

بررسی تجربی عملکرد هیدروترمودینامیکی مبدل حرارتی دولوله‌ای با استفاده از نانوسیال و نوار تابیده دوگانه

مطالعه حاضر به بررسی تجربی عملکرد هیدروترمودینامیکی مبدل حرارتی دو لوله ای با نوار تابیده دوگانه با سه گام متفاوت ۳،۵، ۵ و ۷ سانتیمتر با استفاده از جریان آشفته نانوسیال آب-اکسید منیزیم در کسرهای حجمی ۰،۷٪ و ۱٪ پرداخته است. نتایج این پژوهش در رینولدز ۱۶۰۰۰ برای کسر حجمی ۰،۷٪ حدود ۴۸٪ و برای کسر حجمی ۱٪ حدود ۵۳٪ افزایش در انتقال حرارت جابجایی را نشان می دهد. همچنین استفاده هم زمان از نانوسیال اکسید منیزیم و نوارهای تابیده دوگانه با گام ۳،۵ cm در عدد رینولدز ۶۴۰۰ در مقایسه با سایر نتایج اثر بخشی بهتری را نشان می دهد که در این حالت معیار ارزیابی عملکرد افزایش ۸۰ درصدی نسبت به حالت پایه را نشان می دهد.

امین نعمت زاده^۱

کارشناسی ارشد

اشکان غفوری^۲

استادیار

علی فلاوند جوزایی^۳

استادیار

واژه های راهنما: نانوسیال، مبدل حرارتی دو لوله ای، نوار تابیده دوگانه، ضریب انتقال حرارت جابجایی

۱- مقدمه

مبدل های حرارتی کاربردهای وسیعی در صنایع شیمیایی، تولید برق، صنایع غذایی، مهندسی محیط زیست، بازیافت انرژی، تهویه هوا و سیستم تبرید دارند. امروزه با پیشرفت تکنولوژی از جمله در فرآیندهای صنعتی، نیاز به مبدل های حرارتی با بازده و کارایی بالاتر بیشتر احساس می شود. افزایش سطح انتقال حرارت یکی از روش های مرسوم در افزایش نرخ انتقال حرارت است [۱]. محققان از روش های متفاوتی جهت افزایش کارایی مبدل های حرارتی استفاده می کنند تا بتوانند در حجم های کوچکتر از مبدل های حرارتی، بیشترین مقدار انتقال حرارت را داشته باشند. این روش ها معمولاً به دو گروه فعال و غیرفعال تقسیم می شوند. در روش های فعال از نیروهای خارجی مانند میدان مغناطیسی یا الکترواستاتیکی و چرخشی برای برهم زدن لایه مرزی و افزایش آشفته‌گی برای بهبود انتقال حرارت استفاده می گردد.

^۱ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران nematzadeh.amin@yahoo.com

^۲ نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران a.ghafouri@iauahvaz.ac.ir

^۳ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران falavand78@yahoo.com

استفاده از نیروهای خارجی معمولاً پر هزینه است. روش های غیرفعال شامل روش های اصلاح خواص سیالات، شکل سطح، زبری، افزودنی های خارجی به سیال برای بهبود انتقال حرارت و یا استفاده از تجهیزات درون لوله ای برای ایجاد آشفتگی در جریان می باشد. روش های غیر فعال بدلیل هزینه کمتر، مورد توجه بیشتری قرار گرفته اند [۲]. پایین بودن هدایت حرارتی سیالاتی مانند آب، مواد معدنی و اتیل گلیکول، مانع کارایی بالای مبدل ها می شود. جهت افزایش توان انتقال حرارت این نوع از سیالات، از ذرات ریز جامد معلق که ضریب هدایت حرارتی بالایی دارند استفاده می شود. انواع مختلف ذرات فلزی، غیر فلزی و پلیمری می توانند برای تشکیل نانوسیال به سیالات پایه اضافه شوند [۳]. اسماعیل زاده و همکاران [۴] بر کاربرد نوار تابیده شده برای افزایش انتقال حرارت پرداختند. نتایج پژوهش ایشان نشان می دهد که نوارهای تابیده شده تاثیر قابل توجهی بر افزایش انتقال حرارت و اصطکاک سطحی دارد، زیرا نوار تابیده شده میزان شدت آشفتگی را افزایش می دهد. ژو و همکاران [۵] مدل و خصوصیات حرارتی نانوذره اکسید روی در سیال پایه روغن را بررسی کردند و نشان دادند که در کسر حجمی ۰٫۵٪ انتقال حرارت به میزان ۹٪ افزایش یافته است که در این آزمایش، ضریب هدایت حرارتی به روش سیم داغ گذرا اندازه گیری شد. شیخ الاسلامی و گنجی [۶] به بررسی روش های افزایش انتقال حرارت با تمرکز بر روش های غیر فعال با استفاده از دستگاه های جریان چرخشی پرداختند. بهویا و همکاران [۷] به مطالعه تقویت انتقال حرارت در یک لوله دایره ای با قرار دادن نوارهای تابیده دوگانه خلاف جهت پرداختند. این مطالعه با استفاده از هوا به عنوان سیال عامل در شرایط مرزی شار حرارت دیوار ثابت انجام شد. افزایش بازده حرارتی لوله مجهز به نوارهای دوگانه تابیده سوراخدار در قدرت دمنده ثابت به حدود ۱٫۰۸ تا ۱٫۴۴ رسید.

جایپال و همکاران [۸] به مطالعه میزان افزایش انتقال حرارت در یک مبدل دو لوله ای با نوارتابیده در جریان های متفاوت با تغییر در عدد رینولدز بین محدوده ۶۰۰ تا ۱۶۰۰ و در حالت شار ثابت پرداختند که در مطالعه آنها انتقال حرارت به میزان ۲۱٫۴٪ افزایش یافت. وارون و همکاران [۹] به بررسی تجربی و عددی انواع صفحات میانی با تمرکز بر انتقال حرارت آنها پرداختند که نشان دادند استفاده از صفحات میانی با اشکال متفاوت باعث افزایش انتقال حرارت می شود. سان و همکاران [۱۰] به صورت تجربی با وارد کردن نوار تابیده دوگانه V شکل و با استفاده از هوا به عنوان سیال عامل در یک مبدل حرارتی دو لوله ای نشان داد که انتقال حرارت و اصطکاک بر نوار تابیده وابسته به زاویه حمله می باشد.

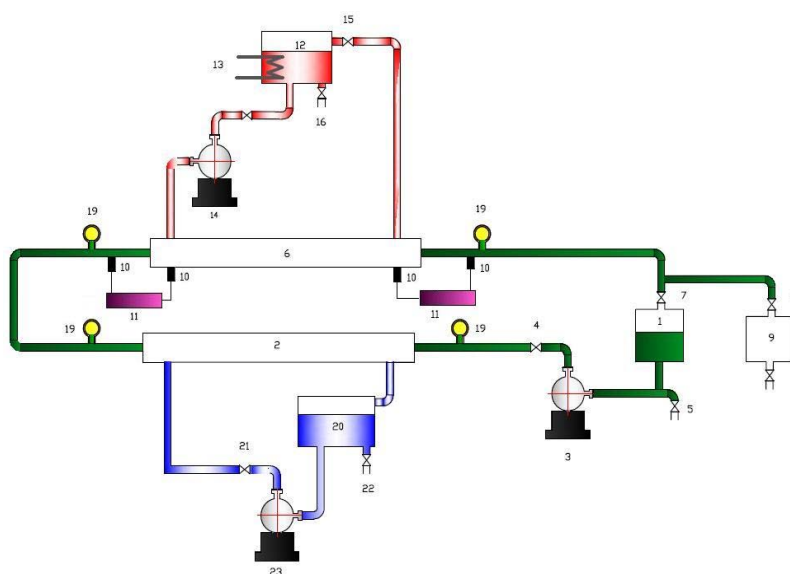
آکیورک و همکاران [۱۱] به مطالعه تجربی بر روی یک مبدل حرارتی دو لوله ای با قراردادن یک آشوبگر فنی و با استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) پرداختند و به این نتیجه رسیدند که زمانی که از آشوبگر فنی استفاده می شود، مقدار غلظت نانوذرات بر ضریب انتقال حرارت تاثیر چشم گیری دارد و افت فشار و همچنین ضریب انتقال حرارت را افزایش می دهد. سارادا و همکاران [۱۲] به صورت تجربی با قراردادن نوارهای تابیده دوگانه به درون یک مبدل دو لوله ای با طول گام های متفاوت و عرض های متفاوت بین اعداد رینولدز ۶۰۰۰ تا ۱۳۵۰۰ به صورت متغیر نشان دادند که در عرض ۳۶ میلی متری افزایش ۴۸٪ در بهبود عملکرد در عدد ناسلت و افت فشار با عرض های پهن مشاهده شده است. گورواتانا و اسکولونگ [۱۳] به مطالعه تقویت انتقال حرارت در یک مبدل دو لوله ای با استفاده از یک نوار به همراه ایروفویل های اصلاح شده پرداختند و دو زاویه ۳۰ و ۴۵ درجه را برای بهبود عملکرد انتقال حرارت در یک مبدل حرارتی قرار داده و

نشان دادند که انتقال حرارت، ضریب اصطکاک و معیار ارزیابی عملکرد تابعی از عدد رینولدز جریان است. یولین و همکاران [۱۴] جریان همرفتی آزاد بین چندین لوله گرم و سرد متفاوت، محاصره شده در فضایی بین دو استوانه کواکسیال آدیاباتیک افقی که با سه نوع مختلف از نانوسیالات پر شده را بررسی کردند و دریافتند استفاده از نانوسیال منجر به تقویت قابل توجه انتقال حرارت در حفره مورد مطالعه می‌شود. جاناناول و همکاران [۱۵] از روش منفعل برای افزایش انتقال حرارت در مبدل حرارتی لوله دوتایی استفاده و چهار نانوسیال مختلف برای بررسی در نظر گرفتند و دریافتند استفاده از نانوسیالات در این روش موجب افزایش چشم‌گیر میزان انتقال حرارت می‌شود. فریدی و غفوری [۱۶] در یک مطالعه عددی انتقال حرارت و ویژگی‌های جریان برای دو لوله مجهز به دو صفحه مارپیچ را مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند استفاده از نانوسیالات، توزیع دمای دیواره را بهبود بخشیده و باعث افزایش قابل توجه در هدایت حرارتی شده است. آوایس و همکاران [۱۷] به بررسی تأثیر انواع جریان حجمی مختلف و نانوسیالات متفاوت در انتقال حرارت و ویژگی‌های افت فشار درون یک مبدل حرارتی لوله‌ای پرداختند و دریافتند که استفاده از نانوسیالات موجب بهبود قابل توجه انتقال حرارت می‌شود.

