

به کارگیری و مقایسه عملکرد گرمایی و هیدرودینامیکی نانوسیال‌های گرافن اکسید و آلومینا در مبدل گرمایی صفحه‌ای

سید محمد صادق حسینی⁺*

گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، رفسنجان، ایران

چکیده: هدف از این پژوهش ارزیابی و مقایسه تأثیر دو نوع نانوسیال پایه آب با هندسه متفاوت تشکیل شده از نانوصفحه‌های گرافن اکسید و نانوذره‌های آلومینا بر عملکرد یک مبدل گرمایی صفحه‌ای می‌باشد. بدین منظور نخست نانوسیال‌های با غلظت ۰/۱ درصد وزنی به کمک یک دستگاه فراصوت دارای میله سنجش و یک همزن مکانیکی پر قدرت تهیه شدند و در ادامه ویژگی‌های ترموفیزیکی آن‌ها شامل ضریب هدایت گرمایی، گرانش و عدد پراتل مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفت. به منظور آزمایش عملکردی، یک سامانه گرمایی شامل یک مبدل صفحه‌ای لجمی مجهز به دو عدد پمپ، دو عدد جریان‌سنج، چهار عدد دماسنج، دو عدد فشارسنج، دو عدد مخزن و لوله‌های فولادی عایق شده، بر پا شد. شدت جریان سیال گرم (آب خالص) ثابت و از نانوسیال به عنوان سیال سرد برای خنک کردن سیال گرم در شدت جریان‌های ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳ و ۳/۵ L/min استفاده شد. عملکرد گرمایی و هیدرودینامیکی از روش ارزیابی نرخ انتقال گرما، عدد ناسلت، ضریب اصطکاک، افت فشار، توان پمپاژ و سرانجام معیار ضریب عملکرد (نسبت انتقال گرمایی به دست آمده به توان پمپاژ مصرفی) به دست آمد. در مقایسه با آب، گرما در مبدل و با استفاده از دو نمونه نانوسیال با نرخ بیش‌تری انتقال یافت به طوری که در بیش‌ترین حالت (در کم‌ترین شدت جریان) درصد بهبود انتقال گرما در نانوسیال گرافن اکسید و نانوسیال آلومینا به ترتیب ۴۶ و ۱۸ درصد بود. این مطالعه نشان داد که بیشینه بهبود ضریب عملکرد مبدل نسبت به آب با استفاده از نانوسیال گرافن اکسید و در شدت جریان‌های کم‌تر از ۲/۵ L/min به دست آمد (۲۷ درصد)، در حالی که در شدت جریان‌های بالاتر از ۲/۵ L/min ضریب عملکرد نانوسیال گرافن اکسید افت محسوسی داشته و از نانوسیال آلومینا و حتی از آب خالص هم کم‌تر شده بود.

واژگان کلیدی: گرافن اکسید، آلومینا، نانوسیال، مبدل گرمایی صفحه‌ای، ضریب عملکرد

KEYWORDS: graphene oxide, alumina, nanofluid, plate heat exchanger, performance index

مقدمه

عملکرد مبدل‌های گرمایی در منابع پژوهشی آمده است. یک بخش از پژوهش‌ها که بیش‌تر جنبه صنعتی دارد روی بهینه‌سازی هندسه، اندازه‌ها و چیدمان مبدل‌های گرمایی انجام شده است. ساده‌ترین

امروزه مبدل‌های گرمایی به واسطه سطح زیاد انتقال گرما، از مهم‌ترین اجزای سامانه‌های گرمایشی و سرمایشی در صنایع گوناگون است. به طوری که دو استراتژی راهبردی برای بهبود

* عهده‌دار مکاتبات

+Email: m.hosseini@vru.ac.ir

بهینه برای دستیابی به بهبود انتقال گرمای بیشینه برای سیلیسیم اکسید، سریم اکسید، تیتانیوم اکسید و آلومینیم اکسید به ترتیب ۱/۲۵، ۰/۷۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد حجمی از نانوذره‌های یادشده گزارش شده‌اند. در مطالعه‌ای دیگر، تیوری و همکاران [۸] که به صورت اختصاصی بر روی نانوسیال سریم اکسید/آب انجام شد، نشان دادند که در شدت جریان حجمی و دمای یکسان نانوسیال با افزایش شدت جریان حجمی سیال گرم نسبت ضریب انتقال گرما نیز افزایش می‌یابد. جواد و همکاران [۹] به بررسی ویژگی‌های ترموفیزیکی و انتقال گرمای نانوسیال‌ها برای سیلیسیم اکسید، تیتانیوم اکسید و آلومینیم اکسید در مبدل گرمایی صفحه‌ای پرداختند. طبق نتیجه‌های آن‌ها مقدار ضریب انتقال گرما و نرخ انتقال گرمای نانوسیال‌های حاوی نانوذره‌های آلومینیم اکسید و تیتانیوم اکسید در غلظت‌های گوناگون با یکدیگر برابر بوده و از سومین نانوسیال یعنی سیلیسیم اکسید/آب بیش‌تر بوده است. در حالی که هدایت گرمایی دو نانوسیال سیلیکا و تیتانا را منطبق بر یکدیگر و بیش‌تر از آلومینا دانستند. وان^۴ و همکاران [۱۰] از نانوذره‌های آلومینا و نانوذره‌های روی اکسید برای ساخت نانوسیال پایه آب در غلظت‌های ۱، ۳ و ۶ درصد حجمی استفاده و برای بررسی ویژگی‌های انتقال گرما و افت فشار در مبدل گرمایی صفحه‌ای به کار بستند. بازه عدد رینولدز بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ و دمای مورد آزمایش ۲۰ تا ۴۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. آن‌ها نتیجه گرفتند که در یک عدد رینولدز مشخص بیش‌ترین بهبود ضریب کلی انتقال گرما در مبدل با استفاده از نانوسیال آلومینا در غلظت حجمی ۶٪ به میزان ۳۰٪ و با استفاده از نانوسیال روی اکسید در غلظت حجمی ۱٪ به میزان ۱۴/۵ درصد بوده است. پندی^۵ و نما [۱۱] از نانوسیال آلومینا/آب به عنوان سیال خنک کننده در مبدل گرمایی صفحه‌ای استفاده نمودند. آزمایش‌هایی بر روی این نانوسیال در غلظت‌های ۲، ۳ و ۴ درصد حجمی از نانوذره‌ها انجام گرفته است. آن‌ها نتیجه گرفتند که ضریب انتقال گرما و نرخ انتقال گرما در همه غلظت‌ها بالاتر از آب بوده است ولی با افزایش غلظت حجمی از ۲ درصد (یعنی در ۳ و ۴ درصد حجمی) این افزایش کم‌تر شده است.

اگر چه در پژوهش‌های یاد شده برای دستیابی به بهترین ویژگی‌های گرمایی نانوسیال‌ها، به‌طورمعمول مقادیر بالایی از غلظت نانوذره‌ها (۱ تا ۳ درصد حجمی) استفاده شده است که ممکن است تحت تأثیر دانسیته به سرعت ته نشین شده و ناپایدار شوند. مقدار زیاد نانوذره

مبدل گرمایی مبدل دو لوله‌ای است که به دلیل سطح انتقال گرمای کم راندمان گرمایی پایینی دارد ولی به واسطه طراحی ساده می‌تواند پر استفاده باشد. از سویی مبدل‌های صفحه‌ای^۱ گونه‌ای از سامانه‌های تبادل گرمایی هستند که به دلیل طراحی ویژه‌ای که دارند دارای سطح تبادل زیاد در حجم کم بوده و راندمان بالایی از خود نشان می‌دهند. البته به دلیل ساختار فشرده این گونه مبدل‌ها منطقی افت فشار عملیاتی زیاد بوده که ممکن است باعث ایجاد تنش و شکستگی در اتصال‌ها شده و نشی سیال به وجود آید و به‌طورمنطقی در کاربردهایی که فشار و دمای عملیاتی زیاد باشد مبدل‌های دو لوله‌ای و پوسته و لوله برتری دارند [۱،۲].

به‌تازگی استفاده از نانوذره‌ها برای بهبود عملکرد گرمایی سیال عامل در مبدل‌های گرمایی به عنوان راهکاری نوین گزارش شده که کاربردی شدن آن‌ها مستلزم در نظر گرفتن پارامترهای عملیاتی بسیاری می‌باشد [۳]. نانوسیال، سیالی است که به‌طورمعمول از معلق کردن مقدار کمی نانوذره (ذره‌هایی که ضریب هدایت گرمایی بالایی دارند) در آن به دست می‌آید. از آن‌جا که نانوذره‌ها اندازه بسیار کوچک و نسبت سطح به حجم بالایی دارند، وقتی در سیالی معلق شوند می‌توانند باعث بهبود ویژگی‌های ترموفیزیکی آن سیال شده تا بتواند انتقال گرمایی بیش‌تری را داشته باشد [۴]. از سویی حرکت براونی نانوذره‌ها باعث پخش بهتر گرما در سیال می‌شود [۵]. مرور منابع پژوهشی نشان می‌دهد نانوذره‌های فلزی و اکسید فلزی بیش‌تر به منظور تهیه نانوسیال برای استفاده در مبدل‌های گرمایی استفاده شده است. در همه این پژوهش‌ها ضریب هدایت گرمایی سیال به کمک این نانوذره‌ها بهبود یافته و در نتیجه عملکرد مبدل نسبت به سیال عامل خالص رشد داشته است.

پنتزلی^۲ و همکاران [۶] از نانوسیال‌های آلومینیم اکسید و مس اکسید به عنوان سیال خنک‌کننده در مبدل صفحه‌ای استفاده نمودند و بیان کردند که نانوسیال اکسید مس ویژگی‌های گرمایی بهتری را نشان داده است اما پایداری ضعیفی دارد. در این مطالعه با پیش‌بینی یک معادله برای عدد ناسلت سیال گرم توانستند ضریب انتقال گرمایی جابه جایی را برای نانوسیال به دست آورند. تیوری^۳ و همکاران [۷] مقایسه‌ای بر عملکرد چند نانوسیال در مبدل گرمایی صفحه‌ای داشتند. نانوسیال‌های مورد بررسی آن‌ها شامل انواع اکسیدهای فلزی مرسوم با سیال پایه آب و در شدت جریان‌های حجمی گوناگون و بازه گسترده‌ای از غلظت‌ها بوده است. غلظت‌های

(۱) Plate Heat Exchanger (PHE)

(۳) Tiwari

(۵) Pandey

(۲) Pantzali

(۴) Kwon

گونه‌های مجتمع شده گرافن اکسید روی سطح گرم‌کن یک ساختار منظم متخلخل را تشکیل می‌دهند که به طور زنجیروار به هم متصل هستند. این ساختار منظم شبکه‌ای باعث افزایش هدایت گرمایی سطح مشترک جامد-مایع به صورت شعاعی شده و با جلوگیری از تشکیل نقطه‌های داغ باعث بهبود فرایند جوشش می‌شود. در حالی که در نانوسیال آلومینا گونه‌های تشکیل شده روی سطح گرمایش متخلخل نیستند و به واسطه آب‌دوست کردن سطح تماس باعث بهبود شار گرمایی بحرانی می‌شوند.

