



بررسی تأثیر نوار مارپیچ برش خورده و نانوسیال آلومینا بر انتقال حرارت در مبدل حرارتی دولوله‌ای

سمیرا خانجانی¹، اکرم توکلی^{2*}، داوود جلالی وحید³، میثم نظری⁴

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

2- استادیار، مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

4- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

* تبریز، صندوق پستی 513351996، a.tavakoli@sut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 03 تیر 1394

پذیرش: 22 شهریور 1394

ارائه در سایت: 06 آبان 1394

کلید واژگان:

نانوسیال

مبدل دولوله‌ای

نوار مارپیچ برش خورده

انتقال حرارت جابجایی

چکیده

در مطالعه حاضر انتقال حرارت جابجایی اجباری آب و نانوسیال آلومینا در یک مبدل حرارتی دولوله‌ای مجهز به نوار مارپیچ معمولی و نوار مارپیچ برش خورده، بصورت تجربی بررسی شده و تأثیر غلظت نانوسیال و حضور نوار مارپیچ معمولی و برش خورده بر انتقال حرارت مورد مطالعه قرار گرفته‌است. آزمایشات در رژیم جریان مغشوش در محدوده عدد رینولدز 4000 تا 34000 انجام شده و غلظت نانوسیال مورد استفاده 0/025، 0/05 و 0/1 درصد حجمی می‌باشد. نتایج مطالعات حرارتی حاکی از افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال نسبت به سیال پایه می‌باشد. افزایش غلظت نانوسیال به صورت کلی باعث بهبود انتقال حرارت شده‌است. همچنین تأثیر استفاده از نانوسیال در اعداد رینولدز بالا بیشتر می‌باشد. استفاده از لوله حاوی نوار مارپیچ برش خورده و نانوسیال، نسبت به لوله خالی و لوله با نوار مارپیچ معمولی و سیال پایه، موجب افزایش انتقال حرارت و عدد ناسلت شده‌است. بررسی افت فشار سیستم نشان داد که نانوسیال مورد استفاده با غلظت‌های ذکر شده باعث افزایش اندکی در افت فشار شده که قابل صرف نظر کردن می‌باشد. اما نوارهای مارپیچ داخل لوله به علت ایجاد مقاومت و افزایش سطح تماس، باعث افزایش افت فشار سیستم شده و ضریب اصطکاک را نیز افزایش می‌دهند.

Effect of cut twisted tape and Al₂O₃ nanofluid on heat transfer of double tube heat exchanger

Samira Khanjani¹, Akram Tavakoli^{1*}, Davood Jalali Vahid², Meysam Nazari²

1- Department of Chemical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

*P.O.B.513351996 Tabriz,Iran, a.tavakoli@sut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 24 June 2015
Accepted 13 September 2015
Available Online 28 October 2015

Keywords:
Nanofluid
Double pipe heat exchanger
Cut twisted tape
Convective heat transfer

ABSTRACT

In this study, forced convective heat transfer characteristics of Al₂O₃/water nanofluid flowing through a double pipe heat exchanger with plain twisted tape and cut twisted tape inserts are investigated experimentally to reveal the effect of cut twisted tape and nanofluid concentration on heat transfer. Experiments are conducted in a turbulent flow regime with Re number ranging from 4000-34000 and in the particle volume concentration range of 0<φ<0.1%. The results of thermal studies showed enhancement of convective heat transfer with Al₂O₃ nanofluids compared with flow of water. Also, it was found that in higher Reynolds numbers the nanofluid has better heat transfer capability. The effects of twisted tape with and without cuts on edges on heat transfer coefficient and rate were investigated. It was found that the twisted tape with cut edges could enhance heat transfer rate better than twisted tape without cut edges. The pressure drop was investigated for flow of nanofluid and water. The results showed that there is a little difference between pressure drops in these cases. Friction factor and pressure drop in tube with plain twisted tape and cut twisted tape inserts are increased due to increasing flow resistance and contact surface between fluid and flow passage.

1- مقدمه

مبدل‌های حرارتی بطور وسیعی در کاربردهای مهندسی مانند صنایع شیمیایی، تولید برق، صنایع غذایی، مهندسی محیط زیست، بازیافت انرژی، تهویه هوا و سیستم تبرید بکار می‌روند. امروزه با توجه به پیشرفت تکنولوژی از جمله در فرایندهای صنعتی، نیاز به مبدل‌های با بازده و کارایی بالا بیشتر

احساس می‌شود. افزایش سطح انتقال حرارت یکی از روش‌های قدیمی در افزایش نرخ انتقال حرارت است [1]. محققان از روش‌های گوناگونی برای افزایش کارایی مبدل‌های حرارتی استفاده می‌کنند تا بتوانند در حجم‌های کوچکتری از مبدل‌های حرارتی بیشترین مقدار انتقال حرارت را داشته باشند. این روش‌ها معمولاً به دو گروه عمده فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. در

Please cite this article using:

S. Khanjani, A. Tavakoli, D. Jalali Vahid, M. Nazari, Effect of cut twisted tape and Al₂O₃ nanofluid on heat transfer of double tube heat exchanger, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 181-190, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

روش‌های فعال از نیروهای خارجی مانند میدان مغناطیسی یا الکترواستاتیکی و یا همزن‌های مکانیکی و چرخشی برای برهم زدن لایه مرزی و افزایش تلاطم برای بهبود انتقال حرارت استفاده می‌گردد. استفاده از نیروهای خارجی معمولاً پرهزینه است و تحت شرایط بحرانی نامناسب می‌باشد. روش‌های غیرفعال شامل روش‌های اصلاح خواص سیالات، شکل سطح، زبری، افزودنی‌های خارجی به سیال برای بهبود انتقال حرارت و یا استفاده از تجهیزات درون لوله‌ای برای ایجاد تلاطم جریان می‌باشد. روش‌های غیرفعال بدلیل هزینه کمتر، مورد توجه بیشتری قرار دارند [2].

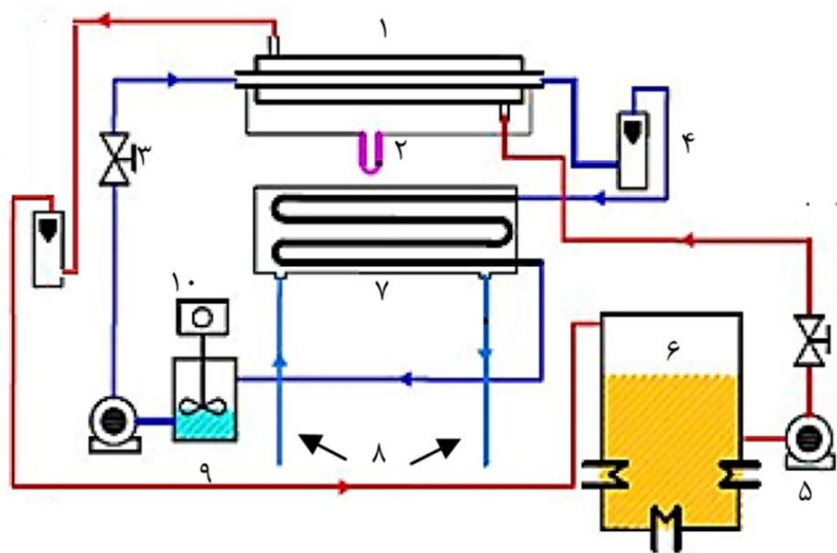
پایین بودن هدایت حرارتی سیالاتی مانند آب، مواد معدنی، روغن‌ها و اتیلن گلیکول، مانع کارایی بالای مبدل‌ها می‌شود. جهت افزایش توان انتقال حرارت این نوع از سیالات، از ریز ذرات جامد معلق که ضریب هدایت حرارتی بالائی دارند استفاده می‌نمایند. انواع مختلف این ریز ذرات مانند ذرات فلزی، غیرفلزی و پلیمری می‌توانند برای تشکیل دوغاب به این سیالات اضافه شوند [3].

ماکسول [4] اولین بار در سال 1873 مفهوم توزیع ذرات جامد در سیال پایه را بمنظور کاهش محدودیت انتقال حرارت برای سیالات با هدایت حرارتی پایین مطرح کرد. البته بکارگیری ذرات معلق در مقیاس میکرو و میلی‌متری موجب ایجاد مشکلاتی نظیر گرفتگی کانال‌ها، افزایش افت فشار، فرسایش خطوط لوله و کاهش انتقال مومنتوم و مشکلات رئولوژیکی و پایداری می‌شود. همچنین ذرات معلق تمایل شدیدی به ته‌نشینی سریع دارند. گرچه دوغاب‌ها هدایت حرارتی بالاتری نسبت به سیالات معمولی دارند، اما هنوز برای استفاده بعنوان سیالات انتقال دهنده حرارت، برای کاربردهای عملی، مناسب نیستند. استفاده از ذرات در ابعاد نانومتری برای اولین بار در یک سری مطالعات در آزمایشگاه ملی آرگون توسط چوی [5] در سال 1995 مطرح شد. او اولین کسی بود که از لفظ نانوسیال برای سوسپانسیون‌های نانوذرات در مایع استفاده نموده و ادعا کرد که چنین سیالاتی در مقایسه با سوسپانسیون‌های معمولی جامد در مایع خواص رئولوژیکی و پایداری بهتری دارند و می‌توانند به طرز چشمگیری هدایت حرارتی، نفوذ گرمایی و ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال را افزایش دهند. نانوسیالات سوسپانسیونی از ذرات جامد، با حداقل یکی از ابعاد اصلی کوچکتر از 100 نانومتر، در سیال پایه می‌باشند.

هدایت حرارتی ویژگی است که بیشترین توجه را در پژوهش‌های نانوسیال در چند دهه اخیر، به خود اختصاص داده‌است. پراکندگی نانوذرات فلزی یا اکسید فلزی در سیال پایه، منجر به افزایش هدایت حرارتی این سوسپانسیون‌ها شده‌است. ایستمن و همکارانش [6] در تحقیقات خود مشاهده کردند که رسانایی حرارتی نانوسیال حاوی نانوذرات مس با کسر حجمی 0/3% و اتیلن گلیکول، در مقایسه با سیال پایه، حدود 40% افزایش یافته‌است.

مطالعات تجربی نشان داده‌اند که هدایت حرارتی نانوسیالات به فاکتورهای زیادی مانند کسر حجمی، ماده تشکیل دهنده ذرات، اندازه ذرات، شکل ذرات و نوع سیال پایه بستگی دارد. ژوان و لی [7] بطور تجربی خصوصیات انتقال حرارت جابجایی و عملکرد جریان نانوسیال آب و مس را در یک لوله با شار حرارتی ثابت روی دیواره بررسی کرده و مشاهده کرده‌اند که خصوصیات انتقال حرارت نانوسیالات با افزایش کسر حجمی نانوذرات، بیشتر می‌شود. نانوسیالات با کسر حجمی پایین، افت بالایی برای توان پمپ ایجاد نمی‌کنند.

