



## بررسی عملکرد حرارتی نانوسیال نانوالماس - روغن موتور در جریان آرام داخل لوله افقی میکروفین دار تحت شارحرارتی ثابت

عرفان رسولی - دانشجوی کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

محمد علی اخوان بهابادی - دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

محمد قزوینی - استادیار دانشکده مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

مهرداد رئیسی دهکردی - استادیار دانشکده مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

E-mail: [akhavan@ut.ac.ir](mailto:akhavan@ut.ac.ir)

چکیده: در این مطالعه به بررسی تجربی افزایش انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال روغن موتور- نانوذرات الماس با غلظت‌های متفاوت در جریان آرام درون لوله افقی میکروفین دار تحت شرایط مرزی شار ثابت پرداخته می‌شود. روغن موتور 20W50 به همراه چهار نانوسیال با غلظت‌های جرمی ۰/۲، ۰/۵، یک و دو درصد به عنوان سیال‌های عامل در نظر گرفته شدند. داده‌های آزمایشگاهی در شارهای مختلف و اعداد رینولدز متفاوت به دست می‌آید. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت در اثر افزودن نانوذرات الماس افزایش چشمگیری پیدا می‌کند. حداکثر افزایش ۵۵٪ در ضریب انتقال حرارت جابجایی برای نانوسیال دو درصد جرمی حاصل می‌گردد. علاوه بر این، بررسی‌ها نشان‌دهنده افزایش افت فشار با استفاده از نانوسیال نسبت به سیال پایه (روغن موتور) است که این افزایش با افزایش غلظت نانوذرات بیشتر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: نانوسیال، لوله میکروفین دار، افزایش انتقال حرارت، افت فشار، جریان آرام.

## Performance Evaluation of Nano-diamond - Engine Oil Nano-fluid through a Laminar Flow inside a Horizontal Micro-fin Tube

E. Rasouli, M.S. Student, the Faculty of Mech. Eng., School of Eng., University of Tehran

M. A. Akhavan-Behabadi, Aso. Prof., the Faculty of Mech. Eng., School of Eng., University of Tehran

M. Ghazvini and M. A. dehkordi, the Faculty of Mech. Eng., School of Eng., University of Tehran

**Abstract:** Enormous increase in produced heat fluxes by means of electronic devices, lasers, computers, automobile engines and other high-tech industries has changed high-performance cooling to a vital need of above industries to keep on acceptable performance. Additive for liquids is one of passive methods for enhancing heat transfer that is one of controversial subjects of researches in recent years. In this study heat transfer enhancement and pressure drop increase of engine oil-nanodiamond nanofluid in different particle concentrations under constant heat flux investigated experimentally. Engine oil (SAE 20W50) as base fluid with four nanofluids with 0.2, 0.5, 1 and 2 weight fraction percent tested. Experimental data gathered and considered for different heat fluxes and Reynolds numbers. Results showed that thermal conductivity increased utmost about 35%. Also 55% increase in convective heat transfer observed in 2% nanofluid. Meanwhile it was seen that pressure drop increased in nanofluids in comparison with base fluid and it increased with augmentation of particle concentration.

