فصلنامه‌ی علمی

علم و مهندسی سرامیک

دوره‌ی ۱۱، شماره‌ی ۱، بهار ۱۴۰۱

بررسی اثر افزاینده‌های سرامیکی نانوآلومینا و نانوگرافن بر عملکرد سیال ضدیخ/ یخزدای بدنه هواپیما

نوع مقاله: علمی پژوهشی

نسیم نایب‌پاشایی[۱*]، سید محمدمهدی هادوی[۲]

[۱]گروه مکانیک و فلزشناسی، پژوهشکده فناوری و مهندسی، پژوهشگاه استاندارد، کرج، ایران

[۲]گروه خوردگی و حفاظت از فلزات، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

n.nayebpashaee@standard.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۱۰ مهر ۱۴۰۰

پذیرش: ۱۴ اسفند ۱۴۰۰

صفحه ۸۶ تا صفحه ۱۰۵

در دسترس در نشانی:
www.ijcse.ir

زبان نشریه: فارسی

شاپا چاپی: ۲۳۵۲-۲۳۲۲

شاپا الکترونیکی:
۲۷۸۳-۳۰۰۳

چکیده:

در پژوهش حاضر، اثر افزودنی‌های نانوآلومینا و نانوگرافن در بهینه‌سازی عملکرد و بهبود ویژگی‌های سیال ضدیخ/ یخزدا بررسی شد. غلظت نانوذرات در این تحقیق ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد حجمی لحاظ گردید و دماهای مورد آزمایش در بازه دمائی ۲۹۳-۲۵۳ کلوین انتخاب شد. بررسی ریخت و ریزساختار نانوذرات توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی(SEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری(TEM) انجام شد. تشخیص فازهای موجود در نانوذرات به وسیله آنالیز تفرق اشعه ایکس(XRD) انجام شد. هدایت حرارتی، کشش سطحی و ویسکوزیته دینامیک نانوسیالات هیبریدی اندازه‌گیری و با سیال پایه مقایسه شد. نتایج نشان‌دهنده آن است که خواص هدایت حرارتی و در نتیجه کارائی سیال ضدیخ/ یخزدا با افزودن ذرات نانو در کسر حجمی مشخص بهبود می‌یابد. با در نظر گرفتن نحوه عملکرد سیال ضدیخ/یخزدای بدنه هواپیما، افزایش کشش سطحی سیال، به بهبود عملکرد آن در پوشانندگی سطوح هواپیما در مقابل نشست قطرات باران و شبنم سرد و برف کمک می‌کند در نتیجه عملکرد ضدیخ/ یخزدائی سیال را تقویت می‌کند. بر مبنای نتایج حاصل از اندازه‌گیری ویسکوزیته دینامیک نانوسیال هیبریدی آب- ضدیخ: یخزدا/ نانوگرافن- نانوآلومینا، افزودن نانوذرات در محدوده کسر حجمی ۰ تا ۰/۵ درصد، علاوه بر افزایش ویسکوزیته، رفتار غیرنیوتنی رقیق گردانی برش سیال پایه، که لازمه اصلی عملکرد سیال ضدیخ/ یخزدای بدنه هواپیما می‌باشد را حفظ می‌کند ولی در غلظت‌های بالاتر نانوسیال هیبریدی رفتار متمایل به رفتار غیرنیوتنی ضخیم‌شونده برش را نشان می‌دهد. بنابراین افزودن این دو نوع نانوذرات در کسرهای حجمی زیر ۰/۵ درصد به تقویت عملکرد سیال ضدیخ/ یخزدا کمک می‌کند.

کلیدواژه:

سیال ضدیخ/ یخزدای بدنه هواپیما، نانوسیال هیبریدی، نانوذرات آلومینا، نانوصفحات گرافن.

کد DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.24.7

۱- مقدمه

یخزدایی از بدنه هواپیماها در هوای سرد و هنگام بارش‌های آسمانی یکی از الزامات پیش از پرواز است تا از بروز حادثه یا سانحه جلوگیری شود [۱]. عدم موفقیت در از بین بردن سطوح یخزده پیش از پرواز باعث از دست‌دادن کنترل هواپیما

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.24.7]

اندکی پس از برخاستن و بروز سانحه/ حادثه می‌گردد [۱، ۲]. مروری بر تاریخچه سوانح و حوادث هوائی در صنعت حمل و نقل هوایی نشان می‌دهد که شمار قابل‌توجهی از این حوادث مربوط به عملیات زمستانی می‌باشد [۳]. یخزدگی بر روی سطوح مختلف هواپیما ناشی از وجود قطرات آب با دمای بسیار پایین در هوای اتمسفر است که در اثر برخورد با قسمت‌های مختلف هواپیما همانند بال‌ها، ملخ‌ها و ورودی‌های هوا به موتور و پیشرانه آن، انرژی گرمایی خود را به چنین سطوحی منتقل می‌نمایند و بلافاصله پس از برخورد با آن‌ها منجمد می‌شوند [۴].

طبق آزمایش‌هایی که در تونل‌های باد صورت گرفت، افزایش و انباشت هر چه بیش‌تر میزان یخ بر روی سطوح هواپیما از جمله در قسمت لبه جلویی بال، روی سطح بال و دم هواپیما، در اثر گذشت زمان منجر به عوارض نامطلوب همچون از دست رفتن حدود ۴۰ درصد نیروی بالابرنده[۱] و افزایش ۳۰ درصدی نیروی پسا[۲] می‌گردد [۱، ۵]. این تغییرات باعث بالا رفتن سرعت واماندگی[۳] هواپیما (سرعتی که در آن جریان هوا از روی بال‌های هواپیما جدا شده و هواپیما دیگر قادر به تولید نیروی بالابرنده نمی‌باشد) و از دست دادن کنترل فرامین هواپیما به دلیل یخزدگی سطوح و دشواری حرکت سکان‌های پرواز می‌شوند. یخ شکل گرفته بر روی بال‌های هواپیما، به ویژه در هواپیماهایی نظیر بویینگ MD و فوکر ۱۰۰ که موتور آن‌ها در قسمت دم هواپیما قرار دارد، در حین پرواز و به دلیل جدا شدن این یخ‌های شکل گرفته، به داخل موتور پرتاب می‌شوند و باعث از دست رفتن نیروی پیشرانه هواپیما می‌گردند [۱، ۶]. همچنین در صورت انباشت و جدا شدن یخ در قسمت دهانه ورودی هوا به داخل موتورهای توربینی و برخورد آن‌ها با تیغه‌های داخل کمپرسور موتور و یا جدا شدن آن‌ها، در اثر گردش و سرعت زیاد ملخ‌ها احتمال برخورد آن‌ها با بدنه وجود دارد و منجر به آسیب به سازه بدنه هواپیما خواهد شد. این سطوح یخزده ممکن است موجب گرفتگی و انسداد و از کار افتادن سنجشگرهای گوناگون هواپیما همچون لوله‌های سنجشگر پیتوت– استاتیک[۴] شود که فشار دینامیکی و استاتیک هوای مورد نیاز نشانگرهای ارتفاع‌سنج، سرعت‌سنج هواپیما و غیره را تامین می‌نماید و این مسئله باعث اشتباه نشان دادن اطلاعات سرعت و ارتفاع و همچنین اطلاعات قدرت تولیدی توسط موتور به خلبان می‌گردند [۴]. از دیگر عوارض نامطلوب یخزدگی می‌توان به کاهش دید اعضاء گروه پرواز و کاهش استحکام شیشه جلوی کابین پرواز در برابر برخورد اشیاء خارجی همانند برخورد پرندگان با شیشه‌های جلوی هواپیما[۵] نام برد. بدیهی است که بروز هر یک از موارد یاد شده، ظرفیت به مخاطره انداختن ایمنی پرواز هواپیما را دارا می‌باشند. بنابراین به منظور افزایش کارائی سطوح آیرودینامیکی و کاهش ریسک پرواز، لازم است هر گونه آلودگی از جمله یخ و برف از روی هواپیما پاک شود. این مفهوم اصطلاحاً CAC[۶] نامیده می‌شود [۷، ۸].

به طور کلی محلول‌های ضدیخ/ یخزدای بدنه هواپیما از موادی بر پایه اتیلن‌گلیکول [۱]، دی‌اتیلن‌گلیکول [۸] یا پروپیلن گلیکول [۱] تشکیل شده‌اند که با آب رقیق شده و

[۱] Lift force
[۲] Drag force
[۳] Stall speed
[۴] Pitot-static tube blockage
[۵] Bird strike
[۶] Clean aircraf concept

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]
[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.24.7]

نیز شامل افزودنی‌های بازدارنده از خوردگی[۷] [۹]، مواد خیس‌کننده[۸] [۱۰] و مواد ضدکف [۹] می‌باشند. مایعات مورد استفاده در عملیات یخ‌زدائی هواپیما چهار نوع می‌باشند: نوع اول (I-Type)، نوع دوم (II-Type)، نوع سوم (III-Type) و نوع چهارم (IV-Type) [۱، ۵].

نانوسیال هیبریدی با افزودن ذرات در مقیاس نانو (۱۰۰ نانومتر) به یک سیال پایه با هدف بهبود انتقال حرارت حاصل می‌شود. نانوسیالات مخلوط جامد– مایع هستند که شامل یک سیال پایه و ذرات نانو است [۹]. یکی از کاربردهای نانوسیالات، استفاده در کاربردهای هدایت حرارت می‌باشد. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که ضریب هدایت حرارتی 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 [۹، ۱۰]. مطالعات مختلف نشان می‌دهد که هر چه اندازه نانوذرات کوچک‌تر باشد هدایت حرارتی مؤثر آن‌ها بالاتر خواهد بود [۱۱]. همچنین گزارش شده است که هدایت حرارتی مؤثر نانوسیالات با افزایش نانوذرات افزایش می‌یابد [۱۲]. هدایت حرارتی مؤثر نانوسیالات و حرکات براونی آن‌ها با افزایش دما، افزایش می‌یابد [۱۳].

