مروری بر انتقال حرارت نانوسیالات هیبریدی سه گانه برای شرایط هندسی مختلف

بهمن رحمتی نژاد[۱]

[۱]گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

چکیده

نانوسیالات، حاصل تعلیق نانوذرات (با ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) در سیالات پایه، پتانسیل چشمگیری در بهبود خواص فیزیکی و حرارتی سیال دارند. در سال‌های اخیر، نانوسیالات هیبریدی سه گانه که از ترکیب سه نوع مختلف نانوذره در یک سیال پایه تشکیل شده‌اند، به عنوان ابزاری نوین در کاربردهای انتقال حرارت مورد توجه قرار گرفته‌اند. بررسی‌های انجام شده بر روی منابع متعدد نشان می‌دهد که استفاده از این نانوسیالات هیبریدی سه گانه، مزایای قابل توجهی نسبت به نانوسیالات هیبریدی و تک جزئی دارد. پارامترهایی نظیر نرخ انتقال حرارت، ویسکوزیته، پایداری سیال، عدد ناسلت، ضریب انتقال حرارت، راندمان ذخیره انرژی و سرعت انتقال حرارت در نانوسیالات هیبریدی سه گانه، مقادیر بالاتری را نشان می‌دهند. به طور مثال در یکی از بررسی ها نشان داده شد در غلظت یک درصد حجمی نانوذرات، انتقال حرارت به ترتیب 3.71، 4.32 و 5.41 درصد برای نانوسیال تکی، هیبریدی و هیبریدی سه گانه افزایش می یابد. و یا در پژوهشی دیگر نشان داده شد عدد ناسلت به ترتیب افزایش 9.8، 19.85 و 44.04 درصد را برای سه نانو سیالات مطرح شده نشان داد.

واژه‌های کلیدی: *نانو سیال، نانو سیال هیبریدی، نانو سیال هیبریدی سه گانه، نانو ذره، انتقال حرارت*

ایمیل نویسنده مسئول:brahmati@nus.ac.ir

تاریخ دریافت : ۱۴۰۴/۹/۲۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۲

فصلنامه ISC انجمن نانو فناوری ایران

[۱] . مربی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران. brahmati@tvu.ac.ir

۱-مقدمه

نانو سیال‌ها (Nanofluids) به مایعاتی اطلاق می‌شود که نانوذرات (معمولاً با اندازه‌ای در حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) به آن‌ها اضافه شده است [۱]. این نانوذرات می‌توانند از مواد مختلفی مانند فلزات، اکسیدهای فلزی، کربن و غیره ساخته شوند. تاریخچه نانو سیال‌ها به اوایل دهه ۱۹۹۰ میلادی برمی‌گردد، زمانی که تحقیقات اولیه در زمینه نانو فناوری و کاربردهای آن در مهندسی و انتقال حرارت آغاز شد. در سال ۱۹۹۵، مقاله‌ای توسط "Choi" منتشر شد که در آن تأثیر نانوذرات بر خواص حرارتی مایعات بررسی شد. این مقاله به عنوان نقطه عطفی در توسعه نانو سیال‌ها شناخته می‌شود. در اوایل دهه ۲۰۰۰، تحقیقات در زمینه نانو سیال‌ها به شدت افزایش یافت. محققان به بررسی خواص حرارتی، ویسکوزیته [۲] و پایداری نانو سیال‌ها پرداختند. همچنین کاربردهای مختلفی از جمله در سیستم‌های خنک‌کننده، تهویه مطبوع و صنایع الکترونیکی مورد بررسی قرار گرفت. با پیشرفت فناوری نانو، روش‌های جدیدی برای تولید و پایدارسازی نانو سیال‌ها توسعه یافت. همچنین مطالعات بیشتری در زمینه تأثیر نوع و اندازه نانوذرات بر خواص سیال‌ها انجام شد. در سال‌های اخیر، تحقیقات به سمت بهینه‌سازی ترکیبات نانو سیال‌ها و بررسی کاربردهای جدید در زمینه‌های مختلف از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر، پزشکی و صنایع خودروسازی متمرکز شده است.

نانو سیال‌های هیبریدی (Hybrid Nanofluids) نوعی از نانو سیال‌ها هستند که در آن‌ها دو یا چند نوع نانوذره با ویژگی‌های مختلف به یک مایع پایه اضافه می‌شود. این ترکیب نانوذرات مختلف می‌تواند به بهبود خواص حرارتی، پایداری و عملکرد نانو سیال کمک کند. نانو سیال‌های هیبریدی به دلیل توانایی‌های منحصر به فرد خود در بهبود انتقال حرارت و کارایی سیستم‌های حرارتی، مورد توجه محققان و مهندسان قرار گرفته‌اند.

نانو سیال‌های هیبریدی سه‌گانه (Triple Hybrid Nanofluids)نوعی جدیدی از نانو سیال‌ها هستند که در آن‌ها سه نوع نانوذره مختلف به یک مایع پایه اضافه می‌شود. این نوع نانو سیال‌ها به دلیل ترکیب ویژگی‌های منحصر به فرد نانوذرات مختلف، می‌توانند خواص حرارتی و فیزیکی بهتری نسبت به نانو سیال‌های هیبریدی دوگانه یا نانو سیال‌های تک‌ذره‌ای ارائه دهند.

ویژگی های اصلی نانو سیال هیبریدی سه گانه

- خواص حرارتی بهبود یافته: ترکیب نانوذرات مختلف می‌تواند به طور قابل توجهی هدایت حرارتی و کارآیی انتقال حرارت سیال را افزایش دهد.
- تنوع در خواص: با ترکیب نانوذرات با خواص مختلف، می‌توان به ویژگی‌های مطلوبی دست یافت که می‌تواند به بهبود

عملکرد در شرایط خاص منجر شود. به عنوان مثال، ترکیب نانوذرات فلزی با نانوذرات کربنی و اکسیدهای فلزی می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی و حرارتی نانو سیال کمک کند.

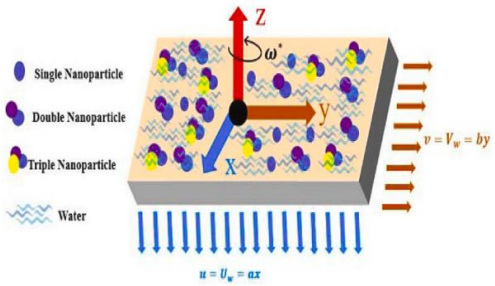
- ❖ تنوع در کاربرد: نانو سیالات هیبریدی سه گانه در زمینه‌های مختلف صنعتی، از جمله سیستم‌های خنک‌کننده، مبدل‌های حرارتی و سایر سیستم‌های مدیریت حرارتی مورد تحقیق و بررسی قرار می‌گیرند.
- ❖ پایداری بیشتر: استفاده از چندین نانوذره ممکن است ثبات نانو سیال را بهبود بخشد و از ته نشینی و کاهش عملکرد طولانی مدت جلوگیری کند.
- ❖ کاهش ویسکوزیته: نانو سیال‌های هیبریدی ممکن است ویسکوزیته کمتری نسبت به نانو سیال‌های تک‌ذره‌ای داشته باشند، که این امر می‌تواند به بهبود جریان و انتقال حرارت کمک کند.

