

بررسی تجربی در استفاده از نانوذرات اکسید آلومینیوم و اکسید مس برای بهبود عملکرد هیدرولیکی حرارتی رادیاتور پژو ۲۰۶

حسن حاج عبداللهی^۱ و وحید قمری^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۲۲	در این مطالعه، رادیاتور خودروی پژو ۲۰۶ به صورت آزمایشگاهی مدل شده است. این مدل شامل مدلسازی حرارتی برای بدست آوردن عدد ناسلت و همچنین مدل هیدرولیکی برای ارزیابی ضریب اصطکاک است. برای افزایش نرخ انتقال حرارت در رادیاتور، نانوذرات بکار گرفته شد. در این مطالعه از دو نوع نانوسیال آب اکسید آلومینیوم و آب اکسید مس استفاده گردیده است. در هر مورد با اضافه کردن نانو ذرات در درصد حجمی های مختلف و همچنین با تغییر دادن دبی سیال و در نتیجه عدد رینولدز، عدد ناسلت و ضریب اصطکاک سمت لوله به ازای حالت مختلف بدست آمده است. نتایج نشان داد برای نسبت های حجمی ۰/۰۲۵، ۰/۰۵۰ و ۰/۰۷۵، در عدد رینولدز ۳۰۰۰، ۱/۹۲٪، ۱۵/۰۸٪ و ۲۲/۴۶٪ بهبودی در عدد ناسلت برای نانوسیال آلومینیوم و برای نانوسیال اکسید مس به ترتیب ۱۰/۸۹٪، ۳۵/۵۰٪ و ۴۶/۱۱٪ در مقایسه با سیال پایه به ترتیب مشاهده شد. در نهایت با استفاده از روش رگرسیون غیر خطی، روابط بسته ای برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک سمت لوله بدست آمد. این روابط برای عدد رینولدز در محدوده ی ۳۰۰۰ الی ۱۵۰۰۰ و همچنین برای نسبت حجمی ذرات در محدوده ی ۰ الی ۰/۰۷۵ با دقت قابل قبول بدست آمدند.
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۱	
واژگان کلیدی: مبادله کن گرمای پره لوله، نانوسیال آب اکسید آلومینیوم، نانوسیال آب اکسید مس، عدد ناسلت، ضریب اصطکاک، عملکرد رادیاتور.	

۱- مقدمه

مبادله کن های گرما، تجهیزاتی هستند که، جریان انرژی بین دو یا چند سیال در دماهای مختلف را فراهم می کنند. مبادله کن های گرما در محدوده ی وسیعی از کاربردها شامل تولید برق، صنایع فرآیندی، شیمیایی، غذایی، الکترونیک، مهندسی محیط زیست، بازیابی گرمای استفاده نشده، صنایع ساخت و تولید، تهویه مطبوع، تبرید و کاربردهای فضایی می باشند. مقاومت حرارتی غالب برای یک مبادله کن گرما معمولاً در سمت هوا بوده و ممکن است ۸۵٪ و یا بیشتر از مقاومت کل را تشکیل دهد. در نتیجه به طور مؤثر بهبود عملکرد حرارتی و به طور قابل توجهی حجم و وزن

مبادله کن گرما هوای سرد را کاهش می دهد. مبادله کن گرمای دارای چگالی مساحت سطح گرمایی (نسبت مساحت سطح گرمایی به حجم مبادله کن) بزرگتر از حدود $700 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ، را مبادله کن فشرده گرما می نامند. مفهوم مبادله کن گرمای فشرده، کاهش اندازه و افزایش میزان انتقال حرارت بوده که ویژگی متداول مبادله کن های گرما مدرن است. هدف اصلی طراحی گرمایی و هیدرولیکی مبادله کن های گرمای فشرده، تولید تجهیزات تبادل گرمای مؤثر برای حداقل کردن هزینه است. این امر با کاهش اندازه مبادله کن گرما برای ظرفیت گرمایی مشخص صورت می گیرد.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: V.Ghamari@stu.vru.ac.ir

۱. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر رفسنجان
۲. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر رفسنجان

این نوع از مبادله‌کن‌ها عموماً در کاربردهای با جریان گاز استفاده می‌شوند. در یک مبادله‌کن لوله‌ای پره‌دار، لوله‌های گرد، مستطیلی، و بیضوی استفاده می‌شوند. پره‌ها بسته به کاربرد، در سمت بیرونی یا در سمت داخل، یا در هر دو سمت داخل و خارج لوله‌ها، به کار می‌رود. پره‌ها به صورت موج دار، نواری، کرکره‌ای و پره‌های ساده استفاده می‌شوند [۱]. پره‌های موج‌دار میان مدل پره‌ها محبوبیت بیشتری دارند که برای بهبود عملکرد انتقال حرارت توسعه داده می‌شود. سطح موجی مسیر جریان هوا را افزایش می‌دهد و موجب اختلاط جریان هوا می‌شود. در نتیجه، عملکرد انتقال حرارتی بالاتری در مقایسه با سطح پره‌های ساده انتظار می‌رود. استفاده از فناوری نانو در سال‌های اخیر افزایش یافته است، زیرا مواد نانو منحصر به فرد نوری، الکتریکی و خواص شیمیایی می‌باشد، بنابراین می‌توان گفت که مایع نانو یک مایع مهندسی جدید است، که می‌تواند عملکرد مبادله‌کن گرما را بهبود بخشد. لازم به ذکر است که نانو سیال یک کلاس جدید از مایعات انتقال حرارت مبتنی بر فناوری نانو است. از آنجایی که هدایت حرارتی جامد بالاتر از مایع است، افزودن مقدار مشخص از جامدات به مایعات ممکن است، خواص حرارتی مایعات را افزایش دهد. اکسید آلومینیوم رایج‌ترین و گسترده‌ترین نانو ذرات است. روش‌های فعال و غیرفعال برای بهبود انتقال حرارت استفاده می‌شود. روش‌های فعال، که باعث بهبودی بهتر می‌شود، نیازمند نیروهای اضافی خارجی و یا تجهیزات است که می‌تواند پیچیدگی، هزینه سرمایه و هزینه سیستم را افزایش دهد. در حالی که افزایش انتقال حرارت می‌تواند با تغییر هندسه جریان یا اصلاح خواص ترموفیزیکی سیال کار شود.

مطالعات قابل توجهی اخیراً در مورد رادیاتور خودرو که همان مبادله‌کن گرمای لوله‌ای پره‌دار می‌باشد، به شرح زیر انجام شده است. این آزمایش‌ها عموماً در مورد انتقال گرما و ویژگی‌های افت فشار و نانو سیال‌ها در مبادله‌کن گرما لوله‌ای پره‌دار موجی شکل انجام شده است.

ابراهیمی و همکاران اثرات نانو سیال سیلیسیم دی‌اکسید بر عملکرد رادیاتور خودرو را مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور، یک مجموعه آزمایشی طراحی کردند. اثرات دمایی ورودی سیال، سرعت جریان و کسر حجمی نانو ذرات بر انتقال حرارت در نظر گرفته شدند. نتایج نشان می‌دهد که عدد ناسلت با افزایش دمایی ورودی سیال، کسر حجمی

نانو ذرات و عدد رینولدز افزایش می‌یابد [۲]. حاج عبداللّهی و همکاران اثرات نانو ذرات اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) بر روی بهینه سازی فنی اقتصادی مبادله‌کن حرارتی لوله‌ای پره‌دار را با استفاده از الگوریتم ژنتیک و در نظر گرفتن ۹ پارامتر طراحی بررسی کرده‌اند. کل هزینه سالیانه و کارایی به عنوان دو تابع هدف در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد نانو ذرات تأثیر قابل توجهی بر هزینه سالیانه و کارایی در دبی جرمی پایین‌تر دارند. حجم مبادله‌کن گرما در مقابل کارایی برای نقاط بهینه جریان جرمی سرد اندازه گیری می‌شود. همچنین افزودن نانو ذرات اکسید آلومینیوم به سیال پایه برای کارایی ثابت، حجم مبادله‌کن گرما را کاهش می‌دهد [۳].

