

## بررسی تجربی انتقال حرارت و افت فشار جریان نانوسیال در لوله افقی دایروی در شرایط دمایی دیواره ثابت

علی اکبر شمشیری<sup>۱</sup>، احمد صداقت<sup>۲</sup>، محمدعلی اخوان بهابادی<sup>۳</sup>، داریوش آشتیانی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، aliakbar.shamshiri@yahoo.com

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، sedaghat@cc.iut.ac.ir

<sup>۳</sup> استاد دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، akhavan@ut.ac.ir

<sup>۴</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، dariusha63@gmail.com

### چکیده

کردن ذراتی به اندازه میکرو/میلیمتر با هدایت حرارتی بالا به آنها توسط آهوجا [۲] مورد بررسی قرار گرفت. سیالات انتقال حرارتی که شامل ذراتی با این سایز بودند، معیبه نظیر خوردگی قطعات در اثر سایب، گرفتگی مسیرهای جریان، ته‌نشینی ذرات و افزایش افت فشار را شامل می‌شدند. برای رهایی از این مشکلات، فناوری نانو به کار گرفته شد و دسته جدیدی از سیالات انتقال حرارت بوجود آمدند که به این سیالات که در آن نانوذرات معلقند را نانوسیال گویند. نانوسیالات حتی با غلظت‌های بسیار کم نیز سبب افزایش قابل ملاحظه در خواص حرارتی می‌شوند [۳-۴].

نتایج بسیار جالب در افزایش فوق‌العاده ضرایب انتقال حرارت باعث شدت گرفتن تحقیقات در این عرصه شد. دینگ و همکاران [۵] مطالعه‌ای را روی نانوتیوب‌های کربن در آب انجام دادند. هدایت حرارتی مؤثر، لزجت و ضریب انتقال حرارت به صورت تجربی بدست آمدند. ماکزیمم افزایش انتقال حرارت جابجایی نانوسیال CNT (نانوتیوب کربن) را بالای ۳۵۰٪ در رینولدز ۸۰۰ برای کسر حجمی ۰.۵٪ گزارش کردند، و این ماکزیمم افزایش در فاصله طولی به میزان ۱۱۰ برابر قطر لوله اتفاق افتاد. مطالعه‌ای تجربی امراللهی و همکاران [۶] بر روی ضریب انتقال حرارت نانوسیال FMWNT<sup>۱</sup> بر پایه آب که در یک لوله افقی که به صورت یکنواخت گرم می‌شد، در ناحیه ورودی در هر دو رژیم آرام و مغشوش انجام دادند. در جریان آرام نتایج آزمایش به وضوح نشان داد که نانوذرات معلق در آب، ضریب انتقال حرارت جابجایی را افزایش می‌دهد و این افزایش با بیشتر شدن دما نسبت مستقیم دارد. سعیدی‌نیا و همکاران [۷] در مطالعه-ای که اخیراً بر روی خواص حرارتی و ضریب انتقال حرارت نانوسیال روغن پایه-اکسید مس با غلظت‌های ۰.۲٪ تا ۲٪ انجام دادند، مشاهده کردند که ماکزیمم افزایش انتقال حرارت در نانوسیال با غلظت جرمی ۲٪ به میزان ۱۲.۷٪ در بیشترین عدد رینولدز آزمایش که برابر ۱۱۵ بود، اتفاق می‌افتد.

هدف کار تجربی که ما می‌خواهیم انجام دهیم، بررسی میزان انتقال حرارت و افت فشار جریان نانو سیال در لوله افقی با شرایط دمایی دیواره ثابت می‌باشد. با توجه به مطالب عنوان شده، و با توجه به تحقیقات نسبتاً محدود انجام شده روی این گونه از نانوسیالات و

