

بررسی اثر دما و غلظت نانوذرات سرامیکی بر هدایت حرارتی نانو-سیال هیریدی آب-اتیلن گلیکول/نانوآلومینا-

فصلنامہ  
سرمیک ایران

گرافن اونو

مایه نازی<sup>۱</sup>, نسیم نایب یاشایی<sup>۲\*</sup>, سید محمد مهدی هادوی<sup>۳</sup>

پژوهشکده شیمی و پتروشیمی، پژوهشگاه استاندارد  
پژوهشکده فناوری و مهندسی، پژوهشگاه استاندارد  
دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

**چکیده:** نانوسيال ترکيبي است که با افروزن ذرات در مقیاس نانو (۱۰۰ نانومتر) به يك سیال پايه با مدلر بهيود انتقال حرارت حاصل می شود. در اين پژوهش، تاثير دما و غلظت نانوذرات مشكل از نانوذرات آلومينا و نانوصفحات گرافن بر هدایت حرارتی سیال پايه مشكل از آب و اتيلن گلیکول بورد مطالعه قرار گرفت. همچنین به ميزان ۲/۰ درصد حجمي اوئيشك اسید (OA) و ۰/۲ درصد وزني سيدم دودسيل سوانحونات (SDS) به عنوان عامل فعل سطحي برای تثبيت و پراكندگي نانوذرات به سیال پايه اضافه شدند. كسر حجمي نانوذرات ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۰/۵، ۲، ۱/۵ درصد حجمي و دماهای مورد زمایش در بازه دماهی ۳۰-۵۶°C کلوین انتخاب شد. ریخت‌شناسی و ریزساختار نانوذرات توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) انجام شد. هدایت حرارتی نانوسيالات هيبريدی اندازه‌گيري و با سیال پايه مقایسه شد. نتایج نشان داد که هدایت حرارتی نانوسيال هيبريدی آب- اتيلن گلیکول/نانو گرافن- نانوآلومينا به غلظت نانوذرات و دما وابسته است. نتایج اندازه‌گيري هدایت حرارتی نانوسيال هيبريدی آب- اتيلن گلیکول/نانو گرافن- نانوآلومينا با مدل‌های پيش‌بیني هدایت حرارتی نانوسيالات مقایسه شد ولي تطابق قابل قبول وجود نداشت. نتایج نشان داد که افزایش دما و غلظت حجمي نانوذرات موجب افزایش هدایت حرارتی نانوسيالات هيبريدی شود. حد اکثر افزایش هدایت حرارتی نانوسيال هيبريدی برابر با ۴۴/۰ درصد بود که در كسر حجمي جامد ۲/۵ درصد و در دمای ۳۰-۳۳°C کلوين حاصل شد.

**كلمات کلیدی:** نانوسيال هيبريدی، اتيلن گلیکول، هدایت حرارتی، نانوذرات آلومينا، نانوصفحات

卷之三

نویسنده مسئول:  
دکتر نسیم نایب پا  
پژوهشکده فناور  
پژوهشگاه استاندار  
نوع مقاله: پژوهشی  
صفحه های: ۱۵ تا  
۳۳۵۱ شاپا چاپی:  
شاپا الکترونیکی:  
زبان نشریه: فارسی  
دسترسی پذیر در نز  
[www.JICERS.ir](http://www.JICERS.ir)  
تاریخ دریافت:  
۱۴۰۰/۰۴/۱۳  
تاریخ پذیرش:  
۱۴۰۰/۰۶/۱۰

n.nayeppashae@standard.ac.ir

- ١

نانوسيالات سوسپانسيون هایی هستند که از مخلوط کردن نانوذرات جامد در مقیاس نانو (۱۰۰ نانومتر) به یک سیال پایه به دست می آیند و موجب بهبود و یا ایجاد خواص جدید می شوند. نانوذرات معمولاً ذرات فلزی همانند Cu, Al, Ni, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>، اکسیدها مانند CaCO<sub>3</sub>, SiC, AlN و ترکیبات دیگری مثل Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, BaTiO<sub>3</sub>، CuO, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>، گرافن می باشد. سیال پایه معمولاً آب، اتیلن گلیکول، پروپیلن گلیکول و یا روغن موتوور می باشد [۳-۱]. توانایی پایین آوردن نقطه انجماد آب، فشار بخار کم و خوردگی نسبتاً کم اتیلن گلیکول، آن را به یک سیال مناسب جهت استفاده به عنوان کاهش نقطه انجماد آب و سیال انتقال حرارت در سیستم های خنک کننده تبدیل می کند. قابلیت انتقال حرارت سیالات متداول از قبیل آب، اتیلن گلیکول، روانکارها و سایر خنک کننده ها ذاتاً پایین است. ب این اساس، نکاردها، نانوسيالات، استفاده از کاردها، هدایت حرارت مر باشد و در سایر اجزاء، اخیر

در این زمینه تحقیقات متعددی انجام شده است [۱۲-۱۵، ۱۳-۱۴، ۵-۱۲]. ذرات نانو به دلیل بالا بودن ضریب هدایتی حرارتی شان، سبب افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال پس از توزیع در سیال پایه می‌شوند [۱۶ و ۱۷]. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که انتقال حرارت نانوسیالات نسبت به سیالات متداول افزایش قابل توجهی نشان می‌دهد. این رفتار به عواملی چون شکل نانوذرات، توزیع اندازه و کسر حجمی آن‌ها، دما، ضریب هدایت حرارتی نانوذرات و سیال پایه بستگی دارد [۱۸ و ۲ و ۱۹]. طی یک دهه گذشته، ویژگی انتقال حرارت نانوسیالات به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است [۲۱-۲۳]. بیشتر تحقیقات به ویژه به منظور افزایش سرعت انتقال حرارت در کاربردهای گرمایش، در دماهای متوسط و بالا انجام شده است. به دلیل عدم وجود مطالعات در زمینه کاربرد نانوسیالات در دماهای پایین (زیر صفر)، کاربرد و بازاریابی استفاده از نانوسیالات در مصارف صنعتی خنک‌کننده پیشرفت نکرده است [۱۶].

پژوهش انجام شده توسط Aladag و همکاران [۱۲] ویسکوزیته نانوسیالات  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و CNT مبتنی بر آب را در غلظت کم و دمای پایین و تعییرات آن ناشی از کاهش دما و زمان برشی را مورد بررسی قرار داده است. این تحقیقات نشان داد که بسته به میزان سرعت برشی، نانوسیالات به عنوان مایعات نیوتونی یا غیر نیوتونی رفتار می‌کنند [۲۲].

به منظور تعیین کاربرد نانوسیالات برای استفاده به عنوان یک سیال انتقال حرارت در دماهای پایین، Kulkarni و همکاران [۲۲ و ۲۳] ویژگی‌های رئولوژیکی ترکیبات اتیلن و پروپیلن گلیکول و مخلوط آب و ۴۰٪ (با وزن) با درصد حجمی متفاوت (درصد تا ۱۲/۶ درصد) نانوذرات اکسید مس ( $\text{CuO}$ ) در دماهای مختلف در محدوده ۳۵-۳۵ درجه سانتی‌گراد تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد را بررسی کردند. Naik و همکاران [۲۴] ویسکوزیته مخلوط پروپیلن گلیکول و آب (۴۰٪ نسبت وزنی) را اندازه‌گیری کرده و نانوسیالات حاصل از آن را با اضافه کردن غلظت متفاوت حجم (از ۰/۲۵ تا ۱/۲) از نانوذرات مس در دمای بین ۱۵-۳۰ درجه سانتی‌گراد و ۳۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری کرد. آن‌ها گزارش دادند که با کاهش دما، ویسکوزیته بصورت تصاعدی افزایش می‌یابد. در این پژوهش، رفتار رئولوژیکی نانوذرات مخلوط آب- اتیلن گلیکول (۵۰٪ نسبت حجمی در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد) در دماهای بین ۲۰-۲۰ درجه سانتی‌گراد و ۲۰ درجه سانتی‌گراد بررسی شده تا عملکرد اینگونه نانوسیالات از طریق مطالعات تجربی در شرایط کاهش دما بررسی شود.

