

# تولید گرافن آب دوست و بررسی تجربی افزودن آن بر بهبود ضریب انتقال گرما در سامانه آب/اتیلن گلیکول

افسون غیائی، حسین بنی اسدی\*، ایمان اکبری داهوئی

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

**چکیده:** یکی از روش های کاهش اندازه تجهیزهای انتقال گرما، افزایش ضریب انتقال گرما جابه جایی سیال پایه است. هدف از این پژوهش تولید گرافن آب دوست و بررسی پتانسیل استفاده از آن در بهبود ضریب انتقال گرما در سامانه آب و اتیلن گلیکول در سیکل سرمایش است. گرافن با استفاده از روش الکتروشیمیایی تولید و پایداری آن درون آب به وسیله بارگذاری نانوذره های سیلیکا افزایش یافت. گرافن تولید شده با آزمون های IR-FT و XRD و تصویرهای SEM و TEM بررسی و تولید موفق آن تأیید شد. درصد های وزنی گوناگون از گرافن - سیلیکا تولید شده شامل ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ و ۱/۵٪ به سیال آب/اتیلن گلیکول افزوده شد تا بهبود ضریب انتقال گرمای جابه جایی توسط این نانوسیال در دستگاه آزمایشگاهی طراحی شده، مورد بررسی قرار گیرد. داده های تجربی به دست آمده برای عدد ناسلت و افت فشار در سیال آب خالص محاسبه و با مدل های موجود در این زمینه مقایسه شد و مشخص شد که سامانه به خوبی قادر به پیش بینی نتیجه ها است. سامانه با استفاده از نانوسیال دارای درصد های گوناگون از گرافن - سیلیکا مورد آزمایش قرار گرفت و مشخص شد که با افزودن ۱٪ وزنی نانوذره به سیال پایه ضریب انتقال گرمای جابه جایی حداقل ۴۰٪ بهبود یافته است؛ این در حالی است که میزان افت فشار ناشی از حضور نانوذره ها نیز حدود ۳۰٪ افزایش نشان داد. به طور کلی نتیجه های این پژوهش پتانسیل استفاده از نانوسیال آب/اتیلن گلیکول/گرافن - سیلیکا را برای استفاده در تجهیزهای انتقال گرمای پشتیبانی می کند.

**واژه های کلیدی:** گرافن - سیلیکا؛ نانوسیال؛ اتیلن گلیکول؛ ضریب انتقال گرمای جابه جایی؛ جریان آرام؛ لوله ماریچ.

**KEYWORDS:** Graphene-silica; Nanofluid; Ethylene glycol; Convective heat transfer coefficient; Laminar flow; Spiral tube.

## مقدمه

بالا بودن نقطه انجماد آب و افزایش حجم حدود ۹ درصدی آن و خوردگی و زنگ زدگی فلزهای مصرفی در سامانه خنک کننده، است. بنابراین در سامانه های خنک کننده از مخلوط آب با مواد دیگر از جمله اتیلن گلیکول استفاده می شود. پژوهش ها در این زمینه نشان داده است که محلول ۴۰ تا ۷۰٪ اتیلن گلیکول

انتقال گرما یکی از مهم ترین پدیده ها در اغلب فرایندهای صنعتی است. از آب به دلیل ارزان بودن و خاصیت انتقال گرمایی بالا به عنوان مایع خنک کننده به میزان چشمگیری در سامانه های خنک کننده استفاده می شود. کاربرد آب به تنهایی به عنوان خنک کننده دارای عیب های گوناگون از جمله پایین بودن نقطه جوش،

\*عهدہ دار مکاتبات

+E-mail: hbaniasadi@srbiau.ac.ir

با سیلیکون اکسید ( $\text{SiO}_2$ ) است که به آن سیلیکا نیز گفته می‌شود [۱۳، ۱۴].

کول<sup>(۳)</sup> و همکاران [۱۵] هدایت گرمایی و رفتار رئولوژیکی گرافن عامل‌دار شده با هیدروژن را در سامانه آب/اتیلن‌گلیکول ( $30/70$ ) در غلظت حجمی  $0.41\%$  و  $3.95\%$  از نانوذره بررسی کردند. نتیجه‌های آن‌ها نشان داد که هدایت گرمایی و گرانیوی دینامیک در حضور نانوصفحه‌های گرافنی به ترتیب  $15\%$  و  $100\%$  افزایش یافته است. صدری و همکاران [۱۶] یک روش ساده و دوستار محیط زیست شامل اتصال اسید گالیک بر روی سطح نانوصفحه‌های گرافنی برای تولید گرافن بسیار پایدار در محیط آبی گزارش نمودند. با انجام آزمایش‌های کافی اتصال کووالانسی اسید گالیک بر روی سطح گرافن و به تبع آن پایداری نانوذره اصلاح شده در محیط آبی تأیید شد. آن‌ها ادعا کردند که نانوذره اصلاح شده پتانسیل استفاده در بهبود ویژگی‌های گرمایی آب برای استفاده در مبدل‌های گرمایی را دارا است. ژانگ<sup>(۴)</sup> و همکاران [۱۷] اکسید گرافن احیا شده را با استفاده از روش هامر اصلاح شده تولید و ویژگی‌های ساختاری آن را به طور کامل بررسی نمودند. سپس با استفاده از درصد‌های وزنی گوناگون از آن نانوسیال بر پایه آب یون‌زدایی شده تولید و پایداری نانوذره ساخته شده درون آب را با انجام آزمایش‌های لازم تأیید کردند. آن‌ها نشان دادند که در غلظت  $1 \text{ mg/mL}$  از نانوذره رفتار نیوتنی آب یون‌زدایی شده حفظ شده است؛ همچنین ضریب هدایت گرمایی آن بیش از  $30\%$  افزایش یافته است. سرانجام آن‌ها ادعا کردند که نانوسیال آب/گرافن اکسید کاهش یافته، پتانسیل استفاده به عنوان سیال انتقال گرما در مبدل‌های گرمایی را دارا است. ریانی و همکاران [۱۸] نانوذره‌های گرافن اکسید را تولید و ویژگی‌های ساختاری آن را به طور کامل بررسی نمودند. سپس با استفاده از  $0.1\%$  تا  $1\%$  وزنی از آن نانوسیال تهیه کردند و به بررسی ویژگی‌های آن پرداختند. آن‌ها پایداری نانوذره درون آب را با استفاده از آزمایش پراکندگی نور دینامیکی تأیید نمودند. در ادامه رفتار گرمایی نانوسیال در حضور نانوذره را بررسی کردند و نشان دادند که حضور نانوذره می‌تواند تا حدود  $20\%$  هدایت گرمایی آب را در دمای محیط افزایش دهد.

در پژوهش حاضر هدف تولید گرافن اصلاح شده با سیلیکا است به طوری که گرافن - سیلیکا تولید شده قابلیت پایداری طولانی مدت

در آب، سامانه‌های خنک کننده را در بالاترین ظرفیت طراحی شده نگه می‌دارد، همچنین از جوش نیامدن آب و در نتیجه خسارت‌های سنگین به تجهیزات اطمینان پیدا می‌شود. از دیگر برتری‌های به کارگیری اتیلن‌گلیکول به عنوان سیال پایه در کنار آب، پایین بودن میزان آثار مخرب زیست محیطی آن است [۱، ۲]. از سوی دیگر با توجه به این که فلزهای هدایت گرمایی بسیار بیش‌تری نسبت به سیال‌ها دارند، به نظر می‌رسد افزودن آن‌ها منجر به بهبود ویژگی‌های گرمایی در سیال‌هایی مانند آب، اتیلن‌گلیکول و روغن‌های معدنی شود [۳]. توزیع یا تعلیق نانوذره‌ها با هدایت گرمایی بالا درون سیال‌ها منجر به معرفی واژه‌ای به نام نانوسیال<sup>(۱)</sup> شده است [۴]. نانوسیال به دلیل هدایت گرمایی و توانایی بالاتر انتقال گرما نسبت به سیال پایه و یا سیال دارای ذره‌ها در ابعاد میکرو، توجه تعداد زیادی از پژوهشگران را به خود معطوف نموده است [۵]. پژوهش‌های انجام شده در این زمینه نشان داده است افزودن اکسیدهای سرامیکی مانند مس اکسید و آلومینیوم اکسید درون سیال پایه آب، منجر به بهبود هدایت گرمایی می‌شود [۶]. به نمونه نمونه نورافکن و همکاران [۷] انتقال گرمایی جابه‌جایی را در نانوسیال آب/اکسید مس در جریان آرام درون لوله بررسی کردند و نشان دادند که در حضور  $5\%$  وزنی نانومس، ضریب انتقال گرما به طور میانگین  $10\%$  افزایش می‌یابد؛ در حالی که افت فشار نیز  $16\%$  افت بیش‌تری نشان می‌دهد.

