

مطالعه اثر نانوسیال در بهبود عملکرد سیستم‌های وسایل نقلیه

سعید زینالی هریس

مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

پست الکترونیکی: zeinali@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده

مفهوم نانوسیال سوسپانسیون‌های حاوی نانوذرات مواد را شامل می‌شود که می‌توانند به عنوان محیط‌های انتقال حرارت در سیستم رادیاتور و روغن موتور وسایل نقلیه استفاده شوند. در این بررسی در مورد عوامل کاهش بهره‌وری مصرف سوخت کامیون‌ها، نقش نانوسیال به عنوان عامل خنک‌کننده در رادیاتور و سیستم روغن موتور و مشکلات احتمالی کاربرد نانوسیال بحث شده است. نتایج مطالعات بیانگر آن است که با افزودن نانوذرات به سیستم رادیاتور و روغن موتور اتومبیل‌ها علاوه بر بهبود انتقال حرارت و کاهش ۱۱ درصدی مصرف سوخت، کاهش بیشتر ضریب اصطکاک با افزودن نانوذرات به این سیستم‌ها مشاهده می‌شود.

کلمات کلیدی: نانوسیال، بهینه‌سازی مصرف سوخت، افزایش انتقال حرارت، کاهش اصطکاک، نانوذرات

۱- مقدمه

ساخته می‌شوند طراحی سیستم انتقال نیرو محرکه به چرخ‌ها به دقت و تجربه بسیار بالایی نیاز دارد؛ چون ممکن است به خاطر تنش حرارتی بالا، اگر دماهای موضعی به بیشتر از 266°F برسد، آسیب ببیند [۱]. بنابراین، توسعه فناوری سرمایه‌ش مؤثر برای نگهداری تنش حرارتی فوق‌العاده روی اجزا سیستم انتقال قوای محرکه مسئله بسیار مهمی در بحث انتقال حرارت است. در مورد سیستم‌های روان‌ساز، به منظور کاهش اثرات منفی سایش، عمومی‌ترین راه‌حل تولید لایه سخت و ضخیم روی سطوح اجزا می‌باشد [۲-۳]. روش دیگر، استفاده از پوشش نرم می‌باشد که تولید پایداری برشی پایین روی سطوح زیری و کاهش تنش تماسی انتقال یافته به سطوح فلزی پایین می‌نماید [۴]. در این سیستم‌ها، مطالعات بسیار زیادی در مورد تأثیر انواع افزودنی‌های روغن موتور و گریس روی سایش و اصطکاک انجام

با توجه به توسعه سریع صنایع خودروسازی و بهبود استانداردهای زندگی، اکنون اتومبیل به عنوان وسیله نقلیه مرسوم نقش مهمی در جابجایی و حتی ورزش داشته و تقاضا برای ماشین‌های پر قدرت رشد چشمگیری داشته است. توسعه وسایل نقلیه به صورت پیوسته انجام می‌گیرد؛ ولی در سال‌های اخیر با توسعه فناوری نانو، طراحی اتومبیل‌ها با بهره‌وری انرژی بالا و استهلاک پایین شتاب بیشتری گرفته است. صنعت حمل و نقل نیاز شدید به کاهش ابعاد و وزن سیستم‌های انتقال حرارت دارد و نانوسیال توانایی افزایش انتقال حرارت در سیستم‌های سرمایه‌ش و روغن موتور دارد. مخصوصاً در مورد اتومبیل‌های 4WD^۱ که جهت جاده‌های ناهموار و لغزنده طراحی و

1. Four Wheel Driver

این، ذرات مورد آزمایش در ابعاد میلی متر و میکرومتر بوده و زمانی که با جریان سیال در داخل لوله حرکت می‌کنند به آسانی به هم فشرده شده و باعث سایش لوله‌ها می‌شوند. در سال ۱۹۹۵ چوی [۸] برای اولین بار پیشنهاد کرد که سیالات حاوی ذرات با اندازه نانومتر نانوسیال نامیده شوند. این نوع سیالات با افزودن نانوذرات کریستالی به سیالاتی نظیر آب، اتیلن گلیکول و روغن موتور تولید می‌شوند. نتایج تحقیقات اخیر [۲۳-۱۶]، نشان‌دهنده آن است که خصوصیات ذراتی که ابعاد آنها کمتر از 100 nm باشد بسیار متفاوت تر از ذرات با ابعاد میکرو و میلی‌متر می‌باشد. ابعاد بسیار کوچک نانوذرات حرکت آنها را بیشتر شبیه حرکت‌های اتم‌های مایع می‌سازد و به جای جمع شدن در داخل لوله، پایداری سیال را افزایش می‌دهد. اگر رفتار انتقال حرارت مد نظر قرار گیرد ذرات با ابعاد 10 nm نانومتر که نسبت سطح به حجم آنها 1000 برابر ذرات 10 nm میکرومتر می‌باشد برای انتقال حرارت و جابجایی بسیار مناسب‌تر می‌باشند.

ایستمن [۲۱] گزارش کرده است که تحت شرایط آزمایشگاهی، با افزودن نانوذرات Cu به داخل آب در غلظت‌های مختلف به صورت فوق‌العاده‌ای رفتار انتقال حرارت بهبود می‌بخشد بطوری که تنها با افزودن 4% حجمی نانوذرات بازدهی انتقال حرارت تا 50% افزایش می‌یابد. علاوه بر این، با وجود اختلاف دانسیته بسیار زیاد نانوذرات فلزی و سیال، هیچ گونه ته‌نشینی مشاهده نمی‌شود. این یافته‌ها نشان‌دهنده سازگاری نانوذرات فلزی با سیال بوده، بطوری که هیچ گونه جدایشی اتفاق نمی‌افتد. تحقیق انجام گرفته بوسیله لی و همکاران [۲۳] بیان می‌کند که بازدهی انتقال حرارت نانوسیال حاوی $4/3\%$ نانوذرات Al_2O_3 تا 30% افزایش می‌یابد. کلبینسکی [۲۴] رابطه‌ای بین ابعاد نانوذرات و رفتار انتقال حرارت سیال را بیان کرد. ژو [۲۵] با ارائه مدلی برای ضریب هدایت حرارتی نانوسیال با توجه به شکل (۲) بیان کرد که بازدهی انتقال حرارت با کاهش ابعاد ذرات افزایش می‌یابد، بطوری که با رسیدن به مقیاس نانو به خاطر توزیع مناسب اتم‌های نانو انتقال حرارت سریع‌تر می‌شود.

علاوه بر افزایش خواص حرارتی نانوسیال، بهبود خاصیت روغن کاری سوسپانسیون نانوذرات در روغن بوسیله بسیاری از محققین گزارش شده است. در این تحقیقات انواع مختلفی از نانوذرات نظیر Al_2O_3 ، Cu، CuO و نانولوله کربن چند لایه، فولرین^۱ (C_{60}) و غیره بکار

گرفته است [۷-۴]. تکنولوژی نانوسیال یک تلاش جدید برای سیستم‌های روغن موتور است؛ چون نانوسیال‌های روان‌ساز نه تنها رفتار نانوسیال را بهبود بخشیده و اصطکاک را کاهش می‌دهند بلکه میزان حرارت انتقال یافته بوسیله این سیالات افزایش می‌یابد [۸]. محققین کشف کرده‌اند که مقدار بسیار کمی از ذرات جامد پراکنده در داخل سیالات هدایت حرارتی آنها را به مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهند [۹]. اساس این روش، استفاده از ذراتی است که ابعاد آنها کمتر از 100 nm نانومتر است و نتیجه گروه جدیدی از محیط‌های انتقال حرارت است که نانوسیال نامیده می‌شوند [۸]. نانوسیال محیط‌های انتقال حرارتی را شامل می‌باشد که از پراکنده کردن ذرات جامد فلزی و غیر فلزی در ابعاد نانو در سیال پایه ایجاد می‌شود، یک نانومتر یک میلیاردیم متر ($1/500000$ قطر موی انسان) می‌باشد. جهت مقایسه قابل ذکر است که هر مولکول آب 1 nm نانومتر می‌باشد [۱۰].

پیشرفت‌های جدید در زمینه نانوتکنولوژی امکان تولید نانوذرات با ابعاد کمتر از 50 nm نانومتر را ایجاد کرده است؛ زیرا ذرات مورد استفاده به حدی کوچک هستند که نانوسیال در صورت پراکندگی صحیح، مشکل ته‌نشینی ذرات را ندارد. همچنین این ذرات مشکل کلوخه شدن و گرفتگی مجاری عبور و افت فشار اضافی را ندارند [۱۱]. ابعاد کوچک ذرات مورد استفاده، پایداری ذرات پراکنده در داخل سیال را افزایش داده بطوری که با کوچک شدن ابعاد سرعت ته‌نشینی کاهش یافته و در ابعاد نانومتری به خاطر تأثیر حرکات براونی ته‌نشینی متوقف می‌گردد [۱۲].

