

ارزیابی تجربی و عددی انتقال گرمای رادیاتور موتور پرکینز A4.248 با استفاده از نانو سیال CuO + water

بهمن رحمتی نژاد* مربی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران، brahmami@tvu.ac.ir
 فرزین عظیم پور استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران، fazimpoor@gmail.com

چکیده

در این تحقیق عملکرد حرارتی رادیاتور موتور پرکینز A4.248 توسط نانو سیال CuO + Water در شرایط محیطی تعریف شده بر روی مدل آزمایشگاهی ساخته شده مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد با افزایش کسر حجمی نانو ذرات چگالی و رسانایی گرمایی افزایش؛ گرمای ویژه و لزجت دینامیک کاهش یافت. ضریب اصطکاک با افزایش کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه افزایش، و با افزایش عدد رینولدز کاهش یافت. همچنین با افزایش دبی و کسر حجمی ضریب اثر بخشی رادیاتور افزایش را نشان داد. در حداکثر مقدار سرعت جریان هوا و سیال خنک کننده با افزودن ۴ درصد حجمی نانوذرات به سیال پایه می توان آهنگ انتقال گرما را به طور متوسط ۳۹ درصد نسبت به سیال پایه افزایش داد. همچنین با افزایش دور الکتروموتور از 20 Hz به 40 Hz ضریب انتقال گرما آب خالص به طور متوسط ۲۸٪ و نانو سیال ۳۲٪ افزایش را نشان داد. افت فشار رادیاتور با کسر حجمی ۱ و ۲ درصد نسبت به سیال پایه در دور حداکثر الکتروموتور به ترتیب ۱۵/۷٪ و ۳۸/۲٪ محاسبه شد.

واژه‌های کلیدی: نانو سیال، انتقال گرما، عدد ناسلت، رادیاتور، CuO، موتور پرکینز A4.248.

Experimental and numerical evaluation of heat transfer of Perkins A4.248 engine radiator using CuO + water nanofluid

B. Rahmatinejad

Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

F. Azimpour

Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

Abstract

In this research, the thermal performance of Perkins A4.248 engine radiator by CuO + Water nanofluid was studied under the defined environmental conditions on a laboratory model. The results showed that with increasing volume fraction of nanoparticles, density and thermal conductivity increased; Specific heat and dynamic viscosity decreased. The coefficient of friction increased with increasing volume fraction of nanoparticles in the base fluid, and decreased with increasing Reynolds number. Also, with increasing flow and volume fraction, the radiator efficiency coefficient showed an increase. At the maximum value of air flow velocity and cooling fluid, by adding 4% by volume of nanoparticles to the base fluid, the heat transfer rate can be increased by an average of 39% compared to the base fluid. Also, by increasing the electromotor speed from 20 Hz to 40 Hz, the heat transfer coefficient of pure water increased by an average of 28% and nanofluid by 32%. The pressure drop of the radiator with a volume fraction of 1 and 2% compared to the base fluid at the maximum speed of the electric motor was calculated to be 15.7% and 38.2%, respectively.

Keywords: Nanofluid, Heat transfer, Nusselt number, Radiator, CuO, Perkins A4.248 engine.

ضریب انتقال گرمای پایین امکان پذیر نبوده و استفاده از سیالاتی با ضریب انتقال گرمای بالاتر، متخصصین را بر آن داشته تا از سیالاتی با ویژگی های مناسب برونند [۳]. در سال های اخیر سیالات انتقال گرمای معمولی مانند آب و روغن موتور به طور گسترده ای در رادیاتور خودرو استفاده می شود [۴] همچنین در مورد افزایش بازده رادیاتورهای کارهای بسیاری انجام شده است که در ادامه به تعدادی از آنها اشاره می کنیم. نوریان و پاسدار شهری به بررسی و مقایسه تجربی و عددی عملکرد رادیاتور قرنیزی و رادیاتور پانلی پرداختند. ظرفیت نامی دو رادیاتور مورد آزمون ۱۲۰۰ کیلوکالری بر ساعت بود. نتایج تجربی حاکی از توزیع دمای یکنواخت تر برای رادیاتور قرنیزی بود، به طوری که اختلاف دما در راستای ارتفاع در مرکز اتاق برای رادیاتور پانلی در ظرفیت های مختلف بین ۳ تا ۷ درجه سلسیوس تغییر می کرد، در حالیکه برای رادیاتور قرنیزی در تمامی ظرفیت ها اختلاف دما در حد ۲ درجه سلسیوس بود [۵]. حاجت زاده پردنجانی و همکاران اثرات تلفات لزجت بر انتقال گرمای جابه جایی اجباری لایه های نانو سیال آب- اکسید آلومینیوم درون میکروکانال صفحه موازی با حضور میدان مغناطیسی به

۱- مقدمه

یکی از مهم ترین زیر مجموعه های اصلی مصرف انرژی در کشور خودروها هستند که هر روز بر تعداد آن ها افزوده می شود و سهم بسیار بسزایی در مصرف سوخت فسیلی و افزایش روز افزون آلودگی هوا دارند. بنابراین باید راندمان سیستم های خنک کننده جهت بهبود مصرف انرژی افزایش یابد [۱]. امروزه نیاز به موتورهای احتراق داخلی سبک تر، ارزان تر، بهتر و کارآمدتر اهمیت روزافزونی پیدا کرده است [۲]. رادیاتور یکی از مهمترین اجزای سیستم خنک کاری بوده که با تبادل گرما با هوای پیرامون خود، موتور را خنک می کند. بهینه سازی سیستم انتقال گرما در رادیاتور خودرو، اکثراً با افزایش سطح آن همراه بوده است که این امر باعث افزایش حجم و اندازه وسایل نقلیه می گردد. برای حل این مشکل نیاز به یک سیستم خنک کاری جدید و سیالات خنک کننده ی جدیدی نظیر نانو سیالات حس میشود تا در فضای کمتر به خنک کاری موتور پرداخته شود. علاوه بر این افزایش گرما در رادیاتور خودرو با استفاده از سیالات آب، اتیلن گلیکول و ... به علت

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: brahmami@tvu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۱/۰۳/۱۵

تاریخ پذیرش: ۰۱/۰۵/۱۷

صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش عدد برینکمن دمای سیال نزدیک دیواره افزایش یافته و آهنگ انتقال گرما از دیوار کاهش می‌یابد. با افزایش درصد حجمی نانوذرات با وجود تلفات لزجت، باعث کاهش انتقال گرما از دیوار به سیال می‌شود و میزان عدد ناسلت کاهش می‌یابد [۶]. سارپیلا و همکاران، در یک ارزیابی عددی با استفاده از نرم افزار، اثر استفاده از نانو سیال CuO-آب- اتیلن گلیکول (۵۰:۵۰) با کسر های حجمی ۲٪ و ۴٪ را در رادیاتور یک کامیون مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آنها، افزایش ۴۰٪ عدد ناسلت و افزایش ۵ درصدی قدرت موتور را نشان داد [۷]. پوترا و ماؤلانا، اثر استفاده از نانو سیال آب آلومینا را با کسرهای حجمی ۱٪ و ۴٪ به صورت عددی در رادیاتور خودرو بررسی کردند. نتایج آنها افزایش ۳۱ تا ۴۸ درصدی ضریب انتقال گرمای همرفتی برای کسر حجمی ۱٪ و افزایش ۵۲ تا ۷۹ درصدی آن برای کسر حجمی ۴٪ را نشان داد [۸]. سو و همکاران، عملکرد حرارتی و افت فشار یک رادیاتور نمونه را برای آب، آب - اتیلن گلیکول (۵۰:۵۰) و نانو سیال آب - آلومینا با کسرهای حجمی ۱٪-۴٪ با استفاده از روش عددی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که ظرفیت خنک کاری، ضریب انتقال گرمای کلی و افت فشار خنک کن برای نانو سیال آب - آلومینا با کسر حجمی ۴٪، به ترتیب ۳۸،۷٪، ۷۴٪، ۱۱۰،۳٪ نسبت به آب خالص برای شرایط دبی سیال خنک کن و هوای ۱۲kg/s و ۸۰۰۰ kg/hr و دمای سیال خنک کن و هوای ۸۰ و ۲۰ درجه سلسیوس افزایش یافته است [۹]. واجها و همکاران، به مطالعه عددی عملکرد انتقال گرمای نانو سیالات تحت جریان لایه ای در یک لوله مسطح رادیاتور خودرو بدون در نظر گرفتن پره ها پرداختند. آنها مطالعه خود را برای اعداد رینولدز ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ و دمای سیال خنک کن ورودی ۹۰ درجه سلسیوس و ضریب انتقال گرمای ثابت $50 \frac{W}{m^2K}$ برای هوا انجام دادند. نتایج نشان داد ضریب انتقال گرمای نانو سیال نسبت به سیال پایه در عدد رینولدز ۱۰۰۰ با افزودن ۱۰٪ نانوذرات اکسید آلومینیم، ۹۱٪ و با افزودن ۶٪ نانوذرات اکسید مس، ۸۶٪ افزایش می یابد [۱۰]. ژی و همکاران، افزایش انتقال گرمای را به کمک نانو سیال اکسید آلومینیم، اکسید قلع، اکسید تیتانیم و اکسید منیزیم با مخلوطی از آب و اتیلن گلیکول با نسبت ۵۵٪ به ۴۵٪ به ترتیب، گزارش دادند. نانو سیال های اکسید آلومینیم، اکسید منیزیم و اکسید قلع، افزایش بالایی در انتقال گرما در مقایسه با نانو سیال اکسید تیتانیم داشتند [۱۱]. لونگ و همکاران در سال ۲۰۱۰ ویژگی های انتقال گرما و افت فشار رادیاتور ماشین را با استفاده از نانوذرات مس در اتیلن گلیکول به عنوان خنک کننده بررسی کردند. آنها اثر کسر حجمی نانوذرات مس و تاثیر عدد رینولدز هوا و خنک کننده را بر روی عملکرد حرارتی رادیاتور و نیز افت فشار خنک کننده و توان پمپ بررسی کردند نتایج آنها نشان داد حدود ۱۲/۱۳ درصد افزایش در توان پمپ در غلظت ۲ درصد نانو ذرات مس در دبی حجمی ۰/۲ متر مکعب بر ثانیه نسبت به سیال پایه لازم است [۱۲]. پیغمبرزاده و همکاران، رادیاتور ماشین را با نانو سیال اکسید آلومینیم با سیال پایه ی آب آزمایش کردند. غلظت حجمی در بازه ۰/۱-۱ درصد متغیر بود. بیشترین افزایش انتقال گرما بالغ بر ۴۵٪ با غلظت حجمی ۱٪ گزارش شد. [۱۳]. پیغمبرزاده و همکاران، مجدداً یک رادیاتور خودرو را با نانوسیالات اکسید مس و اکسید آهن با سیال پایه ی آب در سه غلظت