طی یک دهه گذشته، ویژگی انتقال حرارت نانوسیالات به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. این امر با استفاده از سیستم‌های نانوسیال برای کاربردهای مختلف مورد توجه قرار گرفته است. در مباحث مرتبط با انتقال حرارت، ویسکوزیته نانوسیالات بسیار مهم است. با این حال، بیش‌تر تحقیقات به ویژه به منظور افزایش سرعت انتقال حرارت در کاربردهای گرمایش، در دماهای متوسط و بالا انجام‌شده 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 [۱۱].

در این مطالعه برای نخستین بار، با استفاده از افزودنی‌های نانویی، امکان بهبود خواص فیزیکی و رئولوژیکی سیال ضدیخ/ یخ‌زدای بدنه هواپیما بررسی شد. اثر افزودنی‌های نانو (سازگار با جنس بدنه هواپیما) شامل گرافن و آلومینا بر سیال پایه[۹] شامل مخلوط آب– اتیلن‌گلیکول با نسبت ۵۰:۵۰ درصد حجمی مورد مطالعه قرار گرفت. بر مبنای اطلاعات فعلی نویسندگان تاکنون مطالعه‌ای بر روی سیستم نانوسیال هیبریدی آب– سیال ضدیخ هواپیما/ نانوآلومینا– نانوگرافن انجام نشده است. بنابراین با مطالعه سایر تحقیقات انجام شده در زمینه نانوسیالات دامنه ۲/۵–۰/۵ درصد حجمی به‌عنوان غلظت نانوذرات در نظر گرفته شد تا محدوده غلظت مناسب نانوذرات تعیین شود. دامنه کاربرد سیال یخ‌زدائی بدنه هواپیما ۲۹۳–۲۵۳ کلوین می‌باشد. بنابراین محدوده دمائی مطالعات در این مقاله ۳۰۵–۲۶۰ کلوین انتخاب شد.

۲– فعالیت‌های تجربی

۲–۱– تهیه نانوسیال

اولین قدم در انجام مطالعه حاضر، آماده‌سازی نانوسیال و تعلیق پایدار نانوذرات درون سیال پایه می‌باشد. در این تحقیق برای آماده‌سازی نانوسیال از روش دومرحله‌ای استفاده

[۷] Corrosion inhibitors
[۸] Wetting agent
[۹] base fluid

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]
[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.24.7]

می‌شود. برای انجام آزمایش‌هایی با کم‌ترین خطا در اختیار داشتن نمونه‌های پایدار و همگن مهم‌ترین شرط است. کلوخه شدن یا عدم تعلیق مناسب نانوذرات در سیال پایه می‌تواند خطای زیادی در اندازه‌گیری ایجاد کند. برای جلوگیری از این پدیده روش‌های مختلفی وجود دارد. استفاده از سورفکتانت یکی از راهکارهای موثر در این زمینه می‌باشد.

در این مطالعه، در بررسی‌های آزمایشگاهی، سیال ضدیخ/ یخزدای سنتزشده به عنوان سیال پایه مورد مطالعه قرار گرفت. آب/ محلول ضدیخ سنتزشده با نسبت ۵۰:۵۰ درصد حجمی در دمای ۲۹۸ کلوین به عنوان سیال پایه در نظر گرفته شدند. همچنین به میزان ۰/۲ درصد حجمی اولئیک‌اسید (OA) و ۰/۲درصد وزنی سدیم‌دودسیل سولفونات (SDS) به عنوان سورفکتانت برای تثبیت و پراکندگی نانوذرات به سیال پایه اضافه شدند. خواص فیزیکی و شیمیایی اولئیک‌اسید در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- اطلاعات فیزیکی و شیمیایی اولئیک‌اسید [۱۴-۱۶]

مشخصه	مقدار
فرمول شیمیائی	$C_{18}H_{34}O_2$
نقطه ذوب	۲۸۶/۱۵ K
نقطه انجماد	۲۷۷/۱۵ K
نقطه ابری‌شدن[۱۰]	۲۹۳/۱۵± ۱ K
نقطه ریزش[۱۱]	۲۷۳/۱۵± ۱ K
ویسکوزیته	۳۸/۸۰mPa.s

کسرحجمی نانوذرات در این تحقیق ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد حجمی لحاظ گردید و همچنین جهت بررسی اثر دما، دماهای مورد آزمایش در بازه دمائی ۲۹۳-۲۵۳ کلوین قرار داده شد. نانوذرات که از حجم مساوی نانوآلومینا و گرافن تشکیل‌شده بودند در مقدار معینی از مخلوط آب/ محلول ضدیخ سنتزشده تعلیق شدند. مقادیر مورد نیاز نانوذرات Al_2O_3 و گرافن برای تهیه نمونه‌های نانوسیال ترکیبی از معادله ۱ بدست آمد:

$$\varphi = \left[\frac{\left(\frac{W}{\rho}\right)_{Al_2O_3} + \left(\frac{W}{\rho}\right)_{\text{گرافن}}}{\left(\frac{W}{\rho}\right)_{Al_2O_3} + \left(\frac{W}{\rho}\right)_{\text{گرافن}} + \left(\frac{W}{\rho}\right)_{EG} + \left(\frac{W}{\rho}\right)_{\text{آب}}}\right] \times 100 \qquad (۱)$$

جایی که φ درصد کسر حجمی نانوذرات (مجموع کسر حجمی نانوذرات آلومینا و گرافن) است، ρ دانسیته بر حسب کیلوگرم در متر مکعب و W جرم بر حسب کیلوگرم است. مقادیر نانوذرات، محلول ضدیخ/ یخزدا و آب مورد استفاده برای تهیه حجم ۴۰۰ میلی‌لیتر نانوسیال هیبریدی محاسبه و در جدول ۲ گزارش شده است. غلظت سورفکتانت برای همه نمونه‌ها ثابت بود. در تحقیق حاضر، نانوسیالات با استفاده از روش دو مرحله‌ای تهیه شدند. در این روش ابتدا نانوذره یا سایر نانومواد‌ی که قرار است در سیال پراکنده شوند، به صورت پودرهای خشک تهیه‌شده و در مرحله بعد نانوماده تولیدی در داخل سیال پراکنده می‌گردد. جهت شکستن تجمع ذرات و تعلیق یکنواخت از دستگاه همزن التراسونیک پرابی به مدت ۱۸۱ دقیقه استفاده گردید.

۲-۲- مشخصه‌یابی نانوذرات

به منظور شناسایی فازهای موجود در نمونه از دستگاه پراش اشعه ایکس XRD با ولتاژ ۱۰ و۴۰ کیلوولت، شدت جریان ۲۵ و ۳۰ میلی‌آمپر، طول موج اشعه ۱/۵۴ آنگستروم و لامپ کاتد مسی و فیلتر نیکل استفاده شد. دستگاه به کار رفته دستگاه مدل Philips PW1730 است. برای این منظور نمونه‌های در نظر گرفته شده برای بررسی‌های فازی و سطحی تحت آنالیز قرار گرفتند.

[۱۰] Cloud point

[۱۱] Pour point

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.24.7]

جدول ۲- مقادیرنانوذرات، سیال ضدیخ/ یخ‌زدا و آب مورد استفاده برای تهیه حجم ۴۰۰ میلی‌لیتر نانوسیال هیبریدی

جرم (g) [±۰/۰۰۱]				درصد حجمی جامد(%)
آب	سیال ضدیخ/ یخ‌زدا	گرافن	Al_2O_3	
۲۲۲/۶۴۰	۱۹۹/۶۴۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰
۲۲۲/۵۲۹	۱۹۹/۵۴۲	۰/۰۲۳	۰/۳۸۹	۰/۰۵
۲۲۲/۴۱۷	۱۹۹/۴۴۲	۰/۰۴۶	۰/۷۷۸	۰/۱
۲۲۱/۵۲۷	۱۹۸/۶۴۴	۰/۲۳۰	۳/۸۹۰	۰/۵
۲۲۰/۴۱۴	۱۹۷/۶۴۶	۰/۴۶۰	۷/۷۸۰	۱
۲۱۹/۳۰۰	۱۹۶/۶۴۷	۰/۶۹۰	۱۱/۶۷۰	۱/۵
۲۱۸/۱۸۷	۱۹۵/۶۴۹	۰/۹۲۰	۱۵/۵۶۰	۲
۲۱۷/۰۷۴	۱۹۴/۶۵۱	۱/۱۵۰	۱۹/۴۵۰	۲/۵

در نهایت الگوی پراش اشعه X از سطح نمونه‌ها تهیه و بر اساس الگوی به دست آمده شناسایی فازها با استفاده از کارت های استاندارد انجام شد.

از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Vega Tescan، مجهز به آشکارساز EDS (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 گرفته‌شده برای این آنالیز ساخت شرکت TE-SCAN است و از دقت بالایی برخوردار است.

تصاویر حاصل از آنالیز میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) به منظور بررسی ریخت و بررسی ریزساختاری نانوذرات مورد استفاده قرار گرفت. دستگاه مورد استفاده برای این آنالیز Philips CM120 است.

۲-۳- مشخصه‌یابی نانوسیالات

۲-۳-۱- آنالیز پایداری نانوسیالات

در این مطالعه، از پتانسیل زتا به عنوان یکی از روش‌های ارزیابی پایداری نانوسیالات استفاده شد. پتانسیل زتای نانوسیالات هیبریدی در دمای ۲۹۸ کلوین با استفاده از دستگاه Zetasizer Nano SZ100 ساخته‌شده توسط شرکت Horiba ژاپن اندازه‌گیری شد.

۲-۳-۲- اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی

در این تحقیق از دستگاه آنالایزر 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 ۱/۳ میلی‌متر و طول ۶۰ میلی‌متر انتخاب گردید. با انتخاب این سنسور، میزان هدایت حرارتی نانوسیال در بازه ۰/۰۲ W/(mK) تا ۰/۲ W/(mK) با دقت ±۰/۰۱ W/(mK) اندازه‌گیری شد.

