نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)

J. Energy Conversion

Volume: 13, Issue:1, 2026: 57-69

دوره ۱۳، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص: ۵۷-۶۹

بررسی تجربی شاخص‌های بهبود انتقال حرارت و عملکرد ترموهیدرولیکی مبدل حرارتی پوسته لوله مینی‌کانال با استفاده از نانوسیال آب-گرافن

محمد صفرپور[۱]، مسعود زارع[۲و*]، علیمراد رشیدی[۳]، کوروش جواهرده[۴]

[۱] دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

[۲] استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

[۳] استاد تمام، مرکز تحقیقات نانوتکنولوژی، مرکز تحقیقاتی صنعت پتروشیمی (RIPI)، تهران، ایران

[۴] استاد تمام، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۲۰ ، بازنگری: ۱۴۰۵/۲/۱، پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۲۶

چکیده

در مطالعه تجربی حاضر، عملکرد حرارتی-هیدرولیکی یک مبدل حرارتی پوسته-لوله مینی‌کانال با استفاده از نانوسیال آب-گرافن مورد بررسی قرار گرفت. نانوسیال آب-گرافن تهیه شده به روش دو مرحله‌ای به‌عنوان سیال کاری استفاده شد. پایداری نانوسیال با اندازه‌گیری پتانسیل زتا و بررسی ته‌نشینی ارزیابی شد؛ مقادیر قدرمطلق پتانسیل زتا در pH برابر ۷ و بالاتر بیش از ۳۰ میلی‌ولت بود و طی ۷۲ ساعت نیز ته‌نشینی قابل مشاهده‌ای در سوسپانسیون مشاهده نشد. در این مطالعه از شش کسر حجمی ۰/۰۲، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ درصد استفاده شد. پارامترهای کلیدی حرارتی-هیدرولیکی مورد بررسی شامل ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، ضریب اصطکاک، فاکتور بهبود حرارتی (TEF)، و معیار ارزیابی عملکرد (PEC) بودند. نتایج نشان دادند که استفاده از نانوسیال آب-گرافن در هر کسرحجمی سبب بهبود مشخصه‌های انتقال حرارت در مقایسه با حالت آب به‌عنوان سیال کاری می‌شود. بهترین عملکرد حرارتی در کسر حجمی ۰/۶ درصد به‌دست آمد؛ در این شرایط، افزایش ضریب اصطکاک نسبت به آب کم‌تر از ۲۰ درصد باقی ماند و مقدار PEC تا حدود ۱/۳۵ افزایش یافت. از طرف دیگر، بهترین عملکرد حرارتی-هیدرولیکی در کسرهای حجمی ۰/۴ و ۰/۶ درصد به‌دست آمدند. در این محدوده، بیشینه مقدار PEC برابر ۱/۳۸۸ در کسر حجمی ۰/۶ درصد و بیشینه مقدار TEF حدود ۱/۵۵ در کسر حجمی ۰/۴ درصد به‌دست آمد که نشان‌دهنده تعادل مناسب میان بهبود انتقال حرارت و افت فشار است. این یافته‌ها پتانسیل بالقوه استفاده از نانوسیال آب-گرافن برای بهبود بازده مبدل‌های حرارتی کوچک در رژیم‌های جریان گذرا را به خوبی نشان می‌دهد. هم‌چنین نتایج نشان داد که اگرچه استفاده از نانوسیال موجب افزایش ضریب اصطکاک می‌شود، اما این افزایش از ۲۰٪ فراتر نرفته و در محدوده قابل قبول عملکردی باقی‌مانده است. بر این اساس، نانوسیال آب-گرافن می‌تواند گزینه‌ای مؤثر برای ارتقای عملکرد مبدل‌های حرارتی کوچک‌مقیاس، به‌ویژه در رژیم جریان گذرا، باشد.

* **عهده‌دار مکاتبات:** Masoud_zareh@iau.ac.ir

کلمات کلیدی: نانوذرات گرافن، مبدل حرارتی پوسته-لوله، آنالیز ترمو-هیدرولیکی، انتقال حرارت، المان محدود.

نحوه استناد به این مقاله محمد صفرپور، مسعود زارع، علیمراد رشیدی، کوروش جواهرده. بررسی تجربی شاخص‌های بهبود انتقال حرارت و عملکرد ترموهیدرولیکی مبدل حرارتی پوسته لوله مینی‌کانال با استفاده از نانوسیال آب-گرافن. **مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۵؛ ۱۳ (۱) : ۵۷-۶۹.**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.569]

۱- مقدمه

امروزه در بسیاری از صنایع تقاضای بالا برای افزایش راندمان حرارتی و کاهش مصرف انرژی موجب شده است که تلاش‌ها برای دست‌یابی به روش‌های نوین بهبود انتقال حرارت شده است [۱]. از جمله روش‌های جدید برای این منظور استفاده از نانوسیالات بجای سیالات رایج است. آب در مقایسه با بسیاری از سیالات دیگر (نظیر روغن) دارای ضریب انتقال حرارت نسبتاً ضعیف است که منجر به کاهش عملکرد حرارتی مبدل‌های حرارتی شده است [۲]. سیالات رایج نظیر آب دارای ضریب انتقال حرارت محدودی هستند که افزایش آن می‌تواند موجب بهبود عملکرد مبدل‌های حرارتی شود [۳]. گرافن از جمله این نانومواد است که به دلیل ضریب انتقال حرارت بالا، مساحت سطح و نیز نسبت منظری بالا در سالیان گذشته توجه بسیاری را به خود جلب کرده است [۴و ۵].

نانوذرات گرافن[۱] (GNP) با استفاده از بهبود حرارتی و پایداری در سوسپانسیون مورد استفاده، از مزایای نانوذرات مبتنی بر کربن و نیز فلزی استفاده می‌کند. استفاده مؤثر از GNPها در نانوسیال به‌شدت بستگی به روش تهیه آن‌ها دارد تا بتوان پایداری و پخش همگن آن‌ها درون سیال پایه را تضمین کرد [۶]. این نانوذرات به‌دلیل دارا بودن نیروهای جاذبه واندروالس و نیز انرژی سطحی بالا، به‌شدت مستعد کلوخه شدن هستند که باعث کاهش عملکرد حرارتی و نیز افزایش ته‌نشینی آن‌ها می‌شود. پخش کردن این نانوصفحات با هموژنایزر اولتراسونیک به‌عنوان یک گام اصلی در طی مرحله آماده‌سازی در نظر گرفته می‌شود که می‌تواند سبب به حداقل رساندن کلوخه شدن شود [۷و۸].

