کاربردهای نانوسیالات در صنایع مختلف

میثم اسدی[1]، سیف الله سعدالدین[2*]

1- گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
2- گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
* سمنان، 35131-37111، Meisamasadi91@gmail.com

چکیده

در پژوهش حاضر به بررسی کاربردهای نانوسیالات در صنایع مختلف پرداخته شده است. نانوسیالات دسته جدیدی از سیالات هستند که با پراکنده کردن نانوذرات (کمتر از 100 نانومتر) در یک سیال ایجاد می‌شوند. این سیالات دارای ضریب انتقال حرارت بالاتری نسبت به سیالات رایج انتقال دهنده‌ی حرارت هستند. امروزه با توجه به رشد روز افزون کاربرد نانوسیالات در سیستم‌های حرارتی، روغن موتورها، روان کننده‌ها، و سایر فناوری‌ها، این دسته از سیالات به شدت در کانون توجه محققان قرار گرفته‌اند. در این پژوهش کاربرد نانوسیال در مبدل‌های حرارتی، لوله حرارتی نوسانی، چیلرها، گرمایش خورشیدی آب، ماشینکاری، خنک‌کاری موتور خودروها، خنک‌کاری قطعات الکترونیکی و خنک‌کاری راکتورهای هسته‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که نانوسیالات دارای ضریب انتقال حرارت بالاتری نسبت به سایر سیالات متداول هستند.

کلیدواژگان

نانوسیال، کابرد در مهندسی، کاربرد در صنایع، هدایت حرارتی

Nanofluids in different industrial and engineering applications

Meisam Asadi[1], Seyfolah Saedodin[2*]

1- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran
* P.O.B. 35131-37111 Semnan, Iran, Meisamasadi91@gmail.com

Abstract

The aim of the present study is to investigate the applications of nanofluids in various industrial and engineering applications. Nanofluids are new types of fluids produced by dispersing Nano-particles in a base fluid. Nowadays, regarding the fact that the applications of nanofluids in thermal systems, motor oils, lubricants and so forth are flourishing and booming day by day, these fluids have been strongly in the spotlight of researchers. In this study, the applications of nanofluids in heat exchangers, chillers, machining, solar water heating, engine cooling, cooling of electronic components, oscillating heat pipe, and cooling nuclear reactors have been investigated. The results showed that nanofluids possess grater thermal conductivity compared with those of conventional fluids.

Keywords

Nanofluid, engineering Application, industrial application, thermal conductivity

1- مقدمه

تولید زیاد دی‌اکسید کربن، منبع اصلی بروز مشکل گرم شدن کره زمین است و تبدیل انرژی، اصلی ترین منبع انتشار دی‌اکسید کربن می‌باشد. یکی از راه‌های مهم و مفیدی که می توان در جهت کاهش انتشار دی‌اکسید کربن بکار گرفت، بازیافت بیشتر انرژی و بهبود مصرف موثر آن است. این امر باعث کاهش مصرف سوخت می‌شود و انتشار گاز دی‌اکسید کربن کاهش می‌یابد، در نتیجه هزینه‌های اولیه مربوط به تامین انرژی را نیز برای صنایع کاهش می‌دهد. یکی از روش هایی که در این راستا می‌توان بکار گرفت، استفاده از نانوسیالات می‌باشد.