با توجه به پژوهش‌های پیشین صورت گرفته، در این پژوهش تأثیر استفاده از نوارهای تابیده دوگانه و همچنین نانوسیال اکسید منیزیم با غلظت‌های ۰٫۷٪ و ۱٪ بر ضریب انتقال حرارت، ضریب اصطکاک و معیار ارزیابی عملکرد و همچنین بررسی اثر عدد رینولدز و اثر گام نوار تابیده استفاده شده درون لوله بر انتقال حرارت و افت فشار مورد مطالعه قرار می‌گیرد که مطابق بررسی‌های انجام شده این کار تاکنون انجام نشده است.

۲- هندسه مورد مطالعه

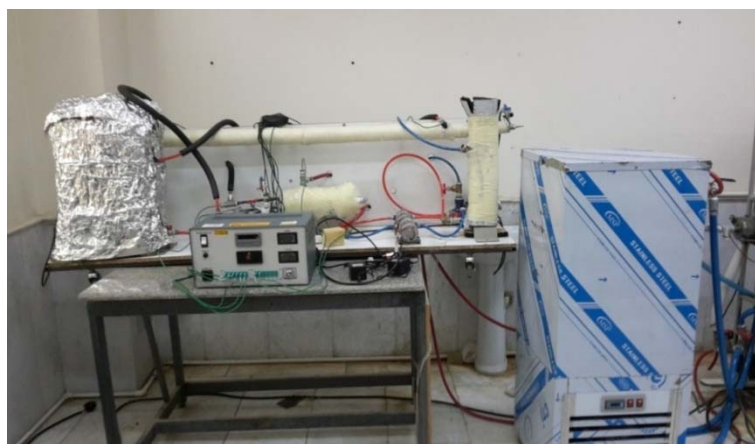
جهت انجام پژوهش دستگای طراحی و ساخته شده است که مدار آن در شکل (۱) قابل مشاهده می‌باشد و اجزای آن به ترتیب شماره در جدول (۱) معرفی شده‌اند. همچنین تصویر واقعی دستگاه آزمایش در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۱- مدار دستگاه آزمایشگاهی جهت انجام پژوهش

جدول ۱- وسایل موجود در مدار دستگاه آزمایش

شماره	نام وسیله	شماره	نام وسیله
۱	مخزن نانوسیال	۱۳	گرم کن برقی
۲	مبدل پوسته و لوله	۱۴	پمپ آب گرم
۳	پمپ نانوسیال	۱۵	شیر برای تغییر دادن مسیر آب گرم برای دبی سنجی
۴	شیر مسیر کنار گذر برای تنظیم دبی نانوسیال	۱۶	شیر تخلیه آب گرم
۵	شیر تخلیه نانوسیال	۱۷	شیر تنظیم دبی آب گرم
۶	مبدل دو لوله ای	۱۸	شیر تخلیه مخزن
۷	شیر برای تغییر دادن مسیر نانوسیال برای دبی سنجی	۱۹	فشارسنج مدل آتونیکس
۸	شیر مخزن دبی سنجی برای نانوسیال	۲۰	مخزن آب سرد
۹	مخزن دبی سنجی برای نانوسیال	۲۱	شیر تنظیم دبی آب سرد
۱۰	ترموکوپل نوع K	۲۲	شیر تخلیه مخزن آب سرد
۱۱	دستگاه داده برداری (Date Logger)	۲۳	پمپ آب سرد
۱۲	مخزن آب گرم		

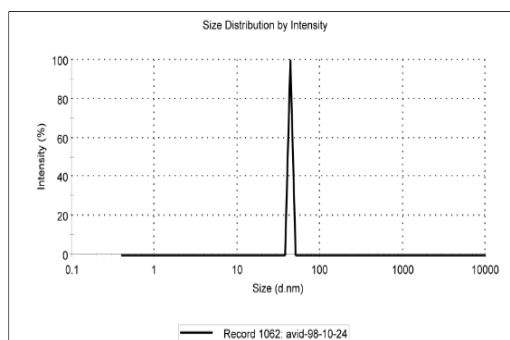


شکل ۲- تصویر واقعی دستگاه آزمایش

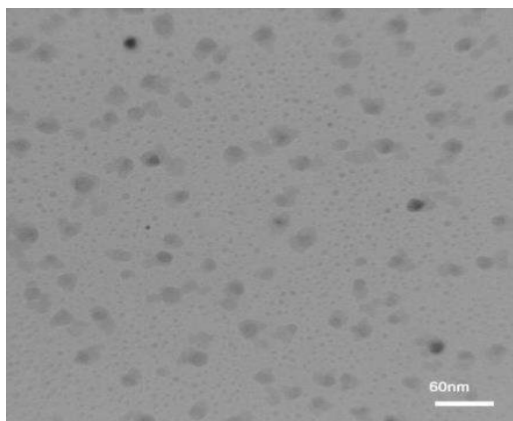


شکل ۳- نوارهای تابیده دوگانه استفاده شده داخل لوله

مبدل دولوله‌ای مورد استفاده در این آزمایش از یک لوله استنلس استیل به طول ۱۷۰ سانتی متر و قطر داخلی ۳۵ میلی متر و همچنین یک لوله استنلس استیل با طول ۲۰۰ سانتی متر و قطر داخلی ۱۷ میلی متر ساخته شده که به صورت هم مرکز و با جریان غیر همسو در داخل لوله اول قرارداد شده است. همچنین با توجه به معیار توسعه یافتگی گرمایی و هیدرولیکی جریان آشفته ($X/D \sim 10$)، از ورودی لوله تا ابتدای ناحیه مورد مطالعه ۱۰ cm فاصله در نظر گرفته شد. قطر داخلی هر دو لوله به اندازه‌ی کافی برای نصب ترموکوپل‌ها بزرگ است. با توجه به مقادیر انتخاب شده، طول ناحیه‌ی انتقال حرارت در مبدل ۱۷۰ cm به دست آمد. نوارهای تابیده دوگانه مورد استفاده از جنس آلومینیوم به ضخامت ۱ میلی متر و عرض ۱۶ میلی متر و طول گام‌های ۵، ۳، ۵ و ۷ سانتیمتر است. این نوارها طوری داخل لوله قرار می‌گیرند که کاملاً مماس با دیواره داخلی لوله باشند. شکل (۳) نمایی از نوارهای تابیده دوگانه را نمایش می‌دهد. آزمایشات در مبدل حرارتی دو لوله‌ای معمولی، لوله با نوارهای تابیده دوگانه با سیال پایه و نانوسیال با غلظت‌های ۰،۷ و ۱ درصد حجمی انجام شده است. دمای سیال گرم و سرد در ورودی‌ها با توسط چهار حسگر حرارتی اندازه‌گیری شده است. برای تنظیم دبی سیال به مبدل از یک شیر فلکه کشویی برنجی استفاده شده است. دبی جریان سیال گرم به صورت ثابت در نظر گرفته شده است. کلیه دماها در حالت پایا گزارش شده‌اند. در هر چهار حالت لوله خالی، لوله با نوار تابیده دوگانه با طول گام ۳،۵ سانتیمتر، لوله با نوار تابیده دوگانه با طول گام ۵ سانتی متر، لوله با نوار تابیده دوگانه با طول گام ۷ سانتی متر با سیال پایه و نانوسیال محاسبه شده است. برای کاهش اتلاف حرارتی تمام قسمت‌های خارجی مبدل توسط عایق حرارتی پوشانده شده است. برای تهیه و نمونه‌سازی اولیه نانوسیال ابتدا به مقدار ۵۰ سی سی آب دیونیزه را در یک بشر ریخته و سپس جهت ایجاد پایداری، نانو ذره همراه با سورفکتانت صمغ عربی به میزان جرم محاسبه شده (کمتر از یک دهم درصد) را درون بشر ریخته و به منظور پایداری نانوسیال، به مدت ۲۴ ساعت بر روی استریر با سرعت ۷۰۰ دور در دقیقه قرار داده، سپس جهت تعلیق نانوذرات به مدت زمان ۳ تا ۵ ساعت و با توان ۶۰۰ وات از دستگاه آلتراسونیک هموژنایزر، استفاده شد. کسر حجمی نانوذرات در این پژوهش ۰،۷٪ و ۱٪ در قطر ۴۰ نانومتر می‌باشد. این نمونه به مدت چند هفته پایدار ماند و هیچگونه ته نشینی مشاهده نشد. شکل (۴) نمایی از توزیع ذرات پس از همگن سازی را نشان می‌دهد. همچنین به منظور صحت از پایداری نانو سیال آب-اکسید منیزیم مورد نظر تصویر TEM تهیه شده که در شکل (۵) قابل مشاهده می‌باشد. همان گونه که در گزارش توزیع اندازه برحسب مشاهده می‌شود، می‌توان گفت که میانگین اندازه نانوذرات اکسید منیزیم ۴۳،۸ می‌باشد.