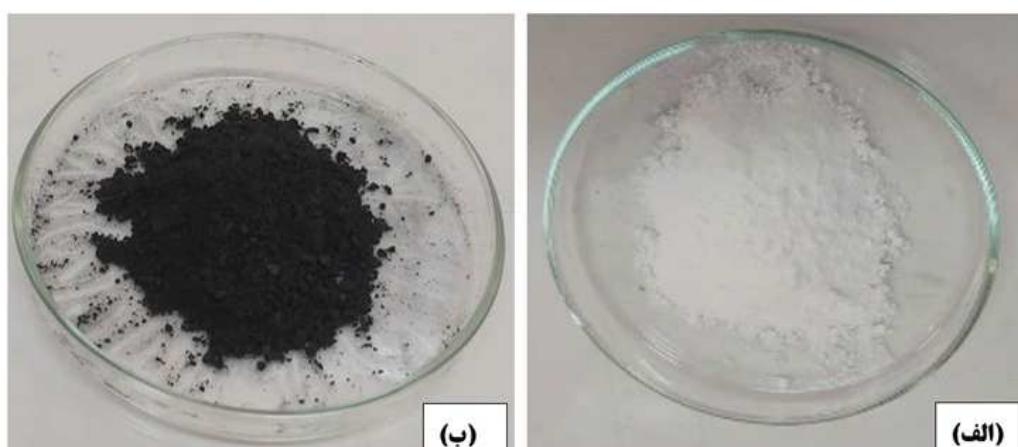
اکثر تحقیقات انجام شده در زمینه مطالعه رفتار نانوسیالات در دماهای متوسط و بالا (۲۹۸-۳۲۸ کلوین) انجام شده است. مطالعات بسیار کمی به طور خاص روی رفتار رئولوژیکی و خواص ترموفیزیکی نانوسیالات در دمای پایین متمرکز شده است [۱۲ و ۲۵]. فقدان چینین مطالعاتی در زمینه رفتار نانوسیالات هیبریدی در دماهای منفی (زیر صفر درجه سانتی‌گراد) آشکارتر است. عدم وجود مطالعات کافی در زمینه اندازه‌گیری خواص ترموفیزیکی نانوسیالات هیبریدی در دماهای پایین انگیزه اصلی این تحقیق بوده است. در این مطالعه، تاثیر دما و غلظت نانوذرات متشکل از نانوذرات آلومینا و نانوصفحات گرافن بر رفتار هدایت حرارتی سیال پایه متشکل از آب و اتیلن گلیکول مورد مطالعه قرار گرفت. در تهیه نانوسیال هیبریدی، مخلوط آب- اتیلن گلیکول با نسبت ۵۰٪ درصد حجمی در دمای ۲۹۸ کلوین به عنوان سیال پایه در نظر گرفته شد. نانوذرات که از حجم مساوی نانوذرات آلومینا و نانوصفحات گرافن تشکیل شده بودند در مقدار معینی از سیال پایه تعلیق شدند. همچنین به میزان ۰/۰ درصد حجمی اولئیک اسید (OA) و ۰/۲ درصد وزنی سدیم دودسیل سولفونات (SDS) به عنوان عامل فعال سطحی<sup>۱</sup> برای تثبیت و پراکنده نانوذرات به سیال پایه اضافه شدند. نانوسیالات با استفاده از روش دو مرحله‌ای تهیه شدند. کسر حجمی نانوذرات در این تحقیق ۰/۰۵، ۰/۰۱، ۰/۰۵، ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۰۲ درصد حجمی لحظه گردید و همچنین جهت بررسی اثر دما، دماهای مورد آزمایش در بازه دمایی ۳۰-۳۰۵ کلوین انتخاب شد. ریخت‌شناسی و ریزساختار نانوذرات توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) انجام شد. پس از سنتر نانوسیال هیبریدی آب- اتیلن گلیکول/ نانوگرافن- نانوآلومینا، هدایت حرارتی نانوسیالات هیبریدی اندازه‌گیری و با سیال پایه و برخی مدل‌های مهم پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیالات مقایسه شد.

<sup>۱</sup> Surfactant

## ۲- مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- مواد اولیه و مشخصه‌یابی نانوذرات

به منظور تهیه نانوپودر هیبریدی از نانوذرات آلمینا و گرافن، آب و اتلين‌گلیکول به عنوان سیال پایه و اولئیک‌اسید (OA) و سدیم دودسیل سولفونات (SDS) به عنوان عامل فعال سطحی استفاده شد. نانوذرات مورد استفاده در این تحقیق از شرکت پیشگامان نانومواد ایران تهیه شده است. خواص فیزیکی و شیمیایی نانوذرات آلمینا و نانوصفحات گرافن در جداول ۱ و ۲ گزارش شده است. پیش از سنتز نانوپودر، نانوذرات مشخصه‌یابی شدند. شکل ۱ نانوذرات گرافن و نانوپودر آلمینا را نشان می‌دهد. خواص فیزیکی و شیمیایی اتلين‌گلیکول و اولئیک‌اسید به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده‌اند.



شکل ۱- تصویر نانوپودر (الف) آلمینا و (ب) گرافن.

جدول ۱- اطلاعات فیزیکی و شیمیایی نانوذرات  $\text{Al}_2\text{O}_3$

مقدار	مشخصه
+۹۹٪.	خلوص
سفید	رنگ
۱۵ nm	اندازه
تقریباً کروی	ریخت
۱۳۸ $\text{m}^2/\text{g}$	مساحت سطح ویژه (SSA)
۳۸۹۰ $\text{Kg}/\text{m}^3$	دانسیته
۸۸۰ $\text{J}/(\text{Kg}\cdot\text{K})$	ظرفیت حرارتی ویژه

جدول ۲- اطلاعات فیزیکی و شیمیایی نانوصفحات گرافن

مقدار	مشخصه
۹۹/۵٪.	خلوص
سیاه	رنگ
۲-۱۸nm	ضخامت
شبه صفحه‌ای	ریخت
۵۰۰-۱۲۰۰ $\text{m}^2/\text{g}$	مساحت سطح ویژه (SSA)
۲۳۰ $\text{Kg}/\text{m}^3$	دانسیته



جهت آماده‌سازی نمونه برای مطالعه ریزساختاری، ابتدا کل پودر توسط اسپاچول هم زده شد. سپس مقدار ناچیزی از پودر به استون اضافه شد تا مات شود. ظرف حاوی محلول مات، به مدت ۱۰ دقیقه داخل آلتراسونیک قرار گرفت و پس از اتمام آلتراسونیک، دو قطره از نمونه روی لام چکانده شد و پس از خشک شدن کامل نمونه، لام حاوی نمونه روی جانمونهای قرار گرفت.

از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Vega Tescan (Inca OXFORD) برای بررسی و تعیین ریخت و اندازه نانوذرات استفاده گردید. خروجی این آنالیز تصاویری هستند که می‌توانند در فهم بهتر توپوگرافی سطح نمونه‌ها به کار روند. دستگاه به کار گرفته شده برای این آنالیزساخت شرکت TE-SCAN است و از دقت بالایی برخوردار است. تصاویر حاصل از آنالیز میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) به منظور ریخت‌شناسی و بررسی ریزساختاری نانوذرات مورد استفاده قرار گرفت. دستگاه مورد استفاده برای این آنالیز Philips CM120 است.

جدول ۳- اطلاعات فیزیکی و شیمیایی اتیلن گلیکول

مقدار	مشخصه
$C_2H_6O_2$	فرمول شیمیائی
شفاف، بی‌رنگ	ظاهر
بدون بو	بو
۶۲/۰۷ g/mol	جرم مولی
۱۱۳۰/۲۰ kg/m <sup>3</sup>	دانتیته
۱۹۷/۳۰°C	نقطه جوش
۰/۲۴۴ W/m K (20°C)	هدایت حرارتی
۱۶/۱ cP (۲۰°C)	ویسکوزیته

جدول ۴- اطلاعات فیزیکی و شیمیایی اولئیک اسید [۲۶ و ۲۷ و ۲۷]

مقدار	مشخصه
$C_{18}H_{34}O_2$	فرمول شیمیائی
۲۸۶/۱۵ K	نقطه ذوب
۲۷۷/۱۵ K	نقطه انجماد
۲۹۳/۱۵ K ± ۱	نقطه ابری شدن <sup>۱</sup>
۲۷۳/۱۵ K ± ۱	نقطه ریزش <sup>۲</sup>
۳۸/۸۰ mPa.s	ویسکوزیته

## ۲-۲- تغییر فناوری سیال

اولین قدم در انجام مطالعه حاضر، آماده‌سازی نانوسیال و تعليق پایدار نانوذرات درون سیال پایه می‌باشد. در این تحقیق برای آماده سازی نانوسیال از روش دومرحله‌ای استفاده می‌شود. برای انجام آزمایش‌هایی با کمترین خطای اختیار داشتن نمونه‌های پایدار و همگن مهم‌ترین شرط است. کلوخه شدن یا عدم تعليق مناسب نانوذرات در سیال پایه می‌تواند خطای زیادی در اندازه‌گیری ایجاد کند. برای جلوگیری از این پدیده روش‌های مختلفی وجود دارد. استفاده از ماده فعال سطحی یکی از راهکارهای موثر در این زمینه می‌باشد. در این مطالعه، در بررسی‌های آزمایشگاهی، محلول آب / اتیلن گلیکول با نسبت ۵۰:۵۰ درصد حجمی در دمای ۲۹۸ درجه می‌باشد. در عنوان سیال پایه در نظر گرفته شدند. همچنین به میزان ۰/۲ درصد حجمی اولئیک اسید (OA) و ۰/۲ درصد وزنی سدیم دودسیل سولفونات (SDS) به عنوان ماده فعال سطحی برای ثبیت و پراکندگی نانوذرات به سیال پایه اضافه شدند. کسر حجمی نانوذرات در این تحقیق ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲/۵ درصد حجمی لحظه گردید و همچنین جهت بررسی اثر

<sup>۱</sup> Cloud point

<sup>۲</sup> Pour point

دما، دمای مورد آزمایش در بازه دمایی ۳۰-۲۶۰ کلوین قرار داده شد. نانوذرات که از حجم مساوی نانوآلومینا و گرافن تشکیل شده بودند در مقدار معینی از مخلوط آب/اتیلن گلیکول تعیق شدند. مقادیر مورد نیاز نانوذرات  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و گرافن برای تهیه نمونه های نانوسیال هیبریدی از معادله ۱ به دست آمد [۲۸-۳۲]:

$$\varphi = \left[ \frac{\left( \frac{W}{\rho} \right)_{\text{Al}_2\text{O}_3} + \left( \frac{W}{\rho} \right)_{\text{گرافن}}}{\left( \frac{W}{\rho} \right)_{\text{Al}_2\text{O}_3} + \left( \frac{W}{\rho} \right)_{\text{گرافن}} + \left( \frac{W}{\rho} \right)_{\text{EG}} + \left( \frac{W}{\rho} \right)_{\text{آب}}} \right] \times 100 \quad (1)$$

که در آن  $\varphi$  درصد حجمی نانوذرات است،  $\rho$  دانسیته بر حسب کیلوگرم در متر مکعب و  $W$  جرم بر حسب کیلوگرم است. مقادیر نانوذرات، اتیلن گلیکول (EG) و آب مورد استفاده برای تهیه حجم ۴۰۰ میلی لیتر نانوسیال هیبریدی محاسبه و در جدول ۵ گزارش شده است. غلظت ماده فعال سطحی برای همه نمونه ها ثابت بود. در تحقیق حاضر، نانوسیالات با استفاده از روش دومرحله ای تهیه شدند. جهت شکستن تجمع ذرات و تعیق یکنواخت از دستگاه همزن التراسونیک پرابی به مدت ۱۸۰ دقیقه استفاده گردید.