به دلیل اهمیت انتقال حرارت پیشرفته در کاربردهای صنعتی مطالعات

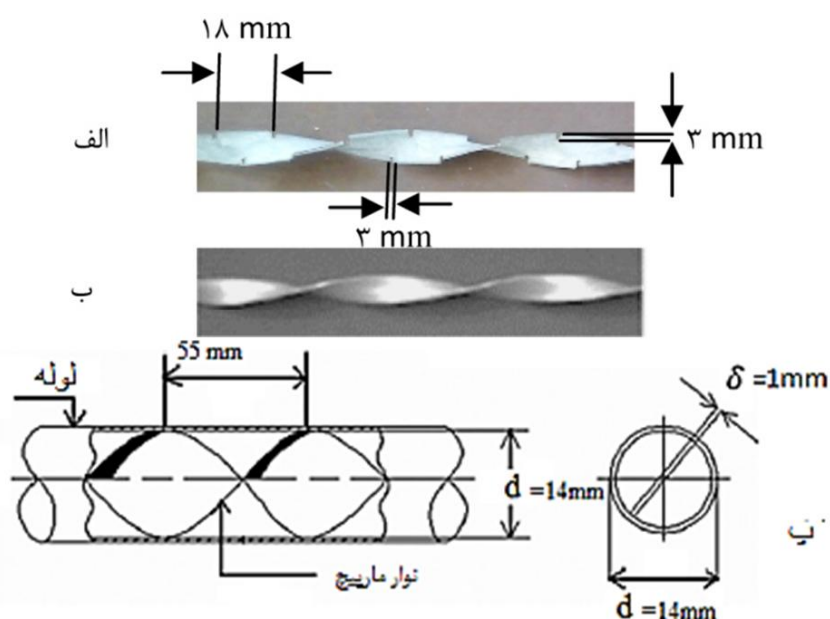


(الف)



(ب)

شکل 1 الف) شماتیک دستگاه ساخته شده برای آزمایشات: 1. مبدل حرارتی دولوله‌ای (قسمت آزمایش)، 2. فشار سنج، 3. شیر تنظیم دبی، 4. دبی سنج، 5. پمپ، 6. مخزن آب گرم، 7. مبدل حرارتی، 8. جریان آب شهری، 9. مخزن سیال سرد، 10. همزن. ب) تصویر واقعی دستگاه آزمایش



شکل 2 نوارهای مارپیچ استفاده شده داخل لوله، الف) نوار مارپیچ برش خورده، ب) نوار مارپیچ معمولی، پ) شماتیک نوار مارپیچ داخل لوله

3- روابط و فرمول‌های ریاضی

3-1- تبادل حرارت

تبادل حرارت بین سیال گرم موجود در پوسته و سیال سرد داخل لوله صورت می‌گیرد. برای محاسبه حرارت مبادله شده از تغییرات انرژی در پوسته و لوله میانگین گرفته می‌شود.

$$Q_h = \dot{m} C_p (T_{h,in} - T_{h,out}) \quad (1)$$

مطالعه کرده‌است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان دهنده افزایش قابل توجه انتقال حرارت با استفاده از نوار مارپیچ می‌باشد.

با توجه به مطالعات انجام شده، انتقال حرارت نانوسیال در مبدل حرارتی دولوله‌ای با نوار مارپیچ برش خورده بصورت آزمایشگاهی بررسی نشده‌است. در مقاله حاضر ضریب انتقال حرارت جابجایی، افت فشار و ضریب اصطکاک نانوسیال آلومینا با سیال پایه آب مقطر در یک مبدل حرارتی دولوله‌ای با نوار مارپیچ معمولی و برش خورده بصورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصله با نتایج سیال پایه و نیز مبدل دولوله‌ای مقایسه شده‌است.

2- دستگاه آزمایشگاهی

نمایی از دستگاه مورد استفاده برای انجام آزمایشات و تصویر واقعی آن در شکل 1 نشان داده شده‌است. دستگاه آزمایش از مخازن سیال گرم و سرد، پمپ‌ها، مبدل‌های حرارتی، دبی سنج‌ها، حسگرهای حرارتی، گرمکن حرارتی، ترمومترها، همزن، کنتاکتور و مانومتر جیوه‌ای U شکل، تشکیل شده‌است.

مبدل دو لوله‌ای مورد استفاده در این آزمایش از یک لوله مسی به طول 1 متر و قطر 35 میلی‌متر و یک لوله مسی با طول 1/15 متر و قطر داخلی 14 میلی‌متر و ضخامت 0/9 میلی‌متر ساخته شده که بصورت هم مرکز در داخل لوله اول قرار داده شده است. نوار مارپیچ (TT)¹ از جنس استیل ضد زنگ به طول 1 متر، ضخامت 1 میلی‌متر، عرض 13 میلی‌متر و طول گام 55 میلی‌متر است. نوار مارپیچ برش خورده (CTT)² با خصوصیات مارپیچ ساده است که برش‌هایی به عمق و عرض 3 میلی‌متر و فاصله 18 میلی‌متر بر روی آن ایجاد شده است. این نوارها طوری داخل لوله قرار می‌گیرند که بصورت کاملاً مماس با دیواره داخلی لوله باشند. شکل 2 نمایی از نوارهای مارپیچ و سطح مقطع لوله را نشان می‌دهد. سیال سرد با چهار دبی 3، 7، 11 و 15 لیتر بر دقیقه وارد لوله شده و پس از سرد شدن در مبدل U شکل، مجدداً به مخزن ذخیره بازگردانده می‌شود. سیال گرم نیز در چهار دما (در محدوده 40-70°C) وارد پوسته شده و پس از تبادل حرارت با سیال داخل لوله، به مخزن سیال گرم باز می‌گردد. این آزمایشات در مبدل دو لوله‌ای با لوله معمولی، لوله با نوار مارپیچ معمولی و لوله با نوار مارپیچ برش خورده و با نانوسیال با غلظت‌های 0/025، 0/05 و 0/1 درصد حجمی انجام شده‌است. دمای سیال سرد و گرم در ورودی و خروجی مبدل مورد آزمایش، توسط حسگرهای حرارتی LM35 اندازه‌گیری شده‌است. جریان سیال در این مبدل بصورت متقاطع می‌باشد. برای تنظیم دبی سیال در مبدل قبل از ورود جریان به دبی سنج، از شیر سوزنی استفاده شده‌است. دبی سیال گرم ورودی به پوسته ثابت در نظر گرفته شده‌است. دماها در حالت پایا گزارش شده‌اند. در هر سه حالت لوله خالی، لوله با نوار مارپیچ و لوله با نوار مارپیچ برش خورده با سیال پایه و نانوسیال، افت فشار سیستم توسط مانومتر جیوه‌ای محاسبه شده‌است. برای کاهش اتلاف حرارتی از ناحیه پوسته، تمام قسمت‌های خارجی مبدل توسط عایق حرارتی دولایه پوشانده شده‌است.

برای تهیه نانوسیال با توجه به غلظت مورد نظر، مقدار مشخصی از پودر نانوذرات درون آب مقطر بعنوان سیال پایه ریخته شده و به مدت 2 ساعت تحت اولتراسوند قرار می‌گیرند. این زمان برای شکستن پیوند فیزیکی اولیه ذرات و ایجاد پایداری نسی نانوسیال کافی می‌باشد. دستگاه اولتراسوند دارای فرکانس مافوق صوت 42 کیلوهرتز و توان 160 وات می‌باشد. اندازه نانوذرات مورد استفاده 20-40 نانومتر بوده و نانوسیال با روش دومرحله‌ای تهیه گردید.

1- Twisted Tape
2- Cut Twisted Tape

که در آن L طول کانال، d_i قطر کانال، u سرعت متوسط سیال، f ضریب اصطکاک و Δp مقدار افت فشار می‌باشد.

3-4- خواص ترموفیزیکی نانوسیال

برای محاسبه چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیالات از روابط (12) و (13) استفاده می‌شود [13]:

$$\rho_{nf} = \varphi \rho_{np} + (1 - \varphi) \rho_f \quad (12)$$

$$C_{p,nf} = \varphi C_{p,np} + (1 - \varphi) C_{p,f} \quad (13)$$

در روابط (12) و (13) ρ_f و $C_{p,f}$ مقادیر مربوط به چگالی و گرمای ویژه نانو ذرات آلومینا می‌باشد که به ترتیب برابر 3890 کیلوگرم بر متر مکعب و 880 ژول بر کیلوگرم کلون است.

رابطه (14) و (15) ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال آلومینا را نشان می‌دهد [18]:

$$k_{nf} = (1 + 3\varphi) k_f \quad (14)$$

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + 2.5\varphi \quad (15)$$

در این روابط φ غلظت حجمی نانوسیال و k_f و μ_f به ترتیب ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته آب مقطر می‌باشد.

3-5- صحت سنجی نتایج

به منظور اطمینان از صحت نتایج بدست آمده از آزمایش، این نتایج با روابط پیشنهاد شده در دیگر تحقیقات مقایسه شده است. برای مقایسه عدد ناسلت آب در داخل لوله خالی، از معادله دیتوس [19] استفاده شده که در معادله (16) نشان داده شده است. همچنین عدد ناسلت برای نانوسیال در داخل لوله خالی با رابطه پیشنهادی توسط ژوان و لی [7] که در رابطه (17) بیان شده، مقایسه شده است.

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.3} \quad (16)$$

$$Nu = 0.0059 (1 + 7.6286 \varphi^{0.6886} Pe_p^{0.001}) Re_{nf}^{0.9238} Pr_{nf}^{0.4} \quad (17)$$

برای اعتبار سنجی نتایج بدست آمده از افت فشار، نتایج آزمایش سیال پایه با رابطه تئوری موجود مقایسه شده است. رابطه (18) معادله بلازیوس و ضریب اصطکاک مربوط به آن را نشان می‌دهد.

$$f_r = 0.316 Re^{-0.25} \Delta p = f_r \frac{L \rho u^2}{d_i 2} \quad (18)$$

4- نتایج و بحث

بطور کلی در مطالعه حاضر عواملی چون سرعت جریان سیال، جریان چرخشی ایجاد شده توسط نوار مارپیچ، دما، خواص حرارتی و غلظت نانوسیال بر لایه مرزی جریان و ضریب انتقال حرارت تأثیر می‌گذارند.

4-1- بررسی اثر دمای سیال مخزن گرم بر ضریب انتقال حرارت

نمودار تغییرات عدد ناسلت بر حسب رینولدز در 4 دمای مختلف مخزن آب گرم برای آب و نانوسیال با غلظت حجمی 0/1 درصد نانوذرات در داخل لوله با نوار مارپیچ برش خورده، در شکل‌های 3 و 4 نشان داده شده است. در این نمودارها تأثیر دمای مخزن آب گرم بر انتقال حرارت مورد بررسی قرار می‌گیرد. همانطور که در نمودار شکل 3 ملاحظه می‌شود، با افزایش عدد رینولدز، ضریب انتقال حرارت جابجایی و در نتیجه عدد ناسلت افزایش می‌یابد. تأثیر دمای سیال جاری در پوسته در لوله‌ی پر شده با نوار مارپیچ برش خورده ناچیز می‌باشد. افزایش دمای سیال گرم موجب افزایش بسیار اندکی در میزان عدد ناسلت شده است.

$$Q_c = \dot{m} C_p (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (2)$$

در روابط (1) و (2) $T_{c,in}$ ، $T_{c,out}$ ، $T_{h,out}$ ، $T_{h,in}$ به ترتیب دمای ورودی سیال گرم، دمای خروجی سیال گرم، دمای خروجی سیال سرد، دمای ورودی سیال سرد، $\dot{m}$ نرخ جرمی جریان سیال و C_p گرمای ویژه سیال می‌باشد.