شکل ۴- گزارش توزیع اندازه ذرات برحسب شدت



شکل ۵- عکس TEM از نانوسیال آب-اکسید منیزیم با مقیاس ۶۰ nm

۳- روابط حاکم

در این بخش با توجه به دستگاه آزمایشگاهی طراحی شده، جریان آشفته و نانو ذرات مورد استفاده، روابط و معادلات حاکم بر مسئله، مدل های مورد استفاده جهت محاسبه خواص ترموفیزیکی آب دیونیزه و نانوسیال بکار رفته و همچنین روابط حاکم بر معیار ارزیابی عملکرد و درنهایت روابط اعتبارسنجی مساله بیان شده است.

۳-۱- روابط حاکم بر معادلات حل مسئله

بهترین روش برای ارزیابی عملکرد حرارتی سیستم مبدل حرارتی محاسبه عدد ضریب انتقال حرارت است. ضریب انتقال حرارت جابجایی از رابطه (۱) بدست می آید:

$$\bar{h} = \frac{mcp}{pL} \ln \left(\frac{T_s - T_{m,i}}{T_s - T_{m,o}} \right) \quad (1)$$

و همچنین میزان دمای T_s را از رابطه (۲) بدست آمده که متوسط لگاریتمی دماهای نمایش داده شده است:

$$LMTD = \frac{(T_{hi} - T_{ce}) - (T_{he} - T_{ci})}{\ln \left(\frac{T_{hi} - T_{ce}}{T_{he} - T_{ci}} \right)} \quad (2)$$

عدد ناسلت متوسط محاسبه شده را می توان از رابطه (۳) محاسبه کرد:

$$Nu = \frac{\bar{h}d}{k} \quad (3)$$

h ضریب انتقال حرارت، D قطر داخلی لوله آزمایش و k ضریب هدایت حرارتی است. همانند ضریب انتقال حرارت، ضریب اصطکاک در بخش تست از طریق رابطه (۴) محاسبه می شود:

$$\Delta p = f \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

با ساده سازی رابطه (۴) ضریب اصطکاک بدست آمده به شرح رابطه (۵) می باشد:

$$f = \frac{2}{\left(\frac{L}{D}\right)} \frac{\Delta P}{\rho V^2} \quad (5)$$

f ضریب اصطکاک، ΔP افت فشار اندازه گیری شده نانوسیال، L طول لوله، ρ چگالی نانوسیال و V سرعت متوسط است. در نهایت ضریب اصطکاک را می توان از رابطه (۶) محاسبه نمود:

$$f = \frac{\Delta P}{1/2 \rho V^2} \frac{D}{L} \quad (6)$$

همچنین عدد رینولدز و عدد پرانتل به صورت رابطه های (۷) و (۸) است:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (7)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{K} \quad (8)$$

که در آن چگالی سیال، V سرعت مرجع، D طول مشخصه، c_p ظرفیت گرمایی ویژه و μ لزجت سیال است.

۳-۲- روابط حاکم بر خواص نانوسیال آب-اکسید منیزیم

برای به دست آوردن ρ_{nf} نانوسیال از رابطه (۹) استفاده می شود [۱۸].

$$\rho_{nf} = \varphi \rho_{np} + (1 - \varphi) \rho_f \quad (9)$$

که در رابطه (۹)، φ کسر حجمی نانوسیال، ρ_{np} چگالی نانوذرات و ρ_f چگالی سیال پایه می باشد. همچنین

برای به دست آوردن Cp_{nf} نانوسیال از رابطه (۱۰) استفاده می شود [۱۸].

$$Cp_{nf} = \frac{\varphi \rho_{np} c_{p,np} + (1-\varphi) \rho_f c_{p,f}}{\rho_{nf}} \quad (10)$$

که در رابطه (۱۰)، ρ_{np} چگالی نانوذرات، ρ_{nf} چگالی نانوسیال، و ρ_f چگالی سیال پایه می باشد. برای بدست آوردن μ_{nf} برای نانوسیال از رابطه (۱۱) استفاده می شود برای نانو ذرات اکسید منیزیم با پایه آب در یک آزمایش تجربی به دست آمده است [۱۹].

$$\mu_{nf} = (1 + 11.61\varphi + 109\varphi^2) \mu_f \quad (11)$$

که در رابطه (۱۱)، μ_f سیال پایه و φ کسر حجمی نانو ذرات می باشد. این رابطه برای محدوده دمایی ۲۵ تا ۵۰ مناسب ارزیابی شده است.

برای بدست آوردن k_{nf} برای نانوسیال از رابطه (۱۲) استفاده می شود که برای نانوذرات اکسید منیزیم با پایه آب از طریق تجربی به دست آمده است [۲۰]. این رابطه برای محدوده دمایی ۲۴,۷ تا ۶۰ مناسب ارزیابی شده است.

$$\frac{K_{eff}}{k_f} = \frac{K_p + 2K_w + 2\phi(K_p - K_w)(1 + \beta)^3}{K_p + 2K_w - \phi(K_p - K_w)(1 + \beta)^3} \quad (12)$$

K_{nf} رسانایی گرمایی نانوسیال، K_p رسانایی گرمایی نانوذرات، K_w رسانایی گرمایی سیال پایه و ϕ درصد کسر حجمی نانوسیال و β نسبت ضخامت لایه نانویی به شعاع اولیه ذره است. معمولاً برای محاسبه رسانایی گرمایی نانوسیال از مقدار $\beta = 0.1$ استفاده می شود. ویژگی های نانوسیال که در معادله بالا نشان داده شده از آب و نانو ذرات در دمای متوسط کل به دست می آید که این رابطه بسیار نزدیک تر و دارای خطای کمتر نسبت به بقیه روابط موجود برای ترکیب آب-اکسید منیزیم می باشد.

۳-۳- روابط حاکم بر خواص آب دیونیزه (سیال پایه)

در این پژوهش برای بدست آوردن خواص سیال پایه (آب)، چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه، ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی رابطه های پیشنهادی به ترتیب زیر هستند که در آن T میانگین دمای ورودی و خروجی به لوله مبدل استفاده شده در دستگاه می باشد [۲۱].

$$\rho_f = 1000 \times \left[1.0 - \frac{(T_w - 4.0)^2}{119000 + 1365 \times T_w - 4 \times (T_w)^2} \right] \quad (13)$$

$$K_f = 0.56112 + 0.00193 \times T_w - 2.60152749e - 6 \times (T_w)^2 - 6.08803e - 8 \times (T_w)^3 \quad (14)$$

$$\mu_f = 0.00169 - 4.25263e - 5 \times T_w + 4.9255e - 7 \times (T_w)^2 - 2.09935e - 9 \times (T_w)^3 \quad (15)$$

$$C_f = 4217.629 - 3.20888 \times T_w + 0.09503 \times (T_w)^2 - 0.00132 \times (T_w)^3 + 9.415e - 6 \times (T_w)^4 - 2.5479e - 8 \times (T_w)^5 \quad (16)$$

۳-۴- معیار ارزیابی عملکرد

برای ارزیابی همزمان افزایش انتقال حرارت و افت فشار می توان از معیار ارزیابی عملکرد استفاده کرد. هر چه مقدار معیار ارزیابی عملکرد بیشتر بوده مطلوب تر است و در مواردی که از یک بالاتر باشد دارای صرفه اقتصادی می باشد که می توان این شاخص را از رابطه (۱۷) محاسبه نمود [۲۲].

$$PEC = \frac{NU/NU_0}{(f/f_0)^{\frac{1}{3}}} \quad (17)$$

۳-۵- بررسی اعتبارسنجی

در ابتدا به منظور اطمینان از صحت نتایج بدست آمده از آزمایش، نتایج با روابط پیشنهادی در دیگر تحقیقات مقایسه شده است. برای مقایسه عدد ناسلت سیال پایه (آب) اندازه گیری شده در لوله خالی از معادله دیتوس-بولتر [۱۹] استفاده شده که در معادله (۱۸) نشان داده شده است.

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (18)$$

برای اعتبارسنجی نتایج بدست آمده از افت فشار، نتایج آزمایش سیال پایه (آب) با رابطه بلازیوس و ضریب اصطکاک مربوط مقایسه شده است [۲۴].