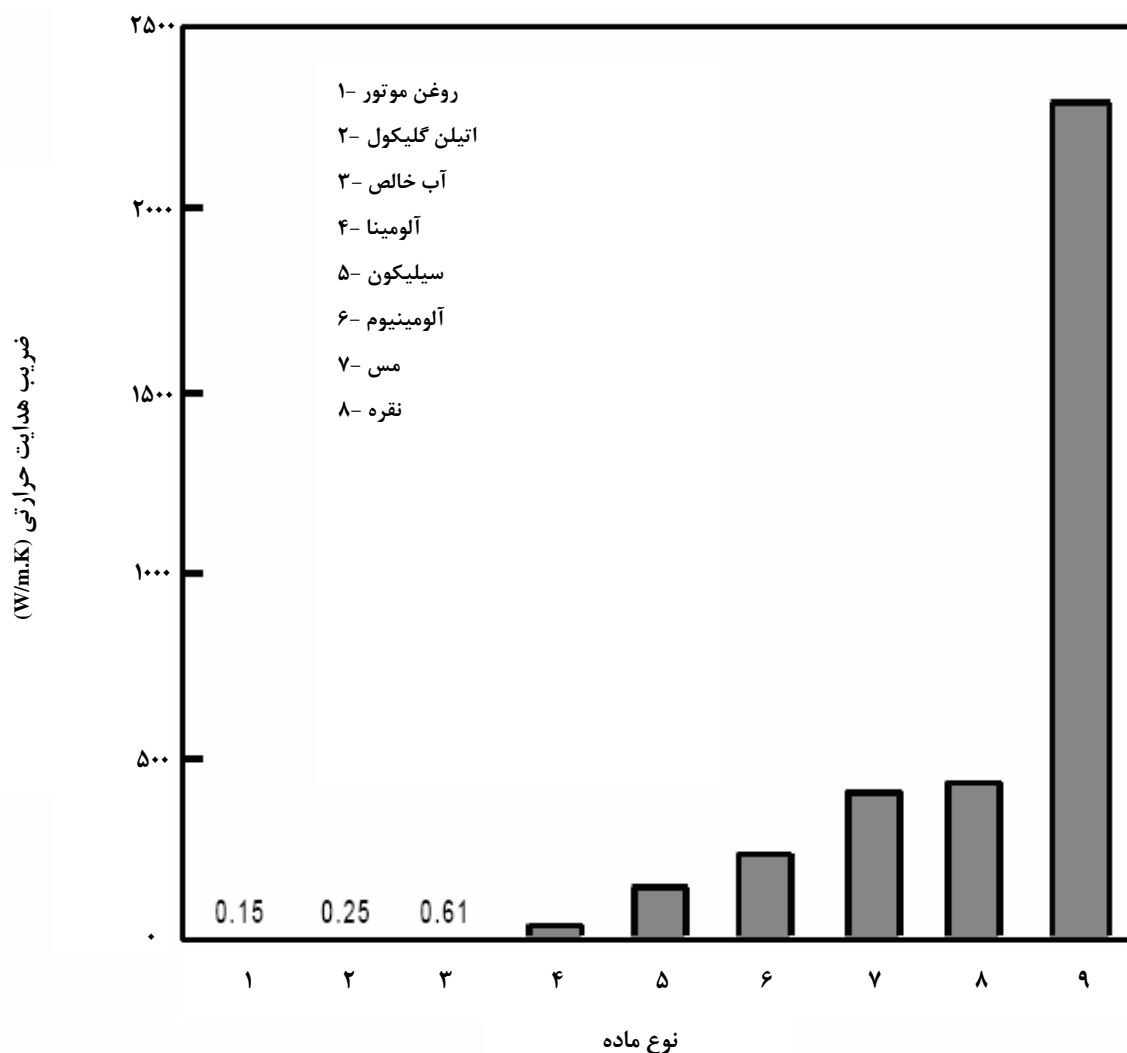
۲- تئوری

به طور معمول رفتار انتقال حرارت جامدات فلزی بسیار بهتر از مایعات می‌باشد. همانطوری که از شکل (۱) مشخص است در دمای اتاق، ضریب هدایت حرارتی مس 700 برابر بیشتر از آب و 3000 برابر بیشتر از روغن موتور است [۱۳]. بنابراین بدیهی است که با افزودن ذرات جامد فلزی معلق به داخل مایعات رفتار انتقال حرارت مایعات به صورت چشمگیری بهبود یابد. ماکسول [۱۴] در حدود صد سال پیش به صورت تئوریک پیش‌بینی کرده است که افزودن ذرات معلق کروی، بازدهی انتقال حرارت را به طور مؤثری افزایش می‌دهد. با انجام آزمایش برای کارهای صنعتی لیو و همکاران [۱۵] تأثیرات ابعاد ذرات، غلظت و شدت جریان را در افزایش انتقال حرارت نشان دادند. با وجود

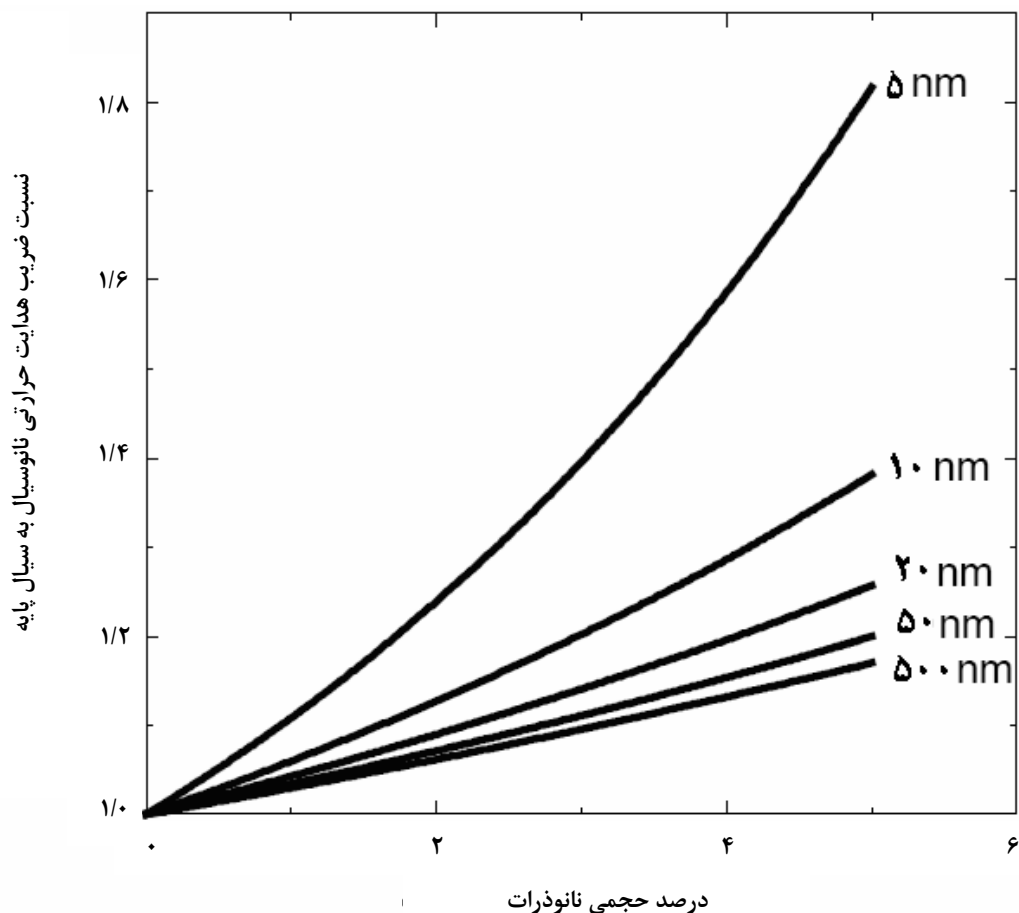
1. Fullerene

رفته است [۷]. لی و همکاران [۲] آزمایش‌هایی با روان‌سازهای نانوسیالی حاوی ZrO_2 و IrO_2 انجام داده و نشان داده‌اند که اصطکاک سطح فولاد $C60$ به صورت قابل توجهی با سیستم روان‌ساز نانوسیالی کاهش می‌یابد و با آنالیز میکرو ساختاری روان‌ساز مشخص گردید، نانوسیال رفتار بسیار عالی از خود نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل، این گروه مشخص کردند که نانوسیال به صورت مؤثری اصطکاک را کاهش می‌دهد. در بعضی از تحقیقات نانولوله کربن

بهترین افزایش را در ضریب هدایت حرارتی روغن نشان می‌دهد در حالی که فولرین پتانسیل بالایی به عنوان افزودنی ضد سایش زمانی که نانوذرات C_{60} در روغن موتور پراکنده شوند نشان می‌دهد. با وجود این، تهیه سوسپانسیون یکنواخت بدون ته‌نشینی به صورت یک بحث باقی می‌ماند چون نانوذرات همیشه به خاطر پیوندهای بین مولکولی واندروالسی تمایل به چسبندگی دارند [۲۶-۲۷].



شکل ۱- مقایسه ضریب هدایت حرارتی سیالات و مواد جامد مختلف [۱۳]



شکل ۲- تأثیر قطر ذرات نانو در افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال [۲۵]

۳- کاربرد نانوسیال در سیستم رادیاتور اتومبیل

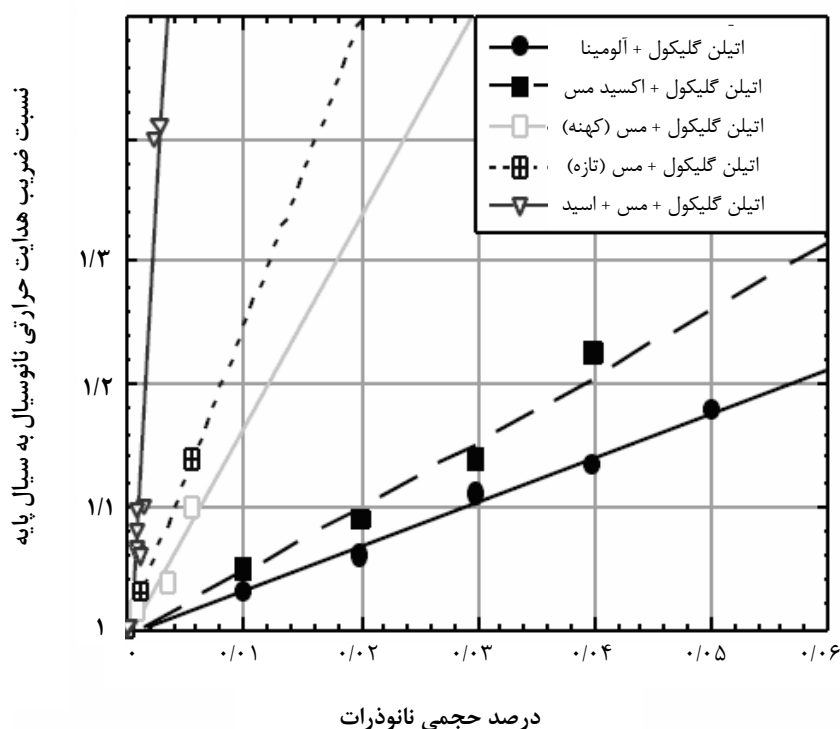
۳-۱- مطالعات انتقال حرارت

سیستم‌های سرمایش وسایل نقلیه باید در دماهای خیلی بالا کار کنند، در حالی که مقدار بسیار زیادی از حرارت را به محیط اطراف منتقل می‌کنند. مسئله‌ای که بسیار حائز اهمیت است و کمتر مورد توجه قرار گرفته است، سیالات خنک‌کننده‌ای است که در سیستم‌های سرمایش رادیاتور مورد استفاده قرار می‌گیرند.

