



بررسی عملکرد انتقال حرارت جریان دو فازی نانوسیال در یک کلکتور خورشیدی سهموی با جاذب خارج از مرکز و عایق جامد

مجتبی جمعیتی^{۱*}، حسین پورمحمدیان^۲، مهدی حسن زاده^۲

۱. استادیار، گروه فیزیک، واحد نراق، دانشگاه آزاد اسلامی، نراق، ایران

۲. گروه مهندسی مکانیک، واحد نراق، دانشگاه آزاد اسلامی، نراق، ایران

*نویسنده مسئول: drmjamiati@gmail.com

چکیده

در این تحقیق تحلیل میدان جریان و انتقال حرارت جریان دو فازی نانوسیال در یک کلکتور خورشیدی سهموی با جاذب خارج از مرکز و عایق جامد مورد بررسی قرار گرفته است. سیال مورد استفاده در این کلکتور نانوسیال آب-آلومینیم است. هدف اصلی پژوهش پیش رو، بررسی تأثیر استفاده از سیستم جاذب خارج از مرکز و عایق جامد بر بازده انرژی کلکتورهای سهموی خطی است. بدین منظور بازده انرژی برای حالت‌های مختلف (شامل دمای محیط، دمای ورودی سیال، کسر حجمی نانوسیال، قطر نانوذرات و مشخصات هندسی) اندازه‌گیری و ارائه شده‌اند. مطالعه در رژیم جریان آشفته بوده و به منظور مدل سازی آن از مدل توربولانسی $k-\epsilon$ استفاده شده است. به منظور حل معادلات بقا از روش حجم محدود و الگوریتم SIMPLE C استفاده شده است. مدل‌های بهینه مختلف از نظر دارا بودن بیش‌ترین بازده انرژی، معرفی شده و در نهایت براساس نتایج به دست آمده برترین مدل مشخص گردیده است. بر اساس نتایج حاصل، بیشترین مقدار بازده انرژی در رینولدزهای مختلف مربوط به کلکتور نوین و مدل دوفازی بوده است. در جایگاه‌های بعدی به ترتیب، کلکتور نوین و مدل تک‌فازی، کلکتور پایه و مدل دوفازی و در انتها کلکتور پایه و مدل تک‌فازی قرار دارند. همچنین مشخص شد که با افزایش مقدار عدد رینولدز، تمامی حالات روند صعودی دارند. بیشینه مقدار بازده انرژی برای کلکتور نوین و مدل دوفازی در رینولدز ۱۵۰۰۰ بوده که مقدار آن برابر ۶۸٪ است. همچنین بیشینه مقدار بازده انرژی برای خروج از مرکز ۲۰ میلی‌متر در رینولدز ۱۵۰۰۰ بوده که مقدار آن برابر ۷۴/۹٪ است. کمینه این مقدار برای خروج از مرکز صفر در رینولدز ۶۰۰۰ بوده که مقدار آن برابر ۶۳/۸٪ است.

کلمات کلیدی: کلکتور خورشیدی سهموی خطی، بهینه‌سازی انرژی، تشعشع، عایق جامد، نانوسیال.

مقدمه

یکی از روش‌های بهبود فرایند انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی، افزودن موادی با ضریب هدایت حرارتی بالا به سیال پایه است. محققان سال‌ها بر روی استفاده از مخلوط ذرات جامد معلق بسیار کوچک در ابعاد میکرو در سیال برای بهبود انتقال حرارت کار کردند. اما این سیالات باعث مشکلات فراوانی مانند رسوب‌گذاری، ناخالصی، خوردگی، افزایش افت فشار می‌شوند. تا اینکه در سال ۱۸۸۱ ایده استفاده از ذرات در ابعاد نانو برای اولین بار توسط ماکسول^۱ مطرح و انقلاب بزرگی در زمینه انتقال حرارت در سیالات پدید آمد. در واقع او دیدگاه تازه‌ای را در مورد سوسپانسیون سیال جامد با ذراتی در ابعاد نانو مطرح کرد. به طور معمول نانوذرات از جنس فلزاتی مانند مس، آلومینیم، پتاسیم، سیلیسیم و اکسیدهای آنها و همچنین نانولوله‌های کربن و سیالات پایه نیز عمدتاً از سیالات با رسانایی نسبتاً پایین‌تر مانند آب، اتیلن گلیکول و سیالاتی از این دسته که در صنعت به عنوان هادی انتقال حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرند، می‌باشند [۱]. نانوسیالات را می‌توان به عنوان نسل بعدی سیالات در انتقال حرارت در نظر گرفت، چرا که توانایی‌های زیادی برای افزایش ضریب انتقال حرارت نسبت به سیالات خالص ایجاد می‌کنند. این ذرات ریز معلق موجب افزایش بهره‌وری سیستم شده و باعث نیاز کمتر به تجهیزات انتقال حرارتی می‌شوند. این در حالی است که همزمان مشکلات مربوط به افت فشار و گرفتگی مجاری جریان را نیز کاهش و بر طرف می‌کنند. نانوسیالات با افزایش کارایی