در سال 1904 ایده استفاده از ذرات در ابعاد نانو برای اولین بار توسط ماکسول [1] مطرح گردید و انقلاب بزرگی در زمینه انتقال حرارت در سیالات پدید آمد. در واقع او دیدگاه تازه ای در مورد سوسپانسیون سیال جامد با ذراتی در ابعاد نانو مطرح کرد. اولین بار ماسودا و همکاران [2] این سیال حاوی ذرات معلق را با نام نانوسیال معرفی کردند و بعد از آنها چوی [3] در آزمایشگاه آرگون آمریکا این مفهوم را به طور گسترده ای توسعه داد. نانوسیال عبارت است از ذرات بسیار ریز جامد در ابعاد بین 1 تا 100 نانومتر که در سیال پایه معلق می‌شوند. به طور معمول نانوذرات از جنس فلزاتی مانند مس، آلومینیوم، پتاسیم، سیلیسیم و اکسیدهای آنها و همچنین نانولوله های کربن و سیالات پایه نیز عمدتا از سیالات با رسانایی نسبتا پایین تر مانند آب، اتیلن گلیکول و سیالاتی از این دسته که در صنعت به عنوان هادی انتقال حرارت مورد استفاده قرار می گیرند، می‌باشند. نانوذرات نسبت به ذرات بزرگتر مانند میکروذرات، بسیار پایدارتر بوده و سطح تماس بیشتری با ناحیه سیال دارند. در واقع دو مشخصه اصلی نانوسیال یکی پایداری بسیار زیاد و دیگری ضریب هدایت حرارتی بسیار بالای آن است. همچنین به دلیل کوچک بودن ذرات، تا حد زیادی مشکلات خوردگی و افت فشار کاهش می-یابد. در پژوهشی که فالکنر و همکاران [4] با استفاده از نانوسیال در سال 2003 انجام دادند، شاهد افزایش میزان خنک کنندگی در سیستم خنک کننده بودند. همت و همکاران [5] مطالعه‌ای تجربی بر روی خواص ترموفیزیکی نانوسیال آب –نانولوله کربنی چند جداره[1] انجام دادند. آن‌ها ضریب هدایت حرارتی این نانوسیال را در کسر های حجمی و دماهای مختلف مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها حاکی از افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌باشد. در مطالعه ای دیگر توسط همت و همکاران [6] ضریب هدایت

1. MWCNT

حرارتی نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم[1] را بصورت تجربی مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها دریافتند که فاکتورهایی ار قبیل اندازه ذرات، شرایط محیطی، و روش‌های آماده سازی نانوسیال در نتایج بدست آمده تاثیر گذار خواهند بود. در تحقیقی دیگر در سال 2014، همت و همکاران [7] خواص ترموفیزیکی نانوسیال آب- اکسید منیزیم[2] را بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که با افزایش کسر حجمی، ضریب هدایت حرارتی افزایش می‌یابد. خواص ترموفیزیکی نانوسیال آب- نانولوله کربنی دوجداره[3] بصورت تجربی توسط همت و همکاران [8] در سال 2014 مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن‌ها حاکی از این موضوع است که در کسر های حجمی پایین، دما تاثیر چشمگیری در ضریب هدایت حرارتی ندارد. سعیدی نیا و همکاران [9] رفتار حرارتی و رئولوژیکی نانوسیال روغن- اکسید مس[4] را بصورت آزمایشگاهی، مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. یافته های آنها حاکی از این موضوع است که با افزایش کسر حجمی نانوذرات، ضریب هدایت حرارتی بصورت غیر خطی افزایش پیدا می کند. با توجه به اهمیت نانوسیالات در کاربرد های انتقال حرارت و نیاز روز افزون صنایع مختلف به سیالاتی با ضریب هدایت حرارتی بالا، این سیالات از جایگاه ویژه ای در صنایع برخوردار می باشند لذا، در این پژوهش به کاربرد های نانوسیالات در صنایع پرداخته شده است.