جدول ۵- مقادیر نانوذرات، اتیلن گلیکول (EG) و آب مورد استفاده برای تهیه حجم ۴۰۰ میلی لیتر نانوسیال هیبریدی

درصد حجمی جامد (%)	[± 0/001] (g) جرم			
	$\text{Al}_2\text{O}_3$	گرافن	اتیلن گلیکول (EG)	آب
.	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱۹۹/۶۴۲	۲۲۲/۶۴۰
۰/۰۵	۰/۳۸۹	۰/۰۲۳	۱۹۹/۵۴۲	۲۲۲/۵۲۹
۰/۱	۰/۷۷۸	۰/۰۴۶	۱۹۹/۴۴۲	۲۲۲/۴۱۷
۰/۵	۳/۸۹۰	۰/۲۳۰	۱۹۸/۶۴۴	۲۲۱/۵۲۷
۱	۷/۷۸۰	۰/۴۶۰	۱۹۷/۶۴۶	۲۲۰/۴۱۴
۱/۵	۱۱/۶۷۰	۰/۶۹۰	۱۹۶/۶۴۷	۲۱۹/۳۰۰
۲	۱۵/۵۶۰	۰/۹۲۰	۱۹۵/۶۴۹	۲۱۸/۱۸۷
۲/۵	۱۹/۴۵۰	۱/۱۵۰	۱۹۴/۶۵۱	۲۱۷/۰۷۴

### ۳-۲- آنالیز پایداری نانوسیالات

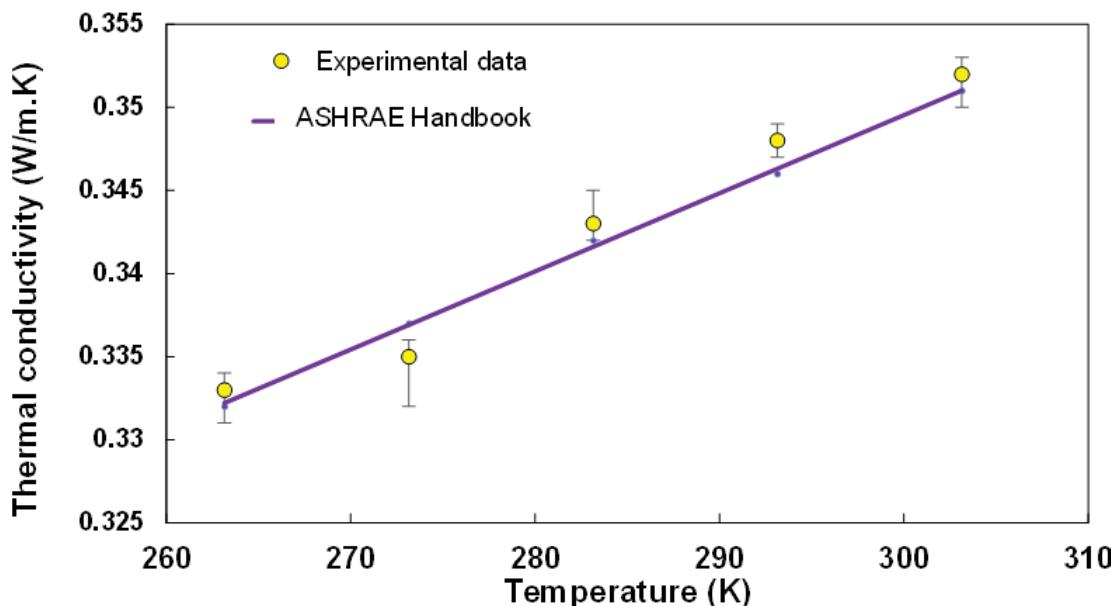
در این مطالعه، از پتانسیل زتا به عنوان یکی از روش های ارزیابی پایداری نانوسیالات استفاده شد. پتانسیل زتا نانوسیالات هیبریدی در دمای ۲۹۸ کلوین با استفاده از دستگاه Zetasizer Nano SZ100 ساخته شده توسط شرکت Horiba ژاپن اندازه گیری شد.

### ۴-۲- اندازه گیری هدایت حرارتی نانوسیالات

در این تحقیق از دستگاه آنالیزور حرارتی KD2 Pro و سنسور KS-1 جهت تعیین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال استفاده شد. این دستگاه مجهز به یک حمام آب جهت ثابت نگه داشتن دما و همچنین سیرکولاسیون آب حول ظرف دوجداره که حاوی نمونه است، بود. در این بررسی سنسور KS-1 با قطر  $1/3$  میلی متر و طول  $60$  میلی متر انتخاب گردید. با انتخاب این سنسور، میزان هدایت حرارتی نانوسیال در بازه  $K(mK)/(mW/m^2)$  با دقت  $\pm 0/01$  میزان شده.

پیش از اندازه گیری هدایت حرارتی نانوسیالات هیبریدی، جهت اندازه گیری دقیق هدایت حرارتی نانوسیال های مورد بررسی، کالیبراسیون دستگاه انجام شد. برای اطمینان از دقت ابزار pro KD2، قبل از اندازه گیری میزان هدایت حرارتی نانوسیال های هیبریدی، هدایت حرارتی مخلوط های آب اتیلن گلیکول ( $50:50$  درصد حجمی) در دمای های مختلف توسط pro KD2 اندازه گیری شد و با داده های ارائه شده در ASHRAE [۳۳] مقایسه شد. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، در محدوده دمایی ذکر شده هدایت حرارتی سیال پایه که به طور آزمایشگاهی تعیین شده است، با داده های ASHRAE مطابقت خوبی دارد و اختلاف جزئی (کمتر از  $5/0$  درصد) با داده های مرجع مشاهده می شود. در نتیجه میزان خطای دستگاه در محدوده قابل قبول می باشد. اندازه گیری

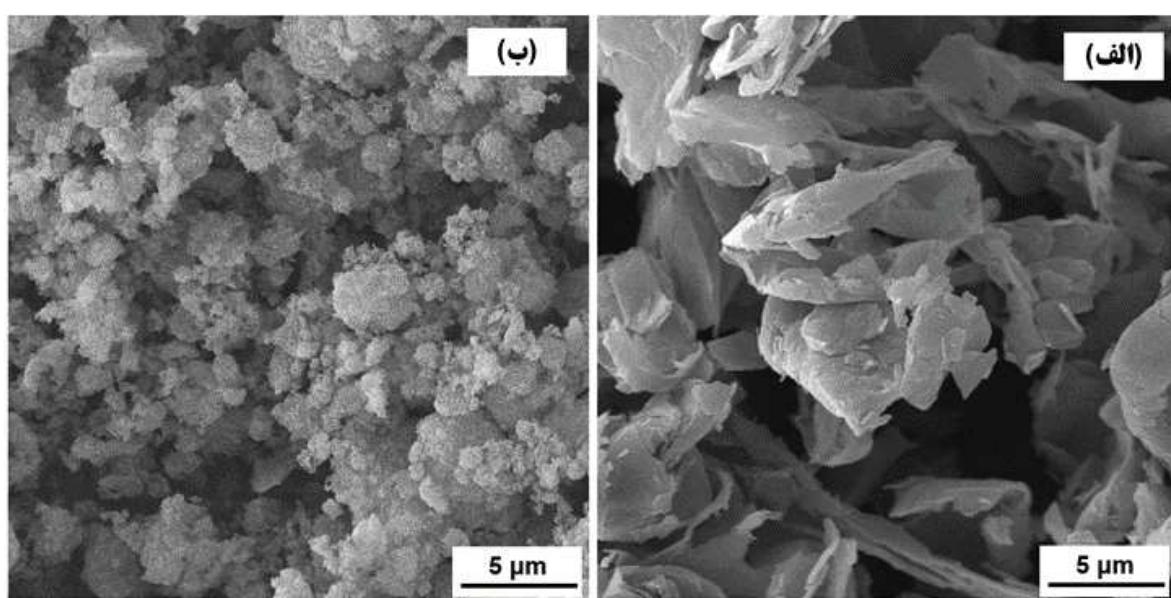
میزان هدایت حرارتی برای هر نانوسيال سه بار تکرار و در نهایت میزان هدایت حرارتی نانوسيال در هر دما و غلظت برابر میانگین سه اندازه‌گیری گزارش شد.



شکل ۲- مقایسه بین نتایج تجربی و داده‌های ASHRAE [۳۳] در مورد هدایت حرارتی مخلوط آب- اتیلن گلیکول (۵۰:۵۰ درصد حجمی) در دماهای مختلف.

