



تاثیر نانوسیال آب - اکسید گرافن بر عملکرد خواص انتقال حرارتی و گرمایشی مبدل حرارتی با استفاده از داده‌های تجربی و ریاضی

سحر بهزادی^۱، مهدی هدایتیان^{۲*} و پریا همتی^۳

- ۱- گروه مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران
 ۲- گروه مکانیک، واحد اسدآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، اسدآباد، ایران
 ۳- گروه برق دانشکده مهندسی دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

چکیده: در این مقاله، مشخصه جریان آشفته نانوسیالات آب-اکسید گرافن به طور کامل بررسی شده است. همچنین، اثرات برخی از پارامترهای مهم مانند غلظت نانوذرات اکسید گرافن و عدد رینولدز بر سرعت انتقال حرارت ارائه می‌شود. محدوده غلظت نانوسیال از صفر تا یک درصد وزنی نانوذرات اکسید گرافن در نظر گرفته شده است و در یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای جریان مخالف در شرایط جریان آشفته که عدد رینولدز بین ۸۰۰۰۰ تا ۱۸۰۰۰۰ انتخاب می‌شود؛ موضوع تاثیر نانوکاتالیست اکسید گرافن در میزان انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد گرانشی نانوسیال نسبت به سیال پایه (آب) حداکثر ۲۳ درصد افزایش یافته است. همچنین افزایش ۲۵/۴ درصدی هدایت حرارتی در نانوسیال حاضر در مقایسه با حداقل مقدار آن برای آب وجود دارد. با در نظر گرفتن داده‌های به دست آمده از این مطالعه، عدد ناسلت، ضریب انتقال حرارت هدایتی، ضریب اصطکاک و ضریب عملکرد حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور اعتبارسنجی داده‌ها، نتایج این مطالعه با مطالعات قبلی و داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. حداکثر، نانوسیال دارای ۲۳ درصد افزایش در ضریب اصطکاک، ۶۹/۷ درصد افزایش در ضریب انتقال حرارت هدایتی، ۳۷ درصد رشد در عدد ناسلت در مقایسه با سیال پایه است. با این حال، ضریب عملکرد حرارتی حداکثر ۱/۸۵ افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان از نانوسیال حاضر در مبدل‌های حرارتی استفاده کرد.

واژگان کلیدی: مبدل حرارتی، اکسید گرافن، نانوسیال، جریان مغشوش، مدل‌سازی ریاضی.

*m.hedayatian@iauh.ac.ir

حرارت یا جلوگیری از گرمای بیش از حد در کاربردهای تبادل حرارت مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱]. نانوسیال اولین بار توسط چوی در سال ۱۹۹۵، با معلق کردن نانوذرات فلزی در سیالات انتقال حرارت معمولی که سیالاتی با رسانایی حرارتی بالاتر تولید می‌کنند و در نتیجه انتقال حرارت را افزایش می‌دهند، پیشنهاد شد [۲]. جریان نانوسیال یکی از مهم‌ترین راه‌حل‌ها برای بهبود سیستم‌های انتقال حرارت در نظر گرفته می‌شود، زیرا ذرات

۱- مقدمه

یکی از مشکلات انتقال حرارت با سیال، به عنوان حامل انرژی در صنعت‌های متفاوت، رسانایی حرارتی پایین است که در بسیاری از مطالعات به جایگزینی نانوسیالات به منظور حل این مشکل پیشنهاد شده است. سیالات جدید با رسانایی حرارتی بالا به نام نانوسیال بجای سیالات معمولی برای افزایش سرعت انتقال

مبتنی بر کربن از جمله نانولوله‌های کربنی (CNTs) [۱۴]، اکسید گرافن [۱۵] و گرافن [۱۶] انجام شد.

شار حرارتی بحرانی بالا، ضریب انتقال حرارت و جوشش کارآمد از ویژگی‌های بارز نانوسیال است. استفاده از این سیالات در مبدل حرارتی باعث کاهش اندازه آن، کاهش مصرف سوخت و افزایش راندمان سیستم می‌شود. در پاراگراف‌های بعد، مطالعات مربوط به بهبود انتقال حرارت با استفاده از نانوسیال ارائه می‌شود؛ ابراهیمیان و همکاران [۱۷] روی مطالعه عددی و تجربی تأثیرات استفاده از نانوسیال کار کردند. در مطالعه آنها ضریب انتقال حرارت در هنگام استفاده از نانوسیال ۲۱ درصد افزایش یافت. سارینن و همکارانش [۱۸] افزایش ۴۰ درصدی در ضریب انتقال حرارت جابجایی در استفاده از نانوسیال مشاهده کردند. آنها همچنین بررسی کردند که نانوذرات ریز، صاف و کروی شکل بیشتر به تقویت ویژگی‌های انتقال حرارت آن کمک می‌کنند. پراساد و همکاران [۱۹] اثر نانوسیال اکسید آب/آلومینیوم بر عملکرد یک مبدل حرارتی دو لوله حاوی نوار پیچ خورده را بررسی کردند. آنها افزایش $31/28\%$ و 23% در عدد ناسلت و ضریب اصطکاک را گزارش کردند. رثا و همکاران [۲۰] انتقال حرارت و افت فشار را با استفاده از نانوسیال زیرکونیوم-آب و نانوسیال آب-آلومینا در داخل لوله افقی در شرایط جریان آرام مورد مطالعه قرار دادند. آنها گزارش دادند که ضرایب انتقال حرارت نانوسیال‌ها با غلظت نانوذرات افزایش می‌یابد، با افزایش $7/2$ برابری افت فشار برای سرعت جریان خاص و هندسه کانال. یو و همکاران [۲۱] اثر نانوسیال اتیلن گلیکول / اکسید گرافن را بر هدایت حرارتی مورد مطالعه قرار داد. محققان با استفاده از یک نانوسیال با کسر حجمی ۵ درصد، که دارای ضریب انتقال حرارت در محدوده $4/6-9/9$ W/m.K است، افزایش ۸۶ درصدی در هدایت حرارتی را گزارش کردند. کاماتچی و همکاران [۲۲] به طور تجربی نانوسیال آب / اکسید گرافن کاهش یافته را مورد مطالعه قرار داد. در مطالعه آنها هدایت حرارتی $0/3$ گرم در لیتر نانوسیال در دمای ۷۵ درجه سانتیگراد ۱۰ درصد افزایش یافت. همچنین آنها نشان دادند که این نانوسیال می‌تواند جایگزین مناسبی برای خنک کردن مایعات باشد. حجار و همکاران [۲۳] به طور تجربی رسانایی حرارتی نانوسیال اکسید گرافن را بررسی کرد. افزایش $47/5$ درصدی در هدایت حرارتی برای نانوسیال در

پراکنده، به ویژه ذرات با اندازه نانو، توجه بالایی را برای پاسخگویی به نیازهای رو به رشد راندمان بالا در کاربردهای تبادل گرما به خود جلب کرده‌اند. امروزه افزایش و بهبود انتقال حرارت به دلیل تأثیر شگرف بر رشد و شکوفایی فرآیندهای صنعتی در ارتباط با سیستم‌های انتقال حرارت یا مبدل‌های حرارتی، از مهمترین موضوعات صنعتی محسوب می‌شوند. از سوی دیگر، کاربرد گسترده سیستم‌های انتقال حرارت همدم در صنایع نفت و گاز، پتروشیمی، مواد ذخیره‌سازی در دستگاه‌های الکترونیکی، واکنش‌های شیمیایی، فرایندهای جوش، انرژی خورشیدی و پالایشگاه‌ها، استفاده از آنها را به موضوع مهمی تبدیل کرده و در نتیجه مطالعه بهبود چنین سیستم‌هایی توسط محققان را ضروری می‌سازد [۳].