عملکرد نانوسیالات هیبریدی سه گانه تحت تأثیر شرایط هندسی مختلفی است، از جمله:

۱. هندسه جریان:
   - لوله‌های مستقیم در برابر کانال‌های منحنی: ویژگی‌های انتقال حرارت می‌تواند به‌طور قابل توجهی متفاوت باشد؛ جریان در لوله‌های مستقیم معمولاً انتقال حرارتی یکنواخت دارد، در حالی که کانال‌های منحنی ممکن است جریان‌های ثانویه را القاء کنند که باعث بهبود اختلاط و نرخ‌های انتقال حرارت می‌شود.
   - میکروکانال‌ها و رسانه‌های متخلخل: نانوسیالات هیبریدی سه گانه به‌ویژه در کاربردهای میکروکانالی به‌خاطر توانایی‌شان در افزایش نسبت سطح به حجم، به طور قابل توجهی در بهبود نرخ انتقال حرارت مؤثر هستند.
۲. زبری سطح: زبری سطوح می‌تواند بر رژیم‌های جریان و ضرایب انتقال حرارت تأثیر بگذارد. نانوسیالات هیبریدس سه گانه می‌توانند به شرایط زبری مختلف سازگار شوند و اغلب منجر به بازده حرارتی بهتری شوند.
۳. شرایط جابجایی: شکل و انحنای سطوح بر نرخ‌های جابجایی طبیعی تأثیر می‌گذارد. نانوسیالات هیبریدی سه گانه می‌توانند در مقدار زیادی انحنا بهتر از سیالات سنتی عمل کنند، به‌ویژه در هندسه‌های مخروطی یا ذوزنقه ای.
۴. شرایط مرزی: شرایط مرزی حرارتی مختلف (مانند دمای ثابت در برابر شار حرارتی ثابت) می‌تواند ویژگی‌های انتقال حرارت را تحت تأثیر قرار دهد. نانوسیالات هیبریدی سه گانه می‌توانند برای هر دو وضعیت بهینه‌سازی شوند بسته به نیاز کاربردی.

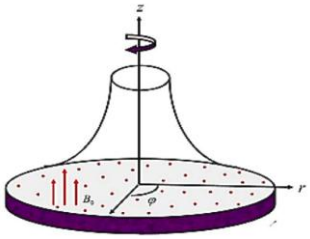
در این تحقیق انتقال حرارت نانوسیالات هیبریدی سه گانه که برای شرایط هندسی مختلف توسط پژوهشگران بررسی شده است جمع آوری شده است.

ارشد و همکاران در سال ۲۰۲۳ بررسی انتقال گرما و جرم تحت واکنش شیمیایی مرتبه اول و تابش حرارتی را به روش عددی بر روی نانو سیال مونو؛ هیبریدی و هیبریدی سه گانه انجام دادند. نتایج عددی با مطالب منتشر شده قبلی بررسی و مورد تایید قرار گرفت. آنها از نانو ذرات $Cu - Al2O3 - TiO2/H2O$ استفاده نمودند. آنها در تحقیق خود تأثیر ترکیبی اثر سورت و دوفور بر روی سطح متخلخل قابل کشش دوگانه را بررسی کردند. شار جرم ایجاد شده توسط گرادیان دما به عنوان اثر انتشار حرارتی (Soret) شناخته می شود. شار انرژی ناشی از اختلاف غلظت به عنوان اثر انتشار-ترمو (Dufour) شناخته می شود. گرمای بالا و سرعت انتقال جرم در غیاب پارامتر چرخش و محیط متخلخل برای همه انواع نانوسیال ها مشاهده شود. اصطکاک سطح در امتداد محور x و محور y با افزایش چرخش مایع افزایش یافت (شکل ۱). علاوه بر این ۳۳ درصد بهبود در نرخ انتقال حرارت و کاهش اصطکاک سطح برای نانوسیال هیبریدی سه گانه در مقایسه با نانوسیالات هیبریدی و تکی مشاهده شد [۳].



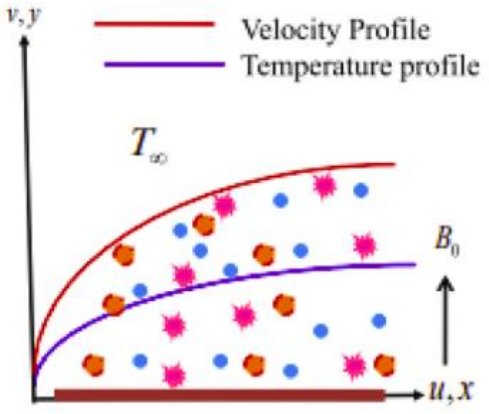
شکل ۱. هندسه سطح کششی دوگانه ارائه شده توسط ارشد و همکاران [۳]

الشهرانی و همکاران در سال ۲۰۲۲ به شبیه سازی عددی جریان نانوسیال سه تایی با شرایط لغزش و پرش حرارتی متعدد پرداختند. این تحقیق به پیامدهای تابش حرارتی با شرایط مرزی لغزش و یک میدان مغناطیسی یکنواخت بر روی یک جریان دوبعدی ثابت نانوسیال‌های هیبریدی سه گانه بر روی یک دیسک در حال چرخش می‌پردازد. نانوذرات اکسید آلومینیوم ($Al2O3$)، دی اکسید زیرکونیوم ($ZrO2$) و نانولوله های کربنی (CNTs) در آب سنتز شودند. نتایج نشان داد، ضریب لغزش میدان سرعت را به شدت کاهش می دهد. برای تقریب های بزرگتر از ویژگی های تابش حرارتی و منبع گرما؛ پروفایل حرارتی افزایش می یابد (شکل ۲). در حالت کلی نانوسیال سه تایی نسبت به هیبرید و نانوسیال ویژگی‌های حرارتی افزایش‌یافته‌ای را نشان می دهد. این مدل پیشنهادی در زمینه هواشناسی، مطالعات جوی، فناوری بیولوژیکی، تولید برق، ساخت خودرو، تبدیل انرژی تجدیدپذیر و شناسایی ریزتراشه ها می تواند مورد استفاده قرار گیرد [۴].