انتقال حرارت و افت فشار جریان آرام نانوسیال روغن انتقال حرارت- نانولوله‌های کربنی در لوله دایروی افقی که در شرایط دمایی دیواره ثابت است، در این تحقیق مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. برای این هدف، روغن انتقال حرارت HT-B و نانوسیال‌های روغن انتقال حرارت-MWCNT با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴ درصد جرمی در لوله‌ای افقی با مقطع دایروی با قطر داخلی ۱۴/۵ میلیمتر مورد آزمایش قرار گرفتند. جریان آزمایش از نظر هیدرودینامیکی توسعه یافته در نظر گرفته می‌شود اما از نظر حرارتی در طول ورودی خواهد بود. خصوصیات سیال پایه و نانوسیال‌ها از قبیل دانسیته، ویسکوزیته، ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه با دستگاه‌های دقیق اندازه‌گیری شدند. این داده‌ها به منظور محاسبات افت فشار و انتقال حرارت مورد استفاده قرار گرفتند. محدوده عدد رینولدز آزمایش عبارت است از: ۱۲۹ تا ۲۱۵۴. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت نانوسیال ضریب انتقال حرارت و هم‌چنین مقدار افت فشار نسبت به سیال پایه افزایش می‌یابند. در رینولدز ۲۱۵۴ عدد ناسلت نانوسیال با غلظت ۰.۴ درصد جرمی حدود ۴۲.۳٪ رشد را نشان داد ولی در عین حال میزان افزایش ضریب اصطکاک آن در حدود ۲۱.۴٪ مشاهده شد. در آخر نیز هر دو عامل انتقال حرارت و افت فشار به منظور ارزیابی عملکرد نانوسیال به‌طور هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفتند.

### واژه‌های کلیدی

انتقال حرارت، افت فشار، نانوسیال، دمایی دیواره ثابت.

### مقدمه

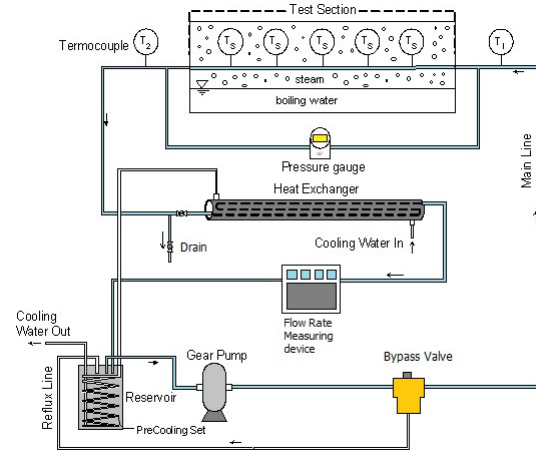
خنک‌کاری یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی است که بسیاری از صنایع با آن روبرو هستند و هدایت حرارتی پایین مهم‌ترین محدودیت در توسعه کارایی انتقال حرارت سیالات مورد استفاده در کاربری‌های صنعتی و تجاری می‌باشد. کارهای زیادی توسط گروه‌های مختلف برای بهبود هدایت حرارتی سیالات انتقال حرارت معمولی از قبیل آب، اتیلن گلیکول و روغن بوسیله اضافه کردن ذرات رسانا انجام شد. ایده افزایش انتقال حرارت در سیالات با استفاده از مخلوط کردن ذرات رسانا اولین بار توسط ماکسول اعلام شد [۱]. بعدها اضافه

<sup>۱</sup> Functionalized Multi Wall Nano Tube

اختلافات شدید در داده‌های موجود، ضرورت انجام تحقیقات در این زمینه احساس می‌شود.

## دستگاه آزمایش

برای مطالعه انتقال حرارت جابجایی و افت فشار جریان نانوسیال در لوله‌ای افقی تحت شرایط دمای دیواره ثابت یک سیستم آزمایشی مطابق شکل (۱) طراحی و ساخته شد. این دستگاه آزمایشی متشکل از یک مدار برای جریان روغن انتقال حرارت HT-B خالص و یا نانوسیال مربوطه می‌باشد که از بخش‌های متفاوتی تشکیل شده است.



