

## اثر نسبت انحنا و طول گام لوله‌ی مارپیچی بر افت فشار و عملکرد حرارتی جریان آرام نانوسیال تیتان/آب\*

مصطفی کاهانی<sup>(۱)</sup> سعید زینالی هریرس<sup>(۲)</sup> سید محمود موسوی<sup>(۳)</sup>

**چکیده** در این مطالعه اثر نسبت انحنا و طول گام لوله‌ی مارپیچی بر رفتار حرارتی و میزان افت فشار جریان آرام نانوسیال تیتان/آب درون لوله‌های مارپیچی افقی به صورت تجربی بررسی شده است. نانوسیال تیتان/آب با غلظت‌های حجمی ۰/۲۵٪ تا ۲٪ به روش دو مرحله‌ای تولید شده‌اند. آزمایش‌ها برای لوله‌های مارپیچی با نسبت انحنا ۱۰ و ۲۰ و همچنین طول گام ۲۴ و ۴۲ انجام پذیرفته است. عدد ناسلت با افزایش غلظت حجمی نانوذرات و همچنین عدد رینولدز بهبود می‌یابد. این افزایش به دلیل هدایت حرارتی مؤثر بالاتر نانوسیال و همچنین تقویت اختلاط نانوذرات می‌باشد. ضمن این‌که افزایش جرم حجمی و گرانشی نانوسیال در مقایسه با سیال پایه منجر به افزایش افت فشار جریان داخل لوله‌ی مارپیچی می‌گردد. همچنین نرخ انتقال حرارت درون لوله‌های مارپیچی با افزایش طول گام و کاهش نسبت انحنا بهبود می‌یابد. از سوی دیگر، نسبت انحنا در مقایسه با طول گام تأثیر بیش‌تری بر روی عدد ناسلت و افت فشار نشان می‌دهد. ۴۲/۱ درصد بهبود عدد ناسلت برای نانوسیال ۲ درصد حجمی نسبت به سیال پایه به دست می‌آید. در پایان تطبیق مناسب و معقول نتایج تجربی عدد ناسلت و افت فشار با مقادیر تخمین زده شده برای جریان نانوسیال درون لوله‌های مارپیچی مورد مطالعه قرار گرفته است.

**واژه‌های کلیدی** نانوسیال، لوله‌ی مارپیچی، نسبت انحنا، طول گام، انتقال حرارت، افت فشار.

### Curvature Ratio and Pitch Spacing Effect of Helical Coiled Tube on Pressure Drop and Heat Transfer Behavior of TiO<sub>2</sub>/Water Nanofluid laminar Flow

M. Kahani S. Zeinali Heris S.M. Mousavi

**Abstract** In the present study the effect of curvature ratio and coil pitch for TiO<sub>2</sub>/water nanofluid laminar flow on heat transfer behavior and pressure drop through helical coils with different geometries was investigated experimentally. The TiO<sub>2</sub>/water nanofluids at 0.25% to 2% particle volume concentrations have been prepared by using a two-step method. The experiments were performed for coils with curvature ratio of 10 and 20 and coil pitch of 24 and 42. Based on the experimental data, it is found that the Nusselt number as well as Reynolds number improves while increasing particle volume concentration. This enhancement is due to the higher effective thermal conductivity of nanofluid and also intensification of nanoparticles. Besides, increase in density and viscosity of nanofluid compared to the base fluid leads to a pressure drop increment for flow through helical coiled tube. Furthermore, the heat transfer rate improves with the increase of pitch coils and decrease of curvature ratio. Additionally, curvature ratio shows more significant effect on Nusselt number and pressure drop than pitch spacing. 42.1% enhancement on Nusselt number is obtained for the nanofluid with 2% volume concentration in comparison to the base fluid. Finally, it is shown that the experimental results and predicted results of Nusselt number and pressure drop for nanofluid flow through helical coils hold reasonable agreement.

**Key Words** Nanofluid, Helical coiled tube, Curvature ratio, Coil pitch, Heat transfer, Pressure drop

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۱/۹/۱۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۳/۲۰ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسنده‌ی مسؤول: دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۳) استاد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

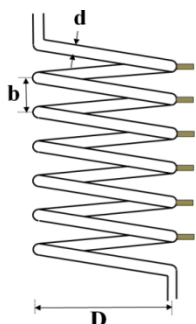
## مقدمه

عملکرد تجهیزات حرارتی با به کارگیری تکنیک‌های خاصی بهبود می‌یابد. به صورت کلی این تکنیک‌ها را می‌توان به دو دسته تکنیک‌های فعال و تکنیک‌های غیرفعال تقسیم نمود. تکنیک‌های فعال به نیروهای خارجی نظیر میدان الکتریکی و مغناطیسی احتیاج دارند، در حالی که تکنیک‌های غیرفعال شامل اضافه کردن افزودنی‌ها به سیالات و یا تغییر شکل هندسی سیستم حرارتی می‌باشد. استفاده از لوله‌های مارپیچی جزء تکنیک‌های غیرفعال بهبود انتقال حرارت می‌باشند که به علت ساختار فشرده و ضریب انتقال حرارت بالا، کاربرد آن‌ها گسترده‌ی وسیعی از ساخت فرآیندهای بازیافت گرما، سیستم‌های سرمایشی و تهویه‌ی هوا، هم‌زن‌ها، رآکتورهای هسته‌ای و ... را در بر می‌گیرد. عملاً با پیچ کردن یک لوله می‌توان انتقال گرما را تقویت کرد بدون این‌که تلاطمی به وجود آید یا مساحت سطح انتقال گرما افزایش یابد. در این حالت نیروهای گریز از مرکز یک جریان ثانویه را به وجود می‌آورند. این جریان از یک جفت گردابه‌ی طولی (Longitudinal Vortex) تشکیل می‌شود که با افزایش اختلاط در سطح مقطع و هم‌چنین کاهش پراکندگی محوری ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را افزایش می‌دهند. البته بسته به میزان انحنا، امکان حضور بیش از یک جفت گردابه نیز در جریان ثانویه وجود دارد. هم‌چنین به علت نداشتن هیچ جزء متحرکی می‌توان با مصرف انرژی کم‌تر و البته هزینه‌ی نگهداری پایین‌تر انتظار عملکرد بهتری از تجهیزات حرارتی با استفاده از لوله‌های مارپیچی داشت [1]. مشخصات هندسی یک لوله‌ی مارپیچی که در شکل (۱) نشان داده شده است شامل قطر لوله ( $d$ )، قطر حلقه ( $D$ )، نسبت انحنا ( $\lambda = D/d$ ) و طول گام ( $b$ ) یا به عبارتی ارتفاع لوله طی یک دور پیچش می‌باشد.

عدد دین ( $De = Re(d/D)^{1/2}$ ) نسبت

حاصل ضرب نیروهای اینرسی در نیروهای گریز از مرکز است به نیروهای لزج و به منظور توصیف شرایط جریان در لوله‌های خمیده مورد استفاده‌ی بسیاری از محققان قرار گرفته است. عدد دین در لوله‌های خمیده همان نقش عدد رینولدز در لوله‌های معمولی را ایفا می‌کند. هم‌چنین میسرا و همکاران [2] با در نظر گرفتن طول گام در لوله‌های مارپیچی عدد هلیکال را به صورت رابطه‌ی (۱) تعریف نمودند.

$$He = De \left[ 1 + \left( \frac{b}{2\pi D} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (1)$$



شکل ۱ پارمترهای هندسی معرف یک لوله‌ی مارپیچی و موقعیت قرارگیری ترموکوپل‌ها بر روی آن

عدد ناسلت جریان آرام سیالات در لوله‌های خمیده چندین برابر بیش‌تر از لوله‌های معمولی می‌باشد [3]. هاترون [4] نخستین محقق‌ی بود که یک روش عددی برای جریان کاملاً توسعه‌یافته در لوله‌های خمیده ارائه کرد. بعد از او آستین و سیدر [5] نمایه‌ی سرعت در ناحیه‌ی ورودی جریان به لوله را به صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها بیان داشتند که با افزایش عدد دین طول ناحیه در حال توسعه نیز افزایش می‌یابد. مولین و همکاران [6] با انجام یک مطالعه‌ی تجربی و عددی بر روی جریان در لوله‌های خمیده بیان داشتند که جریان ثانویه تأثیر قابل توجهی در اعداد رینولدز کم‌تر از ۲۰ ندارد. چن و ژانگ [7] تأثیرات

۲- نانو ذرات معلق شده، هدایت حرارتی مؤثر سیال را افزایش می دهند.

۳- برهم کنش و برخورد بین ذرات نانو، سیال و سطح جامد بیش تر می شود.

۴- نوسان و تلاطم سیال با حضور ذرات نانو تشدید می شود.

۵- پراکندگی ذرات نانو باعث پخش شدن گرادیان دما در تمام سیال می شود. در نتیجه ضخامت لایه مرزی حرارتی کاهش و طول توسعه یافتگی افزایش می یابد.

