

بررسی تجربی تأثیر افزودن گرافن بر بهبود ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در سامانه آب/اتیلن گلیکول در جریان آرام

پژوهش‌های کاربردی
مهندسی شیمی - پلیمر

پریسا ابراهیم دوست رودپشتی^۱، حسین بنی اسدی^{۱*}، احمد رضانی سعادت آبادی^۲، ایمان اکبری داهوئی^۱

۱- دانشکده نفت و مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

فصلنامه علمی - پژوهشی بین‌رشته‌ای

سال دوم، شماره ۳، نسخه ۱،

پاییز ۱۳۹۷، صفحه ۱۹-۳

چکیده

یکی از روش‌های کاهش اندازه تجهیزات انتقال حرارت، افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سیال است. هدف اصلی از این پژوهش، طراحی و تولید نوعی نانوسیال بر پایه آب و اتیلن گلیکول است. بدین منظور ابتدا گرافن با استفاده از روش الکتروشیمیایی تولید و ساختار آن توسط طیف‌های واپاشی پرتو ایکس (XRD)، تبدیل فوریه فروسرخ (FTIR) و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ الکترونی انتقالی (TEM) مورد بررسی و تأیید قرار گرفت. با استفاده از درصد‌های وزنی مختلف از نانوغرافن شامل ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱/۲۵ و ۱/۵٪ نانوسیال آب/اتیلن گلیکول/گرافن تولید شد. سدیم‌دودسیل سولفات (SDS) به عنوان فعال‌کننده سطحی به منظور بهبود پایداری گرافن درون سیال پایه استفاده شد. سامانه آزمایشگاهی طراحی شده شامل لوله مارپیچ با دمای دیواره ثابت و مجهز به کنترل‌کننده دبی و نشانگر دما و فشار بود. عدد ناسلت و افت فشار برای آب خالص توسط سامانه آزمایشگاهی اندازه‌گیری و با مدل‌های تجربی موجود در این زمینه مقایسه و مشخص شد که سامانه به خوبی قادر به پیش‌بینی نتایج است. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، عدد ناسلت و نرخ انتقال حرارت با استفاده از سامانه مذکور برای آب/اتیلن گلیکول با نسبت وزنی ۶۰ به ۴۰ و نیز نانوسیال با درصد‌های مختلف از گرافن در دبی‌های مختلف بررسی شد. نتایج مشخص ساخت که با افزودن ۱٪ وزنی گرافن به سیال پایه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی حدود ۵۰٪ افزایش می‌یابد در حالی که افت فشار نیز حدود ۵۰٪ افزایش نشان می‌دهد. در نهایت یافته‌های این پژوهش، امکان استفاده از سامانه آب/اتیلن گلیکول/گرافن را در تجهیزات سرمایشی/گرمایشی مورد تأیید قرار می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

گرافن
نانوسیال
ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی
جریان آرام
لوله مارپیچ

*مسئول مکاتبات:

hbaniasadi@srbiau.ac.ir

۱ مقدمه

امروزه با رشد و توسعه فناوری‌های نوین، انتقال حرارت، کاهش زمان انتقال حرارت، کوچک‌سازی اندازه مبدل‌های حرارتی و در نهایت افزایش بازده تجهیزات حرارتی، مورد توجه است. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی یکی از ویژگی‌های مؤثر سیال در فرایندهای انتقال حرارت است که با بهبود آن می‌توان نرخ انتقال حرارت را افزایش داد. از آنجایی که ضریب هدایت حرارتی فلزات در مقایسه با سیالات متداول نظیر آب و اتیلن‌گلیکول بیشتر است، ترکیب این دو ماده و ایجاد محیط انتقال حرارتی که شبیه به سیال عمل کند راهکاری مؤثر در زمینه بهبود انتقال حرارت سیالات است [۱-۳].

اولین بار چوی (Choi) و همکاران در سال ۱۹۵۵ سیال حاوی ذرات معلق را با نام نانوسیال معرفی کردند [۱]. در مقایسه با روش‌های موجود افزایش انتقال حرارت، نانوسیالات از توانایی بالقوه‌ای در انتقال حرارت برخوردار هستند. ذرات استفاده شده در نانوسیالات اغلب از جنس فلزی یا اکسید فلزات و به اشکال مختلف به ویژه کروی یا استوانه‌ای هستند. به عنوان مثال مقدار کمی (حدود ۱٪ حجمی) از نانوذرات مسی در اتیلن‌گلیکول منجر به افزایش ۴۰٪ در ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود؛ در حالی که برای رسیدن به چنین افزایشی در تعلیقی‌های معمولی، به غلظت‌های بالاتر از ۱۰٪ از ذرات احتیاج است که خود باعث ایجاد مشکلات رئولوژیکی و پایداری می‌شود [۴-۶].

در سال‌های اخیر پژوهش‌هایی در زمینه نانوسیال با تأکید بر استفاده از ساختارهای کربنی انجام شده است. در این زمینه گرافن (Graphene) یکی از بیشترین مواد مورد مطالعه در دهه اخیر است. کربن، چهارمین عنصر فراوان در طبیعت و یکی از عناصر بسیار ضروری برای حیات انسان است. معمول‌ترین شکل بلوری آن، گرافیت و الماس است. گرافیت، دارای ساختار لایه لایه است که در آن اتم‌های کربن چهار ظرفیتی از طریق سه پیوند کووالانسی به سه اتم کربن دیگر متصل شده‌اند

و ساختار شبکه‌ای شش گوشه‌ای را تشکیل می‌دهند [۸ و ۷]. به هر کدام از این لایه‌ها، ورقه یا لایه گرافنی گفته می‌شود. با توجه به ضعیف بودن پیوندها بین ورقه‌های گرافنی (پیوندهای واندروالسی) این ورقه‌ها می‌توانند به راحتی روی همدیگر بلغزند [۹ و ۱۰]. گرافن دارای خواص فیزیکی و شیمیایی قابل توجه از جمله استحکام شکست بالا، هدایت بسیار بالای الکتریکی و گرمایی، نسبت منظر و زیست‌سازگاری بالا است. این خواص، گرافن را به عنوان ماده‌ای ایده‌آل در زمینه‌های مختلف مانند فیزیک کوانتوم، نانوالکترونیک، انرژی، نانوکامپوزیت‌ها و موارد زیستی معرفی می‌کند [۱۱].

یکی از مشکلات گرافن آب‌گریز بودن آن است؛ در نتیجه نمی‌تواند درون آب یا بعضی از حلال‌های قطبی به مدت زمان طولانی پایدار بماند و نهایتاً کلوخه می‌شود [۱۲]. به منظور پایدار کردن گرافن و در نتیجه بهبود توزیع آن، می‌توان برهم‌کنش بین گرافن و حلال‌های آبی / آلی را با استفاده از عامل‌دار کردن غیرکووالانسی (استفاده از مواد فعال‌کننده سطحی (Surfactant)) یا عامل‌دار کردن کووالانسی (اضافه کردن گروه‌های آب‌دوست یا آب‌گریز بر روی سطوح انرژی بالا مانند لایه‌های نانوصفحات گرافنی) بهبود داد. در سال‌های اخیر استفاده از فعال‌کننده‌های سطحی برای تبدیل سطوح آب‌گریز ذرات و پخش آن‌ها در محلول‌های آبی به دلیل ساده بودن، اقتصادی بودن و کارآمد بودن بسیار گسترش یافته است [۱۳ و ۱۴]. فعال‌کننده سطحی شامل دم آب‌گریز، معمولاً زنجیره بلند هیدروکربنی، و سر آب‌دوست است [۱۵]. هرچند افزودن فعال‌کننده سطحی، روشی مؤثر برای افزایش پایداری در نانوسیال است اما در مقابل، حضور آن معضلاتی را نیز به همراه دارد از جمله فعال‌کننده سطحی می‌توانند به سطح نانوذرات بچسبند و از این طریق به عنوان مقاومتی در برابر انتقال جرم و حرارت تلقی شود. در نانوسیالات بر پایه آب و اتیلن‌گلیکول فعال‌کننده‌های سطحی رایج شامل سدیم‌دودسیل‌بنزن‌سولفونات (Sodium Dodecyl Benzene) (Sulfonate, SDBS)، پلی‌وینیل‌الکل (Poly Vinyl Alcohol)،

الکتروشیمیایی و استفاده از آن در بهبود خواص حرارتی نانوسیال آب/اتیلین گلیکول است. از فعال کننده سطحی SDS به منظور افزایش پایداری گرافن درون سیال پایه استفاده خواهد شد و کارآیی سامانه آب/اتیلین گلیکول/گرافن در بهبود خواص حرارتی در مبدل حرارتی پوسته و لوله مارپیچ در چرخه سرمایش که برای اولین بار در این پژوهش گزارش شده است، اثبات خواهد شد.