به نظر می‌رسد رفتار ترموفیزیکی و جهت‌گیری‌های نانوذره‌های گرافن اکسید متفاوت با رفتار نانوذره‌های آلومینا در آب باشد که این مسئله باعث شد که در پژوهش حاضر به مقایسه عملکرد گرمایی و هیدرودینامیکی این دو نانوسیال با یک غلظت مشخص در یک مبدل گرمایی صفحه‌ای پرداخته شود. اگر چه افزودن نانوساختارهای گوناگون به سیال عامل موجب بهبود انتقال گرما در یک سامانه گرمایشی و سرمایشی با جابه‌جایی اجباری می‌شود ولی ممکن است به واسطه هندسه ویژه ذره‌ها، افت فشار سامانه‌ای بیش از حد شده و توان مصرفی پمپ افزایش یابد. از آن‌جا که استفاده از نانوسیال‌های بر پایه گرافن اکسید در مبدل‌های گرمایی صفحه‌ای به ندرت انجام شده، هدف از این پژوهش استفاده از نانوسیال گرافن اکسید/ آب به عنوان سیال عامل سرد در یک مبدل گرمایی صفحه‌ای است تا نتیجه‌های عملکردی آن شامل گرمایی و هیدرودینامیکی با نانوذره‌های آلومینا مقایسه شود تا مشخص شود که تأثیر کدام یک در مبدل بیش‌تر بوده است. نوآوری این موضوع برای آن است که مقایسه‌ای از معیار عملکرد هر یک از نانوسیال‌ها در شدت جریان‌های گوناگون که به صورت نسبت گرمای انتقال یافته در مبدل به توان پمپ مصرفی مبدل تعریف می‌شود، انجام گیرد.

بخش تجربی

مواد آزمایشگاهی

نانوصفحه‌های گرافن اکسید و نانوذره‌های آلومینا با خلوص بالا از شرکت US Research Nanomaterial's برای آماده‌سازی دو نمونه نانوسیال بر مبنای آب تهیه شد که ویژگی‌های فیزیکی این دو نمونه در جدول ۱ خلاصه شده است. همان‌گونه که مشخص است بیش‌ترین تعداد لایه‌های تک کربنی گرافن اکسید ۱۰ بوده که ضخامت آن‌ها به ۷ نانومتر می‌رسد. این نانوصفحه‌های کربنی، سطح بالایی داشته و ظرفیت گرمایی آن‌ها کم‌تر از آب خالص است

به احتمال قوی در چند سیکل کاری ته نشین شده و موجب رسوب‌گیری پمپ و مبدل می‌شود. در نتیجه کاربرد عملیاتی نانوسیال‌های فلزی و یا اکسید فلزی در مقیاس‌های نیمه صنعتی و صنعتی می‌تواند با مشکل‌های زیادی همراه باشد. از سویی تهیه و یا سنتز مقدار زیاد نانو ذره از نظر اقتصادی نیز به صرفه نیست و استفاده از آن را محدود می‌کند. راه حل این مشکل استفاده از نانوساختارهای تازه سبک برای سنتز نانوسیال‌ها است که با درصد‌های خیلی کم ویژگی‌های چشمگیر گرمایی به سیال‌های عامل می‌بخشند.

نانوساختارهای کربنی شامل نانولوله‌های کربنی، فولرن، نانورشته‌های کربنی و گرافن دسته‌ای از مواد هستند که به تازگی توجه پژوهشگران زیادی را به خود جلب کرده است. این گونه نانوساختارها هدایت گرما و الکتریسیته بالاتری نسبت به نانوذره‌های فلزی و یا اکسید فلزی دارند [۱۲]. همچنین این نانوساختارها بسیار سبک بوده که عملیاتی کردن آن‌ها را ساده‌تر می‌سازد. پژوهشگران در حوزه گرمایی فعالیت‌های تازه‌ای در زمینه به کارگیری این گونه مواد در سامانه‌های گرمایشی به ویژه مبدل‌های گرمایی داشته‌اند [۱۳]. در یک پژوهش که توسط گودرز و همکاران [۱۴] انجام گرفت، پژوهشی روی انتقال گرما و افت فشار یک مبدل گرمایی صفحه‌ای که سیال عامل سرد آن نانوسیال آب/ نانولوله‌های کربنی بود انجام شد. سرفراز و همکاران [۱۵، ۱۶] از نانولوله‌های کربنی عامل‌دار شده برای بهبود عملکرد گرمایی مبدل‌های صفحه‌ای و دولوله‌ای بهره بردند. به تازگی در پژوهش‌های جدید از نانوسیال‌های گرافن/ آب و یا گرافن اکسید/ آب در مبدل‌های گرمایی پوسته و لوله و همچنین مبدل صفحه‌ای به عنوان سیال عامل سرد استفاده شده است [۱۷، ۱۸]. گرافن ماده‌ای تک لایه و دوبعدی است که از شبکه کربنی هگزاگوناال با ضخامت یک اتم با الکترون‌های پای غیرموضعی تشکیل شده است. در حالت کلی سوسپانسیون‌های گرافن می‌توانند تا ۵ لایه داشته باشند که به عنوان گرافن با تعداد لایه کم شناخته می‌شوند. به دلیل رسانایی گرمایی و الکتریکی زیاد لایه‌های گرافن در صفحه، ساختار متخلخل و زیاد بودن سطح ویژه آن، این ماده نقش مهمی را در برای گستره وسیعی از کاربردهای انرژی بازی می‌کند [۱۹].

پارک^۱ و همکاران [۲۰] فرایند جوشش استخری به کمک نانوسیال‌های گرافن اکسید/ آب و آلومینا/ آب را مورد مطالعه آزمایشگاهی و مقایسه قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که بهبود در شار گرمایی بحرانی^۲ نسبت به آب خالص در نانوسیال گرافن اکسید به مراتب بیش‌تر از نانوسیال آلومینا است. آن‌ها اثبات کردند که

(۱) Park

(۲) Critical Heat Flux

جدول ۱ - مشخصه‌های فیزیکی نانوصفحه گرافن اکسید و نانوذره آلومینا

آلومینا		گرافن اکسید	
مقدار	ویژگی	مقدار	ویژگی
۳۰	قطر متوسط ذره‌ها (nm)	۶ تا ۱۰	تعداد لایه‌ها
کروی	شکل ذره‌ها	۳۰۰	سطح ویژه (m^2/g)
۱۰۰	سطح ویژه (m^2/g)	۱۰۰۰	دانسیته (kg/m^3)
۳۹۷۰	دانسیته (kg/m^3)	۵۰ تا ۱۰	بعد گسترده (micron)
۷۶۵	ظرفیت گرمایی ($J/kg.K$)	۷۱۰	ظرفیت گرمایی ($J/kg.K$)
۴۰	ضریب رسانایی گرمایی ($W/m.K$)	۱۷۵	ضریب رسانایی گرمایی ($W/m.K$)

و این در حالی است که دانسیته آن به تقریب با دانسیته آب برابر بوده و بسیار سبک می‌باشد.

نتیجه‌های پراش پرتو ایکس و تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نمونه گرافن اکسید در شکل ۱-الف نشان داده شده است. پیک اشکار و تیز واقع شده در زاویه ۱۰ درجه در الگوی پراش بیانگر فاز گرافن اکسید است [۲۱]، نبود پیک‌های گرافن به عنوان پیش ماده نمایانگر بازدهی مناسب روش سنتز و خلوص گرافن اکسید است. صفحه‌های نانومقیاس ورقه ورقه شده گرافن اکسید در شکل تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری به طور کامل قابل دیدن است. این صفحه‌ها به تقریب ضخامتی در حدود ۳ تا ۷ نانومتر و طول ۵ تا ۱۰ میکرون دارند. نانوذره‌های آلومینا در فاز بلوری گاما متبلور شده که از نتیجه‌های پراش پرتو ایکس شکل ۱-ب این موضوع استنتاج می‌شود. همچنین تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نمونه بیانگر توزیع یکنواخت اندازه ذره‌ها با اندازه متوسط ۳۰ نانومتر در نمونه است. در غلظت‌های کم، این نانوذره‌ها بدون هیچ‌گونه برهمکنش سطحی می‌توانند آزادانه در آب حرکت برونی داشته و موجب بهبود انتقال گرما گردند [۲۲].

تهیه نانوسیال‌ها

در این پژوهش هدف آماده‌سازی دو نوع نانوسیال با هندسه متفاوت است که یکی در اثر افزودن نانوصفحه‌های گرافن اکسید به آب و دیگری از افزودن نانوذره‌های آلومینا به آب تهیه می‌شود. بدین منظور نخست مقدار مشخصی از گرافن اکسید و یا نانوذره‌های آلومینا به صورت تدریجی در ۰/۵ لیتر آب بدون یون مخلوط شده و به کمک یک دستگاه فراصوت دارای میله سنجش (۳۰۰ وات) به مدت ۶۰ دقیقه به خوبی همگن شد. سرانجام این سوسپانسیون تا حجم مورد نیاز

واحد سرد مبدل با آب مقطر و به کمک یک همزن مکانیکی با قدرت ۶۰۰۰ دور بر دقیقه رقیق شد. غلظت کلوییدی نهایی هردو نمونه یکسان و به میزان ثابت ۰/۱ درصد وزنی (معادل ۰/۱ درصد حجمی گرافن اکسید و ۰/۰۲۵ درصد حجمی آلومینا) تثبیت شد. این مرحله چندین نوبت تکرار شده و فرآورده جمع‌آوری شده تا ۶ لیتر نانوسیال مورد نیاز مبدل گرمایی به دست آید. با این حجم از نانوسیال مقداری حدود ۶ گرم از هر نانو ماده مصرف می‌شود. مطابق با پژوهش گانویر^۱ و همکاران [۲۳]، شدت جریان نانوسیال فاکتوری بسیار موثرتر نسبت به غلظت نانوسیال در بهبود عملکرد گرمایی مبدل‌های گرمایی است. از این رو در این پژوهش در یک غلظت مشخص نانوسیال، اثر شدت جریان به عنوان متغیر تأثیرگذار بررسی شد. افزون بر این، مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان داد که پایداری نانوسیال با افزایش جرم نانوذره بیشتر از ۰/۱ درصد وزنی به تدریج کم شده که می‌توانست موجب رسوب‌گذاری در کانال‌های نازک مبدل شده و کم کم بازده آن را کاهش دهد و حتی باعث بسته شدن روزنه‌ها شود. این مشاهده و هزینه زیاد نانومواد به ویژه گرافن اکسید منجر به انتخاب غلظت ۰/۱ درصد وزنی شد. همچنین در پژوهش صورت گرفته توسط اصفهانی و همکاران [۲۴] روی نانوسیال ساخته شده با گرافن اکسید بهترین غلظت عملکردی ۰/۱ درصد به دست آمد. زیرا در غلظت‌های بالاتر رشد چشمگیری در اندازه ذره‌ها و گرانی (۱۳۴٪) دیده شده در حالی که بیش‌ترین رشد هدایت گرمایی نانوسیال تا غلظت ۰/۱ درصد به دست آمده بود.