حجمی ۰/۱۵٪، ۰/۴٪ و ۰/۶۵٪ آزمایش کردند. عدد رینولدز از ۵۰ تا ۱۰۰۰ و دما ورودی خنک کننده از ۵۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس متغیر بود. هر دو نانوسیال یک افزایش ۹٪ را در ضریب کلی انتقال گرما در مقایسه با آب خالص نشان دادند [۱۴]. نارکی و همکاران، نتایج تجربی برای نانو سیال آب و اکسید مس، آزمایش شده تحت حالت جریان لایه ای در رادیاتور خودرو را گزارش کردند. غلظت حجمی از صفر تا ۰/۴٪ متغیر بود. یک افزایش ۸٪ در ضریب کلی انتقال گرما در مقایسه با آب خالص برای کسر حجمی ۰/۴٪ نانو سیال گزارش شد [۱۵]. حسین و همکاران، نانوسیال های اکسید تیتانیم و اکسید سیلیسیم با سیال پایه ی آب را در رادیاتور ماشین تحت حالت جریان ورقه ای آزمایش کردند. غلظت حجمی و دمای ورودی در بازه ۲-۱٪ و ۸۰ - ۶۰ درجه سلسیوس متغیر بودند. بیشترین افزایش ۱۱٪ و ۲۲/۵٪ در مقایسه با سیال خالص به ترتیب برای نانوسیال اکسید تیتانیمو اکسید سیلیسیم بدست آمد [۱۶]. حفیظ و همکاران، تاثیر استفاده از نانو سیال آب/اکسید روی را بر روی رادیاتور خودرو بررسی نمودند. بهترین افزایش در انتقال گرما در این کار، مقدار ۴۶ درصد گزارش شد. این مقدار افزایش برای درصد حجمی ۲٪ ثبت شد. [۱۷]. راجا و همکاران در سال ۲۰۱۶ به مروری بر مشخصات نانوسیال ها، مشخصات انتقال حرارتی و کاربردهای آن پرداختند. آنها مطالعات اخیر محققان را بررسی نمودند و متوجه شدند جنبه های مختلف نانو سیال ها از جمله رسانایی گرمایی، لزجت، مطالعات تجربی، مطالعات عددی انتقال گرما و کاربردهای نانو سیال ها مورد توجه بوده است [۱۸]. بزرگ بیگدلی و همکاران در سال ۲۰۱۶ میلادی به مروری بر انتقال پدیده انتقال گرما و جرم نانو سیال خنک کننده با تمرکز ویژه برای استفاده در خودرو پرداختند. آنها نشان دادند که تعلق مهندسی نانو ذرات (نانوسیال) می تواند مشخصه خواص حرارتی را افزایش دهد [۱۹]. حیدربگی در تحقیقی به بررسی تاثیر استفاده از نانوسیال مس، نانو سیال نقره و اکسید آلومینیم بر میزان انتقال گرما رادیاتور موتور تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ پرداخته و نشان داد در شرایط کاری موتور و شرایط مزرعه ای شخم با گاواهن به عمق ۲۰ سانتی متر انتقال گرما با غلظت های ۸ و ۱۲ درصد از نانو سیال مس و نقره و دی اکسید آلومینیم به ترتیب ۱۶، ۳۲، ۱۱/۳ و ۱۳ درصد افزایش یافت [۲۰]. رحمتی نژاد و همکاران ارزیابی تجربی انتقال گرما رادیاتور تراکتور MF 285 با استفاده از نانو سیال $Al_2O_3 + water$ انجام دادند. نتایج نشان داد با افزودن ۴ درصد حجمی نانوذرات به سیال پایه می توان نرخ انتقال گرما را به طور متوسط 37% و ضریب انتقال گرمای همرفتی را 28% نسبت به سیال پایه افزایش داد [۲۱]. نورآزودی و همکاران نشان دادند که با استفاده از نانو ذرات در مایع خنک کننده رادیاتور، ضریب انتقال گرما تا ۵۰٪ نسبت به مایع خنک کننده پایه افزایش می یابد [۲۲]. ایزدخواه و همکاران به بررسی خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیالات بر پایه آب- اتیلن گلیکول با استفاده از روش های شبیه سازی دینامیک مولکولی غیرتعادلی و دینامیک سیالات محاسباتی پرداختند. نتایج نشان داد اضافه کردن نانو ذرات به سیال پایه باعث بهبود رسانایی گرمایی نانوسیال و همچنین افزایش دانسیته و لزجت سیال پایه می شود [۲۳]. احمدی و همکاران تحقیقی به منظور پیش بینی افت فشار برای جریان سیال CuO/ اتیلن گلیکول آب در رادیاتور خودرو با استفاده از تحلیل شبکه های عصبی مصنوعی ادغام شده با الگوریتم ژنتیک انجام دادند.

dH: قطر هیدرودینامیکی ذره، K: ثابت بولتزمن، η : لزجت حلال است که به دما وابسته بوده و به چگالی و فشار سیستم مرتبط نیست، T: دمای مطلق و D: ضریب نفوذ است [۳]. در روش پراش پرتو X یا XRD برای تعیین اندازه نانوذرات، پردازش و آنالیز پرتو X بازگشتی از سطح نمونه بررسی می شود. پرتو X در زوایای مختلف (θ) به بلور کریستال تابیده می شود. در اثر این تابش و برخورد پرتو به اتم ها، اشعه بازتابیده می شود و یا اصطلاحاً پراش می یابد. هنگامی که اشعه پراش یافته و بازتابیده از نمونه کریستالی توسط دکتور دریافت می گردد به سیگنال تبدیل شده و در نهایت به صورت یک نمودار گزارش می شود. نمودار خروجی فرآیند، الگوی پراش نامیده می شود و نمایشگر شدت پرتو بازتابیده بر حسب زاویه 2θ می باشد. در واقع زاویه بین امتداد پرتو تابش و پرتو بازتابش می باشد که معمولاً از $0-160^\circ$ درجه گزارش می شود. در این روش اندازه ذرات از رابطه (۲) بدست می آید.

$$D = \frac{0.93 \lambda}{B \cos \theta_B} \quad (2)$$

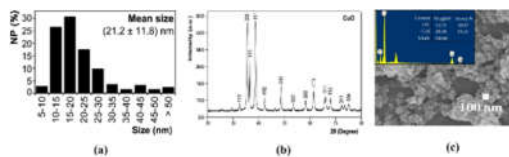
D: قطر ذره

λ : طول موج اشعه ایکس

B: پهناي قله بیشینه در نصف ارتفاع

θ : زاویه پراکندگی است که به ازاء آن قله بیشینه شکل گرفته است.