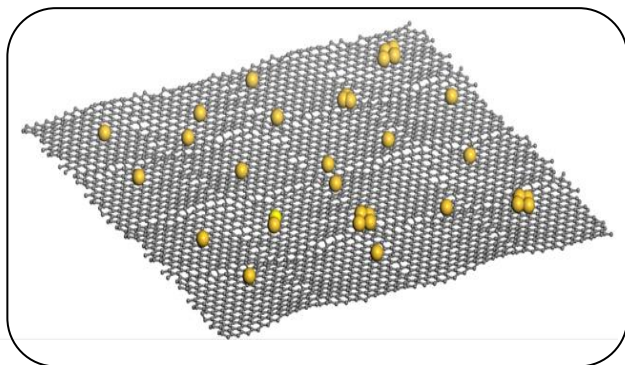
به تازگی تعدادی از پژوهش‌ها در زمینه نانوسیال، بر روی استفاده از ساختارهای کربنی متمرکز شده است؛ در این راستا گرافن<sup>(۲)</sup> یکی از بیش‌ترین مواد مورد مطالعه در دهه اخیر است [۸، ۹]. در انتقال گرما با مکانیسم هدایت، رفتار هدایتی یک ذره تابع هندسه و اندازه‌های آن ذره است. با توجه به این که نانوذره‌های فلزی ساختاری صفر بعدی، نانولوله‌های کربنی ساختاری یک بعدی و صفحه‌های گرافنی ساختاری دو بعدی دارند، در نتیجه گرافن می‌تواند گرما را در اندازه‌های بیش‌تری انتقال دهد. بنابراین انتظار می‌رود ضریب انتقال گرمایی سیال پایه در حضور گرافن به میزان چشمگیری افزایش یابد [۱۰، ۱۱]. متأسفانه آب‌گریز بودن گرافن باعث شده که درون آب یا بعضی از حلال‌های قطبی برای مدت زمان طولانی پایدار نماند و سرانجام کلوخه شود؛ بنابراین بزرگ‌ترین چالش در استفاده از گرافن برای بهبود ویژگی‌های گرمایی آب، پایدار نمودن آن است [۱۲]. یکی از روش‌های موجود، ترکیب کردن آن

(۱) Nanofluid

(۲) Graphene

(۳) Kole

(۴) Zhang



شکل ۱- نمایش الگویی بارگذاری سیلیکا روی صفحه‌های گرافن (کره‌های زرد رنگ نانوذره‌های سیلیکا هستند).

تری اتوکسی سیلان ۹۸٪ به بالن اضافه و سامانه روی همزن مغناطیسی در دمای ۹۰°C به مدت ۴۸ ساعت هم‌زده شد. مخلوط به دست آمده با استفاده از کاغذ صافی صاف و با اتانول شستشو داده شد. ماده به دست آمده به مدت ۳ ساعت درون آن با دمای ۱۰۰°C خشک شد. سپس به مدت یک دقیقه درون کوره با دمای ۴۰۰°C قرار داده شد تا در اثر شوک گرمایی لایه‌ها از یکدیگر جدا شوند. شکل ۱ به صورت الگویی نانوذره‌های سیلیکا بارگذاری شده روی صفحه‌های گرافن را نشان می‌دهد.

#### تهیه نانوسیال

پودر گرافن - سیلیکا با درصد‌های وزنی گوناگون شامل ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۲۵ و ۱/۵٪ با استفاده از امواج فراصوت (۴۵ دقیقه) درون سامانه آب/اتیلن گلیکول (۶۰/۴۰) به عنوان سیال توزیع شد. همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است بعد از گذشت ۴۸ ساعت، توزیع گرافن - سیلیکا درون آب همچنان یکنواخت و پایدار است. با توجه به ماهیت آب‌گریز گرافن، این پایداری می‌تواند به حضور سیلیکا در ساختار گرافن نسبت داده شود.

#### سامانه آزمایشگاهی

نمایش الگویی سامانه آزمایشگاهی استفاده شده در این پژوهش در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود این سامانه متشکل از مخزن نانوسیال مجهز به شیر تخلیه با ظرفیت تقریبی ۴ لیتر است. مخزن یاد شده متصل به پمپ با قدرت ۰/۵ اسب بخار برای دوران آب با قابلیت تنظیم

درون آب را دارا باشد. سپس از این نانوذره‌ها برای تولید نانوسیال بر پایه آب/اتیلن گلیکول استفاده می‌شود و تأثیر حضور گرافن بر بهبود ویژگی‌های گرمایی سیال پایه در یک مبدل گرمایی پوسته و لوله مارپیچ در سیکل سرمایش مورد بررسی و تأیید قرار می‌گیرد.

#### بخش تجربی

##### مواد

مواد استفاده شده در این پژوهش عبارتند از: آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان ۹۸٪<sup>(۱)</sup> (سیگما آلدریج)، سولفوریک اسید ۹۸٪ (دکتر مجلی)، آب مقطر (آزمایشگاهی)، اتیلن گلیکول (مرک) و فویل گرافیت.

#### تولید نانوذره‌های گرافن و اصلاح آن

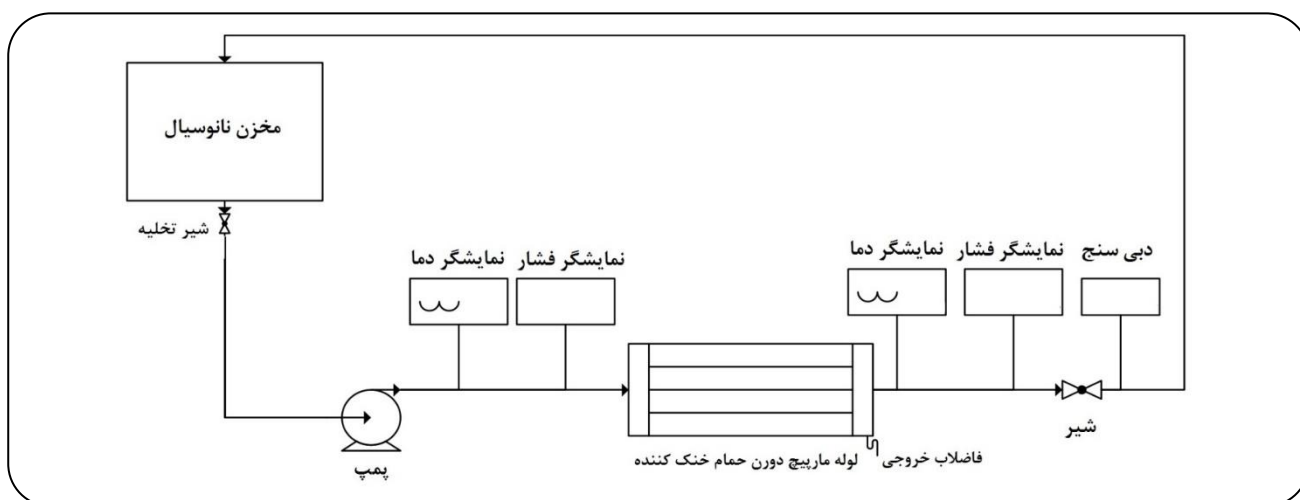
در این پژوهش روش الکتروشیمیایی برای ساخت ذره‌های گرافن استفاده شد [۱۹]. از الکتروکود استیل ضد زنگ به عنوان الکتروکود شمارنده و از فویل گرافیت به عنوان الکتروکود عمل کننده در محلول الکترولیتی (اسیدسولفوریک ۱ N) استفاده شد. به عبارت دیگر سر آند به الکتروکود استیل ضدزنگ و سر کاتد به الکتروکود گرافیت وصل و ولتاژی معادل ۶ V به دو سر الکترودها اعمال شد. با اعمال پتانسیل مثبت به الکتروکود گرافیت، یون‌های موجود در محلول به سمت الکتروکود گرافیت حرکت کردند و سبب بازشدن لایه‌های گرافیتی و سرانجام جدایش آن‌ها شدند. صفحه‌های معلق در محلول با استفاده از کاغذ صافی جدا شد، سپس چندین بار با آب مقطر شستشو داده شد تا اسید فزونی خارج شود. گرافن تولید شده درون یک بشر دارای محلول آب مقطر روی همزن مغناطیسی به مدت نیم ساعت هم‌زده شد و دوباره از کاغذ صافی عبور داده شد تا از حذف ناخالصی‌ها اطمینان پیدا شود. گرافن تولید شده به مدت ۲۴ ساعت درون آن ۷۵°C قرار گرفت تا آب فزونی آن تبخیر شود؛ سپس به مدت یک دقیقه درون کوره ۴۰۰°C قرار داده شد تا به طور کامل خشک و در اثر شوک گرمایی لایه‌ها از هم باز شوند.

به منظور تهیه گرافن اصلاح شده با سیلیکا، از روش معرفی شده توسط ژانگ و همکاران [۱۴] با اندکی تغییر استفاده شد. ۰/۵ گرم گرافن درون ۱۰۰ mL اتانول با استفاده از امواج فراصوت پخش و سپس داخل بالن ریخته شد. ۱۵ mL محلول آمینو پروپیل

(1) (Aminopropyl)triethoxysilane



شکل ۲- تصویر الف) گرافن و ب) گرافن-سیلیکا توزیع شده درون آب بعد از ۴۸ ساعت.



