



اثر دبی سیال گرم و نانولوله‌ی کربنی-آب بر عملکرد نانوسیال در تبادل گر حرارتی صفحه‌ای و اشردار

امید رضانی ازغندی^{۱*}، محمدعلی نوع پرست^۲

۱- دکتری؛ دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲- شرکت دانش‌بنیان ثنا مبدل توسعه‌ی پارس مشهد، مشهد، ایران.

چکیده

در این مقاله، به کمک فعال‌کننده‌ی سطحی سدیم دودسیل سولفات، نانولوله‌ی کربنی در سیال پایه‌ی آب پایدار گردید. نانوسیال ۰/۰۱ وزنی تهیه‌شده (نانولوله‌ی کربنی چندجداره-آب) در مجاور سیال گرم آب دیونیزه، در تبادل گر گرمایی صفحه‌ای که دارای ۱۳ صفحه است، قرار گرفت. جهت بررسی گروه‌های عاملی، تجزیه و تحلیل ساختاری و ریخت‌شناسی نانوذره از طیف‌سنج پراش انرژی پرتو ایکس، طیف‌سنج مادون قرمز فوریه، طیف‌سنج رامان و تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری استفاده شد. اثر تغییر دبی سیال گرم و نانوسیال بر ضریب انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال به صورت آزمایشگاهی مورد آنالیز قرار گرفت. نتایج در محدوده‌ی جریان آرام نشان دادند که بیشتر شدن دبی سیال گرم باعث افزایش ضریب کلی انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال می‌گردد که هر دو نتیجه در محث انتقال حرارت مطلوب است. همچنین مشخص گردید که افزایش دبی نانوسیال باعث رشد $\frac{4}{43}$ ٪ ضریب کلی انتقال حرارت نانوسیال می‌گردد. برای مشخص شدن اثر نانوسیال بر عملکرد تبادل گر گرمایی نسبت به حالت بدون نانوسیال (آب-آب)، بررسی‌ها ادامه یافت و مشخص گردید افزایش دبی سیال گرم و سیال سرد به ترتیب باعث افزایش $\frac{9}{22}$ ٪ و $\frac{3}{17}$ ٪ می‌گردد که بیانکننده‌ی اثر مطلوب استفاده از نانولوله‌ی کربنی در دبی‌های زیاد است.

کلمات کلیدی

نانولوله‌ی کربنی، فعال‌کننده‌ی سطحی، ضریب انتقال حرارت، تبادل گر حرارتی، بستر آزمایشگاهی.

The effect of hot fluid and Nanotube-Water Flow Rate on the Efficiency of Nanofluid on Gasket-plate heat exchanger

Omid Ramezani Azghandi^{*1}, Mohammad Ali noparast²

1- PhD, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2- Sana Mobadel Tose pars company, Mashhad, Iran.

Abstract

In this paper, the Carbon nanotube was stabilized in a water-based fluid by sodium dodecyl sulfate as a surfactant. Then, hot fluid (water) was in contact with the nanofluids (carbon nanotube -weight percentage of 0. 01) on both sides of the heat exchanger plate that has 13 plates. In order to investigate the functional groups and morphology of nanoparticles, obtained by FTIR, EDX, Raman analysis, Transmission, and Scanning electron microscopes images were used. The effect of the flow rate of hot fluid and nanofluid on the heat transfer coefficient and pressure drop was analyzed experimentally. The results in the range of laminar flow showed that the heat transfer coefficient increased by the flow rate of hot fluid and nanofluid rising (53.47% and 43.4%, respectively) and decreases the pressure drop of nanofluid, which are both positive effects. Determining the effect of nanofluid on the efficiency of the heat exchanger compared to the state without nanofluid (water-water), it was found that the increase in the flow rate of hot fluid and cold fluid causes an increase of 22.9% and 17.3%, respectively. It indicates the benefit of using carbon nanotubes in high stated flow rates.

Keywords

Carbon nanotube, Surfactant, Heat Transfer Coefficient, Heat Exchanger, laboratory set

۱- مقدمه

ضریب انتقال حرارت، افت فشار و راندمان حرارتی نانوسیال پرداختند و نشان دادند که افزایش غلظت باعث افزایش همزمان ضریب انتقال حرارت و افت فشار می‌گردد که نتایج مثبت و منفی را به‌همراه دارد. بیان گردید که کم‌شدن دبی نانوسیال که در سمت سرد تبادل گر استفاده شده، اثر بیشتری نسبت به افزایش غلظت نانوسیال دارد. همچنین بیشترین پایداری به کمک آنالیز پتانسیل زتا مربوط به درصد وزنی ۰/۰۱ به‌دست آمد. در مقاله‌ی دیگری [۱۴]، با تغییر سطح تبادل حرارتی از طریق افزایش تعداد صفحه در تبادل گر گرمایی و اشردار، به بررسی اثر دبی نانوسیال هیبرید گرافن-نانولوله‌ی کربنی (به عنوان سیال سرد) بر ضریب کلی انتقال حرارت، افت فشار، راندمان حرارتی نانوسیال و توان پمپاژ پرداخته‌اند و مشخص شد که افزایش تعداد صفحه (افزایش سطح حرارتی) باعث افزایش راندمان و کاهش توان پمپاژ تبادل گر می‌گردد. همچنین نشان دادند که اثر افزایش صفحه با توجه به افزایش هزینه، تنها کمی از اثر افزایش دبی سیال بر راندمان حرارتی مؤثر است. در این مقاله، به کمک فعال‌کننده‌ی سطحی سدیم دودسیل سولفات (روش غیرعملکردی)، نانوسیال حاوی نانولوله‌ی کربنی چندجداره در درصد وزنی ۰/۰۱ تهیه شد. نانوسیال تهیه‌شده در بستر آزمایشگاهی مجهز به تبادل گر گرمایی صفحه‌ای و اشردار به‌کار گرفته شد و سعی شد که اثر تغییر یک سیال که در یک سمت تبادل گر است (به عنوان نمونه روی صفحه‌های زوج در جریان است)، بر روی نتایج سمت دیگر تبادل گر (صفحه‌های فرد) بررسی گردد که تا زمان نگارش این مقاله (به روش بیان‌شده، روی اثر تقابلی دو سیال نانولوله -آب) تحقیقی مشاهده نشده است. در نتیجه نویسندگان با این پژوهش در تلاش هستند تا گپ‌های موجود را