پیش از اندازه‌گیری هدایت حرارتی نانوسیالات هیبریدی، جهت اندازه‌گیری دقیق هدایت حرارتی نانوسیال‌های مورد بررسی، کالیبراسیون دستگاه انجام شد. برای اطمینان از دقت ابزار KD2 pro، قبل از اندازه‌گیری میزان هدایت حرارتی

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.24.7]

نانوسیال‌های هیبریدی، هدایت حرارتی مخلوط‌های آب اتیلن گلیکول (W: EG / 50: 50 % vol) در دماهای مختلف توسط KD2 pro اندازه‌گیری شد و با داده‌های ارائه شده در ASHRAE [۱۷] مقایسه شد. در محدوده دمایی ذکر شده رسانایی حرارتی سیال پایه که به طور آزمایشگاهی تعیین شده است، با داده‌های ASHRAE مطابقت خوبی دارد و اختلاف جزئی (کم‌تر از ۰/۵درصد) با داده‌های مشاهده می‌شود. در نتیجه میزان خطای دستگاه در محدوده قابل قبول می‌باشد. اندازه‌گیری میزان هدایت حرارتی برای هر نانوسیال سه بار تکرار و در نهایت میزان هدایت حرارتی نانوسیال در هر دما و غلظت برابر میانگین سه اندازه‌گیری گزارش شد.

۲-۳-۳- اندازه‌گیری ویسکوزیته نانوسیالات

ویسکوزیته نانوسیالات هیبریدی با کسرهای حجم جامد از ۰/۰۵ تا ۲/۵ درصد در دامنه دمائی از ۲۶۳/۱۵ تا ۳۰۳/۱۵ کلوین اندازه‌گیری شد. از یک ویسکومتر بروکفیلد با مخزن دمایی برای اندازه‌گیری ویسکوزیته‌های نانوسیال‌ها در محدوده نرخ برش ۰/۳ دور در دقیقه تا ۷۰ دور در دقیقه استفاده شد.

دامنه‌های تکرار و دقت ویسکومتر به ترتیب ۰/۲و ± ۱/۰ است. قبل از استفاده از ویسکومتر برای اندازه‌گیری ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالات هیبریدی، ویسکومتر با مخلوط آب خالص و اتیلن‌گلیکول (۵۰:۵۰) در دماهای مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. مطابقت منطقی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و داده های گزارش‌شده در منبع ASHRAE [۱۷] وجود دارد. میانگین انحراف مطلق بین داده‌های ASHRAE و داده‌های تجربی در این مطالعه کم‌تر از ۲٪ است.

۲-۳-۴- اندازه‌گیری کشش سطحی نانوسیالات

در مطالعه حاضر، کشش سطحی نانوسیالات با استفاده از تجهیزات Surf-S1 اندازه‌گیری شد. دستگاه برای اولین بار با اندازه‌گیری کشش سطحی استون در ۲۹۸/۱۵ کلوین تنظیم و کالیبره شد. کشش سطحی نانوسیال‌های هیبریدی آماده شده در دماهای مختلف ثابت از ۲۵۸/۱۵ K تا ۲۸۳/۱۵ کلوین اندازه‌گیری شد. کشش سطحی در دماهای مختلف با استفاده از محفظه مخصوص که شامل یک محفظه دمای ثابت، حمام گردش آب و محفظه گردش آب است، اندازه‌گیری شد. هر مقدار گزارش‌شده به طور متوسط نتیجه سه اندازه‌گیری با عدم قطعیت ۰/۱ میلی‌آمپر در متر است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج مشخصه‌یابی نانوذرات

الگوی پراش اشعه ایکس نانوذرات پودر آلومینا Al_2O_3 و نانوصفحات گرافن همراه با پیک‌های استاندارد در شکل ۱ ارائه شده است. مطابق با شکل ۱-الف پیک‌های پراش نانوذرات γ-Al_2O_3 در ۳۲/۸۱ درجه، ۳۶/۷۲ درجه، ۴۵/۳۸ درجه و ۶۷/۲۴ درجه در فواصل ۲/۷۲۶، ۲/۴۴۶، ۱/۹۹۶ و ۱/۳۹۱ مشاهده شده است. این قله‌ها به ترتیب با صفحات کریستالوگرافی (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۴۰۰) و (۴۴۰) مطابقت دارند. با استفاده از معادله شرر (معادله ۲) اندازه متوسط بلوری برابر با ۱۲ نانومتر برای نانوذرات آلومینا بدست می‌آید:

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \qquad (۲)$$

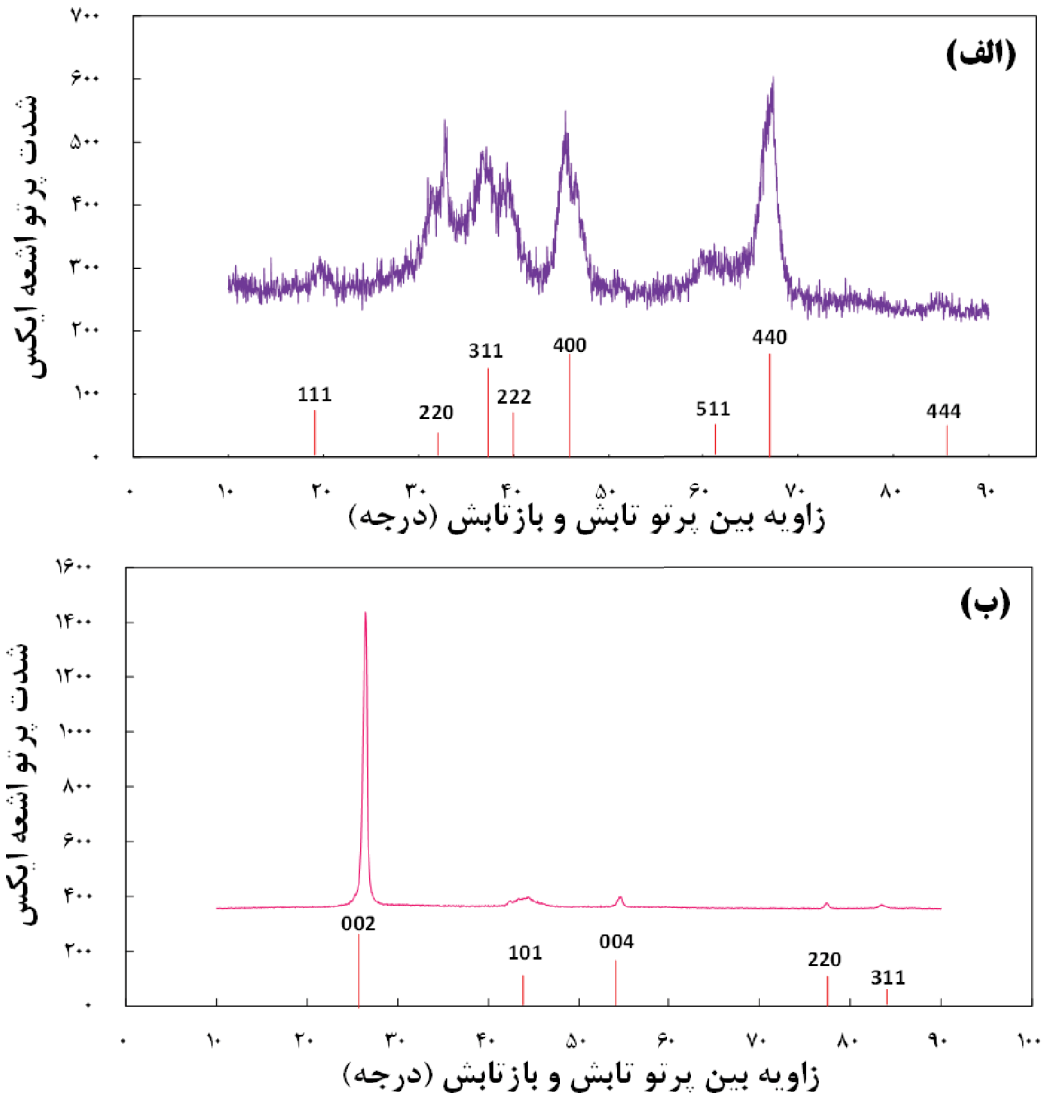
که در آن ۸ طول موج اشعه ایکس، β پهنای پیک در نصف ارتفاع بیشینه (FWHM) و θ زاویه پراش براگ است.

الگوی XRD نانو صفحات گرافن در شکل ۱- ب نشان‌داده شده است. پیک تیز و باریک در زاویه ۲۶/۴۲ درجه و برخی از پیک‌های کوتاه در ۴۳/۳۴۸ درجه، ۵۴/۴۸۴ درجه، ۷۷/۴۲۱ درجه

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.24.7]

و ۸۳/۴۷۸ درجه را می‌توان در طیف XRD نانوصفحات گرافن مشاهده کرد. پیک اصلی در θ= ۴۲/۲۶ با فاصله صفحه d= ۳۷۰/۳ Å مربوط به صفحه بلوری (۰۰۲) از مشخصه‌های اصلی نانوصفحات گرافن است [۱۹، ۲۰]. ریخت نانوذرات Al_2O_3 و نانو صفحات گرافن توسط SEM بررسی شد (شکل ۲). شکل ۲–الف تصویر SEM از نانوذرات Al_2O_3-γ را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود ریخت نانوذرات آلومینا بیش‌تر به شکل کروی است. همانطور که در شکل ۲– الف مشاهده می‌شود، پودرهای نانو تا حدی آگلومره شده‌اند. تشکیل تجمع ذرات (آگلومراسیون) به دلیل نسبت سطح به حجم بسیار زیاد نانوذرات است. مشاهدات SEM (شکل ۲–ب) نشان می‌دهد که نانوصفحات گرافن از ورقه‌های کوتاه لایه‌های گرافن تشکیل شده‌اند.