مقدار حرارت اتلاف شده بین سیال گرم و سرد در مبدل حرارتی با استفاده از رابطه (3) محاسبه شده است.

$$\varepsilon = \frac{Q_h - Q_c}{Q_h} \times 100 \quad (3)$$

بر اساس این رابطه مقدار خطای ناشی از اتلاف حرارتی از قسمت آزمایش به محیط 3% تا 17% می‌باشد. بنابراین نرخ انتقال حرارت متوسط برای محاسبه ضریب انتقال حرارت متوسط با استفاده از رابطه (4) محاسبه می‌شود:

$$Q_{avg} = \frac{Q_c + Q_h}{2} \quad (4)$$

3-2- ضریب کلی انتقال حرارت

برای ارزیابی کارایی مبدل حرارتی، محاسبه ضریب کلی انتقال حرارت و عدد ناسلت می‌تواند به عنوان بهترین گزینه مطرح شود. ضریب کلی انتقال حرارت را می‌توان با رابطه (5) بیان نمود:

$$U_i = \frac{Q_{avg}}{A_i \Delta T_{LMTD}} \quad (5)$$

که در آن ΔT_{LMTD} اختلاف دمای متوسط لگاریتمی است که از رابطه (6) محاسبه می‌شود:

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{h,in} - T_{c,out}) - (T_{h,out} - T_{c,in})}{\ln \left(\frac{T_{h,in} - T_{c,out}}{T_{h,out} - T_{c,in}} \right)} \quad (6)$$

و همچنین A_i سطح انتقال حرارت لوله می‌باشد که می‌توان به صورت رابطه 7 تعریف کرد:

$$A_i = \pi d_o L \quad (7)$$

که در آن L طول لوله و d_o قطر خارجی لوله می‌باشد.

ضریب انتقال حرارت جابجایی در سمت لوله، h_i ، با استفاده از رابطه (8) بیان می‌شود که در این رابطه به دلیل کم بودن ضخامت لوله مسی، از مقاومت لوله مسی صرف نظر شده است.

$$\frac{1}{U_i} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} \quad (8)$$

که در آن ضریب انتقال حرارت در سمت پوسته، h_o ، با استفاده از رابطه دیتوس بولتر بدست می‌آید [14]:

$$Nu_o = \frac{h_o D_h}{k} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.3} \quad (9)$$

$$4 \times 10^3 < Re < 10^6 \quad 0.6 < Pr < 100$$

که D_h قطر هیدرولیکی قسمت پوسته می‌باشد.

پس از بدست آوردن ضریب انتقال حرارت جابجایی در سمت لوله با استفاده از رابطه (8)، می‌توان عدد ناسلت را با رابطه (10) محاسبه نمود:

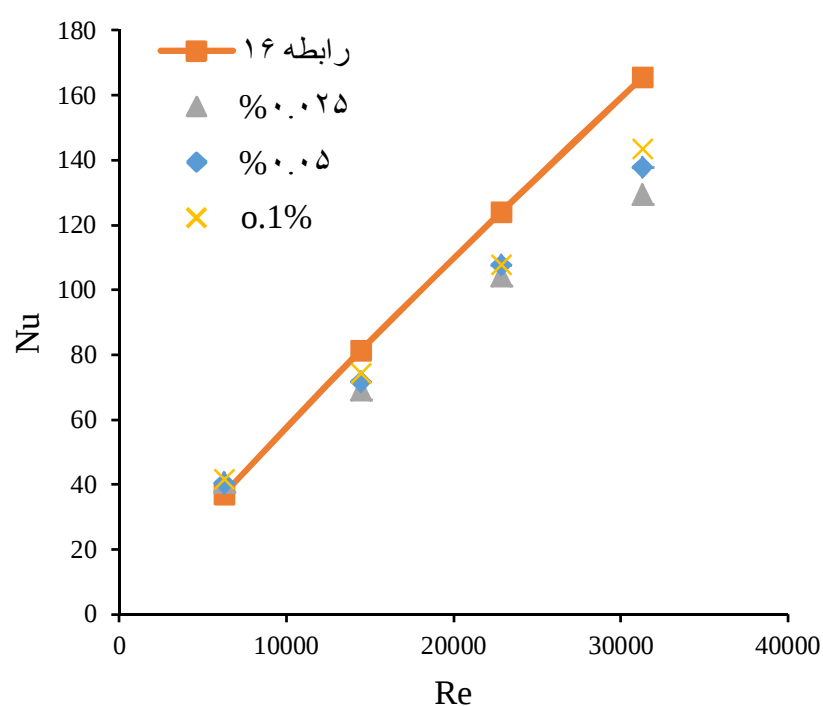
$$Nu_i = \frac{h_i d_i}{k} \quad (10)$$

که در این معادله d_i قطر داخلی لوله و k ضریب هدایت حرارتی سیال سرد می‌باشد.

3-3- افت فشار و محاسبه ضریب اصطکاک

افت فشار در کانال به وسیله مانومتر جیوه‌ای U شکل اندازه گیری می‌شود. گرادیان هیدرولیکی عبارتست از تغییرات هد جریان (افت فشار جریان به واحد وزن آن) نسبت به واحد طول لوله‌ای که در آن این افت رخ می‌دهد. رابطه دارسی - ویسباخ برای افت فشار به صورت معادله (11) ارائه شده است:

$$\Delta p = f \frac{L \rho u^2}{d_i 2} \quad (11)$$



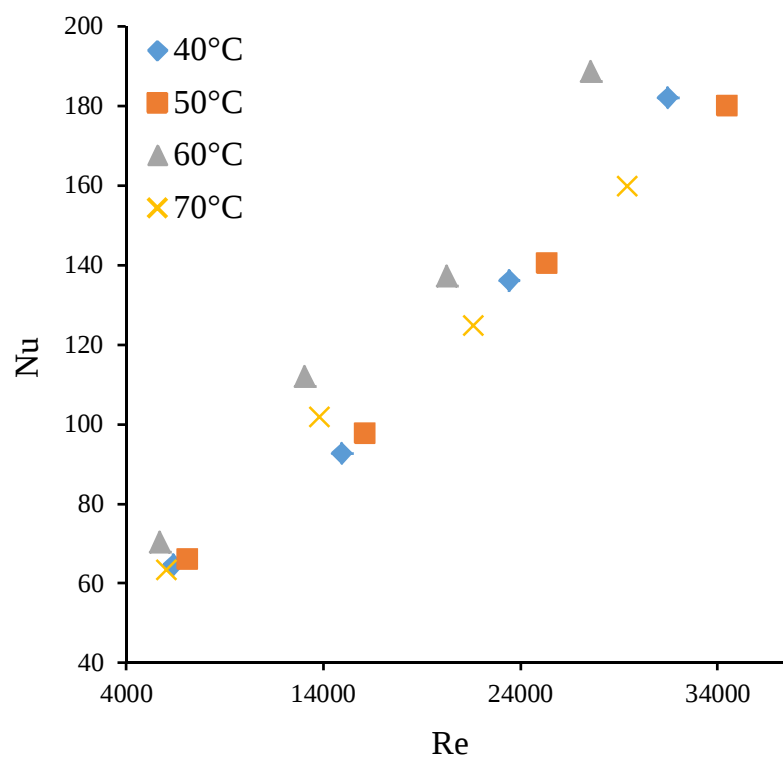
شکل 6 تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در دمای 60 درجه سانتیگراد برای نانوسیال با غلظت‌های مختلف در لوله خالی و مقایسه با رابطه ژوان و لی [7]

در شکل 4 تأثیر دمای پوسته بر انتقال حرارت نانوسیال آلومینا با غلظت حجمی 0/1 درصد نانوذرات در داخل لوله با نوار مارپیچ برش خورده نشان داده شده‌است. با توجه به نمودار ملاحظه می‌شود که همانند آب مقطر، در مورد نانوسیال نیز افزایش عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز همراه بوده‌است. افزایش دمای سیال گرم تغییر چندانی در ضریب انتقال حرارت جابجایی ایجاد نکرده‌است.

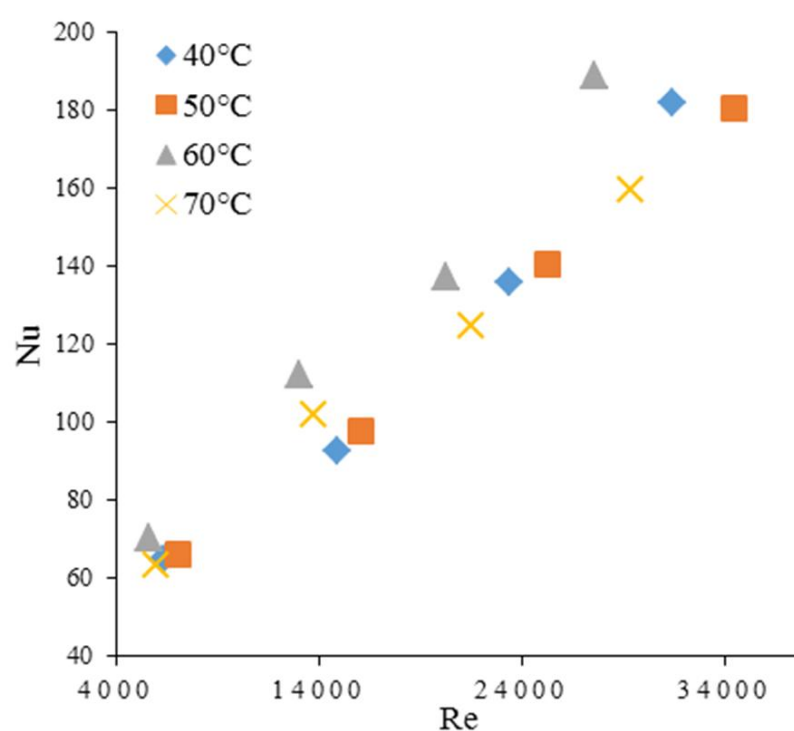
4-2- بررسی تأثیر نانوسیال بر ضریب انتقال حرارت

شکل‌های 5 و 6 تغییرات عدد ناسلت بر حسب رینولدز را برای آب و نانوسیال در لوله خالی نشان می‌دهد. افزایش عدد ناسلت با افزایش رینولدز در این شکل‌ها قابل مشاهده است. همچنین در این نمودارها داده‌های آزمایشگاهی با روش پیشنهادی معادله 15 و 16 مقایسه شده‌است که نتایج تجربی با روش پیشنهادی دیتوس - بالتر و ژوان و لی تطابق خوبی دارند. شکل 7 افت فشار تجربی آب درون لوله خالی را نشان می‌دهد. رابطه (18) برای آب نیز در این نمودار نشان داده شده است. نتایج بدست آمده برای آزمایش آب داخل لوله با رابطه بلازیوس اختلاف زیادی را نشان نمی‌دهد. شکل 8 تغییرات عدد ناسلت بر حسب رینولدز را برای آب و نانوسیال با غلظت‌های مختلف در یک دمای مشخص در داخل لوله خالی نشان می‌دهد. با توجه به شکل 8 مشاهده می‌شود که افزودن نانوذرات به آب مقطر موجب افزایش انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات نسبت به سیال پایه شده‌است. از دلایل این امر حرکت براونی نانوذرات، افزایش ضریب هدایت گرمایی، انتقال انرژی به وسیله پراکندگی نانو ذرات و مهاجرت ذرات به دلیل گرادیان ویسکوزیته می‌باشد. در اعداد رینولدز بالاتر از 12000 افزایش انتقال حرارت نسبت به آب، بیشتر دیده می‌شود. زیرا با افزایش سرعت و در هم شدن جریان، ضخامت لایه مرزی کاهش می‌یابد که این پدیده موجب بهبود انتقال حرارت می‌گردد [14]. همچنین افزایش انتقال حرارت با افزایش غلظت نانوسیال اتفاق افتاده است. بیشترین مقدار عدد ناسلت در رینولدز حدود 30000 و با نانوسیال با غلظت حجمی 0/1 درصد بدست آمده‌است. در این رینولدز افزایش 28/56 درصدی انتقال حرارت نسبت به سیال پایه بدست آمده‌است.