این سیالات، معمولاً از آب یا اتیلن گلیکول و... تشکیل شده‌اند. سیالات مورد استفاده برای انتقال حرارت دارای خواص حرارتی پایینی در مقایسه با فلزات و حتی اکسیدهای فلزی هستند. با توجه به شکل (۱) مشخص می‌شود که ضریب هدایت حرارتی نانولوله کربن 3000 W/m.K ، مس 890 W/m.K ، آب 0.6 W/m.K

۰/۶۱۳ و اتیلن گلیکول 0.252 W/m.K است [۱۳].

در صورتی که سیالات مورد استفاده بتوانند حرارت را با سرعت بالایی انتقال دهند، رادیاتور در ابعاد کوچکتر طراحی و ساخته شده و امکان طراحی آیرودینامیک را برای کامیون فراهم می‌نماید. علاوه بر این، نیاز به سیال در گردش زیادی برای انتقال حرارت نبوده و پمپ‌های انتقال‌دهنده سیال سردکننده، می‌توانند کوچکتر ساخته شده و انرژی کمی را مصرف کنند، همچنین موتور کامیون می‌تواند جهت تولید توان بیشتر در دمای بالاتری کار کند و در ضمن، از عهده استانداردهای سخت لحاظ شده جهت کاهش اتلاف انرژی برآید. همچنین با کوچکتر شدن رادیاتور جلوی وسیله نقلیه، وضعیت دید راننده بهتر می‌شود.



شکل ۳- نسبت ضرایب هدایت حرارتی نانوسیال‌های مختلف نسبت به سیال خالص برحسب غلظت حجمی نانوذرات [۲۱]

این مسئله که افزایش ذرات جامد با ابعاد نانومتري به سیالات مرسوم باعث افزایش فوق‌العاده در ضریب هدایت حرارتی می‌شود هنوز از نظر تئوریک کاملاً شناخته نشده و مطالعات تئوریک و تجربی در این زمینه ادامه دارد. مسئله مهم این است که مواد در مقیاس نانو دارای خواص فیزیکی منحصر بفردی هستند که در مواد با ابعاد متداول دیده نمی‌شود [۳۰].

با وجود این، مهم است تأکید کنیم که کاربرد نانوسیال در سیستم رادیاتورها بیشتر برای مقاصد سرمایش در شرایط انتقال حرارت جابجایی می‌باشد. به همین منظور، جهت تعیین میزان توانایی نانوسیال در تخلیه حرارت، آزمایشی برای نانوسیال اتیلن گلیکول/اکسید آلومینیوم در جریان آرام و کاملاً توسعه در یک کانال مستطیل شکل انجام گرفته است [۳۱]. نتایج تجربی بیانگر تأثیر قابل توجه افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم در افزایش شدت انتقال حرارت و حداکثر دمای دیواره سیستم می‌باشد. همانطوری که از جدول (۱) مشخص است در اعداد رینولدز ۲۰۰۰ با افزایش غلظت نانوذرات از ۰ تا ۷ درصد حجمی حداکثر دمای دیواره از ۸۲/۹ به ۶۷ درجه سانتیگراد کاهش می‌یابد و در عین حال میزان انتقال حرارت، افزایش ۴۰ درصدی را نشان می‌دهد. همچنین

نانوذرات دارای خواص منحصر بفردی هستند که می‌توانند در بهبود خواص حرارتی سیالات متداول به کار روند. از جمله این خواص، سطح مخصوص (نسبت سطح به حجم) بسیار بالا است. همچنین با کوچکتر شدن ابعاد ذرات، تعداد ذرات موجود در واحد حجم افزایش یافته و انتقال حرارت که در داخل نانوسیال بر سطح این ذرات انجام می‌گیرد، افزایش زیادی نشان می‌دهد. برای نانوذرات حدود ۲۰ درصد اتم‌ها در سطح قرار گرفته و اجازه می‌دهد حرارت به خوبی جذب و به صورت مؤثرتری انتقال یابد [۱۳]. به عنوان مثال، محققین کشف کرده‌اند که ضریب هدایت حرارتی اتیلن گلیکول با افزودن تنها ۱۰ درصد حجمی ذرات اکسید مس ۳۵ نانومتري تا ۲۰ درصد افزایش می‌یابد [۱]. نتیجه مشابهی در مورد ذرات نانومتري اکسید تیتانیوم در آب مشاهده شده است [۲۸]. با توجه به شکل (۳) ایستمن و همکاران نشان داده‌اند که افزودن ذرات فلزی مس به اتیلن گلیکول افزایش بیشتری در ضریب هدایت حرارتی نسبت به اتیلن گلیکول حاوی ذرات اکسید فلزی نشان می‌دهد [۲۱]. نتیجه آخرین بررسی‌ها نشان می‌دهد افزودن ۱ درصد حجمی نانولوله کربن به سیال پایه افزایش ۱۵۰ درصدی در ضریب هدایت حرارتی را نشان می‌دهد [۲۹].

انتقال حرارت نانوسیال به آب خالص افزایش زیادی را نشان می‌دهد. عدد Pe در شکل (۴) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Pe = Re_{nf} \cdot Pr_{nf} \quad (1)$$

در این رابطه Pe ، عدد پکلت، Re_{nf} ، عدد رینولدز و Pr_{nf} ، عدد پرائنتل نانوسیال می‌باشد که مطابق روابط زیر محاسبه می‌گردند:

$$Re_{nf} = \frac{\rho_{nf} \cdot \bar{U} \cdot D}{\mu_{nf}} \quad (2)$$

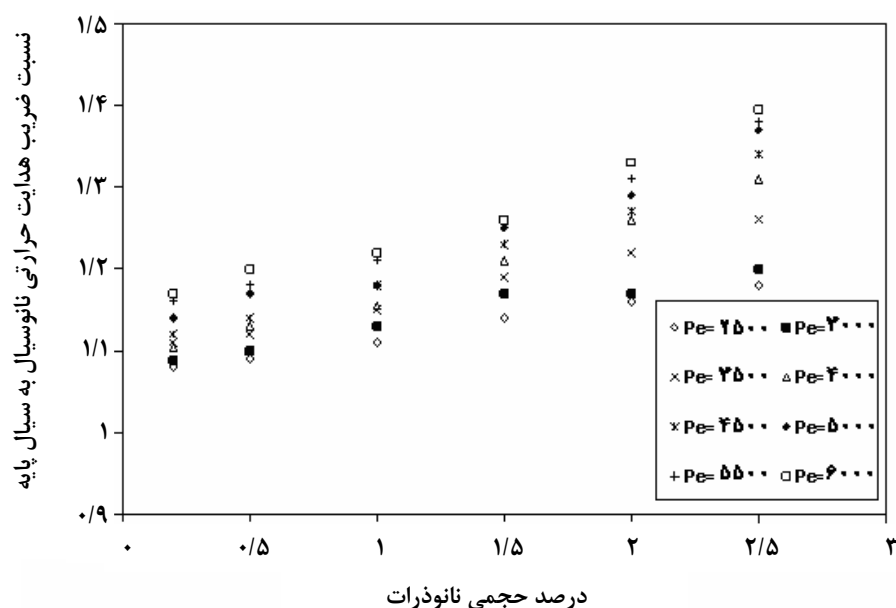
$$Pr_{nf} = \frac{Cp_{nf} \cdot \mu_{nf}}{k_{nf}} \quad (3)$$

می‌توان انتظار داشت با افزایش شدت جریان یا عدد رینولدز شدت سرمایش به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد بطوری که در غلظت ۵ درصد حجمی با افزایش عدد رینولدز از ۱۰۰۰ به ۲۰۰۰ حداکثر دمای دیواره از ۸۰/۴ به ۷۴/۲ درجه سانتیگراد کاهش می‌یابد.

افزایش انتقال حرارت مشابهی برای نانوسیال آب/اکسید آلومینیوم توسط زینالی هریس و همکاران گزارش شده است [۳۲] که با افزودن تنها ۲/۵ درصد حجمی نانوذرات ۳۵ نانومتری اکسید آلومینیوم به آب ضریب انتقال حرارت نسبت به آب افزایش ۴۰ درصدی را نشان می‌دهد همانطوری که از شکل (۴) مشخص است با افزایش غلظت نانوذرات و افزایش شدت جریان مخلوط نسبت

جدول ۱- تأثیر غلظت ذرات و عدد رینولدز بر حداکثر دمای دیواره [۳۱]

اتیلن گلیکول / آلومینا		
Re = ۲۰۰۰	Re = ۱۰۰۰	
۸۲/۹ °C	۹۱/۹ °C	%۰ غلظت حجمی
۸۲/۰ °C	۹۰/۹ °C	%۱/۰ غلظت حجمی
۷۹/۲ °C	۸۷/۵ °C	%۲/۵ غلظت حجمی
۷۴/۲ °C	۸۰/۴ °C	%۵/۰ غلظت حجمی
۶۷/۰ °C	۷۳/۴ °C	%۷/۰ غلظت حجمی



شکل ۴- نسبت ضرایب انتقال حرارت نانوسیال آب/اکسید آلومینیوم به آب خالص بر حسب

غلظت نانو ذرات در شدت جریان‌های مختلف نانوسیال [۳۲]

در روابط بالا ρ_{nf} ، دانسیته نانوسیال، μ_{nf} ، ویسکوزیته نانوسیال، Cp_{nf} ، گرمای مخصوص نانوسیال و k_{nf} ، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال می‌باشد که با توجه به روابط موجود در منابع [۳۲] قابل محاسبه هستند. همچنین \bar{U} سرعت متوسط جریان و D قطر لوله می‌باشد.

نتایج تجربی، بیانگر آن است که در رادیاتورهایی که با استفاده از سیالات خنک‌کننده متداول کار می‌کنند، به منظور افزایش ۲ برابری میزان انتقال حرارت، توان لازم برای پمپ کردن سیال باید حدود ۱۰ برابر شود. ولی در صورتی که از نانوسیال در این سیستم‌ها استفاده شود (با فرض ۳ برابر شدن ضریب هدایت حرارتی) بدون هیچ‌گونه افزایشی در هزینه‌های پمپ کردن، شدت انتقال حرارت ۲ برابر می‌شود [۳۳]. همچنین استفاده از نانوسیال در سیستم‌های سرمایش رادیاتور کامیون‌های با توان بالا می‌تواند تا ۱۰ درصد سطح مورد نظر رادیاتور کامیون را کاهش داده و در نتیجه تا حدود ۵ درصد بهره‌وری در مصرف سوخت موتور به خاطر کاهش نیروی درگ آیرودینامیکی را ایجاد کند [۹].