در ارائه دیگر طراحی حرارتی مبادله‌کن حرارتی فشرده لوله ای تخت و پره ساده با استفاده از روش ϵ -NTU و با استفاده از نانو سیال آب اکسید آلومینیوم به عنوان خنک‌کننده، بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که افت فشار برای درصد حجمی ۰.۴٪ از نانو ذرات اکسید آلومینیوم تقریباً دو برابر سیال پایه است [۴].

پتانسیل انتقال حرارت نانو سیال آب - منو اتیلن گلیکول و اکسید آلومینیوم بر عملکرد مبادله‌کننده رادیاتور خودرو توسط داتاترایا مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه کسر حجمی نانوذرات، میزان دبی سیال خنک‌کننده و دمایی ورودی آن در محدوده ۰/۲-۰/۸ درصد، ۴-۹ لیتر در دقیقه و ۶۵ الی ۸۵ درجه سانتی گراد استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد انتقال حرارت رادیاتور با استفاده از نانوسیالات در مقایسه با مایع خنک‌کننده معمولی افزایش می‌یابد. برای نانوسیال با کسر حجمی ۰/۲ درصد، ۳۰ درصد افزایش در انتقال حرارت مشاهده می‌شود. همچنین برآورد کاهش سطح جلوی رادیاتور در صورت جایگزینی سیال پایه با نانوسیال انجام می‌شود که باعث صرفه جویی در هزینه می‌شود [۵].

نانوسیال‌ها دارای هدایت حرارتی بالایی هستند و می‌توانند به عنوان خنک‌کننده موتور خودرو استفاده شوند. از این رو سردار و همکاران اثرات نانوذرات Al_2O_3 بر روی خنک‌کننده خودرو به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌ها در دمایی ورودی هوا بین ۲۳/۴-۲۸/۶ درجه سانتی گراد، سرعت جریان هوا بین ۱/۷-۴/۳ متر بر ثانیه و میزان دبی سیال خنک‌کننده بین ۱۰-۲۵ لیتر بر دقیقه انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که نانوذرات عملکرد خنک‌کننده شفافاً

برآورد ضریب انتقال حرارت و اصطکاک در رادیاتور خودرو می‌باشد که نوعی مبادله‌کن حرارتی پره لوله است. برای این منظور سیستم رادیاتور خودرو به صورت آزمایشگاهی مدل و ساخته شده است به طوری که بتوان دبی و دمای سیال را تغییر داد و با استفاده از سنسورهای دما، تغییرات دمای ورودی و خروجی در هر سمت را بدست آورد. با داشتن دماهای فوق و همچنین مدل سازی رادیاتور خودرو با استفاده از روش ϵ -NTU می‌توان خصوصیات مورد نظر همچون ضریب انتقال حرارت را بدست آورد. در هر مورد با اضافه کردن نانو ذرات در درصد حجمی‌های مختلف و همچنین با تغییر دادن دبی سیال و در نتیجه عدد رینولدز، عدد ناسلت و ضریب اصطکاک سمت لوله به ازای حالت مختلف بدست می‌آید. سپس با استفاده از روش رگرسیون غیر خطی، روابط بسته‌ای برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک سمت لوله در عدد رینولدز در محدوده ی 3000 الی 15000 و همچنین برای نسبت حجمی ذرات در محدوده ی 0 الی 0.075 ارائه می‌گردد. روند فوق در دو حالت با نانوذرات و بدون نانوذرات در نظر گرفته می‌شود و ضرایب انتقال حرارت و میزان بهبود در هر حالت نسبت به حالت سیال پایه محاسبه می‌شود.

۲- سنتز نانوسیال

اندازه مورد استفاده در نانو سیالات از یک نانومتر تا صد نانومتر می‌باشد و از جنس فلزاتی چون مس، نقره و... و یا اکسید فلزی همچون اکسید آلومینیوم و... تشکیل می‌شوند. با توجه به دسترس بودن، مناسب بودن نسبی خواص و مناسب بودن نسبی قیمت، دو نوع نانوذره شامل اکسید آلومینیوم و اکسید مس در این مطالعه استفاده شده است. همچنین در جدول ۱ مشخصات دو نوع نانوذره بکار رفته آمده است.

جدول ۱- مشخصات دو نانوذره استفاده شده

پارامتر	CuO	Al ₂ O ₃
نوع هندسه	کرولی	کرولی
اندازه متوسط (نانومتر)	۴۰	۲۰
رنگ	سیاه	سفید
دانسیته (kg/m ³)	6490	3890
ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.K)	۵۳۵	۸۸۰

برای تهیه نانوسیال مقدار مشخصی از نانوذره در 0.5 لیتر آب مقطر ریخته شد و به مدت یک ساعت در اولتراسونیک پروپ دار (مدل توسعه فناوری مافوق صوت) با قدرت 200

موتور را افزایش می‌دهند. با استفاده از نانوذرات Al_2O_3 ، توان خنک‌کننده رادیاتور در مقایسه با سیال پایه (آب) تا $17/46$ درصد افزایش یافته است [۶].

نعمت پور کشتلی و شیخ الاسلامی به بررسی عددی رفتار انجماد ماده تغییر فاز دهنده در یک مبدل حرارتی سه لوله‌ای دوبعدی پرداخته شده است. نتایج نشان داد با افزودن نانو ذره CuO زمان انجماد برای تمامی مبدل‌های بررسی شده با فین نسبت به مبدل بدون فین کاهش یافته است. [۷].

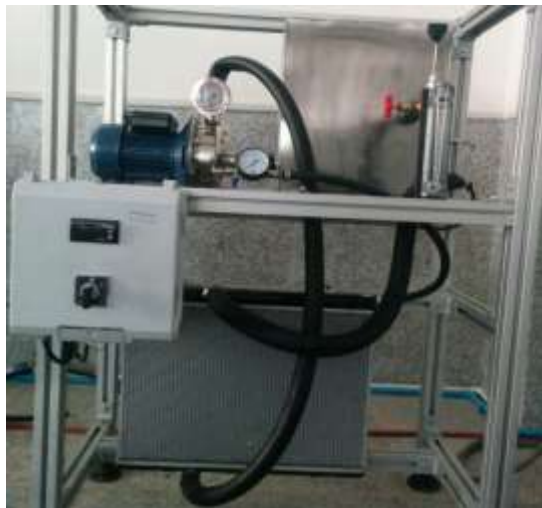
کمانی و رفعی با استفاده از حل عددی معادلات حاکم بر جریان سیال و انتقال حرارت آن، تأثیر افزودن کسر حجمی نانوذرات بر عملکرد یک مبدل حرارتی جریان مخالف را از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش کسر حجمی نانوذرات ضریب انتقال حرارت (U) و انتقال حرارت کل (Q) میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد و همچنین نسبت بازگشت ناپذیری به گرمای مبادله شده (عدد آنتروپی (Ns)) کاهش یافت [۸].

همت اسفیه و اسفنده اثر پارامترهای کسر حجمی و دما بر ویسکوزیته‌ی نانوسیال اکسید مس با پایه‌ی آب (80%) - اتیلن‌گلیکول (20%) در کسرهای حجمی بین 0 تا 1 درصد و دماهای بین 15 تا 50 درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار دادند. به منظور تخمین ویسکوزیته‌ی نانوسیال‌های مشابه با نانوسیال مورد بررسی و همچنین با هدف مدل‌سازی نتایج آزمایش، یک رابطه‌ی تجربی جدید برای پیش‌بینی ویسکوزیته‌ی نانوسیال اکسید مس با پایه‌ی آب (80%) - اتیلن‌گلیکول (20%) در محدوده‌های دمایی و کسر حجمی بیان شده، پیشنهاد شد [۹].