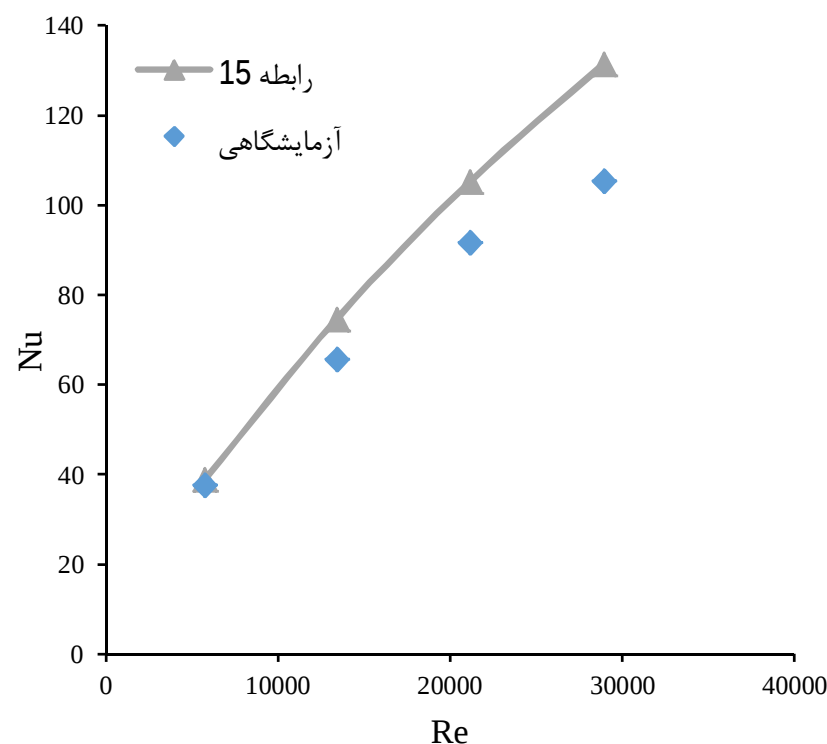
تغییرات عدد ناسلت بر حسب رینولدز برای آب و نانوسیالات در دمای 70 درجه سانتیگراد در لوله با نوار مارپیچ برش خورده در شکل 9 نشان داده شده‌است.



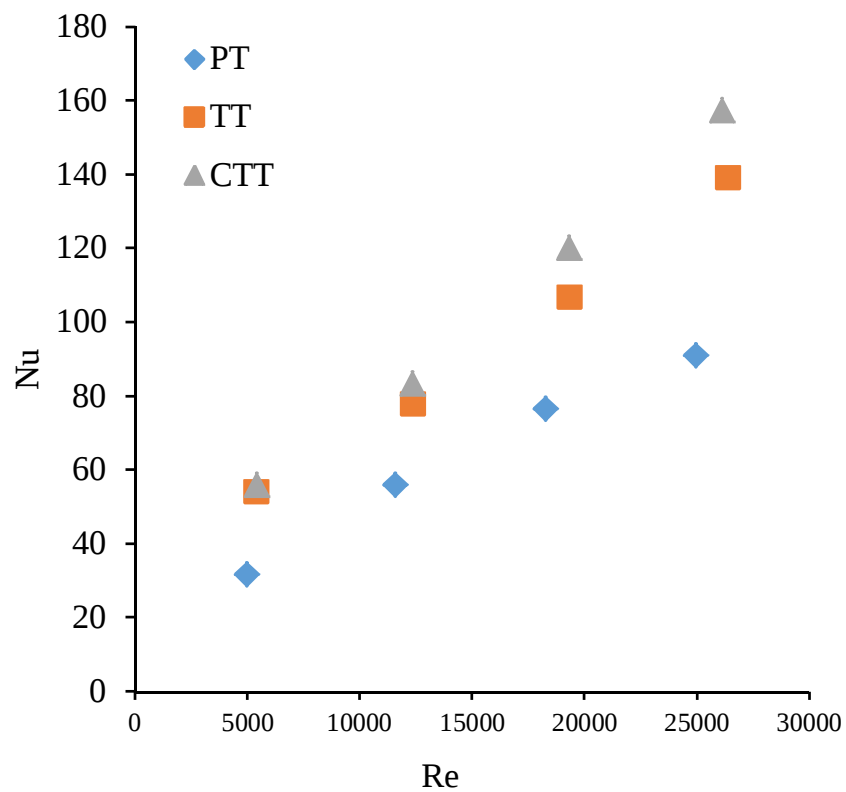
شکل 3 تغییرات عدد ناسلت بر حسب رینولدز برای آب در لوله با نوار مارپیچ برش خورده در دماهای مختلف سیال گرم



شکل 4 تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز برای نانوسیال با غلظت 0/1 درصد در لوله با نوار مارپیچ برش خورده در دماهای مختلف سیال گرم



شکل 5 تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در دمای 60 درجه سانتیگراد برای آب در لوله خالی و مقایسه با رابطه دیتوس-بولتر



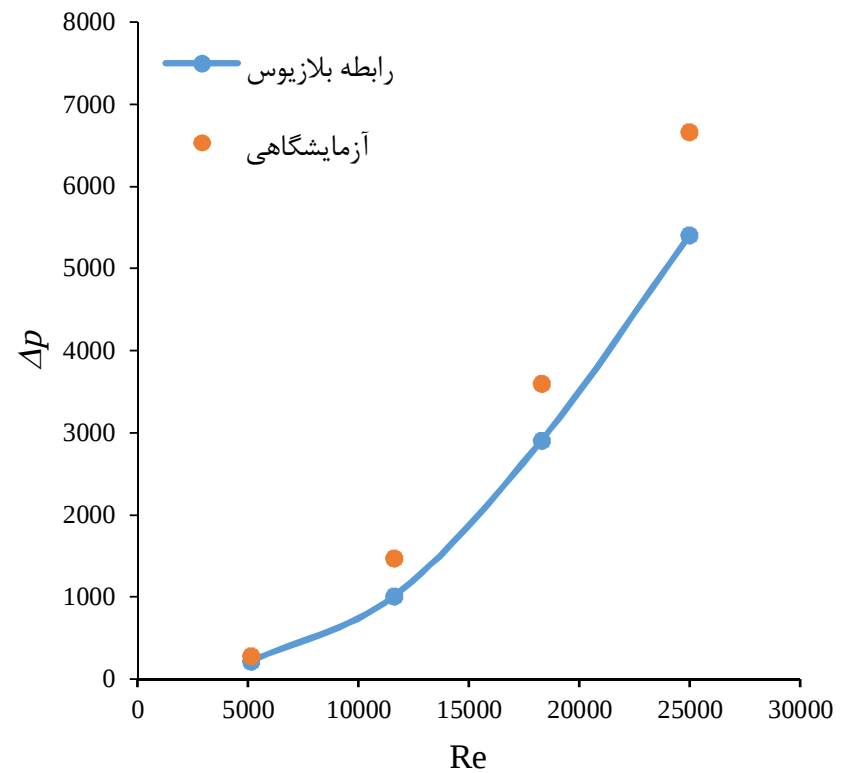
شکل 10 تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز برای آب مقطر در دمای 50 درجه سانتیگراد سیال گرم در لوله خالی و پر شده با نوارها

همانطور که در شکل مشخص است در دبی‌های پایین سیال سرد، اختلاف بین عدد ناسلت برای نانوسیالات با غلظت‌های حجمی مختلف و سیال پایه تقریباً ناچیز بوده در حالیکه با افزایش سرعت سیال بعثت درهم شدن جریان و کاهش ضخامت لایه مرزی، این اختلاف بیشتر شده و میزان انتقال حرارت نانوسیالات نسبت به سیال پایه افزایش یافته‌است. نانوسیال با غلظت حجمی 0/1 درصد، بیشترین مقدار عدد ناسلت را در رینولدز حدود 30000 داشته‌است. در این محدوده رینولدز افزایش 15/33 درصدی انتقال حرارت نسبت به سیال پایه بدست آمده‌است.

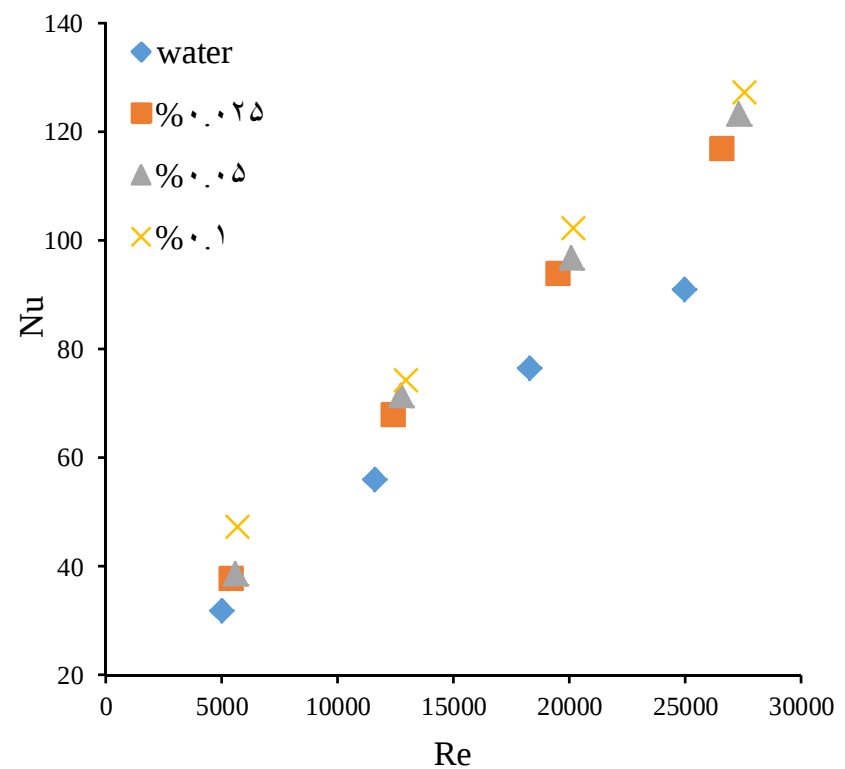
در این قسمت ابتدا تأثیر استفاده از نوار مارپیچ معمولی و برش خورده در انتقال حرارت آب و نانوسیال با غلظت‌های مختلف، بصورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته و سپس مقایسه‌ای نهایی میان نتایج حاصل از نوار مارپیچ در نانوسیالات و سیال پایه صورت می‌گیرد.

