



بررسی تجربی ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت، در نانوسیال آب/کربن

امیرحسین شیروی^{۱*}، مجتبی شفیعی^۲، حدیث بستانی^۱، محمد فیروززاده^۱، مریم بزرگمهریان^۱

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، ایران

^۲ دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۱-۲۸

بازنگری: ۱۳۹۸-۰۵-۱۰

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۶-۳۱

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۷-۲۹

کلمات کلیدی:

نانوسیال

انتقال حرارت

عدد ناسلت

افت فشار

خلاصه: یکی از مهمترین عوامل تاثیرگذار بر عملکرد یک سیال در فرایند انتقال حرارت، ضریب انتقال حرارت سیال می‌باشد. با توجه به بالاتر بودن ضریب انتقال حرارت رسانشی فلزات نسبت به مایعات، می‌توان با استفاده از ذرات جامد فلزی، میزان انتقال حرارت را افزایش داد. یکی از روش‌های جدید برای افزایش انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی، استفاده از نانوسیالات می‌باشد. در این مقاله پارامترهای اصلی تأثیر گذار بر افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی نانو سیال کربن نسبت به سیال پایه آب، از جمله دبی و غلظت نانو سیال را در محدوده رینولدز ۷۱۰۰ تا ۱۶۷۰۰ که حالت جریان آشفته درون لوله محسوب می‌شود، بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که افزایش رینولدز منجر به افزایش ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابجایی و کاهش ضریب اصطکاک می‌شود. همچنین نشان داده شد که در یک رینولدز ثابت، نانو سیال کربن توانسته است تا ۱۰/۱۷٪ ضریب انتقال حرارت جابجایی بیشتری نسبت به سیال پایه (آب) داشته باشد. مشخص شد که با افزودن نانوذرات به آب، در ابتدا شاهد افزایش در ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال هستیم. این افزایش تا غلظت حدود ۰/۲ درصد جرمی از نانوکربن ادامه داشته و پس از آن ضریب انتقال حرارت جابجایی، روندی کاهشی پیدا می‌کند. بعلاوه در این پژوهش، افت فشار ناشی از تغییرات رینولدز نیز بررسی شد و مشخص شد که رفتار این منحنی با دیاگرام مودی کاملاً در تطابق است.

۱- مقدمه

افزودن نانو ذرات به سیال پایه است، تا به کمک نانوسیالات مورد نظر، کارایی و انتقال حرارت سیستم افزایش یابد. به دلیل پتانسیل اثبات شده ی نانوذرات در افزایش مقدار انتقال حرارت، از آنها در بخش‌های مختلفی از جمله: پزشکی [۱]، کشاورزی [۲]، انرژی‌های نو [۳] و الکترونیک [۴] استفاده می‌شود.

تاکنون روابط زیادی جهت اندازه‌گیری مؤلفه‌های مختلف ترموفیزیکی نانوسیالات ارائه شده است که هر کدام در شرایط مربوط به خود قابل استفاده هستند. مؤلفه‌هایی از جمله: آنتروپی [۵] و [۶]، عدد ناسلت [۷] و [۸]، افت فشار [۷] و [۹] و رسانش حرارتی [۱۰] و [۱۱] که توسط محققین مورد دسته بندی قرار گرفته‌اند.

به دلیل پتانسیل اثبات شده ی نانو ذرات در افزایش انتقال حرارت

تجهیزات عامل انتقال حرارت از جمله مهمترین بخش‌های بسیاری از صنایع محسوب می‌شوند. صنایع مرتبط با تولید انرژی، صنعت نفت و گاز، نیروگاه‌های حرارتی، فراوری فلزات، صنایع مرتبط با مواد غذایی و داروسازی، همه به تجهیزات انتقال حرارت نیازمند هستند. تجهیزات عامل انتقال حرارت در صنعت شامل هیترها، بویلرها، مبدل‌های حرارتی، کندانسورها، کوره‌ها و اواپراتورها هستند. از بین موارد ذکر شده مبدل‌های حرارتی کاربرد گسترده‌تری در این زمینه دارند. یکی از بهترین روش‌هایی که برای افزایش انتقال حرارت در تجهیزات صنعتی، به خصوص مبدل‌های حرارتی انجام می‌شود،

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ahshiravi@jsu.ac.ir



مقطر و در محدوده رینولدز ۳۰۰۰ تا ۱۸۰۰۰ به عنوان سیال پایه استفاده کردند. نتایج نشان داد که در رینولدز یکسان، ضریب انتقال حرارت نانوسیالات ذکر شده بین ۸٪ تا ۵۱٪ نسبت به آب مقطر بیشتر شده است. بیشترین افزایش مربوط به نانو اکسید آلومینیوم، پس از آن اکسید روی و سپس اکسید تیتانیوم بوده است. فتوکاتالیز و نصر اصفهانی [۱۹] نیز برای جریان آشفته با عدد رینولدز ۶۰۰۰ تا ۳۱۰۰۰، از نانوذرات اکسید مس با غلظت حجمی حدود ۰/۳ درصد در سیال پایه آب استفاده کرده و افزایش ۲۵ درصدی را در انتقال حرارت گزارش کردند. کسائیان و نصیری [۲۰] بر اثرات ویسکوزیته بر رسانش حرارتی در نانوسیال تیتانیوم اکساید در آب پرداختند.

سلوام و همکاران [۲۱] بر تأثیر دمای ورودی مبدل حرارتی در ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوذرات گرافن در ترکیب آب و اتیلن گلیکول پرداختند و نشان دادند که هر چقدر دمای سیال ورودی مبدل حرارتی بیشتر باشد، مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی و به تبع آن عدد ناسلت، بیش تر خواهد بود. به علاوه، آنها افزایش حدود ۱۷۰ درصدی در ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال ۰/۵ درصد حجمی گرافن را در جریان آشفته نشان دادند.

مایگا و همکاران [۲۲] مشخصات هیدروپنایمیکی و حرارتی نانوسیالها را که از طریق لوله ی گرم در هر دو نوع جریان آشفته و آرام می گذرند، با استفاده از مدل تک فاز و خواص تنظیم شده مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که اضافه کردن نانوذرات می تواند انتقال حرارت را به میزان قابل توجهی نسبت به سیال پایه افزایش دهد. همچنین دریافتند افزایش انتقال حرارت در نانوسیال اکسید آلومینیوم در اتیلن گلیکول نسبت به اکسید آلومینیوم در آب بیشتر است. افزایش انتقال حرارت در نانو سیال گرافن در سیال پایه آب، در مبدل حرارتی پوسته لوله، توسط گوزتلو و همکاران [۲۳] انجام شد. آنها آزمایش خود را در جریان آرام انجام دادند و نشان دادند که افزودن فقط ۰/۱ درصد جرمی گرافن در آب، می تواند ضریب انتقال حرارت جابجایی آن را نسبت به آب خالص تا ۳۵/۶ درصد افزایش دهد. گوزتلو و همکاران [۲۴] در آزمایشی دیگر که با سیال پایه اتیلن گلیکول و در جریان آشفته انجام شده بود، نشان دادند که افزودن همان ۰/۱ درصد جرمی از گرافن، ضریب انتقال حرارت جابجایی نانو سیال حاصل را بیش از ۴۲٪ افزایش داده است.