**Keywords:** Micro-fin tube, Heat transfer enhancement, Pressure drop, Laminar flow, and Nano-fluid

## ۱- مقدمه

شارهای حرارتی تولید شده از دستگاه‌های الکترونیکی، لیزرها، رایانه‌ها، موتور اتومبیل و دیگر صنایع پیشرفته (در بعضی موارد بیش از  $2000 \text{ W/cm}^2$ ) دلیلی بر مبدل شدن سرمایه به یکی از چالش‌های بسیار پیچیده و فنی در روبرویی با صنایع فوق است که نیازمند مطالعات و تحقیقات روز افزون در این عرصه دارد. برگلز و همکارانش، ۱۳ روش را برای افزایش انتقال حرارت که به دو دسته روش‌های غیرفعال و فعال تقسیم می‌شوند، ارائه داده‌اند [۱]. سطوح توسعه یافته و ذرات افزودنی دو روش از دسته روش‌های غیرفعال بوده است که نظر محققین بسیاری را به خود جلب کرده است. نتایج بررسی‌های محققین در زمینه سطوح گسترده برای افزایش انتقال حرارت در مایعات منتهی به طراحی و ساخت انواع لوله‌ها با پره‌هایی در ابعاد میکرو و هندسه‌های گوناگون توسط فوجی شد [۲]. لوله‌های میکروفین‌دار با افزایش انتقال حرارت (۸۰ - ۱۸۰٪) در عین افزایش افت فشار (۲۰ - ۸۰٪) توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند. در مورد دیگر روش افزایش انتقال حرارت غیرفعال، یعنی ذرات افزودنی، در ابتدای کار بدلیل مشکلات جانبی کمتر مورد توجه قرار گرفت. زیرا بیشتر مطالعات روی ضریب هدایت حرارتی سوسپانسیون‌های حاوی ذرات با ابعاد میلی‌متر یا میکرومتر منحصر شده بود. استفاده از مواد افزودنی با چنین ابعادی برای کاربردهای عملی مناسب نبود زیرا ذرات با ابعاد میلی‌متر و یا حتی میکرومتر بسرعت ته‌نشین می‌شوند و در هنگام عبور از مجاری باریک همانند میکروکانال‌ها کلوخه شده و مجاری عبوری را مسدود می‌کنند و باعث افت فشار بیشتری می‌شوند. همچنین برخورد ذرات با دیواره تجهیزات و لوله‌ها باعث سایش می‌گردد. با پیدایش تکنولوژی نانو در یک دهه گذشته و تولید ذرات نانومتری، موانع توسعه این روش تا حدود زیادی برطرف شد و محققین زیادی تحقیقات تجربی خود را در این زمینه انجام دادند [۳-۶]. نتایج بسیار جالب در افزایش فوق-

العاده ضرایب انتقال حرارت باعث شدت گرفتن تحقیقات در این عرصه شد.

همچنین در مواردی چند به آثار جانبی نانوسیال‌ها همچون ایجاد افت فشار پرداخته شده است. همان مطالعات اندک نیز با ابزارهای اندازه‌گیری افت فشار نه‌چندان مناسب برای جریان نانوسیالات همانند مانومترها صورت گرفت که نتایج حاصله نشانگر تغییر نیافتن محسوس افت فشار نانوسیالات نسبت به سیال‌های پایه خود بوده است [۷ و ۸].

در این مطالعه، تصمیم بر آن گرفته شد که علاوه بر بررسی ضرایب انتقال حرارت امکان وجود اثر جانبی افزایش افت فشار هنگام استفاده توأم از هر دو روش گفته شده در بالا (لوله میکروفین‌دار و نانوسیال)، با بهره‌گیری از دستگاه بسیار دقیق افت فشارسنج دیفرانسیلی PMD-75 مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین آثار افزایش غلظت نانوذرات و همچنین شار دیواره بر روی انتقال حرارت جابجایی و افت فشار جریان در لوله افقی میکروفین‌دار بررسی می‌شود.

## ۲- سیستم و پروسه اندازه‌گیری‌های تجربی

شکل (۱)، طرحواره دستگاه آزمایش را نشان می‌دهد. حلقه جریان متشکل از بخش آزمایش، واحد اندازه‌گیری دبی، مخزن، پیش‌خنک کننده، پمپ دنده‌ای و مبدل حرارتی است. بخش آزمایش از یک لوله میکروفین‌دار مسی به طول ۱ متر و قطر داخلی  $8/92$  میلی‌متر ساخته شده است. مشخصات لوله میکروفین‌دار در شکل ۲ آمده است. نانوسیال جاری درون این لوله افقی میکروفین‌دار توسط یک هیتر الکتریکی که بدور آن پیچیده شده بود، گرم می‌شد. برای ایجاد شارهای متفاوت، توان حرارتی هیتر در سه مرحله روی ۱۰۰، ۲۷۰ و ۵۰۰ وات تنظیم می‌شد. بخش آزمایش کاملاً توسط دو لایه عایق حرارتی ایزوله شده بود تا از اتلاف حرارتی جلوگیری شود. دو ترموکوپل (K-type) برای اندازه‌گیری دمای حجمی نانوسیال در ورود و

## ۴- نتایج

در این تحقیق تمامی مقادیر رئولوژیکی (اعم از چگالی، لزجت دینامیکی و سینماتیکی) و حرارتی (اعم از ظرفیت حرارتی و ضریب هدایت حرارتی) برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی و افت فشار بصورت تجربی اندازه‌گیری شده است.