شکل ۱: طرح شماتیک سیستم آزمایش

حلقه جریان متشکل از بخش آزمایش، دستگاه اندازه‌گیری دبی، مخزن، پیش‌خنک کننده، پمپ دنده‌ای و مبدل حرارتی است. برای کنترل دبی جریان از یک شیر بای‌پس با خط برگشت به مخزن استفاده شد. بخش آزمایش از یک لوله صاف مسی به طول ۱/۵ متر و قطر داخلی ۱۴/۵ میلی‌متر است، البته طول لوله برای سنجش ضریب انتقال حرارت ۱/۲ متر و برای پارامتر افت فشار ۱/۵ متر می‌باشد. نانوسیال جاری درون لوله‌ای افقی توسط بخار موجود در اطراف آن، گرم می‌شود. بخار درون مخزن بیش از نیاز توسط المنت‌های حرارتی تولید می‌شود. دو ترموکوپل نوع K برای اندازه‌گیری دمای حجمی نانوسیال در ورود و خروج، درون لوله جاسازی شد. پنج ترموکوپل دیگر نیز در طول لوله‌ی آزمایش برای اندازه‌گیری دمای سطح لوله، به بدنه آن جوش داده شد دستگاه فشارسنج دیفرانسیلی که در این تحقیق به کار گرفته شده، دستگاه فشارسنج دیفرانسیلی بسیار دقیق PMD-75 می‌باشد. سیال پس از ترک بخش آزمایش، ابتدا از یک مبدل حرارتی گذر می‌کند، سیال خنک‌کننده این مبدل آب بود و با جهت جریان نیز ناهمسو بود و سپس برای اندازه‌گیری دبی جریان به واحد اندازه‌گیری دبی هدایت شده و در انتها وارد مخزن می‌شود. در این قسمت خنک‌سازی ثانویه توسط کویل مسی، که آب خارج شده از مبدل وارد آن می‌شود، انجام شده و پس از پمپ کردن و تنظیم دبی توسط شیر بای‌پس، مجدداً به بخش آزمایش وارد می‌شود.

## آماده‌سازی نانوسیال

نانوذرات انتخاب شده برای این تحقیق، نانولوله‌های کربنی چند دیواره‌ای است که دارای قطر ۱۰ تا ۳۰ nm و طول میانگین ۱۰ μm و مساحت سطح ویژه آن ۲۷۰ m<sup>2</sup>/gr می‌باشد و چگالی این نانوذرات ۱/۴ gr/cm<sup>3</sup> است. این نانوذرات با روش آنالیز شیمیایی تولید شده‌اند و خلوصشان در حدود ۹۵ درصد تخمین زده شده است. زمانی که پودر مورد نظر به روغن اضافه شود، تشکیل یک حالت غیر همگن ناپایدار داده و سوسپانسیونی با تجمع نانوذرات ایجاد می‌کند که ته‌نشینی در آن بعد از چند ساعت شروع می‌شود. به منظور تهیه نانوسیال همگن و نسبتاً پایدار از دستگاه اولتراسونیک (Starsonic35) استفاده شد که سوسپانسیون حاصل تا ۴۸ ساعت هیچگونه ته‌نشینی از خود نشان نداد.

در این تحقیق، ۳ نمونه نانوسیال شامل سوسپانسیون‌های روغن انتقال حرارت - نانولوله‌های کربنی با غلظت‌های جرمی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴ درصد (به ترتیب معادل حدودی ۰/۰۶۳، ۰/۱۲۵ و ۰/۲۵۱ درصد حجمی) تهیه و آماده شد. به علاوه سیال پایه نیز مورد آزمایش قرار گرفت.

## نتایج افت فشار

به منظور محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی و ضریب اصطکاک، خواص ترموفیزیکی و رئولوژیکی سیالات مورد استفاده (اعم از چگالی، لزجت، هدایت حرارتی و گرمای ویژه) به صورت تجربی در دماهای مختلف اندازه‌گیری شده است. اندازه‌ی این خواص به طور مستقیم در محاسبه‌ی اعداد رینولدز، ضریب اصطکاک و ضریب انتقال حرارت جابجایی در هر آزمایش با توجه به دمای متوسط سیال، مورد استفاده قرار گرفته است.

به منظور اندازه‌گیری میزان افت فشار از دو انتهای لوله (مقطع مورد آزمایش) دو خروجی به صورت عمود بر لوله به دو ترمینال فشار سنج دیفرانسیلی مربوط می‌شود که در شکل (۱) نشان داده شده است. برای محاسبه ضریب اصطکاک تجربی رابطه (۱) به کار گرفته شد.

