مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر ۱۳۹۳، دوره ۱۴، شماره ۷، ص‌ص ۱۰۹-۱۱۶

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی جابجائی اجباری نانوسیال درون یک لوله افقی حاوی ماده متخلخل

محسن نظری[۱*]، مجتبی آشوری[۲]، محمدحسن کیهانی[۳]

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود

۳- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود

* شاهرود، صندوق پستی ۳۶۱۹۹۹۵۱۶۱، mnazari@shahroodut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۰۴ بهمن ۱۳۹۲
پذیرش: ۲۵ بهمن ۱۳۹۲
ارائه در سایت: ۲۵ مرداد ۱۳۹۳

کلید واژگان:
انتقال حرارت
نانوسیال
مطالعه تجربی
ماده متخلخل

چکیده

در این مقاله انتقال حرارت آب و نانو سیال آب- آلومینا در یک لوله دما ثابت حاوی ماده متخلخل در محدوده رینولدز ۷۰۰ تا ۵۰۰۰ به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به مطالعات انجام شده، انتقال حرارت نانوسیال در لوله حاوی ماده متخلخل با دمای ثابت به طور کامل بررسی نشده و مطالعات عمیق‌تری در این خصوص نیاز است. در این آزمایش، نانو سیال آب- آلومینا در درصد حجمی‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. پس از اندازه‌گیری دمای ورودی و خروجی لوله، عدد ناسلت متوسط برای هر درصد حجمی محاسبه و همزمان افت فشار در لوله نیز اندازه‌گیری می‌شود. با تکرار آزمایش، نتایج بدست آمده بوسیله روابط آماری در بازه اطمینان نمایش داده می‌شوند. صحت‌سنجی نتایج نیزبا استفاده از روابط تئوری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نمایانگر افزایش انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه است. انتقال حرارت جابجایی در لوله حاوی ماده متخلخل فلزی به عنوان راه‌کاری جدید برای افزایش انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج لوله متخلخل نشان دهنده افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت جابجایی تا حدود دو برابر، در مقایسه با لوله خالی است. اثرات همزمان انتقال حرارت و افت فشار نیز در لوله حاوی ماده متخلخل در نسبت‌های تخلخل مختلف ارائه و مورد بررسی قرار می‌گیرد.

Experimental investigation of forced convection of nanofluids in a horizontal tube filled with porous medium

Mohsen Nazari[1*], Mojtaba Ashouri[2], Mohammad Hasan Kayhani[3]

1- Department of Mechanical Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran
3- Department of Mechanical Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran
* P.O.B. 3619995161Shahrood, Iran, mnazari@shahroodut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 24 January 2014
Accepted 14 February 2014
Available Online 16 August 2014

Keywords:
Heat transfer
Nanofluids
Experimental study
Porous medium

ABSTRACT

Heat transfer of Alumina/water nanofluids in a uniform-temperature porous pipe has been investigated in a wide range of Reynolds number, i.e. 700<Re<5000. Investigation of force convective heat transfer of nanofluids in a porous pipe with uniform wall temperature has not been considered completely in the literature. In this experimental study, Alumina nanofluids with different volume fractions have been completely employed. By measuring the nanofluid temperatures, the Nusslet numbers have been reported as a function of the Reynolds number. Also, the pressure drop of nanofluids inside the porous pipe has been measured. The accuracy of the experimental results has been also validated by the presented theoretical formulas in the literature. The result shows a considerable increase in the Nusslet number by using nanofluids instead of water. Convective heat transfer of a porous pipe has been also studied as a novel method to increase the heat transfer rate. The related results show a significant increase in the heat transfer in the presence of porous medium. Both heat transfer and pressure drop of nanofluids in the porous pipe have been also reported and discussed.

۱- مقدمه

افزایش راندمان و بهبود مصرف انرژی در صنایع همواره مورد توجه محققان بوده است. بهبود انتقال حرارت درسیستم‌های گرمایشی و سرمایشی نیز از این قاعده مستثنی نیست، از این رو تحقیقات گسترده‌ای برای استفاده از سیالات جایگزین بجای سیالات متداول نظیر آب و اتیلن گیلکول، که بتواند خواص حرارتی مناسب‌تری را بروز دهد انجام شده است. از سوی دیگر خواص چند برابری هدایت حرارتی فلزاتی نظیر مس و آلومینیوم در مقایسه با مایعات متداول باعث شده تا ایده پخش کردن ذرات فلزی در مایعات توسط ماکسول[۱] مطرح شود. اما می‌توان گفت چوی و ایستمن [۲] و ماسودا و همکاران [۳] اولین محققانی بودند که نانوسیالات در معنای امروزی را مورد استفاده قرار دادند نانوسیالات در معنای امروزی را می‌توان سیالاتی دانست که ذرات بسیار ریز در حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر، در داخل سیال پایه مانند آب و یا اتیلن گیلکول پایدار شده‌اند [۴]. نانوسیالات در سال‌های گذشته در بسیاری از عرصه‌های مهندسی مانند سیستم‌های خورشیدی [۵]، خنک کاری قطعات

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Nazari, M. Ashouri, M.H. Kayhani, Experimental investigation of forced convection of nanofluids in a horizontal tube filled with porous medium, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 109-116, 2014 (In Persian)

الکترونیکی، کاربردهای پزشکی، پیل‌های سوختی، راکتورهای هسته‌ای [۶] و افزایش راندمان سیستم‌های حرارتی [۷] مورد توجه قرار گرفته‌اند. تحقیقات گسترده‌ای در زمینه خواص این سیالات در شرایط مختلف به صورت آزمایشگاهی و عددی انجام گرفته که بسیاری از آنها نمایانگر افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه است.

لی و همکاران [۸]هدایت حرارتی نانوسیال آلومینا و اکسید مس در سیال پایه آب و اتیلن گیلکول را اندازه‌گیری نمودند. نتایج آنها نمایانگر افزایش قابل ملاحظه هدایت حرارتی نانوسیال در مقایسه با سیال پایه است. ژاون و لی [۹] هدایت حرارتی نانوسیال آب/اکسید مس و روغن/اکسید مس در غلظت‌های حجمی ۱/۲۴ تا ۱/۷۸ را بصورت آزمایشگاهی و تحلیلی مورد بررسی قرار داده‌اند، نتایج آن‌ها افزایش ۲/۵ تا ۷/۵ درصدی در ضریب هدایت حرارتی نانوسیال را نشان داده است. نتایج مشابه در زمینه افزایش هدایت حرارتی نانوسیالات، توسط داس و همکاران [۱۰] و ژی و همکاران [۱۱] ارائه شده است.

انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات بدلیل کاربردهای گسترده‌ای که در صنعت دارند توجه محققان را به خود جلب کرده است. تحقیقات گسترده‌ای بر روی تأثیر پارامترهای مختلف از جمله جنس و اندازه نانوپودر مورد استفاده بر روی انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات انجام شده است. لی و همکاران [۱۲] افزایش عدد ناسلت را در برابر افزایش غلظت نانوسیال اکسید مس/آب را مشاهده نمودند. در نشست سالیانه انجمن مهندسان مکانیک آمریکا، چوی [۲] افزایش دو برابری ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات با افزایش ده برابری دبی حجمی سیال نشان داد. یافته‌های زینالی و همکاران [۱۳] نیز از افزایش انتقال حرارت جابجایی را در برابر افزایش غلظت حجمی نانوسیالدر محدوده جریان آرام در لوله دایروی افقی با دمای دیواره ثابت حکایت می‌کند. کیهانی و همکاران [۱۵،۱۴] به بررسی انتقال حرارت جابجایی و افت فشار نانوسیال آب- آلومینا و تیتانیم- آب در محدوده گسترده‌ای از غلظت‌های ۰/۱ تا ۲ درصد در سیال پایه آب درون لوله مستقیم با شار حرارتی ثابت پرداخته‌اند. نتایج وی نشان دهنده افزایش۲۶درصدی برای آب- آلومینا و ۸ درصدی برای تیتانا/آب با غلظت ۲ درصد است. افزایش۳۳ و ۴۰ درصدی ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال کربنی با غلظت حجمی ۰/۲۵ درصد و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به سیال پایه به ترتیب برای جریان آرام و آشفته در یک لوله تحت شار ثابت نیز توسط امراللهی و همکاران [۱۶] نشان داده شده است. کیم و همکاران [۱۷] انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آلومینا و کربنی در رژیم‌های جریان آشفته و آرام درون یک لوله تحت شار حرارتی ثابت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نیز افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت جابجایی نسبت به سیال پایه را نشان می‌دهد. آنها همچنین نشان دادند که افزایش انتقال حرارت جابجایی نانوسیال بسیار بیشتر از درصد افزایش هدایت حرارتی این سیالات است. هیهات و همکاران [۱۹،۱۸] تحقیقی را بر روی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آب- آلومینا در لوله خالی با شارثابت در محدوده جریان آرام و آشفته انجام دادند که نتایج آنها نیز از افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت جابجایی در اثر استفاده از نانوسیال حکایت می‌کند. همچنین مطالعه‌ای بر روی مکانیزم‌ها و دلایل افزایش انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات توسط چاندرسکار و سورش [۲۰] و کاکا و پرماژونکی [۲۱] ارائه شده است. استفاده از محیط‌های متخلخل سلول باز از شیوه‌های جدیدی است که برای افزایش انتقال حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۳،۲۲]. تحقیقات انجام شده مخصوصا در زمینه بررسی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال در محیط متخلخل بصورت آزمایشگاهی بسیار محدود هستند و می‌توان گفت این تحقیق از اولین پژوهش‌هایست که در این زمینه انجام شده است. مغربی و همکاران [۲۴] نیز به بررسی عددی تأثیر نانوسیال بر انتقال حرارت جابجایی اجباری درون لوله متخلخل پرداخته‌اند. همچنین حاجی پور و مولائی [۲۵] انتقال حرارت نانوسیال آب- آلومینا در لوله‌ی متخلخل عمودی، تحت شار ثابت را به دو صورت آزمایشگاهی و عدد مورد بررسی قرار داده‌اند. حداکثر افزایش ۲۰ درصدی انتقال حرارت نانوسیال با غلظت حجمی ۰/۳٪ نسبت به سیال پایه در لوله متخلخل توسط این محققان گزارش شده است. با توجه به تأثیر تخلخل بر انتقال حرارت، این محققان پیشنهاد کاربردهایی همچون مبدل‌های متخلخل و سیستم‌های خورشیدی را مطرح می‌کنند.

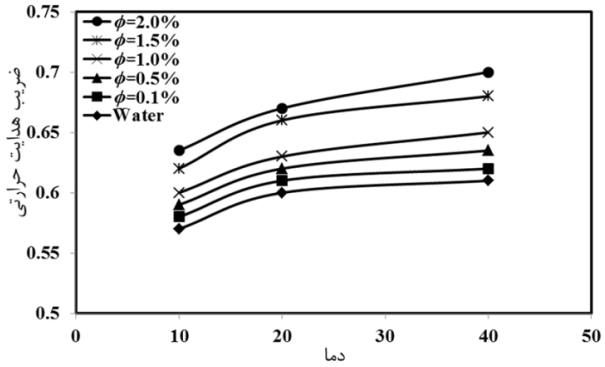
با توجه به مطالعات انجام شده، بررسی انتقال حرارت نانوسیال در ماده متخلخل در شرایط دما ثابت بصورت آزمایشگاهی بررسی نشده است. در این مقاله ضریب انتقال حرارت جابجایی و افت فشار نانوسیال آب- آلومینا درون لوله‌ی افقی دما ثابت (حاوی ماده متخلخل) بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نانوپودر با اندازه متوسط ۴۰ نانومتر جهت ساخت نانوسیال در درصدهای حجمی مختلف بکار گرفته شده است. برای افزایش دقت آزمایشات هر تست سه مرتبه انجام و نتایج حاصل از آزمایشات بصورت بازه اطمینان[1] نمایش داده شده است. نتایج بدست آمده با نتایج سیال پایه مقایسه و برای صحت سنجی، نتایج لوله خالیبا روابط تئوری سیال تک فاز مقایسه می‌شوند. اهداف این تحقیق را می‌توان بصورت زیر خلاصه نمود:

- مقایسه انتقال حرارت لوله حاوی ماده متخلخل با لوله خالی
- مقایسه انتقال حرارت نانوسیال و سیال پایه
- محاسبه افت فشار نانوسیال و مقایسه آن با سیال پایه
- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با روابط تئوری موجود و اعتبارسنجی آزمایشات