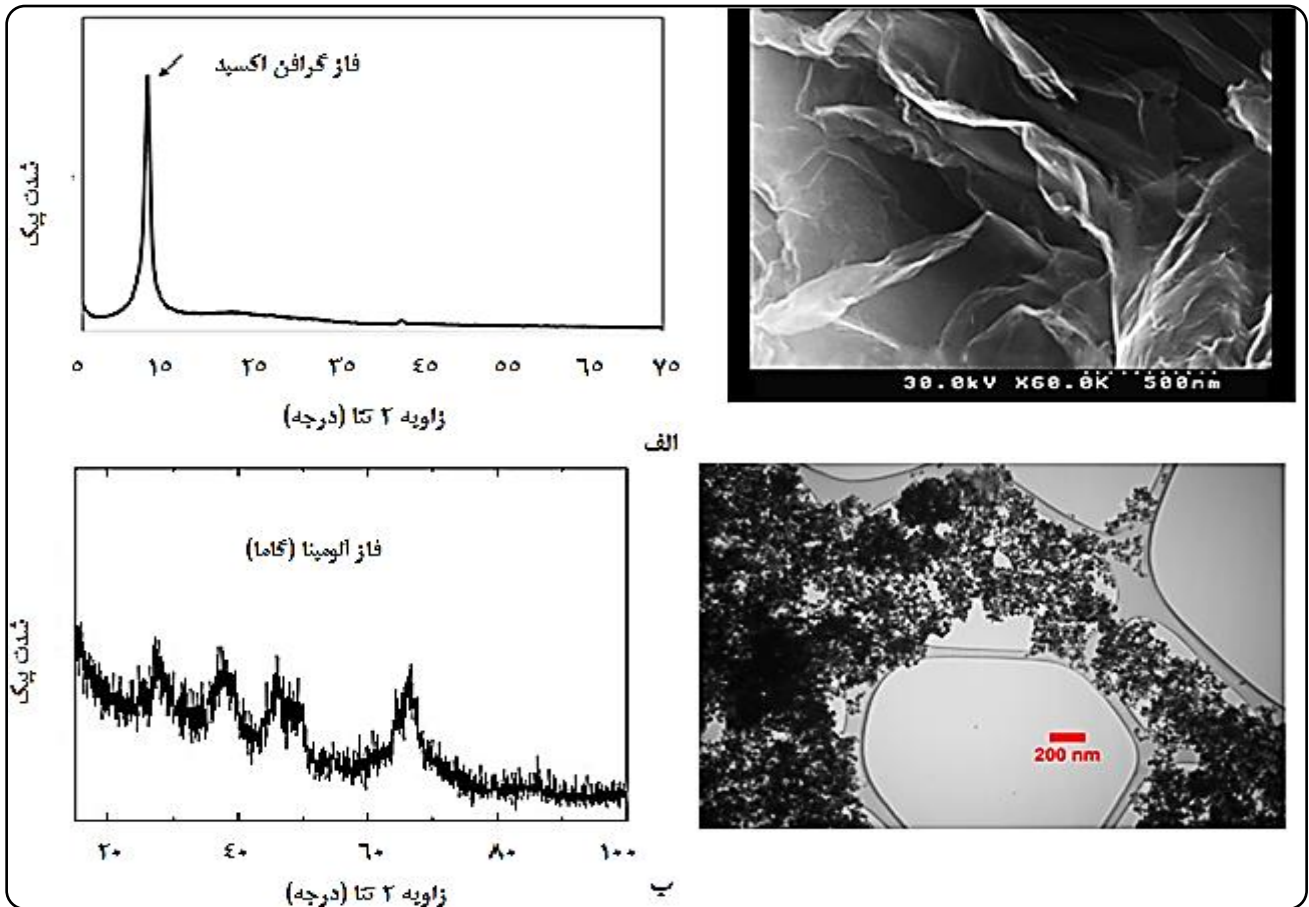
به کمک معادله ضریب هدایت گرمایی آب و دو نمونه نانوسیال به روش گرمایی سیم داغ^۲ و به کمک دستگاه KD2 Pro-thermal analyzer تعیین شد. همچنین گرانی نانوسیال‌ها در بازه دمایی ۱۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس و در نرخ برشی (1/s) ۱۰۰ به روش گرانی سنج چرخشی دیجیتال و به کمک دستگاه Brookfield- Rheometer مجهز شده با اسپیندل نوع LV-2 به همراه یک حمام گرمایی، اندازه‌گیری شد.

مقدارهای پتانسیل زتا برای دو نمونه نانوسیال آلومینا و گرافن اکسید در شرایط کمی اسیدی pH حدود ۶/۲ (نزدیک به pH کاری) در سه دمای گوناگون به کمک دستگاه Malvern Zetasizer ZS instrument بر اساس نظریه حرکت الکتروفوریتیک نانوذره‌ها اندازه‌گیری شد [۲۴].

مخلوط‌های کلوییدی از نانوصفحه‌های گرافن اکسید و نانوذره‌های آلومینا در آب، پایداری بالایی در برابر ته نشینی از خود نشان دادند به طوری که پس از سپری شدن یک ماه از زمان تهیه

(۱) Ganvir

(۲) Hot Wire

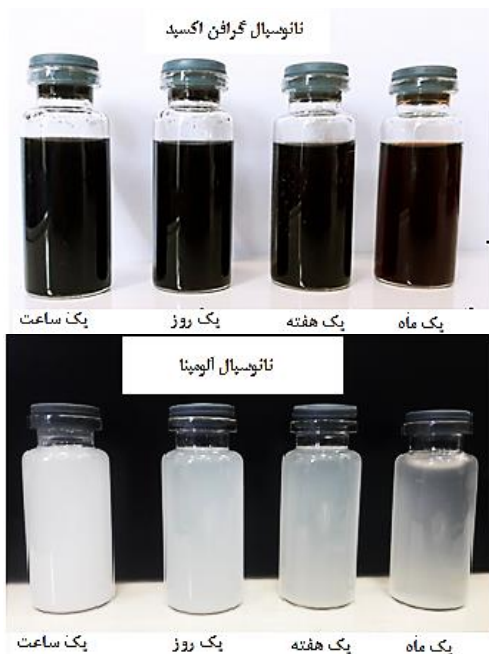


شکل ۱ - آنالیز پراش پرتو ایکس و تصویر میکروسکوپ الکترونی الف) نانوصفحه گرافن اکسید و ب) نانوذره آلومینا

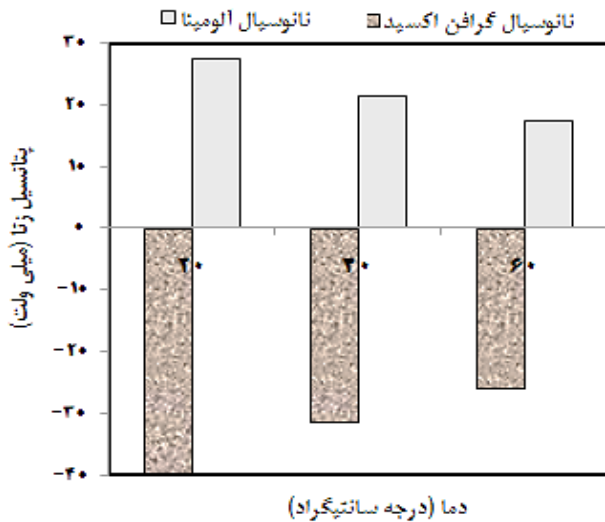
اندکی غلظت نمونه‌ها کاهش یافته بود (شکل ۲). نمونه گرافن اکسید دارای ۷۲ درصد کربن و ۲۷ درصد اکسیژن بوده که اکسیژن آن به صورت گروه‌های سطحی آبدوست شامل (OH) و (C=O) و (C-O) وجود داشت [۲۵]. به واسطه این گروه‌های آبدوست، گرافن اکسید به خوبی در آب حل شده و کلویدهای همگنی از ماده به دست آمد. از سویی به واسطه دانسیته بسیار کم گرافن اکسید (همانند با آب خالص) ته نشینی آن‌ها بسیار کم اتفاق افتاد.

همان‌گونه که دیده می‌شود نانوسیال آلومینا نیز پایداری به نسبت خوبی از خود نشان داد که این به واسطه نانو ذره‌های ریز آلومینا معلق در آب بوده که حرکت برونی داشته و به آسانی مجتمع نشده و ته نشین نمی‌شوند [۲۶]. البته کاهش غلظت نانوسیال آلومینا پس از یک ماه محسوس‌تر از نانوسیال گرافن اکسید بود که به نظر می‌رسد این نتیجه به خاطر سنگین‌تر بودن آلومینا نسبت به گرافن اکسید باشد (جدول ۱، دانسیته مواد).

شودهای (Choudhary) و همکاران [۲۷]، جدول طبقه‌بندی شده ۲ را در مورد پایداری نانوسیال‌ها ارایه کردند. به گفته آن‌ها اگر مقدار



شکل ۲ - پایداری نانوسیال‌های گرافن اکسید و آلومینا بر پایه آب در طول زمان



جدول ۲ - پتانسیل زتا و کیفیت پایداری نانوسیال وابسته به آن [۲۷]

مقدار مطلق پتانسیل زتا (±mV)	کیفیت پایداری
۰	ناپایدار
۱۵	پایداری کم همراه با ته نشینی
۳۰	پایداری متوسط
۴۵	پایداری خوب
۶۰	پایداری بسیار خوب با احتمال ته نشینی بسیار ضعیف

پتانسیل زتا^(۱) (ζ) صفر باشد سوسپانسیون بسیار ناپایدار بوده و هیچ‌گونه دافعه الکتروستاتیکی بین ذره‌ها وجود نداشته و ته نشینی شدید صورت می‌پذیرد. در صورتی که قدر مطلق پتانسیل زتا بین صفر تا ۱۵ میلی‌ولت باشد محتوی جامد/مابغ پایداری کمی دارد و این در حالی است که ته نشینی قابل دیدن است. در بازه ۱۵ تا ۳۰ میلی‌ولت، نانوسیال دارای پایداری متوسطی است و ممکن است پس از گذشت مدت زمانی ته نشینی ذره‌ها شکل بگیرد. ولی وقتی عدد مطلق پتانسیل زتا بین ۳۰ تا ۴۵ باشد پایداری زیاد است، و این در حالی است که در مقدارهای بیشتر از ۴۵ میلی‌ولت، دافعه الکتروستاتیکی بین ذره‌ها شدید شده و امکان مجتمع شدن آن‌ها به کمینه می‌رسد و نانوسیال پایداری خود را در زمان‌های طولانی حفظ می‌کند.