1. maxwell



تجهیزات انتقال حرارت همچون مبدل‌ها ما را قادر به طراحی سیستم‌های کوچکتر با کارایی یکسان می‌کنند [۲]. نانوذرات در اثر مهاجرت خود انرژی را در سیال منتقل می‌نمایند و اثر این نوع انتقال انرژی در لایه مرزی بسیار تأثیر گذار است. اگرچه انتقال حرارت منتقل شده در اثر مهاجرت نانوذرات ناچیز است، ولی لغزش نانوذرات در سیال پایه باعث ایجاد ناهمگونی در نانوسیال می‌گردد. ناهمگونی ایجاد شده باعث تغییر موضعی خواص نانوسیال شده و از این طریق انتقال حرارت جابجایی در نانوسیالات را تحت تأثیر قرار می‌دهد. یانگ و همکاران [۳] به بررسی ضریب انتقال حرارت نانوسیال آب-گرافیت در یک مبدل لوله‌ای افقی پرداختند. آنها تأثیر عدد رینولدز، دما، کسر حجمی نانوذرات و منبع نانوذرات و نوع سیال پایه بر روی ضریب انتقال حرارت بررسی نمودند. نتایج حاکی از افزایش ضریب انتقال حرارت با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات می‌باشد. همچنین با افزایش دمای نانوسیال، میزان افزایش ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. لی و همکاران [۴] هدایت حرارتی و خواص جریان نانوسیال آلومینا و اکسید مس در سیال پایه آب و اتیلن گلیکول را در محدوده جریان‌های آشفته و آرام؛ در داخل یک لوله اندازه‌گیری نمودند. نتایج آنها نمایانگر افزایش قابل ملاحظه هدایت حرارتی نانوسیال در مقایسه با سیال پایه می‌باشد. محمودی و هاشمی [۵] به صورت عددی به مطالعه جریان سیال و انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانوسیال آب-مس در یک محفظه C شکل در نسبت‌های منطقی و اعداد رایلی مختلف پرداختند. بر اساس نتایج آنها عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد رایلی و کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد. همچنین آنها گزارش کردند که در یک نسبت منطقی ثابت با افزایش عدد رایلی نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. بنابدراهمانه و همکاران [۶] در یک مطالعه عددی سه بعدی، بهبود عملکرد حرارتی کلکتورهای خورشیدی سهموی را با در نظر گرفتن مدل‌های تک فاز و دو فازی در نرم‌افزار انسیس-فلوئنت بررسی نمودند. آنها جریان آشفته نانوسیال آلومینا در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به فین‌های زاویه‌دار تحت تابش خورشیدی غیر یکنواخت را بررسی کردند. چافی و همکاران [۷] در یک پژوهش تجربی بازده انرژی و انرژی کلکتورهای خورشیدی سهموی را مورد ارزیابی قرار دادند. هدف اصلی کار آنها بهبود عملی عملکرد کلکتورهای خورشیدی سهموی بود. عظیمی [۸] در یک مطالعه تحلیلی و آزمایشگاهی، آثار استفاده از بازتابنده‌های تخت در چهار طرف کلکتور و همچنین عدسی‌ها را بر روی عملکرد کلکتور صفحه تخت خورشیدی بررسی کرد. دوتا گوپتا و سابا [۹] تحلیل انرژی یک کلکتور را برای پیدا کردن دمای ورودی بهینه با فرض ثابت بودن ضریب کلی افت حرارت انجام دادند. هال و همکاران [۱۰] به تحلیل انرژی دریافت کننده‌های خورشیدی فضایی، با این فرض که ضریب کلی افت حرارت تابع توانی از دمای متوسط سطح بیرونی باشد، پرداختند. چاندرا و همکاران [۱۱] به صورت عددی عملکرد کلکتورهای خورشیدی سهموی طرح مبتنی بر خلأ و مبتنی بر هوا را مورد بررسی قرار دادند. شیگاکا و همکاران [۱۲] یک فرآیند تولید فولاد را (که در آن از انرژی خورشیدی استفاده می‌شود) در کشور ژاپن مورد تحلیل انرژی قرار دادند. آنها افت انرژی را به صورت تابعی از پارامترهایی نظیر نرخ اختلاط آهن خام در فرآیند کوره قوس الکتریکی و در نهایت افت انرژی کلی سیستم محاسبه نمودند. آکودو و همکاران [۱۳] به مطالعه تحلیل انرژی کوره تولید آلومینیوم سینک شده با یک کلکتور خورشیدی مجهز به بازتابنده پرداختند. هدف کار آنها تجزیه و تحلیل و تعیین تلفات انرژی و برگشت ناپذیری‌های فرآیند تولید آلومینیوم با استفاده از قوانین اول و دوم ترمودینامیک بود. حیدری و کرمانی [۱۴] اثر نانوسیال انتقال حرارت جابجایی اجباری مس-آب را بر میدان انتقال حرارت و میدان جریان در کانال دیواره سینوسی بصورت عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که استفاده هم‌زمان از نانوسیال و دیواره‌های افقی موج‌دار می‌تواند انتقال حرارت را تا ۵۰٪ افزایش دهد. جنبه‌های مختلف انتقال حرارت در اطراف موانع در دو دهه‌ی اخیر مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵]. اسریکت و همکاران [۱۶] تحقیقاتی را روی جریان و انتقال حرارت در اطراف یک مانع مثلی که درون یک کانال افقی قرار دارد انجام داده‌اند. آنها دریافته‌اند که بیشترین تجمع دمایی در سطوح بالا و پایین مانع مثلی اتفاق می‌افتد. تحقیقات تجربی برای انتقال حرارت جابجایی پشت یک مانع مثلی در جریان عرضی توسط علی و همکاران [۱۷] انجام شده است. جریان سیال و انتقال حرارت پشت یک مانع مربعی توسط دهیمانا و همکاران [۱۸] بررسی شده است. آنها دو نوع شرایط مرزی دما ثابت و شار ثابت را برای مانع در نظر گرفتند. میدان جریان و ضریب انتقال حرارت برای سیال پایه آب به همراه نانومواد، اطراف



یک مانع دایره‌ای توسط ولی‌پور و زاره‌قدی [۱۹] مورد پژوهش قرار گرفته است. نتایج کار آن‌ها نشان داده است که حداکثر سرعت منفی در ناحیه برگشتی با افزایش نسبت حجمی نانو مواد زیاد می‌شود. جریان نانو سیال و انتقال حرارت اطراف یک مانع مربعی توسط اطمینان فروجی و همکاران [۲۰] مورد بررسی قرار گرفته است. آن‌ها دریافتند که نرخ انتقال حرارت با افزایش قطر نانو ذرات، کاهش می‌یابد. از دیگر جاهایی که وجود مانع بر سر راه جریان کاربرد دارد، در جریان‌های هیدرو مگنتیک است. وجود مانع، تأثیر میدان مغناطیسی را که باعث میرایی اغتشاشات می‌شود، کاهش می‌دهد. داست و پتریت [۲۱] جریان شبه دوبعدی را برای فلز مذاب در اطراف یک مانع دایره‌ای و در یک مجرای مربعی شکل تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی خارجی مورد بررسی قرار داده‌اند. پس از آن بررسی جریان در کانال اطراف مانع مربعی تحت تأثیر میدان مغناطیسی خارجی بزرگ توسط چاترجی و گوپتا [۲۲] بررسی شد.

افزودن ذرات نانو به سیال پایه نه تنها موجب افزایش عملکرد حرارتی و قابلیت‌های ترمودینامیکی سیستم می‌گردد، بلکه به دلیل افزایش ظرفیت حرارتی در نانوسیال، بازده کلی سیستم نیز افزایش می‌یابد. لذا در این تحقیق هدف بر آن است تا از نانوسیال آب-آلومینیم به جای سیال پایه به منظور افزایش انتقال حرارت در شبیه‌سازی عددی کلکتور خورشیدی سهموی استفاده شود و در پایان تأثیر استفاده از نانوسیال بر عملکرد حرارتی و هیدرودینامیکی کلکتور در مقایسه با سیال پایه مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد.

مدل‌سازی

در این بخش، روابط مربوط به تحلیل انرژی کلکتور خورشیدی سهموی خطی ارائه می‌شوند. خواص ترموفیزیکی آب خالص (سیال پایه) و نانو ذرات آلومینیم در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱): خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذره جامد

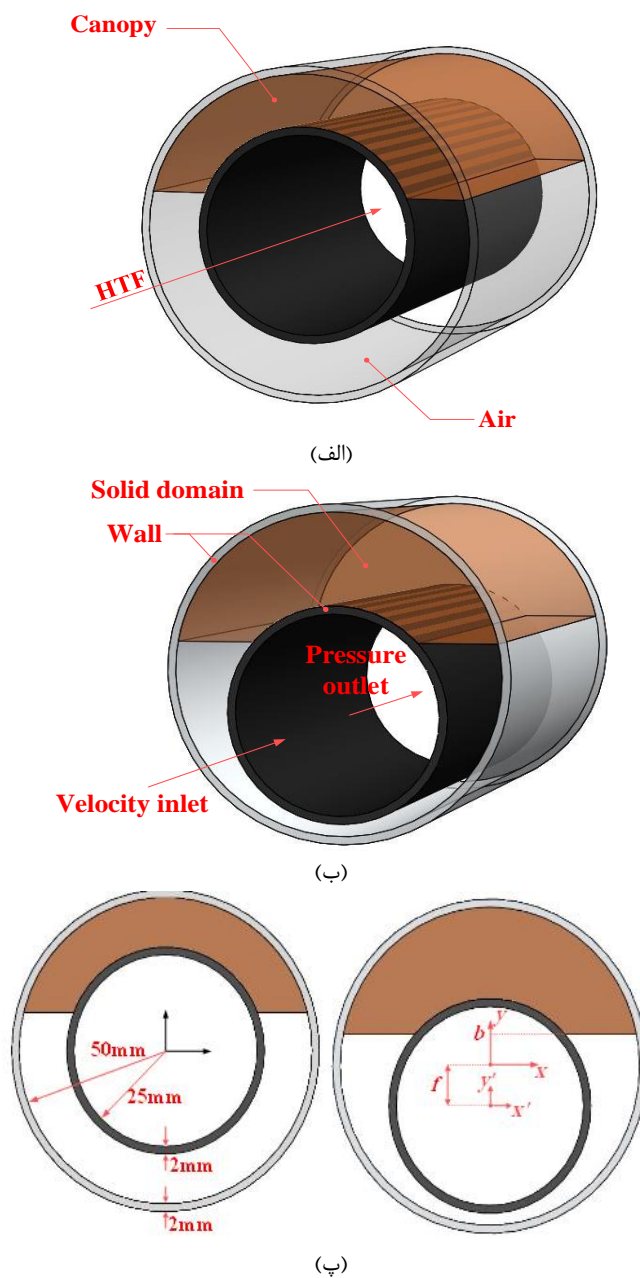
سیال عامل	چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)	گرمای ویژه ($\frac{j}{kg.k}$)
آب خالص	۹۹۷/۱	۴۱۷۹
آلومینیم	۲۷۰۰	۹۰۰
نانوسیال آلومینیم-آب	۹۹۷/۶۱	۴۱۷۸/۰۲

نمای شماتیک هندسه کلکتور خورشیدی سهموی خطی مجهز به لوله جاذب خارج از مرکز و برخی اطلاعات هندسی کلکتور خورشیدی در شکل (۱) نشان داده شده است. جدول (۲)، نیز مشخصات هندسی، ترموفیزیکی و اپتیکی کلکتور خورشیدی مدل‌سازی شده را نشان می‌دهد.

