



بررسی تجربی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال در لوله انحنادار

شیوا ملکی دلارستاقی^۱، محسن نظری^{۱*}، امین شاکری^۲

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۲دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۶ بهمن ۱۳۹۵
بازنگری: ۳۰ اردیبهشت ۱۳۹۶
پذیرش: ۲۵ تیر ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۱۱ مرداد ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

انتقال حرارت جابه‌جایی
نانوسیال
لوله خمیده
مطالعه تجربی

چکیده: در این مقاله انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری آب و نانوسیال آب - آلومینا در لوله‌های خمیده دما ثابت در محدوده دین ۸۱/۹۸ تا ۷۴۹/۲۹ بصورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به مطالعات انجام شده، انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال در لوله‌های خمیده با نسبت انحنای مختلف و با دمای سطح ثابت بطور کامل بررسی نشده و مطالعات عمیق‌تری در این خصوص نیاز است. در این آزمایش آب و نانوسیال آب - آلومینا با درصد حجمی ۰/۱ مورد استفاده قرار گرفته و همچنین از سه لوله خمیده با نسبت انحنای ۰/۱۱۶، ۰/۰۷۴ و ۰/۰۴۲ و مساحت سطح خارجی برابر و جنس یکسان استفاده شده است. پس از اندازه‌گیری دمای ورودی و خروجی لوله، عدد ناسلت متوسط و افت فشار در لوله اندازه‌گیری می‌شود. با تکرار آزمایش، نتایج به‌دست آمده به وسیله روابط آماری در بازه اطمینان نمایش داده می‌شوند. همچنین از روابط تئوری موجود برای لوله‌های خمیده، جهت صحت‌سنجی نتایج تجربی افت فشار استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده نمایانگر افزایش حداکثر ۱۵ درصدی عدد ناسلت در اثر استفاده از نانوسیال آب - آلومینا با ۰/۱ درصد حجمی نسبت به سیال پایه است. همچنین اثر نسبت انحنا بر انتقال حرارت سیال عامل مورد بررسی قرار گرفته و نشان دهنده افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت جابه‌جایی لوله خمیده با نسبت انحنا کوچک‌تر در مقایسه با لوله با نسبت انحنای بزرگ‌تر است.

۱- مقدمه

افزایش راندمان و بهبود مصرف انرژی در صنایع همواره مورد توجه محققان بوده است. بهبود انتقال حرارت در سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی نیز از این قاعده مستثنی نیست. عملکرد تجهیزات حرارتی با به‌کارگیری روش‌های خاصی بهبود می‌یابد. به‌طور کلی این روش‌ها را می‌توان به دو دسته روش‌های فعال و روش‌های غیر فعال تقسیم نمود. در روش‌های فعال یک نیروی خارجی مانند میدان الکتریکی یا میدان مغناطیسی اعمال می‌شود. در روش‌های غیرفعال از سطوح ویژه یا مواد افزودنی استفاده می‌گردد. استفاده از لوله‌های خمیده نیز از روش‌های غیرفعال بهبود انتقال حرارت می‌باشد. لوله‌های خمیده از اجزای ضروری تقریباً تمام تجهیزات فرایندهای صنعتی، اعم از صنایع تولید برق، مواد شیمیایی، مبدل‌های حرارتی، راکتورهای هسته‌ای و ... هستند. جریان در لوله خمیده دارای پیچیدگی‌های زیادی نسبت به جریان در لوله مستقیم است. در لوله خمیده، جریان‌های ثانویه ایجاد شده ناشی از نیروی گریز از مرکز، باعث اختلاط جریان و بهبود انتقال حرارت می‌گردد. مطالعات زیادی در زمینه جریان و انتقال حرارت در انواع لوله‌های خمیده صورت گرفته است [۷-۱]. اما با توجه به پیچیدگی‌های جریان و انتقال حرارت در این هندسه‌ها، نیاز به بررسی‌های بیشتر، ضروری به نظر می‌رسد.

از طرف دیگر هدایت حرارتی ضعیف ذاتی سیالات متداول در انتقال

حرارت در صنایع مانند: آب، روغن‌ها و اتیلن گلیکول محدودیتی جدی در بهبود عملکرد و فشردگی تجهیزات مهندسی است. یکی از راه‌های بهبود انتقال حرارت استفاده از ذرات جامد ریز در سیال می‌باشد. استفاده از این ذرات در ابعاد نانومتر در سیال با عنوان «نانوسیال» برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط چوی [۸] ارائه شد. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده‌اند که نانوسیالات نه تنها باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌شوند بلکه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را نسبت به سیال پایه نیز افزایش می‌دهند [۲۱-۹]. یکی از عوامل محدود کننده ناشی از افزایش کسر حجمی نانوذرات، افت فشار داخل لوله‌ها و افزایش توان پمپ است. افزایش افت فشار در اثر استفاده از نانوسیالات خصوصاً در ناحیه درحال توسعه، توسط محققین مختلف [۲۳-۲۱] گزارش شده است. در کنار بررسی‌های آزمایشگاهی، برخی به مطالعه تئوری و شبیه‌سازی عددی جریان و انتقال حرارت نانوسیالات داخل هندسه‌های مختلف پرداخته‌اند [۲۹-۲۲]. شبیه‌سازی‌های عددی انتقال حرارت جابه‌جایی در هندسه‌های مختلف و شرایط مرزی متفاوت، برای انواع نانوسیالات قابل کاربرد است. در شبیه‌سازی‌های عددی موجود، نانوسیالات شامل انواع نانوذرات مانند آلومینا [۲۷-۲۵ و ۲۳ و ۲۲]، اکسید مس [۲۸] و نانولوله‌های کربنی [۲۹] مطالعه شده‌اند. هندسه جریان در اغلب این شبیه‌سازی‌ها، لوله مستقیم است [۲۹-۲۶ و ۲۲ و ۱۱]. مطالعات کمی در مورد جریان داخل لوله‌های خمیده در دسترس است.

هاترون [۳۰] نخستین محقق بود که یک روش عددی برای جریان

حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال داخل لوله خمیده و تأثیر پارامترهای هندسی بر بهبود عملکرد آن‌ها وجود دارد. بنابراین، این تحقیق جزء اولین تحقیقات آزمایشگاهی در این حوزه است. در بیشتر تحقیقات انجام شده، مقایسه انتقال حرارت بین لوله خمیده و لوله مستقیم مورد بررسی قرار گرفته اما در این پژوهش با توجه به کاربرد لوله‌های خمیده در دستگاه‌های مختلف مهندسی از قبیل سیستم‌های لوله‌کشی، کارخانه‌های صنعتی، توربو ماشین و... این مقایسه، هم‌زمان بین سه لوله خمیده با خم ۱۸۰ درجه، با جنس و مساحت سطح خارجی برابر و نسبت انحناهای متفاوت با در نظر گرفتن افت فشار صورت گرفته و اثر نسبت انحنا و وجود نانوذرات در سیال پایه بر انتقال حرارت و افت فشار مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نانوپودر با اندازه متوسط ۱۵ نانومتر جهت ساخت نانوسیال ۰/۱ درصد حجمی به کار گرفته شده است. برای افزایش دقت آزمایش‌ها، هر تست حداقل سه مرتبه انجام و نتایج حاصل بصورت بازه اطمینان^۱ نمایش داده شده است. اهداف این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- مقایسه انتقال حرارت نانوسیال و سیال پایه در لوله‌های خمیده
- بررسی اثر انحنا بر انتقال حرارت و افت فشار سیال داخل لوله‌های خمیده