شکل ۳- نمایش الگوی سامانه آزمایشگاهی طراحی شده.

### روابط تجربی

آزمایش‌های اولیه با آب مقطر انجام شد تا نتیجه‌های به دست آمده برای عدد ناسلت (Nu) با داده‌های محاسبه شده توسط رابطه‌های موجود شامل معادله‌های نافون و وانگوانیز<sup>(۱)</sup> [۲۰]، مانلاپاز و چرچیل<sup>(۲)</sup> [۲۱]، دراوید<sup>(۳)</sup> [۲۲]، کلب و سیدر<sup>(۴)</sup> [۲۳] و شین و عبادیان<sup>(۵)</sup> [۲۴] مقایسه شود و درستی کارکرد سامانه آزمایشگاهی مورد ارزیابی و تأیید قرار گیرد. معادله‌های یاد شده به همراه شرایط استفاده از آنها توسط معادله‌های (۱) تا (۵) معرفی شده‌اند.

$$Nu = 27.358De^{0.287} Pr^{-0.949} \quad (1)$$

$$300 < De < 2200, \quad Pr \geq 5$$

شدت جریان در بازه‌ی ۵-۳۵ lit/min است. شایان ذکر است در بازه شدت جریان مذکور جریان در رژیم آرام قرار دارد. آب درون لوله ماریچ به طول ۱۰ متر از جنس مس که دارای قطر داخلی و بیرونی به ترتیب ۸ mm و ۹ mm جریان می‌یابد. با توجه به هدایت گرمایی بالای لوله مسی و نیز ضخامت کم آن می‌توان با تقریب خوبی دمای داخل لوله را با خارج آن یکسان در نظر گرفت. ماریچ مذکور درون محفظه مکعبی شکل مجهز به سردکن همراه با همزن، قرار گرفته است. در هر دبی جریان، پس از گذشت ۳۰ دقیقه و اطمینان از پایداری سامانه دمای دماسنج‌ها در بخش‌های ورودی و خروجی جریان، دمای دیواره (که ثابت است) و همچنین افت فشار نانوسیال ثبت شد.

(۱) Naphon and Wongwises

(۲) Manlapaz and Churchill

(۳) Dravid

(۴) Kalb and Seader

(۵) Xin and Ebadian

برای راستی‌آزمایی سامانه، افزون بر عدد  $Nu$  مقادیرهای افت فشار ( $\Delta P$ ) آب خالص نیز از روی دستگاه خوانده و با معادله تجربی زیر مقایسه شد [۲۷].

$$\Delta P = 16542 \dot{m}^{1.760} \quad (۸)$$

در معادله بالا  $\dot{m}$  شدت جریان جرمی جریان و  $\Delta P$  افت فشار سیال است.

عملکرد انتقال گرمای نانوسیال به وسیله ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی ( $h$ ) و عدد  $Nu$  که از روابط ۱۱ و ۱۲ محاسبه شدند، بررسی شد [۲۵].

$$h = \frac{q}{A_i \Delta T_{LMTD}} \quad (۱۱)$$

$$Nu = \frac{h D_i}{K_{nf}} \quad (۱۲)$$

در رابطه‌های بالا  $q$  نرخ انتقال گرما توسط سیال سرمایش،  $A_i$  مساحت دیواره لوله،  $\Delta T_{LMTD}$  متوسط لگاریتمی دما،  $D_i$  قطر درونی لوله و  $k_{nf}$  ضریب هدایت گرمایی نانوسیال است. نرخ انتقال گرما و دمای متوسط لگاریتمی به ترتیب از معادله‌های (۱۳) و (۱۴) محاسبه شد [۲۵]:

$$q = \dot{m} C_{p,nf} (T_i - T_o) \quad (۱۳)$$

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{h1} - T_{C2}) - (T_{h2} - T_{C1})}{\ln \left( \frac{T_{h1} - T_{C2}}{T_{h2} - T_{C1}} \right)} \quad (۱۴)$$

در معادله بالا  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال و  $\dot{m}$  شدت جریان جرمی است. با توجه به اینکه دمای ورودی و خروجی لوله سیال خنک کننده تقریباً با دمای دیواره لوله برابر است یعنی  $T_{C1} = T_{C2} = T_w$ ، می‌توان معادله (۱۴) را به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_i - T_w) - (T_o - T_w)}{\ln \left( \frac{T_i - T_w}{T_o - T_w} \right)} \quad (۱۵)$$

در معادله بالا،  $T_i$  و  $T_o$  به ترتیب دمای ورودی و خروجی سیال و  $T_w$  دمای دیواره لوله هستند.

ویژگی‌های فیزیکی مورد استفاده برای نانوسیال شامل جرم ویژه، گرانشی، گرمای ویژه و ضریب هدایت گرمایی از

$$Nu = \left\{ \left[ \frac{48}{11} + \frac{51}{11 \left( 1 + \frac{1342}{Pr He^{0.2}} \right)^2} \right]^3 + 1.86 \left[ \frac{He}{\left( 1 + \frac{1.15}{Pr} \right)} \right]^2 \right\}^{1/3} \quad (۲)$$

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

$$Nu = (0.76 + 0.65 De^{0.5}) Pr^{0.175} \quad (۳)$$

$50 < De < 2000$  ,  $5 < Pr < 175$

$$Nu = 0.836 De^{0.5} Pr^{0.7} \quad (۴)$$

$De < 800$  ,  $7 < Pr < 5$

$$Nu = (2.153 + 0.318 De^{0.643}) Pr^{0.175} \quad (۵)$$

$20 < De < 2000$  ,  $0.7 < Pr < 175$  ,  $0.02 < D_i/D_{avg} < 0.08$

در معادله‌های بالا  $b$  فاصله بین دوره‌های لوله ماریچ معادل  $De$  عدد دین است که از معادله (۶) به دست می‌آید.

$$De = Re \left( \frac{D_i}{D_{avg}} \right)^{0.5} \quad (۶)$$

در معادله بالا  $Re$  عدد رینولدز،  $D_i$  قطر داخلی لوله (۸ mm) و  $D_{avg}$  قطر متوسط است که از معادله (۷) به دست می‌آید.

$$D_{avg} = \frac{D_{min} + D_{max}}{2} \quad (۷)$$

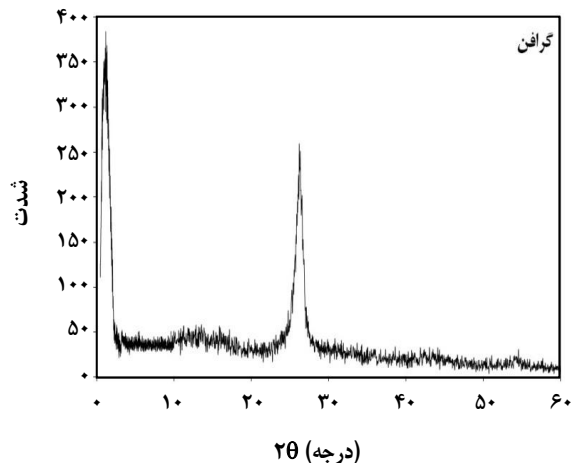
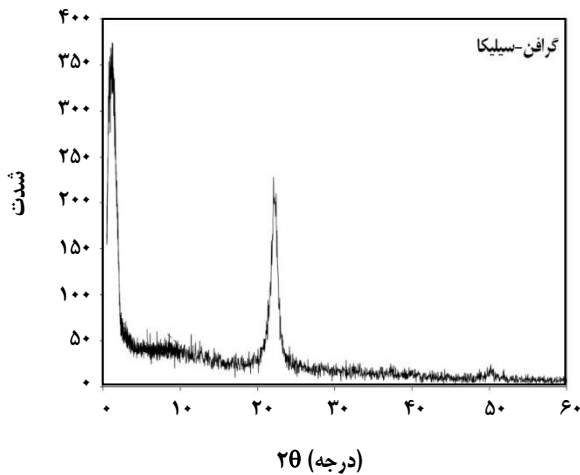
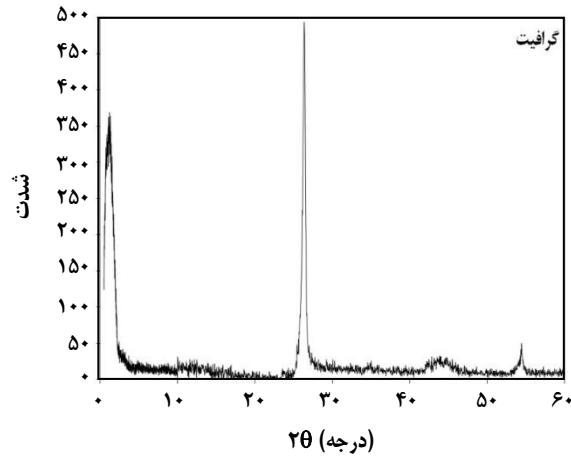
در معادله بالا،  $D_{min}$  قطر اولین حلقه (۱۵۰ mm) و  $D_{max}$  قطر آخرین حلقه (۳۶۰ mm) لوله ماریچ است.