پژوهش‌های عددی و تجربی مختلفی در ارتباط با استفاده از نانوسیال آب-GNP در مبدل‌های حرارتی انجام شده‌اند. برای نمونه، آزمایشات آگرومایر[۲] و همکاران [۹] بهبود بیش از ۳۰٪ در ضریب انتقال حرارتی جابه‌جایی را نشان داد و بر این اساس روابط تجربی برای عدد ناسلت و افت فشار ارائه کردند. در پژوهش دیگری یارمند و همکاران [۱۰] نشان دادند که استفاده از نانوذرات گرافن با کسر حجمی wt% ۰/۱ منجر به افزایش حدوداً ۲۰ درصدی در ضریب انتقال حرارتی جابه‌جایی در رژیم جریان آشفته می‌شود. در مطالعه دیگری محققین نشان دادند که استفاده از نانوسیالات گراف-آب-اتیلین گلیکول منجر به بهبود قابل ملاحظه انتقال حرارت در یک مبدل حرارتی حلقوی می‌شود [۱۱].

مبدل‌های حرارتی پوسته-لوله[۳] (STHEها) به‌دلیل سادگی و انعطاف‌پذیری در طراحی از جمله پرکاربردترین مبدل‌های حرارتی در صنایع مختلف هستند [۱۲]. با این وجود، نوع طراحی آن‌ها سبب شده است که نسبت مساحت سطح به واحد حجم آن‌ها محدود شود و برای افزایش مقدار انتقال حرارت و غلبه بر این مشکل محققین نسخه مینی کانال آن‌ها را پیشنهاد کرده‌اند. در این راستا، ایلماز و همکاران [۱۳] در پژوهش تجربی خود استفاده از نانوسیالات آب-Al_2O_3 در مبدل‌های حرارتی پوسته-لوله مینی‌کانال[۴] (MC-STHE) را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که با پیکربندی پیشنهادی به بیشینه بهبود انتقال حرارت حدوداً ۵۰٪ رسیدند. محققین گزارش دادند. اگرچه مطالعات مختلف نشان داده‌اند که ناسیالاتی نظیر Al_2O_3 دارای ضریب انتقال حرارت بیش‌تر و چگالی جرمی به کم‌تر در مقایسه با GNPها هستند، اما این نانوذرات دارای رسوب به مراتب کم‌تر و پایداری بلندمدت‌تری هستند که سبب شده‌اند استفاده از این نوع نانوذرات توجیه‌پذیرتر و منطقی‌تر به نظر برسند [۱۴و۱۵]. یو و همکاران[۵] [۱۶] نشان دادند که با استفاده از کسرحجمی کم‌تری از GNPها می‌توان به بهبود انتقال حرارت بالاتری در مقایسه با سایر نانوذرات دست یافت. این موضوع از این نظر اهمیت دارد که می‌توان از نانوسیالات در سیستم‌های انرژی حساس و مقیاس کوچک استفاده کرد. با وجود گزارشات مبنی بر

[۱] Graphene nanoparticles
[۲] Agromayor
[۳] Shell-and-tube heat exchangers
[۴] Mini-channel shell-and-tube heat exchangers
[۵] Yu

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.569]

بهبود عملکرد حرارتی در صورت استفاده از این نوع نانوسیال، با این حال نگرانی‌هایی در مورد مشکلات جانبی استفاده از نانوسیالات نظیر افزایش توان پمپاژ و خوردگی بالقوه سطوح داخلی مبدل حرارتی و نیز لوله‌ها وجود دارند [۱۷]. علاوه بر این موارد، غلظت نانوذرات، هندسه سیستم و نیز رژیم جریان سه عاملی هستند که اثر بسیار زیادی بر روی عملکرد حرارتی دارند. بنابراین، یک شکاف پژوهشی در مورد بررسی جداگانه این متغیرها وجود دارد به گونه‌ای که بتوان شرایط بهینه کلی برای عملکرد نانوسیال‌ها در این نوع مبدل را به‌دست آورد.

در مطالعه تجربی حاضر، عملکرد حرارتی و هیدرولیکی یک مبدل حرارتی پوسته-لوله مینی کانال در یک رژیم جریان انتقالی بررسی گردید. نانوسیال آب-GNP به‌عنوان سیال کاری استفاده شد. هدف از این مطالعه بررسی غلظت‌های مختلف نانوذرات به‌منظور بهینه‌سازی عملکرد حرارتی این نوع مبدل حرارتی بود. برای این منظور از شش کسر حجمی مختلف پخش شده در نانوسیال استفاده شد که با روش دومرحله‌ای تهیه گردید. در این مطالعه، تأثیر کسر حجمی نانوذرات و شرایط جریان بر عملکرد ترموهیدرولیکی مبدل حرارتی پوسته-لوله مینی‌کانال به‌صورت تجربی بررسی شد.

۲- روش حل

۲-۱- تهیه نانوسیال

نانوذرات گرافن استفاده شده در پژوهش حاضر دارای میانگین ضخامت ۷ نانومتر و خلوص ۹۹٪ بودند. سیال پایه آب یونیزه شده بود. تمامی ظروف مورد استفاده در پژوهش ابتدا با اتانول شست‌وشو داده شدند و سپس پیش از تهیه نانوسیال، با آب یونیزه‌شده آب‌کشی شدند. در تهیه نانوسیال آب-گرافن از روش دو مرحله‌ای استفاده شد. در این روش ابتدا نانوذرات به‌صورت پودر یکنواخت تهیه شده و سپس نانوذرات بدون استفاده از سورفکتانت و با بهره‌گیری از امواج فراصوت در سیال پایه پخش شدند. برای ارزیابی پایداری الکترواستاتیکی نانوسیال، پتانسیل زتا در محدوده pH برابر ۲ تا ۱۰ اندازه‌گیری شد؛ مقادیر قدرمطلق پتانسیل زتا در pH برابر ۷ و بالاتر بیش از ۳۰ میلی‌ولت بود که نشان‌دهنده پایداری مناسب سوسپانسیون است. حجم نانوذرات مورد استفاده در آزمایشات با استفاده از ترازوی بسیار دقیق (با دقت یک ده هزارم)، وزن شدند. ابتدا مقدار پودر موردنظر درون آب یونیزه شده حل شد سپس با استفاده از هم‌زن مغناطیسی به مدت سی دقیقه با سرعت ۸۰۰ دور در دقیقه هم زده شد. در ادامه، سوسپانسیون به مدت ۶۰ دقیقه با استفاده از دستگاه اولتراسونیک با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز تحت فراصوت قرار گرفت تا پراکندگی یکنواخت نانوذرات در سیال پایه حاصل شود. به‌منظور جلوگیری از افزایش دمای نانوسیال، فرایند فراصوت در حمام یخ انجام شد و دمای سوسپانسیون کم‌تر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد نگه داشته شد. برای اطمینان از اینکه دمای نانوسیال از ۳۰ درجه سانتی‌گراد تجاوز نکند، پخش التراسونیک درون حمام یخ انجام شد. برای ارزیابی پایداری نانوسیال تهیه شده، محلول به مدت ۷۲ ساعت در یک مکان قرار داده شد و هیچ گونه ته‌نشینی قابل رویت دیده نشد. برای تعیین کسر حجمی نانوذرات، ابتدا جرم موردنیاز نانوذرات گرافن با استفاده از ترازوی دقیق اندازه‌گیری شد و حجم متناظر آن از نسبت جرم به چگالی نانوذرات محاسبه گردید. سپس کسر حجمی نانوذرات از نسبت حجم نانوذرات به مجموع حجم نانوذرات و سیال پایه تعیین شد. بر این اساس، نانوسیال در شش کسرحجمی مختلف شامل ۰/۰۲، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، و ۰/۸ درصد بودند.