رابطه ی جدیدی توسط مایگا و همکاران [۲۵] برای توصیف

سیال پایه، تحقیقات گسترده ای در زمینه بررسی انتقال حرارت در نانوسیالات در حال انجام است. در آزمایشی که توسط جانگ و همکاران [۱۲] انجام شد، از اکسید آلومینیوم در آب به عنوان نانوسیال استفاده شد. این نانوسیال در میکروکانالی با مقطع مستطیلی و تحت جریان آرام مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که ضریب انتقال حرارت جابجایی تا ۳۲٪ افزایش می یابد. ون و دینگ [۱۳]، به بررسی انتقال حرارت جریان آرام در ناحیه ورودی لوله پرداختند. نتایج نشان داد، نانوسیال شامل ۱/۶٪ حجمی آلومینیوم در آب، حدود ۴۱٪ افزایش ضریب انتقال حرارت را در ناحیه ی ورودی لوله نسبت به آب دارد. داس و همکاران [۱۴] به بررسی رابطه ی دما با افزایش هدایت حرارتی پرداختند. آنها در محدوده ی دمایی ۲۱ تا ۵۱ درجه سانتیگراد، بین ۲ تا ۳ برابر افزایش انتقال حرارت را مشاهده کردند. پریانی و رضانی [۱۵]، مطالعه ای تجربی بر مؤلفه های حرارتی اکسید تیتانیوم در آب داشتند. آنها آزمایش خود را در محدوده ی رینولدز ۱۱۰۰۰ تا ۲۱۰۰۰ انجام دادند و نتایج کار خود را با معادلات موجود برای محاسبه ناسلت که بر حسب رینولدز و پرانتل هستند، مقایسه کردند. در تحقیق مذکور، غلظت های مختلفی از تیتانیوم اکساید در آب آزمایش شد و نشان داده شد که بیشترین افزایش در ناسلت، برای غلظت حجمی ۰/۲٪ و به میزان ۴۹٪ درصد اتفاق خواهد افتاد. یو و همکاران [۱۶] ضریب انتقال حرارت جابجایی را برای نانو اکسید روی در اتیلن گلیکول با غلظت ۵٪ حجمی اندازه گیری کردند. آنها افزایش ۲۶/۵٪ را در ضریب انتقال حرارت جابجایی برای حالتی که از نانو روی استفاده شده بود نسبت به حالت پایه گزارش کردند. ژوان و لی [۱۷]، جریان و انتقال حرارت نانوسیال مس با سیال پایه آب را در یک لوله مستقیم با شار حرارتی ثابت در دیواره را به صورت تجربی بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود که انتقال حرارت در نانو سیال به میزان قابل توجهی بیشتر از آب است. آنها همچنین ادعا کردند ضریب اصطکاک برای نانوسیال در کسر حجمی کم، در افزایش توان پمپاژ تأثیری ندارد. خورانا و همکاران [۱۷]، مروری بر تحقیقات انجام شده بر سه نانو سیال اکسید مس، اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم پرداختند. در آن مقاله، فرمول های تحلیلی ارائه شده برای محاسبه ناسلت به همراه شرایط استفاده از آنها به طور کامل و مفصل ارائه شد.

حقیقی و همکاران [۱۸]، سه نانو ذره مختلف با غلظت جرمی یکسان شامل: اکسید آلومینیوم، اکسید روی و اکسید تیتانیوم در آب

می‌کنند. دلایل مختلفی از جمله پیچیدگی انجام عملی بسیاری از آزمایش‌ها، زمان بر بودن انجام برخی آزمایش‌ها، چالش‌های اقتصادی پیش روی بسیاری از تست‌های عملی موجب شده تا محققین به استفاده از نرم افزارهای کامپیوتری جهت شبیه سازی و یا پیش بینی رفتار آزمایش خود بپردازند. یکی از این تکنیک‌ها، طراحی آزمایش^۲ است که در دهه‌های ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰ به عنوان یک مزیت رقابتی در کشورهای غربی و ژاپن مطرح شد. استفاده صحیح از روش‌های آماری طراحی آزمایش، می‌تواند باعث سهولت در مراحل طراحی و تولید محصولات جدید و بهبود محصولات موجود گردد. نرم افزار دیزاین اکسپرت^۳ یکی از نرم افزارهای معروف در این حوزه است. این نرم افزار از طریق روش‌های آماری و تکنیک‌هایی از قبیل درون یابی و برون یابی، می‌تواند به محققان درک بهتری راجع به چگونگی تأثیر ورودی‌ها بر خروجی‌ها بدهد. در این پژوهش نیز به منظور کاهش تعداد آزمایش‌ها، از نرم افزار دیزاین اکسپرت نسخه ۱۰ استفاده شده است و نمودارهای بخش نتایج، توسط این نرم افزار ترسیم شده‌اند. یکی از مزیت‌های اصلی استفاده از این نرم افزار در این پژوهش این است که می‌توان با حداقل تعداد آزمایش‌ها حالت بهینه را بیابیم. در این آزمایش، حالت بهینه برای ما، وضعیتی است که بیشترین مقدار انتقال حرارت در آن رخ دهد. به علاوه اینکه رابطه‌ای ریاضی از رفتار تغییرات ناسلت بر حسب رینولدز و غلظت نانوسیال از این نرم افزار استخراج می‌شود.

۲-۲- فرمولاسیون و مبانی نظری

استفاده از اعداد بی بعد یکی از روش‌های متداول برای بیان رفتار حرارتی یک سیال است. در این تحقیق نیز تغییرات عدد ناسلت که نشان دهنده ی نسبت مقاومت انتقال حرارت رسانش به جابجایی می‌باشد، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

محققین زیادی به ارائه فرمول‌هایی برای محاسبه ناسلت در جریان آشفتگی درون لوله پرداخته‌اند. به عنوان مثال، ژوان و لی [۱۷] انتقال حرارت را برای سیال تک فاز در جریان آشفتگی مطالعه کردند و رابطه ی (۱) را برای محاسبه ناسلت معرفی نمودند:

$$Nu_{nf} = \frac{h_{nf} d}{K_{nf}} = 0.0059 (1.0 + 7.6286 \phi^{0.6886} Pe_{nf}^{0.001}) Re_{nf}^{0.9238} Pr_{nf}^{0.4} \quad (1)$$

عملکرد نانوسیال اکسید آلومینیوم در آب در جریان آشفتگی مطرح شد. در این پژوهش از روش حجم کنترل برای حل معادلات غیرخطی حاکم استفاده شد. نتایج عددی نشان دهنده ی آن است که ورود نانوذرات به آب، افزایش ضریب انتقال حرارت را به همراه دارد و با افزایش غلظت نانوذره ی مورد نظر ضریب انتقال حرارت افزایش چشم گیری داشته است. بهزاد مهر و همکاران [۲۶] مدل مخلوط دو فاز ی و جریان آشفتگی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها در تحقیقات خود از نانو ذرات مس با درصد حجمی ۱٪ درون آب استفاده کردند. جریان داخل لوله ی گرم از نظر عددی بررسی شد. در نهایت، نتایج نشان دهنده ی افزایش ۱۵ درصدی عدد ناسلت در نانوسیال نسبت به آب بوده است.