۲ تجربی

۲-۱ مواد

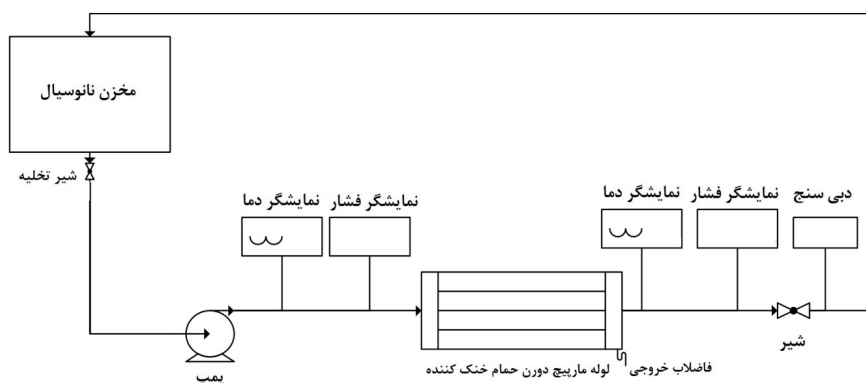
مواد استفاده شده در این پژوهش عبارتند از: اسیدسولفوریک ۹۸٪ (دکتر مجلی)، آب مقطر (آزمایشگاهی)، سدیم دودسیل-سولفات (مرک)، اتیلین گلیکول (مرک) و فویل گرافیت.

۲-۲ تولید نانوذرات گرافن

در این پژوهش از روش الکتروشیمیایی برای ساخت ذرات گرافن استفاده شد [۲۱]. از الکتروود فولاد ضد زنگ به عنوان آنود و فویل گرافیت به عنوان الکتروود کاتد استفاده شد. دو الکتروود در محلول الکترولیتی شامل اسیدسولفوریک ۱ N قرار داده شد. ولتاژ اعمالی به دو سر الکتروود ۶ V در نظر گرفته شد. با اعمال پتانسیل به الکتروود گرافیت، یون‌های موجود در محلول به سمت الکتروود گرافیت حرکت کردند و سبب باز شدن لایه‌های گرافنی و در نهایت جدایش آن‌ها شدند. صفحات معلق در محلول با استفاده از کاغذ صافی جدا شد. سپس چندین بار با آب مقطر شستشو داده شد تا اسید اضافی خارج شود. گرافن تولید شده درون بشر حاوی آب مقطر روی همزن مغناطیسی به مدت نیم ساعت همزده شد و مجدد از کاغذ صافی عبور داده شد تا از حذف ناخالصی‌ها اطمینان حاصل شود. گرافن تولید شده به مدت ۲۴ ساعت درون خشک کن با دمای °C ۷۵ قرار داده شد تا آب اضافی آن تبخیر شود؛ سپس به مدت یک دقیقه داخل کوره با دمای °C ۴۰۰ قرار داده شد تا کاملاً خشک و در اثر شوک حرارتی لایه‌ها از هم باز شوند. پودر حاصل برای تولید نانوسیال استفاده شد.

(PVA)، صمغ عربی و سدیم دودسیل سولفات (Sodium Dodecyl Sulfate, SDS) هستند. سدیم دودسیل سولفات که به عنوان سدیم لوریل سولفات (Sodium Lauryl Sulfate, SLS) هم نامیده می‌شود؛ ترکیب شیمیایی امولسیون کننده، پف دهنده، تسریع کننده انحلال و عامل ایجاد کف است و به میزان زیادی در صنایع شویندگی از جمله مواد فعال کننده سطحی آبیونی در تولید شامپو استفاده می‌شود [۱۶].

کول (Kole) و همکاران [۱۷] هدایت حرارتی و رفتار رئولوژیکی گرافن عامل دار شده با هیدروژن را در سامانه اتیلین گلیکول/آب (۳۰/۷۰) در غلظت حجمی ۰/۰۴۱ و ۰/۳۹۵٪ نانوذره بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که گرانیروی و هدایت حرارتی در حضور نانوصفحات گرافنی به ترتیب ۱۵٪ و ۱۰۰٪ افزایش می‌یابند. امیری و همکاران [۱۸] مخلوط اتیلین گلیکول/آب (۴۰/۶۰) را به عنوان سیال پایه و نانوذرات گرافن را با غلظت‌های ۰/۰۱ تا ۰/۲٪ به عنوان بهبوددهنده خواص حرارتی استفاده کردند. آن‌ها گزارش کردند که هدایت حرارتی، چگالی و گرانیروی به ترتیب ۶۵٪، ۰/۶٪ و ۴/۹٪ افزایش یافتند. کابالریو (Cabaleiro) و همکاران [۱۹] بر روی پایداری و خواص حرارتی-فیزیکی نانوسیال آب/اتیلین گلیکول (۹۰/۱۰) حاوی نانوصفحات گرافنی عامل دار شده با سولفونیک اسید مطالعه انجام دادند. آن‌ها با استفاده از روش پتانسیل زتا و روش پراکندگی نور دینامیکی پایداری حالت گرافن در سامانه مذکور که معادل ۰/۵٪ بود را گزارش کردند. آن‌ها نشان دادند که در این درصد وزنی از گرافن سامانه همچنان رفتار سیال نیوتنی را نشان می‌دهد در حالیکه هدایت حرارتی ۵٪ افزایش یافته است. اخوان زنجانی و همکاران [۲۰] ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانو سیال آب-گرافن با غلظت‌های مختلف گرافن را داخل لوله دایره‌ای شکل در جریان آشفته بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که در کسر حجمی ۰/۰۲٪ از گرافن در رینولدز ۱۰۸۵۰ ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی حدود ۶٪ افزایش یافت. هدف پژوهش حاضر، تولید گرافن با استفاده از روش



شکل ۱ نمودار الگویی سامانه آزمایشگاهی طراحی شده

۲-۳ سامانه آزمایشگاهی

برای مطالعه انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال از سامانه آزمایشگاهی طراحی شده که به صورت الگویی در شکل ۱ نمایش داده شده است، استفاده شد. دستگاه در واقع مبدل پوسته-لوله با لوله مارییج شامل بخش‌های زیر است: مخزن نانوسیال، پمپ گریز از مرکز، لوله مارییج، محفظه نگه‌دارنده لوله مارییج، حمام سرد، شیر، نمایشگر دما و فشار و دبی سنج. مخزن نانوسیال ظرفیت تقریبی ۴ لیتری دارد و مجهز به شیر تخلیه است. پمپ دارای قدرت ۰/۵ HP و به مخزن متصل است تا سیال را به گردش درآورد. سرعت جریان پمپ در محدوده ۵-۳۵ lit/min قابل تنظیم است. لوله مارییج مسی به طول ۱۰ m دارای قطر داخلی و بیرونی به ترتیب ۸ و ۹ mm است. به دلیل ضخامت کم جداره لوله و نیز هدایت حرارتی بالای مس، دمای داخل با خارج لوله یکسان در نظر گرفته می‌شود. لوله مارییج درون محفظه مکعبی شکل با قابلیت سرمایش/گرمایش دیواره خارجی لوله مارییج، قرار دارد؛ به عبارت دیگر در این سامانه دمای دیواره لوله مارییج ثابت است. لازم به ذکر است که در این پژوهش از سرمایش نانوسیال استفاده شد و میزان کاهش دمای سیال در هنگام خروج بررسی شد. برای خنک‌سازی لوله مارییج از حمام یخ مجهز به همزن استفاده شد.

۲-۴ تهیه نانوسیال و راه‌اندازی سامانه

ابتدا گرافن/SDS با نسبت‌های مختلف شامل ۰/۵ به ۱،

۱ به ۱ و ۱/۵ به ۱ تولید شد تا مشخص شود در چه میزانی از SDS بیشترین پایداری گرافن حاصل می‌شود. نتایج نشان داد که در نسبت وزنی ۱ به ۱ از گرافن/SDS بیشترین پایداری حاصل می‌شود. شکل ۲ توزیع پایداری گرافن/SDS با نسبت ۱ به ۱، درون سامانه آب/اتیلن‌گلیکول ۴۸ ساعت بعد از اختلاط را نشان می‌دهد. در ادامه نانوسیال آب/اتیلن‌گلیکول/گرافن با استفاده از درصدهای وزنی مختلف از گرافن شامل ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۲۵ و ۱/۵٪ تولید شد. بدین منظور ابتدا نانوسیال با غلظت ۱/۵٪ از گرافن تولید و درون محفظه نانوسیال ریخته شد. بعد از انجام آزمایش، مقدار مشخصی از نانوسیال از مخزن برداشته و معادل آن آب/اتیلن‌گلیکول خالص اضافه شد؛ به طوری که غلظت نانوذره به ۱/۲۵٪ کاهش یابد. این روند تا رسیدن به غلظت ۰/۲۵٪ نانوذره ادامه یافت.