شکل ۱– الگوی XRD مربوط به الف) نانوذرات γ-Al2O3 و ب) نانوصفحات گرافن همراه با پیک‌های استاندارد

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.24.7]

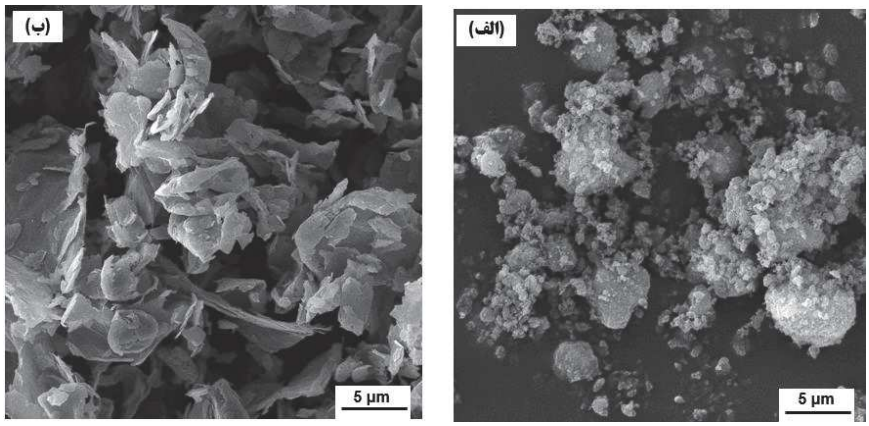
ورقه‌های گرافن روی هم جمع‌شده و مانند کاغذهای نازک چروکیده به نظر می‌رسند.

بررسی‌های بیش‌تر در مورد اندازه و شکل ذرات نانو با استفاده از تصاویر TEM به‌دست آمد. تصاویر TEM از نانوذرات γ-Al_2O_3 در شکل ۳-الف نشان داده شده است. همه ذرات شکل کروی را نشان می‌دهند. شکل ۳-ب تصویر TEM از نانوصفحات گرافن است که بسیاری از چین و چروک‌ها[۱] و مناطق تا شده[۲]را نشان می‌دهد که ساختار معرف نانوصفحات گرافن است.

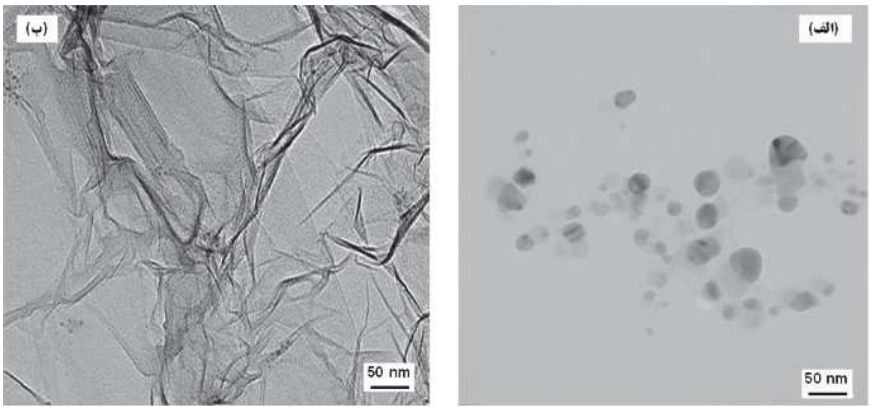
۳-۲- نتایج بررسی پایداری نانوسیال

برای تأیید پایداری نانوسیالات هیبریدی، آنالیز پتانسیل زتا انجام شد. مرز پایداری و ناپایداری سوسپانسیون را می‌توان برحسب پتانسیل زتا تعیین نمود. ذراتی که پتانسیل زتای آن‌ها از ۳۰ میلی‌ولت بیش‌تر و یا از ۳۰- میلی‌ولت کم‌تر باشد، پایدار هستند [۱۸].

پتانسیل زتای نانوسیالات هیبریدی به عنوان تابعی از کسر حجمی جامد و زمان در دمای ۲۹۸ کلوین در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی الف) γ-Al_2O_3 و ب) نانوصفحات گرافن



شکل ۳- تصاویر TEM از الف) نانوذرات γ-Al_2O_3 و ب) نانوصفحات گرافن.

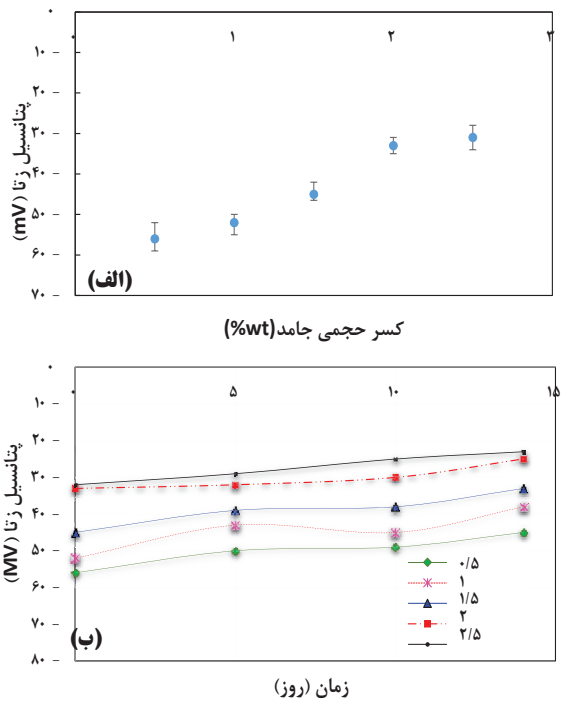
[۱] wrinkles

[۲] folded regions

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.24.7]

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، مقادیر پتانسیل زتای نانوسیالات هیبریدی از ۳۱- تا ۵۰- میلی‌ولت متغیر است که نشان‌دهنده پایداری قابل قبول نانوسیال و عملکرد مناسب سورفکتانت‌ها در جلوگیری از کلوخه‌ای شدن[۱] نانوذرات است. مطابق با شکل ۴- ب مقادیر پتانسیل زتای 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 [۱۹].



شکل ۴- پتانسیل زتای نانوسیالات هیبریدی برحسب الف) کسر حجمی جامد و ب) زمان.

۳-۳- نتایج اندازه‌گیری هدایت حرارتی نانوسیالات

هدایت حرارتی نانوسیال، به دلیل پایداری بالا، اندازه ذرات و ماهیت ذاتی هدایت حرارتی در جامدات به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد. به همین دلیل کاربرد نانوسیالات در مبدل‌های حرارتی بسیار مناسب است. نانوسیالاتی که خواص انتقال حرارتی بهتر و هدایت حرارتی بالاتری را داشته باشند در افزایش ضریب انتقال حرارت سیال پایه مناسب‌تر خواهند بود. در این مطالعه، اندازه‌گیری‌های هدایت حرارتی نانوسیالات هیبریدی در محدوده دمائی از ۲۷۳/۱۵ تا ۳۰۳/۱۵ کلوین برای سوسپانسیون‌های با کسر حجمی جامد ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد انجام شد.

شکل ۵ هدایت حرارتی نانوسیالات هیبریدی را بر حسب کسر حجمی جامد در دماهای مختلف نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، رسانایی گرمایی 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. با افزایش دما، انرژی جنبشی ذرات افزایش‌یافته 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 نانوسیالات هیبریدی با غلظت بالاتر چشمگیرتر است. فاصله زیاد بین ذرات از افزایش قابل توجه هدایت حرارتی در غلظت‌های پایین جلوگیری می‌کند.

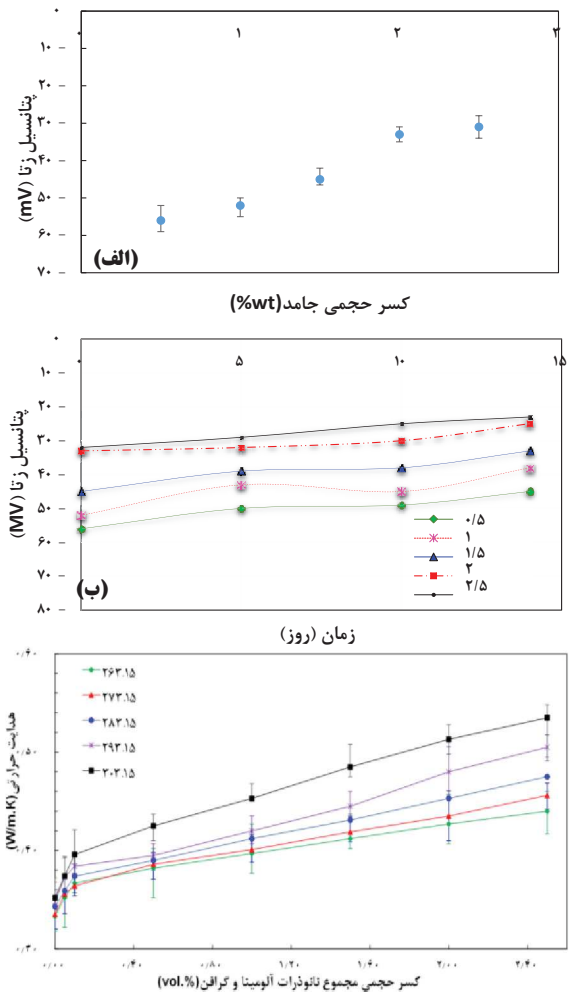
افزایش غلظت نانوذرات، هدایت حرارتی را افزایش می‌دهد، اما از سوی دیگر، می‌تواند موجب افزایش احتمال آگلومراسیون نانوذرات شود. هرچه تجمع ذرات بیش‌تر باشد لذا تشکیل

[۱] agglomeration

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.24.7]

زنجیره‌ها بیش‌تر شده و هدایت حرارتی بهبود می‌یابد.



شکل ۵- تغییرات هدایت حرارتی نانوسیالات هیبریدی بر حسب کسر حجمی جامد در دماهای مختلف

این افزایش تا زمانی وجود دارد که نانوسیال دارای تعلیق پایدار ذرات باشد. چنانچه ذرات به یکدیگر چسبیده و خوشه‌هایی را تشکیل دهند که دیگر پایدار نباشد و رسوب کند باعث کاهش ضریب هدایت حرارتی می‌گردد.