با توجه به مطالب گفته شده، هدف اصلی در این تحقیق، بررسی تأثیر نانو ذرات کربن در انتقال حرارت است. تاکنون اثر موادی از قبیل: گرافن، نانولوله‌های کربنی و فلورن، که هر سه بر پایه کربن هستند و آلوتروپ‌های کربن محسوب می‌شوند، در انتقال حرارت مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. ولی خود کربن تا کنون مورد بحث محققین نبوده است. نانوذرات، غالباً دارای قیمت بالایی هستند و همین امر، عاملی محدود کننده در توجیه پذیری اقتصادی بسیاری از تحقیقات و یا حتی تجاری سازی ایده‌های مرتبط با علم نانو محسوب می‌شود. نانو کربن بلک^۱، با اختلاف بسیار زیاد، ارزان‌ترین نانو ذره موجود است که همین امر مزیت ویژه‌ای برای یک نانو ذره محسوب می‌شود. با مطالعه ی پژوهش‌های انجام شده راجع به انتقال حرارت در نانو سیالات، مشاهده شد که تأثیر نانوکربن به عنوان ماده‌ای ارزان و در دسترس، در انتقال حرارت، هنوز مورد بررسی قرار نگرفته است. با توجه به تحقیقاتی که راجع به نانولوله‌های کربنی و گرافن در انتقال حرارت انجام شده و همه نشان دهنده ی افزایش چشمگیر ضریب انتقال حرارت نانو سیال حاوی این ذرات نسبت به سیال پایه بوده‌اند، انتظار می‌رود که نانوسیال کربن نیز بتواند نسبت به سیال پایه افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی بالایی داشته باشد. در این مقاله، محدوده عدد رینولدز در بازه ۷۱۰۰ تا ۱۶۷۰۰ بوده که کاملاً در ناحیه آشفتگی قرار دارد.

۲- تئوری آزمایش

۲-۱- شرح نرم افزار

امروزه علوم رایانه‌ای نقش بسزایی را در علوم مهندسی ایفا

2 Design of Experiment
3 Design Expert

1 Carbon black

که در آن C_p ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال (J/kg K) و مقادیر T_{in} و T_{out} نیز به ترتیب دمای سیال خروجی از مبدل و دمای ورودی به مبدل حرارتی می‌باشند. هرچقدر مقادیر عددی q_1 و q_2 نزدیک‌تر باشند، نشان دهنده ی آن است که دقت دستگاه آزمایش بالاتر است. در اینجا، اختلاف میان این دو حدود ۶/۴٪ بوده است که این اختلاف اندک نشان دهنده ی کالیبره بودن دستگاه می‌باشد. با توجه به موارد و روابط ذکر شده، می‌توان شار حرارتی (q'') را بر حسب W/m^2 برای این سیستم را از طریق رابطه (۸) بدست آورد:

$$q'' = \frac{\bar{q}}{\pi D_{out} L} \quad (8)$$

که D_{out} قطر خارجی لوله مبدل حرارتی بر حسب متر و L نیز طول مبدل حرارتی است که در دستگاه مورد استفاده، این طول برابر با ۶ متر می‌باشد. با توجه به موارد ذکر شده، ضریب انتقال حرارت جابجایی را می‌توان از طریق رابطه (۹) بدست آورد:

$$h = \frac{q''}{T_w - T_f} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، T_w دمای جداره خارجی لوله ی مبدل حرارتی است و T_f نیز میانگین دمای ورودی به مبدل و خروجی از آن می‌باشند. در نهایت، ضریب انتقال حرارت جابجایی در رابطه (۱۰) که فرمول محاسبه ناسلت است، وارد خواهد شد.

$$\overline{Nu} = \frac{h D_{in}}{k} \quad (10)$$

در این پژوهش، علاوه بر انتقال حرارت، به اندازه‌گیری افت فشار ناشی از تغییرات رینولدز نیز خواهیم پرداخت. بدین منظور از معادله داریسی که به صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود استفاده می‌کنیم:

$$f = \frac{\Delta P}{\left(\frac{L}{D_{in}}\right) \left(\frac{\rho u^2}{2}\right)} \quad (11)$$

که در آن ΔP افت فشار نانو سیال از ورود تا خروج مبدل حرارتی می‌باشد.

که در آن ϕ نشان دهنده ی غلظت نانوسیال و Pr ، Re ، Pe به ترتیب اعداد بی بعد پکلت، رینولدز و پرائتل هستند که از روابط (۲) تا (۴) محاسبه می‌شوند.

$$Pe_{nf} = \frac{u_m d}{\alpha_{nf}} \quad (2)$$

$$Re_{nf} = \frac{u_m d}{\nu_{nf}} \quad (3)$$

$$Pr_{nf} = \frac{\nu_{nf}}{\alpha_{nf}} \quad (4)$$

در این مقاله، از روش دیگری نسبت به محاسبه ناسلت بهره گیری شده است. بدین صورت که ابتدا ضریب انتقال حرارت جابجایی (h) به کمک شار حرارتی محاسبه شده و سپس مقدار آن در فرمول ناسلت جایگذاری می‌شود.

با توجه به توضیحات فوق، دبی جرمی نانو سیال کرین (\dot{m}) بر حسب gr/s ، و همینطور سرعت متوسط آن (u_m) بر حسب m/s ، به ترتیب از طریق روابط (۵) و (۶) قابل محاسبه هستند:

$$\dot{m} = \rho \dot{Q} \quad (5)$$

$$u_m = \frac{\dot{Q}}{(\pi D_{in}^2 / 4)} \quad (6)$$

که در آنها ρ چگالی (gr/cm^3)، \dot{Q} بی حجمی (cm^3/s) و D_{in} قطر داخلی لوله ی مبدل حرارتی بر حسب m است. برای ادامه ی محاسبات، به تعریف پارامتری به نام \bar{q} یاز داریم و آن را به صورت زیر تعریف می‌کنیم [۲۳]:

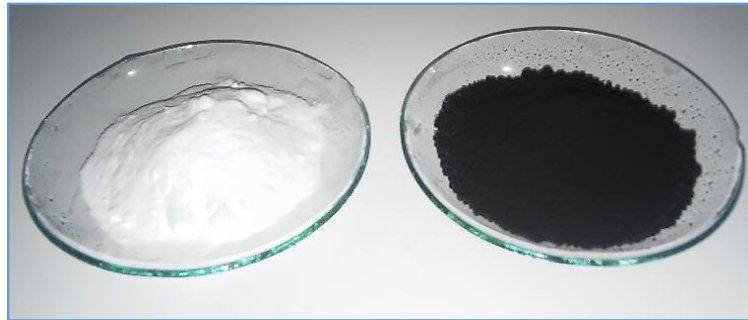
$$\bar{q} = \frac{q_1 + q_2}{2} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، $q_1 = V.I$ است که در واقع توان الکتریکی مبدل حرارتی (المنت) محسوب می‌شود و در آن، V ولتاژ برق هیتر بر حسب ولت و I شدت جریان برق مصرفی آن بر حسب آمپر است. مقدار $q_2 = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in})$ نیز میزان حرارت مبادله شده را در مبدل حرارتی (ظرفیت حرارتی) را نشان می‌دهد

جدول ۱. مشخصات شیمیایی مواد مورد استفاده

Table 1. Chemical properties of used materials

رنگ	رسانش حرارتی (W/mK)	فرمول شیمیایی	چگالی (kg/m ^۳)	ماده
سیاه	۱۶۸	C	۲۰۵۰	کربن
سفید	۰/۵۸	NaC _{۱۲} H _{۲۵} SO _۴	۱۰۱۰	سدیم دودسیل سولفات



شکل ۱. تصویری از نانو کربن و سدیم دودسیل سولفات مورد استفاده در این پژوهش
Fig. 1. An image of used nano-carbon and SDS

۳ شرح عملی آزمایش

۳-۱- آماده سازی نانو سیال

در این پژوهش، غلظت‌های مختلفی از نانو کربن در آب، شامل ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و درصد جرمی مورد بررسی واقع شده‌اند. با توجه به مشاهدات انجام شده، مشخص شد که نانو کربن در آب دارای پایداری زیادی نیست و پس از مدت زمان کوتاهی ته نشین می‌شود. به همین منظور باید از یک سورفکتانت جهت جلوگیری از ته نشینی سریع نانوذرات استفاده کرد. سورفکتانت‌ها ترکیباتی آلی هستند که در آب و حلال‌های دیگر حل شده و منجر به کاهش پدیده کشش سطحی می‌گردند. این مواد به وسیله گروه‌های باردار به ۴ گروه سورفکتانت آنیونی (دارای بار منفی)، کاتیونی (دارای بار مثبت)، غیر یونی (بدون بار) و آمفوتریک (دارای بار در مجموع خنثی) تقسیم‌بندی می‌شوند و در مواردی مانند شوینده‌ها، انعقادسازها، امولسیون‌کننده‌ها، جوهرسازی، کف ساز و پلیمرها استفاده می‌گردند. در این پژوهش از سدیم دودسیل سولفات^۱ که یک سولفات آنیونی می‌باشد، استفاده شده است. این ماده موجب می‌شود تا نانو کربن در آب بتواند پایداری خود را حفظ کرده و ته نشینی چشم گیری نداشته باشد. مشخصات شیمیایی و فیزیکی این دو ماده در جدول ۱ ذکر شده‌اند.

شکل ۱ تصویری از کربن و سدیم دودسیل سولفات و شکل ۲ نشان دهنده ی نتیجه آزمون میکروسکوپ الکترونی عبوری^۲ برای نانو کربن است. به علاوه، جدول ۲ مقادیر پی اچ^۳ و رسانش الکتریکی را برای غلظت‌های مختلف نانوسیال کربن نشان می‌دهد.

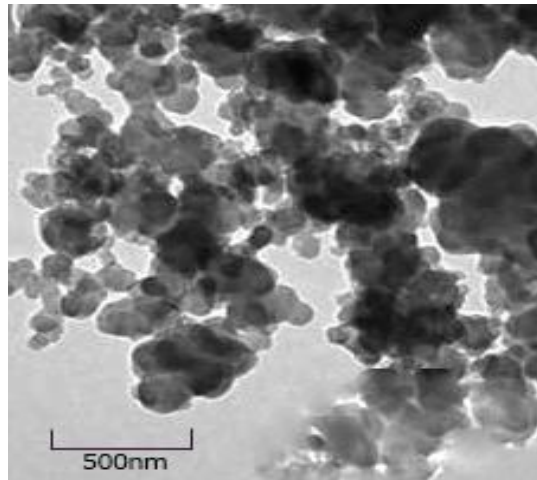
پس از ترکیب نانو کربن و سدیم دودسیل سولفات به نسبت یک به یک در آب، نانو سیال حاصل را برای مدت زمان حدود ۳۰ دقیقه در همزن آزمایشگاهی قرار داده و پس از این مرحله و به منظور ایجاد پایداری بیش‌تر در این نانوسیال، آن را به مدت ۳۰ دقیقه در دستگاه اولتراسونیک تحت فرکانس ۲۰ هرتز قرار می‌دهیم. دستگاه اولتراسونیک با ساطع کردن امواج فراصوتی به درون سیال موجب می‌شود تا نانو ذرات و سورفکتانت، به خوبی در آب پخش شده و شاهد پایداری بهتری باشیم.

شکل ۳ تفاوت در ته نشینی نانوسیال با سورفکتانت و بدون سورفکتانت را نشان می‌دهد. نانوسیال بدون سورفکتانت پس از گذشت مدت زمان حدود ۶ ساعت به طور کامل ته نشین شده است در حالیکه نانوسیال حاوی سدیم دودسیل سولفات به عنوان سورفکتانت حتی پس از ۱۰ روز پایداری خود را حفظ کرده بود و ته نشینی در آن مشاهده نشد.

2 Transmission Electron Microscopy (TEM)

3 PH

1 Sodium Dodecyl Sulfate (SDS)



شکل ۲. آزمون میکروسکوپ الکترونی عبوری برای نانو کربن
Fig. 2. TEM test of nano carbon

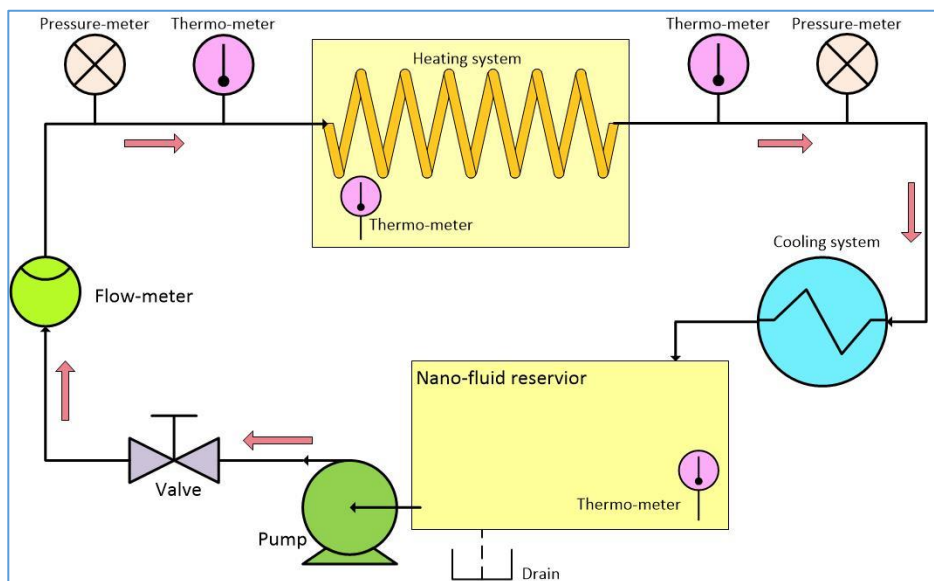
جدول ۲. هدایت الکتریکی و پی-اچ برای غلظت‌های مختلف نانوسیال تحت آزمایش