بعد از اضافه کردن نانوسیال به مخزن مربوطه با فعال‌سازی پمپ، نانوسیال درون سامانه چرخش می‌کند. با استفاده از دبی-سنج، دبی جریان طوری تنظیم شد که جریان آرام باشد. بعد از گذشت ۱۵ دقیقه از چرخش نانوسیال و اطمینان از یکنواختی سامانه، دمای ورودی، خروجی، افت فشار و نیز دمای دیواره (ثابت و حدود ۱۳ °C) خوانده و با استفاده از روابطی که در بخش (۵-۲) ارائه شده است میزان بهبود ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محاسبه شد. لازم به ذکر است که سامانه با استفاده از آب خالص نیز مورد آزمایش

آرام درون لوله ماریپیچ از رابطه ۵ به دست می آید که توسط سریناواسان (Srinivasan) [۲۶] پیشنهاد شده است.

$$Re_c = 2100(1 + 12 \sqrt{\frac{D_i}{D_{ave}}}) \quad (5)$$

در رابطه فوق Re_c رینولدز در لوله ماریپیچ، D_i قطر داخلی لوله ماریپیچ و D_{avg} قطر متوسط را نشان می دهد که طبق این رابطه رینولدز برای اینکه جریان در محدوده آرام قرار گیرد باید کمتر از ۸۰۰۰ باشد.

برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه جایی (h) از مساوی قرار دادن نرخ حرارت ورودی توسط نانوسیال و نرخ انتقال حرارت توسط سیال سرمایش استفاده شد (رابطه ۶) [۲۷].

$$A_i U_i \Delta T_{LMTD} = m C_p (T_i - T_o) \quad (6)$$

در رابطه فوق m دبی جرمی جریان و C_p ظرفیت حرارتی متوسط سیال است که از رابطه ۷ به دست می آید. T_i و T_o به ترتیب دمای سیال ورودی و خروجی هستند که از روی دماسنج خوانده می شوند. U_i ضریب کلی انتقال حرارت، ΔT_{LMTD} متوسط لگاریتمی دما و A_i کل سطح مقطع انتقال حرارت هستند که به ترتیب از روابط ۸، ۹ و ۱۰ محاسبه می شوند [۲۸].

$$C_{p_{nf}} = \frac{\varphi \rho_p C_{p_p} + (1 - \varphi) \rho_{bf} C_{p_{bf}}}{\rho_{nf}} \quad (7)$$

در رابطه فوق $C_{p_{nf}}$ ظرفیت حرارتی نانوسیال، φ کسر وزنی نانوذرات، ρ_p چگالی نانوذرات، C_{p_p} ظرفیت حرارتی نانوذرات، ρ_{bf} چگالی سیال پایه، $C_{p_{bf}}$ ظرفیت حرارتی سیال پایه و ρ_{nf} چگالی نانوسیال است.

$$\frac{1}{U_i} = \frac{1}{h_i} + \frac{d_i \ln(\frac{d_o}{d_i})}{2K_w} + \frac{d_i}{d_o} * \frac{1}{h_o} \approx \frac{1}{h_i} \quad (8)$$

در رابطه فوق U_i ضریب کلی انتقال حرارت بر مبنای سطح داخلی لوله و h_i و h_o به ترتیب ضریب انتقال حرارت جابه جایی داخلی و خارجی لوله هستند. d_i و d_o به ترتیب قطر داخلی و خارجی لوله و K_w ضریب هدایت حرارتی دیواره لوله است. با توجه به ضخامت کم لوله و نیز انتقال حرارت بسیار مناسب آن، با تخمین



شکل ۲ تصویر نانوسیال حاوی ۱٪ وزنی گرافن و نسبت وزنی گرافن/SDS معادل ۱ به ۱ (۴۸ ساعت بعد از توزیع)

قرار گرفت تا مقادیر حاصل برای عدد ناسلت و افت فشار با روابط نظری موجود که در بخش (۲-۵) معرفی شده اند، مقایسه و صحت عملکرد دستگاه بررسی شود.

۲-۵ روابط استفاده شده

برای محاسبه چگالی نانوسیال (ρ_{nf}) و گرانیوی آن ($\rho_{nf} g$) از روابط ۱ و ۲ استفاده شد [۲۲-۲۴]:

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

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} (1 + 2.5\varphi) \quad (2)$$

در روابط فوق ρ_{bf} چگالی سیال پایه (آب/اتیلین گلیکول)، ρ_p چگالی نانوذرات، μ_{bf} گرانیوی سیال پایه و φ کسر وزنی نانوذرات است.

برای محاسبه عدد دین از رابطه ۳ استفاده شد [۲۵].

$$De = Re \left(\frac{D_i}{D_{avg}} \right)^{0.5} \quad (3)$$

در رابطه فوق Re عدد رینولدز، D_i قطر داخلی لوله (λmm) و D_{avg} قطر متوسط است که از رابطه ۴ به دست می آید.

$$D_{avg} = \frac{D_{min} + D_{max}}{2} \quad (4)$$

در رابطه فوق D_{avg} قطر متوسط، D_{min} قطر اولین حلقه ($150 mm$) و D_{max} قطر آخرین حلقه لوله ماریپیچ است.

لازم به ذکر است که محدوده عدد رینولدز برای جریان

$$R_n = [R_o + (2n - 1)\alpha\pi] \quad (11)$$

در رابطه فوق R_o کمینه شعاع خمیدگی لوله مارپیچ (شعاع اولین دور)، n تعداد دورهای لوله و α نرخ افزایش شعاع بر حسب رادیان، معادل $0/00143$ است. α از تقسیم نرخ افزایش شعاع در هر دور ($0/009$ mm) بر 2π به دست آمده است [29].

$$Nu = \frac{h_i D_i}{K_{nf}} \quad (12)$$

در این رابطه h_i ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، D_i قطر داخلی لوله (8 mm) و k_{nf} ضریب هدایت حرارتی نانوسیال است که از رابطه ۱۳ محاسبه می‌شود [31].

$$K_{nf} = \frac{K_p + 2K_{bf} + 2\phi(K_p - K_{bf})}{K_p + 2K_{bf} - \phi(K_p - K_{bf})} K_{bf} \quad (13)$$

در رابطه فوق k_{nf} ضریب هدایت حرارتی نانوسیال، k_p ضریب هدایت حرارتی نانوذر، k_{bf} ضریب هدایت حرارتی سیال پایه و ϕ کسر وزنی نانوذرات است.

برای راستی‌آزمایی سامانه آزمایشگاهی طراحی شده، داده‌های حاصل از آب خالص با روابط تجربی موجود برای لوله مارپیچ که در جدول ۱ نمایش داده شده‌اند، مقایسه شدند [32-35].

در روابط فوق Pr عدد پرانتل (Prandtl) است که از رابطه

خوبی می‌توان U_i را مساوی با h_i در نظر گرفت [29].

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{h1} - T_{c2}) - (T_{h2} - T_{c1})}{\ln\left(\frac{T_{h1} - T_{c2}}{T_{h2} - T_{c1}}\right)} \quad (9-الف)$$

در رابطه فوق ΔT_{LMTD} متوسط لگاریتمی دما، T_{h1} و T_{h2} به ترتیب دمای گرم ورودی و خروجی لوله و T_{c1} و T_{c2} به ترتیب دمای سرد ورودی و خروجی لوله است. با توجه به اینکه دمای ورودی و خروجی لوله سیال خنک‌کننده تقریباً با دمای دیواره لوله برابر است یعنی $T_{c1} = T_{c2} = T_w$ می‌توان رابطه ۹-الف را به صورت ۹-ب بازنویسی کرد:

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_i - T_w) - (T_o - T_w)}{\ln\left(\frac{T_i - T_w}{T_o - T_w}\right)} \quad (9-ب)$$

در رابطه فوق ΔT_{LMTD} متوسط لگاریتمی دما، T_o و T_i به ترتیب دمای ورودی و خروجی سیال و T_w دمای دیواره لوله است [30].

$$A_i = 2\pi R_i \sum_{n=1}^{13} 2\pi R_n \quad (10)$$

در رابطه فوق A_i سطح داخلی لوله مارپیچ، R_i شعاع داخلی لوله مسی و n تعداد دورهای لوله خم شده است؛ که در سامانه آزمایشگاهی طراحی شده، تعداد آن ۱۳ دور است. R_n متوسط شعاع خمیدگی لوله مارپیچ است که از رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود [29].