بسیاری از مطالعات عددی و تجربی پس از آن در جریان آشفته انجام شد. دلیل اصلی بررسی تلاطم جریان در مطالعات انتقال حرارت به دلیل تأثیر اختلاط بر شرایط فرآیند انتقال حرارت است. با در نظر گرفتن این نکته، بسیاری از محققان به طور گسترده در حال مطالعه بهبود انتقال حرارت در زمینه‌های متفاوت بوده‌اند [۵،۴]. نانوسیال حاصل از پراکندگی همگن نانوذرات کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر، در سیال پایه، اختلاط جریان را بهبود می‌بخشد و منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت سیال می‌شود [۴]. علاوه بر اثرات مثبت در مسائل مربوط به مسائل انرژی، خواص ترموفیزیکی بهینه نانوسیالات، آنها را به منظور جایگزینی به جای سیالات معمولی در سیستم‌های انتقال حرارت قابل استفاده می‌کند. چنین کاربردهایی منجر به کاهش اندازه مبدل حرارتی، افزایش کارایی آن، کاهش مصرف سوخت و صرفه‌جویی در هزینه می‌شود [۷،۶]. ویژگی‌های اصلی نانوسیال‌ها ضریب انتقال حرارت جابجایی بالاتر [۹،۸]، شار حرارتی بحرانی بالا و جوشش [۱۰] و ذخیره مناسب انرژی حرارتی آنها است [۱۱]. در نتیجه دلایل ذکر شده، نانوسیال‌ها این پتانسیل را دارند که مناسب‌ترین سیال خنک‌کننده هوشمند در جهان باشند [۱۲].

دو خانواده اصلی نانوذرات (NPs) برای نانوسیال‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند: NP‌های مبتنی بر فلز (فلزات، اکسیدها) و نانومواد کربن (نانوگرافیت، نانوالماس، نانولوله‌های کربنی و گونه‌های گرافنی) [۱۳]. با توجه به پتانسیل بالای انتقال حرارت نانوسیال‌های کربنی، مطالعات زیادی در زمینه نانو ساختارهای

غلظت درصد وزنی ۰/۲۵ وجود دارد. امراللهی و همکاران [۲۴] انتقال حرارت جابجایی جریان نانوسیال نانولوله‌های کربنی آب/چند لایه را در دو رژیم متفاوت، از جمله جریان آرام و آشفتنه در یک لوله افقی و شرایط مرزی شار حرارتی ثابت مورد مطالعه قرار دادند.

با توجه به نتایج آنها، ضریب انتقال حرارت جابجایی زمانی که نانوسیال در ۰/۲۵ درصد وزنی بود حداکثر تا ۴۰ درصد افزایش یافت. هو و همکاران [۲۵] به صورت عددی و تجربی سهم سوسپانسیون‌های نانوذرات Al_2O_3 را در انتقال حرارت همرفتی اجباری آرام نانوسیال آب Al_2O_3 که از طریق یک لوله دایره‌ای جریان می‌یابد، بررسی کردند. مشخص شده است که افزودن نانوذرات منجر به کاهش دمای دیواره و افزایش عدد ناسلت می‌شود و همچنین باعث افزایش افت فشار در طول لوله می‌شود. در مطالعه دیگری، انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آب/گرافن توسط مهرعلی و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. [۲۶]. آنها گزارش دادند که ضریب عملکرد حرارتی نانوسیال جاری در یک لوله افقی می‌تواند به ۱/۱۵ برسد. صادقی نژاد و همکاران [۲۷] بهبود انتقال حرارت را در یک لوله دایره‌ای با شرایط مرزی شار حرارتی ثابت در حضور جریان نانوسیال آب/گرافن در رژیم آشفتنه، هم به صورت عددی و هم تجربی، تحلیل کردند. با توجه به کسرهای وزنی متفاوت، عدد ناسلت تغییرات مثبتی را در محدوده ۳ تا ۸۳ درصد نشان داد. علاوه بر این، افزایش ۰/۴ تا ۱۴/۶ درصدی در کاهش فشار در نتیجه حضور نانوذرات گزارش شده است. نظری و همکاران [۲۸] یک بررسی تجربی با استفاده از نانوسیال اکسید گرافن با چهار غلظت (۰/۲۵، ۰/۵، ۱، و ۱/۵ گرم در لیتر) برای لوله حرارتی ضربانی انجام داد. در نتیجه هدایت حرارتی و گرانیوی سیال پایه افزایش یافت. حکمتی پور و همکارانش [۲۹] ترکیب انتقال حرارت جابجایی (آزاد و اجباری) نانوسیال نفت/اکسید مس را در یک لوله افقی تحت شرایط مرزی همدمای دیوار مورد مطالعه قرار داد. آنها نشان دادند که سرعت ترکیب انتقال حرارت در محدوده ۰ تا ۱/۵ تا ۱۶ درصد در نتیجه افزایش غلظت نانوذرات افزایش می‌یابد. همچنین، حداکثر ضریب عملکرد حرارتی در مطالعه آنها ۱/۱۶ بود. بای و همکارانش [۳۰] یک روش تجربی را با استفاده از نانوسیالات آب دیونیزه شده با اکسید گرافن مورد بررسی قرار داد. در نتیجه، ضریب انتقال

حرارت جابجایی افزایش یافت، از سوی دیگر، ضریب اصطکاک ۷۱ درصد کاهش یافت. رخشا و همکارانش [۳۱] به طور تجربی و عددی انتقال حرارت همرفتی نانوسیال متلاطم را که در یک لوله مارپیچ جریان دارد، بررسی کرد. آنها از نرم افزار Open-Foam برای تجزیه و تحلیل پارامترها استفاده کردند.

در مطالعه آنها، عدد ناسلت در حداکثر غلظت نانوسیال ۱۷ درصد افزایش یافت. رنجبرزاده و همکاران [۳۲] با در نظر گرفتن عدد رینولدز بین ۵۲۵۰ و ۳۶۵۰۰ با غلظت ۰/۰۲۵، ۰/۰۵، ۰/۰۷۵ و ۰/۱ کسر حجمی، اثر استفاده از نانوسیال آب / اکسید گرافن به منظور استفاده در سیستم‌های خنک‌کننده را بررسی کردند. در نتیجه، رشد هدایت حرارتی ۲۸٪ و افزایش ضریب انتقال حرارت همرفتی ۴۰/۳٪ در مقایسه با سیال پایه است. از سوی دیگر، افت فشار و ضریب اصطکاک در نهایت به ۱۶٪ می‌رسد و افزایش ضریب عملکرد حرارتی ۱/۱۴۸ است. خسروی و همکاران [۳۱] با شبیه‌سازی عددی، جریان آرام و توسعه نانوسیال را در لوله مارپیچ در دمای دیواره ثابت بررسی کرد. نتایج عددی با سه مورد آزمایش شامل همرفت اجباری نانوسیال در لوله مستقیم، پروفیل سرعت در لوله منحنی و عدد ناسلت در لوله‌های مارپیچ مقایسه شده است که تطابق خوبی برای همه موارد مشاهده می‌شود. ضریب انتقال حرارت در منطقه در حال توسعه در داخل یک لوله مستقیم با استفاده از مدل مخلوط، پیش‌بینی بهتری را در مقایسه با مدل همگن نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که نانوسیال و سیال پایه دارای مشخصات سرعت محوری تقریباً یکسانی هستند، اما مشخصات دمایی آنها در منطقه در حال توسعه و کامل توسعه‌یافته تفاوت معنی‌داری دارد. نافن [۳۳] تأثیر نانوسیال آب / اکسید تیتانیوم را که در یک لوله مارپیچ مسی تحت شرایط مرزی همدمای دیوار جریان داشت، مورد مطالعه قرار داد. آنها نشان دادند که استفاده از جریان نانوسیال منجر به افزایش ۳۴/۹ درصدی عدد ناسلت شد و ضریب اصطکاک تنها تغییرات جزئی داشت. با توجه به مطالعات انجام شده بر روی تأثیر نانوسیال در فرآیندهای انتقال حرارت ذکر شده در بررسی متون، واضح است که نانوسیالات گرافن تأثیر بسیار خوبی بر افزایش انتقال حرارت جابجایی دارند. گرافن با الگوی لانه زنبوری، متشکل از یک لایه تک اتمی از اتم‌های کربن هیبرید شده با sp^2 و توسط یک پیوند

کووالانسی دوگانه قوی [۱۳] به سه اتم کربن دیگر متصل شده‌اند که عضو جدیدی از خانواده مواد کربنی است، توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است. به دلیل خواص مکانیکی و فیزیکی عالی، با خواص برتری نسبت به نانولوله های کربنی تولید شد. این یک ماده صفحه مانند در اندازه نانو با مدول یانگ ۱۰۰۰ گیگا پاسکال، استحکام کششی ۱۳۰ گیگا پاسکال و دارای سطح ویژه نظری بزرگ ۲۶۳۰ متر مربع بر گرم است [۳۴]. همچنین، اکسید گرافن یک مشتق مهم از گرافن است و حاوی گروه‌های عاملی اکسیژن متفاوت (هیدروکسیل، کربوکسیل اسید و اپوکسی) در سطح و لبه‌های ورقه است، در نتیجه پراکندگی در حلال‌ها را بهبود می‌بخشد [۳۵].