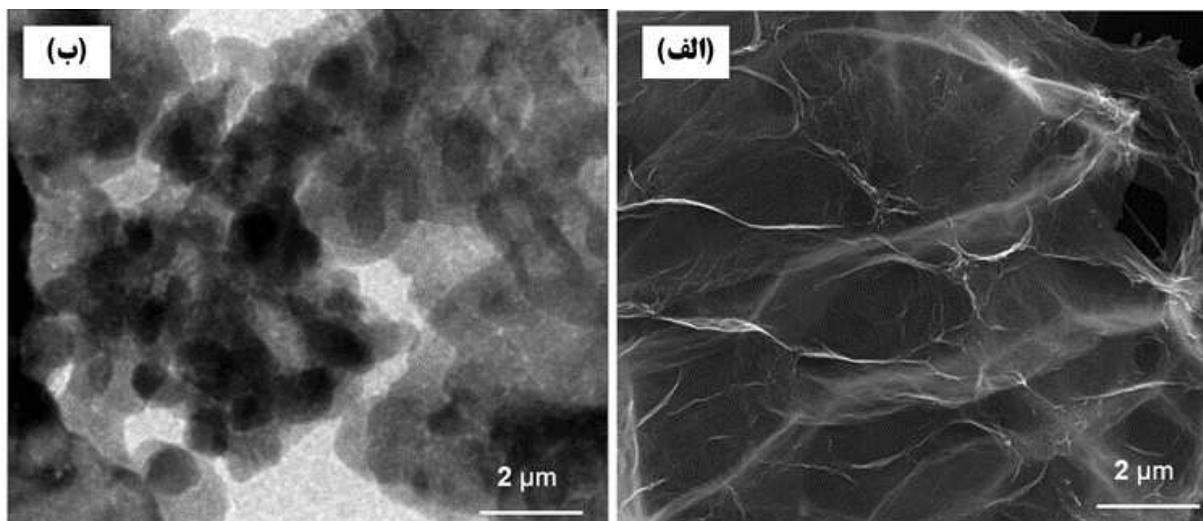
### ۳- نتایج و بحث

ریخت نانوذرات  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و نانوصفحات گرافن توسط SEM بررسی شد (شکل ۳-الف). مشاهدات SEM (شکل ۳-الف) نشان می‌دهد که نانوصفحات گرافن از ورقه‌های کوتاه لایه‌های گرافن تشکیل شده‌اند. ورقه‌های گرافن روی هم جمع شده و مانند کاغذهای نازک چروکیده به نظر می‌رسند. شکل ۳-ب تصویر SEM از نانوذرات  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود ریخت اغلب نانوذرات آلومینا به صورت شبکه‌کروی دیده می‌شود. همانطور که در شکل ۳-ب مشاهده می‌شود، پودرهای نانو تا حدی آگلومره شده‌اند. تشکیل تجمع ذرات (آگلومراسیون) به دلیل نسبت سطح و حجم بسیار زیاد نانوذرات است.



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (الف) نانوصفحات گرافن و (ب)  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$

بررسی‌های بیشتر در مورد اندازه و شکل ذرات نانو با استفاده از تصاویر TEM به دست آمد. شکل ۴-الف تصویر TEM از نانوصفحات گرافن است که چین و چروک‌ها<sup>۱</sup> و مناطق تا شده<sup>۲</sup> را نشان می‌دهد که ساختار معرف نانوصفحات گرافن است. تصاویر TEM از نانوذرات  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  در شکل ۴-ب نشان داده شده است. تصاویر TEM از نانوذرات  $\text{Al}_2\text{O}_3$  نشان داد که اغلب ذرات شکل شبکه‌کروی را نشان می‌دهند.



شکل ۴- تصاویر TEM از (الف) نانو صفحات گرافن و (ب) نانوذرات  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ .

برای تأیید پایداری نانوسیالات هیبریدی، آنالیز پتانسیل زتا انجام شد. پتانسیل زتا نانوسیالات هیبریدی در ۲۹۸ کلوین به عنوان تابعی از کسر حجمی جامد و زمان در شکل ۵ نشان داده شده است. از شاخص پتانسیل زتا برای ارزیابی پایداری نانوذرات استفاده می‌شود که مربوط به نیروهای دافعه الکترواستاتیک بین نانوذرات است. نانوسیال پایدار دارای پتانسیل زتا بیش از ۳۰ میلیولت می‌باشد. مقادیر کمتر از ۱۵ میلیولت برای پتانسیل زتا نشان‌دهنده ناپایداری نانوسیالات است [۳۴-۳۶].

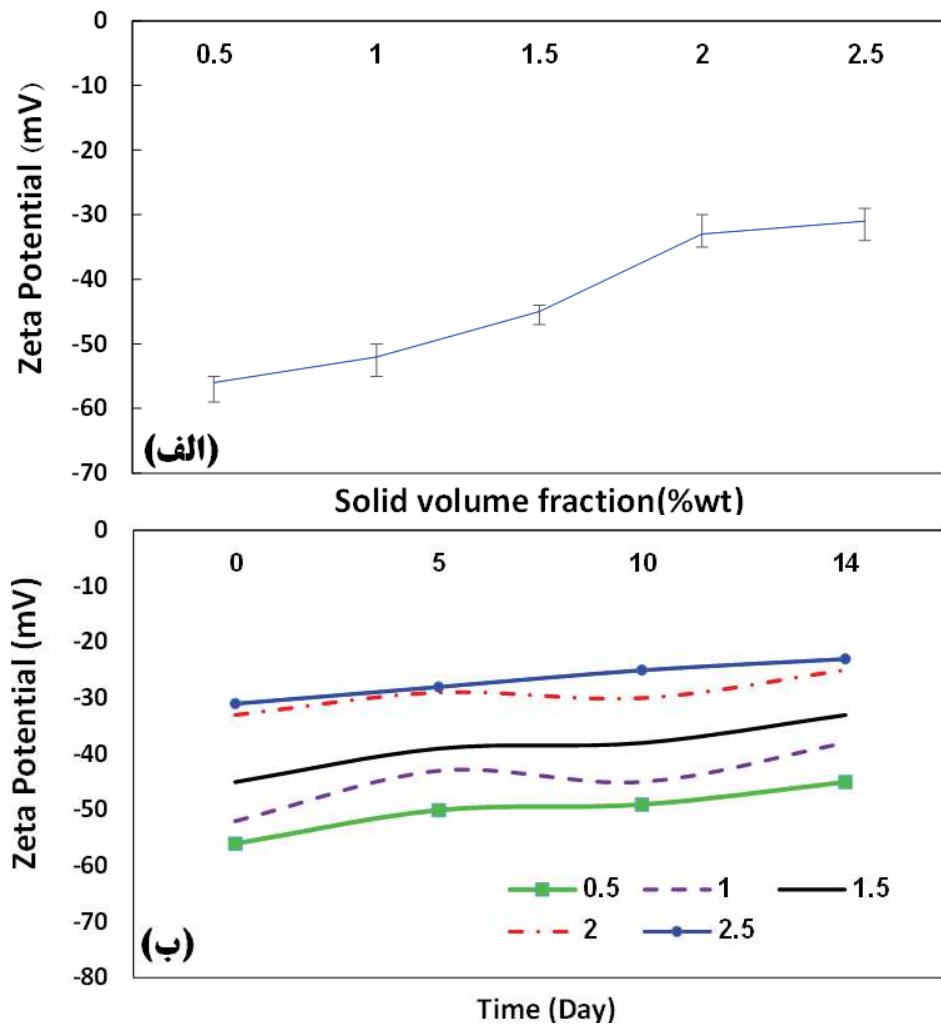
همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، مقادیر پتانسیل زتا نانوسیالات هیبریدی از ۳۱-۳۱-۵۵ میلیولت متغیر است که برای پایداری نانوسیال کافی است. این امر نشان‌دهنده آن است که در حضور عامل فعال سطحی، نانوذرات دارای توزیع و پراکندگی مناسب بدون آگلومر شدن می‌باشند. همچنین با توجه به شکل مشخص می‌شود که حداقل مقادیر پتانسیل زتا در بالاترین مقادیر غلظت نانوذرات حاصل شده است. این را می‌توان با فاصله کمتر بین نانوذرات در غلظت‌های بالاتر، که منجر به تجمع ذرات می‌شود، توضیح داد. مطابق با شکل ۵-ب مقادیر پتانسیل زتا نانوسیالات با افزایش زمان کاهش می‌یابد. با توجه به گرانش و حرکت براونی، ذرات نانو به تدریج با گذشت زمان تمایل به آگلومراسیون و تشکیل تجمع دارند [۲۰ و ۳۵ و ۳۷].

در این مطالعه، اندازه‌گیری‌های هدایت حرارتی نانوسیالات هیبریدی در محدوده دمائی از ۲۶۰ تا ۳۰۵ کلوین برای سوسپانسیون‌های با کسر حجمی جامد ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد انجام شد. شکل ۶ هدایت حرارتی نانوسیالات هیبریدی را بر حسب کسر حجمی جامد در دماهای مختلف نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، در نمونه فاقد نانوذرات ( $\varphi = 0$ ) حضور عامل فعال سطحی اثر قابل ملاحظه‌ای بر هدایت حرارتی سیال پایه نشان نمی‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی با کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد. با فرض تعلیق یکنواخت، در کسر حجمی بالای جامد، تعداد ذرات موجود در حجم معینی از نانوسیال هیبریدی بیشتر است و فاصله بین ذرات جامد در سیال پایه نسبتاً کمتر از غلظت‌های پایین‌تر است. هدایت حرارتی نانوسیال، به دلیل پایداری بالا، اندازه ذرات و ماهیت ذاتی هدایت حرارتی در جامدات به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد. به همین دلیل کاربرد نانوسیالات در مبدل‌های حرارتی بسیار مناسب است. نانوسیالاتی که خواص انتقال حرارتی بهتر و

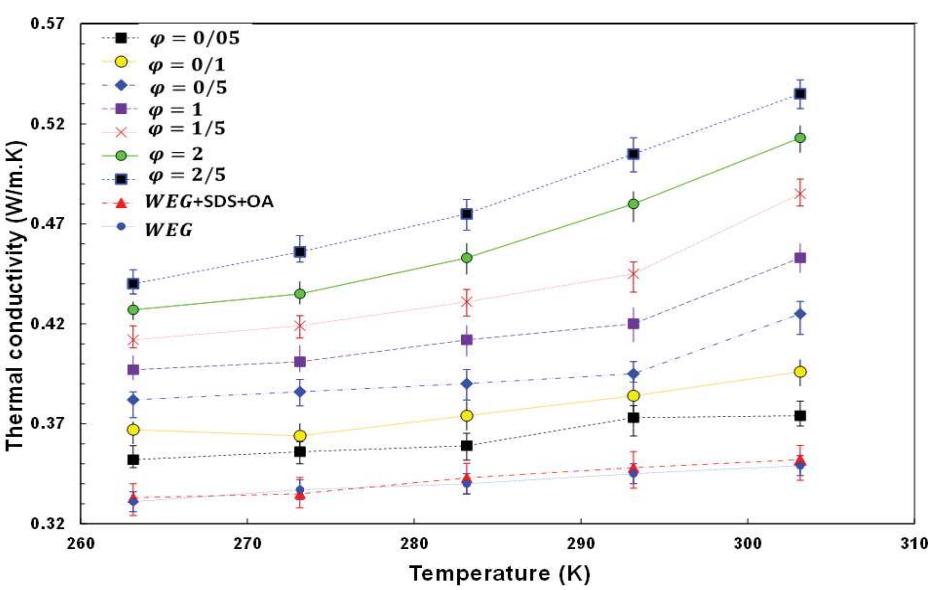
<sup>1</sup> wrinkles

<sup>2</sup> folded regions

هدایت حرارتی بالاتری را داشته باشند در افزایش ضریب انتقال حرارت سیال پایه مناسب‌تر خواهند بود.