۲-۲- معادلات حاکم

با استفاده از قانون اختلاط زیر، چگالی نانوسیال به‌دست می‌آید [۱۸]:

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\cdot\rho_f + \phi\cdot\rho_p \quad (1)$$

که در آن ϕ، ρ_f، و ρ_p به‌ترتیب کسر حجمی نانوذره، چگالی آب، و چگالی نانوذرات گرافن هستند. ظرفیت حرارتی ویژه نانوسیال از طریق رابطه زیر به‌دست می‌آیند [۱۹]:

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.569]

$$C_{p,nf} = \frac{(1-\phi)\cdot\rho_f\cdot C_{p,f} + \phi\cdot\rho_p\cdot C_{p,p}}{\rho_{nf}} \quad (۲)$$

در این رابطه، $C_{p,f}$ و $C_{p,p}$ به‌ترتیب ظرفیت حرارتی ویژه آب و نانوذرات گرافن هستند.

هم‌چنین، ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال از روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌شوند [۲۰]:

$$k_{nf} = k_f(1+\beta\cdot\phi) \quad (۳)$$

$$\mu_{nf} = \mu_f(1+2.5\phi+6.2\phi^2) \quad (۴)$$

ضرایب انتقال حرارت سمت پوسته و لوله مبدل حرارتی پوسته-لوله مینی کانال تک پاس به‌صورت زیر محاسبه شد. بالانس انرژی بین آب گرم و نانوسیال سرد به‌صورت زیر است [۲۱]:

$$Q_h = \dot{m}_h c_{p,h}(T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (۵)$$

$$Q_{nf} = \dot{m}_{nf} c_{p,nf}(T_{nf,o} - T_{nf,i}) \quad (۶)$$

در این روابط، $\dot{m}_h$، $c_{p,h}$، $T_{h,i}$ و $T_{h,o}$ به ترتیب نشان دهنده نرخ جریان جرمی آب گرم، ظرفیت حرارتی ویژه آب، دمای ورودی و دمای خروجی هستند. ضریب کلی انتقال حرارت با استفاده از میانگین انتقال حرارت بین دو سیال ($Q_{ave.}$) محاسبه گردید. این پارامتر با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$Q_{ave.} = UAF\Delta T_{lm} \quad (۷)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{h,i} - T_{nf,o}) - (T_{h,o} - T_{nf,i})}{\ln(\frac{T_{h,i} - T_{nf,o}}{T_{h,o} - T_{nf,i}})} \quad (۸)$$

که در آن U، A، F، و ΔT_{lm} به‌ترتیب ضریب کلی انتقال حرارت، مساحت سطح انتقال حرارت، ضریب تصحیح و اختلاف دمای میانگین لگاریتمی هستند. قطر هیدرولیکی سمت لوله از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$D_e = \frac{1.1}{D_o}(p_t^2 - 0.917D_o^2) \quad (۹)$$

که در آن D_o قطر خارجی لوله و p_t که ۱/۵ برابر قطر خارجی لوله است گام بافل است. عدد ناسلت سمت پوسته از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$Nu_s = \frac{h_s D_e}{k} = j_h Re_s Pr^{1/3} \quad (۱۰)$$

که در آن، D_e، j_h و Re_s به ترتیب عبارتند از قطر معادل جریان سمت پوسته، ضریب کولبرن، و عدد رینولدز سمت پوسته.

ضریب اصطکاک فانینگ سمت لوله با استفاده از رابطه تجربی زیر محاسبه گردید [۲۳]:

$$f_t = \frac{\Delta p_t}{4(L/D_i)(\rho u_i^2/2)} \quad (۱۱)$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

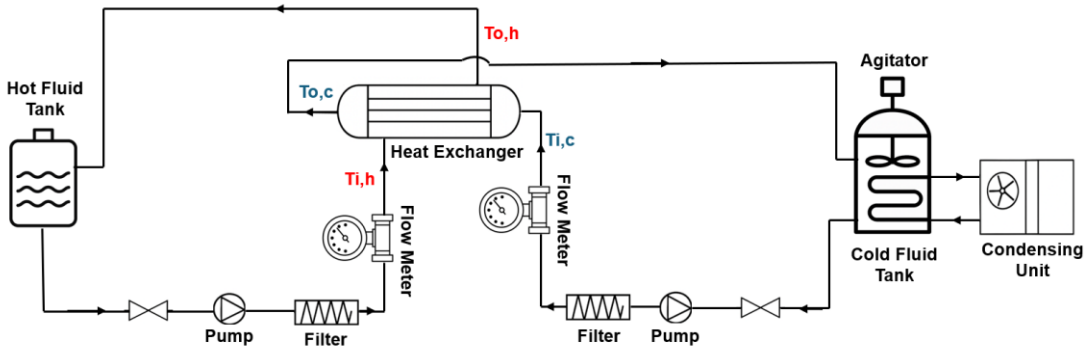
[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.569]

و نهایتاً، پارامتر ارزیابی عملکرد ترموهیدرولیکی مبدل حرارتی با استفاده از رابطه زیر به‌دست می‌آید [۲۴]:

$$\frac{j}{f}=\frac{NuPr^{-1/3}}{fRe} \quad (۱۲)$$

۲-۳- دستگاه آزمایشگاهی

شکل (۱) دیاگرام شماتیکی از سیستم مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. سیال گرم ورودی (دمای بین ۴۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد) توسط پمپ به درون مبدل حرارتی پوسته-لوله مینی کانال پمپاژ می‌شود و و بعد از انتقال حرارت با نانو سیال سرد دوباره به مخزن سیال گرم وارد می‌شود. در سمت دیگر، نانوسیال سرد از مخزن خارج شده (با دمای بین ۱۰ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد) و بعد از گذشت از فیلتر و دبی سنج وارد مبدل حرارتی شده، با سیال گرم تبادل گرما کرده و دوباره وارد مخزن آب سرد می‌شود. در آن‌جا با واحد کندانسور تبادل گرما کرده، و دمای آن کاهش می‌یابد و دوباره وارد چرخه می‌شود. هم‌چنین، در مخزن نانوسیال یک هم‌زن تعبیه شده است تا از ته‌نشین شدن آن جلوگیری کند.