هدف اصلی کار حاضر، یافتن روشی برای رسیدن به بیشترین بازده کلکتور خورشیدی سهموی است. شار حرارتی اعمال شده به لوله جاذب کلکتور خورشیدی سهموی بر اساس نتایج بدست آمده از کد مونت-کارلو است. هندسه مسأله به صورت یک لوله افقی است که جریان نانوسیال با سرعت یکنواخت و دمای یکنواخت وارد آن شده است و به صورت توسعه یافته خارج می‌شود. به منظور شبکه بندی هندسه لوله جاذب کلکتور خورشیدی سهموی خطی از شبکه غیریکنواخت سازمان یافته استفاده می‌شود.



برای مش‌زدن هندسه از المان چهاروجهی^۲ با نوع کوپر^۳ استفاده گردید. از شبکه‌ای سه بعدی به صورت $300 \times 20 \times 78$ به ترتیب در جهت محیطی (NC)، شعاعی (NR) و محوری (NZ) استفاده شده است.



شکل ۱: نمای شماتیک و شرایط مرزی هندسه کلکتور خورشیدی سهموی خطی مجهز به لوله جاذب خارج از مرکز

1. Mesh
2. Element Quad
3. Cooper



جدول (۲): مشخصات هندسی، ترموفیزیکی و اپتیکی کلکتور خورشیدی سهموی

مشخصات	مورد
سهموی خطی مجهز به سینک حرارتی	نوع کلکتور
آلومینیوم	جنس صفحه
رنگ سیاه مات	جنس پوشش صفحه
0.001 mm	ضخامت صفحه
0.9	ضریب صدور صفحه
211 W/m.K	ضریب هدایت حرارتی صفحه
2 m	طول کلکتور
$4/85 \text{ m}$	عرض دهانه کلکتور
35 درجه	شیب قرارگیری کلکتور (β)
یک	تعداد پوشش شیشه‌ای
0.85	ضریب صدور پوشش شیشه‌ای
5 cm	قطر هیدرولیکی لوله
0.68	بازده اپتیکی
0.05 W/m.K	ضریب هدایت حرارتی عایق‌ها
4200 J/kg.K	ظرفیت گرمایی ویژه سیال عامل (آب)

مشخص شده است که به منظور بهبود عملکرد کلکتورهای خورشیدی می‌توان با استفاده از روش‌های نوین نظیر استفاده از سطوح کنگره‌دار یا شیاردار، عملکرد و بازده کلکتور را بهبود بخشید. در کار حاضر از یک طرح نوین برای استفاده از سیستم تک‌سیاله استفاده می‌شود؛ به این صورت که تمامی فضای بین کاور شیشه‌ای و جاذب، خلاء نیست و در بخش بالایی لوله جاذب، ماده عایق قرار دارد تا تلفات از بالا را کاهش دهد. همچنین از لوله خارج از مرکز استفاده شده است تا میزان عایق بیشتری در بخش بالایی کلکتور استفاده شود.

مطالعه در جریان آشفته بوده و با توجه به شرایط مرزی مناسب با استفاده از روش عددی مبتنی بر حجم محدود به منظور مدل‌سازی جریان متلاطم از مدل توربولانسی K-Epsilon¹، و برای حل معادلات بقا از یک کد کامپیوتری به زبان متلب و الگوریتم SIMPLE C² استفاده شده است.

در این مطالعه از مدل اغتشاشی k-ε نوع استاندارد³ استفاده می‌شود، زیرا متداولترین مدل برای کاربردهای صنعتی است. پارامترهای این مدل با استفاده از نتایج تجربی کالیبره می‌گردند که برای بسیاری از کاربردها، قوی و منطقی است. همچنین این مدل دارای ضرایبی است که نسبت به تنظیمات آنها بسیار حساس بوده و توانایی عمومی این مدل را برای نزدیک شدن به نتایج آزمایشگاهی قابل قبول می‌کند. تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از نرم افزار فلونت و گمبیت انجام شده است. در نهایت مدل‌های بهینه مختلف از نظر دارا بودن بیش‌ترین بازده انرژی معرفی شده و برترین مدل مشخص می‌شود. جهت محاسبه توان خروجی متمرکز کننده‌های سهموی از روند محاسباتی زیر استفاده می‌کنیم [۲۳]:

اتلاف حرارت در متمرکز کننده‌های سهموی توسط معادله (۱) بدست می‌آید:

1 . k epsilon turbulence model

2 . SIMPLE Consistent Algorithm

3 . Simple



$$Q_{loss1} = \pi D_{co} l h_w (T_{co} - T_{ci}) + \varepsilon \pi D_{co} l \sigma (T_{co}^4 - T_{sky}^4) \quad (1)$$

در معادله فوق دمای آسمان T_{sky} ، دمای محیط T_a ، ثابت استفان-بولتزمن σ ، طول کلکتور L ، ضریب گسیل ε ، می باشد. برای روند حل نیاز است که ابتدا دمای خارجی پوشش شیشه‌ای T_{co} حدس زده شود که معمولاً نزدیکتر به دمای محیط است. زیرنویس 0 بیانگر سطح خارجی پوشش است. h_w ضریب جابجایی خارجی است که از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$h_w = \frac{Nu.K}{D_{co}} \quad (2)$$

برای محاسبه Nu نیاز به محاسبه عدد رینولدز است که از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (3)$$

سپس از رابطه مک آدامز، میزان Nu به دست می‌آید:

$$Nu = \begin{cases} 0.4 + 0.54 Re^{0.52} & \text{if } 0.1 < Re < 1000 \\ 0.3 Re^{0.6} & \text{if } 1000 < Re < 50000 \end{cases} \quad (4)$$

دمای داخلی پوشش شیشه‌ای T_{ci} از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$Q_{loss1} = \frac{2\pi k_c l (T_{ci} - T_{co})}{\ln(D_{co}/D_{ci})} \quad (5)$$

سپس از رابطه (۶) پارامتر Q_{loss2} محاسبه می‌شود.

$$Q_{loss2} = \frac{\pi D_r l \sigma (T_r^4 - T_{ci}^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{D_r}{D_{ci}} \left(\frac{1}{\varepsilon_r} - 1\right)\right)} \quad (6)$$

در این رابطه زیرنویس 2 بیانگر لوله جاذب است. در صورتی که Q_{loss1} و Q_{loss2} به هم نزدیک باشند، روند حل صحیح بوده است. در غیر این صورت باید مجدداً عددی برای دمای خارجی پوشش شیشه‌ای فرض شود و مراحل بالا تکرار شوند. ضریب تلفات U_L بر اساس سطح جاذب A_r ، از معادله (۷) به دست می‌آید:

$$U_L = \frac{Q_{loss2}}{A_r (T_r - T_{ci})} \quad (7)$$

و در نتیجه ضریب بازده کلکتور برابر خواهد بود با:

$$F' = \frac{1/U_L}{1/U_L + \frac{D_o}{h_f D_i} + \left(\frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2k}\right)} \quad (8)$$

که h_f ضریب انتقال حرارت داخل لوله است.