اکسید گرافن (GO)، از سنتز مشتق گرافن (GR) با روشی آسان و مقرون به صرفه منشا می‌گیرد. GO عمدتاً توسط اکسیداسیون و لایه برداری سنتز می‌شود، از این رو این ماده یک گرافن اصلاح شده شیمیایی با محتوای زیادی از گروه‌های عاملی کربوکسیلیک (COOH)، الکل (-OH) و اتر (-COC) است که روی صفحه پایه متصل شده‌اند. وجود گروه‌های اکسیژن دار روی سطح گرافن، باعث حلالیت GO در آب می‌شود [۳۶]. با این حال، گروه‌های عاملی موجود، پیوند هیبریداسیون sp^2 را مختل می‌کنند و خواص حرارتی، مکانیکی و الکتریکی GO را تحلیل و کاهش می‌دهند. به دلیل خواص مکانیکی، الکتریکی و نوری برجسته، باعث کاربرد GO در زمینه‌های علمی و فناوری شده است [۳۷]. با توجه به پیکربندی منحصربفرد پیوند اکسید گرافن به سطح وسیعی از اکسید فلز یا سولفیدهای فلزی که ظرفیت کامپوزیت اکسید گرافن/فلز سولفید را افزایش می‌دهد، مواد مبتنی بر گرافن انتخاب‌های مطلوبی برای کاربردهای انرژی تجدیدپذیر هستند [۳۴]. از این رو، هدف این تحقیق طراحی و ساخت سیستم آزمایش آب/اکسید گرافن و تامین و تثبیت آن برای اولین بار است. پس از آن، انتقال حرارت همرفتی نانوسیال اندازه‌گیری می‌شود و از آن به عنوان سیال اصلی در یک سیستم انتقال حرارت همدم استفاده می‌شود. با توجه به پتانسیل بالای انتقال حرارت در نانوذرات آب/گرافن، پیش‌بینی می‌شود که ضریب انتقال حرارت همرفتی افزایش یابد که این امر نانوذرات را به گزینه‌ای مناسب برای بهبود فرآیند انتقال حرارت در صنایع متفاوت تبدیل می‌کند. وزن سبک گرافن برای تأیید این موضوع

کافی است که در سیستم‌های مبدل حرارتی، می‌تواند تأثیر عمیقی بر عملکرد حرارتی داشته باشد که می‌تواند عامل تأثیر افت فشار در سیستم باشد. همچنین بررسی منابع مربوطه نشان می‌دهد که مطالعه نظری شامل نانوسیال اکسید گرافن-آب در مبدل‌های حرارتی، بررسی مزایای بالقوه متفاوت، در گذشته گزارش نشده است و این انگیزه مطالعه حاضر است. بنابراین، هدف این کار نشان دادن امکان‌پذیری نانوسیال‌های اکسید گرافن آب در سیستم‌های مبدل حرارتی است. اثر نانوسیال اکسید گرافن-آب بر عملکرد حرارتی در مبدل حرارتی از طریق مدل‌سازی و شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار Matlab بررسی شده است. مدل جریان دو بعدی حالت پایدار با نتایج تجربی حاضر اعتبارسنجی شده است. جوانب دیگر مانند عدد ناسلت، عدد پکلت و ضریب اصطکاک همراه با ضریب انتقال حرارت جابجایی محاسبه و مورد بحث قرار می‌گیرند. در پایان، به منظور بررسی کاربرد کلی و مزایای بالقوه معرفی GO در مبدل حرارتی، مشخص شده است که استفاده از نانوسیال GO یک راه‌حل مناسب برای افزایش عملکرد حرارتی سیستم‌های مبدل حرارتی است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

در این پژوهش، از نانوصفحه‌های GO با گروه‌های عاملی OH و COOH استفاده شده است. خواص فیزیکی نانوصفحات GO تولید شده توسط US Research Nanomaterials, Inc در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: خواص فیزیکی نانوصفحات GO

Parameters	Value
Number of Layers	6-10
Lateral Size	1-10 (micron)
Thickness	3.4 (nm)
Specific Surface Area	750 (m ² /g)
Density	1 (gr/cm ³)
Volume Resistivity	4×10^{-4} (ohm. cm)

۲-۲- آماده سازی نانو سیال آب-اکسید گرافن

رویکردهای زیادی جهت بهبود پایداری نانوسیال‌ها بررسی شده است. این روش‌ها به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند که به

۲-۳- دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش مورد استفاده در این پژوهش که در شکل ۲ نشان داده شده است شامل یک مبدل حرارتی دو لوله ای آزمایشگاهی است که دارای مسیر مجزا برای جریان سرد و گرم می باشد، همچنین دستگاه شامل الکتروپمپ، ترموستات، شیر، روماتر، مخزن منبع گرمایی و سنسورهای دما می باشد. آب با دبی جرمی 230 (kg/h) در دمای 35 درجه سانتیگراد به عنوان سیال خنک کننده می باشد. قطر لوله داخلی $2/5$ سانتیمتر با ضخامت $0/8$ میلیمتر و قطر لوله خارجی $3/75$ سانتیمتر است. این سیستم شامل دو حلقه جریان، یک واحد گرمایش برای گرم کردن نانوسیال یا آب مقطر و دیگری آب خنک کننده، همچنین سیستم اندازه گیری دما برای اندازه گیری دمای عمده جریان های سیال ورودی و خروجی است. از طریق دستگاه آزمایش حاضر سه پارامتر f ، Nu و h_i در محدوده اعداد رینولدز مورد بررسی $(8000-18000)$ برای غلظت های حجمی مورد آزمایش $(1-0/1 \text{ درصد})$ بدست می آیند.

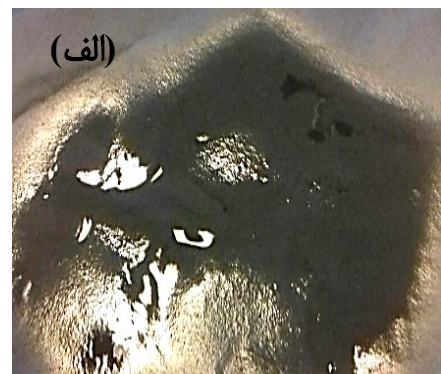


شکل ۲: اجزاء دستگاه آزمایش

۲-۴- محاسبات و روابط ریاضی

مطالعات نشان داده است که خواص فیزیکی نانوسیالات نسبت به سیال پایه تفاوت بسیاری دارد. خواص مورد نیاز جهت حل

صورت فیزیکی و شیمیایی هستند. رویکرد فیزیکی شامل استفاده از نیروهای انرژی بالا مانند فراصوت، هم زدن مغناطیسی، هموژنایزر استفاده از روش اصلاح شده Hammers سنتز می شود. در این پژوهش، 4 گرم گرافیت، 4 گرم نیترات سدیم و 184 میلی لیتر اسید سولفوریک در حمام یخ با هم مخلوط شدند. در ادامه 12 گرم پرمنگنات پتاسیم به آرامی با عمل هم زدن به سوسپانسیون افزوده شد. فرآیند هم زدن به مدت 2 ساعت ادامه پیدا کرد. سپس 184 میلی لیتر آب به آرامی در سوسپانسیون فوق ریخته شد. سپس سوسپانسیون به مدت 40 دقیقه در دمای 98 درجه سانتیگراد حرارت داده شد. در نهایت، سوسپانسیون با محلول 30% آب اکسیژنه عمل آورده می شود. محصول نهایی با محلول 4 درصد اسید کلریدریک رقیق شسته شده، جمع آوری و خشک می شود (شکل ۱ الف)). در نهایت نانوصفحات GO در کسر حجمی مورد نیاز با آب مقطر (DI) به مدت 60 دقیقه با استفاده از پروب اولتراسونیک (PARSONIC 30S) با توان 400 وات و فرکانس 30 کیلوهرتز در دمای 25 درجه سانتیگراد، برای جداسازی ذرات کلوخه شده هم زده می شود. (شکل ۱ ب)).