استفاده از نانوذره‌های مختلف [۲-۱] و افزودن آن‌ها به سیال‌های پایه‌ی متفاوت، نظیر آب، اتانول، روغن، اتیلن گلیکول و غیره [۳] در جهت بهبود خواص آن‌ها که تحت عنوان نانوسیال معرفی شده‌اند [۴]، یک روش مطلوب در کاربردهای متفاوت انتقال حرارت است. با توجه به نوع نانوذره و روش سنتز آن، از روش‌های متفاوت برای پایداری‌سازی استفاده می‌شود. به‌طور کلی می‌توان این روش‌ها را به دو دسته‌ی کووالانسی (عملکردی) یا غیر کووالانسی (غیرعملکردی) دسته‌بندی کرد [۷-۵] که در روش‌های غیرعملکردی از یک فعال‌کننده‌ی سطحی^۱ (سورفکتانت)، بسته به نوع سیال پایه استفاده می‌گردد که باعث تغییر کشش سطحی و پایداری بهتر نانوذره در سیال پایه‌ی مورد نظر است [۹-۸]. در چند دهه‌ی گذشته، علاوه بر استفاده از نانوسیال برای بهبود انتقال حرارت، از تبادل گرهای حرارتی متفاوت برای بهبود ضریب انتقال حرارت و شرایط مطلوب استفاده شده است [۱۱-۱۰]. به عنوان نمونه، ارتورک و همکاران اثر نانوسیال گرافن-آب بر میزان افت فشار و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در جریان گذرا را در مبدل حرارتی بررسی کردند و نشان دادند که میزان افت فشار در جریان گذرا بیشتر از جریان آرام و آشفته است [۱۱]. رضانی و همکاران [۱۲] اثر شکل صفحه‌های (چین و چروک) تبادل گر گرمایی و اشردار بر میزان انتقال حرارت و افت فشار هیبرید گرافن-نانولوله‌ی کربنی بررسی کردند و نشان دادند که صفحه‌های با زاویه‌ی شورون ۴۵ درجه (نوع M) دارای شرایط بهینه و مطلوب است و اثرگذاری بهتری بر نتایج دارد. نانوسیال مورد استفاده در این مقاله در سمت سیال گرم استفاده شده بود. آن‌ها در تحقیق دیگری [۱۳] به بررسی اثر تغییر غلظت و دبی نانوسیال گرافن-آب بر

هستند که حاصل خودآرایی مولکول‌های فعال‌کننده‌ی سطحی (پایدارکننده‌ها) در حفاصل فاز آبی و آلی می‌باشند.

برای این منظور، ابتدا ۱ gr فعال‌کننده‌ی سطحی به آرامی به ارلن حاوی آب دیونیزه که روی همزن مغناطیسی قرار دارد، اضافه می‌شود و به مدت ۲۵ min، به کمک مگنت به خوبی هم زده می‌شود. سپس به میزان ۰/۱ gr از نانولوله‌ی کربنی به محتویات ارلن اضافه می‌شود و به کمک یک التراسونیک پروب‌دار (قدرت ۸۰۰ w به مدت ۱ min ۴۰)، به خوبی هم زده می‌شوند. در انتها نانوسیال پایدار در درصد وزنی ۰/۰۱ تهیه می‌شود. نمونه‌های تهیه‌شده با این روش به مدت طولانی پایدار است و هیچ‌گونه رسوب و ته‌نشینی‌ای در آن‌ها دیده نشد. در این پژوهش، تمام آزمایش‌ها در دمای 24°C انجام شد. باید عنوان گردد که قبل از پایداری نیاز است که نانوذره‌ها شست‌وشو داده شوند که اگر در زمان سنتز، مواد ناخواسته نظیر دوده به نانوذره چسبیده باشد، عاری گردد. در نتیجه قبل از پایداری به کمک محلول اسیدسولفوریک (جرم مولکولی = ۹۸ gr/mol، دانسیته = ۱/۸۴ kg/lit، خلوص ۹۸٪) و اسید نیتریک (جرم مولکولی = ۶۳/۹ gr/mol، دانسیته = ۱/۴۰ kg/lit، خلوص ۶۵٪) که به نسبت ۳-۱ حجمی می‌باشند، درون یک همگن‌ساز حمام‌دار کاملاً هم زده و به کمک سانتریفوژ که دارای ۵۰۰۰ دور بر دقیقه است، با آب دیونیزه شست‌وشو داده می‌شود که از اسیدهای واکنش‌نداده نیز عاری گردد و پودر ذره در انتها به دست آید. البته باید اذعان کرد طی این مرحله امکان دارد گروه‌های آب‌دوست و قطبی کربوکسیل (-COOH) و هیدروکسیل (-OH) بر ساختار نانوذره بچسبند و به نوعی نانوذره عامل‌دار گردد که باعث پایداری بیشتر می‌گردد.

مرتفع سازند. بر این اساس اثر دبی سیال گرم (سیال آب) بر میزان ضریب کلی انتقال حرارت، افت فشارها نانوسیال بررسی گردید. آزمایش برای درصد وزنی ۰/۰۱، انجام شده است. همچنین برای این که مشخص گردد که روش و استفاده از نانوسیال بیان‌شده باعث بهبود انتقال حرارت و عملکرد تبادل گر می‌گردد، کارآیی تبادل گر برای دو حالت نانوسیال و بدون استفاده از نانوسیال (آب-آب) بررسی شده است.

۲- بخش تجربی

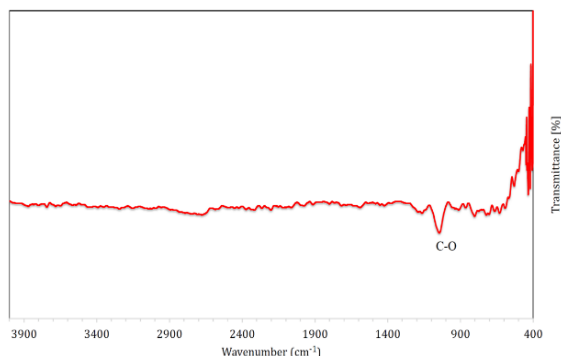
۲-۱- مواد اولیه و روش تهیه

برای تهیه‌ی نانوسیال حاوی نانولوله‌ی کربنی چندجداره، از فعال‌کننده‌ی سطحی سدیم دودسیل سولفات (gr ۵۰، محصول شرکت آزمیران ایران)، نانولوله‌ی کربنی چندجداره^۱ (قطر ۲۰-۳۰ nm و طول ۱۰-۵ μm) و محصول شرکت VCN، gr ۵، آب دیونیزه (۱۵۰ لیتر، پی اچ خنثی، از داخل ایران) استفاده گردید. فعال‌کننده‌های سطحی معمولاً ترکیباتی آلی هستند که دارای گروه‌های هیدروفوبیک (دافع آب) که نقش دم و دنباله را دارد و گروه‌های هیدروفیلیک (جاذب آب) که نقش سر را دارد؛ بنابراین به تناسب ساختار مولکولی، در حلال‌های آب و آلی حل می‌شوند و باعث کم‌شدن کشش سطحی در فصل مشترک آب می‌شوند. در این روش، نانولوله‌ها با بخش آب‌گریز مایسل‌ها^۲ احاطه می‌شوند و بخش آب‌دوست مایسل‌ها نیز با حلال اطراف در تماس است. جذب فیزیکی سورفکتانت‌ها بر سطح نانولوله‌های کربنی کشش سطحی نانولوله‌ها را کم کرده و از تشکیل توده‌های آن‌ها جلوگیری می‌کند و تنها عامل جلوگیری از انباشتگی است. مایسل‌ها ساده‌ترین واکنش‌گاه‌های مولکولی

