

Numerical Study of the Magnetic Field Effect on the Exergy Efficiency in a Parabolic Solar Collector Equipped with Combined Turbulators Filled with Hybrid Magnetic Nano-Fluid

Shahrouz Yousefzadeh^{*1}

G.H. Ghanbari²

M.M. Doustdar³

Department of Mechanical Engineering, Aligudarz Branch,
Islamic Azad University, Aligudarz.

Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein
University.

(Received: 2024/05/07, Revised: 2024/06/18, Accepted: 2024/07/06, Published: 2024/07/22)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1403.13.1.13.9>

ABSTRACT

This study was conducted to investigate the effect of magnetic field on Hartmann numbers ranging from 50 to 200 in a parabolic solar collector with zero to 2.25 percent volume fraction of magnetic hybrid nanofluid containing three nanoparticles of iron oxide, multi-walled carbon nanotubes, and copper in the Reynolds number range of 18000 to 42000. In the numerical study, a parabolic solar collector was simulated using the finite volume method, and the thermophysical properties of the magnetic hybrid nanofluid were used as the working fluid in it. The solar collector absorber tube under study is equipped with three different geometric shapes of turbulators. A hybrid nanofluid of water/carbon nanotube multi-wall-iron oxide-copper has been considered for two-phase simulation. According to numerical results, the maximum exergy efficiency is related to the absorber tube equipped with a combination of turbulator and circular wire. Additionally, the maximum exergy efficiency is related to a Reynolds number of 18000 at a Hartmann number of 200.

Keywords: Exergy, Turbulent flow, Solar collector, Magnetic field, Combined turbulators

مطالعه عددی تأثیر میدان مغناطیسی بر بازده انرژی در کلکتور خورشیدی پارابولیک مجهز به توربولاتورهای ترکیبی پر شده با نانوسیال هیبریدی مغناطیسی

محمد مهدی دوستدار^{۱*}

دانشگاه جامع امام حسین (ع)

غلامحسین قنبری^۲

شهرروز یوسفزاده^{۱*}

دانشکده مهندسی مکانیک، واحد الیگودرز، دانشگاه آزاد اسلامی، الیگودرز، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۸، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۲۹، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۶، انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱)

چکیده

این مطالعه برای بررسی اثر میدان مغناطیسی در اعداد هارتمن ۵۰ تا ۲۰۰ در کلکتور خورشیدی پارابولیک در کسر حجمی صفر تا ۲/۲۵ درصد از نانوسیال هیبریدی مغناطیسی با سه نانوذره اکسید آهن، نانولوله کربنی چند جداره و مس در محدوده رینولدز ۱۸۰۰۰ تا ۴۲۰۰۰ انجام شده است. در قسمت عددی یک کلکتور خورشیدی پارابولیک با استفاده از روش حجم محدود مورد شبیه سازی قرار گرفته و از خواص ترموفیزیکی نانوسیال هیبریدی مغناطیسی به عنوان سیال کاری در آن استفاده شده است. لوله جاذب کلکتور خورشیدی مورد مطالعه مجهز به سه شکل هندسی مختلف از توربو لاتور می باشد. نانوسیال هیبریدی آب/نانولوله کربنی چند جداره - اکسید آهن - مس با در نظر گرفتن مدل دوفازی شبیه سازی گردیده است. مطابق نتایج عددی، حداکثر بازده انرژی در کلکتور خورشیدی، جریان آشفته، کلکتور خورشیدی، میدان مغناطیسی، توربولاتورهای ترکیبی

کلکتور خورشیدی، میدان مغناطیسی، توربولاتورهای ترکیبی

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو)، sh.yousefzadeh@iau.ac.ir

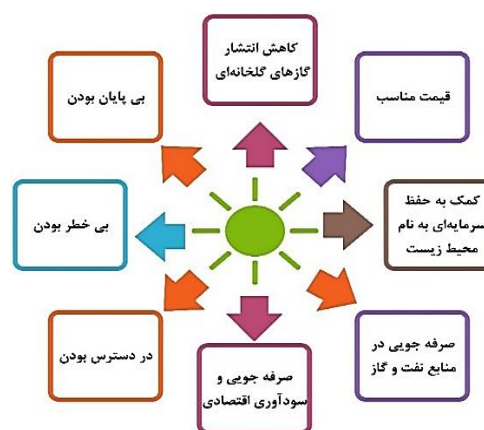
۲- کارشناس ارشد، ghanbari.2910@yahoo.com

۳- استاد، mdostdar@ihu.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه باتوجه به کمبود منابع انرژی فسیلی و مسئله آلودگی هوای ناشی از مصرف این مواد جهت تأمین انرژی، موضوع استفاده از انرژی‌های جایگزین اهمیت بیش‌تری پیدا کرده است. در حال حاضر نفت، گاز و ذغال سنگ در حدود ۸۰ درصد از انرژی مصرفی جهان را تأمین می‌کنند. مصرف انرژی در ۵۰ سال گذشته بیش‌تر از مصرف انرژی در دو قرن پیش از آن بوده است. سازمان اطلاعات انرژی آمریکا پیش‌بینی کرده است که مصرف انرژی جهان تا سال ۲۰۳۰ در حدود ۵۷ درصد افزایش خواهد یافت؛ لذا باتوجه به معضلات سوخت‌های فسیلی نظیر آلودگی محیط‌زیست، منابع محدود و پایان پذیر، تجدیدنظری و تأثیر مستقیم سیاست بر آن، دنیا به انرژی‌های نو نظیر انرژی خورشیدی، باد، زمین گرمایی، هسته‌ای و غیره تمایل نشان داده است [۱].

انرژی خورشیدی یک منبع انرژی پاک و تجدیدپذیر به شمار می‌رود که محیط‌زیست را آلوده نمی‌کند و می‌توان روزانه به طور مستقیم از آن استفاده نمود؛ لذا تا زمانی که خورشید وجود دارد همواره این انرژی در دسترس است. مطابق با نتایج ارائه شده توسط پژوهشگران پدیده فروپاشی خورشید حداقل تا ۵ میلیارد سال آینده رخ نخواهد داد؛ بنابراین جهان زمان کافی برای بهره‌برداری دارد و با اطمینان می‌توان از انرژی خورشیدی استفاده کرد. مزایای انرژی خورشیدی به صورت شماتیک در شکل (۱) ارائه شده است [۲].



شکل (۱): مزایای استفاده از انرژی خورشیدی

مهم‌ترین موضوع در مبحث انرژی خورشیدی، توانایی جذب و ذخیره این انرژی است. جذب انرژی خورشیدی توسط کلکتورهای خورشیدی مختلف برای اهداف متفاوتی از جمله برق، گرمایش آب، گرمایش فضا و غیره صورت می‌گیرد. تلاش و تحقیقات در این زمینه از دیرباز در کشورهای

مختلف آغاز شده و طرح‌های مختلفی برای جمع‌آوری و استفاده از انرژی تابشی خورشید ارائه شده است [۳].

مهم‌ترین بخش هر سیستم خورشیدی، کلکتور است که کار اصلی آن جذب تابش خورشیدی و تبدیل آن به گرما و انتقال آن به سیال عامل عبوری از کانال‌ها یا لوله‌ها می‌باشد. در سیستم‌های آبگرم کن خورشیدی معمولاً از کلکتورهای صفحه تخت استفاده می‌شود. این نوع کلکتور ساده‌ترین و متداول‌ترین وسیله برای تبدیل انرژی تابشی خورشید به گرمای مفید است. یک کلکتور خورشیدی را می‌توان به‌عنوان یک حالت خاص از مبدل گرمایی در نظر گرفت. البته کلکتورهای خورشیدی در مقایسه با سیستم‌های مبدل گرمایی دارای تفاوت‌هایی هستند. در مبدل‌های گرمایی، گرما معمولاً از طریق جابه‌جایی یا هدایت به سیال دیگر منتقل می‌شود و انتقال گرما از طریق تابش در آنها بسیار ناچیز است؛ در حالی که در یک کلکتور خورشیدی، انتقال حرارت از طریق تابش نقش اساسی دارد. میزان تابش انرژی خورشیدی بدون متمرکز کردن آن در بهترین شرایط کاری حدود ۱۰۰۰ وات بر مترمربع است و با تغییرات شرایط جوی تغییر می‌کند. با طراحی صحیح کلکتورهای تخت معمولی می‌توان دمای سیال خروجی از آن‌ها را بنا بر نیاز به حدود ۱۰۰ درجه سلسیوس بالاتر از دمای محیط رساند [۴].