2- کاربرد در مبدل‌های حرارتی

فرآیند سرمایش و گرمایش یکی از بزرگترین مشکلات در صنایع می‌باشد. جهت بهبود فرآیند انتقال حرارت، یکی از راهکارهای موجود افزایش سطح انتقال حرارت است که این مسئله افزایش دبی حجمی سیال خنک کننده در سیکل را به همراه داشته و در نتیجه هزینه‌ی پمپاژ افزایش یافته و به پمپ‌های بزرگتری احتیاج می‌باشد. افزایش هدایت حرارتی سیال خنک کننده در مبدل حرارتی یکی از مهمترین راههای افزایش بازدهی حرارتی و طراحی بهینه مبدل حرارتی مطرح می باشد. لی و ژوان [10] و ژوان و لی [11] به مطالعه تجربی ضریب انتقال حرارت جابجایی و ضریب اصطکاک نانوسیال در جریان آرام و مغشوش نانوسیال آب دی یونیزه شده- مس با قطر نانوذرات کمتر از 100 نانومتر درون لوله برنجی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال افزایش پیدا می کند و در مقایسه با سیال پایه، ضریب انتقال حرارتی نانوسیال با کسر حجمی 2%، 60 درصد افزایش پیدا کرده است. در مطالعه ای دیگر دوسانسوک و ونگویزز [12] به بررسی انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم در کسر حجمی 0/2 تا 2% در یک لوله افقی با جهت جریان مخالف در جریان مغشوش پرداختند و نشان دادند که ضریب انتقال حرارت جابجایی با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی افزایش می‌یابد. در پژوهشی دیگر یانگ و همکاران [12] به بررسی ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوذرات گرافیت- روغن در جریان لایه‌ای درون مبدل لوله‌ای افقی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب انتقال حرارت جابجایی با افزایش رینولدز و کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد. فرج اللهی و همکاران [13] به بررسی انتقال حرارت دو نانوسیال آب-گاما اکسید آلومینیوم با قطر 25 نانومتر و آب- اکسید تیتانیوم با قطر 10 نانومتر در یک مبدل حرارتی در جریان مغشوش پرداختند و دریافتند که انتقال حرارت با افزودن نانوذرات به سیال پایه افزایش یافته است. با توجه به تحقیقات انجام شده استفاده از نانوسیالات در مبدل های حرارتی باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود.

3- کاربرد در چیلرها

امروزه کاربرد گسترده چیلرها و تجهیزات خنک کننده بر کسی پوشیده نیست. تحقیقات متعدد آزمایشگاهی و عددی نشان داده است که استفاده از نانوسیالات می تواند بهبود قابل توجهی را در عملکرد چیلرها ایجاد نماید و با توجه به گستردگی استفاده از چیلرها در مصارف خانگی و صنعتی، صرفه جویی چشمگیری در مصرف انرژی را می‌توان شاهد بود. با استفاده از نانوسیالات با درصد حجمی 0/4 درصد در حدود 40 درصد هدایت حرارتی افزایش می‌یابد و این امر فرصتی را جهت بهبود عملکرد چیلرها در سیستم های ایرکاندیشن هوا فراهم می سازد به طوری که ظرفیت خنک کنندگی نانوسیالات در شرایط استاندارد در حدود 4/2 درصد می‌تواند افزایش یابد. نانوذرات قادر به جذب نوسانات ناشی از انرژی جنبشی توربولانس هستند و با افزایش انتقال حرارت تحت شرایط دینامیکی باعث بهتر شدن عملکرد سیستم می شوند. استفاده از نانوسیالات می تواند در حدود 5/15 درصد مقدار ضریب عملکرد[5] را نسبت به شرایط بدون نانوسیال افزایش دهد [14]. برخی از تحقیقات انجام شده در زمینه سیستم های تبرید بیانگر خواص سودمند نانوسیالات در افزایش بهره وری و قابلیت اطمینان سیستم های سرمایش می باشد، برای مثال وانگ و همکاران [15] دریافتند که نانوذرات اکسید تیتانیوم[6] می‌تواند به عنوان مواد افزودنی به منظور افزایش حلالیت روغن معدنی در مبرد مورد استفاده قرار بگیرد. در پژوهشی دیگر وو و همکاران [16] پتانسیل نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم را در سیستم های خنک کننده بررسی نمودند. نتایج آن‌ها بیانگر افزایش نرخ انجماد نانوسیالات می‌باشد. آن ها با افزودن 2 درصد نانوذرات آلومینا به سیال پایه آب زمان انجماد را در حدود 20/5 درصد کاهش و کارایی سیستم را افزایش دادند. نتایج پژوهش‌های انجام شده در این زمینه حاکی از بهبود عملکرد سیستم‌های سرمایشی با استفاده از نانوسیالات می‌باشد.