شکل ۳ - مقدارهای پتانسیل زتا برای دو نمونه نانوسیال آلومینا و گرافن اکسید در pH حدود ۶/۲ و در سه دمای گوناگون

به‌گونه‌ای است که آن را به سمت ناپایداری می‌کشاند. زیرا مقدار پتانسیل زتا در دمای ۶۰ °C به کمتر از ۲۰ میلی‌ولت رسیده است. این نتیجه بیان می‌کند که احتمال ته نشینی و رسوب گذاری ذره‌های آلومینا در مبدل گرمایی محتمل است. کاهش پتانسیل زتا (مقدار مطلق) برای نانوسیال گرافن اکسید نیز اتفاق افتاده ولی از ۲۰ میلی‌ولت کمتر نشده است. این مشاهده بیان می‌کند که این نمونه در مبدل گرمایی به عنوان سیال کاری کمتر دچار ناپایداری می‌شود اگر چه ممکن است خوشه زایی لحظه‌ای در آن اتفاق بیافتد.

برپایی سامانه انتقال گرما

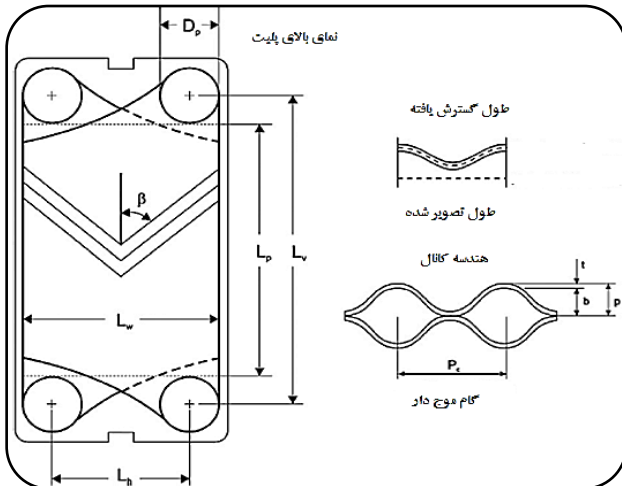
در این پژوهش نتیجه‌های آزمایشگاهی بر مبنای یک مبدل گرمایی صفحه‌ای (لحیمی) از جنس فولاد زنگ نزن ۳۱۶ استوار است که مشخصه‌های هندسی آن در جدول ۳ و شکل ۴ آورده شده است. سامانه انتقال گرما که تصویر واقعی و شمای آن در شکل ۵ نشان داده شده شامل یک مبدل صفحه‌ای، مخزن‌های ذخیره سیال گرم و سرد، لوله‌ها، شیرفلکه‌ها و اتصال‌ها به همراه دو عدد روتامتر برای اندازه‌گیری شدت جریان سیال سرد و گرم بود. درون مخزن سیال عامل گرم یک گرمکن الکتریکی ۲ کیلوواتی، مجهز به سامانه ترموستات تعبیه شده بود. سیال گرم و سرد، در یک سیکل بسته و به کمک دو عدد پمپ سانتریفیوژی با توان ۰/۵ اسب بخار به حرکت در می‌آمدند. در این سامانه دمای سیال‌های گرم و سرد ورودی و خروجی به مبدل توسط چهار عدد دماسنج دیجیتالی

شکل ۳ مقدارهای پتانسیل زتا برای دو نمونه نانوسیال آلومینا و گرافن اکسید در شرایط کمی اسیدی pH حدود ۶/۲ (نزدیک به pH کاری) را نشان می‌دهد. رفتار کلوییدی ذره‌ها در دو نمونه نانوسیال به طور کامل باهم متفاوت است. پتانسیل زتا برای نانوسیال آلومینا در pH یاد شده عددی مثبت است که در دمای ۲۰ °C مقداری برابر ۲۷/۵ mV را به خود اختصاص داده است. این عدد نشان‌دهنده پایداری متوسط این نمونه در این دما است که نتیجه‌های شکل ۲ نیز این مطلب را اثبات می‌کند. پتانسیل زتا در نانوسیال گرافن اکسید منفی بوده به طوری که در دمای ۲۰ °C مقداری آن -۳۹/۶ mV رسیده است. این عدد نشان می‌دهد که این نمونه نانوسیال دارای پایداری خوبی در مقابل ته نشینی از خود نشان می‌دهد. این نتیجه با مشاهده‌های فانگ^(۲) و همکاران [۲۸] همخوانی دارد.

شکل ۳ همچنین بیان می‌کند که دما تأثیر زیادی بر پتانسیل زتا و نتیجتاً پایداری نانوسیال‌ها می‌گذارد. دماهای آزمایش شده به تقریب با بازه کاری مبدل گرمایی که قرار است نانوسیال‌ها در آن به کار گرفته شوند یکی بود. در هر دو نمونه با افزایش دما مقدار مطلق پتانسیل زتا کاهش یافته است. در نانوسیال آلومینا این کاهش

(۱) Zeta Potential

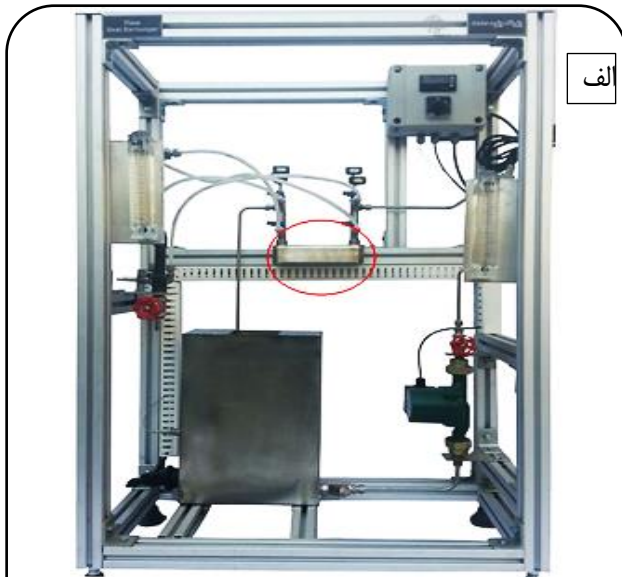
(۲) Fang



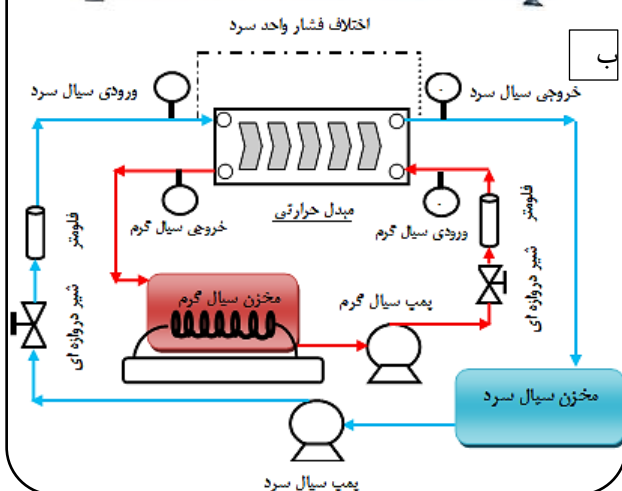
شکل ۴ - شمایی از هندسه مبدل گرمایی صفحه‌ای

جدول ۳ - مشخصه‌های مبدل گرمایی صفحه‌ای نصب شده در دستگاه آزمایش

مقدار	مشخصه	مقدار	مشخصه
۲ mm	فاصله متوسط کانال برای عبور سیال b	۱۶/۵	ضریب هدایت گرمایی فلز
۲۲ mm	قطر تمامی دهانه‌ها، Dp	۰/۵ mm	ضخامت صفحه، t
۶۵ mm	پهنای مؤثر کانال، Lw	۱۵	تعداد کل صفحه‌ها، Ni
۸۴ mm	طول مجموعه صفحه فشرده‌شده، Lc	۷	تعداد کانال بر هر گذر Ncp
۰/۲۱ m ²	سطح کل مؤثر Ae	۳۰°	زاویه شورون β
۱۲۲ mm	فاصله عمودی مرکز دهانه‌ها، Lv	۴۵ mm	فاصله افقی مرکز دهانه‌ها، Lh
۱/۱۷	ضریب بزرگ‌شدگی، Φ	یک گذر	تعداد گذرها



الف



ب

شکل ۵- الف- تصویر واقعی و ب- شمایی سامانه انتقال گرما بر مبنای مبدل گرمایی صفحه‌ای

اندازه‌گیری شد. نانوسیال به عنوان سیال سرد با هدف خنک کردن سیال گرم (آب خالص) به کار برده شد. دو عدد مانومتر فشار دیفرانسیلی برای اندازه‌گیری اختلاف فشار نانوسیال تعبیه شد. دماهای عملیاتی در شرایط دائمی سامانه قرائت شد که البته دمای سیال سرد و دمای سیال گرم ورودی به مبدل در همه آزمایش‌ها همواره یکسان و به ترتیب ۲۵ و ۵۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شد. شدت جریان حجمی واحد سرد (نانوسیال) در مقدارهای ۱/۵، ۲، ۳، ۲/۵ و ۳/۵ L/min متغیر بود، در حالی که شدت جریان حجمی واحد گرم (آب خالص) همواره ۱/۵ L/min قرار داده شد. مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش شدت جریان سیال گرم، اختلاف دمای بین واحدهای سرد و گرم کاهش می‌یابد. در نتیجه برای دستیابی به بیش‌ترین اختلاف دمای ممکن در مبدل با کم‌ترین خطای اندازه‌گیری و همچنین بررسی مطمئن تأثیر شدت جریان نانوسیال بر عملکرد گرمایی مبدل، شدت جریان سیال گرم ثابت و به کمترین میزان ۱/۵ L/min تنظیم شد.