زاویه قله بیشینه نشان دهنده فاصله بین صفحات کریستالی و شدت هر قله حاوی اطلاعاتی از نحوه آرایش اتم ها می باشد. با در نظر گرفتن شدت قله بیشینه و مقایسه آن با الگوهای استاندارد میتوان ساختار اتم ها و فاز کریستالی را تعیین کرد. برای تجزیه و تحلیل ساختاری و تعیین ترکیب شیمیایی نمونه طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس EDS انجام گرفت.



شکل ۲- (a) DLS، (b) XRD نانوذرات CuO، (c) SEM/EDS نانوذرات CuO

جدول ۱- جدول آنالیز نانوذرات CuO (ppm)

Ba	Cd	Co	Zn	Sr	Ca	K	P	Mg	Fe	Pb	Mn
0.75	2.5	6.4	195	2.3	400	300	300	75	87	90	3.5

برای تهیه نانو سیال از یک هم زن برقی با قابلیت تنظیم دور از ۲۰۰ تا ۳۰۰۰ دور در دقیقه، یک تکان دهنده مغناطیسی با سرعت ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ دور در دقیقه و قدرت گرمایش ۴۰۰W، از یک دستگاه التراسونیک همزنایزر مدل UP100H ساخت شرکت Hielscher آلمان دارای ۱۰۰وات و فرکانس ۳۰ کیلوهرتز استفاده شد. به منظور حفظ پایداری محلول برای اینکه برای کارهای مهندسی مناسب باشد از ۱٪ وزنی مواد فعال کننده سطحی (سدیم دود سیل سولفات) استفاده شد. مشخصات مواد فعال کننده سطحی در جدول ۲ آورده شده است.

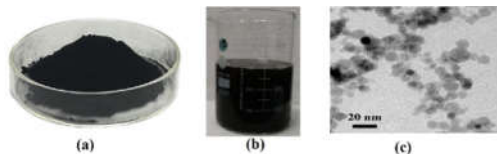
جدول ۲- مشخصات مواد فعال کننده سطحی

ماده فعال سطحی	فرمول مولکولی	ساختار فرمولی	وزن مولکولی (g/mol)	دانسیته (g/cm ³)
سدیم دودسیل سولفات [۲۲]	NaC ₁₂ H ₂₅ SO ₄		۲۸۸/۳۷۲	۱/۰۱

هدف اصلی این مطالعه توسعه شبکه های عصبی بهینه برای پیش بینی افت فشار سیستم با دقت کافی است [۲۴]. استفاده از نانو سیال به عنوان سیالی با ویژگی های انتقال گرمای پیشرفته در صنایع مختلف در حال افزایش است. بنابراین تعیین خواص ترموفیزیکی این سیالات دارای اهمیت می باشد. با توجه به عدم وجود مطالعات مشابه به صورت جامع در این خصوص و ارائه نتایج ضد و نقیض توسط پژوهشگران در این مورد باعث شد این تحقیق انجام شود. بنابراین؛ این خواص به صورت آزمایشگاهی تعیین شده و به منظور ارزیابی صحت موارد به دست آمده با منابع معتبر مقایسه گردید. همچنین به کمک مدل آزمایشگاهی طراحی شده ارزیابی انتقال گرما بر روی رادیاتور موتور پرکینز A4.248 تراکتور MF 285 با استفاده از نانو سیال CuO + Water با دو روش نظری و تجربی انجام شد. نظر به اینکه تاکنون برای بررسی انتقال گرما رادیاتور موتور پرکینز A4.248 تراکتور MF 285 از مدل آزمایشگاهی استفاده نشده است تحقیق حاضر انجام گرفت. بی شک بررسی مقدار انتقال گرما بر روی مدل آزمایشگاهی و شرایط محیطی ثابت باعث استخراج اطلاعات دقیق انتقال گرما خواهد شد.

۲- مواد و روش ها

در این تحقیق ابتدا نانو ذرات CuO توسط دستگاه PNC1k-C شرکت پیام آوران نانو فن آوری فردانگر به روش انفجار الکتریکی سیم به صورت نانوکلوئیدهای فلزی تولید شد. برای بدست آوردن ساختار و مورفولوژی نانو ذرات تولید شده از نانوذرات تصاویر TEM و SEM گرفته شد. تصاویر TEM توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری مدل H9500 (دارای رزولوشن بالا و نقطه به نقطه از ۰/۱۸ نانومتر و وضوح شبکه از ۰/۱ نانومتر) و تصاویر SEM توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Su3500 شرکت HITACHI (با قدرت تفکیک ۱ تا ۵ نانومتر) گرفته شد.



شکل ۳- (a) نانوذرات CuO، (b) نانو سیال CuO، (c) تصویر TEM از نانوذرات CuO

برای اندازه گیری قطر نانو ذرات از روش پراکندگی نور (DLS) و طیف سنج پراش اشعه ایکس (XRD) استفاده شد. برای اندازه گیری این پارامترها به ترتیب از دستگاه مدل NANO-Flex شرکت Particle Metrix کشور آلمان (بازه اندازه گیری اندازه نانوذرات از ۰/۳ نانومتر تا ۱۰ میکرومتر) و مدل EMMA شرکت Ewai چین (با آشکارساز پرتو موازی با کولیماتور شکاف ۰/۴ درجه) استفاده شد. ارتباط بین اندازه ذرات و سرعت حرکت براونی در روش (DLS) توسط رابطه استوکس اینشتین برقرار می شود (رابطه (۱)).

$$d_H = \frac{KT}{3\pi\eta D} \quad (1)$$

۲-۱- خواص ترموفیزیکی نانو سیال

چگالی نانو سیالات را می توان بر اساس قانون مخلوط ها از رابطه پاک و چو [۲۵] محاسبه می کنند.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi_p)\rho_b + \phi_p\rho_p \quad (۳)$$

ρ_{nf} چگالی نانو سیال، V_b حجم سیال پایه و V_p حجم نانوذرات است. در این رابطه ϕ کسر حجمی ذرات نانو، ρ چگالی و اندیس p نشان دهنده نانو ذرات و b نشان دهنده سیال پایه میباشد. اکثر محققان از رابطه (۴) جهت تعیین گرمای ویژه استفاده می کنند [۲۶].

$$(C_p)_{nf} = (1 - \phi_p)(\rho C_p)_b + \phi_p(\rho C_p)_p \quad (۴)$$

که می تواند به صورت رابطه ۵ نوشته شود.

$$(C_p)_{nf} = \frac{(1 - \phi_p)(\rho C_p)_b + \phi_p(\rho C_p)_p}{(1 - \phi_p)\rho_b + \phi_p\rho_p} \quad (۵)$$

$(C_p)_{nf}$ گرمای ویژه فشار ثابت نانو سیال، اندیس p برای نانو ذرات و اندیس b برای سیال پایه است. مدل های نظری مختلفی برای محاسبه لزجت نانو سیالات ارائه شده اند که از میان آنها در این تحقیق از مدل کورشن استفاده شد [۲۷].

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} \left[\frac{1}{1 - 34.87 \left(\frac{d_p}{d_{bf}} \right)^{-0.3} (\phi)^{1.03}} \right] \quad (۶)$$

در این رابطه d_{bf} قطر معادل مولکول سیال پایه است که از رابطه (۷) بدست آمد.

$$d_{bf} = 0.1 \left[\frac{6M}{N\pi\rho_{bf}} \right]^{1/3} \quad (۷)$$

M : وزن مولکولی سیال پایه (مثلا برای آب 18.01528 g/mol)
 N : عدد آووگادرو ($6.022140857 \times 10^{23}$)

پارامترهایی چون حجم نانو ذرات، اندازه و شکل آنها، سیال پایه، ضخامت نانو لایه، تکنیک های پراکندگی، دما و مقدار pH و حرکت بروانی نانو ذرات در تعیین لزجت نانو سیال نقش دارند [۲۸-۳۲].