افت فشار و انتقال حرارت جابه جایی اجباری

نانوسیال تیتان/آب درون تبادلگر حرارتی دو لوله ای تحت شرایط مرزی شار ثابت توسط دانگتونگسوک و وانگ ویز [14] مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج

آنها حاکی از افزایش ۶ تا ۱۱ درصدی ضریب انتقال حرارتی نانو سیال در مقایسه با سیال پایه بدون افزایش قابل توجه افت فشار می باشد. زینالی هریس و همکاران

[15] انتقال حرارت جابه جایی نانو سیال آلومینا/آب و اکسید مس/آب را در یک لوله ای مدور معمولی مورد بررسی قرار دادند. آنها تأکید کردند که ضریب انتقال

حرارت با افزایش غلظت نانوذرات در سیال پایه و عدد پکلت افزایش می یابد. عباسیان و امانی [16, 17] تأثیر

قابل توجه غلظت و سایز نانو ذرات تیتان بر انتقال حرارت اجباری و افت فشار نانو سیال درون تبادلگر

حرارتی دو لوله ای جریان متقابل مورد تأکید قرار داده اند. اکبرنیا و همکاران [18] به صورت عددی انتقال

حرارت جابه جایی نانو سیالات آلومینا/آب در یک لوله ای خمیده افقی را مورد بررسی قرار دادند. آنها گزارش کرده اند که غلظت نانو ذرات تأثیر مستقیمی بر

ضریب اصطکاک ندارد. جمشیدی و همکاران [19] تأثیر زیاد قطر کوئل و طول گام را بر عملکرد حرارتی

نانوسیالات درون لوله های مارپیچی در بررسی عددی خود مورد تأکید قرار داده اند. بهابادی و همکاران [20]

از نانولوله های کربنی چندجداره درون روغن پایه ای نانو سیال هایی با غلظت های مختلف ساختند و تأثیر

ترکیبی چرخش و انحنا را (نیروی گریز از مرکز) بر روی الگوی جریان، افت فشار، توزیع دما و عدد

ناسلت لوله های مارپیچی مورد بررسی قرار دادند. افزایش افت فشار جریان داخل لوله های خمیده در

مقایسه با افت فشار لوله های معمولی برای اولین بار توسط گریندلی و گیسون [8] مطرح گردید. پاتانکار و

همکاران [9] تأثیرات عدد دین را بر افت فشار و انتقال حرارت در ناحیه ای کاملاً توسعه یافته درون لوله های

مارپیچی مورد بررسی کامل قرار داده اند. ضمن این که، علی [10] روابط کاملی به منظور پیش بینی افت فشار

درون لوله های مارپیچی بر حسب عدد اویلر، عدد رینولدز و گروه های هندسی ارائه کرده است. هارت و

همکاران [11] یک نمودار برای تخمین ضریب اصطکاک در لوله های مارپیچی مشابه نمودار مودی

برای لوله های معمولی ارائه کرده اند. اخیراً پاوار و ساناپوار [12] بررسی تجربی جامعی در مورد

جریان های نیوتنی و غیر نیوتنی سیالات درون لوله های مارپیچی با هندسه های مختلف انجام داده اند. نتایج

آنها نشان می دهد که با افزایش قطر کوئل، ضریب انتقال حرارت کلی و اعداد ناسلت کاهش می یابد.

از طرف دیگر، نانو سیال سازی یکی دیگر از تکنیک های غیر فعال افزایش انتقال حرارت می باشد که

توجه بسیاری از محققان را در دو دهه ی اخیر به خود جلب کرده است. نانو سیال شامل یک مخلوط

پراکنده ی جامد-مایع پایدار از ذرات نانو (کوچک تر از ۱۰۰ نانومتر) در یک سیال پایه مرسوم هم چون آب،

ایتیلن گلیکول، روغن و غیره می باشد. با معلق کردن ذرات نانو، عملکرد حرارتی سیال به طور محسوسی

بدون این که در سیستم افت فشار قابل ملاحظه ای ایجاد شود، افزایش می یابد. دلایل اصلی این بهبود عبارتند از

[13]: ۱- با توجه به نقش سطوح نانوذرات در انتقال حرارت، سطح جانبی نسبی بسیار بزرگ نانوذرات

باعث افزایش شدید انتقال حرارت توسط این ذرات داخل سیال می شود.

فشار جریان نانوسیال با افزایش غلظت حجمی نانوسیال و عدد رینولدز می‌باشد. هم‌چنین آن‌ها بیان کرده‌اند که میزان انتقال حرارت و افت فشار با افزایش نسبت انحنا در لوله‌های مارپیچی افزایش می‌یابد. ضمن این‌که آن‌ها در آزمایش‌های خود بازه‌ی محدودی از عدد رینولدز (صفر تا ۱۰۰۰) را مورد بررسی قرار داده‌اند، حال آن‌که در لوله‌های مارپیچی جریان تا رینولدز حدود ۴۰۰۰ (البته بسته به طول گام لوله‌ی مارپیچی) هم‌چنان آرام است. هم‌چنین آن‌ها با معرفی پارامتری به نام شاخص عملکرد (Performance index) بیان نمودند که استفاده از تکنیک مارپیچ کردن لوله به‌جای استفاده از نانوسیال، روش به‌مراتب به‌تری به‌منظور بهبود عملکرد حرارتی تجهیزات می‌باشد.

اگرچه بررسی‌های مختلفی در مورد دو تکنیک نانوسیال‌سازی و لوله‌های مارپیچی به‌صورت مجزا صورت پذیرفته است اما صرفاً تعداد محدودی پژوهش پیرامون ترکیب دو روش مذکور در بهبود انتقال حرارت تجهیزات حرارتی مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش تأثیر پارامترهای هندسی لوله‌های مارپیچی (نسبت انحنا و طول گام) بر عملکرد حرارتی و میزان افت فشار جریان نانوسیال تیتان/آب در بازه‌ی وسیعی از اعداد رینولدز مورد بررسی قرار می‌گیرد و روابطی به‌منظور تخمین عدد ناسلت و افت فشار جریان نانوسیال داخل لوله‌های مارپیچی ارائه می‌گردد. هم‌چنین بعد از این بررسی‌ها، نتایج تجربی مربوط به جریان آب خالص و نانوسیال درون لوله‌های مارپیچی و لوله‌ی مستقیم مقایسه می‌گردد.

### آماده‌سازی نانوسیال تیتان/آب

نانوذرات تیتان ( $TiO_2$ ) که خواص فیزیکی و تصاویر میکروسکوب الکترونی عبوری (TEM) آن‌ها به‌ترتیب در جدول (۱) و شکل (۲) آورده شده است در این پژوهش به‌منظور تولید نانوسیال مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل کروی نانوذرات در تصاویر به‌وضوح

استفاده از آن‌ها را درون لوله‌های مارپیچی مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج آن‌ها نانوسیال در مقایسه با سیال پایه عدد ناسلت بالاتری از خود نشان می‌دهد. آن‌ها هم‌چنین افزایش تا هفت برابری نرخ انتقال حرارت نانوسیالات در لوله‌های مارپیچی در مقایسه با سیال پایه در لوله‌های معمولی را گزارش نموده‌اند. هاشمی و همکاران [21] با آزمایش اثر نانوسیال اکسید مس/روغن پایه، تأکید کردند که استفاده از لوله‌های مارپیچی در مقایسه با استفاده از نانوسیال‌ها روش مؤثرتری می‌باشد. کومار و همکاران [22] افزایش ۵۵ درصدی عدد ناسلت و ۲۶ درصدی افت فشار نانوسیال اکسید آلومینیوم/آب درون لوله‌های مارپیچی در جریان آشفته نسبت به آب خالص را گزارش نموده‌اند. البته آن‌ها تأثیر پارامترهای هندسی لوله‌ی مارپیچی از جمله نسبت انحنا و طول گام را در کار خود مورد بررسی قرار نداده‌اند.