در سال ۲۰۱۰ سومرس و یرک [۵] به صورت تجربی به بررسی اثر نانوسیال پروپانول-اکسید آلومینیم بر انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری درون یک سیستم حرارتی پرداختند. مطالعه آنها در محدوده اعداد رینولدز ۱۸۰۰ تا ۲۸۰۰ و کسر وزنی ۰/۳ تا ۰/۵ درصد از نانوذرات صورت گرفته است. نتایج آنها نشان می‌دهد استفاده از نانوسیال پروپانول-اکسید آلومینیم نسبت به سیال پایه پروپانول به مراتب انتقال حرارت بیشتری ایجاد می‌کند. همچنین مطابق نتایج بدست آمده حداکثر افزایش انتقال حرارت در سیستم حرارتی در کسر وزنی ۰/۵ درصد از نانوذرات و عدد رینولدز ۲۸۰۰ رخ می‌دهد.

در سال ۲۰۱۱ وانگچاری و ایامسا آراد [۶] به صورت تجربی تأثیر نوار پیچ خورده انحنادار را در حالت‌های مختلف از زاویه انحنا در یک مجرا مورد بررسی قرار دادند. مطالعه آنها برای زاویه‌های ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ از نوار پیچ خورده انحنادار در اعداد رینولدز ۵۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ صورت گرفت. نتایج خروجی آنها به صورت نمودارهای تغییرات عدد

افزایش دهد. همچنین افت فشار رابطه مستقیمی با عدد رینولدز و کسرحجمی نانوذرات داشته و با بیشتر شده مقادیر آنها، افزایش می‌یابد.

در سال ۲۰۱۵ بهابادی و همکاران [۱۰] با استفاده از روش آزمایشگاهی اثر افزودن سیم فلزی هلیکال را بر رفتار جریان درون یک مبدل حرارتی مورد بررسی قرار دادند. مطالعه آنها با هدف بهبود راندمان حرارتی مبدل حرارتی با استفاده از افزودن سیم فلزی هلیکال صورت گرفته است. بر اساس نتایج نویسندگان سیم فلزی هلیکال می‌تواند بازده حرارتی را به طور چشمگیری افزایش دهد. همچنین حداکثر افزایش راندمان سیستم حرارتی هنگام استفاده از سیم فلزی هلیکال ۶۱/۰۹ درصد گزارش شده است.

در سال ۲۰۱۶ امیراحمدی و همکاران [۱۱] به صورت عددی و با استفاده از روش حجم محدود به شبیه‌سازی تأثیر استفاده توربولاتورهای دوزنقه‌ای بر کارایی انرژی درون کانال پرداختند. آنها در این مطالعه به منظور شبیه‌سازی عددی از نرم افزار فلوئنت استفاده نمودند. مطالعه آنها برای حالت‌های مختلف از ارتفاع توربولاتور دوزنقه‌ای در اعداد رینولدز ۴۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ صورت گرفته است. همچنین آنها در این مطالعه برای گسسته سازی معادلات بقا از روش آپ ویند مرتبه ۲ که به مراتب دارای دقت بالایی است استفاده نمودند. بر طبق نتایج آنها با افزایش ارتفاع دوزنقه‌ای کارایی انرژی در اعداد رینولدز بالا کاهش پیدا می‌کند.

در سال ۲۰۱۷ مشوفی و همکاران [۱۲] با استفاده از روش تجربی به بررسی اثر نوارهای هلیکال بر میدان جریان و انتقال حرارت درون یک مجرا پرداختند. مطالعه آنها در رژیم جریان آشفته و محدوده اعداد رینولدز ۷۰۰۰ تا ۳۵۰۰۰ صورت گرفته است. نویسندگان نتایج خروجی خود را به صورت منحنی‌های اعداد ناسلت متوسط، افت فشار، ضریب اصطکاک به نمایش گذاشته اند. بر طبق خروجی‌های آنها استفاده از نوارهای هلیکال در اعداد رینولدز بالا به مراتب نسبت به اعداد رینولدز پایین اختلاط و آشفتگی بیشتری ایجاد می‌کنند. لذا همان‌طور که پیش بینی می‌شود به واسطه این اختلاطها همواره در اعداد رینولدز بالا نرخ انتقال حرارت بیشتر است.

در سال ۲۰۱۸ بویا و همکاران [۱۳] با استفاده از روش آزمایشگاهی به مطالعه استفاده از توربولاتورهای پیچ‌خورده

ناسلت متوسط و ضریب اصطکاک گزارش شد. نتایج گزارش شده توسط نویسندگان نشان می‌دهد که حداکثر بازده حرارتی مربوط هنگام استفاده از نوار پیچ‌خورده با زاویه ۰/۴ در عدد رینولدز ۲۰۰۰۰ به میزان ۴۱/۶۷ درصد می‌باشد.

در سال ۲۰۱۲ محمد و همکاران [۷] در مطالعه‌ای عددی به بررسی اثر شیارهای دنداندار بر میدان جریان و انتقال حرارت در جریان آشفته نانوسیال درون یک کانال پرداختند. مطالعه آنها برای نسبت شیارهای ۰/۴ تا ۴ از دندان و اعداد رینولدز ۵۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفته است. آنها در این مطالعه به منظور طراحی هندسه و تحلیل سیالاتی به مراتب از نرم افزارهای سالیدورک و فلوئنت استفاده نمودند. بر اساس نتایج ارائه شده توسط نویسندگان دنداندارهای شیار دار و افزایش نسبت آنها با افزایش عدد ناسلت و ضریب اصطکاک نسبت مستقیمی دارد و افزایش پیدا می‌کند.

در سال ۲۰۱۳ مانکا و همکاران [۸] به صورت عددی و با استفاده از نرم فلوئنت به بررسی تأثیر استفاده از نانوسیال آب-اکسید آلومینیم بر جابه‌جایی اجباری نانوسیال درون یک کانال پرداختند. آنها به منظور مدل‌سازی نانوسیال از مدل تک فاز استفاده نمودند. همچنین برای گسسته سازی معادلات حاکم از الگوریتم سیمپل استفاده نمودند. رژیم جریان آشفته و در محدوده ۴۰۰۰ تا ۱۸۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این برای مدل‌سازی جریان آشفته از توربولانسی کا-پسیلون استفاده شد. نتایج بدست آمده از مطالعه نویسندگان نشان می‌دهد در تمام قسمت شبیه‌سازی عددی میزان بازده حرارتی نانوسیال، بهتر از سیال پایه آب بوده است. همچنین بالاترین بازده حرارتی کانال در عدد رینولدز ۱۸۰۰۰ به میزان ۱۲/۰۹ درصد بوده است.

در سال ۲۰۱۴ واگول و همکاران [۹] با روش آزمایشگاهی به مطالعه تأثیر استفاده از توربولاتور پیچ‌خورده بر عملکرد هیدرولیکی حرارتی نانوسیال آب-نقره در یک کلکتور خورشیدی پرداختند. مطالعه آنها برای کسرحجمی ۱ تا ۵ درصد از نانوذرات نقره و محدوده رینولدز ۴۰۰۰ تا ۱۶۰۰۰ در رژیم جریان متلاطم صورت گرفته است. نتایج خروجی آنها نشان می‌دهد که نانوسیال آب-نقره نسبت به سیال پایه آب از عملکرد حرارتی مطلوب تری برخوردار بوده و می‌تواند عدد ناسلت متوسط را به میزان ۲۱/۶۴ درصد

افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی گردیده است. میزان افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی به مراتب در اعداد رینولدز بالا و کسرحجمی بالاتر به مراتب بیشتر است.