## ۴-۱- ضریب انتقال حرارت جابجایی

در این بخش با استفاده از اندازه‌گیری‌های تجربی صورت گرفته برای مقادیر رئولوژیکی و حرارتی، ضرایب مطرح در انتقال حرارت جابجایی محاسبه و بررسی می‌گردد.

برای بررسی تأثیر افزودن نانوذرات الماس در بهبود انتقال حرارت درون لوله، ضریب انتقال حرارت میانگین در اعداد پکلت مختلف برای نانوسیال‌های تهیه شده در شکل ۳ در توان حرارتی ۱۰۰ وات، نشان داده شده است. افزایش ضریب انتقال حرارت در اثر افزایش غلظت جرمی و عدد پکلت قابل مشاهده است. دلیل این اتفاق را می‌توان اینگونه بیان کرد که چون عدد پراپتیل نانوسیال با غلظت بالاتر، بیشتر از نانوسیال با غلظت پایینتر و روغن پایه است، در یک عدد رینولدز مشخص، طول ورودی آن بزرگتر از طول ورودی روغن پایه است. با توجه به اینکه روند نزولی ضریب انتقال حرارت در ابتدای ناحیه ورودی شدیدتر است، می‌توان گفت که نانوسیال با غلظت بیشتر نسبت به سیال با غلظت کمتر در نقطه ابتدایی‌تر طول ورودی قرار دارد.

در بررسی اثر افزایش دبی و عدد رینولدز بر انتقال حرارت می‌توان گفت که با افزایش عدد رینولدز عدد پکلت افزایش می‌یابد که در نهایت منجر به بهبود انتقال حرارت می‌شود. با افزایش عدد پکلت، ضخامت لایه‌های مرزی کمتر شده و طول

خروج، درون سیال جاسازی شد. شش ترموکوپل دیگر نیز در طول لوله آزمایش برای اندازه‌گیری دمای سطح لوله، به بدنه آن جوش داده شد. جهت اندازه‌گیری افت فشار در طول بخش آزمایش از افت فشارسنج دیفرانسیلی بسیار دقیق PMD-75 استفاده شد.

سیال پس از ترک بخش آزمایش، برای اندازه‌گیری دبی جریان به واحد اندازه‌گیری دبی هدایت شده و در انتها وارد مخزن می‌شد. در این قسمت خنک‌سازی اولیه توسط کویل مسی، که آب خارج شده از مبدل وارد آن می‌شد، انجام شده و پس از پمپ کردن و تنظیم دبی و خنک شدن در مبدل حرارتی، مجدداً به بخش آزمایش وارد می‌شد.

## ۳- آماده سازی نانوسیال

سیال پایه روغن موتور از گرید SAE 20W50 انتخاب شد که یکی از پرمصرف‌ترین گریدها محسوب می‌شود. نانوذرات مورد استفاده، نانوالماس سیاه رنگ است که دارای اندازه کریستال اولیه ۴ تا ۶ nm بوده اما اندازه توده‌های مترکم غیر قابل گسست آن حدود ۲۰ تا ۵۰ nm می‌باشد. خلوص پودر نانوالماس در حدود ۵۲ تا ۸۵ 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 دقیقه شروع می‌شود. به‌منظور تهیه نانوسیال همگن و نسبتاً پایدار از دستگاه اولتراسونیک (Starsonic35) با توانایی ایجاد فرکانس ۲۸ تا ۳۴ کیلوهرتز استفاده شد.

در این تحقیق، ۴ نمونه نانوسیال شامل سوسپانسیون‌های روغن موتور - نانوالماس با غلظت‌های جرمی ۰/۲، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد (به ترتیب معادل حدودی ۰/۰۵۴، ۰/۱۳۴، ۰/۲۶۸ و ۰/۵۳۷ درصد حجمی) تهیه و آماده شد.

