



## اثر تعداد صفحه بر شرایط بهینه مبدل حرارتی صفحه‌ای واشردار با هیبرید گرافن-نانولوله کربنی

امید رمضانی ازغندی<sup>۱</sup>، محمد جواد مغربی<sup>۲\*</sup> و علیرضا تیمورتاش<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

<sup>۲</sup>استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۳

### چکیده

در این مقاله به کمک فعال کننده سطحی سدیم دودسیل سولفات، هیبرید نانوسیال گرافن-نانولوله کربنی در سیال پایه آب پایدار گردید. نانوسیال تهیه شده در مجاور سیال گرم آب دیونیزه، در مبدل حرارتی صفحه‌ای قرار گرفت که دارای ۱۱، ۱۳، ۱۵ و ۱۷ صفحه است. اثر تغییر دبی و تعداد صفحه‌های مبدل بر ضریب انتقال حرارت و افت فشار به صورت آزمایشگاهی مورد آنالیز قرار گرفت. نتایج برای جریان آرام نشان داد که اثر بیشتر شدن تعداد صفحه باعث کم شدن هم‌زمان ضریب کلی انتقال حرارت (۲۶/۱٪) و افت فشار (۵۲/۵٪) می‌گردد؛ بنابراین، عملکرد مبدل، توان پمپاژ و راندمان حرارتی نانوسیال نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشتر شدن تعداد صفحه، باعث بالا رفتن راندمان و عملکرد مبدل و کم شدن توان پمپاژ می‌شود که عوامل مطلوب است. طراحی آزمایش‌ها برای یافتن شرایط مطلوب و اثرگذاری هریک به روش تاگوچی نیز انجام شد. نتایج همچنان نشان داد که اثر کاهش دبی نانوسیال از اثر افزایش تعداد صفحه در عملکرد مبدل بیشتر است. شرایط مطلوب متناظر با حداکثر تعداد صفحه و حداقل دبی هیبرید است (ضریب کلی انتقال حرارت  $978.5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ، افت فشار  $0.070 \text{ kPa}$ ، راندمان حرارتی هیبرید ۹۳٪، توان پمپاژ  $0.0023 \text{ kW}$  و عملکرد مبدل ۱/۲۰۹۸ است). با مقایسه نتایج تاگوچی، صحت نتایج تجربی تایید شد.

**کلمات کلیدی:** هیبرید نانوسیال؛ فعال کننده سطحی؛ دبی نانوسیال؛ تعداد صفحه مبدل؛ عملکرد مبدل.

## Effect of Plate Numbers on Optimal Condition of Gasket Heat Exchanger with Graphene-Carbon Nanotube Hybrid

O. Ramezani Azghandi<sup>1</sup>, Mohammad Javad Maghrebi<sup>2\*</sup>, Alireza Teymourtash<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ph.D, Mech. Eng., Ferdowsi Univ., Mashhad, Iran.

<sup>2</sup>Prof., Mech. Eng., Ferdowsi Univ., Mashhad, Iran.

### Abstract

In this study, the nanofluid hybrid (the graphene-Carbon nanotube) was stabilized in a water-based fluid by sodium dodecyl sulfate as a surfactant. The prepared nanofluid was in contact with hot water in a plate heat exchanger with 11, 13, 15, and 17 plates. The flow rate and the number of plate effects on heat transfer coefficient and pressure drop were analyzed experimentally. Results in laminar flow regime showed that any increase in plate numbers causes a decrease in the overall heat transfer coefficient (26.1%) and pressure drop (52.5%). The efficiency, and pumping power, and thermal effectiveness of nanofluid were also examined. It indicated that any increase in plate numbers increases the effectiveness and efficiency, and decreases the pumping power. Experiments were also designed to find the optimal conditions by the Taguchi method. The results showed that reduction in nanofluid volume flow rate is more effective than increase in the number of plates for exchanger efficiency. The optimal condition relates to the maximum number of plates and minimum hybrid volume flow rate (overall heat transfer coefficient  $978.5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , pressure drop  $0.070 \text{ kPa}$ , hybrid thermal effectiveness 93%, pumping power  $0.0023 \text{ kW}$  and exchanger efficiency of 1.2098). The accuracy of the results was confirmed by comparing Taguchi results to the experiments.

**Keywords:** Hybrid Nanofluid; Surfactant; Flow Rate; Number of Plates; Efficiency.

## ۱- مقدمه

یکی از نگرانی‌های کشورهای و جوامع صنعتی مبحث انرژی است که باعث شده دانشمندان و محققان، به دنبال راه‌حل جدید برای بهبود در این زمینه باشند. افزودن نانوذره [۱] به سیال پایه که باعث تغییر و بهبود در خواص ترموفیزیکی سیال می‌شود [۲ و ۳] و به‌عنوان نانوسیال معروف است [۴]. یک روش مناسب در زمینه بهبود ضریب انتقال حرارت است، همچنین اضافه کردن سطح تبادل و فین‌دار کردن راه موثر دیگری است که امروزه به کارگرفته می‌شود [۵]. با توجه به سایز و نوع نانوذره‌ها، نظیر نانوذره‌های فلزی، اکسید فلزی یا حتی ساختارهای کربنی، روش‌های پایدارسازی آن‌ها و رسیدن به نانوسیال پایدار مختلفی به کارگرفته می‌شود [۶]. امروزه دانشمندان پا را فراتر گذاشتند و از چند نانوذره متفاوت خواص متفاوتی را طلب می‌کنند که به هیبرید سیال معروف است. کارادونا، ندوشان و ژیان از محدود پژوهشگرانی هستند که در این زمینه به پژوهش پرداخته‌اند. [۷-۹]. با توجه به این‌که در ساختار هیبرید بیش از یک نانوذره استفاده شده است در نتیجه سایز هیبریدی ذره‌ها به تبع آن بیشتر شده و این باعث رسوب‌گذاری بیشتر می‌شود که در نتیجه پایدارسازی هیبرید ذره‌ها کمی پیچیده‌تر خواهد بود. به‌کل از دو روش کووالانسی (عملکردی) و غیرکووالانسی برای پایدارسازی هیبرید ذره‌ها استفاده می‌گردد [۱۰ و ۱۱]. در روش کووالانسی [۱۲] اغلب به کمک اسیدها، پیوندها تغییر کرده و اتم‌ها با ازدست‌دادن یا گرفتن الکترون، مدار بیرونی خود را پر و یا از دست می‌دهند و به این طریق رفتار متفاوتی از آن‌ها مشاهده می‌شود. البته زمان اختلاط و سونیکیت کردن اگر زمان مناسب جهت هم‌زدن لحاظ نگردد، باعث نقص در نانوذره می‌شود؛ مثلاً در نانولوله‌ها باعث شکستن و کوچک شدن سایز نانولوله‌ها می‌شود که در کاربردهای رسانایی بسیار نکته نامناسبی است. بعلاوه، روش پایدارسازی به‌روش کووالانسی وقت‌گیر است، ولی از جنبه دیگر، مدت پایداری به این روش طولانی‌تر است. در روش‌های غیرکووالانسی [۱۱ و ۱۳] اغلب از یک فعال‌کننده سطحی که دارای یک سر قطبی و یک سر غیرقطبی است استفاده می‌گردد (آب‌دوست و آب‌گریز) و با توجه به سیال پایه می‌تواند نانوذره‌ها را در سیال پایه پایدار سازد، البته ممکن است، در صورت استفاده نامناسب کف نیز در روی

سیال ایجاد شود، ولی مشکل‌های روش کووالانسی را دیگر ندارد.

بعد از سنتز نانوذره‌ها و پایداری آن‌ها در سیال پایه مناسب، اغلب نانوسیال‌ها در یک دستگاه حرارتی نظیر مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای و یا پوسته و لوله استفاده شده است [۱ و ۱۴] تا ضریب انتقال حرارت به‌صورت جابجایی و یا افت فشار [۱۵-۱۷] نسبت به حالت بدون نانوسیال سنجیده شود. مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای با توجه به خواص مناسب نظیر راندمان بالا، تعمیر و نگهداری آسان، اشغال فضای کمتر و راحتی تغییر سطح تبادل حرارتی، نسبت به مبدل‌های حرارتی دیگر امروزه بیش از پیش مورد توجه صنایع مختلف قرار گرفته‌اند؛ زیرا موج‌های به‌وجودآمده روی صفحه‌های مبدل باعث بیشتر شدن سطح تبادل حرارتی و آشفته‌گی در جریان سیال می‌گردد که خود یک نکته مهم در مبحث تبادل انرژی است [۱۸].

به‌طور کلی استفاده نانوسیال در مبدل‌های حرارتی به‌طور هم‌زمان، باعث بیشتر شدن ضریب انتقال حرارت می‌گردد که یک نکته مثبت به شمار می‌آید ولی بیشتر شدن افت فشار ناشی از آن، یک نتیجه منفی به شمار می‌آید؛ زیرا باعث بیشتر شدن سایز پمپ و به تبع آن بیشتر شدن هزینه‌ها می‌شود [۱۸ و ۱۹]. امروزه محققان سعی کرده‌اند، به کمک روش‌های جدید به میزان انتقال حرارت مناسب دست یابند که نسبت انتقال حرارت به افت فشار مطلوب گردد. جیوا و همکاران [۶] اثر دبی، دما و غلظت روی خواص ترموفیزیکی هیبرید را در سیال پایه ترکیبی آب-اتیلن‌گلیکول را بررسی کرد که به نسبت ۱-۱ باهم بودند. بزرگان و همکاران [۲۰] اثر نانوسیال را در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای واشردار بررسی کردند و به ترتیب افزایش هم‌زمان ۱۲/۳٪ و ۱۱/۱۵٪ را برای نرخ انتقال حرارت و توان پمپ گزارش کردند. رضانی و همکاران [۲۱] به کمک نانولوله کربنی و مبدل حرارتی ۲۱ صفحه‌ای تحت جریان درهم، به بررسی انتقال حرارت پرداختند و نشان دادند، غلظت بیشتر از دما بر افزایش هدایت حرارتی نانوسیال موثر است؛ همچنین افزایش دما بر بیشتر شدن ناسلت موثر است. این نتایج به کمک روش تاگوچی نیز تایید شد. ژیان و همکاران [۹] به بررسی نقش فعال‌کننده سطحی بر پایداری هیبرید گرافن-دی‌اکسید تیتانیوم در سیال اتیلن‌گلیکول-آب پرداختند. برای ۳۰ تا ۷۰

محققان کمی در زمینه اثر تعداد صفحه در مبدل حرارتی در زمان استفاده از نانوسیال به تحقیق پرداخته‌اند، در نتیجه نویسندگان با این پژوهش در تلاش هستند تا گپ‌های موجود را مرتفع سازند.