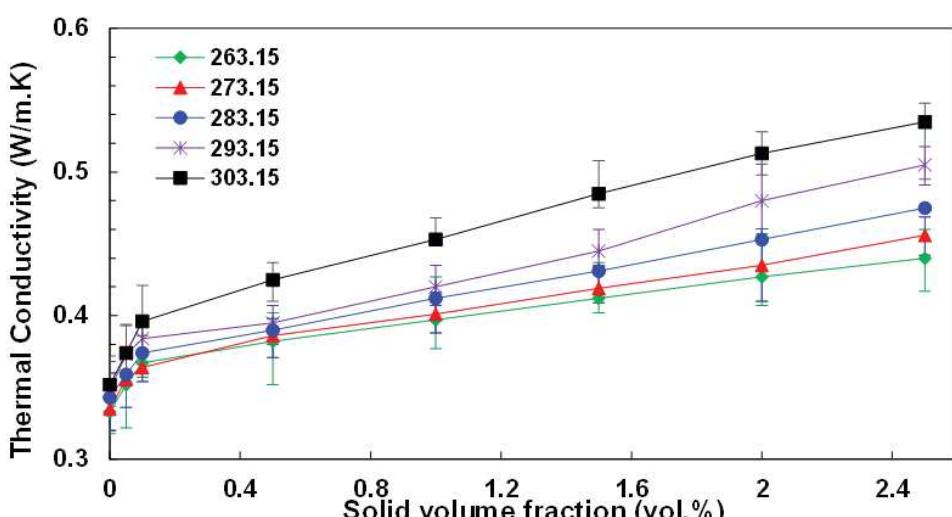
شکل ۵- پتانسیل زتای نانوسيالات هيبريدی بر حسب (الف) کسر حجمی جامد و (ب) زمان.



شکل ۶- تغییرات هدایت حرارتی نانوسيالات هيبريدی بر حسب کسر حجمی جامد در دمای مختلف

با افزایش دما، انرژی جنبشی ذرات افزایش یافته و تعداد برخورد تصادفی بین ذرات افزایش می‌یابد. افزایش برخورد نانوذرات باعث افزایش تبادل انرژی بین ذرات می‌شود. این امر هدایت حرارتی سیال پایه را افزایش می‌دهد. این افزایش در نانوسيالات هیبریدی با غلظت بالاتر چشمگیرتر است. فاصله زیاد بین ذرات از افزایش قابل توجه هدایت حرارتی در غلظت‌های پایین جلوگیری می‌کند. افزایش غلظت نانوذرات، هدایت حرارتی را افزایش می‌دهد، اما از سوی دیگر، می‌تواند موجب افزایش احتمال آگلومراسیون نانوذرات شود. آگلومراسیون نانوذرات، نسبت سطح به حجم را کاهش می‌دهد و هدایت حرارتی را کاهش می‌دهد. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، با افزایش دما، هدایت حرارتی افزایش می‌یابد. در دماهای بالاتر، شبیه این تغییرات مثبت بیشتر است. این بدان معنی است که در دماهای بالاتر، بازده حرارتی نانوسيال هیبریدی بهبود یافته است.

هدایت حرارتی نانوسيالات هیبریدی بر حسب دما برای مقادیر مختلف کسر حجمی نانوذرات در شکل ۷ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۷ دیده می‌شود، در کسرهای حجمی جامد بالاتر (۱-۲/۵ درصد حجمی)، اثر دما بر هدایت حرارتی نانوسيال هیبریدی چشمگیرتر است. هدایت حرارتی بر اساس حرکت براونی و برخورد بین ذرات نانو است. در غلظت‌های زیاد، اثر دما ملموس‌تر است.



شکل ۷- هدایت حرارتی نانوسيالات بر حسب دما در کسرحجمی های مختلف جامد

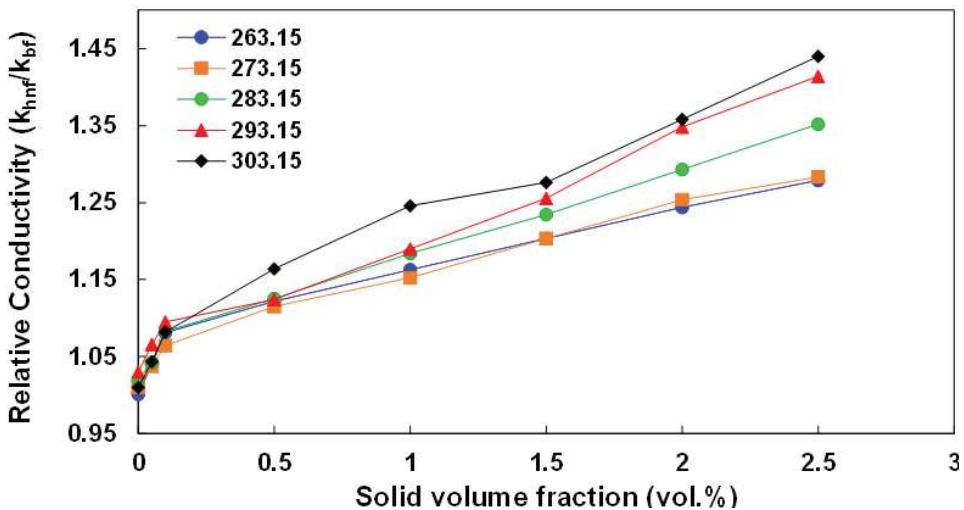
شکل ۸ تغییرات نسبت هدایت حرارتی نانوسيال هیبریدی به سیال پایه را به عنوان تابعی از دما و کسر حجمی جامد نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که نسبت هدایت حرارتی نانوسيال هیبریدی با افزایش دما و افزایش کسر حجمی جامد افزایش می‌یابد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزودن نانو ذرات به سیال پایه، هدایت حرارتی نانوسيال هیبریدی در مقایسه با سیال پایه، بهبود می‌یابد. اندازه‌گیری‌های هدایت حرارتی نشان داد که حداکثر افزایش هدایت حرارتی نانوسيال هیبریدی ۴۶/۰۲ درصد بود که در کسر حجمی جامد ۲/۵ درصد و دمای ۳۰/۳ کلوین حاصل شد.

هدایت حرارتی نانوصفحات گرافن و نانوذرات  $\text{Al}_2\text{O}_3$  به ترتیب حدود  $40\text{ W/m.K}$  [۴۰] و  $38\text{ W/m.K}$  [۳۹] و  $36\text{ W/m.K}$  [۴۴] است، در حالی که برای اتیلن گلیکول  $244\text{ W/m.K}$  [۰/۲۴۴] و برای آب  $6/0\text{ W/m.K}$  [۱۹] است. بنابراین، با افزودن مواد افزودنی نانو به سیال پایه، هدایت حرارتی آن افزایش می‌یابد. همچنین، همانطور که قبلًا ذکر شد، با افزایش غلظت نانوذرات، تعداد نانوذرات معلق افزایش می‌یابد. از این رو، سرعت انتقال حرارت بهبود می‌یابد و همزمان ویسکوزیته نانوسيال افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، پایداری نانوسيال در غلظت‌های بالا کاهش یافته و منجر به آگلومراسیون و تجمع ذرات نانو می‌شود. از این رو، میزان افزایش هدایت حرارتی در کسر حجمی بالاتر جامد نسبتاً کاهش می‌یابد.

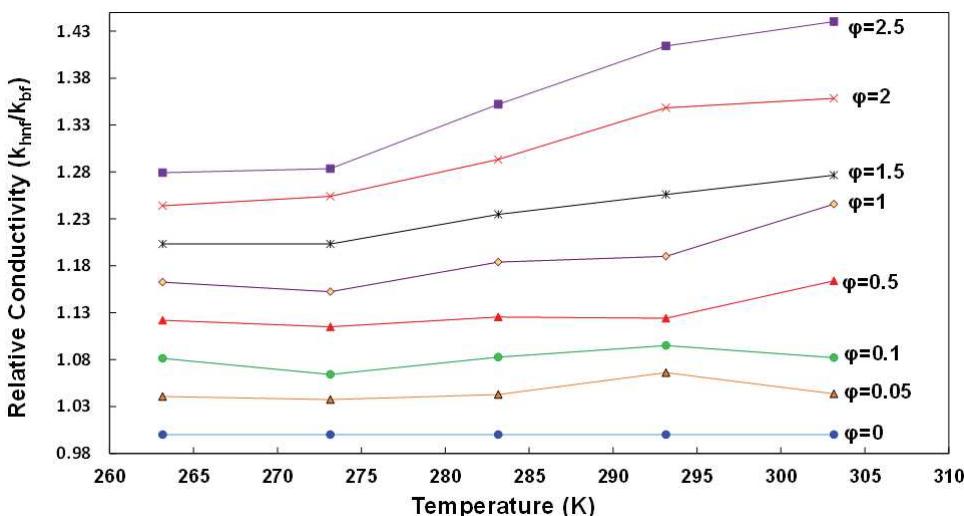
برای نشان دادن هدایت حرارتی بهبود یافته، تغییر نسبت هدایت حرارتی نانوسيال هیبریدی به عنوان تابعی از کسر حجمی جامد و دما در شکل ۹ نشان داده شده است. این شکل، به وضوح تأثیر محتوای نانوذرات و دما بر افزایش هدایت حرارتی نانوسيالات را



اثبات می‌کند. افزایش نسبت هدایت حرارتی تقریباً برابر با  $14/4\%$  و  $10/7\%$  در بالاترین و کمترین دمای آزمایش به ازای بالاترین کسر حجمی ( $2/5$  درصد حجمی) است. نتایج اندازه‌گیری‌های هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی در دمای پایین نشان دهنده بهبود قابل قبول در هدایت حرارتی نسبت به سیال پایه است. بر این اساس، نتیجه گرفته شد که کاربرد آن‌ها در محیط‌های دمای پایین می‌تواند مفید باشد. این نتایج برای استفاده از نانوسیال هیبریدی در کاربردهای دمای پایین، نتایج امیدوارکننده‌ای است.