Table 2. Thermal conductivity and pH for different concentrations of the nanofluid

رسانش الکتریکی ($\frac{\mu S}{cm}$)	PH	
۵۷۷	۷/۱۰	آب خالص
۷۱۴	۷/۶۳	۰/۱ درصد جرمی
۸۲۰	۷/۶۷	۰/۲ درصد جرمی
۹۳۹	۷/۷۳	۰/۳ درصد جرمی
۱۱۵۰	۷/۸۲	۰/۴ درصد جرمی



شکل ۳. نانو سیال کربن در دو حالت (الف) با سورفکتانت (ب) بدون سورفکتانت
Fig. 3. Carbon nanofluid (a) with surfactant (b) without surfactant



شکل ۴. شماتیک دستگاه مورد استفاده

Fig. 4. An scheme of the experimental set up

جدول ۳. مشخصات سنسورهای مورد استفاده در دستگاه آزمایش

Table 3. Characteristics of the used sensors

سنسور	تعداد	مدل	حداقل محدوده	حداکثر محدوده	دقت
دما	۳	One wire DS-18B20	-۵۵ °C	۱۲۵ °C	۰/۵ °C
دما	۱	Type K	-۵۸ °C	۱۸۳۲ °C	۰/۱ °C
فشار	۲	Hogller	۰ bar	۴ bar	٪ ۰/۵
دبی	۱	YF-S۲۰۱	۱ لیتر/دقیقه	۳۰	٪ ۱۰

۳-۲- شرح دستگاه آزمایش

لوله مبدل حرارتی در تماس است و دمای لحظه‌ای آن را ثبت می‌کند. جهت بررسی افت فشار نیز از دو فشارسنج الکتریکی که در ورودی و خروجی هیتر قرار دارند، استفاده شده است. شکل ۴ شماتیکی از دستگاه تحت آزمایش و همینطور محل دقیق سنسورها را به تصویر کشیده است. به علاوه مشخصات سنسورهای به کار رفته در این دستگاه در جدول ۳ ذکر شده‌اند.

بیشینه ظرفیت مخزن این دستگاه ۲۵ لیتر است. سیال درون مخزن، توسط یک عدد پمپ با توان ۱ اسب بخار در مجموعه به گردش در می‌آید. دبی این پمپ متغیر است و می‌تواند دبی‌های مختلفی در محدوده ۱ الی ۸ لیتر بر دقیقه ایجاد کند. در بخش گرمایش، از یک عدد المنت الکتریکی با توان ۱۵۰۰ وات استفاده شده است. حرارت

به منظور بررسی خواص حرارتی نانو سیالات مختلف، دستگاه اندازه‌گیری خواص نانوسیالات در دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول طراحی و ساخته شد. این دستگاه قادر است تا کلیه ی آزمایش‌های مرتبط با انتقال حرارت و افت فشار را برای سیالات مختلف مورد ارزیابی قرار دهد. تغییرات دمایی سیال مورد آزمایش توسط ۴ عدد حسگر دمایی ثبت خواهد شد. سنسورهای به کار رفته، دارای دقت ۰/۵ درجه سانتی گراد بوده و توانایی اندازه‌گیری محدوده دمایی ۱۲۵+ تا -۵۵- درجه سانتی گراد را دارا هستند. دو سنسور، دمای سیال را در ورودی و خروجی هیتر اندازه‌گیری می‌کنند. سنسور سوم درون مخزن تعبیه شده است و چهارمین سنسور نیز با جدار خارجی

۴- بحث و نتایج

در این بخش به تشریح رفتار غلظت‌های مختلف نانو سیال کربن، در رینولدزهای متفاوت پرداخته‌ایم. عدد ناسلت، ضریب انتقال حرارت جابجایی و همینطور ضریب اصطکاک در این قسمت مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند. در تمامی بخش‌ها، نمودارها در محدوده رینولدز ۷۱۰۰ تا ۱۶۷۰۰ و توسط نرم افزار دیزاین اکسپرت ترسیم شده‌اند. در پایان نیز به منظور نشان دادن پتانسیل مناسب نرم افزار مذکور در پیش بینی آزمایش‌های نانوسیالات، نمودارهایی از مقایسه ی نتایج تجربی و نتایج پیش بینی شده توسط نرم افزار ترسیم شده‌اند و درصد اختلاف بین این نتایج محاسبه شده است.

۴-۱- تغییرات ناسلت

شکل ۵ تغییرات ناسلت را بر حسب غلظت نانو کربن و رینولدز به صورت دو بعدی و سه بعدی نشان می‌دهد. با افزایش رینولدز و به طور همزمان با افزایش غلظت نانو کربن از صفر تا حدود ۰/۲ درصد جرمی، شاهد افزایش در ناسلت هستیم و پس از آن ناسلت کاهش یافته است. کمترین مقدار ناسلت را در رینولدز حدود ۷۱۰۰ با غلظت‌های صفر و ۰/۴ درصد جرمی شاهد بوده‌ایم. همچنین نرم افزار، بیشترین مقدار ناسلت را ۲/۴۷۸ و در رینولدز ۱۴۸۵۰ و غلظت ۰/۲۲ درصد جرمی نانو کربن پیش بینی کرده است. در مقالات دیگری نیز این رفتار غیر یکنواخت نانوسیالات در انتقال حرارت نشان داده شده است. پریانی و رضانی [۱۵] نیز حد بهینه ی غلظت نانو اکسید تیتانیوم در آب را پیدا کردند و نشان دادند که افزودن نانو ذرات به سیال پایه، تا غلظتی خاص می‌تواند موجب بهبود مؤلفه‌های حرارتی در سیال پایه شود و پس از آن حد، با کاهش در مؤلفه‌های حرارتی مواجه خواهیم شد.