شکل ۱: (الف) سنتز پودر GO، (ب) نانو سیال آب-اکسید گرافن پس از فرایند اولتراسونیک.

عدد پرانتل Pr ، یک خاصیت سیال است که نسبت گرانیوی سینماتیک (پخش مومنتوم) به پخش حرارتی سیال را نشان می‌دهد:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (9)$$

عدد پکلت Pe ، نسبت انتقال حرارت از طریق حرکت سیال به انتقال حرارت هدایتی می‌باشد:

$$Pe = Re * Pr \quad (10)$$

در حالی که:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (11)$$

در مدل تک‌فاز، خواص حرارتی و جریان نانوسیال با استفاده از مدل‌های تئوری پیش‌بینی می‌شوند. برای جریان اشفته و تک‌فاز، ضریب اصطکاک سیال پایه f_{bf} و عدد ناسلت سیال پایه Nu_{bf} از رابطه نیلینسکی [۴۲]، طبق روابط (۱۲) و (۱۳) بدست می‌آیند:

$$f_{bf} = (1.58 \ln Re - 3.82)^{-2} \quad (12)$$

$$Nu_{bf} = \frac{\left(\frac{f_{bf}}{8}\right) (Re - 1000) Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{f_{bf}}{8}\right)^{0.5} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (13)$$

از طرفی دیگر، بلازیوس [۴۳] نیز رابطه‌ای تجربی زیر را برای ضریب اصطکاک ارائه داد:

$$f = 0.079 Re^{-0.25} \quad (14)$$

دیتوس-بوتلر [۴۴] رابطه (۱۵) را برای عدد ناسلت در جریان اشفته پیشنهاد داد:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (15)$$

اگر $0.6 \leq Pr \leq 160$ ، $Re \geq 10^4$. توان عدد پرانتل برای گرمایش سیال $0/4$ و برای سرمایش $0/3$ خواهد بود.

دانتونساک و ونگوایز [۴۵] روابطی ارائه دادند که بر اساس آن ضریب اصطکاک و عدد ناسلت برای هر سرعت جریان از نانوسیال قابل محاسبه است:

$$f_{nf} = 0.961 Re^{-0.375} \varphi^{0.052} \quad (16)$$

$$Nu_{nf} = 0.074 Re^{0.707} Pr_{nf}^{0.385} \varphi^{0.074} \quad (17)$$

معادلات، چگالی، ظرفیت حرارتی، گرانیوی و هدایت حرارتی هستند که هر کدام از روابطی که در ادامه ارائه می‌شود بدست می‌آیند.

پک و چو [۳۸] برای بدست آوردن چگالی نانوسیالات رابطه (۱) را ارائه دادند:

$$\rho_{nf} = \varphi \rho_{np} + (1 - \varphi) \rho_{bf} \quad (1)$$

که در آن، φ و ρ به ترتیب غلظت حجمی و دانسیته هستند. همچنین، اندیس‌های np و bf نشان‌دهنده سیال پایه، نانوذره و نانوسیال هستند. به طور کلی، گرانیوی سیال به عنوان تابعی از دما تغییر می‌کند. اگرچه سیالات متفاوت، انواع متفاوتی از وابستگی‌های سرعت برشی سیال را نشان می‌دهند. بر اساس رابطه انیشتین، گرانیوی نانوسیالات μ_{nf} ، بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۹]:

$$\mu_{nf} = (1 + 343\varphi) \mu_{bf} \quad (2)$$

پوازی، در فرمول (۳) چگونگی وابستگی گرانیوی مایع با دما را نشان می‌دهد:

$$\mu_{bf} = \mu_0 \left(\frac{1}{1 + \alpha T + \beta T^2} \right) \quad (3)$$

که برای آب $\alpha = 0.0336E$ و $\beta = 0.000221$.

ظرفیت حرارتی C_p ، مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌شود [۴۰]:

$$(\rho C_p)_{nf} = \varphi (\rho C_p)_{np} + (1 - \varphi) (\rho C_p)_{bf} \quad (4)$$

در این پژوهش، روابط (۵) و (۶) حاصل از مطالعات مقدم و همکاران [۴۱] برای تعیین ضرایب هدایت حرارتی سیال پایه k_{bf} و نانوسیال k_{nf} ، بر اساس تغییرات دما T و غلظت حجمی بکار می‌رود:

$$k_{bf} = 0.5642 e^{0.002748T} \quad (5)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = (1.017 + 0.072 \times 1.029^T \times \varphi^{0.773}) \quad (6)$$

محاسبات مربوط به گرانیوی سینماتیک ν و پخش حرارتی α ، به ترتیب مطابق با روابط (۷) و (۸) می‌باشند:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (8)$$

ناخالصی‌های دیگر مانند گرافیت وجود ندارد. بنابراین، تأیید می‌شود که ذره تقویت کننده GO دارای خلوص بالا است.

شکل ۴ تغییرات گرانیوی را بر حسب دما و غلظت حجمی نانوصفحات اکسید گرافن مطابق معادلات ۲ و ۳ نشان می‌دهد. گرانیوی یک عامل محدود کننده در توسعه ظرفیت انتقال حرارت نانوسیالات است. همان طور که نشان داده شده است، با اضافه شدن نانوذرات در سیال پایه، گرانیوی افزایش می‌یابد در حالی که با افزایش دمای ورودی، گرانیوی سیال کاهش می‌یابد. گرانیوی نانوسیال با افزایش غلظت نانوذرات از ۰/۱ درصد به ۱ درصد ۲۳ درصد افزایش یافت. به نظر می‌رسد رفتار نانوسیال‌ها برای غلظت‌های پایین نانوذرات نیوتنی باشد. سایر محققان رفتار مشابهی را برای تأثیر غلظت نانوذرات بر گرانیوی نانوسیال آب-اکسید گرافن، نانوسیالات آب- Al_2O_3 و EG- Al_2O_3 [۴۷] و گرافن [۴۸] در برابر دما نشان دادند.

ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال h_i بر اساس رابطه (۱۸) تعریف می‌شود:

$$h_i = \frac{Nu_{nf} k_{nf}}{D_i} \quad (18)$$

که D_i ، نشان دهنده قطر داخلی لوله است.

همچنین ضریب بازده حرارتی [۴۶] برای نانوسیال از رابطه (۱۹) تعیین می‌شود:

$$\eta = \frac{Nu_{nf}/Nu_{bf}}{\left(f_{nf}/f_{bf}\right)^{1/\varepsilon}} \quad (19)$$

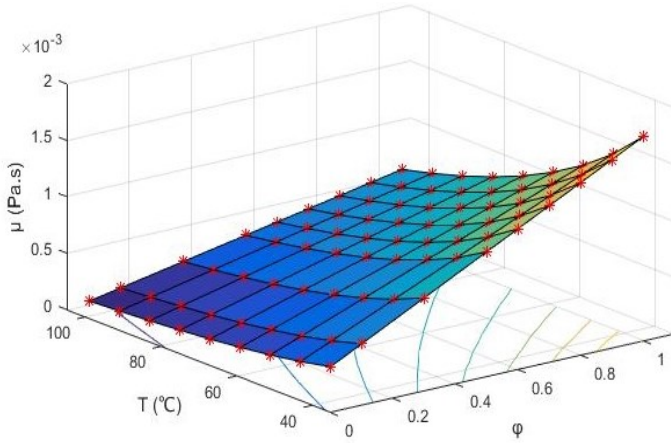
۳- بحث و نتایج

در جدول ۲، خواص فیزیکی اندازه‌گیری شده برای نانو کاتالیست اکسید گرافن-آب در غلظت‌های حجمی متفاوت ذکر شده است که در ادامه نحوه تأثیر هر عامل مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۲: خواص فیزیکی نانو کاتالیست اکسید گرافن-آب