آگلومراسیون نانوذرات، هدایت حرارتی را کاهش می‌دهد [۲۰]. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، با افزایش دما، هدایت حرارتی افزایش می‌یابد. در دماهای بالاتر، شیب این تغییرات مثبت بیش‌تر است. این بدان معنی است که در دماهای بالاتر، بازده حرارتی نانوسیال ترکیبی بهبود یافته است. همانگونه که در شکل ۵ دیده می‌شود، در کسرهای حجمی جامد بالاتر (۲/۵-۱ درصد حجمی)، اثر دما بر هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی چشمگیرتر است. هدایت حرارتی بر اساس حرکت براونی و برخورد بین ذرات نانو است. در غلظت‌های زیاد، اثر دما ملموس‌تر است.

نتایج هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی آب- ضدیخ: یخزدا/ نانوگرافن- نانوآلومینا نشان‌دهنده آن است که خواص هدایت حرارتی و در نتیجه کارائی سیال ضدیخ/یخزدا با افزودن ذرات نانو در محدوده ۲/۵-۰/۵ درصد حجمی بهبود می‌یابد. همانگونه که پیش‌تر اشاره شد این افزایش تا زمانی وجود دارد که مشخصه‌ی اصلی نانوسیال یعنی تعلیق پایدار ذرات ممکن باشد.

۳-۴- نتایج اندازه‌گیری ویسکوزیته

اندازه‌گیری‌های ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال هیبریدی در محدوده دمائی از ۲۶۳/۱۵ تا ۲۹۳/۱۵ کلوین برای نانوسیال با کسر حجمی جامد ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد انجام شد. برای بررسی ویسکوزیته یک نانوسیال هیبریدی، ابتدا باید رفتار نیوتنی یا غیرنیوتنی نانوسیال مطالعه شود. مایعات نیوتنی از قانون ویسکوزیته نیوتون تبعیت می‌کنند. تنش برشی در این مایعات مستقل از میزان برش است. رابطه (۳) مشخصه آن است:

$$\tau = \mu\gamma \quad (۳)$$

که در آن μ ویسکوزیته، τ تنش برشی و $\dot{\gamma}$ نرخ برش بر حسب s^{-1} است. مایعات غیرنیوتنی از قانون نیوتن تبعیت نمی‌کنند و تنش برشی آن‌ها با نرخ برشی رابطه خطی ندارد. رابطه (۴)

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.24.7]

به ازای n≠۱ رفتار غیر نیوتنی را نشان می‌دهد:

$$\tau = m\dot{\gamma}^n \quad (۴)$$

که در آن τ تنش برشی، $\dot{\gamma}$ نرخ برش، m شاخص ثبات سیال[۲] و n (n≠۱) شاخص رفتار جریان[۳] است. وقتی n<1، رفتار رقیق‌گردانی برش[۴] تعریف می‌شود. سیال ضخیم‌شونده برش[۵] با n>1 مرتبط است.

در شکل ۶ ویسکوزیته دینامیکی بر حسب سرعت برشی در دمای ۲۹۸ کلوین برای مقادیر مختلف کسر حجمی جامد نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، ویسکوزیته نانوسیالات هیبریدی با کسرهای حجمی جامد از ۰/۵ تا ۲/۵ وابسته به سرعت برشی است. در نانوسیالات با کسر حجمی ۰ تا ۰/۵ درصد، هنگامی که دما ثابت است، افزایش سرعت برشی منجر به کاهش غیر خطی ویسکوزیته می‌شود که نشان دهنده رفتار غیر نیوتنی سیال مورد مطالعه است. همچنین می‌توان دریافت که مقادیر n کم‌تر از ۱ است که نشان می‌دهد نانوسیالات هیبریدی در غلظت‌های بالا دارای رفتار رقیق‌گردانی برش هستند. نمونه‌هایی با کسرهای حجمی جامد بیش‌تر از ۰/۵ درصد رفتار رئولوژیکی متفاوتی را نشان می‌دهد. در نمونه‌های با کسر حجمی جامد در بازه ۲/۵– ۰/۵ درصد، افزایش نرخ برشی منجر به افزایش نسبی ویسکوزیته می‌شود و نانوسیال هیبریدی رفتار متمایل به رفتار غیرنیوتنی Shear –thickening را نشان می‌دهد.

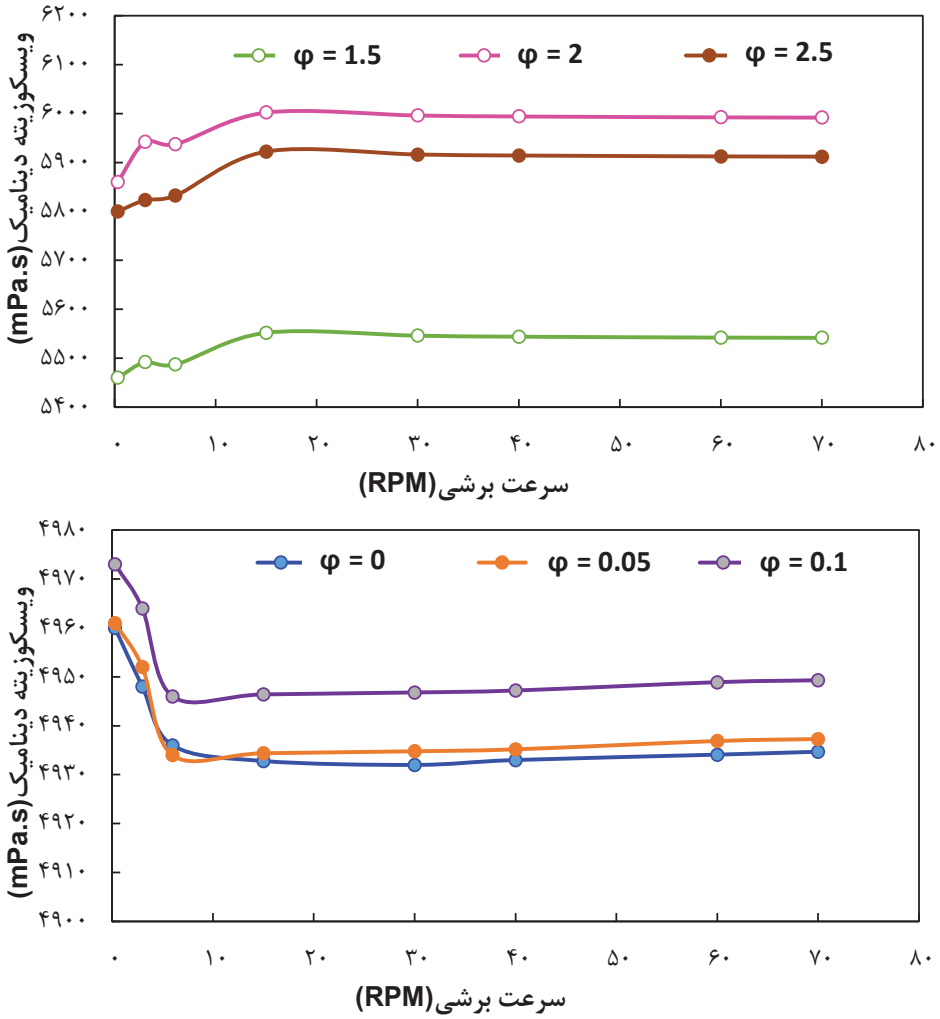
مطابق با استاندارد AMS 1428 [۲۱] سیال یخ‌زدائی و ضدیخ هواپیما نوع دوم (سیال سنتزشده در این مطالعه) سیال غیرنیوتونی سودوپلاستیک[۶] است که به منظور ماندگاری بر روی سطوح بال هواپیما برای جلوگیری از یخ‌زدگی آن سطوح طراحی شده است. این لایه بتدریج با گذشت زمان و هنگامی که سرعت هواپیما به حد معینی برسد (حدود ۱۰۰ knots)، از روی سطوح جدا می‌شود [۱]. محلول مورد استفاده باید قبل از برخاست از روی سطوح جدا شود تا بر عملکرد آیرودینامیکی هواپیما تاثیر منفی نداشته باشد. افزودن نانوذرات در محدوده کسر حجمی ۰ تا ۰/۵ درصد، علاوه بر افزایش ویسکوزیته، رفتار غیرنیوتنی رقیق‌گردانی برش نانوسیال پایه، که لازمه اصلی عملکرد سیال ضدیخ/ یخ‌زدای بدنه هواپیما می‌باشد، را حفظ می‌کند ولی در غلظت‌های بالاتر نوع رفتار رئولوژیکی سیال متمایل به رفتار ضخیم‌شونده برش است. بنابراین افزودن این دو نوع نانوذرات در کسرهای حجمی زیر ۰/۵ درصد به تقویت عملکرد سیال ضدیخ/ یخ‌زدا کمک می‌کند.

مطابق با شکل ۶، با افزایش کسر حجمی جامد، تعداد نانوذرات افزایش می‌یابد و در نتیجه حرکات خود به خودی نانوذرات و برخورد با مولکول‌های سیال پایه ایجاد می‌شود. در مقابل، افزایش تعداد نانوذرات (افزایش غلظت نانوذرات) باعث کاهش فاصله بین ذرات نانو و احتمال تجمع ذرات نانو می‌شود. با افزایش کسر حجمی نانوذرات، برخورد بین ذرات افزایش یافته و احتمال آگلومراسیون افزایش می‌یابد و باعث افزایش ویسکوزیته و شاخص ثبات سیال می‌شود.

افزودن نانوذرات حتی در کسر حجمی کم به سیال پایه، باعث افزایش ویسکوزیته به طور قابل توجهی می‌شود. ویسکوزیته عامل اصلی انتقال حرکت بین لایه‌های سیال است.