۲- تهیه و تعیین نانوسیال و مشخصات آن

آماده‌سازی نانوسیالات اولین قدم در افزایش انتقال حرارت نانوسیالات محسوب می‌شود. دو روش متداول برای تولید نانوسیالات عبارتند از: روش تک مرحله‌ای و روش دو مرحله‌ای. در روش دو مرحله‌ای نانوپودر تهیه شده به روش آلتراسونیک در سیال پایه پایدار می‌شود. وانگ و همکاران [۴۱] از جمله کسانی بودند که از روش دو مرحله‌ای برای تولید نانوسیال آب - آلومینا استفاده کردند. در این مقاله از روش دو مرحله‌ای برای تهیه نانوسیال استفاده شده است، بدین ترتیب که نانوپودر آلومینا به اندازه متوسط ۱۵ نانومتر توسط شرکت تکنان اسپانیا آماده شده، توسط دستگاه آلتراسونیک با قدرت ۲۰۰ وات و ۳۰ کیلو هرتز در سیال پایه (آب مقطر) به مدت ۳ ساعت پایدار می‌شود. نانوسیال آماده شده، حداقل به مدت ۴۸ ساعت بدون هیچ ته‌نشینی، کلوخه شدن، تغییر رنگ و بصورت کاملاً یک‌رنگ پایدار می‌ماند. باید توجه داشت که برای جلوگیری از تغییر خواص حرارتی نانوسیال، هیچ‌گونه ماده اضافی یا پایدار کننده به سیال اضافه نشده است. نانوسیال در درصد حجمی ۰/۱ آماده و مورد استفاده قرار گرفته است. سه پارامتر اصلی در محاسبه سرعت انتقال حرارت نانوسیالات، شامل ویسکوزیته، هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی، ممکن است با پارامترهای مربوط به سیال پایه متفاوت باشند. انیشتین [۴۲] برای محاسبه ویسکوزیته نانوسیال با غلظت کمتر از ۵ درصد رابطه (۱) را ارائه داده است.

$$\mu_{nf} = \mu_w (1 + 2.5\phi) \quad (1)$$

در این رابطه ϕ درصد حجمی و μ_w ویسکوزیته سیال پایه می‌باشد.

کاملاً توسعه یافته در لوله‌های خمیده ارائه کرد. مولین و همکاران [۳۱] با انجام مطالعه تجربی و عددی بر روی جریان در لوله‌های خمیده بیان داشتند که جریان ثانویه تأثیر قابل توجهی در اعداد رینولدز کمتر از ۲۰ ندارد. افزایش افت فشار جریان داخل لوله‌های خمیده در مقایسه با افت فشار لوله‌های معمولی برای اولین بار توسط گریندلی و گیسون [۳۲] مطرح گردید. کالب و سیدر [۳۳ و ۳۲] انتقال حرارت جریان ویسکوز پایدار توسعه‌یافته در لوله خمیده با مقطع دایره‌ای با شرط مرزی شار ثابت و دما ثابت دیواره را به روش عددی مورد مطالعه قرار دادند و رابطه‌ای برای محاسبه عدد ناسلت متوسط در محدوده مشخص عدد دین و پرانتل یافتند. اکبری‌نیا و همکاران [۳۴ و ۲۵ و ۲۳] به شبیه‌سازی عددی جابه‌جایی ترکیبی آرام نانوسیال آلومینا در آب، داخل یک خم ۱۸۰ درجه پرداخته‌اند و اثر نیروی شناوری و گریز از مرکز، غلظت و قطر ذرات جامد را بر انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که در جریان جرمی مشخص، غلظت نانوذرات اثر مثبت بر سرعت محوری و نیروی شناوری اثر منفی بر عدد ناسلت و ضریب اصطکاک دارند. همچنین افزایش قطر ذرات جامد سبب کاهش عدد ناسلت و جریان ثانویه و افزایش سرعت محوری می‌شود. ابراهیمی‌نیا و همکاران [۳۶ و ۳۵] انتقال حرارت نانوسیال آب - آلومینا که خواص ترموفیزیکی آن تابعی از دما و غلظت ذرات در نظر گرفته شده، برای دو لوله صاف و منحنی با طول و قطر برابر و انتقال حرارت جریان آرام نانوسیال مخلوط آب و نانو لوله کربنی را در لوله خمیده با خم ۹۰ درجه به روش عددی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها اثر انحنا و نانوذرات را بررسی کردند و دریافتند با توجه به حرکت جریان ثانویه ناشی از اثرات انحنا نرخ انتقال حرارت به طور قابل توجهی بهبود یافته است و با افزایش افت فشار همراه می‌باشد. بررسی عددی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال آلومینا - آب در لوله خمیده توسط چوی و ژانگ [۳۷] انجام شد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش عدد رینولدز و پرانتل عدد ناسلت افزایش می‌یابد و افزایش ظرفیت گرمایی ویژه و افزایش غلظت نانو ذرات موجب بهبود انتقال حرارت و افزایش افت فشار در لوله می‌شود. بررسی عددی اثرات اعمال میدان مغناطیسی در فروسیال آب و اکسید آهن در لوله خمیده و مستقیم افقی توسط امین‌فر و همکاران [۳۸] انجام شد. نتایج آن‌ها بیان‌گر آن است استفاده از میدان مغناطیسی خارجی باعث افزایش ضریب انتقال حرارت در لوله مستقیم می‌شود. اما در انتهای لوله خمیده به دلیل تقابل بین نیروی گریز از مرکز قوی‌تر و نیروی کلونین، ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. لیبرتو و همکاران [۳۹] با شبیه‌سازی عددی، جریان درهم توسعه‌یافته و انتقال حرارت را در لوله خمیده مورد بررسی قرار دادند. سیوفالو و همکاران [۴۰] اثرات شناوری گرانشی و گریز از مرکز در جریان آرام و انتقال حرارت در لوله‌های منحنی و مارپیچ با شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار دادند.

در این تحقیق، اثر استفاده از روش‌های جدیدی هم‌چون نانوسیال و تغییر شکل هندسی در راستای بهبود سیستم‌های انتقال حرارت بررسی شده است. تحقیقات نشان می‌دهد، مطالعات انجام‌شده محدودی در زمینه بررسی انتقال

خارجی برابر برای آزمایش به کار گرفته شده است. تصویر واقعی و شماتیک سیستم مورد آزمایش، به ترتیب در شکل ۲(الف) و ۲(ب) و تصویر واقعی و شماتیک نمای بالای مخزن سیال، به ترتیب در شکل ۳(الف) و ۳(ب) نمایش داده شده است. برای شروع آزمایش در هر مرحله می‌بایست ابتدا نرخ جریان سیال تعیین شود تا سرعت جریان و به دنبال آن عدد رینولدز مشخص شود. در گام اول و قبل از شروع به آزمایش باید المنت حرارتی^۱ را روشن کرد تا زمانی که دمای مخزن آب که لوله آزمایش بطور کامل داخل آن قرار گرفته، روی ۹۲ درجه سانتی‌گراد با دقت ± 0.5 در حالت جوشش^۲ قرار گرفته و ثابت شود. برای اطمینان از تثبیت دمای مخزن، از چند سنسور دما در نزدیک جداره و نقاط مختلف داخل مخزن آب استفاده شد (برای حالت دما ثابت). گام دوم ریختن سیال عامل در تانک سیال و روشن کردن پمپ است تا جریان ثانویه سیال در خط لوله برقرار گردد. سپس این سیال عامل به سمت مبدل حرارتی هدایت می‌شود. مبدل حرارتی از نوع پوسته لوله‌ای است که توسط آب شهر و یخ (مخلوط آب و یخ) فرآیند تثبیت دمای ورودی را بر روی ۱۸ درجه سانتی‌گراد با دقت ± 0.5 را انجام می‌دهد. در هر شدت جریانی ۱۰ الی ۲۰ دقیقه به سیستم اجازه کار داده می‌شود تا سیستم به حالت پایا برسد، به طوری که همواره سیال با یک دما وارد بخش آزمایش گردد. با رسیدن سیستم به حالت پایا در هر لحظه دمای سنسور مخزن، دمای سنسور ورودی و خروجی لوله آزمایش توسط دستگاه آدام ۴۰۱۵ ثبت و توسط مبدل سریال به پورت آدام ۴۵۶۱ به رایانه منتقل می‌شود و از مقادیر آن متوسط گرفته می‌شود. با در دست داشتن اطلاعات فوق می‌توان ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و عدد ناسلت این جریان سیال را مشخص کرد. دستگاه سنجش افت فشار نیز در هر دبی تغییرات فشار را روی نمایش‌گر نشان می‌دهد. سنسورهای مورد استفاده از نوع سنسورهای مقاومی پی تی ۱۰۰ ساخت شرکت جمو آلمان می‌باشند که با دقت ± 0.1 درجه سانتی‌گراد کالیبره شده‌اند. نتایج هر آزمایش پس از رسیدن به حالت پایا ثبت شده و برای افزایش دقت هر تست حداقل سه مرتبه انجام و نتایج به دست آمده بصورت بازه اطمینان با دقت ۹۷ درصد آماری نمایش داده می‌شود.