اسوکان و همکارانش به صورت تجربی عملکرد حرارتی مبدل حرارتی فشرده و خواص رئولوژیکی نانوسیال‌های تکی و هیبریدی با غلظت کم و حاوی نانوذرات اکسید آلومینیوم و اکسید مس را بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم و مس به عنوان سیال عامل در مبدل حرارتی فشرده، افزایش در عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت متوسط را به ترتیب به میزان $6/7\%$ و $7/2\%$ در مقایسه با نانوسیال مس و به میزان $17/9\%$ و $12/1\%$ به ترتیب در مقایسه با نانوسیال اکسید آلومینیوم نشان می‌دهد [۱۰].

هدف از این پژوهش، انجام تست‌های آزمایشگاهی به منظور

که حرارت تولید می‌کند را شبیه سازی می‌کند. ۳- پمپ و الکتروموتور برای به‌گردش درآوردن سیال خنک کاری. ۴- دی‌سنج، دماسنج و فشارسنج در ورودی و خروجی از رادیاتور ۵- لوله‌ها، شیرآلات و اتصالات باکس برق.



شکل ۳- سیستم آزمایشگاهی بکار رفته برای مدل سازی رادیاتور خودرو

رادیاتور به‌کار رفته دارای طول ۵۵ سانتیمتر، عرض ۳۸ سانتیمتر، عمق ۲ سانتیمتر با پره‌های موجی شکل از جنس آلومینیوم است. جزئیات مشخصات فیزیکی هسته‌ی پره‌دار و همچنین ضرایب انتقال حرارت و افت فشار این پره‌ها از کتاب کیس و لوندون استخراج شده‌است [۱].

بنابراین با داشتن ابعاد رادیاتور، دی‌جریان و با استفاده از شکل و اطلاعات فوق، می‌توان سایر مشخصه‌های رادیاتور مانند مساحت انتقال حرارت، مساحت پره‌ها، قطر هیدرولیکی، عدد رینولدز و در نهایت ضریب انتقال حرارت و افت فشار سمت پره را تخمین زد. از آنجایی‌که برنامه‌ی نوشته شده برای مدل سازی، به صورت کامپیوتری است، بنابراین نیاز است تا ضرایب کلبورن و افت اصطکاکی شکل فوق به صورت اعداد درآورده شود تا نیاز به مراجعه به شکل را بر طرف کند. این اعداد با استفاده از نرم افزار Tecdig بدست آمده و در جدول ۲ برای ضریب کلبورن آورده شده‌است.

۴- مدل‌سازی مبادله‌کن گرم

در این بخش به طراحی رادیاتور خودرو پرداخته می‌شود و مشخصه‌های حرارتی و هیدرولیکی دو سمت آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

وات قرار گرفت. بعد از آن برای رسیدن به درصد حجمی مورد نظر (۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵) به محلول حاصل آب مقطر اضافه شد و به مدت یک ساعت با همزن مکانیکی^۱ با دور ۲۰۰۰ دور بر دقیقه مخلوط شد. در شکل (۱) نمایی از اولتراسونیک و همزن استفاده شده آمده‌است.



(ب)



(الف)

شکل ۱- (الف): همزن مکانیکی (ب): تصویر اولتراسونیک پروب دار شکل (۲) نمایی از نانوسیال‌ها سنتز شده بعد از یک هفته را نشان می‌دهد.



شکل ۲- تصویر نمونه نانوسیال اکسید مس (رنگ مشکی) و اکسید آلومینیوم (رنگ شیری) ساخته شده در آزمایشگاه

۳- مشخصات مجموعه‌ی آزمایشگاهی

شکل (۳) سیستم آزمایشگاهی برای مدل‌سازی رادیاتور نام‌برده، توسط شرکت پژواک پژوه صنعت ساخته شده‌است. این سیستم شامل اجزای اصلی زیر است: ۱- رادیاتور خودروی ۲۰۶ که در پایین قرار داده شده‌است. این رادیاتور با یک فن هوا را از بین پره‌ها عبور می‌دهد. ۲- مخزن آب از جنس استیل و به مجهز شده به یک هیتر که در بالای شکل قرار دارد. در واقع این بخش از سیستم، موتور خودرو

^۱ IKA Germany

که از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۱].

$$NTU = \frac{U A_{tot}}{C_{min}} \quad (2)$$

U ضریب کلی انتقال گرما، A_{tot} مساحت انتقال حرارت کل، C^* نسبت نرخ ظرفیت گرمایی که در آن C_{min} و C_{max} به ترتیب، بیشتر و کمتر دو مقدار C_c و C_h هستند [۱۱]. نرخ‌های ظرفیت گرمایی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$C^* = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (3)$$

محاسبه ضریب کلی انتقال گرما با توجه به هدایت دیواره و صرف نظر از مقاومت رسوب به صورت زیر بدست می‌آید [۱۱].

$$(UA_{tot})_{ch} = \frac{I}{\left(\frac{I}{h_w A_{tot} \eta_s}\right)_h + \left(\frac{I}{h_a A_{tot} \eta_s}\right)_c} \quad (4)$$

که در آن h_w و h_a به ترتیب بازده کلی، ضریب انتقال حرارت هوا و ضریب انتقال حرارت آب می‌باشد. در ضریب انتقال کلی گرما، ضریب انتقال حرارت سمت لوله و ضریب انتقال حرارت سمت پره مشکل اصلی می‌باشد و با بدست آوردن این دو ضریب بیشتر مشکلات مدلسازی برطرف شده‌است. پس شرح زیر برای بدست آوردن ضرایب انتقال حرارت سمت لوله و پره می‌باشد.

۴-۱- ضریب انتقال حرارت سمت لوله تخت

برای بدست آوردن ضریب انتقال حرارت سمت آب ابتدا باید ویژگی‌های ترموفیزیکی نانو سیال را بدست آوریم، خواص ترموفیزیکی نانو سیال‌ها شامل چگالی، گرمای ویژه، ویسکوزیته و هدایت حرارتی می‌باشد. در این پژوهش دو نوع نانوذرات از جمله Al_2O_3 و CuO به ترتیب با اندازه‌های متوسط $45nm$ و $29nm$ با آب برای تولید نانو سیال در طرف لوله مبادله‌کن گرما استفاده شده‌است. چگالی و گرمای ویژه نانو سیال‌ها را می‌توان با استفاده از روابط زیر به دست آورد [۱۲]:

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_{bf} + \phi\rho_{np} \quad (5)$$

$$c_{p,nf} = \frac{(1-\phi)(\rho c_p)_{bf} + \phi(\rho c_p)_{np}}{(1-\phi)\rho_{bf} + \phi\rho_{np}} \quad (6)$$

در اینجا ϕ غلظت حجمی نانو ذرات است، و زیر مجموعه‌های ρ_{bf} و ρ_{np} به ترتیب سیال پایه و نانو ذرات می‌باشد. ρ چگالی و c_p گرمای ویژه نانو ذرات می‌باشد که در جدول ۱ آمده است [۱۳، ۱۴].