معادله‌های استفاده شده

ویژگی‌های ترموفیزیکی نانوسیال آلومینا-آب، با توجه به کروی بودن نانوذره‌های آلومینا از معادله‌های ۱ تا ۳ به دست آمده‌اند. معادله‌های (۱) و (۲) معادله‌های نظری هستند که به‌طور عمده در سامانه‌های دو فازی مربوط به نانوسیال در زمینه دانسیته و ظرفیت گرمایی ویژه استفاده می‌شوند [۲۶]. برای نانوذره‌های کروی آلومینا برای تخمین گرانیوی به‌طور عمده از معادله انیشتین (معادله (۳)) استفاده شده است [۳، ۲۹].

$$\rho_{nf} = \phi \cdot \rho_{np} + (1 - \phi) \cdot \rho_w \quad (1)$$

که در معادله‌های بالا c_p ، ظرفیت گرمایی ویژه سیال، m ، شدت جریان جرمی سیال، ΔT ، اختلاف دمای ورودی و خروجی سیال موردنظر است. منطقی باید نرخ انتقال گرمای واحد سرد و گرم یکسان باشد ولی به دلیل خطاهای آزمایشگاهی بیش‌ترین حدود ۳ الی ۷ درصد اختلاف مشاهده شد که برای حل این مسئله نرخ میانگین انتقال گرما تعریف شد.

$$q_{ave} = (q_h + q_{nf})/2 \quad (11)$$

حال با داشتن q_{ave} ، می‌توان ضریب انتقال گرمای کلی سیال را محاسبه کرد. برای این کار می‌توان از معادله (۱۴) استفاده کرد.

$$U = q_{ave}/(A \times \Delta T_{LMTD}) \quad (12)$$

در معادله بالا A سطح تبادل گرمایی مبدل و ΔT_{LMTD} اختلاف دمای متوسط لگاریتمی است که عبارت است از:

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{((T_{hi} - T_{nfo}) - (T_{ho} - T_{nfi}))}{\ln \frac{(T_{hi} - T_{nfo})}{(T_{ho} - T_{nfi})}} \quad (13)$$

که اندیس های i و o مربوط به ورودی و خروجی مبدل است. ویژگی‌های سیال‌های عامل در دمای متوسط T_b آنالیز شد.

$$T_{bh} = (T_{hi} + T_{ho})/2 \quad (14)$$

$$T_{bnf} = (T_{nfi} + T_{nfo})/2 \quad (15)$$

مطابق با پژوهش تیواری و همکاران [۸]، عدد ناسلت برای آب خالص (سیال گرم) در مبدل گرمایی صفحه‌ای از معادله زیر به دست آمد که در آن عددهای بدون بعد ناسلت Nu_h و پراتل Pr_h ظاهر شده است.

$$Nu = 0.348 Re_h^{0.663} Pr_h^{0.33} \quad (16)$$

$$Pr_h = (c_{ph} \cdot \mu_h) / k_h \quad (17)$$

$$Nu_h = (h_h \cdot D_h) / k_h \quad (18)$$

حال وقتی ضریب انتقال گرمای جابه جایی سیال گرم (آب خالص) h_h به دست آمد، می‌توان از معادله ۱۹، ضریب انتقال گرمای جابه جایی نانوسیال h_{nf} (سیال سرد) را با توجه به ضریب کلی انتقال گرما (U) بر مبنای مقاومت‌های گرمایی حاکم درون مبدل به دست آورد. عبارت $\frac{t}{k_w}$ مربوط به مقاومت هدایت مبدل است که به ضریب هدایت فلز و ضخامت مبدل بستگی دارد.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_h} + \frac{1}{h_{nf}} + \frac{t}{k_w}} \quad (19)$$

$$c_{p_{nf}} = \frac{(1-\varphi)(\rho_w c_{pw}) + \varphi(\rho_{np} c_{pnp})}{\rho_{nf}} \quad (2)$$

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_w} = (1 + 2.5\varphi) \quad (3)$$

در مورد ویژگی‌های ترموفیزیکی نانوسیال گرافن اکسید/ آب، دانسیته و ظرفیت گرمایی از معادله‌های (۱) و (۲) به دست آمدند. از آن جایی که نانو ساختارهای گرافن اکسید کروی نیستند، معادله‌ها در مورد گرانی بر اساس تعریف‌های ویژه آن صورت می‌پذیرد. گرانی نانوسیال گرافن اکسید بر اساس معادله پیشنهادی رنجبزراده و همکاران از معادله ۴ به دست آمد [۳۰]. نقش دما در گرانی آب ایجاد شده است.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_w} = [1 + 343\varphi] \quad (4)$$

در این معادله‌ها φ درصد حجمی و ρ_w و ρ_{np} به ترتیب معادل دانسیته آب خالص و دانسیته نانوذره، c_{pw} و c_{pnp} به ترتیب ظرفیت گرمایی نانوذرها و ظرفیت گرمایی آب خالص و μ_w و μ_{nf} به ترتیب نماد گرانی آب خالص و نانوسیال است. ضریب هدایت گرمایی نانوسیال‌ها به روش تجربی به دست آمد. معادله‌های اشاره شده در این بخش مطابق مرجع [۸] ارایه شده‌اند. عدد رینولدز که معرف اینرسی سیال است برای سیال گرم (آب خالص) و برای سیال سرد (نانوسیال) به ترتیب از معادله‌های (۵) و (۶) به دست می‌آید.

$$Re_h = G_h \cdot D_h / \mu_h \quad (5)$$

$$Re_{nf} = G_{nf} \cdot D_h / \mu_{nf} \quad (6)$$

که در معادله‌های بالا قطر هیدرولیکی مبدل صفحه‌ای $D_h = 2b/\Phi$ و G_h ، G_{nf} به ترتیب سرعت جرمی بر واحد سطح کانال برای آب و نانوسیال است که از معادله‌های (۷) و (۸) محاسبه می‌گردند. Φ نسبت طول توسعه یافته به طول تصویر شده کانال است.

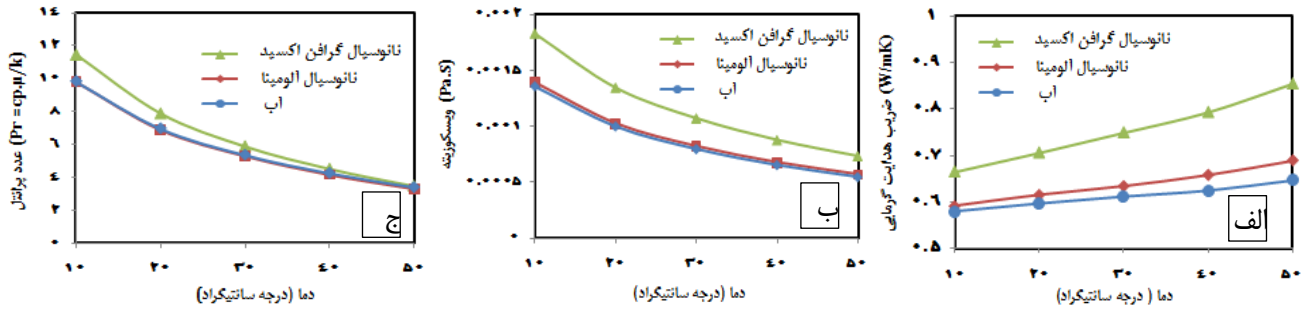
$$G_h = \frac{\dot{m}_h}{N_{cp} \cdot b \cdot L_w} \quad (7)$$

$$G_{nf} = \frac{\dot{m}_{nf}}{N_{cp} \cdot b \cdot L_w} \quad (8)$$

در این معادله‌ها N_{cp} تعداد کانال به ازای هر گذر، b فاصله متوسط کانال برای عبور سیال و L_w پهنای موثر کانال است. نرخ انتقال گرما در واحد گرم (آب خالص) و واحد سرد مبدل (نانوسیال) به ترتیب از معادله‌های ۹ و ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$q_h = \dot{m}_h c_{p_h} \Delta T_h \quad (9)$$

$$q_{nf} = \dot{m}_{nf} c_{p_{nf}} \Delta T_{nf} \quad (10)$$



شکل ۶ - ویژگی‌های ترموفیزیکی آب و دو نمونه نانوسیال ساخته شده با گرافن اکسید و آلومینا با غلظت ۰/۱ درصد وزنی، شامل ضریب هدایت گرمایی، گرانیوی و عدد پرانتل

خصلت یابی نانوسیال

همان گونه که بیان شد ضریب هدایت گرمایی دو نمونه نانوسیال با غلظت یکسان ۰/۱ درصد وزنی از نانوذره‌ها با استفاده از روش سیم داغ محاسبه شد که نتیجه‌ها در شکل ۶- الف خلاصه شده است. چنانچه مشخص است افزودن نانوذره‌های آلومینا و نانوصفحه‌های گرافن اکسید به آب، ضریب هدایت گرمایی آن را افزایش داده و این افزایش در نانوسیال گرافن اکسید به مراتب بیشتر از نانوسیال آلومینا است. مطابق با فیزیک نانوسیال‌ها، ماهیت و فعالیت گرمایی خود نانوذره‌ها و وجود حرکت‌های براونی آن‌ها در محیط سیال موجب بهبود ضریب رسانایی گرمایی نانوسیال‌ها نسبت به سیال پایه است [۳۱]. مطابق با شکل ۶، ضریب رسانایی گرمایی با افزایش دما در حال افزایش است و در دمای ۵۰ درجه سلسیوس، نانوصفحه‌های گرافن اکسید به میزان ۳۲ درصد و نانوذره‌های کروی آلومینا به مقدار ۶/۵ درصد هدایت گرمایی آب را بهبود بخشیده‌اند. مطابق با ویژگی‌های اولیه نانوساختارهای استفاده شده ضریب هدایت گرمایی گرافن اکسید ۱۷۵ W/m.K و ضریب هدایت گرمایی آلومینا ۴۰ W/m.K است که این موضوع خود دلیلی بر تأثیر بیش‌تر گرافن اکسید بر هدایت آب نسبت به آلومینا است.

البته، به نظر می‌رسد که شکل و هندسه نانوذره‌های معلق در آب پارامتر مهم دیگری در توجیح رفتار متفاوت دو نوع نانوسیال مورد بررسی باشد. پژوهش‌های سلواکومار^۲ و همکاران [۳۲] نشان داده که نانوذره‌های کشیده (غیر کروی) به واسطه ضریب شکل بزرگ‌ترشان نسبت به نانوذره‌های کروی تأثیر بیش‌تری روی هدایت گرمایی سیال پایه دارند. از همین رو در مقایسه با نانوذره‌های کروی آلومینا، نانوصفحه‌های گرافن اکسید تأثیر نسبی بیش‌تری بر ویژگی‌های گرمایی آب گذاشته‌اند. از سویی در پژوهش‌های انجام شده در این حوزه، این اثبات شده که تشکیل برخی چیدمان‌های ویژه

پس از به دست آمدن ضریب انتقال گرمای جابه جایی نانوسیال می‌توان به‌طورمستقیم از معادله (۲۲) عدد ناسلت نانوسیال را محاسبه کرد.

$$Nu_{nf} = (h_{nf} \cdot D_h) / k_{nf} \quad (20)$$

اختلاف فشار واحد سرد (نانوسیال) در مبدل گرمایی به صورت آزمایشگاهی تعیین شده و بر همین اساس ضریب اصطکاک و توان پمپ نانوسیال از معادله‌های زیر به دست آمد.

$$\Delta p = f \left[\frac{L_v \cdot 2G^2}{D_h \cdot \rho} \right] \quad (21)$$

$$P = \frac{\dot{m} \cdot \Delta p}{\rho} \quad (22)$$

که در این معادله‌ها L_v فاصله عمودی مرکز دهانه‌ها (در امتداد ارتفاع صفحه‌ها و P معرف توان پمپ می‌باشد. معیار ضریب عملکرد مبدل^۱ که نسبت نرخ انتقال گرمای صورت گرفته در مبدل به توان پمپاژ است از معادله زیر استنتاج شد. که در قسمت نتیجه‌ها نسبت $\frac{\eta_{nf}}{\eta_w}$ برحسب شدت جریان نانوسیال رسم شده است.

$$\eta = \frac{q_{ave}}{P} \quad (23)$$

نتیجه‌ها و بحث

بخش نتیجه‌ها شامل دو بخش است. بخش اول مربوط به خصلت‌یابی نانوسیال گرافن اکسید/آب و نانوسیال آلومینا مبتنی بر آنالیز ضریب هدایت گرمایی (k)، گرانیوی (μ) و عدد بدون بعد پرانتل (Pr) نانوسیال‌ها است. بخش دوم نتیجه‌ها در مورد انتقال گرما در مبدل گرمایی صفحه‌ای بحث شده است. بررسی نتیجه‌ها بیش‌تر از جنبه مقایسه میزان اثرگذاری دو نمونه نانوسیال (با غلظت یکسان) و شدت جریان آن بر نرخ انتقال گرما، عدد ناسلت، افت فشار و ضریب عملکرد مبدل می‌باشد.