شکل ۲. دیسک چرخان ارائه شده توسط الشهرانی و همکاران[٤]

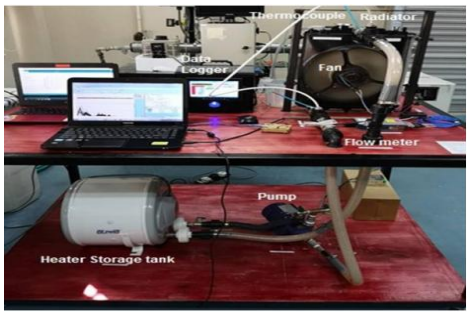
رمضان و همکاران در سال ۲۰۲۳ به ارزیابی محاسباتی نانوسیال هیبریدی سه تایی Carreau تحت تأثیر جریان MHD (مغناطیس هیدرودینامیک) برای تولید آنتروپی پرداختند. آنها در این تحقیق از نانوذرات نقره (Ag)، دی سولفید مولیبدن (Mo S2)، و نانولوله کربنی چند جداره (MW CN T) استفاده کردند. کربوکسی متیل سلولز (CMC-water) به عنوان سیال پایه استفاده شود. ویژگی های متعددی مانند سرعت جریان، دما، اصطکاک کششی و عدد ناسلت مورد بررسی قرار گرفت. افزایش مقادیر پارامتر تشعشع، نرخ انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، نشان داده شد که اهمیت بیشتر پارامتر میدان مغناطیسی باعث کاهش تولید آنتروپی و سرعت مایع می شود. در حالت کلی می توان گفت عدد ناسلت نانوسیال هیبریدی سه تایی در مقایسه با نانوسیال مونو و هیبریدی برای پارامترهای تشعشع بیشتر است (شکل ۳).



شکل ۳. پروفیل دما و سرعت ارائه شده توسط رمضان و همکاران[۵]

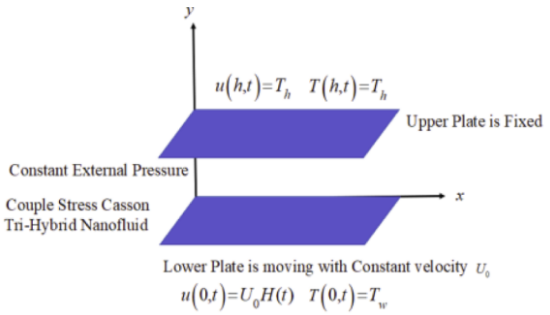
استفاده از نانوسیالات خنک‌کننده در رادیاتور خودرو، به‌عنوان یک فناوری نوین، پتانسیل قابل توجهی در بهبود عملکرد سیستم خنک‌کننده دارد. این سیالات، با معلق‌سازی نانوذرات با هدایت حرارتی بالا در سیال پایه (مانند آب یا اتیلن گلیکول)، قادرند ضریب انتقال حرارت را به طور چشمگیری افزایش دهند. این افزایش ضریب انتقال حرارت، به دو مزیت کلیدی منجر می‌شود: اولاً، توانایی رادیاتور در انتقال حرارت از موتور به محیط افزایش می‌یابد. ثانیاً، با توجه به افزایش کارایی انتقال حرارت، امکان طراحی و تولید رادیاتورهایی با ابعاد کوچکتر فراهم می‌شود. این کاهش حجم، علاوه بر سبک‌سازی خودرو، فضای بیشتری را در محفظه موتور ایجاد کرده و امکان مانورپذیری بهتری را برای طراحان فراهم می‌کند. در نتیجه، استفاده از نانوسیالات خنک‌کننده، گامی مؤثر در راستای بهبود راندمان سیستم خنک‌کننده، کاهش وزن خودرو و افزایش فضای موجود در محفظه موتور به شمار می‌رود. رامادا و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی انتقال حرارت رادیاتور خودرو با استفاده از نانو خنک کننده هیبریدی سه گانه پرداختند (شکل ۴). در این تحقیق ویژگی‌های انتقال حرارت نانوسیال Al 2 O 3 - TiO 2 - SiO 2 مبتنی بر آب / اتیلن گلیکول به صورت تجربی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و با مخلوط آب / اتیلن گلیکول مقایسه شد.آزمایش‌ها با تغییر نرخ جریان مایع خنک‌کننده بین ۲ تا ۱۲ LPM برای دمای کاری ۷۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد، سرعت جریان هوا به طور متوسط ۴ متر بر ثانیه باقی ماند تا تأثیر سرعت جریان خنک‌کننده بر انتقال حرارت بررسی شود. نتایج نشان داد که ضریب انتقال حرارت نانوسیال هیبریدی سه گانه با افزایش غلظت حجمی و دما افزایش می یابد. حداکثر افزایش ضریب انتقال حرارت برای سمت خنک کننده در ۳۹.۷٪ در غلظت ۰.۳٪ حجم مشاهده می شود. افت فشار و قدرت

پمپاژ دارای الگوی یکسانی هستند که با افزایش غلظت حجمی، افت فشار و قدرت پمپاژ به دلیل غلظت نانوسیال افزایش می یابد [۶].



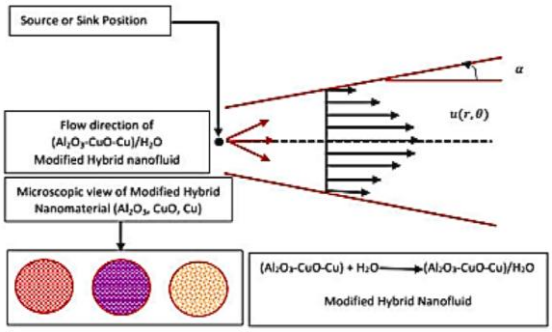
شکل ٤: مدل آزمایشگاهی رادیاتور خودروی ارائه شده توسط رامادا و همکاران[٦]

عارف و همکاران در سال ۲۰۲۳ به تجزیه و تحلیل انتقال حرارت نانوسیال هیبریدی سه گانه با استفاده از نانوذرات شکل غیرمشابه در خون پرداختند (شکل ۵). در مطالعه حاضر سه نانوذره با شکل های مختلف به طور یکنواخت در خون پراکنده شده اند. مسئله از طریق معادلات تکانه و انرژی بر حسب معادلات دیفرانسیل جزئی مجهز به شرایط اولیه و مرزی واقعی فیزیکی فرموله شود. حل معادلات سرعت و دما با استفاده از هر دو تبدیل لاپلاس و تبدیل فوریه به دست آمده است، در حالی که تأثیر پارامترهای فیزیکی بر پروفیل‌های سرعت و دما، به صورت گرافیکی با بهره‌برداری از MATHCAD تحلیل شده است. نتایج نشان داد برای مقادیر بالاتر کسر حجمی از نانوذرات، سرعت سیال کاهش می‌یابد، در حالی که دما افزایش می‌یابد. استفاده از نانوسیال هیبریدی سه تایی مبتنی بر خون، سرعت انتقال حرارت را برای Fe3O4 کروی شکل، نانوذرات پلاکتی (Zn) و استوانه ای شکل نانوذرات طلا (Au) به ترتیب 8.05%، 4.63%، 8.984% و 10.407% افزایش نشان می دهد [۷].