۴- تحلیل داده

۴-۱- فرمول‌بندی

یکی از بهترین شیوه‌ها برای بررسی عملکرد حرارتی یک سیستم، بررسی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و عدد ناسلت است. ضریب جابه‌جایی از رابطه (۵) محاسبه می‌شود: [۴۶]

$$h = \frac{q}{A \Delta T_b} \quad (5)$$

که در آن q حرارت جذب شده سیال در طول لوله آزمایش، A مساحت

چگالی و گرمای ویژه نانوسیال در رابطه (۲) و (۳) نشان داده شده است که این روابط به ترتیب توسط پک و چو [۴۳] و ژوان و روتزل [۴۴] با داده‌های تجربی مورد بررسی قرار گرفت.

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_w + \phi\rho_{np} \quad (2)$$

$$C_{p,nf} = \frac{\phi\rho_{np}C_{p,np} + (1-\phi)\rho_w C_{p,w}}{\rho_{nf}} \quad (3)$$

در این رابطه ρ_w و ρ_{np} به ترتیب چگالی آب و نانوذرات و $c_{p,np}$ و $c_{p,w}$ به ترتیب گرمای ویژه آب و نانوذرات می‌باشد. از اولین مدل‌های ریاضی برای رسانش گرمایی سوسپانسیون‌های ماکرو، مدل ماکسول [۴۵] می‌باشد. در این مدل که در رابطه (۴) نشان داده شده است سوسپانسیون تنها تابعی از جزء حجمی ذره و رسانش گرمایی سیال و ذره می‌باشد.

$$\frac{K_{nf}}{K_w} = \frac{K_{np} + 2K_w + 2\phi(K_{np} - K_w)}{K_{np} + 2K_w - \phi(K_{np} - K_w)} \quad (4)$$

در این معادله K_w و K_{np} به ترتیب رسانش گرمایی در نانوذرات و آب می‌باشد.

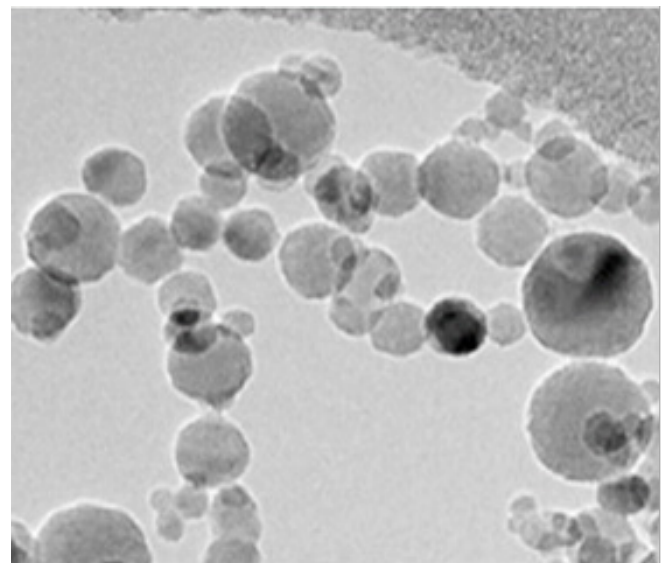


Fig. 1. TEM image of alumina nanopowder

شکل ۱: تصویر TEM از نانوپودر آلومینا مورد استفاده

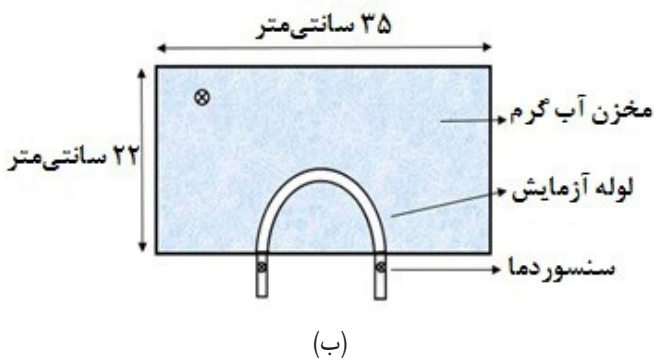
۳- سیستم آزمایشگاهی

در این مقاله انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری سیال عامل (آب و نانوسیال آب - آلومینا ۰/۱ درصد حجمی) درون لوله خمیده گذرنده از مخزن مکعب مستطیل شکل با شرط مرزی دما ثابت مورد بررسی قرار گرفته است. بدنه مخزن از جنس تفلون نرم با طول ۳۵ سانتی‌متر، عرض ۲۲ سانتی‌متر، ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر و ضخامت ۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین سه لوله خمیده با نسبت انحناهای ۰/۰۴۲، ۰/۰۷۴ و ۰/۱۱۶ و مساحت سطح

- 1 Heating Element
- 2 Boiling
- 3 PT100



(الف)



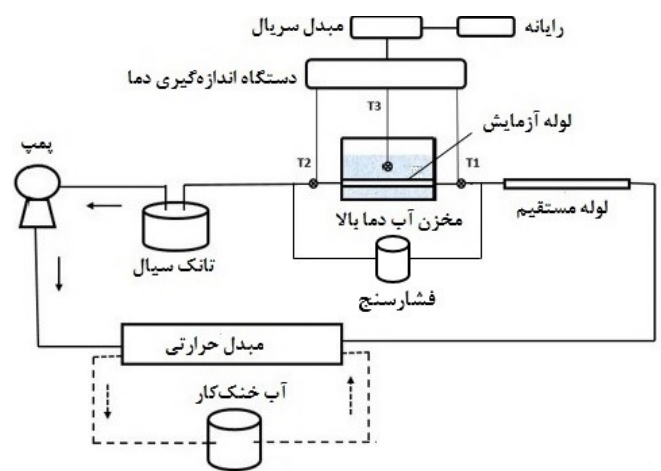
(ب)

Fig. 3. a) An upper view of the test section, b) A schematic of the upper view of the test section

شکل ۳: الف) تصویر واقعی نمای بالای مخزن، ب) طرحواره نمای بالای مخزن



(الف)



(ب)

Fig. 2. a) A picture of experimental system, b) Schematic of experimental system

شکل ۲: الف) تصویر واقعی سیستم آزمایشگاهی، ب) طرحواره سیستم آزمایشگاهی

دیواره لوله و ΔT_b اختلاف میانگین بین دمای دیواره و مرکز لوله بین ورودی و خروجی است. انرژی جذب شده سیستم را می‌توان به صورت رابطه (۶) تعریف کرد [۴۶]:

$$q = \dot{m} C_{peff} (T_{out} - T_{in}) \quad (6)$$

که در آن C_{peff} ضریب گرمایی ویژه مؤثر نانوسیال از رابطه (۳) محاسبه می‌شود. دمای بالک جریان نیز از روش $LMTD^1$ محاسبه می‌شود [۴۶]:

$$\Delta T_b = \ln \frac{T_w - T_{in}}{T_w - T_{out}} \quad (7)$$

که T_w دمای دیواره لوله و T_{in} و T_{out} به ترتیب دماهای سیال در ورودی

1 Long Mean Temperature Difference

و خروجی لوله هستند. بنابراین ضریب جابه‌جایی به صورت رابطه (۸) تعریف می‌شود:

$$h = \frac{\dot{m} C_{peff} (T_{out} - T_{in})}{A \ln \frac{T_w - T_{in}}{T_w - T_{out}}} \quad (8)$$