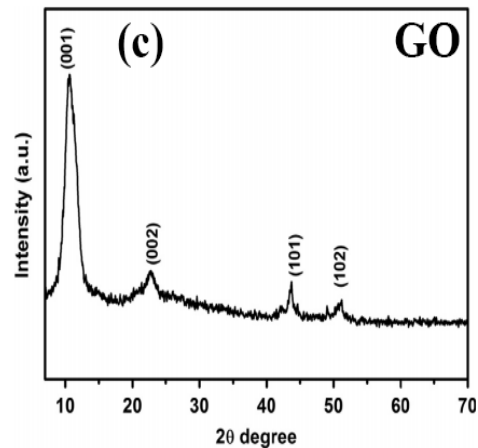
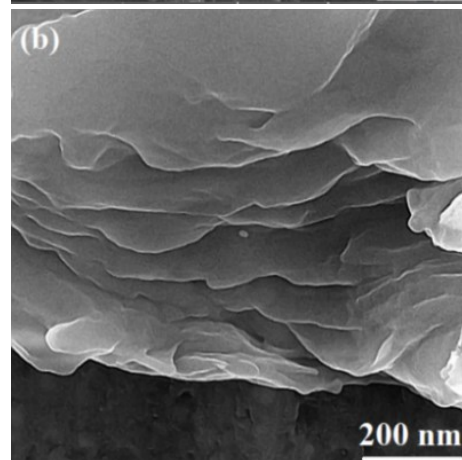
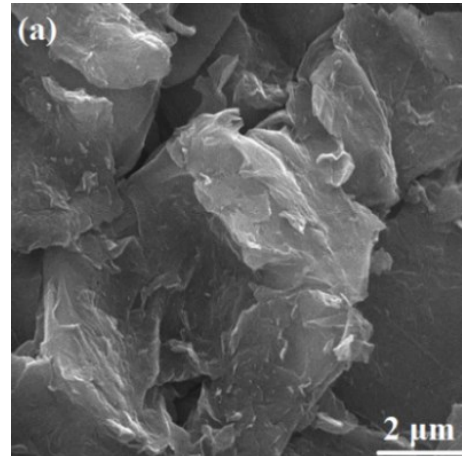
مقدار	خواص فیزیکی
986-995	چگالی (kg/m^3)
4170-4179	ظرفیت حرارتی (J/Kg.K)
0.623-0.816	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)
0.4×10^{-3} - 1.73×10^{-3}	گرانیوی دینامیکی (Pa.s)

شکل ۳، تصاویر FESEM در دو بزرگنمایی متفاوت و طیف پراش پرتو ایکس (XRD) از پودر آماده‌سازی شده GO را نشان می‌دهد. در تصاویر FESEM، شکل (a) و (b) ساختار ورقه مانند GO آشکار می‌شود و اندازه نانوصفحات همانند جدول ۱ با اندازه ذره ۸-۱ میکرون مطابقت دارد. طیف XRD نشان داده شده در شکل (c) ۳ به وضوح پیک اصلی GO را در زاویه $2\theta = 11.5^\circ$ یا 5.5° نشان می‌دهد که مربوط به پراش قوی از (۰۰۲) صفحات است. عدم وجود پیک در $2\theta = 25\sim 30^\circ$ نشان می‌دهد که گرافن اصلی به طور کامل به GO تبدیل شده است و

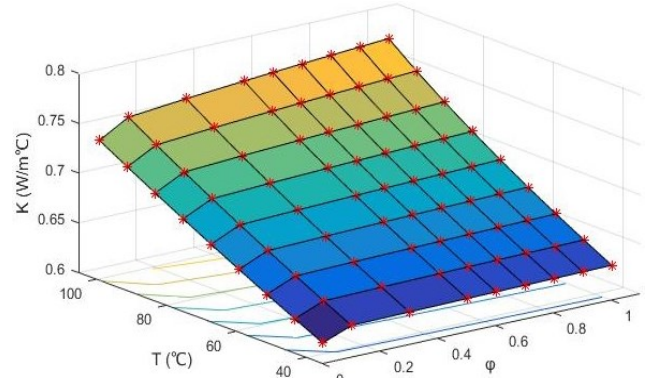
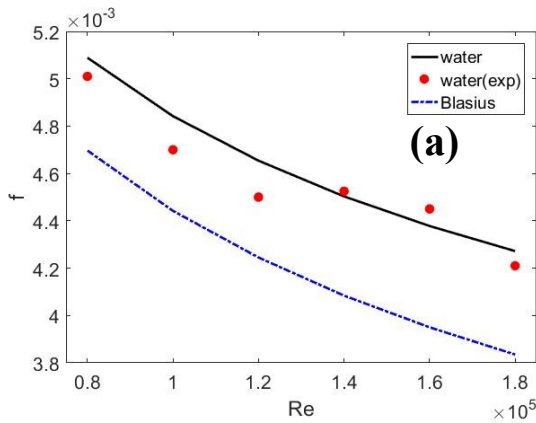


شکل ۴: تغییر گرانیوی با دما و غلظت حجمی اکسید گرافن

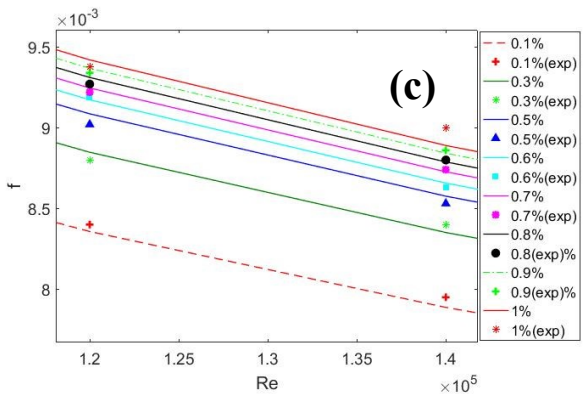
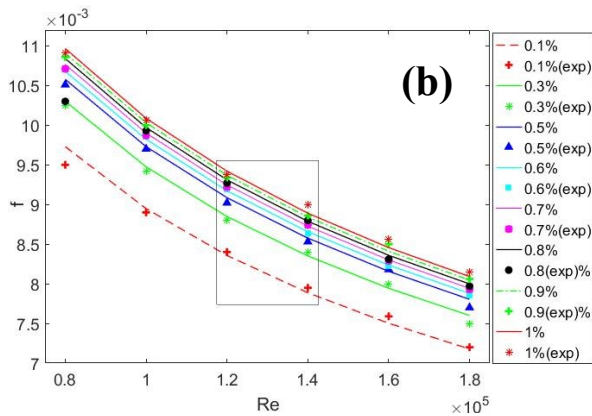
در شکل ۵، با توجه به معادلات ۵ و ۶ قابل توجه است که پارامتر دما، به ویژه در مقادیر کمی از نانوذرات، اثر ناچیزی بر روی ضریب هدایت حرارتی دارد. با این حال، با افزایش غلظت حجمی نانوذرات، اثر دما در نتیجه افزایش ضریب هدایت حرارتی افزایش می‌یابد. حداکثر مقدار ضریب هدایت حرارتی در غلظت ۱٪ حجمی به دست می‌آید؛ که مقدار آن ۰/۷۸ است. سرعت رشد حداکثر مقدار ضریب هدایت حرارتی برای نانوسیال ۲۵/۴ درصد در مقایسه با حداقل مقدار آن برای آب است. این فرآیند به وضوح نشان می‌دهد که دستیابی به رسانایی حرارتی بالاتر منجر به افزودن ذرات اکسید گرافن به سیال پایه (آب) می‌شود. همچنین، مقایسه بین رسانایی حرارتی بر حسب دما برای مقادیر نانوسیال آب-اکسید گرافن به دست آمده از مطالعه حاضر و مقادیر ارائه شده توسط سایر پژوهشگران [۴۹، ۴۱، ۱۵-۵۲] برای نانوسیال‌های اکسید فلزی متفاوت انجام شده است که نتیجه نشان می‌دهد، روند تغییر مشابه است. همانطور که شکل ۵ نشان می‌دهد، افزایش دما به دلیل افزایش انتشار براونی و تأثیرات بیشتر ذرات، منجر به ضریب هدایت حرارتی بالاتر می‌شود که با افزایش غلظت حجمی به دلیل وجود نانوذرات بیشتر، تأثیر دما بر انتشار براونی و برخورد تصادفی نانوذرات محسوس‌تر است. همچنین، حداکثر غلظت حجمی نانو ذره اکسید گرافن بالاترین رسانایی حرارتی را دارد.