۱- MWCNTs

۲- Micelles

به‌خصوص در دو مولکول متفاوت در دو محیط متفاوت قرار داشته؛ بنابراین هیچ‌گاه دو مولکول با ساختمان‌های متفاوت جذب مادون‌قرمز یا به عبارت بهتر طیف مادون‌قرمز مشابه نمی‌دهند. شکل ۱ طیف مادون‌قرمز تبدیل فوریه برای نانولوله‌ی کربنی چندجداره‌ی خام آمده است. تنها در حوالی ۱۱۰۰، یک پیک مشاهده می‌شود که به‌دلیل پیوند C-O است. صحت نتیجه نیز با مقایسه با کار محققان به‌دست آمد. گودرزی و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۱۵] و شنبدی و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۱۶] به بررسی و شناسایی پیک‌های آنالیز طیف‌سنج مادون‌قرمز فوریه پرداخته که در این حوالی آن‌ها نیز وجود اکسیژن در ماده‌ی خام نانولوله (پیک در این حوالی) را گزارش کرده است.



شکل ۱- آنالیز طیف‌سنج مادون‌قرمز فوریه برای نانولوله‌ی کربنی چندجداره

۳-طیف‌سنج رامان^۴: یکی از اصلی‌ترین کاربردهای طیف‌سنجی رامان در بحث نانوساختارهای کربنی تعیین‌کردن نسبت گروه‌های بی‌نظم به گروه‌های مماسی است. هیبریداسیون کربن موجود در نانولوله‌ی کربنی (دارای خلوص بالا) sp^2 است و اضافه‌شدن گروه‌های عاملی به ساختار اصلی آن‌ها موجب تغییر هیبریداسیون

جهت ریخت‌شناسی^۱ پودر به‌دست‌آمده‌ی طیف‌سنج پراش انرژی پرتوایکس (جدول ۱)، طیف‌سنج مادون‌قرمز فوریه (شکل ۱)، طیف‌سنج رامان (شکل ۲) و تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (شکل ۳) انجام گردید.

۱-طیف‌سنج پراش انرژی پرتوایکس^۲: برای تجزیه و تحلیل ساختاری و خصوصیات شیمیایی نمونه از طیف‌سنج پراش انرژی پرتوایکس استفاده شد. اصول طراحی بر پایه‌ی تابش پرتوایکس به نمونه در زوایای مختلف و تحلیل الگوی پراش یا بازتابش آن است. جدول ۱ طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس نانولوله‌ی کربنی را نشان می‌دهد.

جدول ۱- طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس برای نانولوله‌ی کربنی چندجداره

غلظت وزنی	غلظت اتمیک	نام عنصر	نشانه	تعداد عناصر	مواد
۹۳/۰۲	۹۴/۶۷	کربن	C	۶	نانولوله‌ی کربنی چندجداره
۶/۹۸	۵/۳۳	اکسیژن	O	۸	

۲-طیف‌سنج مادون‌قرمز فوریه^۳: طیف‌سنج تبدیل فوریه‌ی مادون‌قرمز روشی برای شناسایی مولکول‌ها و به‌خصوص گروه‌های عاملی موجود در ترکیبات است. دستگاهی که طیف جذبی یک ترکیب را حاصل می‌کند یک دستگاه طیف‌سنج مادون‌قرمز یا به عبارت دقیق‌تر یک اسکپتروفتومتر خوانده می‌شود. هر ماده‌ای طیف مادون‌قرمز مخصوص به خود دارد و همانند اثرانگشت مختص خود مولکول است؛ چون هر پیوند دارای فرکانس ارتعاش طبیعی خاصی است و نیز چون یک پیوند

۱- Morphology

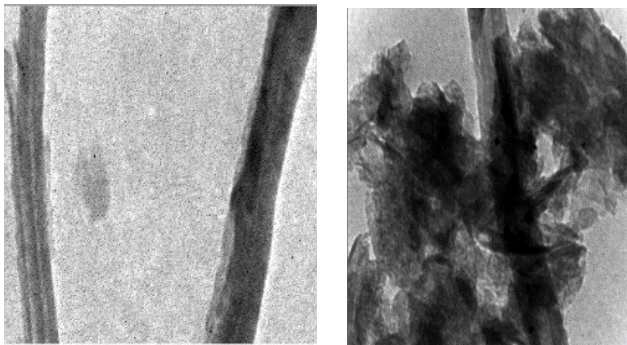
۲- EDX

۳- FTIR

۴- Raman

کربن و تبدیل آن به sp^3 می‌شود.

عبور می‌کنند، انرژی خود را ازدست می‌دهند و از طرف دیگر، نمونه با انرژی خاص آن عنصر روی یک صفحه‌ی فلورسنت یا دوربین نمایش داده شده و در بزرگ‌نمای بالا و توان تفکیک بالا ثبت می‌شوند. معمولاً می‌توان در عکس‌های مربوط به نانولوله‌های کربنی، نقض‌های موجود بر روی سطح، کاهش یا افزایش قطر، کوتاه‌شدن طول و بریده‌شدن را بررسی کرد. در شکل ۳، تصاویر به‌دست‌آمده از میکروسکوپ الکترونی عبوری مرتبط با نانولوله‌های کربنی چندجداره‌ی خام و بعد از شست‌وشو و خالص‌سازی است که می‌توان دید ساختار اصلی نانولوله‌های کربنی چندجداره کاملاً سالم مانده است.