۲-۳- جوشش نانوسیال

سیستم سرمایش رادیاتور در دماهای خیلی بالا کار می‌کند، بنابراین فرآیند جوشش یا تغییر فاز در مورد سیستم‌های نانوسیال، مبحث مطالعات دیگری می‌باشد که بوسیله محققین انجام گرفته است [۳۹-۳۴]. جوشش و انتقال حرارت طی جوشش، فرآیند بسیار پیچیده‌ای حتی برای آب خالص می‌باشد. این فرآیند، تحت تأثیر عواملی نظیر فلاکس حرارتی دیواره (سوپرهیت دیواره)، خصوصیات مشخصات هندسی سطوح حرارتی، حضور افزودنی‌هایی نظیر عوامل فعال سطحی، گازهای نامحلول و مواد جامد معلق قرار می‌گیرد. حضور افزودنی‌ها روی رفتار انتقال حرارت هم به صورت ماکروسکوپی (از طریق تغییر کشش سطحی، ترشوندگی سطوح و خواص رئولوژیکی) و هم به صورت میکروسکوپی (از طریق تغییر تعداد مواضع هسته‌ای شدن، فرکانس هسته‌ای شدن، رشد حباب‌ها و سرعت جدا شدن آنها) تأثیرگذار است [۳۹]. طی مطالعه یو و همکاران [۴۰]، در مورد انتقال حرارت جوشش نانوسیال آب / Al_2O_3 افزایش فوق‌العاده‌ای در فلاکس حرارتی بحرانی در حضور نانوذرات ملاحظه شد. بطوری که با

افزودن $10^{-4} \times 5$ درصد جرمی ذرات Al_2O_3 و 10^{-2} درصد جرمی ذرات سیلیکا به آب حدود ۲۰۰ درصد افزایش در فلاکس حرارتی بحرانی مشاهده گردید. همچنین گزارش شده است که با افزودن نانوذرات به آب، ابعاد حباب‌ها بزرگتر شده ولی فرکانس جدایش حباب‌ها کاهش می‌یابد.

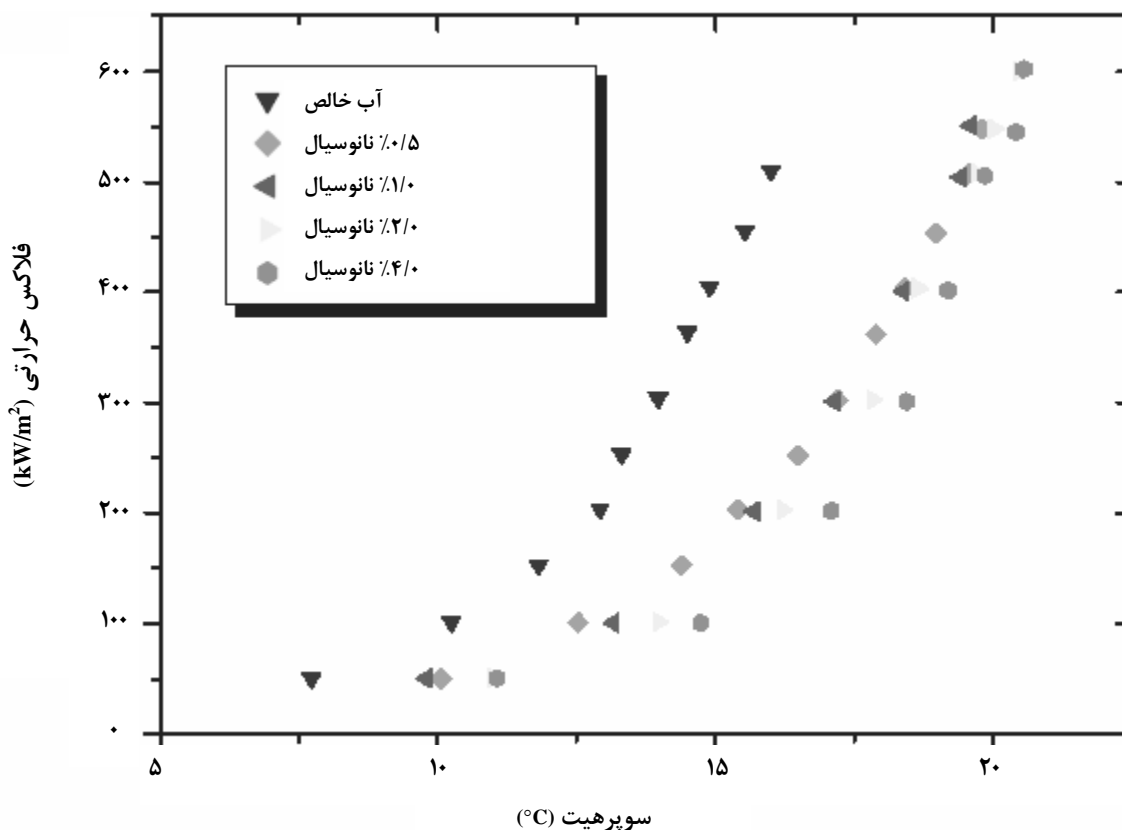
مطالعات انجام شده بوسیله وسالو و همکاران [۳۶] بیانگر افزایش فلاکس حرارتی بحرانی برای آب حاوی نانوذرات می‌باشد ولی اختلاف قابل توجهی در انتقال حرارت برای توان‌های کمتر از فلاکس حرارتی بحرانی مشاهده نگردید. همچنین، نتایج، بیانگر رسیدن به جوشش فیلمی پایدار در دماهای نزدیک به دمای ذوب سیستم می‌باشد بطوری که برای ذرات ۵۰ nm سیلیکا، فلاکس حرارتی ماکزیمم ۳ برابر آب خالص است.

اندازه گیری‌های دمای سطح جوشش توسط چنول بنگ [۳۸] در شکل (۵) نشان داده شده است. افزودن نانوذرات آلومینا باعث می‌شود که منحنی جوشش آب به سمت راست حرکت کند و در نتیجه باعث کاهش انتقال حرارت جوشش هسته‌ای شود. در مقایسه با غلظت‌های پایین، دمای سطح جوشش در فلاکس حرارتی یکسان برای نانوسیال در غلظت‌های بالا افزایش می‌یابد. این به معنی آن است که با افزایش غلظت نانوذرات ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. همچنین از شکل (۵) تشخیص بین مرحله جابجایی آزاد و مرحله جوشش هسته‌ای مشخص است. در مورد نانوسیال مرحله جابجایی آزاد نسبتاً به صورت طولانی تری ادامه دارد و تاخیر در شروع مرحله جوشش هسته‌ای مشاهده می‌شود به عبارت دیگر، سوپرهیت بالاتری برای جوشیدن لازم است.

مطالعات انجام گرفته توسط داس و همکاران [۳۴] برای فرآیند جوشش نانوسیال در غلظت‌های ۱ تا ۴ درصد حجمی نانوذرات Al_2O_3 در آب نشان می‌دهد که رفتار جوشش سیال پایه با افزودن نانوذرات به تعویق می‌افتد و این به معنی آن است که نانوسیال دمای دیواره بالاتری را در مقایسه با آب خالص، تحت فلاکس حرارتی یکسان ایجاد می‌کند. این مسئله، بیانگر تحت‌الشعاع قرار گرفتن نقش هدایت لحظه‌ای در جوشش استخری بوسیله عوامل دیگر است [۳۵]. از آنجایی که ذرات تحت بررسی یک یا دو مرتبه کوچکتر از زبری سطح می‌باشند؛ چنین نتیجه‌گیری می‌شود که نانو ذرات طی مراحل جوشش در سطوح جوشش به دام افتاده و مواضع هسته‌ای شدن یا

حالت‌هایی با تغییر غلظت و ابعاد ذرات می‌توان مسئله جوشش را کنترل کرد. مطالعه انجام شده توسط داس [۳۴] بیانگر آن است که برای لوله‌های باریکتر پدیده به تعویق افتادن فرآیند جوشش مستقل از فلاکس حرارتی می‌باشد؛ ولی برای قطرهای بزرگتر شدیداً وابسته به فلاکس حرارتی می‌باشد.

جوشش را می‌بندند. نتایج بررسی، کمک شایانی در طراحی سیستم‌های خاص سرمایش با استفاده از نانوسیال می‌کند بطوری که ممکن است در صورت ثابت باقی ماندن دمای اشباع یک فوق گرمایش^۱ رخ دهد. همچنین قابل ذکر است، چنین سیالاتی را می‌توان در کاربردهای انتقال حرارت و فرآیندی موادی که نیاز به دمای بالای سطوح بدون تغییر فاز سیال دارند استفاده نمود و در چنین



شکل ۵- منحنی جوشش برای آب خالص و نانوسیال حاوی نانوذرات آلومینا در غلظت‌های

مختلف برای فلاکس‌های حرارتی پایین و ناحیه جابجایی آزاد [۳۸]