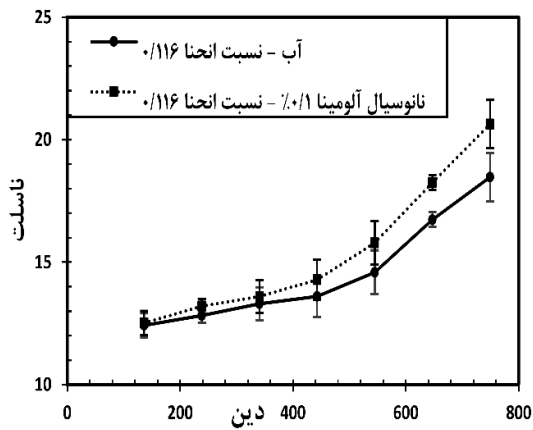
در نهایت می‌توان عدد ناسلت جریان را به صورت رابطه (۹) محاسبه نمود [۴۶]:

$$Nu = \frac{hD}{K_{eff}} \quad (9)$$

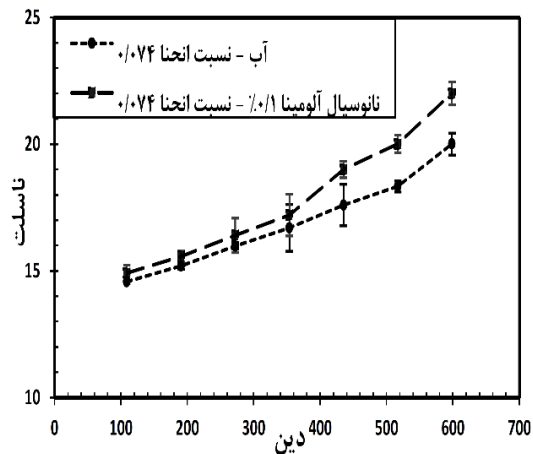
D قطر لوله و K_{eff} ضریب هدایت مؤثر سیال است که برای نانوسیال از رابطه (۴) محاسبه می‌گردد. برای محاسبه عدد رینولدز از رابطه (۱۰) استفاده می‌شود [۴۶]:

$$Re = \left(\frac{\rho}{\mu}\right)_{eff} UD \quad (10)$$

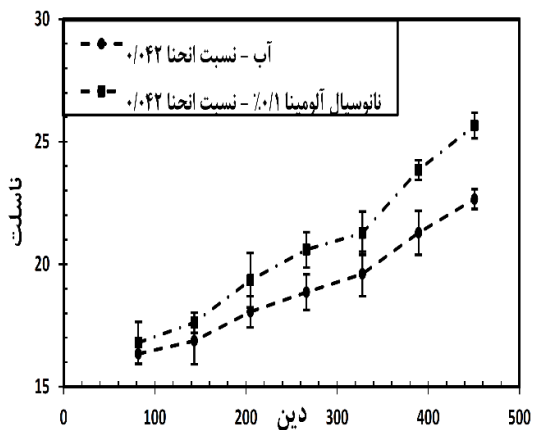
انتخاب شده و عدد ناسلت دو لوله دیگر، نسبت به این لوله سنجیده می‌شود.



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 4. Nusselt number of the water and nano-fluid as functions of Dean number for curved tubes, with curvatures of: a) 0.116, b) 0.074 and c) 0.042

شکل ۴: عدد ناسلت آب و نانوسیال بر حسب عدد دین برای (الف) لوله خمیده با نسبت انحنا ۰/۱۱۶، (ب) لوله خمیده با نسبت انحنا ۰/۰۷۴، (ج) لوله خمیده با نسبت انحنا ۰/۰۴۲

μ و ρ دانسیته و ویسکوزیته سیال و U سرعت متوسط سیال در لوله است. برای محاسبه عدد دین از رابطه (۱۱) استفاده می‌شود [۲۳]:

$$De = Re \left(\frac{r}{R} \right)^{0.5} \quad (11)$$

که $r=D/2$ شعاع لوله، R شعاع انحنا و (r/R) نسبت انحنای لوله خمیده هستند.

۵- نتایج

در این پروژه انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری سیال درون لوله خمیده گذرنده از مخزن مکعب مستطیل شکل افقی به صورت آزمایشگاهی در محدوده دین ۸۱/۹۸ تا ۷۴۹/۲۹ بررسی شده است. در این آزمایش‌ها آب و نانوسیال آلومینا در درصد حجمی ۰/۱ به عنوان سیال عامل در لوله آزمایش استفاده شده است. هدف اصلی از انجام این پروژه مقایسه تجربی بین سه لوله خمیده با شرایط یکسان (ثابت بودن مساحت سطح خارجی و جنس) و نسبت انحنای متفاوت می‌باشد. آزمایش‌ها در شرط مرزی دما ثابت انجام و نتایج آن گزارش شده است. برای بالا بردن دقت نتایج در هر دبی، آزمایش‌ها حداقل سه مرتبه انجام و در بازه اطمینان اندازه‌گیری شده، نمایش داده شده‌اند. خطای قابل قبول این آزمایش‌ها در این بازه، در شکل‌ها نشان داده شده است. جدول ۱ نشان‌گر دقت و بازه تغییرات وسایل اندازه‌گیری مورد استفاده می‌باشد. با استفاده از جدول ۱ و انجام محاسبات، ماکزیمم درصد عدم قطعیت^۱ برای دما، افت فشار، دبی، حرارت جذب شده توسط سیال و عدد ناسلت به ترتیب ۰/۵، ۰/۰۰۱۶، ۰/۰۶۵، ۵/۵۶، ۴/۷ و ۴۸ درصد گزارش می‌شود [۴۷ و ۴۸]

جدول ۱: دقت و بازه تغییرات وسایل اندازه‌گیری

Table 1. Measuring instruments range and accuracy

وسایل اندازه‌گیری	بازه تغییرات	دقت
سنسور دما	-۱۰۰ تا +۱۰۰	± 0.1
پمپ	درجه سانتی‌گراد	درجه سانتی‌گراد
دستگاه اندازه‌گیری افت فشار	۱۷۱۴/۳ تا ۱۷۱۴/۴	± 0.1
	میلی‌لیتر بر دقیقه	میلی‌لیتر بر دقیقه
	۰ تا ۶۲۰ میلی‌بار	± 0.001 میلی‌بار

یکی از پارامترهای مهم در انتقال حرارت، عدد ناسلت می‌باشد. عدد ناسلت جریان تابعی از عدد دین است که در لوله خمیده با نسبت انحنا ۰/۱۱۶، ۰/۰۷۴ و ۰/۰۴۲ در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود عدد ناسلت با افزایش عدد دین افزایش می‌یابد و این افزایش در لوله خمیده با نسبت انحنا کمتر، بیشتر است. برای نشان دادن میزان این افزایش با توجه به شکل ۵ لوله با نسبت انحنا ۰/۱۱۶ به عنوان مرجع

1 Uncertainty

۰/۰۷۴، حداکثر ۰/۴۷ برابر، و برای لوله با نسبت انحنای ۰/۰۴۲، حداکثر ۱/۱۵ برابر افزایش انتقال حرارت برای لوله با نسبت انحنای ۰/۱۱۶ است. با بررسی شتاب مرکزگرا (V^2/R) برای هر دو لوله خمیده، می‌توان گفت با کاهش نسبت انحنای شتاب مرکزگرا ذرات سیال افزایش یافته و همین مورد موجب افزایش انتقال حرارت می‌شود.

با توجه به نمودارهای نمایش داده شده در مجموع می‌توان نتیجه‌گیری نمود که افزایش عدد دین و همچنین اضافه شدن نانوسیال به سیستم، نرخ انتقال حرارت را افزایش می‌دهد که نتیجه آن کاهش بیشتر دمای خروجی سیال و به تبع آن افزایش انتقال حرارت سیال درون لوله است. سوسپانسیون نانوذرات می‌تواند ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی سیال پایه را تغییر دهد. از طرفی حرکت نانوذرات منجر به شتاب یافتن فرآیند انتقال انرژی می‌شود. همچنین نفوذ و پراکندگی ذرات نانو به‌خصوص ذرات نانوسیالات فلزی در کنار دیواره منجر به افزایش سریع انتقال حرارت از دیواره به توده سیال و در نتیجه افزایش انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه می‌شود. محققان عواملی همچون وجود حرکت براونی نانوذرات، خاص ترموفیزیکی و مکانیزم انتشار نانوذرات را به‌عنوان عوامل مؤثر بر افزایش انتقال حرارت در سوسپانسیون نانوسیال معرفی می‌کنند [۴۹]. از طرفی با افزایش عدد رینولدز به دلیل این که که سیال فرصت کمتری برای انتقال حرارت دارد، دمای خروجی لوله کاهش می‌یابد این در حالی است که دریک رینولدز مشخص، استفاده از نانوسیال سبب افزایش میزان انتقال حرارت (انرژی حرارتی جذب شده سیال) و در نتیجه افزایش دمای خروجی می‌شود. نتایج حاصل از مخزن خروجی سیال در اعداد دین مختلف برای حالتی که لوله گذرنده از مخزن نسبت انحنای متفاوتی دارد در شکل ۷ نمایش داده شده است. همان‌طور که توضیح داده شد نتایج حاکی از کاهش دمای سیال با افزایش عدد دین و نسبت انحنای لوله می‌باشد.