در سال ۲۰۲۲ شاکر و همکاران [۱۷] در یک مطالعه عددی با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی به شبیه‌سازی یک کلکتور خورشیدی مجهز شده به توربولاتور با شکل هندسی دلتا پرداختند. همچنین آنها از نانوسیال سیلترم ۸۰۰-اکسید آلومینیم در کلکتور خورشیدی استفاده نمودند. مطالعه آنها برای حالت مختلف از زاویه توربولاتور انجام شده است. آنها در این مطالعه از روش فشار مبنا و جریان پایا استفاده نمودند. علاوه بر این در تنظیمات حل آنها شتاب گرانش زمین در نظر گرفته شده است. نمودارهای ارائه شده در خروجی مطالعات آنها بیانگر آن است که ضریب اصطکاک و ضریب انتقال حرارت در اعداد رینولدز بالا تغییرات بیشتری از خود نشان می‌دهند.

در سال ۲۰۲۳ آبدلا و همکاران [۱۸] در یک مطالعه به بررسی تاثیر استفاده از شکل هندسی توربولاتور بر بازده انرژی پرداختند. مطالعه آنها برای شکل‌های هندسی مختلف از توربولاتور انجام شده است. بر اساس نتایج نویسندگان بازده انرژی در اعداد رینولدز پایین به مراتب از اعداد رینولدز بالا، بیشتر است. همچنین گزارشات آنها نشان می‌دهد در عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ بازده انرژی هنگام استفاده از توربولاتور ۳۸/۱۱ درصد کاهش می‌یابد.

در سال ۲۰۲۳ جیو و همکاران [۱۹] یک مبدل حرارتی حاوی توربولاتور V شکل را مورد بررسی قرار دادند. آنها در این مطالعه از سیال آب و نانوسیال آب-اکسید مس به عنوان سیال کاری استفاده کردند. همچنین در مطالعه آنها به منظور یافتن مدل مناسب جهت مدل‌سازی جریان آشفته اعتبار سنجی با مراجع تجربی انجام شده است. در مطالعه آنها از شرط ورودی سرعت و همچنین دیواره‌های دارای شرط عدم لغزش استفاده شده است. نتایج آنها نشان می‌دهد استفاده از توربولاتور باعث بازده انرژی و کاهش بازده انرژی می‌شود.

در سال ۲۰۲۳، مرزبان و همکاران [۲۰] به مطالعه عددی کارایی انرژی و انرژی نانوسیال هیبریدی مغناطیسی MWCNT-Fe₃O₄-Cu/Water با وجود توربولاتور چرخشی نوآورانه در کلکتور خورشیدی پارابولیک پرداختند. در تحقیق آنها، نانوسیال هیبریدی مغناطیسی با استفاده از روش دو مرحله ای تهیه شد. سپس از خواص

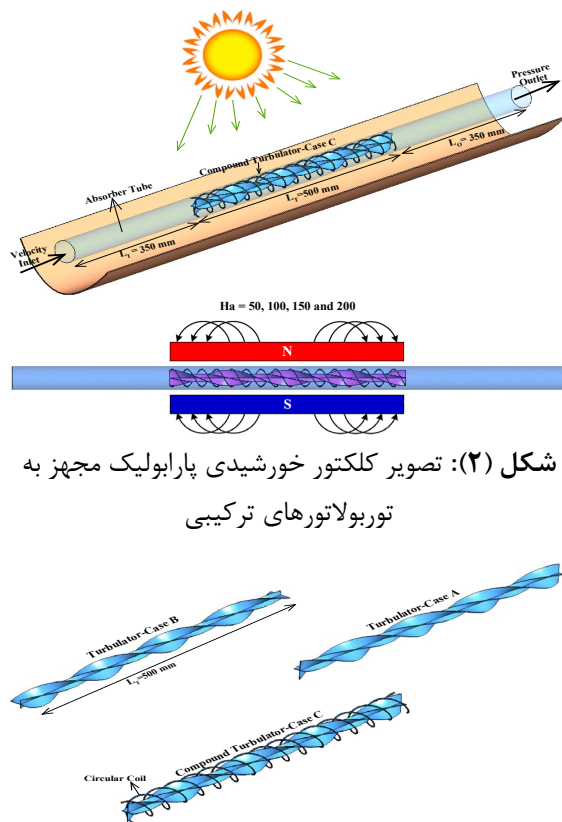
بر عملکرد هیدرولیکی حرارتی درون یک مبدل حرارتی پرداختند. هدف اصلی مطالعه آنها مقایسه میزان افزایش نرخ انتقال حرارت و افت فشار هنگام استفاده از ۱، ۲ و ۳ توربولاتور پیچ‌خورده بود. مطالعه آنها در رژیم جریان آشفته و در محدوده عدد رینولدز ۶۰۰۰ تا ۳۶۰۰۰ انجام شده است. نتایج خروجی آنها به صورت منحنی‌های عدد ناسلت متوسط، افت فشار و ضریب اصطکاک ارائه گردیده است. از نتایج ارائه شده توسط آنها می‌توان نتیجه گرفت هر چه تعداد توربولاتورها افزایش یابد، انتقال حرارت و افت فشار هم بیشتر می‌شوند. همچنین افزایش سرعت با افزایش عملکرد حرارتی نسبت مستقیم دارد.

در سال ۲۰۱۹ الیویه و همکاران [۱۴] به صورت تجربی به اندازه‌گیری هدایت حرارتی و لزجت نانوسیال هیبریدی اتیلن گلیکول - الماس - نقره پرداختند. مطالعه آنها برای کسر حجمی صفر تا ۰/۱ درصد از نانوذرات و محدوده دمایی ۱۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس صورت گرفت. آنها برای بررسی پایداری نانوسیال از روش‌های طیف سنجی و بررسی میزان رسوب استفاده کردند. نانوسیال آماده شده به مراتب دارای هدایت حرارتی بهتری نسبت به سیال پایه می‌باشد و افزایش هدایت حرارتی تابعی از کسرحجمی نانوذرات و دما می‌باشد.

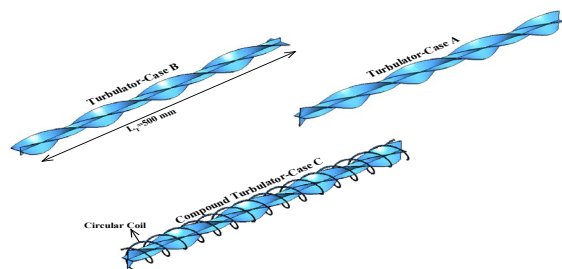
در سال ۲۰۲۰ آیش و همکاران [۱۵] به صورت تجربی به اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی و لزجت نانوسیال اکسید آلومینیم با سیال پایه ترمینول ۵۵ پرداختند. مطالعه آنها برای کسرحجمی ۰/۰۵ تا ۰/۳ درصد از نانوذرات و محدوده دمایی ۳۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس صورت گرفته است. آنها برای ساخت نانوسیال از روش دو مرحله‌ای استفاده کردند. برای پراکندگی نانوذرات در نانوسیال از اسید اولئیک استفاده شده است. نتایج آنها نشان می‌دهد که لزجت نانوسیال با افزایش کسر حجمی افزایش و با افزایش دما، کاهش می‌یابد.

در سال ۲۰۲۱ کسیم و همکاران [۱۶] به صورت تجربی به ساخت توربولاتور پیچشی و نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم و بررسی تاثیر آنها در یک لوله پرداختند. آنها در این مطالعه از نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم به عنوان سیال کاری در کسرحجمی ۰/۰۸ تا ۰/۳ درصد از نانو ذرات استفاده نمودند. همچنین مطالعه آنها در رژیم جریان متلاطم و در محدوده رینولدز ۷۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ صورت گرفته است. بر طبق گزارشات نویسندگان از مراحل آزمایش انجام شده، توربولاتور پیچشی در تمامی مراحل موجب

نمونه ۳ یک سیم دایره‌ای شکل به دور توربو لاتور پیچیده شده است.