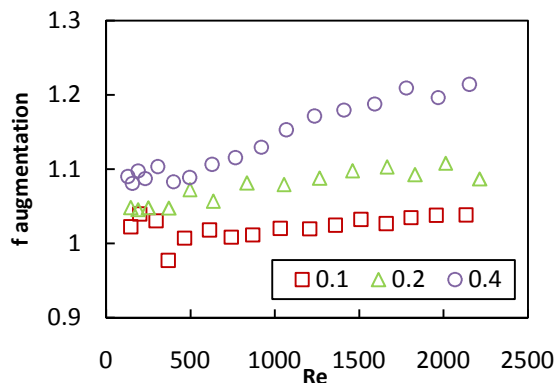
$$f = \frac{\Delta P d^5 \pi^2 \rho}{8 l m^2} \quad (1)$$

برای مقایسه نتایج تجربی با مقادیر تئوری ضریب اصطکاک جریان آرام که از رابطه  $f = 64 / Re$  محاسبه می‌شود، به کار گرفته شد. اما برای سیالاتی که تغییرات ویسکوزیته آنها با دما زیاد است، باید یک ضریب تصحیح برای تغییرات ویسکوزیته در روی مقطع جریان به صورت زیر در نظر گرفته شود [۸].

$$f = \frac{64}{Re} \left( \frac{\mu_s}{\mu_m} \right)^{0.58} \quad (2)$$

با این توضیحات نمودار مقایسه‌ای نتایج تجربی و تئوری ضریب اصطکاک در شکل (۲) نشان داده شده است که مبنای مقایسه‌ی نتایج با نانوسیال و هم‌چنین صحت دستگاه آزمایش می‌باشد. از این شکل تطابق خوب داده‌های تجربی و تئوری مشهود است و حداکثر خطا بین ۰/۲- تا ۰/۸+ گزارش شد.

آزمایش که در رابطه مستقیم با افت فشار است، بنا بر رابطه (۱) منجر به افزایش ضریب اصطکاک می‌شوند. بنا بر کار سعیدی‌نیا و همکاران [۹] دلیل دیگر این افزایش در ضریب اصطکاک می‌تواند حرکات بی‌نظم و جابجایی نانوذرات درون سیال پایه نیز باشند.



شکل ۴: نسبت افزایش ضریب اصطکاک نانوسیال‌ها به روغن پایه

### نتایج انتقال حرارت

آزمایش‌های انتقال حرارت تحت شرایط دمایی دیواره ثابت ابتدا برای روغن انتقال حرارت HTB صورت گرفت. برای بدست آوردن ضریب انتقال حرارت کلی  $h$  در این حالت، از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

$$h = \frac{\dot{m}c_p(T_{out} - T_{in})}{\pi d_i l \Delta T_{LMTD}} \quad (3)$$

که  $\Delta T_{LMTD}$  اختلاف دمایی میانگین لگاریتمی سیال می‌باشد و برای محاسبه عدد ناسلت از رابطه زیر استفاده می‌گردد:

$$Nu = \frac{hd}{k} \quad (4)$$

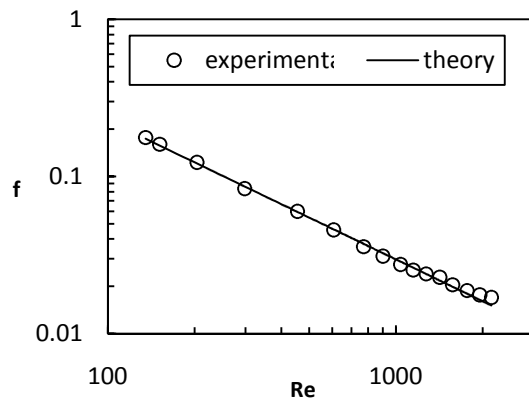
برای مقایسه نتایج تجربی با تئوری و ارزیابی دقت دستگاه آزمایش، داده‌های بدست آمده از آزمایش با رابطه زیر مقایسه شدند که عبارت  $(\mu_s / \mu_m)^{-0.14}$  دلیل اثرات تغییر لزجت در مقطع جریان اعمال شد [۸].