افت فشار است.

در شکل ۷ مقادیر افت فشار در سه رینولدز انتخابی در غلظت‌های متفاوت نانوذرات برای لوله میکروفین‌دار نشان داده شده است. با توجه به شکل ۷، بوضوح دیده می‌شود که افت فشار با افزایش کسر جرمی نانوذرات در حال افزایش است. چنین روندی در تمام توان‌های دیگر نیز دیده می‌شود. این نتایج از سویی تأیید کننده نتایج تحقیقات [۹] و متمایز از نتایج گزارشات [۱۰، ۸ و ۷] می‌باشد. نکته قابل توجهی که می‌بایستی به آن توجه نمود، خصوصیات سیال پایه هر تحقیق می‌باشد. در اکثر قریب به اتفاق تحقیقات انجام شده در زمینه نانوسیال‌ها از آب به‌عنوان سیال پایه استفاده شده است که به‌طور تقریبی لزجت آن در دمای  $20/2^{\circ}\text{C}$  برابر ۱ سانتی پوز است اما در همین دما لزجت روغن آزمایش شده برابر ۴۶۳ سانتی پوز می‌باشد. اگرچه به این نکته نیز بایستی دقت کرد که لزجت روغن برخلاف آب که تقریباً مستقل از دما است، وابستگی شدیدی به دما دارد.

در شکل‌های ۸ و ۹، نسبت افزایش افت فشار نانوسیال‌ها به افت فشار روغن خالی برای دو غلظت انتخابی به‌نمایش درآمده است. کسرهای جرمی  $0/2$  و  $2$  درصد به‌ترتیب به‌عنوان کمترین و بیشترین غلظت نانوسیال‌های آماده شده انتخاب شده‌اند. دیده می‌شود که در هر دو توان حرارتی و در یک رینولدز مشخص، کسر جرمی بزرگتر نانوذرات باعث افزایش بیشتری در افت فشار درون لوله میکروفین‌دار شده‌اند. این میزان افزایش در کسرهای جرمی بالاتر ( $2\%$ ) و همچنین در توان‌ها و اعداد رینولدز پایین‌تر، بیشتر نمایان می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از نانوسیال در لوله‌های میکروفین‌دار در شارهای کم (که در نتیجه آن دمای نانوسیال روغن - نانوالماس پایین است) و همچنین در رینولدزهای پایین مناسب نمی‌باشد زیرا در مقایسه با افزایش انتقال حرارتی که لوله میکروفین‌دار

ورودی افزایش می‌یابد. در اثر کاهش ضخامت لایه مرزی حرارتی، گرادیان دما در نزدیکی دیواره بیشتر شده و در نتیجه انتقال حرارت بیشتر خواهد شد.

شکل ۴ تغییرات ضریب انتقال حرارت محلی در رینولدزهای مختلف برای نانوسیال یک درصد جرمی را بر حسب فاصله از ورودی برای لوله میکروفین‌دار نشان می‌دهد. در نهایت می‌توان شکل ۵ را برای مقایسه میزان بهبود انتقال حرارت در اثر استفاده از نانوالماس به عنوان افزودنی به روغن موتور در لوله میکروفین‌دار تهیه کرد. در این شکل اعداد نسبت به ضریب انتقال حرارت روغن موتور خالص در همان شار و عدد پکلت رسم شده‌اند. مشاهده می‌شود که بیشترین افزایش در توان حرارتی  $100$  وات در ضریب انتقال حرارت جابجایی مربوط به نانوسیال  $2\%$  حدود  $55\%$  است. این افزایش در اثر دو عامل است؛ یکی وجود میکروفین‌ها و دیگری نانوذرات. همچنین مشاهده می‌شود که تاثیر افزودن نانوذرات الماس به روغن موتور خالص در شارهای پایین‌تر بیشتر است.