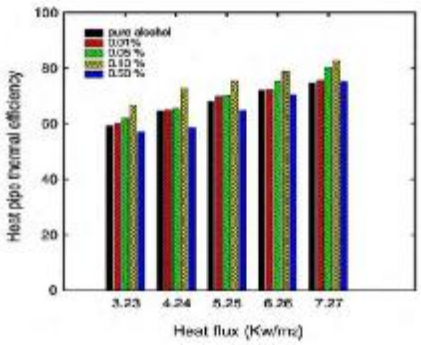
4- کاربرد در لوله حرارتی نوسانی

فرآیند خنک کاری قطعات الکترونیکی، نیازمند توسعه‌ی فناوری‌های جدید در زمینه‌ی انتقال حرارت می‌باشد و به نظر می‌رسد استفاده از لوله‌های حرارتی نوسانی یک از راهکارهای مناسب انتقال حرارت می‌باشد. لوله حرارتی نوسانی سیکل بسته از یک لوله موئینه که به صورت مارپیچ خمیده شده و دو سر آن به هم متصل شده‌اند تشکیل شده است. درون این لوله مسی از یک سیال عامل پر شده و عامل انتقال حرارت از منبع گرم به منبع سرد می‌باشد. با توجه به عملکرد حرارتی نامطلوب سیالات عامل متداول مانند آب، اتیلن گلیکول و ... امروزه از نانوسیالات به عنوان سیال عامل در این لوله‌ها استفاده می‌شود. استفاده از نانوسیالات باعث بهبود عملکرد حرارتی لوله حرارتی نوسانی می‌شود. دمای عملکرد لوله حرارتی نوسانی یکی از پارامترهای تاثیر گذار بر ظرفیت انتقال حرارت آن می‌باشد. هرچه دمای عملکرد لوله حرارتی نوسانی بالاتر باشد، ظرفیت انتقال حرارت آن افزایش می‌یابد. در پژوهشی که نافون و همکاران [17] در سال 2008 انجام دادند به بررسی عملکرد لوله حرارتی نوسانی پر شده با نانوسیال اکسید تیتانیوم را بررسی کردند. نتایج

1. Al2O3
2. MgO
3. DWCNT
4. CuO

5. COP
6. TiO2

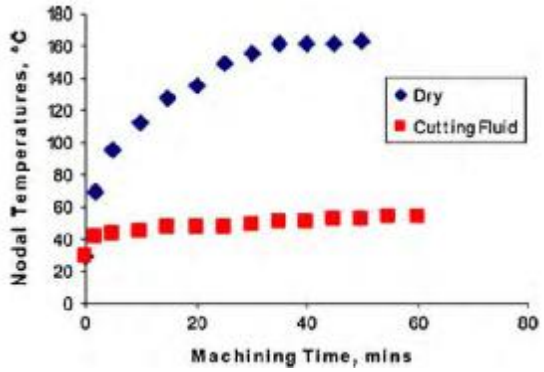
بدست آمده حاکی از افزایش بازدهی حرارتی لوله حرارتی نوسانی با افزایش غلظت نانوذرات می‌باشد. نتایج این بررسی در شکل 1 نشان داده شده است.



شکل1 بازدهی حرارتی لوله حرارتی نوسانی با توجه به شار حرارتی و کسر حجمی نانوذرات [14]

