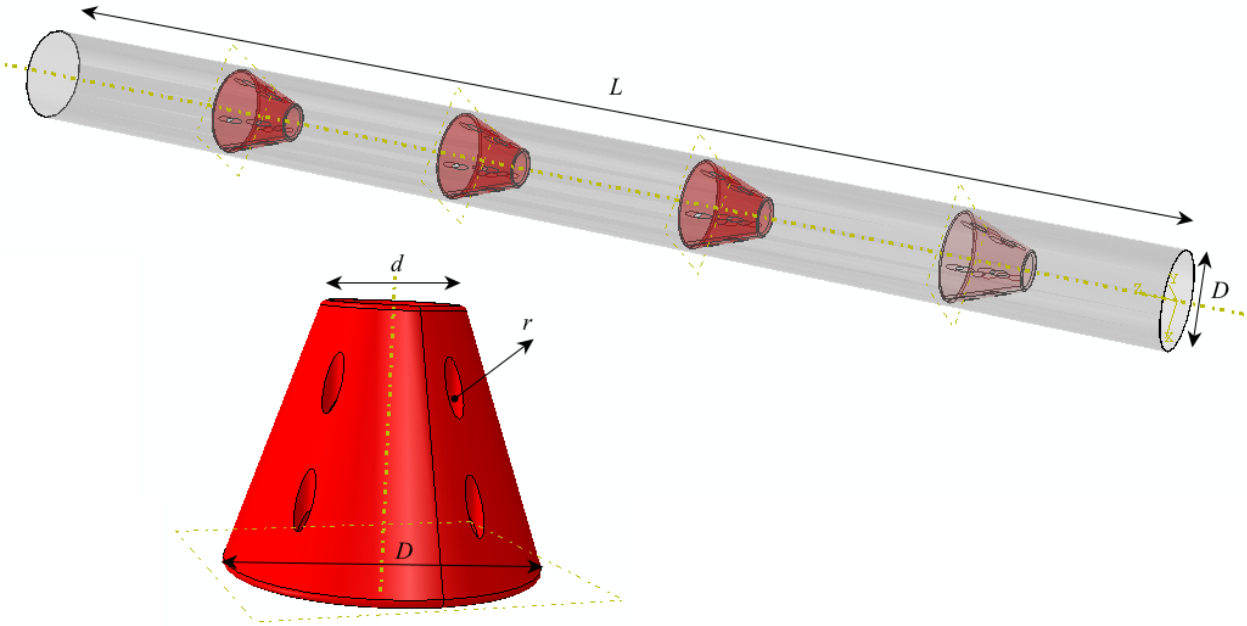
بررسی مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از نانوذرات و آشوبگرها دو روش مؤثر در زمینه افزایش انتقال حرارت مبدل‌های حرارتی می‌باشد. با توجه به اینکه مطالعات در زمینه تأثیر همزمان این دو روش بسیار محدود هست، بنابراین نیاز هست تا این مسئله از جنبه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار بگیرد. علاوه بر این، تاکنون عملکرد مبدل‌های حرارتی لوله‌ای حاوی نانوسیال و مجهز به آشوبگرهای مخروطی شکل سوراخ‌دار بررسی نشده است. تکمیل کمبود اطلاعات در این زمینه هدف این تحقیق می‌باشد. در این مقاله، نوع جدیدی از آشوبگرهای مخروطی ارائه شده و اثر آنها بر بهبود انتقال حرارت در حضور تعلیق نانوذرات اکسید زیرکونیم داخل سیال مطالعه می‌شود. بدین منظور، با استفاده از مدل دوفازی نانوسیال و روش دینامیک سیالات محاسباتی عملکرد این نوع مبدل‌های حرارتی در محدوده Re=4000-20000 مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. پارامترهای مستقل شامل عدد رینولدز، مشخصات هندسی آشوبگرهای مخروطی و تعداد سوراخ‌های واقع بر روی آن، فاصله آشوبگرها و کسر حجمی نانوذرات اکسید زیرکونیوم می‌باشد. تأثیر این پارامترها بر روی عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و عملکرد حرارتی[1] مبدل (PEC) بررسی می‌شود.

[1] Performance Evaluation Criterion

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

۲- بیان مسئله

هندسه سیستم تحت بررسی، در شکل ۱ نشان داده شده است. مدل شامل یک مبدل حرارتی لوله‌ای به طول L برابر 2000 mm و قطر D برابر 70 mm می‌باشد. مبدل حرارتی لوله‌ای مجهز به آشوبگر مخروطی شکل دارای دو ردیف سوراخ بوده که برای اولین بار در این تحقیق ارائه شده است. طول حلقه‌های مخروطی برابر 60 mm، $d=0.2D$ و ضخامت آنها برابر 2 mm و ثابت در نظر گرفته شده است. نتایج عددی به ازای تعداد مختلف مخروط‌ها (M=1, 2, 3, 5, 6) و تعداد مختلف سوراخ‌ها (N=0, 4, 8, 12) استخراج شده است. سیال آب به عنوان سیال پایه استفاده شده است و نانوذرات آکسید زیرکونیم (ZrO2) با غلظت حجمی ۰/۲-۰ درصد مورد توجه قرار گرفته است. نانوسیال به صورت سه‌بعدی، غیرمتراکم و حالت پایا با خواص فیزیکی ثابت در نظر گرفته شده است. نانوسیال با دمای ثابت ($T_{in} = 300K$) وارد مبدل شده و دمای جداره لوله (T_w) در 350 K ثابت در نظر گرفته می‌شود. در ورودی مبدل، پروفیل سرعت یکنواخت متناظر با Re=4000-20000 اعمال می‌شود. همچنین، در خروجی لوله شرایط مرزی از نوع نیومن با فشار خروجی برابر صفر انتخاب شده است.



شکل ۱ هندسه مبدل حرارتی لوله‌ای مجهز به آشوبگر مخروطی سوراخ‌دار جدید ارائه شده

۳- مدل‌سازی عددی

بیشتر کارهای انجام شده روی نانوسیالات نشان می‌دهد که افزایش ضریب هدایت حرارتی نمی‌تواند تنها عامل افزایش قابل توجه انتقال حرارت در نانوسیالات باشد و مکانیزم‌های مختلفی برای این افزایش پیشنهاد شده است. انتقال حرارت جابه‌جایی در نانوسیالات را می‌توان با دو روش تکفاز و دوفاز مدل کرد. اگرچه روش تکفاز ساده و کم هزینه است ولی چون خواص واقعی نانوسیالات دقیقاً مشخص نیستند، نتایج این روش معمولاً تطابق مناسبی با کارهای تجربی ندارد و یا محدود به شرایطی خاص بوده و قابل تعمیم نیستند. علاوه بر این به دلیل وجود عواملی از قبیل نیروی اصطکاک بین سیال و ذرات جامد و همچنین پخش برونی ذرات، سرعت لغزشی بین سیال و ذرات جامد صفر نیست. بنابراین به نظر می‌رسد استفاده از روش دوفازی برای مدل کردن نانوسیالات، مناسب‌تر است. در این مدل‌ها با اعمال مدل اویلری-اویلری به جریان نانوسیالات، سیال پایه و نانوذرات به عنوان دو فاز مجزا در نظر

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

گرفته شده و معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و انرژی برای هر یک از فازها به طور جداگانه به کار می‌رود. معادلات حاکم در مدل مخلوط دوفازی به صورت زیر می‌باشد [۲۳-۲۵]:

معادله پیوستگی:

$$\nabla.(\rho_m V_m) = 0 \quad (۱)$$

معادله اندازه حرکت:

$$\nabla.(\rho_m V_m V_m) = -\nabla P + \nabla.(\mu_m \nabla.V_m) + \rho_m g + \nabla.\left(\sum_{k=1}^{n} \phi_k \rho_k V_{dr,k} V_{dr,k}\right) \quad (۲)$$