در ادامه، نتایج تجربی حاصل از آزمایشات اندازه‌گیری افت فشار در کسرهای جرمی متفاوت تحت توان‌های حرارتی مختلف تولید شده توسط هیتر، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۴-۲- بررسی افزایش افت فشار در هر دو لوله

شکل ۶ نشانگر افزایش افت فشار اندازه‌گیری شده با افزایش عدد رینولدز در دو توان  $100$  و  $500$  وات تولیدی المنت می‌باشد. همانطور که دیده می‌شود، افت فشار با افزایش عدد رینولدز در هر دو شار افزایش می‌یابد. چنین روندی در تمام شارها مشاهده گردید. روند صعودی افت فشار، قابل پیش‌بینی بود. زیرا افزایش دبی (و متعاقباً افزایش رینولدز) عامل افزایش

است که در توان حرارتی ۱۰۰ وات (کوچکترین شار) و نانوسیال ۲٪ اتفاق می افتد.

▪ مشاهده شد که افت فشار با افزایش کسر جرمی نانوذرات در حال افزایش است که این روند افزایش در تمام شارها دیده می شود.

▪ بیشترین نسبت افزایش افت فشار نانوسیال به سیال پایه، در آزمایشات مربوط به نانوسیال ۲٪ تحت کمترین شار و اعداد رینولدز کوچکتر مشاهده شده است. حداکثر این نسبتها حدود ۱۰۰ درصد افزایش را برای افت فشار در  $Re=3$  نشان می دهد.

#### ۶- مراجع

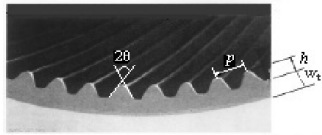
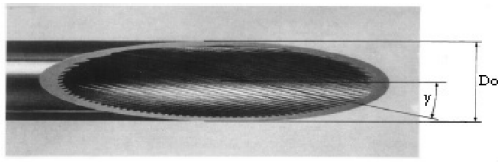
- [1] Bergles, A. E., "Recent development in convective heat transfer augmentation", Applied Mechanics Review, Vol. 26, pp. 675, 1973.
- [2] Fujie, K., Itoh, N., Kimura, H, Nakayama, N. and Yanugidi, T., Heat transfer pipe, US Patent 4044797, assigned to Hitachi Ltd., 1977.
- [3] Masuda, H., Ebata, A., Teramae, K. and Hishinuma, N., "Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (Dispersions of c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, and TiO<sub>2</sub> ultra-fine particles)", Netsu Bussei (Japan), Vol. 4, pp. 227-233, 1993.
- [4] Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Li, S., Thompson, L. J. and Lee, S., "Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids", Nanophase and Nanocomposite Materials II, MRS, Pittsburg, 1997.
- [5] Choi, S.U.S., Zhang, Z. G., Yu, W., Lockwood, F.E. and E.A. Grulke, "Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions",

نسبت به دیگر لوله ها ایجاد می کند، افت فشار به نسبت بیشتری در سیستم ایجاد می شود که نیازمند افزایش توان پمپ و در نتیجه افزایش هزینه ها می شود. بیشترین نسبت افزایش افت فشار، در آزمایشات مربوط به نانوسیال ۲٪ تحت کمترین شار و اعداد رینولدز کوچکتر مشاهده شده است. حداکثر این نسبتها حدود ۱۰۰ درصد افزایش را برای افت فشار در  $Re=3$  نشان می دهد. همچنین با مقایسه شکل های ۸ و ۹، پیداست که افزایش شار باعث کاهش میزان افت فشار در رینولدز ثابت، می شود. دلیل این امر را می توان در اثر دما بر سست شدن پیوند بین نانوذرات و در نتیجه کوچک شدن سایزه ذره (توده نانوذرات) و نیز کاهش لزجت سیال جاری جستجو کرد. آثار سوء حضور نانوذرات با افزایش دما بدلیل همگن تر شدن سوسپانسیون و جایگیری نانوذرات در بین مولکول های سیال پایه، با شدت کمتری اثر افزایش عدد رینولدز را که خود عامل افزایش افت فشار است، تشدید می کنند.