ب

الف

شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانولوله‌ی کربنی

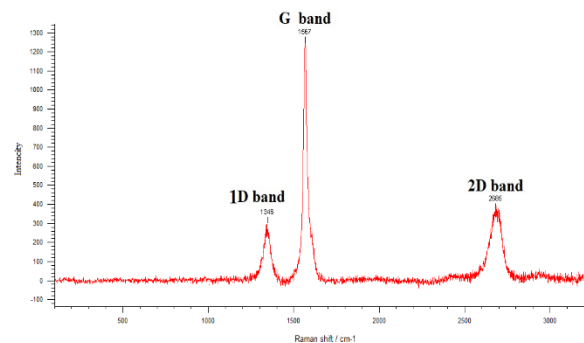
الف-نانولوله‌ی کربنی جداره بعد از خالص‌سازی

ب-نانولوله به همراه خوشه

۲-۲- بستر آزمایشگاهی

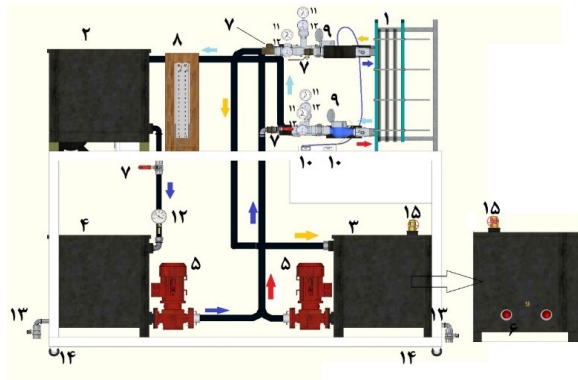
شکل‌های ۴ و ۵ شماتیک دستگاه و بستر ساخته‌شده جهت بررسی ضریب کلی انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال (نانولوله‌ی کربنی-آب) در رژیم جریان آرام نشان داده شده است. بستر شامل دو حلقه‌ی گرم و سرد است

گروه‌های بی‌نظم (D باندها) در نانولوله‌ی کربنی دارای هیبریداسیون sp^3 و گروه‌های مماسی (G باندها) شامل هیبریداسیون sp^2 است. افزایش گروه عاملی در جهت تخریب π الکترون‌های موجود در ساختار نانولوله و ایجاد نقاط فعال مناسب برای واکنش با سایر مواد که به معنای تغییر تعدادی از هیبریدهای sp^2 به sp^3 است. نتایج طیف‌سنجی رامان جهت تعیین ساختار شیمیایی نانولوله‌ی کربنی چندجداره‌ی اولیه در شکل ۲ مشاهده می‌گردد. صحت نتیجه با مقایسه‌ی مقاله‌ی امیری [۱۷] و شنبدی [۱۸] به‌دست آمد. به‌طور کلی نتایج طیف‌سنج تبدیل فوریه‌ی مادون‌قرمز و رامان شبیه به هم هستند، ولی طیف‌سنجی رامان اطلاعات بارزتری را نیز در زمینه‌ی فیزیک حالت جامد ارائه می‌کند.



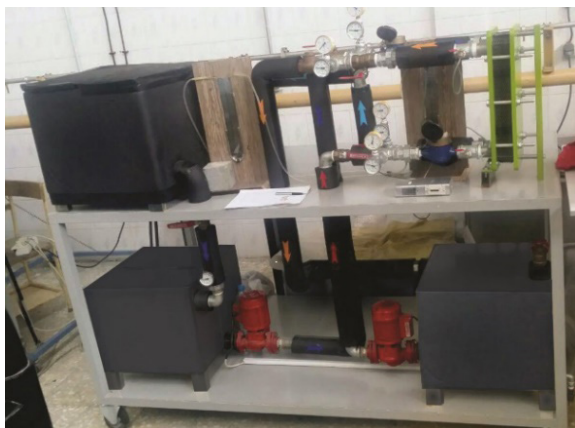
شکل ۲- آنالیز طیف‌سنج رامان برای نانولوله‌ی کربنی

۴- میکروسکوپ الکترونی عبوری^۱: جهت بررسی ریخت‌شناسی از میکروسکوپ الکترونی عبوری استفاده شد. به‌طور کلی آماده‌سازی نمونه‌های میکروسکوپ الکترونی عبوری مشتمل بر دو مرحله‌ی آماده‌سازی اولیه و نازک‌کردن نهایی نمونه به روش‌های مختلف است. درواقع، هنگامی که الکترون‌ها (پرتو الکترون) در میکروسکوپ الکترونی عبوری از درون نمونه (عنصر)



شکل ۴- شماتیک دستگاه آزمایش

- ۱- تبادلهای صفحه‌ای (مدل ام ۳- ۱۳ صفحه‌ای برند ثنا مبدل با زاویه‌ی شورون ۴۵ درجه). ۲- قسمت سرمایش (منبع سرمایش ثانویه، توان $1/hp5$ ، حاوی گاز $R404$).
- ۳- منبع ذخیره‌ی گرم (۱۲۵ lit، جنس استنلس استیل 304 ، مجهز به المنت گرمایی). ۴- منبع ذخیره‌ی سرد (۱۲ lit، جنس استنلس استیل 304). ۵- پمپ (برند نوید مدل اس ۱۰۰). ۶- المنت‌های گرمایی (هیتر). ۷- شیرهای تنظیم دبی و ورود و خروج سیال. ۸- اختلاف فشارسنج جیوه‌ای U شکل. ۹- کنترلر. ۱۰- شمارنده کنترلر جهت بررسی دبی. ۱۱- فشارسنج (مانومتر برند پکنز، 160-mbar ، $0-4$ عدد). ۱۲- ترمومتر (برند پکنز، $120-0$ ، 5 عدد). ۱۳- دریچه برداشت نمونه و تخلیه سیال. ۱۴- چرخ، ۱۵- شیر اطمینان فشار.



شکل ۵- بستر آزمایشگاهی مورد استفاده

که هرکدام دارای مخزن نگهداری سیال، پمپ، بخش اندازه‌گیری فشار و دما (قبل و بعد از تبادل گر) و بخش مربوط به اندازه‌گیری دبی سیال است. جهت اندازه‌گیری افت فشار مانومتر L شکل نیز در سیستم نصب شده است و برای به حداقل رساندن اتلاف حرارت در مسیر سیال، از عایق الاستومری استفاده شده است. همچنین در قسمت منبع گرم، دو المنت گرمایی مجهز به ترموستات قرار دارد. برای اینکه دمای سیال سرد (نانوسیال) بعد از تبادل حرارتی در تبادل گر به دمای ابتدایی برسد، در مسیر سیال سرد و قبل از منبع ذخیره‌ی سیال سرد، از یک سیستم سردساز استفاده شده است. یک ترمومتر اضافه جهت بررسی دمای برگشت سیال سرد شده در سیستم سردساز به تانک ذخیره نیز تعبیه شده است تا زمانی که به دمای اولیه‌ی سیال برسد، شیر باز شده و سیال از منبع سردسازی به منبع ذخیره منتقل گردد.