$$Nu_m = \frac{1}{2x^+} \ln \left[ \frac{1}{8 \sum_{n=0}^{\infty} (G_n / \lambda_n^2) \exp(-\lambda_n^2 x^+)} \right] \left( \frac{\mu_s}{\mu_m} \right)^{-0.14} \quad (5)$$

شکل (۵) عدد ناسلت تجربی روغن انتقال حرارت برحسب رینولدز در مقایسه با رابطه تئوری (۵) را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که داده‌های آزمایش تطابق خوبی با رابطه تئوری دارند و حداکثر خطا بین ۱۰٪ تا ۱۱٪ می‌باشد.

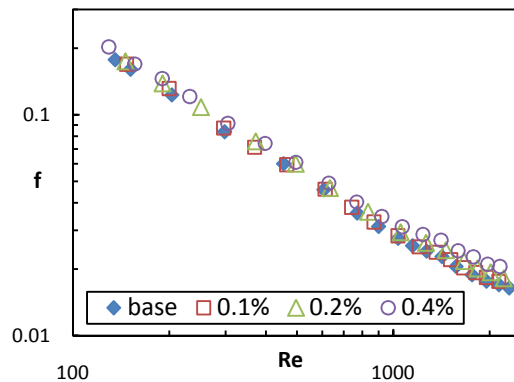
شکل (۶) نتایج عدد ناسلت روغن انتقال حرارت به همراه نانوسیال‌ها را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزودن نانوذرات به سیال پایه عدد ناسلت افزایش قابل ملاحظه‌ای را از خود نشان می‌دهد.

ضریب انتقال حرارت سیال پایه و نانوسیال‌ها همگی با افزایش میانگین جریان و عدد رینولدز افزایش می‌یابند. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت جرمی نانوذرات عدد ناسلت افزایش



شکل ۲: مقایسه ضریب اصطکاک تئوری با داده‌های آزمایش برای سیال پایه

در این قسمت نتایج ضریب اصطکاک برای روغن انتقال حرارت پایه به همراه نانوسیال‌ها ارائه می‌شود.



شکل ۳: ضریب اصطکاک نانوسیال‌ها و سیال پایه بر حسب عدد رینولدز

بنا بر شکل (۳)، ضریب اصطکاک نانوسیال ۰.۱٪ در رینولدزهای یکسان افزایش محسوسی را در مقابل سیال پایه نشان نمی‌دهد که بیانگر این مطلب است که نانوسیال رقیق منجر به زیاد شدن توان مصرفی پمپ نمی‌شود ولی با افزایش غلظت نانوسیال این افزایش در ضریب اصطکاک بیشتر می‌شود و در نتیجه توان پمپ مصرفی نیز افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر در یک رینولدز یکسان با افزایش غلظت نانوسیال ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد.

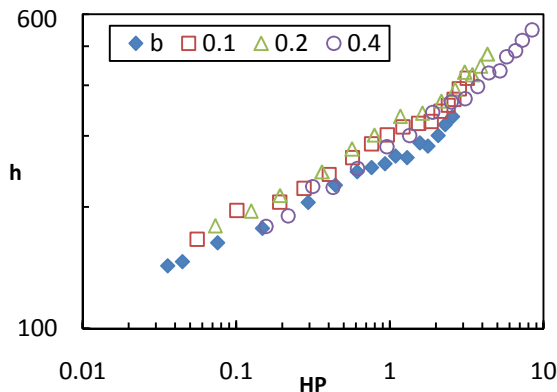
در شکل (۴) نسبت افزایش ضریب اصطکاک نانوسیال‌ها به سیال پایه برحسب عدد رینولدز آمده است. از این شکل دریافت می‌شود که با افزایش رینولدز این نسبت افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که نانوسیال با کمترین غلظت جرمی به مقدار بسیار کمی ضریب اصطکاک را به نسبت سیال پایه افزایش داده است، همان‌طور که گفته شد برای سیالات با غلظت جرمی بالاتر، این نسبت بالاتر است، به‌طور مثال برای نانوسیال با غلظت ۰.۴٪ افزایش ۹٪ و ۲۱.۴٪ به ترتیب در رینولدزهای ۱۲۹ و ۲۱۵۴ مشاهده می‌شود که این افزایش به علت ذرات معلق در نانوسیال‌ها می‌باشد. همچنین دیده می‌شود که شیب نسبت افزایش ضریب اصطکاک با افزایش غلظت افزایش می‌یابد. ذرات معلق با افزایش ویسکوزیته دینامیکی سیال