ضریب جریان کلکتور از رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$F_R = \frac{m C_p}{A_r U_L} \left[1 - \exp\left(\frac{-U_L F' A_r}{m C_p}\right)\right] \quad (9)$$

انرژی دریافتی مفید (Q_u) کسب شده توسط کلکتور بر حسب مقدار تشعشع خورشیدی ورودی و تلفات حرارتی از بدنه کلکتور عبارت است از [۲۱]:

$$Q_u = F_R A_a \left[S - \frac{A_r}{A_a} U_L (T_i - T_a)\right] \quad (10)$$

در رابطه بالا، A_a سطح جاذب کلکتور بدون تلفات ناشی از تصویر لوله جاذب و T_i دمای متوسط صفحه جاذب است. لازم به ذکر است دمای صفحه جاذب مقدار ثابتی نیست و در نظر گرفتن دمای متوسط برای آن کاملاً یک مفهوم مجازی است. همچنین در این رابطه، F_R ضریب برداشت حرارت است و S بخشی از تشعشع خورشیدی بر واحد سطح جاذب کلکتور است که توسط آن جذب می‌شود. مقدار S از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۴-۲۶]:

$$S = \eta_0 \cdot I_T \quad (11)$$

در این رابطه I_T شار تشعشع خورشیدی (میانگین ساعتی روزانه) وارد شده به کلکتور و η_0 بازده اپتیکی است که بازده اپتیکی برابر حاصلضرب مؤثر عبور- جذب است و از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۴-۲۶]:



$$\eta_0 = (\tau\alpha) \quad (12)$$

همچنین I_T از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود:

$$I_T = I_b R_b + I_d \left[\frac{1 + \cos\beta}{2} \right] + I \cdot P_{gr} \left[\frac{1 - \cos\beta}{2} \right] \quad (13)$$

در رابطه فوق I ، I_b و I_d به ترتیب تشعشع^۱ خورشیدی روی سطح افقی، تشعشع مستقیم خورشیدی و تشعشع پخش^۲ هستند. همچنین R_b نسبت تشعشع مستقیم خورشیدی ورودی روی سطح افقی به تشعشع مستقیم روی سطح زاویه دار است و از رابطه (۵) محاسبه می‌شود [۲۴-۲۶]:

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos(\omega) + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta} \quad (14)$$

در رابطه فوق، φ عرض جغرافیایی محل^۳، θ زاویه انحراف خورشیدی^۴ و ω زاویه ساعت^۵ است.

در نهایت بازده انرژی واحد طول کلکتور خورشیدی سهموی از رابطه (۱۵) بدست می‌آید [۲۴-۲۶]:

$$\eta = \frac{\eta_{\gamma} \cdot c_p (T_{out} - T_{in}) - P}{I_T A_c} \quad (15)$$

در رابطه (۱۵)، P توان پمپ است که برابر خواهد بود با:

$$P_{pump} = \frac{P_{flow}}{\eta_{pump} \cdot \eta_{motor}} \quad (16)$$

در روابط فوق P_{flow} ، افت فشار دینامیکی سیال است و از رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود:

$$P_{flow} = \frac{\eta_{\gamma} \cdot \Delta P}{\rho} \quad (17)$$

حال با متوسط‌گیری زمانی، معادله انرژی را که برای جریان تراکم‌ناپذیر و خواص ثابت و با صرف نظر کردن از تلفات لزجت صحیح است را در نظر می‌گیریم [۲۴-۲۶]:

$$\rho C_p \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right) = - \frac{\partial}{\partial x_i} (q_i) \quad (18)$$

که در معادله فوق q_i عبارت است از:

$$q_i = -k \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} + \bar{q}R - \rho C_p \bar{U}_i \bar{T} \quad (19)$$

تلاش‌های زیادی صورت گرفته است تا روابط بقای اغتشاش نیز به معادلات متوسط زمانی پیوستگی، مومنوم و انرژی افزوده شود. معروف‌ترین رابطه بدست آمده برای انرژی جنبشی اغتشاش نوسانات (K)، به صورت زیر می‌باشد [۲۴-۲۶]:

$$K = \frac{1}{2} (\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'}) = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} \quad (20)$$

1. beam

2. diffuse beam

3. latitude

4. declination angle

5. hour angle



متاسفانه تاکنون هیچ مدل یگانه‌ای به‌طور فراگیر برای استفاده در انواع مسائل مختلف مورد تایید قرار نگرفته است. انتخاب یک مدل اغتشاش به مواردی مثل فیزیک جریان، سطح دقت مورد نیاز، منابع محاسباتی در اختیار و میزان زمان لازم برای شبیه‌سازی بستگی خواهد داشت. بنابراین برای انتخاب مدل مناسب برای یک مسئله به خصوص نیاز به فهم قابلیت‌ها و محدودیت‌های مدل موردنظر داریم. لذا برای حل جریان‌های مغشوش روابط پیوستگی و مومنتوم لایه مرزی را به‌عنوان معادلات اصلی حرکت در نظر گرفته و مدل‌های اغتشاش به این معادلات افزوده می‌شوند.

منظور از U_L در رابطه (۱) افت کلی از کلکتور است و از رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود [۲۴-۲۶]:

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (21)$$

در رابطه فوق U_t افت از سمت بالای صفحه جاذب بر محیط، U_b افت از پشت کلکتور و U_e افت از کناره‌ها است. برای شبکه‌بندی شش وجهی و چهار وجهی زمانی که وجوه و سلول‌های واحد بالادست و پایین دست مشخص باشند، فلونت برای محاسبه مقدار مرتبه بالاتر متغیر جابه‌جایی ϕ در یک صفحه، روش مرتبه سوم را نیز به کار می‌گیرد. روش‌های مرتبه ۳ بر پایه محاسبه میانگین جهت‌دار در روش آپ ویند مرتبه ۲ و میان‌یابی‌های مرکزی متغیرها می‌باشد [۲۶-۲۷].

مدل‌های زیادی از ویسکوزیته توسط پژوهشگران به منظور تخمین ویسکوزیته موثر نانو سیالات بصورت تابعی از کسر حجمی نانوذرات استفاده شده است. در این پژوهش مدل بچلر^۱ برای ذرات کروی و کسر حجمی کمتر از ۵ درصد مناسب می‌باشد [۲۸]. این معادله بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\mu_{nf, Batchelor} = (1 + 2.5\phi + 6.2\phi^2)\mu_f \quad (22)$$

که μ_{nf} ویسکوزیته نانوسیال و μ_f ویسکوزیته آب می‌باشد. روشی که نرم‌افزار فلونت برای حل معادلات بقا در نظر گرفته است، روش حجم محدود می‌باشد. در این روش میدان محاسباتی به تعدادی حجم کنترل که هر کدام یک گره را احاطه می‌نمایند تقسیم می‌شود. ابعاد حجم‌های کنترل می‌تواند متفاوت باشد که این روش تأکیدی بر یکسان بودن آن‌ها ندارد. قدم کلیدی در روش حجم کنترل انتگرال‌گیری از معادلات دیفرانسیل بر روی هر یک از حجم‌های کنترل است.

در مطالعه حاضر، ضریب انتقال حرارت هدایتی نانوسیال با استفاده از رابطه ژان و همکاران [۲۹] محاسبه می‌شود.