در شکل 10 نمودار عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز برای سیال پایه در داخل لوله خالی¹ (PT) و لوله حاوی نوارهای مارپیچ ساده² (TT) و برش خورده³ (CTT) در دمای 50 درجه سانتی‌گراد سیال گرم نشان داده شده‌است. همانطور که در شکل نیز مشخص است، روند تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز برای هر سه حالت مشابه است، یعنی با افزایش دبی جریان که موجب افزایش عدد رینولدز می‌گردد، ضریب انتقال حرارت جابجایی برای حالت‌های مختلف هندسه مبدل، افزایش می‌یابد. انتقال حرارت با استفاده از نوار مارپیچ برش‌خورده نسبت به نوار مارپیچ معمولی بیشتر است. چون این نوع نوار اغتشاش بیشتری در نزدیکی دیواره لوله برای سیال ایجاد می‌کند. همچنین باعث تشکیل یک گردابه پشت قسمت‌های برش‌خورده می‌شود که منجر به افزایش انتقال حرارت در مقایسه با نوار مارپیچ معمولی می‌گردد. علاوه بر این انتقال حرارت مربوط به لوله حاوی نوار مارپیچ معمولی از لوله خالی بیشتر است. زیرا جریان چرخشی بوجود آمده، موجب اختلاط بهتر جریان بین مرکز و دیواره لوله می‌گردد. این پدیده باعث افزایش نوسانات جریان آشفته مماسی و شعاعی، نازک شدن لایه مرزی و بنابراین موجب افزایش نرخ انتقال حرارت در سمت لوله می‌گردد.

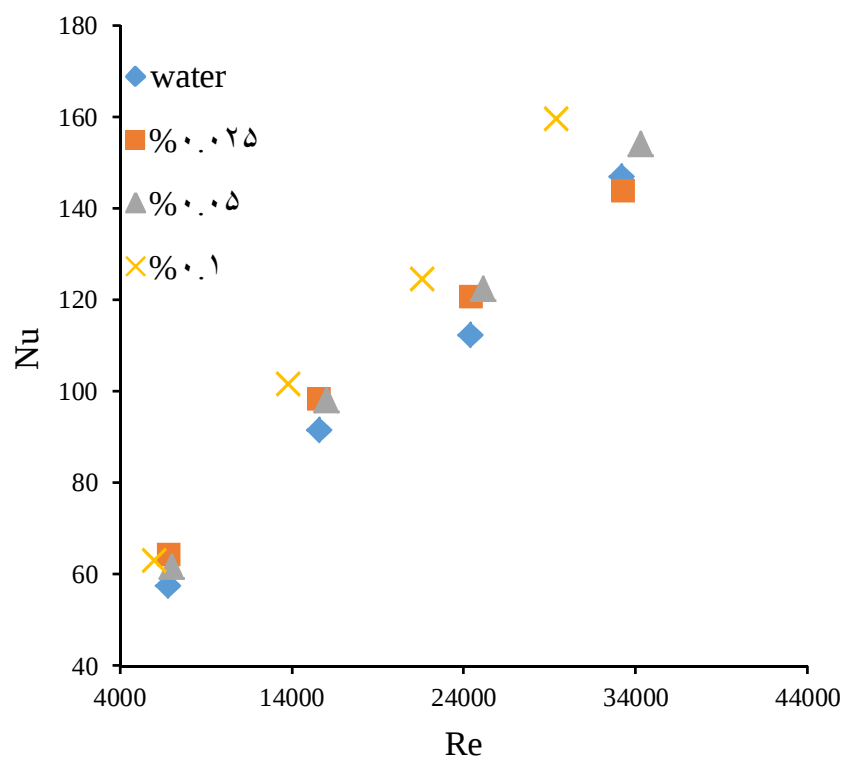
1- Plain Tube
2- Twisted Tape
3- Cut Twisted Tape



شکل 7 افت فشار آب در برابر عدد رینولدز و مقایسه آن با رابطه بلازیوس



شکل 8 تغییرات ناسلت بر حسب رینولدز در لوله خالی در دمای 50 درجه سانتیگراد

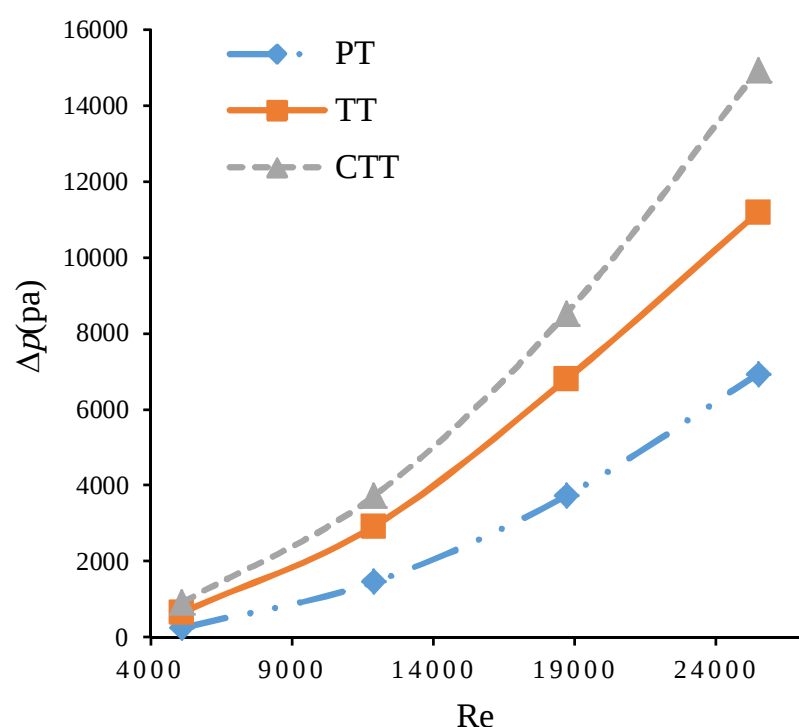


شکل 9 تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در لوله با نوار مارپیچ برش خورده در دمای 70 درجه سانتیگراد برای آب و نانوسیال

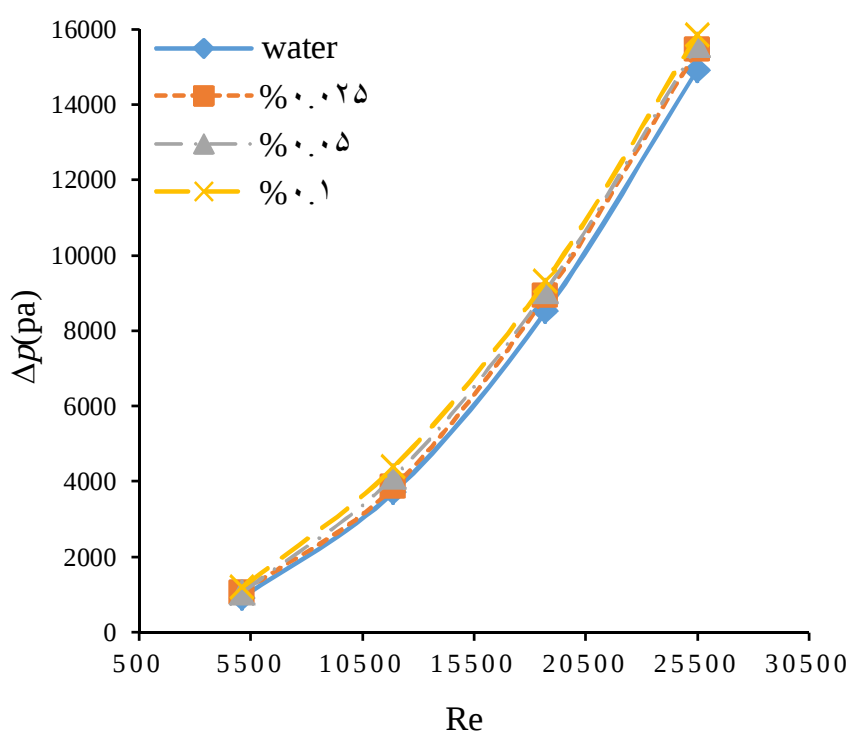
همانطور که در شکل مشاهده می‌شود بطور کلی استفاده از نانوسیال نسبت به آب و همچنین استفاده از نوار مارپیچ نسبت به لوله خالی و برش در نوار مارپیچ باعث افزایش انتقال حرارت شده‌است.

در ادامه رفتار هیدرودینامیکی جریان سیال در داخل مبدل دولوله‌ای با نوارهای مارپیچ مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

انتقال حرارت و تغییرات دمای لوله تأثیر بسیار ناچیزی بر روی افت فشار و رفتار هیدرودینامیکی سیال دارد. شکل 13 تغییرات افت فشار را برای آب در لوله خالی، لوله با نوار مارپیچ و لوله با نوار مارپیچ برش‌خورده نشان می‌دهد. در این شکل تأثیر هندسه سیستم بر افت فشار بررسی شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود افت فشار با افزایش عدد رینولدز افزایش یافته‌است. با افزایش سرعت در لوله، با توجه به بقاء مومنتوم فشار کاهش می‌یابد. چون انرژی جنبشی در لوله با افت فشار یا گرادیان فشار موازنه می‌شود. افت فشار مربوط به لوله حاوی نوار مارپیچ برش‌خورده از لوله معمولی و لوله حاوی نوار مارپیچ معمولی بیشتر است. علت این پدیده ایجاد اغتشاشات اضافی است که موجب افزایش تماس مماسی بین جریان ثانویه و سطح دیواره لوله می‌شود. همه این فاکتورها باعث افزایش مقاومت جریان و در نتیجه افزایش افت فشار می‌گردد.