معادله انرژی:

$$\nabla.\left(\sum_{k=1}^{n} \phi_{p,k} \rho_k V_k T\right) = \nabla.(k_m \nabla T) \quad (۳)$$

معادله کسر حجمی نانوذرات:

$$\nabla.(\phi_p \rho_p V_m) = -\nabla.(\phi_p \rho_p V_{dr,p}) \quad (۴)$$

که در آن V نشان دهنده سرعت، ϕ_k و $V_{dr,k}$ نشان دهنده کسرحجمی و سرعت رانش[2] برای فاز ثانویه p (نانوذرات) است. زیرنویس‌های p، f و m به ترتیب نشان دهنده نانوذرات، سیال پایه و مخلوط می‌باشد. چگالی مخلوط، ویسکوزیته، رسانش حرارتی، سرعت میانگین جرم به صورت زیر می‌باشد:

$$(\rho_m, \lambda_m, \mu_m) = \sum_{k=1}^{n} \phi_k (\rho_k, \lambda_k, \mu_k) \quad (۵)$$

$$V_m = \frac{\sum_{k=1}^{n} \phi_k \rho_k V_k}{\rho_m} \quad (۶)$$

$$V_{dr,k} = V_k - V_m \quad (۷)$$

که V_m سرعت متوسط جرمی می‌باشد.

τ و τ_t به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\tau = \mu_m \nabla V_m \quad (۸)$$

$$\tau_t = -\sum_{k=1}^{n} \phi_k \rho_k \overline{v_k v_k} \quad (۹)$$

سرعت رانش به صورت سرعت فاز ثانویه (p) نسبت به سرعت فاز پایه (f) که توسط Manninen ارائه شده است در رابطه زیر نشان داده شده است [۲۶]:

$$V_{pf} = V_p - V_f = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \mu_f f_{drag}} \frac{(\rho_p - \rho_m)}{\rho_p} [g - (V_m.\nabla) V_m] \quad (۱۰)$$

سرعت رانش به صورت زیر به سرعت نسبی وابسته می‌باشد:

$$V_{dr,p} = V_{kp} - \sum_{k=1}^{n} \frac{\phi_k \rho_k V_k}{\rho_m} \quad (۱۱)$$

همچنین، تابع درگ f_{drag} به صورت زیر پیشنهاد شده است [۲۷]:

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 Re_p^{0.687} for Re_p \leq 1000 \\ 0.0183 Re_p for Re_p > 1000 \end{cases} \quad (۱۲)$$

که در آن $Re_p = \frac{V_m d_p}{\nu_m}$ عدد رینولدز محلی نانوذرات می‌باشد.

عدد ناسلت میانگین، عدد رینولدز، ضریب اصطکاک و ضریب عملکرد حرارتی که به صورت بی‌بعد هستند، به ترتیب به صورت زیر می‌باشند [۲۸]:

[2] Drift Velocity

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

$$Nu = \frac{h\ (x)D_h}{k} \quad (۱۳)$$

که k و h به ترتیب رسانش گرمایی و ضریب هدایت حرارتی متوسط هستند و

$$h\ (x) = \frac{Q''(x)}{T_w(x) - T_b(x)} \quad (۱۴)$$

که در آن

$$T_b(x) = \frac{\int T\rho|\vec{V}d\vec{A}|}{\int \rho|\vec{V}d\vec{A}|}, T_w(x) = \frac{1}{A}\int T d\ A \quad (۱۵)$$

ضریب انتقال حرارت متوسط به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$h\ = \frac{1}{L}\int_0^L h\ (x)dx \quad (۱۶)$$

در نتیجه، عدد ناسلت میانگین را می‌توان به صورت زیر تعیین نمود:

$$Nu = \frac{h\ D_h}{k} \quad (۱۷)$$

عدد رینولدز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{\rho u_m D_h}{\mu} \quad (۱۸)$$

که در آن u_m سرعت میانگین سیال در سطح مقطع می‌باشد. قطر هیدرولیکی معادل لوله (D_h) به صورت زیر می‌باشد:

$$D_h\ = \frac{4(\frac{\pi}{4})(D_o^2 - D_i^2)}{\pi D_o + \pi D_i} = D_o - D_i \quad (۱۹)$$

ضریب اصطکاک برای جریان توسعه یافته کامل به صورت زیر می‌باشد:

$$f = \frac{2D_h}{L}\frac{\Delta P}{\rho u_m^2} \quad (۲۰)$$

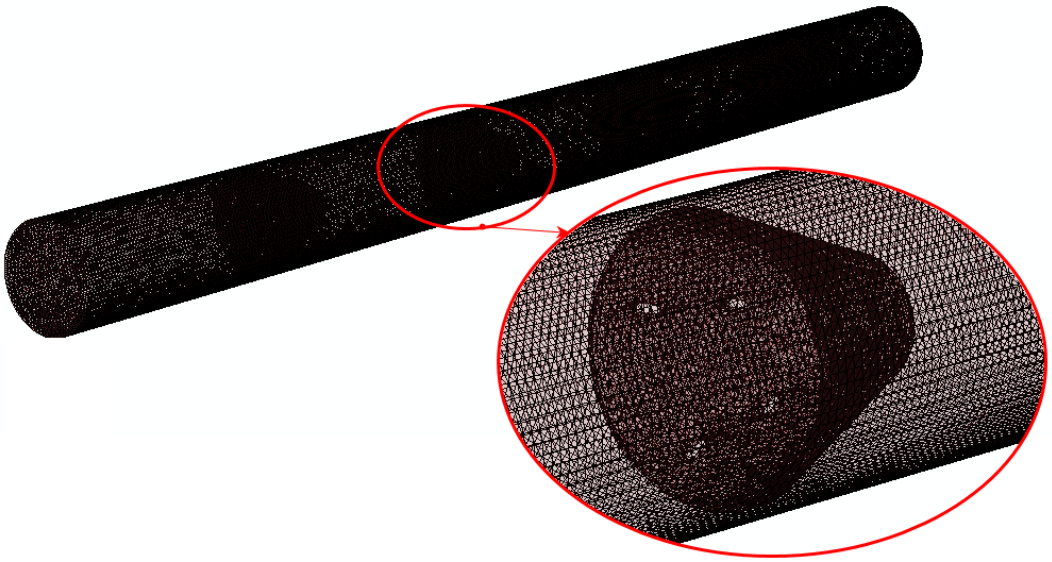
که در آن ΔP اختلاف فشار بین ورودی و خروجی می‌باشد.