برای تعیین رسانایی گرمایی نانو سیال از رابطه همیلتون - کروسر استفاده شد [۳۳].

$$k_{nf} = \left[\frac{k_p + (n-1)k_{bf} - \phi(n-1)(k_{bf} - k_p)}{k_p + (n-1)k_{bf} + \phi(k_{bf} - k_p)} \right] \times k_{bf} \quad (۸)$$

که در این رابطه K رسانایی گرمایی، ذره و n ضریب شکل است که از رابطه $n = \frac{3}{\psi}$ به دست می آید. ψ ضریب کرویت است و برای ذرات کروی $\psi = 1$ و $n=3$ و برای ذرات استوانه ای $n=6$ است.

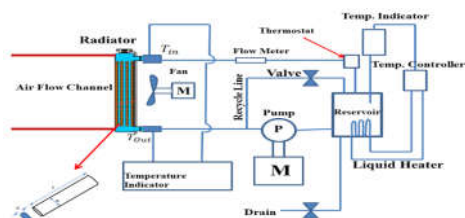
خواص ترموفیزیکی نانو ذرات CuO و سیال پایه مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- خواص ترموفیزیکی سیال های پایه و نانو ذره CuO

[۳۴]		
آب	CuO	اتیلن گلیکول
۴۱۷۹	۵۳۳	۲۴۲۰/۶
۹۹۷/۱	۶۵۰۰	۱۱۱۰/۲
۰/۶۱۳	۷۶	۰/۲۵۳
۲۱	---	۵۷

۲-۲- تشریح دستگاه آزمایش

به منظور ساخت یک مدل آزمایشگاهی جهت تست مقدار انتقال گرما در رادیاتور با سیال های متفاوت و در دبی سیال های مختلف و همچنین بررسی سرعت پروانه خنک کننده در یک موتور، ابتدا طرحواره ای از آن طراحی شد (شکل ۳). سپس براساس طرحواره طراحی شده اقدام به ساخت نمونه اولیه آزمایشگاهی جهت بررسی انتقال گرما رادیاتور شد. دستگاه ساخته شده دارای یک مخزن، المنت گرمکن، پمپ گریز از مرکز، فلومتر، ترموستات و محل نشیمنگاه آن، شیرهای کنترل جریان، فن، ترموکوپل های اندازه گیری دما، رادیاتور، الکتروموتور سه فاز (دور حداکثر ۱۳۸۵ RPM)، اینورتر، ترموستات گرمایی و لامپ پیلوت می باشد.



شکل ۳- طرحواره سیستم طراحی شده

حجم کل مایع در گردش 10 lit است و در کل مراحل آزمایش ثابت می باشد. برای اینکه پمپ گریز از مرکز و فن بتواند دورهای متغییر داشته باشد الکتروموتور سه فاز که محرک پمپ می باشد با یک اینورتر راه اندازی می شود. با توجه به اندازه مخزن و مقدار انرژی مورد نیاز از دو عدد گرمکن 6000 w استفاده شد. برای اطمینان از اینکه دما از یک حدی بالاتر نرود از یک ترموستات گرمایی داخل مخزن استفاده شد. برای ثابت نگه داشتن دمای سیال ورودی به رادیاتور بین ۴۰ الی ۸۵ درجه سلسیوس از یک PID کنترلر استفاده شد. این کنترل کننده دما را روی Set Point ثابت نگه می دارد. از ترموکوپل قبیل از ترموستات برای ورودی PID کنترلر استفاده شد. از دبی سنچ پیستونی $PD-SDC$ برای اندازه گیری دبی استفاده شد. از دو عدد ترموکوپل نوع T برای اندازه گیری دمای ورودی و خروجی به رادیاتور و دو عدد دیگر جلو و عقب فن برای اندازه گیری دمای هوای ورودی و خروجی و ۴ عدد دیگر بر روی رادیاتور نصب شد تا دمای بدنه رادیاتور اندازه گیری شود. با توجه به رسانایی گرمایی بالای مس و ضخامت کم لوله ها می توان دمای بیرون و داخل لوله ها را یکسان فرض نمود. کالیبراسیون ترموکوپل ها انجام شد و دقت اندازه گیری: $\pm 1^{\circ}C(0 \text{ to } 150^{\circ}C)$ برآورد گردید. مشخصات رادیاتور استفاده شده در این تحقیق در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴- مشخصات رادیاتور استفاده شده در این تحقیق

نام محصول	اندازه شبکه	سایز لوله	تعداد ردیف	جنس شبکه	جنس مخزن
رادیاتور	۴۸۷ × ۳۸۰ × ۵۰	۱۲.۵ mm	۶ ردیف	رادیاتور	رادیاتور
رادیاتور تراکتور مسی فرگوسن MF 285				مسی - برنجی CuSn	ورق برنجی CuZn30

$$\varepsilon = \frac{(m c_p)_h (T_{in} - T_{out})}{(m c_p)_c (T_{in} - T_{air})} \quad (21)$$

در این رابطه h و c به ترتیب سیال گرم و سرد را توصیف می کند و T_{air} دمای محیط را نشان می دهد.

استفاده از نانو سیال به عنوان جایگزین سیال خالص باعث افزایش افت فشار در مجاری شده و نیاز به قدرت پمپاژ بیشتر می باشد. برای بررسی نسبت نرخ انتقال گرما به قدرت پمپاژ مورد نیاز، از پارامتر مریت (شایستگی) استفاده شد. [۳۷].

$$Me = \frac{q}{p} \quad (22)$$

در این رابطه p قدرت پمپاژ است که از رابطه (۲۳) محاسبه شد.

$$p = Q \Delta P \quad (23)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ته نشینی نانو ذرات CuO در سیال پایه آب

برای بررسی زمان ته نشینی آزمایش عکس برداری از رسوب و آزمایش زتا انجام گرفت. به منظور بررسی زمان ته نشینی یک مخلوط از نانو سیال با کسر حجمی ۱٪ از نانو ذرات 20 nm تهیه شد. برای پایداری بیشتر از مواد فعال کننده سطحی (سدیم دود سیل سولفات) استفاده شد. سپس 100 ml از مخلوط در ظرف مدرج ریخته شده و در بازه های زمانی مشخص و در دمای ۳۰ درجه سلسیوس از رسوب نانو ذرات عکس برداری شد. نتایج نشان از پایداری CuO در ۲۰ روز اول می باشد. نتایج بدست آمده با منبع [۳۸] ارزیابی و مورد تایید قرار گرفت. در آزمایش پتانسیل زتا از دستگاه ZETA - Check ساخت شرکت Particle Metrix کشور آلمان استفاده شد. بدین منظور از ۲ wt% نانوذرات CuO با قطر ۲۰ nm استفاده شد. در این آزمایش دما ۲۵ درجه سانتی گراد، فشار یک اتمسفر و رطوبت ۳۸ درصد بود. بالاترین مقدار اندازه گیری شده برای نانو سیال $CuO + H_2O$ به مقدار mv ۳۷/۷ بود که نشان از پایداری و پراکندگی عالی است. محققان بسیاری از جمله وو و همکاران [۳۹] گزارش کرده اند که در پتانسیل زتای بیشتر از 30 mv محلول کلونیدی پایدارند.

۳-۲- بدست آوردن چگالی، گرمای ویژه، لزجت

دینامیکی، نسبت رسانایی گرمایی نانو سیال به سیال پایه، ضریب اصطکاک و ضریب اثر بخشی

در این قسمت ابتدا بر اساس روابط تخمینی ارائه شده برای کسرهای حجمی صفر تا ۴ درصد مقادیر چگالی، گرمای ویژه، لزجت دینامیکی و رسانایی گرمایی نانو سیال نسبت به سیال پایه در دمای ۳۰ درجه سلسیوس بدست آمد. نتایج نشان داد با افزایش کسر حجمی نانو ذرات چگالی و رسانایی گرمایی افزایش؛ گرمای ویژه و لزجت دینامیک کاهش یافت. مقادیر بدست آمده با منابع [۴۰-۴۶] ارزیابی و تایید شد. ضریب اصطکاک با افزایش کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه افزایش، و با افزایش عدد رینولدز کاهش یافت. همچنین با افزایش دبی و کسر حجمی ضریب اثر بخشی رادیاتور افزایش را نشان داد. این موارد با منبع [۳۵] ارزیابی و تایید شد.