برای محاسبه عدد  $Re$  از معادله (۸) استفاده شد که در آن  $u$  سرعت نانوسیال است که از تقسیم شدت جریان حجمی بر سطح مقطع لوله به دست می‌آید [۲۵].

$$Re = \frac{\rho_{nf} u D_i}{\mu} \quad (۸)$$

شایان ذکر است که عدد رینولدز درون لوله ماریچ  $Re_c$  از معادله (۹) به دست می‌آید که طبق آن برای این که جریان در بازه آرام قرار گیرد باید عدد رینولدز کم‌تر از ۸۰۰۰ باشد [۲۶].

$$Re_c = 2100 \left( 1 + 12 \sqrt{\frac{D_i}{D_{ave}}} \right) \quad (۹)$$



شکل ۴ - طیف XRD مربوط به گرافیت، گرافن و گرافن - سیلیکا.

معادله‌های (۱۶) تا (۱۹) با توجه به ویژگی‌های سیال پایه و نانوذره‌ها در دمای متوسط لگاریتمی محاسبه شدند [۳، ۲۸، ۲۹].

$$\rho_{nf} = \rho_p \phi + (1 - \phi) \rho_{bf} \quad (16)$$

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} (1 + 2.5\phi) \quad (17)$$

$$Cp_{nf} = \frac{\phi \rho_p Cp_p + (1 - \phi) \rho_{bf} Cp_{bf}}{\rho_{nf}} \quad (18)$$

$$K_{nf} = \frac{K_p + 2K_{bf} + 2\phi(K_p - K_{bf})}{K_p + 2K_{bf} - \phi(K_p - K_{bf})} K_{bf} \quad (19)$$

در روابط فوق  $\phi$  نسبت حجمی نانوذره‌ها است؛ همچنین ویژگی‌های فیزیکی با زیرنویس p مربوط به نانوذره، با زیرنویس bf مربوط به سیال پایه و با زیرنویس nf مربوط به نانوسیال است.

## نتیجه‌ها و بحث

### بررسی ویژگی‌های گرافن-سیلیکا تولید شده

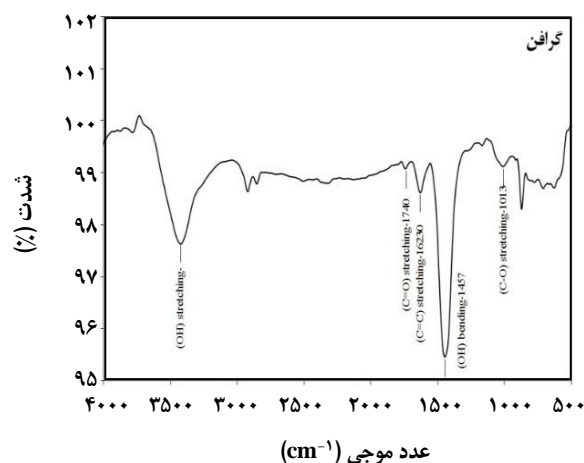
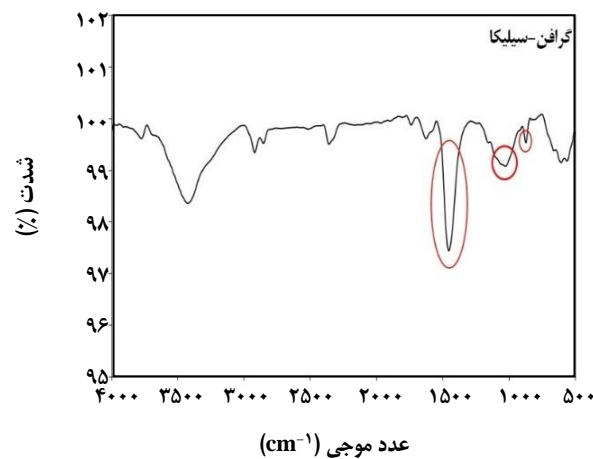
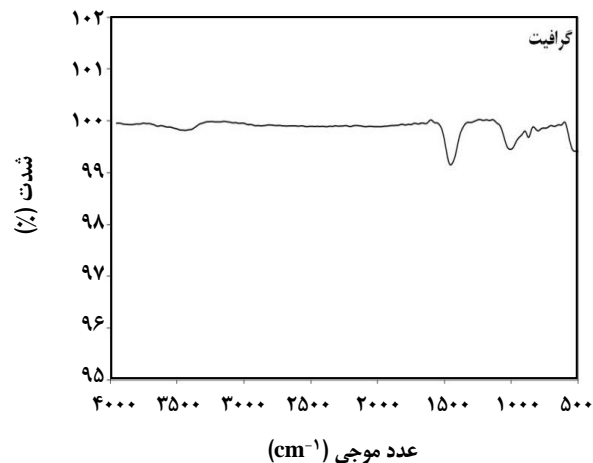
برای تهیه نانوسیال ابتدا آزمون‌های گوناگونی بر روی گرافن سیلیکا تولید شده انجام پذیرفت تا کیفیت آن مورد بررسی و تأیید قرار گیرد. تصویر پراش پرتوی ایکس گرافن - سیلیکا تولید شده به روش الکتروشیمیایی در شکل ۴ آمده است. مطابق شکل گرافیت یک پیک شدید در  $2\theta = 26.5^\circ$  نشان داده است که طبق معادله براگ متناظر است با فاصله بین لایه‌های  $3.35 \text{ \AA}$ . این پیک در گرافن با شدت کمتر تکرار و در مورد گرافن-سیلیکا پیک به  $23.61^\circ$  جابه‌جا شده است. جابه‌جایی موقعیت پیک که نشان دهنده افزایش فاصله بین لایه‌های در گرافن است می‌تواند به دلیل نفوذ ذره‌های سیلیکا به فضای بین لایه‌ای در گرافن باشد.

به منظور بررسی ساختار گرافن-سیلیکا تولید شده طیف FTIR از گرافیت، گرافن و گرافن-سیلیکا تهیه و در شکل ۵ ارائه شد. همان‌گونه که دیده می‌شود پیک قابل تشخیصی در نمودار گرافیت وجود ندارد. گرافن در موقعیت‌های زیر پیک نشان داده است:  $3470 \text{ cm}^{-1}$  (مربوط به پیوند کششی O-H)،  $1740 \text{ cm}^{-1}$  (مربوط به پیوند کششی C=O)،  $1630 \text{ cm}^{-1}$  (مربوط به پیوند بخش‌های اکسید نشده گرافیت)،  $1457 \text{ cm}^{-1}$  (مربوط به پیوند خمشی O-H) و  $1013 \text{ cm}^{-1}$  (مربوط به پیوند کششی C-O). همه پیک‌هایی که در طیف گرافن مشاهده می‌شود در طیف گرافن-سیلیکا با اندکی تغییر و جابه‌جایی تکرار شده است. به عنوان مثال یک پیک جدید در  $810 \text{ cm}^{-1}$  ایجاد شده است که مربوط به پیوند کششی Si-OH است.

همچنین، شدت پیک در  $1500\text{ cm}^{-1}$  به دلیل برهم‌کنش سیلیسیم (پیوند Si-H) به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. همچنین شدت پیک در  $1013\text{ cm}^{-1}$  به دلیل تشکل پیوندهای Si-O-C و Si-O-Si افزایش یافته است [۱۴].