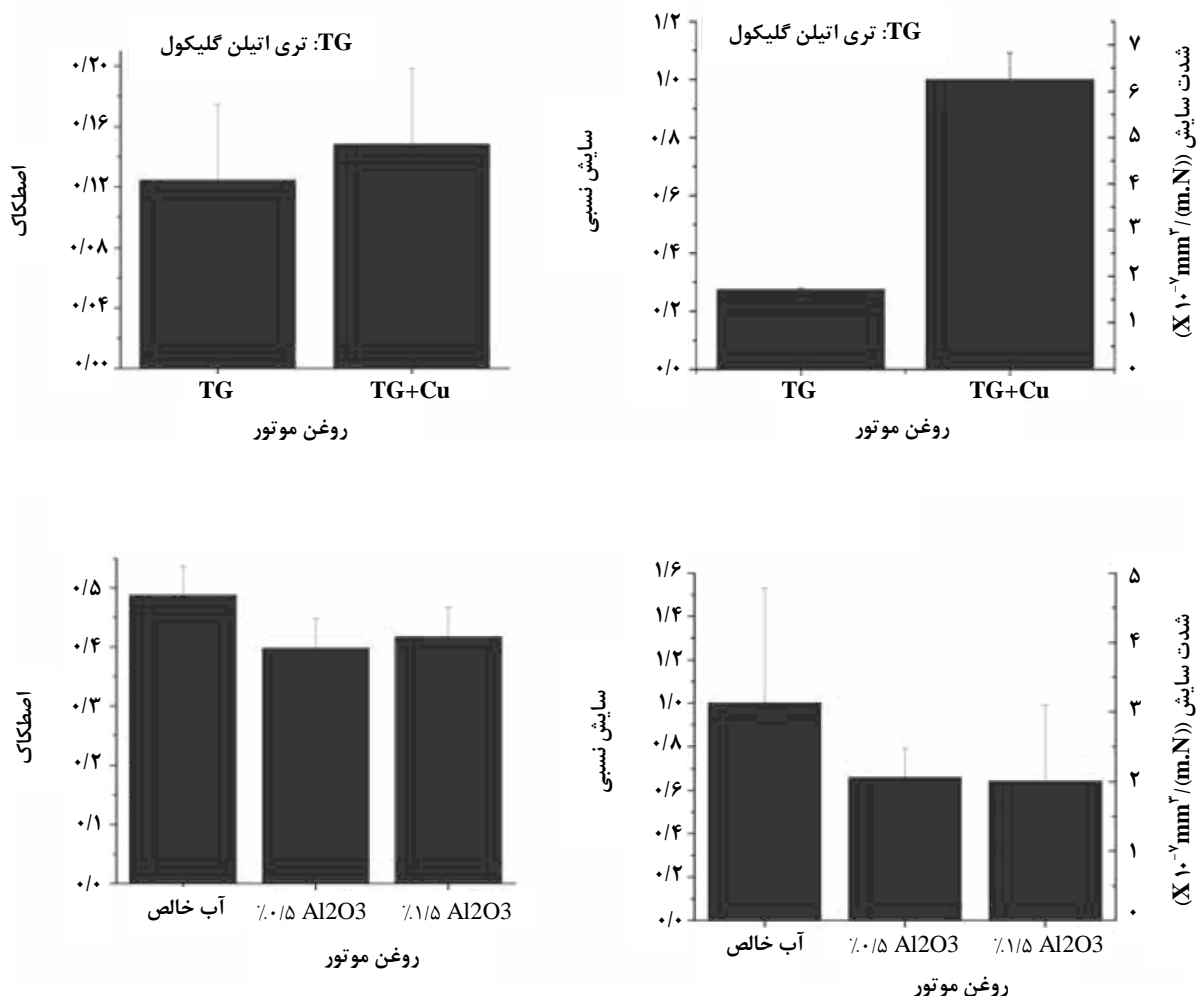
1. Over heating

۳-۳- مطالعات اصطکاک و سایش

با توجه به اینکه سیستم انتقال حرارت رادیاتور در دمای بالا کار می‌کند، مطالعه‌ای در مورد تأثیر افزایش نانوذرات به سیستم رادیاتور و اجزا سازنده آن، آلومینیوم ۳۰۰۳ در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد از نظر خوردگی انجام گرفته است [۱۲ و ۳۳].

به منظور مشخص نمودن تأثیرات تخریبی احتمالی نانوسیال روی سیستم رادیاتور، میزان سایش در فلز رادیاتور (تعیین کاهش جرم) به صورت تابعی از غلظت نانوسیال برای نانوسیال‌های آب/اکسید

آلومینیوم و آب/مس با استفاده از پروفیلومتر در نقاط مختلف شیارهای سایش، اندازه‌گیری شده و نتایج در شکل (۶) ارائه شده است. با توجه به شکل (۶)، نانوسیال حاوی ذرات اکسید آلومینیوم کاهش در میزان سایش و اصطکاک را نشان می‌دهد در صورتی که نانوسیال حاوی ذرات مس تغییر چندانی در اصطکاک نشان نمی‌دهد؛ ولی افزایش قابل اغماضی در میزان سایش مشاهده می‌گردد که ممکن است به خاطر اکسید شدن ذرات مس و تولید اکسید مس باشد.



شکل ۶- نمودار میزان اصطکاک و سایش برای نانوسیال‌های حاوی ذرات مس و اکسید آلومینیوم [۱۲]

سازهای نانوسیالی رفتار بسیار عالی را نشان می‌دهد و رفتار متقابل بین فلزات و سطوح، در مورد نانوذرات بسیار متفاوت‌تر از ذرات با ابعاد میکرومتر و بالاتر است [۱ و ۲]. هدف از این بخش، تعیین تأثیر افزایش نانوذرات به روغن موتور از نظر انتقال حرارت و اصطکاک فولاد- فولاد می‌باشد.

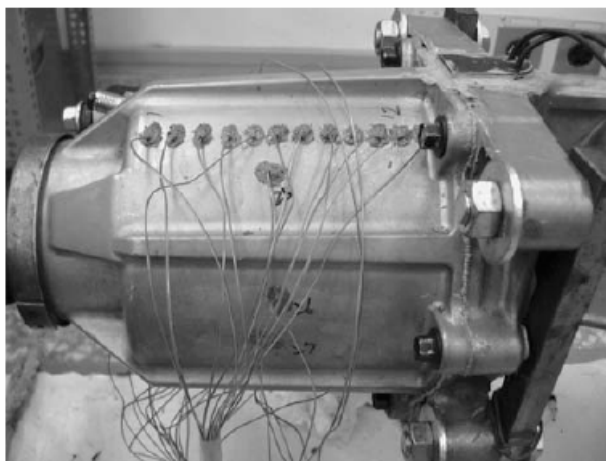
۴-۱- مطالعه انتقال حرارت نانوسیال روان‌ساز

به منظور بررسی اثر افزودن روغن موتور حاوی نانوذرات، کانال روغن یک RBC^۱ آزمایشی توسط تسینگ و همکاران [۳ و ۴] مورد استفاده قرار گرفته است. همانطوری که در شکل (۷) نشان داده شده است، بخش آزمایش RBC، یک دیفرانسیل مرکزی تریبیوت^۲ ۳/۰L، آخرین موتور ساخت شرکت مزدا می‌باشد. ترموکوپل‌های مختلفی در جهت محوری و شعاعی بخش آزمایش سطح خارجی RBC به منظور اندازه‌گیری دمای موضعی نقاط نصب شده‌اند. سرعت چرخش محور توسط یک مبدل فرکانس کنترل می‌شود و حداکثر سرعت چرخش ۳۴۲۰ rpm می‌باشد. اندازه‌گیری توزیع دما به منظور بررسی رفتار انتقال حرارت روغن موتور خالص و فاقد نانوذرات و روغن موتور مخلوط با مواد نانو Al_2O_3 ، CuO و آنتی فوم در چهار سرعت مختلف ۴۰۰، ۸۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۶۰۰ دور بر دقیقه انجام گرفته است.

قابل ذکر است شدت خوردگی فولاد در داخل آب در شرایط عملیاتی ۲ mil/year می‌باشد، در حالی که شدت سایش آلومینیوم ناشی از افزایش نانوذرات مس به آب در شرایط عملیاتی ۰/۰۶۵ mil/year با ساعت کارکرد ۲۵۰۰ hr/year (کمتر از نصف مقدار خوردگی فولاد در آب) می‌باشد. بررسی‌ها، بیانگر کاهش اصطکاک و سایش در نتیجه استفاده از نانوسیال‌ها بوده و بیانگر بیش از ۶٪ بهره‌وری در مصرف سوخت به دلیل کاهش اصطکاک می‌باشد [۴۱].

۴- کاربرد نانوسیال در سیستم روغن موتور اتومبیل

مطالعات بسیار زیادی در مورد تأثیر انواع افزودنی‌های روغن و گریس روی سایش و اصطکاک انجام گرفته است. معمولاً نتایج مطالعات، استفاده از فلزات خالص یا اجزا آنها به عنوان مواد اضافه شونده به روغن به صورت فیزیکی یا شیمیایی به منظور ایجاد لایه محافظ نازک یا از طریق پراکنده کردن مواد اضافه شونده فلزی به سطوح در معرض خوردگی را پیشنهاد می‌کند. این عمل، باعث کاهش و تعدیل سریع تنش تماسی سطوح شده و در نتیجه از تغییر شکل لایه زیرین جلوگیری می‌کند [۴۱ و ۴۲-۷]. یکی از نتایج افزودن ذرات جامد، تجمع آنها در فیلترها (فلزات خاص) می‌باشد. کوشش‌های زیادی جهت تولید پودرهای فلزی توسط فرآیندهای مختلف انجام گرفته است. آنالیز میکروساختاری روان



شکل ۷- بخش آزمایش دیفرانسیل مرکزی تریبیوت ۳/۰L، آخرین موتور ساخت شرکت مزدا [۱]