۴-۲- تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی

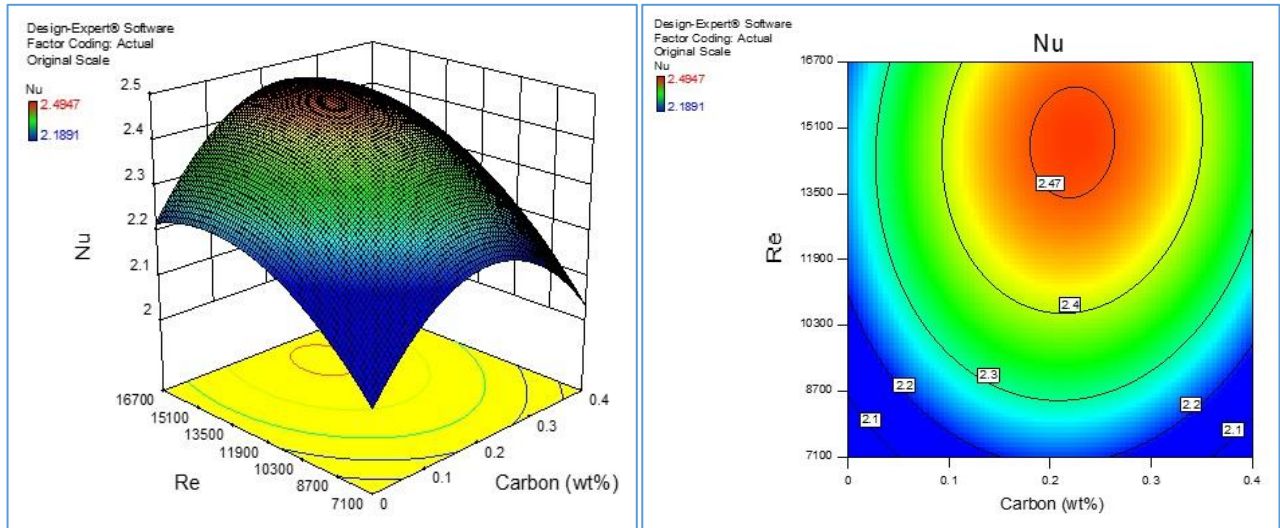
شکل ۶ تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی را بر حسب غلظت نانو کربن و رینولدز به صورت دو بعدی و سه بعدی نشان می‌دهد. با مقایسه ی این شکل و شکل ۵، می‌توان دریافت که ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابجایی دارای رفتاری مشابه هستند. در اینجا نیز ضریب انتقال حرارت جابجایی با افزایش رینولدز و به طور همزمان با افزایش غلظت نانو کربن از صفر تا حدود ۰/۲ درصد جرمی، در حال افزایش

تولید شده توسط این المنت به یک عدد لوله مسی $\frac{3}{8}$ اینچی که به صورت مارپیچ درآمده است منتقل می‌شود. لوله مذکور دارای ۶ متر طول بوده و به صورت مارپیچ به ۲۰ حلقه تقسیم شده است. در واقع، مبدل حرارتی مورد استفاده در این آزمایش مبدلی با لوله مارپیچ است و این نوع مبدل در تحقیقات مرتبط با انتقال حرارت در نانوسیالات به ندرت مورد آزمایش قرار گرفته است و بیشتر مقالات ارائه شده در این خصوص به صورت نرم افزاری بوده‌اند.

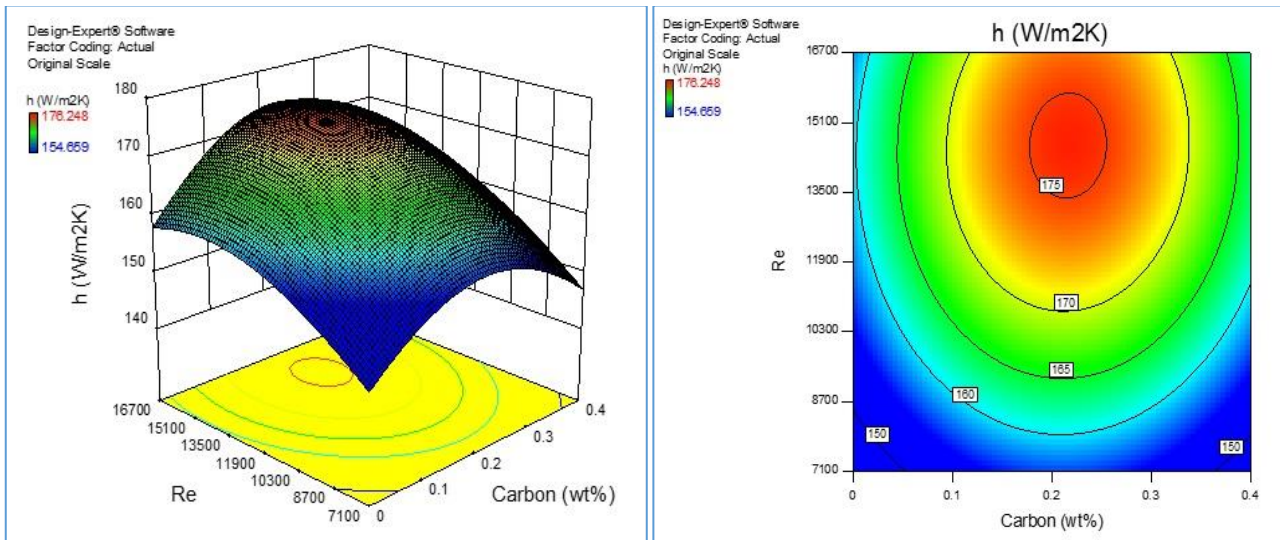
۳-۳- شرح آزمایش

نانوسیال آماده شده را درون مخزن دستگاہ ریخته و پس از فعال سازی سیستم‌های سرمایش و گرمایش، پمپ را با دبی مورد نظر روشن می‌کنیم. همانطور که گفته شد، پمپ مورد استفاده دارای ۱ اسب بخار قدرت بوده و قادر است تا محدوده دبی ۱ الی ۸ لیتر بر دقیقه را ایجاد کند. در این آزمایش، محدوده دبی مورد نظر ۳ الی ۷ لیتر بر دقیقه است. هر آزمایش تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که اختلاف دمای نشان داده شده بر روی صفحه نمایشگر دستگاہ، به مقداری ثابت و پایا برسد. آزمایش‌های مختلف، در زمان‌های متفاوتی به حالت پایا می‌رسند ولی به طور کلی این مدت زمان برای همه ی آزمایش‌های انجام شده بین ۸ تا ۱۳ دقیقه بوده است.

با توجه به استفاده از نرم افزار دیزاین اکسپرت، به طور کلی تعداد ۱۱ آزمایش انجام می‌شود و دیگر حالات توسط این نرم‌افزار و با روش‌های آماری پیش بینی خواهند شد. این نرم افزار برای تقریب زدن نتایج از روش‌هایی مثل: درون‌یابی، برون‌یابی و نظریه اغتشاش بهره می‌گیرد. روال کار در دیزاین اکسپرت این است که کاربر تعداد متغیرهای ورودی و خروجی آزمایش خود را تعیین می‌کند. سپس نرم افزار تعدادی آزمایش برای کاربر تعیین می‌کند. محقق، فقط با انجام دادن آن آزمایش‌ها و وارد کردن داده‌های خروجی آنها در نرم افزار، می‌تواند به کل اطلاعات آزمایش در آن محدوده از متغیرها دست یابد. به منظور افزایش دقت و نشان دادن صحت داده برداری‌ها، هر حالت، ۲ بار تکرار شد و پس از مقایسه مشخص شد که اختلاف میان داده‌گیری‌ها، بین ۲/۲٪ تا ۵/۹٪ بوده است.