۳-۲- تجزیه و تحلیل داده های تجربی

دو پارامتر اساسی برای تعیین عملکرد حرارتی یک سیستم، ضریب انتقال گرمای همرفتی و عدد ناسلت است. بر اساس قانون سرمایش نیوتن انتقال گرمای همرفتی از رابطه (۹) بدست می آید [۳۵].

$$Q = h A \Delta T = h A (T_b - T_w) \quad (9)$$

که در آن Q گرمای منتقل شده، A مساحت لوله ها، ΔT اختلاف دما و T_b دمای کلی می باشد. که T_b از رابطه (۱۰) بدست می آید.

$$T_b = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (10)$$

T_{in} و T_{out} دمای ورودی و خروجی می باشد و T_w دمای لوله ها می باشد که از طریق چهار عدد ترموکوپل و توسط رابطه (۱۱) بدست می آید.

$$T_w = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a T_i \quad (11)$$

و میزان انتقال گرما از رابطه (۱۲) بدست می آید.

$$Q = m^0 \times c_p \times (T_{in} - T_{out}) \quad (12)$$

در این رابطه Q گرمای منتقل شده، c گرمای ویژه و m^0 دبی جرمی جریان می باشد.

ضریب انتقال گرمای همرفتی (رابطه (۱۳)) بدست می آید.

$$h_{exp} = \frac{m^0 \times c_p \times (T_{in} - T_{out})}{A \times (T_b - T_w)} \quad (13)$$

برای جریان لایه ای کاملاً توسعه یافته با گرمای ثابت در سطوح لوله عدد نوسلت از رابطه (۱۴) محاسبه می شود [۳۶].

$$Nu = \frac{h D_H}{k} = 3.66 \quad (14)$$

در این رابطه D_H قطر هیدرولیکی است که از رابطه (۱۴) بدست می آید [۳۵].

$$(15)$$

$$D_H = \frac{4 \times \left[\frac{\pi}{4} d^2 + (D - d) \times d \right]}{\pi \times d + 2 \times (D - d)}$$

برای محاسبه عدد نوسلت موضعی در جریان متلاطم کاملاً توسعه یافته در لوله های صاف از شباه چیلتون - کولبرن می توان استفاده کرد. که در نهایت به شکل رابطه (۱۶) تحت عنوان رابطه کولبرن ساده می شود [۳۶].

$$(16)$$

$$Nu = 0.023 Re^{1/4} Pr^{1/3}$$

Nu عدد نوسلت، Re عدد رینولدز و Pr عدد پرانتل است که توسط رابطه (۱۷) محاسبه شد.

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (17)$$

Pr عدد پرانتل، c_p گرمای ویژه در فشار ثابت، μ لزجت دینامیکی و k رسانایی گرمایی است. عدد رینولدز از رابطه (۱۸) بدست می آید.

$$Re = \frac{\rho \times D_H \times u}{\mu} \quad (18)$$

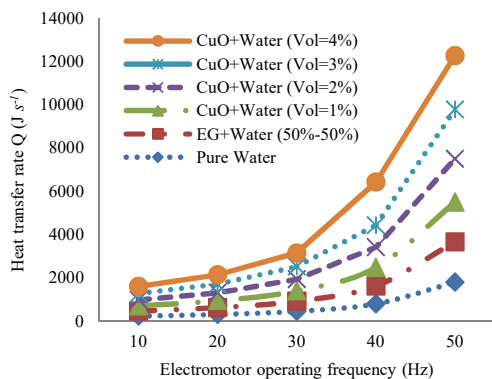
u سرعت سیال در قسمت ورودی رادیاتور است که با توجه به دبی (Q) و سطح مقطع لوله رادیاتور (A) از رابطه (۱۹) بدست می آید.

$$u = \frac{Q}{A} \quad (19)$$

ضریب اصطکاک (f) با توجه به ΔP بدست آمده از مانومتر از رابطه (۲۰) بدست می آید.

$$f = \frac{2 \times \Delta P}{\frac{L}{D_H} \times \rho \times u^2} \quad (20)$$

ضریب اثر بخشی ε برای رادیاتور از رابطه (۲۱) بدست می آید.

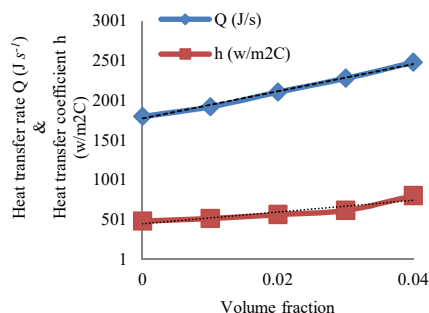


شکل ۶- تاثیر سرعت الکتروموتور بر میزان آهنگ انتقال گرما

نتایج نشان می دهد در دور حداکثر الکتروموتور، زمانی که کسر حجمی نانو ذرات ۴ درصد است نسبت به زمانی که یک درصد می باشد آهنگ انتقال گرما متوسط ۲۹ درصد بیشتر می شود.

۳-۵- تأثیر غلظت حجم نانوسیال بر میزان انتقال گرما

افزایش انتقال گرما در رادیاتور با استفاده از نانوذرات CuO به قطر 20 nm در سیال پایه آب با درصد های حجمی ۱، ۲، ۳ و ۴ به صورت تجربی مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان می دهد در حداکثر مقدار سرعت جریان هوا و سیال خنک کننده با افزودن ۴ درصد حجمی نانوذرات به سیال پایه می توان آهنگ انتقال گرما را به طور متوسط ۳۹ درصد نسبت به سیال پایه افزایش می یابد (شکل ۷). این مورد با منبع [۴۷] بررسی و تایید شد.



شکل ۷- تاثیر درصد حجمی نانو ذرات بر آهنگ انتقال گرما و ضریب انتقال گرمای همرفتی

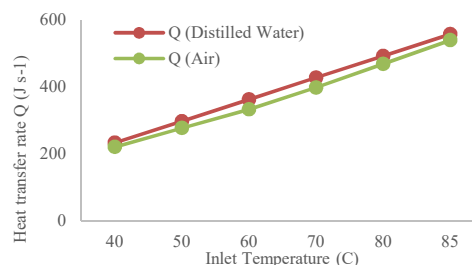
شکل ۸ تغییرات آهنگ انتقال گرما با تغییر در غلظت نانو ذرات در سیال پایه را برای دمای ورودی مختلف بین ۴۰ تا ۸۵ درجه سلسیوس را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد با افزایش غلظت حجمی نانوذرات، سرعت انتقال گرما افزایش می یابد. در این آزمایش سرعت جریان سیال خنک کننده $3.18 \text{ (lit min}^{-1}\text{)}$ بود.

۳-۳- محاسبه درصد خطا

در حالت ایده آل، انتقال گرمای انجام شده از سیال خنک کننده به بدنه رادیاتور باید با انتقال گرمای بدنه به هوا برابر باشد. یعنی گرمایی که سیال خنک کننده از دست می دهد برابر با گرمایی است که هوا از بدنه رادیاتور دریافت می کند. برای حالت عملی باید خطای بین این دو مورد محاسبه شود. تا اعتبار سیستم آزمایش مورد بررسی قرار گیرد. خطا را می توان از رابطه ۲۴ محاسبه نمود.

$$\text{Error}(\%) = \left[\frac{Q_{liq}^{\circ} - Q_{air}^{\circ}}{Q_{liq}^{\circ}} \right] \times 100 \quad (24)$$

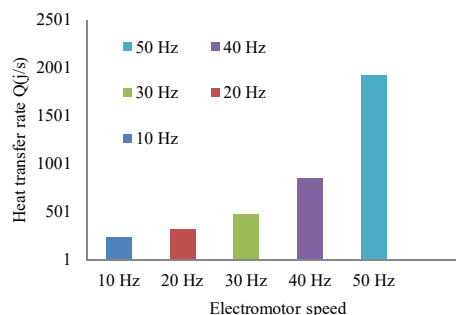
خطای بین گرمای از دست رفته توسط آب مقطر و گرمای بدست آمده توسط هوا کمتر از ۱۰٪ است.



شکل ۴- اتلاف گرما توسط آب و گرمای بدست آمده توسط هوا در دماهای مختلف ورودی رادیاتور

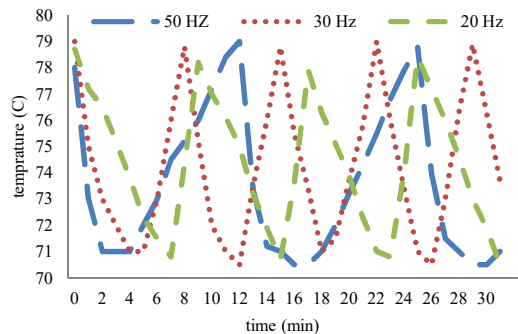
۳-۴- تاثیر سرعت الکتروموتور بر آهنگ انتقال گرما

برای حالتی که مقدار نانوذرات یک درصد حجمی می باشد و برای حداکثر اختلاف دمای ورودی و خروجی رادیاتور (۱۵ درجه) مقادیر آهنگ انتقال گرما محاسبه و در نمودار ۵ نشان داده شد. نتایج نشان می دهد با افزایش سرعت الکتروموتور از 10 Hz به 20 Hz آهنگ انتقال گرما به طور متوسط ۳۴ درصد افزایش می یابد.