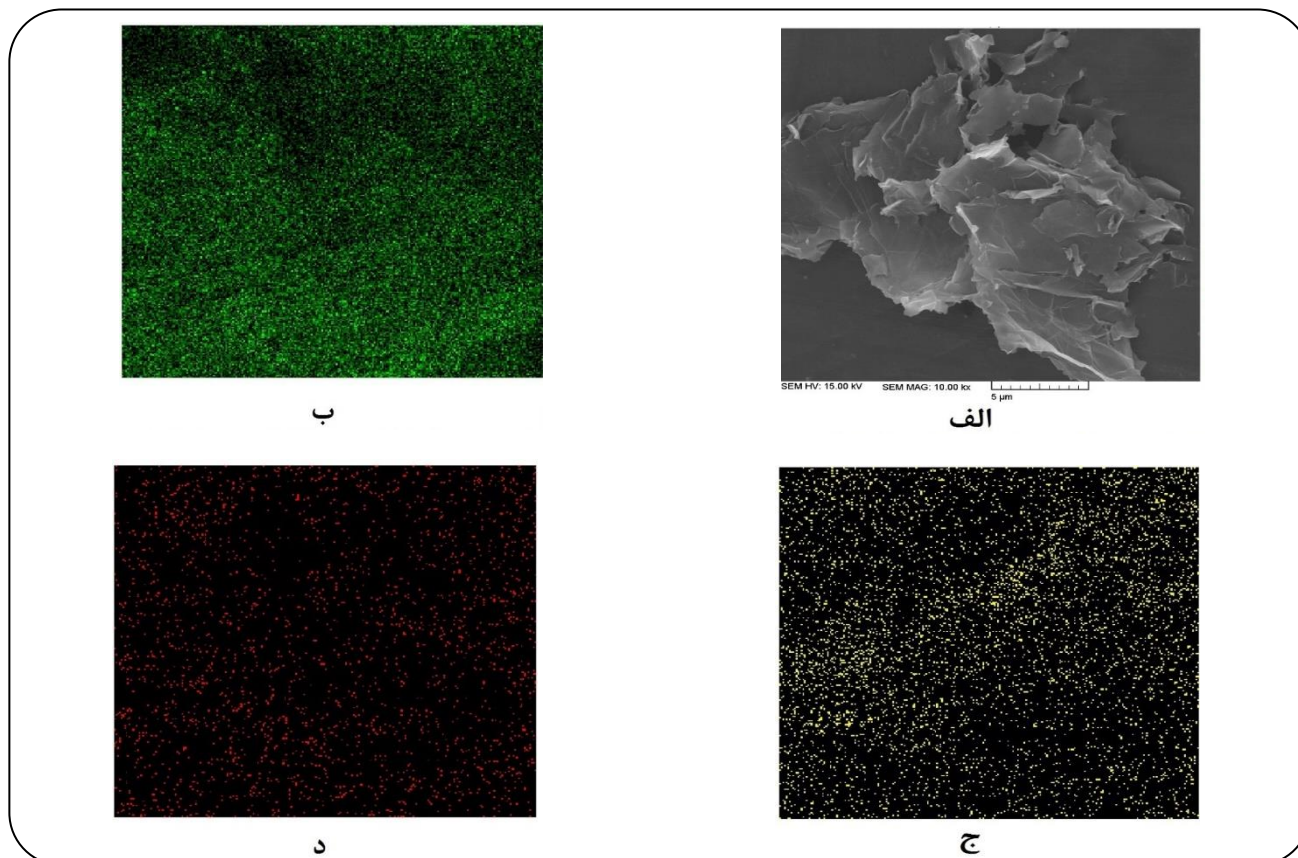
به منظور بررسی ریخت شناسی گرافن - سیلیکا تولید شده از تصویربرداری SEM استفاده شد (شکل ۶الف). همان‌گونه که دیده می‌شود سطح گرافن تولید شده چروکیده و نامنظم است که مطابقت خوبی با ساختار طبیعی صفحه‌های گرافنی دارد. همچنین ترکیب‌های موجود در گرافن - سیلیکا با استفاده از طیف سنجی (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) EDS بررسی شدند تا حضور و یا عدم حضور سیلیکا در ساختار گرافن مشخص شود [۳۰]. (شکل ۶). همان‌گونه که دیده می‌شود گرافن - سیلیکا شامل عناصر کربن، اکسیژن و سیلیکا است. همچنین درصد وزنی هر کدام از این عناصر به ترتیب عبارتند از: ۸۷/۴۴، ۱۱/۰۲ و ۱/۵۴٪. به عبارت دیگر در ساختار گرافن - سیلیکا تولید شده سیلیکا موجود و درصد آن نیز بسیار کم است؛ بنابراین می‌توان با تقریب به نسبت خوبی ویژگی‌های فیزیکی گرافن - سیلیکا را همانند با گرافن خالص در نظر گرفت.

برای بررسی دقیق‌تر ریخت شناسی گرافن و گرافن سیلیکا تولید شده و همچنین دیدن وضعیت لایه‌های گرافنی تصویرهای TEM از نمونه‌ها تهیه و در شکل ۷ نشان داده شد. همان‌گونه که دیده می‌شود تصویر TEM تهیه شده از گرافیت تیره رنگ است. ضخامت تک لایه‌های گرافنی حدود  $0.142\text{ nm}$ ، فاصله بین آن‌ها  $0.335\text{ nm}$  و تعداد لایه‌ها در گرافیت حدود ۳۰ است [۳۱]. تیرگی دیده شده در تصویرهای TEM گرافیت به دلیل وجود تعداد زیاد لایه‌های گرافنی است که اجازه عبور الکترون را نمی‌دهند؛ درحالی که تعداد لایه‌ها در گرافن بین ۵ تا ۱۰ عدد گزارش شده است بنابراین انتظار می‌رود عبور الکترون‌ها در گرافن نسبت به گرافیت به تعداد بیشتری صورت پذیرد. در تصویر TEM تهیه شده از گرافن همان‌گونه که دیده می‌شود تیرگی کم‌تر شده است؛ به عبارت دیگر، می‌توان ادعا نمود روش الکتروشیمیایی به کار گرفته شده در این پژوهش به طور موفقیت آمیزی منجر به تولید چندلایه‌های گرافنی (کم‌تر از ۱۰ لایه) شده است. در تصویر TEM مربوط به گرافن - سیلیکا افزون بر حفظ شفافیت تصویر، نقطه‌های تیره دایره‌ای شکلی نیز به خوبی قابل دیدن است که نشان دهنده حضور سیلیکا در ساختار گرافن است. چگالی ذره‌های سیلیکا بیش‌تر از گرافن است؛ بنابراین هنگام تصویربرداری الکترون‌ها

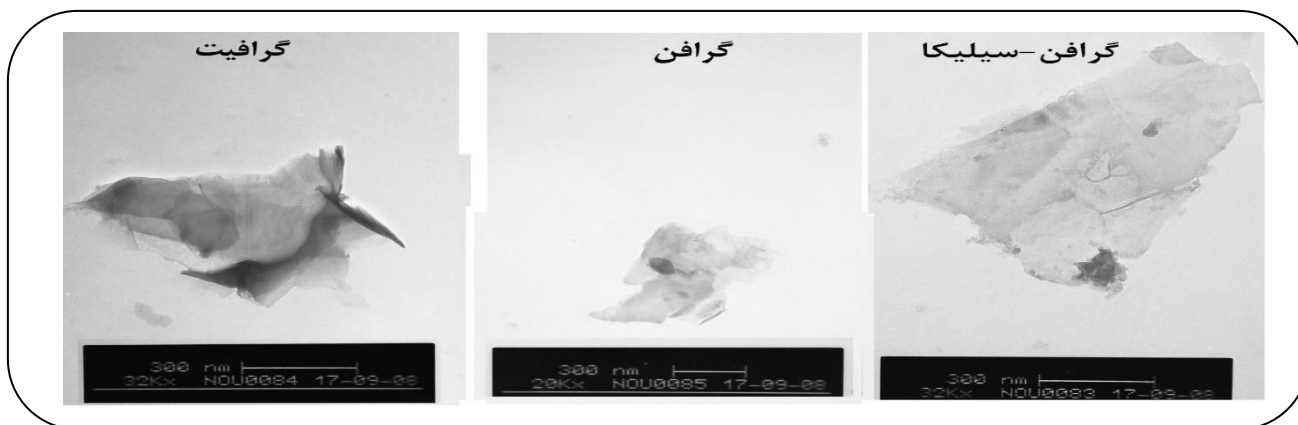


شکل ۵ - نمودار FT-IR مربوط به گرافیت، گرافن و گرافن - سیلیکا.





شکل ۶ - الف) تصویر SEM و ب، ج، د) آزمون EDS از گرافن-سیلیکا (دانشیته عنصرهای کربن (ب)، اکسیژن (ج) و سیلیکا (د) در ساختار نمونه به صورت کیفی نشان داده شده است).



شکل ۷ - تصویرهای TEM تهیه شده از گرافیت، گرافن و گرافن - سیلیکا.

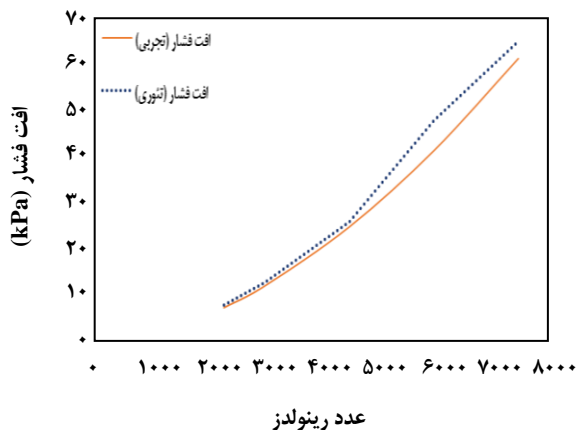
#### راستی آزمایشی سامانه آزمایشگاهی

در این بخش با مقایسه مقادیر عدد ناسلت و نیز افت فشار به دست آمده برای آب خالص از روی رابطه‌های تجربی موجود با مقادیرهای همانند به دست آمده از سامانه طراحی شده،

نمی‌توانند از این ذره‌ها عبور کنند و به صورت نقطه‌های تیره مشخص می‌شوند. نکته دیگری که از تصاویر TEM قابل دستیابی است این است که طی فرایند تولید، ساختار صفحه‌ای گرافیت دست نخورده باقی مانده و تنها تعداد لایه‌ها کم شده است.



توانایی این سامانه مورد راستی آزمایی قرار گرفته است.