در تمام آزمایش‌ها، تبادل گر گرمایی دارای ۱۳ صفحه است که با تغییر دبی ورودی سیال گرم، در یک دبی مشخص سیال سرد آزمایش‌ها انجام می‌گیرد و سپس دبی سیال سرد به کمک شیرهای تعبیه‌شده در بستر تغییر داده شده و آزمایش‌ها تکرار می‌گردد. قبل از شروع آزمایش‌های نانوسیال، تبادل گر با سیال آب-آب تست می‌شود (جهت اعتبارسنجی دستگاه و مقایسه با حالت نانوسیال در مرحله‌ی بعد)، سپس با نانوسیال (به عنوان سیال سرد) و آب (سیال گرم) آزمایش‌ها ادامه پیدا می‌کند. در این تحقیق، دمای سیال سرد 24°C و سیال گرم 60°C است.

همچنین به کمک رابطه ی ۱، توان پمپ برای دو حالت نانوسیال-آب و آب-آب (بدون استفاده از نانوسیال) را می توان به دست آورد [۵].

$$\left(\frac{W_f}{W_b}\right) = \left(\frac{\mu_f}{\mu_b}\right) \left(\frac{\rho_b}{\rho_f}\right)^2 \quad (1)$$

به کمک رابطه ی ۲ می توان کارآیی یا عملکرد^۱ تبادل گر گرمایی را محاسبه کرد. برای این که از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشد، باید نسبت ضریب جابه جایی انتقال حرارت به نسبت توان پمپاژ در دو حالت استفاده از هیبرید و بدون نانوسیال بیشتر از یک باشد [۱۹].

$$\eta = \frac{\left(\frac{h_f}{h_b}\right)}{\left(\frac{W_f}{W_b}\right)} \quad (2)$$

در روابط بالا، h ، μ ، ρ و w به ترتیب چگالی سیال، گرانشی، ضریب انتقال حرارت جابه جایی و توان پمپ است. همچنین نماد زیرنویس nf نانوسیال و b سیال پایه است.

برای بررسی خطا، به این دلیل که در تکرار آزمایش از مقدار میانگین استفاده می شود و انحراف از مقدار میانگین ممکن است گاهی مثبت و گاهی منفی باشد و متوسط آن ها برابر صفر گردد، از اختلاف معیار استفاده می گردد، ولی متداول است که از انحراف معیار که مجذور اختلاف معیار است، طبق رابطه ی ۳ استفاده گردد. برای محاسبه ی خطای دستگاهی نیز از رابطه ی ۴ استفاده شد^۲. در رابطه ی ۳، ثابت n تعداد اندازه گیری ها و \bar{x} مقدار میانگین آزمایش است. برای عدم قطعیت آزمایش ها نیز از رابطه ی کلین-مک کلانتاک^۳ استفاده

جدول ۲ پارامترهای هندسی تبادل گر مورد استفاده را نشان می دهد. تبادل گر صفحه ای دارای جریان معکوس تک گذر، ۱۳ صفحه و دارای فریم U شکل است (تمام ورود و خروج های سیال روی فریم جلو است).

جدول ۲- مشخصه های هندسی تبادل گر ام ۳

پارامتر	مقدار
طول صفحه (L)	۰/۴۲۹ m
عرض صفحه (w)	۰/۱۲۵ m
فاصله ی پورت-پورت طولی (Lp)	۰/۳۵۷ m
فاصله ی پورت-پورت عرضی (Lw)	۰/۰۶ m
دهانه ی ورود و خروج سیال، (Dp)	۰/۰۳۱ m
ضخامت صفحه ها (t)	۰/۰۰۰۵ m
گام صفحه	۰/۰۰۳ m
فاصله ی دو فریم تبادل گر (Lc)- برای ۱۳ صفحه	۰/۰۳۹ m
سطح تبادل کل (At)- برای ۱۳ صفحه ضخامت واشر	۰/۴۱۶ m ^۲ ۰/۰۰۰۲۵ m

با استفاده از بستر آزمایشگاهی تهیه شده و روابط و جدول ارائه شده توسط رضایی [۱۴]، به کمک یادداشت دما و فشار برای سیال سرد و گرم در ورود و خروج تبادل گر و دبی های ثبت شده در ورودی هر سیال، خواص ترموفیزیکی هر سیال (نظیر چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه، ضریب هدایت حرارتی و گرانشی (لزجت))، سرعت جرمی در کانال و در دهانه ی ورود و خروج، عدد رینولدز، عدد پرانتل، کسر حجمی و وزنی، عدد ناسلت، ضریب انتقال حرارت جابه جایی و ضریب کلی انتقال حرارت، ضریب اصطکاک فانیگ، افت فشار برای کانال و پورت و افت فشار کل به روش مشابه محاسبه می گردند.

۱- Efficiency

۲- Bechwith

۳- Kline and McClontock

۳- نتایج و بحث

در مطالعه‌ی، حاضر از نانوسیال در غلظت ۰/۰۱ wt.% استفاده گردید. دبی‌های ورودی سیال گرم ۲-۵ lpm است. برای تست بستر آزمایشگاهی، ابتدا برای سیال‌های آب-آب آزمایش‌ها انجام گردید و سپس برای نانولوله‌ی کربنی-آب آزمایش‌ها انجام شد. برای کمتر شدن خطای آزمایش‌ها، تمام گیج‌ها کالیبره شده‌اند و از عایق الاستومری (با رعایت شعاع بحرانی لوله) برای جلوگیری از اتلاف حرارت استفاده شد، تست‌های هیدرولیک و اسیدشویی تبادل‌گر بعد از هر آزمایش انجام گردید و تمام آزمایش‌ها با ۴ مرتبه تکرار صورت پذیرفت تا خواص ترموفیزیکی با دقت بیشتر حاصل گردد. همچنین برای صحت نتایج، مجموع مربعات خطا و نوار خطا روی نمودار رسم گردید.

در شکل ۶، نتایج به‌دست‌آمده از منحنی‌های ضریب کلی انتقال حرارت برحسب دبی حجمی برای سیال آب-آب رسم شده است. دبی حجمی سیال گرم ۳ lpm در نظر گرفته شده است. با مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از نمودار ضریب کلی انتقال حرارت برحسب دبی حجمی سیال با نتایج تایوار و همکاران [۲۰]، مشخص گردید که تفاوت اندک مربوط به زاویه‌ی شوری و شاید مقدار تفاوت کوچک در خواص سیال پایه‌ی آب (مانند پی اچ) است. همچنین محدوده‌ی خطای عمودی نمودارها برابر با ۴٪ لحاظ شده است.