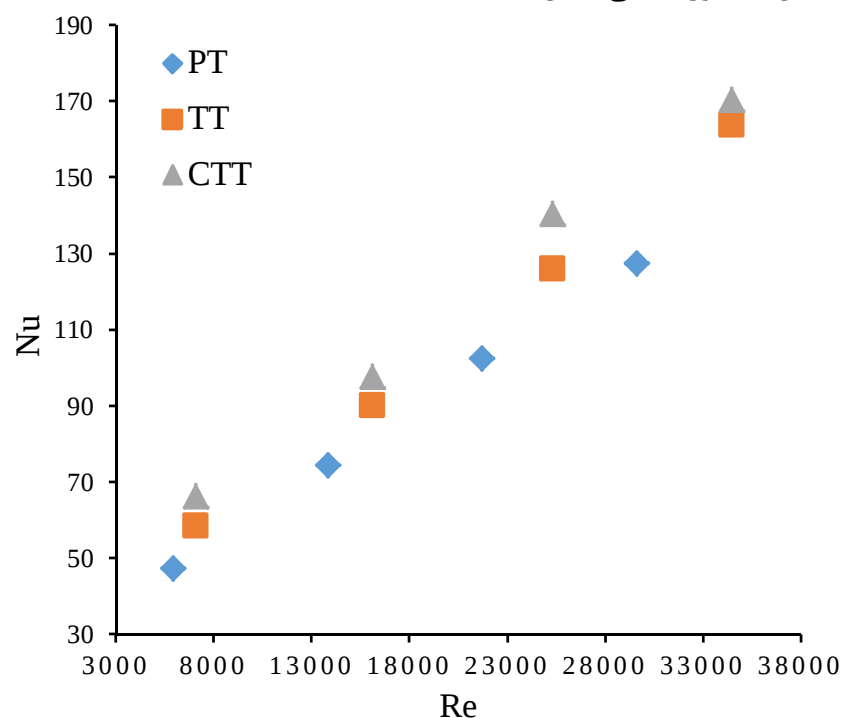
شکل 13 تغییرات افت فشار بر حسب عدد رینولدز برای آب در لوله خالی، لوله پر شده با نوار مارپیچ و لوله پر شده با نوار مارپیچ برش خورده



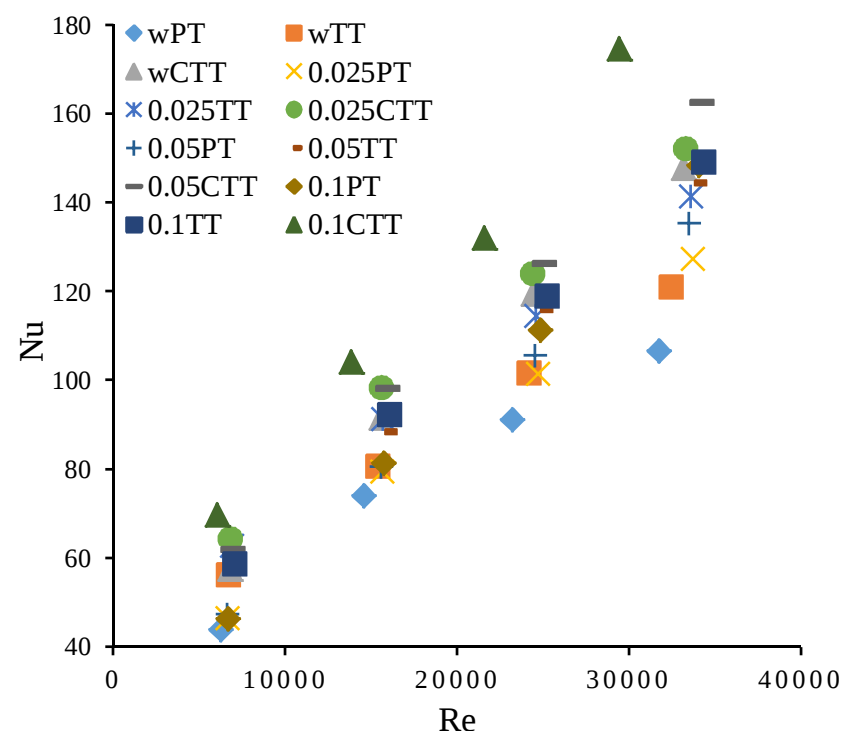
شکل 14 تغییرات افت فشار بر حسب عدد رینولدز برای سیالات مختلف در لوله با نوار مارپیچ برش خورده

نمودار تغییرات عدد ناسلت بر حسب رینولدز در مبدل دولوله‌ای ساده، مبدل دولوله‌ای حاوی نوار مارپیچ معمولی و نوار مارپیچ برش خورده با استفاده از نانوسیال آلومینا با غلظت 0/1 درصد حجمی در شکل 11 نشان داده شده‌است. با دقت در نمودار می‌توان دریافت که با افزایش عدد رینولدز میزان انتقال حرارت در سه حالت مختلف مبدل حرارتی به علت تشدید اختلاط نانوسیال و حرکت پر هرج و مرج نانوذرات در نانوسیال افزایش می‌یابد. [20] استفاده از نوارهای مارپیچ به علت ایجاد جریان‌های ثانویه و چرخشی و کاهش ضخامت لایه مرزی، موجب افزایش انتقال حرارت نسبت به لوله خالی شده‌است. [14] استفاده از نوار مارپیچ برش خورده نسبت به نوار مارپیچ معمولی در نانوسیال، افزایش نسبی عدد ناسلت را به همراه داشته‌است که نشان دهنده تأثیر برش‌های نوار مارپیچ در بهبود انتقال حرارت بوده‌است. به عنوان مثال در مورد نانوسیال با غلظت 0/1 درصد در عدد رینولدز 34000 انتقال حرارت با نوار مارپیچ برش خورده 10 درصد بیشتر از نوار مارپیچ معمولی و 28/6 درصد بیشتر از لوله خالی بوده‌است.

در شکل 12 تغییرات عدد ناسلت بر حسب رینولدز در 3 حالت مبدل دولوله‌ای برای آب و نانوسیالات در همه غلظت‌های حجمی در یک دمای مشخص به صورت کلی نشان داده شده‌است.



شکل 11 تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز برای نانوسیال با غلظت 0/1 درصد حجمی



شکل 12 نمودار کلی عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در دمای 70 درجه سانتیگراد

شکل 14 تأثیر استفاده از آب و نانوسیالات را بر افت فشار در لوله حاوی نوار مارپیچ برش خورده نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود بکارگیری نانوسیالات در سیستم، افت فشار را به مقدار ناچیزی نسبت به آب، افزایش داده‌است. دلیل این رفتار را می‌توان به بیشتر بودن ویسکوزیته نانوسیال نسبت به آب نسبت داد. این مقدار افزایش بسیار اندک و قابل صرف نظر کردن می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که تغییرات افت فشار نانوسیال در غلظت‌های مختلف حجمی نسبت به هم نیز بسیار ناچیز است.

شکل 15 تغییرات کلی ضریب اصطکاک بر حسب رینولدز را با استفاده از آب و نانوسیالات با غلظت‌های حجمی مختلف و در 3 حالت مختلف لوله نشان می‌دهد. ضریب اصطکاک سیالات با افزایش رینولدز کاهش می‌یابد. در مورد سیال پایه با لوله خالی ضریب اصطکاک تغییر چندانی نمی‌کند. همانطور که در شکل مشخص است ضریب اصطکاک لوله پر شده با نوار مارپیچ برش‌خورده بیشتر از لوله خالی است. دلیل این پدیده افزایش اصطکاک ناشی از افزایش سطح و تماس مماسی بیشتر بین جریان چرخشی و سطح لوله است. همچنین مشاهده می‌شود که ضریب اصطکاک لوله پر شده با نوار مارپیچ برش‌خورده بیشتر از نوار مارپیچ معمولی است. علت این امر ایجاد نوسانات تلاطم جریان در کناره‌های نوار برش‌خورده‌است. با توجه به نمودار همچنین می‌توان مشاهده کرد که ضریب اصطکاک مربوط به نانوسیالات از سیال پایه بیشتر است و با افزایش غلظت نانوسیالات این مقدار افزایش می‌یابد که البته ناچیز است. علت این امر، افزایش ویسکوزیته نانوسیال با افزایش غلظت و در نتیجه افزایش افت فشار می‌باشد.

در ادامه به معرفی ضریب کارایی حرارتی پرداخته می‌شود. ضریب کارایی حرارتی به صورت رابطه (19) بیان می‌شود: [10، 20 و 21]

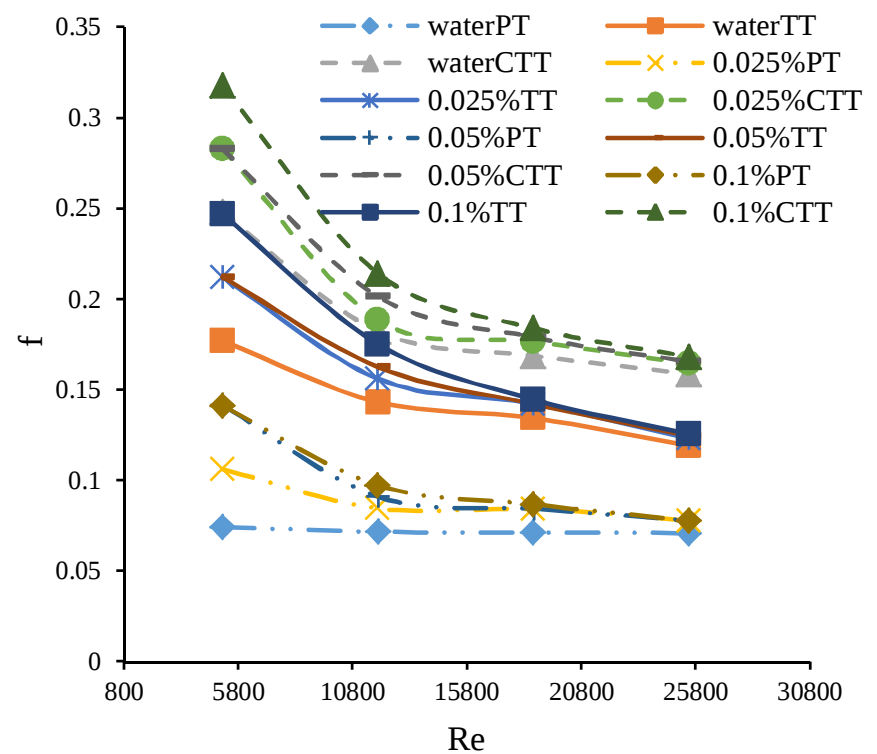
$$\eta = \frac{\frac{Nu_E}{f_E}}{\left(\frac{f_f}{f_E}\right)^{1/3}} \quad (19)$$

در این رابطه Nu_E و f_E به ترتیب عدد ناسلت و ضریب اصطکاک لوله در حالت افزایش یافته ناشی از استفاده از نانوسیال و نوارهای مارپیچ می‌باشد. برای سود خالص انرژی، مقدار ضریب کارایی حرارتی باید بیشتر از 1 باشد.