شکل (۲): تصویر کلکتور خورشیدی پارابولیک مجهز به توربولاتورهای ترکیبی



شکل (۳): اشکال هندسی مختلف از توربولاتورهای

ترکیبی

در مطالعه حاضر برای شبیه‌سازی عددی جریان نانوسیال هیبریدی آب/نانولوله کربنی چند جداره - اکسید آهن - مس درون کلکتور خورشیدی پارابولیک از روش دوفازی مخلوط استفاده شده است. معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی به ترتیب با روابط (۱) تا (۳) نشان داده شده است [۲۰ و ۲۱]. علاوه بر این جریان نانوسیال هیبریدی در محدوده اعداد رینولدز ۱۸۰۰۰ تا ۴۲۰۰۰ مورد بررسی قرار می‌گیرد. باتوجه به در نظر گرفتن این محدوده از اعداد رینولدز برای مدل‌سازی جریان آشفته از مدل کا - اپسیلون RNG استفاده شده است؛ لذا لزجت آشفتگی با استفاده از معادلات ۱ تا ۹ قابل محاسبه است [۲۱ و ۲۲].

$$\left(q \rho_q v_q \right) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (1)$$

ترمو فیزیکی آن به عنوان سیال عامل استفاده شد. لوله جاذب PTC مورد مطالعه به سه شکل هندسی مختلف توربولاتور ترکیبی مجهز شد. نانوسیال هیبریدی مغناطیسی در محدوده رینولدز ۱۸۰۰۰ تا ۴۲۰۰۰ و کسر حجمی ۱،۲۵ و ۲،۲۵ درصد از نانوذرات با در نظر گرفتن روش دو مرحله ای شبیه سازی شد. آنها دریافتند که وجود نانو سیال هیبریدی و توربولاتور چرخشی در داخل کلکتور خورشیدی باعث افزایش کارایی انرژی و انرژی می‌شود.

در این تحقیق، شبیه‌سازی عددی کلکتور خورشیدی پارابولیک مجهز به توربولاتورهای ترکیبی در جریان آشفته پر شده با نانوسیال هیبریدی مغناطیسی انجام شده و تغییرات میدان مغناطیسی و بازده انرژی به صورت عددی ارائه گردیده است. مطالعه در رژیم جریان آشفته و محدوده اعداد رینولدز ۱۸۰۰۰ تا ۴۲۰۰۰ انجام می‌شود. به علاوه نانوسیال هیبریدی آب/نانولوله کربنی چند جداره - اکسید آهن - مس در کسر حجمی‌های صفر، ۱/۲۵، ۱/۷۵ و ۲/۲۵ درصد شبیه‌سازی شده است. به منظور درک بهتر از فیزیک مسئله کانتورهای سرعت، فشار، خطوط جریان، دما و لزجت گردابی در بالاترین عدد رینولدز ۴۲۰۰۰ و بالاترین کسر حجمی ۲/۲۵ درصد ارائه شده است.

۲- بیان مسأله و معادلات حاکم

کلکتور خورشیدی پارابولیک مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشخص شده این کلکتور خورشیدی پارابولیک مجهز به توربو لاتور با شکل هندسه جدیدی می‌باشد. توربو لاتور نسبت به ورودی و خروجی لوله جاذب در فاصله مشخص ۳۵۰ میلی‌متر قرار گرفته است. طول توربو لاتور ۵۰۰ میلی‌متر می‌باشد. لوله جاذب در سه حالت با شکل هندسی مختلف از توربو لاتور مورد بررسی قرار می‌گیرد. علاوه بر این لوله جاذب مطابق شکل ۲ در قسمت میانی تحت تأثیر میدان مغناطیسی می‌باشد. همان‌طور که در شکل نیز به آن اشاره شده اثر میدان مغناطیسی در اعداد هارتمن ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ مورد بررسی قرار می‌گیرد. سه شکل هندسی مختلف از توربو لاتور جدید در شکل ۳ نشان داده شده است. لوله جاذب کلکتور خورشیدی مورد مطالعه مجهز به سه شکل هندسی مختلف از توربو لاتور می‌باشد (نمونه ۱، نمونه ۲ و نمونه ۳). تفاوت شکل هندسی نمونه ۱ با نمونه ۲ در نحوه قرارگیری توربو لاتور به صورت عمودی یا افقی است و در

می‌باشند. استفاده از توربولاتور در اکثر مطالعات همواره باعث بیشتر شدن افت فشار گردیده است. افت فشار همواره به عنوان یک عامل منفی در سیستم‌های انتقال حرارت می‌باشد. لذا بررسی این پارامتر در سیستم‌های مهندسی بسیار مهم است. در این مطالعه افت فشار کل در کلکتور خورشیدی پارابولیک به همراه توربولاتور برابر با حاصل اختلاف افت فشار در ورودی و خروجی کلکتور خورشیدی پارابولیک می‌باشد. رابطه ۱۲ نحوه محاسبه افت فشار در مطالعه حاضر را نشان می‌دهد. همان‌طور که قبلاً هم به آن اشاره شد استفاده از توربولاتور همواره باعث افزایش افت فشار است. لذا بررسی معیار ارزیابی عملکرد هیدرولیکی- حرارتی باعث می‌شود که میزان افت فشار ناشی از وجود توربولاتور در مقایسه با میزان افزایش انتقال حرارت آن مورد بررسی قرار بگیرد. معیار ارزیابی عملکرد هیدرولیکی- حرارتی در مطالعه حاضر با استفاده از رابطه (۱۳) قابل محاسبه است. علاوه بر این بازده انرژی و آگرزژی در کلکتور خورشیدی پارابولیک با استفاده از روابط (۱۴) و (۱۵) محاسبه می‌شوند. [۲۳ و ۲۴].

$$Re_{THNF} = \frac{\bar{U}_{THNF} d_p \rho_{THNF}}{\mu_{THNF}} \quad (10)$$

$$Nu_{ave} = \frac{h_{THNF} \cdot D_h}{k_{THNF}} \quad (11)$$

$$\Delta P = P_{THNF,av,Inlet} - P_{THNF,av,Outlet} \quad (12)$$

$$PEC \quad (13)$$

$$= \left(\frac{Nu_{av\&THNF\&Case\ A,B\ and\ C}}{Nu_{av\&THNF\&Simple}} \right)$$

$$\cdot \left(\frac{\Delta P_{THNF\&Case\ A,B\ and\ C}}{\Delta P_{THNF\&Simple}} \right)^{-1/3}$$

$$\eta_n = \frac{E_n}{I \cdot A} = \frac{1}{6 \times 10^4 \cdot I \cdot A} [p_{fo} \cdot Q_{in} \quad (14)$$

$$\cdot \rho_{in} \cdot c_{p,in}$$

$$\cdot (T_{fo,out} - T_{in})$$

$$+ (1 - p_{fo}) Q_{in} \cdot \rho_{in}$$

$$\cdot c_{p,in} \cdot (T_{fi,out} - T_{in})]$$

$$E_u = Q_u - \dot{m} c_p T_0 \ln \left(\frac{T_{Outlet}}{T_{Inlet}} \right) \quad (15)$$

$$\nabla \cdot (\alpha_q \rho_q v_q v_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \tau_q + \alpha_q \rho_q g + \sum_{p=1}^n (R_{pq} + \dot{m}_{pq} v_{pq} - \dot{m}_{pq} v_{pq}) + (F_q + F_{Lift,q} + F_{vm,q}) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\alpha_q \rho_q v_q h_q) = \tau_q + \nabla u_q - \nabla \cdot q_q + S_q + \sum_{p=1}^n (Q_{pq} + \dot{m}_{pq} h_{pq} - \dot{m}_{qp} h_{qp}) \quad (3)$$

$$G_k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu_{nf} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right) - \varepsilon \rho_{nf} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_{nf} K u_i) \quad (4)$$

$$G_k = -\overline{u'_j u'_i} \rho_{nf} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i \rho_{nf} \varepsilon) = \frac{\varepsilon}{k} G_k C_{1\varepsilon} - \rho_{nf} \frac{\varepsilon^2}{k} C_{2\varepsilon} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \left((\sigma_\varepsilon)^{-1} \mu_t + \mu_{nf} \right) \right) \quad (6)$$

$$\sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3, C_{1\varepsilon} = 1.42, Pr_t = 0.85, C_\mu = 0.0845, C_{2\varepsilon} = 1.68 \quad (7)$$