شد (رابطه‌ی ۵) که در آن WXn محدوده‌ی خطای اندازه‌گیری پارامتر Xn است [۲۰-۲۲].

$$\sigma = \left(\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\% \frac{W}{x} = \left[\left(\frac{U_{x1}}{x1} \right)^2 + \left(\frac{U_{x2}}{x2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{U_x}{x} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$W_x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial x_1} w_{x1} \right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial x_2} w_{x2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial x}{\partial x_n} w_x \right)^2} \quad (5)$$

به کمک روابط ۳-۵ برای این تحقیق، عدم قطعیت وسایل و تکرار آزمایش در جدول ۳ آمده است. همچنین نتایج حاکی از آن دارد که عدم قطعیت عدد پرانتل ۲/۳۳، عدد ناسلت ۴/۵، ضریب جابه‌جایی انتقال حرارت ۶/۷۸، ضریب اصطکاک ۵/۳۱ و توان پمپاژ تبادل‌گر گرمایی نیز کمتر از ۱۰ درصد است.

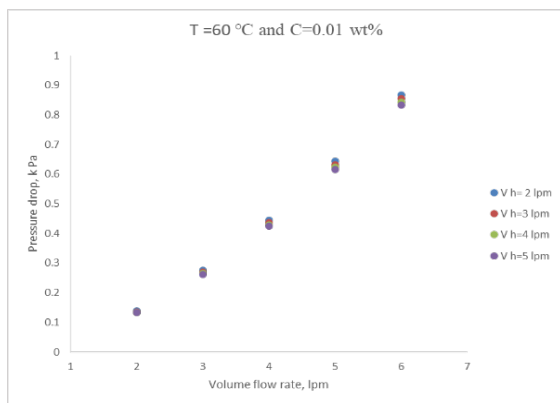
جدول ۳- عدم قطعیت وسیله و تکرار آزمایش

پارامترها	عدم قطعیت تکرار، (%)	عدم قطعیت وسیله، (%)
دمای هیبرید ورودی (°C)	۲/۵۷	۱/۱۸
دمای هیبرید خروجی (°C)	۱/۶۲	۲/۰۷
دمای آب ورودی (°C)	۵/۸۹	۴/۱۶
دمای آب خروجی (°C)	۲/۰۶	۲/۰۱۸
دبی هیبرید (Lit/s)	۳/۹۷	زمان = ۰/۲۳ s
اختلاف فشار سمت هیبرید (kPa)	۳/۵۶	حجم سیال = ۱/۴۲ lit
	۲/۴۰	

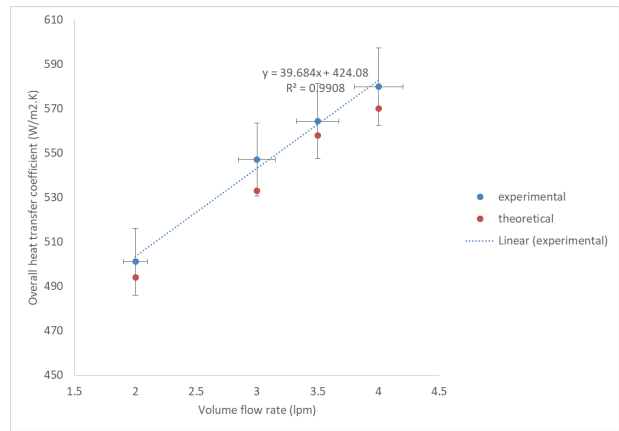
ثابت سیال سرد) و سیال سرد (دبی مشخص سیال گرم) باعث بهبود ضریب کلی انتقال حرارت نانوسیال می‌شود.

مشخص گردید که در یک دبی مشخص سیال گرم، مانند ۵ lpm افزایش دبی نانوسیال باعث بیشتر شدن ۴۳/۴٪ ضریب کلی انتقال حرارت شده است. همچنین در یک دبی مشخص نانوسیال (۶ lpm) با افزایش دبی سیال گرم، افزایش ۵۳/۴۷٪ ضریب کلی انتقال حرارت نانوسیال نتیجه می‌شود. دلیل این است که با افزایش دبی‌های حجمی، برخوردهای بین مولکولی نانوسیال بیشتر می‌شود که نتیجه‌ی آن افزایش عدد رینولدز و به تبع آن، عدد ناسلت و در نتیجه بیشتر شدن ضریب انتقال حرارت است که نتیجه‌ی مثبت به شمار می‌آید. بیشترین ضریب کلی انتقال حرارت ($1586 \text{ K} \cdot \text{W}/\text{m}^2$) مربوط به حالتی است که نانوسیال در دمای 24°C و دبی حجمی ۶ lpm از یک سمت صفحه‌ی تبادل گر در تماس با آب به عنوان سیال گرم در دمای 60°C و دبی حجمی ۵ lpm در طرف دیگر صفحه قرار بگیرد.

در تبادل گرهای حرارتی علاوه بر ضریب انتقال حرارت، افت فشار در تبادل گر نیز بسیار مهم است؛ در نتیجه برای این که مشخص گردد که افزایش دبی سیال گرم و سیال سرد چه تأثیری بر افت فشار نانوسیال دارد، شکل ۸ بررسی گردید.

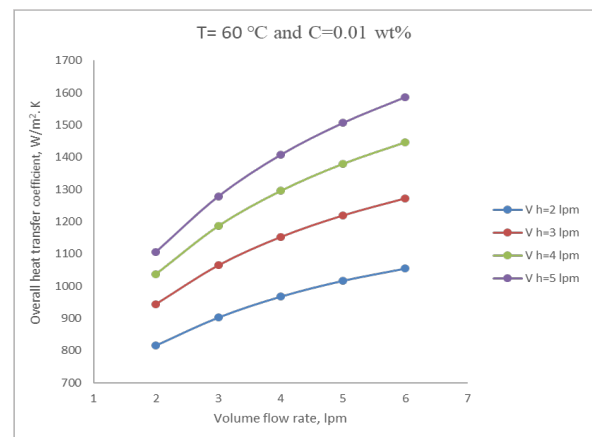


شکل ۸- اثر دبی سیال گرم و سرد بر افت فشار نانوسیال



شکل ۶- مقایسه‌ی نتایج به دست آمده برای تبادل گر با زاویه‌ی شورون 45° درجه با روابط تئوری برای سیال پایه‌ی آب

برای مشخص شدن اثر دبی سیال گرم بر ضریب کلی انتقال حرارت و افت فشار، از تبادل گر گرمایی و نانوسیال -آب استفاده گردید. شکل ۷ اثر دبی سیال گرم بر ضریب کلی انتقال حرارت نانوسیال (سیال سرد) در دبی‌های مختلف بررسی شده است.