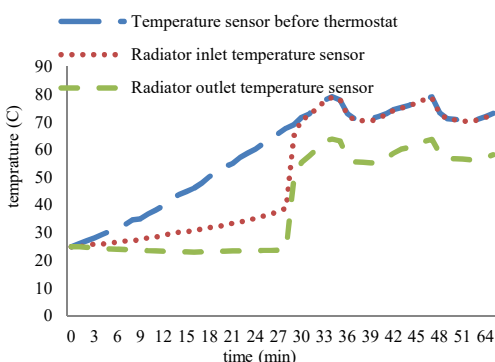
شکل ۵- تاثیر سرعت الکتروموتور بر میزان آهنگ انتقال گرما (در یک درصد حجمی نانو ذرات)

در شکل ۶ آهنگ انتقال گرما برای سیال پایه آب، مخلوط آب و اتیلن گلیکول و نانو سیال با کسر حجمی مختلف ترسیم شد.



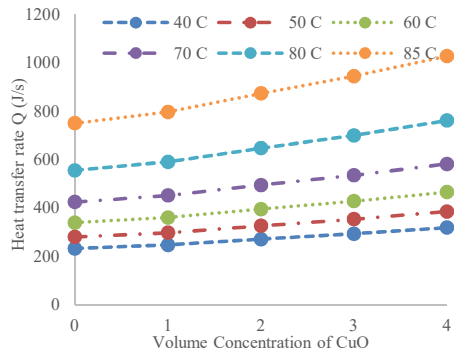
شکل ۱۰- بررسی دمای باز و بسته شدن ترموستات با سه دور مختلف الکتروموتور

هر چقدر سرعت الکتروموتور زیاد باشد سرعت خنک شدن سیال سریعتر و در نتیجه سرعت بسته شدن سریعتر (شیب نمودار نزولی از حداکثر دما به حداقل دما تندتر) می باشد. با کاهش سرعت این عملیات برعکس می شود. یعنی شیب نمودار بسته شدن بیشتر و فرآیند باز شدن حداکثر ترموستات در زمان کمتری اتفاق می افتد. در ادامه سرعت الکتروموتور در حالت حداکثر قرار داده شد (فرکانس کاری 50 Hz) و حسگرهای قبل ترموستات، ورودی و خروجی رادیاتور در مدل آزمایشگاهی بررسی شد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- بررسی دمای حسگرهای قبل ترموستات، ورودی و خروجی رادیاتور در مدل آزمایشگاهی طراحی شده.

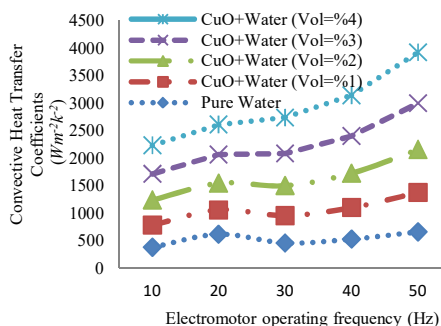
با شروع آزمایش با توجه به بسته بودن ترموستات دمای حسگر قبل از ترموستات با یک شیب تقریباً خطی افزایش پیدا می کند. تند بودن یا کند بودن این شیب به توان حرارتی تولید شده المنت های حرارتی بستگی دارد. تا قبل از باز شدن ترموستات حسگر بعد از ترموستات تغییرات دمایی کمی را دارد. افزایش دمای کمی که در حسگر ورودی رادیاتور قبل از باز شدن ترموستات ملاحظه می شود به خاطر عبور سیال از سوراخ تعبیه شده بر روی ترموستات است. با شروع باز شدن ترموستات دمای ورودی رادیاتور یک افزایش سریع و با شیب تند را دریافت نموده و دمای خود را به دمای حسگر قبل ترموستات می رساند. از این لحظه به بعد دمای این دو حسگر تقریباً با هم برابر بوده و اختلاف آنها کمتر از یک درجه سلسیوس می شود. همچنین با عبور سیال گرم از رادیاتور دمای حسگر خروجی نیز با شیب تندی



شکل ۸- نمودار سرعت انتقال گرما و غلظت حجم ذرات نانو در دمای مختلف ورودی رادیاتور

۳-۶- ضریب انتقال گرمای همرفتی

در این آزمایش دمای هوای خنک کننده ۲۷ درجه سلسیوس و اختلاف دمای سیال خنک کننده در قسمت ورودی و خروجی رادیاتور حداکثر مقدار بود. ضریب انتقال گرمای همرفتی در نانو سیالات با توجه به سرعت جریان و جزء حجمی نانو ذرات تغییر کرده و در صورت وجود شرایط یکسان بیشتر از مقدار مشابه در سیال پایه می باشد (شکل ۹).



شکل ۹- تاثیر افزایش سرعت الکتروموتور بر روی ضریب انتقال گرمای همرفتی در درصد حجمی های مختلف

به طور مثال در مقایسه با آب، نانو سیال حاوی ۴٪ حجمی از CuO در دور حداکثر دارای افزایش ۲۹ درصدی در ضریب انتقال گرمای همرفتی است. همچنین با افزایش دور الکتروموتور از 20 Hz به 40 Hz ضریب انتقال گرمای آب خالص به طور متوسط ۲۸٪ و نانو سیال ۳۲٪ افزایش را نشان می دهد. این مورد با منبع [۴۹] بررسی و مورد تایید قرار گرفت.

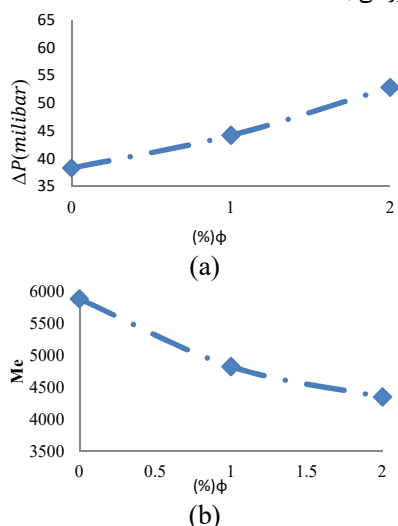
۳-۷- بررسی دمای باز و بسته شدن ترموستات در دوره های مختلف الکتروموتور

با توجه به سرعت الکتروموتور ۱۰ الی ۳۰ دقیقه زمان تقریبی باز شدن ترموستات می باشد. در شکل ۱۰ بعد از اینکه حسگر قبل از ترموستات که می تواند دمای فعال و غیر فعال شدن ترموستات را گزارش کند به دمای حداکثر رسید. شروع به ترسیم نمودار برای دوره های مختلف الکتروموتور نمودیم.

۹-۳- بررسی افت فشار و پارامتر مریت (شایستگی) برای

رادیاتور

استفاده از نانو سیال به عنوان جایگزین سیال خالص، دارای یک اثر مطلوب و یک اثر نا مطلوب می باشد. اثر مطلوب همان افزایش انتقال گرما و اثر نامطلوب افزایش افت فشار در مجاری و نیاز به قدرت پمپاژ بیشتر می باشد. لذا برای بررسی اثر واقعی استفاده از نانو سیال، از پارامتر مریت (شایستگی) استفاده می شود. برای اندازه گیری افت فشار سیال درون رادیاتور، از دو عدد فشار سنج در ورودی و خروجی رادیاتور استفاده شد. با توجه به آزمایش های انجام شده مشخص گردید بهترین حالت برای اندازه گیری افت فشار و پارامتر مریت در دور حداکثر الکتروموتور می باشد.