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = \frac{K_n + 2K_f - 2\phi(K_f - K_n)}{K_n + 2K_f + \phi(K_f - K_n)} + \frac{\rho_n \phi C_{p,f}}{2K_f} \cdot \sqrt{\frac{2K_B T}{3\pi d_n \mu_f}} \quad (23)$$

در رابطه (۲۳)، T دمای سیال، k ضریب انتقال حرارت هدایتی سیال، μ لزجت دینامیکی سیال، d_n قطر نانوذرات، $C_{p,f}$ ظرفیت گرمایی ویژه سیال پایه و K_B ثابت بولتزمن هستند. زیروندهای n و f به ترتیب نشان دهنده نانوذره، سیال پایه و نانوسیال می‌باشند و ϕ کسر حجمی نانوذرات در نانوسیال است. شایان ذکر است، مدل ژان و همکاران، شکل اصلاح شده مدل ماکسول است که اثرات حرکت براونی و تجمع نانوذرات را در نظر می‌گیرد.

بدیهی است که برای شبیه‌سازی یک جریان به وسیله دینامیک سیالات محاسباتی ابتدا باید دامنه محاسباتی تولید گردد. از آنجا که نرم‌افزار فلونت تنها یک نرم‌افزار محاسباتی می‌باشد، لازم است از نرم‌افزارهای پشتیبانی کننده آن استفاده کرد. نرم‌افزار گمبیت بهترین انتخاب برای ساختن فایل‌های ورودی فلونت می‌باشد. هندسه و شبکه را می‌توان توسط نرم‌افزار

1. Batchelor



پیش‌پردازنده گمبیت تولید کرد. نرم‌افزار گمبیت قادر به تولید انواع شبکه‌بندی (مش‌های چهار ضلعی، مثلثی، مش‌های حجمی چهار وجهی و شش وجهی) بوده و در آن می‌توان شرایط مرزی را نیز مشخص نمود [۲۲-۲۰].

آزمون استقلال نتایج از شبکه‌بندی برای کلکتور حاوی سیال آب برای تجزیه و تحلیل اثرات ابعاد شبکه‌بندی بر نتایج انجام گرفته است. مطابق جدول (۳)، هفت حالت شبکه‌بندی برای مدل حاوی سیال آب در نظر گرفته شده است. با مقایسه حالت های فوق، شبکه‌بندی با تعداد گره $1/207/319$ به‌عنوان شبکه‌بندی قابل قبول هم از نظر دقت و هم از نظر صرفه جویی در زمان حل انتخاب شد. اعتبارسنجی برنامه کامپیوتری بر اساس هندسه و شرایط مرزی تحقیق دودلی و همکاران [۳۰] و کالدیوس و همکاران [۳۱] انجام شده است. آن‌ها به صورت عددی عملکرد انتقال حرارت و جابجایی اجباری جریان آب در داخل یک کلکتور خورشیدی سهموی را به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار دارند.

در محاسبات میزان دمای محیط 25°C ، دمای آسمان 17°C ، دمای سیال ورودی 90K و میزان متوسط تابش خورشید در سطح افق $7/27 \left(\frac{\text{Kw}}{\text{m}^2}\right)$ در هر ساعت در نظر گرفته شده است. در این حالت محدوده تغییرات دمایی خروجی از سطح داخلی و خارجی پوشش شیشه‌ای حدود 3K بدست می‌آید. با مقایسه نتایج کار حاضر و مراجع [۲۶ و ۲۷] در مورد بازده کلکتور، مطابق شکل (۲) انطباق خوب جواب‌ها با حداکثر خطای $10/21\%$ مشاهده می‌شود.

تجزیه و تحلیل نتایج

شکل (۳) نمودار تغییرات بازده انرژی کلکتور خورشیدی سهموی، در حالت‌های پایه^۱ و نوین^۲ با خروج از مرکز ($f=0$) و زاویه کمان ($b=0\text{ mm}$) و در شرایط استفاده از مدل‌های تک‌فازی^۳ و دوفازی^۴ بر اساس عدد رینولدز، حاوی نانوسیال با کسر حجمی 1% و قطر نانوذرات 20 nm دnp را نشان می‌دهد.

همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار بازده انرژی در رینولدزهای مختلف، مربوط به کلکتور نوین و مدل دوفازی می‌شود. در جایگاه‌های بعدی به ترتیب، کلکتور نوین و مدل تک‌فازی، کلکتور پایه و مدل دوفازی و در انتها کلکتور پایه و مدل تک‌فازی قرار دارند. طبق نمودار، با افزایش مقدار عدد رینولدز، تمامی حالات روند صعودی دارند. بیشینه مقدار بازده انرژی برای کلکتور نوین و مدل دوفازی در رینولدز 15000 بوده که مقدار آن برابر $68/0\%$ است. کمینه‌ی این مقدار برای کلکتور پایه و مدل تک‌فازی در رینولدز 6000 بوده که مقدار آن برابر $48/8\%$ است.

جدول (۳): آزمون استقلال حل از شبکه

تعداد گره‌ها	Re=6000	Re=9000	Re=12000
211/311	92/7832	111/7628	129/0017
680/606	110/9710	145/2093	167/9221
880/353	114/2187	153/1289	182/8729
994/575	117/2982	159/0388	191/2390
1/191/201	119/8872	162/2389	197/0328

1. Conventional parabolic through solar collector(C.PTSC)

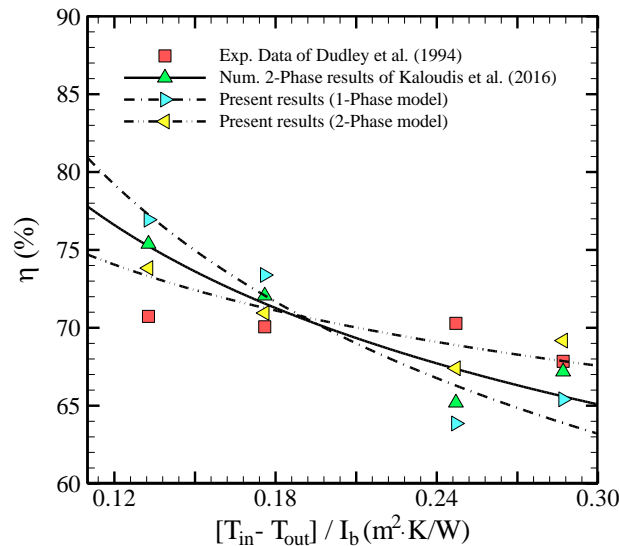
2. Novel parabolic through solar collector(N.PTSC)

3. Single Phase Model(SPM)

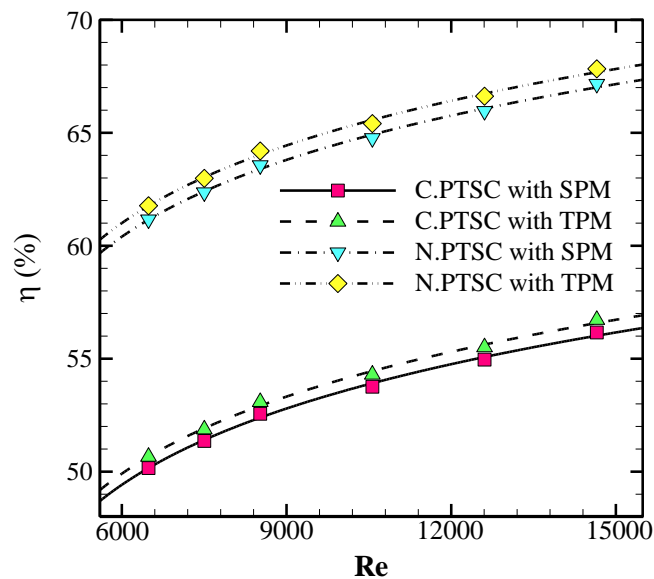
4. Two Phase Model(TPM)