5- کاربرد در ماشینکاری

اصطکاک و حرارت بوجود آمده در حین فرآیند ماشین کاری تا کنون یکی از مشکلات طول عمر کوتاه این ماشین‌ها بوده است. به منظور برطرف کردن این مشکل از سیالات برش استفاده می شود، اما خطرات زیست محیطی ناشی از این سیالات استفاده از آنها را محدود کرده است. و همچنین توانایی انتقال حرارت و روانکاری مناسب این سیالات نیز محدود می باشد. با توجه به مشکلات این سیالات، نانوسیالات توانسته‌اند توجه محققین را به استفاده از نانوسیالات به عنوان سیال برش جذب کنند. نانوسیالات با خواص خنک کنندگی و روانکاری به عنوان یک راه حل جدید برای رفع مشکلات سیالات برش متداول، قدم به این عرصه نهاده‌اند. استفاده از سیالات برش باعث افزایش عمر دستگاه، کاهش تغییر شکل ناشی از تنش حرارتی روی قطعه‌کار و دور ساختن براده‌ها از ناحیه برشکاری می‌شود. سیالات برش باید دارای خواص مطلوبی باشند که بتوانند وظایف خود را به خوبی انجام دهند. این سیالات وظایفی از قبیل روانکاری در سرعت‌های پایین برشکاری، خنک کاری قطعه‌کار در سرعت‌های برشکاری بالا، دور ساختن براده‌ها و حفاظت ماشین در برابر خوردگی را برعهده دارند. این سیالات باید به گونه‌ای انتخاب شوند که بتوانند وظایف خود را به خوبی انجام بدهند. یک از محدودیت‌های موجود در انتخاب سیالات برش پایین بودن ضریب انتقال حرارت این نوع از سیالات می‌باشد. برای رفع این مشکل محققین توانسته‌اند با افزودن نانوذرات به این سیالات کارایی حرارتی آن‌ها را افزایش دهند. در پژوهشی که سریکان و همکاران [18] در سال 2009 انجام دادند تاثیر افزودن نانوذرات به سیالات برش را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات به سیالات برش به دلیل بالا بردن ضریب هدایت حرارتی سیالات برش، باعث می‌شود که دمای قطعه کار در مقایسه با زمانی که از سیالات برش بدون نانوذرات استفاده شود، کمتر می‌باشد. در شکل 2 توزیع دمایی در فرآیند ماشینکاری با استفاده از نانوسیال و سیال برش نشان داده شده است.



شکل 2 توزیع دمایی در فرآیند ماشینکاری در شرایط مختلف خشک و تر با استفاده از سیال برش به عنوان خنک کننده[14]

6- کاربرد در گرمایش خورشیدی آب

به منظور طبیعت تجدید پذیر و غیر آلوده کنندگی، از انرژی خورشیدی در کاربردهایی نظیر تولید الکتریسیته، گرمایش حرارتی و فرآیندهای شیمیایی استفاده می شود. بیشترین قسمت هزینه‌ی سیستم‌های خورشیدی مربوط به صفحه مسطح آن است ولی با این حال بازدهی اندک و دماهای خروجی کم این صنعت را تحت شعاع قرار می‌دهد. با توجه به اهمیت انرژی خورشید و بازدهی اندک کلکتورهای خورشیدی نیاز به بهبود بازدهی این کلکتورها به شدت احساس می‌شود. از این رو یکی از راهکارهایی که توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته است، استفاده از سیالات عامل با ضریب هدایت حرارتی بالا می‌باشد. افزودن نانوذرات به سیال پایه از جدیدترین روش‌های افزایش ضریب هدایت حرارتی سیالات می‌باشد. با افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال عامل استفاده شده در کلکتور امکان ساختن کلکتورها در ابعاد کوچکتر وجود دارد و این مسئله صرفه‌جویی اقتصادی به همراه دارد. در پژوهشی که تیاگی و همکاران [19] استفاده از نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم را به صورت تئوری برای کلکتور خورشیدی غیرمتمرکز کننده و کلکتور صفحه‌ای بررسی کردند. بررسی آن‌ها نشان می‌دهد که با استفاده از نانوسیال به عنوان سیال عامل میزان جذب انرژی حدود 9 برابر افزایش می‌یابد. همچنین بازده کلکتور نوع صفحه‌ای 10 درصد از بازده کلکتور غیر متمرکز کننده بیشتر می‌باشد. قابل توجه است که میزان ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات با افزایش کسر حجمی و افزایش دما افزایش می‌یابد.