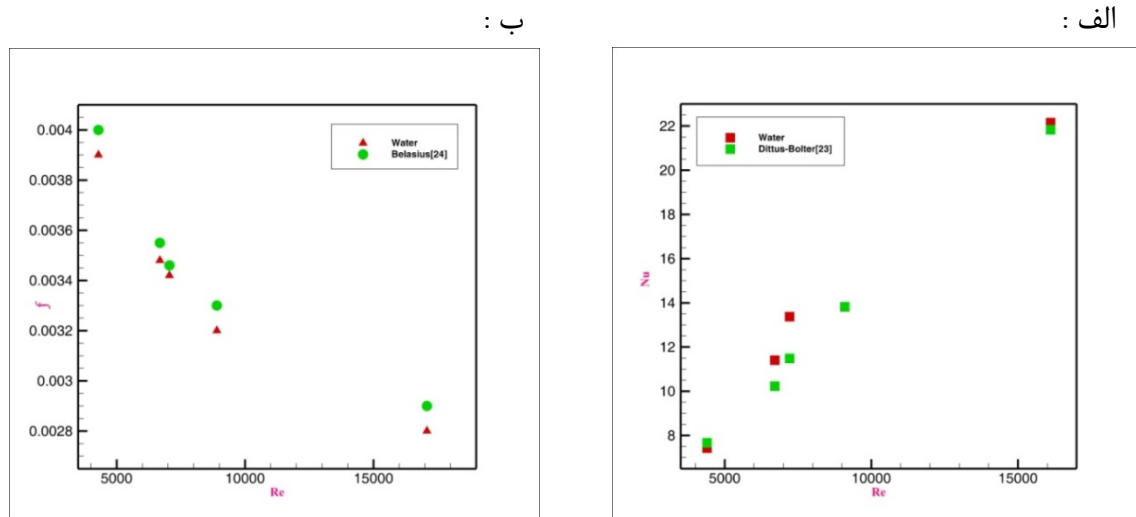
$$f = 0.316Re^{-0.25} \quad (19)$$

۴- نتایج

به طور کلی در مطالعه حاضر عواملی چون سرعت جریان، جریان چرخشی ایجاد شده توسط نوارهای تابیده دوگانه، دما، خواص حرارتی و کسرهای حجمی نانوسیال آب-اکسید منیزیم بر لایه مرزی جریان سیال و ضریب انتقال حرارت تاثیرگذار بوده است.

۴-۱- اعتبارسنجی نتایج آزمایشگاهی بدست آمده با نتایج تجربی

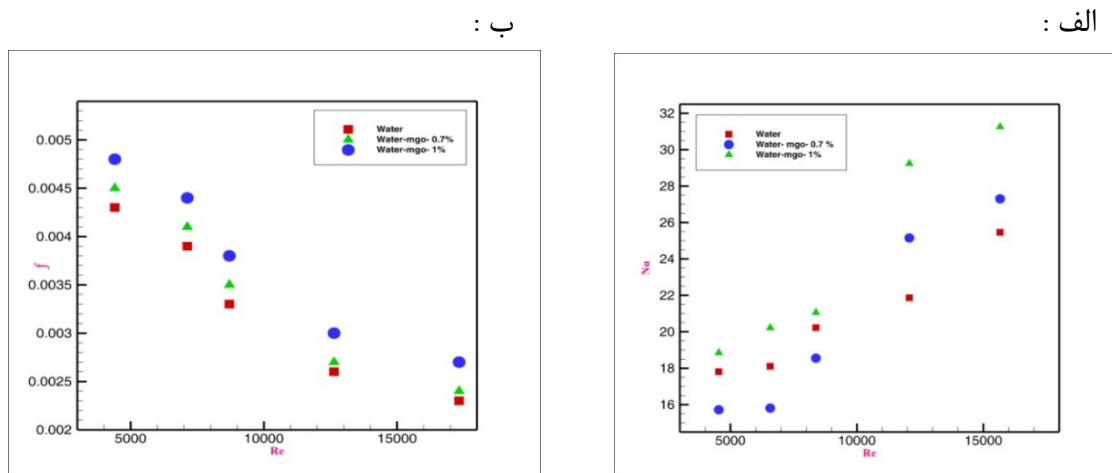
به منظور تعیین صحت نتایج حاصل شده در این پژوهش باید مقایسه ای با نتایج پژوهش ها و مطالعات مورد اطمینان پیشین صورت گیرد که این کار باعث می شود به پژوهش پیشین رو اعتبار بخشید. برای اعتبارسنجی عدد ناسلت و ضریب اصطکاک بدست آمده در پژوهش حاضر، نتایج با عدد ناسلت و ضریب اصطکاک به دست آمده از پژوهش دیتوس-بولتر [۲۳] و پژوهش بلازیوس [۲۴] اعتبارسنجی شده است که نتیجه آن بسیار شبیه و نزدیک به هم بوده است.



شکل ۶- الف) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابجائی تجربی آب با دیتوس بولتر [۲۳] (ب) مقایسه ضریب اصطکاک تجربی آب با بلازیوس [۲۴]

برای اطمینان از تکرارپذیری هر آزمایش سه بار تکرار شد و از دقت خوبی برخوردار بود و متوسط سه مقدار در نظر گرفته شد. همچنین نتایج به دست آمده در این پژوهش با نتایج به دست آمده توسط رابطه دیتوس-بولتر [۲۳] و بلازیوس [۲۴] بسیار نزدیک به هم بوده، به شکلی که نمودار عدد ناسلت دارای حداکثر ۳,۵ درصد خطا و نمودار ضریب اصطکاک دارای حداکثر ۴ درصد خطا بوده که نشان از مقدار پایین خطا و صحت داده ثبت شده در آزمایشگاه و اعتبار کار انجام شده دارد. همچنین باز تولید شوندگی نتایج توسط آزمایشگر دیگر نیز مورد بررسی قرار گرفته و صحت نتایج تایید شد.

۴-۲- محاسبه عدد ناسلت و ضریب اصطکاک درون لوله با نوار تابیده دوگانه با گام ۳,۵ سانتی متر در این بخش به مقایسه نتایج آب و نانوسیال آب-اکسید منیزیم با غلظت های ۰,۷٪ و ۱٪ در حالت استفاده هم زمان از نوارهای تابیده دوگانه با طول گام ۳,۵ سانتی متر پرداخته شده است. نتایج آزمایش برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک مطابق شکل (۷) قابل مشاهده می باشند:

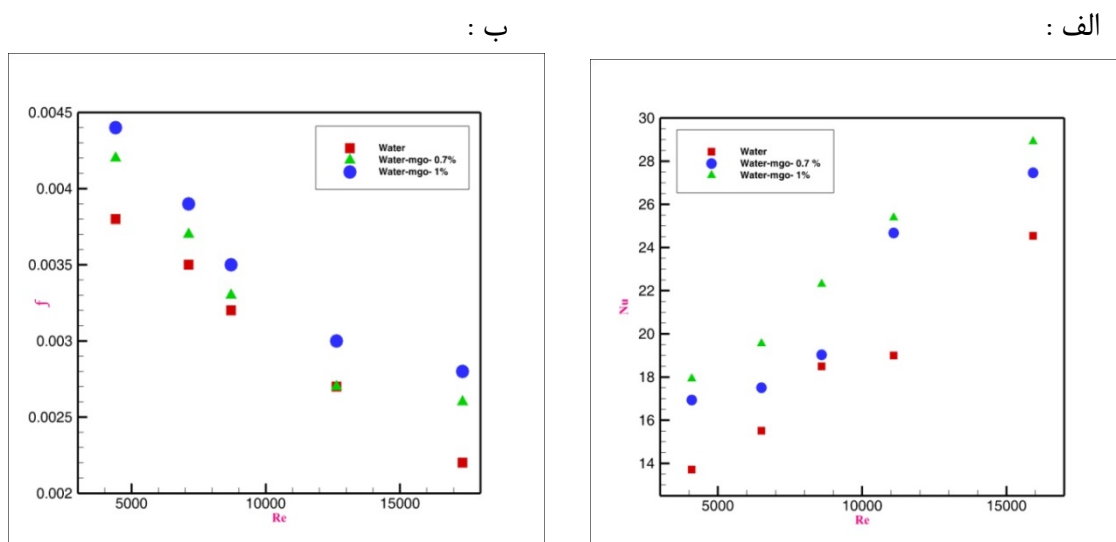


شکل ۷- الف) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابجائی تجربی آب با نانوسیال (ب) مقایسه ضریب اصطکاک تجربی آب با نانوسیال

همان گونه که در بخش الف شکل (۷) مشاهده می شود به طور کلی عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز افزایش یافته است که با مشاهده نتایج نمودار می توان گفت زمانی که از نوار تابیده دو گانه با طول گام ۳,۵cm استفاده می شود، در هنگام استفاده از نانوسیال آب-اکسید منیزیم با غلظت ۰,۷٪ به عنوان سیال عامل دوم، عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز افزایش یافته است. همچنین روند مشابه هنگام استفاده از نانوسیال آب-اکسید منیزیم با غلظت ۱ درصد به عنوان سیال عامل مشاهده می گردد. با انجام محاسبات می توان گفت که استفاده از نانوسیال آب-اکسید منیزیم با غلظت ۰,۷ درصد باعث بهبود ۵ درصدی عدد ناسلت در مقایسه با آب دیونیزه شده و نانوسیال آب-اکسید منیزیم با غلظت ۱ درصد باعث بهبود ۱۵ درصدی عدد ناسلت در مقایسه با آب شده است. همچنین از بخش ب شکل (۷) می توان این گونه برداشت کرد که در هر سه حالت که از نوارهای مارپیچی دو گانه با طول گام ۳,۵cm استفاده شده است میزان ضریب اصطکاک هر سه حالت به هم نزدیک بوده است، به گونه ای که در هنگام استفاده از نانوسیال آب - اکسید منیزیم با غلظت ۰,۷ درصد باعث ۳,۱ درصد افزایش ضریب اصطکاک و در زمان استفاده از نانوسیال آب-اکسید منیزیم با غلظت ۱ درصد باعث افزایش ۴,۳ درصد ضریب اصطکاک شده است. این موضوع به خاطر وجود مقدار بیشتر نانو ذره در سیال پایه و ویسکوزیته بالاتر نانوسیال نسبت به سیال پایه است که نتیجه آن ضریب اصطکاک بیشتر است.