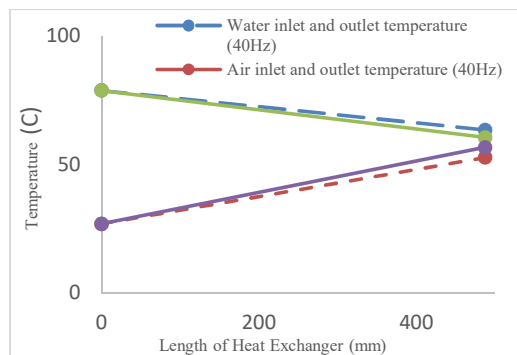
شکل ۱۴- (a) افت فشار رادیاتور، (b) تغییر پارامتر مریت (شایستگی) بر حسب درصد نانو ذرات

افت فشار رادیاتور با کسر حجمی ۱ و ۲ درصد نسبت به سیال پایه در دور حداکثر الکتروموتور به ترتیب ۱۵/۷٪ و ۳۸/۲٪ محاسبه شد. تغییرات پارامتر مریت (شایستگی) در همان دور به ترتیب برای کسر های حجمی ۱ و ۲ درصد کاهش ۱۷/۹٪ و ۲۶٪ را نسبت به سیال پایه نشان می دهد. این موضوع با منبع [۵۰] بررسی و مورد ارزیابی قرار گرفت.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق عملکرد حرارتی رادیاتور موتور پرکینز A4.248 توسط نانو سیال CuO + Water در شرایط محیطی تعریف شده توسط یک مدل آزمایشگاهی ساخته شده مورد مطالعه قرار گرفت. ابتدا به منظور بررسی ته نشینی نانو سیال تهیه شده آزمون پتانسیل زتا گرفته شد. بالاترین مقدار اندازه گیری شده برای نانو سیال $CuO + H_2O$ به مقدار ۳۷/۷ mv بود که نشان از پایداری و پراکندگی عالی است. با افزایش کسر حجمی نانو ذرات چگالی و رسانایی گرمایی افزایش؛ گرمای ویژه و ویسکوزیته دینامیک کاهش یافت. ضریب اصطکاک با افزایش کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه افزایش، و با افزایش عدد رینولدز کاهش یافت. همچنین با افزایش دبی و کسر حجمی ضریب اثر

افزایش یافته و سپس با رسیدن به دمای حداکثر خود با الگوی مناسبی از حسگر دمای ورودی تبعیت می کند. اختلاف دمای بین این دو حسگر در مواقعی که ترموستات باز بوده و سیال از رادیاتور عبود می کرد به طور متوسط بین ۱۲ الی ۱۵ درجه سلسیوس برآورد شد. تغییرات دمای هوا و سیال خنک کننده آب در طول رادیاتور در دوره های 40 Hz و 50 Hz الکتروموتور مورد بررسی قرار گرفت و نتایج در نمودار شکل ۱۲ گزارش گردید.

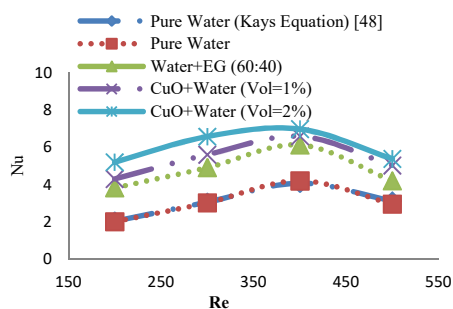


شکل ۱۲- تغییرات دما در طول رادیاتور در دوره های 50 Hz و 40 Hz

نتایج نشان می دهد با افزایش سرعت الکتروموتور از 40 Hz به 50 Hz دمای سیال خنک کننده آب در قسمت خروجی به مقدار ۴/۷ درجه سلسیوس خنک تر شده و دمای هوای در قسمت خروجی ۷/۳ درجه سلسیوس گرمتر می شود.

۸-۳- تغییرات عدد ناسلت

تغییرات عدد ناسلت نسبت به رینولدز در دور حداکثر الکتروموتور برای سه حالت آب خالص؛ آب و اتیلن گلیکول (۴۰:۶۰) و در نهایت با نانو سیال $CuO + H_2O$ با کسرهای حجمی ۱ و ۲ درصد محاسبه و در شکل ۱۳ گزارش گردید. عدد ناسلت با افزایش رینولدز افزایش پیدا کرده و در رینولدز ۴۰۰ به مقدار حداکثر آن می رسد و سپس دوباره کاهش پیدا می کند. این امر بخاطر کاهش ضریب انتقال گرمایی همرفتی در دبی های بالا است. همچنین افزایش کسر حجمی نانو ذرات به سیال پایه باعث افزایش ناسلت می شود.



شکل ۱۳- نمودار تغییرات ناسلت بر حسب رینولدز

[9] Vasu V., Krishna K.R., Kumar A.C.S., Thermal design analysis of compact heat exchanger using nanofluids. *International Journal of Nanomanufacturing*, 2008.

[10] Vajjha R.S., Das D.K., Namburu P.K., Numerical study of fluid dynamic and heat transfer performance of Al₂O₃ and CuO nanofluids in the flat tubes of a radiator. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 31, 613-621, 2010.

[11] Xie H., Li Y., Yu W., Intriguingly high convective heat transfer enhancement of nanofluid coolants in laminar flows. *Phys Lett A*;374:2566-8, 2010.

[12] Leong K.Y., Saidur R., Kazi S. N., Mamun A. H., Performance investigation of an automotive car radiator operated with nanofluid-based coolants (nanofluid as a coolant in a radiator). *Applied Thermal Engineering* 30: 2685-2692, 2010.

[13] Peyghambarzadeh SM., Hashemabadi SH., Hoseini SM., Seifi JM., Experimental study of heat transfer enhancement using water/ethylene glycol based nanofluids as a new coolant for car radiators. *International Communities Heat Mass Transfer*;38:1283e90, 2011.

[14] Peyghambarzadeh SM., Hashemabadi SH., Naraki M., Vermahmoudi Y., Experimental study of overall heat transfer coefficient in the application of dilute nanofluids in the car radiator. *Appl Therm Eng*;52:8e16, 2013.

[15] Naraki M., Peyghambarzadeh SM., Hashemabadi SH., Vermahmoudi Y., Parametric study of overall heat transfer coefficient of CuO/water nanofluids in a car radiator. *International Journal in Thermal Science*;66:82e90, 2013.

[16] Hussein AM., Bakar RA., Kadrigama K., Sharma KV., Heat transfer enhancement using nanofluids in an automotive cooling system. *Int Commun Heat Mass Transfer*;53:195e202, 2014.

[17] Muhammad Ali H., Ali H., Liaquat H. and Bin Maqsood H. T., Experimental Investigation of Convective Heat Transfer Augmentation for Car Radiator Using ZnO/Water Nanofluids. *Journal of Elsevier, Energy*, 1-8, 2015.

[18] Raja M., Vijayan R., Dineshkumar P., Venkatesan M., Review on nanofluids characterization, heat transfer characteristics and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 64:163-173, 2016.

[19] Bozorg Bigdeli M., Fasano M., Cardellini A., Chiavazzo E., Asinari P., A review on the heat and mass transfer phenomena in nanofluid coolants with special focus on automotive applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60: 1615-1633, 2016.

[20] Heydarbeigi G., Investigation of the effect of using copper nanofluid, silver nanofluid and aluminum oxide on the heat transfer rate of Ferguson 285 copper tractor engine radiator. *First International Conference on Applied Research in Agricultural Sciences, Natural Resources and Environment*, 2017.

[21] رحمتی نژاد ب. عباسقلی پور م. و محمدی السنی ب. ارزیابی تجربی انتقال حرارت رادیاتور تراکتور MF 285 با استفاده از نانو سیال Al₂O₃+water. ماشین های کشاورزی، ۱۴۰۱.

[22] Nor Azwadi C. S., Muhammad Noor A. W. M. Y., Rizalman M., Recent advancement of nanofluids in engine cooling system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016.

[23] ایزدخواه ش. عرفان نیا ح. و مرادخانی ح. بررسی خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیالات بر پایه آب-اتیلن گلیکول با استفاده از روش های شبیه سازی دینامیک مولکولی غیرتعادلی و دینامیک سیالات محاسباتی. مهندسی مکانیک مدرس، ۱۶ (۷): ۱۶۲-۱۵۳، ۱۳۹۵.

[24] Ahmadi, M. H., Ghazvini, M., Maddah, H., Kahani, M., Pourfarhang, S., Pourfarhang, A., & Heris, S. Z. (2020). Prediction of the pressure drop for CuO/(Ethylene glycol-water) nanofluid flows in the car radiator by means of Artificial Neural Networks analysis integrated with genetic algorithm. *Physica A: Statistical mechanics and its Applications*, 546, 124008.

[25] Pak B. C., and Cho Y. I., Hydraulic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*, vol. 11(2), pp. 151-170, 1998.

[26] Ho C., Liu W., Chang Y., Lin C., Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in vertical square enclosures: an experimental study. *Int J Therm Sci*, 49:1345-53, 2010.