7- کاربرد به عنوان سیال خنک کننده موتور

امروزه با پیشرفت تکنولوژی و ساخت خودروهای سبک و سنگین مدرن، میزان حرارت تولید شده در طی فرآیند احتراق توسط موتور با توجه به افزایش قدرت و توان این خودروهای افزایش یافته است. در خودروها به منظور خنک کاری موتور از سیالات متداول انتقال حرارت و رادیاتور استفاده می‌شود. تا کنون تنها راهکار برای دفع فرآیند تولید شده تغییر جنس و ابعاد رادیاتور بوده است. سیالات متداول انتقال حرارت که معمولا آب، اتیلن گلیکول یا مخلوطی از این دو می‌باشند، دارای خواص حرارتی پایینی بوده و به ناچار برای دفع حرارت از موتور باید رادیاتور را بزرگتر بسازیم که این مسئله طراحی جلوی خودرو را مشکل‌تر ساخته و وزن خودرو را افزایش می‌دهد در نتیجه تلفات زیاد توان مفید موتور را به همراه دارد. در جدول 1 ضریب هدایت حرارتی چندین نوع سیال و فلز نشان داده شده است.

جدول 1 ضریب هدایت حرارتی چندین نمونه از مایعات و جامدات

نوع ماده	هدایت حرارتی (W/m.k)
نقره	429
مس	401
آلومینیوم	237
الماس	3300
نانولوله کربنی	3000
سیلیسیم	148
آلومینا	40
سدیم (در دمای 644 کلوین)	72/3
آب	0/613
اتیلن گلیکول	0/253
روغن موتور	0/145

با افزودن ذراتی که دارای هدایت حرارتی بالایی هستند به سیال پایه، ضریب هدایت حرارتی سیال پایه افزایش می‌یابد. با استفاده از سیالات با ضریب هدایت حرارتی بالا در خنک کاری موتور قادر به طراحی رادیاتور کوچکتر خواهیم بود. از طرفی دیگر حجم سیال استفاده شده به دلیل انتقال حرارت بهتر، کمتر است و به پمپ‌های کوچکتری جهت گردش سیال نیاز خواهد بود. همچنین موتور خودرو در دماهای بالاتری می‌تواند کار کند و دستیابی به رسیدن به توان‌های بالا را امکان پذیر می‌کند. در یک پژوهش تجربی پیغمبرزاده و همکاران [20] به بررسی تاثیر نانوذرات اکسید آلومینیوم در ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال پایه‌ی آب- اتیلن گلوکول پرداختند. نتایج آن‌ها نشان دهنده‌ی افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی تا 40 درصد در حضور نانوذرات اکسید آلومینیوم می‌باشد.

8- کاربرد در خنک‌کاری قطعات الکترونیکی

امروزه دانسیته توان میکروپروسسورها به طور روز افزون در حال افزایش است. پیش بینی می شود که در سال 2018، مدار های مجتمع با کارایی بالا، شامل بیش از 9 بیلیون ترانزیستور در یک چیپ با مساحت 280 میلی متر مربع خواهند بود که این مقدار بیش از 60 برابر مقدار حال حاضر بر روی یک نود به ابعاد 90 نانومتر است. برای کارایی در این حد، به سرمایشی فراتر از مقدار خنک کاری ناشی از هوا که در سیستم های امروزی استفاده می شود نیاز است. بدین منظور از مایع تک فازی، دوفازی و یا نانوسیال می توان استفاده کرد. سای و همکاران [21] از نانوسیالی با سیال پایه آب، در لوله های گرمایشی دوار استفاده کردند که می توان از آن در پردازشگر یک کامپیوتر همراه یا یک کامپیوتر شخصی استفاده کرد. نتایج، بیانگر افزایش مشهود ضریب انتقال حرارت در نانوسیال نسبت به آب می باشد. نگوین و همکاران [22] بهبود خواص انتقال حرارتی و رفتار نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم را در یک سیستم سرمایش مدار بسته برای خنک کاری میکروپردازنده ها یا دیگر ابزار الکترونیکی مورد ارزیابی قرار دادند. با توجه به بهبود قابل توجهی که در ضریب انتقال حرارت جابجایی مشاهده شد، نتایج آنها استفاده از نانوسیال را بعنوان سیال جایگزین در این دستگاه ها تایید می کند. بر اساس گزارش آن ها در غلظت نانوسیال 6/8 % ضریب انتقال حرارت در مقایسه با سیال پایه آب، 40% افزایش پیدا کرد.