## ۲- اقدامات تجربی و آزمایشگاهی

### ۲-۱- مواد اولیه و روش تهیه

یکی از مراحل مهم آماده‌سازی نانوسیال‌ها، پراکنده کردن نانوذره‌ها در سیال پایه است؛ در نتیجه برای تهیه هیبرید گرافن-نانولوله کربنی نیاز به پایدارسازی گرافن (قطر ۲۰-۳۰  $\mu\text{m}$  GNP) و ضخامت در حدود ۴۰nm، محصول شرکت (VCN،  $\Delta\text{gr}$ ) و نانولوله کربنی چندجداره (به قطر ۲۰-۳۰  $\mu\text{m}$  (MWCNTs) و طول ۵-۱۰  $\mu\text{m}$ ، محصول شرکت (VCN، ۵ gr) است. برای این منظور از فعال‌کننده سطحی استفاده گردید. فعال‌کننده سطحی دارای گروه‌های غیرقطبی آب‌گریز و قطبی آب‌دوست است؛ در نتیجه به راحتی گروه‌های آب‌دوست توسط مولکول‌های قطبی آب جذب شده، درحالی‌که گروه‌های آب‌گریز به جذب بر روی سطح گرافن و نانولوله کربنی چندجداره ادامه می‌دهد. فعال‌کننده سطحی مورد استفاده در این تحقیق سدیم‌دودسیل‌سولفات (SDS، ۲۰ gr) است. در ابتدا مقداری از پیش تعیین شده، فعال‌کننده سطحی (gr) (۱/۴۵) به ارلن حاوی آب دیونیزه که روی هم‌زن مغناطیسی قرار دارد اضافه می‌شود. سپس هریک از نانوذره‌های گرافن و نانولوله کربنی چندجداره به نسبت مساوی ۰/۵-۰/۵ برداشته و به آرامی به ارلن اضافه می‌شود و به مدت ۴۵ min (زمان استراحت ۵ min) به کمک اولتراسونیک پروب‌دار به قدرت ۸۰۰W، محلول هم‌زده تا هیبرید پایدار گرافن-نانولوله سیاه‌رنگ در انتها به دست آید (شکل ۱). لازم به توضیح است که نسبت سدیم دو دسیل سولفات به مجموع نانو ذره‌ها ۱-۱ است. جهت بررسی پایداری نانوسیال‌های تهیه‌شده، آنالیز پتانسیل زتا نیز انجام شد که بیانگر بهبود پایداری هیبرید نسبت به نانوذره گرافن تک است. برای مثال برای درصد وزنی ۰/۱ اعداد پتانسیل زتا برای نانولوله، هیبرید و گرافن به ترتیب برابر با ۳۷/۳۰، ۳۷/۲۱- و ۳۲/۶۱ mV- است (عدد پتانسیل زتا کمتر از ۳۰- و بیشتر از ۳۰+ میلی ولت کاملاً پایدار). با افزایش غلظت

درجه سانتی‌گراد و در غلظت‌های ۰/۲۵، ۰/۰۵، ۰/۰۷۵ و ۰/۱ درصد وزنی بررسی‌ها شده است. نتایج نشان دادند که بسته به نوع فعال‌کننده سطحی آنیونی و یا کاتیونی میزان عدد مثبت و منفی پتانسیل زتا منفی و مثبت می‌شود (برای غیریونی‌ها گاهی مثبت و گاهی منفی). افزایش غلظت باعث افزایش هم‌زمان هدایت حرارتی و گرانروی نسبت به سیال پایه در تمام نانوسیال‌ها می‌شود. بالا رفتن دما نیز به بیشتر شدن هدایت حرارتی منجر می‌شود؛ همچنین آن‌ها عنوان کردند که پایداری نانوذره منفرد بیشتر از هیبرید حاصل است که دلیل را به نسبت اختلاط نامناسب فعال‌کننده سطحی، نوع فعال‌کننده سطحی و مورفولوژی متفاوت گرافن و دی‌اکسید تیتانیوم نسبت دادند. هدایت حرارتی هیبرید البته بیشتر از نانوسیال منفرد گزارش کردند. کارادونا و همکاران [۷] نیز نانولوله کربنی چندجداره و نانوپلیت گرافن را به شکل هیبرید پایدار ساخت و به خواص الکتریکی و حرارتی هیبرید پرداخت و بیان نمود که اضافه کردن نسبت نانولوله به گرافن در بحث رسانایی الکتریکی موثرتر است. نداف و همکاران [۲۲] نیز برای هیبرید نانولوله کربنی و گرافن در سیال پایه روغن به دو روش کووالانسی و غیرکووالانسی پایدار ساخت و به نتیجه مشابه کاردونا رسید.

در این مقاله به کمک فعال‌کننده سطحی سدیم‌دودسیل‌سولفات (روش غیرکووالانسی)، هیبرید دو نانوذره گرافن و نانولوله تهیه شد. هیبرید تهیه‌شده در بستر آزمایشگاهی مجهز به مبدل حرارتی صفحه‌ای استفاده شد (سیال سرد) تا با تغییر تعداد صفحه‌ها و تغییر دبی‌سیال، شرایط مطلوب عملیاتی مشخص گردد. باتوجه به این که مقاله‌ای در زمینه استفاده هم‌زمان هیبرید گرافن نانولوله در سیال آب و مبدل حرارتی صفحه‌ای واشردار مشاهده نشده است؛ همچنین تا این لحظه کار آزمایشگاهی روی اثر هم‌زمان تعداد صفحه‌های مبدل واشردار و دبی سیال (به‌خصوص هیبرید گرافن-نانولوله کربنی چندجداره) دیده نشده است و تنها نداف و همکاران [۲۲] اثر هیبرید نانولوله کربنی و گرافن بر خواص ترموفیزیکی را بررسی کرده است که البته سیال پایه آن هم متفاوت بوده و اثر مبدل حرارتی و تعداد صفحه‌ها نیز بر میزان انتقال حرارت، افت فشار، راندمان نانوسیال و عملکرد مبدل بررسی نشده است، همچنین