جدول ۲- ضریب کلبورن بر حسب عدد رینولدز برای سمت پره

عدد رینولدز	ضریب کلبورن (j)
۴۰۲/۲۵	۰/۰۴۵۶۶۲۸
۴۵۴/۷۳۶	۰/۰۴۰۴۷۹
۵۱۴/۰۷۱	۰/۰۳۵۸۸۳۶
۵۹۴/۲۳۸	۰/۰۳۱۳۳۵۳
۶۷۹/۲۶۴	۰/۰۲۷۹۹۰۱
۷۷۹/۳۸۸	۰/۰۲۴۵۳۴۲
۸۸۷/۶۳۵	۰/۰۲۱۷۴۹۶
۹۹۵/۹۹۷	۰/۰۱۹۵۷۳۷
۱۱۳۰/۰۹	۰/۰۱۷۵۴۹۹
۱۳۳۰/۷۶	۰/۰۱۵۲۶۸۷
۱۶۰۸/۱۲	۰/۰۱۳۵۳۹۱
۱۹۵۷/۵۹	۰/۰۱۲۲۸۱۲
۲۴۲۷/۵۵	۰/۰۱۱۱۴۱۱
۲۹۸۷/۷۸	۰/۰۱۰۴۵۶۳
۳۶۶۳/۶	۰/۰۰۹۸۸۸۰۳
۴۵۷۶/۱۴	۰/۰۰۹۴۲۲۳۲
۵۵۰۷/۹۹	۰/۰۰۹۰۴۵۳۳
۶۶۵۳/۷۷	۰/۰۰۸۸۴۹۳
۷۹۷۸/۹۹	۰/۰۰۸۵۲۷۲۹

مشخصات این رادیاتور در جدول ۳ آورده شده‌است:

جدول ۳- مشخصات رادیاتور خودروی پژو ۲۰۶ ساخت شرکت

کوشش رادیاتور

Peugeot 206 radiator	
OGM	1330.B2 – 1330.59 – 1330.G6 ikco no: 9654566680
Tank material	PA66-GF30
Core size	380
Core type	16 and 26/CT
No. row	1
Core material	Al
Kooshesh no.	200

این رادیاتورها در واقع نوعی مبادله‌کن گرمای پره لوله با جریان متقاطع هستند که گرمای موتور را به هوای محیط انتقال می‌دهند. در این مطالعه از روش ε -NTU برای مدل‌سازی حرارتی این نوع از مبادله‌کن استفاده شده‌است. برای بدست آوردن کارایی از معادله زیر استفاده می‌گردد [۱۱]:

$$\varepsilon = 1 - \exp[-(1+C^*)NTU] \times [I_0(2NTU\sqrt{C^*}) + \sqrt{C^*} I_1(2NTU\sqrt{C^*}) - \frac{1-C^*}{C^*} \sum_{n=2}^{\infty} C^{*n/2} I_n(2NTU\sqrt{C^*})] \quad (1)$$

در رابطه ی فوق، I تابع بسل بهبود یافته و NTU اندازه بدون بعد انتقال گرمای مبادله‌کن گرما را مشخص می‌کند،

که در آن Pm' و A' به ترتیب محیط انتقال گرما و سطح خالص جریان می باشد، که از رابطه زیر بدست می آید [۱۵]:

$$A' = 4 \left[\frac{\pi}{4} H^2 + (W - H) H \right] \quad (14)$$

$$Pm' = (\pi H + 2(W - H))$$

در معادله بالا H و W به ترتیب ارتفاع و عرض لوله می باشد.

۴-۲- ضریب انتقال حرارت سمت پره موجی

ضریب انتقال حرارت هوا برای پره های موجی شکل مانند شکل (۵) از رابطه زیر بدست می آید.

$$h_a = \frac{Nu_a \times k_a}{De} \quad (15)$$

تعریف قطر هیدرولیکی ساده برای پره های موجی شکل به صورت زیر می باشد [۱۵]:

$$De = (2 \times F_p \times F_h) / (F_h + F_p) \quad (16)$$

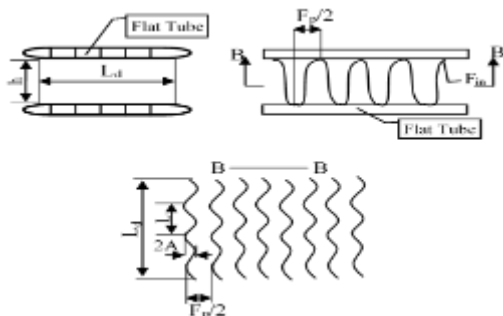
در حالت کلی، عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت هوا سمت پره های موجی شکل با استفاده از روابط زیر بدست می آید [۱۵]:

$$Nu_a = 0.086 Re_a^{0.914} (F_p / F_h)^{-0.301} \quad (17)$$

$$(2A/L)^{0.7875} (L2/L)^{-0.254} (2A/L2)^{-0.786}$$

$$Re_a = \frac{\rho u_\infty De}{\mu} \quad (18)$$

در معادله بالا L ، $2A$ ، F_h و F_p به ترتیب طول موج، دامنه موج، ارتفاع پره و گام پره می باشد.



شکل ۵- مبادله کن گرما لوله ای تخت و پره های موجی

مساحت کلی انتقال حرارت و بازده کلی و بازده پره به صورت زیر بدست می آیند [۱۶]:

$$A_{tot h} = A_f + A_o \quad (19)$$

$$\eta_s = 1 - \frac{A_f}{A_{tot h}} (1 - \eta_f)$$

$$\eta_f = \frac{\tanh(ml)}{ml} \quad l = F_h / 2$$

علاوه بر این، تمام خصوصیات ترموفیزیکی آب (به عنوان یک مایع پایه) به صورت وابسته به دما در نظر گرفته می شود و به طور متوسط در دمای سمت ورودی و خروجی لوله تعیین

می شود. ویسکوزیته و هدایت حرارتی نانو سیال از رابطه زیر محاسبه می شود [۱۳، ۱۴].

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = Bl e^{(B_2 \phi)} \quad (7)$$

$$k_{nf} = \left(\frac{k_{np} + 2k_{bf} - 2(k_{bf} - k_{np})\phi}{k_{np} + 2k_{bf}(k_{bf} - k_{np})\phi} k_{bf} \right) \quad (8)$$

$$+ 5 \times 10^4 \alpha \phi \rho_{bf} c_{p,bf} \sqrt{\frac{kT}{\rho_{np} d_{np}}} f(T, \phi)$$

$$f(T, \phi) = (-3.0669 \times 0.01\phi - 3.917 \times 0.001) + (2.8217 \times 0.01\phi + 3.91123 \times 0.001) \times \left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (9)$$

که در معادله بالا k ثابت بولتزمن که مقدار آن 1.38×10^{-23} می باشد و d_{np} اندازه متوسط نانو ذرات می باشد. همبستگی غلظت حجمی برای اکسید آلومینیوم در محدوده $0.1 - 0.01$ می باشد، اما برای اکسید مس در محدوده $0.06 - 0.01$ می باشد. مقادیر B_1 ، B_2 و B ، $c_{p,np}$ ، ρ_{np} مقادیر ثابتی هستند. عدد پرانتل نانو سیال تابعی از گرمای ویژه، ویسکوزیته و هدایت حرارتی نانو سیال می باشد. معادله عدد پرانتل به صورت زیر می باشد [۱۳ و ۱۴].

$$Pr_{nf} = \left(\frac{c_p \mu}{k} \right) n_f \quad (10)$$

عدد رینولدز نانو سیال از رابطه زیر بدست می آید [۱۳]:

$$Re_{nf} = \frac{4m}{\pi D_h \mu_{nf} N_p} \quad (11)$$

ضریب انتقال حرارت به صورت زیر محاسبه می شود [۱۳ و ۱۴]:

$$h_{nf} = (Nu \times k_{nf}) / D_h \quad (12)$$

که در آن D_h قطر هیدرولیکی می باشد که روش قطر هیدرولیکی، ساده ترین روش برای محاسبه انتقال گرما و افت فشار در مجراهای غیر دایره ای می باشد، برای اکثر مجراهای غیر دایره ای صاف، ضرایب اصطکاک دقیق تجربی در حالت خواص ثابت، با تقریب $\pm 10\%$ ، برابر مقادیر پیش بینی شده با استفاده از رابطه مجرای دایره ای صاف است، که از رابطه زیر حاصل می گردد [۱۵]:

$$D_h = 4A' / Pm' \quad (13)$$

اصطکاک در حضور دو نانوذره شامل اکسید آلومینیوم و اکسید مس در درصد حجمی‌های مختلف نانوذرات بدست آورده شود.