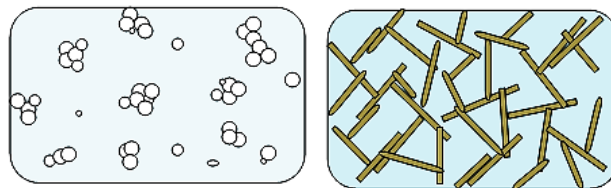
(۱) Selvakumar

(۲) Performance Evaluation Criterion

منفی در عملکرد آن محسوب می‌شود که ممکن است باعث افت فشار سامانه‌ای شود. به طور کلی در مقایسه ویژگی‌های ترموفیزیکی نانوسیال‌ها علاوه بر مقایسه ضریب هدایت گرمایی می‌بایست عدد پراتل هم مورد ارزیابی قرار گیرد [۳۵]. عدد پراتل در یک سیال، معرف نسبت پخش مومنتم ناشی از گرانشی به پخش انرژی ناشی از رسانندگی است که در فلزهای مایع به دلیل پخش انرژی زیاد به سمت صفر میل می‌کند و در آب خالص به تقریب یک است [۳۶]. اگر چه نانوسیال گرافن اکسید نسبت به نانوسیال آلومینا ضریب هدایت گرمایی بالاتری از خود نشان داد ولی گرانشی آب را نیز بیش‌تر افزایش داد و بر همین اساس و افزایش بیش از حد گرانشی، عدد پراتل (معادله ۱۹) آن بیش‌تر از نانوسیال آلومینا است (شکل ۶-ج). در دماهای پایین اختلاف عدد پراتل نانوسیال گرافن اکسید و نانوسیال آلومینا بیشتر است و پس از دمای ۴۰ درجه سلسیوس عدد پراتل سه نمونه سیال کاری تقریباً یکی می‌شود.

نتیجه‌های عملکردی در مبدل گرمایی صفحه‌ای

شکل ۸ تغییر نرخ انتقال گرما و عدد ناسلت را بر حسب شدت جریان سیال سرد برای سه نمونه سیال کاری آب، نانوسیال آلومینا و نانوسیال گرافن اکسید نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۸ با افزایش شدت جریان حجمی نرخ انتقال گرما و عدد ناسلت افزایش داشته که نمایانگر بهبود ضریب انتقال گرمایی جابه‌جایی با افزایش سرعت سیال است. افزودن گرافن اکسید و آلومینا به آب باعث بهبود نرخ انتقال گرما شده که نشان‌دهنده نقش ذره‌های پرانرژی معلق در آب در پخش موثرتر گرما است. همان‌گونه که از شکل ۸ پیداست اختلاف انتقال گرما و عدد ناسلت دو نمونه نانوسیال با آب خالص با افزایش شدت جریان در حال کاهش است. در شدت جریان‌های بالا اثر سرعت سیال بر ضریب انتقال گرمایی جابه‌جایی آب موثرتر از افزودن نانوذره‌ها است. عملکرد گرمایی نانوسیال گرافن اکسید در همه شدت جریان‌ها به واسطه اختلاف معنی‌دار انتقال گرما، از نانوسیال آلومینا بیش‌تر است. در شدت جریان ۳/۵ L/min نرخ انتقال گرما در مبدل با آب، نانوسیال آلومینا و نانوسیال گرافن اکسید به ترتیب به ۱۹۶۴، ۲۱۶۸ و ۲۴۶۱ وات و عدد ناسلت به ترتیب به ۶/۹، ۸ و ۹/۹ رسیده است. دلیل این رفتار با توجه به اختلاف ضریب هدایت گرمایی دو نمونه نانوسیال (شکل ۶-الف) قابل توجه است. طبق منابع پژوهشی ضریب اصطکاک تابع جنس سطح مبدل و عدد رینولدز است و هر چه رینولدز بیش‌تر/کم‌تر شود مقدار آن کاهش/افزایش می‌یابد [۳۵]. تغییر ضریب اصطکاک درون مبدل



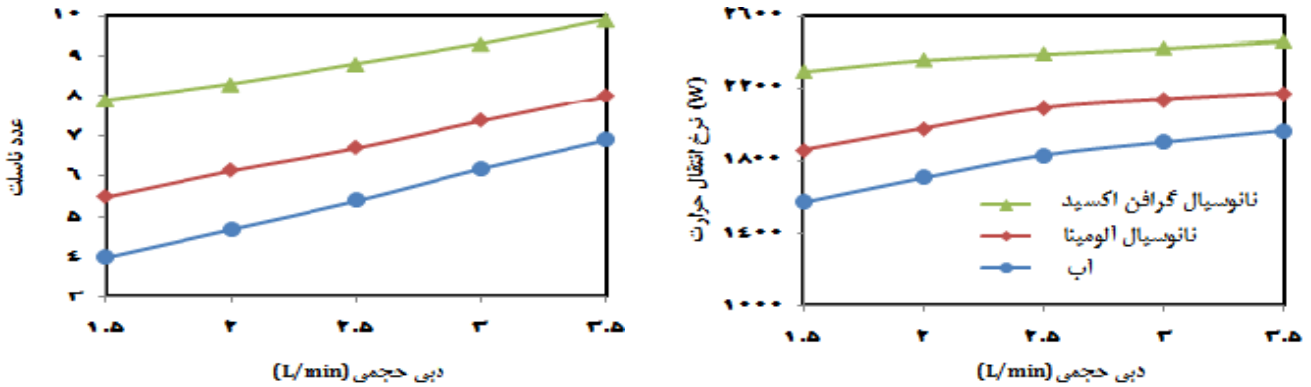
گونه‌های آلومینا

گونه‌های گرافن اکسید

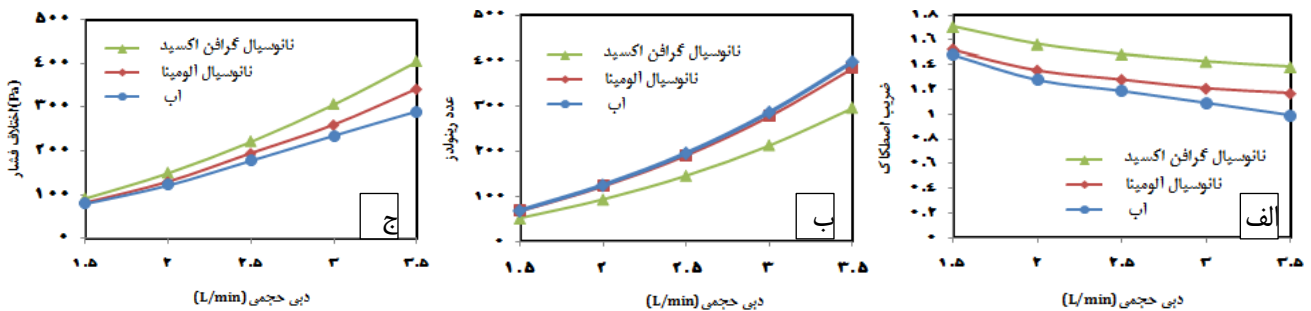
شکل ۷ - چیدمان ذره‌ها در نانوسیال آلومینا و نانوسیال گرافن اکسید

از نانوذره‌ها و ایجاد پل‌های گرمایی در بالک سیال می‌تواند مقاومت در مقابل پخش گرمایی را کمینه کنند [۳۳].

مطابق با جدول ۱، دانسیته گرافن اکسید به مراتب کم‌تر از آلومینا است و چیزی در حدود دانسیته آب خالص است. پس در جرم مساوی از هر یک، نانوذره‌های گرافن اکسید در مقایسه با نانوذره‌های آلومینا حجم بیش‌تری را اشغال می‌کنند و همچنین کم‌تر تحت تأثیر ثقل قرار می‌گیرند. همان‌گونه که در شکل ۷ به صورت شمایی نشان داده شده است، به نظر می‌رسد چگونگی چیدمان ذره‌های صفحه‌ای و سبک گرافن اکسید معلق در آب به گونه‌ای است که تشکیل شبکه‌های زنجیرمانند در سرتاسر مایع کرده و این چیدمان نقش مهمی در پخش موثرتر گرما در همه جهتها دارد. این موضوع توسط پارک و همکاران نیز به اثبات رسیده است [۲۰]. در نانوسیال آلومینا تشکیل این چیدمان زنجیره‌ای وجود ندارد؛ زیرا اگر گونه‌های کروی آلومینا به هم بیوندند و از یک حد بزرگ‌تر شوند به خاطر وزن سنگینشان ته نشین می‌شوند و این مهم به گونه‌ای است که باز هم فضاهای خالی از نانوذره در بالک مایع وجود دارد که از عملکرد آن تا حدودی می‌کاهد. ولی گونه‌های گرافن اکسید اگر چه حجیم هستند ولی بسیار سبک‌اند و به سادگی ته نشین نمی‌شوند. نمودار تغییر گرانشی آب و نانوسیال‌ها در شکل ۶-ب نشان داده شده است. به‌طورمنطقی افزودن فاز جامد به مایع باعث افزایش گرانشی آن می‌شود که این افزایش در دماهای پایین بیش‌تر است. در همه بازه دمایی، گرانشی آب در حضور نانوذره‌های کروی آلومینا رشد کمی داشته و این در حالی است که نانوصفحه‌های گرافن اکسید باعث افزایش بیش‌تر گرانشی آب خالص شده‌اند. در دمای ۱۰ درجه سلسیوس و در مقایسه با آب خالص گرانشی نانوسیال گرافن اکسید حدود ۳۵ درصد رشد داشته و گرانشی نانوذره‌های آلومینا تنها حدود ۲/۵ درصد افزایش داشته است. به نظر می‌رسد هندسه صفحه‌ای مانند (طول بلند و ضخامت کم) ذره‌های گرافن اکسید و امکان تشکیل شبکه‌های کارت مانند کلوییدی دلیل بالا رفتن گرانشی نانوسیال آن باشد [۳۴]. بالا بودن گرانشی نانوسیال یک پارامتر