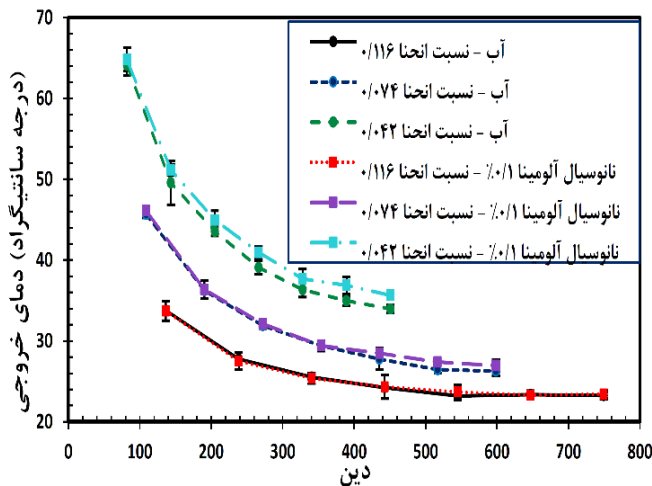


Fig. 7. A comparison of the temperature of the fluid at exit versus Dean number, between curved tubes with different curvatures

شکل ۷: مقایسه دمای خروجی سیال برحسب عدد دین برای لوله خمیده با نسبت انحنای متفاوت

نتایج حاکی از آن است حداکثر افزایش عدد ناسلت لوله با نسبت انحنای ۰/۰۷۴ نسبت به لوله مرجع، برابر ۲۲ درصد و برای لوله با نسبت انحنای ۰/۰۴۲ برابر ۴۵ درصد است. همچنین استفاده از نانوسیال در لوله با نسبت انحنای ۰/۱۱۶، ۰/۰۷۴ و ۰/۰۴۲ به ترتیب موجب حداکثر افزایش ۱۲ درصد، ۱۳ درصد و ۱۵ درصد انتقال حرارت نسبت به سیال پایه (آب) شده است.

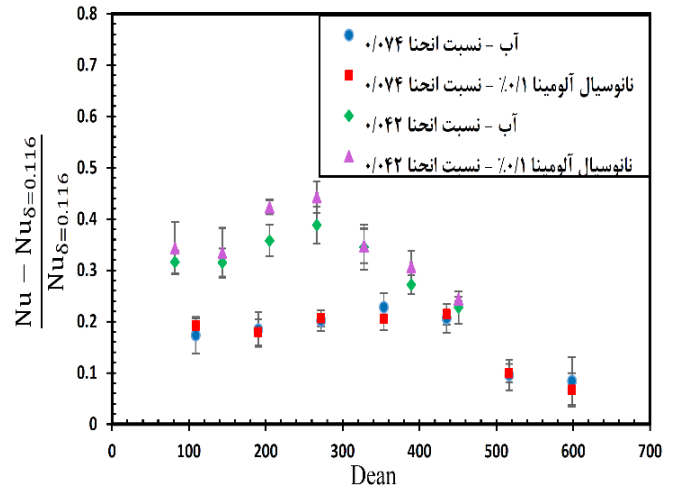


Fig. 5. Enhancement of heat transfer in curved tubes with curvatures of 0.042 and 0.074 in comparison to the curved tube with the curvature of 0.116

شکل ۵: بهبود انتقال حرارت لوله خمیده با نسبت انحنای ۰/۰۴۲ و ۰/۰۷۴ نسبت به لوله با نسبت انحنای ۰/۱۱۶

در شکل ۶ میزان انتقال حرارت منتقل شده از دیواره لوله خمیده به سیال عامل داخل آن، که از معادله (۶) محاسبه می‌شود، برحسب عدد دین نمایش داده شده است.

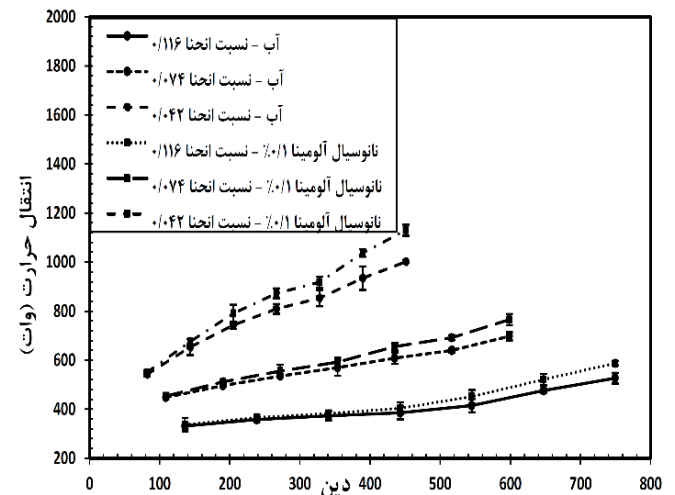


Fig. 6. Heat transfer of water and Alumina nano-fluid as functions of Dean number, for curved tubes with different curvatures

شکل ۶: انتقال حرارت آب و نانوسیال آلومینا برحسب عدد دین برای لوله خمیده با نسبت انحنای متفاوت

نتایج نشان می‌دهد با افزایش عدد دین و با کاهش نسبت انحنای میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد. این افزایش برای لوله با نسبت انحنای

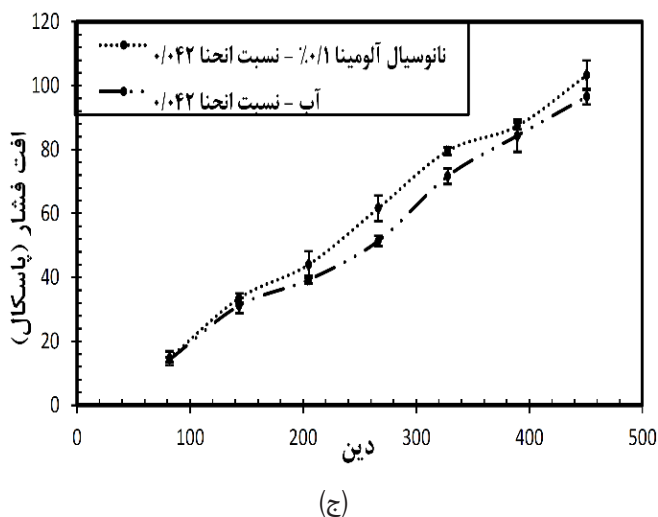
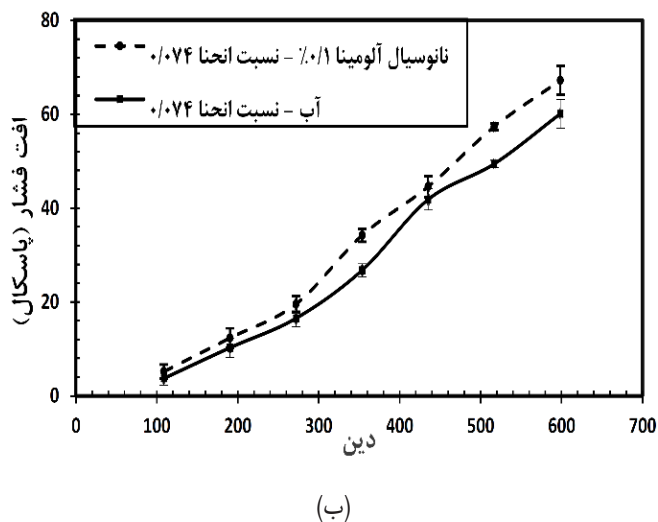
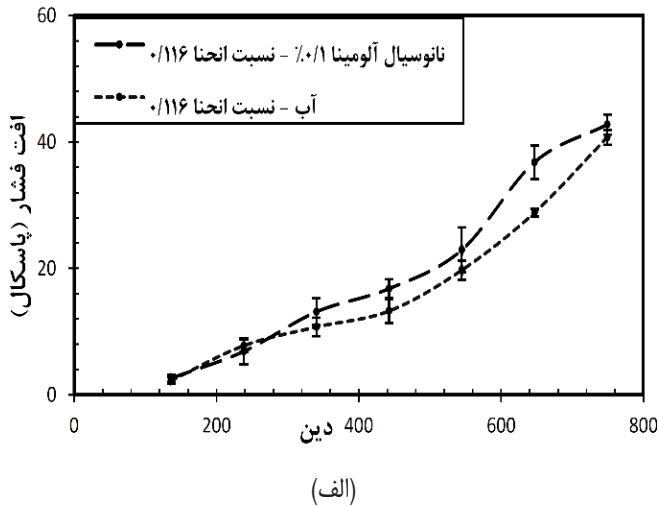