ضریب عملکرد حرارتی (PEC) که در این تحقیق به منظور تعیین عملکرد حرارتی مبدل حرارتی در حضور توأم آشوبگر و نانوسیال مورد استفاده قرار می‌گیرد، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

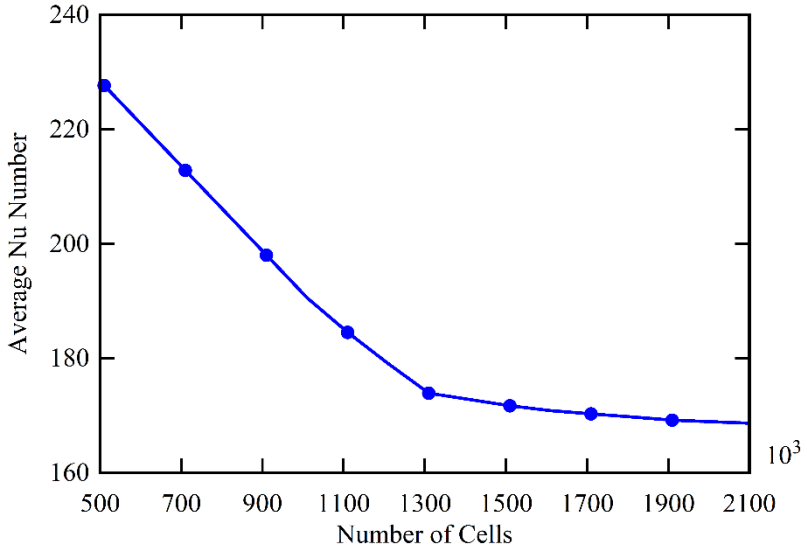
$$PEC = \frac{\left(\frac{Nu_{av}}{Nu_{av,o}}\right)}{\left(\frac{f}{f_o}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (۲۱)$$

که در آن Nu_{av} و $Nu_{av,0}$ به ترتیب عدد ناسلت میانگین لوله در حضور تجهیزات خارجی و لوله صاف می‌باشند. در شکل ۲ مدل مش‌بندی که تحلیل‌های عددی استفاده شده، نشان داده شده است. شبکه‌بندی با استفاده از مش‌بندی ANSYS 18.0 انجام شده و به صورت شبکه‌ای با سازمان و غیریکنواخت می‌باشد. در نزدیکی سوراخ‌های مخروط نیز مش با چگالی بالا استفاده شده است تا بتوان تولید ورتکس و جریان‌های گردشی را مشاهده کرد. با هدف اطمینان از شبکه مورد استفاده، محاسبات در عدد رینولدز ۷۰۰۰ برای نانوسیال ZrO2/water با کسر حجمی 0.2٪ انجام شده و نتایج آن بر حسب عدد ناسلت میانگین در شکل ۳ آورده شده است. مشاهده می‌شود که تغییرات عدد ناسلیت به ازای مش‌های بیشتر از 1.4×10^6 عدد به کمتر از 1.17% می‌رسد. از این رو، استفاده از این شبکه برای محاسبات مدل دوفازی مناسب به نظر می‌رسد و در کلیه محاسبات این مقاله نیز از این نوع مش‌بندی استفاده شده است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



شکل ۲ مدل مش‌بندی شده مبدل حرارتی لوله‌ای مجهز به حلقه‌های مخروطی سوراخ‌دار

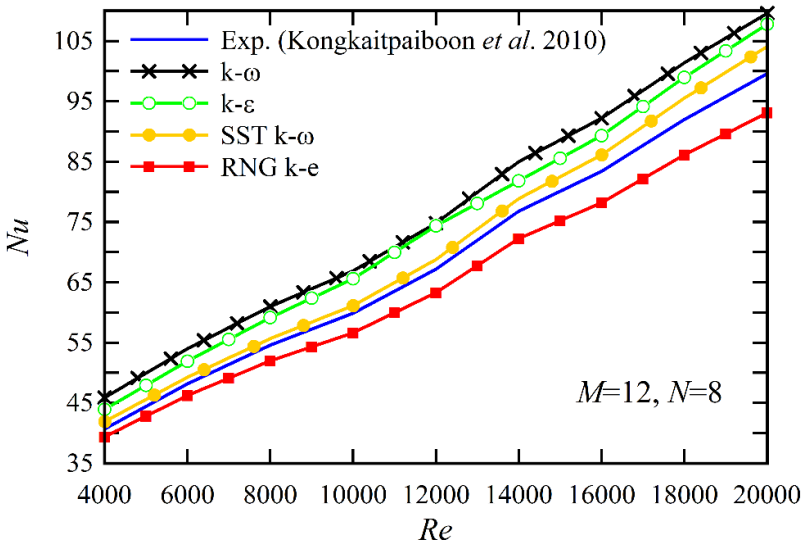


شکل ۳. بررسی استقلال از شبکه برای در عدد رینوادز ۲۰۰۰۰ برای نانوسیال ZrO2/water با کسر حجمی 0.2٪

حل عددی مبدل حرارتی حامل نانوسیال و مجهز به حلقه‌های مخروطی سوراخ‌دار با استفاده از روش حجم محدود انجام شده است. معادلات حاکم با استفاده از نرم‌افزار ANSYS-FLUENT 19.0 و الگوریتم سیمپل با روش کوپل شدگی سرعت فشار حل شده است. روش بالادستی مرتبه دوم[3] به منظور گسسته‌سازی معادلات مومنتوم و انرژی انتخاب شده است. نتایج چهار مدل مختلف توربولانسی (مدل k-ε استاندارد، مدل k-omega استاندارد، مدل‌های SST k-omega و RNG k-e) با نتایج تست‌های تجربی مرجع [۳] در شکل ۴ مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به نتایج، مدل توربولانسی SST k-e بهترین نتایج را با حداقل خطای ممکن با نتایج تجربی در اختیار می‌گذارد. بنابراین مدل SST k-e در مطالعه حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرد. معیار همگرایی برای تمامی متغیرها 10^{-6} در نظر گرفته شده است.

[3] Second-Order Upwind

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



شکل ۴. مقایسه نتایج برای چهار مدل مختلف توربولانسی با نتایج تجربی [۳] برای N=8 و M=12

۵- بررسی نتایج

۵-۱ صحت‌سنجی نتایج

به منظور صحت‌سنجی مدل عددی مورد استفاده در این تحقیق، عدد ناسلت میانگین و فاکتور اصطکاک برای لوله دایروی مجهز به حلقه‌های مخروطی دارای یک ردیف سوراخ با نتایج تجربی Kongkaitpaiboon و همکاران [۳] در جدول ۱ مقایسه شده است. نتایج به ازای شرایط مرزی و مشخصات فیزیکی مورد استفاده در مرجع مزبور استخراج شده است. مشاهده می‌شود که مدل عددی مورد استفاده در تحقیق حاضر، تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی مرجع [۳] و در محدوده Re=6000-14000 دارند.

جدول ۱ مقایسه عدد ناسلت و فاکتور اصطکاک با نتایج تجربی مرجع [۳]

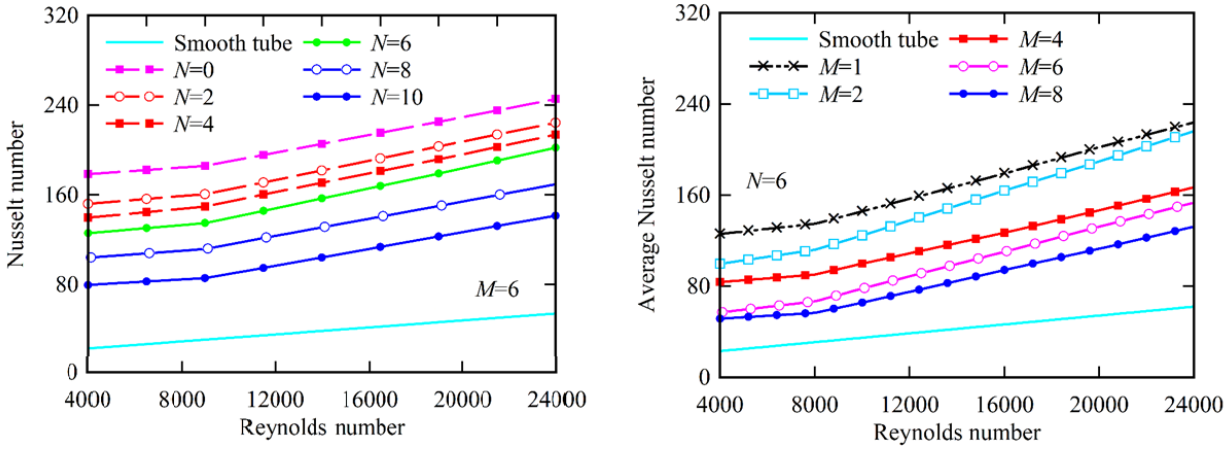
Re	*Nu*		*f*	
	Present study	Exp. [3]	Present study	Exp. [3]
4000	56.2	58.7	4.6	4.5
8000	75.6	76.8	3.5	3.3
12000	99.4	100.6	3.2	3.1