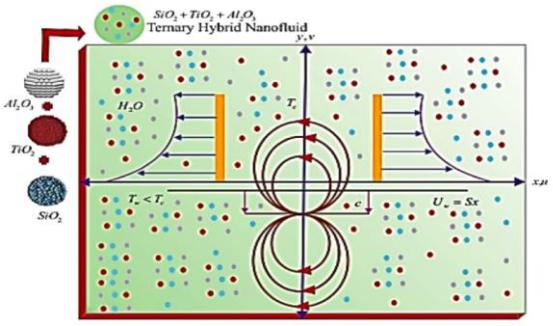
شکل ۵. مدل کانال ارائه شده توسط عارف و همکاران[۷]

عدنان و همکاران در سال ۲۰۲۲ به تحلیل عددی راندمان حرارتی در نانوسیالات هیبریدی (Al2O3-CuO/H2O) و هیبریدی سه گانه (Al2O3 CuO-Cu/H2O) بین کانال همگرا/ واگرا پرداختند (شکل ۶). نتایج نشان داد نانوسیال هیبریدی سه گانه Al2O3-CuO-Cu/H2O دارای راندمان ذخیره انرژی حرارتی بالایی نسبت به نانوسیالات سنتی و هیبریدی است [۸].



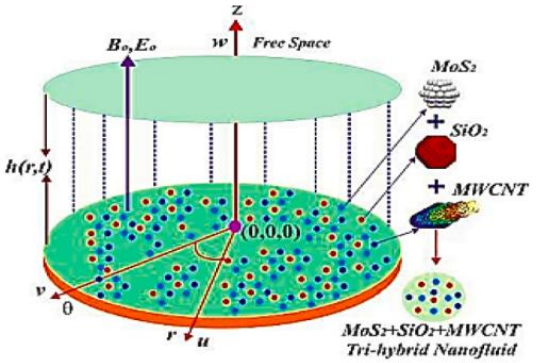
شکل ٦. کانال همگرا/ واگرا ارائه شده توسط عدنان و همکاران[۸]

نصیر و همکاران در سال ۲۰۲۳ تاثیر تجزیه و تحلیل آنتروپی و تشعشع بر انتقال نانوسیال پیشرفته MHD در سطح متخلخل با استفاده از مدل دارسی-فورچهایمر را بررسی کردند (شکل ۷). در این تحقیق از نانوسیال سه‌گانه هیبریدی مبتنی بر آب SiO2، TiO2 و Al2O3 برای اهداف خنک کاری در علوم مهندسی استفاده شد. نتایج نشان داد نانوسیال‌های هیبریدی سه‌گانه با افزایش غلظت حجمی، بهبودی در سرعت انتقال حرارت نشان دادند [۹].



شکل ۷. نمای گرافیکی مدل جریان ارائه شده توسط نصیر و همکاران[۹]

زکی الله و همکاران در سال ۲۰۲۳ به جریان لایه نازک نانوسیال هیبریدی سه تایی بر روی یک دیسک در حال چرخش تحت تأثیر میدان مغناطیسی پرداختند (شکل ۸). آنها در تحقیق خود از نانوسیالات هیبریدی سه گانه مگنتوهیدرودینامیک وابسته به زمان شامل دی سولفید مولیبدن (MoS2)، دی اکسید سیلیکون (SiO2)، نانولوله های کربنی چند جداره (MWCNT)، آب (H2O)، هیبرید (MWCNT MoS2/H2O +) و نانوسیال (MWCNT /H2O) استفاده کردند. تأثیر برخی از پارامترهای فیزیکی مهم بر روی مشخصات جریان سیال، میدان های دما، نیروی پسا و نرخ انتقال حرارت بررسی شد. نتایج نشان داد نانوسیالات هیبریدی سه تایی در مقایسه با نانوسیال‌های منفرد، در افزایش عملکرد حرارتی سیالات سنتی کارآمدتر هستند [۱۰].

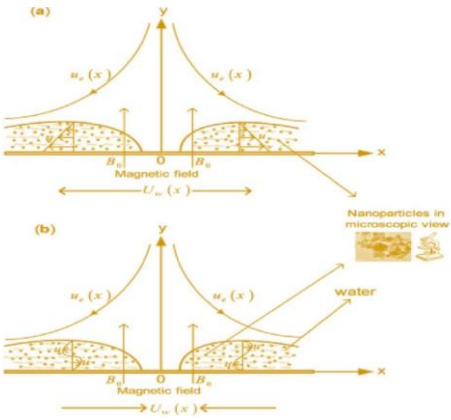


شکل ۸. دیسک چرخان تحت تأثیر میدان مغناطیسی ارائه شده توسط زکی الله و همکاران [۱۰]

زکی الله در سال ۲۰۲۳ تجزیه و تحلیل برگشت ناپذیری نانو جریان هیبریدی سه گانه به روش مارانگونی (Marangoni) برای تقویت حرارتی را انجام داد. در این تحقیق یک میدان مغناطیسی و تابش حرارتی برای بهبود بیشتر هدایت حرارتی سیال پایه استفاده شود. برگشت ناپذیری تحت تأثیر پارامترهای تعبیه شده تجزیه و تحلیل شود. معادلات پایه برای نانوسیالات هیبریدی سه تایی با استفاده از مفهوم شباهت از معادلات دیفرانسیل جزئی (PDEs) به معادلات دیفرانسیل معمولی (ODEs) تبدیل شد. ایده جابجایی مارانگونی در مدل ریاضی برای اختلاف دما بین دو محیط استفاده می شود: سطح و سیال. نتایج به دست آمده ارائه و مورد بحث قرار گرفت. نتایج نشان

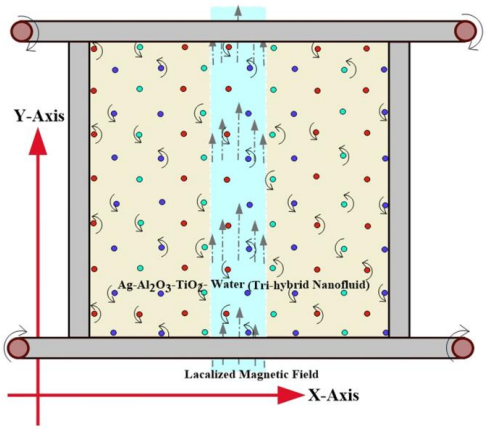
داد در غلظت ۱ درصد حجمی نانوذرات انتقال حرارت را به ترتیب 3.71، 4.32 و 5.41 درصد برای نانوسیال تک، هیبریدی و هیبریدی سه گانه افزایش می دهد [۱۱].