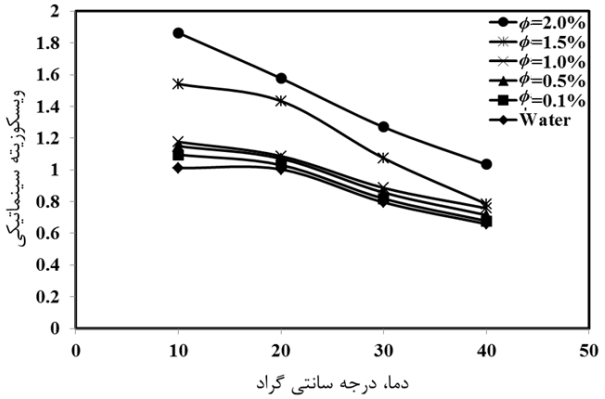
۲- آماده سازی نانوسیال

آماده‌سازی نانوسیالات اولین قدم در افزایش انتقال حرارت نانوسیالات محسوب می‌شود. دو روش برای تولید نانوسیالات بکار گرفته می‌شود، روش تک مرحله‌ای و روش دو مرحله‌ای، در روش دو مرحله‌ای نانوپودر تهیه شده با روش آلتراسونیک در سیال پایه پایدار می‌شود. ایستمن و همکاران [۲۶] ولی و همکاران [۸] از جمله کسانی بودند که از روش دو مرحله‌ای برای تولید نانوسیال آب- آلومینا استفاده کردند. نانوذرات دیگری همچون طلا، نقره، نانولوله‌های کربنی و سیلیکا با این روش تولید ودر سیال پایه پایدار شده‌اند. در این مقاله از روش دو مرحله‌ای برای تهیه نانوسیال استفاده شده است، بدین ترتیب که نانوپودر آلومینا با اندازه متوسط ۴۰ نانومتر که توسط شرکت نانو و آمورفوس[2] آماده شده توسط دستگاه آلتراسونیک با قدرت ۴۰۰ وات و ۴۰ کیلوهرتز در سیال پایه (آب مقطر) در مدت ۳ ساعت پایدار می‌شود. نانوسیال آماده شده با این روش، حداقل به مدت ۴۸ ساعت بدون هیچ ته‌نشینی، کلوخه شدن، تغییر رنگ و به صورت کاملا شیری رنگ پایدار می‌ماند. باید توجه داشت که برای جلوگیری از تغییر خواص حرارتی نانوسیال هیچ گونه ماده اضافی یا پایدار کننده به سیال اضافه نشده است. نانوسیال در درصدهای حجمی مختلف آماده و مورد آزمایش قرار گرفته است. اندازه‌گیری خواص حرارتی نانوسیال از جمله ویسکوزیته و هدایت حرارتی برای استفاده در محاسبات بسیار مهم است. در این مقاله، خواص ترموفیزیکی نانوسیال با روش آزمایشگاهی استخراج و در محاسبات مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۱ و شکل ۲ به ترتیب نمایانگر ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته سینماتیکی نانوسیال آب- آلومینا تابعی از دما در غلظت حجمی‌های متفاوت است که توسط مؤلفین در مرجع [۱۴] نیز گزارش شده است.

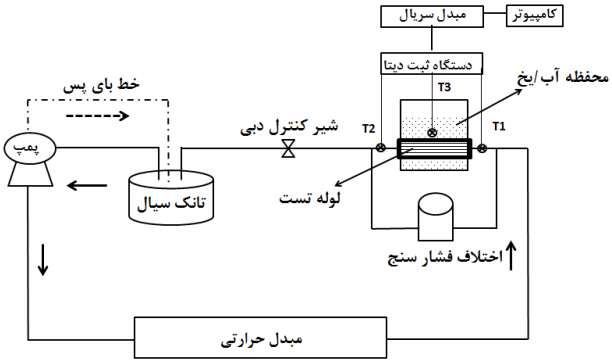
1- Confidence Interval
2- Nanostructure & Amorphous Materials



شکل ۱ ضریب هدایت نانوسیال آب- آلومینا تابعی از دما در غلظت حجمی‌های متفاوت [۱۴]



شکل ۲ ویسکوزیته سینماتیکیآب- آلومینا تابعی از دما در غلظت حجمی‌های متفاوت[۱۴]



(الف)

(ب)

شکل ۳ الف) شماتیک سیستم آزمایشگاهی؛ ب) مقطع لوله متخلخل مورد آزمایش

۳- دستگاه آزمایشگاهی

انتقال حرارت و افت فشار نانوسیالآب- آلومینا درون لوله‌ای با قطر ۲ سانتی متر، طول ۴۰ سانتی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متری باشرایط مرزی دمای ثابت در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین دو لوله متخلخل سلول باز با تخلخل ۵۰ و ۶۳ درصد با شرایط مشابه برای آزمایش لوله متخلخل بکار گرفته شده است. لوله متخلخل با روش "جایگذاری خارج شونده‌ها" ساخته و از نمک با اندازه ۳ تا ۵ میلی‌متر بعنوان عامل خارج‌شونده استفاده شده است.

شماتیکی از سیستم مورد استفاده در شکل ۳- الف مشاهده می‌شود.همچنین مقطع لوله متخلخل نیز درشکل ۳- ب نشان داده شده است. به منظور ثابت نگاه داشتن دمای دیواره، لوله از درون یک محفظه آب/یخ قرار عبور داده شده است. سیال عامل پس از عبور از لوله وارد تانک سیال شده، سپس به منظور تثبیت دمای ورودی لوله، سیال توسط پمپ به سمت مبدل حرارتی هدایت می‌شود. آب شهر با دمای ثابت به عنوان سیال فعال در مبدل حرارتی مورد استفاده قرار گرفته تا دمای ورودی لوله بر روی ۲۴ درجه سانتی‌گراد با حداکثر اختلاف ۰/۵± درجه سانتی‌گراد ثابت نگاه داشته شود. برای شروع هر آزمایش می‌بایست نرخ جریان اندازه‌گیری و به دنبال آن سرعت و عدد رینولدز جریان محاسبه شود. بدین منظور، اندازه‌گیری جریان پس از خروج سیال از قسمت تست با دقت ۱± میلی‌لیتر بر ثانیه انجام می‌شود. کنترل جریان نیز توسط شیر خط بازگشت پمپ انجام می‌شود.

برای اندازه‌گیری دمای ورودی و خروجی دو سنسور هر یک در ابتدا و انتهای قسمت تست قرار گرفته است. به منظور اطمینان از دقیق بودن دمای متوسط سیال در ورودی و خروجی این سنسورها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که دقیقا در قسمت میانی سطح مقطع لوله تست قرار گرفته باشند. یک سنسور نیز درون محفظه آب/یخ به منظور کنترل ثابت نگاه داشتن دمای آب محفظه و به تبع آن دمای دیواره لوله استفاده شده است. ضمنا دمای دیواره لوله نیز به منظور اطمینان از ثابت بودن آن در حین آزمایش به کمک سنسور دما کنترل می‌شود. سنسورهای مورد استفاده از نوع سنسورهای مقاومتی پی تی ۱۰۰ ساخت شرکت جمو المان می‌باشد که با دقت ۰/۱± درجه سانتی‌گراد کالیبره شده‌اند. دماهای اندازه‌گیری شده توسط دستگاه ثبت اطلاعات ADAM4015 نگهداری و بواسطه مبدل سریال به پورت ADAM4561 به رایانه منتقل می‌شوند. همچنین اندازه‌گیری افت فشار در طول لوله آزمایش با استفاده از دستگاه LD301انجام می‌شود. نتایج هر آزمایش پس از پایا شدن دماهای سیستم، پس از حداقل ۲۰ دقیقه از شروع هر آزمایش، ثبت شده و برای افزایش دقت هر تست سه مرتبه انجام و نتایج بدست آمده به‌صورت بازه اطمینان با دقت ۹۵ درصد آماری نمایش داده می‌شود.