۵- بحث و نتایج

۵-۱- نتایج آزمایشگاهی مربوط به عدد ناسلت در حالت سیال پایه و نانوسیال

برای حل راحت‌تر معادلات حاکم، از نرم افزار EES استفاده شده است. در این نرم افزار تنها نیاز است که معادلات روش ϵ -NTU ذکر شده در فصل مدل‌سازی را وارد کرده و خروجی مورد نظر (مثلاً ضریب انتقال حرارت) را بدست آورد. در ادامه نتایج تجربی مربوط به عدد ناسلت در حالت سیال پایه و افزودن نانو سیال و با توجه به تغییرات عدد رینولدز (با توجه به تغییرات دبی سیال ورودی) بیان می‌شود. در واقع در هر مرحله‌ی تست، دمای ورودی آب به رادیاتور خودرو ثابت و مقدار ۹۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته می‌شود و با تغییر دبی آب ورودی با تنظیم شیر، دیگر مشخصات همچون دمای آب خروجی توسط حسگرها اندازه‌گیری می‌شود. نهایتاً با استفاده از نرم افزار حلگر معادلات مهندسی (EES) ضریب انتقال حرارت سمت لوله تخمین زده می‌شود. عدد ناسلت نسبت به تغییرات عدد رینولدز در نسبت‌های حجمی مختلف نانوذرات و برای سه حالت مورد بررسی شامل سیال پایه، نانوسیال اکسید آلومینیوم و اکسید مس به ترتیب در شکل‌های (۶-الف، ب و ج) آورده شده است.

همانطور که در اشکال (۶-الف، ب و ج) مشاهده می‌شود، با اضافه کردن نانو ذرات به سیال پایه، عدد ناسلت و در نتیجه ضریب انتقال حرارت افزایش پیدا می‌کند و این افزایش در نانوسیال اکسید مس بیشتر از اکسید آلومینیوم است. همچنین با توجه به نتایج، با افزایش دبی سیال سمت لوله همانطور که انتظار می‌رفت، عدد ناسلت سمت لوله افزایش می‌یابد. در نهایت نتایج نشان می‌دهند که با افزایش غلظت حجمی نانوذرات، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. شایان ذکر است که تغییرات عدد ناسلت برای سه غلظت مختلف نانوسیال اکسید آلومینیوم شامل ۰/۰۲۵، ۰/۰۵ و ۰/۰۷۵ انجام شده و در شکل (۷) آمده است. در ادامه، نتایج آزمایشگاهی مربوط به عدد ناسلت به ازای دبی‌های مختلف سمت لوله و در حالت نانوسیال اکسید مس و به ازای غلظت‌های حجمی مختلف در شکل (۸) آورده شده است.

که در آن A_f ، A_0 ، η_f به ترتیب بازده پره، مساحت سطح انتقال حرارت بدون پره و مساحت سطح انتقال حرارت با پره می‌باشد. که در آن m از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$m = \sqrt{\frac{2h_a}{\delta k_f}} \quad (20)$$

h_a و δ و k_f به ترتیب ضریب انتقال حرارت هدایت پره، ضخامت پره و ضریب انتقال حرارت هوا می‌باشد.

۴-۳- مدل‌سازی هیدرولیکی

طراحی هیدرولیکی در مبادله‌کن گرما تعیین ضریب اصطکاک و افت فشار در سیالات می‌باشد. یک مبادله‌کن گرما باید عملکرد هیدرولیکی خوبی داشته باشد. هرچه افت فشار کمتر باشد، کارایی هیدرولیکی مبادله‌کن گرما بهتر می‌باشد. با افزایش افت فشار در مبادله‌کن گرما، به پمپ با ظرفیت بالا نیاز می‌باشد، و پمپ با ظرفیت بالا هزینه عملکردی مبادله‌کن گرما را بالا می‌برد. برای بدست آوردن افت فشار ابتدا باید ضریب اصطکاک را محاسبه کرد. ضریب اصطکاک با استفاده از روابط زیر بدست می‌آیند.

۴-۴- ضریب اصطکاک و افت فشار سمت پره (هوا)

$$F_a = 15.46 Re_a^{-0.416} (F_p / F_h)^{-0.138} \quad (21)$$

$$(2A/L)^{1.098} (L2/L)^{-0.45} (2A/L2)^{-0.506}$$

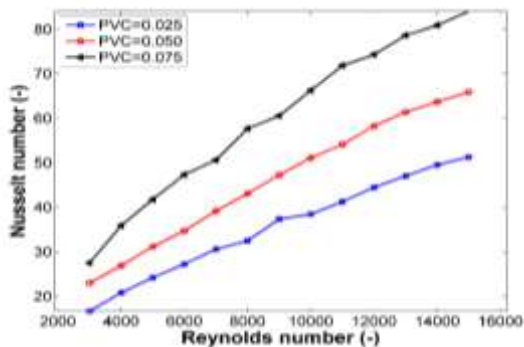
$$\Delta p_a = \frac{G^2 v_{in}}{2} [(1 + \sigma^2) (\frac{v_{out}}{v_{in}} - 1) + f a \frac{A_{tot}}{A_{flow}} \frac{v_{ave}}{v_{in}}] \quad (22)$$

در معادل ۲۱، σ نسبت مساحت حداقل جریان آزاد به مساحت سطح جلو می‌باشد، که A_{flow} ، A_{front} از رابطه زیر بدست می‌آید. $\sigma = \frac{A_{flow}}{A_{front}}$ همچنین v و G به ترتیب حجم مخصوص و سرعت جریان جرمی می‌باشد [۳].

$$A_{flow} = [(\frac{L3}{Xt} - 1)b + (Xt - D_h)] L I \quad (23)$$

$$b = \min[Xt - D_h, 2\sqrt{(Xt/2)^2 + XI^2}] \quad (24)$$

از آنجایی که یکی از اهداف این پروژه بکارگیری نانوذرات در سمت لوله است، و از طرفی با اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه در سمت لوله تمامی مشخصه‌های حرارتی و هیدرولیکی جریان تغییر می‌کند، بنابراین نیاز است تا رفتار سیستم در سمت لوله در حضور نانوذرات مورد بررسی قرار گیرد. در بخش بعد سعی بر این است که دو مشخصه‌ی مهم مورد نیاز در طراحی رادیاتور شامل عدد ناسلت و ضریب

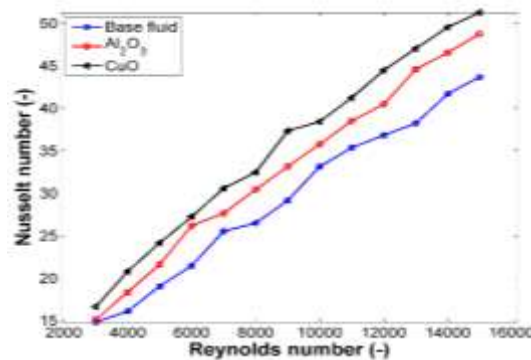


شکل ۸- تغییرات عدد ناسلت نسبت به عدد رینولدز در نسبت‌های حجمی مختلف نانوذره و برای نانوسیال اکسید مس همانطور که از شکل‌های فوق مشاهده می‌شود، عدد ناسلت در حالت نانوسیال و در تمامی رینولدزهای مورد بررسی، رشد قابل توجهی دارد و این رشد برای نانوسیال اکسید مس بیشتر از نانوسیال اکسید آلومینیوم است. همچنین عدد ناسلت با افزایش درصد حجمی نانوذره رشد می‌کند.