$$\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \mu_t - \frac{2 \delta_{ij}}{3} \rho_{nf} K - \frac{2}{3} \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} = (-\rho_{nf} \overline{u'_j u'_i}) \quad (8)$$

$$\mu_t = \rho_{nf} \frac{1}{\varepsilon} C_\mu K^2 \quad (9)$$

به منظور محاسبه سرعت در اعداد رینولدز ۱۸۰۰۰ تا ۴۲۰۰۰ از رابطه ۱۰ استفاده شده است. این رابطه مربوط به عدد رینولدز می‌باشد. در این رابطه قطر لوله جاذب در کلکتور خورشیدی پارابولیک و ρ_{THNF} و μ_{THNF} به ترتیب جرم مخصوص و ضریب لزجت نانوسیال هیبریدی می‌باشند. به منظور محاسبه انتقال حرارت در کلکتور خورشیدی پارابولیک از رابطه عدد ناسلت متوسط استفاده می‌شود. رابطه ۱۱ نحوه محاسبه عدد ناسلت متوسط در سیستم خورشیدی مطالعه حاضر را نشان می‌دهد. در این رابطه h_{THNF} ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال هیبریدی دوفازی و D_h قطر هیدرولیکی لوله جاذب

$$\begin{aligned} \nabla(\rho_{bf}\phi_{bf}\vec{U}_{bf}h_{bf} + \rho_s\phi_s\vec{U}_sh_s) \\ = \nabla\left((\phi_{bf}k_{bf} + \phi_s k_s)\nabla\vec{T}\right) \quad (21) \\ + \frac{\vec{J}\cdot\vec{J}}{\sigma_m} \end{aligned}$$

$$\vec{J} = \sigma(-\vec{\nabla}\phi + (\vec{u} \times \vec{B})) \quad (22)$$

$$\nabla(\rho_s\phi_s\vec{U}_m) = -\nabla(\rho_s\phi_s\vec{U}_{dr,s}) \quad (23)$$

$$Ha = B_0 D_h \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)_{THNF}^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

۳-۱- استقلال نتایج عددی از تعداد مش

بررسی استقلال از شبکه یکی از بخش های بسیار مهم در هر شبیه سازی می باشد. عدم وابستگی حل به مش نه تنها در دینامیک سیالات محاسباتی، بلکه در تمامی نرم افزارهای شبیه سازی، که دامنه محاسباتی را به زیردامنه های کوچکتر تقسیم بندی می کنند نیز باید بررسی شود. در این مطالعه کلکتور خورشیدی پارابولیک مجهز به ترکیب توربولاتورهای و سیم دایره ای شکل در عدد رینولدز ۴۲۰۰۰ و کسر حجمی ۲/۲۵ درصد از نانوسیال هیبریدی آب/ نانولوله کربنی چند جداره- اکسید آهن- مس برای شبکه با تعداد المان های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در هر مرحله مقادیر به دست آمده از عدد ناسلت متوسط در کلکتور خورشیدی مجهز به ترکیب توربولاتور و سیم دایره ای شکل گزارش شده است. این کار برای ۶ مرحله انجام شده است. نتایج به دست آمده از میزان تغییرات عدد ناسلت متوسط در عدد رینولدز ۴۲۰۰۰ و کسر حجمی ۲/۲۵ درصد در شکل (۴) گزارش شده است. نتایج بیانگر آن است که از تعداد ۳۷۴۱۲۵۷ تغییرات عدد ناسلت متوسط نسبت به تعداد المان ها بسیار پایین است. در حقیقت می توان بیان نمود که پاسخ های شبیه سازی قابل اطمینان بوده و می توان به آن استناد کرد. همچنین شماتیک شبکه بندی شده لوله جاذب مجهز به ترکیب توربولاتورها و سیم دایره ای شکل در شکل (۵) نشان داده شده است.

$$E_s = Q_s \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_0}{T_{sun}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_{sun}} \right) \right] \quad (16)$$

$$\eta_{ex} = \frac{E_u}{E_s} \quad (17)$$

۳- معادلات مربوط به مدل سازی میدان مغناطیسی

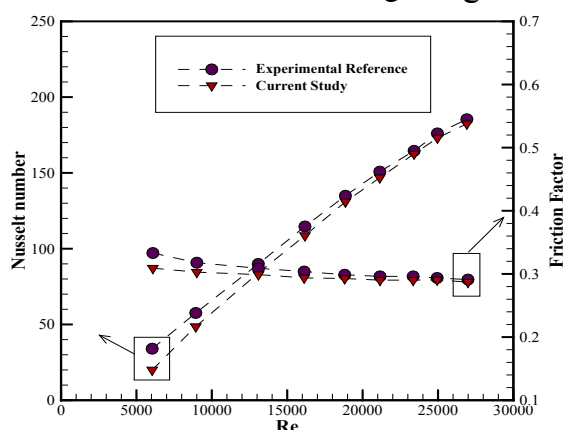
معادله مومنوم در کلکتور خورشیدی پارابولیک برای جریان نانوسیال هیبریدی آب/ اکسید آهن- مس- نانو لوله کربنی چند جداره تحت تأثیر میدان مغناطیسی به صورت رابطه (۱۸) می باشد [۲۵ و ۲۶]. در معادله مومنوم $\vec{U}_{dr,bf}$ سرعت رانش نانوذرات و $\vec{U}_{dr,s}$ سرعت رانش سیال پایه آب می باشند. برای به دست آوردن آنها به ترتیب از معادلات (۱۹) و (۲۰) استفاده می شود. قسمت $\vec{H}(\vec{M} \cdot \vec{\nabla})\mu_0$ در معادله مومنوم مربوط به نیروی کلون می باشد. لذا اگر میدان مغناطیسی در نظر گرفته نشود این قسمت برابر صفر خواهد بود. همچنین $\vec{J} \times B$ مربوط به نیروی لورنتس می باشد. در حقیقت \vec{J} جریان الکتریکی القا شده در اثر حرکت سیال هادی الکتریسته در میدان مغناطیسی است [۲۶]. معادله انرژی به صورت سه بعدی در هندسه مبدل حرارتی دو لوله ای به همراه نانوسیال هیبریدی آب/ اکسید آهن- مس- نانو لوله کربنی چند جداره تحت تأثیر میدان مغناطیسی به صورت رابطه (۲۱) بازنویسی می گردد. در این معادله جمله $\frac{\vec{J}\cdot\vec{J}}{\sigma_m}$ تلفات ژول است، که به دلیل میدان مغناطیسی اضافه شده است. در این رابطه \vec{J} با استفاده از رابطه (۲۲) محاسبه می گردد. همچنین کسر حجمی نانوذرات هیبریدی دوفازی با استفاده از رابطه (۲۳) محاسبه می گردد [۲۶]. علاوه بر این، برای محاسبه عدد هارتمن از رابطه (۲۴) استفاده می شود. که در این رابطه B_0 میدان مغناطیسی، D_h قطر هیدرولیکی، σ رسانایی الکتریکی و μ لزجت نانوسیال هیبریدی می باشند.

$$\begin{aligned} \rho_m(\vec{U}_m \nabla \vec{U}_m) = -\nabla \vec{P} \\ + \mu_m (\nabla \vec{U}_m + (\nabla \vec{U}_m)^T) \\ + \nabla(\rho_{bf}\phi_{bf}\vec{U}_{dr,bf}\vec{U}_{dr,bf} \\ + \rho_s\phi_s\vec{U}_{dr,s}\vec{U}_{dr,s}) + \rho_m \vec{g} \\ + \mu_0 (\vec{M} \cdot \vec{\nabla}) \vec{H} + \vec{J} \times B \end{aligned} \quad (18)$$

$$\vec{U}_{dr,bf} = \vec{U}_{bf} - \vec{U}_m \quad (19)$$

$$\vec{U}_{dr,s} = \vec{U}_s - \vec{U}_m \quad (20)$$

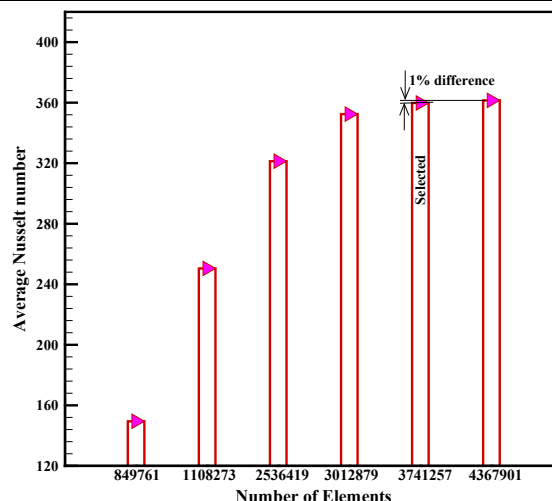
مقایسه نتایج بدست آمده از حل عددی با داده‌های تجربی حداکثر میزان خطا ۲/۹۷ درصد می‌باشد لذا می‌توان از صحت نتایج مطمئن شد.