۴- تحلیل داده‌ها

۴-۱- فرمول‌بندی

یکی از بهترین شیوه‌های برای بررسی عملکرد حرارتی یک سیستم، بررسی ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت جریان است. ضریب جابجایی را می‌توان به صورت رابطه ۱ تعریف نمود:

$$h = \frac{q}{A\Delta T_b} \qquad (۱)$$

که در آن q حرارت دفع شده از سیال در طول لوله تست، A مساحت دیواره لوله و ΔT_b اختلاف میانگین بین دمای دیواره و مرکز لوله بین ورودی و خروجی است. انرژی دفع شده از سیستم را می‌توان به صورت رابطه ۲ تعریف کرد:

$$q = \dot{m} c_{\text{peff}} (T_{\text{in}} - T_{\text{out}}) \qquad (۲)$$

که در آن c_{peff}ضریب ظرفیت گرمایی ویژه متوسط نانوسیال است [۲۷]:

$$c_{\text{peff}} = \frac{(1-\phi_{\text{n}})(\rho c)_{\text{bf}} + \phi_{\text{n}}(\rho c)_{\text{n}}}{(1-\phi_{\text{n}})(\rho)_{\text{bf}} + \phi_{\text{n}}(\rho)_{\text{n}}} \qquad (۳)$$

دمای بالک جریان نیز از روش LMTD[1] محاسبه می‌شود:

1- Long Mean Temperature Difference

$$\Delta T_b = \ln \frac{T_w - T_{in}}{T_w - T_{out}} \quad (۴)$$

که T_w دمای دیواره لوله، T_{in} و T_{out} به ترتیب دماهای سیال در ورودی و خروجی لوله هستند. بنابراین ضریب جابجایی بصورت رابطه ۵ تعریف می‌شود:

$$h = \frac{\dot{m} c_{peff} \left(T_{in} - T_{out}\right)}{A \ \ln \frac{T_w - T_{in}}{T_w - T_{out}}} \quad (۵)$$

در نهایت می‌توان عدد ناسلت جریان را به صورت رابطه ۶ محاسبه نمود:

$$\mathrm{Nu} = \frac{hD}{k_{eff}} \quad (۶)$$

که D قطر لوله و k_{eff} ضریب هدایت متوسط سیال است که بصورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری و در شکل ۲ نشان داده شده است.

۴-۲- صحت سنجی نتایج

به منظور صحت‌سنجی نتایج بدست آمده، از روابط تئوری لوله بدون ماده متخلخل استفاده می‌شود. ابتدا باید محدوده جریان از نظر توسعه یافتگی و طول ورودی تعیین شود. معادلات ذکر شده در رابطه ۷ به ترتیب مربوط به طول ورودی جریان آرام و آشفته می‌باشند [۲۸]:

$$\frac{l_e}{D} = 0.06\,\mathrm{Re}$$
$$\frac{l_e}{D} = 4.4\,\mathrm{Re}^{\frac{1}{6}} \quad (۷)$$

با در نظر گرفتن مشخصات لوله آزمایش (بدون ماده متخلخل) و استفاده از رابطه ۷، واقع شدن جریان آرام (با رینولدز کمتر از ۲۳۰۰) در محدوده طول ورودی لوله مشخص است. رابطه ۸ عدد ناسلت جریان آرام در یک لوله با دمای ثابت در محدوده طول ورودی که توسط [۲۹] بدست آمده را نشان می‌دهد:

$$\mathrm{Nu}_D = 3.66 + \frac{0.0668\left(\frac{D}{L}\right)\mathrm{Re}_D \mathrm{Pr}}{1 + 0.04\left[\left(\frac{D}{L}\right)\mathrm{Re}_D \mathrm{Pr}\right]^{\frac{2}{3}}} \quad (۸)$$

همچنین رابطه گیلینسکی نیز برای جریان آشفته در قسمت کاملا توسعه یافته لوله به صورت رابطه ۹ تعریف می‌شود [۱۵]:

$$\mathrm{Nu}_D = \frac{\frac{f}{8}(\mathrm{Re}-1000)\mathrm{Pr}}{1 + 12.7\sqrt{\frac{f}{8}}\left(\mathrm{Pr}^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr}_w}\right)^{0.11} \left[1 + \left(\frac{D}{L}\right)^{\frac{2}{3}}\right] \quad (۹)$$

این رابطه برای بازه $۵.۱۰^{۶}$>عدد رینولدز>۲۳۰۰ و $۱۰^{۶}$>پرانتل>۰/۵ تعریف شده، که در آن fضریب دارسی و به صورت رابطه ۱۰ نوشته می‌شود:

$$f = \frac{1}{\left(1.82\log_{10}\mathrm{Re} - 1.64\right)^2} \quad (۱۰)$$

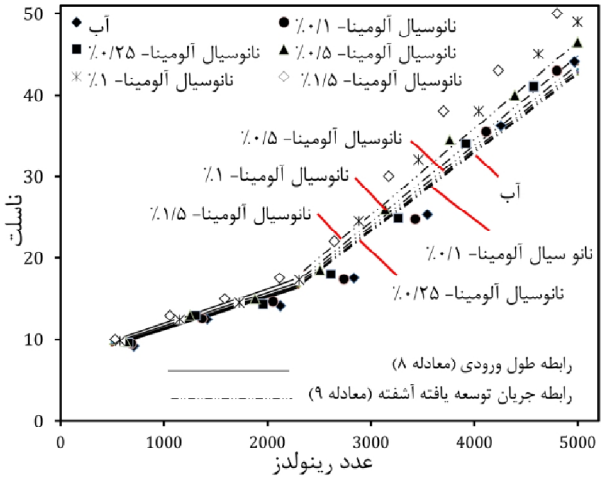
شکل ۴ مقایسه‌ی نتایج بدست آمده از آزمایش انجام شده (در لوله خالی) را با روابط ذکر شده نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج بدست آمده هم در جریان آرام و هم در جریان درهم، انطباق نزدیکی با روابط گزارش شده دارد.

بدلیل تأثیر افت فشار جریان در مصرف انرژی، این پارامتر در کاربردهای صنعتی از اهمیت زیادی برخوردار است. افت فشار ناشی از سیال در سیستم مورد آزمایش توسط لوله فرعی که در که در ابتدا و انتهای مسیر لوله نصب شده‌اند اندازه‌گیری و ثبت شده است. برای اعتبارسنجی نتایج بدست آمده، نتایج آزمایش سیال پایه (آب) با رابطه تئوری موجود مقایسه می‌شود.