#### ۵- نتیجه گیری

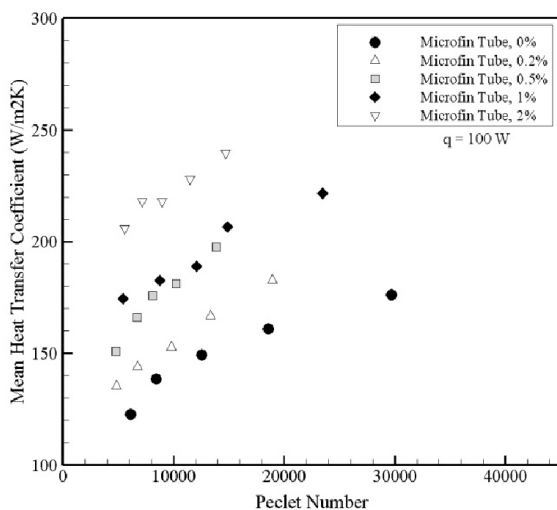
در این مقاله انتقال حرارت جابجایی اجباری و اثر جانبی افزایش افت فشار جریان روغن موتور خالص و نانوسیال در لوله میکروفین دار افقی، بعنوان دو روش افزایش انتقال حرارت، در اعداد رینولدز زیر ۱۰۰ تحت شار ثابت دیواره مورد بررسی قرار گرفت. هنگام استفاده از لوله میکروفین دار و نیز نانوسیال از مطالعات تجربی صورت گرفته، نتایج زیر را می توان برداشت کرد:

- افزایش دبی و در نتیجه عدد پکلت باعث افزایش ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت می شود.
- با افزایش غلظت جرمی ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی افزایش قابل توجهی می یابد. مشاهده می شود که بیشترین افزایش در ضریب انتقال حرارت جابجایی ۵۵٪



$Do=9.52$ mm	قطر بیرونی لوله
$D=8.92$ mm	قطر درونی لوله
$Wt=0.3$ mm	ضخامت دیواره لوله
$hm=0.25$ mm	ارتفاع فین
$p=0.48$ mm	گام فین
$\gamma=150$	زاویه مارپیچ فین
$2\theta=250$	زاویه رأس فین
$n=55$	تعداد فین ها

شکل (۲): مشخصات هندسی لوله میکروفین دار آزمایش شده



شکل (۳): ضریب انتقال حرارت میانگین نانوسیالات بر حسب عدد

پکلت در توان حرارتی ۱۰۰ وات

Applied Physics Letter, Vol. 79 (14), pp. 2252-2254, 2001.

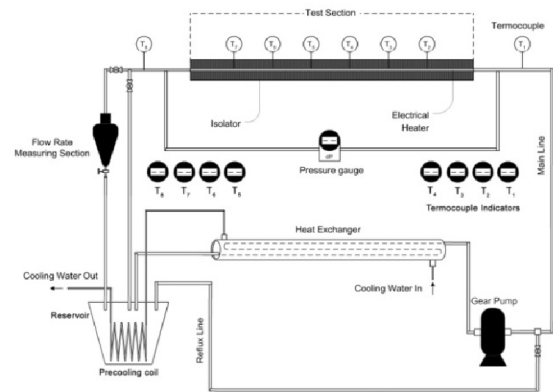
[6] Xuan, Y.M. and Li, Q., "Heat transfer enhancement of nanofluids", International Journal Heat Fluid Flow, Vol. 21, pp. 58–64, 2000.

[7] Xuan, Y. and Li, Q., "Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids", J. Heat Transfer, Vol. 125, pp. 151-155, 2003.

