



## بررسی آزمایشگاهی اثر دبی و غلظت نانوسیال گرافن-آب و یافتن شرایط مطلوب به کمک روش تاگوچی

امید رضانی ازغندی، محمد جواد مغربی\*، علیرضا تیمورتاش

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۲  
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۱۸  
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۳  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۸/۲۲

### کلمات کلیدی:

نانوصفحه‌های گرافن  
فعال کننده سطحی  
درصدوزنی نانوسیال  
اثربخشی  
عملکرد

**خلاصه:** در این مقاله به کمک فعال کننده سطحی سدیم دودسیل سولفات، نانوصفحه‌های گرافن در سیال پایه آب پایدار گردید. نانوسیال تهیه شده در درصد وزنی‌های ۰/۱۴۵-۰/۰۱ در تبادل گر گرمایی صفحه‌های واشردار در مجاورت سیال سرد (آب مقطر) قرار گرفت. تمام آزمایش‌ها برای جریان آرام در گستره اعداد رینولدز ۱۵۰۰-۵۰۰ انجام گردید. اثر تغییر دبی و غلظت نانوسیال بر ضریب کلی انتقال حرارت و افت فشار بررسی شد. مشخص شد که بیشترشدن غلظت، باعث بیشترشدن هم‌زمان هردو عامل می‌گردد، در نتیجه کارایی و اثربخشی نانوسیال نیز مورد آنالیز قرار گرفت. مشخص گردید که بیشترشدن غلظت باعث بیشترشدن اثربخشی نانوسیال و کارایی می‌شود. بیشترین اثربخشی (۸۹٪) و کارایی (۱/۲۴۴) در دبی حداقل (۲ لیتر بر دقیقه) و غلظت حداکثر (۰/۱۴۵ درصد وزنی) اتفاق می‌افتد. برای یافتن شرایط مطلوب (اثربخشی بالاتر)، به کمک روش تاگوچی، آزمایش‌ها آنالیز گردید و صحت آزمایش‌ها تأیید شد. همچنین مشخص شد که کم شدن دبی (۹۸/۵۶٪) اثر بیشتری بر نتایج نسبت به بیشترشدن درصد وزنی (۰/۴۰۴٪) دارد. میزان درصد خطا نیز ۰/۱۸٪ به دست آمد که دقت نتایج را نشان می‌دهد.

### ۱- مقدمه

پایین بودن هدایت حرارتی سیال‌ها نظیر روغن موتور [۱]، آب [۲]، اتیلن گلیکول [۳] یا ترکیب آن‌ها (آب - اتیلن گلیکول) [۴] یک مشکل بزرگ در صنایع و فرایندهای مهندسی و در بحث انتقال حرارت است. یک‌راه، اضافه کردن ذرات جامد است که به دلیل ضریب هدایت بالاتر نسبت به سیال پایه، باعث بهبود هدایت حرارتی سیال می‌گردد، ولی اضافه کردن این ذرات جامد به سیال پایه به علت پایین بودن پایداری سوسپانسیون حاصل، بعد از مدت کوتاهی منجر به ته‌نشینی و رسوب‌گذاری می‌کند [۵]. به کمک روش‌های پایداری نظیر روش‌های کووالانسی، عامل‌دار کردن و غیر کووالانسی این مشکل نیز مرتفع شده است [۴ و ۶-۸] برای اولین بار کلمه نانوسیال را چوی<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۵ معرفی نمود [۹]. البته امروزه اغلب بررسی محققان، روی چند نمونه ذره متفاوت (به‌خصوص در سایز نانو) نظیر: فلزات (مس و طلا)، اکسید فلزات (دی‌اکسید تیتانیوم و اکسید منیزیم)، نیتريد فلزات (نیترات

آلومینیوم)، کاربید (سیلیکون کاربید) و نانو ساختارهای کربنی (نانولوله تک جداره، دوجداره، چندجداره، گرافن، گرافن نانو پلیت، اکسید گرافن و هیبرید آن‌ها) است [۳ و ۷ و ۹ و ۱۰]. در سال‌های اخیر به علت خواص ترموفیزیکی و پایداری مناسب نانو ساختارهای کربنی نسبت به سایر ذره‌ها، بیش‌تر این نانوذرات، موردعلاقه محققان قرار گرفته است. کربن دارای شکل‌های متفاوتی مثل الماس و گرافیت (که از معروف‌ترین مواد کربنی) است. شکل الماس سه‌بعدی، ورقه‌های گرافن دوبعدی، نانولوله کربنی یک‌بعدی و فولرن (باکی بال) صفربعدی، از اشکال متفاوت کربن هستند. امروزه تولیدگرافن و نانولوله‌های کربنی به سرعت در حال رشد و تکامل است. گرافن ورقه‌ای دوبعدی از اتم‌های کربن در یک پیکربندی شش‌ضلعی (لانه‌زنبوری) است که در آن اتم‌های کربن با هیبرید  $sp^2$  به هم متصل شده‌اند. این شبکه از دو معادل زیر نرده تشکیل شده که اتم‌های کربن همراه با پیوند سیگما  $\sigma$  پیوند می‌خورند. صفحه‌های گرافن با کنار هم قرار گرفتن اتم‌های کربن (که با پیوندهای کووالانسی به هم وصل شده‌اند و یک شبکه شش‌ضلعی کاملاً مسطح پدیدآورنده‌اند) تشکیل می‌شوند. در یک صفحه گرافن، هر اتم کربن

1 Choi

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mjmaghrebi@um.ac.ir



در تمام نانوسیال‌ها می‌شود. افزایش دما نیز به بالا رفتن 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 ریخت‌شناسی متفاوت گرافن و دی‌اکسید تیتانیوم نسبت دادند. هدایت حرارتی هیبرید البته بیش‌تر از نانوسیال منفرد گزارش شد. عده‌ای دیگر از محققان به بررسی اثر نانوسیال بر ضریب کلی انتقال حرارت و میزان افت فشار پرداخته‌اند. به‌عنوان نمونه اگر ومایور و همکاران [۱۵] نانوصفحه‌های گرافن را در سیال پایه پایدار ساخت (در غلظت ۰/۱-۰/۲۵ درصد وزنی) و به کمک تبادل گر گرمایی دولوله ای، اثر غلظت و دبی جرمی نانوسیال بر ضریب انتقال حرارت و افت فشار را بررسی نمود و گزارش کرد که غلظت بهینه ۰/۵ درصد وزنی است. از غلظت پایین تا این میزان، ضریب انتقال حرارت در حال افزایش است و از این غلظت به بعد، افزایش غلظت، باعث کاهش ضریب جابجایی انتقال حرارت می‌گردد. امیری و همکاران [۳] نانوصفحه‌های گرافن را در اتیلن گلیکول پایدار ساختند و به کمک تبادل گر گرمایی پوسته و لوله، اثر دما، غلظت و دبی بر ضریب اصطکاک، ضریب انتقال حرارت و کارایی تبادل گر گرمایی را مورد بررسی قرار دادند و بیان نمودند که استفاده از نانوسیال نسبت به سیال پایه جهت سرمایش بیشتر رادیاتور ماشین، مؤثر است.

راه دیگر، استفاده از تبادل گر گرمایی صفحه‌ای است که به دلیل شکل صفحات و چین‌وچروک روی صفحات آن، باعث ازدیاد سطح تبادل حرارتی و درهم شدن جریان سیال می‌گردد. به‌تبع آن نرخ و میزان انتقال حرارت را افزایش خواهد داد که در بحث انرژی بسیار حائز اهمیت است. این تبادل‌گرهای گرمایی، همچنین به دلیل اشغال فضای کمتر، شست‌وشو و اسید شویی راحت‌تر، راندمان بالا، تعمیر و نگهداری ساده، در این سال‌ها بیش از پیش مورد توجه محققان قرار گرفته است (نسبت به منابع کوپلی و تبادل‌گرهای پوسته و لوله) و پژوهشگران به کمک این تبادل‌گرها به بررسی سیال‌های مختلف برای سرمایش یا گرمایش بیشتر جهت، یافتن سیال مناسب در صنایع پرداخته‌اند [۱۶-۱۸]. به طور کلی استفاده نانوسیال در تبادل‌گرهای گرمایی 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 سائیدگی پمپ و به‌تبع آن بیشتر شدن هزینه‌ها می‌گردد. امروزه سعی شده به کمک روش‌های جدید، به میزان انتقال حرارت مناسب دست بیابند تا نسبت انتقال حرارت به افت فشار مطلوب گردد.

با سه اتم کربن دیگر پیوند داده است. این سه پیوند در یک صفحه قرار دارند و زوایای بین آن‌ها با یکدیگر، ۱۲۰ درجه است. در این حالت، اتم‌های کربن در وضعیتی قرار می‌گیرند که شبکه‌ای از شش‌ضلعی‌های منظم را در حالت ایده‌آل ایجاد می‌کنند. از دیگر خواص استثنایی گرافن می‌توان به بی‌اثر بودن شیمیایی، استحکام قوی، هدایت حرارتی و الکتریکی بالا اشاره کرد، ولی به دلیل سطح ویژه زیاد، این مواد تمایل به تجمع و کلوخه شدن دارند [۱۱]. در این میان، پژوهش‌هایی در ارتباط با روش‌های پایداری و بررسی خواص ترموفیزیکی انجام شده است. به‌عنوان نمونه جانسون و همکاران [۱۲] به بررسی خواص ترموفیزیکی گرافن مانند هدایت حرارتی و لزجت و مقایسه آن با سیال پایه آب در دماهای متفاوت (۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد) و دبی‌های نانوسیال (۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ لیتر بر دقیقه) متفاوت پرداخته است. برای پایداری آن از فعال‌کننده سطحی سدیم دودسیل بنزن سولفونات استفاده گردید. نتایج نشان دادند که بالا رفتن دما در آب و نانوسیال باعث بهبود هدایت حرارتی می‌گردد. همچنین بیشتر شدن غلظت نانوسیال نیز باعث بیشتر شدن این میزان می‌گردد (در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب غلظت، میزان افزایش نسبت به سیال پایه برابر است با ۱۱/۹، ۱۶/۱، ۱۸/۲ و ۲۰/۶٪). بیشتر شدن دما از ۳۰ به ۸۰ درجه سانتی‌گراد در هر دو سیال (سیال پایه و نانوسیال) باعث کم شدن لزجت می‌گردد، این در حالی است که بیشتر شدن غلظت، باعث بیشتر شدن لزجت نسبت به سیال پایه می‌گردد. صدری و همکاران [۱۳] به بررسی اثر دما و غلظت روی هدایت حرارتی، لزجت و چگالی بعد از سنتز اکسید گرافن پرداختند. همچنین اثر پی‌اچ محیط بر پایداری هم بررسی کردند و عنوان نمودند که در پی‌اچ قلیایی، کمترین پایداری رخ می‌دهد. ژیان و همکاران [۱۴] به بررسی نقش فعال‌کننده سطحی بر پایداری هیبرید گرافن-دی‌اکسید تیتانیوم در سیال اتیلن گلیکول-آب پرداختند. برای ۷۰-۳۰ درجه سانتی‌گراد و در غلظت‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۰/۱ درصد وزنی، بررسی‌ها انجام شده است. نتایج نشان دادند که بسته به نوع فعال‌کننده سطحی آنیونی و یا کاتیونی میزان عدد پتانسیل زتا منفی و مثبت می‌شود (برای غیر یونی‌ها گاهی مثبت و گاهی منفی). به‌عنوان نمونه تمام اعداد زتا پتانسیل برای استفاده از فعال‌کننده سدیم دودسیل سولفات<sup>۱</sup> منفی، استفاده از سدیم دودسیل سولفات<sup>۲</sup> مثبت و استفاده از پلی وینیل پیرولیدون<sup>۳</sup> برای سیال منفرد منفی و برای هیبرید مثبت است. افزایش غلظت باعث افزایش هم‌زمان هدایت حرارتی و لزجت، نسبت به سیال پایه