رینولدز ۲۱۳۲ میزان افزایش ناسلت برای نانوسیال با غلظت ۰.۱٪ برابر ۱۳.۵٪ می‌باشد درحالی‌که برای نانوسیال ۰.۴٪ این افزایش در رینولدز ۲۱۵۴ برابر ۴۲.۳٪ می‌باشد. همچنین در تمامی نانوسیال‌ها مشاهده شد که با افزایش رینولدز این نسبت افزایش می‌یابد برای نمونه برای نانوسیال ۰.۲٪ در رینولدزهای ۱۴۵ و ۲۰۱۲ به ترتیب نسبت افزایش برابر ۱۴.۱٪ و ۲۳٪ مشاهده شد، همچنین با بیشتر شدن غلظت شیب افزایش این نسبت بالاتر نیز می‌رود، این مطلب مؤید آن است که سرعت جریان بر نانوسیال‌های غلیظ‌تر اثر بیشتری دارد.

### ارزیابی عملکرد

از آنجایی که استفاده از نانوذرات باعث بهبود خواص حرارتی سیال پایه گردید ولی از طرفی باعث افزایش ضریب اصطکاک و افت فشار آن گردید، بنابراین بهتر است افزایش ضریب انتقال حرارت و افزایش افت فشار همزمان ارزیابی شود. برای این کار باید عامل سومی را در نظر گرفت که با هر دو عامل، رابطه داشته و بتواند شرایط قیاس برای این دو عامل را فراهم آورد. این عامل سوم را می‌توان ضریب عملکرد در نظر گرفت. در اینجا سعی می‌شود نمودار ضریب انتقال حرارت نسبت به توان پمپاژ رسم شود تا مقایسه شود که آیا در توان پمپاژ یکسان ضریب انتقال حرارت برای نانوسیال نسبت به سیال پایه افزایش یافته است یا نه؟ برای محاسبه‌ی توان پمپاژ به سادگی از رابطه‌ی (۶) استفاده می‌شود.

$$HP = Q\Delta P \quad (6)$$

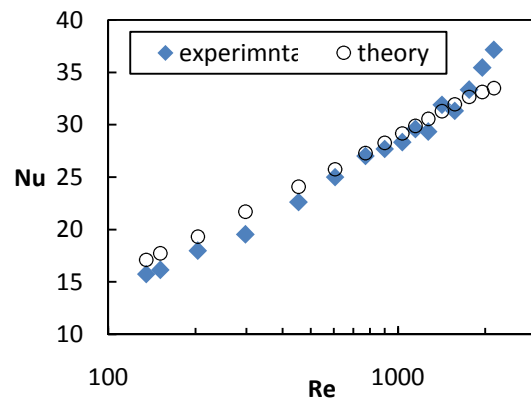


شکل ۸: تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال‌ها و سیال پایه بر حسب توان پمپاژ

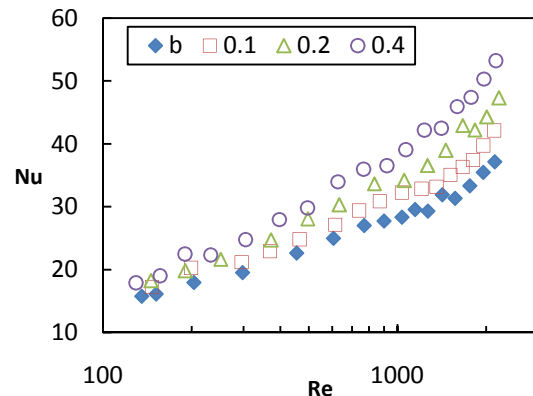
از شکل (۸) مشاهده می‌شود که تمامی نانوسیال‌ها از عملکرد بهتری نسبت به سیال پایه برخوردارند و نانوسیال با غلظت جرمی ۰.۲٪ بهترین عملکرد را نشان می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که شیب تغییرات ضریب انتقال حرارت تمامی سیال‌ها یکسان است و این بدین معنی است که ضریب عملکرد به توان پمپاژ وابسته نمی‌باشد.