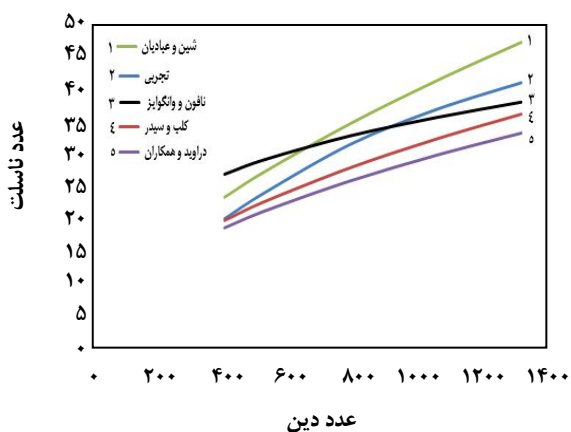
شکل ۸ - افت فشار آب بر حسب عدد رینولدز برای جریان آب در درون لوله ماریچ با دمای ثابت دیواره.

### راستی آزمایی افت فشار

افت فشار جریان آب از روی فشارسنج‌های تعبیه شده بر روی سامانه خوانده شد؛ سپس داده‌ها با مقادیر محاسبه شده توسط معادله (۱۰) مقایسه و نتیجه‌ها در شکل ۸ ارایه شد. شایان ذکر است که افت فشار در شدت جریان‌های گوناگون (عددهای رینولدز گوناگون) به دست آمده است. همان‌گونه که دیده می‌شود در همه عددهای رینولدز اختلاف کمی بین مقادیر به دست آمده از دستگاه و مقادیر تجربی وجود دارد؛ به عبارت دیگر مقادیر به دست آمده توسط دستگاه برای افت فشار می‌تواند قابل استناد باشد.

### راستی آزمایی عدد ناسلت

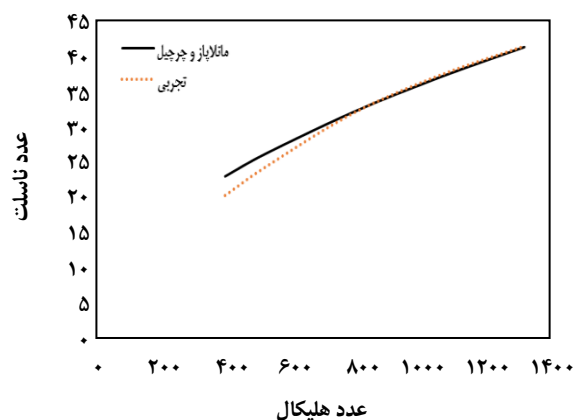
به منظور بررسی توانایی سامانه در تعیین دقیق و درست ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی نانو سیال، عدد ناسلت آب خالص از روی رابطه‌های تجربی (معادله‌های ۱ تا ۵) محاسبه شد و با مقادیر به دست آمده از سامانه طراحی شده برای جریان آرام با شرط مرزی دما ثابت مقایسه شد. نتیجه‌ها در شکل‌های ۹ و ۱۰ قابل دیدن است. شایان ذکر است که این مقایسه در شدت جریان‌های گوناگون که متناظر است با عددهای دین و هلیکال گوناگون صورت پذیرفت. در شکل ۹ مقادیر عدد ناسلت بر حسب عدد دین برای جریان آب در داخل لوله ماریچ با دمای ثابت دیواره و شکل ۱۰ مقادیر عدد ناسلت بر حسب عدد هلیکال برای جریان آب در درون لوله ماریچ با دمای ثابت دیواره را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود مطابقت خوبی بین نتیجه‌های تجربی به دست آمده و نتیجه‌های تئوری محاسبه شده از معادله‌های ذکر شده وجود دارد؛ به عبارت دیگر می‌توان نتیجه گرفت که سامانه طراحی شده برای جریان آرام با شرط مرزی دیواره ثابت به خوبی قادر به پیش بینی عدد ناسلت (ضریب انتقال گرما جابه‌جایی) است.



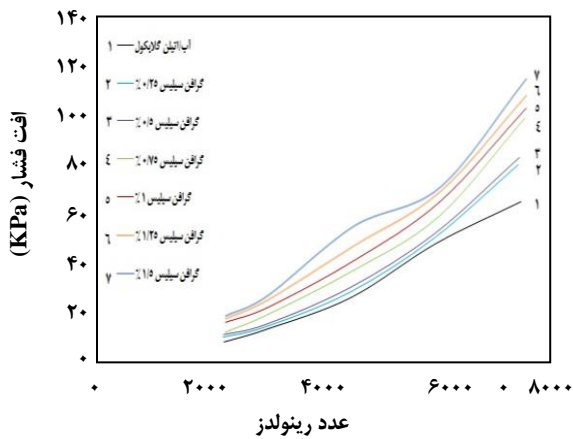
شکل ۹ - عدد ناسلت بر حسب عدد دین برای جریان آب در درون لوله ماریچ با دمای ثابت دیواره.

### نتیجه‌های تجربی برای نانوسیال

در این قسمت نتیجه‌های بررسی ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی، افت فشار، عدد ناسلت و نرخ انتقال گرما برای نانو سیال با غلظت‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۲۵ و ۱/۵٪ وزنی از گرافن - سیلیکا در بازه‌ی عدد دین ۴۰۰-۱۴۰۰ (جریان آرام) ارایه شده است تا تأثیر غلظت نانوذره‌ها روی پارامترهای یاد شده مشخص شود.



شکل ۱۰ - عدد ناسلت بر حسب عدد هلیکال برای جریان آب در درون لوله ماریچ با دمای ثابت دیواره.



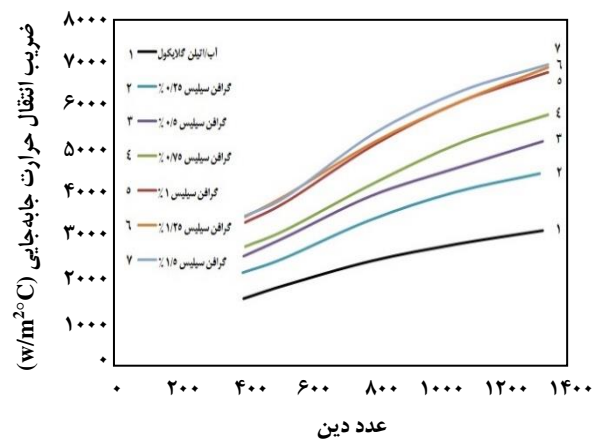
شکل ۱۲ - افت فشار محوری جریان سیال پایه و نانوسیال درصدهای وزنی گوناگون از گرافن-سیلیکا بر حسب عدد رینولدز.

#### محاسبه افت فشار

رابطه بین افت فشار بر حسب عدد رینولدز برای سیال پایه و نیز نانوسیال با درصدهای وزنی گوناگون از گرافن - سیلیکا در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان گونه که دیده می شود با افزایش غلظت نانوسیال و همچنین عدد رینولدز (دبی جریان) میزان افت فشار داخل لوله افزایش یافته است. به طور نمونه در بالاترین عدد رینولدز در هر آزمایش با افزایش غلظت نانوسیال از ۰/۲۵ به ۱٪ میزان افت فشار درون لوله ماریچی از ۱۰ به KPa ۱۶ افزایش نشان می دهد. دلیل این رفتار، افزایش جرم حجمی و گرانی سیال به خاطر حضور نانوذره ها است. افزون بر آن پراکندگی و حرکت های تصادفی نانوذره ها به خصوص در نزدیک دیواره لوله منجر به تشدید نرخ تبادل ممتوم بین نانوذره ها می شود. این تبادل ممتوم نیز خود منجر به افزایش میزان افت فشار محوری جریان درون لوله می شود.

#### محاسبه عدد ناسلت

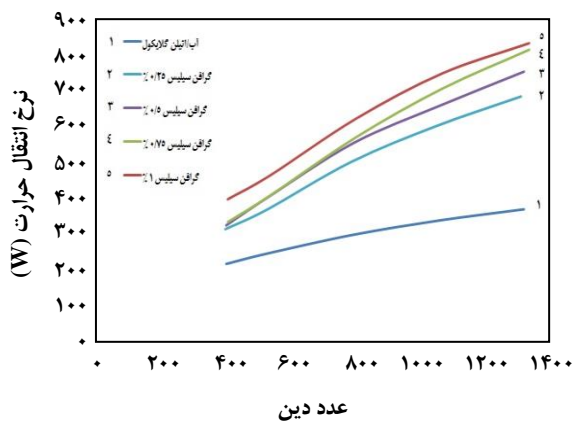
به منظور بررسی تأثیر همزمان حضور نانوذره بر روی ضریب انتقال گرما جابه جایی و نیز ضریب هدایت گرمایی، عدد ناسلت در سیال پایه و نیز نانوسیال با درصدهای گوناگون از نانوذره در عددهای دین گوناگون (شدت جریان های گوناگون) محاسبه و نتیجه ها در شکل ۱۳ ارائه شد. هر چند حضور نانوذره ها منجر به افزایش ضریب هدایت گرمایی می شود که طبق معادله (۱۲) عامل کاهش عدد ناسلت است؛ ولی همان گونه که دیده می شود در همه



شکل ۱۱ - ضریب انتقال گرمای جابه جایی سیال پایه و نانوسیال با درصدهای وزنی گوناگون از گرافن - سیلیکا بر حسب عدد دین.