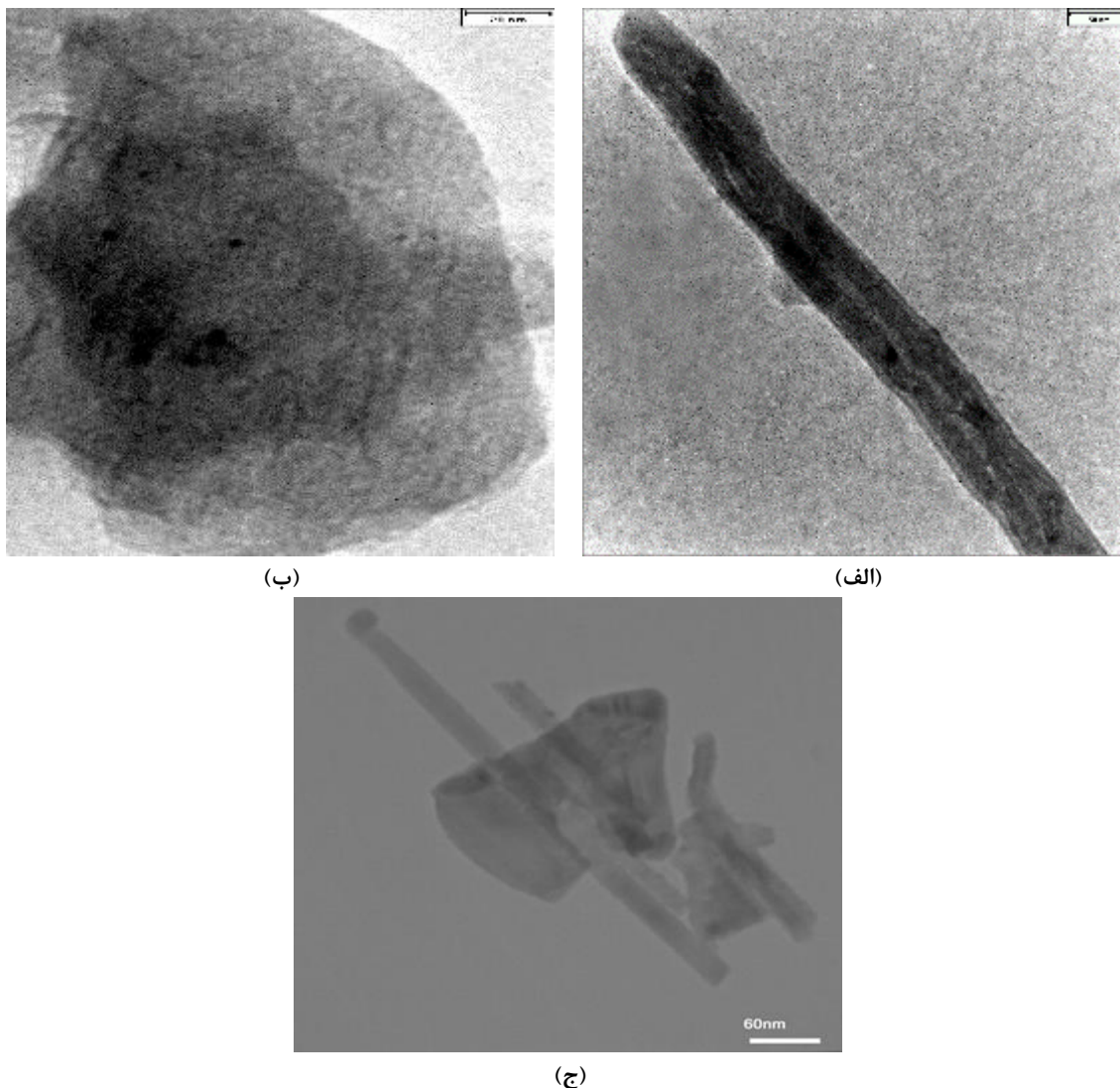
## ۲-۲- بستر آزمایشگاهی

شکل‌های ۳ و ۴ شماتیک دستگاه و بستر ساخته شده جهت بررسی ضریب کلی انتقال حرارت و افت فشار هیبرید-آب در رژیم جریان آرام نشان داده شده است. بستر شامل دو حلقه سرد و گرم است که هرکدام دارای مخزن نگهداری سیال، پمپ، بخش اندازه‌گیری فشار و دما (قبل و بعد از مبدل) و بخش مربوط به اندازه‌گیری دبی سیال است؛ همچنین در قسمت منبع گرم دو المنت گرمایی مجهز به ترموستات قرار دارد (سیال آب). برای این که دمای سیال سرد بعد از تبادل حرارتی در مبدل به دمای ابتدایی برسد، در مسیر سیال سرد و قبل از منبع ذخیره سیال سرد، از یک دستگاه سردساز استفاده شده است و برای حداقل رساندن اتلاف حرارت در مسیر سیال، از عایق الاستومری استفاده شده است. برای آزمایش‌ها، مبدل حرارتی را روی یک تعداد صفحه‌های ثابت قرار داده و با تغییر دبی ورودی سیال گرم، آزمایش‌ها انجام می‌گیرد، سپس این عمل برای تعداد صفحه‌های دیگر تکرار می‌گردد. در ابتدا مبدل با سیال آب-آب آزمایش می‌شود (جهت اعتبارسنجی دستگاه و مقایسه با حالت نانوسیال در مرحله بعد)، سپس با هیبرید (به عنوان سیال سرد) و آب (سیال گرم) آزمایش‌ها ادامه پیدا می‌کند. در این تحقیق دمای ورودی سیال گرم و سرد به ترتیب  $60^{\circ}\text{C}$  و  $24^{\circ}\text{C}$  است که بعد از این که دماها پایدار شدند، دماها ثبت گردید. مبدل حرارتی صفحه‌ای به کاررفته با تعداد ۱۱، ۱۳، ۱۵ و ۱۷ صفحه است که با تغییر صفحه‌ها سطح تبادل و طول فریم تا فریم (فاصله صفحه ابتدایی و انتهایی) مبدل در حال تغییر است. در این تحقیق از صفحه‌های ترکیبی H-L که اصطلاحاً M (زاویه میانگین،  $45^{\circ}$ ) بیان می‌گردد، استفاده شده است، این



شکل ۱- تهیه نانوسیال گرافن، نانولوله کربنی و هیبرید آنها

پایداری کم شده (بین عدد  $30-$  و  $30+$  و بیانگر پایداری نسبی و اعداد نزدیک به صفر (نزدیک نقطه ایزو الکتریک) ناپایدار می‌باشند) درحالی که همچنان پایداری هیبرید بیشتر از گرافن و کمتر از نانولوله است، به عنوان نمونه برای غلظت  $0.055\%$  و  $0.1\%$  عدد پتانسیل زتا هیبرید به ترتیب  $28/45-$ ،  $21/34-$  و  $15/22-$  است، ولی از طرف دیگر افزایش غلظت باعث بهبود راندمان حرارتی سیال می‌گردد، در نتیجه کاربرد نانوسیال بسیار حائز اهمیت است. روش‌های مختلفی برای تعیین شکل و اندازه ذرات به کار می‌رود. برخی از این روش‌ها شکل و اندازه ذرات را به طور مستقیم به دست نمی‌آورند. برای مثال در پراش اشعه ایکس اندازه ذرات از رابطه شرر می‌توان به دست آورد که این رابطه برای تعیین اندازه نانو ساختار دقیق نیست و در اندازه‌های پایین دارای خطای زیادی نسبت به مقادیر واقعی است. این روش برای نانو ساختارهای غیربلوری نیز مناسب نیست. همچنین از طیف نوری عبوری مواد نانو ساختاری می‌توان برای تعیین اندازه ذرات استفاده کرد که روش اندازه‌گیری و تعیین قطر ذرات پیچیده است و برای برخی از مواد قابل استفاده نیست. امروزه در اغلب مطالعات برای خواص مواد نانو ساختاری، میکروسکوپ الکترونی عبوری یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین دستگاه‌هایی است که مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹ و ۲۲]. این روش اندازه و شکل ذرات را با دقت حدود چند دهم نانومتر محاسبه می‌کند که به نوع ماده و دستگاه مورد استفاده بستگی دارد. امروزه در بررسی خواص مواد نانو ساختاری از میکروسکوپ عبور الکترونی با وضوح بالا استفاده می‌شود. علاوه بر تعیین شکل و اندازه ذرات به وسیله میکروسکوپ الکترونی عبوری با استفاده از پراش الکترونی و سایر سازوکارهای موجود در برخورد الکترون با ماده، برخی ویژگی‌های دیگر مواد نانو ساختاری مانند ساختار بلوری و ترکیب شیمیایی را نیز می‌توان به دست آورد. جهت بررسی مورفولوژی هیبرید تهیه شده از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) استفاده شد که در شکل ۲ آمده است. در این پژوهش تمام آزمایش‌ها در دمای  $24^{\circ}\text{C}$  انجام شد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، نانولوله کربنی روی نانوپلیت گرافن تثبیت شده و به شکل هیبرید در حدود سایز  $60\text{nm}$  به وجود آمده است.



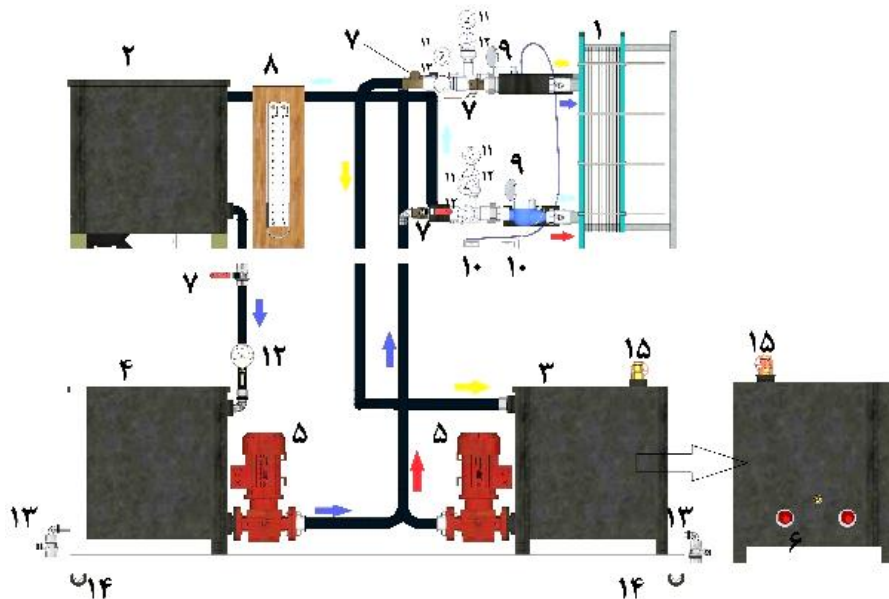
شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری الف) نانولوله کربنی، ب) نانوپلیت گرافن و ج) هیبرید گرافن-نانولوله کربنی

و دارای فریم U شکل است (تمام ورود و خروج‌های سیال روی فریم جلو است).

به کمک بستر آزمایشگاهی تهیه‌شده، دما و فشار برای سیال سرد و گرم در ورود و خروج مبدل خوانده شد (بعد از پایدارشدن) و دبی حجمی و افت‌فشار برای دو سیال یادداشت گردید. برای به دست آوردن خواص ترموفیزیکی هرسیال (نظیر چگالی، ظرفیت گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارتی و گرانبوی (لزجت) سیال به ترتیب از تئوری اختلاط، رابطه ژوان-روتزل، معادله ماکسول اصلاحی و رابطه برینکمن استفاده شد) از میانگین‌گیری دماهای ورود و خروج خوانده

نوع صفحه ترکیب صفحه‌های H (زاویه زیاد،  $60^\circ$ ) و L (زاویه کم،  $30^\circ$ ) که یکی درمیان در کنار هم قراردارند، به دست آمده و بین دو صفحه به کمک گسکت، آب‌بند می‌گردد تا نشتی از سیال‌ها نیز صورت نگیرد. یک ترمومتر اضافه جهت بررسی دمای برگشت سیال سردشده در دستگاه سردساز به تانک ذخیره نیز تعبیه شده است تا زمانی که به دمای اولیه سیال برسد، شیر باز شده و سیال از منبع سردسازی به منبع ذخیره منتقل گردد.