کاهانی و همکاران [23] تأثیر استفاده از نانوسیال آلومینا/آب و لوله‌های مارپیچی را در بهبود نرخ انتقال حرارت مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج تجربی آن‌ها حاکی از افزایش ۳۲۰ درصدی عدد ناسلت در صورت استفاده‌ی هم‌زمان از دو تکنیک مورد اشاره نسبت به جریان آب خالص در لوله‌ی مستقیم می‌باشد. هم‌چنین آن‌ها در پژوهشی دیگر مقایسه‌ی تجربی بین جریان آرام نانوسیال‌های اکسید آلومینیوم (۳۵ نانومتر)/آب و اکسید تیتانیوم (۵۰ نانومتر)/آب درون لوله‌های مارپیچی انجام داده‌اند [24]. نتایج حاکی از افزایش بیش‌تر نرخ انتقال حرارت نانوسیال اکسید آلومینیوم/آب به‌علت ضریب هدایت حرارتی بیش‌تر و سایز کوچک‌تر نانوذرات نسبت به نانوسیال اکسید تیتانیوم/آب می‌باشد. اخیراً اکبری‌دوست و همکاران [25] بررسی تجربی و عددی بر رفتار هیدرودینامیکی و حرارتی جریان آرام و پایدار نانوسیال اکسید مس/آب درون لوله‌های مارپیچی با شرط مرزی دما ثابت انجام داده‌اند. نتایج ارائه‌شده توسط آن‌ها مؤید افزایش نرخ انتقال حرارت و افت

با شرایط فوق، ماندگاری تا بیش از ۴۵ روز را به خوبی از خود نشان می‌دادند. کسر حجمی و جرم حجمی نانوذرات داخل مخلوط پراکنده‌ی جامد-مایع به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\varphi = \frac{\vartheta_p}{\vartheta_t} \quad (1)$$

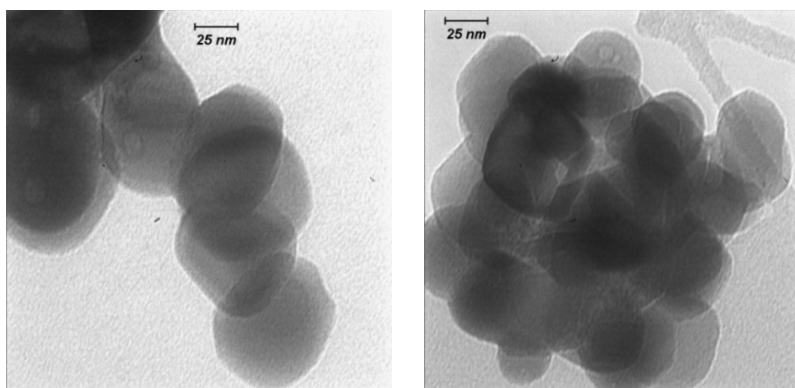
$$\rho_p = \frac{m_p}{\vartheta_p} \quad (2)$$

در نتیجه مقدار مناسب نانوذرات برای تهیه‌ی ۲ لیتر نانوسیال (بر حسب گرم) به وسیله‌ی رابطه‌ی زیر با توجه به کسر حجمی نانوذرات محاسبه می‌شود:

$$m_p = 7800 \varphi \quad (3)$$

قابل ذکر است که جرم حجمی واقعی نانوذرات بیش از پنجاه برابر جرم حجمی ظاهری آن‌ها است. بنابراین جرم مناسب از روی جرم حجمی واقعی آن‌ها تعیین می‌شود.

قابل تشخیص می‌باشد. نانوذرات تیتان در آب خالص در غلظت‌های مختلف حجمی ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصدی و به روش دو مرحله‌ای تولید می‌گردد. برای تهیه‌ی نانوسیال باید از پراکندگی صحیح نانوذرات در سیال و مکانیزم صحیح افزودن ذرات به سیال برای رسیدن به مخلوط پراکنده‌ی جامد-مایع پایدار بدون ته‌نشینی آگاه بود. زمانی که پودرهای مورد نظر به آب اضافه می‌شوند تشکیل یک حالت غیرهمگن ناپایدار می‌دهند و مخلوط جامد-مایع با تجمع نانوذرات مشاهده می‌شود و ته‌نشینی بعد از چند دقیقه آغاز می‌گردد. به منظور بهبود پایداری نانوسیالات از دو روش امواج مافوق صوت (Ultrasonic) و ماده‌ی سطحی‌ساز (Surfactant) استفاده می‌شود. ابتدا مقادیر مشخص از نانوذرات و ستیل تری متیل آمونیوم برماید (CTAB) به عنوان ماده‌ی فعال‌ساز سطحی با نسبت بهینه‌ی وزنی حدود یک به بیست به مدت ۱۰ ساعت توسط دستگاه هم‌زن مغناطیسی با دور کم هم زده می‌شود. سپس مخلوط حاصل به مدت ۴۵ دقیقه در دستگاه فراصوت (مدل UP400SHielscher) تحت امواج مافوق صوت قرار داده می‌شود. نانوسیال تولیدی



شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نانوذرات تیتان مورد استفاده در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی

جدول ۱ خواص فیزیکی نانوذرات مورد استفاده در این پژوهش

نانو ذره	خلوص	قطر متوسط (nm)	جرم حجمی واقعی (Kg/m <sup>3</sup> )	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.K)	هدایت حرارتی (W/m.K)
TiO <sub>2</sub>	%۹۹	۵۰	۳۹۰۰	۷۱۰	۱۳/۷

### شرح دستگاه و روش انجام آزمایش‌ها

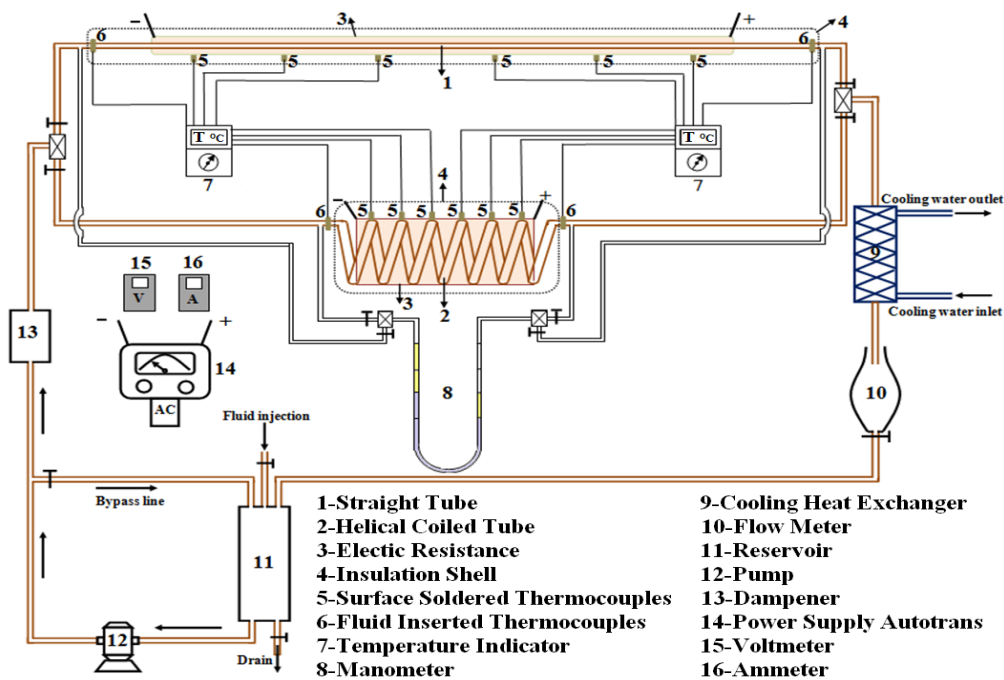
یک سیستم آزمایشی که تصویر و شماتیک آن در شکل (۳) نشان داده شده است به منظور بررسی و مطالعه‌ی فرآیند انتقال حرارت جابه‌جایی آرام و هم‌چنین میزان افت فشار جریان نانوسیال داخل لوله‌ی مارپیچی تحت شار ثابت مورد استفاده قرار می‌گیرد. دستگاه به صورت یک سیستم بسته است که شامل مخزن ذخیره‌ی سیال عامل (۲ لیتر)، پمپ، جریان برگشتی به مخزن به منظور کنترل و اعمال دبی مورد نظر، مخزن تثبیت‌کننده به منظور کاهش نوسانات ناشی از پمپ به روی سیال، بخش‌های مربوط به تست انتقال حرارت، تبادلگر حرارتی به منظور خنک‌سازی سیال عامل و ثابت نگه داشتن دمای ورودی آن به بخش انتقال حرارت، مانومتر U شکل به منظور تعیین افت فشار سیال جاری در لوله‌ها و یک مخزن مدرج به منظور اندازه‌گیری دبی می‌باشد.