شکل ۸- نسبت هدایت حرارتی نانوسیال نسبت به سیال پایه بر حسب کسرهای حجمی مختلف جامد و در دماهای مختلف



شکل ۹- نسبت هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی به سیال پایه در دماهای مختلف.

چند مدل برای توضیح مکانیزم افزایش هدایت حرارتی سیال پایه در حضور افزودنی‌های نانو وجود دارد مانند: نظریه ماکسول، مدل همیلتون-کراسر، حرکت براونی و تجمع ذرات [۱۷]. در تحقیقات انجام شده، اغلب مطالعات بر روی یافتن معادله حاکم بر هدایت حرارتی نانوسیالات متمرکز بوده است و با توجه به تأثیر دما و کسر حجمی نانوذرات، معادلات متعددی برای پیش‌بینی رفتار هدایت حرارتی نانوسیالات هیبریدی پیشنهاد شده است [۱۷]. معادله ۲ مدل ماکسول است که معادله پایه‌ای برای پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیالات است:

$$k_{nf} = \frac{k_p + 2k_{bf} + 2\varphi(k_p)}{k_p + 2k_{bf} - \varphi(k_p - k_{bf})} \quad (2)$$

که در آن  $k_{nf}$  هدایت حرارتی نانوسیال،  $\varphi$  غلظت کلی نانوذرات و  $k_p$  و  $k_{bf}$  به ترتیب هدایت حرارتی ذرات نانو و سیال پایه هستند. Takabi و همکاران [۴۱] یک معادله برای هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی، بر اساس مدل ماکسول و قانون اختلاط

ارائه داده‌اند. این مدل با در نظر گرفتن  $k_p$  به صورت معادله (۳) معادله (۴) را پیشنهاد می‌دهد:

$$k_p = \frac{(\varphi np_1 k_{np1} + \varphi np_2 k_{np2})}{\varphi} \quad (3)$$

$$k_{hnf} = k_{bf} \frac{\frac{(\varphi np_1 k_{np1} + \varphi np_2 k_{np2})}{\varphi} + 2k_{bf} + 2(\varphi np_1 k_{np1} + \varphi np_2 k_{np2}) - 2\varphi k_{bf}}{\frac{(\varphi np_1 k_{np1} + \varphi np_2 k_{np2})}{\varphi} + 2k_{bf} - (\varphi np_1 k_{np1} + \varphi np_2 k_{np2}) + \varphi k_{bf}} \quad (4)$$

که در آن  $k_{hnf}$  هدایت حرارتی نانوسيال هيبريدی است،  $\varphi$  غلظت حجمی دو نوع مختلف ذره نانو است که در نانوسيال هيبريدی پراکنده شده‌اند و به صورت  $\varphi = \varphi_{np1} + \varphi_{np2}$  محاسبه می‌شود،  $\varphi_{np1}$  کسر حجمی نانوذرات است و  $\varphi_{np2}$  هدایت حرارتی نانوذرات است. نتایج محاسبه شده هدایت حرارتی نانوسيالات هيبريدی آب-اتيلن‌كليكول / نانوآلومينا-نانوگرافن توسط اين مدل در شكل ۱۰ همراه با داده‌های تجربی نشان داده شده است. از شكل ۱۰ می‌توان دريافت که هدایت حرارتی اندازه‌گيری شده كمتر از مقداری است که با استفاده از مدل Takabi [۴۱] محاسبه می‌شود. به نظر می‌رسد که در كسرهای حجمی‌های بسیار کم (۰/۰۵-۰/۱) این مدل کاربرد بیشتری دارد و در غلظت‌های بالا نتایج تجربی انحراف قابل توجهی از مقادیر محاسبه شده دارند.

نانوذرات معلق با دو روش هدایت حرارتی نانوسيالات را افزایش می‌دهند: هدایت حرارتی ثابت استاتیک و حرکت تصادفی ذرات نانو. حرکت تصادفی ذرات نانو مربوط به فعل و انفعالات سطحی بین ذرات و مولکول‌های مایع است [۴۲]. با در نظر گرفتن این دو مکانیزم، كل هدایت حرارتی موثر در نانوسيالات را می‌توان به صورت معادله (۵) نوشت:

$$k_{eff} = k_{eff,EMT} + k_{eff,Brown} \quad (5)$$

که در آن  $k_{eff}$  كل هدایت حرارتی موثر نانوسيال است و  $k_{eff,EMT}$  بخشی از هدایت حرارتی است که به تئوري محیط موثر مرتبط است و  $k_{eff,Brown}$  بخشی از هدایت حرارتی است که به حرکت براونی مرتبط است. Gao و همکاران [۴۲] هدایت حرارتی نانوسيال هيبريدی Graphene oxide -  $Al_2O_3/Water$  را در دامنه‌ای از دما ۷۰-۰ درجه سانتی‌گراد و کسر جرمی ذرات نانو از ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۲۵ بررسی کرده و مدل جدیدی را برای هدایت گرمایی موثر نانوسيالات هيبريدی پیشنهاد کرده‌اند. با در نظر گرفتن ساختار و حرکت براونی، هدایت حرارتی به صورت معادله ۶ در نظر گرفته می‌شود:

$$k_{eff,hnf} = \varphi \left[ k_{bf} \left( \frac{k_{eff,EMT,1}}{k_{bf}} + k_{eff,Brown,1} \right) \right] + (1 - \varphi) \left[ k_{bf} \left( \frac{k_{eff,EMT,2}}{k_{bf}} + k_{eff,Brown,2} \right) \right] \quad (6)$$

که در آن  $\varphi$  کسر حجمی نانوذره  $Al_2O_3$  است و زيرنويس آ به هر نانوذره ارجاع می‌شود. با اعمال مدل Gao به نانوسيال مورد مطالعه در اين پژوهش،  $k_{hnf}$  به روسي که در ادامه شرح داده شده محاسبه می‌شود. در اين مدل،  $K_{eff,EMT}$  برای نانوذره  $Al_2O_3$  هدایت حرارتی استاتیک آن از مدل همیلتون-کراسر (H-C) قابل محاسبه است، توسط معادله (۷) تعیین می‌شود:

$$\frac{k_{eff,EMT,1}}{k_{bf}} = \frac{k_{np} + (n-1)k_{bf} - (n-1)\varphi(k_{bf} - k_{np})}{k_{np} + (n-1)k_{bf} + \varphi(k_{bf} - k_{np})} \quad (7)$$

که در آن  $K_{eff,EMT,1}$  هدایت حرارتی موثر  $Al_2O_3$  است و  $n$  عامل شکل تجربی است که برای ذرات کروی مقدار  $n$  برابر ۳ است. مطابق مدل Gao [۴۲]، هدایت گرمایی موثر نانوذره گرافن،  $K_{eff,EMT,2}$  به صورت معادله (۸) محاسبه می‌شود:

$$\frac{k_{eff,EMT,2}}{k_{bf}} = \frac{3 + 2\eta^2\varphi / [k_{bf}(2\frac{R_k}{L} + 13.4\sqrt{t})]}{3 - \eta\varphi} \quad (8)$$

که در آن  $t$  ضخامت،  $L$  طول،  $R_k$  مقاومت حرارتی سطحی و  $\eta$  ميانگين نسبت صافي<sup>۱</sup> است. افزایش هدایت حرارتی توسط حرکت تصادفی نانوذرات توسط معادله (۹) محاسبه می‌شود:

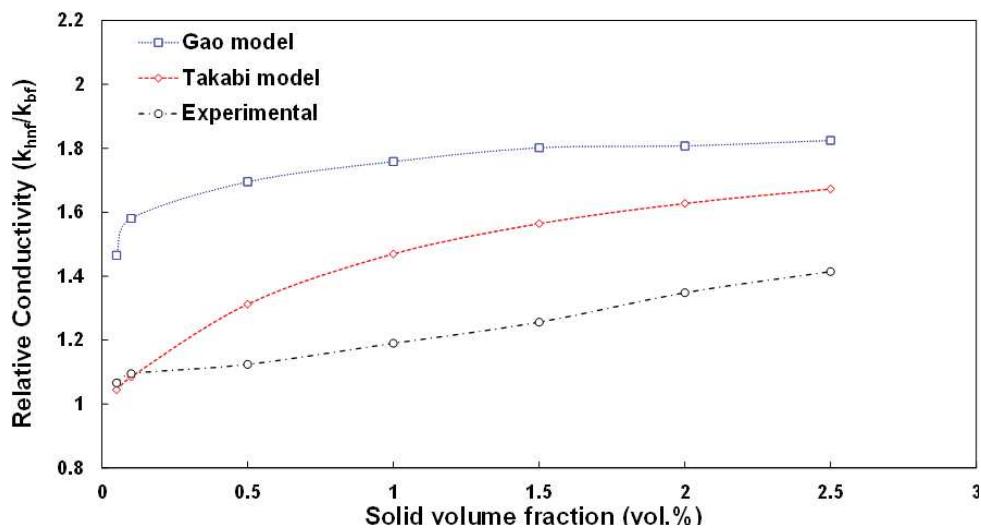
$$k_{eff,Brown} = \frac{\rho_{np}\varphi C_{p,np}}{2} \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi\mu r_c}} \quad (9)$$