۴-۳- محاسبه عدد ناسلت و ضریب اصطکاک درون لوله با نوار تابیده دوگانه باگام ۵ سانتی متر

در این بخش به مقایسه نتایج آب و نانوسیال آب-اکسید منیزیم با غلظت های ۰,۷٪ و ۱٪ را در حالت استفاده هم زمان از نوارهای تابیده دوگانه با طول گام ۵ سانتی متر پرداخته شده است. نتایج آزمایش برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در شکل (۸) قابل مشاهده می باشد.



شکل ۸- (الف) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابجائی تجربی آب با نانوسیال (ب) مقایسه ضریب اصطکاک تجربی

آب با نانوسیال

همان طور که در بخش الف شکل (۸) مشاهده می شود به طور کلی عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز افزایش یافته است که با نگاه دقیق تر به نتایج می توان گفت زمانی که از نوارهای تابیده دو گانه با طول گام ۵ cm استفاده می شود با افزودن نانوذرات اکسید منیزیم با کسر حجمی ۰,۷ درصد و با افزایش عدد رینولدز ضریب انتقال حرارت جابجائی نیز افزایش یافته است. همچنین اختلاف ضریب انتقال حرارت جابجائی مربوط به بالاترین سطح عدد رینولدز یعنی حدود عدد رینولدز ۱۶۰۰۰ میان دو کسرحجمی نانوسیال آب - اکسید منیزیم بررسی شده که نشان دهنده آن است که با افزایش کسرحجمی عدد ناسلت افزایش می یابد. با انجام محاسبات می توان گفت که استفاده از نانوسیال آب - اکسید منیزیم با غلظت ۰,۷ درصد باعث بهبود ۳,۱ درصد عدد ناسلت در مقایسه با آب دیونیزه شده و نانوسیال آب - اکسید منیزیم با غلظت ۱ درصد باعث بهبود ۵ درصد عدد ناسلت در مقایسه با آب دیونیزه شده است.

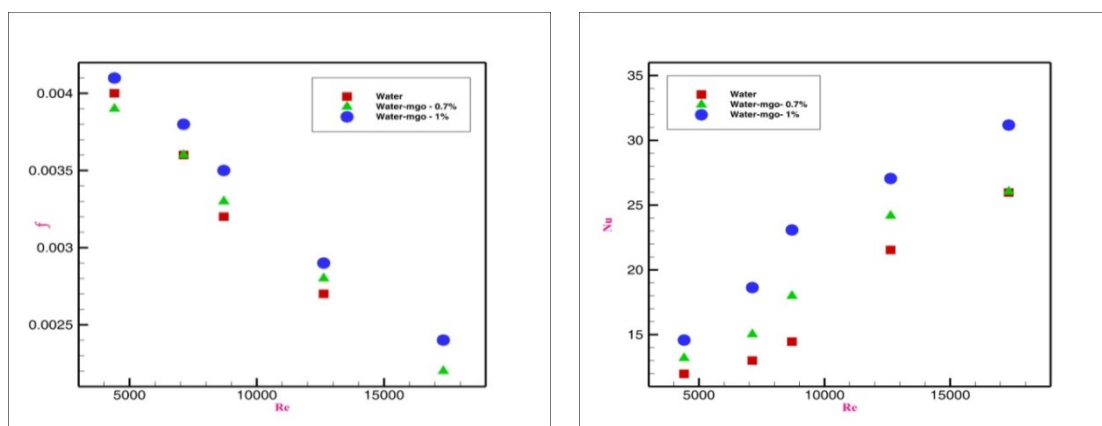
در نمودار قسمت ب شکل (۸) تاثیر ضریب اصطکاک بین دو کسرحجمی نانوسیال آب - اکسید منیزیم و آب دیونیزه مورد بررسی قرار گرفته است همان طور که در شکل مشخص است، نانوسیال آب - اکسید منیزیم با کسر حجمی ۱ درصد ضریب اصطکاک بیشتری نسبت به کسر حجمی ۰,۷ درصد دارد و با افزایش عدد رینولدز اختلاف میان دو کسرحجمی بیشتر می شود. به گونه ای که در هنگام استفاده از نانوسیال آب - اکسید منیزیم با غلظت ۰,۷ درصد باعث ۴ درصد افزایش ضریب اصطکاک و همچنین در زمان استفاده از نانوسیال آب - اکسید منیزیم با غلظت ۱ درصد باعث افزایش ۶ درصد ضریب اصطکاک شده است که بیانگر آن است که با افزایش کسرحجمی ضریب اصطکاک افزایش یافته است. از دیدگاه فیزیکی افزایش عدد رینولدز باعث نازک شدن زیر لایه آرام و در نتیجه افزایش تنش برشی می گردد. این امر به نوبه خود باعث افزایش افت فشار خواهد گردید. با افزایش رینولدز، فاکتور اصطکاک کاهش می یابد. این بدان دلیل است که طبق رابطه $f = \frac{\Delta P}{L} \frac{D}{1/2 \rho v^2}$ فاکتور اصطکاک به سرعت متوسط سیال به توان ۲- وابستگی دارد. لذا با افزایش عدد رینولدز، فاکتور اصطکاک کاهش می یابد. همچنین افزایش غلظت نانو سیال به دلیل افزایش لزجت، باعث افزایش فاکتور اصطکاک می شود. همچنین نتایج حاصل از آزمایش نشانگر افزایش عدد ناسلت نسبت به سیال پایه می باشد. زیرا وجود ذرات نانو باعث بهبود هدایت حرارتی و از سوی دیگر افزایش ویسکوزیته سیال می گردد. البته با توجه به این نمودار تاثیر هدایت حرارتی غالب می باشد. همچنین با افزایش کسر حجمی نانو ذرات و نیز افزایش عدد رینولدز، مقدار عدد ناسلت بهبود بیشتری می یابد.

۴-۴- محاسبه عدد ناسلت و ضریب اصطکاک درون لوله با نوار تابیده دوگانه با گام ۷ سانتی متر

در این بخش به مقایسه نتایج آب و نانوسیال آب - اکسید منیزیم با غلظت های ۰,۷٪ و ۱٪ را در حالت استفاده هم زمان از نوارهای تابیده دوگانه با طول گام ۷ سانتی متر پرداخته شده است. نتایج آزمایش برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک مطابق شکل (۹) قابل مشاهده می باشند.

الف :

ب :



شکل ۹- (الف) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابجائی تجربی آب با نانوسیال (ب) مقایسه ضریب اصطکاک تجربی آب با نانوسیال

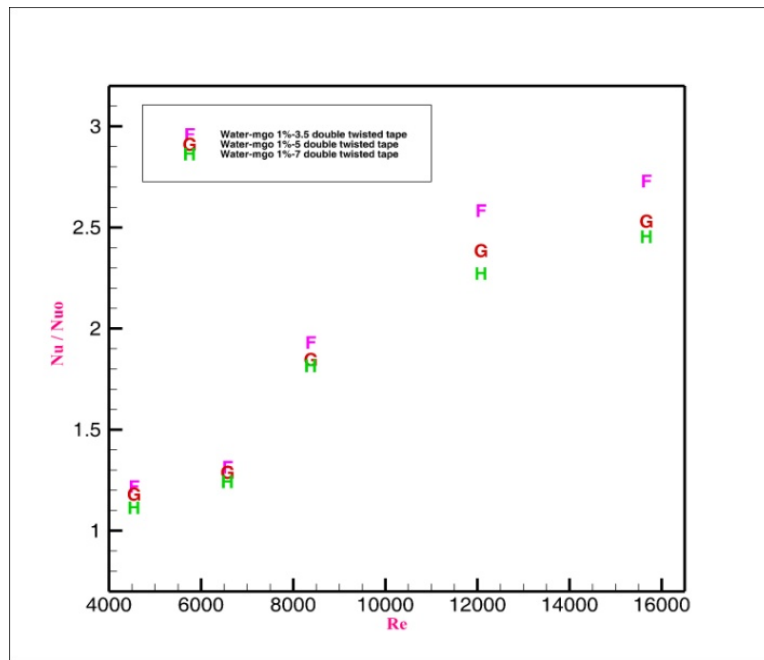
همان طور که در بخش الف شکل (۹) مشاهده می شود به طور کلی عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز افزایش یافته است که با دقت به نتایج نمودار میتوان گفت زمانی که از نوار تابیده دوگانه با گام ۷cm استفاده می شود، روند کلی به گونه ای است که در هنگام استفاده از نانوسیال آب-اکسید منیزیم با غلظت ۰,۷ درصد به عنوان سیال عامل عدد ناسلت بالاتری بدست آمده است. همچنین با روندی مشابه زمانی که از نانوسیال آب-اکسید منیزیم با غلظت ۱ درصد به عنوان سیال عامل دوم استفاده می شود، عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز افزایش یافته است. با انجام محاسبات می توان گفت که استفاده از نانوسیال آب - اکسید منیزیم با غلظت ۰,۷ درصد باعث بهبود ۹ درصد عدد ناسلت در مقایسه با آب دیونیزه شده و استفاده از نانوسیال آب-اکسید منیزیم با غلظت ۱ درصد باعث بهبود ۲۸ درصد عدد ناسلت در مقایسه با آب دیونیزه شده است.