۵-۲ تأثیرمشخصات هندسی آشوبگرها

در این بخش تأثیر پارامترهای مختلف آشوبگرهای مخروطی سوراخ‌دار و نانوسیال آب/اکسید زیرکونیوم بر عملکرد حرارتی مبدل حرارتی لوله‌ای مطالعه می‌شود. در ابتدا، تأثیر تعداد سوراخ‌ها (N) و تعداد آشوبگرهای مخروطی (M) مطالعه می‌شود. در شکل ۵ عدد ناسلت میانگین محاسبه شده برحسب عدد رینولدز و به ازای مقادیر مختلف حلقه‌های مخروطی و سوراخ‌های آنها نشان داده شده است. همچنین، در این شکل‌ها مقایسه بین استفاده از این نوع آشوبگرهای مخروطی با لوله صاف نیز انجام شده است. این نتایج به ازای کسر حجمی نانوذرات اکسید زیرکونیوم برابر ۰/۰۱ درصد استخراج شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز از ۴۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ عدد ناسلت افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. علت این امر

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

اساساً به این خاطر می‌باشد که در رینولدزهای بالا، وجود حلقه‌های مخروطی باعث اغتشاش بیشتر در جریان سیال ایجاد شده و در نتیجه آن آشفتگی‌های لایه مرزی حرارتی سبب افزایش انتقال گرما در این نوع مبدل‌های حرارتی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین عدد ناسلت برای حلقه مخروطی بدون سوراخ (N=0) و M=1 به دست می‌آید که در Re=4000 در حدود ۱۲۷ درصد نسبت به لوله صاف بیشتر می‌باشد. علاوه بر این، پراکندگی جریان سیال و رفتار جت مانند سیال در خروجی حلقه‌های مخروطی شکل باعث بیشتر شدن مقاومت گرمایی سیال و در نتیجه ضریب انتقال حرارت در این نوع مبدل حرارتی افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد به ازای M برابر ۱ و ۶، عدد ناسلت در رینولدزهای ۴۰۰۰ به ترتیب در حدود ۱۸۲ درصد و ۱۴۰ درصد نسبت به لوله صاف افزایش می‌یابد. با افزایش تعداد آشوبگرهای مخروطی، عدد ناسلت میانگین کاهش می‌یابد و چنین نتیجه‌ای در مورد تعداد سوراخ‌های موجود بر روی این حلقه‌ها نیز صادق است. با افزایش تعداد سوراخ‌ها عدد ناسلت کمتر می‌شود. به عنوان نمونه به ازای M=6، با افزایش تعداد سوراخ‌ها از صفر به ۱۰، عدد ناسلت در رینولدز ۴۰۰۰ در حدود ۵۶ درصد کاهش می‌یابد.



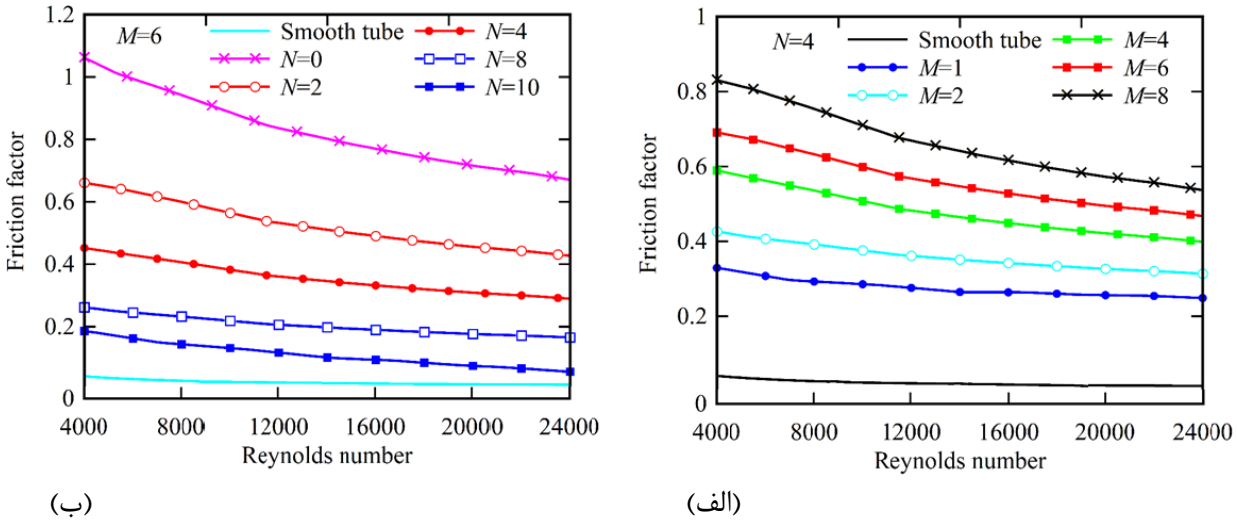
(ب) (الف)

شکل ۵ عدد ناسلت میانگین محاسبه شده برحسب عدد رینولدز

به ازای (الف) تعداد مختلف سوراخ‌های حلقه‌های مخروطی و (ب) مقادیر مختلف حلقه‌های مخروطی

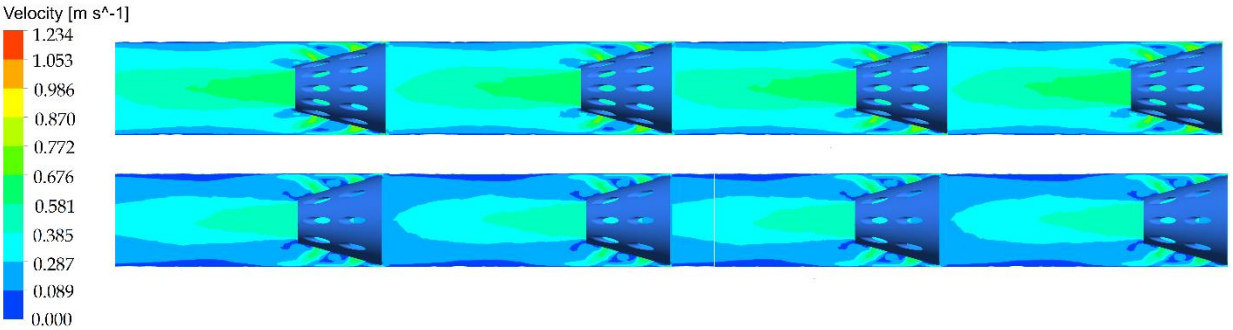
تأثیر تعداد حلقه‌های مخروطی و سوراخ‌های واقع بر روی آن بر فاکتور ضریب اصطکاک در شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین، نتایج برای لوله صاف نیز رسم شده است. مشاهده می‌شود با افزایش تعداد آشوبگرهای مخروطی و کاهش فاصله بین آنها ضریب اصطکاک به صورت محسوسی افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه با افزایش تعداد آشوبگرهای مخروطی مقاومت بیشتر در برابر جریان سیال به وجود خواهد آمد، بنابراین چنین نتیجه‌ای قابل توجیه است. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که فاکتور اصطکاک در لوله با افزایش تعداد سوراخ‌های آشوبگرهای مخروطی کاهش می‌یابد و در Re=4000 به ازای N=2، N=8 و N=10 به ترتیب در حدود ۳۷٪، ۷۶٪ و ۸۴٪ کمتر از حالت N=0 می‌باشد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