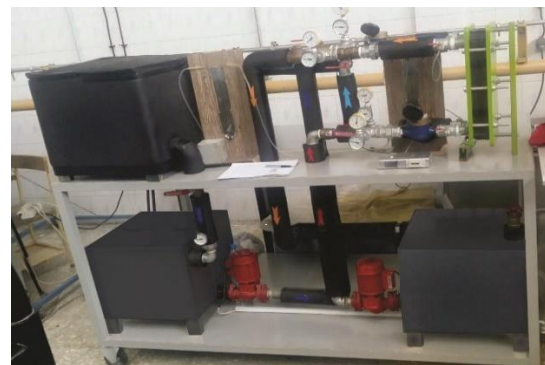
جدول ۱ پارامترهای هندسی مبدل مورد استفاده را نشان می‌دهد. مبدل صفحه‌ای دارای جریان معکوس تک‌گذر



شکل ۳- شماتیک بستر آزمایشگاهی؛ ۱- مبدل صفحه‌ای (مدل ۳ ام برند ثنا مبدل با زاویه شورون ۴۵ درجه)، ۲- قسمت سرمایش (منبع سرمایش ثانویه، توان ۱/۵ hp +، حاوی گاز R404)، ۳- منبع ذخیره گرم (۱۲۵ lit، جنس استنلس‌استیل ۳۰۴، مجهز به المنت گرمایی)، ۴- منبع ذخیره سرد (۱۲ lit، جنس استنلس‌استیل ۳۰۴)، 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، ۰-۱۶۰ mbar، ۴ عدد)، ۱۲- ترمومتر (برند پکنز، ۰-۱۲۰ °C، ۵ عدد)، ۱۳- دریچه برداشت نمونه و تخلیه سیال، ۱۴- چرخ، ۱۵- شیر اطمینان فشار.

جدول ۱- مشخصه‌های هندسی مبدل ۳ ام

مقدار	پارامتر
۰/۴۲۹ m	طول صفحه (L)
۰/۱۲۵ m	عرض صفحه (W)
۰/۳۵۷ m	فاصله پورت-پورت طولی ( $L_p$ )
۰/۰۶ m	فاصله پورت-پورت عرضی ( $L_w$ )
۰/۰۳۱ m	دهانه ورود و خروج سیال، ( $D_p$ )
۰/۰۰۰۵ m	ضخامت صفحه‌ها (t)
۰/۰۰۳ m	گام صفحه
۴۵°	زاویه صفحه (مدل M)
۰/۰۳۳ m	فاصله دو فریم مبدل ( $L_c$ ) برای ۱۱ صفحه
۰/۳۵۲ m	سطح تبادل کل ( $A_t$ ) برای ۱۱ صفحه



شکل ۴- بستر آزمایشگاهی مورد استفاده

شده در دو طرف مبدل، استفاده گردید [۱۹، ۲۳]. به کمک دبی‌های ثبت شده و خواص ترموفیزیکی، سرعت جرمی در کانال و در دهانه ورود و خروج به کمک رابطه ۱ و ۲، عدد رینولدز (رابطه ۳)، عدد پرانتل (رابطه ۴)، محاسبه می‌شوند. به کمک رابطه ۵ کسر حجمی و وزنی تبدیل گردد [۶ و ۸] و از رابطه ۶ عدد ناسلت محاسبه می‌شود.

در رابطه بالا  $N_p$  بیانگر تعداد گذرها (تک گذر)، LMTD، اختلاف دمای لگاریتمی (برای جریان ناهمسو) و  $L_{eff}$  طول مسیر بین دهانه ورودی و خروجی مبدل است (۰/۳۵۷ m). همچنین ثوابت  $C_n$ ،  $n$ ،  $K_p$  و  $m$  نیز با توجه به عدد رینولدز و زاویه شورون از جدول ۲ به دست می‌آیند. اگر دمای سیال بیشتر از سطح باشد، ثابت  $b$  در رابطه ۶ معادل ۰/۳ و در غیراین صورت ۰/۴ است [۵]. به کمک رابطه ۱۳ بازده حرارتی مبدل یا نسبت انتقال حرارت واقعی به ماکسیمم انتقال محاسبه می‌گردد [۱۳ و ۲۰]. در این رابطه  $Q_{ave}$  میانگین بار حرارتی هیبرید و سیال آب است. اندیس  $h$  و  $c$  نیز بیانگر سیال گرم و سرد است؛ همچنین در رابطه ۱۳ برای محاسبه  $C_{min}$ ، از رابطه ۱۴ استفاده شد:

$$\varepsilon = \frac{Q_{actual}}{Q_{max}} = \frac{Q_{ave}}{C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (13)$$

$$C_{min} = \min[(m \times C_{p,nf}), (m \times C_{p,h})] \quad (14)$$

جدول ۲- ثابت‌ها برای محاسبه انتقال گرما و افت فشار در مبدل صفحه‌ای گسکت‌دار [۲۵]

انتقال گرما			
n	Cn	Re	زاویه (درجه)
۰/۶۶۳	۰/۳۴۸	>۱۰	≤۳۰
۰/۶۶۳	۰/۳۰۰	>۱۰۰	۴۵
۰/۷۰۳	۰/۱۰۸	>۴۰۰	۶۰
افت فشار			
m	Kp	Re	زاویه (درجه)
۰/۱۸۳	۲/۹۹	>۱۰۰	≤۳۰
۰/۲۰۶	۱/۴۴۱	>۳۰۰	۴۵
۰/۲۱۵	۰/۷۶	>۴۰۰	۶۰

با توجه به این که توان موردنیاز برای پمپ کردن سیال نیز حائز اهمیت است از رابطه ۱۵ می‌توان به دست آورد [۴ و ۱۳].

$$G_c = \frac{\dot{m}}{N_{cp} \times b \times L_w} \quad (1)$$

$$G_p = \frac{\dot{m}}{\left(\frac{\pi D_p^2}{4}\right)} \quad (2)$$

$$Re = \frac{G_c D_h}{\mu} \quad (3)$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{K} \quad (4)$$

$$\phi = \frac{\sum \left(\frac{w}{\rho}\right)_{nf}}{\sum \left(\frac{w}{\rho}\right)_{nf} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_b} \quad (5)$$

$$Nu = C_n Re^n Pr^b \left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_b}\right)^{0.14} \quad (6)$$

در روابط بالا  $\dot{m}$  نماد دبی جرمی،  $N_{cp}$  تعداد کانال به ازای هر گذر،  $b$  ضخامت‌واشر ( $b=p-t$ )، که به کمک جدول ۱ و معادل ۰/۰۲۵ m است،  $D_p$  قطر پورت،  $D_h$  قطر هیدرولیکی (که معادل  $\frac{2b}{\phi}$  است که  $\phi$  ضریب بزرگ‌شدگی سطح (۱/۰۷۸) است)،  $w$  کسر جرمی و  $\phi$  کسر حجمی است. در تمام روابط  $\rho$  چگالی،  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه،  $k$  ضریب هدایت حرارتی و  $\mu$  گراندروسی (لزجت) سیال است. همچنین ضریب جابجایی انتقال حرارت و ضریب کلی انتقال حرارت به کمک روابط ۷ و ۸ محاسبه می‌شوند. با به دست آوردن ضریب اصطکاک از رابطه ۹ و افت فشار برای کانال و پورت، به کمک روابط ۱۰ و ۱۱، افت فشار کل که مجموع دو افت فشار کانال و پورت است، از رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود [۲۰، ۲۴-۲۵].

$$h = \frac{Nu}{k D_h} \quad (7)$$

$$U = \frac{Q}{A \times LMTD_h} = \left(\frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_h} + \frac{t}{K_w} + R_f\right)^{-1} \quad (8)$$

$$f = \frac{K_p}{Re^m} \quad (9)$$

$$\Delta P_c = 4f \left[ \left(\frac{L_{eff}}{D_h} N_p\right) \left(\frac{G_c^2}{2\rho_f}\right) \right] \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{-0.17} \quad (10)$$

$$\Delta P_p = 1.4 N_p \frac{G_p^2}{2\rho} \quad (11)$$

$$\Delta P_t = \Delta P_c + \Delta P_p \quad (12)$$

نتایج حاکی از آن دارد که عدم قطعیت نرخ انتقال گرما ۲/۵۷، عدد ناسلت ۴/۵، ضریب جابجایی انتقال حرارت ۶/۵۱، ضریب اصطکاک ۴/۹۲ و توان پمپاژ مبدل 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

### ۳- نتایج و بحث

در مطالعه حاضر از هیبرید نانوسیال در غلظت ۰/۱۴۵ wt.% استفاده گردید. دمای المنت‌ها روی ۶۰°C تنظیم شده است. دمای ورود نانوسیال سرد در این مطالعه ۲۴°C است. دبی‌های ورودی سیال گرم ۶-۲ lpm است.