- 1 Sodium Dodecyle Sulfate (SDS)
- 2 Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide (CTAB)
- 3 Poly Vinyl Pyrrolidone (PVP)

التراسونیک پروب دار به قدرت ۸۰۰ وات به مدت ۴۰ دقیقه ارلن به خوبی هم زده می‌شود تا در انتها نانوسیال پایدار در درصد وزنی ۰/۱ تهیه شود. نمونه‌های تهیه‌شده با این روش، بیش از ۹ ماه پایدار بوده و هیچ‌گونه رسوب و ته‌نشینی در آن‌ها دیده نشد. سایر درصد‌های وزنی ۰/۰۱، ۰/۰۵۵ و ۰/۱۴۵ نیز به روش مشابه به دست می‌آید که در شکل ۱ مشاهده می‌شود و تنها وزن نانوذره متفاوت است. نتایج آنالیز پتانسیل زتا نشان دادند که هرچه میزان درصد وزنی کمتر باشد، پایداری سیال بیشتر است. برای غلظت‌های بیان‌شده پتانسیل زتا به ترتیب برابر با  $-۳۳/۶۱$ ،  $-۲۳/۶۸$ ،  $-۱۹/۲۷$  و  $-۱۶/۸۵$  است. لازم به توضیح است که نسبت سدیم دودسیل سولفات به نانوذره ۱-۱ است. البته نسبت‌های ۱-۰/۵ و ۱-۲ نیز به کمک آنالیز پتانسیل زتا بررسی گردید، ولی بیشترین پایداری برای نسبت ۱-۱ به دست آمد (به ترتیب برای درصد وزنی ۰/۰۱، نتایج پتانسیل زتا برابر است با  $-۲۷/۴۳$  و  $-۱۵/۳۳$ ). این بیان‌گر این است که غلظت فعال‌کننده سطحی نیز برای تعلیق بسیار مهم است. در مقادیر کم فعال‌کننده، ثبات و دافعه الکتریسته ساکن ناکافی است و اگر مقدار آن بیش از حد باشد، فشار اسمزی، بیشتر باعث تجمع نانوذره در تعلیق شده و پایداری سیال را کاهش می‌دهد. شبنیدی و همکاران [۱۹] برای نانولوله کربنی و چند فعال‌کننده سطحی نظیر صمغ عربی و سدیم دودسیل سولفات به نتیجه مشابه رسیدند که نسبت ۱-۱ بهترین پایداری را از خود نشان می‌دهد. در این پژوهش تمام آزمایش‌ها در دمای ۲۴ سانتی‌گراد انجام شد. باید عنوان گردد که قبل از پایداری نیاز است که نانوذرها شست‌شو داد شوند که اگر در زمان سنتز، مواد ناخواسته نظیر دوده به نانوذره چسبیده باشد، عاری گردد. در نتیجه قبل از پایداری سازی به کمک محلول اسیدسولفوریک (جرم مولکولی = ۹۸ گرم بر مول، چگالی برابر با ۱/۸۴ کیلوگرم بر لیتر، خلوص ۹۸٪) و اسید نیتریک (جرم مولکولی برابر با ۶۳/۹ گرم بر مول، چگالی برابر با ۱/۴۰ کیلوگرم بر لیتر، خلوص ۶۵٪) که به نسبت ۱-۳ حجمی می‌باشند، درون یک سونیکیتور حمام‌دار کاملاً هم‌زده و به کمک سانتی‌فیوژ که دارای ۵۰۰۰ دور بر دقیقه است با آب دیونیزه شست‌شو داده می‌شود که از اسیدهای واکنش نداده 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 و هیدروکسیل بر ساختار نانوذره بچسبند و به نوعی نانوذره عامل دار گردد که باعث پایداری بیشتر می‌گردد.

جهت ریخت‌شناسی پودر به دست آمده طیف‌سنج پراش انرژی پرتو ایکس، طیف‌سنج رامان و تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری انجام گردید که به ترتیب در جدول ۱، شکل ۲ و شکل ۳ مشاهده می‌گردند.

در این مقاله، هدف ساخت نانوسیال حاوی نانوصفحات گرافن در سیال پایه آب به روش غیرکوکوالانسی و بررسی آن در تبادل گر گرمایی صفحه‌ای است. از آنجا که تا زمان نگارش این مقاله، پژوهشی در زمینه بررسی هم‌زمان کارایی تبادل گر صفحه‌ای و اشردار در این ابعاد (نیمه صنعتی)، راندمان حرارتی نانوسیال گرافن و یافتن هم‌زمان شرایط مطلوب به روش تاگوشی (گرافن خالص به کمک این فعال‌کننده سطحی با توجه به اهمیت میزان پایداری) مشاهده نشده است، انگیزه گردید که این بررسی انجام گردد. برای این منظور به کمک فعال‌کننده سطحی سدیم دودسیل سولفات، نانوصفحات گرافن در سیال پایه آب به نسبت مناسب ۱-۱ پایدار شد. نانوسیال تهیه شده در بستر آزمایشگاهی مجهز به تبادل گر گرمایی صفحه‌ای مدل ام ۳، به کار گرفته شد تا با تغییر دمای هیتر، تغییر دبی سیال و غلظت سیال، شرایط مطلوب مشخص گردد. با توجه به اهمیت میزان راندمان نانوسیال و کارایی مبدل در شرایط مطلوب در کاربردهای صنعتی نظیر سرمایش بیشتر روغن دنده، ذوب کردن رمپ‌های مجتمع‌های تجاری و فرودگاه‌ها و یا سایز رادباتورهای اتمیبل، به کمک طراحی آزمایش و روش تاگوشی شرایط مطلوب مورد بررسی قرار گرفت و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید، تا صحت نتایج مورد بررسی قرار گیرد و همچنین به این روش اثر بخشی هر عامل (میزان دبی و غلظت مناسب) بدست آید.

## ۲- بخش آزمایشگاهی

### ۲-۱ مواد و روش

برای تهیه نانوسیال حاوی گرافن، نانوصفحات گرافن<sup>۱</sup> (قطر ۳۰-۲۰ میکرومتر و ضخامت در حدود ۴۰ نانومتر، محصول شرکت VCN، ۵ گرم)، آب دیونیزه (۲۰۰ لیتر، از داخل ایران) و فعال‌کننده سطحی سدیم دودسیل سولفات (۵۰ گرم، محصول شرکت آزمیران ایران) تهیه گردید. فعال‌کننده سطحی دارای گروه‌های غیر قطبی 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 ادامه می‌دهد. ابتدا ۱ گرم فعال‌کننده سطحی به آرامی به ارلن حاوی آب دیونیزه (آب دیونیزه از داخل خریداری شده، پی اچ خنثی) که روی همزن مغناطیسی قرار دارد اضافه می‌شود و به مدت ۲۵ دقیقه به کمک مگنت به خوبی هم‌زده می‌شود. سپس به میزان ۱ گرم از نانوصفحات گرافن به کمک اسپاتول و ترازوی دیجیتال وزن کرده و به محتویات ارلن اضافه می‌شود. به کمک یک

1 Graphene NanoPlate (GNP)



شکل ۱. نانوسیال گرافن پایدار در غلظت‌های متفاوت

Fig. 1. Stabilized graphene nanofluid at different concentrations

جدول ۱. طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس برای نانوصفحه‌های گرافن

Table 1. Energy Dispersive X-ray spectroscopy for graphene nanoplates

ماده خام	اجزای نماد	نام عنصر	غلظت اتمی	غلظت وزنی
گرافن	۶	C	۱۰۰	۱۰۰

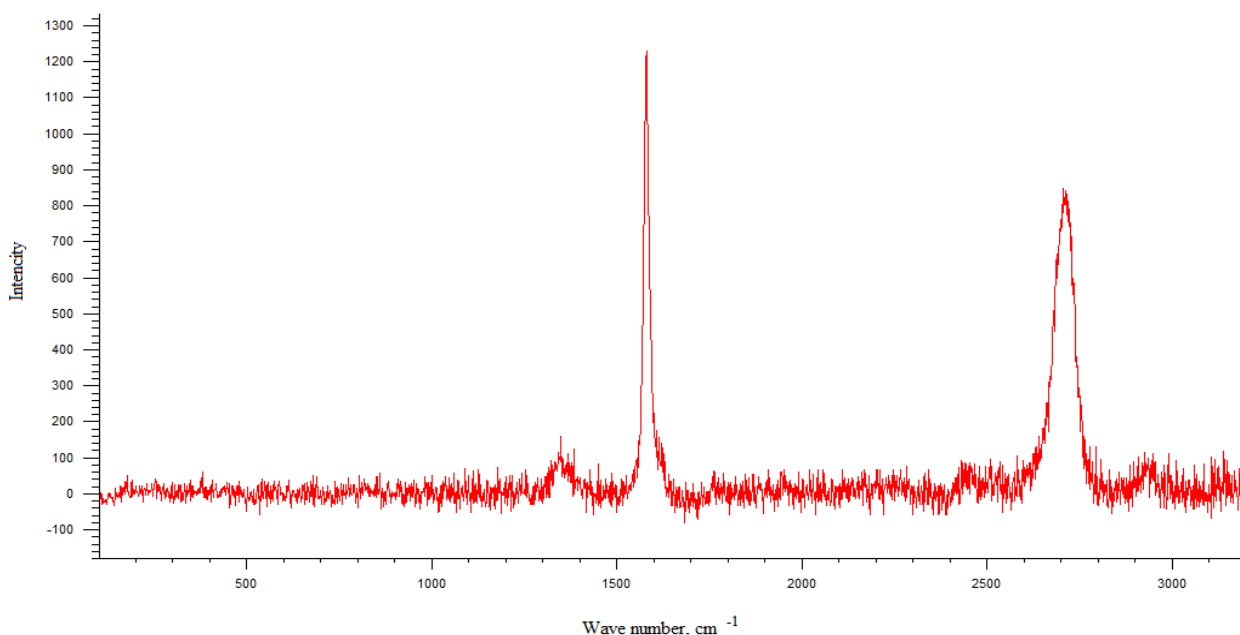
طول موج‌های بلند به عنوان نمونه در فرکانس‌های کم<sup>۳</sup>، ظاهر شوند که به خطوط استوکس معروف‌اند. حتی در طرف طول موج‌های کوتاه، ممکن است خطوط ضعیف‌تری به نام پاد استوکس با فرکانس<sup>۴</sup> ظاهر شوند. طیف‌سنجی رامان برای شناسایی ساختار مولکولی، بسیار مناسب است و با این روش تعیین فرکانس‌های چرخشی و ارتعاشی مولکول، ارزیابی هندسی و حتی تقارن مولکول‌ها امکان‌پذیر است. در برخی موارد که امکان تعیین ساختار مولکولی وجود ندارد، می‌توان با تکیه بر فرکانس‌های ثبت‌شده، قرار گرفتن اتم‌ها در یک مولکول را بررسی کرد. اطلاعاتی که توسط طیف‌سنجی مادون قرمز و رامان به دست می‌آید، بسیار مشابه هستند.