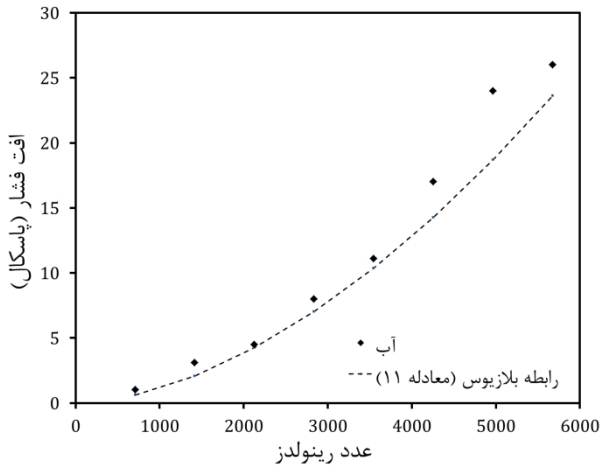
رابطه ۱۱ معادله بلازیوس و ضریب اصطکاک مربوط به آن را نشان می‌دهد:

$$\Delta P = f_r\left(\frac{L}{D}\right)\left(\frac{\rho U^2}{2}\right)$$
$$f_r = 0.316\,\mathrm{Re}_d^{-0.25} \quad (۱۱)$$

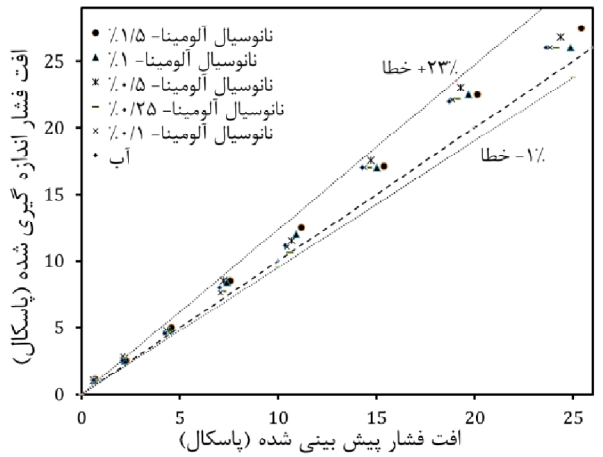
شکل ۵ افت فشار تجربی آبدرون لوله خالی را نشان می‌دهد. رابطه ۱۱ برای آب نیز در این نمودار نشان داده شده است. نتایج بدست آمده برای آزمایش آب (در داخل لوله) با رابطه بلازیوس اختلاف زیادی را نشان نمی‌دهند.



شکل ۴ مقایسه عدد ناسلت تجربی نانوسیال با روابط تئوری موجود



شکل ۵ افت فشار آب در برابر عدد رینولدز و مقایسه آن با رابطه بلازیوس



شکل ۶ افت فشارتجربی در برابر افت فشار پیش‌بینی شده توسط رابطه ۱۱

شکل ۶ نتایج تجربی افت فشار نانوسیال و آب را در برابر نتایج تئوری (افت فشار پیش‌بینی شده از رابطه ۱۱ نشان می‌دهد. این شکل نیز برای لوله بدون ماده متخلخل نمایش داده شده است تا انحراف نتایج تجربی از روابط تئوری نشان داده شود. محدوده پراکندگی نتایج تجربی نسبت به نتایج تئوری توسط این نمودار گزارش شده است. سجادی و کاظمی [۳۰] و پنگ و همکاران [۳۱] نیز مشابه این نتایج را برای نانوسیال در لوله خالی مشاهده کرده‌اند.

۴-۳- انتقال حرارت در لوله بدون ماده متخلخل

در این قسمت عدد ناسلت متوسط در لوله (بدون ماده متخلخل) محاسبه و نتایج آن بصورت تابعی از عدد رینولدز به نمایش در آمده است. ابتدا لازم است تعریف عدد رینولدز مورد استفاده برای لوله‌های آزمایش بیان شود:

$$\mathrm{Re} = \left(\frac{\rho}{\mu}\right)_{\mathrm{eff}} UD \qquad (۱۲)$$

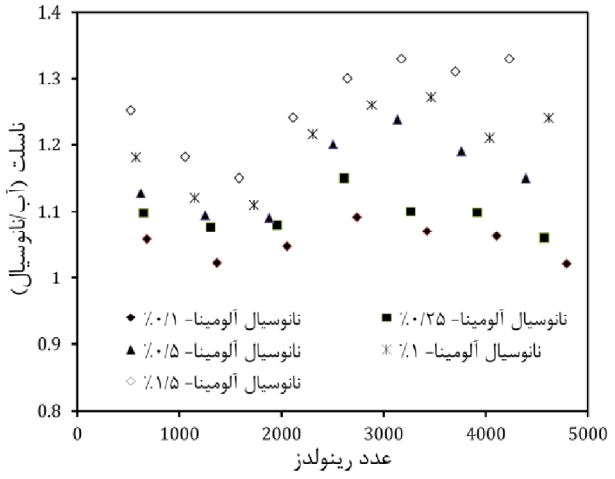
ρ و μ دانسیته و ویسکوزیته سیال و U سرعت متوسط سیال در لوله است که از محاسبه دبی حجمی در سیکل بسته بدست می‌آید. همان‌طور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود افزایش غلظت نانوسیال منجر به افزایش انتقال حرارت و افزایش عدد ناسلت می‌شود. نتایج تجربی نشان می‌دهد که در اعداد رینولدز بزرگ، تغییرات عدد ناسلت نانوسیال (در مقایسه با سیال پایه) در برابر عدد رینولدز قابل ملاحظه نیست. این نتیجه توسط بسیاری از مولفین گزارش شده است که از آن جمله می‌توان به [۱۴]، [۱۵] و [۱۹] اشاره کرد، که احتمالا به دلیل وجود تلاطم و حرکات تصادفی نانوذرات است. در قسمت بعدی مقاله، نتایج لوله حاوی ماده متخلخل با شکل ۷ مقایسه خواهد شد. همان‌طور که گفته شد به منظور افزایش دقت، هر آزمایش سه مرتبه انجام و نتایج آن به همراه بازه اطمینان ۹۰ درصدی (با استفاده از نمودار توزیع آماری T-Student) روی نمودار به نمایش در آمده که حاکی از خطای قابل قبول در مقادیر اندازه‌گیری در هر آزمایش است. شکل ۷ میزان افزایش عدد ناسلت جریان نانوسیال نسبت به سیال پایه (آب) را در لوله خالی نشان می‌دهد. بیشترین انتقال حرارت جابجایی (در حدود ۳۲٪) برای نانوسیال آب- آلومینا ۱/۵ درصد رخ داده است. روند تغییرات عدد ناسلت (نانوسیال نسبت به سیال پایه) در کسر حجمی‌های بالا می‌تواند در اثر بالا رفتن درصد حجمی نانوذرات در سیال پایه باشد که در بررسی تجربی کیهانی و همکاران [۱۵] نیز چنین رفتاری در مورد نانوسیال اکسید تیتانیوم در غلظت حجم‌های بالای یک درصد گزارش شده است.