برای آزمایش بستر آزمایشگاهی ابتدا برای سیال‌های آب-آب آزمایش‌ها انجام گردید و سپس برای هیبرید-آب آزمایش‌ها انجام شد. با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده برای ناسلت برحسب رینولدز برای سیال آب با نتایج کاکاک (شکل ۵) [۲۵] و همچنین با مقایسه نتایج اختلاف فشارسنج‌ها و مانومتر U شکل و نتایج روابط ۶ و ۷ می‌توان صحت آزمایش‌ها را تایید نمود. 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 مبدل بعد از هر آزمایش انجام شد و تمام آزمایش‌ها با ۴ مرتبه تکرار صورت پذیرفت تا خواص ترموفیزیکی با دقت بیشتر حاصل گردد؛

$$P_{Power} = \frac{m \times \Delta P}{\rho} = V \cdot \Delta P \quad (15)$$

با توجه به این که قطر لوله‌ها و مسیر لوله یکسان است می‌توان از رابطه ۱۶ توان پمپ در حالتی که نانوسیال وجود دارد، نسبت به حالتی که سیال پایه آب است (بدون نانوسیال) محاسبه کرد [۱۱]. به کمک رابطه ۱۷ می‌توان عملکرد (بازده) مبدل را محاسبه کرد. برای این که از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشد، باید نسبت ضریب جابجایی انتقال حرارت به نسبت توان پمپاژ در دو حالت استفاده از هیبرید و بدون نانوسیال (آب) بیشتر از یک باشد [۱۷].

$$\left(\frac{W_{nf}}{W_b}\right) = \left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_b}\right) \left(\frac{\rho_b}{\rho_{nf}}\right)^2 \quad (16)$$

$$\eta = \frac{\left(\frac{h_{nf}}{h_b}\right)}{\left(\frac{W_{nf}}{W_b}\right)} \quad (17)$$

برای بررسی خطا، به این دلیل که در تکرار آزمایش از مقدار میانگین استفاده می‌شود و انحراف از مقدار میانگین ممکن است گاهی مثبت و گاهی منفی باشد و متوسط آن‌ها برابر صفر گردد از اختلاف معیار استفاده می‌شود، ولی متداول است که از انحراف معیار که مجذور اختلاف معیار است، طبق رابطه ۱۸ استفاده گردد. برای محاسبه خطای دستگاهی نیز از رابطه Bechwith استفاده شد (رابطه ۱۹). در رابطه ۱۸ ثابت n تعداد اندازه‌گیری‌ها و  $\bar{x}$  مقدار میانگین آزمایش است. برای عدم قطعیت آزمایش‌ها نیز از رابطه Kline and McClintock استفاده شد (رابطه ۲۰) که در آن  $W_{xn}$  محدوده خطای اندازه‌گیری پارامتر  $X_n$  است [۱۸ و ۱۹].

$$\sigma = \left(\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

$$\% \frac{Ux}{x} = \left[ \left(\frac{U_{x1}}{x1}\right)^2 + \left(\frac{U_{x2}}{x2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{U_{xn}}{xn}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

$$W_x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial x_1} w_{x1}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial x_2} w_{x2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial x}{\partial x_n} w_{xn}\right)^2} \quad (20)$$

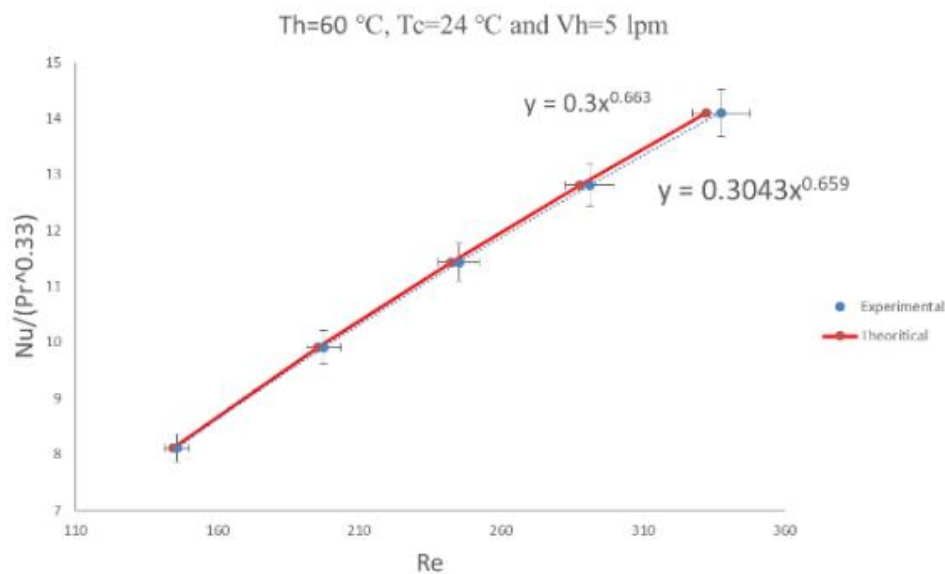
به کمک روابط ۱۸-۲۰ برای این آزمایش عدم قطعیت وسایل و تکرار آزمایش در جدول ۳ آمده است؛ همچنین



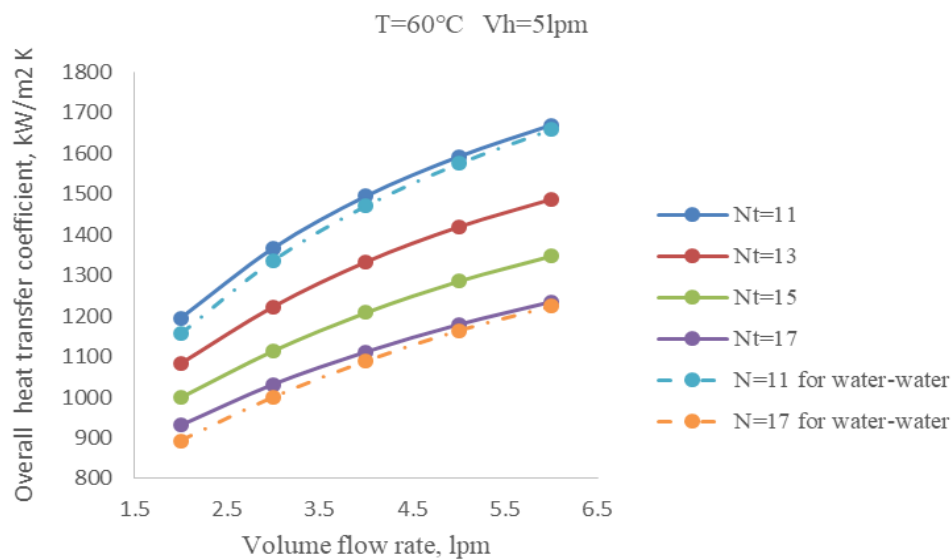
با افزایش تعداد صفحه های موجود در مبدل حرارتی صفحه ای سطح تبادل حرارتی بیشتر می گردد و این به منزله بهتر شدن انتقال حرارت است، ولی نیاز است که مشخص شود، افزایش این سطح و استفاده همزمان از نانوسیال به دلیل پایین بودن راندمان سیال پایه، چه میزان اثرگذار است. شکل ۶ نمودار ضریب کلی انتقال حرارت بر حسب دبی برای هیبرید نانو سیال در تعداد صفحات مختلف مبدل رسم شده است.

همچنین برای صحت نتایج، نوار خطا (۳٪) روی نمودار رسم گردید.

در شکل ۵ نتایج به دست آمده از آزمایش ها برای ۱۷ صفحه (زاویه ۴۵ درجه) برای سیال آب رسم شده است. به این طریق ثابت های عدد ناسلت در رابطه ۶ محاسبه شد و با ثابت های ارایه شده توسط کاکاک [۲۵] مقایسه شد و انحراف کمی مشاهده گردید که صحت آزمایش ها را نشان می دهد.



شکل ۵- مقایسه نتایج به دست آمده با ثوابت رابطه تئوری برای سیال پایه آب (صفحه ۱۷) [۲۵]

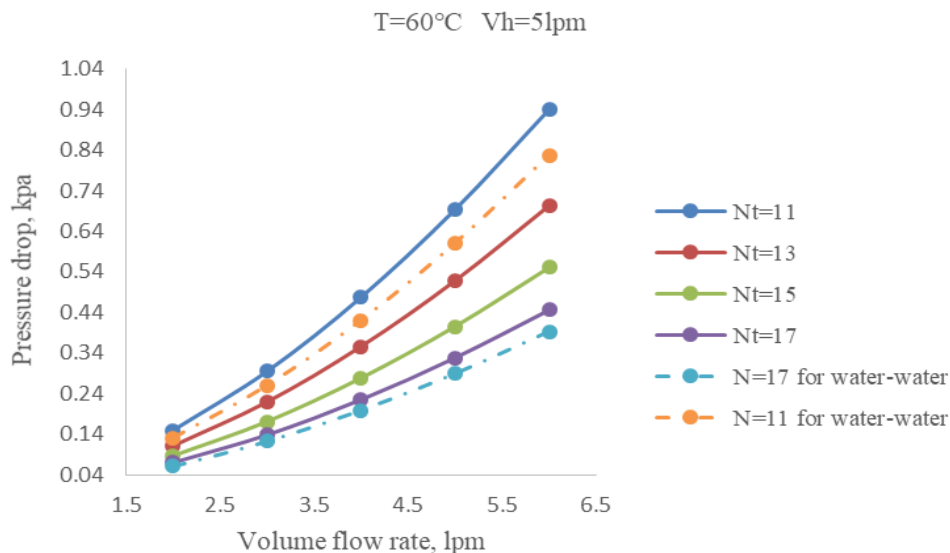


شکل ۶- اثر دبی هیبرید بر ضریب کلی انتقال حرارت در تعداد صفحه متفاوت مبدل

جریان مبدل و احتمال برخورد بین مولکولی بیشتر که به افزایش هدایت حرارتی سیال نیز می‌انجامد که به تبع آن باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌شود. همچنین با افزایش دبی، علاوه بر زیاد شدن سرعت سیال، گرانروی هم بیشتر می‌شود (در یک دمای مشخص) که نتیجه آن افزایش افت فشار است که پیامد مثبتی به شمار نمی‌آید. بدین منظور در شکل ۷ نحوه تغییر افت فشار با دبی برای صفحه‌های مختلف مبدل حرارتی واشردار رسم شده است.