شکل-۱: دیاگرام شماتیکی و تصویری از سیستم آزمایشگاهی مورد مطالعه

شکل (۲) تصویری از مبدل حرارتی مینی‌کانال پوسته-لوله استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. این مبدل حرارتی شامل ۲۱ لوله با گام ۳ میلی‌متر، قطر خارجی ۳ میلی‌متر، طول لوله ۴۰ سانتی‌متر، ضخامت جداره ۱ میلی‌متر، و آرایش مثلثی است. از

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.569]

طرف دیگر، دارای پوسته با قطر ۵۰ میلی‌متر، ضخامت جداره ۵ میلی‌متر، تعداد ۵ بافل، بافل کات ۳۵٪ و فاصله بین بافل ۷۰ میلی‌متری است.



شکل-۲: تصویری از مبدل حرارتی مینی کانال پوسته-لوله مورد استفاده در مطالعه حاضر

۳- نتایج

در این بخش، نتایج به‌دست آمده از آزمایشات انجام شده بر روی سیستم مورد مطالعه و بررسی عملکرد حرارتی مبدل ارائه می‌شوند. جدول (۱) خواص ترموفیزیکی نانوسیال آب-GNP در غلظت‌های مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۱: خواص ترموفیزیکی نانوسیال آب-GNP پژوهش حاضر

کسر حجمی (٪)	چگالی (kg/m^3)	ظرفیت حرارتی ویژه $(J/kg.K)$	ضریب هدایت حرارتی $(W/m.K)$	ویسکوزیته $(Pa.s)$
۰/۰۲	۹۹۷/۲۴	۴۱۸۰/۴۶	۰/۶۱۳۴	۰/۰۰۰۸۹
۰/۱	۹۹۸/۲	۴۱۷۴/۳۳	۰/۶۱۴۸	۰/۰۰۰۸۹۲
۰/۲	۹۹۹/۴۱	۴۱۶۶/۶۷	۰/۶۱۶۷	۰/۰۰۰۸۹۴
۰/۳	۱۰۰۱/۸۱	۴۱۵۱/۴۱	۰/۶۲۰۴	۰/۰۰۰۸۹۹
۰/۴	۱۰۰۴/۲۲	۴۱۳۶/۲۳	۰/۶۲۴۱	۰/۰۰۰۹۰۴
۰/۵	۱۰۰۶/۶۲	۴۱۲۱/۱۲	۰/۶۲۷۸	۰/۰۰۰۹۰۸

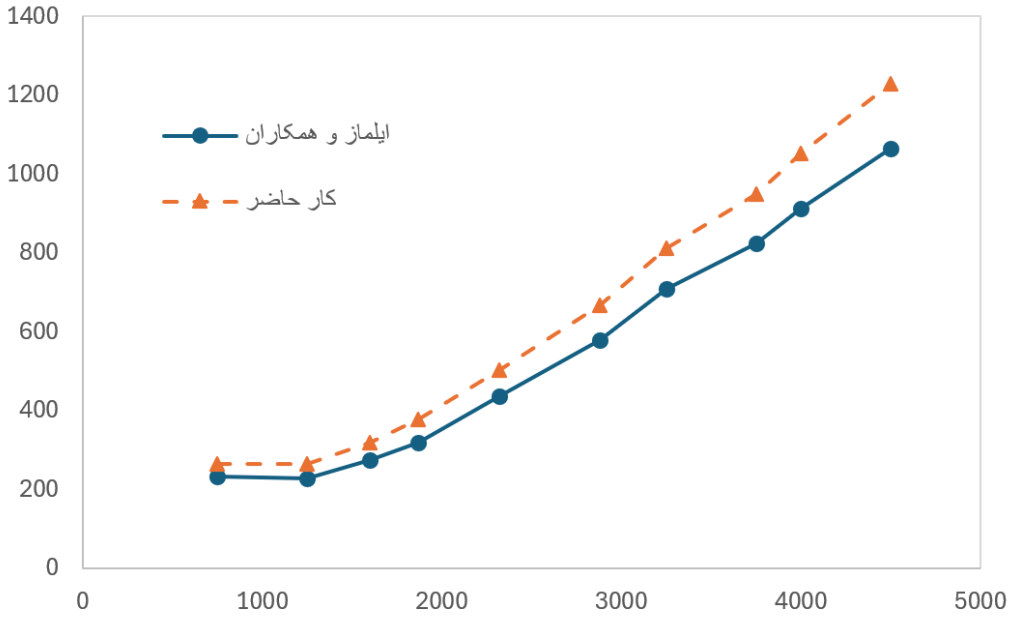
۳-۱- اعتبارسنجی

در بخش اول به اعتبارسنجی نتایج به‌دست آمده با کارهای پیشین پرداخته شد. برای این منظور، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سیال پایه (آب) بر حسب رینولدز به‌دست آمده در پژوهش حاضر با کار ایلماز و همکاران [۱۳] مقایسه و در شکل (۳) ارائه گردید. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود، با افزایش عدد رینولدز، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش می‌یابد که این روند دقیقاً با نتایج گزارش شده توسط مرجع موردنظر هم‌خوانی دارد. در رینولدزهای پایین، به دلیل این‌که جریان هنوز آشفته نشده نتایج بسیار نزدیک به هم هستند (کم‌تر از ۲٪). با افزایش عدد رینولدز به‌صورت پیوسته مقدار اختلاف بین دو کار افزایش می‌یابد، و در عدد رینولدز ۴۵۰۰ این مقدار به حدود ۱۱٪ درصد می‌رسد. با افزایش عدد رینولدز، اختلاف میان نتایج دو مطالعه اندکی افزایش یافت و در عدد رینولدز ۴۵۰۰ به حدود ۱۱ درصد رسید. این اختلاف می‌تواند ناشی از تفاوت در مشخصات هندسی مبدل، از جمله قطر

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.569]

داخلی لوله‌ها، آرایش و ابعاد اجزای مبدل، و هم‌چنین تفاوت در شرایط آزمایشگاهی، عایق‌بندی و تجهیزات اندازه‌گیری مورد استفاده در دو مطالعه باشد. از دیگر دلایل اختلاف موجود، می‌توان به شرایط آزمایشگاهی، عایق‌بندی و جنس مواد، و دستگاه‌های سنجش مورد استفاده در هر دو کار اشاره کرد. با توجه به تطابق خوب در روندنماهای بین دو مطالعه و اختلاف قابل قبول (۱۱٪) در رینولدزهای بالاتر که با تفاوت هندسی قابل توجیه است، نتایج به‌دست‌آمده از اعتبار علمی قابل قبولی برخوردار هستند.