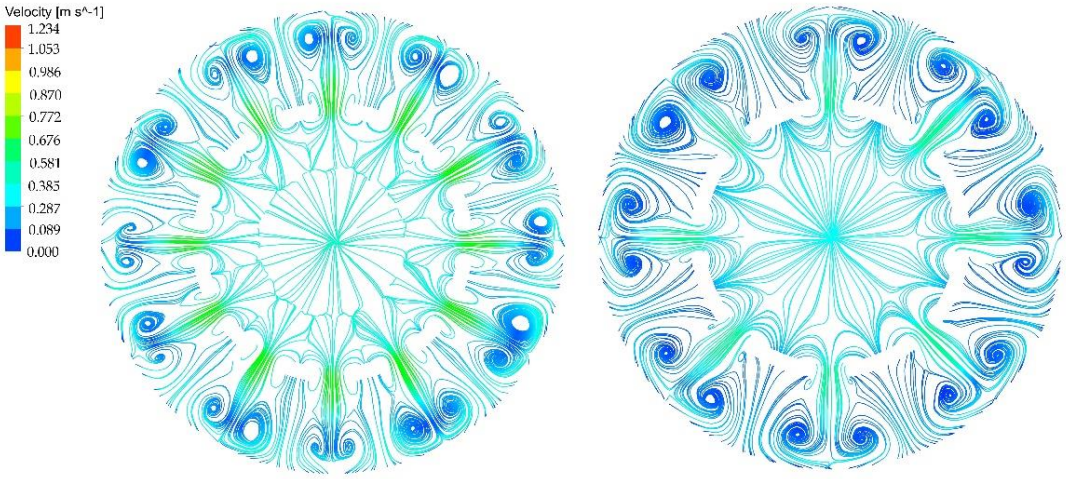
شکل ۶ ضریب اصطکاک محاسبه شده برحسب عدد رینولدز
به ازای (الف) مقادیر مختلف حلقه‌های مخروطی و (ب) تعداد مختلف سوراخ‌های حلقه‌های مخروطی

در شکل ۷ توزیع سرعت جریان در حالت M=4 و Re=۵۰۰۰ و در حالت‌های مختلف تعداد سوراخ‌های آشوبگرهای مخروطی نشان داده شده است. با توجه به این نتایج مشاهده می‌شود که افزایش تعداد سوراخ‌ها باعث کاهش موانع موجود در مقابل جریان سیال شده و در نتیجه آن عدد ناسلت و ضریب اصطکاک مبدل حرارتی لوله‌ای با آشوبگرهای مخروطی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، همانطور که مشاهده می شود با کاهش تعداد سوراخ‌ها سرعت خروجی سیال از این حفره‌های بیشتر بوده و در نتیجه آن به علت ایجاد تلاطم بیشتر در نواحی اطراف آشوبگرهای مخروطی عدد ناسلت افزایش می‌یابد. این رفتار دلیل افزایش عدد ناسلت میانگین با کاهش تعداد سوراخ‌ها که در شکل ۵ نشان داده شده است را تصدیق می‌کند. به منظور بررسی دقیق‌تر، در شکل ۸ خطوط سرعت جریان در سطح میانی حلقه‌های مخروطی ارائه شده با تعداد 4، 8 و 10 سوراخ در Re=15000 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در این حالت‌های حداکثر سرعت به ترتیب برابر 0.97 m/s، 0.78 m/s و 0.65 m/s می‌باشد که نشان می‌دهد با افزایش تعداد سوراخ‌ها از 4 به 10 حداکثر سرعت خروجی سیال ۳۳ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۷ توزیع سرعت جریان در حالت‌های مختلف تعداد سوراخ‌های آشوبگر مخروطی به ازای Re=15000 و M=4

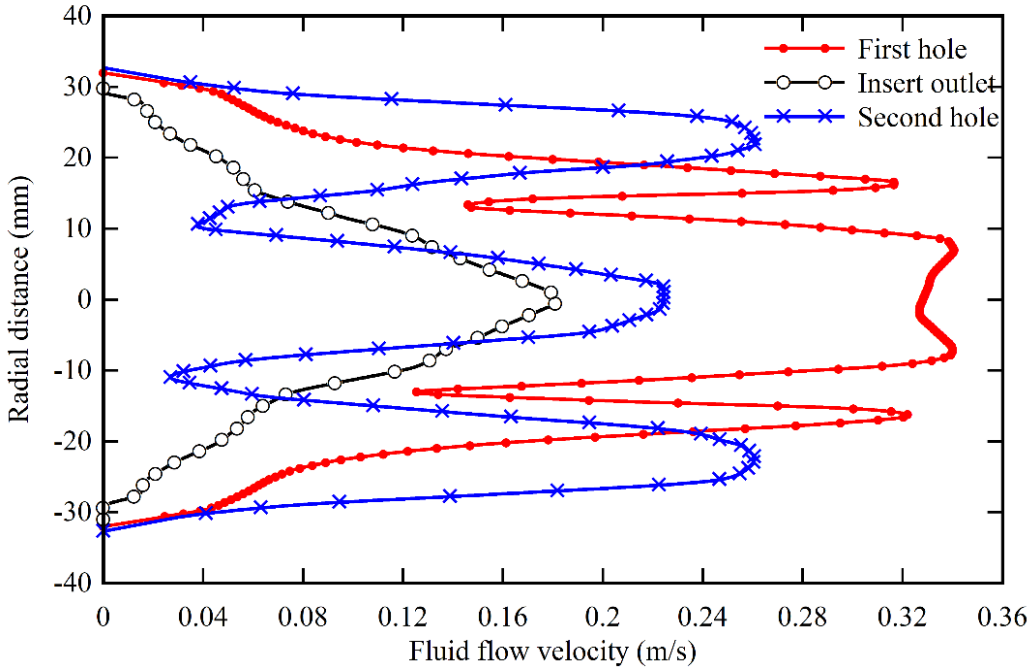
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



(ب) (الف)

شکل ۸ خطوط سرعت جریان در سطح میانی آشوبگرهای مخروطی ارائه شده به ازای (الف) N=8 و (ب) N=12

پروفیل‌های سرعت نشان داده شده در شکل ۹ نیز نشان می‌دهد سرعت خروجی سیال در حفره‌های دارای حداکثر مقدار بوده و با پیشروی در طول آشوبگر سرعت سیال کاهش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود سرعت خروج جریان سیال از حفره‌ها بیشتر بوده و این امر باعث افزایش شدت توربولانسی و انتقال سیال از ناحیه میانی به نواحی مرزی با جداره می‌شود. افزایش گردابه‌های جریان ایجاد شده در نزدیک دیواره‌های آشوبگر طلاطم جریان را افزایش می‌دهد و این باعث برهم ریخته شدن لایه مرزی حرارتی در نواحی نزدیک دیواره لوله می‌شود. این نوع جریان عامل اصلی در افزایش انتقال حرارت در مبدل‌های لوله‌ای مجهز به آشوبگر مخروطی تحت بررسی در تحقیق حاضر می‌باشد.