جدول ۱ روابط نظری عدد ناسلت در لوله مارپیچ

شرایط	رابطه	عنوان رابطه
$300 < De < 2200$ $Pr \geq 5$	$Nu = \left\{ \left[\frac{48}{11} + \frac{51}{(1 + \frac{1342}{PrHe^{0.2}})^2} \right]^3 + 1.86 \left[\frac{He}{(1 + \frac{1.18}{Pr})^2} \right]^{1/3} \right\}$	نافون و وانگوایز (Naphon and Wongwises) [32]
		مانلاپاز و چرچیل (Manlapaz and Churchill) [33]
$50 < De < 2000$	$Nu = (0.76 + 0.65De^{0.5}) Pr^{0.175}$	دراوید (Dravid) [34]
	$Nu = 0.836De^{0.5} Pr^{0.7}$	کلب و سیدر (Kalb and Seader) [34]
$20 < De < 2000$	$Nu = (2.153 + 0.318De^{0.643}) Pr^{0.175}$	شین و عبادیان (Xin and Ebadian) [35]

۳-۶-۲ میکروسکوپ الکترونی روبشی

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning Elec- tron Microscope, SEM) با استفاده از دستگاه Philips CM 200, Netherlands با ولتاژ ۲۰۰ kV برای بررسی ریخت‌شناسی صفحات گرافنی تولید شده استفاده شد. بدین منظور صفحات گرافنی درون اتانول با استفاده از امواج فراصوت توزیع شدند و سپس تصویربرداری از آن‌ها انجام پذیرفت.

۳-۶-۴ میکروسکوپ الکترونی عبوری

به منظور بررسی دقیق‌تر ریخت‌شناسی صفحات گرافنی تولید شده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (Transmission Electron Microscope, TEM) گرفته شده با دستگاه Philips EM 208, Netherlands استفاده شد. بدین منظور پودر گرافن در اتانول خالص به واسطه امواج مافوق صوت به مدت ۱۵ دقیقه پخش شد؛ سپس در پایه‌های مخصوص قرار داده و تصویربرداری انجام شد.

۳ نتایج و بحث

این قسمت شامل دو بخش اصلی است؛ در بخش اول به ریخت‌شناسی و بررسی خواص شیمیایی گرافن تولید شده پرداخته شده است و در بخش دوم تأثیر حضور گرافن تولید شده بر روی بهبود خواص انتقال حرارت در سیال پایه آب/اتیلن‌گلیکول مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۱ آزمون‌های ریخت‌شناسی

طیف XRD مربوط به گرافیت و گرافن تولید شده به روش الکتروشیمیایی در شکل ۳ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود گرافیت، قله شدیدی (d_{002}) در $2\theta = 25/5^\circ$ نشان داده است که طبق رابطه براگ متناظر است با فاصله بین لایه‌های $3/3 \text{ \AA}$. شدت این قله در گرافن کمتر شده است همچنین اندکی جابه‌جایی در موقعیت آن رخ داده است. جابه‌جایی قله به زوایای کمتر طبق رابطه براگ نشان دهنده افزایش فاصله بین لایه‌ها است. همچنین کاهش شدت قله، می‌تواند نشان‌دهنده تولید موفقیت‌آمیز گرافن با استفاده از روش الکتروشیمیایی

۱۴ [۳۰] و همچنین He عدد هلیکال (Helical) است که از رابطه ۱۵ [۳۶] به دست می‌آید.

$$Pr_{nf} = \frac{Cp_{nf}\mu_{nf}}{K_{nf}} \quad (14)$$

در رابطه فوق p_{mf} عدد پراتنل نانوسیال و Cp_{nf} ظرفیت گرمایی ویژه است که از رابطه ۷ محاسبه می‌شود. μ_{nf} گرانیروی و K_{nf} ضریب هدایت حرارتی نانوسیال است که به ترتیب از روابط ۲ و ۱۳ محاسبه می‌شود.

$$He = De \left[1 + \left(\frac{b}{2\pi D_{ave}} \right)^2 \right]^{-1/2}$$

در رابطه فوق He عدد هلیکال، De عدد دین، b فاصله بین دورهای لوله مارپیچ که برابر با $0/0025 \text{ m}^2$ و D_{ave} قطر متوسط را نشان می‌دهد که نحوه محاسبه آن در رابطه ۴ ارائه شد.

برای راستی‌آزمایی مقادیر افت فشار، افت فشار آب خالص از روی دستگاه خوانده شد و با رابطه تجربی ۱۶ مقایسه شد [۳۷].

$$\Delta P = 16542 \dot{m}^{1.760} \quad (16)$$

در رابطه فوق \dot{m} دبی جرمی جریان و ΔP افت فشار سیال است.

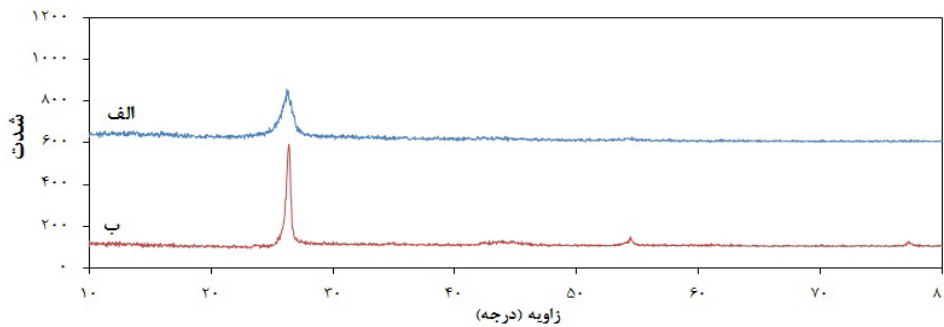
۲-۶ آزمون‌ها

۲-۶-۱ طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ

به منظور بررسی ساختار شیمیایی گرافیت و گرافن، از طیف‌سنجی فروسرخ (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) در دمای 25°C با استفاده از دستگاه Shimadzu FTIR Spectrometer استفاده شد.

۲-۶-۲ پراش پرتو ایکس

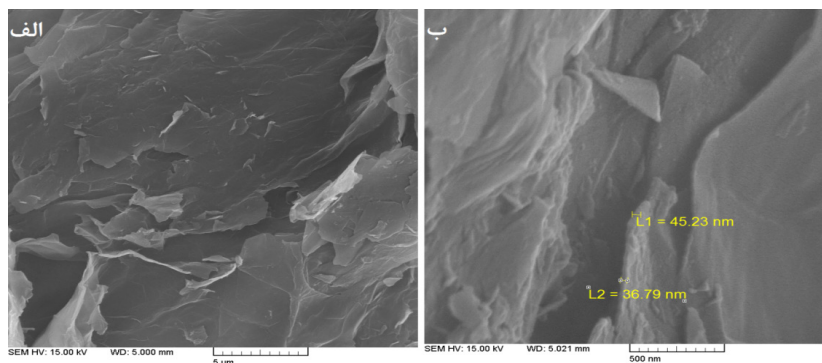
از پراش پرتو ایکس با زاویه کم (X-Ray Diffraction, XRD) برای بررسی ساختار گرافیت و گرافن استفاده شد. آزمایش‌ها توسط دستگاه Shimadzu XRD pert PRO MRD, Philips Netherlands X با طول موج $0/1506 \text{ nm}$ ، ولتاژ 40 kV و شدت جریان 40 mA با نرخ اسکن $1^\circ/\text{s}$ صورت گرفت. فواصل بین‌لایه‌ای طبق رابطه براگ ($2d \sin \theta = \lambda$) محاسبه شد که در آن λ طول موج دستگاه، d فاصله بین لایه‌ای و θ زاویه ظهور قله است.