۱- طیف‌سنج پراش انرژی پرتوایکس<sup>۱</sup>: برای تجزیه و تحلیل ساختاری و خصوصیات شیمیایی نمونه، از طیف‌سنج پراش انرژی پرتوایکس استفاده شد. جدول ۱، طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس نانوصفحه‌های گرافن خام را نشان می‌دهد. همان‌طور که از جدول ۱ مشخص است، گرافن خالص شده است و عاری از آلودگی است.

۲- طیف‌سنج رامان<sup>۲</sup>: بهترین روش جهت بررسی ساختار نوع هیبریداسیون کربن‌های موجود، طیف‌سنجی رامان است. اگر گاز یا مایعی تحت تابش یک خط قوی با فرکانس اختیاری (به عنوان مثال، یکی از خطوط صادره از لامپ جیوه) قرار گیرد، نور پراکنده شده، عمدتاً دارای همان فرکانس است. اما یک یا چند خط ضعیف جابه‌جایی، ممکن است در طرف

3 vs  
4 va

1 Energy Dispersive X-ray spectroscopy (EDX)  
2 Raman



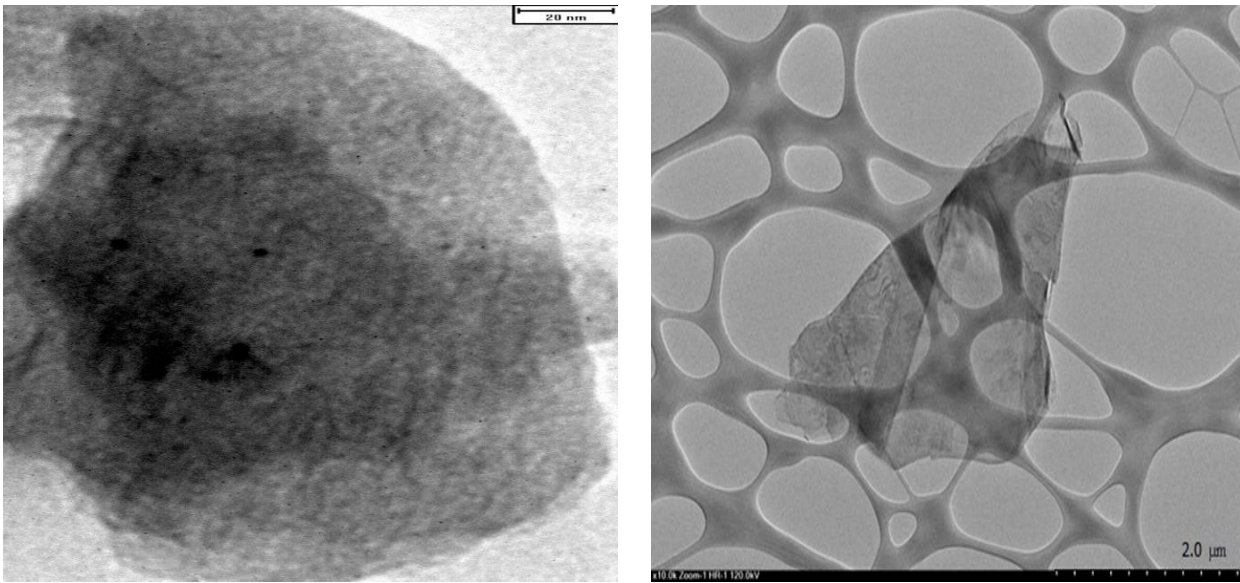
شکل ۲. آنالیز طیف‌سنجی رامان برای گرافن

Fig. 2. Raman spectroscopy analysis for graphene

بر سانتی‌متر (D باند)، پیک دوم حوالی ۱۶۰۰ بر سانتی‌متر (G باند) و پیک سوم نیز حوالی ۱۷۰۰ بر سانتی‌متر (۲D باند) مشاهده شد. در نتیجه صحت نتایج آنالیز رامان تأیید شد.

۳- میکروسکوپ الکترونی عبوری: جهت بررسی ریخت‌شناسی از میکروسکوپ الکترونی عبوری استفاده شد. میکروسکوپ الکترونی عبوری از جمله میکروسکوپ‌های الکترونی است که در آن از پرتو الکترونی متمرکز شده، برای به دست آوردن تصاویر استفاده می‌شود. در این میکروسکوپ، یک پرتو الکترونی مثل نور از درون نمونه بسیار نازک عبور کرده و متأثر از ساختار درونی نمونه می‌گردد. در واقع هنگامی که الکترون‌ها در میکروسکوپ الکترونی عبوری از درون نمونه عبور می‌کنند، انرژی خود را از دست می‌دهند و از طرف دیگر نمونه خارج می‌شوند. الکترون‌های خروجی دارای توزیع خاصی از انرژی هستند که مختص عنصر یا عناصر تشکیل‌دهنده نمونه است. پرتو الکترونی عبور کرده از نمونه، روی یک صفحه فسفری متمرکز و سپس نمایش داده شده و یا برای پردازش کامپیوتری به یک کامپیوتر فرستاده می‌شود. بعد از تشکیل شدن تصاویر روی صفحه فلورسنت یا

یکی از اصلی‌ترین کاربردهای طیف‌سنجی رامان، تعیین ساختار شیمیایی ترکیبات است. کاربرد اصلی رامان در بحث نانو ساختارهای کربنی، تعیین کردن نسبت گروه‌های بی‌نظم به گروه‌های مماسی است. هیبریداسیون کربن موجود در گرافن (دارای خلوص بالا)  $sp^2$  است و اضافه شدن گروه‌های عاملی به ساختار اصلی آن‌ها، موجب تغییر هیبریداسیون کربن و تبدیل آن به  $sp^3$  می‌شود. گروه‌های بی‌نظم (D باندها) در گرافن دارای هیبریداسیون  $sp^2$  و گروه‌های مماسی (G باندها) شامل هیبریداسیون  $sp^2$  است. افزایش نسبت  $ID/IG$ ، به معنای تغییر تعدادی از هیبریدهای  $sp^2$  به  $sp^3$  است که این پدیده، در نتیجه اضافه شدن گروه‌های عاملی به ساختار اصلی رخ می‌دهد. به بیان دیگر هنگامی که  $\pi$  الکترون‌های موجود در ساختار گرافن تخریب می‌شوند، نقاط فعالی جهت واکنش با سایر مواد ایجاد می‌گردد و این نقاط به راحتی با گروه‌های عاملی وارد واکنش می‌شوند و این واکنش منجر به تغییر هیبریداسیون می‌گردد. نتایج طیف‌سنجی رامان جهت تعیین ساختار شیمیایی نانوصفحه‌های گرافن در شکل ۲ مشاهده می‌گردد. باتکلیو و همکاران [۲۰] برای نانوصفحه‌های گرافن مختلف (صفحات مختلف) به کمک آنالیز رامان سه پیک گزارش کردند. پیک اول حوالی ۱۴۰۰-۱۲۰۰



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری برای گرافن

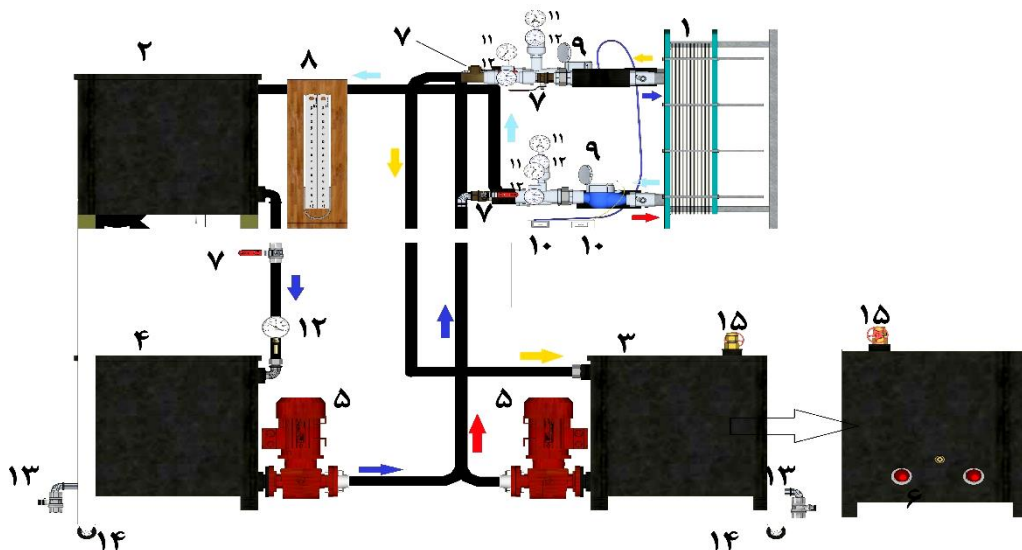
Fig. 3. Transmission Electron Microscope Images of graphene

#### ۲-۲- دستگاه آزمایشگاهی

شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب طرحواره دستگاه و بستر ساخته شده، جهت بررسی ضریب کلی انتقال حرارت و افت فشار گرافن-آب در رژیم جریان آرام (گستره اعداد رینولدز ۱۵۰۰-۵۰۰) 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 تبادل گر) و بخش مربوط به اندازه‌گیری دبی سیال است. جهت اندازه‌گیری افت فشار، مانومتر L شکل نیز در بستر، نصب شده است. همچنین در قسمت منبع گرم، دو المنت گرمایی مجهز به ترموستات قرار دارد. برای این‌که دمای سیال سرد بعد از تبادل حرارتی در تبادل گر، به دمای ابتدایی برسد، در مسیر سیال سرد و قبل از منبع ذخیره سیال سرد، از یک سیستم سردساز استفاده شده است. برای حداقل رساندن اتلاف حرارت در مسیر سیال، از عایق الاستومری 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 اولیه سیال برسد، شیر باز گردد و سیال از منبع سردسازی به منبع ذخیره منتقل گردد.

دوربین، تصاویر از داخل نمونه‌ها در بزرگ‌نمایی بالا و توان تفکیک بالا ثبت می‌شود. در روش بررسی ساختار با میکروسکوپ الکترونی عبوری، مناسب‌ترین نوع نمونه، نمونه‌ای خیلی نازک است که الکترون قادر به عبور از آن باشد. در این راستا قدرت عبور الکترون از نمونه به ولتاژ شتاب‌دهنده پرتوهای الکترونی و نیز چگالی و عدد اتمی نمونه بستگی دارد. به‌طور کلی آماده‌سازی نمونه‌های میکروسکوپ الکترونی عبوری، مشتمل بر دو مرحله آماده‌سازی اولیه و نازک کردن نهایی است. برای نازک کردن نمونه‌های میکروسکوپ الکترونی عبوری، از روش‌های متفاوتی همچون بمباران یونی نمونه یا غوطه‌ورسازی در یک محلول خورنده استفاده می‌شود. پس از عملیات آماده‌سازی، معمولاً نمونه‌ها روی یک توری فلزی کوچک با قطر چند میلی‌متر (۳ میلی‌متر) ریخته شده و سپس درون میکروسکوپ قرار داده می‌شود. معمولاً می‌توان در عکس‌های مربوط به نانولوله‌های کربنی، نقض‌های موجود بر روی سطح، کاهش یا افزایش قطر، کوتاه شدن طول و بریده شدن را بررسی کرد.