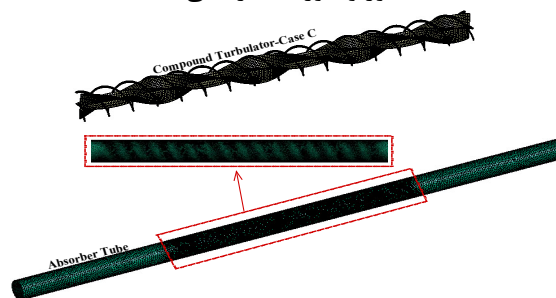
شکل (۶): اعتبارسنجی نتایج پژوهش حاضر با پژوهش تجربی کومار و همکاران [۲۸].

مطالعه تأثیر میدان مغناطیسی بر رفتار سیال برای اولین بار توسط هارتمن انجام شده است [۱۶]. مطابق نتایج ارائه شده در مطالعه هارتمن، اعمال میدان مغناطیسی در یک کانال می‌تواند بر لزجت، سرعت جریان و افت فشار تأثیر قابل‌توجهی داشته باشد؛ لذا بررسی تأثیر این پارامتر در سیستم‌های حرارتی اخیراً مورد توجه پژوهشگران مختلفی قرار گرفته است. در نرم‌افزار انسیس فلونت امکان تجزیه و تحلیل رفتار جریان سیال تحت تأثیر میدان‌های الکترومغناطیسی ثابت (DC) و نوسانی (AC) با استفاده از مدل MHD وجود دارد. میدان مغناطیسی اعمال شده خارجی، می‌تواند با استفاده از توابع ساده داخل فلونت و یا با استفاده از توابع تعریف شده توسط کاربر^۳ (UDF) اعمال شود [۲۹].

مقادیر به‌دست‌آمده از معیار ارزیابی عملکرد هیدرولیکی - حرارتی بر حسب عدد رینولدز مختلف درون کلکتور خورشیدی پارابولیک تحت تأثیر میدان مغناطیسی در اعداد هارتمن ۵۰ تا ۲۰۰ (برای الف) نمونه ۱، (ب) نمونه ۲ و (ج) نمونه ۳ در شکل (۷) نشان داده شده است. نانوسیال هیبریدی آب/اکسید آهن - مس - نانولوله کربنی چند جداره در کسر حجمی ۲/۲۵ درصد مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج معیار ارزیابی عملکرد هیدرولیکی - حرارتی با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده از عدد ناسلت متوسط و



شکل (۴): نتایج پیکربندی شبکه بر اساس عدد ناسلت متوسط در لوله جاذب کلکتور خورشیدی مجهز به توربولاتورهای ترکیبی



شکل (۵): تصویر پیکربندی مش لوله جاذب مجهز به توربولاتورهای ترکیبی در کلکتور خورشیدی پارابولیک

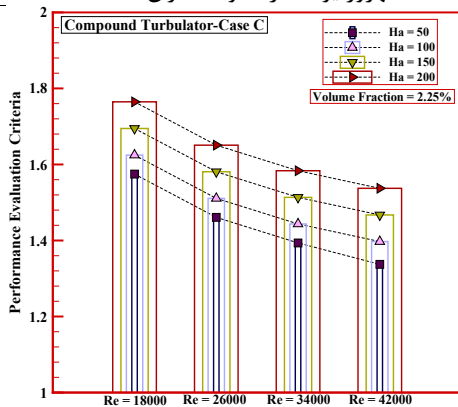
۴- بحث بر روی نتایج

۴-۱- اعتبارسنجی

در مطالعه حاضر برای انجام اعتبارسنجی از یک مطالعه تجربی استفاده شده است. کومار و همکاران [۲۸] در یک مطالعه که مبنای آن بر اساس روش آزمایشگاهی می‌باشد، تأثیر استفاده توربولاتور دیسکی را در عملکرد هیدرودینامیکی یک مبدل حرارتی مورد بررسی قرار دادند. اعتبارسنجی بر اساس مدل فیزیکی هندسی و شرایط مرزی ورودی و خروجی مطالعه کومار و همکاران [۲۸] در اعداد رینولدز مختلف انجام شده است. اعتبارسنجی در شرایط نسبت گام^۱ $PR = 1$ و شاخص سوراخ شدگی^۲ $PI = 16\%$ انجام شده است. نتایج به دست آمده از عدد ناسلت متوسط و ضریب اصطکاک برحسب عدد رینولدز در شکل (۶) به نمایش در آمده است. با

³ User Defined Functions

¹ Pitch Ratio
² Perforation Index



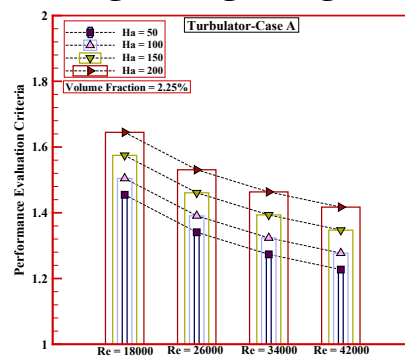
(ج)

شکل (۷): نتایج محاسبه معیار ارزیابی عملکرد

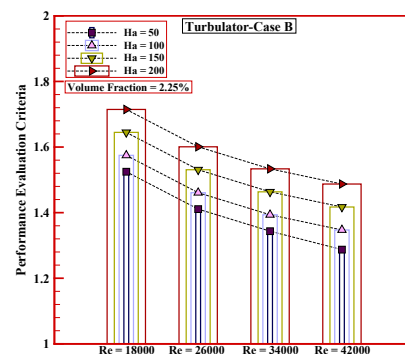
هیدرولیکی - حرارتی در کلکتور خورشیدی پارابولیک تحت تأثیر میدان مغناطیسی برای شکل‌های هندسی مختلف از توربولاتورهای ترکیبی

مقادیر به دست آمده از بازده آگرژی بر حسب عدد رینولدز مختلف درون کلکتور خورشیدی پارابولیک تحت تأثیر میدان مغناطیسی در اعداد هارتمن ۵۰ تا ۲۰۰ (برای الف) (نمونه ۱، ب) (نمونه ۲ و ج) (نمونه ۳ در شکل ۸) نشان داده شده است. نانوسیال هیبریدی آب/اکسید آهن - مس - نانولوله کربنی چند جداره در کسر حجمی ۲/۲۵ درصد مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج ارائه شده می‌توان بیان نمود که اعمال نیروی مغناطیسی و افزایش عدد هارتمن باعث افزایش بازده آگرژی گردیده است. این در حالی است که افزایش سرعت ورودی یا افزایش رینولدز باعث شده که مقادیر بازده آگرژی کاهش پیدا کند. در واقع از دیدگاه قانون دوم نیوتن افزایش سرعت ورودی، باعث کاهش کار خروجی در کلکتور خورشیدی پارابولیک می‌گردد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بر اساس نتایج عدد هارتمن ۲۰۰ دارای بیشترین مقادیر بازده آگرژی در تمامی محدوده اعداد رینولدز مورد بررسی می‌باشد و پس از آن اعداد هارتمن ۱۵۰، ۱۰۰ و ۵۰ در جایگاه‌های بعدی قرار دارند. حداکثر بازده آگرژی مربوط به عدد رینولدز ۱۸۰۰۰ در هارتمن ۲۰۰ می‌باشد. به عبارت بهتر استفاده از این سیستم در رینولدزهای پایین بازدهی بیشتری دارد و در رینولدزهای بالا استفاده از آن باعث کاهش بازده آگرژی می‌شود.