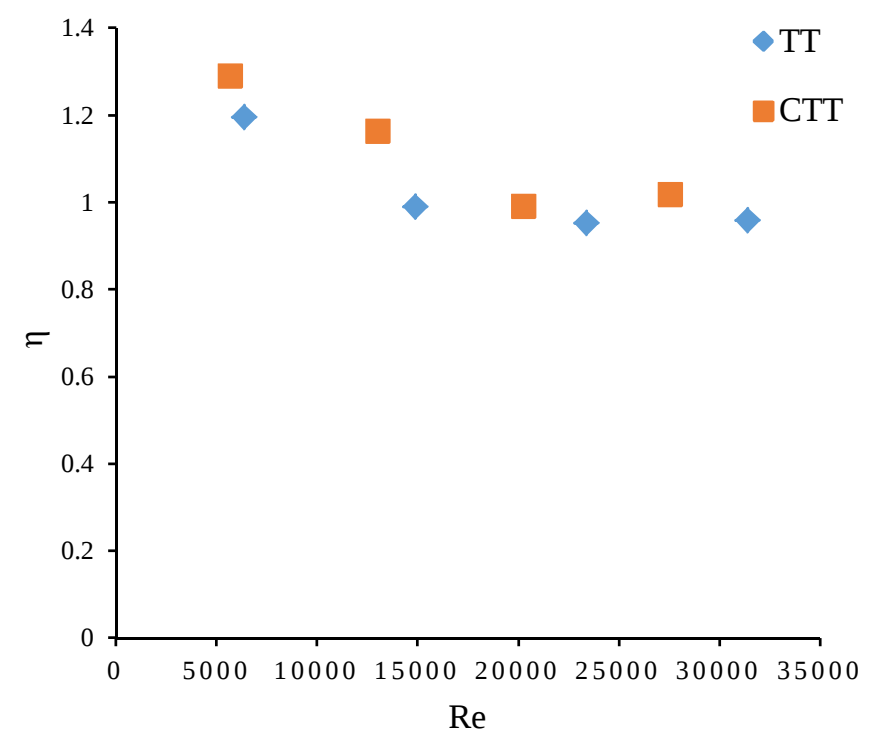
در شکل 16 تأثیر هندسه سیستم بر ضریب کارایی حرارتی نانوسیال با غلظت 0/1 درصد نشان داده شده است. همانطور که در شکل 16 ملاحظه می‌شود با افزایش عدد رینولدز ضریب کارایی حرارتی روند تقریباً کاهشی دارد و این مقدار برای نوار مارپیچ برش خورده بیشتر از نوار مارپیچ ساده است. ضریب کارایی حرارتی برای نانوسیال با غلظت 0/1 درصد بین 1/017-1/30 می‌باشد. شکل 17 تغییرات ضریب کارایی حرارتی با رینولدز را برای آب در دمای 60 درجه سانتیگراد در لوله با نوار مارپیچ ساده و برش خورده نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که ضریب کارایی حرارتی با افزایش عدد رینولدز روند تقریباً کاهشی داشته است. همچنین کارایی حرارتی در لوله با نوار مارپیچ برش خورده بیشتر از نوار مارپیچ ساده بوده‌است.

شکل 18 ضریب کارایی حرارتی ناشی از استفاده نانوسیال در مبدل دولوله‌ای با نوار مارپیچ برش خورده را در دمای 60 درجه سانتیگراد نشان می‌دهد. همانطور که در شکل 18 مشاهده می‌شود با افزایش غلظت نانوسیال ضریب کارایی حرارتی در بیشتر موارد افزایش داشته است و مقدار آن برای همه سیالات بیشتر از 1 می‌باشد. اما روند کاملاً مشخصی برای تغییرات ضریب کارایی حرارتی مشاهده نمی‌شود.

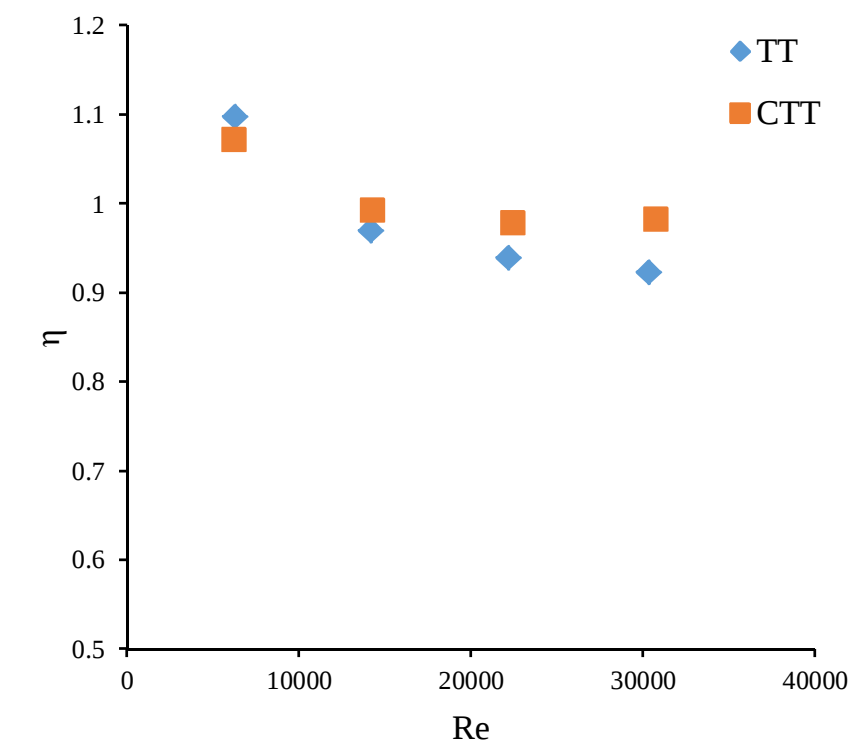
شکل 19 ضریب کارایی حرارتی ناشی از استفاده نانوسیال در مبدل دولوله‌ای ساده را در دمای 60 درجه سانتیگراد نشان می‌دهد.



شکل 15 تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز



شکل 16 تغییرات ضریب کارایی حرارتی با رینولدز برای نانوسیال 0/01 درصد در دمای 60 درجه سانتیگراد



شکل 17 تغییرات ضریب کارایی حرارتی با رینولدز برای آب در دمای 60 درجه سانتیگراد

همانطور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش غلظت نانوسیال ضریب کارایی حرارتی افزایش یافته است. این افزایش در اعداد رینولدز بالا بیشتر مشهود می‌باشد. مقدار ضریب کارایی حرارتی برای نانوسیال با غلظت 0/1 درصد بین 0/83 تا 1/36 می‌باشد.

شکل 20 نشانگر میزان بهبود انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه در لوله با نوار مارپیچ برش خورده می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود افزایش غلظت حجمی نانوسیال منجر به افزایش میزان انتقال حرارت شده است.

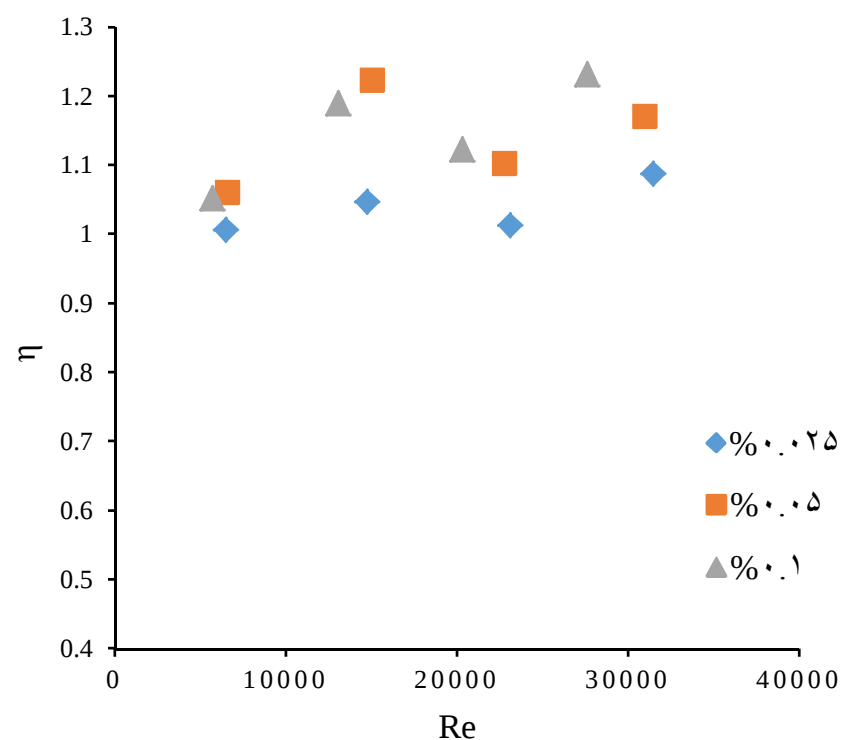
4-3- خطای آزمایشات و عدم قطعیت

عدم قطعیت به معنای تردید در خصوص مقدار نتیجه اندازه‌گیری می‌باشد. عدم قطعیت اندازه‌گیری بیانگر اطلاعاتی درباره کیفیت اندازه‌گیری است. عدم قطعیت آزمایشات در فرایند انتقال حرارت جابجایی اساساً به وسیله خطاهای آزمایش و خطای محاسبات و دقت وسایل اندازه‌گیری ایجاد می‌گردد. حداکثر خطای ایجاد شده توسط دبی سنج $\pm 0/000016 \frac{m^3}{s}$ و حسگرهای دما $\pm 0/1$ درجه سانتیگراد می‌باشد. خطای اندازه‌گیری دما، جریان سیال و اندازه‌گیری‌های مربوط به قطر لوله بر ضریب انتقال حرارت، بر اساس تئوری پخش خطاها که توسط کلاین و مک کلیناک [22] ارائه شده، محاسبه گردیده و مقدار آن حداکثر 3/22 % بدست آمده است. با در نظر گرفتن خطاهای تصادفی، خطای وسایل اندازه‌گیری و خطای حاصل از اتلاف حرارت از مبدل به محیط، حداکثر خطا در محاسبه ضریب انتقال حرارت با توجه به روابط ذکر شده برابر 19/24 % بدست آمده است.

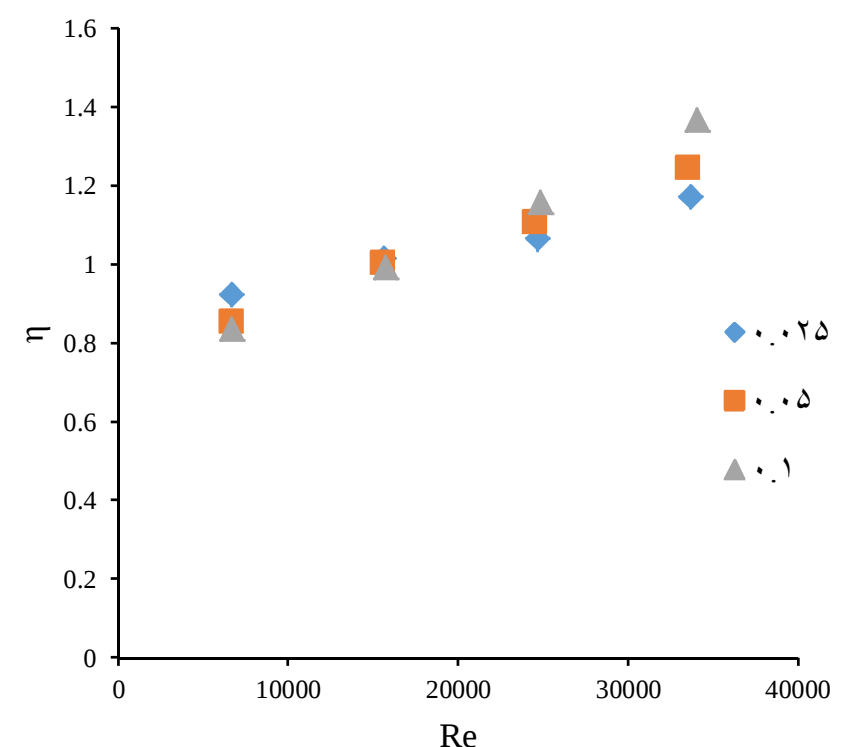
5- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر انتقال حرارت جابجایی اجباری در رژیم جریان مغشوش در مبدل دولوله‌ای حاوی نوار مارپیچ برش خورده با استفاده از نانوسیال آلومینا به عنوان سیال عامل بررسی شده است. در این کار تأثیر نانوسیال و نوار مارپیچ برش خورده، با سیال پایه و مبدل دولوله‌ای با و بدون نوار مارپیچ معمولی مقایسه شده است.