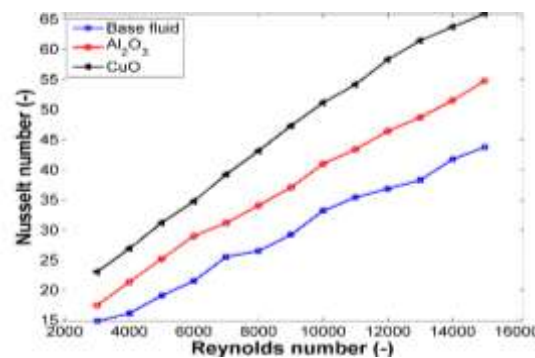
۵-۲- نتایج آزمایشگاهی مربوط به ضریب اصطکاک در حالت سیال پایه و نانوسیال

بعد از ارزیابی عدد ناسلت در سمت لوله برای حالت‌های مختلف، شامل سیال پایه، نانوسیال اکسید آلومینیوم و اکسید مس، به ارزیابی ضریب اصطکاک پرداخته شده‌است. در واقع برای تکمیل طراحی مبادله‌کن حرارتی علاوه بر دانستن مشخصه‌های حرارتی، نیاز به داشتن مشخصه‌های هیدرولیکی و افت فشار نیز است. برای این منظور، همان روندی که برای ارزیابی عدد ناسلت صورت گرفته، برای ارزیابی ضریب اصطکاک نیز انجام می‌شود با این تفاوت که خروجی‌های معلوم بجای دماهای هر سمت، فشارهای هر سمت هستند. مانند عدد ناسلت، نتایج تجربی ضریب اصطکاک، برای حالات مختلفی شامل سیال پایه و نانوسیالات در درصد حجمی‌های مختلف بدست آمده‌است. نتایج بدست آمده برای ضریب اصطکاک نسبت به تغییرات عدد رینولدز در نانوسیالات مختلف و همچنین حالت سیال پایه، در شکل‌های (۹-الف، ب و ج) آورده شده‌است.

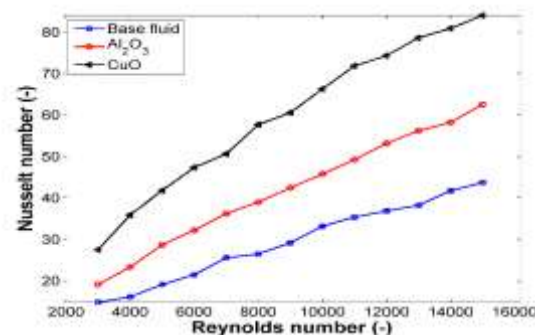
همانطور که از شکل (۹-الف، ب و ج) مشاهده می‌شود، با اضافه کردن نانو ذرات به سیال پایه، ضریب اصطکاک و در نتیجه افت فشار افزایش پیدا می‌کند و این افزایش در نانوسیال اکسید مس بیشتر از اکسید آلومینیوم است. همچنین با افزایش دبی سیال سمت لوله همانطور که انتظار می‌رفت، ضریب اصطکاک سمت لوله کاهش می‌یابد. در نهایت نتایج نشان می‌دهند که با افزایش غلظت حجمی



الف) نسبت حجمی ۰/۰۲۵

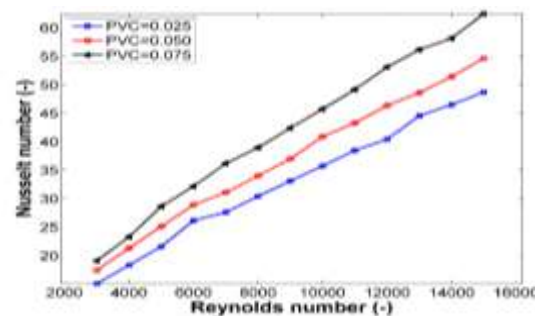


ب) نسبت حجمی ۰/۰۵



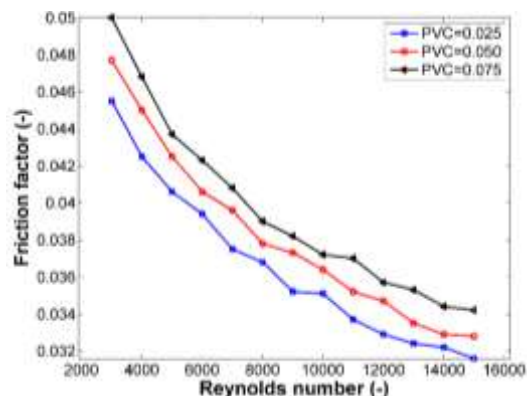
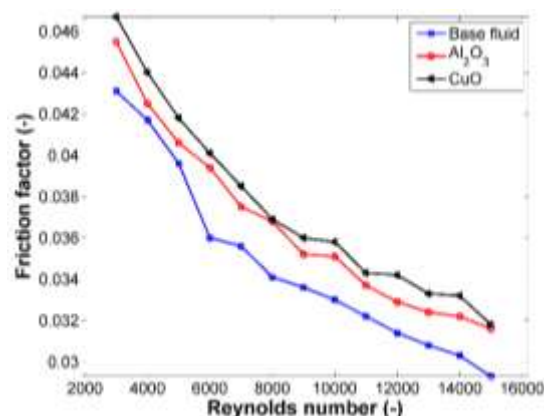
ج) نسبت حجمی ۰/۰۷۵

شکل ۶- تغییرات عدد ناسلت نسبت به عدد رینولدز در نسبت‌های حجمی مختلف نانوذره و برای سه حالت مورد بررسی شامل سیال پایه، نانوسیال اکسید آلومینیوم و اکسید مس



شکل ۷- تغییرات عدد ناسلت نسبت به عدد رینولدز در نسبت‌های حجمی مختلف نانوذره و برای نانوسیال اکسید آلومینیوم

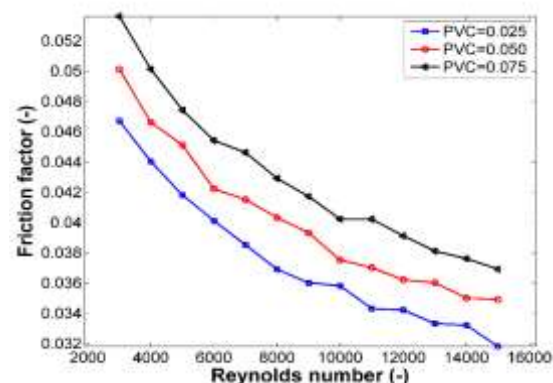
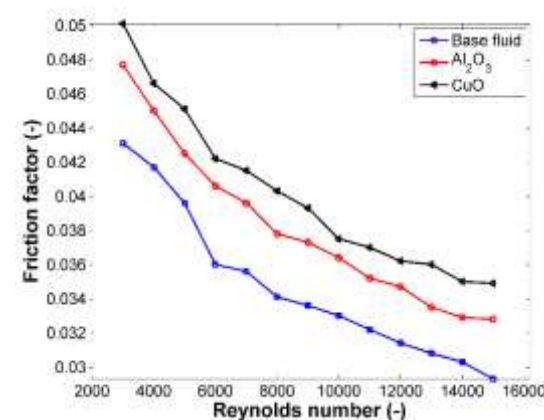
نانوذرات، ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰- تغییرات ضریب اصطکاک نسبت به عدد رینولدز در نسبت‌های حجمی مختلف نانوذره برای نانوسیال اکسید آلومینیوم

نتایج آزمایشگاهی مربوط به ضریب اصطکاک برای دبی‌های مختلف سمت لوله و در حالت نانوسیال اکسید مس و به‌ازای غلظت‌های حجمی مختلف در شکل (۱۱) آورده شده‌است.