قسمت اصلی سیستم شامل سه لوله‌ی مارپیچی با هندسه‌ی متفاوت و یک لوله‌ی مستقیم تحت شار ثابت می‌باشد که مشخصات هندسی آن‌ها در جدول (۲) آورده شده است. لوله‌ی مسی جنس ایده‌آل برای بسیاری از کاربردهای صنعتی است. استحکام و شکل‌تحدودی انعطاف‌پذیری آن باعث ساخت و شکل‌دادن راحت لوله می‌گردد. هم‌چنین ضریب هدایت حرارتی بالای آن باعث استفاده‌ی روزافزون از آن در صنعت به خصوص برای تجهیزات تبرید و تهویه‌ی هوا شده است. در ضمن لوله‌ی ساخته‌شده از مس یکی از معدود مواد طبیعی است که به صورت ۱۰۰٪ قابل بازیافت است. از این رو برای جلوگیری از له‌شدگی آن‌ها به هنگام ساخت، ابتدا درون لوله‌ی مسی با شن نرم پر می‌شود و سپس لوله به دور یک مدول تفلونی فشرده که قبلاً طول گام و قطر کویل لوله‌ی مورد نظر

بر روی آن تراشکاری شده است پیچیده می‌شود. شرایط شار ثابت در سطح لوله به وسیله‌ی المنت‌های الکتریکی حلقوی تأمین می‌گردد. به این منظور از یک منبع الکتریکی (Autotrans) که مستقیماً به برق شهری متصل می‌باشد استفاده می‌شود. توسط ولت‌متر و آمپر موجود در مدار توان ورودی به المنت‌های حرارتی اندازه‌گیری می‌گردد. تصویر لوله‌های مارپیچی ساخته شده همراه با المنت‌های الکتریکی مورد استفاده در شکل (۴) آورده شده است. دو ترموکوپل (PT100 - 0.1°C) داخل جریان سیال به منظور اندازه‌گیری دمای بالک سیال ورودی به هر لوله و خروجی از آن تعبیه می‌گردد. به منظور اندازه‌گیری دمای سطح لوله نیز از ترموکوپل‌های مشابه نوع قبلی استفاده می‌شود. موقعیت قرارگیری ترموکوپل‌ها به روی سطح خارجی لوله‌های مارپیچی در هر پیچ همان‌طور می‌باشد که در شکل (۱) نشان داده شده است. برای لوله‌ی مستقیم موقعیت ترموکوپل‌ها به ترتیب به فاصله‌ی ۱۰، ۳۳، ۷۸، ۱۰۰ و ۱۲۳ سانتی‌متری از طرف ورودی سیال به لوله می‌باشد. ضمن این‌که طول ورودی و خروجی معادل به ترتیب ۳۰ و ۱۵ برابر قطر لوله‌ی اصلی به منظور حفظ توسعه‌یافتگی هیدرودینامیکی جریان در سیستم مدنظر قرار گرفته است. هم‌چنین تمام تجهیزات الکتریکی (از قبیل ترموکوپل‌ها، آمپر‌متر و ولت‌متر) و تجهیزات مکانیکی بادقت کالیبره گردیده‌اند. برای اندازه‌گیری افت فشار در ناحیه‌ی آزمایش از یک مانومتر U شکل حاوی جیوه و تراکلرید کربن استفاده می‌شود که افت فشار را در طول لوله‌های مارپیچی برای شدت جریان‌های مختلف سیال اندازه‌گیری می‌کند. به منظور کاهش اتلاف حرارتی به محیط، لوله‌ها با دو لایه‌ی ضخیم از فایبرگلاس و پشم سنگ ایزوله می‌گردند. جریان سیال از داخل مخزن پمپ می‌شود و

پایین آن شیرری قرار دارد عبور می کند و با ثبت زمان لازم برای پر شدن حجم مشخصی از محفظه می توان دبی جریان را اندازه گیری کرد. طی آزمایش ها، دمای ورودی و خروجی سیال عامل، دمای سطوح خارجی لوله ها، دبی جریان، توان ورودی به بخش حرارتی و میزان افت فشار سیال درون لوله ها اندازه گیری و ثبت می شود.

به منظور تنظیم دبی جریان مقداری از سیال از طریق یک خط جریان برگشتی به داخل مخزن برگشت داده می شود. سپس سیال وارد یک تثبیت کننده ی جریان (Dampener) می گردد و بعد از آن به سمت لوله های آزمایش فرستاده می شود. سیال خروجی با جریان آب سرد خنک می شود و سپس وارد ناحیه ی اندازه گیری دبی می گردد. به منظور تعیین دبی، جریان سیال قبل از ورود به مخزن از یک محفظه ی مدرج که در قسمت



شکل ۳ چیدمان کلی سیستم مورد استفاده در آزمایش ها

جدول ۲ مشخصات هندسی لوله های مورد استفاده در این پژوهش

Tube	d (mm)	t (mm)	L (mm)	D (mm)	$\lambda$	b (mm)	N
I- لوله ی مارپیچی (HCT-I)	۷	۰/۵	۱۳۱۸/۸	۱۴۰	۲۰	۲۴	۳
II- لوله ی مارپیچی (HCT-II)				۷۰	۱۰	۴۲	۶
III- لوله ی مارپیچی (HCT-III)				۷۰	۱۰	۲۴	۶
لوله ی مستقیم						-	

خواص فیزیکی و حرارتی مورد استفاده برای نانوسیال شامل جرم حجمی، گرانی، گرمای مخصوص و ضریب هدایت حرارتی با توجه به خواص آب، ذرات نانو و کسر حجمی مورد نیاز در دمای متوسط بالک تعیین می شوند:

جرم حجمی نانوسیال [26]:

$$\rho_{nf} = \varphi \rho_s + (1 - \varphi) \rho_f \quad (6)$$

گرانروی نانوسیال [27]:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{1 - 34.87 \left(\frac{d_s}{d_f}\right)^{-0.3} (\varphi)^{1.03}} \quad (7)$$

که  $d_f$  قطر معادل یک مولکول سیال پایه می باشد و توسط رابطه زیر حساب می شود:

$$d_f = 0.1 \left(\frac{6M}{N^* \pi \rho_{f0}}\right)^{1/3} \quad (8)$$

ظرفیت حرارتی مؤثر نانوسیال [28]:

$$C_{pnf} = \frac{\varphi \cdot (\rho_p \cdot C_{pp}) + (1 - \varphi) \cdot (\rho_f \cdot C_{pf})}{\rho_{nf}} \quad (9)$$

هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال [27]:

$$k_{nf} = k_f \left(1 + 4.4 \text{Re}^{0.4} \text{Pr}^{0.66} \left(\frac{T}{T_{fr}}\right)^{10} \left(\frac{k_s}{k_f}\right)^{0.03} \varphi^{0.66}\right) \quad (10)$$

همچنین سیدر و تیت [29] و مانلاپاز و چرچیل [30] معادلات (۱۱ و ۱۲) را برای تخمین عدد ناسلت متوسط جریان سیال داخل لوله های مستقیم و مارپیچی ارائه کرده اند.

$$\overline{\text{Nu}}_s = 1.86 \left(\text{Re} \text{Pr} \frac{d}{L}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (11)$$



شکل ۴ لوله های مارپیچی و المنت های الکتریکی حلقوی مورد استفاده

### آنالیز داده های تجربی و بررسی میزان خطای آزمایش ها

داده های تجربی به منظور تعیین عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت متوسط سیال داخل لوله ها به شکل زیر محاسبه می شوند:

$$\bar{h}(\text{exp}) = \frac{V \cdot I}{A(T_w - T_b)_M} \quad (4)$$

$$\overline{\text{Nu}}(\text{exp}) = \frac{\bar{h}_{nf}(\text{exp}) d}{k_{nf}} \quad (5)$$

در روابط فوق،  $(T_w - T_b)_M$  اختلاف دمای متوسط لگاریتمی می باشد. افت فشار به طور مستقیم از روی مانومتر برای حالت های مختلف خوانده می شود. نانوسیال یک سیستم چندجزئی است و مرفولوژی و جهت گیری ذرات پراکنده در آن پیچیده می باشد. از این رو، روابط بسیار محدودی برای انتقال حرارت نانوسیال پیشنهاد شده است. البته با توجه به ابعاد بسیار کوچک و کسر حجمی پایین ذرات مورد استفاده در تهیه نانوسیال ها این مخلوط های پراکنده ی جامد-مایع در عمل معمولاً شبیه سیال خالص عمل می کنند و بنابراین تحت این شرایط روابط متداول برای سیالات همگن را می توان برای سیستم نانوسیال نیز به کار برد.



محاسبه شده از روی پارامترهای قابل اندازه گیری،  $U_{Xi}$  خطای اندازه گیری (نسبت دقت سیستم اندازه گیری به کوچک ترین مقدار کمیت اندازه گیری شده در آزمایش ها) و  $U_{Pi}$  حداکثر خطای ممکن در محاسبه ی یک کمیت می باشد. تأثیر تمام خطاها در محاسبه ی کمیت نهایی به صورت معادله ی (۱۶) بیان می شود [38].

$$\text{Max } U_p = \pm \left[ \left( \frac{X_1}{P} \frac{\partial P}{\partial X_1} U_1 \right)^2 + \left( \frac{X_2}{P} \frac{\partial P}{\partial X_2} U_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{X_3}{P} \frac{\partial P}{\partial X_3} U_3 \right)^2 \right]^{0.5} \quad (16)$$

که  $U_p$  نشان دهنده ی خطای حاصل در تخمین کمیت می باشد.