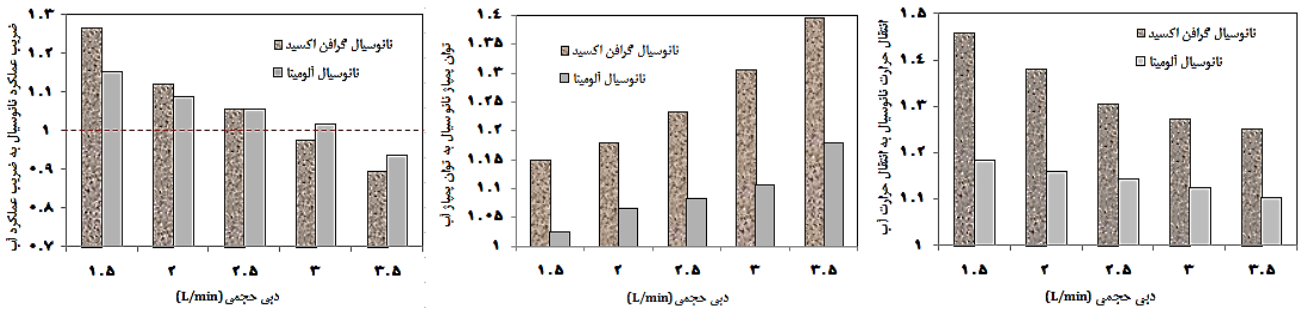
شکل ۸ - تغییر نرخ انتقال گرما، و عدد ناسلت بر حسب شدت جریان سیال سرد برای آب، نانوسیال آلومینا، نانوسیال گرافن اکسید. شدت جریان سیال گرم ۱/۵ L/min و دمای سیال سرد و دمای سیال گرم ورودی به مبدل به ترتیب ۲۵ و ۵۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شد



شکل ۹ - تغییر ضریب اصطکاک، اختلاف فشار و عدد رینولدز بر حسب شدت جریان سیال سرد برای آب، نانوسیال آلومینا، نانوسیال گرافن

این نسبت در نانوسیال گرافن اکسید بیشتر از نانوسیال آلومینا است. در بیشترین حالت و در شدت جریان ۱/۵ L/min نرخ انتقال گرما در نانوسیال گرافن اکسید ۱/۴۶ برابر آب بوده و این در حالی است که این نسبت برای نانوسیال آلومینا ۱/۱۸ برابر دیده شد. با افزایش شدت جریان، اختلاف عملکردی دو نانوسیال نسبت به آب کاهش می‌یابد. در حقیقت تأثیر استفاده از نانوصفحه‌های اکسید گرافن و نانوذره‌های آلومینا در بهبود ویژگی‌های گرمایی آب در شدت جریان‌های پایین بیش‌تر از شدت جریان‌های بالاست. از دیدگاه هیدرودینامیکی نتیجه‌های مربوط به نسبت توان پمپاژ نانوسیال به توان پمپاژ آب (P_{nf}/P_w) بر حسب شدت جریان نانوسیال در شکل ۱۰-ب خلاصه شده است. در هر دو نانوسیال (در بازه شدت جریان کاری) این نسبت بیشتر از یک و البته با افزایش سرعت سیال به شدت در حال افزایش است. نسبت (P_{nf}/P_w) در بیش‌ترین شدت جریان ۳/۵ L/min برای نانوسیال آلومینا ۱/۱۸ و برای نانوسیال گرافن اکسید ۱/۴ است. این نتیجه بدان معنی است که نانوسیال گرافنی ۴۰ درصد توان بیش‌تری نسبت به آب برای پمپاژ نیاز دارد و این در حالیست که توان پمپ کردن نانوسیال آلومینا ۱۸ درصد بیش‌تر از توان پمپ کردن آب است. مشخص شد که نرخ انتقال گرما

صفحه‌ای بر حسب شدت جریان حجمی سیال عامل در شکل ۹-الف خلاصه شده است. به طور منطقی در هر سه حالت با افزایش شدت جریان، ضریب اصطکاک درون مبدل گرمایی کاهش یافته است. با این وجود، مقدارهای ضریب اصطکاک ایجاد شده در مبدل با نانوسیال گرافن اکسید بیش‌تر از نانوسیال آلومینا است. مطابق شکل ۹-ب در یک شدت جریان مشخص، (به واسطه تغییرهای دانسیته و گرانروی) عدد رینولدز در نانوسیال گرافن اکسید کمتر از نانوسیال آلومینا و آن هم کمتر از آب خالص است و نتیجتاً در یک شدت جریان ثابت انتظار این است که ضریب اصطکاک نانوسیال گرافن اکسید از نانوسیال آلومینا و آب خالص بیش‌تر باشد. این نتیجه مشخص می‌کند که افت فشار سامانه‌ای تحت تأثیر نانوسیال گرافن اکسید می‌بایست بیش‌ترین مقدار را در مقایسه با نانوسیال آلومینا و آب خالص داشته باشد. شکل ۹-ج نشان می‌دهد که افت فشار ایجاد شده در واحد سرد مبدل (واحد عبور نانوسیال) با افزایش شدت جریان نانوسیال افزایش یافته که این سهم افزایش در گرافن اکسید بیش‌تر از آلومینا بود. شکل ۱۰-الف نسبت نرخ انتقال گرمای دو نمونه نانوسیال به آب (q_{nf}/q_w) را در شدت جریان‌های گوناگون نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ - تغییرهای نسبت نرخ انتقال گرما، توان پمپاژ و ضریب عملکرد در نانوسیال به همین مقادیرها در آب بر حسب شدت جریان (سیال گرم ۱/۵ L/min و دمای سیال سرد ورودی و دمای سیال گرم ورودی به مبدل به ترتیب ۲۵ و ۵۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شد)

نانوسیال گرافن اکسید قرار گرفت به طوری که درصد افزایش گرانیوی آب توسط نانوسیال گرافن اکسید در بازه دمایی ذکر شده به طور میانگین ۱/۵ برابر گرانیوی نانوسیال آلومینا به دست آمد.

استفاده مقدار کمی از نانوصفحه‌های گرافن اکسید و یا نانوذره‌های آلومینا باعث بهبود عملکرد آب خالص به عنوان سیال عامل در یک مبدل گرمایی صفحه‌ای شده است. بیش‌ترین اختلاف عملکردی بین دو نانوسیال و آب در شدت جریان‌های پایین به وجود آمد.

تأثیر گرمایی نانوصفحه‌های گرافن اکسید با دانسیته کم و ضریب هدایت گرمایی بالا روی نرخ انتقال گرمای مبدل بیشتر از نانوذره‌های آلومینا بود به طوری که در شدت جریان ۱/۵ L/min نرخ انتقال گرما در مبدل به کمک نانوسیال گرافن اکسید ۲۴ درصد بیش‌تر از نانوسیال آلومینا و ۴۶ درصد بیشتر از آب خالص به دست آمد.

اگر چه تأثیرهای گرمایی بالایی از نانوسیال گرافن اکسید در بهبود عملکرد آب دیده شد ولی توان پمپاژ مبدل گرمایی را نیز افزایش داد. در مقایسه با آب و در شدت جریان ۳/۵ L/min، توان مورد نیاز برای پمپاژ نانوسیال گرافن اکسید حدود ۱/۴ برابر آب خالص و این توان در نانوسیال آلومینا ۱/۱۸ برابر آب ثبت شد.

به منظور ارزیابی پایانی دو نمونه سیال، نسیت ضریب عملکرد مبدل با نانوسیال به ضریب عملکرد مبدل با آب خالص تعریف شد. نتیجه‌ها نشان داد بیش‌ترین درصد بهبود ضریب عملکرد مبدل نسبت به آب با استفاده از نانوسیال گرافن اکسید و در شدت جریان‌های ۱/۵ و ۲ لیتر بر دقیقه (به ترتیب ۲۷ و ۱۲ درصد) بود. در شدت جریان ۲/۵ لیتر بر دقیقه ضریب عملکرد هر دو نانوسیال به تقریب یکسان و کمی بیش‌تر از آب (۵ درصد) و در شدت جریان‌های بیش‌تر از ۲/۵، ضریب عملکرد نانوسیال گرافن اکسید کم‌تر از آب خالص نتیجه شده بود.

فهرست نمادها

A سطح انتقال گرما (m²)

و عملکرد گرمایی نانوسیال گرافن اکسید بیشتر از نانوسیال آلومینا است و از سوئی توان پمپاژ و انرژی مصرفی مبدل در نانوسیال آلومینا کم‌تر از نانوسیال گرافن اکسید است. برای ارزیابی پایانی، معیار بهبود ضریب عملکرد (نسبت انتقال گرما به توان لازم برای پمپاژ نانوسیال) دو نمونه نانوسیال نسبت به آب (η_{nf}/η_w) که در آن هم ملاحظه‌ای گرمایی و هم هیدرودینامیکی لحاظ شده باشد در نتیجه‌های شکل ۱۰- ج ارائه شده است. در شدت جریان ۱/۵ L/min بیش‌ترین اختلاف مثبت عملکردی بین آب و نانوسیال وجود دارد به طوری که ضریب عملکرد نانوسیال گرافن ۲۷ درصد بیش‌تر از ضریب عملکرد آب و ضریب عملکرد نانوسیال آلومینا ۱۵ درصد بیش‌تر از آب است. رفته رفته هرچه شدت جریان بیش‌تر می‌شود به خاطر افزایش افت فشار و توان پمپاژ مصرفی این نسبت رو به کاهش است. در شدت جریان ۲ L/min ضریب عملکرد نانوسیال گرافن اکسید ۱۲ درصد بیش‌تر از آب و ضریب عملکرد نانوسیال آلومینا ۸ درصد بیش‌تر از ضریب عملکرد آب است. در شدت جریان ۲/۵ لیتر بر دقیقه ضریب عملکرد دو نانوسیال به تقریب یکسان و تقریباً ۵ درصد بیش‌تر از آب خالص است. در شدت جریان ۳ و ۳/۵ لیتر بر دقیقه عملکرد مبدل با استفاده از نانوسیال گرافن اکسید پایین‌تر از نانوسیال آلومینا و حتی آب خالص بوده که نشان می‌دهد که در شدت جریان‌های بالاتر از ۲/۵ لیتر بر دقیقه نانوسیال گرافن اکسید صرفه اقتصادی از نظر مصرف انرژی ندارد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش دو نوع نانوسیال متفاوت با غلظت یکسان (۰/۱ درصد وزنی) با استفاده از نانوصفحه‌های گرافن اکسید و نانوذره‌های آلومینا تهیه شد. در دمای ۵۰ °C ضریب هدایت گرمایی نانوسیال گرافن اکسید ۳۲ درصد بیش‌تر از آب و متوسط ضریب رسانایی نانوسیال آلومینا ۶/۵ درصد بیش‌تر از آب بود. در حالی که گرانیوی آب بیش‌تر تحت تأثیر