۴-۴- انتقال حرارت در لوله حاوی ماده متخلخل

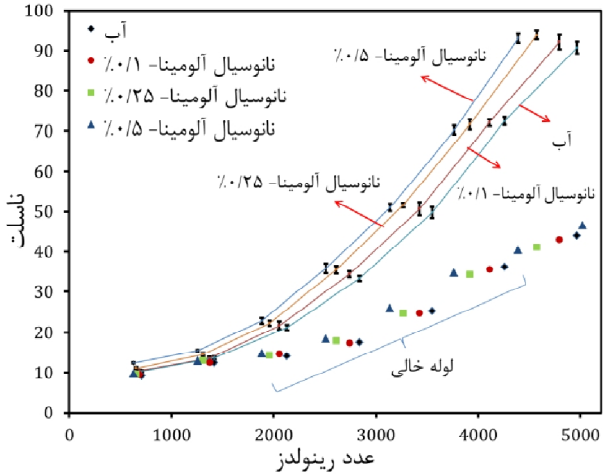
استفاده از محیط‌های متخلخل سلول باز جزء روش‌های جدید برای افزایش انتقال حرارت یک سیستم هستند. در این مقاله نانوسیال آب- آلومینا با سه درصد حجمی متفاوت ۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۵ در لوله‌ی متخلخل با تخلخل ۵۰ و ۶۳ درصد مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۸ عدد ناسلت را به صورت تابعی از عدد رینولدز برای لوله خالی و لوله حاوی ماده متخلخل نشان می‌دهد.

نتایج بدست آمده نمایانگر تأثیر غلظت حجمی نانوسیال بر انتقال حرارت، برای هر دو لوله خالی و متخلخل است. برخی از علت‌های احتمالی افزایش انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه را می‌توان به این ترتیب خلاصه نمود:

سوسپانسیون نانوذرات می‌تواند ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی سیالات پایه را تغییر دهد. از طرفی حرکت نانوذرات منجر به شتاب یافتن فرایند انتقال انرژی می‌شود.



شکل ۷ درصد افزایش ناسلت نانوسیال نسبت به آب در برابر عدد رینولدز



شکل ۸ عدد ناسلت نانوسیال در محیط متخلخل تابعی از عدد رینولدز

همچنین نفوذ و پراکندگی ذرات نانو بخصوص 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 بروانی نانوذرات، خواص ترموفیزیکی و مکانیزم انتشار نانوذرات را به عنوان یکی از فاکتورهای افزایش انتقال حرارت در سوسپانسیون نانوسیال معرفی می‌کنند[۲۱،۲۰].

همچنین نتایج از افزایش قابل ملاحظه عدد ناسلت متوسط (حدود دو برابر) در محیط متخلخل نسبت به لوله خالی حکایت می‌کند. دلیل این افزایش می‌تواند معلول عوامل مختلفی از جمله افزایش سطح تماس سیال و ماده متخلخل فلزی باشد. همچنین تماس نانوذرات با سطوح ماده متخلخل سبب می‌شود تا افزایش انتقال حرارت در اثر استفاده از نانوسیال در لوله متخلخل بیشتر از لوله خالی باشد. حداکثراین افزایش برای نانوسیال ۰/۱ و ۰/۲۵ به ترتیب برای لوله خالی ۸ و ۱۱ درصد می‌باشد در حالی که برای لوله متخلخل ۹ و ۱۷ درصد اندازه‌گیری شده است. افت فشار نانوسیال در لوله متخلخل نیز در طی آزمایش اندازه‌گیری و ثبت شده است. افزایش شدید افت فشار لوله متخلخل نسبت به لوله خالی بخصوص در اعداد رینولدز بالا مشهود است، که می‌تواند در اثر مقاومت اصطکاکی محیط متخلخل باشد.

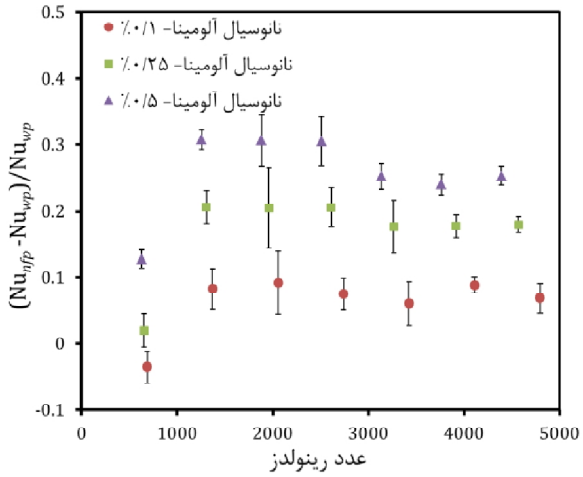
شکل ۹ و شکل ۱۰ نشانگر میزان افزایش انتقال حرارت نانوسیال (nf) نسبت به سیال پایه (w)، در محیط متخلخل با تخلخل ۵۰ و ۶۳ درصد هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش غلظت حجمی منجر به افزایش

انتقال حرارت می‌شود در حالی که تغییرات عدد رینولدز (به خصوص در مقادیر بزرگ) تأثیر شدیدی بر افزایش انتقال حرارت نمی‌گذارد. حداکثر افزایش انتقال حرارت برای نانوسیال آب- آلومینا ۰/۵٪ در حدود ۳۰ درصد برای تخلخل ۵۰٪ و حداکثر ۲۳٪ برای تخلخل ۶۳٪ است.