همان طور که در بخش ب شکل (۹) مشاهده می شود که افزایش عدد رینولدز سبب کاهش ضریب اصطکاک خواهد شد که دلیل آن این است که با افزایش عدد رینولدز، دبی جریان و در پی آن سرعت متوسط جریان افزایش می یابد و با توجه به این که ضریب اصطکاک با مجذور سرعت جریان رابطه عکس دارد، لذا کاهش ضریب اصطکاک با افزایش عدد رینولدز بدیهی است. همچنین با افزایش درصد کسرحجمی نانو سیال آب-اکسید منیزیم، افت فشار افزایش می یابد. دلیل این موضوع افزایش ویسکوزیته و در نتیجه ایجاد افت فشار بیشتر می باشد. به گونه ای که در هنگام استفاده از نانوسیال آب-اکسید منیزیم با غلظت ۰,۷ درصد باعث ۱,۸ درصد افزایش ضریب اصطکاک و همچنین در زمان استفاده از نانوسیال آب-اکسید منیزیم با غلظت ۱ درصد باعث افزایش ۲,۶۳ درصد افزایش اصطکاک شده است که بیانگر آن است که با افزایش کسر حجمی ضریب اصطکاک افزایش می یابد.

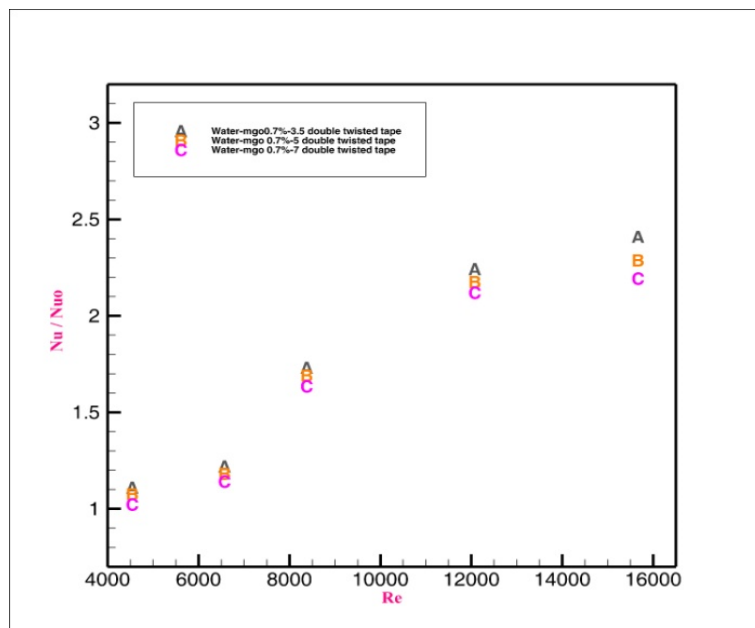
۴-۵- بررسی معیار ارزیابی عملکرد برای حالات تجربی مطالعه شده

برای بررسی همزمان افزایش انتقال حرارت و افت فشار می توان از عاملی به نام معیار ارزیابی عملکرد حرارتی استفاده کرد که تعریف آن مطابق رابطه (۱۷) می باشد. هر چه این نسبت بالاتر از یک باشد بهینه تر بوده و در مواردی که از یک بزرگتر است از نظر اقتصادی مقرون به صرفه می باشد.

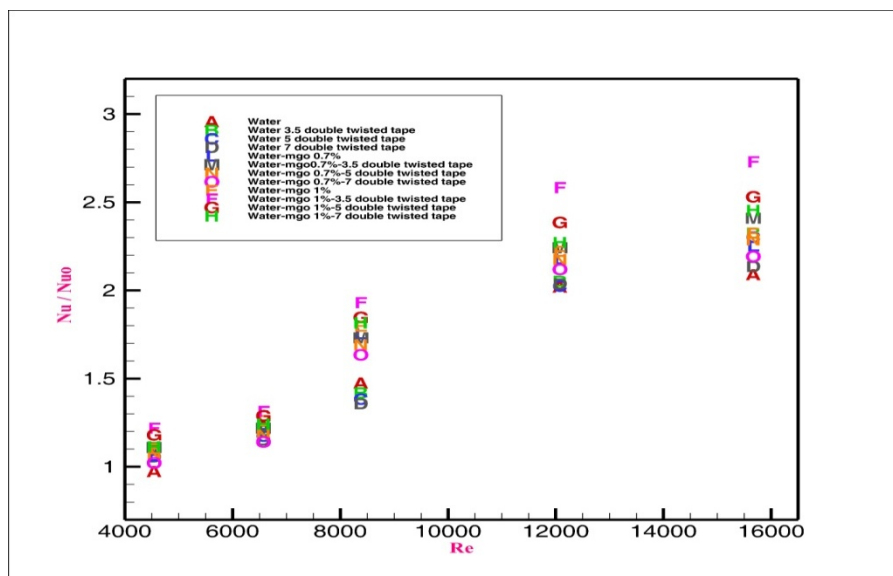
در شکل (۱۰) و شکل (۱۱) تغییرات عدد ناسلت به عدد ناسلت سیال پایه متناسب با تغییر طول گام های نوار تاییده برای نانوسیال ۱ درصد و ۰,۷ درصد به ترتیب قابل مشاهده می باشد. همچنین در شکل (۱۲) برای طول گام های متفاوت و در مقایسه با سیال پایه در مبدل حرارتی بدون استفاده از نانوسیال و با نوار مارپیچ با یکدیگر مقایسه شده اند. چنانچه ملاحظه می شود با افزایش عدد رینولدز نسبت Nu/Nu_0 افزایش می یابد و بیشترین میزان بهبود عملکرد حرارتی مربوط به نانوسیال ۱ درصد در مبدل حرارتی دو لوله ای با نوار مارپیچ دو گانه با طول گام ۳,۵ سانتی متر می باشد.



شکل ۱۰- نسبت Nu/Nu_0 طول گام های نوار تابیده بر حسب عدد رینولدز برای ۱٪.

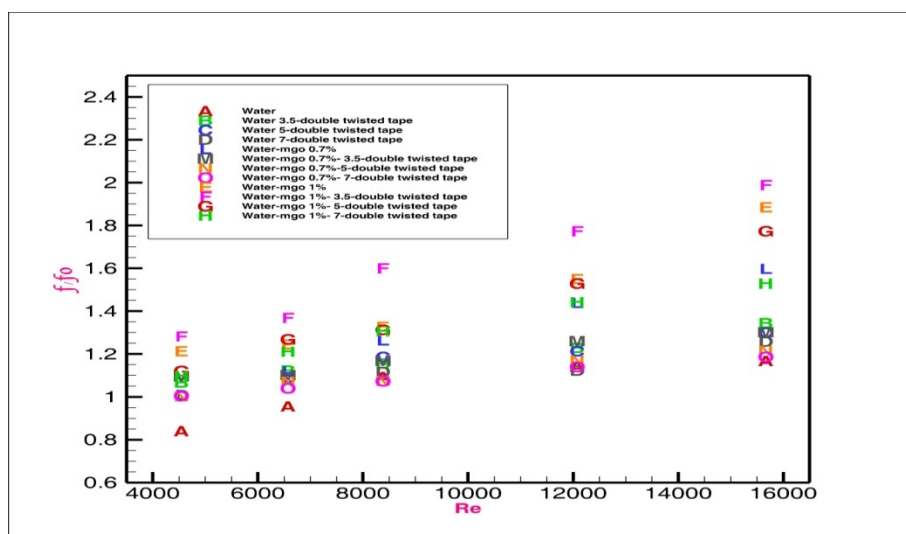


شکل ۱۱- نسبت Nu/Nu_0 طول گام های نوار تابیده بر حسب عدد رینولدز برای ۰,۷٪.



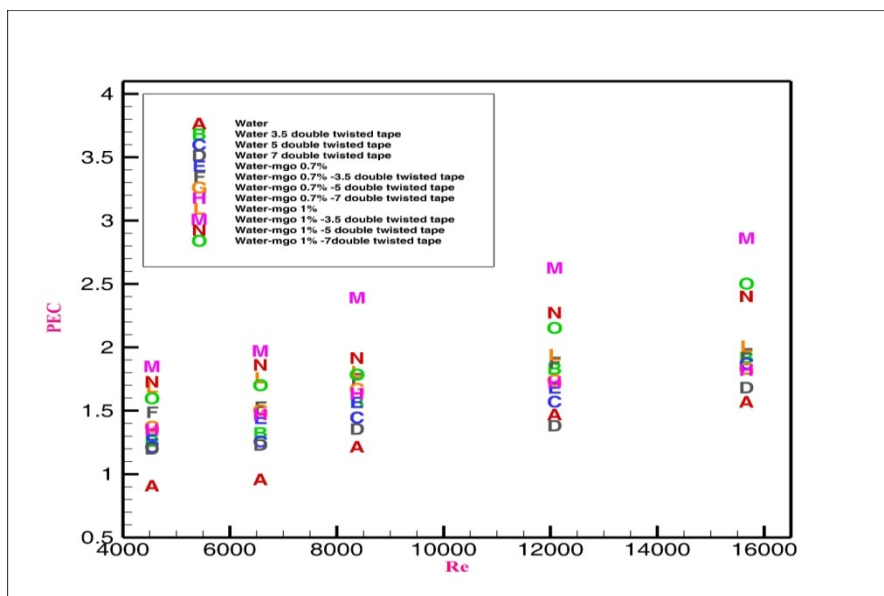
شکل ۱۲- نسبت NU/NU_0 طول گام های نوار تابیده بر حسب عدد رینولدز

در شکل (۱۳) نسبت f/f_0 بر حسب عدد رینولدز رسم شده است. نسبت تغییرات ضریب اصطکاک هر سه طول گام و دو کسر حجمی مقایسه شده‌اند. با افزایش عدد رینولدز این نسبت نیز افزایش یافته و فاصله نمودارها در عدد رینولدزهای بالاتر با توجه به غلبه سرعت بر افت فشار کمتر می‌شود.