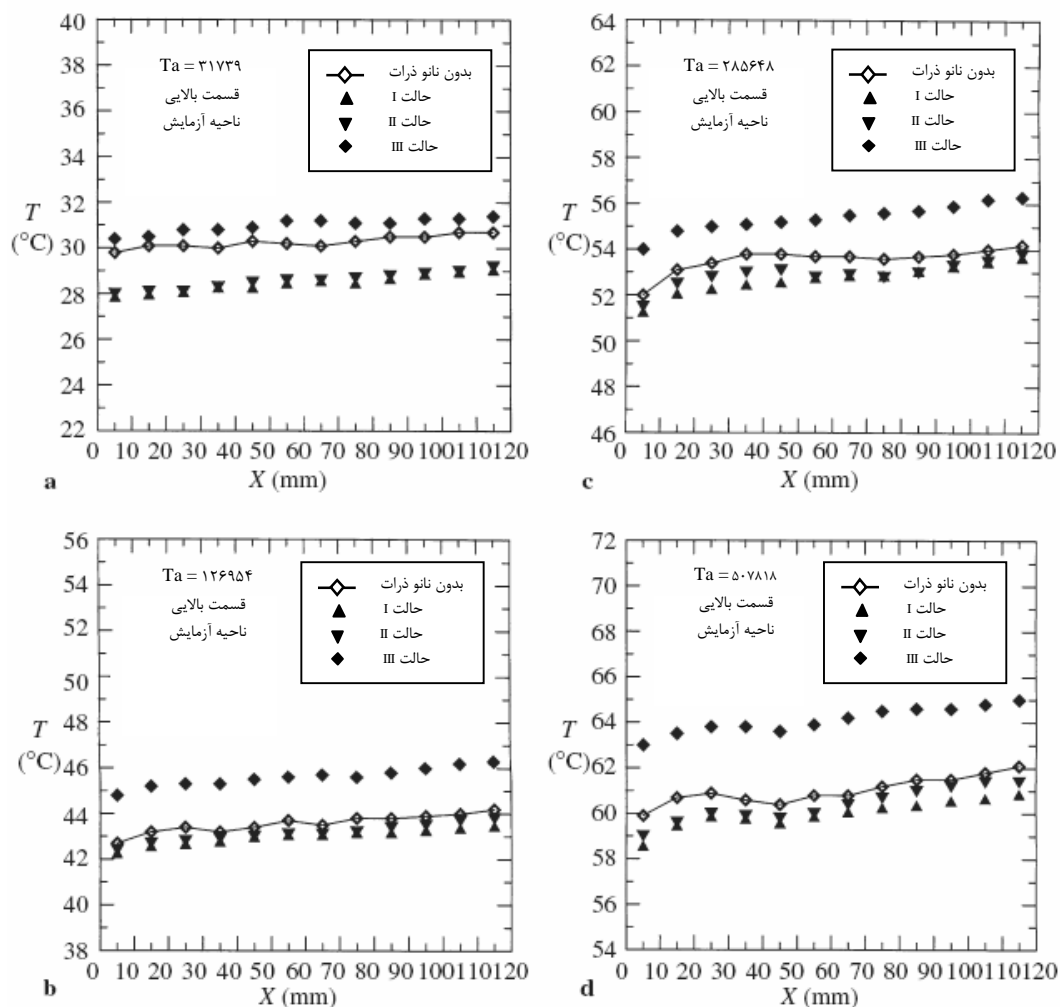
1. Rotary Blade Coupling
2. Tribute

است. بالاترین دما بوسیله روغن حاوی آنتی فوم ایجاد می‌شود. آنتی فوم اضافه می‌شود تا از اختلاط هوا با روغن جلوگیری کند، با وجود این، رفتار انتقال حرارت آنتی فوم به اندازه کافی بد است تا توانایی انتقال حرارت روغن موتور را کم کند. در شکل (۸) پارامتر Ta نشان‌دهنده عدد تیلور بوده و به صورت زیر تعریف می‌گردد [۱]:

$$Ta = \Omega^2 r_m (r_o - r_i)^3 / \nu^2 \quad (۴)$$

که در رابطه (۴) r_o و r_i به ترتیب شعاع داخلی و خارجی، r_m شعاع متوسط کانال روغن RBC، ν سرعت متوسط و Ω سرعت زاویه‌ای می‌باشند.

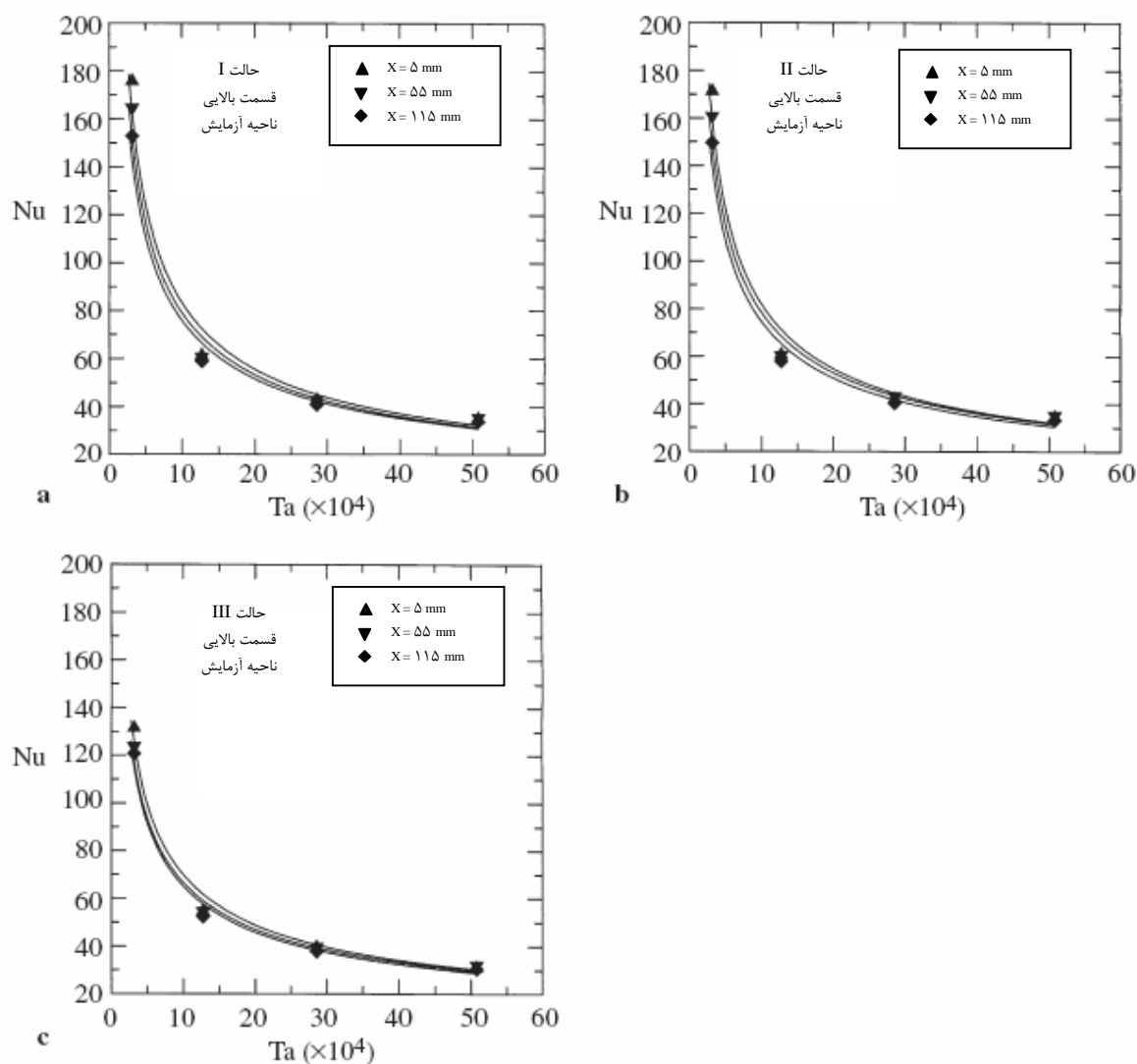
شکل (۸) نشان‌دهنده توزیع دما در جهت محوری در قسمت بالایی بخش آزمایش در سرعت‌های چرخش مختلف برای روغن موتور خالص و روغن‌های حاوی نانوذرات مختلف می‌باشد. مقایسه بین شکل‌های $a-d$ که در آن عدد تیلور از $Ta = 31739$ تا $Ta = 507818$ افزایش می‌یابد و بالاترین دما از $30^\circ C$ تا $60^\circ C$ افزایش می‌یابد. مشخص می‌شود که با افزایش یک مرتبه در سرعت چرخش دمای متوسط حدود $10^\circ C$ افزایش می‌یابد. این به معنی آن است که، توزیع دما هم تراز نبوده و در سرعت‌های چرخش بالاتر ایجاد نقاط داغ محتمل‌تر است. مقایسه بین حالت‌های I تا III در شکل (۸) از a تا d مشخص می‌کند که پایین‌ترین دما، متعلق به روغن حاوی نانوذرات CuO، بعد روغن حاوی نانوذرات Al_2O_3 و بعد روغن فاقد نانوذرات



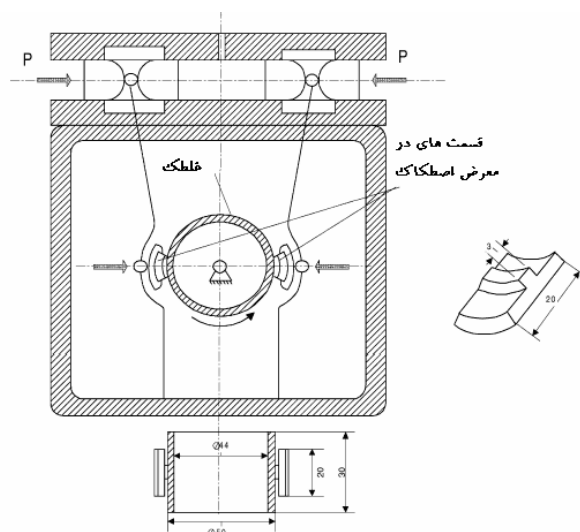
شکل ۸- توزیع دمای محوری برای اعداد تیلور مختلف در قسمت بالایی سیستم آزمایشی [۱]

۴-۲- مطالعه کاهش اصطکاک روغن موتور حاوی نانوذرات جهت تعیین تأثیر افزودن نانوذرات روی اصطکاک، آزمایش‌های سایش و اصطکاک برای چندین نوع از افزودنی‌ها و نیز ۳ نوع مختلف از فلزات انجام گرفته است [۶]. شماتیک سیستم آزمایشی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. روغن موتور SAE ۳۰ (ویسکوزیته سینماتیک در 100°C برابر $9/3-12/5\text{Cp}$) به عنوان روان‌کننده جهت کاهش اصطکاک گونه‌های ساخته شده از فولاد کربن (۰/۴٪ کربن و ۱/۰٪ کروم) استفاده شده است.

توزیع دما در ۳ موقعیت مختلف در جهت محوری (در حالت‌های ۱ با $4/4\%$ وزنی نانوذرات $X=5\text{mm}, 55\text{mm}, 115\text{mm}$) و حالت ۲ با $4/4\%$ وزنی نانوذرات Al_2O_3 و حالت ۳ با $0/5\%$ وزنی CuO ، در این فواصل محاسبه شده و در شکل (۹) از a تا c نشان داده شده است. همانطوری که از شکل‌ها مشخص است در تمامی فواصل نانوذرات CuO بیشترین افزایش را در انتقال حرارت و عدد ناسلت نشان می‌دهند و نانوذرات Al_2O_3 در مرحله بعدی قرار دارند و روغن حاوی آنتی فوم ضعیف‌ترین انتقال حرارت و عدد ناسلت را نشان می‌دهد. همچنین با افزایش عدد تیلور انتقال حرارت کاهش می‌یابد.