شکل ۵. تغییرات ناسلت نسبت به رینولدز و غلظت نانو سیال کربن
 Fig. 5. The variation of Nu versus both Re and nanofluid concentration



شکل ۶. تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی نسبت به رینولدز و غلظت نانو سیال کربن
 Fig. 6. The variation of CHTC versus both Re and nanofluid concentration

کاهش ضریب اصطکاک منجر می‌گردد به همین دلیل در پایین‌ترین رینولدز، بالاترین ضریب اصطکاک دیده می‌شود. این منحنی، کاملاً با رفتار ارائه شده در نمودار مودی در تطابق است. با مقایسه مقادیر عددی برای ضریب اصطکاک، اختلاف حدود ۲۵/۳ درصدی بین کمترین و بیشترین رینولدز ملاحظه می‌شود.

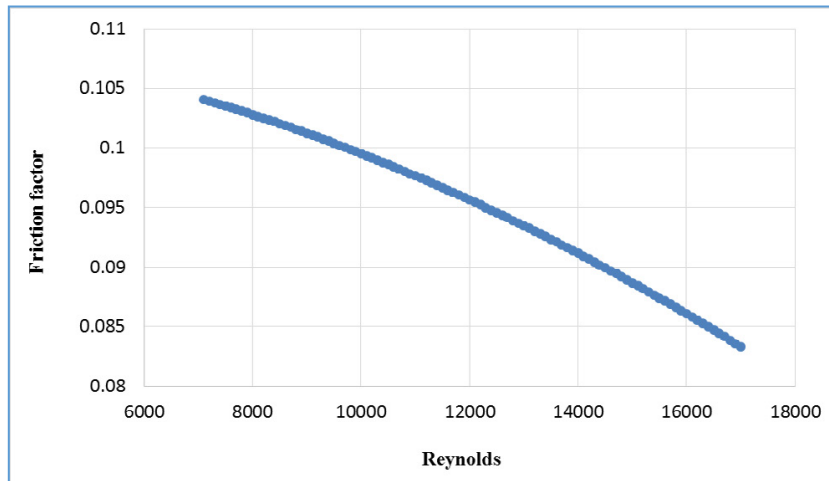
۴-۴- اختلاف بین نتایج تجربی و نرم افزاری

در شکل ۸، اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی شده توسط نرم افزار دیزاین اکسپرت به تصویر کشیده شده است.

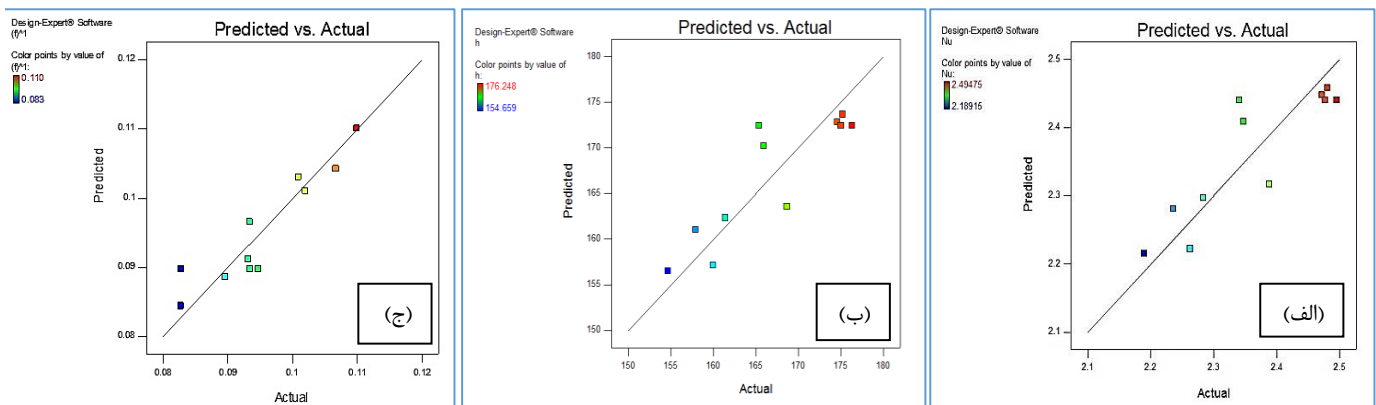
و پس از آن کاهش یافته است. بیش‌ترین مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی $175/7 \text{ W/m}^2\text{K}$ بوده که مربوط به رینولدز ۱۴۸۵۰ و غلظت ۰/۲۲ درصد جرمی کربن می‌باشد. همچنین نشان داده شد که در یک رینولدز ثابت، نانو سیال کربن توانسته است تا ۱۰/۱۷٪ ضریب انتقال حرارت جابجایی بیشتری نسبت به سیال پایه (آب) داشته باشد.

۴-۳- تغییرات ضریب اصطکاک

رابطه‌ی تغییرات ضریب اصطکاک با تغییرات رینولدز در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش رینولدز به



شکل ۷. رابطه‌ی تغییرات ضریب اصطکاک با رینولدز
Fig. 7. The variation of friction factor versus Re



شکل ۸. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نرم افزاری برای حالات (الف) ناسلت (ب) ضریب انتقال حرارت جابجایی (ج) ضریب اصطکاک
Fig. 8. Comparison of experimental and predicted results by Design Expert for (a) Nu, (b) CHTC and (c) friction factor

توجه به روش‌های آماری در این نرم افزار استخراج شدند. نتایج این پژوهش را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- ۱- مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی با افزایش غلظت نانوسیال تا ۰/۲۲٪ روند صعودی داشته و پس از آن نزولی شده است و بیشترین مقدار اختلاف بین ضریب انتقال حرارت جابجایی آب خالص و نانوسیال کربن، ۱۰/۱۷٪ بوده است.
- ۲- افزایش اغتشاش موجب افزایش در عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌شود.
- ۳- ضریب اصطکاک با افزایش رینولدز کاهش یافته است.
- ۴- به دلیل اختلاف کم نتایج تجربی و نتایج پیش بینی شده در نرم افزار دیزاین اکسپرت، این نرم افزار می‌تواند به عنوان ابزاری

کاملاً مشخص است که تفاوت کمی بین این نتایج وجود دارد. برای ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابجایی، بیشینه ی این اختلاف برابر با ۴/۲٪ و برای ضریب اصطکاک بیشترین اختلاف ۸٪ بوده است.