μ	گرانروی دینامیکی (kg/ms)	C_p	ظرفیت گرمای ویژه (J/kg.K)
\mathcal{P}	توان (W)	D_h	قطر هیدرولیکی (m)
η	معیار بهبود عملکرد مبدل	f	ضریب اصطکاک
ρ	دانسیته (kg/m ³)	G	سرعت جرمی بر واحد سطح کانال (kg/m ² .s)
φ	کسر حجمی نانوذره‌ها	GO	گرافن اکسید
Δ	گرادیان	h	ضریب انتقال گرما (W/m ² K)
ζ	پتانسیل زتا	k	هدایت گرمایی (W/mK)
ave	متوسط	LMTD	متوسط لگاریتمی
i	ورودی مبدل	Nu	عدد ناسلت
o	خروجی مبدل	P	فشار (Pa)
np	نانوذره	Pr	عدد پرانتل
nf	نانوسیال (سیال خنک کننده)	Q	شدت جریان حجمی (mL/min)
w	آب (سیال سرد شونده)	q	نرخ انتقال گرما (W)
		Re	عدد رینولدز
		T	دما (K)
		PHE	مبدل گرمایی صفحه‌ای
		U	ضریب کلی انتقال گرما (W/m ² K)
		\dot{m}	شدت جریان جرمی (kg/s)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۸

مراجع

- [1] Thulukkanam K., "Heat Exchanger Design Handbook", CRC press, (2013).
- [۲] بزرگان ن.، مبری م.، وحیدی نیا ف.، کاربرد نانوسیال آب-آلومینا گاما در مبدل گرمایی پوسته و لوله در غلظت‌های حجمی گوناگون، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۲) ۳۵: ۱۳۹ تا ۱۴۹ (۱۳۹۵).
- [3] Kumar V., Tiwari AK., Ghosh SK., Application of Nanofluids in Plate Heat Exchanger: A Review, *Energy Conversion and Management*, **105**: 1017-1036 (2015).
- [4] Yu W., Xie H., A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications, *Journal of Nanomaterials*, **2012**: 1-17 (2012).
- [5] Jang S.P., Choi S.U., Role of Brownian Motion in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids, *Applied Physics Letters*, **84(21)**: 4316-4318 (2004).
- [6] Pantzali M.N., Mouza A.A., Paras S.V., Investigating the Efficacy of Nanofluids as Coolants in Plate Heat Exchangers (PHE), *Chemical Engineering Science*, **64(14)**: 3290-3300 (2009).
- [7] Tiwari A.K., Ghosh P., Sarkar J., Performance Comparison of the Plate Heat Exchanger using Different Nanofluids, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **49**: 141-151 (2013).
- [8] Tiwari A.K., Ghosh P., Sarkar J., Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of CeO₂/Water Nanofluid in Plate Heat Exchanger, *Applied Thermal Engineering*, **57(1-2)**: 24-32 (2013).
- [9] Javadi F.S., Sadeghipour S., Saidur R., BoroumandJazi G., Rahmati B., Elias M.M., Sohel M.R., The Effects of Nanofluid on Thermo Physical Properties and Heat Transfer Characteristics of a Plate Heat Exchanger, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **44**: 58-63 (2013).

- [10] Kwon Y.H., Kim D., Li C.G., Lee J.K., Hong D.S., Lee J.G., Lee S.H., Cho Y.H., Kim S.H., [Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Nanofluids in a Plate Heat Exchanger](#), *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **11(7)**: 5769-5774 (2011).
- [11] Pandey S.D., Nema V.K., [Experimental Analysis of Heat Transfer and Friction Factor of Nanofluid as a Coolant in a Corrugated Plate Heat Exchanger](#), *Experimental Thermal and Fluid Science*, **38**: 248-256 (2012).
- [12] Balandin A.A., [Thermal Properties of Graphene and Nanostructured Carbon Materials](#), *Nature Materials*, **10(8)**: 569-581 (2011).
- [13] Goodarzi M., Amiri A., Goodarzi M.S., Safaei M.R., Karimipour A., Languri E.M., Dahari M., [Investigation of Heat Transfer and Pressure Drop of a Counter Flow Corrugated Plate Heat Exchanger using MWCNT based Nanofluids](#), *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **66**: 172-179 (2015).
- [۱۴] کاظمی بیدختی ا.، اهمیت نانوسیال‌های دارای نانولوله‌های کربنی اصلاح شده در افزایش توان گرمایی مبدل‌های پوسته لوله و صفحه‌ای، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، **۳۸(۳)**: ۲۴۳ تا ۲۵۲ (۱۳۹۸).
- [15] Sarafraz M.M., Hormozi F., [Heat Transfer, Pressure Drop and Fouling Studies of Multi-Walled Carbon Nanotube Nano-Fluids Inside a Plate Heat Exchanger](#), *Experimental Thermal and Fluid Science*, **72**: 1-11 (2016).
- [16] Sarafraz M.M., Hormozi F., Nikkhal V., [Thermal Performance of a Counter-Current Double Pipe Heat Exchanger Working with COOH-CNT/Water Nanofluids](#), *Experimental Thermal and Fluid Science*, **78**: 41-49 (2016).
- [17] Esfahani M.R., Languri E.M., [Exergy Analysis of a Shell-And-Tube Heat Exchanger using Graphene Oxide Nanofluids](#), *Experimental Thermal and Fluid Science*, **83**: 100-106 (2017).
- [18] Wang Z., Wu Z., Han F., Wadsö L., Sundén B., [Experimental Comparative Evaluation of a Graphene Nanofluid Coolant in Miniature Plate Heat Exchanger](#), *International Journal of Thermal Sciences*, **130**: 148-156 (2018).
- [19] Vivekchand S.R., Rout C.S., Subrahmanyam K.S., Govindaraj A., Rao C.N., [Graphene-based Electrochemical Supercapacitors](#), *Journal of Chemical Sciences*, **120(1)**: 9-13 (2008).
- [20] Park S.D., Won Lee S., Kang S., Bang I.C., Kim J.H., Shin H.S., Lee D.W., Won Lee D., [Effects of Nanofluids Containing Graphene/Graphene-Oxide Nanosheets on Critical Heat Flux](#), *Applied Physics Letters*, **97(2)**: 023103 (2010).
- [21] Hajjar Z., Rashidi A.M., Ghosatloo A., [Enhanced Thermal Conductivities of Graphene Oxide Nanofluids](#), *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **57**: 128-131 (2014).
- [22] Vajjha R.S., Das D.K., [A Review and Analysis on Influence of Temperature and Concentration of Nanofluids on Thermo Physical Properties, Heat Transfer and Pumping Power](#), *International Journal of Heat and Mass Transfer*. **55(15-16)**: 4063-4078 (2012).
- [23] Ganvir R.B., Walke P.V., Kriplani V.M., [Heat Transfer Characteristics in Nanofluid a Review](#), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **75**: 451-460 (2017).

- [24] Esfahani M.R., Languri E.M., Nunna M.R., [Effect of Particle Size and Viscosity on Thermal Conductivity Enhancement of Graphene Oxide Nanofluid](#), *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **76**: 308-315 (2016).
- [25] Mehrali M., Sadeghinezhad E., Akhiani A.R., Latibari S.T., Talebian S., Dolatshahi-Pirouz A., Metselaar H.S., Mehrali M., [An Eco-Friendly Graphene-based Nanofluid for Heat Transfer Applications](#), *Journal of Cleaner Production*, **137**: 555-566 (2016).
- [26] Suganthi K.S., Rajan K.S., [Metal oxide nanofluids: Review of Formulation, Thermo-Physical Properties, Mechanisms, and Heat Transfer Performance](#), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **76**: 226-255 (2017).
- [27] Choudhary R., Khurana D., Kumar A., Subudhi S., [Stability Analysis of Al₂O₃/Water Nanofluids](#), *Journal of Experimental Nanoscience*, **12(1)**: 140-151 (2017).
- [28] Chen L., Xu C., Liu J., Fang X., Zhang Z., [Optical Absorption Property and Photo-Thermal Conversion Performance of Graphene Oxide/Water Nanofluids with Excellent Dispersion Stability](#), *Solar Energy*, **148**: 17-24 (2017).
- [29] Li C.H., Peterson G.P., [Experimental Investigation of Temperature and Volume Fraction Variations on the Effective Thermal Conductivity of Nanoparticle Suspensions \(Nanofluids\)](#), *Journal of Applied Physics*, **99(8)**: 084314 (2006).
- [30] Ranjbarzadeh R., Karimipour A., Afrand M., Isfahani A.H., Shirneshan A., [Empirical Analysis of Heat Transfer and Friction Factor of Water/Graphene Oxide Nanofluid Flow in Turbulent Regime through an Isothermal Pipe](#), *Applied Thermal Engineering*, **126**: 538-547 (2017).
- [۳۱] غیاثی ا.، بنی اسدی ح.، اکبری ا.، تولید گرافن آب دوست و بررسی تجربی افزودن آن بر بهبود ضریب انتقال گرما در سامانه آب/اتیلن گلیکول، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، **۳۹(۱)**: ۳۹ تا ۵۲ (۱۳۹۸).
- [32] Selvakumar R.D., Dhinakaran S., [A Multi-Level Homogenization Model for Thermal Conductivity of Nanofluids based on Particle Size Distribution \(PSD\) Analysis](#), *Powder Technology*, **301**: 310-317 (2016).
- [33] Shima P.D., Philip J., Raj B., [Influence of Aggregation on Thermal Conductivity in Stable and Unstable Nanofluids](#), *Applied Physics Letters*, **97(15)**: 153113 (2010).
- [34] Ijam A., Saidur R., Ganesan P., Golsheikh A.M., [Stability, Thermo-Physical Properties, and Electrical Conductivity of Graphene Oxide-Deionized Water/Ethylene Glycol Based Nanofluid](#), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **87**: 92-103 (2015).
- [35] Kakaç S., Pramuanjaroenkij A., [Review of Convective Heat Transfer Enhancement with Nanofluids](#), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **52(13-14)**: 3187-3196 (2009).
- [36] Bergman T.L., Incropera F.P., Lavine A.S., DeWitt D.P., "Introduction to Heat Transfer", John Wiley & Sons Inc, (2011).