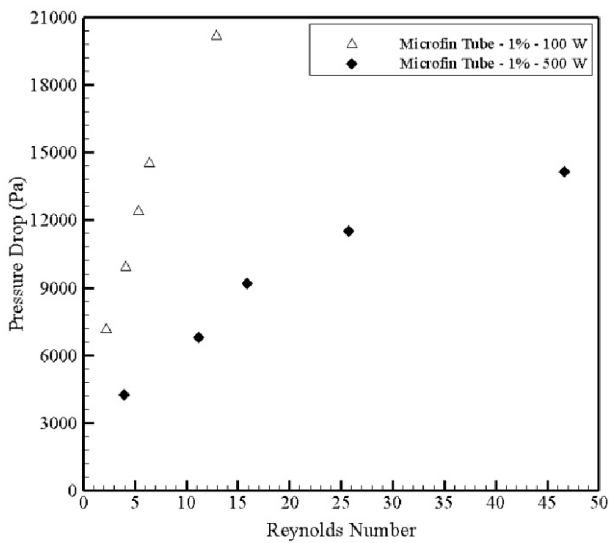
[8] Yurong He, Yi Jin, Haisheng Chen, Yulong Ding, Daqiang Cang and Huilin Lu, "Heat transfer and flow behavior of aqueous suspensions of TiO<sub>2</sub> nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, pp. 2272–2281, 2007.

[9] Ulzie Rea, Tom McKrell, Lin-wen Hu and Jacopo Buongiorno, "Laminar convective heat transfer and viscous pressure loss of alumina-water and zirconia-water nanofluids", International Journal of Heat and Mass Transfer, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.10.025, 2008.

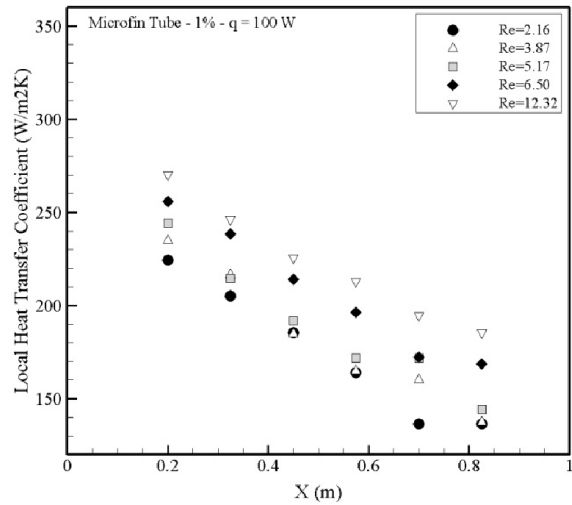
[10] Li Q and Xuan Y., "Convective heat transfer and flow characteristics of Cu-Water nanofluid", Science in China (Series E), Vol. 45 (4), pp. 408–16, 2002.



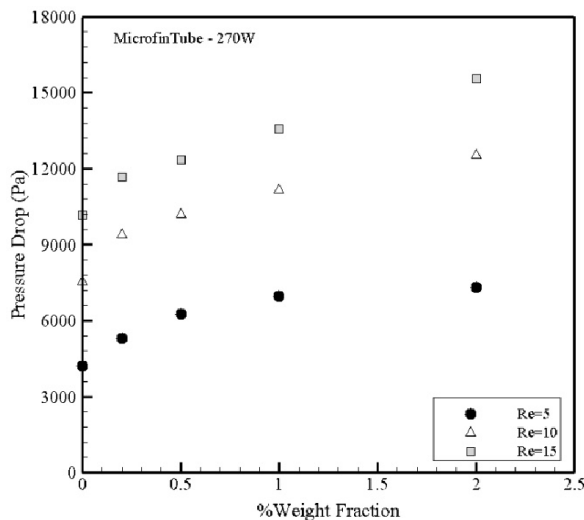
شکل (۱): طرحواره سیستم آزمایشی



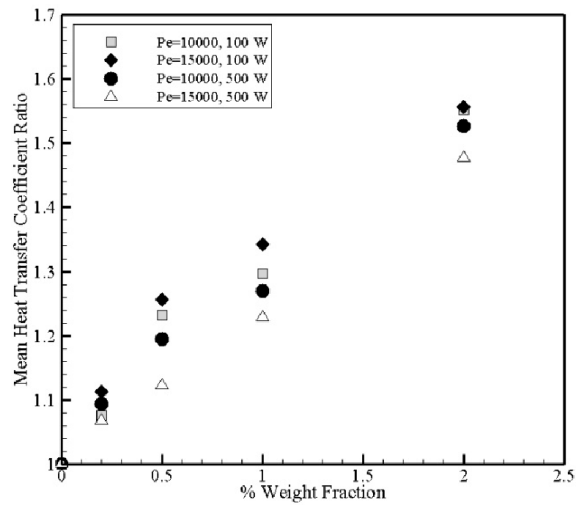
شکل (۶): افت فشار جریان نانوسیال با غلظت ۱ درصد جرمی با عدد رینولدز در توان حرارتی ۱۰۰ و ۵۰۰ وات