شکل ۷- اثر دبی‌های متفاوت سیال گرم بر ضریب کلی انتقال حرارت نانوسیال

برای این منظور، دمای المنت 60°C تنظیم شد. نانوسیال با درصد وزنی ۰/۰۱ و دبی‌های ۲-۶ lpm در تماس با سیال گرم با دبی‌های ۵-۲ lpm قرار گرفت. همان طور که در شکل ۷ نیز مشخص است، افزایش دبی سیال گرم (در دبی

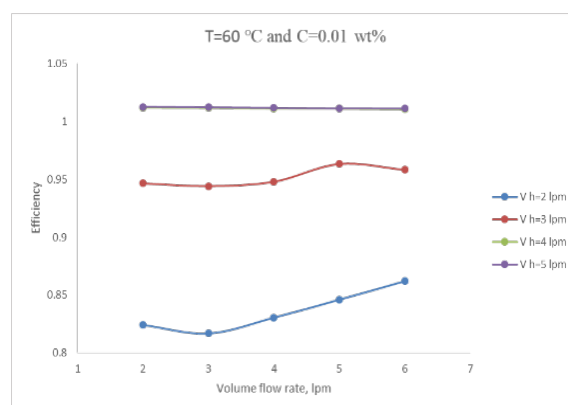
از شکل ۹ مشخص گردید که افزایش دبی سیال گرم در یک دبی مشخص نانوسیال باعث بهبود کارایی تبادل گر می‌گردد یا به عبارت دیگر، استفاده از نانوسیال-آب باعث بهبود کارایی تبادل گر نسبت به زمانی که تنها از آب-آب استفاده (دو سمت صفحه‌های تبادل گر آب است) می‌گردد، خواهد شد. به عنوان نمونه، برای دبی ثابت ۲ lpm از نانوسیال مشاهده گردید. افزایش دبی سیال گرم (آب) از ۲ به ۵ لیتر بر دقیقه باعث افزایش ۲۲/۹٪ کارایی تبادل گر می‌شود که مطلوب است. همچنین از شکل ۹ مشخص گردید که افزایش دبی نانوسیال نیز باعث بهبود کارایی تبادل گر می‌گردد (برای سیال گرم در دبی ثابت ۵ lpm، این میزان افزایش ۱۷/۳٪ است). بیشترین عملکرد مربوط به زمانی است که ۵ lpm آب به عنوان سیال گرم در دمای ۶۰ °C در یک سمت تبادل گر، در تماس با ۶ lpm نانوسیال در دمای ۲۴ °C در سمت دیگر تبادل گر باشد (۱/۰۲). همچنین مشخص گردید در دبی‌های پایین سیال گرم استفاده از نانوسیال نیز مطلوب نخواهد بود.

۴- نتیجه‌گیری

در کار حاضر، نانولوله‌ی کربنی چندجداره در سیال پایه‌ی آب در ۰/۰۱ wt% به کمک فعال‌کننده‌ی غلظت سطحی سدیم دودسیل سولفات پایدار گردید. جهت بررسی اثر دبی سیال گرم (آب) در دمای ثابت ۶۰ °C بر ضریب انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال، از تبادل گر گرمایی صفحه‌ای واشردار که نانوسیال (روی صفحه‌های فرد) و آب (روی صفحه‌های زوج) در حال جریان هستند، استفاده گردید. دبی سیال گرم از ۲ تا ۵ لیتر بر دقیقه در تغییر است. نتایج نشان داد که افزایش دبی سیال گرم باعث افزایش ۵۰/۴۷٪ ضریب کلی انتقال حرارت و همچنین باعث کاهش افت فشار در سمت نانوسیال می‌گردد که هر دو

شکل ۸ نمودار تغییر افت فشار نانوسیال که با اندازه‌گیری از بستر آزمایشگاهی به دست آمده رسم شده است. همان‌طور که مشخص است، افزایش دبی نانوسیال باعث افزایش افت فشار می‌گردد که مطلوب نیست (برای ۲ lpm سیال گرم، افزایش دبی نانوسیال باعث افزایش ۵۳۰/۳۳٪ افت فشار در تبادل گر می‌گردد)، ولی افزایش دبی سیال گرم باعث کاهش افت فشار در تبادل گر می‌گردد (در یک دبی مشخص نانوسیال (۶ lpm) افزایش دبی سیال گرم از ۲ به ۵ لیتر بر دقیقه باعث بهبودی ۳۹۶/۵٪ می‌گردد) که بسیار مطلوب است و در انتخاب سایز پمپ مؤثر خواهد بود. دلیل این است که با افزایش دبی سیال گرم، اختلاف دمای ورود و خروج سیال سرد بیشتر می‌شود که این باعث کاهش ویسکوزیته می‌گردد که باعث کاهش افت فشار می‌شود؛ درحالی‌که با افزایش دبی نانوسیال، میزان عدد رینولدز بیشتر شده که نتیجه‌ی آن کاهش ضریب اصطکاک فاینینگ و افزایش افت فشار نانوسیال است.

همان‌طور که از شکل‌های ۷ و ۸ مشخص گردید، افزایش دبی سیال گرم (آب) باعث بهبود انتقال حرارت نانوسیال و افت فشار در سمت نانوسیال می‌گردد که همیشه در تبادل گرهای حرارتی مطلوب است. برای اینکه مشخص گردد که استفاده از نانوسیال به جای سیستم آب-آب، چه تأثیری بر کارایی یا عملکرد تبادل گر دارد، (شکل ۹) بررسی‌ها ادامه یافت.



شکل ۹- اثر دبی سیال گرم بر کارایی تبادل گر

۶- منابع و مراجع

- [1] Giwa, S. O., Sharifpur, M., Goodarzi, M., Alsulami, H., & Meyer, J. P. (2021). Influence of base fluid, temperature, and concentration on the thermophysical properties of hybrid nanofluids of alumina-ferrofluid: experimental data, modeling through enhanced ANN, ANFIS, and curve fitting. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 143(6), 4149-4167.
- [2] Das, P. K. (2017). A review based on the effect and mechanism of thermal conductivity of normal nanofluids and hybrid nanofluids. *Journal of Molecular Liquids*, 240, 420-446.
- [3] Ali, N., Teixeira, J. A., & Addali, A. (2018). A review on nanofluids: fabrication, stability, and thermophysical properties. *Journal of Nanomaterials*, 2018.
- [4] Naddaf, A., & Heris, S. Z. (2018). Experimental study on thermal conductivity and electrical conductivity of diesel oil-based nanofluids of graphene nanoplatelets and carbon nanotubes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 95, 116-122.
- [5] Shanbedi, M., Amiri, A., Zeinali Heris, S., Eshghi, H., & Yarmand, H. (2018). Effect of magnetic field on thermo-physical and hydrodynamic properties of different metals-decorated multi-walled carbon nanotubes-based water coolants in a closed conduit. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 131(2), 1089-1106.
- [6] Ramezani Azghandi, O., Maghrebi, M. J., & Teymourash, A. R. (2016). Modification of Glucose biosensor using Pt/MWCNTs electrode and optimization by application of taguchi method. *International Journal of Nano Dimension*, 7(3), 231-239.