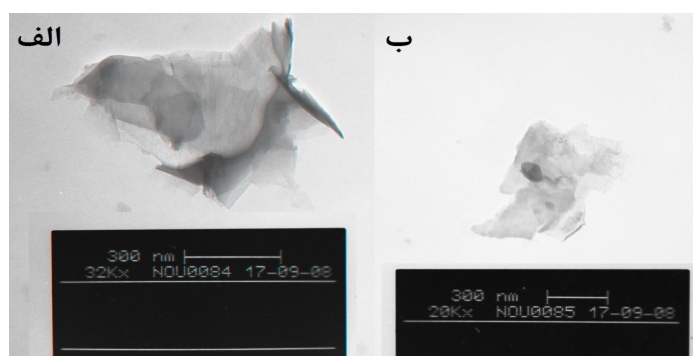
شکل ۳ نمودار XRD مربوط به الف) گرافن و ب) گرافیت

لایه‌های زیاد کربنی تیره است؛ به عبارت دیگر تعداد زیاد لایه‌ها اجازه عبور الکترون را نمی‌دهد. در مقابل تصویر TEM گرفته شده از گرافن روشن‌تر است که نشان‌دهنده کاهش تعداد لایه‌ها حین فرایند تولید الکتروشیمیایی است. لازم به ذکر است نقاط تیره همچنان در برخی از مکان‌ها قابل مشاهده است که نشان می‌دهد در برخی از محل‌ها تعداد لایه‌ها کمتر کاهش یافته است. نکته دیگری که از تصاویر TEM قابل استنباط است حفظ ساختار صفحه‌ای گرافیت در گرافن است؛ به عبارت دیگر هرچند تعداد لایه‌ها حین فرایند الکتروشیمیایی کاهش یافته است ولی ساختار صفحه‌ای کماکان حفظ شده است. در نهایت با توجه به تصاویر TEM می‌توان نتیجه گرفت که روش الکتروشیمیایی استفاده شده به خوبی قادر به تولید صفحات گرافنی (حدوداً شش لایه) بوده است.

به کار گرفته شده باشد [۳۸]. تصاویر SEM از گرافن با بزرگ‌نمایی‌های مختلف تهیه و در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود گرافن تولید شده دارای سطحی شبیه به کاغذ چروکیده و نامنظم است که ویژگی طبیعی صفحات گرافنی است. همچنین سطح گرافن به صورت یکنواخت است و هیچگونه ناخالصی در سطح دیده نمی‌شود [۳۹]. ضخامت صفحات در حدود ۳۰ nm است که نشان‌دهنده حضور حدود ۶ لایه گرافنی روی یکدیگر است؛ به عبارت دیگر تعداد لایه‌ها از حدود ۳۰ لایه در گرافیت خالص به حدود ۶ لایه کاهش یافته است. برای بررسی دقیق‌تر ساختار گرافن تولید شده و همچنین مشاهده وضعیت لایه‌های گرافنی، از نمونه‌ها عکس TEM گرفته شد (شکل ۵). همان‌طور که مشاهده می‌شود تصویر TEM گرافیت به دلیل تعداد



شکل ۴ تصاویر SEM از گرافن تولید شده در بزرگ‌نمایی‌های مختلف: الف) ۱۰۰۰۰ برابر و ب) ۱۰۰۰۰۰ برابر



شکل ۵ تصاویر TEM از الف) گرافیت و ب) گرافن تولید شده

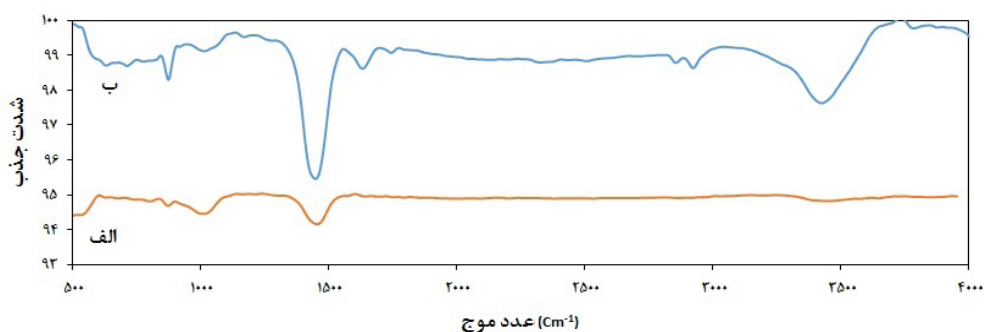
۳-۲ مطالعه ساختار شیمیایی

شکل ۶ نمودار FTIR مربوط به گرافیت و گرافن تولید شده به روش الکتروشیمیایی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، قله قابل تشخیصی در نمودار گرافیت وجود ندارد (شکل ۶ الف). بر اساس نتایج دیگر پژوهشگران [۴۰] گرافن در موقعیت‌های 3400 cm^{-1} (مربوط به پیوند کششی O-H)، 1718 cm^{-1} (مربوط به پیوند کششی C=O)، 1623 cm^{-1} (مربوط به پیوند بخش‌های اکسید نشده گرافیت)، 1420 cm^{-1} (مربوط به پیوند خمشی O-H) و 1032 cm^{-1} (مربوط به پیوند کششی C-O) قله نشان می‌دهد. قله‌های فوق در نمودار FTIR تهیه شده از گرافن در شکل ۶ ب قابل مشاهده است که نشان‌دهنده موفقیت آمیز بودن تولید گرافن از گرافیت به روش الکتروشیمیایی است.

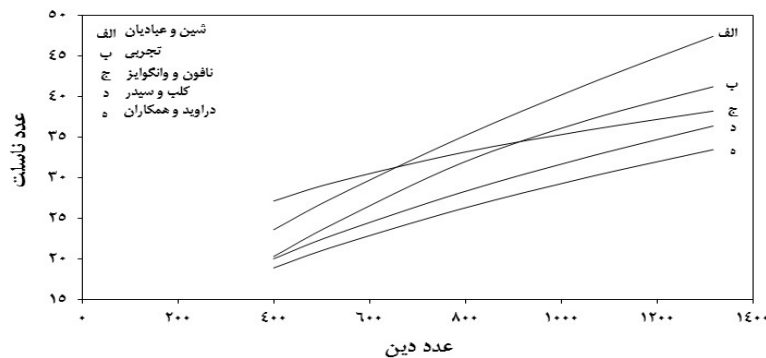
۳-۳ راستی آزمایی سامانه آزمایشگاهی

به منظور راستی‌آزمایی سامانه، دستگاه با استفاده از آب

مقطر خالص مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج حاصل برای عدد ناسلت و نیز افت فشار با روابط تجربی موجود در این زمینه مقایسه شد. نتایج این مقایسه در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر تجربی عدد ناسلت به دست آمده از سامانه آزمایشگاهی، در محدوده اعداد محاسبه شده توسط روابط نظری موجود در این زمینه قرار دارد؛ به عبارت دیگر نتایج به دست آمده برای عدد ناسلت (ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی) توسط این سامانه در محدوده جریان آرام برای لوله ماریچ با دیواره ثابت قابل استناد است. به منظور تعیین بیشترین انطباق مابین نتایج تجربی و نتایج به دست آمده از معادلات نظری، عدد ناسلت تجربی بر حسب عدد ناسلت نظری برای هر یک از روابط موجود ترسیم و نتایج در شکل ۹ نمایش داده شد. همچنین به منظور بررسی دقیق‌تر، خط راستی از هر یک از نمودارها عبور داده و مقدار



شکل ۶ نمودار FTIR مربوط به الف) گرافیت و ب) گرافن



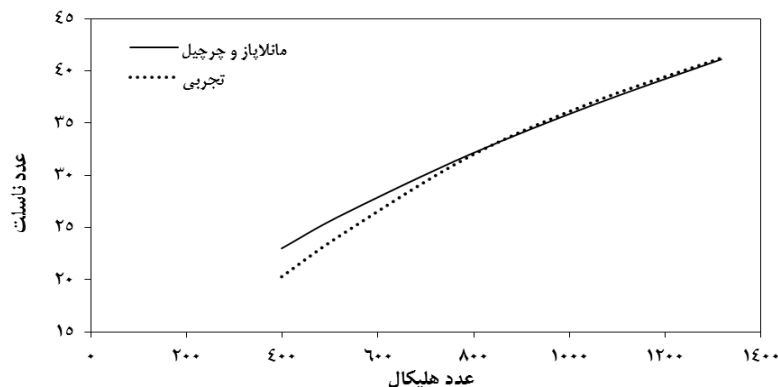
شکل ۷ مقادیر عدد ناسلت (تجربی و نظری) بر حسب عدد دین برای جریان آب در داخل لوله مارپیچ با دمای ثابت دیواره