### نتیجه‌گیری

عملکرد تجربی انتقال حرارت جابجایی و افت فشار جریان آرام روغن



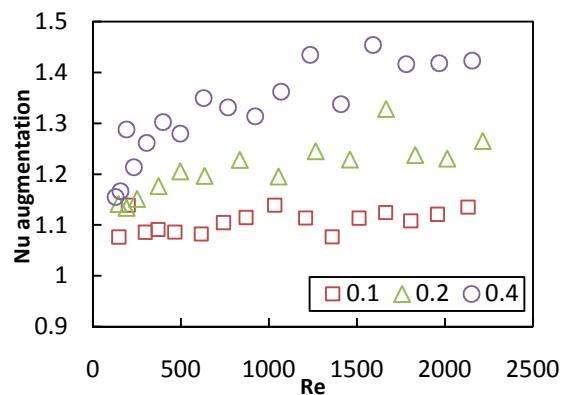
شکل ۵: مقایسه ناسلت تئوری با داده‌های آزمایش برای سیال پایه



شکل ۶: تغییرات ناسلت نانوسیال‌ها و سیال پایه بر حسب عدد رینولدز

می‌یابد به طوری که در نانوسیال با غلظت جرمی ۰.۴٪ در رینولدزهای ۱۲۹ و ۲۱۵۴ به ترتیب عدد ناسلت برابر ۱۷.۹ و ۵۳.۲ مشاهده می‌شود، درحالی‌که برای نانوسیال با غلظت جرمی ۰.۱٪ عدد ناسلت در رینولدزهای ۱۴۶ و ۲۱۳۲ به ترتیب برابر با ۱۷.۲ و ۴۲.۱ می‌باشد.

شکل (۷) نسبت افزایش عدد ناسلت نانوسیال‌ها به سیال پایه را بر حسب عدد رینولدز نشان می‌دهد.



شکل ۷: نسبت افزایش ناسلت نانوسیال‌ها و سیال پایه بر حسب عدد رینولدز

در این شکل مشاهده می‌شود که در یک رینولدز یکسان با افزایش غلظت، نسبت افزایش ناسلت بیشتر می‌شود، برای مثال در

$\dot{m}$	دبی جرمی، kg/s
Nu	محیط ترشده، m
$\Delta p$	افت فشار، Pa
$Q$	دبی حجمی، $m^3/s$
Re	عدد رینولدز
T	دمای سیال، K
$x^+$	طول بی بعد
<b>علائم یونانی</b>	
$\mu$	ویسکوزیته دینامیکی، Pa.s
$\rho$	چگالی، $kg/m^3$
<b>زیرنویس</b>	
$m$	متوسط، بالک
$s$	سطح لوله

### مراجع

- [1] Maxwell, C., 1891. "A Treatise on Electricity and Magnetism," Clarendon, Oxford.
- [2] Ahuja, A.S., 1975. "Augmentation of heat transport in laminar flow of polystyrene suspension: experiments and results," *Journal of Applied Physics*, Vol. 46, pp. 3408–3416.
- [3] Murshed, S.M.S., Leong, K.C., Yang, C., 2009. "A combined model for the effective thermal conductivity of nanofluids". *Applied Thermal Engineering*, 29, pp. 2477–2483
- [4] Chen, L., Xie, H., 2009. "Silicon oil based multiwalled carbon nanotubes nanofluid with optimized thermal conductivity enhancement". *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 352, pp. 136–140.
- [5] Ding, Y., Alias, H., Wen, D., Williams, R.A., 2006. "Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids)". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 240–250.
- [6] Amrollahi, A., Rashidi, A.M., Lotfi, R., Emami Meibodi, M., Kashefi, K., 2010. "Convection heat transfer of functionalized MWNT in aqueous fluids in laminar and turbulent flow at the entrance region". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 717–723.
- [7] Saeedinia, M., Akhavan-Behabadi, M.A., Razi, P., 2011. "Thermal and rheological characteristics of CuO–Base oil nanofluid flow inside a circular tube". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, article inpress.
- [8] Deissler, R. C., July 1951. NACA (now NASA) TN 2410, Washington.
- [9] Saeedinia, M., Akhavan-Behabadi, M.A., Nasr, M., 2012. "Experimental study on heat transfer and pressure drop of nanofluid flow in a horizontal coiled wire inserted tube under constant heat flux". *Experimental Thermal and Fluid Science*, 36, pp. 158–168.