[۲] consistency index
[۳] power law index
[۴] shear–thinning
[۵] Shear–thickening
[۶] Pseudoplastic

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]
[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.24.7]



شکل ۶- تغییرات ویسکوزیته نانوسیال به ازای تغییرات نرخ برش و درصد حجمی جامد در دمای ۲۹۸ کلوین

به دلیل فعل و انفعالات بین ذرات نانو و سیال پایه، با افزودن ذرات نانو، ویسکوزیته سیال پایه افزایش می‌یابد. تأثیر غلظت نانوذرات بر روی ویسکوزیته به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین باید توجه داشت که رابطه بین ویسکوزیته و غلظت نانوذرات مشخص نیست.

اکثر مطالعات تجربی موجود نشان می‌دهد که افزایش غلظت ذرات باعث افزایش ویسکوزیته نانوسیالات هیبریدی می شود. با این حال، برخی گزارش‌ها ادعا می‌کنند که برخی از مخلوط ها اثر روانکاری دارند و در نتیجه باعث کاهش ویسکوزیته می‌شوند. مشخص شد که این اثر روانکاری وابسته به غلظت است و در غلظت‌های کم بارزتر است [۲۲].

دما مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامتر در ویسکوزیته است. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، ویسکوزیته نانوسیال هیبریدی با افزایش دما کاهش می‌یابد. این امر به این دلیل است که با افزایش دما، جاذبه بین مولکولی بین

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.24.7]

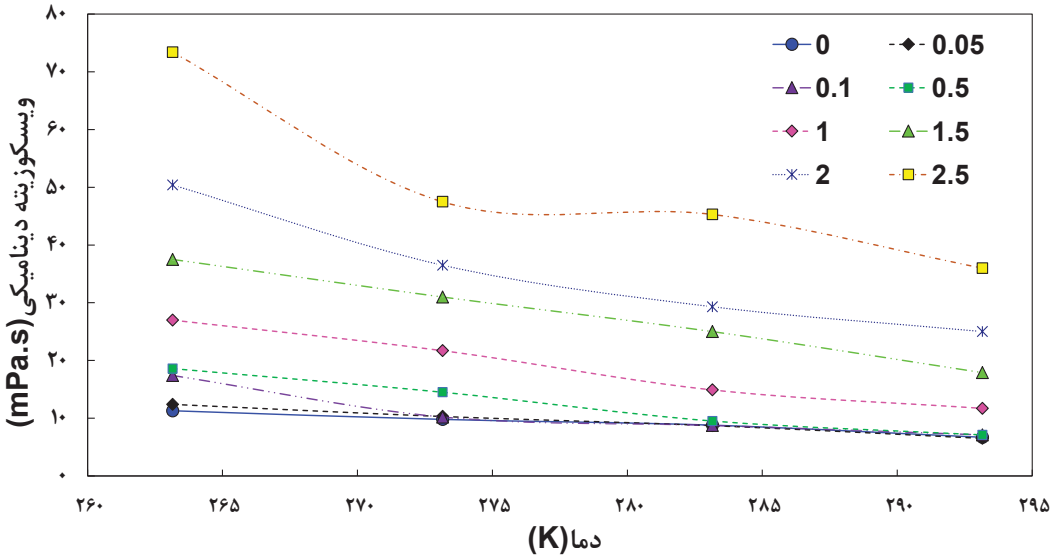
نانوذرات و سیال پایه آن‌ها ضعیف می‌شود. اکثر مطالعات انجام شده روند کاهشی ویسکوزیته را با افزایش دما بیان کرده‌اند [۲۳، ۲۴]. اگرچه، برخی از پژوهشگران [۲۵] دریافتند که افزایش دما تاثیری بر ویسکوزیته نسبی ندارد. Zao و همکاران [۲۳] ویسکوزیته نانوسیالات آب/ آلومینا را با کسرهای مختلف حجمی (φ= ٪۵/۹۲, ٪۴/۲۵, ٪۲/۷۲, ٪۱/۳۱) تحت دماهای مختلف از ۲۹۶ تا ۳۱۳ کلوین مطالعه کرده و گزارش دادند که گرانروی بسیار به کسر حجمی نانوذرات Al_2O_3 وابسته است ولی با تغییر دما، ویسکوزیته ثابت می ماند. Chen و همکاران [۲۶] در مطالعات خود بر روی نانوسیال اتیلن گلیکول/ TiO_2 در محدوده دمایی ۲۹۳ تا ۳۳۳ کلوین هیچ تفاوتی در ویسکوزیته نسبی با افزایش دما گزارش نکردند.

۳-۵- نتایج اندازه‌گیری کشش سطحی

کشش سطحی به نیرویی گفته می‌شود که در واحد طول سطح مایع عمود بر نیرو عمل می‌کند. کشش سطحی یک عامل تعیین‌کننده و مهم در کاربردهای نانوسیال هیبریدی است، اما به ندرت مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۶، ۲۷] در مطالعات انجام شده پیرامون تغییر در کشش سطحی ناشی از افزودن نانوذرات، نتایج متناقضی گزارش شده است [۲۷-۲۹]. مشخص نیست که آیا افزایش کسر حجمی جامد باعث کاهش یا افزایش کشش سطحی می‌شود و علل این نوع رفتار چیست. هدف این قسمت پرداختن به این موضوع است.

کشش سطحی نانوسیال هیبریدی آب- ضدیخ: یخزدا/ نانو گرافن- نانوآلومینا در کسر حجمی نانوذرات در دامنه کسر حجمی جامد ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد و در دماهای مختلف از ۲۵۳/۱۵ تا ۲۸۳/۱۵ کلوین اندازه‌گیری شد. شکل ۷ مقادیر کشش سطحی سیال پایه حاوی سورفکتانت، سیال پایه بدون سورفکتانت و نانوسیالات هیبریدی را به عنوان تابعی از غلظت حجمی نانوذرات و دما نشان می‌دهد.

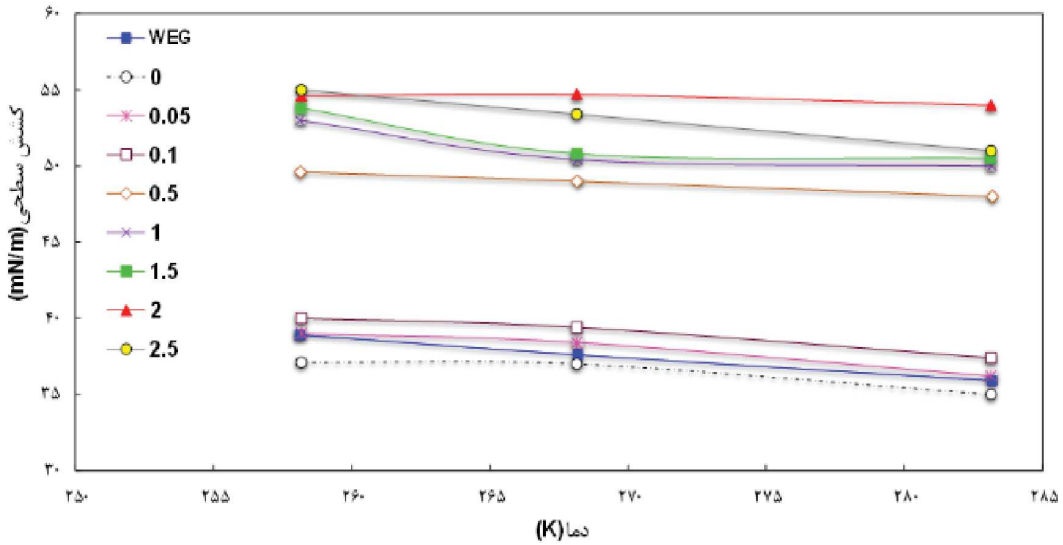
مطابق با شکل ۸ وجود سورفکتانت باعث کاهش کشش سطحی سیال پایه می‌شود.



شکل ۷- مقادیر تجربی ویسکوزیته نانوسیال برای غلظت‌های مختلف حجمی بر حسب دما.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.24.7]



شکل ۸- کشش سطحی سیال پایه بدون سورفکتانت (WEG)، سیال پایه حاوی سورفکتانت(φ=۰) و نانوسیالات هیبریدی با کسرهای مختلف حجمی جامد به صورت تابعی از دما.

اثر جاذبه گیبس بر مولکول‌های سورفکتانت موجود در محلول حاکم است و سعی در تولید یک لایه در فصل مشترک دارد و باعث کاهش کشش سطحی سیستم می‌شود. خصوصیات جذب سورفکتانت‌ها در منابع [۱۶، ۳۰، ۳۱] گزارش شده است. نتایج کاهش کشش سطحی در اثر افزودن سورفکتانت‌ها با یافته‌های Banisharif و همکاران [۱۶، ۳۲] سازگار است. در مطالعه انجام شده توسط Banisharif و همکاران [۱۶، ۳۲] اثرات OA و SDS بر پایداری نانوذرات Fe_2O_3 در سیال پایه متشکل از آب و اتیلن‌گلیکول بررسی شده و گزارش شده است که وجود سورفکتانت‌ها به طور قابل توجهی کشش سطحی سیال پایه را کاهش می‌دهد. Radiom و همکاران [۲۹] اثر OA را بر پایداری نانوذرات TiO_2 در آب بررسی کرد و نتایج مشابهی را یافت.

در شکل ۸ مشاهده می‌شود که با افزودن ذرات نانو به سیال پایه، کشش سطحی افزایش می‌یابد. با افزودن ذرات نانو به سیال پایه، مولکول‌های نانوذرات و سیال پایه با یکدیگر برهمکنش می‌کنند. در نتیجه، نیروهای مابین نانوذرات و ذرات مجاور و همچنین نیروهای مولکول مایع، در سطوح مایع دخالت می‌کنند. از اینرو، نیروهای جاذبه واندروالس ظاهر می‌شوند که انرژی آزاد سطح را افزایش می‌دهند و کشش سطحی را بهبود می‌بخشند [۳۳].