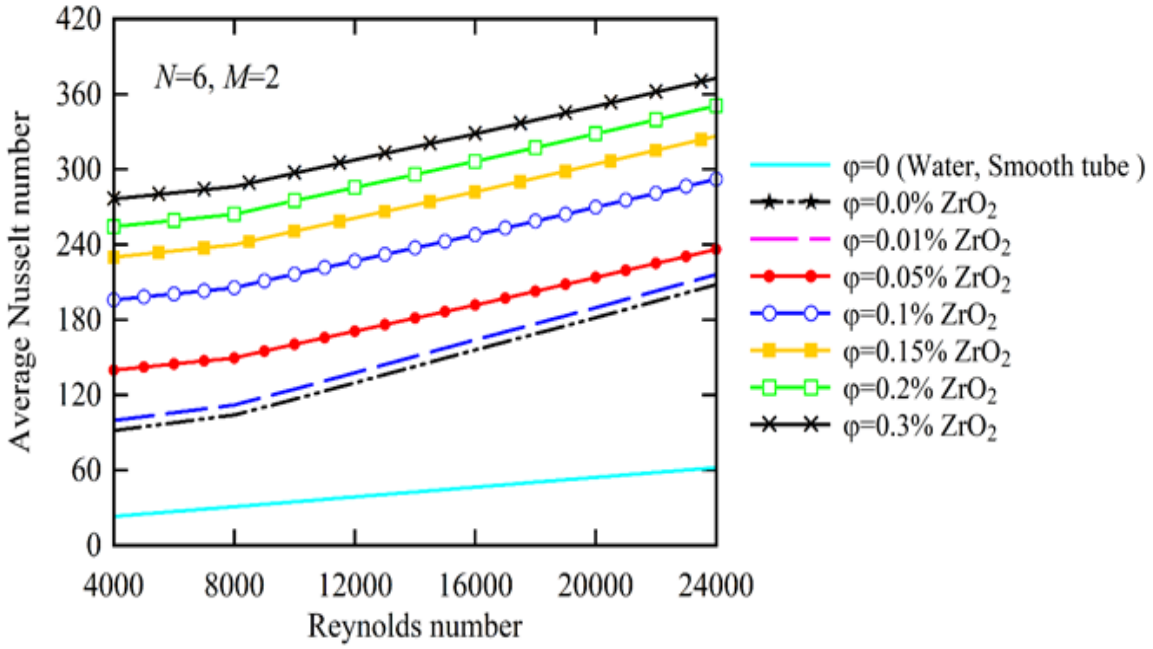


شکل ۹ پروفیل سرعت جریان سیال در محل آشوبگر به ازای N=4 و Re=4000

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

۵-۳ تأثیر میزان نانوذرات اکسید زیرکونیوم

در شکل ۱۰ تأثیر کسر حجمی نانوذرات اکسید زیرکونیوم بر عدد ناسلت مبدل حرارتی لوله‌ای با آشوبگرهای مخروطی سوراخ‌دار به ازای M=2 و N=6 نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که حضور نانوذرات منجر به افزایش ضریب هدایت گرمایی سیال می‌گردد و در نتیجه ضریب انتقال گرما و عدد ناسلت افزایش می‌یابد. با افزایش کسر حجمی نانوذرات اکسید زیرکونیوم از صفر درصد تا ۰/۲ درصد، عدد ناسلت در Re=5000 در حدود ۲۰۳ درصد افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد در این مبادله کن‌های گرمایی به ازای رینولدزهای بیشتر از ۸۰۰۰، نرخ تأثیر نانوذرات بر افزایش عدد ناسلت با تغییرات عدد رینولدز افزایش می‌یابد که یکی از دلایل آن می‌تواند همگن‌تر بودن نانوسیال در رینولدزهای بالا به دلیل اغتشاش بیشتر باشد. همچنین، تأثیر مثبت حرکت بروانی را می‌توان علت دیگر افزایش عدد ناسلت نانوسیال دانست. حرکات بی‌نظم و تصادفی نانوذرات درون سیال سبب می‌شود که توسعه لایه مرزی حرارتی به تأخیر افتاده و این امر منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت خواهد شد. همچنین، مشاهده می‌شود افزایش عدد رینولدز باعث بیشتر شدن عدد ناسلت می‌شود. به عنوان مثال عدد ناسلت میانگین با افزایش عدد رینولدز از ۵۰۰۰ به ۱۰۰۰۰ در حضور سیال آب و نانوسیال با کسر جرمی ۰/۵ درصد به ترتیب حدود ۲۳٪ و ۱۲٪ افزایش می‌یابد. با مقایسه منحنی‌های مربوط به لوله‌های مجهز به آشوبگر دارای سیال پایه آب و حالت نانوسیال با ۰/۵ درصد مشاهده می‌شود که آشوبگر ارائه شده در این تحقیق نسبت به استفاده از نانوذرات، تأثیر بیشتری بر افزایش عدد ناسلت میانگین دارد.

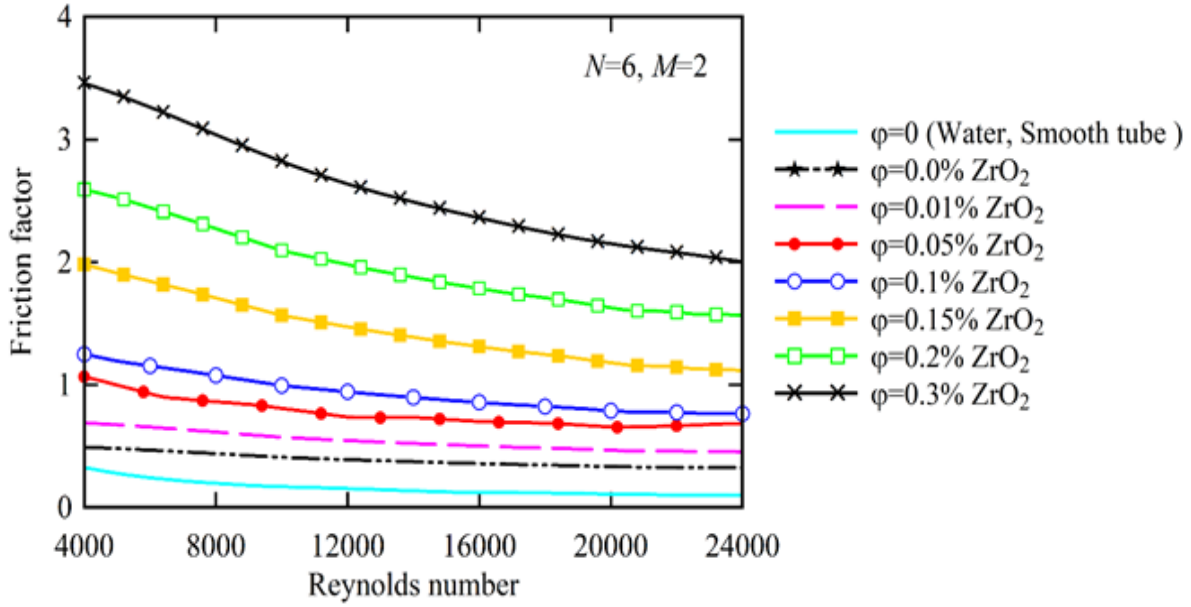


شکل ۱۰ تأثیر کسر حجمی نانوذرات اکسید زیرکونیوم بر عدد ناسلت مبدل حرارتی لوله‌ای با حلقه مخروطی سوراخ‌دار

شکل ۱۱، تغییرات ضریب اصطکاک را برحسب عدد رینولدز برای آب و نانوسیال اکسید زیرکونیوم و در غلظت‌های وزنی مختلف برای مبدل حرارتی لوله‌ای دارای آشوبگر مخروطی و به ازای M=2 و N=6 نشان

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

می‌دهد. مشاهده می‌شود فاکتور اصطکاک با افزایش عدد رینولدز ضریب اصطکاک برای آب خالص و نانوسیال کاهش می‌یابد. افزودن نانوذرات به سیال پایه سبب افزایش لزجت و در پی آن افزایش مقدار افت فشار است به طوری که با زیاد شدن غلظت حجمی نانوسیال ضریب اصطکاک افزایش پیدا می‌کند. در Re=4000 با افزاش نانوذرات به ۱٪، فاکتور اصطکاک ۱۷۰ درصد بیشتر می‌شود.