که در آن  $\rho_{np}$  و  $C_{p,np}$  به ترتیب چگالی و ظرفیت حرارتی ویژه نانوذرات،  $\mu$  ویسکوزیته سیال پایه،  $k_B$  ثابت بولتزمن،  $T$  دمای کلوین و  $r_c$  ميانگين شعاع خوش است. برای نانو ذرات کروی  $Al_2O_3$  شعاع است و برای نانو ورقه‌های گرافن  $r_c$  تقریباً نیمی از قطر معادل ( $d_{p,eq}$ ) ورقه است:

<sup>۱</sup> flatness ratio

$$d_{p,eq} = \left( \frac{6v_{non-sph}}{\pi} \right)^{1/3} \quad (10)$$

با استخراج مقادیر  $L$ ,  $\epsilon$  و  $R_k$  بر اساس داده‌های تجربی، هدایت حرارتی نانوسيال هيبريدی آب-اتيلن گليكول / نانوآلومينا-نانوگرافن با استفاده از مدل Gao [۴۲] محاسبه و نتایج محاسبه شده در مقایسه با داده‌های تجربی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۱۰ مشخص شد که هدایت حرارتی اندازه‌گیری شده بیشتر از مقدار محاسبه شده با استفاده از مدل GAO [۴۲] است و نتایج تجربی با نتایج پیش‌بینی شده مطابقت قابل قبولی ندارند.



شکل ۱۰- مقایسه بین نتایج تجربی اندازه‌گیری شده هدایت حرارتی و مقادیر هدایت حرارتی محاسبه شده با استفاده از مدل Gao [۴۲] و مدل Takabi [۴۱] برای نانوسيال هيبريدی آب-اتيلن گليكول / نانوآلومينا-نانوگرافن.

همانگونه که از روابط مربوط به مدل‌های مدل Gao [۴۲] و مدل Takabi [۴۱] استنباط می‌شود، این دو مدل برای تخمین ضریب هدایت حرارتی تابع عواملی مانند کسر حجمی نانوذرات و شکل ذرات معلق می‌باشند و تاثیر عوامل بسیار مهم و تاثیرگذاری مانند دما و قطر نانوذرات، نوع و میزان مواد عامل فعال سطحی و نوع روش پایدارسازی در آن‌ها لحاظ نشده است.

پارامترهای مختلف موثر بر هدایت حرارتی نانوسيالات ترکیبی مانند دما، چگالی، گرمای ویژه، pH، حرکات براونی<sup>۱</sup>، پارامترهای شکل و اندازه افروزی نانو، کسر حجم جامد، تشکیل آگلومرها (اثر خوشبندی)، ویسکوزیته، خواص اتمی و شیمیایی ذرات نانو و روش تولید نانوسيال منجر به ایجاد ساختار پیچیده‌ای در نانوسيالات هيبريدی می‌شود. بر این اساس، نتایج تجربی به طور قبل توجهی از نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل‌های نظری متفاوت است. روابط مشخص شده در مطالعات انجام شده، یک دستور صریح برای پیش‌بینی نسبت هدایت حرارتی نمی‌دهد و به نظر می‌رسد که یک مدل واحد و منحصر به فرد نمی‌تواند طیف گسترده‌ای از مشاهدات تجربی را برای نانوسيالات هيبريدی مختلف پیش‌بینی کند. این اختلاف ممکن است به دلیل کمبود داده‌ها برای نانوسيالات خاص باشد. بر این اساس، مدل‌ها با استفاده از مجموعه داده‌های کوچک و فرضیات ساده ساخته شده‌اند. از سوی دیگر، در نظر نگرفتن پارامترهای مهم و اثرگذار مانند دما یا اندازه نانوذرات در روابط و مدل‌های تخمین ضریب هدایت حرارتی نانوسيالات می‌تواند باعث عدم کارائی و کاهش نتیجه بخشی مدل‌های تخمین هدایت حرارتی شود. پارامترهای قطر نانوذرات و دمای نانوسيال در کنار پارامترهایی مانند کسر حجمی اثر تعیین‌کننده‌ای بر ضریب هدایت حرارتی نانوسيال دارند. بسیاری از مدل‌هایی که تاکنون به صورت تحلیلی یا تجربی ارائه شده‌اند میزان اثرگذاری این پارامترها را ناچیز فرض کرده‌اند و یا اثر این پارامترها را به صورت مستقیم لحاظ ننموده‌اند.

<sup>۱</sup> Brownian



## ۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر دما و غلظت نانوذرات متشکل از نانوذرات آلومینا و نانوصفحات گرافن بر هدایت حرارتی نانوسیال پایه متشکل از آب و اتیلن گلیکول مورد مطالعه قرار گرفت. در تهیه نانوسیال هیبریدی، مخلوط آب- اتیلن گلیکول با نسبت ۵۰:۵۰ درصد حجمی در دمای ۲۹۸ کلوین به عنوان سیال پایه در نظر گرفته شد. نانوذرات که از حجم مساوی نانوذرات آلومینا و نانوصفحات گرافن تشکیل شده بودند در مقدار معینی از سیال پایه تعیق شدند. همچنین به میزان ۰/۲ درصد حجمی اولئیک اسید (OA) و ۰/۰ درصد وزنی سدیم دودسیل سولفونات (SDS) به عنوان ماده فعال سطحی برای ثبت و پراکندگی نانوذرات به سیال پایه اختفای شدند. نانوسیالات با استفاده از روش دو مرحله‌ای تهیه شدند. کسر حجمی نانوذرات در این تحقیق ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵ و ۰/۲ درصد حجمی لحظه گردید و همچنین جهت بررسی اثر دما، ماهای مورد آزمایش در بازه دمائی ۲۶۰-۳۰۳ کلوین طراحی شد. ریخت‌شناسی و ریزساختار نانوذرات توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) انجام شد. پس از سنتز نانوسیال هیبریدی آب- اتیلن گلیکول/ نانوگرافن- نانوآلومینا، هدایت حرارتی نانوسیالات هیبریدی اندازه‌گیری و با سیال پایه مقایسه شد و نتایج زیر حاصل شد:

۱- نتایج نشان داد که خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیال هیبریدی آب- اتیلن گلیکول/ نانوگرافن- نانوآلومینا خصوصاً در ماهای زیر صفر به شدت به دما و غلظت نانوذرات وابسته است.

۲- هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی آب- اتیلن گلیکول/ نانوگرافن- نانوآلومینا به غلظت نانوذرات و دما وابسته است. نتایج نشان داد که افزایش دما و غلظت حجمی نانوذرات موجب افزایش هدایت حرارتی نانوسیالات هیبریدی می‌شود. حداقل افزایش هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی برابر با ۰/۲ درصد بود که در کسر حجمی ۰/۵ درصد و در دمای ۳۰۳ کلوین حاصل شد.

۳- نتایج اندازه‌گیری هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی آب- اتیلن گلیکول/ نانوگرافن- نانوآلومینا با مدل‌های پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیالات مقایسه شد ولی تطابق قابل قبولی وجود نداشت.

## منابع مالی/ حمایت‌ها

این پژوهش تحت حمایت صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور- معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری با شماره ۹۷۰۱۷۹۶۴ انجام شده است.

## مراجع

- [1] S. Chakraborty, P. K. Panigrahi, "Stability of nanofluid: A review", *Appl. Therm. Eng.*, 2020, 174 115259.
- [2] I. M. Mahbubul, R. Saidur, M. A. Amalina, "Latest developments on the viscosity of nanofluids", *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2012, 55 874–885.
- [3] D. Dey, P. Kumar, S. Samantaray, "A review of nanofluid preparation, stability, and thermo-physical properties", *Heat Transf. - Asian Res.*, 2017, 46 1413–1442.
- [4] A. K. Rasheed, M. Khalid, W. Rashmi, T. C. S. M. Gupta, A. Chan, "Graphene based nanofluids and nanolubricants - Review of recent developments", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2016, 63 346–362 .
- [5] D. Khurana, R. Choudhary, S. Subudhi, "A critical review of forced convection heat transfer and pressure drop of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> and CuO nanofluids", *Heat Mass Transf.*, 2017, 53 343–361
- [6] Sarafraz, M. M., Safaei, M. R., Tian, Z., Goodarzi, M., Bandarra Filho, E. P., & Arjomandi, M. (2019). "Thermal assessment of nano-particulate graphene-water/ethylene glycol (WEG 60: 40) nano-suspension in a compact heat exchanger". *Energies*, 1929, 12 (10).
- [7] Y. R. Sekhar, K. V. Sharma, "Study of viscosity and specific heat capacity characteristics of water-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids at low particle concentrations", *J. Exp. Nanosci.*, 2015, 10 86–102.
- [8] S. S. J. Aravind, S. Ramaprabhu, "Graphene-multiwalled carbon nanotube-based nanofluids for improved heat dissipation", *RSC Adv.*, 2013, 3 4199–4206.
- [9] P. Van Trinh, N. N. Anh, B. H. Thang, L. D. Quang, N. T. Hong, N. M. Hong, P. H. Khoi, P. N. Minh, P. N. Hong, "Enhanced thermal conductivity of nanofluid-based ethylene glycol containing Cu nanoparticles decorated on a Gr-MWCNT hybrid material", *RSC Adv.*, 2017, 7 318–326.