نحوه ی محاسبه ی خطای حاصل در محاسبه ی عدد ناسلت در یکی از آزمایش ها به عنوان نمونه در زیر آورده می شود:

خطای تقریبی اندازه گیری دبی جرمی سیال

$$U_m = \pm 3 \times 10^{-2}$$

خطای اندازه گیری ولتاژ

$$U_v = \pm \frac{0.1}{74.3} = \pm 1.345 \times 10^{-3}$$

خطای اندازه گیری جریان (آمپر)

$$U_i = \pm \frac{0.01}{1.37} = \pm 7.3 \times 10^{-3}$$

خطای اندازه گیری اختلاف دمای لگاریتمی سطح لوله و سیال

$$U_{Pi} = \frac{X_i}{P} \frac{\partial P}{\partial X_i} U_{Xi} \quad (15)$$

که در این رابطه  $X_i$  پارامتر قابل اندازه گیری است.  $U_{(T_w-T_b)_M} = \pm \frac{0.1}{13.5} = \pm 7.4 \times 10^{-3}$  کمیت  $P$

جدول ۳ مقایسه ی عدد رینولدز بحرانی در لوله های مارپیچی

	ایتو [36]	کوبیر [35]	اشمیت [34]	کیونکولین [33]	سربینواسان [32]
۱۰	۹۵۷۲	۶۰۹۲	۱۱۷۶۷	۱۰۱۶۵	۱۶۲۷۱
۲۰	۷۶۶۸	۴۸۸۰	۹۸۸۳	۷۳۳۹	۱۴۰۱۶

$$\overline{Nu}_c = \left\{ \left[ \frac{48}{11} + \frac{\frac{51}{11}}{\left(1 + \frac{1342}{Pr \cdot He^{0.2}}\right)^2} \right]^3 + 1.86 \left[ \frac{He}{1 + \frac{1.15}{Pr}} \right]^{\frac{3}{2}} \right\}^{1/3} \quad (12)$$

که  $Pr$  و  $Re$  به ترتیب عدد رینولدز و عدد پرانتل می باشند و طبق روابط زیر محاسبه می شوند.

$$Re = \rho \bar{U} d / \mu \quad (13)$$

$$Pr = \mu \frac{C_p}{k} \quad (14)$$

انتقال جریان آرام به آشفته درون لوله های خمیده (به علت تأثیرات تثبیت کننده ی جریان ثانویه) در رینولدزهای بالاتری نسبت به لوله های مستقیم اتفاق می افتد [31]. در جدول (۳) روابط ارائه شده توسط برخی محققان پیرامون تخمین عدد رینولدز بحرانی درون لوله های خمیده ارائه شده است. هم چنین عدد رینولدز بحرانی برای لوله های مارپیچی مورد استفاده در این پژوهش در جدول مذکور آورده شده است. به منظور حفظ آرام بودن رژیم جریان کلیه ی آزمایش ها در رینولدزهای کم تر از ۴۵۰۰ انجام پذیرفت.

بررسی هایی به منظور تعیین میزان خطا در محاسبه ی عدد ناسلت به وسیله ی اندازه گیری های تجربی صورت پذیرفته است. این بررسی ها تأثیر خطاهای اندازه گیری را در نتیجه ی کلی نشان می دهد. معادله ی مورد استفاده برای تخمین خطا رابطه ی (۱۵) می باشد [37].

$$U_{Pi} = \frac{X_i}{P} \frac{\partial P}{\partial X_i} U_{Xi} \quad (15)$$

که در این رابطه  $X_i$  پارامتر قابل اندازه گیری است.  $U_{(T_w-T_b)_M} = \pm \frac{0.1}{13.5} = \pm 7.4 \times 10^{-3}$  کمیت  $P$

صحت و دقت مناسب روش‌های اندازه‌گیری این پژوهش می‌باشد.

**اثر نسبت انحنای لوله‌های مارپیچی بر نرخ انتقال حرارت و افت فشار.** در شکل (۶) به منظور بررسی اثر نسبت انحنا نتایج مربوط به عدد ناسلت جریان آب خالص و نانوسیال در غلظت‌های مختلف حجمی درون لوله‌های مارپیچی I و III بر حسب عدد رینولدز مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. تمام مشخصات هندسی این دو لوله به جز نسبت انحنا، همان‌طور که در جدول (۲) به آن اشاره شد، یکسان می‌باشند.

همان‌طور که از شکل (۶) به وضوح قابل مشاهده است، اولاً نانوسیال در تمامی غلظت‌ها نرخ انتقال حرارت بیش‌تری نسبت به آب خالص از خود نشان می‌دهند و هر چه غلظت نانوسیال بیش‌تر شود میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال در عدد رینولدز حدود ۱۳۱۰ و برای جریان داخل لوله مارپیچی I با افزایش غلظت حجمی نانوسیال از ۰/۲۵٪ تا ۲٪ عدد ناسلت از ۱۷/۹۰ تا ۲۳/۶۵ افزایش می‌یابد؛ یعنی ۳۲/۱ درصد بهبود در نرخ انتقال حرارت مشاهده می‌شود. دلیل اصلی این بهبود ناشی از افزایش قابل توجه هدایت حرارتی نانوسیالات نسبت به سیال پایه می‌باشد. ثانیاً نرخ انتقال حرارت با افزایش عدد رینولدز روند صعودی از خود نشان می‌دهد؛ به‌عنوان نمونه، با افزایش عدد رینولدز از ۵۰۳ تا ۳۱۷۰ برای نانوسیال ۲٪ حجمی درون لوله‌ی مارپیچی III عدد ناسلت از ۱۶/۹ تا ۵۳/۹ افزایش می‌یابد که دلیل اصلی این پدیده تشدید فرآیند تبادل انرژی در سیال به‌دلیل حرکات براونسی و اتفاقی نانوذرات می‌باشد. در جریان‌هایی با دبی‌های بالا اثرات پراکندگی و حرکات نامنظم و توزیع نانوذرات در سیال تشدید می‌شود که این امر می‌تواند باعث برهم‌زدن لایه‌ی مرزی حرارتی تشکیل‌یافته و نازک کردن آن شود که منجر به

برای محاسبه‌ی هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال از رابطه‌ی (۱۰) استفاده شده است که برای ذرات کروی با خطای ناچیز هدایت حرارتی نانوسیال را پیش‌بینی می‌کند.

خطای تقریبی رابطه تخمین هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال عبارت است از:  $U_{k_{nf}} = \pm 3 \times 10^{-2}$  بنابراین حداکثر خطای اندازه‌گیری عدد ناسلت به‌صورت رابطه‌ی (۱۷) بیان می‌گردد:

$$\text{Max } U_{Nu} = \pm \left[ (U_V)^2 + (U_I)^2 + (-U_{(T_w - T_b)_M})^2 + (-U_{k_{nf}})^2 \right]^{0.5} \quad (17)$$

با جای‌گذاری مقادیر خطا در رابطه‌ی (۱۷) میزان خطا در این آزمایش خاص ۳/۱۷٪ به‌دست می‌آید.

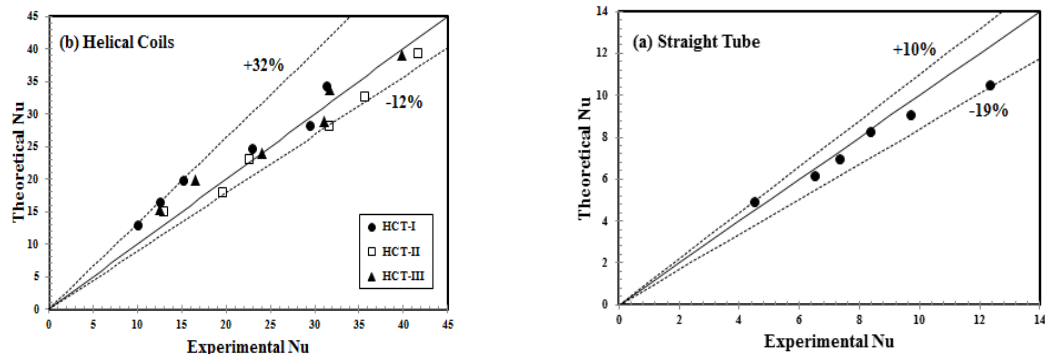
### نتایج تجربی و بحث

**بررسی صحت و دقت نتایج تجربی.** به‌منظور بررسی میزان دقت نتایج و اندازه‌گیری‌های تجربی، ابتدا برای تمام لوله‌ها آزمایش‌هایی با آب خالص انجام پذیرفت و نتایج حاصل با نتایج تئوری ارائه‌شده توسط محققان مقایسه گردید.