محمود و همکاران در سال ۲۰۲۳ به تجزیه و تحلیل عددی نانوسیال هیبریدی سه گانه بر روی یک ورق کششی پرداخته و نشان دادند حرکت ورق باعث ایجاد جریان در سیال اطراف می‌شود همچنین در بسیاری از موارد عملی، حرارت می‌تواند درون مایع تولید یا جذب شود که بر روی میدان دما و ویژگی‌های انتقال حرارت تأثیر می‌گذارد (شکل ۹). آنها ویژگی‌های جریان را با پارامترهای مختلف مانند غلظت نانوذرات، شدت میدان مغناطیسی، نرخ‌های تولید/جذب حرارت و شرایط لغزش در مرز مطالعه نمودند. و برای تحلیل از معادلات ناویر-استوکس استفاده نمودند. در مقایسه با سیالات معمولی، عدد ناسلت به ترتیب پیشرفت‌های تقریباً 9.8%، 19.85% و 44.04% را برای نانوسیال‌های تک، هیبریدی و هیبریدی سه گانه نشان می‌دهد [۱۲].



شکل ۹. مکانیسم جریان فیزیکی سیالات

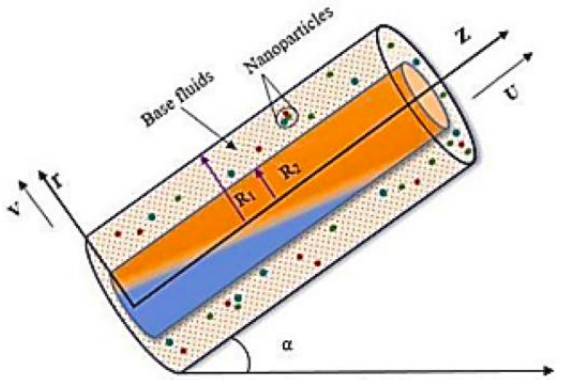
شبیر احمد و همکاران در سال ۲۰۲۳ به تحلیل عددی نقش میدان مغناطیسی موضعی در تولید گرداب در جریان نانوسیال هیبریدی سه گانه پرداخته و نشان دادند میدان مغناطیسی می‌تواند نانوذرات موجود در سیال را تحت تأثیر قرار دهد و باعث ایجاد جاذبه یا دافعه بین آن‌ها شود که این امر می‌تواند منجر به تغییر توزیع نانوذرات در طول جریان و به‌ویژه در نزدیکی ورق شود (شکل ۱۰). همچنین می‌تواند باعث ایجاد ناهماهنگی در جریان شده و منجر به تشکیل گردابه‌هایی در نقاط خاصی از جریان گردد. این گردابه‌ها می‌توانند به‌عنوان مناطق تجمع انرژی و حرارت عمل کنند و در نتیجه، افزایش انتقال حرارت و کاهش دما را در سایر نواحی تسهیل کند. بنابراین میدان مغناطیسی با تغییر الگوی جریان گاز یا مایع در اطراف ورق به بهبود کارایی در فرآیندهای حرارتی کمک می کند [۱۳].



شکل ۱۰. تصویر شماتیک مسئله

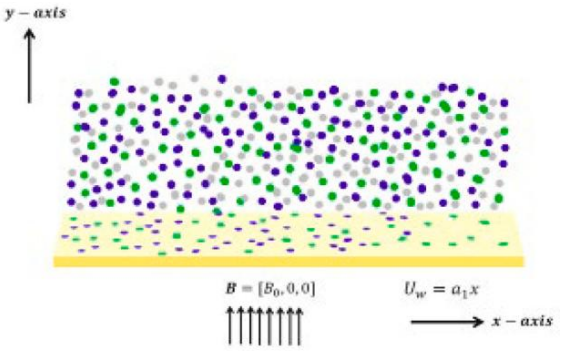
فصلنامه انجمن نانو فناوری ایران ISC ه

راتوره و ساندیپ در سال ۲۰۲۳ با ارائه یک طراح هندسی جدید از لوله‌های کلکتور خورشیدی سعی در حداکثر کردن جذب حرارت نمودند (شکل ۱۱). آنها برای این منظور از نانو سیال هیبریدی سه گانه Cu/Al2O3/GO استفاده نمودند. آنها سرعت، دما و نرخ‌های انتقال حرارت را در ترکیب های مختلف مورد بررسی قرار دادند. معادلات حاکم بر جریان با استفاده از روش کِللر باکس حل شد [۱۴].



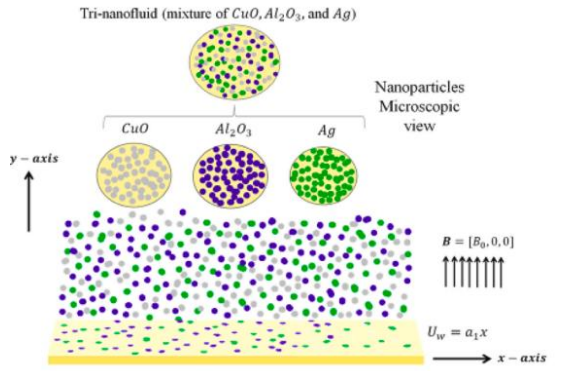
شکل ۱۱. لوله جمع کننده حرارت خورشیدی

مدخالی در سال ۲۰۲۲ نشان داد نانو سیالات معمولی، ترکیبی و سه‌گانه تأثیرات مغناطیسی متفاوتی را نشان می‌دهند (شکل ۱۲). نانو سیال ترکیبی در مقایسه با نانو سیالات مونو و سه‌گانه بیشترین نیروی مغناطیسی را تجربه می‌کند. نانو سیال هیبریدی سه گانه بیشترین تنش برشی را بر روی مرز جامد اعمال می‌کند، در حالی که کمترین تنش برشی بر روی دیواره در مورد نانو سیال معمولی مشاهده می‌شود. عدد ناسلت برای نانوذرات هیبریدی سه گانه در مقایسه با نانوذرات تکی ۵۹ درصد افزایش یافت [۱۵].



شکل ۱۲. ورق کششی ارائه شده توسط مدخالی

موگنم و المانیا در سال ۲۰۲۲ مطالعه عددی بازده حرارتی در نانو سیالات معمولی، هیبریدی و هیبریدی سه گانه در سال سوتربی را بررسی کردند (شکل ۱۳) سیالات سوتربی یک کلاس از سیالات غیرنیوتونی هستند که با رفتار منحصربه‌فرد خود در زمانی که تحت تنش برشی قرار می‌گیرند، مشخص می‌شوند. این سیالات به نام پژوهشگرانی که آن‌ها را معرفی کردند، نامگذاری شده‌اند و خواص آن‌ها با سیالات نیوتونی (که ویسکوزیته ثابت و مستقل از نرخ برش دارند) متفاوت است. آنها برای این آزمایش از نانوذرات Cuo; Al2O3; Ag (EG) استفاده نمودند. نتایج نشان داد نانو سیال هیبریدی سه گانه حداکثر سرعت انتقال حرارت را دارد [۱۶].