9- کاربرد به عنوان خنک کننده اصلی در راکتور هسته‌ای

در راکتورهای اتمی به دلیل انجام فرآیند شکافت هسته‌ای، میزان حرارت تولید شده درون راکتور به مقدار خیلی زیادی افزایش یافته و این حرارت تولید شده باید با سرعت و نرخ بسیار بالایی توسط یک سیال خنک کننده از راکتور خارج شده و به منظور تولید بخار جهت تولید نیروی الکتریسیته مورد استفاده قرار بگیرد. از این رو سیستم‌های انتقال حرارت کاربرد عمده‌ای در خنک کاری راکتورهای اتمی دارا می‌باشند. رایج‌ترین سیالی که وظیفه‌ی خنک کاری راکتور را بر عهده دارد آب می‌باشد. این سیال دارای ضریب انتقال حرارت جابجایی پایینی بوده و جهت خنک کاری راکتور باید سرعت جریان در سیکل افزایش یابد که این مسئله نیازمند بکارگیری پمپ‌های بزرگتر و صرفه هزینه‌ی بیشتر جهت مصرف پمپ‌ها می‌باشد. یکی دیگر از محدودیت های آب به عنوان سیال خنک کننده راکتور این است که امکان دستیابی به توان تولیدی بیشتر از 18/9 مگاوات بدون در نظر گرفتن انحراف از جوشش هسته‌ای و ماکزیمم شار حرارتی بحرانی در راکتور هسته‌ای، مقدور نمی‌باشد. با توجه به اینکه تولید انرژی مسئله‌ای حائز اهمیت می‌باشد محققین به دنبال دستیابی به توان تولیدی بیشتر در راکتورهای هسته‌ای می‌باشند. با پیشرفت تکنولوژی در زمینه‌ی نانوسیالات امکان دستیابی به توان تولیدی بیشتر در راکتور فراهم شده است. در پژوهشی هو و بونگیورنو [23] بررسی‌هایی برروی جایگزینی سیال خنک کننده‌ی راکتور هسته‌ای با نانوسیالات انجام داده‌اند. آن‌ها یک نیروگاه هسته‌ای آب فشرده ساخت شرکت وستینگ هاوس را مورد بررسی قرار دادند. در بررسی انجام شده از نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم در درصدهای حجمی 0/001% و 0/01% استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با ثابت در نظر گرفتن جوشش هسته‌ای و با استفاده از نانوسیال 10 تا 20 درصد دمای خروجی از راکتور هسته‌ای در مقایسه با آب بیشتر می‌باشد. همچنین میزان توان تولید شده در راکتور 20 درصد افزایش می‌یابد.

10- نتیجه‌گیری

در این پژوهش استفاده از نانوسیالات در مبدل‌های حرارتی، لوله حرارتی نوسانی، چیلرها، گرمایش خورشیدی آب، ماشینکاری، خنک‌کاری موتور خودروها، خنک‌کاری قطعال الکترونیکی و خنک‌کاری راکتورهای هسته‌ای مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از نانوسیال به دلیل بالا بردن ضریب انتقال حرارت باعث بهبود عملکرد سیستم‌های مورد بررسی شده و صرفه‌جویی انرژی به همراه دارد.

11- مراجع

[۱] J. C. Maxwell, A treatise on electricity and magnetism, Vol. I & II, Claredon, Oxford, 1904 .
[۲] S. Murshed, K. Leong, C. Yang, Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 47, No ,٥ .pp. 560-568, 2008 .
[۳] S. Chol, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *ASME-Publications-Fed*, Vol. 231, pp. 99-106, 1995 .
[٤] D. Faulkner, M. Khotan, R. Shekarriz, Practical design of a 1000 W/cm 2 cooling system [high power electronics], in *Proceeding of*, IEEE, pp. 223-230 .
[٥] M. H. Esfe, S. Saedodin, O. Mahian, S. Wongwises, Thermophysical properties, heat transfer and pressure drop of COOH-functionalized multi walled carbon nanotubes/water nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 58, pp. 176-183, 2014 .
[٦] M. H. Esfe, S. Saedodin, O. Mahian, S. Wongwises, Thermal conductivity of Al2O3/water nanofluids, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 117, No. 2, pp. 675-681, 2014 .
[۷] M .H. Esfe, S. Saedodin, M. Mahmoodi, Experimental studies on the convective heat transfer performance and thermophysical properties of

MgO–water nanofluid under turbulent flow, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 52, pp. 68-78, 2014 .