۳-۴ ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی

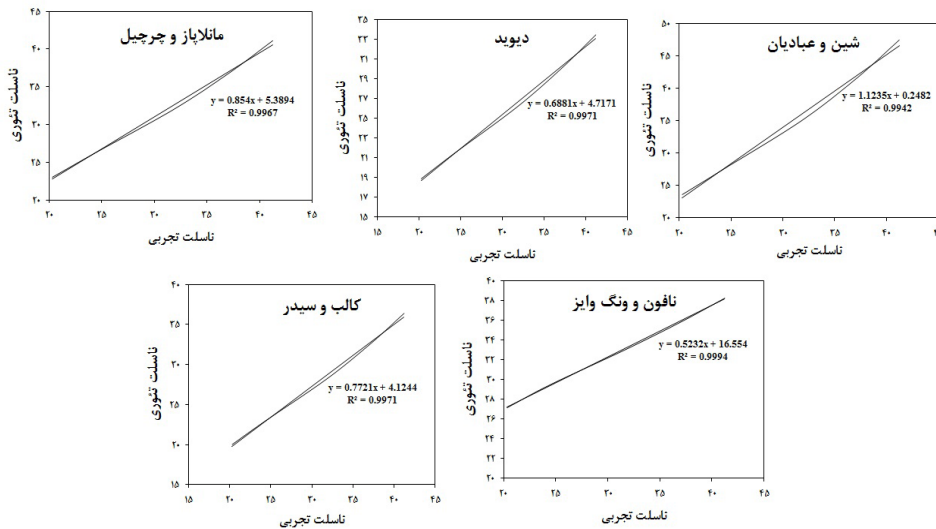
ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی یکی از عامل‌های بسیار مهم در بحث انتقال حرارت است. در این قسمت ضریب انتقال حرارت سیال پایه و نانوسیال با درصدهای وزنی مختلف از گرافن با استفاده از رابطه ۶ محاسبه و نتایج در شکل ۱۱ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد دین در تمامی غلظت‌های نانوذره، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش یافته است؛ همچنین در هر عدد دین ثابت نیز با افزایش درصد وزنی نانوذره، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش یافته است. افزایش عدد دین متناظر است با افزایش سرعت سیال و در نتیجه افزایش سرعت جابه‌جایی توده‌های آن. افزایش در سرعت جابه‌جایی توده‌های سیال، انتقال

R2 نیز گزارش شد تا مشخص شود کدام یک از روابط مطابقت بیشتری با نتایج تجربی به دست آمده از سامانه آزمایشگاهی دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود رابطه شین و عبادیان مطابقت بیشتری با نتایج به دست آمده در این پژوهش دارد و معادله خط به دست آمده نزدیک‌ترین رابطه به معادله $y=x$ است.

در ادامه به منظور بررسی بیشتر سامانه آزمایشگاهی، مقادیر افت فشار برای آب مقطر از روی دستگاه خوانده شد و با مقادیر نظری محاسبه شده توسط رابطه ۱۶ مقایسه شد (شکل ۱۰). همان‌طور که مشاهده می‌شود در محدوده عدد رینولدز استفاده شده، مطابقت خوبی مابین مقادیر خوانده شده از روی دستگاه و مقادیر محاسبه شده وجود دارد؛ به عبارت دیگر مقادیر افت فشار به دست آمده از روی دستگاه قابل استناد است.



شکل ۸ مقادیر عدد ناسلت (تجربی و نظری) بر حسب عدد هلیکال برای جریان آب در داخل لوله مارپیچ با دمای ثابت



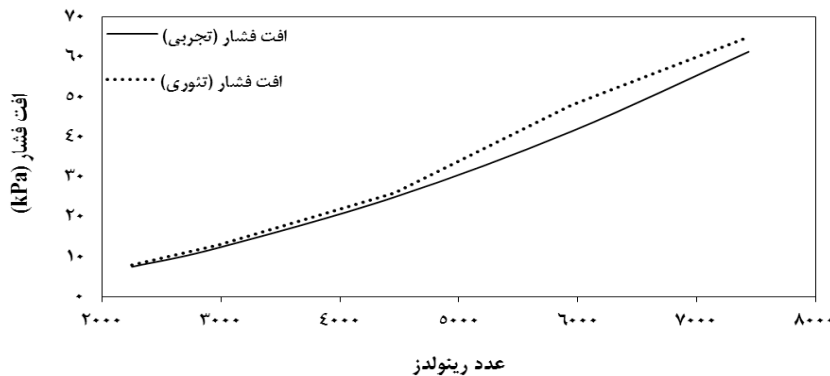
شکل ۹ مقایسه عدد ناسلت تجربی با عدد ناسلت نظری محاسبه شده با مدل های مختلف

کمترین میزان نانو ذره که منجر به بهترین افزایش انتقال حرارت شود مد نظر است؛ بنابراین به نظر می رسد ۱٪ وزنی نانو ذره گزینه مناسبی است.

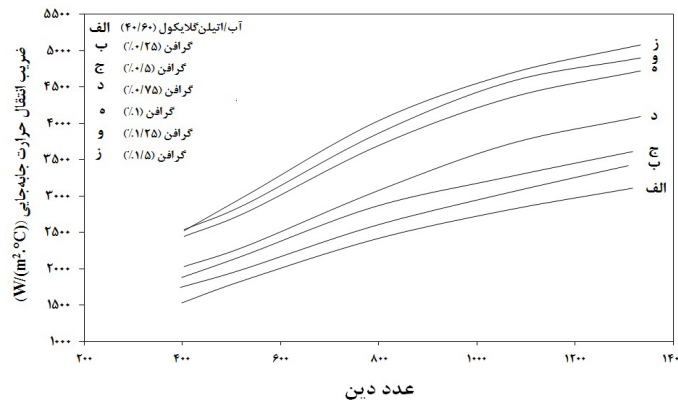
۳-۵ عدد ناسلت

حضور نانو ذره درون سیال علاوه بر بهبود ضریب انتقال حرارت جابه جایی منجر به بهبود ضریب هدایت حرارتی نیز می شود. تأثیر این دو مولفه بر روی عدد ناسلت طبق رابطه ۱۲ عکس یکدیگر است؛ به عبارت دیگر افزایش ضریب انتقال حرارت جابه جایی منجر به افزایش عدد ناسلت و افزایش ضریب هدایت حرارت جابه جایی منجر به کاهش عدد ناسلت می شود. بنابراین در این قسمت، عدد ناسلت در دبی های مختلف

حرارت جابه جایی و به تبع آن ضریب انتقال حرارت جابه جایی را بهبود می دهد. از سوی دیگر، در صورت توزیع مناسب و یکنواخت نانو ذرات درون سیال پایه، انتقال حرارت بهتر انجام می گیرد که متناظر است با بهبود ضریب انتقال حرارت جابه جایی. این بهبود در تمامی درصدهای وزنی نانو ذرات قابل مشاهده است. البته همان طور که در شکل ۱۱ نیز مشاهده می شود این بهبود در درصدهای کمتر از ۱٪ چشمگیرتر است؛ به عبارت دیگر در درصدهای وزنی بالاتر از ۱٪ نانو ذرات، بهبود ضریب انتقال حرارت جابه جایی، قابل توجه نیست. از آنجایی که حضور نانو ذرات منجر به افزایش افت فشار در نتیجه افزایش هزینه انتقال سیال می شوند



شکل ۱۰ مقادیر افت فشار آب بر حسب عدد رینولدز



شکل ۱۱ ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برای سیال پایه و نانوسیال با درصد‌های وزنی مختلف از گرافن بر حسب عدد دین

از نانوذره از سیال پایه حدود ۳۰٪ بیشتر است که نشان می‌دهد استفاده از گرافن سبب افزایش نرخ انتقال حرارت شده است. همچنین با افزودن نانوذره نرخ انتقال حرارت نیز افزایش یافته است به طوری که با افزودن ۱٪ وزنی نانوذره میزان نرخ انتقال حرارت نسبت به نانوسیال حاوی ۲۵٪ نانوذره حدود ۲۰٪ افزایش یافته است.

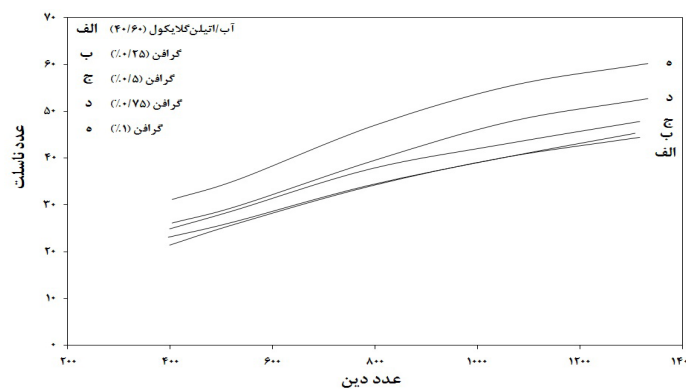
۷-۳ افت فشار

افت فشار سامانه با استفاده از رابطه ۱۶ برای سیال پایه و نیز نانوسیال با درصد‌های وزنی مختلف از گرافن محاسبه و نتایج در شکل ۱۴ ارائه شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود افت فشار سیال پایه نسبت به نانوسیال، کمتر است؛ به عبارت دیگر گرافن موجود در سیال سبب ایجاد افت فشار شده است و هرچه درصد وزنی نانوذرات افزایش یافته است افت فشار