شکل ۱۳. شماتیک ارائه شده توسط موگنم و المانیا

شمش الدین و همکاران در سال ۲۰۲۳ به مطالعه مکانیزم‌های تابش بر روی جریان نانو سیال هیبریدی سه‌گانه روی دیسک چرخان پرداختند و نشان دادند دیسک چرخان نیروی گریز از مرکز ایجاد می‌کند که بر جریان نانو سیال تأثیر می‌گذارد (شکل ۱۴). این می‌تواند منجر به یک پروفایل سرعت و توزیع دما پیچیده شود. در مایعات رسانا که تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار دارند، هاله مغناطیسی به وجود می‌آید. این هاله های مغناطیسی بر رفتار جریان تأثیر می‌گذارند و می‌توانند منجر به تغییر در میدان‌های سرعت و دما شوند. معادلات حاکم برای جریان از معادلات ناویر-استوکس، معادله پیوستگی و معادله انرژی استخراج شود [۱۷].

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.(\rho u) = 0 \qquad (۱)$$

معادله مومنتوم:

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u.\nabla u\right) = -\nabla p + \mu\nabla^2 u + F_{Hall} + F_{Centrifugal} \qquad (۲)$$

معادله انرژی:

$$\rho C_p\left(\frac{\partial T}{\partial t} + u.\nabla T\right) = k\nabla^2 T + Q_{rad} \qquad (۳)$$

که در آن:

ρ: چگالی

u: بردار سرعت

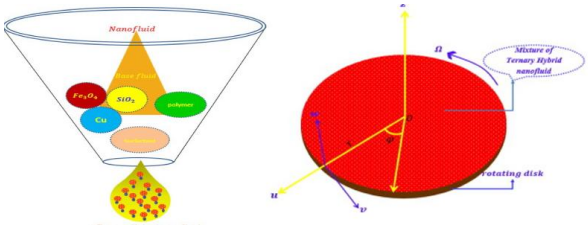
p: فشار

μ: ویسکوزیته دینامیکی

C_p: ظرفیت حرارتی ویژه

k: هدایت حرارتی

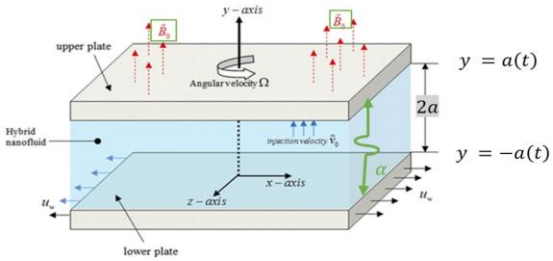
Q_{rad}: انتقال حرارت تابشی



شکل ۱۴. دیسک دوار تحت تاثیر میدان مغناطیسی

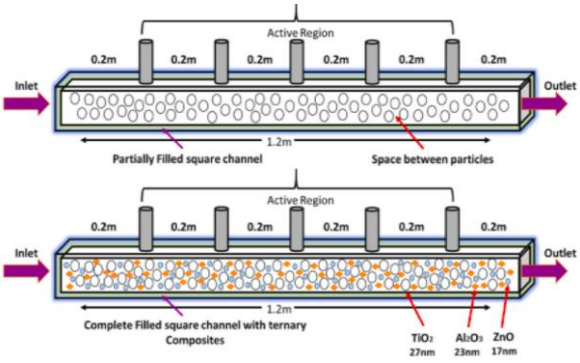
رئوف و همکاران در سال ۲۰۲۲ اثرات مورفولوژیکی جریان نانوسیال غیرنیوتنی هیبریدی سه گانه تحت تأثیر میدان مغناطیسی بین دو سطح موازی را بررسی نمودند (شکل ۱۵). در این تحقیق، جریان هیدرودینامیک مغناطیسی و انتقال حرارت یک نانوسیال میکروپولار هیبریدی سه گانه بین دو سطح متخلخل درون یک سیستم چرخشی مورد بررسی قرار گرفته است. سیالات میکروپولار، نوعی از سیالات غیر نیوتنی هستند که دارای ویژگی‌های خاصی هستند. این سیالات به دلیل وجود میکروذرات یا ذراتی با اندازه بزرگتر از نانو، رفتار خاصی از خود نشان می‌دهند. به طور خاص، سیالات میکروپولار می‌توانند دارای حرکات چرخشی و دیگر ویژگی‌های دینامیکی باشند

که در سیالات نیوتنی مشاهده نمی‌شود. برای حل عددی مسئله مورد نظر، از روش Bvp4c مبتنی بر MATLABاستفاده شد. از نانوسیال هیبریدی سه گانه Fe3O4-Al2O3-TiO2/H2O در این تحقیق استفاده شد. نتایج نشان داد نرخ انتقال حرارت نانو سیال سه گانه از نانو سیال هیبریدی معمولی و نانو سیال تکی بیشتر است [۱۸].



شکل ۱۵. هندسه مسئله ارائه شده توسط رئوف و همکاران [۱۸].

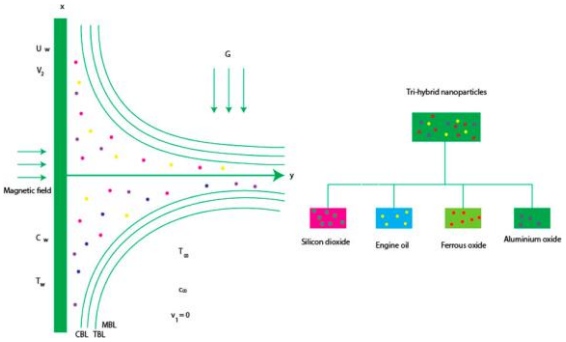
استفاده از نانوسیال‌ها در مبدل‌های حرارتی پتانسیل بالایی برای بهبود کارایی سیستم‌های خنک‌کننده دارد. این نانوسیال‌ها با بهبود خواص حرارتی سیال پایه (مانند آب، روغن یا اتیلن گلیکول)، از جمله افزایش هدایت حرارتی، ظرفیت حرارتی و ضریب انتقال حرارت جابجایی، می‌توانند کارایی مبدل‌های حرارتی را به طور چشمگیری ارتقا دهند. این امر منجر به کاهش ابعاد مبدل، کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد سیستم‌های خنک‌کننده می‌شود. احمد و همکاران در سال ۲۰۲۱ به بررسی توسعه انتقال حرارت با جریان آشفته نانو سیالات ترکیبی سه‌گانه در یک مبدل حرارتی مربعی تحت شرایط جریان حرارتی ثابت پرداختند (شکل ۱۶). آنها از نانو سیالات هیبریدی سه‌گانه جدید بر پایه اکسیدهای فلزی مخلوط ZnO + Al2O3 + TiO2/DW با غلظت‌های وزنی مختلف (۰.۰۲۵، ۰.۰۵، ۰.۰۷۵ و ۰.۱) استفاده کردند. نتایج نشان داد در ۰.۱ درصد وزنی نانوذرات هیبریدی سه گانه در آب مقطر، بهبود بارزتری را در میانگین انتقال حرارت دارد که این مقدار در محدوده ۱۲۰۰ تا ۳۲۰۰ (W/m2 K) قابل توجه است. این مطالعه همچنین نشان داد که نانو سیالات ترکیبی هیبریدی سه‌گانه بر پایه اکسیدهای فلزی برای کاربردهای خنک‌کننده مناسب هستند به دلیل ویژگی‌های ترموفیزیکی بهبود یافته و همچنین برای مدیریت انرژی در کاربردهای صنعتی قابل استفاده هستند [۱۹].