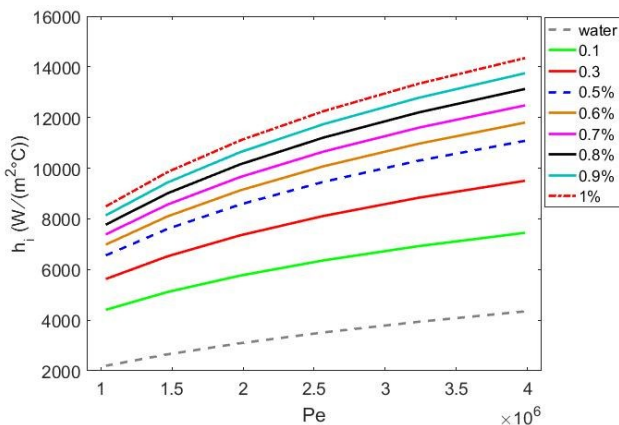
شکل ۳: (a,b) تصاویر FESEM از سنتز پودر GO در دو بزرگنمایی متفاوت، (c) طیف پراش پرتو ایکس.



شکل ۵: تغییر ضریب هدایت حرارتی با دما و غلظت حجمی اکسید گرافن



شکل ۶: (a) مقایسه تغییرات ضریب اصطکاک آب با معادله بلازیوس (b) تغییرات ضریب اصطکاک نانوسیال بر اساس عدد رینولدز، (c) تصویر بزرگنمایی از (b).

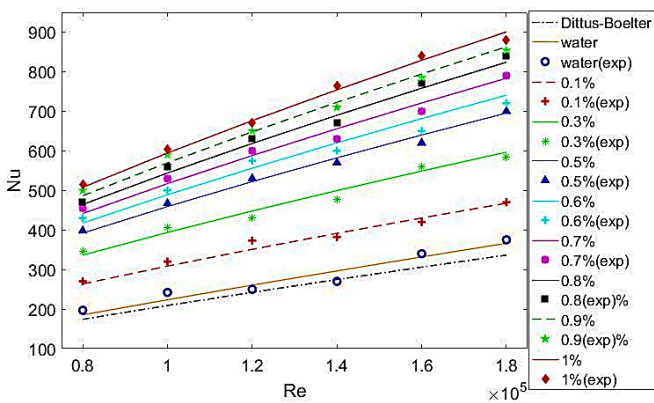


شکل ۷: تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی نسبت به عدد پکلت

در شکل ۶، ضریب اصطکاک با استفاده از روابط گلینسکی (معادله ۱۲) و بلازیوس (معادله ۱۴)، برای سیال پایه آب و همچنین، معادله ۱۶، برای نانو سیال ترسیم شده است. در این شکل نحوه تغییر ضریب اصطکاک با عدد رینولدز نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای یک سرعت جریان جرمی معین، ضریب اصطکاک با افزایش غلظت حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد اما با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد، همان طور که بسیاری از محققان بیان کردند [۵۲-۵۴]. در غلظت ۱ درصد حجمی نانوسیال و حداکثر سرعت جریان جرمی، ضریب اصطکاک نانوسیال ۲۳ درصد بیشتر از آب است. علاوه بر این، نتایج عددی و آزمایشگاهی حاضر با معادله (۱۴) مقایسه شده است. حداکثر میزان اختلاف نتایج عددی و تجربی ۲/۹٪ می‌باشد که میزان قابل قبولی است. همچنین، نتایج مشابهی برای نانوسیال آب - آلومینا [۵۲]، توسط البدر و همکارانش نشان داده شده است.

شکل ۷، روند تغییر ضریب انتقال حرارت جابجایی را بر اساس عدد پکلت مطابق معادلات ۱۰ و ۱۸ نشان می‌دهد. همان طور که نشان داده شده است افزایش عدد پکلت و غلظت حجمی به طور همزمان باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌شود، همین روند توسط فرج‌اللهی و همکاران نشان داده شده است [۵۵]. حداکثر مقدار ضریب جابجایی حرارتی در غلظت ۱ درصد حجمی نانوسیال و عدد پکلت برابر با $3/98 \times 10^6$ رخ می‌دهد.

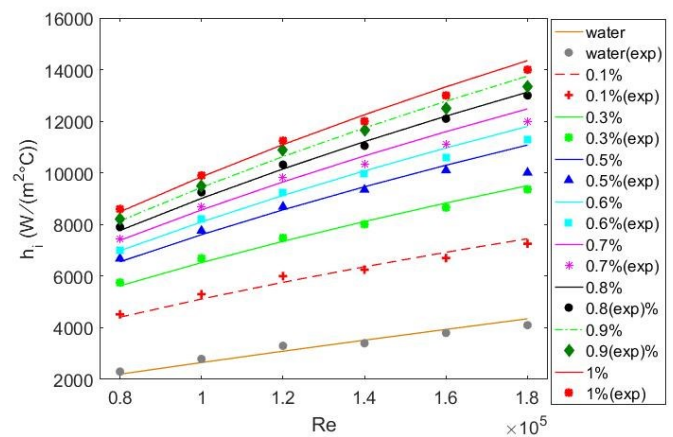
است. از طرف دیگر، اعداد ناسلت برای غلظت ۱ درصد حجمی و آب در حداقل عدد رینولدز $507/6$ و $185/3$ است، بنابراین عدد ناسلت نانوسیال ۳۷ درصد بیشتر از سیال آب است. با افزایش سرعت انتقال حرارت، عدد ناسلت نیز رشد می‌کند. شکل ۹، تصدیق می‌کند که انتقال حرارت با افزایش دمای ورودی افزایش می‌یابد و بنابراین عدد ناسلت نیز افزایش می‌یابد. به طور کلی روابط نظری-تجربی متفاوتی برای ارزیابی عدد ناسلت وجود دارد و هر یک دارای محدودیت خاصی بوده و با مقادیر عددی یا تجربی تا حد خاصی مطابقت دارد. علاوه بر این، نتایج عددی حاضر با رابطه دیتوس-بوتلر (معادله ۱۵) مقایسه شده است. حداکثر عدم دقت بین محاسبه عددی و نتایج همبستگی $1/8/9$ است. از طرفی، حداکثر میزان اختلاف نتایج عددی و تجربی $2/3$ ٪ است. بنابراین، شکل ۹ نتایج تقریب خوبی را ارائه می‌دهد. همین روند برای نانوسیال آب - آلومینا [۵۲]، توسط البدر و همکاران نشان داده شده است.



شکل ۹: تغییرات عدد ناسلت نسبت به عدد رینولدز

مطالعه حاضر در رابطه با بررسی ضریب عملکرد حرارتی نشان داد که ضریب جریان انتقال حرارت نانوسیال در اعداد رینولدز پایین‌تر مناسب‌تر است، نتایج مشابهی توسط رنجبرزاده و همکارانش [۳۲] ارائه شده است. با در نظر گرفتن معادله (۱۹) و روند تغییرات ضریب اصطکاک و عدد ناسلت به ترتیب مطابق شکل ۶ و شکل ۹؛ رفتار ضریب عملکرد حرارتی افزایشی است. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که حداکثر مقدار ضریب عملکرد حرارتی در غلظت ۱٪ حجمی نانوسیال در عدد رینولدز کم، برابر با $2/1$ به دست می‌آید، بنابراین، نسبت افزایش ضریب عملکرد حرارتی $1/8$ است.

شکل ۸، مقایسه ضریب انتقال حرارت جابجایی، (معادله ۱۸)، برای غلظت های حجمی فرضی و سیال پایه بر اساس عدد رینولدز را نشان می‌دهد. همان طور که نشان داده شده است، ضریب جابجایی حرارتی با عدد رینولدز به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، همان طور که توسط بسیاری از محققان گزارش شده است [۵۳، ۵۶]. عدد رینولدز بالاتر در جریان معشوش، حرکت آشفته نانوذرات را افزایش می‌دهد. در نتیجه، این حرکات آشفته نانوذرات ضریب انتقال حرارت جابجایی را افزایش می‌دهد. در حداکثر غلظت حجمی نانو ذره اکسید گرافن، به دلیل ضریب انتقال حرارت جابجایی بالا در مقایسه با سیال پایه، حدود $69/7$ درصد رشد روی سیال پایه در حداقل عدد رینولدز مشاهده می‌شود. همچنین حداکثر میزان اختلاف نتایج عددی و تجربی $2/5$ ٪ می‌باشد. این نتایج می‌تواند اثر ظرفیت بالای انتقال حرارت در نانوصفات اکسید گرافن باشد.