در شکل ۳، تصاویر به‌دست‌آمده از میکروسکوپ الکترونی عبوری مرتبط با نانوصفحه‌های گرافن آمده است که دارای مقیاس ۲۰ نانومتر است و به راحتی سایز نانوصفحه‌های گرافن خام خالص، به دست می‌آید.



شکل ۴. طرحواره دستگاه آزمایش

Fig. 4. Schematic of experimental setup



شکل ۵. بستر آزمایشگاهی مورد استفاده

Fig. 5. Laboratory setup

می‌شود. سپس برای سایر غلظت‌های نانوسیال آزمایش‌ها تکرار می‌شود. دمای هیتر ۶۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. دبی نانوسیال نیز ۳-۶ لیتر بر دقیقه است. دمای ورود نانوسیال نیز دمای محیط (۲۴ درجه سانتی‌گراد) است.

در ابتدا بستر آزمایشگاهی با سیال آب-آب آزمایش می‌شود و سپس با نانوسیال‌های تهیه شده آزمایش‌ها ادامه می‌یابد. در ابتدا هیتر در دمای مشخص بوده و با تغییر دبی در یک درصد وزنی ثابت مانند ۰/۰۱ آزمایش‌ها انجام

جدول ۲. مشخصه‌های هندسی تبادل گر گرمایی صفحه‌ای برند ام ۳

Table 2. Geometric characteristics of M3 heat exchanger

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)

رابطه ژوان-روتزل، معادله ماکسول اصلاحی و رابطه بچلر برای نانوسیال و سیال گرم (آب دیونیزه) محاسبه می‌گردد [۱۳ و ۱۵ و ۲۱]. به کمک دبی‌های ثبت شده و خواص ترموفیزیکی، سرعت جرمی در کانال، در دهانه ورود و خروج، عدد رینولدز، عدد پرانتل به ترتیب از رابطه (۱) تا (۴)، محاسبه می‌شوند. برای تبدیل کسر حجمی و وزنی از رابطه (۵) و عدد ناسلت از رابطه (۶) استفاده شد. ضریب انتقال حرارت جابجایی از رابطه (۷) و ضریب کلی انتقال حرارت از رابطه (۸) محاسبه می‌شوند. با به دست آوردن ضریب اصطکاک، افت فشار برای کانال و ورودی‌ها به ترتیب از رابطه (۹) تا (۱۱) به دست می‌آید. افت فشار کل مجموع، دو افت فشار کانال و ورودی است و از رابطه (۱۲) محاسبه می‌گردد [۱۶ و ۱۸ و ۲۲ و ۲۳].

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

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

۱-تبادل گر گرمایی صفحه‌ای (مدل ام ۳، برند ثنا مبدل با زاویه شورون ۴۵ درجه)، ۲-قسمت سرمایش (منبع سرمایش ثانویه، توان ۱/۵ اسب بخار +، حاوی گاز R۴۰۴)، ۳-منبع ذخیره گرم (۱۲۵ لیتر، جنس استنلس استیل ۳۰۴، مجهز به المنت گرمایی)، ۴-منبع ذخیره سرد (۱۲۵ لیتر، جنس استنلس استیل ۳۰۴)، ۵-پمپ (برند نوید، مدل اس ۱۰۰)، ۶-المنت‌های گرمایی (هیتر)، ۷-شیرهای تنظیم دبی ورود و خروج سیال، ۸-اختلاف فشارسنج جیوه‌ای U شکل، ۹-دبی‌سنج، ۱۰-شمارنده دبی (کنتور) جهت بررسی دبی، ۱۱-مانومتر (برند پکنز، ۱۶۰-۰ میلی‌بار، عدد)، ۱۲-ترمومتر (برند پکنز، ۱۲۰-۰ درجه سانتی‌گراد، عدد)، ۱۳-دریچه برداشت نمونه و تخلیه سیال، ۱۴-چرخ، ۱۵-شیر اطمینان فشار.

جدول ۲ پارامترهای هندسی تبادل گر گرمایی صفحه‌ای مورد استفاده را نشان می‌دهد. تبادل گر گرمایی صفحه‌ای دارای جریان معکوس تک گذر و دارای فریم U شکل است (تمام ورود و خروج‌های سیال روی فریم جلو است).

به کمک بستر آزمایشگاهی تهیه شده در ورود و خروج تبادل گر گرمایی، دما و فشار برای سیال سرد و گرم خوانده شد و دبی حجمی و افت فشار برای دو سیال یادداشت گردید. با توجه به دماهای تبادل شده دو سیال در ورود و خروج تبادل گر گرمایی، خواص ترموفیزیکی قابل محاسبه است. از روی دمای میانگین سیال، خواص ترموفیزیکی نظیر چگالی، ظرفیت گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارتی و لزجت سیال به ترتیب به کمک تئوری اختلاط،



جدول ۳ به دست می‌آید. ثابت  $b$  نیز با توجه به این که برای گرمایش سیال یا سرمایش سیال استفاده می‌گردد به ترتیب  $۰/۴$  و  $۰/۳$  انتخاب می‌گردد [۲۲ و ۲۴]. در روابط بالا  $m$  نماد دبی جرمی،  $N_{cp}$  تعداد کانال به ازای هر گذر،  $b$  ضخامت و اشتر  $(b=p-t)$ ، که به کمک جدول ۲ و معادل  $۰/۰۰۲۵$  متر است،  $D_p$  قطر پیورت،  $D_h$  قطر هیدرولیکی (که معادل  $\frac{2b}{\phi}$  است که  $\phi$  ضریب بزرگ‌شدگی سطح ( $۱/۰۷۸$ ) است)،  $w$  کسر جرمی و  $\phi$  کسر حجمی است. همچنین  $N_p$  بیانگر تعداد گذرها (تک گذر)،  $LMTD$  اختلاف دمای لگاریتمی (برای جریان ناهمسو) و  $L_{eff}$  طول مسیر بین دهانه ورودی و خروجی مبدل است ( $۰/۳۵۷$  متر). در تمام روابط  $\rho$  چگالی،  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه،  $k$  ضریب هدایت حرارتی و  $\mu$  لزجت سیال می‌باشد.

به کمک رابطه (۱۳) راندمان حرارتی (اثربخشی) یا نسبت انتقال حرارت واقعی به ماکسیمم انتقال محاسبه می‌گردد [۲ و ۲۵]. در این رابطه برای بررسی  $C_{min}$  از رابطه (۱۴) استفاده شده است:

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

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

همچنین از آنجا که برای سیال گرم، دبی ثابت است و تنها دبی سیال سرد در حال تغییر است و با توجه به این که قطر لوله‌ها و مسیر لوله یکسان است، می‌توان از رابطه (۱۵) توان پمپ در حالتی که نانوسیال وجود دارد نسبت به حالتی که سیال پایه آب است (بدون نانوسیال) به دست آورد [۶].

$$\left(\frac{W_{nf}}{W_b}\right) = \left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_b}\right) \left(\frac{\rho_b}{\rho_{nf}}\right)^2 \quad (15)$$

به کمک رابطه (۱۶) می‌توان کارایی یا عملکرد<sup>۲</sup> را محاسبه کرد. برای این که از لحاظ اقتصادی استفاده از نانوسیال، مقرون به صرفه باشد، باید نسبت ضریب جابجایی انتقال حرارت به نسبت توان پمپاژ در دو حالت استفاده از نانوسیال و بدون نانوسیال بیشتر از یک باشد [۳].

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

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

$$\phi = \frac{w \rho_b}{(w \rho_b) + (1-w) \rho_{np}} \quad (5)$$

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

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

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

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

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

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

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

در روابط بالا ثابت‌های  $C_n$ ،  $n$ ،  $K_p$  و  $m$  با توجه به عدد رینولدز از

1 Thermal effectiveness

2 Efficiency

جدول ۳. ثابت‌ها برای محاسبه انتقال گرما و افت فشار یک‌فاز در تبادل گر گرمایی صفحه‌ای گسکت دار [۲۲].

Table 3. Constants in heat transfer and pressure drop of a single-phase gasket-plate heat exchanger

افت فشار			انتقال گرما			
$m$	$K_p$	$Re$	$n$	$C_n$	$Re$	زاویه شورون (درجه)، $\leq 30$
۱	۵۰	$> 10$	۰/۳۴۹	۰/۷۱۸	$< 10$	
۰/۵۸۹	۱۹/۴	۱۰۰-۱۰	۰/۶۶۳	۰/۳۴۸	$> 10$	
۰/۱۸۳	۲/۹۹	$> 100$				
۱	۴۷	$< 10$	۰/۳۴۹	۰/۷۱۸	۱۰	۴۵
۰/۶۲۵	۱۸/۲۹	۳۰۰-۱۰	۰/۵۵۸	۰/۴۰۰	۱۰۰-۱۰	
۰/۲۰۶	۱/۴۴۱	$> 300$	۰/۶۶۳	۰/۳۰۰	$> 100$	
۱	۲۴	$< 40$	۰/۳۶۲	۰/۵۶۲	$< 20$	۶۰
۰/۴۵۷	۳/۲۴	۴۰-۴۰۰	۰/۵۲۹	۰/۳۰۶	۴۰۰-۲۰	
۰/۲۱۵	۰/۷۶	$> 400$	۰/۷۰۳	۰/۱۰۸	$> 400$	

$$\% \frac{U_x}{x} = \left[ \left( \frac{U_{x1}}{x1} \right)^2 + \left( \frac{U_{x2}}{x2} \right)^2 + \dots + \left( \frac{U_{xn}}{xn} \right)^2 \right] \frac{1}{2} \quad (18)$$

$$\eta = \left( \frac{W_{nf}}{W_b} \right) \left( \frac{h_{nf}}{h_b} \right) \quad \eta = \left( \frac{h_{nf}}{h_b} \right) \left( \frac{W_{nf}}{W_b} \right) \quad (16)$$

در رابطه (۱۷)، ثابت  $n$  تعداد اندازه‌گیری‌ها و  $\bar{x}$  مقدار میانگین آزمایش است. برای عدم قطعیت<sup>۲</sup> آزمایش‌ها، نیز از رابطه کلاین و مک کلانتاک<sup>۳</sup> استفاده شد (رابطه (۱۹)) که در آن  $W_{Xn}$  محدوده خطای اندازه‌گیری پارامتر  $X_n$  است [۲ و ۲۶]. نتایج حاکی از آن دارد که عدم قطعیت کارایی تبادل گر گرمایی نیز کمتر از ۱۰ درصد است.

برای بررسی خطا، به این دلیل که در تکرار آزمایش، از مقدار میانگین استفاده می‌شود و انحراف از مقدار میانگین ممکن است گاهی مثبت، منفی و گاهی متوسط آن‌ها برابر صفر گردد، از اختلاف معیار استفاده می‌گردد. ولی متداول است که از انحراف معیار که مجذور اختلاف معیار است، طبق رابطه (۱۷) استفاده گردد. برای محاسبه خطای دستگاهی نیز از رابطه بک‌ویت<sup>۱</sup> برطبق رابطه (۱۸) استفاده شد.

$$W_x = \left( \left( \frac{\partial x}{\partial x_1} w_{x1} \right)^2 + \left( \frac{\partial x}{\partial x_2} w_{x2} \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial x}{\partial x_n} w_{xn} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

$$\sigma = \left( \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

به کمک رابطه‌های (۱۷) تا (۱۹) برای این آزمایش، عدم قطعیت وسایل، تکرار آزمایش و نتایج در جدول‌های ۴ و ۵ خلاصه شده است.