#### محاسبه ضریب انتقال گرمای جابه جایی

ضریب انتقال گرما جابه جایی یکی از فاکتورهای بسیار مهم در بحث انتقال گرما است. این ضریب از معادله (۱۱) برای سیال پایه و نانوسیال با غلظت های گوناگون از گرافن - سیلیکا در عددهای دین گوناگون محاسبه و نتیجه ها در شکل ۱۱ برای مقایسه ارائه شد. همان گونه که دیده می شود با افزایش عدد دین در همه غلظت های نانوذره ضریب انتقال گرمای جابه جایی افزایش یافته است؛ همچنین در هر عدد دین ثابت با افزایش درصد وزنی نانوذره نیز ضریب انتقال گرمای جابه جایی افزایش یافته است. همان گونه که اشاره شد افزایش عدد دین متناظر با افزایش سرعت سیال و در نتیجه افزایش سرعت جابه جایی توده های آن است. این افزایش در سرعت جابه جایی توده های سیال، انتقال گرما جابه جایی و به تبع آن ضریب انتقال گرما جابه جایی را بهبود می دهد. از سوی دیگر در صورت توزیع مناسب و یکنواخت نانوذره های درون سیال پایه، انتقال گرما بهتر انجام می پذیرد که متناظر با بهبود ضریب انتقال گرما جابه جایی است. این بهبود در همه ی درصدهای وزنی نانوذره ها قابل دیدن است. البته شایان ذکر است که این بهبود در درصدهای کمتر از ۱٪ چشم گیرتر است. از آنجایی که حضور نانوذره ها منجر به افزایش افت فشار و در نتیجه افزایش هزینه انتقال سیال می شود، کمترین میزان نانوذره که منجر به بهترین افزایش انتقال گرما می شود مد نظر است. بنابراین به نظر می رسد انتخاب ۱٪ وزنی نانوذره گزینه مناسبی باشد.

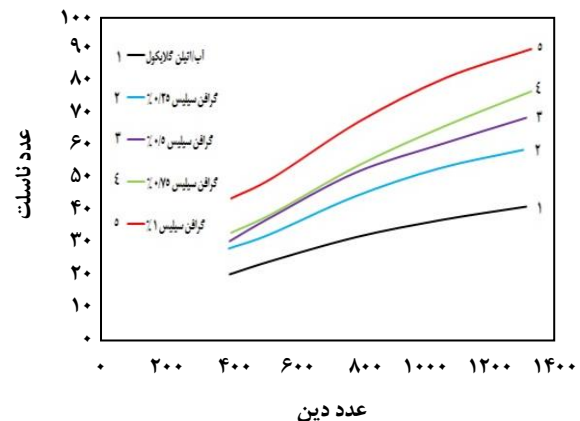


شکل ۱۴ - نرخ انتقال گرمای سیال پایه و نانوسیال با درصدهای وزنی مختلف از گرافن-سیلیکا بر حسب عدد دین.

با شدت جریان‌های بالا اثرهای پراکندگی و حرکت‌های نامنظم و توزیع نانوذره‌ها در سیال تشدید می‌شود؛ این امر می‌تواند باعث برهم‌زدن لایه مرزی گرمایی تشکیل یافته و نازک کردن و سرانجام تشکیل گرادیان دمایی بالاتر در مجاورت دیواره و پیرو آن افزایش نرخ انتقال گرما شود.

### نتیجه‌گیری

از جمله روش‌های افزایش ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی در سیال‌ها، استفاده از نانوذره‌های درون سیال پایه یا به عبارت دیگر استفاده از نانوسیال‌ها است. در پژوهش حاضر طراحی و ساخت نوعی نانوسیال متشکل از آب/اتیلن‌گلیکول/گرافن - سیلیکا که پتانسیل استفاده در تجهیزهای انتقال گرما را دارا است گزارش شد. گرافن با استفاده از روش الکتروشیمیایی تولید و خاصیت آب دوستی آن که منجر به توزیع بهتر درون آب می‌شود، به وسیله سیلیکا اصلاح شد. طیف‌های FT-IR و XRD تهیه شده از گرافن - سیلیکا اصلاح شده در کنار تصویرهای SEM و TEM تولید موفقیت آمیز آن را تأیید نمود. از گرافن - سیلیکا تولید شده با درصدهای وزنی گوناگون شامل ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱/۲۵ و ۱/۵٪ برای تولید نانوسیال بر پایه آب/اتیلن‌گلیکول استفاده شد و تأثیر حضور آن بر بهبود ویژگی‌های انتقال گرما در یک تأثیر لوله ماریپیچ مجهز به نشانگر دما و فشار و نیز شدت جریان سنج در شرایط دمایی دیواره ثابت و نیز جریان آرام در سیکل سرمایش بررسی شد. نتیجه‌ها مشخص ساخت که حضور نانوذره درون سیال پایه منجر به بهبود ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی می‌شود به طوری



شکل ۱۳ - عدد ناسلت برای سیال پایه و نانوسیال با درصدهای وزنی گوناگون از گرافن-سیلیکا بر حسب عدد دین.

درصدهای وزنی از نانوذره، عدد ناسلت افزایش یافته است؛ به عنوان مثال در عدد دین ۸۰۰، با افزایش غلظت نانوسیال از ۰/۲۵ به ۱٪ عدد ناسلت از ۴۴/۲۹ به ۶۷/۴۹ افزایش یافته است (حدود ۵۰٪ بهبود). به عبارت دیگر تأثیر حضور نانوذره بر افزایش ضریب انتقال گرما جابه‌جایی بسیار بیش‌تر از تأثیر آن بر افزایش ضریب هدایت گرمایی بوده است.

### محاسبه نرخ انتقال گرما

نرخ انتقال گرما از سیال پایه و نیز نانوسیال با درصدهای وزنی مختلف از روی معادله (۱۳) محاسبه و نتیجه‌ها بر حسب عدد دین (شدت جریان‌های گوناگون) در شکل ۱۴ نمایش داده شد. همان‌گونه که دیده می‌شود نرخ انتقال گرما نانوسیال از سیال پایه بیش‌تر است. در واقع استفاده از نانوذره‌ها در سیال پایه سبب افزایش نرخ انتقال گرما شده است؛ همچنین هرچه غلظت نانوذره‌های موجود در نانوسیال افزایش یافته است، نرخ انتقال گرما نسبت به سیال پایه افزایش بیش‌تری نشان داده است. به عنوان مثال با افزودن ۰/۲۵٪ نانوذره به سیال پایه میزان انتقال گرما حدود ۶۵٪ افزایش یافته است. دلیل اصلی این بهبود ناشی از افزایش چشمگیر ضریب انتقال گرما جابه‌جایی نانوسیال نسبت به سیال پایه در اثر حضور گرافن - سیلیکا است. از سوی دیگر، نرخ انتقال گرما با افزایش عدد دین نیز افزایش یافته است که این افزایش می‌تواند به دلیل پدیده تشدید فرایند تبادل انرژی در سیال ناشی از حرکت‌های براونی و اتفاقی نانوذره‌ها در سرعت‌های بالاتر (شدت جریان و یا عدد دین بالاتر) باشد. در جریان‌هایی

$D_{min}$	قطر اولین حلقه لوله ماریچ	که با افزودن تنها ۰/۲۵٪ نانوذره به سیال پایه میزان ضریب هدایت
$D_{max}$	قطر آخرین حلقه لوله ماریچ	گرمایی ۶۵٪ افزایش یافت. این بهبود به توزیع یکنواخت و همگن
$b$	فاصله بین دورهای لوله ماریچ	نانوذره درون سیال پایه نسبت داده شد. بهبود ضریب انتقال گرمای
$\Delta P$	افت فشار، kPa	جابه‌جایی همراه با افزایش افت فشار بود که البته میزان آن در
$\Delta T$	تغییرهای دما، °C	محدود گزارش شده توسط سایر پژوهشگران بود. به طور کلی
$\rho$	دانسیته، kg/m <sup>3</sup>	نتیجه‌های این پژوهش پتانسیل استفاده از نانوسیال
$\phi$	کسر حجمی نانوذره‌ها	آب/اتیلن‌گلیکول/گرافن - سیلیکا برای استفاده در تجهیزهای
$\mu$	ویسکوزیته، Pa.s	انتقال گرما را ثابت می‌کند.
$T_h$	دمای سیال گرم، °C	
$T_c$	دمای سیال سرد، °C	
LMTD	متوسط لگاریتمی	<b>فهرست نمادها</b>
$A$	سطح انتقال گرما، m <sup>2</sup>	w دیواره
$\dot{m}$	شدت جریان جرمی، kg/s	eff مؤثر
$C_p$	ظرفیت ویژه گرمایی، J/Kg K	in ورودی-داخلی
$h$	ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی، W/m <sup>2</sup> K	out خروجی-بیرونی
$K$	ضریب هدایت گرمایی، W/m K	nf نانوسیال
$U_i$	ضریب کلی انتقال گرما، W/m <sup>2</sup> K	bf سیال پایه
$Nu$	عدد ناسلت (بدون بعد)	P نانو ذره
$Pr$	عدد پراتل (بدون بعد)	ave متوسط
$Re$	عدد رینولدز (بدون بعد)	L طول لوله، m
$De$	عدد دین (بدون بعد)	R شعاع
$He$	عدد هلیکال (بدون بعد)	D قطر لوله، m
		$R_n$ متوسط شعاع خمیدگی
		n تعداد دورهای لوله خم شده
		$\alpha$ نرخ افزایش شعاع