شکل ۷ نمودار تغییر افت فشار برای تعداد صفحه‌های مختلف مبدل و در دبی‌های مختلف هیبرید را نشان می‌دهد. از نمودارها مشخص است با کم کردن دبی یا اضافه کردن تعداد صفحه‌ها، افت فشار کاهش می‌یابد (۰/۳۴۶۴ kPa) که پیامد مطلوب است؛ همچنین مشخص گردید که در یک دبی ثابت با افزایش صفحه، زمان استفاده از نانوسیال کاهش کمتری در افت فشار مشاهده می‌گردد که اثر مطلوب در مبدل است (مثلا برای دبی ۲ لیتر بر دقیقه نانوسیال، افزایش تعداد صفحه از ۱۱ به ۱۷ در مبدل، باعث کاهش ۱/۵۳٪ افت فشار می‌شود؛ درحالی‌که برای آب، کاهش ۴/۳۷٪ افت فشار محاسبه گردید). البته کاهش افت فشار نتیجه مطلوب است؛ دلیل این است که با افزایش دبی، سرعت سیال در لوله بیشتر شده در نتیجه مولکول‌ها زمانی برای تشکیل رسوب و فولینگ

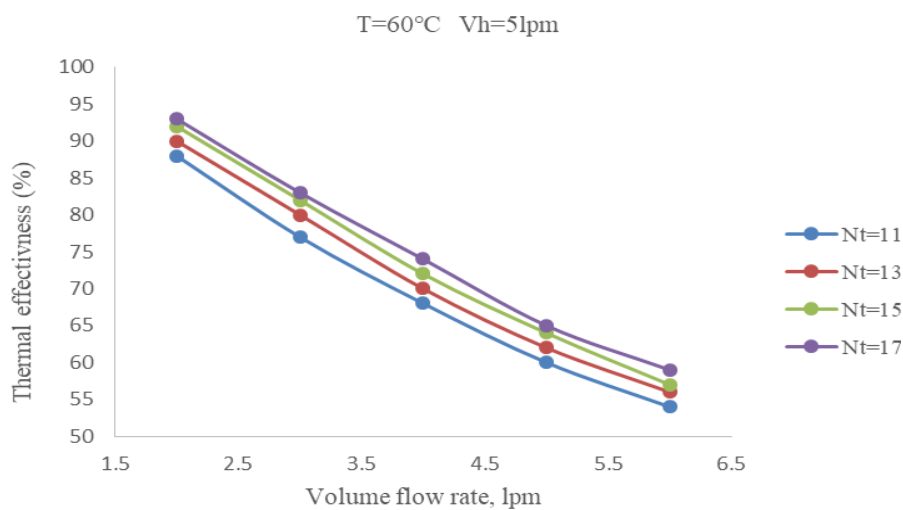
همان‌طور که در شکل ۶ نیز مشخص است، افزایش دبی در تمام صفحه‌ها باعث بهبود ضریب کلی انتقال حرارت می‌شود؛ همچنین مشخص گردید که در یک دبی مشخص مانند ۲ لیتر بر دقیقه تغییر تعداد صفحه از ۱۱ به ۱۷، باعث کاهش ۲۲/۲٪ ضریب کلی انتقال حرارت است درحالی‌که برای آب این کاهش ۲۲/۸٪ است (ضریب کلی انتقال حرارت برای نانوسیال برای ۱۱ صفحه و دبی ۲ لیتر بر دقیقه  $1257 \text{ kW.m}^2/\text{K}$  است؛ درحالی‌که برای آب این میزان  $1156 \text{ kW.m}^2/\text{K}$  است) که بیانگر این است که زمان استفاده از نانوسیال ضریب کلی انتقال حرارت نسبت به آب در یک دبی و تعداد صفحه ثابت بیشتر است (اثر مطلوب) و همچنین افزایش تعداد صفحه، در زمان استفاده از نانوسیال باعث کاهش کمتری در ضریب کلی انتقال حرارت می‌شود (اثر مثبت دیگر استفاده از نانوسیال). کاهش ضریب کلی انتقال حرارت اثر نامطلوب است. همچنین افزایش دبی از ۲ به ۶ لیتر بر دقیقه در ۱۷ صفحه (صفحه ثابت) باعث افزایش ضریب کلی انتقال حرارت می‌شود (۳۲/۴۵ درصد). در نتیجه افزایش دبی و کاهش صفحه‌ها باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌شود. دلیل این است که با افزایش دبی یا کاهش صفحه‌ها، آشفتگی سیال و برخوردهای بین مولکولی بیشتر گردیده است که در نتیجه باعث افزایش عدد رینولدز و عدد ناسلت گردیده است (بیشتر شدن نانوسیال در کانال‌های



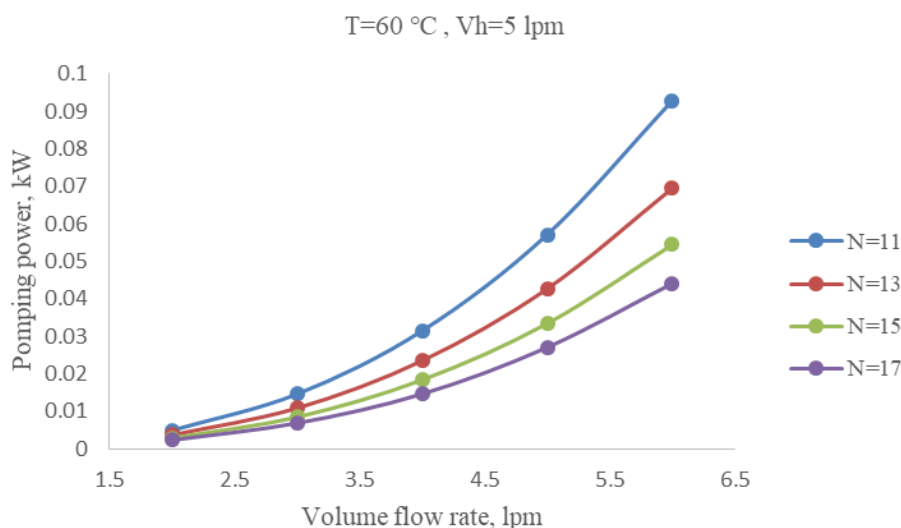
شکل ۷- اثر دبی هیبرید بر افت فشار در تعداد صفحه متفاوت

با توجه به نتایج شکل ۸ مشخص گردید که افزایش دبی باعث کاهش بازده حرارتی مبدل در تمام صفحه‌ها می‌شود. دلیل این است که افزایش دبی باعث بیشتر شدن ماکسیمم انتقال حرارت (مخرج رابطه ۱۳) و به تبع آن کاهش راندمان حرارتی سیال می‌شود (رابطه ۱۳). افزایش تعداد صفحه‌ها نیز باعث بهبود بازده حرارتی می‌شود (توزیع پذیری بهتر در کانال‌ها [۲۷]) زیرا در یک دبی ثابت، با افزایش تعداد صفحه، در اصل میزان سیال کمتری روی هر صفحه عبور می‌کند؛ در نتیجه مخرج رابطه ۱۳ کاهش و راندمان حرارتی سیال بیشتر می‌شود (رابطه ۱۳). به عنوان نمونه در دبی مشخص ۲ لیتر بر دقیقه بازده حرارتی از ۸۹ درصد به ۹۳ درصد می‌رسد. به عبارت دیگر افزایش دبی و تعداد صفحه‌ها روند معکوسی را نشان می‌دهند. کمترین بازده حرارتی مربوط به دبی حداکثر و تعداد صفحه‌ها حداقل است؛ (۵۴ درصد) زیرا افت فشار بیشتر شده است. در دبی ۶ لیتر بر دقیقه و تعداد ۱۱ صفحه به حداکثر مقدار خود می‌رسد. اثر تعداد صفحه بر توان پمپ نانوسیال نیز در شکل ۹ بررسی شد. مشخص گردید با افزایش تعداد صفحه توان پمپ با شدت در حال کاهش است (اثر مثبت)؛ این در حالی است که افزایش دبی باعث بیشتر شدن توان پمپاژ می‌گردد؛ زیرا حجم بیشتری از نانوسیال را باید پمپ‌نماید (باتوجه به رابطه ۱۵). همچنین با افزایش تعداد صفحه، حجم سیال کمتری از روی هر صفحه مبدل عبور کرده، در نتیجه افت فشار کمتر می‌گردد که به تبع آن به توان پمپاژ کمتری نیاز است. همان‌طور که مشاهده شد، افزایش

را ندارند. در نتیجه هسته‌زایی اولیه شکل نمی‌گیرد و رسوب کاهش می‌یابد. البته می‌توان به این علت هم اشاره کرد که افزایش تعداد صفحه‌ها باعث اختلاف دمایی بیشتر ورود و خروج سیال هیبرید شده در نتیجه افزایش دما باعث کاهش لزجت و در نتیجه کاهش افت فشار می‌شود که خود این پدیده را می‌توان به تغییر برخورد بین مولکولی (حرکت براونی) و تغییر در عدد پرناتل نیز ربط داد هر چند تغییر در عدد پرناتل تأثیر اندکی در محاسبه‌ها خواهد گذاشت؛ چراکه افزایش رینولدز یا افزایش ضریب پخش آلفا ( $\alpha$ ) چشم‌گیرتر است؛ همچنین در یک دبی ثابت (۶ لیتر بر دقیقه) با افزایش تعداد صفحه، فولینگ بیشتر می‌شود (برای ۱۱ صفحه این میزان  $0.2832 \text{ W.m}^2/\text{k}$  است و برای ۱۷ صفحه به  $0.3826 \text{ W.m}^2/\text{k}$  می‌رسد) که باعث بیشتر شدن ضریب اصطکاک می‌شود که پیامد آن کاهش افت فشار است. آکتورک و همکاران نیز برای مبدل حرارتی صفحه‌ای که شامل ۱۰، ۱۵ و ۲۱ صفحه است، به نتیجه مشابه برای سیال پایه آب رسیدند که استفاده از تعداد صفحه کمتر به کم شدن افت فشار می‌انجامد [۲۶]. با مشاهده شکل‌های ۶ و ۷ نتیجه می‌شود که افزایش تعداد صفحه‌ها باعث کاهش افت ضریب کلی انتقال حرارت (پارامتر منفی) و کاهش افت فشار می‌شود (پارامتر مثبت). باتوجه به این که افزایش تعداد صفحه‌ها باعث نتایج مثبت و منفی است، در نتیجه برای شرایط مطلوب راندمان حرارتی مبدل (شکل ۸) و اثر تعداد صفحه بر توان پمپاژ (شکل ۹) نیز بررسی گردید.