2 Uncertainty  
3 Kline and McClontock

1 Bechwith

جدول ۴. عدم قطعیت وسیله و تکرار آزمایش

Table 4. Device uncertainty and test repetition

پارامترها	عدم قطعیت تکرار (%)	عدم قطعیت وسیله (%)
دمای ورودی نانوسیال (°C)	۲/۵۷	۱/۱۸
دمای خروجی نانوسیال (°C)	۱/۶۲	۲/۰۷
دمای آب ورودی (°C)	۵/۸۹	۴/۱۶
دمای آب خروجی (°C)	۲/۰۶	۲/۰۲
دبی نانوسیال (lit/s)	۳/۹۷	زمان = ۰/۲۳ s
		حجم سیال = ۱/۴۲ lit
اختلاف فشار سمت نانوسیال (kPa)	۳/۵۶	۲/۴۰

جدول ۵. عدم قطعیت مربوط به نتایج آزمایش

Table 5. Uncertainty of test results

نتایج	عدم قطعیت (%)
عدد ناسلت	۴/۵۹
ضریب جابجایی انتقال حرارت	۶/۷۸
ضریب اصطکاک	۴/۹۸

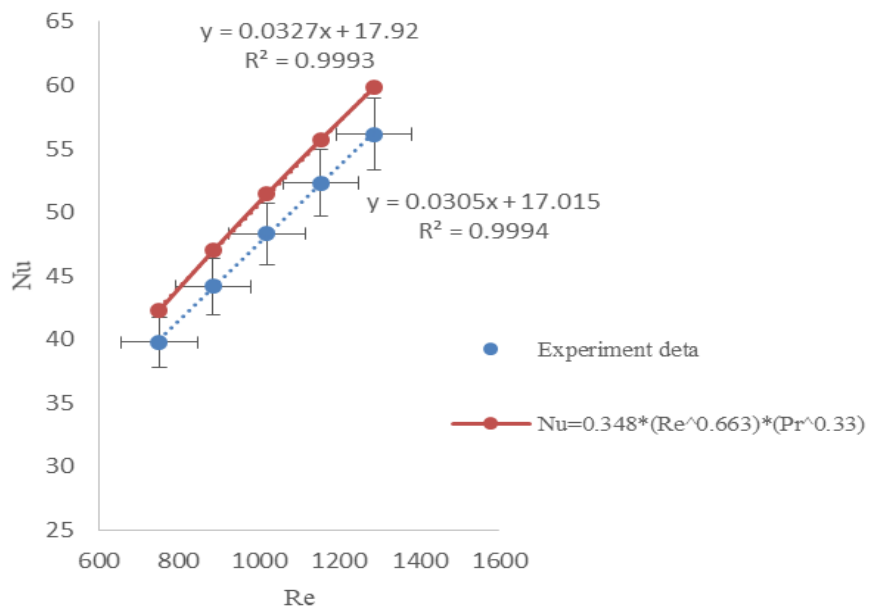
۳- نتایج و بحث

در مطالعه حاضر از نانوسیال حاوی نانو صفحات گرافن در غلظت‌های ۰/۱-۰/۱۴۵ درصد وزنی استفاده گردید. دبی سیال گرم ۵ لیتر بر دقیقه است. برای آزمایش بستر آزمایشگاهی، ابتدا برای سیال‌های آب-آب آزمایش‌ها انجام گردید و سپس برای نانوسیال-آب، آزمایش‌ها انجام شد. با مقایسه نتایج به دست آمده از نمودار ناسلت برحسب رینولدز برای سیال آب با نتایج کاکاک و تایوار [۲۲ و ۲۵] و همچنین با مقایسه نتایج اختلاف فشارسنج‌ها و مانومتر U شکل و نتایج روابط (۶) و (۷)، می‌توان صحت آزمایش‌ها را تأیید نمود که در شکل ۶ آمده است. 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 تبادل گر گرمایی نیز 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 شکل ۶ رسم گردید.

در شکل ۶ نتایج به دست آمده از منحنی‌های ناسلت برحسب رینولدز برای سیال آب-آب رسم شده است. با مقایسه نتایج با معادله تجربی تایوار [۲۵] مشخص گردید که تفاوت موجود مربوط به زاویه شورون و فاصله بین صفحات است که کاکاک [۲۲] نیز دلیل مشابه برای این اختلاف از رابطه تئوری، برای زاویه‌های مختلف با توجه به محدوده رینولدز بیان نموده است. در این تحقیق زاویه شورون صفحات ۴۵ درجه و عدد رینولدز بیشتر از ۱۰۰ است، در نتیجه رابطه ناسلت و ضریب اصطکاک به کمک جدول ۲ و روابط (۶) و (۹) به دست می‌آیند. با توجه به نتایج به دست آمده، معادله پیشنهادی برای ناسلت به صورت  $Nu = 0.3 Re^{0.663} Pr^{0.3} \left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_b}\right)^{0.14}$  است.

1 Error bar



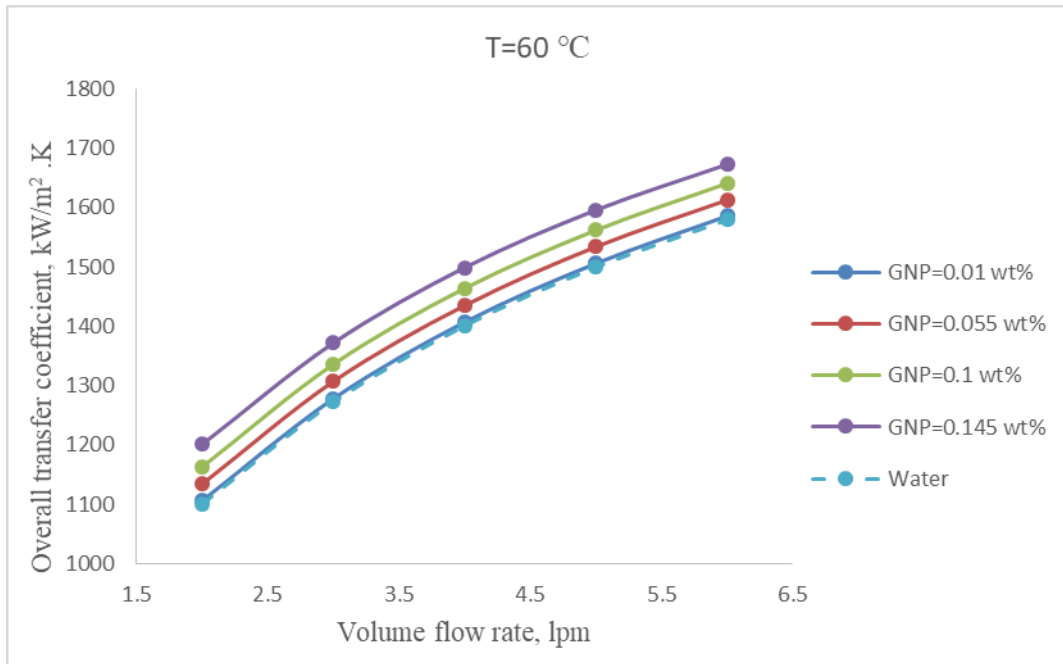
شکل ۶. مقایسه نتایج به دست آمده برای تبادل گر گرمایی با زاویه شورون ۴۵ درجه با روابط تئوری برای سیال پایه آب [۲۵].

Fig. 6. Comparison of experimental results of 45° chevron angle heat exchanger with theoretical equations for water-based fluid

متناسب خواهد شد. در نتیجه در یک دبی مشخص (رینولدز مشخص)، بیشتر کردن کسر نانوذره‌ها به سیال پایه، باعث بهبود دو ضریب انتقال حرارت به شکل هدایت و جابجایی می‌شود، در نتیجه ضریب کلی انتقال حرارت بیشتر می‌شود. به‌طور کلی می‌توان افزایش ضریب انتقال حرارت را به چند عامل نسبت داد: ۱- بیشتر شدن ضریب هدایت حرارتی، ۲- اضافه کردن نانوذره‌ها به سیال پایه، که باعث تولید کلاستر (خوشه) در سیال شده و به تبع آن مقاومت حرارتی کم‌تر می‌شود، در نتیجه ضریب انتقال حرارت بیشتر می‌شود (گاهی خوشه‌ای شدن، یک مسیر مناسب برای بیشتر شدن سرعت انتقال بین سیال ایجاد می‌کند، البته، مقادیر بالای خوشه در سیال، باعث رسوب بیشتر می‌گردد که نامناسب است) ۳- برخورد تصادفی نانوذره‌ها به همدیگر و تفاوت سرعت نانوذره‌ها و سیال پایه نیز، به بیشتر شدن انتقال حرارت کمک می‌کند، زیرا اگر ذرات به‌صورت موازی با جهت جریان حرکت کنند، باعث کم شدن انتقال حرارت می‌شوند. البته میزان این بیشتر شدن انتقال حرارت، بسته به سایز و نوع ذره، نسبت سطح به حجم، نوع روش ساخت ذره، می‌تواند تغییر کند. امیری و همکاران [۴] و گودرزی و همکاران [۲۷] دلایل مشابه را بیان نمودند.

برای مشخص شدن اثر غلظت بر انتقال حرارت و افت فشار، از نانوسیال با درصد‌های وزنی ۰/۰۱، ۰/۰۵۵، ۰/۱ و ۰/۱۴۵ استفاده گردید. شکل ۷ اثر دبی نانوسیال بر ضریب کلی انتقال حرارت نانوسیال در درصد وزنی‌های بیان شده، بررسی شده است.