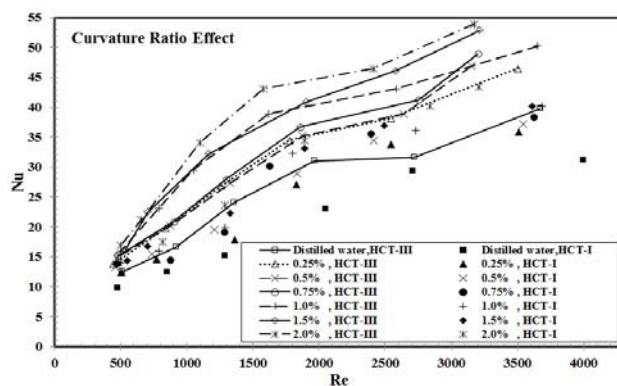
در شکل (۵) نتایج تجربی اندازه‌گیری عدد ناسلت در لوله‌های مستقیم و مارپیچی با مقادیر تئوری متناظر آن (معادلات ۱۴ و ۱۵) مقایسه شده است. میزان انحراف داده‌های تجربی از داده‌های حاصل از رابطه‌ی تئوری برای لوله‌ی مستقیم بین ۱۹٪- و ۱۰٪+ و برای لوله‌های خمیده بین ۱۲٪- و ۳۲٪+ می‌باشد. ذکر این نکته ضروری می‌باشد که روابط مختلفی توسط محققان برای پیش‌بینی انتقال حرارت داخل لوله‌ها ارائه شده است که گاه اختلاف‌های چشمگیری از هم دارند. بر این اساس تطبیق قابل قبولی بین داده‌های آزمایشگاهی و روابط تئوری برقرار می‌باشد که نشان از

گرادیان دمایی بالاتر در مجاورت دیواره و در نتیجه افزایش نرخ انتقال حرارت گردد. ثالثاً خطوط نشان‌دهنده‌ی عدد ناسلت سیال جاری در لوله‌ی مارپیچی III ( $\lambda=10$ ) در سطح بالاتری نسبت به لوله‌ی مارپیچی I ( $\lambda=20$ ) برای غلظت‌های یکسان از نانوسیال قرار دارند که این نشان‌دهنده عملکرد حرارتی به‌تر و مناسب‌تر نانوسیال در لوله با نسبت انحنای کوچک‌تر می‌باشد. به‌عنوان مثال، برای نانوسیال ۱٪ حجمی جاری در لوله‌ی مارپیچی III با افزایش عدد رینولدز از ۴۹۹ تا ۳۶۵۰ عدد ناسلت از ۱۵/۹ تا ۵۰/۲ بهبود پیدا می‌کند در حالی که عدد ناسلت این نانوسیال در لوله‌ی مارپیچی I با تغییر عدد رینولدز بین ۵۰۵ و ۳۶۸۴ از

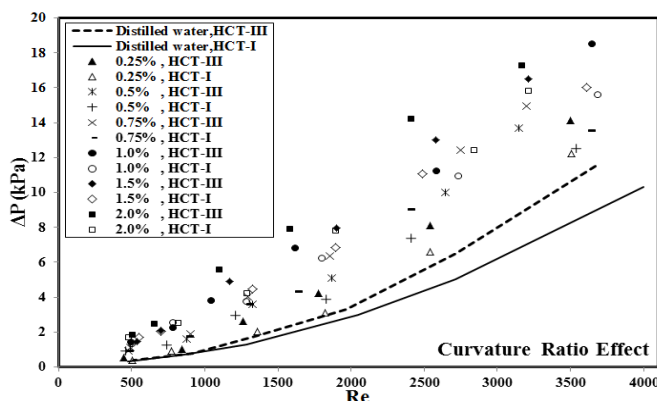
۱۴/۰ تا ۴۰/۲ افزایش می‌یابد. نسبت انحنای کوچک‌تر منجر به تشدید نیروی گریز از مرکز و در نتیجه تقویت جریان ثانویه در لوله‌های مارپیچی می‌گردد. با تقویت جریان ثانویه و اختلاط سطح مقطعی بیش‌تر ذرات، حرکت براونی نانوذرات افزایش می‌یابد که به نوبه‌ی خود سبب افزایش بیش‌تر عدد ناسلت می‌گردد. به همین دلیل، لوله‌ی مارپیچی III که نسبت انحنای کوچک‌تری دارد نرخ انتقال بالاتری را نسبت به لوله‌ی مارپیچی I بروز می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده توسط دیگر محققان [25,30] نیز حاکی از اثر مثبت افزایش نسبت انحنای لوله‌ی مارپیچی بر نرخ انتقال حرارت می‌باشد.



شکل ۵ مقایسه بین عدد ناسلت متوسط تئوری و تجربی برای آب خالص درون (a) لوله‌ی مستقیم (b) لوله‌های مارپیچی



شکل ۶ عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز برای جریان آب خالص و نانوسیال با غلظت‌های مختلف درون لوله‌های مارپیچی I و III به‌منظور بررسی اثر نسبت انحنای لوله‌های مارپیچی



شکل ۷ افت فشار جریان آب خالص و نانوسیال با غلظت‌های مختلف حجمی درون لوله‌های مارپیچی I و III به منظور بررسی اثر نسبت انحناهای لوله‌های مارپیچی

کوچک‌تر لوله‌ی مارپیچی III منجر به تقویت جریان ثانویه به علت نیروهای گریز از مرکز غیرتعادلی قوی‌تر در جریان و هم‌چنین افزایش اختلاط ذرات در هر سطح مقطع لوله نسبت به لوله‌ی مارپیچی I می‌گردد که تمامی این عوامل سبب تشدید حرکت براونی نانو ذرات و تبادل ممتوم بین آن‌ها می‌گردد و در نتیجه میزان افت فشار بیش‌تری در لوله‌ی مارپیچی III مشاهده می‌شود.

**اثر طول گام لوله‌های مارپیچی بر نرخ انتقال حرارت و افت فشار.** به منظور بررسی اثر طول گام، نتایج مربوط به جریان داخل لوله‌های مارپیچی II و III که تمام مشخصات هندسی به جز طول گام آن‌ها یکسان می‌باشد مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. بدین منظور عدد ناسلت و میزان افت فشار جریان آب خالص و نانوسیال در غلظت‌های مختلف حجمی بر حسب عدد رینولدز به ترتیب در شکل‌های (۹) و (۸) نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل (۸) نشان داده شده لوله‌ی مارپیچی II ( $b=42$ ) در غلظت‌های یکسان از نانوسیال عدد ناسلت بالاتری نسبت به لوله‌ی مارپیچی III ( $b=24$ ) دارد. به عنوان مثال برای غلظت ۱/۵٪ حجمی نانوسیال، عدد ناسلت برای لوله‌ی مارپیچی III بین ۱۶/۲ و ۵۲/۹ تغییر می‌کند در حالی که برای لوله‌ی مارپیچی II عدد ناسلت در سطوح بالاتر و بین ۱۶/۵ و

در شکل (۷) میزان افت فشار محوری جریان آب خالص و نانوسیال داخل لوله‌های مارپیچی I و III نشان داده شده است.

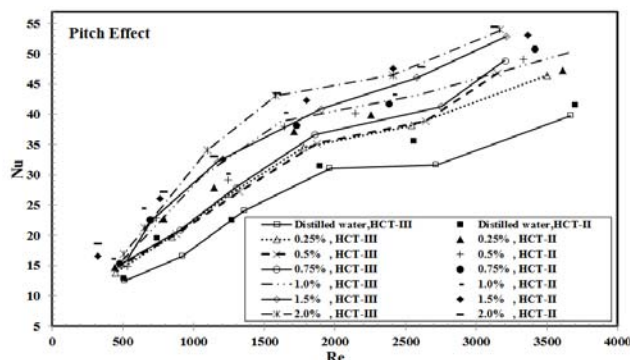
شکل (۷) نشان می‌دهد که با افزایش غلظت نانوسیال و هم‌چنین عدد رینولدز میزان افت فشار داخل لوله افزایش می‌یابد. به طور مثال در بالاترین عدد رینولدز در هر آزمایش با افزایش غلظت نانوسیال از ۰/۲۵٪ تا ۲٪ میزان افت فشار درون لوله‌ی مارپیچی I از ۱۲/۲۳ تا ۱۵/۸۲ افزایش می‌یابد. دلیل این رفتار، افزایش جرم حجمی و گرانشی سیال به خاطر حضور نانو ذرات می‌باشد [39]. علاوه بر آن پراکنندگی و حرکات تصادفی نانو ذرات به خصوص در نزدیک دیواره‌ی لوله منجر به تشدید نرخ تبادل ممتوم بین نانو ذرات می‌گردد. این تبادل ممتوم نیز خود منجر به افزایش میزان افت فشار محوری جریان داخل لوله می‌شود.

ضمن این‌که جریان نانوسیال داخل لوله‌ی مارپیچی III که نسبت انحنا کوچک‌تری دارد افت فشار بیش‌تری را نشان می‌دهد؛ به عنوان نمونه، میزان افت فشار محوری برای جریان نانوسیال ۱/۵٪ حجمی درون لوله‌ی مارپیچی I با تغییر عدد رینولدز بین ۵۵۰ تا ۳۶۱۰ از ۱/۶۶ تا ۱۵/۹۹ کیلو پاسکال افزایش می‌یابد، در حالی که این میزان افزایش برای جریان داخل لوله‌ی مارپیچی III از ۱/۴۵ تا ۱۶/۵ کیلو پاسکال در محدوده‌ی رینولدز ۵۳۵ تا ۳۲۱۵ می‌باشد. نسبت انحنا

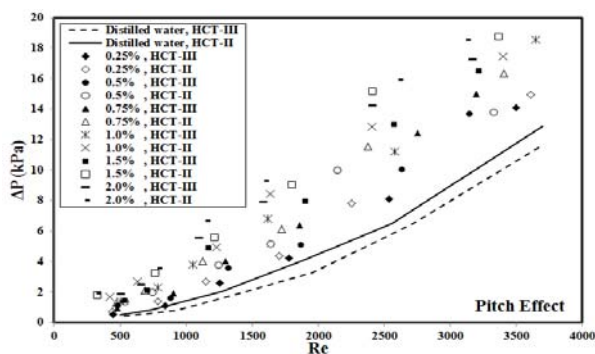
ثانویه را در هر سطح مقطع لوله تحت تأثیر قرار می‌دهد. ماکزیمم عدد ناسلت حاصل از جریان نانوسیال ۲٪ حجمی درون لوله‌ی ماریچی II و رینولدز ۳۱۲۵ و برابر ۵۴/۵ می‌باشد که حدود ۴۲/۱ درصد بهبود نسبت به جریان آب خالص در رینولدز مشابه نشان می‌دهد.