۱/۲۰۷/۳۱۹	۱۲۰/۶۲۰۹	۱۶۳/۱۴۹۳	۱۹۹/۷۸۸۵
۱/۳۱۲/۶۱۸	۱۲۰/۶۳۳۵	۱۶۳/۱۵۰۸	۱۹۹/۸۶۹۵



شکل (۲): مقایسه نتایج کار حاضر و مراجع [۲۹ و ۳۰] در مورد دمای خروجی

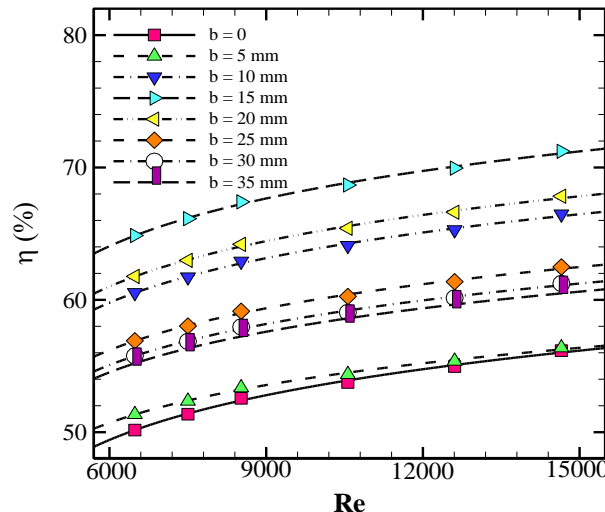


شکل (۳): تغییرات بازده انرژی کلکتور خورشیدی سهموی در حالت‌های پایه و نوین و در شرایط استفاده از مدل‌های تک‌فازی و دوفازی

شکل (۴) نمودار تغییرات بازده انرژی کلکتور خورشیدی سهموی نوین برای زوایای کمان مختلف و در شرایط استفاده از مدل دوفازی را نشان می‌دهد. در این شکل، تغییرات اثرات استفاده از زاویه کمان‌های متفاوت عایق بر تغییرات بازده کلکتور بر اساس عدد رینولدز با استفاده از کلکتور نوین ($f=0$)، حاوی نانو سیال ($d_{np}=20\text{ nm}$ ، $\phi=1\%$) شبیه سازی شده با مدل دوفازی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار بازده انرژی در رینولدزهای مختلف، مربوط به زاویه کمان عایق ۱۵ میلی‌متر می‌شود. در جایگاه‌های بعدی به ترتیب، مقدار زاویه کمان‌های عایق ۲۰، ۱۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۵ و ۰ میلی‌متر قرار دارند. طبق نمودار، با افزایش مقدار عدد رینولدز، تمامی حالات روند صعودی دارند. بیشینه مقدار بازده انرژی برای زاویه



کمان عایق ۱۵ میلیمتر در رینولدز ۱۵۰۰۰ بوده که مقدار آن برابر $71/8\%$ است. کمینه این مقدار برای زاویه کمان عایق ۰ میلیمتر در رینولدز ۶۰۰۰ بوده که مقدار آن برابر $56/1\%$ است.

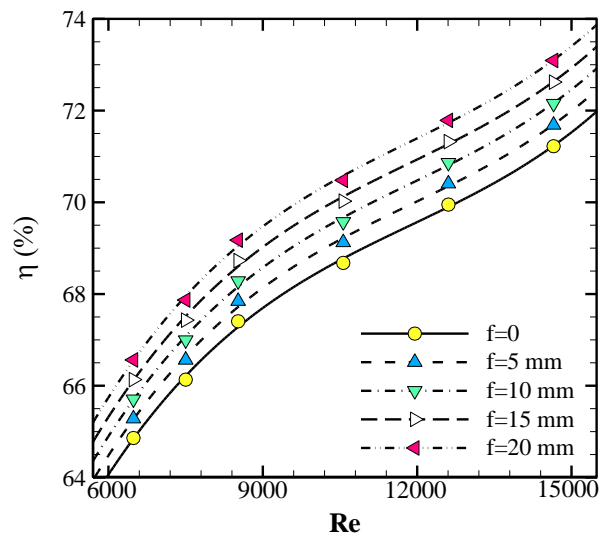


شکل (۴): نمودار تغییرات بازده انرژی کلکتور خورشیدی سهموی نوین برای زوایای کمان مختلف و در شرایط استفاده از مدل دوفازی

شکل (۵) نمودار تغییرات بازده انرژی کلکتور خورشیدی سهموی نوین برای مقادیر مختلف خروج از مرکز لوله جاذب نسبت به کاور شیشه‌ای و در شرایط استفاده از مدل دوفازی را نشان می‌دهد. در حقیقت این شکل، تغییرات اثرات استفاده از مقادیر متفاوت خروج از مرکز بر تغییرات بازده کلکتور براساس عدد رینولدز با استفاده از کلکتور نوین ($b=15\text{ mm}$)، حاوی نانوسیال نیوتنی ($\phi=1\%$ ، $d_{np}=20\text{ nm}$) شبیه سازی شده با مدل دوفازی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار بازده انرژی در رینولدزهای مختلف، مربوط به میزان خروج از مرکز ۲۰ میلیمتر می‌باشد. در جایگاه‌های بعدی به ترتیب، میزان‌های خروج از مرکز ۱۵، ۱۰، ۵ و ۰ میلیمتر قرار دارند.

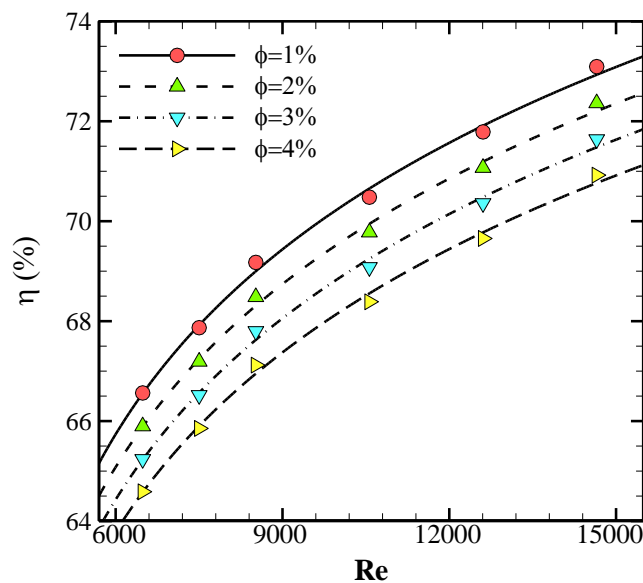
طبق نمودار، با افزایش مقدار عدد رینولدز، تمامی حالات روند صعودی دارند. بیشینه مقدار بازده انرژی برای خروج از مرکز ۲۰ میلیمتر در رینولدز ۱۵۰۰۰ بوده که مقدار آن برابر $74/9\%$ است. کمینه این مقدار برای خروج از مرکز ۰ میلیمتر در رینولدز ۶۰۰۰ بوده که مقدار آن برابر $63/8\%$ است.

شکل (۶) نمودار تغییرات بازده انرژی کلکتور خورشیدی سهموی نوین برای مقادیر مختلف کسر حجمی نانوسیال برای کلکتور خورشیدی نوین بهینه و در شرایط استفاده از مدل دوفازی را نشان می‌دهد. در حقیقت این شکل، تغییرات اثرات استفاده از کسرهای حجمی نانوذرات بر تغییرات بازده کلکتور براساس عدد رینولدز با استفاده از کلکتور نوین ($b=15\text{ mm}$ ، $f=20\text{ mm}$)، حاوی نانوسیال ($d_{np}=20\text{ nm}$) شبیه سازی شده با مدل دوفازی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار بازده انرژی در رینولدزهای مختلف، مربوط به کسر حجمی ۱٪ می‌باشد. در جایگاه‌های بعدی به ترتیب، مقادیر کسرهای حجمی ۲٪، ۳٪ و ۴٪ قرار دارند. هرچه تجمع ذرات بیشتر باشد ذرات به همدیگر چسبیده و خوشه‌هایی را تشکیل می‌دهند که دیگر پایدار نباشد و رسوب کند و این باعث کاهش شدید ضریب هدایت حرارتی می‌گردد.