نتایج نشان دادند که افزایش درصد وزنی از ۰/۰۱ درصد وزنی به ۰/۱۴۵ درصد وزنی باعث بیشتر شدن ضریب کلی انتقال حرارت می‌شود (در دبی ۲ لیتر بر دقیقه، بیشتر شدن درصد وزنی باعث ۸/۵۱٪ ضریب کلی انتقال حرارت بیشتر گردد و برای دبی ۶ لیتر بر دقیقه این میزان به ۵/۵۳٪ است). همچنین مشاهده گردید در تمام دبی‌ها نانوسیال نسبت به سیال پایه، ضریب کلی انتقال حرارت بیشتر است و با بیشتر شدن دبی در یک غلظت مشخص، این میزان بیشتر نیز می‌گردد. دلیل را می‌توان به، اضافه کردن نانوذره به سیال پایه که باعث بیشتر شدن رسانایی سیال می‌شود نسبت داد. به‌عبارت‌دیگر بیشتر شدن غلظت، باعث می‌شود که برخورد‌های بین مولکولی بیشتر صورت بگیرد در نتیجه عدد رینولدز (یا پکلت) و ضریب انتقال حرارت به شکل جابجایی بیشتر شود. شاید بتوان افزایش ضریب انتقال حرارت به شکل جابجایی را به افزایش  $k / \delta t$  نسبت داد [۲۷]. اگر تغییر دما در لایه مرزی حرارتی، خطی فرض شود، در نتیجه رسانایی گرمایی با ضریب انتقال حرارت،



شکل ۷. اثر دبی سیال بر ضریب کلی انتقال حرارت در غلظت‌های متفاوت

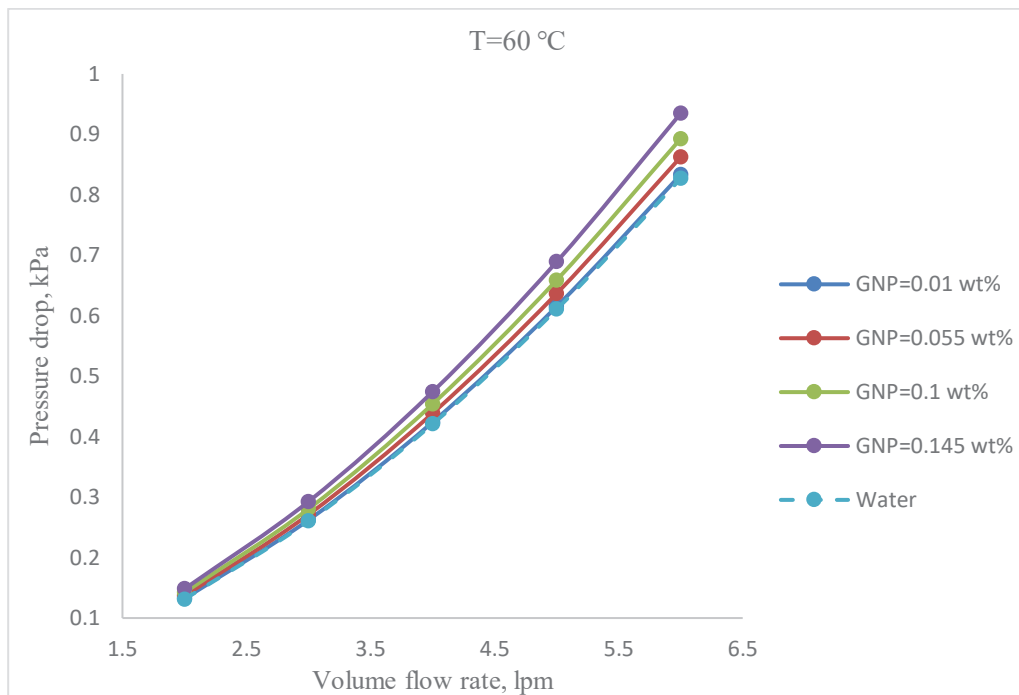
Fig. 7. Effect of flow rate on overall heat transfer coefficient at different concentrations

غلظت به بیشتر شدن ضریب اصطکاک می‌انجامد، در نتیجه افت فشار هم در لوله و هم در کانال‌های جریان تبادل گر گرمایی بیشتر شده و این به معنای بیشتر شدن افت فشار کل است. همچنین دلیل این زیاد شدن افت فشار را می‌توان به بیشتر شدن لزجت نسبت داد. بیشتر شدن غلظت، باعث بیشتر شدن لزجت می‌گردد در نتیجه افت فشار نیز زیاد می‌شود. با بیشتر شدن دبی نانوسیال (لزجت بیشتر شده)، برخوردهای بین مولکولی بیشتر می‌گردد که نتیجه آن بیشتر شدن سرعت جرمی در کانال و دهانه ورودی و همچنین عدد رینولدز است که به تبع آن افت فشار بیشتر می‌گردد (رابطه‌های (۱۰) و (۱۱)).

با توجه به شکل‌های ۷ و ۸ مشخص گردید که افزایش غلظت، هم‌زمان باعث بیشتر شدن ضریب کلی انتقال حرارت (اثر مثبت) و افت فشار می‌گردد (اثر منفی) در نتیجه برای یافتن شرایط مطلوب و بهینه، نمودارهای راندمان حرارتی نانوسیال و کارایی تبادل گر گرمایی بررسی گردید. از شکل ۹ مشخص است که افزایش غلظت باعث بهبود راندمان حرارتی نانوسیال می‌گردد (۵/۹۴٪ در دبی ثابت ۲ لیتر بر دقیقه)، که می‌توان علت آن را به بیشتر شدن دبی جرمی سیال در یک دمای مشخص و کاهش مخرج رابطه (۱۳) نسبت داد. با بیشتر شدن دبی در یک غلظت ثابت، این میزان

شکل ۸ اثر دبی سیال بر میزان افت فشار سیال بررسی شده است، زیرا ممکن است بیشتر شدن غلظت باعث بهبود انتقال حرارت گردد ولی افت فشار در تبادل گر گرمایی را بسیار بالا ببرد که باعث افزایش هزینه گردد (رسوب‌گذاری بیشتر یا تغییر پمپ)، در نتیجه بررسی میزان افت فشار هم بسیار مهم است.

از نتایج مشخص است که استفاده از نانوسیال در غلظت‌های بالاتر، باعث بیشتر شدن افت فشار می‌گردد. البته این افزایش در دبی‌های پایین، بسیار نزدیک به سیال پایه است (در درصد وزنی ۰/۰۱ و برای دبی ۲ لیتر بر دقیقه، میزان افت فشار برای نانوسیال و سیال پایه به ترتیب ۰/۱۳۲۲ و ۰/۱۳۱۲ کیلوپاسکال است). همچنین استفاده از نانوسیال در دبی‌های بالاتر باعث بیشتر شدن افت فشار نانوسیال می‌گردد، زیرا نانوذره بیشتری به سیال پایه اضافه شده است که افت فشار را بالا می‌برد. در تمام غلظت‌های بیان شده، افت فشار بیشتر از سیال پایه است، البته در درصد وزنی ۰/۰۱ این اختلاف ناچیز است به عنوان نمونه در دبی ۲ لیتر بر دقیقه، این اختلاف ۰/۷۶٪ است. در دبی ۲ لیتر بر دقیقه و درصد وزنی ۰/۰۱ کمترین افت فشار مشاهده می‌شود (۰/۱۳۱۲ کیلوپاسکال). بیشتر شدن غلظت با بالا رفتن نرخ جریان ورودی در دهانه همراه است. از طرفی در یک دبی ثابت، بیشتر شدن



شکل ۸. اثر دبی سیال بر افت فشار سیال در غلظت‌های متفاوت

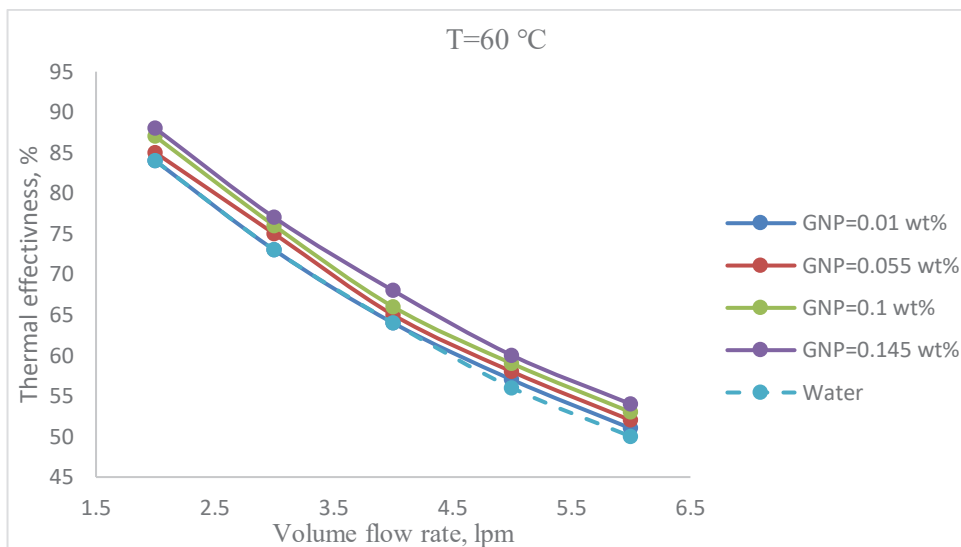
Fig. 8. Effect of flow rate on pressure drop at different concentrations

پایه و بیشتر شدن اثر لزجت نسبت به ضریب هدایت حرارتی، در غلظت‌های بالا عنوان نمود که به کمتر شدن کارایی می‌انجامد. بیشترین کارایی تبادل گر گرمایی زمانی است که دبی نانوسیال کمترین میزان و غلظت آن بیشینه باشد (در دبی ۲ لیتر بر دقیقه و درصد وزنی ۰/۱۴۵ کارایی بیشینه برابر با ۱/۲۴۴ است). همچنین مشاهده می‌گردد در تمام غلظت‌ها با توجه به رابطه (۱۶)، این میزان بیشتر از یک است که نشان می‌دهد، استفاده از نانوسیال مناسب است و از لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر است.

با بررسی شکل‌های ۵ و ۶ مشخص گردید که بیشتر شدن دبی و غلظت، باعث بیشتر شدن هم‌زمان ضریب کلی انتقال حرارت و افت فشار می‌شود (یک اثر مثبت و یک اثر منفی)، در نتیجه برای بررسی اثربخشی هر یک در شرایط بهینه (بالا بردن راندمان حرارتی)، به کمک نرم‌افزار کوالایتک<sup>۱</sup> که از روش تاگوچی کمک می‌گیرد، استفاده گردید [۲۸ و ۲۹]. در طراحی تاگوچی به عوامل ثابت، فاکتورهای مؤثر بر میزان پاسخ و به تغییرات که می‌توان در فاکتورها اعمال کرد، سطوح گویند. بعد از انتخاب فاکتور و سطوح و شرایط مطلوب آزمایش (بسته به کاربرد از میان افزایش انتقال حرارت، کاهش افت

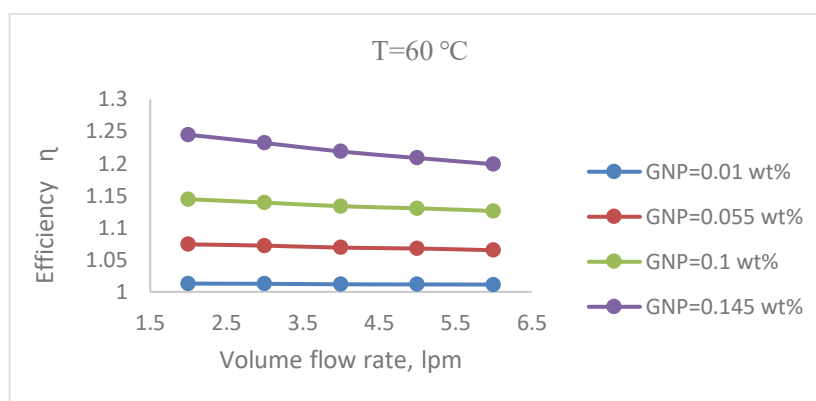
به شدت کم می‌گردد. همچنین می‌توان به بالا رفتن بر خورد‌های بین مولکولی و رسوب‌گذاری بیشتر دلیل آن را نسبت داد. بعلاوه در تمام دبی‌ها، راندمان حرارتی نانوسیال بیشتر از سیال پایه است و این میزان با بیشتر شدن درصد وزنی نانوسیال نیز تقویت می‌شود. در یک دمای ثابت (۶۰ درجه سانتی‌گراد) و دبی مشخص، افزایش غلظت نسبت به سیال پایه باعث کاهش گرمای ویژه سیال می‌گردد (در دبی ثابت ۲ لیتر بر دقیقه، میزان گرمای ویژه نانوسیال برای درصد وزنی ۰/۰۱ و ۰/۱۴۵، به ترتیب ۴۱۳۹ و ۳۶۱۲ ژول بر کیلوگرم در کلون است). بیشترین راندمان حرارتی (۸۹٪) مربوط به نانوسیال در درصد وزنی ۰/۱۴۵ و دبی حداقل (۲ لیتر بر دقیقه) است.