Fig. 9. Pressure drop in different Dean numbers for curved tubes with curvatures of: a) 0.116, b) 0.074 and c) 0.042

شکل ۹: افت فشار در دین‌های مختلف برای (الف) لوله خمیده با نسبت انحنا ۰/۱۱۶ (ب) لوله خمیده با نسبت انحنا ۰/۰۷۴ (ج) لوله خمیده با نسبت انحنا ۰/۰۴۲

شکل ۸ نمایان‌گر میزان افزایش عدد ناسلت نانوسیال آلومینا نسبت به سیال پایه (آب) در لوله خمیده با نسبت انحناهای مختلف بر حسب عدد دین است. همانطور که اشاره شد افزودن اندکی نانوپودر موجب تغییر خواص حرارتی سیال می‌شود. می‌توان گفت افزایش عدد ناسلت تابعی از نسبت انحنا بوده و با افزایش عدد دین افزایش می‌یابد. بیشترین افزایش عدد ناسلت برای لوله خمیده با نسبت انحنا ۰/۰۴۲ در دین ۴۵۰/۸۷ به میزان ۱۵ درصد گزارش شده است.

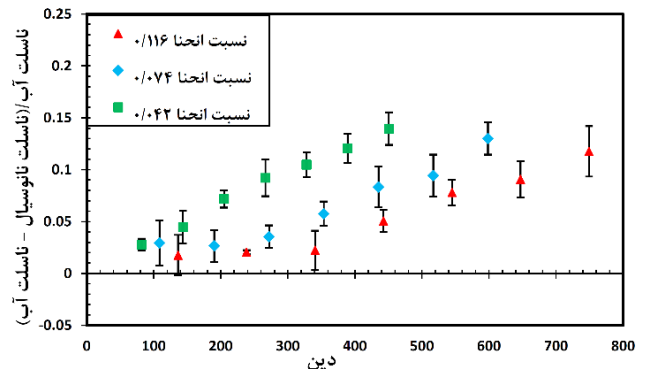


Fig. 8. Enhancement percentage of Nusselt number of the Alumina nanofluid versus Dean number for curved tubes with different curvatures

شکل ۸: درصد افزایش عدد ناسلت نانوسیال آلومینا تابعی از عدد دین برای لوله خمیده با نسبت انحناهای متفاوت

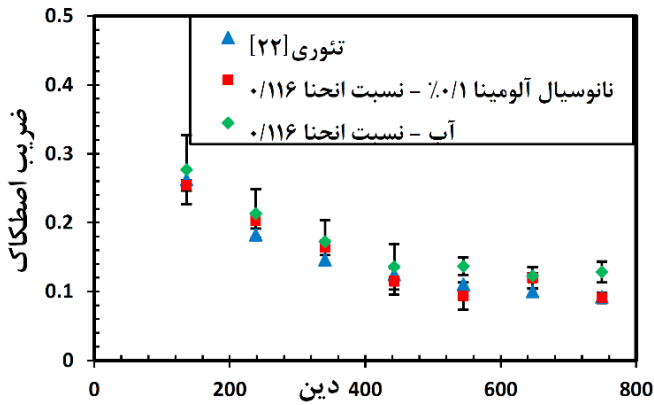
۵-۱- افت فشار

بررسی افت فشار به دلیل تأثیر آن در مصرف انرژی یکی از پارامترهایی است که در صنعت به آن توجه ویژه‌ای می‌شود. شکل ۹ افت فشار ایجاد شده در لوله خمیده با نسبت انحنا ۰/۱۱۶، ۰/۰۷۴ و ۰/۰۴۲ را بر حسب تابعی از عدد دین نشان می‌دهد. مشاهدات تجربی نشان می‌دهد وجود نانوذرات در سیال پایه موجب افزایش افت فشار سیستم می‌شود. افزایش ویسکوزیته نانوسیال نسبت به آب یکی از عواملی است که منجر به افزایش افت فشار در نانوسیال نسبت به آب می‌شود. همچنین نشان داده شده افت فشار در لوله با نسبت انحنا ۰/۰۴۲ بیشتر از دو لوله دیگر است.

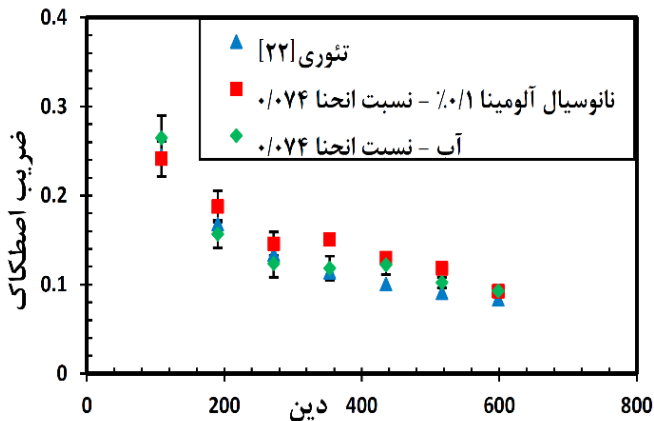
شکل ۱۰ نشان‌دهنده هر دو اثر انتقال حرارت و افت فشار در لوله خمیده است. به‌وضوح مشاهده می‌شود که یک نقطه بهینه (با بیشترین مقدار

$$\left(\frac{Nu_{nf}/Nu_w}{\Delta P_{nf}/\Delta P_w} \right)$$

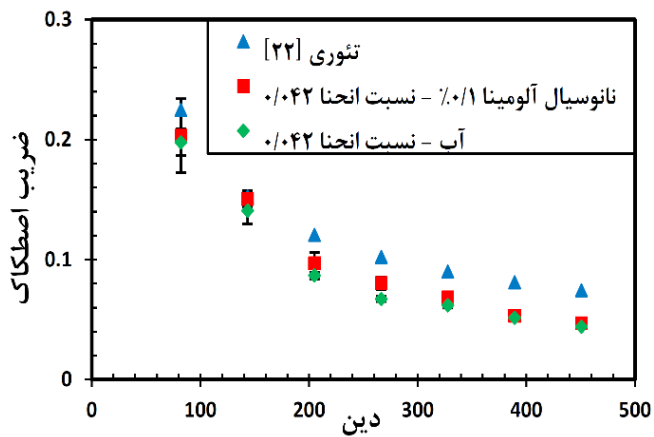
را می‌توان برای هر لوله خمیده با نسبت انحناهای مختلف استخراج کرد. مقادیر بزرگ‌تر از یک، بیانگر آن است که میزان افزایش انتقال حرارت بر افزایش افت فشار نانوسیال نسبت به آب غالب است و این موضوع بیان‌گر بازدهی بیشتر است. برای نمونه لوله با نسبت انحنا ۰/۰۴۲ در محدوده عدد دین ۴۵۰/۸۷ بهترین کارایی را در نمودار نشان می‌دهد. منظور از کارایی، اثرات هم‌زمان انتقال حرارت و افت فشار است که در محور عمودی به شکل بی‌بعد نشان داده شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 11. Comparison of experimental friction coefficient and Ito's formula in different Dean numbers, for curved tubes with curvatures of: a) 0.116, b) 0.074 and c) 0.042

شکل ۱۱: مقایسه ضریب اصطکاک تجربی با رابطه ایتو برحسب دین برای (الف) لوله خمیده با نسبت انحنا ۰/۱۱۶ (ب) لوله خمیده با نسبت انحنا ۰/۰۷۴ (ج) لوله خمیده با نسبت انحنا ۰/۰۴۲