این نتایج تا حد زیادی یافته‌های تئوری توسط مانلاپاز و چرچیل [30,40] را پوشش می‌دهد. آن‌ها تأثیر ناچیز طول گام را بر نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری به استثنای اعداد رینولدز پایین و نسبت انحنای بزرگ لوله‌ی ماریچی مورد تأکید قرار داده‌اند. هم‌چنین در نتایج به‌دست آمده توسط اکبری دوست و همکاران [25] نیز به‌علت طول گام کوچک لوله‌های مورد بررسی، تأثیر طول گام به‌وضوح قابل بررسی نیست.

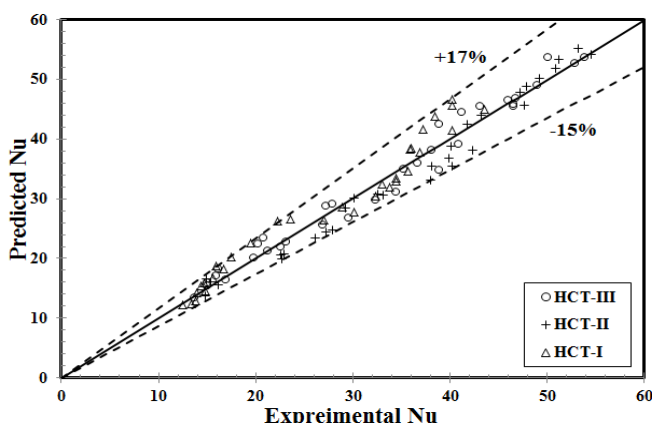
۵۳/۱ تغییر می‌کند. البته میزان افزایش عدد ناسلت در لوله‌ی ماریچی II در مقایسه با لوله‌ی ماریچی III در اعداد رینولدز پایین بیش‌تر قابل ملاحظه است. به‌طور مثال در عدد رینولدز ۴۴۰ برای جریان ۰/۲۵٪ حجمی از نانوسیال درون لوله‌ی ماریچی II عدد ناسلت ۱۴/۸ و برای لوله‌ی ماریچی III، ۱۳/۸ می‌باشد یعنی ۷/۲۵ درصد افزایش در نرخ انتقال حرارت. اما در عدد رینولدز حدود ۳۵۵۰ افزایش عدد ناسلت از ۴۶/۵ تا ۴۷/۳ یعنی ۱/۷۲ درصد می‌باشد. این نوع تغییر عدد ناسلت احتمالاً ناشی از تأثیر بیش‌تر نیروی شناوری می‌باشد که ساختار جریان را فقط در رینولدزهای پایین (که نیروهای گریز از مرکز ضعیف‌تر است) تغییر می‌دهد. هم‌چنین تغییر طول گام لوله‌ی ماریچی منجر به تغییر نیروهای گریز از مرکز سیال جاری در لوله‌ی ماریچی می‌گردد که این به نوبه‌ی خود جریان‌های



شکل ۸ عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز برای جریان آب خالص و نانوسیال با غلظت‌های مختلف درون لوله‌های ماریچی II و III به‌منظور بررسی اثر طول گام لوله‌های ماریچی



شکل ۹ افت فشار جریان آب خالص و نانوسیال با غلظت‌های مختلف درون لوله‌های ماریچی II و III به‌منظور بررسی تأثیر طول گام لوله‌های ماریچی



شکل ۱۰ مقایسه بین اعداد ناسلت متوسط تخمین زده شده با رابطه‌ی (۱۸) و اعداد

ناسلت تجربی برای جریان نانو سیال داخل لوله‌های مارپیچی

تخمین میزان افت فشار جریان نانوسیال درون لوله‌های مارپیچی با ضریب تخمین  $R^2=95/9\%$  به دست می‌آید.

$$\Delta P_C = 16.61 \text{ He}^{1.27} \varphi^{0.41} \quad (19)$$

ضمن این که محدوده‌ی قابل قبول پارامترهای موجود در روابط (۱۸ و ۱۹) به قرار زیر است:

$$101 \leq \text{He} \leq 1152, \quad 4.8 \leq \text{Pr} \leq 8.95, \\ 0.0025 \leq \varphi \leq 0.02$$

### نتیجه گیری

در این پژوهش اثر نسبت انحنا و طول گام لوله‌های مارپیچی بر میزان افت فشار و عدد ناسلت جریان آرام نانوسیال تیتان/آب در غلظت‌های ۰/۲۵٪ تا ۲٪ حجمی مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها بر روی سه لوله‌ی مارپیچی با مشخصات هندسی متفاوت صورت پذیرفت و نتایج به دست آمده از این مطالعه به‌طور خلاصه به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

۱- استفاده از نانوسیال منجر به بهبود نرخ انتقال حرارت در تمامی شرایط عملیاتی مورد مطالعه می‌گردد. در محدوده‌ی غلظتی مورد آزمایش، هر چه غلظت نانوسیال مورد استفاده بیش تر باشد عدد ناسلت

هم‌چنین همان‌طور که در شکل (۹) به‌وضوح نشان داده شده است نانوسیال جاری در لوله‌ی مارپیچی II افت فشار بیش‌تری را نسبت به لوله‌ی مارپیچی III تجربه می‌کند که دلیل آن طول گام بزرگ‌تر لوله‌ی مارپیچی و در نتیجه افزایش اختلاط ذرات نانو می‌باشد.

**تخمین عدد ناسلت و افت فشار جریان نانوسیال داخل لوله‌های مارپیچی.** با انجام آنالیز رگرسیون بر روی داده‌های تجربی حاصل از این پژوهش، عدد ناسلت جریان نانوسیال درون لوله‌های مارپیچی با معادله‌ی (۱۸) تخمین زده می‌شود.

$$\overline{\text{Nu}}_C = 0.865 \text{ He}^{0.531} \text{ Pr}^{0.431} \varphi^{0.113} \quad (18)$$

ضریب تخمین رابطه‌ی فوق  $R^2=96/7\%$  می‌باشد که برای جریان نانوسیال تیتان/آب با غلظت‌های حجمی کم‌تر از ۲٪ مورد استفاده قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است انحراف بین عدد ناسلت تخمین زده شده و عدد ناسلت تجربی در بازه‌ی بین ۱۵٪- و ۱۷٪+ قرار می‌گیرد.

هم‌چنین با روش مشابه، رابطه‌ی (۱۹) برای

دبی جرمی ( $\text{kg s}^{-1}$ )	$\dot{m}$	بیش تر افزایش می یابد.
وزن مولکولی سیال پایه	M	۲- افزایش عدد رینولدز باعث افزایش عدد ناسلت و افت فشار جریان می شود. این افزایش که بیش تر ناشی از افزایش سرعت جریان در لوله می باشد باعث تقویت جریان ثانویه و در نتیجه بهبود عملکرد آن بر افزایش ضریب انتقال حرارت می شود.
تعداد دور لوله‌ی مارپیچی	N	۳- پارامترهای هندسی لوله‌ها تأثیر قابل توجهی بر انتقال حرارت و میزان افت فشار جریان نانوسیال می گذارد. کاهش نسبت انحنا و یا افزایش طول گام در لوله‌های مارپیچی به علت تقویت نیروی گریز از مرکز و تشدید جریان ثانویه و هم چنین بهبود اختلاط سطح مقطعی نانوذرات منجر به ازدیاد تبادل ممتوم و انرژی بین ذرات می گردد و در نتیجه عدد ناسلت و افت فشار جریان افزایش می یابد. هر چند تأثیر نسبت انحنا از اثر طول گام بیش تر می باشد.
عدد آووگادرو	$N^*$	
عدد ناسلت متوسط (بدون بعد)	$\overline{Nu}$	۴- حداکثر عدد ناسلت برای جریان نانوسیال ۲٪ حجمی درون لوله‌ی مارپیچی II (که دارای بزرگ‌ترین طول گام و کوچک‌ترین نسبت انحنا می باشد) برابر با ۵۴/۵ می باشد که در رینولدز ۳۱۲۵ اتفاق می افتد.
عدد پرائتل (بدون بعد)	Pr	
ضریب تخمین (%)	$R^2$	
عدد رینولدز (بدون بعد)	Re	
دمای (K)	T	
ضخامت لوله (m)	t	
سرعت متوسط ( $\text{m s}^{-1}$ )	$\bar{U}$	
ولتاژ (V)	V	
<b>حروف یونانی</b>		
افت فشار محوری (Pa)	$\Delta$	
جرم حجمی ( $\text{kg m}^{-3}$ )	$\rho$	
گرانروی (Pa s)	$\mu$	
نسبت انحنا‌ی لوله‌ی مارپیچی (D/d)	$\lambda$	
جزء حجمی نانو ذرات	$\varphi$	
حجم ( $\text{m}^3$ )	$\theta$	
<b>فهرست نمادها</b>		
اندیس‌ها		
بالک	b	A سطح داخلی لوله ( $\text{m}^2$ )
لوله‌ی مارپیچی	c	b طول گام لوله‌ی مارپیچی (m)
سیال پایه	f	$C_p$ ظرفیت گرمایی ویژه ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
سیال پایه در دمای $20^\circ \text{C}$	$f_0$	d قطر داخلی لوله (m)
نقطه‌ی ذوب	fr	D قطر کویل (m)
نانوسیال	nf	De عدد دین (بدون بعد)
ذره	p	E میزان خطا
لوله‌ی مستقیم	s	f ضریب اصطکاک فینینگ
کل	t	$\bar{h}$ ضریب انتقال حرارت متوسط ( $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ )
دیوار	w	He عدد هلیکال (بدون بعد)
		I شدت جریان الکتریکی (A)
		k هدایت حرارتی ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
		L طول لوله (m)