شکل ۹- تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد تیلور در ۳ موقعیت مختلف از قسمت بالایی سیستم آزمایشی [۱]



شکل ۱۰- شماتیک سیستم آزمایش اندازه گیری سایش و اصطکاک [۶]

مقادیر ضریب اصطکاک متوسط و سایش بر حسب غلظت نانوذرات و نوع مواد استفاده شده در جدول (۲) نشان داده شده است. از جدول (۲) می توان دریافت که بهترین نتایج در مورد افزودنی های ۲ و ۴ و ۵ در تمام حالات قابل مشاهده است که در آن تمایل مشخص برای کاهش اصطکاک و محدوده توانایی یاتاقان^۱ قابل مشاهده است.

پودرهای نانوذرات در محیط های گازی مختلف به منظور تغییر ابعاد متوسط ذرات تولید شده اند. به منظور ایجاد پایداری در پراکندگی افزودنی های نانو در داخل روغن از همزن مکانیکی به همراه عوامل فعال سطحی استفاده شده است. نمونه ها روی غلطک های ساکن تحت شرایط آزمایش زیر ساییده می شوند. بار نرمال ۱۸۴N-۱۱۰، سرعت لغزش ۲/۶۲-۱/۵۶ m/s و طول مسیر سر خوردن ۲۷km می باشد.

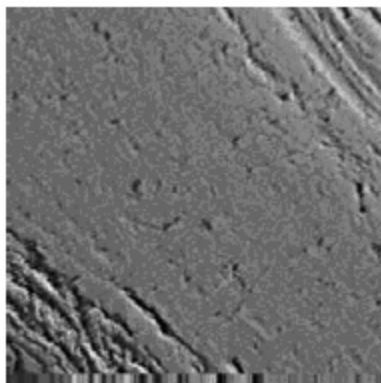
جدول ۲- نتایج حاصل از آزمایش تست سایش و اصطکاک برای روغن موتور حاوی نانوذرات تحت شرایط آزمایشی مختلف [۶]

ردیف	روغن موتور	جنس سطوح در معرض سایش	غلظت نانو ذرات اضافه شده به روغن موتور (wt%)			
			ممان اصطکاک (Nm)		محدوده توانایی یاتاقان (N)	
			-۱/۳	-۱/۶	-۱/۳	-۱/۶
۱	SAE ۴۰	استیل - استیل استیل - آهن استیل - برنج	۱/۳۰۸	--	۷۹۲	--
			۱/۱۲۷	۱/۱۴۲	۸۵۸	۸۵۸
			۰/۳۲۵	۰/۲۳۹	۷۹۲	۷۹۲
۲	Cu(CO ₂)+SAE ۴۰	استیل - استیل استیل - آهن استیل - برنج	۰/۷۵۹	--	۱۲۵۴	--
			۰/۸۹۸	۱/۳۵۱	۹۲۴	۷۹۲
			۱/۲۴۶	۰/۲۲۷	۹۲۴	۱۱۲۲
۳	Cu(Ar)+SAE ۴۰	استیل - استیل استیل - آهن استیل - برنج	۱/۲۸۳	--	۷۹۲	--
			۰/۹۱۶	۱/۲۱۱	۹۲۴	۹۲۴
			۱/۳۲۸	۰/۱۸	۸۰۰	۸۵۸
۴	Cu(Ar)+O ₂ +SAE ۴۰	استیل - استیل استیل - آهن استیل - برنج	۰/۷۴۴	--	۸۵۸	--
			۱/۰۶۳	۱/۲۴۱	۹۲۴	۸۵۸
			۱/۲۴۶	۰/۱۵۸	۸۰۰	۱۱۲۲
۵	Cu(N ₂)+SAE ۴۰	استیل - استیل استیل - آهن استیل - برنج	۰/۵۴۳	--	۱۴۵۲	--
			۱/۱۱۸	--	۹۲۴	--
			۱/۲۴۶	--	۷۶۲	--

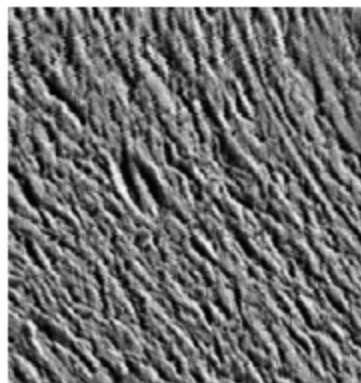
1. Score Limit

بهترین عملکرد را در نوسانات یاتاقان و کاهش وزن از دست رفته نشان می‌دهد.

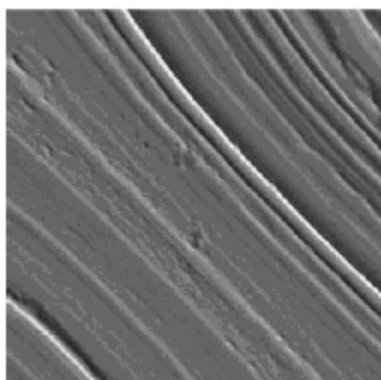
با مقایسه نتایج نهایی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که افزودن ذرات مس در محیط N_2 بهترین نتایج را در مورد اصطکاک و سایش نشان می‌دهد. غلظت بالای نانوذرات فلزی در روغن SAE ۳۰ (۰/۶٪ وزنی)



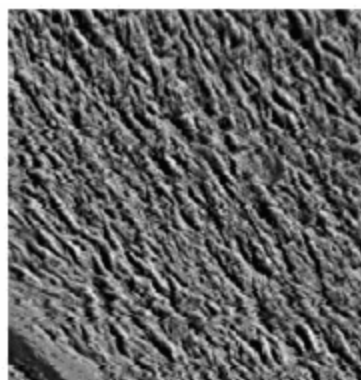
a) ۱۱۰ N, ۱/۵۶ m/s



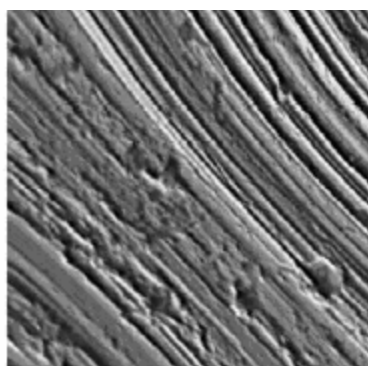
b) ۱۸۴ N, ۱/۵۶ m/s



c) ۱۱۰ N, ۲/۶۲ m/s



d) ۱۸۴ N, ۲/۶۲ m/s



e) تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطوح سایش یافته پس از آزمایش با روغن موتور خالص

شکل ۱۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطوح سایش یافته تحت تأثیر شرایط مختلف اصطکاکی

با روغن موتور خالص و حاوی نانوذرات مس [۶]

نانوسیال، شامل هدیت حرارتی، انتقال حرارت به صورت جابجایی اجباری و جوشش نشان‌دهنده بهبود فوق‌العاده خواص انتقال حرارتی سیالات مرسوم مورد استفاده در سیستم‌های سرمایش خودروها شده و بیانگر آن است که امکان ایجاد توان سرمایشی بالا در فضایی کوچک فقط با استفاده از فناوری‌های جدید (نظیر استفاده از سیستم سرمایشی نانوسیال) امکانپذیر است، بطوری که استفاده از نانوسیال با ضرایب هدایت حرارتی بالا در سیستم‌های سرمایش رادیاتور کامیون‌های با توان بالا می‌تواند تا ۱۰ درصد سطح مورد نظر رادیاتور کامیون را کاهش داده و در نتیجه تا حدود ۵ درصد بهره‌وری در مصرف سوخت موتور به خاطر کاهش نیروی درگ آیرودینامیکی را ایجاد کند. همچنین نتایج مطالعات انجام گرفته در زمینه کاربرد نانوسیال در سیستم روغن موتور، نشان‌دهنده کاهش اصطکاک و سایش در نتیجه افزودن نانوذرات به عنوان ماده افزودنی به روغن موتور بوده و بیانگر بیش از ۶٪ بهره‌وری در مصرف سوخت به دلیل کاهش اصطکاک می‌باشد [۴۱]. بنابراین، با کاربرد نانوسیال در سیستم روغن موتور و رادیاتور اتومبیل‌ها تا حدود ۱۱ درصد امکان بهبود مصرف سوخت برای ماشین‌ها بخصوص ماشین‌آلات سنگین وجود دارد. همچنین بهبود انتقال حرارت، کاهش هزینه‌های عملیاتی و توان لازم برای پمپ کردن، طراحی و ساخت رادیاتورهای کوچکتر و سبکتر، کاهش دبی سیال خنک‌کننده، کاهش اتلاف حرارتی و محیط زیست تمیزتر از مزایای استفاده از نانوسیال در سیستم‌های خنک‌کننده کامیون‌ها می‌باشد. البته نیاز به مطالعات بیشتر در زمینه ساختار تجهیزات سازگار با نانوذرات مخصوصاً از نظر مقاومت سایشی می‌باشد.

مراجع

- [1] Tzeng, S. C. and Hung, C. W., "Heat transfer enhancement of nanofluids in rotary blade coupling of four-wheel-drive vehicles", *Acta Mechanica*, Vol. 179, pp. 11-23, (2005).
- [2] Li, J. F., Liao, H., Wang, X. Y., Normand, B., Ji, V., Ding, C. X. and Coddet C., "Improvement in wear resistance of plasma sprayed Yttria stabilized Zirconia coating using nanostructured powder", *Tribology Int.*, Vol. 37, pp. 77-84, (2004).
- [3] Alexeyev, N. M., Kuzmin, N. N., Trakovskaya, G. R. and Shuvalova, E. A., "On the similarity of friction and wear processes at different scale levels", *Wear*, Vol. 156, pp. 251-261, (1992).