این پژوهش اثر نسبت انحنا و وجود نانوذرات بر انتقال حرارت و افت فشار مورد مطالعه قرار گرفته است و نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانوپودر به

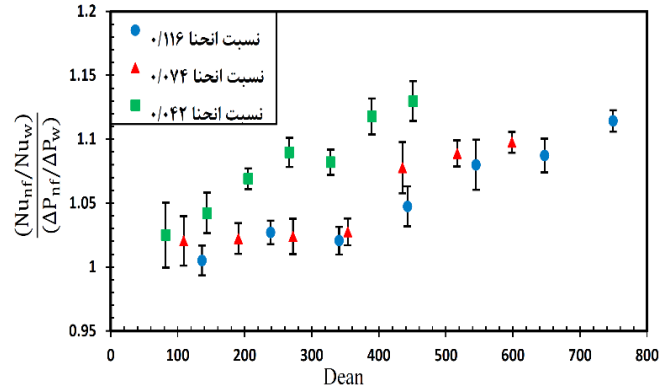


Fig. 10. The increase in the Nusselt number on the rate of increase of pressure drop in terms of the Dean number

شکل ۱۰: میزان افزایش عدد ناسلت بر میزان افزایش افت فشار برحسب عدد دین برای لوله خمیده با نسبت انحنای متفاوت

۵-۲- صحت‌سنجی ضریب اصطکاک داری

با استفاده از رابطه بلازیوس و افت فشار تجربی به‌دست‌آمده از آزمایش، ضریب اصطکاک تجربی لوله خمیده محاسبه می‌گردد. برای صحت‌سنجی ضریب اصطکاک به‌دست‌آمده از افت فشار دو سر لوله خمیده برای آب و نانوسیال آلومینا ۰/۱ درصد حجمی، از رابطه تئوری ایتو [۵۰] که برای لوله‌های خمیده تعریف شده برای مقایسه استفاده شده است. (رابطه ۱۲)، رابطه بلازیوس و ضریب اصطکاک متناظر با آن را نشان می‌دهد)

$$\Delta P = f_r \left(\frac{L}{d}\right) \left(\frac{\rho v^2}{2}\right) \rightarrow f_r = \frac{2d \Delta P}{L \rho v^2} \quad (12)$$

شکل ۱۱ مقایسه نتایج تجربی ضریب اصطکاک آب و نانوسیال آلومینا در هر یک از دو لوله خمیده را با نتایج تئوری رابطه ایتو ارائه می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده خطای زیادی را از رابطه تئوری نشان نمی‌دهد. شکل ۱۲ نتایج تجربی ضریب اصطکاک نانوسیال و آب را در برابر نتایج تئوری نشان می‌دهد. خط میانی، خط انطباق کامل نتایج تئوری و تجربی است و انحراف از این خط به‌عنوان خطای آزمایش منظور شده است. حداکثر خطای ۲۸ درصد و حداقل ۹ درصد نسبت به نتایج تئوری توسط این نمودار گزارش شده است.

۶- نتیجه‌گیری

بهبود سیستم‌های انتقال حرارت در سال‌های اخیر مورد توجه محققان و بخش‌های صنعتی قرار گرفته است. استفاده از نانوسیال‌ها با خواص حرارتی مناسب و تغییر در ساختار فیزیکی از روش‌هایی هستند که به طور ویژه تحقیق‌هایی روی آنها در حال انجام است. در این تحقیق سعی شده تا به روش آزمایشگاهی انتقال حرارت نانوسیال آب - آلومینا ۰/۱ درصد حجمی در لوله‌های خمیده با نسبت انحنای ۰/۱۱۶، ۰/۰۷۴ و ۰/۰۴۲ با مساحت سطح خارجی و جنس یکسان با دمای دیواره ثابت مورد بررسی قرار گیرد. در

عدد دین	De
عدد ناسلت	Nu
علامت یونانی	
چگالی، kg/m^3	ρ
ضریب اصطکاک داریسی	f
درصد حجمی	ϕ
ویسکوزیته، N.s/m^2	μ
زیر نویس	
مؤثر	eff
نانوذره	np
نانوسیال	nf
دمای بالک	b
دیواره	W

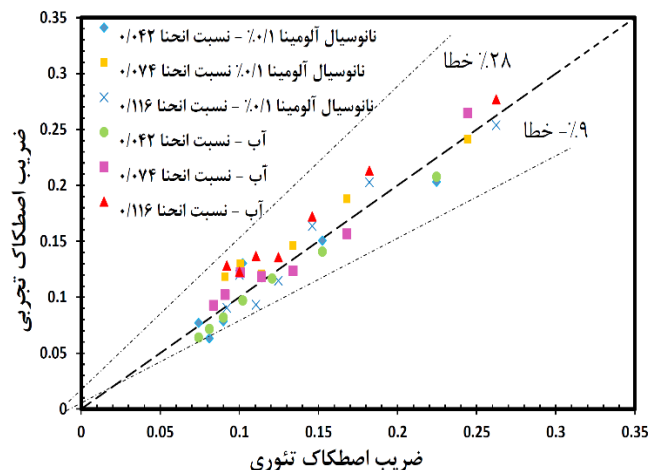


Fig. 12. Comparison of the friction coefficient error between theoretical and experimental values

شکل ۱۲: مقایسه خطای ضریب اصطکاک روابط تئوری و تجربی در لوله خمیده با نسبت انحنای متفاوت

سیال پایه و کاهش نسبت انحنای سبب افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت در لوله خمیده می‌شود. حرکات تصادفی، جابه‌جایی و برخورد ذرات نانو در لوله با نسبت انحنای کمتر و طول بیشتر منجر به تغییر پروفیل دمایی می‌شود. همچنین نفوذ و پراکندگی ذرات نانو در کنار دیواره منجر به افزایش سریع انتقال حرارت از دیواره به توده سیال می‌شود. ضمناً اثرات همزمان انتقال حرارت و افت فشار در سه نسبت انحنای متفاوت ارائه و مقایسه شده‌اند. تحقیق حاضر، از جمله اولین مقالات در خصوص بررسی تجربی نانوسیال و مقایسه انتقال حرارت جابه‌جایی بین سه لوله خمیده با نسبت انحنای متفاوت است و نوآوری این کار پژوهشی به حساب می‌آید.

فهرست علائم

A	سطح انتقال حرارت، m^2
C_p	ظرفیت ویژه حرارتی، J/kg.K
D	قطر لوله، m
r	شعاع لوله، m
\dot{m}	نرخ جرمی جریان، kg/s
q	شار حرارتی، W
T	دما، K
R	شعاع انحنای، m
U	سرعت، m/s
h	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، W/m.K
K	ضریب رسانش حرارتی، W/m.K
r/R	نسبت انحنای
Re	عدد رینولدز

- منابع**
- [1] C.E. Kalb, J. Seader, Fully developed viscous—flow heat transfer in curved circular tubes with uniform wall temperature, *AIChE Journal*, 20(2) (1974) 340-346.
 - [2] V. Kumar, P. Gupta, K. Nigam, Fluid flow and heat transfer in curved tubes with temperature-dependent properties, *Industrial & engineering chemistry research*, 46(10) (2007) 3226-3236.
 - [3] S. Mandal, S. Das, Pressure losses in bends during two-phase gas—Newtonian liquid flow, *Industrial & engineering chemistry research*, 40(10) (2001) 2340-2351.
 - [4] P. Naphon, S. Wongwises, A review of flow and heat transfer characteristics in curved tubes, *Renewable and sustainable energy reviews*, 10(5) (2006) 463-490.
 - [5] J. Prusa, L. Yao, Numerical solution for fully developed flow in heated curved tubes, *Journal of Fluid Mechanics*, 123 (1982) 503-522.
 - [6] F. Van de Vosse, A. Van Steenhoven, A. Segal, J. Janssen, A finite element analysis of the steady laminar entrance flow in a 90 curved tube, *International journal for numerical methods in fluids*, 9(3) (1989) 275-287.
 - [7] L.-S. Yao, S.A. Berger, Flow in heated curved pipes, *Journal of Fluid Mechanics*, 88(2) (1978) 339-354.
 - [8] S. Chol, J. Estman, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *ASME-Publications-Fed*, 231 (1995) 99-106.
 - [9] K. Anoop, T. Sundararajan, S.K. Das, Effect of particle size on the convective heat transfer in nanofluid in the