شکل ۸: تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی نسبت به عدد رینولدز

در شکل ۹، عدد ناسلت با استفاده از روابط گلینسکی (معادله ۱۳) و دیتوس-بوتلر (معادله ۱۵)، معادله نظری برای سیال پایه آب و همچنین، رابطه نظری دانگتانکساک و وانگووایز (معادله ۱۷) برای نانوسیال ترسیم شده است. عدد ناسلت نانوسیال بیشتر از عدد ناسلت سیال پایه است و با افزایش عدد رینولدز و غلظت حجم ذرات، این عدد افزایش می‌یابد. با این حال، با افزایش عدد رینولدز، اثر نانوسیال بر انتقال حرارت افزایش می‌یابد که همین نتیجه توسط پژوهشگران دیگر نشان داده شده است [۵۷]. حداکثر عدد ناسلت در غلظت حداکثر حجمی نانو ذره اکسید گرافن و عدد رینولدز حدود $90/6$ است، همچنین برای آب $366/3$ است بنابراین، عدد ناسلت نانوسیال ۴۱ درصد بیشتر از آب

مقدار ضریب انتقال حرارت در ۱٪ غلظت حجمی نانوسیال اتفاق می افتد و عدد پکلت برابر $10^6 \times 3/98$ است.

۵- ضریب جابجایی حرارتی با عدد رینولدز به میزان قابل توجهی افزایش می یابد. حرکات آشفته نانوذرات به دلیل عدد رینولدز بالاتر، ضریب انتقال حرارت جابجایی را افزایش می دهد. در حداکثر غلظت حجمی نانو ذره اکسید گرافن، به دلیل ضریب انتقال حرارت جابجایی بالا در مقایسه با سیال پایه، حدود ۶۹/۷ درصد رشد نسبت به سیال پایه در حداقل عدد رینولدز مشاهده می شود. این نتایج می تواند اثر ظرفیت بالای انتقال حرارت در نانوصفحات اکسید گرافن باشد.

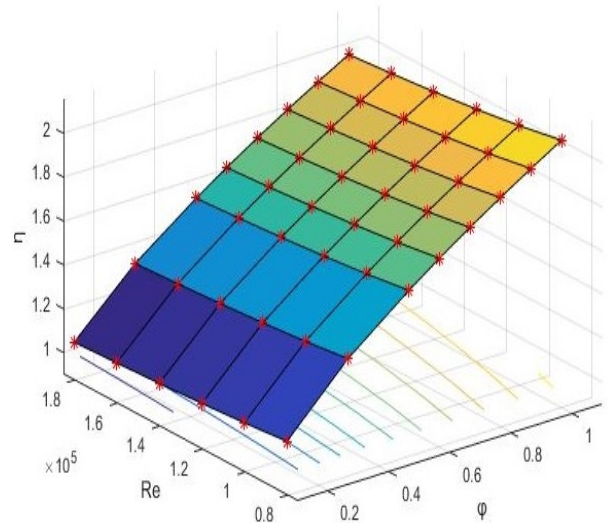
۶- در ماکزیمم عدد رینولدز، حداکثر نسبت افزایش عدد ناسلت ۲/۴ است، همچنین عدد ناسلت نانوسیال ۴۱ درصد بیشتر از آب است. از سوی دیگر، افزایش عدد ناسلت برای غلظت حجمی ۱ درصد نسبت به آب در حداقل عدد رینولدز، ۲/۷ است و همچنین عدد ناسلت نانوسیال ۳۷ درصد بیشتر از آب است. حداکثر عدم دقت بین محاسبات عددی و نتایج همبستگی در مقایسه با معادله دیتوس-بولتر ۸/۸۶ درصد است.

۷- نسبت افزایش ضریب عملکرد حرارتی می تواند به ۱/۸ برسد. از این رو، بهره مندی از نانوسیال اکسید گرافن به عنوان سیال انتقال حرارت در شرایط مشابه می تواند روشی چشمگیر برای بهبود عملکرد حرارتی سیستم باشد.

فهرست علائم

اختصارات	
ϕ غلظت حجمی (%)	C_p ظرفیت حرارتی (J/Kg.C)
ρ دانسیته (Kg/m ³)	k ضرایب هدایت حرارتی (W/m. C)
μ گرانروی دینامیک (Pa.s)	T دما (C)
ν گرانروی سینماتیک (m ² /s)	Re عدد رینولدز
bf سیال پایه	α ضریب پخش حرارتی (m ² /s)
np نانو ذره	Pr عدد پراوتل
nf نانوسیال	f ضریب اصطکاک
Pe عدد پکلت	Nu عدد ناسلت
h_c ضریب انتقال حرارت جابجایی (W/m ² .C)	D_i قطر داخلی لوله (mm)
T_f ضریب راندمان حرارتی	

مراجع



شکل ۱۰: تغییرات ضریب عملکرد حرارتی نسبت به عدد رینولدز و غلظت حجمی

۴- نتیجه گیری

کاربرد نانوسیالات آب-اکسید گرافن برای افزایش انتقال حرارت در رژیم آشفته به طور جامع بررسی شد. نتایج نشان می دهد که ویژگی های جریان آشفته نقش مهمی در بهبود راندمان مبدل حرارتی دارند. این مقاله یک تحلیل مقایسه ای دقیق از نانوصفحات اکسید گرافن را در رابطه با کارایی مبدل حرارتی ارائه می کند. مهمترین یافته های این بررسی به همراه چالش ها به شرح زیر است:

۱- با توجه به تجزیه و تحلیل تغییرات گرانروی نسبت به دما و غلظت حجمی نانوصفحات اکسید گرافن، حداکثر افزایش ۲۳ درصد است. به نظر می رسد رفتار نانوسیال ها برای غلظت های پایین نانوذرات نیوتنی باشد.

۲- در نانوسیال حاضر ۲۵/۴ درصد رشد ضریب هدایت حرارتی نسبت به کمترین مقدار آن برای آب مشاهده شد. این بدان معناست که افزایش دما به دلیل افزایش انتشار براونی و تأثیرات بیشتر ذرات منجر به ضریب هدایت حرارتی بالاتر می شود.

۳- تغییر روند ضریب اصطکاک آب و نانوسیال با تغییر عدد رینولدز یکسان است. ضریب اصطکاک نانوسیال در مقایسه با آب حداکثر تا ۲۳ درصد افزایش می یابد.

۴- روند تغییر ضریب انتقال حرارت جابجایی بر اساس عدد پکلت نشان داد که افزایش عدد پکلت و غلظت حجمی به طور همزمان باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی می شود. حداکثر