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۲۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۷/۱۶

## مراجع

- [1] Sandhya D., Reddy M.C.S., Rao V.V., [Improving the Cooling Performance of Automobile Radiator with Ethylene Glycol Water-Based TiO<sub>2</sub> Nanofluids](#), *Int. Commun. Heat Mass Trans.*, **78**: 121-126 (2016).
- [2] Subhedar D.G, Ramani B.M, Gupta A., [Experimental Investigation of Heat Transfer Potential of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Water-Mono Ethylene Glycol Nanofluids as a Car Radiator Coolant](#), *Case Studies Therm. Eng.*, **11**: 26-34 (2018).
- [3] Raja M., Vijayan R., Dineshkumar P., Venkatesan M., [Review on Nanofluids Characterization, Heat Transfer Characteristics and Applications](#), *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **64**: 163-173 (2016)

- [4] Ali Akbari O., Karimipour A., Toghraie Semiromi D., Zarringhalam M., Ahmadi Sheikh Shabani G., [Experimental Investigation of the Effect of Suspended Nanoparticles into Conventional Fluid on the Heat Transfer Improvement](#), *J. Solid Mechan. Eng.* **9(2)**: 209-220 (2016).
- [۵] ایزدخواه، میرشهاب‌الدین؛ عرفان نیا، حمید؛ مرادخانی، حامد، [بررسی خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیالات بر پایه آب - اتیلن‌گلیکول با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی دینامیک مولکولی غیرتعادلی و دینامیک سیالات محاسباتی، ماهنامه علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، \(۷\)۱۶: ۱۵۳ تا ۱۶۲ \(۱۳۹۵\)](#).
- [6] Wang X.Q., Mujumdar A.S., [Heat Transfer Characteristics of Nanofluids: A Review](#), *Int. J. Therm. Sci.*, **46(6)**: 1-19 (2007).
- [7] Nourafkan E., Karimi G., Moradgholi J, [Experimental Study of Laminar Convective Heat Transfer and Pressure Drop of Cuprous Oxide/Water Nanofluid Inside a Circular Tube](#), *Exp. Heat Transfer*, **28(1)**: 58-68 (2015).
- [۸] کاظمی بیدختی، امین، [اهمیت نانوسیالات دارای نانولوله‌های کربنی اصلاح سطح شده در افزایش توان گرمایی مبدل‌های پوسته لوله و صفحه‌ای، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، \(۳\)۳۸: ۲۴۳ تا ۲۵۲ \(۱۳۹۸\)](#).
- [9] Sadeghinezhad E., Mehrali M., Saidur R., Mehrali M., Tahani Latibari S., Akhiani A.R., Metselaar H.S.C., [A Comprehensive Review on Graphene Nanofluids: Recent Research, Development and Applications](#), *Energy Convers. Manag.*, **111**: 466-487 (2016).
- [10] Chen L., Xie H, [Silicon Oil Based Multi-Walled Carbon Nano Tubes Nano Fluid with Optimized Thermal Conductivity Enhancement](#), *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, **352(1-3)**: 136-140 (2009).
- [11] Sun B., Zhou G., Zhang H., [Synthesis, Functionalization, and Applications of Morphology-Controllable Silica-Based Nanostructures: A Review](#), *Prog. Solid State Chem.*, **44(1)**: 1-19 (2016).
- [12] Dume B., [Carbon Sheets Offer Cool Solution for Computers](#), *Science*, **1**: 35-42 (2010).
- [13] Yang K., Chen B., Zhu L., [Graphene-Coated Materials Using Silica Particles as a Framework for Highly Efficient Removal of Aromatic Pollutants in Water](#), *Sci. Rep.* **5**: 1-13 (11641) (2015).
- [14] Zhang W.L., Choi H.J., [Silica-Graphene Oxide Hybrid Composite Particles and Their Electroresponsive Characteristics](#), *Langmuir* **28**: 7055-7062 (2012).
- [15] Kole M., Dey T.K., [Investigation of Thermal Conductivity, Viscosity, and Electrical Conductivity of Graphene-Based Nanofluids](#), *J. Appl. Phys.* **113**: (084307) (2013).
- [16] Sadri R., Hosseini M., Kazi, S.N., Bagheri S., Zubir N., Ahmadi G., Dahari M., Zaharini T., [A Novel, Eco-Friendly Technique for Covalent Functionalization of Graphene Nanoplatelets and the Potential of Their Nanofluids for Heat Transfer Applications](#), *Chem. Phys. Lett.* **675**: 92-97 (2017).

- [17] Zhang H., Wang S., Lin Y., Feng M., Wu Q., [Stability, Thermal Conductivity, and Rheological Properties of Controlled Reduced Graphene Oxide Dispersed Nanofluids](#), *Appl. Therm. Eng.* **119**: 132–139 (2017)
- [18] Rabbani Esfahani M., Mohseni Languri E., [Exergy Analysis of a Shell-And-Tube Heat Exchanger Using Graphene Oxide Nanofluids](#), *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **83**: 100–106 (2017)
- [19] Tiwari S.K., Huczko A., Oraon R., De Adhikari A., Nayak G.C., [Facile Electrochemical Synthesis of Few Layered Graphene from Discharged Battery Electrode And its Application for Energy Storage](#), *Arab. J. Chem.*, **10**: 556-565 (2017).
- [20] Naphon P., Wongwises S., [A review of Flow and Heat Transfer Characteristics in Curved Tubes](#), *Renew. Sust. Energ. Rev.* **64**: 163-173 (2016).
- [21] Singh P., Sharma P., Gupta R., Wanchoo R.K., [Heat Transfer Characteristics of Propylene Glycol/Water Based Magnesium Oxide Nanofluid Flowing Through Straight Tubes and Helical Coils](#), *J. Therm. Eng.* **4(1)**: 1737-1755 (2018).
- [22] Austen D.S., Soliman H.M., [Laminar Flow and Heat Transfer in Helically Coiled Tubes with Substantial Pitch](#), *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **1(2)**: 183–194 (1998).
- [23] Kalb C.E., Seader J.D., [Fully Developed Viscous Flow Heat Transfer in Curved Circular Tubes with Uniform Wall Temperature](#), *AIChE J.*, **20**: 340-346 (1974).
- [24] Xin R.C., Ebdadian M.A., [The Effects of Prandtl Numbers on Local and Average Convective Heat Transfer Characteristics in Helical Pipes](#), *J. Heat Transf.* **119**: 467–473 (1997).
- [25] Lightfoot E.N., Bird R.B., Stewart W.E., "Transport Phenomena", John Wiley & Sons Inc., New Yorck (2002).
- [26] Ali S., Haider Zaidi A., [Head Loss and Critical Reynolds Numbers for Flow in Ascending Equiangular Spiral Tube Coils](#), *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* **18(2)**: 349–353 (1979).
- [27] Duangthongsuk W., Wongwises S., [An Experimental Investigation on the Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Nanofluid Flowing in Micro-Channel Heat Sink with Multiple Zigzag Flow Channel Structures](#), *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **87**: 30-39 (2017).
- [28] Bashirnezhad K., Bazri S., Safaei M.R., Goodarzi M., Dahari M., Mahian O., Dalkılıca A.S., Wongwises S., [Viscosity of nanofluids: A Review of Recent Experimental Studies](#), *Int. Commun. Heat Mass Trans.* **73**: 114-123 (2016).
- [29] Hentschke R., [On the Specific Heat Capacity Enhancement in Nanofluids](#). *Nanoscale Res. Lett.* **11(88)**: 1-11 (2016)
- [30] Feng L., Gao G., Huang P., Wang X., Zhang C., Zhang J., Guo S., Cui D., [Preparation of Pt Ag Alloy Nanoisland/Graphene Hybrid Composites and Its High Stability and Catalytic Activity in Methanol Electro-Oxidation](#), *Nanoscale Res. Lett.*, **6(551)**: 1-10 (2011).
- [31] Shearer C.J., Slattery A.D., Stapleton A.J., Shapter J.G., Gibson C.T., [Accurate Thickness Measurement of Graphene](#), *Nanotechnology*, **27**: 1-10 (2016).