- [10] M. M. Sarafraz, M. R. Safaei, Z. Tian, M. Goodarzi, "Nano-Suspension in a Compact Heat Exchanger", Energies, 2019, 1217.
- [11] J. Gangwar, A.K. Srivastava, S.K. Tripathi, M. Wan, R.R. Yadav, "Strong enhancement in thermal conductivity of ethylene glycol-based nanofluids by amorphous and crystalline Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles", Appl. Phys. Lett., 2014, 105 19–23 .
- [12] J. Xu, K. Bandyopadhyay, D. Jung, "Experimental investigation on the correlation between nano-fluid characteristics and thermal properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano-particles dispersed in ethylene glycol-water mixture", Int. J. Heat Mass Transf., 2016, 94 262–268.
- [13] R. Agarwal, K. Verma, N. K. Agrawal, R. Singh, "Sensitivity of thermal conductivity for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids", Exp. Therm. Fluid Sci., 2017, 80 19–26.
- [14] S. Tanvir, L. Qiao, "Surface tension of nanofluid-type fuels containing suspended nanomaterials", West. States Sect. Combust. Inst. Spring Tech. Meet. 2012, 2012 551–573.
- [15] B. Aladag, S. Haleffadl, N. Doner, T. Maré, S. Duret, P. Estellé, "Experimental investigations of the viscosity of nanofluids at low temperatures", Appl. Energy., 2012, 97 876–880.
- [16] G. Sekrani, S. Poncet, "Ethylene- and propylene-glycol based nanofluids: A litterature review on their thermophysical properties and thermal performances", Appl. Sci., 2018, 8.
- [17] A. Banisharif, M. Aghajani, S. Van Vaerenbergh, P. Estellé, A. Rashidi, "Thermophysical properties of water ethylene glycol (WEG) mixture-based Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluids at low concentration and temperature", J. Mol. Liq., 2020, 302 112606.
- [18] L. S. Sundar, K. V. Sharma, M. T. Naik, M. K. Singh, "Empirical and theoretical correlations on viscosity of nanofluids: A review", Renew. Sustain. Energy Rev., 2013, 25 670–686.
- [19] J. R. Satti, D. K. Das, D. Ray, "Investigation of the thermal conductivity of propylene glycol nanofluids and comparison with correlations", Int. J. Heat Mass Transf., 2017, 107871–881.
- [20] N. Tan, Y. Zhang, B. Wei, C. Zou, "Experimental investigation on optical and thermal properties of propylene glycol–water based nanofluids for direct absorption solar collectors", Appl. Phys. A Mater. Sci. Process., 2018, 124 0
- [21] A. Ahmadian, M. Bilal, M. A. Khan, and M. I. Asjad, "Numerical analysis of thermal conductive hybrid nanofluid flow over the surface of a wavy spinning disk," Sci. Rep., 2020, 10(1) 1–13.
- [22] D. P. Kulkarni, D. K. Das, S. L. Patil, "Effect of temperature on rheological properties of copper oxide nanoparticles dispersed in propylene glycol and water mixture", J. Nanosci. Nanotechnol., 2007, 7 2318–2322.
- [23] P. K. Namburu, D. P. Kulkarni, D. Misra, D. K. Das, "Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture", Exp. Therm. Fluid Sci., 2007, 32 397– 402.
- [24] M. T. Naik, G. Ranga Janardhana, K. Vijaya Kumar Reddy, B. Subba Reddy, "Experimental investigation into rheological property of copper oxide nanoparticles suspended in propylene glycol–water based fluids", J. Eng. Appl. Sci., 2010, 5 29–34.
- [25] D. P. Kulkarni, D. K. Das, R. S. Vajjha, "Application of nanofluids in heating buildings and reducing pollution", Appl. Energy., 2009, 86 2566–2573 .
- [26] N. Salih, J. Salimon, E. Yousif, "The physicochemical and tribological properties of oleic acid based triester biolubricants", Ind. Crops Prod., 2011, 34 1089–1096 .
- [27] D. R. Lide, "Hardness of Minerals and Ceramics", CRC Handb. Chem. Phys. 2005, 2313–2314 .
- [28] Z. Y. Zhou, D. Q. Qian, L. Bin, Y. M. Xiao and H. C. Bi. "Experimental study on the surface tension of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O nanofluid" Mater. Sci. Forum, 2016, 852 394-400.
- [29] Lu, Gui, Yuan-Yuan Duan, and Xiao-Dong Wang. "Surface tension, viscosity, and rheology of water-based nanofluids: a microscopic interpretation on the molecular level." J. Nanopart. Res., 2014, 16(9) 1-11.
- [30] M. Afrand, D. Toghraie, B. Ruhani, "Effects of temperature and nanoparticles concentration on rheological behavior of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Ag/EG hybrid nanofluid: An experimental study", Exp. Therm. Fluid Sci., 2016, 77 38–44 .
- [31] H. W. Xian, N. Azwadi, C. Sidik, S.R. Aid, T. L. Ken, Y. Asako, "Review on Preparation Techniques, Properties and Performance of Hybrid Nanofluid in Recent Engineering Applications ", J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci., 2018, 1 1–13.
- [32] S. Atashrouz, M. Mozaffarian, G. Pazuki, "Viscosity and rheological properties of ethylene glycol+water+Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluids at various temperatures: Experimental and thermodynamics modeling", Korean J. Chem. Eng., 2016, 33 2522–2529.
- [33] M. S. Owen, ASHRAE Handbook: Fundamentals, Inch-Pound Ed., 2009.
- [34] S. N. M. Zainon, W. H. Azmi, "Recent progress on stability and thermo-physical properties of mono and hybrid towards green nanofluids", Micromachines. 2021, 12 1–35.
- [35] H. W. Xian, N. A. C. Sidik, R. Saidur, "Impact of different surfactants and ultrasonication time on the stability and thermophysical properties of hybrid nanofluids", Int. Commun. Heat Mass Transf. 2020, 110.
- [36] F. Rubbi, L. Das, K. Habib, N. Aslfattahi, R. Saidur, M. T. Rahman, "State-of-the-art review on water-based nanofluids for low temperature solar thermal collector application", Sol. Energy Mater. Sol. Cells., 2021, 230 111220.
- [37] F. Rubbi, K. Habib, R. Saidur, N. Aslfattahi, S. M. Yahya, L. Das, "Performance optimization of a hybrid PV/T solar system using Soybean oil/MXene nanofluids as A new class of heat transfer fluids", Sol. Energy., 2020,



- 208 124–138 .
- [38] Mahanta, Nayandep K., and Alexis R. Abramson. "Thermal conductivity of graphene and graphene oxide nanoplatelets." In 13th InterSociety conference on thermal and thermomechanical phenomena in electronic systems, 2012, IEEE, 1-6.
  - [39] M. Sang, J. Shin, K. Kim, and K. J. Yu, "Electronic and thermal properties of graphene and recent advances in graphene based electronics applications," *J. Nanomater.*, 2019, 9(3) 1–33.
  - [40] H. Zamzamian and M. T. Jamal-Abadi, "Factor effect estimation in the convective heat transfer coefficient enhancement of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$  nanofluid in a double-pipe heat exchanger," *Int. J. Eng. Trans. B Appl.*, 2013, 26(8) 837–844.
  - [41] B. Takabi, S. Salehi, "Augmentation of the heat transfer performance of a sinusoidal corrugated enclosure by employing hybrid nanofluid", *Adv. Mech. Eng.* 2014, 2014.
  - [42] Y. Gao, J. An, Y. Xi, Z. Yang, and J. Liu, "Thermal Conductivity and Stability of Novel Aqueous Graphene Oxide –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Hybrid Nanofluids for Cold Energy Storage." *Appl. Sci.*, 2020, 10(17) 5768.



# Investigation of the Effect of Temperature and Concentration of Ceramic Nanoparticles on the Thermal Conductivity of Water-Ethylene Glycol/ Nano Alumina-Nano Graphen Hybrid Nanofluid

M.Nazi<sup>1</sup>, N.Nayebpashae<sup>2,\*</sup>, S. M. M. Hadavi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Chemistry and Petrochemistry Research Center, Standard Research Institute (SRI)

<sup>2</sup> Technology and Engineering Research Center, Standard Research Institute (SRI)

<sup>3</sup> Department of Materials Engineering, Tarbiat Modares University

\* n.nayebpashae@standard.ac.ir

**Abstract:** Nanofluid is a suspension obtained by adding nanoscale particles (100 nm) to a base fluid to improve heat transfer. In this study, the effect of temperature and concentration of nanoparticles consisting of Alumina nanoparticles and Graphene nanosheets on the thermal conductivity of a base fluid consisting of water and ethylene glycol was studied. Also, 0.2% by volume of oleic acid (OA) and 0.2% by weight of sodium dodecyl sulfonate (SDS) were added to the base fluid as a surfactant to stabilize and disperse the nanoparticles. The volume fraction of nanoparticles of 0.05, 0.1, 0.5, 1, 1.5, 2 and 2.5% by volume and the tested temperatures were selected in the temperature range of 260-305 K. The morphology and microstructure of the nanoparticles were investigated by scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM). Thermal conductivity of hybrid nanofluids was measured and compared with the base fluid. Results showed that thermal conductivity of water-ethylene glycol/ nano Graphene-nano Alumina hybrid nanofluid depends on nanoparticle concentration and temperature. The thermal conductivity measurements of water-ethylene glycol/ nano Graphene-nano Alumina hybrid nanofluid were compared with the thermal conductivity prediction models of nanofluids but there was no acceptable agreement. The results showed that increasing the temperature and volumetric concentration of nanoparticles increases the thermal conductivity of hybrid nanofluids. The maximum increase in thermal conductivity of hybrid nanofluid was 44.02% which was obtained in solid volume fraction of 2.5% and at temperature of 303 K.

**Keywords:** Hybrid nanofluid, ethylene glycol, thermal conductivity, alumina nanoparticles, graphene nanosheets.