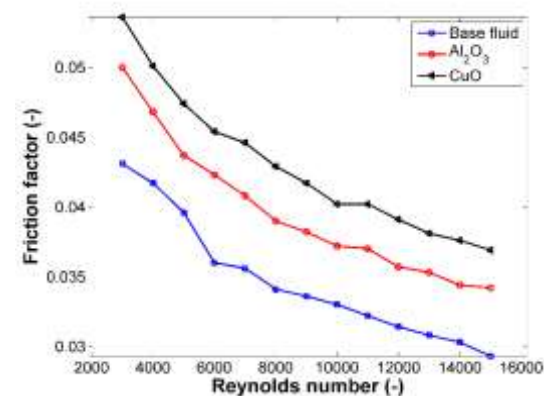
الف) نسبت حجمی ۰/۰۲۵



شکل ۱۱- تغییرات ضریب اصطکاک نسبت به عدد رینولدز در نسبت‌های حجمی مختلف نانوذره برای نانوسیال اکسید مس

همانطور که از شکل‌های (۱۰) و (۱۱) مشاهده می‌شود، ضریب اصطکاک در حالت نانوسیال و در تمامی رینولدزهای مورد بررسی، رشد قابل توجهی دارد و این رشد برای نانوسیال اکسید مس بیشتر از نانوسیال اکسید آلومینیوم است. همچنین مشاهده می‌شود که ضریب اصطکاک با افزایش درصد حجمی نانوذره افزایش می‌یابد.

ب) نسبت حجمی ۰/۰۵



ج) نسبت حجمی ۰/۰۷۵

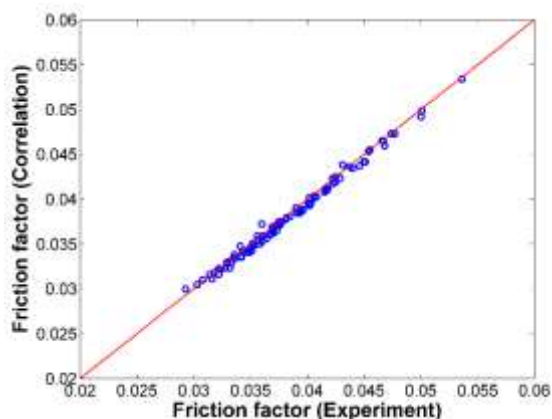
شکل ۹- تغییرات ضریب اصطکاک نسبت به عدد رینولدز در نسبت‌های حجمی مختلف نانوذره و برای سه حالت مورد بررسی شامل سیال پایه، نانوسیال اکسید آلومینیوم و اکسید مس

۳-۵- روابط همبستگی برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک سمت لوله

در بخش قبل نتایج تجربی مربوطه به عدد ناسلت و ضریب اصطکاک سمت لوله برای سیال پایه و دو نوع نانوسیال در رینولدزهای مختلف و همچنین در درصد حجمی نانوذرات

در ادامه، نتایج آزمایشگاهی مربوط به ضریب اصطکاک به‌ازای دبی‌های مختلف سمت لوله و در حالت نانوسیال اکسید آلومینیوم و به‌ازای غلظت‌های حجمی مختلف در شکل (۱۰) آورده شده‌است. شایان ذکر است که تغییرات

ناسلت در محدوده‌ی ۴/۹۷- الی ۷/۵۰+ و برای ضریب اصطکاک در محدوده‌ی ۳/۳۸- الی ۲/۶۳+ است که دقت خوبی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- ضریب اصطکاک تجربی سمت لوله و با استفاده از روابط همبستگی

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه، رادیاتور خودرو پژو ۲۰۶ به صورت آزمایشگاهی مدل شد. این مدل شامل مدل سازی حرارتی برای بدست آوردن عدد ناسلت و همچنین مدل هیدرولیکی برای ارزیابی ضریب اصطکاک بود. برای افزایش نرخ انتقال حرارت در رادیاتور، ایده ی بکار گیری نانوذرات بکار گرفته شد. در این کار از دو نوع نانوسیال آب اکسید آلومینیوم و آب اکسید مس استفاده گردید. در هر مورد با اضافه کردن نانو ذرات در درصد حجمی‌های مختلف و همچنین با تغییر دادن دبی سیال و در نتیجه عدد رینولدز، عدد ناسلت و ضریب اصطکاک سمت لوله به‌ازای حالت مختلف بدست آمد. نتایج نشان می‌دهد که هم عدد ناسلت و هم ضریب اصطکاک در مورد نانوسیال در مقایسه با سیال پایه افزایش می‌یابد و این افزایش در نانوسیال اکسید مس بیشتر است. به عنوان مثال در عدد رینولدز ۳۰۰۰، ۱/۹۲٪، ۱۵/۰۸٪ و ۲۲/۴۶٪ بهبود در عدد ناسلت برای نانوسیال آلومینیوم در مقایسه با سیال پایه به ترتیب برای نسبت‌های حجمی ۰/۰۲۵، ۰/۰۵۰ و ۰/۰۷۵ مشاهده شده‌است. بهبود ذکر شده برای نانوسیالات اکسید مس به ترتیب ۱۰/۸۹٪، ۳۵/۵۰٪ و ۴۶/۱۱٪ بدست آمده‌است. علاوه بر این، در رینولدز ۳۰۰۰، ۱۵/۲۷٪، ۹/۶۴٪ و ۱۳/۸۰٪ افزایش ضریب اصطکاک برای نانوسیال آلومینیوم در مقایسه با سیال پایه به ترتیب برای نسبت‌های حجمی ۰/۰۲۵، ۰/۰۵۰ و ۰/۰۷۵ مشاهده می‌شود. افزایش‌های ذکر شده برای نانوسیال

مختلف بدست آورده شد.

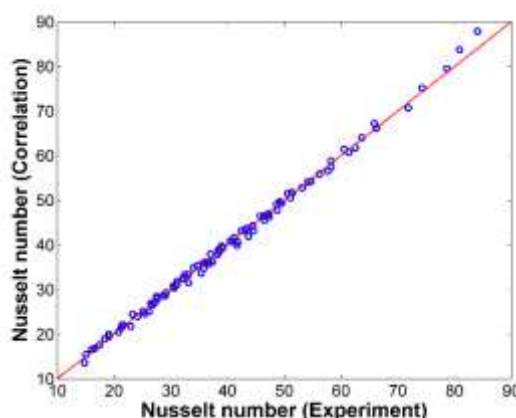
از آنجایی‌که آزمایشات در ۳ نسبت حجمی مختلف و ۱۳ عدد رینولدز مختلف (شامل ۰/۰۲۵، ۰/۰۵، ۰/۰۷۵ و برای رینولدز در محدوده‌ی ۱۵۰۰۰ - ۳۰۰۰) انجام شد، بنابراین نیاز است تا این نتایج قدری بسط یابند تا بتوان از آن‌ها در محدوده‌های مورد نظر نیز استفاده کرد. برای این منظور نیاز است تا با استفاده از روابط همبستگی (correlation) رابطه ای نسبتاً جامع برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک بر حسب متغیرهای موجود ارائه شود. برای این منظور با استفاده از نرم افزار (minitabs) و با بکار گیری اعداد موجود در فصل قبل، روابط زیر برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک سمت لوله بدست آورده شد:

$$Nu = 0.029(Re^{0.701})(1 + 0.054\phi^{0.231}) \quad (25)$$

$$\frac{2}{(Pr^3)}$$

$$f = 0.29(Re^{-0.236})(\mu_{nf} / \mu_{bf})^{0.121} \quad (26)$$

در روابط فوق Re, Pr, ϕ, μ_{nf} و μ_{bf} به ترتیب عدد رینولدز، عدد پرانتل، غلظت حجمی نانوذره، ویسکوزیته نانوسیال و ویسکوزیته سیال پایه است. روابط فوق برای سیال پایه و دو نوع نانوسیال مورد بررسی شامل نانواکسید آلومینیوم و نانواکسید مس و در محدوده‌ی $Re > 3000 > 15000$ و $0.075 < \phi < 0$ معتبر هستند. برای ارزیابی میزان دقت روابط فوق، نمودار حاصل از نتایج تجربی و نتایج مربوط به روابط همبستگی فوق برای دو پارامتر عدد ناسلت و ضریب اصطکاک بدست آورده و در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) به‌نمایش گذاشته شده‌است.