۵- نتیجه گیری

هدف این مقاله، ارزیابی تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی، عدد ناسلت و همینطور مقدار افت فشار ناشی از حرکت نانوسیال در لوله بوده است. آزمایش‌ها در دبی‌های ۳ تا ۷ لیتر بر دقیقه که محدوده رینولدز ۷۱۰۰ تا ۱۶۷۰۰ را شامل می‌شود و با غلظت‌های صفر تا ۰/۴٪ جرمی نانوکربن انجام شدند و در نهایت داده‌های آزمایش‌ها به عنوان ورودی، به نرم افزار دیزاین اکسپرت منتقل شده و نمودارها با

- the synthesis and characterization of nano-antimicrobials, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 84 (2016) 131-138.
- [2] D. Chen, P. Szostak, Z. Wei, R. Xiao, Reduction of orthophosphates loss in agricultural soil by nano calcium sulfate, *Science of The Total Environment*, 539 (2016) 381-387.
- [3] M. Firoozzadeh, A.H. Shiravi, M. Shafiee, Experimental Study on Photovoltaic Cooling System Integrated With Carbon Nano Fluid, *Journal of Solar Energy Research*, 3(4) (2018) 287-292.
- [4] Y. Li, J. Yang, J. Song, Nano energy system model and nanoscale effect of graphene battery in renewable energy electric vehicle, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69 (2017) 652-663.
- [5] O. Mahian, A. Kianifar, C. Kleinstreuer, A.-N. Mohd A, I. Pop, A.Z. Sahin, S. Wongwises, A review of entropy generation in nanofluid flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 65 (2013) 514-532.
- [6] X. Chen, T. Zhao, M.-Q. Zhang, Q. Chen, Entropy and entransy in convective heat transfer optimization: A review and perspective, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 137 (2019) 1191-1220.
- [7] D. Khurana, R. Choudhary, S. Subudhi, A critical review of forced convection heat transfer and pressure drop of Al₂O₃, TiO₂ and CuO nanofluids, *Heat and Mass Transfer*, 53(1) (2017) 343-361.
- [8] K. Bashirnezhad, M. Ghavami, A.A. Alrashed, Experimental investigations of nanofluids convective heat transfer in different flow regimes: A review, *Journal of Molecular Liquids*, 244 (2017) 309-321.
- [9] R. Ranjbarzadeh, A. Karimipour, M. Afrand, A.H.M. Isfahani, A. Shirneshan, Empirical analysis of heat transfer and friction factor of water/graphene oxide nanofluid flow in turbulent regime through an isothermal pipe, *Applied Thermal Engineering*, 126 (2017) 538-547.
- [10] J. Fan, L. Wang, Review of Heat Conduction in Nanofluids, *Journal of Heat Transfer*, 133(4) (2011) 040801-040801-040814.
- [11] A. Pramuanjaroenkij, A. Tongkratoke, S. Kakaç, Numerical study of mixing thermal conductivity models for nanofluid heat transfer enhancement, *Journal of*

مناسب در تجزیه و تحلیل مباحث انتقال حرارت در نانوسیالات به کار برده شود.

علائم انگلیسی

C_p	ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال، J/kg K
D	قطر لوله، m
F	ضریب اصطکاک
H	ضریب انتقال حرارت جابجایی، W/m ² K
I	جریان، A
K	رسانش حرارتی، W/mk
L	طول لوله، m
\dot{m}	جرمی، gr/s
Nu	عدد ناسلت
P	فشار، Pa
Pe	عدد پکلت
Pr	عدد پرانتل

\dot{Q} ، ی حجمی، cm³/s

q حرارت منتقل شده، J

q'' شار حرارتی، W/m²

Re عدد رینولدز

T دما، K

u سرعت، m/s

V ولتاژ، v

علائم یونانی

ρ چگالی، kg/m³

یب پخش حرارتی، m²/s

ν سکوزیته سینماتیکی، m²/s

ϕ ظت جرمی نانوسیال، %

زیرنویس

f سیال

in داخلی

m متوسط

nf نانوسیال

out خارجی

w دیواره

مراجع

- [1] M.C. Sportelli, R.A. Picca, N. Cioffi, Recent advances in

- of dilute CuO/water nanofluid inside a circular tube, *International communications in heat and mass transfer*, 37(2) (2010) 214-219.
- [20] A.B. Kasaeian, S. Nasiri, Convection Heat Transfer Modeling of Nano- fluid Tio₂ Using Different Viscosity Theories, *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 11(1) (2015) 45-51.
- [21] C. Selvam, T. Balaji, D.M. Lal, S. Harish, Convective heat transfer coefficient and pressure drop of water-ethylene glycol mixture with graphene nanoplatelets, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 80 (2017) 67-76.
- [22] S.E.B. Maïga, C.T. Nguyen, N. Galanis, G. Roy, Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube, *Superlattices and Microstructures*, 35(3) (2004) 543-557.
- [23] A. Ghozatloo, A. Rashidi, M. Shariaty-Niassar, Convective heat transfer enhancement of graphene nanofluids in shell and tube heat exchanger, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 53 (2014) 136-141.
- [24] A. Ghozatloo, M. Shariaty-Niasar, A.M. Rashidi, Investigation of Heat Transfer Coefficient of Ethylene Glycol/ Graphenenanofluid in Turbulent Flow Regime, *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 10(4) (2014) 237-244.
- [25] S. El Bécaye Maïga, C. Tam Nguyen, N. Galanis, G. Roy, T. Maré, M. Coqueux, Heat transfer enhancement in turbulent tube flow using Al₂O₃ nanoparticle suspension, *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 16(3) (2006) 275-292.
- [26] A. Behzadmehr, M. Saffar-Avval, N. Galanis, Prediction of turbulent forced convection of a nanofluid in a tube with uniform heat flux using a two phase approach, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28(2) (2007) 211-219.
- Engineering Physics and Thermophysics*, 91(1) (2018) 104-114.
- [12] J.-Y. Jung, H.-S. Oh, H.-Y. Kwak, Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels, in: *ASME 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, American Society of Mechanical Engineers, 2006, pp. 327-332.
- [13] 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.
- [14] S.K. Das, N. Putra, P. Thiesen, W. Roetzel, Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids, *Journal of heat transfer*, 125(4) (2003) 567-574.
- [15] S. Paryani, A. Ramazani SA, Investigation of the combination of TiO₂ nanoparticles and drag reducer polymer effects on the heat transfer and drag characteristics of nanofluids, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 96(6) (2018) 1430-1440.
- [16] W. Yu, H. Xie, L. Chen, Y. Li, Investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluid, *Thermochimica Acta*, 491(1-2) (2009) 92-96.
- [17] Y. Xuan, Q. Li, Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids, *Journal of Heat transfer*, 125(1) (2003) 151-155.
- [18] E.B. Haghghi, M. Saleemi, N. Nikkam, R. Khodabandeh, M.S. Toprak, M. Muhammed, B. Palm, Accurate basis of comparison for convective heat transfer in nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 52 (2014) 1-7.
- [19] S. Fotukian, M.N. Esfahany, Experimental study of turbulent convective heat transfer and pressure drop

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A.H. Shiravi, M. Shafiee, H. Bostani, M. Firoozzadeh, M. Bozorgmehrian, *An Experimental Investigation on the Convective Heat Transfer Coefficient and Nusselt Number in Water/ Carbon Nanofluid*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(1) (2021) 209-220.

DOI: [10.22060/mej.2019.16148.6289](https://doi.org/10.22060/mej.2019.16148.6289)