شکل ۱۰ اثر دبی نانوسیال بر کارایی تبادل گر گرمایی، در غلظت‌های متفاوت را نشان می‌دهد. دیده می‌شود، بیشتر شدن غلظت، به بالاتر رفتن کارایی تبادل گر گرمایی می‌انجامد. همچنین با افزایش دبی نانوسیال این میزان کمتر می‌شود، البته بسته به درصد وزنی متفاوت نانوسیال این شیب رشد، متفاوت است (افزایش دبی از ۲ به ۶ لیتر بر دقیقه در درصد وزنی ۰/۰۱ باعث کمتر شدن ۱۴/۰٪ کارایی می‌گردد ولی این میزان در درصد وزنی ۰/۱۴۵، ۳/۸۴٪ است) که می‌توان دلیل را از مقایسه نسبت نانوسیال به سیال



شکل ۹. اثر غلظت بر راندمان حرارتی نانوسیال در دبی‌های متفاوت

Fig. 9. Effect of concentration on thermal effectiveness of nanofluid in different flow rates



شکل ۱۰. اثر دبی نانوسیال بر کارایی در غلظت‌های متفاوت

Fig. 10. Effect of nanofluid flow rate on efficiency at different concentrations

اغتشاش در آزمایش (N). در مرحله بعد می‌توان با انتخاب آنووا، مجموع مربعات خطا، درجه آزادی<sup>۲</sup> (بتعداد سطح، منهای یک)، واریانس (تقسیم مجموع مربعات خطا بر درجه آزادی)، ضریب فیشر (واریانس هر فاکتور تقسیم بر واریانس خطا) و درصد سهم هر فاکتور (شرکت‌پذیری) را مشاهده کرد. ضریب فیشر بیان‌گر معنادار بودن اثر فاکتورها است. هرچه درصد سهم بیشتر باشد، بیان‌گر تغییر راحت‌تر آن فاکتور در آن سطح موردنظر بر نتایج

- 1 ANOVA
- 2 DOF

فشار، افزایش راندمان نانوسیال و یا افزایش عملکرد مبدل)، طراحی آزمایش مشخص می‌کند، که کدام سطح از هر فاکتور، برای آزمایش‌ها مطلوب است. همچنین نرم‌افزار، نمودارهایی در اختیار قرار می‌دهد که از روی آن به راحتی مجدداً اثر سطوح و فاکتورها بر نتیجه و اثربخشی هر یک با توجه به شیب نمودارها، مشخص می‌گردد. در قسمت آنالیز نرم‌افزار، می‌توان با انتخاب گزینه در نرم‌افزار S/N Analysis میزان پراکندگی پاسخ‌ها را بررسی کرد. منظور از سیگنال مؤلفه نشانه و مطلوب است (S) و منظور از نویز مؤلفه

جدول ۶. فاکتور و سطوح انتخابی برای تحلیل تاگوچی

Table 6. Factors and levels in Taguchi analysis

پارامترها	فاکتورها	سطوح
A	غلظت (wt.%)	۱ ۰/۰۱ ۲ ۰/۱ ۳ ۰/۱۴۵
B	تغییر دبی (lpm)	۲ ۴ ۶

است. درصد سهم خطا باید همیشه کمتر از ۱۰٪ باشد تا آنالیز مورد تأیید باشد. در انتها طراحی آزمایش، یک شرایط آزمایش پیشنهاد می‌کند (سطوح و فاکتور مناسب) که شرایط مطلوب نتایج است و نیاز است که در آن حالت، تست تأییدیه گرفته شود. در این پژوهش، اثر درصد وزنی و دبی نانوسیال به‌عنوان ۲ فاکتور طراحی آنالیز آماری روش تاگوچی، انتخاب گردید. برای هر کدام از فاکتورها، ۳ سطح تغییر انتخاب گردید (به‌عنوان مثال برای فاکتور غلظت، سطوح ۰/۰۱، ۰/۱ و ۰/۱۴۵ انتخاب گردید). جدول ۶ فاکتورها و سطوح انتخابی را نشان می‌دهد.

در جدول ۶ پارامترهای A و B بیان‌کننده فاکتورهای مورد بررسی می‌باشند که به ترتیب غلظت و دبی نانوسیال است. شکل ۱۱ نتایج به دست آمده از نرم‌افزار است. کوالایتک نسبت سیگنال به نویز نتایج را بررسی می‌کند (نتایج مثبت به نتایج منفی). از روی نتایج می‌توان فهمید که چه فاکتوری و در چه سطحی نتیجه مطلوب‌تری را به دنبال دارد. به این دلیل که هدف اولیه بیشتر شدن راندمان حرارتی نانوسیال است، در نرم‌افزار حالت شرایط بیشتر، مطلوب است، انتخاب گردید که نشان می‌دهد، هرچه راندمان حرارتی بیشتر باشد نتیجه مطلوب‌تر است. در شکل ۱۱ هرچه عدد ستون‌ها (نسبت سیگنال به نویز) بیشتر باشد (با توجه به انتخاب شرایط بیشتر توسط ما)، نتیجه بهتر است. اعداد مربوط به ردیف‌ها در شکل ۱۱، نشان‌دهنده ۳ سطح مورد آنالیز برای هر فاکتور می‌باشند.

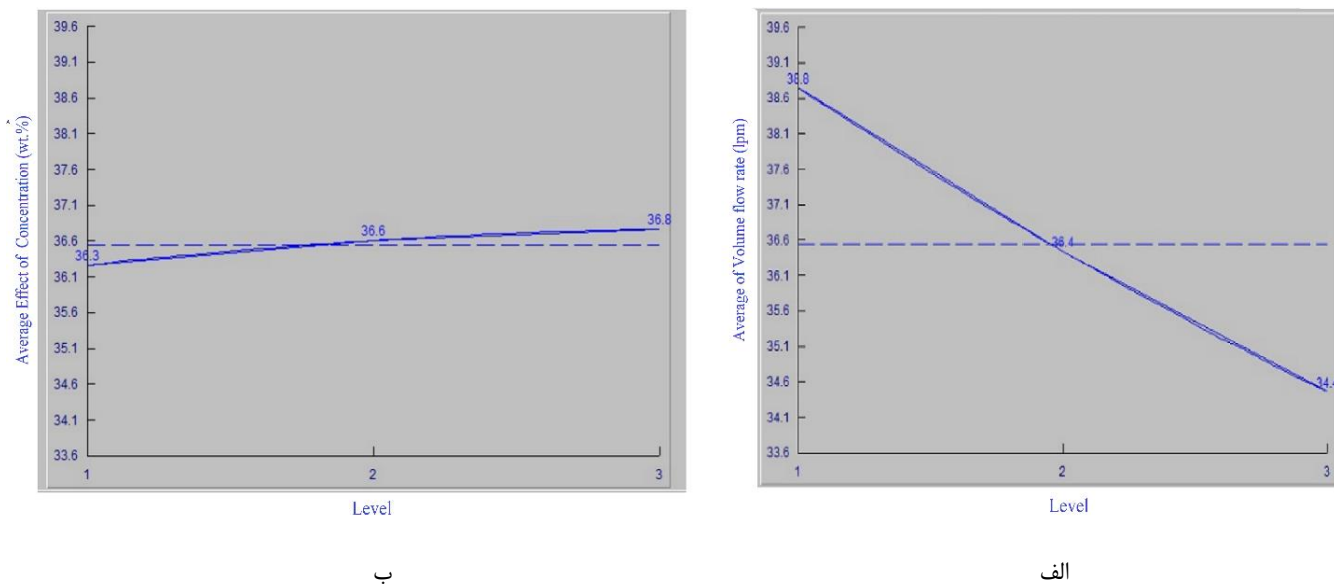
شکل ۱۱ نشان می‌دهد برای رسیدن به راندمان حرارتی بالاتر نانوسیال، اثر درصد وزنی کمتر از اثر دبی نانوسیال است (از روی شیب نمودار). همچنین از شکل ۱۱-الف مشخص است که برای رسیدن به یک راندمان حرارتی

مطلوب، دبی نانوسیال باید کمتر شود درحالی‌که از شکل ۱۱-ب مشخص است که غلظت نانوسیال بهتر است که بیشتر گردد تا راندمان حرارتی بیشینه شود. همچنین مشخص است که شیب نمودار دبی نانوسیال بیشتر از غلظت است، یا به‌عبارت‌دیگر برای رسیدن به شرایط مطلوب، کم شدن دبی نانوسیال اثر بیشتری در نتایج راندمان حرارتی دارد. به عبارت ساده برای داشتن بالاترین راندمان حرارتی، دبی نانوسیال ۲ لیتر بر دقیقه و درصد وزنی نانوسیال ۰/۱۴۵ باید باشد. این نتیجه نیز قبل‌تر در شکل ۱۱ مشاهده شد که تأییدی بر نتایج آزمایش است. برای پیدا کردن اثر هر فاکتور در شرایط بهینه، آنالیز سیگنال به نویز نیز انجام شد که نتایج در جدول ۷ آمده است.

از نتایج جدول مشخص می‌گردد که اثر تغییر دبی نانوسیال (اشتراک‌پذیری برابر با ۹۸/۵۶۶٪) بسیار بیشتر از تغییر درصد وزنی نانوسیال (۰/۴۰۴٪) در راندمان حرارتی نانوسیال است. به این معنا که با تغییر دبی نانوسیال راحت‌تر می‌توان به راندمان بالا و مطلوب رسید. این نتایج با بررسی ستون مربوط به اعداد درصد سهم و ضریب فیشر نیز مشاهده می‌گردد. در این آنالیز ۳ سطح در نظر گرفته شده است، در نتیجه درجه آزادی ۲ به دست آمده است. همچنین مشخص گردید که درصد خطا نیز کمتر از ۱۰ درصد است (۰/۰۱۸٪) که با انجام تست تأییدیه، بار دیگر صحت نتایج را نشان می‌دهد. از جدول ۷ مشخص گردید که مطلوب‌ترین حالت در سطح سوم از فاکتور اول (۰/۱۴۵ درصد وزنی) و سطح اول از فاکتور دوم (۲ لیتر بر دقیقه) مشاهده خواهد شد (البته با مشخص کردن میزان درصد اشتراک هریک) که قبل‌تر نیز این شرایط مطلوب را در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده شده بود که بار دیگر دقت آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

1 Bigger the better





شکل ۱۱. نتیجه به دست آمده از تحلیل تاگوچی نرم افزار کوالایتک ; الف- اثر دبی نانوسیال، ب- اثر درصد وزنی نانوسیال

Fig. 11. Taguchi analysis of Qualitek-4 for nanofluid effects on a-flow rate, b-weight percentage