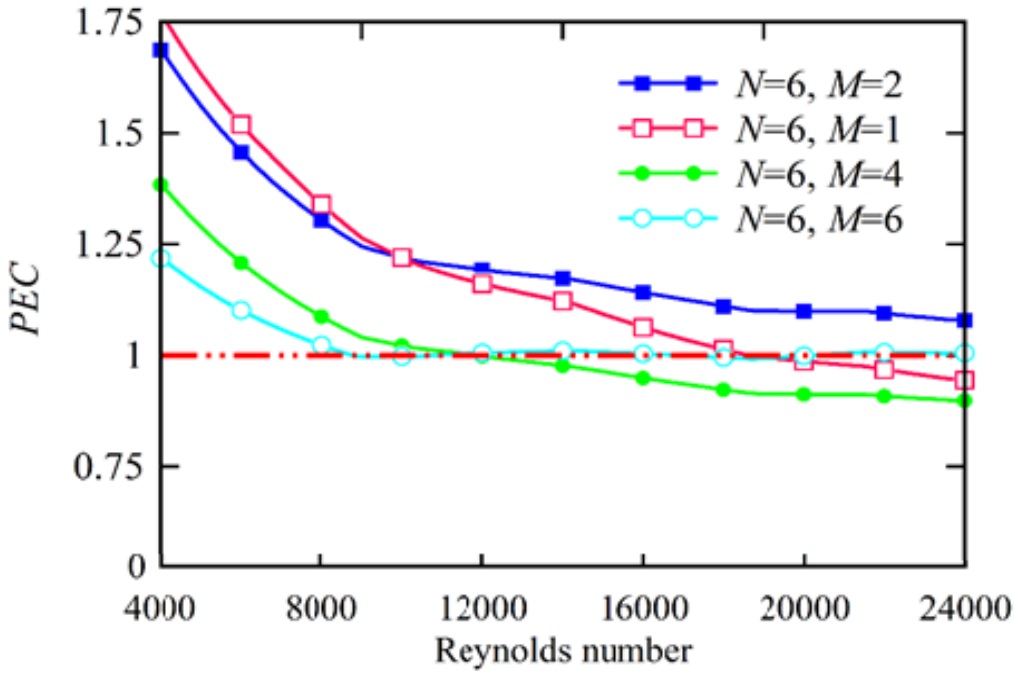


شکل ۱۱ تأثیر کسر حجمی نانوذرات اکسید زیرکونیوم بر ضریب اصطکاک مبدل حرارتی لوله‌ای با حلقه مخروطی سوراخ‌دار

۴-۵ ضریب عملکرد حرارتی (PEC)

در شکل ۱۲ ضریب عملکرد حرارتی مبدل لوله دارای آشوبگر مخروطی ارائه شده در این تحقیق، در بعضی حالت‌های تحت بررسی نشان داده شده است. هر چند بیان که آشوبگر ارائه شده در حالت کلی باعث افزایش محسوسی در عدد ناسلیت می‌شود، ولی با توجه به نتایج شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که این نتیجه در خصوص ضریب عملکرد حرارتی صادق نمی‌باشد. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که بسته به شرایط کارکردی مبدل، مقادیر مناسب برای پارامترهای هندسی آشوبگر وجود دارد که به ازای آن عملکرد حرارتی دارای حداکثر مقدار خواهد بود. به عنوان مثال در شرایط Re<8800 آشوبگر با M=1 و N=6 عملکرد مطلوبی دارد و به ازای Re>8800 آشوبگر با M=2 و N=6 عملکرد مطلوبی از خود نشان می‌دهد. همچنین، اگر Re>7500 باشد در اینصورت آشوبگر با مشخصه‌های M=6 و N=6 تأثیر بر عملکرد حرارتی نداشته و آشوبگر با مشخصه‌های M=4 و N=6 تأثیر منفی بر عملکرد حرارتی خواهد داشت.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



شکل ۱۲ ضریب عملکرد حرارتی مبدل لوله دارای آشوبگر مخروطی سوراخ‌دار

۶- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر با استفاده از روش عددی به بررسی انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی لوله‌ای حامل نانوسیال آب/اکسید زیرکونیوم و مجهز به نوع جدیدی از آشوبگرهای مخروطی شکل دارای دو ردیف سوراخ بر روی آنها پرداخته شد. بدین منظور، تأثیر تعداد آشوبگرها، تعداد سوراخ‌های واقع بر روی آن و کسر حجمی نانوذرات ($0<\phi<0.2\%$) بر روی فاکتور اصطکاک، عدد ناسلیت میانگین، ضربی عملکرد حرارتی در محدوده عدد رینولدز 4000 تا 24000 مطالعه شد. شبیه‌سازی نانوسیال با استفاده از مدل دوفازی صورت پذیرفته است. خلاصه‌ای از نتایج مهم تحقیق حاضر به صورت زیر می‌باشد:

- استفاده از آشوبگرهای مخروطی سوراخ‌دار با ایجاد جریان‌های گردشی‌مجدد و جدایشی در حضور نانوسیال باعث بهبود انتقال حرارت در نتیجه برهم زدن لایه مرزی حرارتی و ایجاد ختلال بیشتر در جریان سیال در طول مبدل حرارتی لوله‌ای می‌شود.
- عدد ناسلیت در رینولدز 4000 و به ازای N=0, 4, 8, 12 به ترتیب 6.5، 5.3، 4.7 و 2.3 برابر افزایش می‌یابد. بنابراین، این نوع آشوبگرهای مخروطی تأثیر بسیار چشمگیری بر افزایش عدد ناسلت داشته و با افزایش تعداد سوراخ‌ها عدد ناسلت کاهش می‌یابد.
- مشاهده می‌شود که فاکتور اصطکاک در لوله با افزایش تعداد سوراخ‌های آشوبگرها کاهش می‌یابد و در Re=4000 به ازای N=2، N=8 و N=10 به ترتیب در حدود ۳۷٪، ۷۶٪ و ۸۴٪ کمتر از حالت N=0 می‌باشد.
- آشوبگرهای ارائه شده در این تحقیق در صورت تعیین مناسب پارامترها می‌تواند عملکرد حرارتی را تا ۷۶ درصد نسبت به لوله صاف افزایش دهند. حداکثر ضریب عملکرد حرارتی برابر 1.76 در حالت M=1، N=1 و Re=4000 به دست آمده است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

مراجع

[1] Outokesh, M., Ajarostaghi, S. S. M., Bozorgzadeh, A., Sedighi, K., (2020). Numerical evaluation of the effect of utilizing twisted tape with curved profile as a turbulator on heat transfer enhancement in a pipe. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. **140**(3), pp. 1537-1553.

[2] Nakhchi, M., Esfahani, J., (2019). Numerical investigation of different geometrical parameters of perforated conical rings on flow structure and heat transfer in heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*. **156** pp. 494-505.

[3] Kongkaitpaiboon, V., Nanan, K., Eiamsa-Ard, S., (2010). Experimental investigation of heat transfer and turbulent flow friction in a tube fitted with perforated conical-rings. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. **37** (5), pp. 560-567.

[4] Yakut ,K., Sahin, B., Canbazoglu, S., (2004). Performance and flow-induced vibration characteristics for conical-ring turbulators. *Applied Energy*. **79** (1), pp. 65-76.