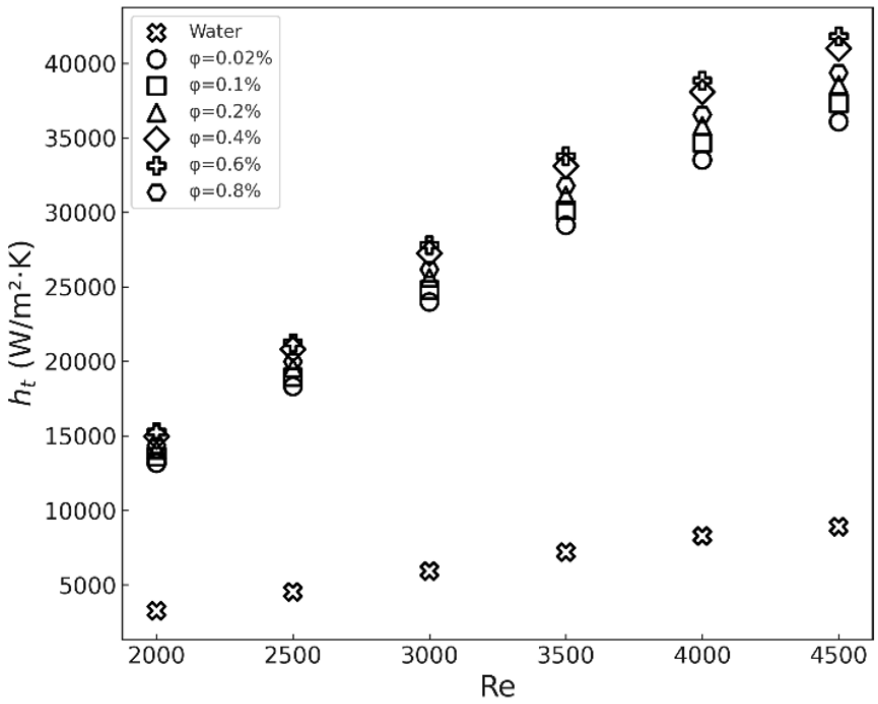


شکل-۳: مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی کار حاضر با مرجع [۱۳]

۳-۲- ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سمت پوسته

همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است، با افزایش عدد رینولدز مقدار ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برای تمامی سیال‌های کاری افزایش می‌یابد. دلیل این امر ناشی از فرآیند بهبودیافته جابه‌جایی و در نتیجه لایه مرزی حرارتی نازک‌تر است. از شکل مشاهده می‌شود که آب دارای پایین‌ترین ضریب انتقال حرارت است، در حالی‌که نانوسیال (به ویژه در کسر حجمی‌های ۰/۴ و ۰/۶ درصد) در تمامی اعداد رینولدز بهبودهای قابل توجهی را در ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نشان می‌دهد. برای مثال، در عدد رینولدز ۲۵۰۰، مقدار ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برای آب برابر تقریباً ۵۰۰۰ $W/m^2.K$ است، در حالی‌که این مقدار برابر نانوسیال حدوداً ۲۰۰۰۰ $W/m^2.K$ است. از طرف دیگر، بیش‌ترین مقدار ضریب انتقال حرارت مربوط به کسر حجمی ۰/۶ و بعد از آن ۰/۴درصدی است. برای مثال، در عدد رینولدز ۳۵۰۰، مقدار این ضریب برای کسر حجمی‌های ۰/۰۲، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ درصدی به ترتیب برابر ۲۸۹۲۰، ۲۹۴۳۲، ۳۰۵۶۷، ۳۲۶۵۰، ۳۳۱۴۰ و نهایتاً ۳۱۷۲۸ $W/m^2.K$ بود. این مقادیر نشان می‌دهد که در یک عدد رینولدز ثابت اختلاف بین کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار ضریب انتقال حرارت در کسرحجمی‌های مختلف برابر ۱۳٪ است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که استفاده از کسرهای حجمی متوسط از نانوذرات گرافن (در حدود ۰/۴٪)، بهینه‌ترین عملکرد هیدورلیکی-حرارتی را نتیجه می‌دهند که به خوبی با روند ضریب اصطکاک و ضریب انتقال حرارت این مطالعه همراستا هستند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.569]



شکل-۴: ضریب انتقال حرارت سمت پوسته بر حسب رینولدز در کسرحجمی‌های مختلف نانوسیال

مقادیر مختلف ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و پارامتر $(j/f)_t$ در کسرهای مختلف نانوسیال در Re =۳۵۰۰ در جدول (۲) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که از اعداد مشاهده می‌شود، با افزایش کسر حجمی از ٪۰ تا ٪۰/۲، هر دو پارامتر افزایش می‌یابند. در کسر حجمی ٪۰/۴، مقدار ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی به W/m²·K ۲۶۵۰۰۰ می‌رسد، در حالی که پارامتر $(j/f)_t$ به بیشینه مقدار خود در حدود ۰/۲۴۲ می‌رسد. این نتایج به خوبی نشان می‌دهند که کسرهای حجمی متوسط نانوذرات گرافن سبب بهبود ضریب هدایت حرارتی و بهبود آشفتگی جریان می‌شوند بدون این‌که افت فشار زیادی را به وجود بیاورند. با افزایش کسر حجمی بیش‌تر از ٪۰/۴، مقدار ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش می‌یابد، این در حالی است که پارامتر $(j/f)_t$ با کاهش مواجه می‌شود. این نشان می‌دهد که بایستی یک تعادل بین افزایش انتقال حرارت و تولید مقاومت جریان بیش‌تر که سبب کاهش بازده کلی می‌شود را ایجاد کرد. نهایتاً، در کسر حجمی ٪۰/۸، هر دو پارامتر کاهش می‌یابند که به‌دلیل تجمع نانوذرات و افزایش ویسکوزیته نانوسیال است.