انتقال حرارت با و بدون نانوتیوب کربن در لوله دایروی در طول ورودی با دمای دیواره ثابت در محدوده رینولدز ۱۲۹ تا ۲۱۵۴ مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

۱. ضریب اصطکاک نانوسیال ۰.۱٪ در رینولدزهای یکسان افزایش محسوسی را در مقابل سیال پایه نشان نمی‌دهد که بیان‌گر این مطلب است که نانوسیال رقیق منجر به زیاد شدن توان مصرفی پمپ نمی‌شود.
۲. مشاهده گردید با افزایش غلظت نانوذرات در یک رینولدز یکسان میزان ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد، برای نانوسیال ۰.۱٪ در رینولدز ۲۱۵۰ این ضریب برابر است با ۰.۱۷۵ و در همان رینولدز برای نانوسیال ۰.۴٪ برابر است با ۰.۲۰۶، هم-چنین با افزایش عدد رینولدز میزان افزایش ضریب اصطکاک نسبت به سیال پایه بیشتر می‌شود، برای نانوسیال با غلظت ۰.۴٪ افزایش ۹٪ و ۲۱.۴٪ به ترتیب در رینولدزهای ۱۲۹ و ۲۱۵۴ مشاهده شد.
۳. مشاهده گردید که با افزودن نانو ذرات حتی با غلظت کم به سیال پایه عدد ناسلت افزایش قابل ملاحظه‌ای را از خود نشان داد، برای نانوسیال ۰.۱٪ میزان افزایش عدد ناسلت در رینولدز ۲۱۳۲ برابر ۱۳.۶٪ بود. هم‌چنین ضریب انتقال حرارت سیال پایه و نانوسیال‌ها همگی با افزایش عدد رینولدز افزایش یافتند، برای نانوسیال ۰.۲٪ عدد ناسلت در رینولدزهای ۱۴۵ و ۲۰۱۲ به ترتیب برابر با ۱۸.۳ و ۴۴.۳ بود.
۴. به طور کلی با افزایش عدد رینولدز، نسبت عدد ناسلت نانوسیال‌ها به سیال پایه روندی صعودی دارد، هم‌چنین شیب افزایش این نسبت با غلیظ‌تر شدن نانوسیال بیشتر می‌شود، برای نمونه برای نانوسیال با غلظت ۰.۴٪ افزایش ۱۰.۶٪ و ۴۳.۲٪ به ترتیب در رینولدزهای ۱۲۹ و ۲۱۵۴ مشاهده شد در حالی که برای نانوسیال با غلظت ۰.۱٪ افزایش ۷.۶٪ و ۱۳.۶٪ به ترتیب در رینولدزهای ۱۴۶ و ۲۱۳۲ گزارش شد.
۵. اگر نانوسیال‌ها با سیال پایه در یک توان پمپ مصرفی یکسان مقایسه شوند، یک افزایشی در ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال‌ها مشاهده گردید و در این زمینه نانوسیال با غلظت جرمی ۰.۲٪ بهترین عملکرد را نشان داد که البته این افزایش به مقدار توان پمپ مصرفی بستگی ندارد.

### فهرست علائم

$c_p$	ظرفیت گرمایی ویژه، J/kgK
$d$	قطر لوله، m
$f$	ضریب اصطکاک
$h$	ضریب انتقال حرارت، $W/m^2K$
HP	توان پمپ، W
$k$	ضریب هدایت حرارتی، W/mK
$l$	طول لوله، m