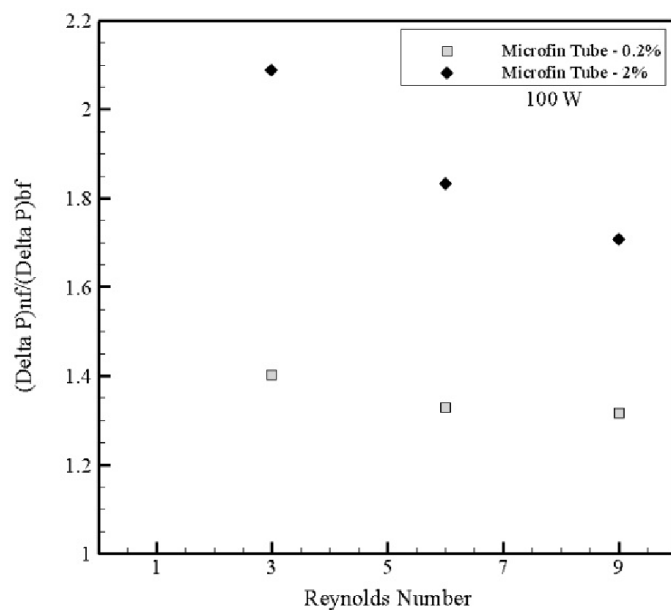
شکل (۴): تغییرات ضریب انتقال حرارت محلی بر حسب فاصله از ورودی لوله برای نانوسیال ۱٪ در توان ۱۰۰ وات



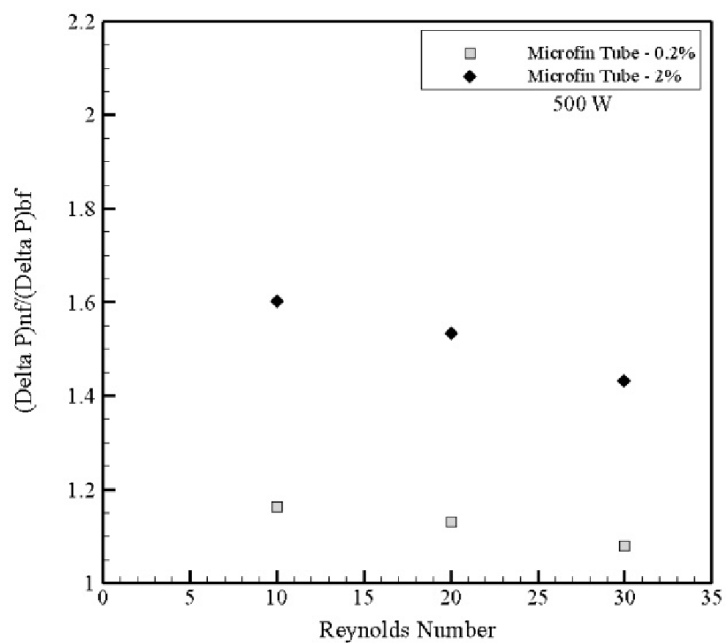
شکل (۷): افزایش افت فشار در لوله میکروفین دار بر اثر افزایش غلظت نانوذرات در توان ۲۷۰ وات



شکل (۵): ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین نسبی بر حسب درصد جرمی در اعداد پکلت و شارهای مختلف



شکل ۸: نسبت افت فشار نانوسیال‌ها به سیال پایه در رینولدز-های مشخص برای لوله میکروفین‌دار در شار حرارتی ۱۰۰ وات



شکل ۹- نسبت افت فشار نانوسیال‌ها به افت فشار سیال پایه در رینولدزهای مشخص برای لوله میکروفین‌دار تحت توان حرارتی ۵۰۰ وات