شکل ۱۶. مبدل حرارتی مربعی

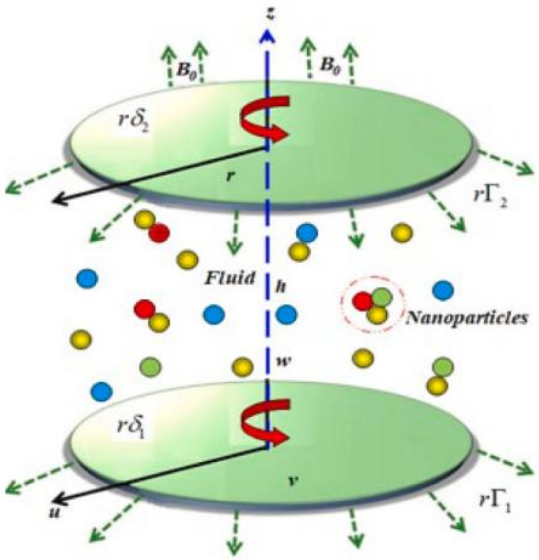
سهیل و همکاران در سال ۲۰۲۳ از سه نوع نانوذره در روغن موتور برای تولید انرژی حرارتی استفاده کردند (شکل ۱۷). نظریه دارسی-فورچایمر برای تحلیل رفتار جریان و انرژی حرارتی استفاده شود. مدل‌های توسعه‌یافته به صورت عددی با کمک روش المان محدود (FEM) مورد بررسی قرار گرفت. از الگوریتم گالرکین برای این منظور استفاده شد. این

یک روش مورد استفاده در آنالیز عددی برای حل معادلات دیفرانسیل است که به طور خاص برای به‌دست آوردن تقریبات قابل قبول از مسائل مقدار مرزی مفید است. انرژی حرارتی سیال در برابر مقادیر عدد زمان استراحت افزایش می‌یابد. غلظت سیال در برابر تغییرات عدد اشمیت و عدد واکنش شیمیایی کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد نانوسیال هیبریدی سه گانه از نظر دستیابی به حداکثر عملکرد حرارتی بهتر از سیال، نانوسیال و نانوسیال هیبریدی است [۲۰].



شکل ۱۷: شماتیک مسئله ارائه شده توسط سهیل و همکاران [۲۰].

نورین و همکاران در سال ۲۰۲۳ به بررسی تطبیقی نانوسیالات هیبریدی سه گانه با استفاده مدل جریان حرارتی کاتانئو-کریستوف بین دیسک‌های دوار پرداخته و نشان دادند دما، غلظت نانوذرات بر روی سرعت تاثیر گذار است (شکل ۱۸). علاوه بر این، افزایش کسری حجمی نانوذرات، هدایت حرارتی را بهبود می‌بخشد و نرخ انتقال حرارت را در دیسک بالایی افزایش می‌دهد. برای حل معادلات دیفرانسیل به دست آمده از تابع Bvp4c در MATLAB استفاده شد این تابع برای حل عددی معادلات حاکم بسیار پرکاربرد است [۲۱].



شکل ۱۸. دو دیسک دوار ارائه شده توسط نورین و همکاران [۲۱].

نتیجه گیری

نانوسیالات هیبریدی سه گانه به عنوان رویکردی نوآورانه در مهندسی سیالات، نویدبخش پیشرفت های چشمگیر در کاربردهای انتقال حرارت هستند. این دسته از نانوسیالات، با ترکیب سه نوع نانوذره مختلف، خواص منحصر به فردی را ارائه می دهند که به واسطه آن، می توان عملکرد حرارتی سیستم ها را به طور قابل توجهی ارتقا بخشید. نتایج حاصل از مطالعات و بررسی های متعدد حاکی از آن است که نانوسیالات هیبریدی سه گانه در مقایسه با نانوسیالات هیبریدی و تکی، از مزایای قابل توجهی در زمینه های مختلف برخوردارند. نرخ انتقال حرارت، ویسکوزیته، پایداری سیال، عدد ناسلت، ضریب انتقال حرارت، راندمان ذخیره انرژی و سرعت انتقال حرارت، همگی در نانوسیالات هیبریدی سه گانه، به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابند. به

عنوان مثال، در یکی از پژوهش ها، افزایش نرخ انتقال حرارت در غلظت یک درصد حجمی نانوذرات، به ترتیب ۳.۷۱، ۴.۳۲ و ۵.۴۱ درصد برای نانوسیال تکی، هیبریدی و هیبریدی سه گانه گزارش شده است. همچنین، پژوهش دیگری نشان داده که عدد ناسلت برای نانوسیال هیبریدی سه گانه در مقایسه با نانوسیال تکی، تا ۵۹ درصد افزایش می یابد. این یافته ها نشان می دهد که نانوسیالات هیبریدی سه گانه، با ارائه عملکرد حرارتی برتر، پتانسیل بالایی برای بهبود کارایی و بهینه سازی سیستم های مختلف انتقال حرارت، از جمله سیستم های خنک کننده الکترونیکی، مبدل های حرارتی و سیستم های ذخیره انرژی دارند. با این حال، تحقیقات بیشتری در زمینه پایداری طولانی مدت، هزینه تولید و بررسی اثرات زیست محیطی این نانوسیالات، ضروری به نظر می رسد تا بتوان به طور کامل از مزایای آن ها بهره مند شد.

منابع

[1] Rahmatinejad, B. (2022). Investigating thermophysical properties and thermal performance of Al2O3 nanoparticles in water and ethylene glycol based fluids. Journal of Nanostructures, 12(3), 642-659.

[2] Rahmatinejad, B., & Azimpour Shishevan, F. (2023). Investigating parameters affecting the viscosity of nanofluids. Nano World, 19(70), 34-51.

[3] Arshad, M., Alharbi, F. M., Alhushaybari, A., Eldin, S. M., Ahmad, Z., & Galal, A. M. (2023). Exploration of heat and mass transfer subjected to first order chemical reaction and thermal radiation: Comparative dynamics of nano, hybrid and tri-hybrid particles over dual stretching surface. International Communications in Heat and Mass Transfer, 146, 106916.