شکل (۱۱) تصاویر میکروسکوپ الکترونی^۱ سطوح سایش یافته را برای سیستم روغن موتور حاوی نانوذرات مس و روغن موتور فاقد هیچ گونه افزودنی تحت شرایط عملیاتی مختلف نشان می‌دهد. بررسی شکل (۱۱) نشان می‌دهد که توپولوژی سطوح سایش یافته بوسیله نانوذرات مس در مقایسه با روغن موتور خالص متفاوت است. بطوری که شیارهای سایش حاصل از روغن فاقد مواد افزودنی تیپیکال هستند در حالی که توپولوژی سطوح اصطکاک روغن موتور حاوی نانوذرات مس یا صاف هستند یا دارای موج‌های خیلی کوچک می‌باشند. بررسی منحنی‌ها نشان می‌دهد که تأثیر افزودنی‌ها در سرعت‌های لغزش پایین و بالا و بارهای زیاد بسیار مهم است. در آزمایش با سرعت‌های بالا و بارهای پایین سطوح سایش خیلی صاف به نظر می‌رسند و تأثیر قابل ملاحظه‌ای در ضریب اصطکاک مشاهده نمی‌شود. معمولاً مس جامد نشان‌دهنده خاصیت ضد اصطکاک خوبی نمی‌باشد چون لایه‌های سطحی مس، طی فرآیند اصطکاکی غیر روغن کاری شده به سختی کار می‌کنند و حتی ممکن است به اندازه کافی شکننده باشند و از طریق شکستگی، خوردگی‌ها تشدید شود. با وجود این، انواع دیگر تغییر شکل که کاملاً بوسیله ساختار نانوکریستالی مس تعیین شده‌اند ایجاد می‌شود [۶]. پارامتر N ارائه شده در شکل (۱۱) مقدار بار نرمال اعمال شده بر سطح می‌باشد.

طبیعت این تغییر شکل مربوط به ساختار نانوکریستال لایه زیر سطحی تشکیل شده در طی اصطکاک شدید می‌باشد. علاوه بر دلایل مکانیکی برای توصیف کاهش اصطکاک در نتیجه افزودن نانوذرات مس، دلایل شیمیایی نیز وجود دارد. روغن موتورهای حاوی افزودنی‌های ضد اصطکاک و سایش مختلف می‌باشند که در سطوح تماس تجزیه شده و محصولات تولیدی نه تنها با فلز پایه بلکه با افزودنی‌های نانوذرات مس واکنش می‌دهند. در مورد مس و فولاد و دمای با اندازه کافی بالا در نقاط اصطکاک ممکن است واکنش جایگزینی اتفاق بیفتد. همچنین گرمای بیش از حد موضعی در نتیجه تماس مستقیم دو سطح منجر به شروع ته‌نشینی شیمیایی مس روی فولاد می‌شود [۴۲ و ۴۱].

بحث و نتیجه‌گیری

مطالعات و تحقیقات انجام گرفته در زمینه‌های خواص حرارتی

1. Scanning Electron Microscopy

- [4] Mishimia, H., "Surface deformation and formation of original element of wear particles in sliding friction", *Wear*, Vol. 215, pp. 10-17, (1998).
- [5] Yu, S. and Kolubaev, A. V., "Effect of friction on subsurface layer microstructure in austenitic and martensitic steels", *Wear*, Vol. 231, pp. 228-234, (1999).
- [6] Tarasov, S., Kolubaev, A., Belyaev, S., Lerner, M. and Tepper, F., "Study of friction reduction by nanocopper additives to motor oil", *Wear*, Vol. 252, pp. 63-69, (2002).
- [7] Hwang, Y., Park, H. S., Lee, J. K. and Jung, W. H., "Thermal conductivity and lubrication characteristics of nanofluids", *Current Applied Physics*, Vol. 6S1, pp. e67-e71, (2006).
- [8] Choi, S.U.S., "Enhancing thermal conductivity of fluid with nanoparticles", *Developments and Applications of Non-Newtonian flows*, D.A. Siginer and H.P. Wang eds., FED, V. 231/MD, V. 66, pp. 99, (1995).
- [9] Lee, S. and Choi, S.U.S., "Application of metallic nanoparticle suspensions in advanced cooling system", *ASME Publications PVP-Vol. 342/MD-Vol. 72*, pp. 227-234, (1996).
- [10] Das, S.K., Putra, N., Theisen, P. and Roetzel, W., "Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluid", *J. Heat Transfer*, vol. 125, pp. 567-574, (2003).
- [11] Ding, Y. and Wen, D., "Particle migration in a flow of nanoparticle suspensions", *Powder Technology*, V. 149, P. 84, (2005).
- [12] Singh, D. and Routbort, J., "Effects of nanofluids on heavy vehicle systems", Argonne National Laboratory (ANL) Report, U. S. Department of Energy, April (2006).
- [13] Choi, S.U.S. and Zhang, Z.G., "Nanofluid for thermal management, Society of Automotive engineers", LNC, vol. 01, pp. 1711-1721, (2001).
- [14] Maxwell, J.C., *A treatise on electricity and magnetism*, Second ed., Oxford University Press, Cambridge, UK, (1904).
- [15] Liu, K. V., Choi, S. U. S. and Kasza, K. E., "Measurement of pressure drop and heat transfer in turbulent pipe flows of particulate slurries", Argonne National Laboratory Report NL-88-15, (1998).
- [16] Vadasz, J. J., Govender, S. and Vadasz, P., "Heat transfer enhancement in nano-fluids suspensions: Possible mechanisms and explanations", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 263-2683, (2005).
- [17] Koo, J., Kleinstreuer, C., "Laminar nanofluid flow in micro heat sinks", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 2652-2661, (2005).
- [18] Tsai, C.Y., Chien, H.T., Ding, P.P., Chan, B. Luh, T.Y. and Chen, P.H., "Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance", *Materials Letters*, Vol. 58, No. 9, pp. 1461-1465, (2004).
- [19] Zhou, D.W., "Heat transfer enhancement of copper nanofluid with acoustic cavitations", *Int. J. heat & Mass Transfer*, Vol. 47, pp.3109-3117, (2004).
- [20] Zeinali Heris, S., Nasr Esfahany, M., and Etemad, S. Gh., "Experimental investigation of convective heat transfer of Al_2O_3 / water nanofluid in circular tube", *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 28, pp. 203-210, (2007).
- [21] Eastman, J.A., Choi, S.U.S., Li, S. Yu, W. and Thompson, L.J., "Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles", *Applied Physics letters*, V. 78, No. 6, P. 718, (2001).
- [22] Daunthongsuk, W. and Wongeises, S., "A critical review of convective heat transfer of nanofluids", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 50, pp. 2272-2281, (2007).
- [23] Lee, S., Choi, S.U.S., Li, S. and Eastman, J.A., "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles", *J. Heat Transfer*, Vol. 121, pp. 280-289, (1999).
- [24] Kobliski, P., Phillpot, S.R., Choi, S.U.S. and Eastman, J.A., "Mechanism of heat flow in suspension of nano-sized particle (nanofluids)", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 855-863, (2002).
- [25] Xue, Q., Xu W. M., "A model of thermal conductivity of nanofluids with interfacial shells", *Material Chemistry and Physics*, Vol. 90, No. 2, pp. 298-301, (2005).
- [26] Zeinali Heris, S. "The Heavy truck fuel consumption optimization using new kind of fluid in radiator system", *First Conference on Optimization of Energy Consumption*, Mashhad, Iran, May (2007).
- [27] Zeinali Heris, S., Nasr Esfahany, M. and Etemad, S.Gh., "Study the potential of Nanofluid as new kind of heat transfer fluid", *Iranian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 4, No. 18, pp. 11-21, (2005).
- [28] Murshed, S.M.S., Leong, K.C. and Yang, C., "Enhanced thermal conductivity of TiO_2 / Water based nanofluids", *Int. J. Thermal Science*, Vol. 44, pp. 367-373, (2005).
- [29] Choi, S.U.S., Zhang, Z.G., Yu, W., Lockwood, F.E. and Grulke, E.A., "Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions", *Applied Physics Letter*, Vol. 79, No. 14, pp. 2252-2254, (2001).
- [30] Ashley, S., "Small structure yields big property payoffs", *Mechanical Engineering*, pp. 52-57, Feb. (1994).
- [31] Nguyen, C.T., Roy, G. and Maiga, S.E.B., "Heat transfer enhancement by using nanofluids for cooling of high heat output microprocessor", *Electronics Cooling, TechBrief*, pp. 1-4, (2007).
- [32] Zeinali Heris, S., Nasr Esfahany, M. and Etemad, S.Gh., "Numerical Investigation of Nanofluid Laminar Convective Heat Transfer through Circular Tube", *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, Vol. 52, pp.1043-1058, (2007).

- [33] Choi, S.U.S., "Metallic nanofluids research can lead to cooler engines, Transportation Technology R&D Center, TechBrief, (2007).
- [34] Das, S.K. Putra, N. and Roetzel, W., "Pool boiling of nano-fluids on horizontal narrow tubes", Int. J. Multi Phase Flow, Vol. 29, pp. 1237-1247, (2003).
- [35] Das, S.K. Putra, N. and Roetzel, W., "Pool boiling characteristics of nano-fluids", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 6, pp. 851-862, (2003).
- [36] Vassallo, P., Kumar, R. and Amico, S.D., "Pool boiling heat transfer experiments in Silica-water nanofluids", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 47, pp. 407-411, (2004).
- [37] Zhou, D.W., "Heat transfer enhancement of copper nanofluid with acoustic cavitations", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 47, No. 14, pp. 3109-3117, (2004).
- [38] Bang, I.C. and Chang, S.H., "Boiling heat transfer performance and phenomena of Al_2O_3 -water nanofluids from a plain surface in a pool", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 48, pp. 2407-2419, (2005).
- [39] Wen, D. and Ding, Y., "Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based alumina nanofluids", J. Nanoparticle Research, Vol. 7, pp. 265-274, (2005).
- [40] You, S.M., Kim, J.H. and Kim, K.H., "Effects of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer", Appl. Phys. Lett., Vol. 83, pp. 3374-3376, (2003).
- [41] Tzeng, S. C., "The introduction and diagnostics of powder transmission of powder transmission elements of 4WD vehicles", J. Mech. Industry, Vol. 224, pp. 142-151, (2001).
- [42] Vipper, A. B., Krein, V. N., Bauman, V. N. and Tarasov, V. A., "Mechanism of action and use of detergent additive in motor oils, Petroleum Chemistry U.S.S.R., Vol. 12, pp. 104-108, (1972).
- [43] Mazda Tribute: Training handout. MAZDA Motor Corporation, (2001).