مطابق با شکل ۸، کشش سطحی نانوسیال هیبریدی تا غلظت ۲٪ حجمی افزایش و سپس کاهش می‌یابد. این بدان معنی است که افزایش کشش سطحی یک حد بهینه دارد. وقتی کسر حجمی نانوذرات به زیر این آستانه برسد، کشش سطحی افزایش می‌یابد، اما وقتی بیش‌تر از این مقدار بحرانی باشد، عکس این حالت اتفاق می‌افتد. روندهای مشاهده شده در ادامه توضیح داده خواهد شد تا مشخص شود که ترکیب ذرات نانو چگونه می‌تواند انرژی سطحی فصل مشترک مایع و گاز را تغییر دهد و در نتیجه کشش سطحی ایجاد شود.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.24.7]

غلظت ذرات در سطح گاز/ مایع بالاتر از نانوسیال است زیرا به نظر می‌رسد ذرات نانو در فصل مشترک گاز- مایع تجمع می‌یابند. نیروهای جاذبه و دافعه بین ذرات و تشکیل لایه‌ای از سورفکتانت بین یک ذره و مولکول‌های سیال اطراف، می‌توانند به طور بالقوه انرژی آزاد سطح را در فصل مشترک گاز- مایع تغییر دهند [۳۱]. با افزایش غلظت ذرات، ذرات به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند که منجر به افزایش نیروی وندروالس می‌شود. این امر باعث افزایش انرژی آزاد در سطح و در نتیجه افزایش کشش سطحی نانوسیال هیبریدی برای کسرهای حجمی جامد کم‌تر از ۲٪ حجمی می‌شود.

توضیحات زیر را می‌توان در مورد کاهش کشش سطحی ناشی از افزایش غلظت نانوذرات بیش از ۲٪ حجمی ارائه داد. به دلیل خصوصیت آبگریزی گرافن، جذب ذرات نانو در فصل مشترک گاز و مایع باعث می‌شود که با افزایش غلظت، کشش سطحی نانوسیال کاهش یابد [۳۴]. همچنین لازم به ذکر است که رابطه بین کشش سطحی و غلظت نانوذرات بطور روشن مشخص نشده است. در مطالعات انجام شده، الگوهای مختلفی برای تأثیر غلظت نانوذرات بر کشش سطحی نانوسیال گزارش شده است [۳۵، ۳۶]. نتایج مطالعه Zhou و همکاران [۲۸] بر روی نانوسیال H_2O-Al_2O_3 با کسرهای حجمی مختلف ۲/۵-۱ درصد حجمی و دماهای مختلف از ۱۸ درجه سانتی‌گراد تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد نشان داد که هرچه کسر حجمی نانوذرات بیش‌تر باشد، کشش سطحی کاهش می‌یابد. آزمایش‌های انجام شده توسط Banisharif و همکاران [۱۶، ۳۲] بر روی نانوسیالات مبتنی بر مخلوط آب اتیلن‌گلیکول حاوی نانوذرات Fe_2O_3 با غلظت حجمی ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱٪ در دامنه دمایی ۲۵۳/۱۵ تا ۲۹۳/۱۵ به نتیجه مخالف رسید و ادعا کرد که با افزایش غلظت حجمی نانوذرات، کشش سطحی نانوسیالات افزایش می‌یابد. این با یافته‌های Bhuiyan و همکاران [۳۷]، که اثر نانوذرات Al_2O_3، TiO_2 و SiO_2 را در آب مقطر در کسرهای مختلف حجمی نانوذرات مختلف از ۰/۰۵ تا ۰/۲۵ درصدی درصد بررسی کردند، سازگار است. این تناقض در نتایج گزارش شده توسط محققین ممکن است ناشی از استفاده از انواع مختلف نانو ذرات با کشش‌های سطحی متفاوت، غلظت‌های مختلف نانو ذرات، سورفکتانت‌های مختلف و یا سیالات پایه مختلف باشد. تفاوت در کشش سطحی ناشی از ترشوندگی ذرات نانو است. نانوذرات آبگریز می‌توانند به فصل مشترک متصل شده و در سطح آزاد جمع شوند. در نتیجه، نیروی دافعه بین مولکول‌های آب و نانوذرات قویتر می‌شود، باعث افزایش فاصله بین مولکولی در فصل مشترک و کاهش نیروی جاذبه مولکول‌های آب در داخل سیال و در سطح آزاد شده و در نتیجه باعث کاهش کشش سطحی می‌شود [۳۴، ۳۶].

به دلیل حرکت براونی، نانوذرات آب دوست تمایل بیش‌تری دارند که در سیال پایه باقی بمانند، فقط تعدادی از این ذرات به ناحیه بین سطح منتقل می‌شوند. وقتی نانوذرات آب‌دوست وجود داشته باشد، فعل و انفعال نانوذرات با آب از تعامل بین مولکول‌های آب بیش‌تر می‌شود. فاصله بین مولکولی به دلیل جذب بین ذرات نانو و مولکول‌های آب کاهش می‌یابد و باعث افزایش کشش سطحی می‌شود. با توجه به نتایج ذکر شده در بالا، می‌توان پیشنهاد کرد که یک حد بحرانی برای غلظت نانوذرات وجود دارد. در یک درجه حرارت معین، کشش سطحی سیالات پایه با افزودن نانوذرات افزایش می‌یابد و

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.24.7]

هنگامی که غلظت نانو ذرات جامد از غلظت بحرانی مربوطه افزایش یابد، کشش سطحی سیال پایه کاهش می‌یابد.
همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، با افزایش دما، کشش سطحی نانوسیال هیبریدی کاهش می‌یابد. به دلیل افزایش دما حرکت ترمودینامیکی مولکولی و حرکت براونی تشدید شده و موجب کاهش کشش سطحی نانوسیال می‌شود. کشش سطحی توسط نیروهای بین مولکولی تعیین می‌شود. اگر دما افزایش یابد، مولکول‌های سیال پایه بیش‌تر درگیر می‌شوند و سریع‌تر حرکت می‌کنند. در نتیجه، نیروهای جاذبه بین مولکول‌ها ضعیف شده و جاذبه بین ذرات نانو کاهش می‌یابد [۳۱، ۳۴].

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، اثر افزودنی‌های نانو به صورت ذراتی که می‌توانند در بهینه‌سازی عملکرد و بهبود ویژگی‌های ترموفیزیکی ماده ضدیخ/ یخزدا موثر باشند، بررسی شد. به منظور سنتز نانوسیال هیبریدی، سیال ضدیخ/ یخزدای سنتز شده در مرحله نخست پژوهش، مورد استفاده قرار گرفت. در تهیه نانوسیال هیبریدی، مخلوط آب- مایع ضدیخ/ یخزدا با نسبت ۵۰:۵۰ درصد حجمی در دمای ۲۹۸ کلوین به عنوان سیال پایه در نظر گرفته شد. نانوذرات که از حجم مساوی نانو ذرات آلومینا و نانوصفحات گرافن تشکیل شده بودند در مقدار معینی از سیال پایه تعلیق شدند. همچنین به میزان ۰/۲ درصد حجمی اولئیک اسید (OA) و ۰/۲درصد وزنی سدیم دودسیل سولفونات (SDS) به عنوان سورفکتانت برای تثبیت و پراکندگی نانوذرات به سیال پایه اضافه شدند. نانوسیالات با استفاده از روش دو مرحله‌ای تهیه شدند. کسرحجمی نانوذرات در این تحقیق ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد حجمی لحاظ گردید و همچنین جهت بررسی اثر دما، دماهای مورد آزمایش در بازه دمائی ۲۹۳-۲۵۳ کلوین طراحی شد. بررسی ریخت و ریزساختار نانوذرات توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) انجام شد. پس از سنتز نانوسیال هیبریدی آب- ضد یخ: یخزدا/ نانوگرافن- نانوآلومینا، هدایت حرارتی، کشش سطحی و ویسکوزیته دینامیک نانوسیالات هیبریدی اندازه‌گیری و با سیال پایه مقایسه شد و نتایج زیر حاصل شد:

۱) نتایج نشان داد که خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیال هیبریدی آب- ضدیخ: یخزدا/ نانوگرافن- نانوآلومینا خصوصاً در دماهای زیر صفر به شدت به دما و غلظت نانوذرات وابسته است.
۲) هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی آب- ضدیخ: یخزدا/ 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.
۳) نتایج اندازه‌گیری کشش سطحی نشان داد که با افزودن سورفکتانت به سیال پایه، کشش سطحی ابتدا کاهش می‌یابد، اما پس از آن با افزایش غلظت ذرات نانو، کشش سطحی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش دما، کشش سطح نانوسیال هیبریدی کاهش می‌یابد.
۴) نتایج اندازه‌گیری ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال هیبریدی نشان داد که نمونه‌های با کسرهای

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]
[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.24.7]

حجمی جامد کم‌تر از ۰/۵٪ حجمی رفتار غیرنیوتنی Shear-thinning داشتند، در حالی که نمونه‌های با غلظت بالاتر (۲/۵ – ۰/۵ =φ) رفتار غیرنیوتنی Shear-thickening داشتند و از قانون نیوتن پیروی می‌کردند.

۵) نانوسیال هیبریدی آب– ضدیخ: یخزدا/ نانوگرافن– نانوآلومینا در دمای زیر صفر و غلظت کم نانوذرات، رفتار رئولوژیکی و ترموفیزیکی شگفت‌انگیزی را نسبت به سایر محدوده بازه دمائی و غلظتی نشان می‌دهند که به وجود اسیداولئیک و نانوصفحات گرافن نسبت داده شود.

۶) نتایج هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی آب– ضد یخ: یخزدا/ نانوگرافن– نانوآلومینا نشان‌دهنده آن است که خواص هدایت حرارتی و در نتیجه کارائی سیال ضدیخ/ یخزدا با افزودن ذرات نانو بهبود می‌یابد.

۷) با در نظر گرفتن نحوه عملکرد سیال ضدیخ/ یخزدای بدنه هواپیما، افزایش کشش سطحی سیال، به بهبود عملکرد آن در پوشانندگی سطوح هواپیما در مقابل نشست قطرات باران و شبنم سرد و برف کمک می‌کنند در نتیجه عملکرد ضدیخ/ یخزدائی سیال را تقویت می‌کند.