[5] Durmuş, A., (2004). Heat transfer and exergy loss in cut out conical turbulators. *Energy Conversion and Management*. **45** (5), pp. 785-796.

[6] Promvonge, P., (2008). Heat transfer behaviors in round tube with conical ring inserts. *Energy Conversion and Management*. **49** (1), pp. 8-15.

[7] Promvonge, P., Eiamsa-ard, S., (2006). Heat transfer enhancement in a tube with combined conical-nozzle inserts and swirl generator. *Energy Conversion and Management*. **47** (18), pp. 2867-2882.

[8] Chen, H., Ayed, H., Marzouki, R., Emami, F., Mahariq, I., Jarad, F., (2021). Thermal, hydraulic, exergitic and economic evaluation of a flat tube heat exchanger equipped with a plain and modified conical turbulator. *Case Studies in Thermal Engineering*. **28** pp. 101587.

[9] Abbaspour, M., Mousavi Ajarostaghi, S. S., Hejazi Rad, S. A., Nimafar, M., (2021). Heat transfer improvement in a tube by inserting perforated conical ring and wire coil as turbulators. *Heat Transfer*. **50** (6), pp. 6164-6188.

[10] Ibrahim, M. M., Essa, M. A., Mostafa, N. H., (2019). A computational study of heat transfer analysis for a circular tube with conical ring turbulators. *International Journal of Thermal Sciences*. **137** pp. 138-160.

[11] Sheeba, A., Akhil, R., Prakash, M. J., (2020). Heat transfer and flow characteristics of a conical coil heat exchanger. *International Journal of Refrigeration*. **110** pp. 268-276.

[12] Xiong, Q., Izadi, M ,.Shehzad, S., Mohammed, H. A., (2021). 3D numerical study of conical and fusiform turbulators for heat transfer improvement in a double-pipe heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. **170,** pp. 120995.

[13] Srivastava, G. P., Patil, A. K ,.Kumar, M., (2022). Heat transfer enhancement and entropy generation analysis of a tube with perforated conical inserts. *Experimental Heat Transfer*. **35** (6), pp. 864-883.

[14] Esfe, M. H., Kamyab, M. H., Toghraie, D., (2022). Statistical review of studies on the estimation of thermophysical properties of nanofluids using artificial neural network (ANN). *Powder Technology*. pp. 117210.

[15] Mehta, B., Subhedar, D., (2022). Review on mechanism and parameters affecting thermal conductivity of nanofluid. *Materials Today :Proceedings*. **56** pp. 2031-2037.

[16] Mehta, B., Subhedar, D., Panchal, H., Said, Z., (2022). Synthesis, stability, thermophysical properties and heat transfer applications of nanofluid–a review. *Journal of Molecular Liquids*. pp. 120034.

[17] Pak, B. C., Cho, Y. I., (1998). Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer an International Journal*. **11** (2), pp. 151-170.

[18] Javaherdeh, K., Mozafarie, S. S., Zare Talab, z., (2019). Numerical simulation of heat transfer of turbulent flow for non-Newtonian nano fluid in a coiled double pipe heat exchanger. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. **53**(1), pp . 221-240.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[19] sharifi Asl, m., toghraie, d., Azimian, A., (2018). Numerical simulation of convective heat transfer in a turbulant non-Newtonian nanofluid flow through a horizontal circular tube. *Journal of Modeling in Engineering*. **16** (53), pp. 113-120.

[20] Radwan, M. S., Saleh, H. E., Attai, Y. A., Elsherbiny, M. S., (2020). On heat transfer enhancement in diesel engine cylinder head using γ-Al2O3/water nanofluid with different nanoparticle sizes. *Advances in Mechanical Engineering*. **12** (1), pp. 34-56.

[21] Çolak, A. B., (2021). Experimental study for thermal conductivity of water-based zirconium oxide nanofluid: Developing optimal artificial neural network and proposing new correlation. *International Journal of Energy Research*. **45** (2), pp. 2912-2930.

[22] Kolappan, S., Karthik, S., Logesh, K., Vasudevan, A., (2020). Thermal characterisation study of ZrO2/water nanofluid. *International Journal of Ambient Energy*. **41** (8), pp. 918-921.

[23] Tavakoli, M. R., Akbari, O. A., Mohammadian, A., Khodabandeh, E., Pourfattah, F., (2019). Numerical study of mixed convection heat transfer inside a vertical microchannel with two-phase approach. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. **135** (2), pp. 1119-1134.

[24] Esmaeili, H., Armaghani, T., Abedini, A., Pop, I., (2019). Turbulent combined forced and natural convection of nanofluid in a 3D rectangular channel using two-phase model approach. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. **135** (6), pp. 3247-3257.

[25] Ghaffari, O., Behzadmehr, A., Ajam, H., (2010). Turbulent mixed convection of a nanofluid in a horizontal curved tube using a two-phase approach. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. **37** (10), pp. 1551-1558.

[26] Hu, K.-X., Huang, Y., Zhang, X.-Y., Wang, S., Chen, Q.-S., (2021). The nanofluid flows in the channel with linearly varying wall temperature. *Case Studies in Thermal Engineering*. **28** pp. 101602.

[27] Barnoon, P., Toghraie, D ,.Eslami, F., Mehmandoust, B., (2019). Entropy generation analysis of different nanofluid flows in the space between two concentric horizontal pipes in the presence of magnetic field: single-phase and two-phase approaches. *Computers & Mathematics with Applications*. **77** (3), pp. 662-692.

[28] Launder BE, Spalding DB. Lectures in mathematical models of turbulence. London: Academic Press; 1972.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

Numerical investigation of the effect of incomplete cone-shaped agitators on improving the heat transfer of tubular heat exchangers with water/zirconium oxide nanofluid

Ali Mohadjer [1], Mohammad Hassan Nobakhti [2,*], Alireza Nezamabadi [3]

1- Department of Mechanical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.
*2- Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
3- Department of Mechanical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.

Received: August 2023 Accepted: November 2023

Abstract

Considering the importance of improving heat transfer in heat exchangers, the effect of simultaneous use of agitators and also zirconium oxide nanoparticles on the heat transfer of tubular heat exchanger is studied numerically. For this purpose, at first, a new type of incomplete conical agitator with two parallel rows of holes is presented. Then, using the computational fluid dynamics method, heat transfer equations have been solved in the range of Reynolds numbers 4000 to 24000 and also the amount of zirconium oxide nanoparticles from 0.01% to 0.2%. In order to increase the modeling accuracy, the nanofluid has been simulated in a two-phase form. The effect of parameters such as the number of agitators, the number of holes and the volume fraction of nanoparticles on the flow field, the average Nusselt number, the friction factor and the thermal performance coefficient have been investigated. The results show that the use of perforated agitators in the flow path leads to significant changes in the flow characteristics and heat transfer. Perforated conical agitators improve heat transfer by creating recirculation and separation currents in the presence of nanofluid as a result of disrupting the thermal boundary layer and causing more disturbance in the fluid flow during the tubular heat exchanger. The agitators presented in this research can increase the thermal performance by 76% compared to the smooth pipe if the parameters are determined properly. The maximum coefficient of thermal performance is 1.76 in the case of M=1, N=1 and Re=4000.

Key words: Incomplete conical agitators, zirconium oxide nanoparticles, two-phase model, heat transfer, thermal performance coefficient.

*corresponding author: **m.nobakhti@srbiau.ac.ir**

Cite this article as: Ali Mohadjer, Mohammad Hassan Nobakhti, Alireza Nezamabadi, Numerical investigation of the effect of incomplete cone-shaped agitators on improving the heat transfer of tubular heat exchangers with water/zirconium oxide nanofluid. Journal of Energy Conversion, 2023, 10(3), 79-95.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]