شکل ۸- اثر دبی بر راندمان حرارتی سیال در تعداد صفحه متفاوت



شکل ۹- اثر دبی نانوسیال بر توان پمپاژ برای تعداد صفحات متفاوت

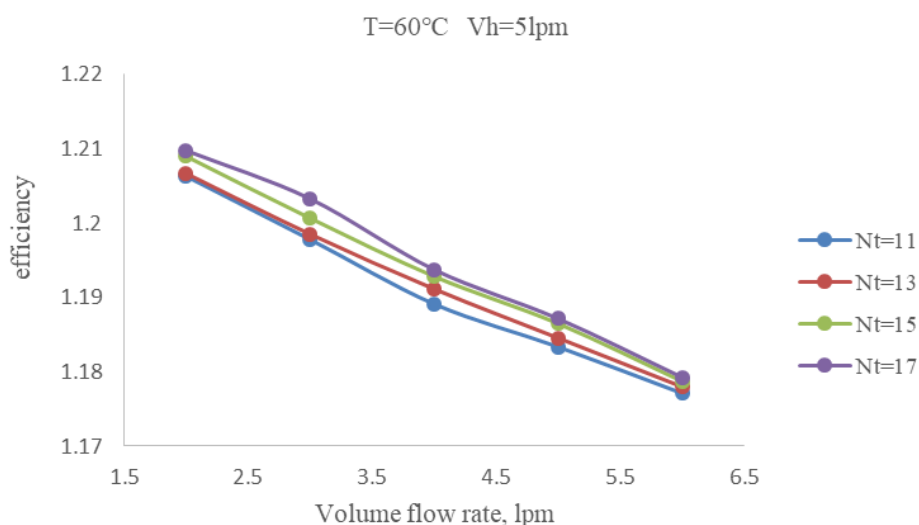
دبی‌های نانوسیال و در صفحات متفاوت) استفاده از نانوسیال توجیه‌پذیر است. این نتیجه به شکل دیگر مؤید نتایج شکل‌های ۶ و ۷ است.

برای این که مشخص گردد، دبی یا تعداد صفحه کدام اثر بیشتری در شرایط مطلوب دارد (عملکرد مبدل)، به کمک نرم‌افزار Qualitek-4 استفاده گردید که از روش تاگوچی کمک می‌گیرد [۲۱ و ۲۸]. در آنالیز طراحی آزمایش به عوامل ثابت (یا می‌تواند ثابت فرض شود) فاکتورهای مؤثر بر میزان پاسخ گویند (F) و به تغییرات که می‌توان در فاکتورها اعمال کرد، سطوح گویند (L). در نرم‌افزار بعد از انتخاب فاکتور و سطوح و شرایط مطلوب آزمایش (انتخاب از میان افزایش انتقال حرارت، کاهش افت فشار، افزایش راندمان نانوسیال و یا افزایش عملکرد مبدل)، در قسمت آنالیز می‌توان با انتخاب S/N Analysis میزان پراکندگی پاسخ‌ها را بررسی کرد (سیگنال مؤلفه نشانه و مطلوب است (S) و منظور از نویز مؤلفه اغتشاش در آزمایش (N) است). از روی جواب‌ها مشخص می‌گردد که کدام سطح از هر فاکتور برای هدف آزمایش مناسب است؛ همچنین نرم افزار، نمودارهایی در اختیار قرار می‌دهد که از روی آن به راحتی مجدداً اثر سطوح و فاکتورها بر نتیجه و اثر بخشی هر یک با توجه به شیب نمودارها مشخص می‌شود. در انتها طراحی آزمایش، یک جواب پیشنهاد می‌گردد که شرایط مطلوب نتایج است و نیاز است که در آن حالت، تست تاییدیه گرفته شود. در پژوهش

تعداد صفحه با این که ضریب کلی انتقال حرارت را کاهش داد، ولی میزان کاهش افت فشار به میزانی بود که این نقصان را جبران کند؛ به طوری که افزایش تعداد صفحه به بهبود راندمان حرارتی نانوسیال و کاهش شدید پمپاژ می‌انجامد.

همچنین جهت اثربخشی نانوسیال و برای این که مشخص گردد که آیا استفاده از هیبرید نسبت به آب مناسب است، عملکرد مبدل (کارایی مبدل) نیز بررسی گردید (شکل ۱۰).

از شکل ۱۰ مشخص است که افزایش دبی باعث کاهش عملکرد مبدل می‌شود، زیرا افزایش دبی هم‌زمان باعث افزایش چگالی و گرانیوی، نسبت به سیال پایه می‌شود؛ در نتیجه از آنجا که در رابطه ۱۶ برای جریان آرام با توان دوم چگالی رابطه دارد در نتیجه مخرج کسر ۱۷ بسیار بزرگ شده و عملکرد مبدل کاهش می‌یابد. مثلاً برای ۱۷ صفحه عملکرد مبدل با افزایش دبی، عملکرد از ۱/۲۰۹ به ۱/۱۷۹ کاهش می‌یابد (۰/۲/۵). همچنین مشخص گردید، افزایش تعداد صفحات در یک دبی مشخص مانند ۲ لیتر بر دقیقه، باعث افزایش عملکرد مبدل می‌انجامد (۰/۰/۳). با افزایش تعداد صفحه، در یک دبی ثابت در اصل اختلاف دما بیشتر می‌شود که این باعث کاهش چگالی نانوسیال می‌شود (گرانیوی زیاد تغییر نمی‌کند) در نتیجه مخرج رابطه ۱۳ کوچک شده که به افزایش عملکرد مبدل می‌انجامد. بیشترین عملکرد مبدل زمانی است که دبی نانوسیال حداقل و تعداد صفحات حداکثر باشد (۱/۲/۹). از شکل ۱۰ مشخص است که در تمام شرایط



شکل ۱۰- اثر دبی نانوسیال بر عملکرد مبدل برای صفحات متفاوت

جدول ۴- نتایج به دست آمده از نرم افزار Qualitek-4

مشخصات	۱	۲	۳	شرح سطوح	سطح	اشتراک پذیری
تعداد صفحات	۱۱	۱۵	۱۷	۱۷	۳	۰/۰۰۹
دبی حجمی (lpm)	۲	۴	۶	۲	۱	۰/۱۱۱
مجموع						۰/۱۲۱

مقایسه نتایج تاگوچی و آزمایش‌ها (از شکل‌های ۷-۱۰) مشخص گردید که افزایش تعداد صفحه و کاهش دبی مطلوب است.

#### ۴- نتیجه گیری

در کار حاضر، هیبرید در سیال پایه آب در غلظت ۰/۱۴۵wt.% به کمک فعال کننده سطحی سدیم دو دسیل سولفات پایدار گردید. نسبت فعال کننده سطحی به نانوذره‌ها ۱-۱ است. جهت بررسی ضریب انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال، در دمای ثابت ۶۰°C و دبی ثابت سیال گرم (۵ lpm)، نانوسیال در دبی‌های ۲-۶ lpm در مبدل حرارتی صفحه‌ای واشردار (تعداد صفحه متفاوت ۱۱-۱۷) در تماس با سیال گرم (آب دیونیزه) قرار گرفت. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که استفاده از نانوسیال نسبت به سیال پایه آب، با بیشتر شدن تعداد صفحه (دبی ثابت ۲ lpm) به کم شدن

ما سه سطح و دو فاکتور (تعداد صفحه و دبی) برای کاهش محاسبات (کم شدن اثر تداخلی فاکتورها) در نظر گرفته شد [۲۸] (برای دبی حجمی سطوح ۲، ۴ و ۶ لیتر بر دقیقه و سطوح تعداد صفحه‌ها ۱۱، ۱۵ و ۱۷ در نظر گرفته شد) و نتایج در جدول ۴ آورده شده است.