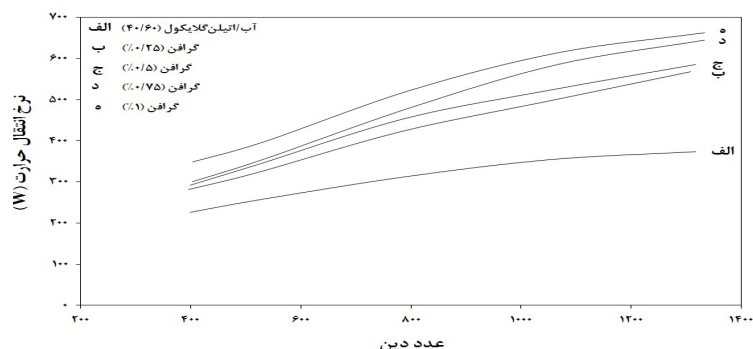
(اعداد دین مختلف) برای سیال پایه و نیز نانوسیال با درصد‌های وزنی مختلف از گرافن محاسبه و نتایج در شکل ۱۲ نشان داده شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرات عدد ناسلت هم با افزایش عدد دین و هم با اضافه شدن گرافن افزایشی است؛ به عبارت دیگر هر چند ضریب هدایت حرارتی نانوسیال در اثر حضور نانوذره افزایش یافته است ولی افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نسبت به ضریب هدایت حرارتی چشمگیرتر بوده است که در نهایت منجر به افزایش عدد ناسلت سیال پایه شده است.

۶-۳ نرخ انتقال حرارت

نرخ انتقال حرارت سیال با استفاده از رابطه $Q = h_1 A_1 \Delta T_{LMTD}$ محاسبه و نتایج در شکل ۱۳ نشان داده شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نرخ انتقال حرارت نانوسیال حاوی ۲۵٪



شکل ۱۲ عدد ناسلت برای سیال پایه و نانوسیال با درصد‌های وزنی مختلف از گرافن بر حسب عدد دین



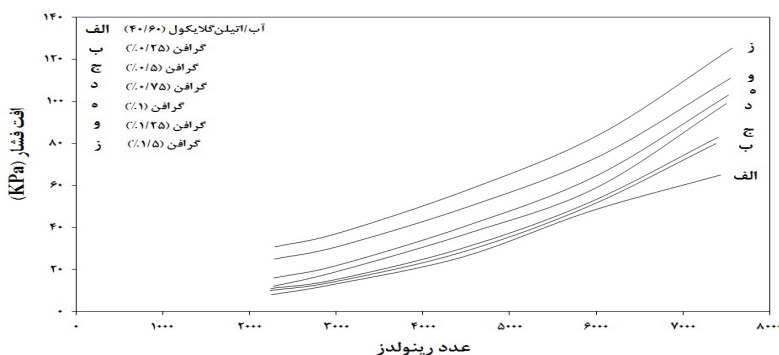
شکل ۱۳ نرخ انتقال حرارت برای سیال پایه و نانوسیال با درصدهای وزنی مختلف از گرافن بر حسب عدد دین

تولید آن با استفاده از روش‌های SEM، XRD، FTIR و TEM تأیید شد. به دلیل ماهیت آب‌گریز گرافن و عدم توزیع یکنواخت و همگن آن در آب از فعال‌کننده سطحی سدیم دودسیل سولفات (SDS) استفاده شد. نسبت‌های مختلف نانوذره به SDS مورد بررسی قرار گرفت و نسبت ۱ به ۱ به عنوان نسبت بهینه برای پایداری گرافن درون سیال پایه گزارش شد. درصدهای مختلف وزنی از گرافن شامل ۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۲۵ و ۱/۵٪ به سیال پایه اضافه شد و تأثیر حضور آن بر بهبود ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سیال پایه در فرایند سرمایه‌گذاری در سامانه آزمایشگاهی که متشکل از لوله مارپیچ به طول ۱۰ با دمای دیواره ثابت بود، بررسی شد. نتایج به دست آمده برای عدد ناسلت و افت فشار برای آب خالص با نتایج نظری محاسبه شده، مقایسه شد و کارآمد بودن سامانه آزمایشگاهی در پیش‌بینی

ایجاد شده نیز بیشتر شده است. افزودن گرافن به سیال پایه منجر به افزایش گرانشی آن می‌شود؛ بنابراین پمپ باید انرژی بیشتری صرف کند تا بتواند سیال را به چرخش درآورد. با توجه به افت فشار زیاد نانوسیال در درصدهای بالای نانوذره (بالتر از یک درصد) و نیز تأثیر کم نانوذره در درصدهای وزنی بالاتر از یک در بهبود خواص حرارتی (شکل ۱۱)، به نظر می‌رسد درصد وزنی گرافن درون نانوسیال نباید از یک بیشتر باشد.

۴ نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر تولید نوعی نانوسیال بر پایه آب/ اتیلن‌گلیکول (سیال پایه) حاوی گرافن برای بهبود ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی گزارش شد. گرافن با استفاده از روش الکتروشیمیایی تولید و موفقیت‌آمیز بودن



شکل ۱۴ مقادیر افت فشار برای سیال پایه و نانوسیال با درصدهای مختلف وزنی از گرافن بر حسب عدد رینولدز

خواص حرارتی تا مقدار ۱٪ وزنی از نانوذره چشمگیر بود و بعد از آن تغییر قابل ملاحظه‌ای مشاهده نشد. از سوی دیگر حضور نانوذره درون سیال پایه، منجر به افزایش ۵۰٪ افت فشار سیال پایه شد. در نهایت نتایج به‌دست آمده از این پژوهش کارآمد بودن نانوسیال آب/اتیلن‌گلیکول/گرافن را برای استفاده در تجهیزات سرمایش/گرمایش اثبات کرد.

مقادیر مذکور تأیید شد. در ادامه، سامانه با نانوسیال حاوی درصدهای مختلف از نانوذره در دبی‌های مختلف (جریان آرام) مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که حضور نانوذره درون سیال پایه منجر به بهبود چشم‌گیر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود؛ به‌طوری که حضور ۰/۲۵، نانوذره منجر به افزایش ۳۰٪ نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی شد. میزان بهبود