[۸] M. H. Esfe, S. Saedodin, O. Mahian, S. Wongwises, Heat transfer characteristics and pressure drop of COOH-functionalized DWCNTs/water nanofluid in turbulent flow at low concentrations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 73, pp. 186-194, 2014 .

[۹] M. Saeedinia, M. Akhavan-Behabadi, P. Razi, Thermal and rheological characteristics of CuO–Base oil nanofluid flow inside a circular tube, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 1, pp. 152-159, 2012 .

[۱۰] Q. Li, Y. Xuan ,Convective heat transfer and flow characteristics of Cu-water nanofluid, *Science in China Series E: Technolgical Science*, Vol. 45, No. 4, pp. 408-416, 2002 .

[۱۱] Y. Xuan, Q. Li, Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids ,*Journal of Heat transfer*, Vol. 125, No. 1, pp. 151-155, 2003 .

[۱۲] W. Duangthongsuk, S. Wongwises, An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO 2-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, No. 1, pp. 334-344, 2010 .

[۱۳] B. Farajollahi, S. G. Etemad, M. Hojjat, Heat transfer of nanofluids in a shell and tube heat exchanger, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, No. 1, pp. 12-17, 2 .۲۰۱۰

[۱٤] R. Saidur, K. Leong, H. Mohammad, A review on applications and challenges of nanofluids, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 3, pp. 1646-1668, 2011 .

[۱٥] R. Wang, B. Hao, G. Xie, H. Li, A refrigerating system using HFC134a and mineral lubricant appended with n-TiO2 (R) as working fluids, in *Proceeding of*, 888-892 .

[۱٦] S. Wu, D. Zhu, X. Li, H. Li, J. Lei, Thermal energy storage behavior of Al 2 O 3–H 2 O nanofluids, *Thermochimica Acta*, Vol. 483, No. 1, pp. 73-77, 2009 .

[۱۷] P. Naphon, P. Assadamongkol, T. Borirak, Experimental investigation of titanium nanofluids on the heat pipe thermal efficiency, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, No. 10, pp. 1316-1319, 2008 .

[۱۸] R. Srikant, D. Rao, M. Subrahmanyam, V. P. Krishna, Applicability of cutting fluids with nanoparticle inclusion as coolants in machining, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Vol. 223, No. 2, pp. 221-225, 2009 .

[۱۹] H .Tyagi, P. Phelan, R. Prasher, Predicted efficiency of a low-temperature nanofluid-based direct absorption solar collector, *Journal of solar energy engineering*, Vol. 131, No. 4, pp. 041004, 2009 .

[۲۰] S. Peyghambarzadeh, S. Hashemabadi, S. Hoseini, M. S .Jamnani, Experimental study of heat transfer enhancement using water/ethylene glycol based nanofluids as a new coolant for car radiators, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 9, pp. 1283-1290, 2011 .

[۲۱] C. Tsai, H. Chien ,P. Ding, B. Chan, T. Luh, P. Chen, Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance, *Materials Letters*, Vol. 58, No. 9, pp. 1461-1465, 2004 .

[۲۲] C. Nguyen, G. Roy, S. Maiga, P. Lajoie, Heat transfer enhancement by using nanofluids for cooling of high heat output microprocessor, *Electronics Cooling*, *TechBrief*, pp. 1-4, 2007 .

[۲۳] J. Buongiorno, L.-W. Hu, S. J. Kim, R. Hannink, B. Truong, E. Forrest, Nanofluids for enhanced economics and safety of nuclear reactors: an evaluation of the potential features, issues, and research gaps, *Nuclear Technology*, Vol. 162, No. 1, pp. 80-91, 2008 .