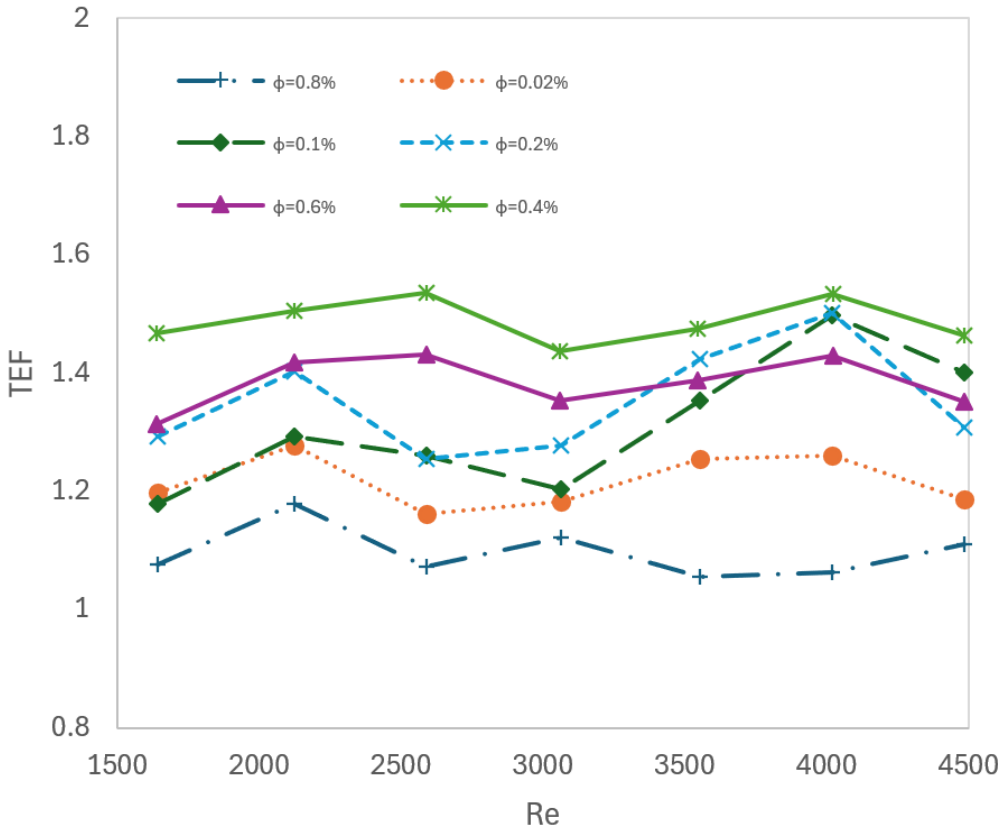
جدول ۲: مقادیر به‌دست آمده ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و پارامتر $(j/f)_t$ در کسرهای مختلف نانوسیال

پارامتر	کسر حجمی نانوسیال (٪)						
	آب	۰/۰۲	۰/۱	۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۸
$h_t(W/m2.K)$	۱۵۰۳۴/۸	۱۸۴۶۵/۲	۲۱۸۹۵/۶	۲۲۷۵۹/۴	۲۶۴۳۴/۱	۲۷۱۷۵/۹	۲۴۰۰۷/۵
$(j/f)_t$	۰/۲۰۴	۰/۲۱۹	۰/۲۲۱	۰/۲۲۵	۰/۲۴۲	۰/۲۳۴	۰/۱۶۵

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.569]

شکل (۵) تغییرات فاکتور بهبود حرارتی[۱] برحسب عدد رینولدز برای شش کسر حجمی مختلف نانوسیال آب-گرافن را نشان می‌دهد. فاکتور بهبود حرارتی یک پارامتر بی‌بعد است که تعادل بین بهبود ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و افت فشار را نشان می‌دهد. در نتیجه، این پارامتر یک شاخص مناسب برای عملکرد هیدرولیکی-حرارتی است. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود، مقدار TEF برای تمامی غلظت‌ها بیش‌تر از یک است، که نشان می‌دهد بهبود حرارتی در مقایسه با حالت پایه (آب) به‌دست آمده است. در کسر حجمی ٪۰/۴، بیش‌ترین مقدار TEF (حدود ۱/۵۵) در مقایسه با تمامی کسرحجمی‌ها در عدد رینولدز تقریباً ۴۰۰۰ به‌دست آمد. این بیان‌گر مناسب‌ترین تعادل میان افزایش انتقال حرارت و تلفات هیدرولیکی در این شرایط است. تقریباً در تمامی رینولدزها، نانوسیال با کسر حجمی ٪۰/۸ دارای کم‌ترین مقدار است (کم‌تر از ۱/۱)، که نشان می‌دهد در این حالت افزایش ویسکوزیته و احتمال تجمع بیش‌تر نانوذرات سبب شده است که اثر مثبت افزایش انتقال حرارت ناشی از حضور بیش‌تر نانوذرات تقلیل یابد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که بهینه‌ترین حالت کسرحجمی نانوذرات در ٪۰/۴ و ٪۰/۶ اتفاق می‌افتد به‌طوری که سبب بهبود عملکرد حرارتی در سیستم مینی‌کانال می‌شود، در حالی‌که هزینه‌های بیش‌تری در رابطه با پمپاژ تحمیل نمی‌شود. این یافته، با نتایج گزارش شده در مطالعات دیگر در رابطه با روندهای ضریب اصطکاک و انتقال حرارت هم‌سو می‌باشد. بر این اساس، استفاده از نانوسیال در محدوده کسر حجمی ۰/۴ تا ۰/۶ درصد می‌تواند عملکرد هم‌زمان حرارتی و هیدرولیکی مناسب‌تری برای مبدل حرارتی مورد بررسی فراهم کند.