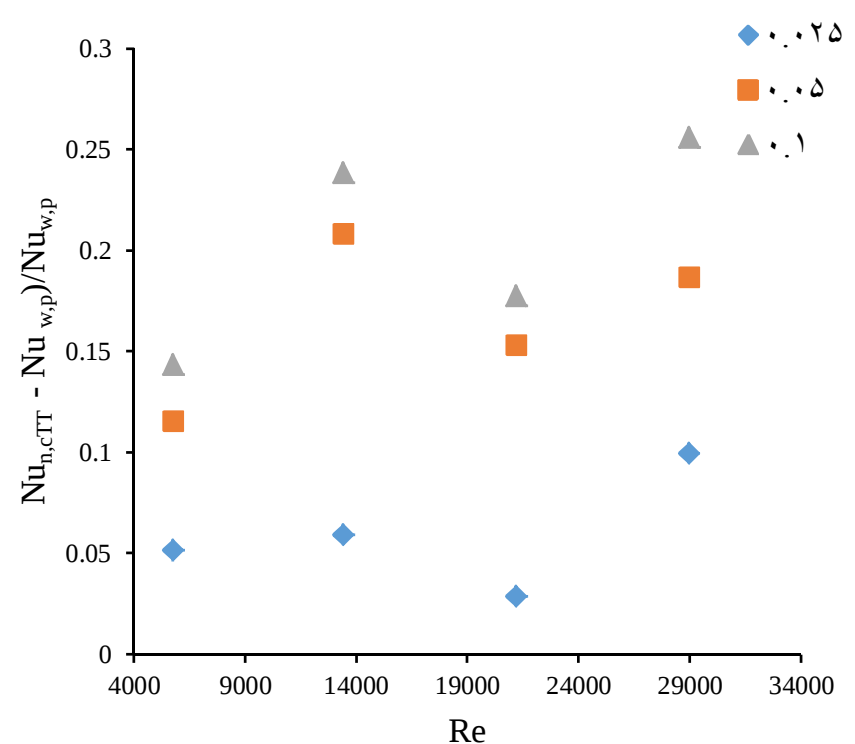
نتایج بدست آمده نشان داده است که افزودن نانو ذرات به سیال پایه موجب افزایش انتقال حرارت در مبدل حرارتی دولوله‌ای می‌شود. بطوریکه با استفاده از نانوسیال با غلظت 0/1 درصد در مبدل دولوله‌ای و در عدد رینولدز حدود 30000، بیشترین میزان افزایش انتقال حرارت نسبت به سیال پایه و بمقدار 28/65 % مشاهده شده است. همچنین مشاهده شد که استفاده از نوار مارپیچ معمولی و برش خورده تأثیر مطلوبی بر انتقال حرارت داشته و موجب افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی شده است. در عدد رینولدز حدود 27000 استفاده از نوار مارپیچ معمولی و برش خورده نسبت به لوله خالی به ترتیب 34/56 و 42/20 % افزایش انتقال حرارت را موجب گشته‌اند. نوار مارپیچ برش خورده به علت ایجاد جریان چرخشی و تشکیل گردابه در پشت قسمت‌های برش خورده، موجب بهبود انتقال حرارت نسبت به نوار مارپیچ معمولی شده است. در این پژوهش تأثیر بکارگیری نانوسیالات در لوله حاوی نوار مارپیچ برش خورده بررسی و نتایج حاصل با لوله خالی، لوله با نوار مارپیچ معمولی و سیال پایه مقایسه گردید و اثرات انتقال حرارت و افت فشار مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاکی از افزایش انتقال حرارت در لوله حاوی نوار مارپیچ برش خورده و نانوسیال بوده است. نوار مارپیچ برش خورده موجب افزایش افت فشار نسبت به لوله خالی و لوله حاوی نوار مارپیچ معمولی شده است. استفاده از نانوسیالات با غلظت‌های حجمی مختلف تأثیر بسیار ناچیزی



شکل 18 تغییرات ضریب کارایی حرارتی با رینولدز برای نانوسیال با غلظت‌های مختلف در دمای 60 درجه سانتیگراد در لوله با نوار مارپیچ



شکل 19 تغییرات ضریب کارایی حرارتی با رینولدز برای نانوسیال با غلظت‌های مختلف در دمای 60 درجه سانتیگراد در لوله



شکل 20 بهبود انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه در لوله با نوار مارپیچ برش خورده

7- مراجع

- [1] R. Saidur, K.Y.Leong, H.A.Mohammad, A review on applications and challenges of nanofluids, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, pp. 1646–1668, 2011.
- [2] R. Shanthi, Sh. Sundaram, Heat Transfer Enhancement Using Nanofluids An Overview, *Thermal Science*, Vol. 16, No. 2, pp. 423-444, 2012.
- [3] W. Duangthongsuk, S. Wongwises, 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, pp. 2059–2067, 2009.
- [4] J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 2nd ed, Vol. 1, Clarendon Press, Oxford, U.K., 1881.
- [5] S. Chol, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *ASME-Publications-Fed*, Vol. 231, pp. 99-106, 1995.
- [6] J.A Eastman, S.U.S Choi, S. Li. Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. *Applied Physical Letter* Vol. 78, pp.718-720. 2001.
- [7] Y. Xuan, Q. Li, Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 125, pp. 151-155, 2003.
- [8] J.M. Wu, J. Zhao, A review of nanofluid heat transfer and critical heat flux enhancement, Research gap to engineering application, *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 66, pp. 13-24, 2013.
- [9] M.H. Kayhani, M. Nazari, H. Soltanzadeh, M.M. Heyhat, F. Kowsary, Experimental analysis of turbulent convective heat transfer and pressure drop of Al₂O₃/water nanofluid in horizontal tube, *Micro & Nano Letters*, Vol 7, No. 3, pp. 223-227, 2012.
- [10] S.Eiamsa, P.Promvonge. Thermal characteristics in round tube fitted with serrated twisted tape. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 30, pp. 1673-1682, 2010.
- [11] B. Salam, S. Biswas, Sh. Saha, 2013. Heat transfer enhancement in a tube using rectangular-cut twisted tape insert. *Procedia Engineering*. Vol. 56, pp. 96 – 103, 2013.
- [12] L. SyamSundar, ManojK.Singh, Convective heat transfer and friction factor correlations of nanofluid in a tube and with inserts : A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 20, pp. 23–35, 2013.
- [13] L. Syam Sundar, K.V. Sharma, Turbulent heat transfer and friction factor of Al₂O₃ Nanofluid in circular tube with twisted tape inserts, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 1409–1416, 2010.
- [14] P. Murugesan, K. Mayilsamy, S. Suresh, “Heat transfer and pressure drop characteristics in a circular tube fitted with and without V-cut twisted tape insert”. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. Vol. 38, pp. 329–334. 2010.
- [15] S. Eiamsa, Ch. Thianpong,. Experimental investigation of heat transfer and flow friction in a circular tube fitted with regularly spaced twisted tape elements, *International Communications in Heat and Mass Transfer*. Vol. 33, pp. 1225–1233. 2006.
- [16] A.A. Abbasian Arani, J. Amani, Experimental study on the effect of TiO₂-water nanofluid on heat transfer and pressure drop, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 42, pp.107–115, 2012.
- [17] P. Naphon. Heat transfer and pressure drop in the horizontal double pipes with and without twisted tape insert, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, No. 2, pp. 166–175, 2006.
- [18] G. Huminic, A. Huminic, Application of nanofluids in heat exchangers: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, pp. 5625–5638. 2012.
- [19] F.W. Dittus, L.M.K. Boelter, “Heat transfer in automobile radiators of the tubular type”, *University of California at Berkley, Publications in Engineering*, Vol. 13, pp. 755-758, 1930.
- [20] S. Eiamsa-ard, K. Wongcharee, Single-phase heat transfer of CuO/water nanofluids in micro-fin tube equipped with dual twisted-tapes, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 1453–1459, 2012.
- [21] S. Eiamsa-ard, P. Somkleang, C. Nuntadusit. Heat transfer enhancement in tube by inserting uniform/non-uniform twisted-tapes with alternate axes: Effect of rotated-axis length. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 54, pp. 289–309, 2013.
- [22] S. J. Kline, F.McClintock, “Describing uncertainties in single-sample experiment”, *Mechanical engineering*, Vol. 75, pp. 3-8, 1953.

بر افت فشار سیستم داشته‌است که قابل صرفنظر کردن می‌باشد. همچنین در این پژوهش تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز بررسی شد و نتایج آزمایشات نشان‌دهنده افزایش ضریب اصطکاک با استفاده از نوار مارپیچ برش خورده به علت افزایش اصطکاک ناشی از افزایش سطح می‌باشد. در بررسی عملکرد حرارتی سیستم مشاهده شد که استفاده از نانوسیال و همچنین نوار مارپیچ برش خورده نسبت به حالت پایه کارایی گرمایی سیستم را بهبود می‌بخشد.

6- فهرست علائم

A	سطح انتقال حرارت (m^2)
C_p	گرمای ویژه ($J kg^{-1} K^{-1}$)
CTT	نوار مارپیچ برش خورده
D_h	قطر هیدرولیکی (m)
d	قطر لوله (m)
f	ضریب اصطکاک
H	افت فشار (mm Hg)
h	ضریب جابجایی ($W m^{-2} K^{-1}$)
k	ضریب هدایت گرمایی ($W m^{-1} K^{-1}$)
L	طول لوله (m)
$\dot{m}$	نرخ جرمی جریان ($kg s^{-1}$)
Nu	عدد ناسلت
Pr	عدد پرانتل
PT	لوله معمولی
Q	نرخ حجمی جریان ($m^3 s^{-1}$)
Re	عدد رینولدز
T	دما ($^{\circ}C$)
TT	نوار مارپیچ برش ساده
u	سرعت (ms^{-1})
U	ضریب انتقال حرارت کلی ($W m^{-2} K^{-1}$)

علائم یونانی

ρ	چگالی ($kg m^{-3}$)
η	فاکتور کارایی حرارتی
μ	لزجت دینامیکی ($kg m^{-1} s^{-1}$)
ΔP	افت فشار (Pa)
φ	غلظت نانوسیال
ε	درصد اتلاف حرارتی

زیر نویس‌ها

avg	متوسط
c	سیال سرد
f	سیال پایه
h	سیال گرم
in	ورودی
i	داخلی
np	نانو ذره
nf	نانوسیال
o	خارجی
out	خروجی