افت فشار در کلکتور خورشیدی پارابولیک تحت تأثیر میدان مغناطیسی محاسبه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد رینولدز مقادیر ارزیابی عملکرد هیدرولیکی - حرارتی کاهش، و با افزایش عدد هارتمن افزایش می‌یابد. در حقیقت استفاده از میدان مغناطیسی و افزایش عدد هارتمن باعث افزایش مقادیر عدد ناسلت متوسط در تمامی حالت‌های هندسی از توربو لاتور شده است. این در حالی است که با تغییر شکل هندسی (نمونه ۱، نمونه ۲ و نمونه ۳) مقادیر معیار ارزیابی عملکرد هیدرولیکی - حرارتی افزایش می‌یابد. همچنین استفاده از میدان مغناطیسی در عدد هارتمن بالاتر تأثیر قابل توجهی بر عملکرد هیدرودینامیکی سیستم دارد و مقدار شاخص ارزیابی عملکرد هیدرولیکی - حرارتی را تا حدی نسبت به اعداد هارتمن پایین‌تر افزایش می‌دهد. در تمامی حالت‌ها مقادیر شاخص ارزیابی عملکرد هیدرولیکی - حرارتی همواره بیشتر از ۱ می‌باشد؛ لذا می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از میدان مغناطیسی همواره در بهبود انتقال حرارت تأثیر داشته است. علاوه بر این، استفاده از میدان مغناطیسی در کلکتور خورشیدی به لحاظ اهمیت شاخص ارزیابی عملکرد هیدرولیکی - حرارتی مطلوب می‌باشد.



(الف)



(ب)

جداره اکسید آهن - مس با در نظر گرفتن مدل دوفازی شبیه‌سازی گردید. نتایج شاخص به‌دست‌آمده در این مطالعه عبارت‌اند از:

(۱) استفاده از نانوسیال هیبریدی مغناطیسی با سه نانوذره اکسید آهن، نانولوله کربنی چند جداره و مس در کلکتور خورشیدی پارابولیک همواره باعث می‌شود میزان انتقال حرارت بیشتر از سیال پایه آب باشد.

(۲) حداکثر میزان بازده حرارتی کلکتور خورشیدی پارابولیک در حالت لوله جاذب مجهز به ترکیب توربو لاتور و سیم دایره‌ای شکل می‌باشد.

(۳) اضافه کردن توربو لاتور باعث شده بر خلاف جریان لایه‌ای که در آن حرکت ذرات سیال به شکل لایه‌ای است، ذرات سیال در راستای عمود بر مسیر حرکت نیز با هم مخلوط شده و حرکتی تصادفی را ایجاد کنند.

(۴) نتایج بررسی شده از معیار ارزیابی عملکرد هیدرولیکی - حرارتی توصیف می‌کند که در این مطالعه به‌کارگیری توربو لاتور در لوله جاذب کلکتور خورشیدی همواره نقش مثبت و مطلوبی دارد.

(۵) حداکثر بازده انرژی مربوط به لوله جاذب مجهز به ترکیب توربو لاتور و سیم دایره‌ای شکل می‌باشد.

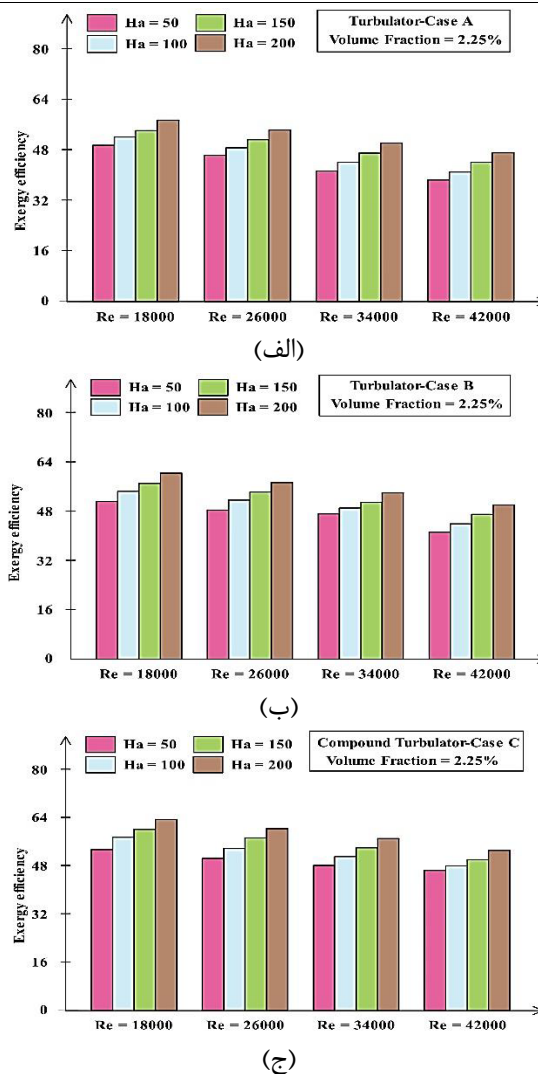
(۶) با افزایش سرعت در ورودی لوله جاذب کلکتور خورشیدی بازده انرژی کاهش پیدا می‌کند. این در حالی است که تغییر شکل هندسی توربو لاتور باعث افزایش بازده انرژی می‌گردد.

(۷) استفاده از میدان مغناطیسی همواره در بهبود انتقال حرارت تأثیر داشته است. زیرا همواره انتقال حرارت افت فشار غلبه می‌کند و نتایج به‌دست‌آمده از معیار ارزیابی عملکرد هیدرولیکی حرارتی بیشتر از ۱ می‌باشند.

(۸) حداکثر بازده انرژی مربوط به عدد رینولدز ۱۸۰۰۰ در هارتمن ۲۰۰ می‌باشد. به عبارت بهتر، استفاده از این سیستم در رینولدزهای پایین تحت تأثیر میدان مغناطیسی بازدهی بیشتری دارد و در رینولدزهای بالا استفاده از آن باعث کاهش بازده انرژی می‌شود.

۶- مراجع

- [1] Khalili, Z., Sheikholeslami, M., "Numerical modeling for efficiency of solar cell module combined with TEG involving Fe₃O₄-water nanofluid utilizing MHD", Journal of Magnetism and Magnetic



شکل (۸): نتایج محاسبه بازده انرژی در کلکتور خورشیدی پارابولیک تحت تأثیر میدان مغناطیسی برای شکل‌های هندسی مختلف از توربولاتورهای ترکیبی

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر میدان مغناطیسی در اعداد هارتمن ۵۰ تا ۲۰۰ در کلکتور خورشیدی پارابولیک در کسر حجمی صفر تا ۲/۲۵ درصد از نانوسیال هیبریدی مغناطیسی با سه نانوذره اکسید آهن، نانولوله کربنی چند جداره و مس در محدوده رینولدز ۱۸۰۰۰ تا ۴۲۰۰۰ انجام شد. در قسمت عددی یک کلکتور خورشیدی پارابولیک با استفاده از روش حجم محدود مورد شبیه‌سازی قرار گرفت و از خواص ترموفیزیکی نانوسیال هیبریدی مغناطیسی به‌عنوان سیال کاری در آن استفاده شد. لوله جاذب کلکتور خورشیدی مورد مطالعه مجهز به سه شکل هندسی مختلف از توربو لاتور می‌باشد نانوسیال هیبریدی آب/نانولوله کربنی چند