- [21] Y. Yang, Z.G. Zhang, E.A. Grulke, W.B. Anderson, G. Wu, Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(6) (2005) 1107-1116
- [22] A. Akbarinia, Impacts of nanofluid flow on skin friction factor and Nusselt number in curved tubes with constant mass flow, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29(1) (2008) 229-241.
- [23] S. Mirmasoumi, A. Behzadmehr, Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in a horizontal tube using two-phase mixture model, *Applied Thermal Engineering*, 28(7) (2008) 717-727.
- [24] M. Akbari, A. Behzadmehr, F. Shahraki, Fully developed mixed convection in horizontal and inclined tubes with uniform heat flux using nanofluid, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29(2) (2008) 545-556.
- [25] A. Akbarinia, A. Behzadmehr, Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in horizontal curved tubes, *Applied Thermal Engineering*, 27(8-9) (2007) 1327-1337.
- [26] Y. He, Y. Men, X. Liu, H. Lu, H. Chen, Y. Ding, Study on forced convective heat transfer of non-Newtonian nanofluids, *Journal of Thermal Science*, 18(1) (2009) 20-26.
- [27] S.E.B. Maiga, S.J. Palm, C.T. Nguyen, G. Roy, N. Galanis, Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows, *International journal of heat and fluid flow*, 26(4) (2005) 530-546.
- [28] S. Mirmasoumi, A. Behzadmehr, Effect of nanoparticles mean diameter on mixed convection heat transfer of a nanofluid in a horizontal tube, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29(2) (2008) 557-566.
- [29] A.K. Santra, S. Sen, N. Chakraborty, Study of heat transfer due to laminar flow of copper-water nanofluid through two isothermally heated parallel plates, *International Journal of Thermal Sciences*, 48(2) (2009) 391-400.
- [30] W.R. Hawthorne, Secondary circulation in fluid flow, *Proc. R. Soc. Lond. A*, 206(1086) (1951) 374-387.
- [31] P. Moulin, P. Manno, J. Rouch, C. Serra, M. Clifton, P. Aptel, Flux improvement by Dean vortices: ultrafiltration of colloidal suspensions and macromolecular solutions, *Journal of Membrane Science*, 156(1) (1999) 109-130.
- [32] J.H. Grindley, A. Gibson, On the frictional resistances to the flow of air through a pipe, *Proc. R. Soc. Lond. A*, 80(536) (1908) 114-139.
- [33] C. Kalb, J. Seader, Heat and mass transfer phenomena for viscous flow in curved circular tubes, *International journal of heat and mass transfer*, 52(9-10) (2009) 2189-2195.
- [10] H. Chen, W. Yang, Y. He, Y. Ding, L. Zhang, C. Tan, A.A. Lapkin, D.V. Bavykin, Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of titanate nanotubes (nanofluids), *Powder Technology*, 183(1) (2008) 63-72.
- [11] Y. Ding, H. Alias, D. Wen, R.A. Williams, Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(1-2) (2006) 240-250.
- [12] Y. He, Y. Jin, H. Chen, Y. Ding, D. Cang, H. Lu, Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe, *International journal of heat and mass transfer*, 50(11-12) (2007) 2272-2281.
- [13] S.Z. Heris, M.N. Esfahany, G. Etemad, Investigation of CuO/water nanofluid laminar convective heat transfer through a circular tube, *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 13(4) (2006).
- [14] S.Z. Heris, M.N. Esfahany, S.G. Etemad, Experimental investigation of convective heat transfer of Al₂O₃/water nanofluid in circular tube, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28(2) (2007) 203-210.
- [15] S.Z. Heris, S.G. Etemad, M.N. Esfahany, Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 33(4) (2006) 529-535.
- [16] K.S. Hwang, S.P. Jang, S.U. Choi, Flow and convective heat transfer characteristics of water-based Al₂O₃ nanofluids in fully developed laminar flow regime, *International journal of heat and mass transfer*, 52(1-2) (2009) 193-199.
- [17] W. Lai, S. Vinod, P. Phelan, R. Prasher, Convective heat transfer for water-based alumina nanofluids in a single 1.02-mm tube, *Journal of Heat Transfer*, 131(11) (2009) 112401.
- [18] Q. Li, Y. Xuan, Convective heat transfer and flow characteristics of Cu-water nanofluid, *Science in China Series E: Technological Science*, 45(4) (2002) 408-416.
- [19] U. Rea, T. McKrell, L.-w. Hu, J. Buongiorno, Laminar convective heat transfer and viscous pressure loss of alumina-water and zirconia-water nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(7-8) (2009) 2042-2048.
- [20] D. Wen, Y. Ding, Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions, *International journal of heat and mass transfer*, 47(24) (2004) 5181-5188.

- [41] X. Wang, X. Xu, S.U. S. Choi, Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture, *Journal of thermophysics and heat transfer*, 13(4) (1999) 474-480.
- [42] A. Einstein, *Investigations on the Theory of the Brownian Movement*, Courier Corporation, 1956.
- [43] B.C. Pak, Y.I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Experimental Heat Transfer an International Journal*, 11(2) (1998) 151-170.
- [44] Y. Xuan, W. Roetzel, Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, *International Journal of heat and Mass transfer*, 43(19) (2000) 3701-3707.
- [45] J. Maxwell, *Electricity and Magnetism*, v. 1, in, Oxford, Clarendon Press, 1892.
- [46] M. Nazari, M. Ashouri, M.H. Kayhani, A. Tamayol, Experimental study of convective heat transfer of a nanofluid through a pipe filled with metal foam, *International Journal of Thermal Sciences*, 88 (2015) 33-39.
- [47] S. Bell, *Measurement good practice guide no. 11 (issue 2), A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement*. National Physical Laboratory Teddington, Middlesex, United Kingdom, (2001).
- [48] R.J. Moffat, Describing the uncertainties in experimental results, *Experimental thermal and fluid science*, 1(1) (1988) 3-17.
- [49] M. Chandrasekar, S. Suresh, Experiments to explore the mechanisms of heat transfer in nanocrystalline alumina/water nanofluid under laminar and turbulent flow conditions, *Experimental Heat Transfer*, 24(3) (2011) 234-256.
- [50] H. Ito, Friction factors for turbulent flow in curved pipes, *Trans. ASME, J. Basic Engng*, D, 81 (1959) 123-134.
- Journal of Heat and Mass Transfer*, 15(4) (1972) 801-817.
- [34] A. Akbarinia, R. Laur, Investigating the diameter of solid particles effects on a laminar nanofluid flow in a curved tube using a two phase approach, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 30(4) (2009) 706-714.
- [35] E.E. Bajestan, H. Niazmand, M. Renksizbulut, Flow and heat transfer of nanofluids with temperature dependent properties, in: ASME 2010 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels collocated with 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting, *American Society of Mechanical Engineers*, 2010, pp. 733-739.
- [36] E. Ebrahimnia-Bajestan, H. Niazmand, Convective heat transfer of nanofluids flows through an isothermally heated curved pipe, *Iranian journal of chemical engineering*, 8(2) (2011) 81-97.
- [37] J. Choi, Y. Zhang, Numerical simulation of laminar forced convection heat transfer of Al₂O₃-water nanofluid in a pipe with return bend, *International Journal of Thermal Sciences*, 55 (2012) 90-102.
- [38] H. Aminfar, M. Mohammadpourfard, Y.N. Kahnamouei, Numerical study of magnetic field effects on the mixed convection of a magnetic nanofluid in a curved tube, *International Journal of Mechanical Sciences*, 78 (2014) 81-90.
- [39] M. Di Liberto, M. Ciofalo, A study of turbulent heat transfer in curved pipes by numerical simulation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 59 (2013) 112-125.
- [40] M. Ciofalo, A. Arini, M. Di Liberto, On the influence of gravitational and centrifugal buoyancy on laminar flow and heat transfer in curved pipes and coils, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 82 (2015) 123-134.

Please cite this article using:

S. Maleki-Delarestaghi, M. Nazari, A. Shakeri, Experimental Investigation of the Forced Convection Heat Transfer of Nanofluids in Curved Tubes, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(2) (2018) 347-358.
DOI: 10.22060/mej.2017.12450.5340

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