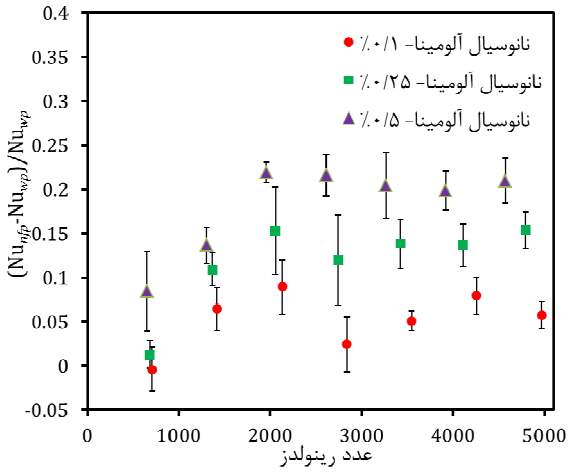
افزایش افت فشار نانوسیال نسبت به سیال پایه که در نتایج آزمایش بخصوص در لوله متخلخل مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن اثر چسبندگی و دانسیته نانوسیال قابل توجیه است. شکل۱۱ نشان دهنده هر دو اثر انتقال حرارت و افت فشار در لوله حاوی ماده متخلخل است. Nu_{nfp} معرف عدد ناسلت نانوسیال در لوله حاوی ماده متخلخل است. Nu_{nf} نیز معرف عدد ناسلت در لوله بدون ماده متخلخل می‌باشد. به طور مشابه، نسبت افت فشار در لوله حاوی ماده متخلخل و لوله خالی نیز قابل تعریف هستند که در محور عمودی قابل مشاهده می‌باشند. شکل ۱۱ به وضوح نشان می‌دهند که یک نقطه بهینه (با بیشترین مقدار $\frac{Nu_{nfp}/Nu_{nf}}{\Delta P_{nfp}/\Delta P_{nf}}$) را می‌توان به ازای هر درصد حجمی نانوسیال استخراج کرد. اعداد رینولدز بالا به دلیل افت فشار قابل ملاحظه، شرایط مطلوبی برای طراحی نمی‌باشند. افزایش افت فشار در اثر استفاده از نانوسیال در محیط متخلخل بیشتر از لوله خالی است، اما شاید افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت در لوله متخلخل بتواند استفاده از این محیط‌ها را توجیه نماید. برای نمونه، در میزان تخلخل ۰/۵ و درصد حجمی ۰/۲۵ نانوسیال، محدوده عدد رینولدز ۱۵۰۰ بهترین کارائی را در شکل ۱۱ نشان می‌دهد. منظور از کارائی، اثرات همزمان انتقال حرارت و افت فشار است که در محور عمودی به شکل بی‌بعد نشان داده شده است. باید توجه کرد که محور عمودی هر دو اثر انتقال حرارت جابجائی و قدرت پمپاژ را بطور همزمان نشان می‌دهد. همچنین شکل ۱۲ نیز افزایش افت فشار لوله متخلخل نسبت به لوله خالی برای نانوسیال بر حسب عدد رینولدز را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان افت فشار نسبت به لوله خالی بخصوص در اعداد رینولدز بالا بشدت افزایش پیدا کرده است. با این حال مطالعات بیشتری در زمینه انتقال حرارت و افت فشار بخصوص در لوله‌های متخلخل به منظور روشن شدن ابعاد استفاده از نانوسیالات در این محیط‌ها مورد نیاز است.

۵- نتیجه‌گیری

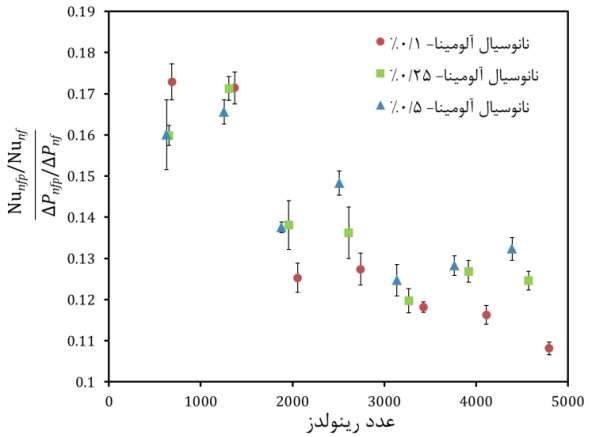
بهبود سیستم‌های انتقال حرارت در سال‌های اخیر مورد توجه محققان و بخش‌های صنعتی قرارگرفته است.



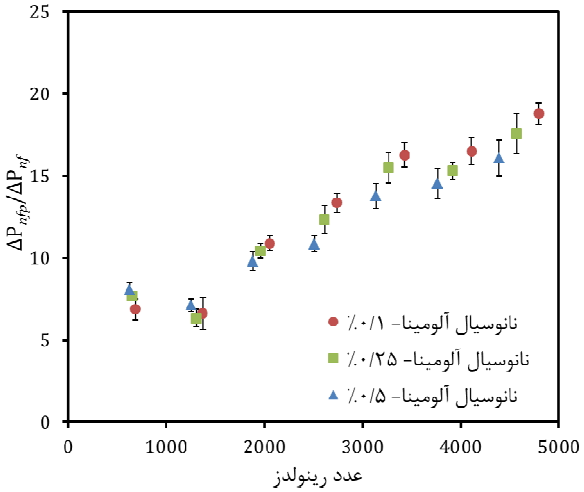
شکل ۹ بهبود انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه در ماده متخلخل با تخلخل ۵۰٪



شکل ۱۰ بهبود انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه در ماده متخلخل با تخلخل ۶۳٪



شکل ۱۱ میزان افزایش عدد ناسلت بر روی میزان افزایش افت فشار لوله متخلخل نسبت به لوله خالی بر حسب عدد رینولدز



شکل ۱۲ افزایش افت فشار نانوسیال آب- آلومینا در لوله متخلخل نسبت به لوله خالی بر حسب عدد رینولدز

استفاده از نانوسیالات با خواص حرارتی مناسب و محیط‌های متخلخل سلول باز از روش‌هایی هستند که بطور ویژه تحقیقات روی آن‌ها در حال انجام است. در این تحقیق سعی شده است تا به روش آزمایشگاهی انتقال حرارت نانوسیال آب- آلومینا در لوله حاوی ماده متخلخل به طول ۴۰ سانتی متر با دمای دیواره ثابت مورد بررسی قرار گیرد. بررسی تأثیر غلظت نانوسیال بر

انتقال حرارت و افت فشار مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده به همراه بازه اطمینان ارائه شده و برای اعتبارسنجی، نتایج لوله خالی با روابط تئوری متداول در ادبیات مساله مقایسه شده‌اند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که افزودن نانو پودر به سیال پایه، منجر به افزایش چشمگیر انتقال حرارت در لوله است. برای اولین بار انتقال حرارت نانوسیال در یک لوله متخلخل بررسی و نتایج حاصل با لوله خالی مقایسه شده است. ضمنا اثرات همزمان انتقال حرارت و افت فشار در دو نسبت تخلخل متفاوت ارائه و مقایسه شده‌اند. افزایش سطح تماس جریان در لوله متخلخل از عواملی است که منجر به افزایش قابل توجه انتقال حرارت در محیط متخلخل نسبت به لوله خالی (حدود دو برابر) می‌شود. پژوهش حاضر، از جمله اولین مقالات در خصوص بررسی تجربی نانوسیال در ماده متخلخل سلول باز است و نوآوری این کار پژوهشی به‌حساب می‌آید.

۶- فهرست علائم

A	سطح انتقال حرارت(m^2)
C	ظرفیت ویژه حرارتی (kJ/kgK)
D	قطر لوله (m)
f_r	ضریب اصطکاک
m	نرخ جرمی جریان (kg/s)
Q	نرخ دبی حجمی (m^3/s)
q	شار حرارتی (W)
T	دما (°K)
U	سرعت (m/s)
h	ضریب جابجایی (W/mK)
Nu	عدد ناسلت
Re	عدد رینولدز

علایم یونانی

ΔP	افت فشار
ρ	چگالی جرمی(kg/m^3)
ϕ	درصد حجمی
μ	ویسکوزیته ($N\text{-}s/m^2$)

زیرنویس ها

w	دیواره
wp	آب در محیط متخلخل
eff	موثر
in	ورودی
out	خروجی
n	نانوپودر
nf	نانوسیال
nfp	نانوسیال در محیط متخلخل
bf	سیال پایه
b	دمای بالک
e	طول ورودی

۷- مراجع

[1] J. C. Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism*: Clarendon, 1955.