شکل ۱۲- عدد ناسلت تجربی سمت لوله و با استفاده از روابط همبستگی

میزان خطا بین نتایج تجربی و رابطه‌ی همبستگی برای عدد

Nu	عدد ناسلت (-)	اکسید مس به ترتیب ۷/۷۱٪، ۱۳/۹۷٪ و ۱۹/۵۹٪ بدست آمده‌است. سپس، همبستگی برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک با دقت قابل قبول حاصل شد. در نهایت با استفاده از روش رگرسیون غیر خطی، روابط بسته‌ای برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک سمت لوله بدست آمد. این روابط برای عدد رینولدر در محدوده‌ی ۳۰۰۰ الی ۱۵۰۰۰ و همچنین برای نسبت حجمی ذرات در محدوده‌ی ۰ الی ۰/۰۷۵ با دقت قابل قبول بدست آمدند.
Pr	عدد پرائنتل (-)	
PVC	غلظت حجمی ذرات (%)	
Re	عدد رینولدز (-)	
U	ضریب انتقال حرارت کلی (-)	
v	سرعت سیال (m/s)	
	علائم یونانی	
ΔP	افت فشار (kPa)	
ε	کارایی (-)	
η	بازده پره (-)	
μ	ویسکوزیته (Pa.s)	
ρ	چگالی (kg/m^3)	
ϕ	غلظت حجمی ذرات (%)	
	زیر نویس‌ها	
bf	سیال	
f	پره	
nf	نانوسیال	
np	نانوذره	
o	سمت بیرون	
$tube$	سمت لوله	
	تقدیر و تشکر	
	این پژوهش توسط صندوق حمایت از پژوهشگران و فن‌آوران ایران با شماره ی طرح ۹۵۸۳۸۹۴۸ پشتیبانی شده‌است. در اینجا از حمایت این موسسه برای انجام این کار تقدیر و تشکر می‌شود.	
		ضمایم
		فهرست علائم
A_{tot}	کل سطح انتقال حرارت (m^2)	
C_{min}	حداقل C_c و C_h (W/K)	
C_{max}	حداکثر C_c و C_h (W/K)	
C^*	نسبت نرخ ظرفیت گرمایی (-)	
c_p	ظرفیت گرمایی ویژه ($kJ/kg K$)	
d_{np}	میانگین اندازه نانوذره (nm)	
D_h	قطر هیدرولیکی (m)	
f	ضریب اصطکاک (-)	
G	فلاکس جرمی (kg/m^2s)	
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی (W/m^2K)	
j	ضریب کلیون (-)	
k_f	ضریب هدایتی سیال (W/m^2K)	
\dot{m}	دبی جرمی (kg/s)	
NTU	اندازه بدون بعد انتقال گرما (-)	

مراجع

- [1] W. M. Kays, and A. L. London, "Compact heat exchangers", 3th edition, Krieger Publishing Company, 1984.
- [2] S. Akbarzade, K. Sedighi, and M. Farhadi, "Experimental investigation of force convection heat transfer in a car radiator filled with SiO₂-water nanofluid", International Journal of Engineering, Vol. 27, No. 2, February 2014, pp. 333-340.
- [3] H. Hajabdollahi, and Z. Hajabdollahi, "Investigating the effect of nanoparticle on thermo-economic optimization of fin and tube heat exchanger", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, Vol. 231, No. 6, December 2017, pp. 1127-40.
- [4] V. Vasu, K. R. Krishna, and A. C. S. Kumar, "Thermal design analysis of compact heat exchanger using nanofluids", International Journal of Nano manufacturing, Vol. 2, No. 3, January 2008, pp. 271-288.
- [5] D. G. Subhedar, B. M. Ramani, and A. Gupta, "Experimental investigation of heat transfer potential of Al₂O₃/Water-Mono Ethylene Glycol nanofluids as a car radiator coolant", Case studies in thermal engineering, Vol. 11, November 2018, pp. 26-34.
- [6] S. Mert, H. Yasar, U. Durmaz, A. Topuz, A. Yeter, and T. Engin, "An experimental study on cooling performance of a car radiator using Al₂O₃-ethylene glycol/water nanofluid", Thermal Science, Vol. 25, 2021, pp. 801-809.

[۷] ابوالفضل نعمت پورکشتلی و محسن شیخ الاسلامی، "بررسی عددی رفتار انجماد درون مبدل حرارتی سه لوله‌ای حاوی مواد تغییر فاز دهنده با استفاده از فین"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۷، تابستان ۱۳۹۸، صفحه ۳۲۷-۳۳۸.

[۸] کامیارکمانی و روح اله رفعی، "بررسی انتقال حرارت و جریان آرام نانوسیال از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک در یک مبدل حرارتی جریان مخالف"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۳، شماره ۴۱، تابستان ۱۳۹۴، صفحه ۴۷-۵۷.

[۹] محمد همت اسفه و سعید اسفنده، "بررسی آزمایشگاهی رفتار رئولوژیکی نانوسیال اکسید مس پایه آب (۸۰٪) - اتیلن گلیکول (۲۰٪) و آنالیز حساسیت ویسکوزیته نسبت به پارامترهای موثر (دما و کسر حجمی)"، نشریه مدل سازی در مهندسی، doi: 10.22075/jme.2017.11100.1073.

[10] N. Asokan, P. Gunnasegaran, and V. V. Wanatasanappan, "Experimental investigation on the thermal performance of compact heat exchanger and the rheological properties of low concentration mono and hybrid nanofluids containing Al₂O₃ and CuO nanoparticles", Thermal Science and Engineering Progress, Vol 20, December 2020, pp. 2451-9049.

[11] R. K. Shah, and D. P. Sekulic, "Fundamentals of heat exchanger design", 1th edition, John Wiley and Sons, 2003.

[12] R. S. Vajjha, D. K. Das, and D. P. Kulkarni, "Development of new correlations for convective heat transfer and friction factor in turbulent regime for nanofluids", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 53, No. 21-22, October 2010, pp. 4607-4618.

[13] R. S. Vajjha, and D. K. Das, "Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 52, No. 21-22, October 2009, pp. 4675-4682.

[14] J. Dong, L. Su, and Q. Chen, "Experimental study on thermal-hydraulic performance of a wavy fin-and-flat tube aluminum heat exchanger", Applied Thermal Engineering, Vol. 51, No. 1-2, March 2013, pp. 32-39.

[15] M. Elsebay, I. Elbadawy, M.H. Shedid, and M. Fatouh, "Numerical resizing study of Al₂ O₃ and CuO nanofluids in the flat tubes of a radiator", Applied Mathematical Modelling, Vol. 40, No. 13-14, July 2016, pp. 6437-6450.

[16] D. Junqi, C. Jiangping, C. Zhijiu, Z. Yimin, and Z. Wenfengb, "Heat transfer and pressure drop correlations for the wavy fin and flat tube heat exchangers", Applied Thermal Engineering, Vol. 27, No. 11-12, August 2007, pp. 2066-2073.