## مراجع

1. Naphon, P. and Wongwises, S., "A review of flow and heat transfer characteristics in curved tubes", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 10, pp. 463-490, (2006).
2. Mishra, P. and Gupta, S.N., "Momentum transfer in curved pipes 1. Newtonian fluids; 2. Non-Newtonian Fluids", *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, Vol. 18, pp. 130-142, (1979).
3. Seban, R.A. and McLaughlin, E.F., "Heat transfer in tube coils with laminar and turbulent flow", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 6, pp. 387-395, (2006).
4. Hawthorne, W.R., "Secondary circulation in fluid flow", *Proceedings the Royal of Society London A*, Vol. 206, pp. 374-387, (1951).
5. Austin, L.R. and Searder, J.D., "Entry region for steady viscous flow in coiled circular pipes", *AIChE Journal*, Vol. 20, pp. 820-822, (1974).
6. Moulin, P., Manno, P., Rouch, J.C., Serra, C., Clifton, M.J. and Aptel, P., "Flux improvement by Dean vortices: Ultrafiltration of colloidal suspensions and macromolecular suspensions", *Journal of Membrane Science*, Vol. 156, pp. 109, (1999).
7. Chen, H. and Zhang, B., "Fluid flow and mixed convection heat transfer in a rotating curved pipe", *International Journal of Thermal Science*, Vol. 42, pp. 1047-1059, (2003).
8. Grindley, J.H. and Gibson, A.H., "On the frictional resistance of air through a pipe", *Proceedings the Royal of Society London A*, Vol. 80, pp. 114-139, (1908).
9. Patankar, S.V., Pratap, V.S. and Spalding, D.B., "Prediction of laminar flow and heat transfer in helically coiled pipes", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 62, pp. 539-551, (1974).
10. Ali, S.; "Pressure drop correlations for flow through regular helical coil tubes", *Fluid Dynamics Research*, Vol. 28, pp. 295-310, (2001).
11. Hart, J., Ellenberger, J. and Hamersma, P.J., "Single and two-phase flow through helically coiled tubes", *Chemical Engineering Science*, Vol. 45, pp. 775-783, (1988).
12. Pawar, S.S. and Sunnapwar, V.K., "Experimental studies on heat transfer to Newtonian and non-Newtonian fluids in helical coils with laminar and turbulent flow", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 44, pp. 792-804, (2013).
13. Zussman, S., "More about Argonne's stable, highly conductive nanofluids, Technology Transfer at Argonne, Public communication", *Argonne National Laboratory*, IL, USA, (2002).
14. Duangthongsuk, W. and Wongwises, S., "An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO<sub>2</sub>-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 334-344, (2010).
15. ZeinaliHeris, S., Etemad, S.Gh. and Nasr Esfahany, M. , "Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer", *International Communication of Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, pp. 529-535, (2006).



16. Abbasian Arani, A.A. and Amani, J., "Experimental study on the effect of TiO<sub>2</sub>-water nanofluid on heat transfer and pressure drop", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 42, pp. 107-115, (2012).
17. Abbasian Arani, A.A. and Amani, J., "Experimental investigation of diameter effect on heat transfer performance and pressure drop of TiO<sub>2</sub>-water nanofluid", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 44, pp. 520-533, (2013).
18. Akbarinia, A. and Behzadmehr, A., "Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in horizontal curved tubes", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, pp. 1327-1337, (2007).
19. Jamshidi, N., Farhadi, M., Sedighi, K. and Domeiry Ganji, D., "Optimization of design parameters for nanofluids flowing inside helical coils", *International Communication of Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 311-317, (2012).
20. Akhavan-Behabadi, M.A., FakoorPakdaman, M. and Ghazvini, M., "Experimental investigation on the convective heat transfer of nanofluid flow inside vertical helically coiled tubes under uniform wall temperature condition", *International Communication of Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 556-564, (2012).
21. Hashemi, S.M. and Akhavan-Behabadi, M.A., "An empirical study on heat transfer and pressure drop characteristics of CuO-base oil nanofluid flow in a horizontal helically coiled tube under constant heat flux", *International Communication of Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 144-151, (2012).
22. Mukesh Kumar, P.C., Kumar, J. and Suresh, S., "Heat transfer and friction factor studies in helically coiled tube using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> /water Nanofluid", *European Journal of Scientific Research*, Vol. 82, pp. 161-172, (2012).
23. Kahani, M., ZeinaliHeris, S. and Mousavi, S.M., "Effects of curvature ratio and coil pitch spacing on heat transfer performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid laminar flow through helical coils", *Journal of Dispersion Science And technology*, (2013) doi:10.1080/01932691.2013.764485.
24. Kahani, M., ZeinaliHeris, S. and Mousavi, S.M., "Comparative study between metal oxide nanopowders on thermal characteristics of nanofluid flow through helical coils", *Powder Technology*, Vol. 246, pp. 82-92, (2013).
25. Akbaridoust, F., Rakhsha, M., Abbassi, A. and Saffar-Avval, M., "Experimental and numerical investigation of nanofluid heat transfer in helically coiled tubes at constant wall temperature using dispersion model", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 58, pp. 480-491, (2013).
26. Drew, D.A. and Passman, S.L., "*Theory of Multi Component Fluids*", First ed., Springer, Germany, (1999).
27. Corcione, M., "Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids", *Journal of Energy Conversion and Management*, Vol. 52, pp. 789-793, (2011).
28. Einstein, A., "*Investigation on Theory of Brownian motion*", First ed., Dover Publication, USA, (1956).
29. Seider, E.N. and Tate, G.E., "Heat transfer and pressure drop of liquid in tubes", *Industrial &*

- Engineering Chemistry Research*, Vol. 28, pp. 1429-1435, (1936).
30. Manlapaz, R.L. and Churchill, S.W., "Fully developed laminar convection from a helical coil", *Chemical Engineering Communications*, Vol. 97, pp. 185-200, (1981).
31. Ko, T.H. and Ting, K., "Optimal Reynolds number for the fully developed laminar forced convection in a helical coiled tube", *Energy*, Vol. 31, pp. 2142-2152, (2006).
32. Srinivasan, P.S., purkar, S.S. and Holland, F.A., "Pressure drop and heat transfer in coils", *The Chemical Engineer*, Vol. 218, pp. 113-119, (1968).
33. Cioncolini, A. and Santini, L., "An experimental investigation regarding the laminar to turbulent flow transition in helically coiled pipes", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 30, pp. 367-380, (2006).
34. Schmidt, D.F., "Warmeubargang and Druckverlust in Rohrshlangen", *Chemical Engineering and Technology*, Vol. 13, pp. 781, (1967).
35. Kubair, V. and Varrier, C.B.S., "Pressure drop for liquid flow in helical coils", *Transactions of the Indian Institute of Chemical Engineers*, Vol. 14, pp. 93-97, (1961).
36. Ito, H., "Friction factors for turbulent flow in curved pipes", *Journal of Basic Engineering ASME Transactions ASME*, Vol. 81, pp. 123, (1959).
37. Young, H.D., "*Statistical treatment of experimental data*", McGraw-Hill, New York, (1962).
38. Holman, J.D., "*Experimental methods for engineers*", Fifth ed., McGraw-Hill, New York, (1986).
39. Drew, D.A. and Passman, S.L., "*Theory of Multi Component Fluids*", First ed., Springer, Germany, (1999).
40. Manlapaz, R.L. and Churchill, S.W., "Fully developed laminar flow in a helically coiled tube of finite pitch", *Chemical Engineering Communications*, Vol. 7, pp. 57-78, (1980).