مراجع

- 1- Choi S.U., Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticle, American Society of Mechanical Engineers of Fluids Engineering Disseminates, 231, 12, 99-105, 1995.
- 2- Sheikholeslami M. and Sadoughi M.K., Simulation of CuO-Water Nanofluid Heat Transfer Enhancement in Presence of Melting Surface, International Journal of Heat and Mass Transfer, 116, 909-919, 2018.
- 3- Huminic G. and Huminic A., Hybrid Nanofluids for Heat Transfer Applications-A state-of-the-Art Review, International Journal of Heat and Mass Transfer, 125, 82-103, 2018.
- 4- Wang X.Q. and Mujumdar A. S., Heat Transfer Characteristics of Nanofluids: a Review, International Journal of Thermal Sciences, 46, 6, 1-19, 2007.
- 5- Ahmadi M.A., Ahmadi M.H., Fahim Alavi M., Nazemzadegan M.R., Ghasempour R. and Shamsirband S., Determination of Thermal Conductivity Ratio of CuO/Ethylene Glycol Nanofluid by Connectionist Approach, Journal of the Taiwan Institute of Chemical, 91, 383-395, 2018.
- 6- Kumar N., Singh P., Redhewal A.K. and Bhandari P., a Review on Nanofluids Applications for Heat Transfer in Micro-channels, Procedia Engineering, 127, 1197-1202, 2015.
- 7- Stankovich S., Dikim D.A., Dommett G.H., Kohlhaas K.M., Zimney E.J., Stach EA, Piner R.D., Nguyen S.T. and Ruoff R.S., Graphene-based Composite Material, Nature, 442, 710, 282-286, 2006.
- 8- Mehrali M., Sadeghinezhad E., Akhiani A.R., Tahan Latibari S., Talebian S., Dolatshahi-Pirouz A., Metselaar H.S.C. and Mehrali M., An Ecofriendly Graphene-based Nanofluid for Heat Transfer Applications, Journal of Cleaner Production 137, 555-566, 2016.
- 9- Novoselov K.S., Falko V.I., Colombo L., Gellert P.R., Schwab M.G. and Kim K., A Roadmap for Graphene, Nature, 490, 192-200, 2012.
- 10- Sarma S.D., Adam S., Hwang E.H. and Rossi E., Electronic Transport in Two Dimensional Graphene, Reviews of Modern Physics, 407, 70-83, 2011.
- 11- Soldano C., Mahmood A and Dujardin E., Production, Properties and Potential of Graphene. Carbon, 48, 2127-2150, 2010.
- 12- Georgakilas V., Otyepka M., Bourlinos A.B., Chandra V., Kim N., Kemp K.C., Hobza P., Zboril R. and Kim K.S., Functionalization of Graphene: Covalent and non-Covalent Approaches, Derivatives and Applications, Chemical Reviews, 112, 6156-6214, 2012.
- 13- Li X., Zhu D.S., Wang X.J., Wang J., Gao J.W. and Li H., Thermal Conductivity Enhancement Dependent pH and Chemical Surfactant for Cu-H₂O Nanofluids, Thermochemica Acta, 469, 98-103, 2008.
- 14- Hwang Y., Park H.S., Lee J.K. and Jung W.H., Thermal Conductivity and Lubrication Characteristics of Nanofluids, Current Applied Physics, 6, 67-71, 2006.
- 15- Butt H.J., Graf K., and Kappl M., Physics and Chemistry of Interfaces, Wiley, New York, 2006.
- 16- Vu L.V., Long N.N., Doanh S.C. and Trung B.Q., Preparation of Silver nanoparticles by Pulse Sonoelectrochemical Method and Studying their Characteristics, Journal of Physics: Conference Series, 187,1-6, 2009.
- 17- Kole M. and Dey T.K., Investigation of Thermal Conductivity, Viscosity, and Electrical Conductivity of Graphene-based Nanofluids. Journal of Applied Physics, 113, 084307, 2013.
- 18- Amiri A., Sadri R., Shanbedi M., Ahmadi G., Kazi S.N., Chew B.T. and Zubir M.N.M, Synthesis of Ethylene Glycol-treated Graphene Nanoplatelets with One-pot, Microwave-assisted Functionalization for Use as a High Performance Engine Coolant, Energy Convers Manage 101, 67-77, 2015.
- 19- Cabaleiro D., Colla L., Barison S., Lugo L., Fedele L. and Bobbo S., Heat Transfer Capability of (Ethylene glycol + Water)-based Nanofluids Containing Graphene Nanoplatelets: Design and Thermophysical Profile, Nanoscale Research Letters, 12:53, 2017.
- 20- Akhavan-Zanjani H., Saffar-Avval M., Mansourkiaei M., Ahadi M. and Sharif F., Turbulent Convective Heat Transfer and Pressure Drop of Graphene water Nanofluid Flowing inside a Horizontal Circular Tube, Journal of Dispersion Science and Technology, 35, 1230-1240, 2014.
- 21- Tiwari S.K, Huczko A., Oraon R., De Adhikari A. and Nayak G.C., Facile Electrochemical Synthesis of Few Layered Graphene from Discharged Battery Electrode and its Application for Energy Storage, Arabian

- Journal of Chemistry, 10, 556-565, 2017.
- 22- Vajjha R. H. and Das D.K., A Review and Analysis on Influence of Temperature and Concentration of Nanofluids on Thermophysical Properties, Heat Transfer and Pumping Power, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55, 4063-4078, 2012.
- 23- Mahian O., Kianifar A., Kleinstreuer C., Al-Nimr M.A., Pop L., Sahin L. and Wongwises S., A Review of Entropy Generation in Nanofluid Flow, International Journal of Heat and Mass Transfer, 65, 6, 514-532, 2013.
- 24- Haddad Z., Oztop H.F., Abu-Nada E. and Mataoui A., A Review on Natural Convective Heat Transfer of Nanofluids, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 5363-5378, 2012.
- 25- Srinivas T. and Vinod V., Heat Transfer Enhancement Using CuO/Water Nanofluid in a Shell and Helical Coil Heat Exchanger, International Conference on Computational Heat and Mass Transfer, 127, 1271-1277, 2015.
- 26- Srinivasan P.S., Nandapurkar. A. and Sand Holland F.A, Pressure Drop and Heat Transfer in Coils, Chemical Engineering Journal, 113-119, 1968.
- 27- Deshpande G.N., Heat transfer enhancement by nanofluid in a spiral tube heat exchanger, Journal of Thermal Engineering and Technology, 2, 6-10, 2017.
- 28- Nilesh Purohit A., Varun Anand Purohit B. and Kamlesh Purohit, Assessment of Nanofluids for Laminar Convective Heat Transfer: A Numerical Study, Engineering Science and Technology an International Journal, 1-12, 2015.
- 29- Naphon P. and Wongwises S., An Experimental Study on the in-Tube Convective Heat Transfer Coefficients in a Spiral Coil Heat Exchanger, International Communications in Heat and Mass Transfer, 29, 797-809, 2002.
- 30- Nourafkan E., Karimi G. and Moradgholi J., Experimental Study of Laminar Convective Heat Transfer and Pressure Drop of Cuprous oxide/Water Nanofluid inside a Circular Tube, Experimental Heat Transfer, 28, 58-68, 2015.
- 31- Ganvir R.B., Walke P.V and Kriplan V.M, Heat Transfer Characteristics in Nanofluid- a Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 75, 451-460, 2017.
- 32- Naphon P. and Wongwises S., Investigation of the Performance of a Spiral-Coil Finned Tube Heat Exchanger under Dehumidifying Conditions, Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 76, 83-92, 2003
- 33- Manlapaz, R.L., Churchill, S.W., Fully Developed Laminar Convection from a Helical Coil, Chemical Engineering Communications, 97, 185-200, 1981.
- 34- Austen D.S. and Soliman H.M., Laminar Flow and Heat Transfer in Helically Coiled Tubes with Substantial Pitch, Experimental Thermal and Fluid Science, 1, 183-194, 1988.
- 35- Xin R.C. and Ebadian M.A., The Effects of Prandtl Numbers on Local and Average Convective Heat Transfer Characteristics in Helical Pipes, Journal of Heat Transfer, 119, 467-473, 1977.
- 36- Mishra P. and Gupta S.N., Momentum Transfer in Curved Pipes 1. Newtonian Fluids; 2. Non-Newtonian Fluids, Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 18, 130-142, 1979.
- 37- Duangthongsuka W. and Wongwises S., An Experimental Investigation on the Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Nanofluid Flowing in Microchannel Heat Sink with Multiple Zigzag flow Channel Structures, Experimental Thermal and Fluid Science, 87, 30-39, 2017.
- 38- Teng, C.C., Ma, C.C.M., Lu, C.H., Yang, S.Y., Lee, S.H., Hsiao, M.C., Yen, M.Y., Chiou, K.C. and Lee, T.M., Thermal Conductivity and Structure of Non-covalent Functionalized Graphene/Epoxy Composites, Carbon, 49, 5107- 5116, 2011.
- 39- Rasheed A.K., Khalid. M, Rashmi. W, Gupta T.C.S.M and Chan A., Graphene-based Nanofluids and Nanolubricants - Review of Recent Developments, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 63, 346-362, 2016.
- 40- Ju H.M., Choi S.H, and Huh S.H, X-ray Diffraction Patterns of Thermally-reduced Graphene, Journal of Korean Physical Society, 57, 1649-1652, 2010.

فهرست نمادها

ΔT	تغییرات دما ($^{\circ}C$)	w	دیواره
ρ	چگالی (kgm^{-3})	eff	مؤثر
ϕ	کسر حجمی نانوذرات	in	ورودی-داخلی
μ	گرانروی (Pa.s)	out	خروجی-بیرونی
T_h	دمای سیال گرم ($^{\circ}C$)	nf	نانوسیال
T_c	دمای سیال سرد ($^{\circ}C$)	bf	سیال پایه
LMTD	متوسط لگاریتمی	P	نانوذره
A	سطح انتقال حرارت (m^2)	ave	متوسط
	دبی جرمی ($kg s^{-1}$)	L	طول لوله (m)
C_p	ظرفیت ویژه حرارتی ($JKg^{-1} K^{-1}$)	R	شعاع
h	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ($W.m^{-2} K^{-1}$)	D	قطر لوله (m)
K	ضریب هدایت حرارتی ($Wm^{-1} K^{-1}$)	R_n	متوسط شعاع خمیدگی
U_i	ضریب کلی انتقال حرارت ($Wm^{-2} K^{-1}$)	n	تعداد دورهای لوله خم‌شده
	عدد ناسلت (بدون بعد)	α	نرخ افزایش شعاع
	عدد پرانتل (بدون بعد)	D_{min}	قطر اولین حلقه لوله مارپیچ
Re	عدد رینولدز (بدون بعد)	D_{max}	قطر آخرین حلقه لوله مارپیچ
	عدد دین (بدون بعد)	b	فاصله بین دورهای لوله مارپیچ
He	عدد هلیکال (بدون بعد)		افت فشار (kPa)