[2] S. U. Choi, J. Eastman, *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles*, Argonne National Lab., IL (United States), pp. 1995.

[3] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, N. Hishinuma, Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-Fine ParticlesDispersion of Al₂O₃, SiO₂ and TiO₂ Ultra-Fine Particles, *Netsu Bussei*, Vol. 7, No. 4, pp. 227-233, 1993.

[4] O. Mahian, S. Mahmud, S. Zeinali Heris, Effect of Uncertainties in Physical Properties on Entropy Generation Between Two Rotating Cylinders With Nanofluids, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 134, No. 10, pp. 101704-101704, 2012.

[5] O. Mahian, A. Kianifar, S. A. Kalogirou, I. Pop, S. Wongwises, A review of the applications of nanofluids in solar energy, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 57, No. 2, pp. 582-594, 2//, 2013.

[6] R. Saidur, K. Y. Leong, H. A. Mohammad, A review on applications and challenges of nanofluids, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 3, pp. 1646-1668, 4//, 2011.

[7] G. Colangelo, E. Favale, A. de Risi, D. Laforgia, Results of experimental investigations on the heat conductivity of nanofluids based on diathermic oil for high temperature applications, *Applied Energy*, Vol. 97, No. 0, pp. 828-833, 9//, 2012.

[8] S. Lee, S. U. Choi, S. Li, and, J. Eastman, Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 121, No. 2, 1999.

[9] Y. Xuan, Q. Li, Heat transfer enhancement of nanofluids, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 21, No. 1, pp. 58-64, 2//, 2000.

[10] S. K. Das, N. Putra, P. Thiesen, W. Roetzel, Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 125, pp. 567, 2003.

[11] H. Xie, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, F. Ai, Q. Wu, Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles, *Journal of Applied Physics*, Vol. 91, No. 7, pp. 4568-4572, 2002.

[12] Q. Li, Y. Xuan, J. Wang, Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids, *Journal of Heat transfer*, Vol. 125, pp. 151-155, 2003.

[13] S. Zeinali Heris, M. Nasr Esfahany, S. G. Etemad, Experimental investigation of convective heat transfer of Al2O3/water nanofluid in circular tube, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, No. 2, pp. 203-210, 4//, 2007.

[14] M. Kayhani, M. Nazari, H. Soltanzadeh, M. Heyhat, F. Kowsary, Experimental analysis of turbulent convective heat transfer and pressure drop of Al< sub> 2</sub> o< sub> 3</sub>/water nanofluid in horizontal tube, *Micro & Nano Letters, IET*, Vol. 7, No. 3, pp. 223-227, 2012.

[15] M. H. Kayhani, H. Soltanzadeh, M. M. Heyhat, M. Nazari, F. Kowsary, Experimental study of convective heat transfer and pressure drop of TiO2/water nanofluid, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 3, pp. 456-462, 3//, 2012.

[16] A. Amrollahi, A. M. Rashidi, R. Lotfi, M. Emami Meibodi, K. Kashefi, 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, No. 6, pp. 717-723, 7//, 2010.

[17] D. Kim, Y. Kwon, Y. Cho, C. Li, S. Cheong, Y. Hwang, J. Lee, D. Hong, S. Moon, Convective heat transfer characteristics of nanofluids under laminar and turbulent flow conditions, *Current Applied Physics*, Vol. 9, No. 2, Supplement, pp. e119-e123, 3//, 2009.

[18] M. M. Heyhat, F. Kowsary, A. M. Rashidi, M. H. Momenpour, A. Amrollahi, Experimental investigation of laminar convective heat transfer and pressure drop of water-based Al2O3 nanofluids in fully developed flow regime, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 44, No. 0, pp. 483-489, 1//, 2013.

[19] M. M. Heyhat, F. Kowsary, A. M. Rashidi, S. Alem Varzane Esfehani, A. Amrollahi, Experimental investigation of turbulent flow and convective heat transfer characteristics of alumina water nanofluids in fully developed flow regime, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 8, pp. 1272-1278, 10//, 2012.

[20] 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*, Vol. 24, No. 3, pp. 234-256, 2011.

[21] S. Kakaç, A. Pramuanjaroenkij, Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 13–14, pp. 3187-3196, 6//, 2009.

[22] K. C. Leong, L. W. Jin, Characteristics of oscillating flow through a channel filled with open-cell metal foam, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 27, No. 1, pp. 144-153, 2//, 2006.

[23] I. Kurtbas, N. Celik, Experimental investigation of forced and mixed convection heat transfer in a foam-filled horizontal rectangular channel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 5–6, pp. 1313-1325, 2//, 2009.

[24] M. J. Maghrebi, M. Nazari, T. Armaghani, Forced Convection Heat Transfer of Nanofluids in a Porous Channel, *Transport in porous media,* Vol. 93, No. 3, pp. 401-413, 2012.

[25] M. Hajipour, A. Molaei Dehkordi, Mixed-convection flow of Al2O3–H2O nanofluid in a channel partially filled with porous metal foam: Experimental and numerical study, *Experimental Thermal and Fluid Science*, No. 0.

[26] J. Eastman, U. Choi, S. Li, L. Thompson, S. Lee, Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids, in *Proceeding of,* Cambridge Univ Press, pp. 3-12.

[27] M. Rafati, A. Hamidi, M. Shariati Niaser, Application of nanofluids in computer cooling systems (heat transfer performance of nanofluids), *Applied Thermal Engineering*, 2012.

[28] A. F. Mills, *Heat Transfer*: Prentice Hall PTR, 1999.

[29] M. A. Akhavan-Behabadi, M. F. Pakdaman, M. Ghazvini, Experimental investigation on the convective heat transfer of nanofluid flow inside vertical helically coiled tubes under uniform wall temperature condition, *International Communications in Heat and Mass Transfer,* Vol. 39, No. 4, pp. 556-564, 4//, 2012.

[30] A. R. Sajadi, M. H. Kazemi, Investigation of turbulent convective heat transfer and pressure drop of TiO2/water nanofluid in circular tube, *International Communications in Heat and Mass Transfer,* Vol. 38, No. 10, pp. 1474-1478, 12//, 2011.

[31] H. Peng, G. Ding, W. Jiang, H. Hu, Y. Gao, Measurement and correlation of frictional pressure drop of refrigerant-based nanofluid flow boiling inside a horizontal smooth tube, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 32, No. 7, pp. 1756-1764, 11//, 2009.