بخشی رادیاتور افزایش را نشان داد. در حداکثر مقدار سرعت جریان هوا و سیال خنک کننده با افزودن ۴ درصد حجمی نانوذرات به سیال پایه می توان نرخ انتقال گرما را به طور متوسط ۳۹ درصد نسبت به سیال پایه افزایش داد. با افزایش غلظت حجمی نانوذرات، سرعت انتقال گرما افزایش یافت. با افزایش دور الکتروموتور از 20 Hz به 40 Hz ضریب انتقال گرما آب خالص به طور متوسط ۲۸٪ و نانو سیال ۳۲٪ افزایش را نشان می دهد. اختلاف دمای بین دو حسگر ورودی و خروجی رادیاتور در مواقعی که ترموستات باز بوده و سیال از رادیاتور عبود می کرد به طور متوسط بین ۱۲ الی ۱۵ درجه سلسیوس برآورد شد. با افزایش سرعت الکتروموتور از 40 Hz به 50 Hz دمای سیال خنک کننده آب در قسمت خروجی به مقدار ۴/۷ درجه سلسیوس خنک تر شده و دمای هوای در قسمت خروجی ۷/۳ درجه سلسیوس گرمتر می شود. عدد ناسلت با افزایش رینولدز افزایش پیدا کرده و در رینولدز ۴۰۰ به مقدار حداکثر آن می رسد و سپس دوباره کاهش پیدا می کند. این امر بخاطر کاهش ضریب انتقال گرمای همرفتی در دبی های بالا است. همچنین افزایش کسر حجمی نانو ذرات به سیال پایه باعث افزایش ناسلت می شود. افت فشار رادیاتور با کسر حجمی ۱ و ۲ درصد نسبت به سیال پایه در دور حداکثر الکتروموتور به ترتیب ۱۵/۷٪ و ۳۸/۲٪ محاسبه شد. تغییرات پارامتر مریت (شایستگی) در همان دور به ترتیب برای کسر های حجمی ۱ و ۲ درصد کاهش ۱۷/۹٪ و ۲۶٪ را نسبت به سیال پایه نشان می دهد.

۵- مراجع

[1] تقی جراح ح. محتسبی س. احمدی ح. و ستاری نجف آبادی م. مطالعه آزمایشگاهی افزایش ضریب انتقال حرارت سیستم خنک کاری تراکتور با استفاده از فن آوری جدید نانوسیالات. ششمین همایش ملی ایده های نو در کشاورزی، اصفهان، ۱۳۹۰.

[2] Alves, L. O. F. T., Henriquez, J. R., da Costa, J. A. P., & Abramchuk, V. (2022). Comparative performance analysis of internal combustion engine water jacket coolant using a mix of Al₂O₃ and CuO-based nanofluid and ethylene glycol. *Energy*, 250, 123832..

[3] Peyghambarzadeh S.M., Hashemabadi S. H., Seiji Jamnani M., Hoseini S. M., Improving the cooling performance of automobile radiator with Al₂O₃ /water nanofluid. *Applied Thermal Engineering*. 31:1833-1838, 2011(a).

[4] Tijani, A. S., & bin Sudirman, A. S. (2018). Thermos-physical properties and heat transfer characteristics of water/anti-freezing and Al₂O₃/CuO based nanofluid as a coolant for car radiator. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 118, 48-57.

[5] نوریان، سجاد، پاسدار شهری، هادی. (۱۳۹۷). بررسی و مقایسه تجربی و عددی عملکرد رادیاتور قرنیزی و رادیاتور پانلی مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ۳۴۶-۳۹۹، (۳)، ۴۸.

[6] حاجت زاده پردنجانی، احمد، رئیسی، افراسیاب، قاسمی، بهزاد. (۱۳۹۸). اثرات تلفات لزجت بر انتقال گرمای جابه جایی اجباری نانوسیال درون یک میکروکانال با حضور میدان مغناطیسی مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ۹۲-۸۳، (۱)، ۴۹.

[7] Saripella S.K., Yu W., Routbort J.L., France D.M., Rizwan-uddin., Effect of nanofluid coolant in a class 8 truck engine. *Sae Technical paper series*, 2007.

[8] Putra N., Maulana S., Heat transfer enhancement of nanofluids in car radiator. *7th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC 2008)*, 2008.

[5·] Fakhari, M. M., & Sheikhzadeh, G. A. (2020). *Heat Transfer and Pressure Drop of Al₂O₃-Ethylene Glycol-water Nanofluid as the Coolant in an Automotive Radiator.*

- [27] Corcione M., Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids. *Energy Convers. Manag.*, 52, 789–793, 2011.
- [28] Turgut A., Tavman I., Chirtoc M., Schuchmann H. P., Sauter C., Tavman S., Thermal conductivity and viscosity measurements of waterbased TiO₂ nanofluids. *International Journal of Thermophysics* 30 (4):1213–1226, 2009.
- [29] Bahiraei M., Hosseinalipour S. M., Zabihi K., Using neural network for determination of viscosity in water-TiO₂ nanofluid. *Advances in Mechanical Engineering* 4:742-680, 2012.
- [30] Fan X., Chen H., Ding Y., Plucinski P. K., Lapkin A. A., Potential of 'nanofluids' to further intensify microreactors. *Green Chemistry* 10 (6): 670–677, 2008.
- [31] Ghadimi A., Metselaar I. H., The influence of surfactant and ultrasonic processing on improvement of stability. thermal conductivity and viscosity of titania nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science* 51:1–9, 2013.
- [32] Yiamsawas T., Dalkilic AS., Mahian O., Wongwises A., Measurement and correlation of the viscosity of waterbased Al₂O₃ and TiO₂ nanofluids in high temperatures and comparisons with literature reports. *Journal of Dispersion Science and Technology* 34 (12): 1697–1703, 2013.
- [33] Hamilton R. O. K., Crosser Industrial and Engineering Chemistry Fundamental, 1(3), 187, 1962.
- [34] Wen D., Lin G., Vafaei S., Review of nanofluids for heat transfer applications. *Particuology*, 7:141–50, 2009.
- [35] Hussein AM., Bakar RA., Kadrigama K., Study of forced convection nanofluid heat transfer in the automotive cooling system. *Case Studies Thermal Engineering* 2:50–61, 2014.
- [37] Holman J.P., Heat Transfer. McGraw-Hill Book Co., New York, 1989.
- [3v] Yu W., Nanofluids for Thermal Conditions-Underhood Heat Transfer. *Argonne National Laboratory*, 2009.
- [3^] Kouloulias K., Sergis A., Hardalupas Y., Sedimentation in nanofluids during a natural convection experiment. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 101: 1193-1203, 2016.
- [3^] Wu S., Zhu D., Li X., Lei J., Thermal energy storage behavior of Al₂O₃-H₂O nanofluids. *Thermochimica Acta*, 483(1-2) 73-77, 2009.
- [4·] Heyhat MM., Kowsary F., Rashidi AM., Alem Varzane Esfehani S., Amrollahi A., Experimental investigation of turbulent flow and convective heat transfer characteristics of alumina water nanofluids in fully developed flow regime. *International Communication in Heat and Mass Transfer* 39:1272–1278, 2012.
- [4^] Pak B. C., and Cho Y. I., Hydraulic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer* 11(2):151-170, 1998.
- [4^] Pandey SD., Nema V. K., Experimental analysis of heat transfer and friction factor of nanofluid as a coolant in a corrugated plate heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science* 38:248–56, 2012.
- [4^] Wang X., Xu X., Choi SUS., Thermal conductivity of nanoparticle–fluid mixture. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* 13:474–80, 1999.
- [4^] Nguyen C., Desgranges F., Roy G., Galanis N., Mare T., Boucher S., Mintsa H. A., Viscosity data for Al₂O₃–water nanofluid–hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable?. *International Journal of Thermal Sciences* 47:103–111, 2008.
- [4^] Williams WC., Buongiorno J., Hu WL., Experimental investigation of turbulent convective heat transfer and pressure loss of alumina/water and zirconia/water nanoparticle colloids (nanofluids) in horizontal tubes. *Journal of Heat Transfer* 130:042412-7, 2008.
- [4^] Maxwell Garnett J., Colours in metal glasses and in metallic films. *Philosophical Transactions the Royal Society* 203: 385-420, 1904.
- [4v] Datta N.M., Sandeep S., Experimental Analysis of Heat Transfer From Car Radiator Using Nanofluids. Vol 2, 4, 2014.
- [48] Kays W.M., Numerical solutions for laminar-flow heat transfer in circular tubes. *Trans. ASME*, 77, 1265, 1955.
- [^] N. Bozorgan, K. Krishnakumar and N. Bozorgan, "Numerical Study on Application of CuO-Water Nanofluid in Automotive Diesel Engine Radiator," *Modern Mechanical Engineering*, Vol. 2 No. 4, 2012, pp. 130-136.