از نتایج جدول مشخص می‌گردد که اثر تغییر صفحه کمتر از تغییر دبی نانوسیال، در عملکرد مبدل است. به این معنا که با تغییر دبی ساده‌تر می‌توان به عملکرد بهتر مبدل رسید. همچنین این جدول نشان داد که مطلوب‌ترین حالت در سطح سوم از فاکتور اول (تعداد صفحه ۱۷) و سطح اول از فاکتور دوم (۲ lpm) مشاهده خواهد شد (همان‌طور که در شکل ۸ نیز مشاهده شد) که تاییدی بر نتیجه آزمایش‌ها است؛ همچنین مشخص می‌شود که اشتراک‌پذیری تعداد صفحه به مراتب کمتر از دبی است. برای شرایط مطلوب نیز تست تاییدیه انجام شد که خطای ۰/۵۳٪ مشاهده شد. با

غلظت جرمی	$w$	هم‌زمان ضریب کلی انتقال حرارت (نتیجه نامطلوب، ۰/۲۶/۱)
قدرت پمپ	$w$	و افت فشار (نتیجه مطلوب، ۰/۵۲/۵) می‌انجامد (نتایج منفی و مثبت). در نتیجه نمودارهای راندمان حرارتی، توان پمپاژ و عملکرد مبدل نیز مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد که بیشتر شدن تعداد صفحه باعث بالارفتن راندمان حرارتی هیبرید، کم‌شدن توان پمپاژ و بیشتر شدن عملکرد مبدل می‌شود که همه اثرات مثبت است، که در نتیجه مهم‌شدن اثر کاهش افت فشار (اثر مثبت) بر اثر کاهش ضریب انتقال حرارت است (اثر منفی). برای یافتن شرایط مطلوب به کمک روش تاگوچی نتایج آزمایش‌ها ارزیابی شد و مشخص گردید که استفاده از تعداد صفحه بیشتر مبدل و دبی کمتر هیبرید نانوسیال، شرایط مطلوب است. در شرایط مطلوب (دبی حجمی ۲ lpm و تعداد ۱۷ صفحه) ضریب کلی انتقال حرارت $978/5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ، افت فشار $0/0701 \text{ kPa}$ ، راندمان حرارتی هیبرید ۹۳٪، توان پمپاژ $0/0023 \text{ kW}$ و عملکرد مبدل $1/2098$ به دست آمد. باتوجه به مقایسه نتایج تاگوچی و آزمایش‌ها، صحت نتایج آزمایش‌ها نیز تایید گردید.
غلظت حجمی	$\varphi$	
چگالی، $\text{kg/m}^3$	$\rho$	
گرانروی، cp	$\mu$	
	زیر نویس	
سیال پایه	b	
سیال سرد	c	
شرایط پاک و تمیز	cl	
شرایط کثیف و رسوب گرفته	f	
سیال گرم	h	
ورودی	i	
نانوسیال	nf	
نانوذره	np	
خروجی	o	
سیال آب	w	

#### ۵- فهرست علائم

ظرفیت گرمای ویژه، $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$	$C_p$
قطر هیدرولیکی، m	$D_h$
قطر دهانه و پورت ورودی لوله، m	$D_p$
سرعت سیال در کانال‌های صفحه‌ها، m/s	$G_c$
نانوذره گرافن	GNP
سرعت در پورت لوله، m/s	$G_p$
ضریب انتقال حرارت جابجایی، $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	h
ضریب انتقال حرارت به شکل هدایت، $\text{W/m} \cdot \text{K}$	k
فاصله مرکز تا مرکز طولی، m	$L_p$
فاصله مرکز تا مرکز عرضی، m	$L_w$
تعداد پاس‌ها یا گذرهای صفحه‌های مبدل	$N_p$
تعداد کانال به ازای هر گذر	$N_{CP}$
عدد ناسلت	NU
مبدل صفحه‌ای	PHE
عدد پرانتل	Pr
عدد رینولدز	Re
نانولوله کربنی چند جداره	MWCNTs

#### ۶- مراجع

- [1] Bahiraei M, Rahmani R, Yaghoobi A, Khodabandeh E, Mashayekhi R, Amani M (2018) Recent research contributions concerning use of nanofluids in heat exchangers: A critical review. *Appl Therm Eng* 133: 137-159.
- [2] Qiu L, Zhu N, Feng Y, Michaelides EE, Żyła G, Jing D, Zhang X, Norris, PM, Markides CHN, Mahian O (2020) A review of recent advances in thermophysical properties at the nanoscale: From solid state to colloids. *Phys Rep* 843: 1-81.
- [3] Sadri R, Zangeneh Kamali K, Hosseini M, Zubir N, Kazi SN, Ahmadi G, Golsheikh AM (2017) Experimental study on thermo-physical and rheological properties of stable and green reduced graphene oxide nanofluids: Hydrothermal assisted technique. *J Disper Sci Technol* 38(9): 1302-1310.
- [4] Tiwari AK, Ghosh P, Sarkar J (2015) Particle concentration levels of various nanofluids in plate heat exchanger for best performance. *Int J Heat Mass Tran* 89: 1110-1118.
- [5] Huang D, Wu Z, Sunden B (2016) Effects of hybrid nanofluid mixture in plate heat exchangers. *Exp Therm Fluid Sci* 72: 190-196.
- [6] Giwa SO, Sharifpur M, Goodarzi M, Alsulami H, Meyer JP (2021) Influence of base fluid, temperature, and concentration on the

- water-based nanofluid. *Exp Heat Transfer* 29(1): 124-138.
- [17] Amiri A, Sadri R, Shanbedi M, Ahmadi G, Kazi SN, Chew BT, Zubir MNM (2015) Synthesis of ethylene glycol-treated graphene nanoplatelets with one-pot, microwave-assisted functionalization for use as a high performance engine coolant. *Energy Convers Manage* 101: 767-777.
- [18] Kumar B, Singh SN (2017) Study of pressure drop in single pass U-type plate heat exchanger. *Exp Therm Fluid Sci* 87: 40-49.
- [19] Demirkır Ç, Ertürk H (2021) Convective heat transfer and pressure drop characteristics of graphene-water nanofluids in transitional flow. *Int Commun Heat Mass* 121: 105092.
- [20] Bozorgan N, Shafahi M (2017) Analysis of gasketed-plate heat exchanger performance using nanofluid. *Journal of Heat and Mass Transfer Research* 4(1): 65-72.
- [21] Ramezani Azghandi O, Maghrebi MJ, Teymourash AR (2021) Investigation and optimization of heat transfer coefficient of MWCNTs-Water nanofluids in a plate heat exchanger. *Int J Nano Dimens* 12(2): 104-112.
- [22] Naddaf A, Heris SZ (2018) Experimental study on thermal conductivity and electrical conductivity of diesel oil-based nanofluids of graphene nanoplatelets and carbon nanotubes. *Int J Heat Mass Tran* 95: 116-122.
- [23] Mansour RB, Galanis N, Nguyen CT (2007) Effect of uncertainties in physical properties on forced convection heat transfer with nanofluids. *Appl Therm Eng* 27(1): 240-249.
- [24] Zahrani SAL, Islam MS, Saha SC (2021) Heat transfer enhancement investigation in a novel flat plate heat exchanger. *Int J Therm Sci* 161: 106763.
- [25] Kakac S., Liu H, Pramuanjaroenkij A (2002) Heat exchangers: selection, rating, and thermal design. CRC press.
- [26] Akturk F, Sezer-Uzol N, Aradag S, Kakac S (2015) Experimental investigation and performance analysis of gasketed-plate heat exchangers. *J Therm Sci Tech-Jpn* 35(1): 43-52.
- [27] Shokouhmand H, Hasanpour M (2020) Effect of number of plates on the thermal performance of a plate heat exchanger with considering flow maldistribution. *J. Energy Storage* 32: 101907.
- [28] Ramezani Azghandi O, Maghrebi MJ, Teymourash AR (2016) Modification of Glucose biosensor using Pt/MWCNTs electrode and optimization by application of taguchi method. *Int J Nano Dimens* 7(3): 231-239.
- thermophysical properties of hybrid nanofluids of alumina-ferrofluid: experimental data, modeling through enhanced ANN, ANFIS, and curve fitting. *J Therm Anal Calorim* 143(6): 4149-4167.
- [7] Caradonna A, Badini C, Padovano E, Pietroluongo M (2019) Electrical and thermal conductivity of epoxy-carbon filler composites processed by calendaring. *Mater* 12(9): 1522.
- [8] Nadooshan AA, Eshgarf H, Afrand M (2018) Measuring the viscosity of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-MWCNTs/EG hybrid nanofluid for evaluation of thermal efficiency: Newtonian and non-Newtonian behavior. *J Mol Liq* 253: 169-177.
- [9] Xian H, Sidik NAC, Saidur R (2020) Impact of different surfactants and ultrasonication time on the stability and thermophysical properties of hybrid nanofluids. *Int Commun Heat Mass* 110: 104389.
- [10] Moradi M, Abouchenari A, Pudine M, Sharifianjazi F (2021) The effect of polymeric surfactant content on the mechanical properties of Al/GNP nanocomposites. *Mater Chem Phys* 257: 123831.
- [11] Shanbedi M, Amiri A, Heris SZ, 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. *J Therm Anal Calorim* 131(2): 1089-1106.
- [12] Amiri A, Shanbedi M, AliAkbarzade MJ (2016) The specific heat capacity, effective thermal conductivity, density, and viscosity of coolants containing carboxylic acid functionalized multi-walled carbon nanotubes. *J Disper Sci Technol* 37(7): 949-955.
- [13] Goodarzi M, Amiri A, Goodarzi MS, Safaei MR, Karimipour A, Languri EM, Dahari M (2015) Investigation of heat transfer and pressure drop of a counter flow corrugated plate heat exchanger using MWCNT based nanofluids. *Int Commun Heat Mass* 66: 172-179.
- [14] Agromayor R, Cabaleiro D, Pardinias AA, Vallejo JP, Fernandez-Seara J, Lugo L (2016) Heat transfer performance of functionalized graphene nanoplatelet aqueous nanofluids. *Materials* 9(6): 455.
- [15] Allahyar HR, Hormozi F, ZareNezhad B (2016) Experimental investigation on the thermal performance of a coiled heat exchanger using a new hybrid nanofluid. *Exp Therm Fluid Sci* 76: 324-329.
- [16] Megatif L, Ghizatloo A, Arimi A, Shariati-Niasar M (2016) Investigation of laminar convective heat transfer of a novel TiO<sub>2</sub>-carbon nanotube hybrid