شکل ۱۳- نسبت f/f_0 طول گام های نوار تابیده بر حسب عدد رینولدز

پس از بررسی افت فشار و انتقال حرارت بطور جداگانه نوبت به بررسی آنها به طور همزمان می‌رسد. تاکنون بهترین طول گام از نظر افزایش انتقال حرارت گام ۳,۵cm و کمترین افت فشار مربوط به طول گام ۷cm است. در شکل (۱۴) معیار ارزیابی عملکرد حرارتی برای هر یک از طول گام‌ها با نانوسیال و با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد که این مسئله به دلیل افزایش نسبت NU/NU_0 و نیز افزایش نسبت f/f_0 با نرخ کمتر در محدوده اعداد رینولدز تحت بررسی می‌باشد.



شکل ۱۴- معیار ارزیابی عملکرد برحسب عدد رینولدز برای تمام حالت های مطالعه شده

ملاحظه می شود که بهترین معیار ارزیابی عملکرد متعلق به طول گام ۳,۵ cm است که بیشترین مقدار را دارد. به طور کلی عوامل بسیاری بر ضریب انتقال حرارت جابجائی نانو سیال تاثیر می گذارند که شامل اندازه نانو ذره، مکانیزیم هدایت حرارتی در نانوسیال، روش آماده سازی و مخلوط و تاثیر نانوسیال بر لایه مرزی در انتقال حرارت جابجائی است. به منظور درک بهتر نتایج به دست آمده هریک از عوامل توضیح داده شده و چگونگی اثر آن ها مورد بررسی قرار گرفت. همان طور که در شکل (۱۴) مشاهده می شود در مجموع نسبت NU/NU_0 به نسبت f/f_0 مورد محاسبه گردید و نمودارهایی که در بالا مشاهده می گردد، نمودار عملکرد حرارتی مبدل در شرایط مختلف می باشد. اگر آب دیونیزه در مبدل دو لوله ای حالت A و به عنوان مقدار پایه قرار گیرد، نسبت معیار ارزیابی عملکرد در تمام شرایط به شرح جدول (۲) می باشد. هرچه مقدار معیار ارزیابی عملکرد بیشتر مطلوب تر می باشد و در مواردی که از یک بالاتر بوده دارای صرفه اقتصادی می باشند و با توجه به این که همگی نمودارهای موجود در شکل (۱۴) صعودی و از یک بیشتر بوده اند، همگی صرفه اقتصادی دارند. در پژوهش حاضر بهترین عملکرد در شرایط استفاده از نانوسیال آب-اکسید منیزیم با غلظت ۱٪ با نوارهای تابیده دوگانه با طول گام ۳,۵cm می باشد.

۵- عدم قطعیت در مطالعه تجربی حاضر

عدم قطعیت به صورت یک مقدار \pm ، یعنی فاصله‌ای در اطراف نتیجه اندازه‌گیری شده، بیان می‌گردد. عدم قطعیت یک جزئی غیرقابل اجتناب در اندازه‌گیری است و زمانی بسیار مهم می‌شود که نتایج اندازه‌گیری نزدیک حدود مشخصه باشد. به‌طور خلاصه می‌توان مفهوم عدم قطعیت را این‌گونه بیان نمود که میزانی از خطای احتمالی تخمین زده شده در مقدار یک اندازه و همچنین تخمینی از گستره‌ای از مقادیر که مقدار واقعی اندازه در آن گستره قرار دارد.

جدول ۲- نتایج مقایسه ای معیار ارزیابی عملکرد در تمام حالات بر مبنای الگو (آب دیونیزه در مبدل دو لوله ای)

ردیف	حالت	نماد	میزان افزایش معیار ارزیابی عملکرد بر حسب درصد
۱	شرایط آب درمبدل دولوله ای با استفاده از نوارتابیده دوگانه با طول گام ۳,۵cm	B	٪۱۹
۲	شرایط آب درمبدل دولوله ای با استفاده از نوارتابیده دوگانه با طول گام ۵cm	C	٪۱۷
۳	شرایط آب درمبدل دولوله ای با استفاده از نوارتابیده دوگانه با طول گام ۷cm	D	٪۱۶
۴	شرایط نانوسیال باغلظت ۰,۷ درصد درمبدل دولوله ای	E	٪۳۷
۵	شرایط نانوسیال باغلظت ۰,۷ درصد درمبدل دولوله ای با استفاده از نوارتابیده دوگانه با طول گام ۳,۵cm	F	٪۴۴
۶	شرایط نانوسیال باغلظت ۰,۷ درصد درمبدل دولوله ای با استفاده از نوارتابیده دوگانه با طول گام ۵cm	G	٪۴۳
۷	شرایط نانوسیال باغلظت ۰,۷ درصد درمبدل دولوله ای با استفاده از نوارتابیده دوگانه با طول گام ۷cm	H	٪۲۶
۸	شرایط نانو سیال باغلظت ۱ درصد درمبدل دولوله ای	L	٪۴۲
۹	شرایط نانوسیال باغلظت ۱ درصد درمبدل دولوله ای با استفاده از نوارتابیده دوگانه با طول گام ۳,۵cm	M	٪۸۰
۱۰	شرایط نانوسیال باغلظت ۱ درصد درمبدل دولوله ای با استفاده از نوارتابیده دوگانه با طول گام ۵cm	N	٪۷۴
۱۱	شرایط نانوسیال باغلظت ۱ درصد درمبدل دولوله ای با استفاده از نوارتابیده دوگانه با طول گام ۷cm	O	٪۵۵

عدم قطعیت را می توان به شکل نسبی و از رابطه (۲۰) استخراج نمود [۲۵]:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left[\frac{u(x_i)}{|x_i|} \right]^2} \quad (20)$$

که $u_c(y)$ عدم قطعیت استاندارد از یک مقدار y و عدم قطعیت پارامترهای مستقل $X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n$ که عدم قطعیت به آن ها وابسته است. همچنین $\frac{u(x_i)}{|x_i|}$ عدم قطعیت پارامترهای بیان شده به شکل انحراف استاندارد نسبی بوده که می توان عدم قطعیت پارامترهای اندازه گیری شده از رابطه (۲۰) را در جدول (۳) مشاهده نمود.

جدول ۳- عدم قطعیت آزمایش

متغیر	اختلاف دما (C)	فشار (kpa)	دبی (Lit/s)	عدد ناسلت	ضریب اصطکاک	ضریب عملکرد
عدم قطعیت	±۰,۴	±۶,۲	±۵,۷	±۲,۴	±۲,۷	±۷,۵

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش از یک مبدل حرارتی دو لوله ای تحت شرایط مختلف از قبیل استفاده از مبدل دو لوله ای بدون نوار تابیده، استفاده هم زمان از مبدل دو لوله ای با نوارهای تابیده دوگانه با طول گام ۳,۵ cm، استفاده هم زمان از مبدل دولوله ای با نوارهای تابیده دو گانه با طول گام ۵ cm و استفاده هم زمان از مبدل دو لوله ای با نوارهای تابیده دوگانه با طول گام ۷ cm، استفاده شده است که این چهار حالت و شرایط بیان شده برای سیال های آب، نانوسیال اکسید منیزیم با غلظت ۰,۷٪ و ۱٪ در رینولدزهای بین ۴۰۰۰ تا ۱۶۰۰۰ بر روی دستگاه آزمایشگاهی که بدین منظور ساخته شده، انجام شده است.

اهم نتایج کلیدی به دست آمده در پژوهش حاضر به شرح زیر می باشد.

- ۱- افزایش غلظت نانو سیالات، ضریب هدایت حرارتی آن ها را افزایش می دهد که در صورت استفاده از نانوسیالات با غلظت بیشتر میزان انتقال حرارت جابجایی به میزان چشم گیری افزایش می یابد.
- ۲- افزایش عدد رینولدز، سبب افزایش انتقال حرارت و افت فشار می شود. این افزایش که بیشتر ناشی از افزایش سرعت جریان در لوله است باعث تقویت جریان ثانویه و در نتیجه بهبود عملکرد آن بر ضریب انتقال حرارت می شود.
- ۳- استفاده از نوارهای تابیده دوگانه با طول گام ۳,۵ cm باعث بهبود و افزایش عملکرد حرارتی مبدل به میزان ۱۵ درصد و همچنین موجب افزایش ضریب اصطکاک به میزان ۴,۳ درصد نسبت به آب دیونیزه در همین شرایط می شود.
- ۴- استفاده از نوارهای تابیده دوگانه با طول گام ۵ cm باعث بهبود و افزایش عملکرد حرارتی مبدل به میزان ۵ درصد و همچنین موجب افزایش ضریب اصطکاک به میزان ۶ درصد نسبت به آب دیونیزه در همین شرایط می شود.
- ۵- استفاده از نوارهای تابیده دوگانه با طول گام ۷ cm باعث بهبود و افزایش عملکرد حرارتی مبدل به میزان ۲۸ درصد و همچنین موجب افزایش ضریب اصطکاک به میزان ۲,۶۳ درصد نسبت به آب دیونیزه در همین شرایط می شود.
- ۶- استفاده از نانو اکسید منیزیم با غلظت ۰,۷ درصد با استفاده از نوارهای تابیده دو گانه با طول گام ۳,۵ سانتیمتر درون مبدل دو لوله ای باعث بهبود ۴۴ درصد معیار ارزیابی عملکرد نسبت به آب دیونیزه در مبدل دو لوله ای بدون نوار تابیده شده و همچنین استفاده از نانو اکسید منیزیم با غلظت ۱ درصد با استفاده از نوارهای تابیده دوگانه با طول گام ۳,۵ cm درون مبدل دو لوله ای باعث بهبود ۸۰ درصد معیار ارزیابی عملکرد نسبت به آب دیونیزه در مبدل دو لوله ای بدون نوار تابیده شده است.