شکل-۵: مقادیر TEF در برابر عدد رینولدز برای کسر حجمی‌های مختلف

[۱] Thermal Enhancement Factor

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.569]

جدول (۴) تغییرات معیار ارزیابی عملکرد[۱] در رینولدزهای مختلف برای هر شش کسر حجمی در نظر گرفته شده در مطالعه حاضر را نشان می‌دهد. معیار PEC به‌صورت هم‌زمان بهبود انتقال حرارت و افزایش مقاومت هیدرولیکی را در نظر می‌گیرد و به‌صورت نسبت عدد ناسلت نرمال‌شده به ریشه سوم ضریب اصطکاک نرمال‌شده تعریف می‌شود. همین سبب شده است که این معیار یک شاخص قوی برای ارزیابی بازده حرارتی-هیدرولیکی محسوب شود. از جدول مشاهده می‌شود که در هر عدد رینولدزی، استفاده از نانوسیال منجر به تولید اعداد PEC بزرگ‌تر از ۱ شده است، که نشان می‌دهد استفاده از نانوسیال عملکرد کلی بالاتری از آب به‌عنوان سیال کاری دارد. بیش‌ترین مقادیر PEC مربوط به کسرحجمی ٪۰/۶ است، جایی‌که مقدار PEC به ۱/۳۵ نیز رسیده است. این نشان می‌دهد که در این کسرحجمی، مزایای بهبود انتقال حرارت بیش‌تر از عامل منفی افزایش ویسکوزیته و مقاومت در برابر جریان است.

جدول ۴: تغییرات معیار ارزیابی عملکرد در برابر رینولدز برای کسرهای مختلف حجمی

	کسر حجمی نانوسیال (٪)					
مقدار رینولدز	۰/۰۲	۰/۱	۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۸
۲۰۰۰	۱/۱۱۶	۱/۱۶۱	۱/۱۹۵	۱/۲۸۹	۱/۳۳۶	۱/۲۳۰
۲۵۰۰	۱/۱۰۵	۱/۱۴۸	۱/۱۸۲	۱/۲۷۶	۱/۳۲۱	۱/۲۱۶
۳۰۰۰	۱/۰۶۵	۱/۱۰۷	۱/۱۴۰	۱/۲۳۰	۱/۲۷۵	۱/۱۷۴
۳۵۰۰	۱/۰۸۶	۱/۱۳۱	۱/۱۶۴	۱/۲۵۶	۱/۳۰۲	۱/۱۹۸
۴۰۰۰	۱/۰۸۱	۱/۱۲۶	۱/۱۵۶	۱/۲۵۰	۱/۲۹۷	۱/۱۹۳
۴۵۰۰	۱/۱۵۹	۱/۲۰۵	۱/۲۴۰	۱/۳۳۷	۱/۳۸۸	۱/۲۷۶

برای اکثر کسر حجمی‌ها، با افزایش عدد رینولدز (به ویژه ۳۵۰۰ به بالا)، مقدار PEC کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع ناشی از این است که مزیت نسبی افزودن نانوذرات با افزایش نیروهای اینرسی کاهش می‌یابد، که سبب سرکوب اثر حرکت براونین و اثرات جابه‌جایی در بعد میکرو می‌شود. با این وجود، در تمامی حالت‌ها دو کسر حجمی ٪۰/۴ و ٪۰/۶ مقادیر PEC خوب را نتیجه دادند که استفاده از آن‌ها در سیستم‌های مینی‌کانال در آغاز رژیم انتقالی را توجیه می‌کند. از طرف دیگر، کم‌ترین مقدار PEC برای کسرحجمی ٪۰/۲ به‌دست آمد که در آن اثرات حرارتی قابل صرف‌نظر هستند.

۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه تجربی حاضر، عملکرد حرارتی-هیدرولیکی مبدل حرارتی پوسته-لوله مینی‌کانال با استفاده از نانوسیال آب-گرافن به‌عنوان سیال کاری در محدوده عدد رینولدز ۲۰۰۰ تا ۴۵۰۰ بررسی شد. نانوسیال در شش کسر حجمی ۰/۰۲، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ درصد و به روش دومرحله‌ای تهیه شد. نتایج نشان داد که استفاده از نانوسیال موجب افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نسبت به آب می‌شود و بهترین عملکرد در کسرهای حجمی متوسط، به‌ویژه ۰/۴ و ۰/۶ درصد، حاصل می‌شود. از نظر هیدرولیکی، اگرچه افزودن نانوذرات موجب افزایش ضریب اصطکاک شد، این افزایش در تمامی شرایط کم‌تر از ۲۰ درصد بود. بررسی معیارهای عملکرد نشان داد که بیشینه مقدار TEF حدود ۵۵/۱ در کسر حجمی ۰/۴ درصد و بیشینه مقدار PEC برابر ۱/۳۸۸ در کسر حجمی ۰/۶ درصد به‌دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که کسرهای حجمی ۰/۴ و ۰/۶ درصد تعادل مناسب‌تری میان بهبود انتقال حرارت و افزایش مقاومت هیدرولیکی ایجاد می‌کنند. بنابراین، استفاده از نانوسیال آب-گرافن در غلظت‌های بهینه می‌تواند موجب ارتقای

[۱] Performance Evaluation Criterion

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.569]

عملکرد حرارتی-هیدرولیکی مبدل‌های حرارتی پوسته-لوله مینی‌کانال شود. در مطالعات آینده، بررسی نانوسیالات هیبریدی، سیالات غیرنیوتنی و سایر شرایط عملیاتی در این نوع مبدل‌ها پیشنهاد می‌شود.

فهرست علائم

حروف انگلیسی			
نماد (واحد)	تعریف	نماد (واحد)	تعریف
$A\ (m^2)$	مساحت سطح انتقال حرارت	j	ضریب کولبرن
$D_e\ (m)$	قطر معادل جریان در سمت پوسته	$(j/f)_k$	پارامتر عملکرد ترموهیدرولیکی
$D_h\ (m)$	قطر هیدرولیکی لوله	Nu	عدد ناسلت
$D_o\ (m)$	قطر خارجی لوله	PEC	معیار ارزیابی عملکرد
F	ضریب تصحیح مبدل حرارتی	TEF	فاکتور بهبود حرارتی
f	ضریب اصطکاک فانینگ	$U\ (W/m^2.K^2)$	ضریب کلی انتقال حرارت
$h\ (W/m^2.K^2)$	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی	Re	عدد رینولدز
حروف یونانی			
ΔT_{lm}	اختلاف دمای میانگین لگاریتمی	ρ	چگالی سیال
μ	ویسکوزیته دینامیکی سیال	ϕ	کسر حجمی نانوذرات

مراجع

[1] S. U. S. Choi, J. A. Eastman, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, Argonne National Laboratory (ANL), Argonne, IL, USA (1995).

[2] S. K. Das, et al., *Nanofluids: Science and Technology*, John Wiley & Sons (2007).

[3] S. Angayarkanni, J. Philip, Review on thermal properties of nanofluids: Recent developments, Advances in Colloid and Interface Science, 225 (2015) 146-176.