20. U. Rea, T. McKrell, L. wen Hu, and J. Buongiorno, *Int. J. Heat Mass Transf.* 52, 2042, 2009.
21. W. Yu, H. Xie, X. Wang, and X. Wang, *Phys. Lett. A* 375, 1323, 2011.
22. R. Kamatchi, S. Venkatachalapathy, and B. Abhinaya Srinivas, *Int. J. Therm. Sci.* 97, 17, 2015.
23. Z. Hajjar, A. morad Rashidi, and A. Ghosatloo, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 57, 128, 2014.
24. A. Amrollahi, A. M. Rashidi, R. Lotfi, M. Emami Meibodi, and K. Kashefi, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 37, 717, 2010.
25. C. J. Ho, C. Y. Chang, W. M. Yan, and P. Amani, *Int. J. Heat Mass Transf.* 120, 6, 2018.
26. M. Mehrali, E. Sadeghinezhad, M. A. Rosen, A. R. Akhiani, S. Tahan Latibari, M. Mehrali, and H. S. C. Metselaar, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 66, 23, 2015.
27. E. Sadeghinezhad, H. Togun, M. Mehrali, P. Sadeghi Nejad, S. Tahan Latibari, T. Abdulrazzaq, S. N. Kazi, and H. S. C. Metselaar, *Int. J. Heat Mass Transf.* 81, 41, 2015.
28. M. A. Nazari, R. Ghasempour, M. H. Ahmadi, G. Heydarian, and M. B. Shafii, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 91, 90, 2018.
29. F. Hekmatipour, M. A. Akhavan-Behabadi, and B. Sajadi, *Appl. Therm. Eng.* 100, 621, 2016.
30. M. jie Bai, J. long Liu, J. He, W. jun Li, J. jun Wei, L. xian Chen, J. yin Miao, and C. ming Li, *Diam. Relat. Mater.* 108, 107982, 2020.
31. M. Rakhsha, F. Akbaridoust, A. Abbassi, and S. A. Majid, *Powder Technol.* 283, 178, 2015.
32. R. Ranjbarzadeh, A. Karimipour, M. Afrand, A. H. M. Isfahani, and A. Shirmeshan, *Appl. Therm. Eng.* 126, 538, 2017.
33. P. Naphon, *Int. J. Heat Mass Transf.* 93, 293, 2016.
34. M. Zahid, N. Yasmin, M. N. Ashiq, M. Safdar, and M. Mirza, *Phys. B Condens. Matter* 624, 413359, 2022.
35. A. Chouhan, H. P. Mungse, and O. P. Khatri, *Adv. Colloid Interface Sci.* 283, 102215, 2020.
36. Y. Zeng, T. Li, Y. Yao, T. Li, L. Hu, and A. Marconnet, *Adv. Funct. Mater.* 29, 1901388, 2019.
37. S. Ram Joshi, J. Lee, and G. H. Kim, *Mater. Lett.* 292, 129649, 2021.
38. B. C. Pak and Y. I. Cho, <https://doi.org/10.1080/08916159808946559> 11, 151, 2007.
1. S. R. Nfawa, A. R. Abu Talib, A. A. Basri, and S. U. Masuri, *Case Stud. Therm. Eng.* 27, 101279, 2021.
2. Y. Xuan and Q. Li, *J. Heat Transfer* 125, 151, 2003.
3. N. A. C. Sidik, S. Samion, M. N. Musa, M. J. Muhammad, A. I. Muhammad, M. N. A. W. M. Yazid, and R. Mamat, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 72, 39, 2016.
4. M. M. K. Bhuiya, M. S. U. Chowdhury, M. Saha, and M. T. Islam, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 46, 49, 2013.
5. M. Parsazadeh, H. A. Mohammed, and F. Fathinia, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 46, 97, 2013.
6. M. Afrand, *Appl. Therm. Eng.* 110, 1111, 2017.
7. A. Andreozzi, O. Manca, S. Nardini, and D. Ricci, *Appl. Therm. Eng.* 98, 1044, 2016.
8. C. J. Ho, C. Y. Chang, and W. M. Yan, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 83, 23, 2017.
9. A. Naghash, S. Sattari, and A. Rashidi, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 78, 127, 2016.
10. M. Afrand, E. Abedini, and H. Teimouri, *Phys. E Low-Dimensional Syst. Nanostructures* 87, 248, 2017.
11. Y. Luo, X. Du, A. Awad, and D. Wen, *Int. J. Heat Mass Transf.* 104, 658, 2017.
12. T. J. Choi, S. P. Jang, and M. A. Kedzierski, *Int. J. Heat Mass Transf.* 122, 483, 2018.
13. M. Pavia, K. Alajami, P. Estellé, A. Desforges, and B. Vigolo, *Adv. Colloid Interface Sci.* 294, 102452, 2021.
14. S. Sarbolookzadeh Harandi, A. Karimipour, M. Afrand, M. Akbari, and A. D'Orazio, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 76, 171, 2016.
15. R. Taherialekouhi, S. Rasouli, and A. Khosravi, *Int. J. Heat Mass Transf.* 145, 118751, 2019.
16. D. P. Barai, B. A. Bhanvase, and S. H. Sonawane, *Ind. Eng. Chem. Res.* 59, 10231, 2020.
17. E. Ebrahimnia-Bajestan, M. Charjouei Moghadam, H. Niazmand, W. Daungthongsuk, and S. Wongwises, *Int. J. Heat Mass Transf.* 92, 1041, 2016.
18. S. Saarinen, S. Puupponen, A. Meriläinen, A. Joneidi, A. Seppälä, K. Saari, and T. Ala-Nissila, *Int. J. Heat Mass Transf.* 81, 246, 2015.
19. P. V. Durga Prasad and A. V. S. S. K. S. Gupta, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 75, 154, 2016.

39. A. Ijam, R. Saidur, P. Ganesan, and A. Moradi Golsheikh, *Int. J. Heat Mass Transf.* 87, 92 2015.
40. Y. Xuan and W. Roetzel, *Int. J. Heat Mass Transf.* 43, 3701, 2000.
41. I. P. Moghadam, M. Afrand, S. M. Hamad, A. A. Barzinjy, and P. Talebizadehsardari, *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.* 548, 122140 , 2020.
42. V. Gnielinski, Gnielinski, and V., *STIA* 41, 8, 1975.
43. H. Blasius, in *Mitteilungen Über Forschungsarbeiten Auf Dem Gebiete Des Ingenieurwesens*, 1913.
44. F. W. Dittus and L. M. K. Boelter, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 12, 1985.
45. W. Duangthongsuk and S. Wongwises, *Int. J. Heat Mass Transf.* 52, 2009.
46. R. L. Webb, *Int. J. Heat Mass Transf.* 24, 1981.
47. D. Gao, M. Bai, C. Hu, J. Lv, C. Wang, and X. Zhang, *Nanotechnology* 31, 2020.
48. C. Liu, T. Zhang, B. Lv, Y. Qiao, and Z. Rao, *J. Mol. Liq.* 319, 2020.
49. M. Hemmat Esfe, S. Saedodin, and M. Mahmoodi, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 52, 2014.
50. L. Syam Sundar, M. K. Singh, and A. C. M. Sousa, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 44, 2013.
51. S. Askari, A. Rashidi, and H. Koolivand, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 108, 2019.
52. J. Albadr, S. Tayal, and M. Alasadi, *Case Stud. Therm. Eng.* 1, 2013.
53. D. Purbia, A. Khandelwal, A. Kumar, and A. K. Sharma, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 108, 104327 , 2019.
54. T. Dagdevir, O. Keklikcioglu, and V. Ozceyhan, *Res. Eng. Struct. Mater.* 2017.
55. B. Farajollahi, S. G. Etemad, and M. Hojjat, *Int. J. Heat Mass Transf.* 53, 12 , 2010.
56. R. K. Das, G. S. Sokhal, and S. S. Sehgal, *Mater. Today Proc.* 33, 1499 , 2020.
57. I. J. K. Wong and N. T. A. Tiong, *SN Appl. Sci.* 3, 1 , 2021.



Effect of water-graphene oxide nanofluid on the performance and heating properties of heat exchangers using experimental and mathematical data

S.Behzadi, M. Hedayatian*, P.Hemati

1. Department of Mechanical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

2. Department of Mechanical Engineering, Asadabad Branch, Islamic Azad University, Asadabad, Iran

3. Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Abstract: In this article, turbulent flow characteristic of GO-water nanofluids is thoroughly reviewed. Also presents the effects of some important parameters such as, GO nanoparticles concentration, and Reynolds number on heat transfer rate. The range of nanofluid concentration is considered as 0.0%-1.0% of volume concentration and in a double tube heat exchanger counter flow under turbulent flow conditions which Reynolds number of the turbulent flow is chosen between 80000 and 180000; the effect of graphene oxide nanocatalysts on heat transfer has been investigated. The viscosity of nanofluid has a maximum of 23% increase in comparison to the base fluid (water). There was a 25.4% growth in thermal conductivity in the present nanofluid compared to the minimum amount of that for water. Considering the data obtained from this study, the Nusselt number, the convective heat transfer coefficient, the friction factor, and the thermal performance coefficient are investigated. In order to validate the data, the results of this study are compared with preceding studies and experimental data. Maximally, the nanofluid has a 23% increment in the friction factor, 69.7% augmentation in the convective heat transfer coefficient, 37% growth in Nusselt number in comparison to the base fluid. However, the thermal performance coefficient maximally increments by 1.85. According to the achieved results, the present nanofluid can be used in heat exchangers.

Keywords: Heat Exchanger, Graphene Oxide, Nanofluid, Turbulent Flow, Numerical Modelling.