مراجع

- [1] Saidur, R., Leong, K. Y., and Mohammed, H. A., "A Review on Applications and Challenges of Nanofluids", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, No. 3, pp. 1646-1668, (2011).

- [2] Shanthi, R., Anandan, S.S., and Ramalingam, V., "Heat Transfer Enhancement using Nanofluids: An Overview", *Thermal Science*, Vol. 16, No. 2, pp. 423-444, (2012).
- [3] Duangthongsuk, W., and Wongwises, S., "Heat Transfer Enhancement and Pressure Drop Characteristics of TiO₂-water Nanofluid in a Double-tube Counter Flow Heat Exchanger", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 7-8, pp. 2059-2067, (2009).
- [4] Esmaeilzadeh, E., Almohammadi, H., Nokhosteen, A., Motezaker, A., and Omrani, A.N., "Study on Heat Transfer and Friction Factor Characteristics of g-Al₂O₃/water through Circular Tube with Twisted Tape Inserts with Different Thicknesses", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 82, pp. 72-83, (2014).
- [5] Zhou, Rui., He, Fan., Ma, Zhichao, Liang Ping, Shen., Dong, Ming Wang, Hanbin and Wang, Hao, "Characterization and Modeling of Thermal Conductivity of ZnO Nanoparticle-based Transfer Oil NanoFluid", *Journal of Computational and Theoretical NanoScience*, Vol. 12, pp. 719-723, (2015).
- [6] Sheikholeslami, M., and Domiri Ganji, D., "Nanofluid Flow and Heat Transfer between Parallel Plates Considering Brownian Motion using DTM", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 283, pp. 651-663, (2015).
- [7] Bhuiya, A.K., Azad, M.S.U., and Chowdhury, M., Saha., "Heat Transfer Augmentation in a Circular Tube with Perforated Double Counter Twisted Tape Inserts", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 74, pp. 18-26, (2016).
- [8] D. Mali, J., Acharaya, A., and Pise A., "Heat Transfer Enhancement with Centrally Hollow Twisted Tapes in a Tubular Heat Exchanger", *Journal of Material Science and Mechanical Engineering (JMSME)*, Vol. 3, pp. 187-191, (2016).
- [9] Varun, M.O., Garg, H., Nautiyal, S.M.K., Khurana, S., and Shukla, M.K., "Heat Transfer Augmentation using Twisted Tape Inserts, A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 63, pp. 193-225, (2016).
- [10] Sun, B., Yang, A., and Yang, D., "Experimental Study on the Heat Transfer and Flow Characteristics of Nanofluids in the Built-in Twisted Belt External Thread Tubes", *J. Heat Mass Transfer*, Vol. 107, pp. 712-722, (2017).
- [11] Feyza Akyürek, E., Gelis, K., Sahin, B., and Manay, E., "Experimental Analysis for Heat Transfer of Nanofluid with Wire Coil Turbulators in a Concentric Tube Heat Exchanger", *Results in Physics*, Vol. 9, pp. 376-389, (2018).
- [12] Naga Sarada, S., Sita Rama Raju, A.V., Kalyani Radha, K., and Shyam Sunder, L., "Enhancement of Heat Transfer using Varying width Twisted Tape Inserts", *International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol. 2, No. 6, pp. 107-118, (2018).
- [13] Gururatana, S., and Skullong, S., "Experimental Investigation of Heat Transfer in a Tube Heat Exchanger with Airfoil-shaped Insert", *Therm., Eng*, Vol. 14, pp. 100462, (2019).

- [14] Ma, Y., Jamiatia, M., Aghaei, A., Sepehrirad, M., Dezfulizadeh, A., and Afrand, M., "Effect of Differentially Heated Tubes on Natural Convection Heat Transfer in a Space between Two Adiabatic Horizontal Concentric Cylinders using Nano-fluid", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 163, No. 105148, (2019).
- [15] Gnanavel, S., Saravanan, R., and Chandrasekaran, M., "Heat Transfer Augmentation by Nano-fluids and Circular Fin Insert in Double Tube Heat Exchanger a Numerical Exploration", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 21, pp. 934-939, (2019).
- [16] Faridi, R., and Ghafouri, A., "Numerical Study on Heat Transfer and Nanofluid Flow in Pipes Fitted with Different Dimpled Spiral Center Plate", *SN Applied Sciences*, Vol. 2, No. 2, pp. 298, (2020).
- [17] Awai, M., Saad, M., Aya, H., Ehsan, M.M., and Bhuiyan, A.A., "Computational Assessment of Nano-particulate (Al₂O₃/Water) Utilization for Enhancement of Heat Transfer with Varying Straight Section Lengths in a Serpentine Tube Heat Exchanger", *Thermal Science and Engineering Progress*, 100521, doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100521, (2020).
- [18] Hamilton, R.L., and Crosser, O.K., "Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems", *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, Vol. 1, No. 3, pp. 187-191, (1962).
- [19] Wang, X., Xu, X., and Choi, S.U., "Thermal Conductivity of Nanoparticle-fluid Mixture", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 13, No. 4, pp. 474-480, (1999).
- [20] Yu, W., and Choi, S.U.S., "The Role of Interfacial Layers in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids: a Renovated Maxwell Model", *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 5, No. 1-2, pp. 167-171, (2003).
- [21] Azmi, W.H., Sharma, K.V., Rizalman Mamat, Alias, A.B.S., and Izan Izwan Misnon, "Correlations for Thermal Conductivity and Viscosity of Water Based Nanofluids", *1st International Conference on Mechanical Engineering Research*, Kuantan, Malaysia, Vol. 36, pp. 012029, (2012).
- [22] Webb, R.L., "Performance Evaluation Criteria for use of Enhanced Heat Transfer Surfaces in Heat Exchanger Design", *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 24, pp. 715-726, (1981).
- [23] Dittus, L.M.K, and Boelter, "Heat Transfer in Automobile Radiators of the Tubular Type", *University of California at Berkley Publications in Engineering*, Vol. 13, pp. 755-758, (1930).
- [24] Incropera, F.P., Dewitt, P.D., Bergman, T.L., and Lavine, A.S., "*Foundation of Heat Transfer*", 6th Edition, John Wiley & Sons, Singapore, pte. Ltd, (2013).

فهرست نمادهای انگلیسی

قطر	d	m
گرانروی پویا نانو	μ_{nf}	$kg\ m\ s^{-1}$
گرانروی ایستا نانو	ν_{nf}	$m^2\ s^{-1}$
چگالی نانو	ρ_{nf}	$kg\ m^{-3}$
ضریب هدایت حرارتی نانو	K_{nf}	$W\ m^{-1}K^{-1}$
ضریب اصطکاک	f	
ضریب انتقال حرارت جابجائی	h	$W\ m^{-2}K^{-1}$
ضریب هدایت حرارتی	k	$W\ m^{-1}K^{-1}$
طول	L	m
دبی جرمی	\dot{m}	$kg\ s^{-1}$
عدد ناسلت	Nu	
معیار ارزیابی عملکرد	PEC	
عدد پراتل	P_r	
نرخ انتقال حرارت	q	W/k^2
عدد رینولدز	Re	
دما	T	$^{\circ}C$
ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت	C_p	$J\ kg^{-1}K^{-1}$
اختلاف فشار	ΔP	kpa

نمادهای یونانی

گرانروی پویا	μ	$kg\ m\ s^{-1}$
گرانروی ایستا	ν	$m^2\ s^{-1}$
چگالی	ρ	$kg\ m^{-3}$

زیرنویس ها

سیال سرد	c
سیال پایه	f
سیال گرم	H
لوله داخلی	i
نانوسیال	nf
نانوذره	p

Abstract

The present paper aimed to conduct an experimental study on the hydro-thermodynamic performance of the double-tube heat exchanger with double twisted tape with three different steps of 3.5, 5 and 7 cm using turbulent flow of water-magnesium oxide Nanofluid in volume fractions of 0.7% and 1%. As results of this study, heat transfer coefficient in the Reynolds number of 16000 increased about 48% for the volume fraction of 0.7% and about 53% for the volume fraction of 1%. The simultaneous use of magnesium oxide Nanofluid and double twisted tapes with the step of 3.5 cm in the Reynolds number 6400 was more effective than deionized water compared to other results. In this case, the highest value of the performance evaluation criterion is obtained with 80% increase compared to the base state.