- [14] Raquel de Oliveira, L., Ferreira Lima Ribeiro, S.R., Miranda Reis, M.H., Luiz Cardoso, V., Bandarra Filho, E.P., "Diamond and Related Materials", Vol. 96, pp. 216-230, 2019, DOI 10.1016/j.diamond.2019.05.004.
- [15] Anish, M., Jayaprakash, J., Jayaprakash, V., Prabhu, A., Bhuvanesh Ram, V., Austin Jijo, M., "Measurement dependent temperature of thermal conductivity and viscosity by using Al₂O₃ – Therminol 55 based nanofluid", Materials Today, Vol. 21, pp. 332-334, 2020, DOI 10.1016/j.matpr.2019.05.457.
- [16] S. Kassim, A. Salah Fouad, O. Samarmad, Ahmed, "Experimental and Numerical Study of Enhancement Heat Transfer Coefficient of TiO₂/Water Nanofluid in Spiral Fluted Tube Equipped with Twisted Tape", Nanoscience & Nanotechnology-Asia, Vol. 7, pp.1432-1456, 2021, DOI 10.2174/2210681206666161021105504.
- [17] Shaker, B., Gholinia, M., Pourfallah, M., Ganji, D.D., "CFD analysis of Al₂O₃-syltherm oil Nanofluid on parabolic trough solar collector with a new flange-shaped turbulator model", Theoretical and Applied Mechanics Letters, Vol. 12, pp. 100323, 2022, DOI 10.1016/j.taml.2022.100323.
- [18] Abdalla, A.N., Shahsavari, A., "Numerical investigation of the effect of rotary propeller type turbulator on the energy and exergy efficiencies of a concentrating photovoltaic/thermal hybrid collector", Journal of Cleaner Production, Vol. 393, pp. 136225, 2023, DOI 10.1016/j.jclepro.2023.136225.
- [19] Jie, Z., Binti Muhamad, S., Abed, A.M., Deifalla, A., Ghoushchi, S.P., Rusni, I.M., "Hydrothermal parameters enhancement of a DTHX with simultaneous V-cut twisted tape turbulator and air/CuO-water flow usage", Case Studies in Thermal Engineering, Vol. 45, pp. 102989, 2023, DOI 10.1016/j.csite.2023.102898.
- [20] Ghanbari, G., Marzban A., & Yousefzadeh S., Improving the thermal efficiency of parabolic trough collector equipped with combined turbulator containing two-phase magnetic hybrid nanofluid, Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol. 155, pp. 565–583, 2023, DOI 10.1016/j.enganabound.2023.06.022.
- [21] Abasi Varzaneh, A.R., Toghraie, D., Karimipour, A., "Comprehensive simulation of nanofluid flow and heat transfer in straight ribbed microtube using single-phase and two-phase models for choosing the best conditions", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry volume, Vol. 139, pp. 701-720, 2020, DOI 10.1007/s10973-019-08381-8.
- [22] Jafaryar, M., Sheikholeslami, M., "Efficacy of turbulator on performance of parabolic solar collector with using hybrid nanomaterial applying numerical method", Renewable Energy, Vol. 198, pp. 534-548, 2022, DOI 10.1016/j.renene.2022.08.037.
- [23] Aminfar, H., Mohammadpourfard, M., Mohseni, F., "Two-phase mixture model simulation of the hydro-thermal behavior of an electrically conductive ferrofluid in the presence of magnetic fields", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 324, pp.830-842, 2012, DOI 10.1016/j.jmmm.2011.09.028.
- [24] Xiong, Q., Jafaryar, M., Divsalar, A., Sheikholeslami, M., Shafee, A., Dat, D., Vo, M. Khan, H., Tlili, I., Lijk, Z., "Macroscopic simulation of nanofluid Materials, Vol. 580, pp. 170950, 2023, DOI 10.1016/j.jmmm.2023.170950
- [2] Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A., Kim, K.H., "Solar energy: Potential and future prospects. Renewable and Sustainable Energy Reviews", Vol. 82, pp. 894-900, 2018, DOI 10.1016/j.rser.2017.09.094.
- [3] SolarGis S.R.O, Slovakia, available at: <http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/download>, Visited date: January 19, 2019.
- [4] Duffie J.A., Beckman W.A., "Solar Engineering of Thermal Processes", John Wiley & Sons, New York, 2006.
- [5] Sommers, A.D., Yerkes, K.L. "Experimental investigation into the convective heat transfer and system-level effects of Al₂O₃-propanol nanofluid", J Nanopart Res, 12, pp. 1003–1014, 2010, DOI 10.1007/s11051-009-9657-3.
- [6] Wongcharee, K., Eiamsa-ard, S., "Heat transfer enhancement by twisted tapes with alternate-axes and triangular, rectangular and trapezoidal wings, Chemical Engineering and Processing": Process Intensification, Vol. 50, pp. 211-219, 2011, DOI 10.1016/j.cep.2010.11.012.
- [7] Mohammed, H.A., -Shamani, A.N. Al, Sheriff, J.M., "Thermal and hydraulic characteristics of turbulent nanofluids flow in a rib-groove channel", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 39, pp. 1584-1594, 2012, DOI 10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.10.020.
- [8] Manca, O., Nardini, S., Ricci, D., "Enhancement of Forced Convection in Ribbed Channels by Nanofluids", International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Vol. 121, pp. 695-703, 2013, DOI 10.1115/IMECE2012-88892.
- [9] Waghole, D. R., Warkhedkar, R.M., Kulkarni, V.S., Shrivastva, R.K., Experimental Investigations on Heat Transfer and Friction Factor of Silver Nanofluid in Absorber/Receiver of Parabolic Trough Collector with Twisted Tape Inserts, Energy Procedia, Vol. 45, pp.558-567, 2014, DOI 10.1016/j.egypro.2014.01.060.
- [10] Akhavan-Behabadi, M.A., Shahidi, M., Aligoodarzi, M.R., "An experimental study on heat transfer and pressure drop of MWCNT–water nano-fluid inside horizontal coiled wire inserted tube", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 63, pp. 62-72, 2015, DOI 10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.02.013.
- [11] Amirahmadi, S., Rashidi, S., Abolfazli Esfahani, J., "Minimization of exergy losses in a trapezoidal duct with turbulator, roughness and beveled corners", Applied Thermal Engineering, Vol. 107, pp. 533-543, 2016, DOI 10.1016/j.applthermaleng.2016.06.182.
- [12] Mashoofi, N., Pesteei, S.M., Moosavi, A., Sadighi Dizaji, H., "Fabrication method and thermal-frictional behavior of a tube-in-tube helically coiled heat exchanger which contains turbulator", Applied Thermal Engineering, Vol. 111, pp. 1008-1015, 2017, DOI 10.1016/j.applthermaleng.2016.09.163.
- [13] Bhuiya, M.M.K., Chowdhury, M.S.U., Shahabuddin, M., Saha M., Memon, L.A., "Thermal characteristics in a heat exchanger tube fitted with triple twisted tape inserts", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 48, pp. 124-132, 2018, DOI 10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.08.024.

- turbulent flow due to compound turbulator in a pipe”, *Chemical Physics*, Vol. 527, pp. 110-475, 2019, DOI 10.1016/j.chemphys.2019.110475.
- [25] Dawar, A., Shah, Z., Islam, S., Deebani, W., Shutaywi, M., MHD stagnation point flow of a water-based copper nanofluid past a flat plate with solar radiation effect, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 220, pp. 111148, 2023, DOI 10.1016/j.petrol.2022.111148.
- [26] Khalili, Z., Sheikholeslami, M., “Numerical modeling for efficiency of solar cell module combined with TEG involving Fe₃O₄-water nanofluid utilizing MHD”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 580, pp. 170950, 2023, DOI 10.1016/j.jmmm.2023.170950.
- [27] Cianfrini, M., Corcione, M., Quintino, A., “Natural convection heat transfer of nanofluids in annular spaces between horizontal concentric cylinders”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, pp 17–18, pp. 4055-4063, 2011, DOI 10.1016/j.applthermaleng.2011.08.010.
- [28] Kumar, A., Singh, S., Chamoli, S., Kumar, M., “Experimental investigation on thermo-hydraulic performance of heat exchanger Tube with solid and perforated circular disk along with twisted tape Insert”, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 40, pp. 616-626, 2019, DOI 10.1080/01457632.2018.1436618.
- [29] ANSYS® Academic Research, Release 18.1, ANSYS FLUENT, Theory Guide, ANSYS, Inc