جدول ۷. نتایج به دست آمده از نرم افزار Qualitek-4

Table 7. Results from Qualitek-4 software

ردیف	درصد سهم هر فاکتور (%)	درصد سهم (S')	ضریب فیشر (F)	واریانس (V)	مجموع مربعات فاکتور (S)	درجه آزادی (f)	فاکتور	ستون
۳	۱/۴۱۶	۰/۴۰۴	۳۲۴/۱۴۶	۰/۲۰۲	۰/۴۰۵	۲	درصد وزنی نانوسیال	۱
۱	۹۸/۵۶۶	۲۸/۱۵	۲۲۴۹۳/۸۴۲	۱۴/۰۷۵	۲۸/۱۵۱	۲	دبی حجمی نانوسیال	۲
	۰/۰۱۸			۰	۰/۰۰۲		خطا/دیگر	۳
	۱۰۰٪				۲۸/۵۵۹		مجموع	۴

#### ۴- نتیجه گیری

ضریب انتقال حرارت به شکل هدایت، W/m.K	$k$
فاصله مرکز تا مرکز طولی، m	$L_p$
فاصله مرکز تا مرکز عرضی، m	$L_w$
تعداد پاس‌ها یا گذرهای صفحه‌های تبادل گر گرمایی	$N_p$
تعداد کانال به ازای هر گذر	$N_{cp}$
عدد ناسلت	$Nu$
تبادل گر گرمایی صفحه‌ای (واشردار)	$PHE$
عدد پرانتل	$Pr$
عدد رینولدز	$Re$
نانولوله کربنی چند جداره	$MWCNT$
غلظت جرمی	$w$
قدرت پمپ	$W$
<b>علائم یونانی</b>	
غلظت حجمی	$\phi$
چگالی، $kg/m^3$	$\rho$
لزجت، cP	$\mu$
<b>زیرنویس</b>	
سیال پایه (آب)	$b$
سیال سرد	$c$
شرایط پاک و تمیز	$cl$
شرایط کثیف و رسوب گرفته (یا فولینگ)	$f$
سیال گرم	$h$
ورودی لوله	$i$
نانوسیال	$nf$
نانوذره	$np$
خروجی لوله	$o$
سیال آب	$w$

در کار حاضر، نانوصفحه‌های گرافن در سیال پایه آب در غلظت‌های ۰/۰۱-۰/۱۴۵ درصد وزنی به کمک فعال‌کننده سطحی سدیم دودسیل سولفات پایدار گردید. نسبت فعال‌کننده سطحی بهینه به نانوذره‌ها ۱-۱ است. جهت بررسی ضریب انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال، سیال گرم (آب دیونیزه) در دمای ثابت ۶۰ درجه سانتی‌گراد و دبی ثابت (۵ لیتر بر دقیقه)، در تماس با نانوسیال در دبی‌های ۲-۶ لیتر بر دقیقه و در دو طرف تبادل گر حرارتی صفحه‌ای واشردار، قرار گرفت. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که استفاده از نانوسیال نسبت به سیال پایه آب (دبی ثابت ۲ لیتر بر دقیقه) باعث بیشتر شدن هم‌زمان ضریب کلی انتقال حرارت (۹/۱۷٪)، نتیجه مطلوب) و افت فشار (۱۳/۱٪، نتیجه نامطلوب) می‌گردد. در نتیجه نمودارهای راندمان حرارتی و کارایی تبادل گر گرمایی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد که استفاده از نانوسیال به‌خصوص در غلظت‌های بالا باعث بالا رفتن هر دو عامل راندمان حرارتی (در دبی حجمی ۲ لیتر بر دقیقه این میزان ۵/۹۵٪ و در دبی حجمی ۶ لیتر بر دقیقه این میزان به ۰/۸٪) و کارایی تبادل گر گرمایی می‌گردد (۳/۸۴٪ در دبی حداقل نانوسیال در ۲ لیتر بر دقیقه). که هر دو اثر مثبت به شمار می‌آیند. همچنین به کمک روش تاگوشی شرایط مطلوب ارزیابی شد و مشخص شد که اثر دبی نانوسیال (کم شدن)، از اثر غلظت نانوسیال برای رسیدن به شرایط مطلوب مؤثرتر است. در شرایط مطلوب (دبی حجمی ۲ لیتر بر دقیقه و درصد وزنی ۰/۱۴۵) ضریب کلی انتقال حرارت ۱۲۶۲ وات بر مجذور متر در کلونین، افت فشار ۰/۱۴۸ کیلوپاسکال، راندمان حرارتی ۸۹٪ و کارایی تبادل گر گرمایی ۱/۲۴۴ به دست آمد.

#### ۵- فهرست علائم

- منابع**
- [1] A. Naddaf, S.Z. Heris, 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 (2018) 116-122.
- [2] K.M. Shirvan, M. Mamourian, J.A. Esfahani, Experimental study on thermal analysis of a novel shell and tube heat exchanger with corrugated tubes, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 138(2) (2019) 1583-1606.

علائم انگلیسی	
ظرفیت گرمای ویژه، kJ/ kg.K	$C_p$
قطر هیدرولیکی، m	$D_h$
قطر دهانه و پورت ورودی لوله، m	$D_p$
سرعت سیال در کانال‌های صفحه‌ها، m/s	$G_c$
نانو صفحات گرافن	$GNP$
سرعت در پورت لوله، m/s	$G_p$
ضریب انتقال حرارت جابجایی، W/m <sup>2</sup> .K	$h$

- fitting, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 143(6) (2021) 4149-4167.
- [11] M. Tabandeh-Khorshid, A. Kumar, E. Omrani, C. Kim, P. Rohatgi, Synthesis, characterization, and properties of graphene reinforced metal-matrix nanocomposites, *Composites Part B: Engineering*, 183 (2020) 107664.
- [12] J. M. J.R. Bose, j. Livingston, Experimental Study of Thermophysical Properties of Graphene Water Nanofluid BELOW Boiling Temperature, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 9(10) (2018) 1423-1433.
- [13] R. Sadri, K. Zangeneh Kamali, M. Hosseini, N. Zubir, S. Kazi, G. Ahmadi, M. Dahari, N.M. Huang, A. Golsheikh, Experimental study on thermo-physical and rheological properties of stable and green reduced graphene oxide nanofluids: Hydrothermal assisted technique, *Journal of dispersion science and technology*, 38(9) (2017) 1302-1310.
- [14] H.W. Xian, N.A.C. Sidik, R. Saidur, Impact of different surfactants and ultrasonication time on the stability and thermophysical properties of hybrid nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 110 (2020) 104389.
- [15] R. Agromayor, D. Cabaleiro, A.A. Pardinias, J.P. Vallejo, J. Fernandez-Seara, L. Lugo, Heat transfer performance of functionalized graphene nanoplatelet aqueous nanofluids, *Materials*, 9(6) (2016) 455.
- [16] M.A. Jamil, Z.U. Din, T.S. Goraya, H. Yaqoob, S.M. Zubair, Thermal-hydraulic characteristics of gasketed plate heat exchangers as a preheater for thermal desalination systems, *Energy Conversion and Management*, 205 (2020) 112425.
- [17] M.S. Islam, S.C. Saha, Heat transfer enhancement investigation in a novel flat plate heat exchanger, *International Journal of Thermal Sciences*, 161 (2021) 106763.
- [18] N. Bozorgan, M. Shafahi, Analysis of gasketed-plate heat exchanger performance using nanofluid, *Journal of Heat and Mass Transfer Research*, 4(1) (2017) 65-72.
- [19] M. Shanbedi, S.Z. Heris, A. Maskooki, Experimental [3] A. Amiri, R. Sadri, M. Shanbedi, G. Ahmadi, S. Kazi, B. Chew, M.N.M. Zubir, Synthesis of ethylene glycol-treated graphene nanoplatelets with one-pot, microwave-assisted functionalization for use as a high performance engine coolant, *Energy conversion and management*, 101 (2015) 767-777.
- [4] A. Amiri, M. Shanbedi, M.J. AliAkbarzade, The specific heat capacity, effective thermal conductivity, density, and viscosity of coolants containing carboxylic acid functionalized multi-walled carbon nanotubes, *Journal of Dispersion Science and Technology*, 37(7) (2016) 949-955.
- [5] A. Amiri, M. Shanbedi, H. Dashti, Thermophysical and rheological properties of water-based graphene quantum dots nanofluids, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 76 (2017) 132-140.
- [6] M. Shanbedi, A. Amiri, S.Z. Heris, H. Eshghi, H. Yarmand, 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) (2018) 1089-1106.
- [7] M. Xing, J. Yu, R. Wang, Experimental study on the thermal conductivity enhancement of water based nanofluids using different types of carbon nanotubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 88 (2015) 609-616.
- [8] M. Moradi, A. Abouchenari, M. Pudine, F. Sharifianjazi, The effect of polymeric surfactant content on the mechanical properties of Al/GNP nanocomposites, *Materials Chemistry and Physics*, 257 (2021) 123831.
- [9] P.K. Das, A review based on the effect and mechanism of thermal conductivity of normal nanofluids and hybrid nanofluids, *Journal of Molecular Liquids*, 240 (2017) 420-446.
- [10] S. Giwa, M. Sharifpur, M. Goodarzi, H. Alsulami, J. Meyer, 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

- [25] A.K. Tiwari, P. Ghosh, J. Sarkar, Particle concentration levels of various nanofluids in plate heat exchanger for best performance, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89 (2015) 1110-1118.
- [26] J.P. Holman, *Experimental methods for engineers*, 2001.
- [27] M. Goodarzi, A. Amiri, M.S. Goodarzi, M.R. Safaei, A. Karimipour, E.M. Languri, M. Dahari, 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 (2015) 172-179.
- [28] O. Ramezani Azghandi, M.J. Maghrebi, A.R. Teymourtash, Modification of Glucose biosensor using Pt/MWCNTs electrode and optimization by application of taguchi method, *International Journal of Nano Dimension*, 7(3) (2016) 231-239.
- [29] O. Ramezani Azghandi, M.J. Maghrebi, A.R. Teymourtash, Investigation and optimization of heat transfer coefficient of MWCNTs-Water nanofluids in a plate heat exchanger, *International Journal of Nano Dimension*, 12(2) (2021) 104-112.
- investigation of stability and thermophysical properties of carbon nanotubes suspension in the presence of different surfactants, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 120(2) (2015) 1193-1201.
- [20] T. Batakliiev, I. Petrova-Doycheva, V. Angelov, V. Georgiev, E. Ivanov, R. Kotsilkova, M. Casa, C. Cirillo, R. Adami, M. Sarno, Effects of graphene nanoplatelets and multiwall carbon nanotubes on the structure and mechanical properties of poly (lactic acid) composites: a comparative study, *Applied Sciences*, 9(3) (2019) 469.
- [21] H. Allahyar, F. Hormozi, B. ZareNezhad, Experimental investigation on the thermal performance of a coiled heat exchanger using a new hybrid nanofluid, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 76 (2016) 324-329.
- [22] S. Kakaç, H. Liu, A. Pramuanjaroenkij, *Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design*, (2020).
- [23] V. Kumar, A.K. Tiwari, S.K. Ghosh, Effect of variable spacing on performance of plate heat exchanger using nanofluids, *Energy*, 114 (2016) 1107-1119.
- [24] D. Huang, Z. Wu, B. Sunden, Effects of hybrid nanofluid mixture in plate heat exchangers, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 72 (2016) 190-196.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

O. Ramezani Azghandi, M. J. Maghrebi, A. R. Teymourtash, *Experimental Investigation of Flow Rate and Concentration Effects of Graphene-Water Nanofluid and Finding the Optimal Conditions Using Taguchi Method*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(3) (2022) 629-648.

DOI: 10.22060/mej.2021.20298.7209