[4] T. Kanthimathi, et al., Thermophysical properties and heat transfer in mono and hybrid nanofluids with different base fluids: An overview, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 149(4) (2024) 1649-1666.

[5] W. H. Danial, Z. Abdul Majid, Recent advances on the enhanced thermal conductivity of graphene nanoplatelets composites: A short review, Carbon Letters, 32(6) (2022) 1411-1424.

[6] T. Huq, et al., Review on aqueous graphene nanoplatelet nanofluids: Preparation, stability, thermophysical properties, and applications in heat exchangers and solar thermal collectors, Applied Thermal Engineering, 210 (2022) 118342.

[7] I. Moulefera, et al., Innovative application of graphene nanoplatelet-based ionanofluids as heat transfer fluid in hybrid photovoltaic-thermal solar collectors, Scientific Reports, 15(1) (2025) 6489.

[8] S. S. Chougule, S. Sahu, Comparative study on heat transfer enhancement of low volume concentration of Al2O3–water and carbon nanotube–water nanofluids in laminar regime using helical screw tape inserts, Journal of Nanotechnology in Engineering and Medicine, 4(4) (2013) 040904.

[9] R. Agromayor, et al., Heat transfer performance of functionalized graphene nanoplatelet aqueous nanofluids, Materials, 9(6) (2016) 455.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.569]

[10] H. Yarmand, et al., Experimental investigation of thermo-physical properties, convective heat transfer and pressure drop of functionalized graphene nanoplatelets aqueous nanofluid in a square heated pipe, Energy Conversion and Management, 114 (2016) 38-49.

[11] H. Khajeh Arzani, et al., Toward improved heat transfer performance of annular heat exchangers with water/ethylene glycol-based nanofluids containing graphene nanoplatelets, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 126 (2016) 1427-1436.

[12] K. Silaipillayarputhur, H. Khurshid, The design of shell and tube heat exchangers–A review, International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development, 9(1) (2019) 87-102.

[13] M. S. Yilmaz, H. Kucuk, M. Unverdi, An experimental study for thermal and hydraulic performance of a mini channel shell and tube heat exchanger using low concentration nanofluids prepared with Al2O3 nanomaterials, Machines. Technologies. Materials., 13(1) (2019) 29-35.

[14] S. S. Chougule, S. Sahu, Comparative study on heat transfer enhancement of low volume concentration of Al2O3–water and carbon nano-tube–water nano-fluids in transition regime using helical screw tape inserts, Experimental Heat Transfer, 29(1) (2016) 17-36.

[15] I. Behroyan, et al., A comprehensive comparison of various CFD models for convective heat transfer of Al2O3 nanofluid inside a heated tube, International Communications in Heat and Mass Transfer, 70 (2016) 27-37.

[16] W. Yu, et al., Significant thermal conductivity enhancement for nanofluids containing graphene nanosheets, Physics Letters A, 375(10) (2011) 1323-1328.

[17] Z. Wang, et al., Experimental comparative evaluation of a graphene nanofluid coolant in miniature plate heat exchanger, International Journal of Thermal Sciences, 130 (2018) 148-156.

[18] B. C. Pak, Y. I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, Experimental Heat Transfer: An International Journal, 11(2) (1998) 151-170.

[19] W. Yu, et al., Experimental investigation on the heat transfer properties of Al2O3 nanofluids using the mixture of ethylene glycol and water as base fluid, Powder Technology, 230 (2012) 14-19.

[20] C. Kleinstreuer, Y. Feng, Experimental and theoretical studies of nanofluid thermal conductivity enhancement: A review, Nanoscale Research Letters, 6 (2011) 1-13.

[21] [21] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 8th ed., Wiley, New York (2018).

[22] M. Ünverdi, H. Kücük, M. S. Yılmaz, Experimental investigation of heat transfer and pressure drop in a mini-channel shell and tube heat exchanger, Heat and Mass Transfer, 55 (2019) 1271-1286.

[23] S. Kakaç, H. Liu, A. Pramuanjaroenkij, *Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design*, CRC Press (2002).

[24] J. Xu, K. Bandyopadhyay, D. Jung, Experimental investigation on the correlation between nano-fluid characteristics and thermal properties of Al2O3 nano-particles dispersed in ethylene glycol–water mixture, International Journal of Heat and Mass Transfer, 94 (2016) 262-268.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.569]

Experimental Investigation of Heat Transfer Enhancement Indices and Thermal-Hydraulic Performance of a Mini-Channel Shell-and-Tube Heat Exchanger Using Graphene-Water Nanofluid

Mohammad Safarpour[1], Masoud Zare[2,*], Alimorad Rashidi[3], Koroush Javaherdeh[4]

[1,2] Department of Mechanical Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran
[3] Nanotechnology Research Center, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran
[4] Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

Received: Winter 2026 Accepted: Spring 2026

Abstract:

This experimental study evaluated the thermal-hydraulic performance of a mini-channel shell-and-tube heat exchanger using graphene-water nanofluid prepared by a two-step method. Stability was verified by zeta-potential measurements and sedimentation observations; the absolute zeta-potential exceeded 30 mV at pH 7 and above, and no visible sedimentation occurred after 72 h. Six nanoparticle volume fractions (0.02%, 0.1%, 0.2%, 0.4%, 0.6%, and 0.8%) were tested. The convective heat-transfer coefficient, friction factor, thermal enhancement factor (TEF), and performance evaluation criterion (PEC) were evaluated. Graphene-water nanofluid enhanced heat transfer relative to water at all concentrations. The highest heat-transfer performance occurred at 0.6%, while the increase in friction factor remained below 20%. The best overall thermal-hydraulic performance was obtained at 0.4% and 0.6%; the maximum PEC was 1.388 at 0.6%, and the maximum TEF was approximately 1.55 at 0.4%, indicating a favorable balance between heat-transfer enhancement and hydraulic penalty. These results demonstrate that optimized graphene-water nanofluids can improve small-scale heat-exchanger performance, particularly under transitional-flow conditions, without an excessive friction penalty.

[*]**Corresponding author:** Masoud_zareh@iau.ac.ir

Keywords: Graphene nanoparticles, Shell-and-tube heat exchanger, Thermo-hydraulic analysis, Heat transfer, Finite element.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.569]

Cite this article as: Mohammad Safarpour, Masoud Zare, Alimorad Rashidi, Koroush Javaherdeh , Experimental Investigation of Heat Transfer Enhancement Indices and Thermal-Hydraulic Performance of a Mini-Channel Shell-and-Tube Heat Exchanger Using Graphene-Water Nanofluid. Journal of Energy Conversion, **2026, 13(1), 57-69**