شکل (۵): نمودار تغییرات بازده انرژی کلکتور خورشیدی سهموی نوین برای مقادیر مختلف خروج از مرکز لوله جاذب نسبت به کاور شیشه‌ای و در شرایط استفاده از مدل دوفازی

طبق نمودار (۶)، با افزایش مقدار عدد رینولدز، تمامی حالات روند صعودی دارند. بیشینه مقدار بازده انرژی برای کسر حجمی ۱٪ در رینولدز ۱۵۰۰۰ بوده که مقدار آن برابر ۷۳/۳٪ است.

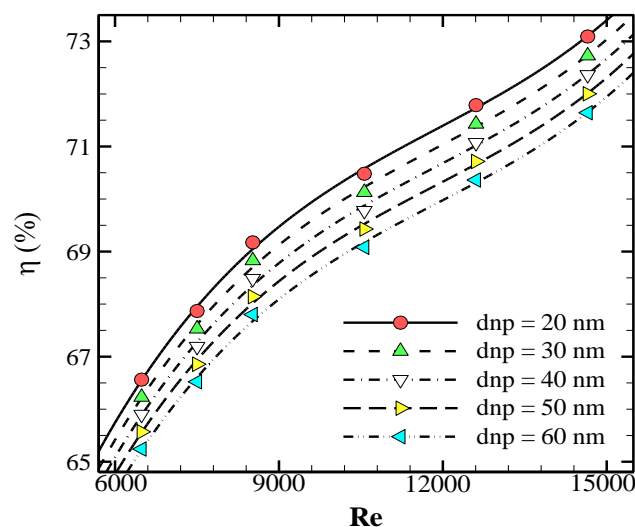


شکل (۶): تغییرات بازده انرژی کلکتور خورشیدی سهموی نوین برای مقادیر مختلف کسر حجمی نانوسیال برای کلکتور خورشیدی نوین بهینه و در شرایط استفاده از مدل دوفازی

شکل (۷) نمودار تغییرات بازده انرژی کلکتور خورشیدی سهموی نوین برای مقادیر مختلف قطر نانوذرات برای کلکتور خورشیدی نوین بهینه و در شرایط استفاده از مدل دوفازی را نشان می‌دهد. در حقیقت این شکل، تغییرات اثرات استفاده از مقادیر متفاوت قطر نانوذرات بر تغییرات بازده کلکتور براساس عدد رینولدز با استفاده از کلکتور نوین ($f=20 \text{ mm}$)، حاوی نانوسیال ($\phi=1\%$) شبیه سازی شده با مدل دوفازی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار بازده انرژی در رینولدزهای مختلف، مربوط به قطر نانوذرات 20 nm می‌باشد که مقدار آن برابر ۷۳٪ است. در



جایگاه‌های بعدی به ترتیب، مقادیر قطر نانوذرات ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ (nm) قرار دارند. در واقع هرچه قطر ذرات کمتر باشد، سطح تماس بیشتر، انتقال حرارت بالاتر و ضریب هدایت گرمایی بالاتری را مشاهده خواهیم نمود. طبق نمودار، با افزایش مقدار عدد رینولدز، تمامی حالات روند صعودی دارند. به منظور بررسی اثر ضخامت ماده عایق بر بازده کلکتور، در سیال پایه با افزایش ضخامت از ۳ به ۶ و از ۶ به ۱۲ میلی‌متر راندمان به ترتیب، ۳/۲۲٪ و ۵/۸۴٪ و در نانو سیال با افزایش ضخامت از ۳ به ۶ و از ۶ به ۱۲ میلی‌متر راندمان به ترتیب، ۳/۹۲٪ و ۷/۳۶٪ کاهش می‌یابد. مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت شیشه، تابش ورودی به سیال کاهش یافته و از جهتی دیگر به علت ضریب هدایت حرارتی پائین، می‌تواند با افزایش ضخامت، بازده را کاهش دهد.



شکل (۷): تغییرات بازده انرژی کلکتور خورشیدی سهموی نوین برای مقادیر مختلف قطر نانوذرات برای کلکتور خورشیدی نوین بهینه و در شرایط استفاده از مدل دوفازی

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که بیشترین مقدار بازده انرژی در رینولدزهای مختلف، مربوط به کلکتور نوین و مدل دوفازی می‌شود. در جایگاه‌های بعدی به ترتیب، کلکتور نوین و مدل تک‌فازی، کلکتور پایه و مدل دوفازی و در انتها کلکتور پایه و مدل تک‌فازی قرار دارند. همچنین با افزایش مقدار عدد رینولدز، تمامی حالات روند صعودی دارند. بیشینه مقدار بازده انرژی برای کلکتور نوین و مدل دوفازی در رینولدز ۱۵۰۰۰ بوده که مقدار آن برابر ۶۸٪ است. کمینه این مقدار برای کلکتور پایه و مدل تک‌فازی در رینولدز ۶۰۰۰ بوده که مقدار آن برای ۴۸/۸٪ است. بیشترین مقدار بازده انرژی در رینولدزهای مختلف، مربوط به زاویه کمان عایق ۱۵ میلی‌متر می‌شود. در جایگاه‌های بعدی به ترتیب، مقدار زاویه کمان‌های عایق ۱۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۵ و ۰ میلی‌متر قرار دارند. بیشینه مقدار بازده انرژی برای زاویه کمان عایق ۰ میلی‌متر در رینولدز ۶۰۰۰ بوده که مقدار آن برابر ۵۶/۱٪ است. بیشترین مقدار بازده انرژی در رینولدزهای مختلف، مربوط به میزان خروج از مرکز ۲۰ میلی‌متر می‌باشد. در جایگاه‌های بعدی به ترتیب، میزان‌های خروج از مرکز ۱۵، ۱۰، ۵ و ۰ میلی‌متر قرار دارند. بیشینه مقدار بازده انرژی برای خروج از مرکز ۲۰ میلی‌متر در رینولدز ۱۵۰۰۰ بوده که مقدار آن برابر ۷۴/۹٪ است. کمینه این مقدار برای خروج از مرکز ۰ میلی‌متر در رینولدز ۶۰۰۰ بوده که مقدار آن برای ۶۳/۸٪ است. بیشترین مقدار بازده انرژی در رینولدزهای مختلف، مربوط به کسر حجمی ۱٪ می‌باشد. در جایگاه‌های بعدی به ترتیب، مقادیر کسرهای حجمی ۲٪، ۳٪ و ۴٪ قرار دارند. با افزایش مقدار عدد رینولدز، تمامی حالات روند صعودی دارند. بیشینه مقدار بازده انرژی برای کسر حجمی ۱٪ در رینولدز ۱۵۰۰۰ بوده که مقدار آن برابر ۷۳/۳٪ است.



بیشترین مقدار بازده انرژی در رینولدزهای مختلف، مربوط به قطر نانوذرات ۲۰ nm می‌باشد. در جایگاه‌های بعدی به ترتیب، مقادیر قطر نانوذرات ۳۰ nm، ۴۰ nm، ۵۰ nm و ۶۰ nm قرار دارند. نتایج محاسبه تحلیلی بازده انرژی در جدول (۴) گزارش شده است.