۸) بر مبنای نتایج حاصل از اندازه‌گیری ویسکوزیته دینامیک نانوسیال هیبریدی آب– ضدیخ: یخزدا/ نانوگرافن– نانوآلومینا، افزودن نانوذرات در محدوده کسر حجمی ۰ تا ۰/۵ درصد، علاوه بر افزایش ویسکوزیته، رفتار غیرنیوتنی Shear-thinning نانوسیال پایه، که لازمه اصلی عملکرد سیال ضدیخ/ یخزدای بدنه هواپیما می‌باشد، را حفظ می‌کند ولی در غلظت‌های بالاتر نوع رفتار رئولوژیکی سیال تغییر می‌کند. بنابراین افزودن این دو نوع نانوذرات در کسرهای حجمی زیر ۰/۵ درصد به تقویت عملکرد سیال ضدیخ/ یخزدا کمک می‌کند.

منابع مالی/ حمایت‌ها

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

مراجع

[1] C. A. Authority, Aircraft icing handbook. Safety Education and Publishing Unit: New Zealand, 2000.
[2] Transport Canada, Guidelines for Aircraft Ground Icing Operations (Chapter 13), 2005, 74.
[3] Ground De-/Anti-Icing of Aeroplanes; Intake/Fan-blade Icing and effects of fluid residues on flight controls, EASA Safety Information Notice (SIN) 2008, 29.
[4] Getting to grips with cold weather operations, Flight Operations Support and Line Assistance, Airbus, 2000.
[5] Transport Canada, Deicing/Anti-icing Fluids, TP 10643E When Doubt. Small Large Aircr. Aircr. Crit. Surf. Contam. Train. Aircrew Groundcrew, 2004.
[6] Training Recommendations and Background Information for De-Icing /Anti-Icing of Aeroplane on the Ground, 12th Edition, August 2015.
[7] Federal Aviation Administration, Standardized international aircraft ground deice program (SIAGDP), Faa, 2010, 1–36.
[8] Leroux, Jacques. "Guide to Aircraft Ground Deicing." SAE G-12 Steering Group, 2017,

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.24.7]

134.
[9] S. P. Chauhan, M. S. Roshon, W. D. Samuels, and E. S. Berman. Environmentally Benign Aircraft Anti-icing and Deicing Fluids Based on Cost Effective, Bio-based Ingredients. BATTELLE MEMORIAL INST COLUMBUS OH, 2012.
[10] C.H.M. Hill, ACRP Web-Only Document 4: Aircraft Deicing and Airfield Anti-Icing Formulations: Aquatic Toxicity and Biochemical Oxygen Demand, 2008.
[11] Doc 9640 - Manual of A/C Ground De-Icing/Anti-Icing Ops (Doc 9640), International Civil Aviation Organization (ICAO), Secend edition, 2000.
[12] N.R. Karthikeyan, J. Philip, B. Raj, Effect of clustering on the thermal conductivity of nanofluids, Mater. Chem. Phys., 2008, 109 50–55.
[13] M. Hemmat Esfe, The investigation of effects of temperature and nanoparticles volume fraction on the viscosity of Copper Oxide-ethylene Glycol Nanofluids, Period. Polytech. Chem. Eng., 2018, 62 43–50.
[14] N. Salih, J. Salimon, E. Yousif, The physicochemical and tribological properties of oleic acid based triester biolubricants, Ind. Crops Prod., 2011, 34 1089–1096.
[15] D.R. Lide, Hardness of Minerals and Ceramics, CRC Handb. Chem. Phys. (2005) 2313–2314. http://www.hbcpnetbase.com.
[16] A. Banisharif, M. Aghajani, S. Van Vaerenbergh, P. Estellé, A. Rashidi, Thermophysical properties of water ethylene glycol (WEG) mixture-based Fe3O4 nanofluids at low concentration and temperature, J. Mol. Liq. 302 (2020) 112606. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112606 .
[17] M. S. Owen, ASHRAE Handbook: Fundamentals, Inch-Pound Ed., 30329(404), 2009, pp.31.9.
[18] 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.
[19] M. Zareei, H. Yoozbashizadeh, H.R. Madaah Hosseini, Investigating the effects of pH, surfactant and ionic strength on the stability of alumina/water nanofluids using DLVO theory, J. Therm. Anal. Calorim., 2019, 135 1185–1196.
[20] M.U. Sajid, H.M. Ali, Thermal conductivity of hybrid nanofluids: A critical review, Int. J. Heat Mass Transf., 2018, 126 211–234.
[21] Standard, SAE Aerospace. "Standard Test Method for Aerodynamic Acceptance of SAE AMS 1424 and SAE AMS 1428 Aircraft Deicing/Anti-icing Fluids." AS5900 Rev. A., 2003.
[22] P.C. Mishra, S. Mukherjee, S.K. Nayak, A. Panda, A brief review on viscosity of nanofluids, Int. Nano Lett., 2014, 4 109–120.
[23] I.M. Mahbubul, R. Saidur, M.A. Amalina, Latest developments on the viscosity of nanofluids, Int. J. Heat Mass Transf., 2012, 55 874–885.
[24] M. Afrand, D. Toghraie, B. Ruhani, Effects of temperature and nanoparticles concentration on rheological behavior of Fe3O4-Ag/EG hybrid nanofluid: An experimental study, Exp. Therm. Fluid Sci., 2016, 77 38–44.
[25] N. Zhao, Z. Li, Experiment and artificial neural network prediction of thermal conductivity and viscosity for alumina-water nanofluids, Materials (Basel), 2017, 10(5) 552.
[26] 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.
[27] R. Kumar, D. Milanova, "Effect of surface tension on nanotube nanofluids." Appl. Phys. Lett., 2009, 94(7) 073107.
[28] Z. Y. Zhou, D.Q. Qian, L.Bin, Y.M. Xiao and H.C. Bi. "Experimental study on the surface tension of Al_2O_3-H_2O nanofluid." In Materials Science Forum, Trans Tech Publications Ltd, 2016, 852 394-400.
[29] M. Radiom, C .Yang, W.K. Chan. "Characterization of surface tension and contact angle of nanofluids." In Fourth International Conference on Experimental Mechanics, International Society for Optics and Photonics, 2010, 7522 75221D.
[30] 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.
[31] A. Huminic, G. Huminic, C. Fleaca, F. Dumitrache, "Thermal conductivity, viscosity and surface tension of nanofluids based on FeC nanoparticles." Powder Technol., 2015,

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]
[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.24.7]

284 78-84.

[32] A. Banisharif, M. Aghajani, S. Van Vaerenbergh, P. Estellé, Low Temperature Viscosity of Nanofluids with Water : Ethylene Glycol Base Fluid, In 1st International Conference on Nanofluids (ICNf2019) & 2nd European Symposium on Nanofluids (ESNf2019). 2019.

[33] S.Tanvir, and L. Qiao. "Surface tension of nanofluid-type fuels containing suspended nanomaterials." Nanoscale. Res. Lett., 2010, 7(1) 1-10.

[34] N Ahammed, LG Asirvatham, S Wongwises, "Effect of volume concentration and temperature on viscosity and surface tension of graphene–water nanofluid for heat transfer applications." J. Therm. Anal. Calorim., 2016, 123(2) 1399-1409.

[35] M.H.U. Bhuiyan, R.Saidur, M.A.Amalina, R.M. Mostafizur and A.K.M.S. Islam, "Effect of nanoparticles concentration and their sizes on surface tension of nanofluids.", Procedia Engineering, 2015, 105 431-437.

[36] A.R. Harikrishnan, P. Dhar, P.K. Agnihotri, S. Gedupudi and S.K. Das, "Effects of interplay of nanoparticles, surfactants and base fluid on the surface tension of nanocolloids." Eur Phys J E Soft Matter ., 2017, 40(5) 1-14.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.24.7]

Iranian Journal of
Ceramic Science & Engineering
Vol. 11, No. 1, 2022

Study the Effect of Nano Al_2O_3 and Nano Graphene Ceramic Additives on the Aircraft Anti-Icing/De-Icing Fluids

N. Nayebpashaee[1,*], S.M.M.Hadavi[2]

[1] Department of Metallurgy and Mechanical Engineering, Technology and Engineering Research Center, Standard Research Institute (SRI), Karaj, Iran
[2]Department of Materials Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* n.nayebpashaee@standard.ac.ir

Abstract: In the present study, the effect of nano Al_2O_3 and nano graphene ceramic additives in optimizing performance and improving thermophysical properties of aircraft anti-icing/de-icing fluids was investigated. Nanoparticles were characterized by TEM, SEM and XRD methods. The thermal conductivity, surface tension and dynamic viscosity of the hybrid nanofluids were experimentally assessed for temperatures between 253 and 303K and results were compared with some existing theoretical models. Results revealed that the thermal conductivity properties and thus the efficiency of aircraft anti-icing/de-icing fluids are improved by the addition of nanoparticles. Considering the performance of the aircraft anti-icing/de-icing fluids, increasing the surface tension of the fluid helps to improve its performance in covering the aircraft surfaces against the precipitation of super cooled raindrops and snow, resulting in better performance of aircraft anti-ice/de-ice fluid. Based on the results of measuring the dynamic viscosity of graphene-Al_2O_3/ aircraft anti-icing/de-icing -water hybrid nanofluid, the addition of nanoparticles in the volume fraction ranges from 0 to 0.5%, in addition to increasing the viscosity, show non-newtonian behavior Shear-thinning nanofluid the base, which is the main requirement for the performance of the aircraft anti-icing/de-icing fluid. However, at higher concentrations, the hybrid nanofluid shows a tendency to non-Newtonian shear-thickening behavior. Therefore, the addition of these two types of nanoparticles in volume fractions below 0.5% helps to enhance the performance of aircraft anti-icing/de-icing fluid.

Keywords: Aircraft anti-icing/de-icing fluid, Hybrid nanofluid, Al_2O_3 nanoparticle; Graphene nanoplate.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-09]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.24.7]