نتیجه، مطلوب در تبادل گرهای حرارتی است. همچنین برای اینکه مشخص گردد اثر نانوسیال نسبت به زمانی که از نانوسیال استفاده نشده است (آب-آب) چه میزان است، عملکرد نانوسیال بر تبادل گر گرمایی صفحه‌ای واشردار ۱۳ صفحه‌ای بررسی گردید و مشخص شد افزایش دبی سیال گرم باعث بهبود ۲۲/۹٪ می‌گردد که نشان می‌دهد تهیه‌ی نانوسیال به کمک فعال‌کننده‌ی سطحی سدیم دودسیل سولفات و روش بیان‌شده (حاوی نانولوله‌ی کربنی در سیال پایه آب) در مباحثی که هدف میزان بهبود انتقال حرارت است، مطلوب خواهد بود. همچنین افزایش دبی نانوسیال نیز بررسی گردید که نشان‌دهنده‌ی بهبود عملکرد می‌گردد.

۵- فهرست علائم

D_p	قطر دهانه و پورت ورودی لوله، m
h	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، $K.W/m^2$
L_p	فاصله‌ی مرکز تا مرکز طولی، m
L_w	فاصله‌ی مرکز تا مرکز عرضی، m
N_p	تعداد پاس‌ها یا گذرهای صفحه‌های تبادل گر
MWCNTs	نانولوله‌ی کربنی چندجداره
W	قدرت پمپ
	علائم یونانی
ρ	چگالی، kg/m^3
μ	گرانروی، cp
	زیرنویس
b	سیال پایه (سیال آب)
nf	نانوسیال (سیال سرد)
w	سیال آب (سیال گرم)

- Using Taguchi Method. *Amirkabir journals of Mechanical Engineering*, 3(54),8-30 (in Persian).
- [14] Ramezani Azghandi, O., Maghrebi, M. J., & Teymourtash, A. R. (2021). The Effect of Plate Numbers on Optimal Condition of Gasket Heat Exchanger by Graphene-Carbon Nanotube Hybrid. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 5(11), 149-163 (in Persian).
- [15] Goodarzi, M., Amiri, A., Goodarzi, M. S., Safaei, M. R., Karimipour, A., Languri, E. M., & Dahari, M. (2015). Investigation of heat transfer and pressure drop of a counter flow corrugated plate heat exchanger using MWCNT based nanofluids. *International communications in heat and mass transfer*, 66, 172-179.
- [16] Shanbedi, M., Amiri, A., Zeinali Heris, S., Eshghi, H., & Yarmand, H. (2018). Effect of magnetic field on thermo-physical and hydrodynamic properties of different metals-decorated multi-walled carbon nanotubes-based water coolants in a closed conduit. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 131(2), 1089-1106.
- [17] Amiri, A., Maghrebi, M., Baniadam, M., & Heris, S. Z. (2011). One-pot, efficient functionalization of multi-walled carbon nanotubes with diamines by microwave method. *Applied Surface Science*, 257(23), 10261-10266.
- [18] Amiri, A., Shanbedi, M., Eshghi, H., Heris, S. Z., & Baniadam, M. (2012). Highly dispersed multiwalled carbon nanotubes decorated with Ag nanoparticles in water and experimental investigation of the thermophysical properties. *The Journal of Physical Chemistry C*, 116(5), 3369-3375.
- [19] Amiri, A., Sadri, R., Shanbedi, M., Ahmadi, G., Kazi, S. N., Chew, B. T., & Zubir, M. N. M. (2015). Synthesis of ethylene glycol-treated graphene
- [7] Ramezani Azghandi, O., Maghrebi, M. J., & Teymourtash, A. R. (2021). Investigation and optimization of heat transfer coefficient of MWCNTs-Waternanofluids in a plate heat exchanger. *International Journal of Nano Dimension*, 12(2), 104-112.
- [8] Xian, H. W., Sidik, N. A. C., & Saidur, R. (2020). Impact of different surfactants and ultrasonication time on the stability and thermophysical properties of hybrid nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 110, 104389.
- [9] Moradi, M., Abouchenari, A., Pudine, M., & Sharifianjazi, F. (2021). The effect of polymeric surfactant content on the mechanical properties of Al/GNP nanocomposites. *Materials Chemistry and Physics*, 257, 123831.
- [10] Bhattad, A., Sarkar, J., & Ghosh, P. (2018). Discrete phase numerical model and experimental study of hybrid nanofluid heat transfer and pressure drop in plate heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 91, 262-273.
- [11] Demirkır, Ç., & Ertürk, H. (2021). Convective heat transfer and pressure drop characteristics of graphene-water nanofluids in transitional flow. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 121, 105092.
- [12] Ramezani Azghandi, O., Maghrebi, M. J., & Teymourtash, A. R. (2021). Experimental investigation of forced convection heat transfer and pressure drop of GNP-MWCNTs hybrid in a plate heat exchanger with different plate chevron. *Nanomaterials*, 47(13), 184-194 (in Persian).
- [13] Ramezani Azghandi, O., Maghrebi, M. J., & Teymourtash, A. R. (2022). Experimental Study of the Effect of Flow Rate and Concentration of Graphene-Water Nanofluid and Finding the Optimal Conditions

Esfahani, J. (2019). Experimental study on thermal analysis of a novel shell and tube heat exchanger with corrugated tubes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138(2), 1583-1606.

[22] Demirkır, Ç., & Ertürk, H. (2021). Convective heat transfer and pressure drop characteristics of graphene-water nanofluids in transitional flow. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 121, 105092.

nanoplatelets with one-pot, microwave-assisted functionalization for use as a high performance engine coolant. *Energy conversion and management*, 101, 767-777.

[20] Tiwari, A. K., Ghosh, P., & Sarkar, J. (2013). Performance comparison of the plate heat exchanger using different nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 49, 141-151.

[21] Milani Shirvan, K., Mamourian, M., & Abolfazli