جدول (۴): نتایج محاسبات تحلیلی بازده انرژی

درصد بازده	مقدار	کمیت
۶۸	۱۵۰۰۰	عدد رینولدز
۷۱/۸	۱۵mm	زاویه کمان عایق
۷۴/۹	۲۰mm	میزان خروج از مرکز
۷۳/۳	۱٪	کسر حجمی
۷۳	۲۰nm	قطر نانوذرات

فهرست علائم

A	مساحت، (m^2)
T_a	دمای محیط، (k)
T_{pm}	دمای متوسط صفحه جاذب، (k)
I_T	شار تشعشع خورشیدی، ($\frac{W}{m^2}$)
I_b	تشعشع مستقیم خورشیدی، ($\frac{W}{m^2}$)
I_d	تشعشع پخشی، ($\frac{W}{m^2}$)
R_b	نسبت تشعشع مستقیم خورشیدی ورودی روی سطح افقی به تشعشع مستقیم، (بدون بعد)
P	توان پمپ، (w)
A	مساحت، (m^2)
i	ورودی
Q	نرخ انتقال حرارت، (W)
T_a	دمای محیط، (k)
φ	عرض جغرافیایی محل، (درجه)
θ	زاویه انحراف خورشیدی، (درجه)
ω	زاویه ساعت، (درجه)
U_t	افت از سمت بالای صفحه جاذب، ($\frac{W}{m^2K}$)
U_b	افت از پشت کلکتور، ($\frac{W}{m^2K}$)
U_e	افت از کناره‌ها، ($\frac{W}{m^2K}$)
F_R	ضریب انتقال گرمای کلکتور، (بدون بعد)
η	بازده، (درصد)
η_0	بازده اپتیکی (درصد)
α	ضریب جذب، (بدون بعد)



- [1] Jamiati, M., Pourmohamadian, H., (2021), The effects of using two compound twisted tapes to enhance the performance of a parabolic trough solar collector, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, 11(4). pp 59-70.
- [2] Norouzi, A.M., Siavashi, M., Oskouei, M., (2020), Efficiency enhancement of the parabolic trough solar collector using the rotating absorber tube and nanoparticles, *Renewable Energy*, 145(7). pp 569-584.
- [3] Qiang, L., Yimin, X., (2002), convective heat transfer and flow characteristics of Cu-Water Nanofluid, *Science China Technological Sciences*, 45. pp 408-416.
- [4] Lee, S.S., Choi, U., Li, S., Eastman, J., (1999), Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, *Journal of Heat Transfer*, 121(2). pp 280-289.
- [5] Mahmoodi, M., Hashemi, S.M., (2012), Numerical study of natural convection of a nanofluid in C-shaped enclosures, *International Journal of Thermal Sciences*, 55. pp 76-89.
- [6] Benabderrahmane, A., Benazza, A., Laouedj, S., Solano, J.P., (2017), Numerical analysis of compound heat transfer enhancement by single and two-phase models in parabolic through solar receiver, *Mechanika*, 23(1). pp 55-61.
- [7] Chafie, M., Fadhel-Ben-Aissa, M., Guizani, A., (2017), Energetic end exergetic performance of a parabolic trough collector receiver: An experimental study, *Journal of Cleaner Production*, 171. pp 285-296.
- [8] Azimi, B., (1988). *Advanced Engineering Thermodynamics*, New York, Wiley Inter science.
- [9] Gupta, D., Saha, K.K., (1990), Energy Analysis of Solar Thermal Collectors, *Renewable energy and environment*, 33(1). pp 283-287.
- [10] Pal-Chandra, Y., Singh, Kumar-Mohapatra, A.S., Kesari, J.P., & Rana, L., (2017), Numerical optimization and convective thermal loss analysis of improved solar parabolic trough collector receiver system with one sided thermal insulation, *Solar Energy*, 48. 14836.
- [11] Mahanta, D.K., Kumar, S.S., (2002), Internal Irreversibility in a Water Heating Solar Flat Plate Collector, *Energy Conversion and Management*, 43(17). pp 2425-2435.
- [12] Shingaki, N., Akiyama, T., Tsukihashi, F., (2002), Exergy Analysis of steel production processes, *Materials Transactions*, 43(3). pp 379-384.
- [13] Acevedo, L., Usón, S., Uche, J., (2015), Exergy transfer analysis of an aluminum holding furnace, *Energy Conversion and Management*, 89. pp 484-496.
- [14] Mohamed, N., Khedidja, B., Belkacem, Z., & Michel, D., (2008), Numerical study of laminar forced convection in entrance region of a wavy channel, *Numerical Heat Transfer: Part A*, 53. pp 35-52.
- [15] Valipour, M.S., Rashidi, S., Masoodi, R., (2014), Magnetohydrodynamics flow and heat transfer around a solid cylinder wrapped with a porous, *Asme J Heat transfer*, 136(6). pp 62601-62609.
- [16] Srikanth, S., Dhiman, A.K., Bijjam, S., (2010), Confined flow and heat transfer across a triangular cylinder in a channel, *Int J Therm Sci*, 49. pp 2191-200.
- [17] Ali, M., Zeitoun, O., Nuhait, A., (2011), Forced convection heat transfer over horizontal triangular cylinder in cross flow. *Int J Therm Sci*, 50. pp 106-114.
- [18] Dhimana, A.K., Chhabra, R. P., Eswaran, V., (2005), Flow and heat transfer across a confined square cylinder in the steady flow regime: effect of Peclet number, *Int J Heat Mass Transf*, 48. pp 4598-614.
- [19] Valipour, M.S., Zare Ghadi, A., (2011), Numerical investigation of fluid flow and heat transfer around a solid circular cylinder utilizing nanofluid, *Int Commun Heat Mass Transfer*, 38. pp 1296-304.
- [20] Etminan-Farooji, Ebrahimnia-Bajestan, V.E., Niazmand, H., & Wongwises, S., (2012), Unconfined laminar nanofluid flow and heat transfe around a squarer cylinder, *Int J Heat Mass Transf*, 55. pp 1475-85.
- [21] Dousset, V., Pothérat, A., (2008), Numerical simulations of a cylinder wake under a strong axial magnetic field, *Phys. Fluids*, 20. 017104.



- [22] Chatterjee, D., Gupta., S.k., (2015), MHD flow and heat transfer behind a square cylinder in a duct under strong axial magnetic field, *Int J Heat Mass Transf*, 88. pp 1–13.
- [23] Aminy, M., Aminzadeh, M., Haghgou, H., (2016), Optimized design and control system of linear parabolic trough collectors used in solar cooling at Material & Energy Research Center (MERC), *Journal of Renewable and New Energy*, 3(2). pp 45-56 (In Persian).
- [24] Wang, G.V., Vanka, S., (1995), Convective heat transfer in periodic wavy passages, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38. pp 3219-3230.
- [25] Abdulhamed, A.J., Adam, N.M., Ab-Kadir, M.Z.A., & Hairuddin, A.A., (2018), Review of solar parabolic-trough collector geometrical and thermal analyses, performance, and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91. pp 822-831.
- [26] Upadhyay, B.H., Patel, A.J., Ramana, P.V., (2019), A detailed review on solar parabolic trough collector, *International Journal of Ambient Energy*, 41(6). pp 942-946.
- [27] Naphon, P., (2009), Effect of wavy plate geometry configurations on the temperature and flow distributions, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36. pp 942-946.
- [28] Batchelor, G., (1977), The Effect of Brownian Motion on the Bulk Stress in a Suspension of Spherical Particles, *The Journal of Fluid Mechanics*, 83. pp 97–117.
- [29] Xuan, Y., Li, Q., Hu, W., (2003), gregation structure and thermal conductivity of nanofluids, *AIChE Journal*, 49(4). pp 1038-1043.
- [30] Dudley, V., Kolb, G., Sloan, M., & Kearney, D., (1994), SEGS LS2 Solar Collector Test Results, Report of Sandia National Laboratories, Report, 94. 1884.
- [31] Kaloudis, E., Papanicolaou, E., Belessiotis, V., (2016), Numerical simulations of a parabolic trough solar collector with nanofluid using a two-phase model, *Renewable Energy*, 97. pp 218-229.