[4] Alshahrani, S., Ahammad, N. A., Bilal, M., Ghoneim, M. E., Ali, A., Yassen, M. F., & Tag-Eldin, E. (2022). Numerical simulation of ternary nanofluid flow with multiple slip and thermal jump conditions. Frontiers in Energy Research, 10, 967307.

[5] Ramzan, M., Ali, F., Akkurt, N., Saeed, A., Kumam, P., & Galal, A. M. (2023). Computational assesment of Carreau ternary hybrid nanofluid influenced by MHD flow for entropy generation. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 567, 170353.

[6] Ramadhan, A. I., Azmi, W. H., & Mamat, R. (2020, May). Heat transfer characteristics of car radiator using tri-hybrid nanocoolant. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 863, No. 1, p. 012054). IOP Publishing.

[7] Arif, M., Di Persio, L., Kumam, P., Watthayu, W., & Akgül, A. (2023). Heat transfer analysis of fractional model of couple stress Casson tri-hybrid nanofluid using dissimilar shape nanoparticles in blood with biomedical applications. Scientific Reports, 13(1), 4596.

[8] Adnan, Guedri, K., Raizah, Z., Tag-Eldin, E., Ashraf, W., Khan, U., & M. Galal, A. (2022). Thermal efficiency in

approach. Nanotechnology Reviews, 12(1), 20220561.

[14] Rathore, N., & Sandeep, N. (2023). Solar thermal energy performance on mono/trihybrid nanofluid flow through the evacuated thermal collector tube. International Journal of Hydrogen Energy, 48(94), 36883-36899.

[15] Madkhali, H. A. (2022). Numerical study on thermal and concentration relaxation time in tri, hybrid and mono nano-Sutterby magnetohydrodynamic fluid under generalized diffusion conditions. International Communications in Heat and Mass Transfer, 139, 106394.

[16] Al-Mughanam, T., & Almaneea, A. (2022). Numerical study on thermal efficiencies in mono, hybrid and tri-nano Sutterby fluids. International Communications in Heat and Mass Transfer, 138, 106348.

[17] Shamshuddin, M. D., Akkurt, N., Saeed, A., & Kumam, P. (2023). Radiation mechanism on dissipative ternary hybrid nanoliquid flow through rotating disk encountered by Hall currents: HAM solution. Alexandria Engineering Journal, 65, 543-559.

[18] Rauf, A., Faisal, Shah, N. A., & Botmart, T. (2022). Hall current and morphological effects on MHD micropolar non-Newtonian tri-hybrid nanofluid flow between two parallel surfaces. Scientific Reports, 12(1), 16608.

hybrid (Al2O3-CuO/H2O) and tri-hybrid (Al2O3-CuO-Cu/H2O) nanofluids between converging/diverging channel with viscous dissipation function: Numerical analysis. Frontiers in Chemistry, 10, 960369.

[9] Nasir, S., Berrouk, A. S., Tassaddiq, A., Aamir, A., Akkurt, N., & Gul, T. (2023). Impact of entropy analysis and radiation on transportation of MHD advance nanofluid in porous surface using Darcy-Forchheimer model. Chemical Physics Letters, 811, 140221.

[10] Ullah, A. Z., Guo, X., Gul, T., Ali, I., Saeed, A., & Galal, A. M. (2023). Thin film flow of the ternary hybrid nanofluid over a rotating disk under the influence of magnetic field due to nonlinear convection. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 573, 170673.

[11] Ullah, M. Z. (2023). Irreversibility Marangoni tri-hybrid nanoflow analysis for thermal enhancement applications. Nanomaterials, 13(3), 423.

[12] Mahmood, Z., Eldin, S. M., Rafique, K., & Khan, U. (2023). Numerical analysis of MHD tri-hybrid nanofluid over a nonlinear stretching/shrinking sheet with heat generation/absorption and slip conditions. Alexandria Engineering Journal, 76, 799-819.

[13] Ahmad, S., Takana, H., Ali, K., Akhtar, Y., Hassan, A. M., & Ragab, A. E. (2023). Role of localized magnetic field in vortex generation in tri-hybrid nanofluid flow: A numerical

nanoparticles in magnetized Reiner–Philippoff liquid, including modified fluxes via Galerkin algorithm: Significance of EMHD. Frontiers in Physics, 11, 1133550.

[21] Noreen, S., Farooq, U., Waqas, H., Fatima, N., Alqurashi, M. S., Imran, M., ... & Bariq, A. (2023). Comparative study of ternary hybrid nanofluids with role of thermal radiation and Cattaneo-Christov heat flux between double rotating disks. Scientific Reports, 13(1), 7795.

[19] Ahmed, W., Kazi, S. N., Chowdhury, Z. Z., Johan, M. R. B., Mehmood, S., Soudagar, M. E. M., ... & Ahmad, M. S. (2021). Heat transfer growth of sonochemically synthesized novel mixed metal oxide ZnO+Al2O3+TiO2/DW based ternary hybrid nanofluids in a square flow conduit. Renewable and sustainable energy reviews, 145, 111025.

[20] Sohail, M., Nazir, U., Mukdasai, K., Singh, M., Singh, A., Mohan, C. R., ... & Eldin, S. M. (2023). Transportation of Fe3 O4-SiO2-Al2O3/EO and SiO2-Al2O3/EO

A Review of Heat Transfer in Ternary Hybrid Nanofluids under Various Geometrical Conditions

Bahman Rahmatinejad
Department of Mechanical Engineering, National University of Skills (NUS),Tehran, Iran.
brahmati@nus.ac.ir

Abstract

Nanofluids, which are suspensions of nanoparticles (with dimensions of 1 to 100 nanometers) in base fluids, have significant potential for improving the physical and thermal properties of the fluid. In recent years, ternary hybrid nanofluids, formed by combining three different types of nanoparticles in a base fluid, have gained attention as a novel tool in heat transfer applications. Studies conducted on numerous sources indicate that the use of these ternary hybrid nanofluids offers significant advantages compared to hybrid and single-component nanofluids. Parameters such as heat transfer rate, viscosity, fluid stability, Nusselt number, heat transfer coefficient, energy storage efficiency, and heat transfer rate show higher values in ternary hybrid nanofluids. For instance, one study showed that at a 1% volume concentration of nanoparticles, heat transfer increased by 3.71%, 4.32%, and 5.41% for single, hybrid, and ternary hybrid nanofluids, respectively. Another study demonstrated a Nusselt number increase of 9.8%, 19.85%, and 44.04% for the aforementioned three types of nanofluids.

Keywords: Nanofluid, Hybrid Nanofluid, Ternary Hybrid Nanofluid, Nanoparticle, Heat Transfer

فصلنامه ISC ه انجمن نانو فناوری ایران