

# بررسی تنش حرارتی و تولید بخار توسط سیستم جمع کننده حرارتی خورشیدی سهموی حاوی نانوسیالات مختلف برای شرایط اقلیم مشخص

میثم محمودی<sup>۱</sup>، سید ابوذر فنایی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۵)

## چکیده

جمع کننده حرارتی خورشیدی سهموی یکی از تجهیزات رایج و کارآمد در بهره برداری از انرژی خورشیدی با دمای بالا است. استفاده از نانوسیال ها به عنوان سیال عامل و جاذب حرارتی، می تواند به طور قابل توجهی کارایی حرارتی این سیستم ها را افزایش دهد. در پژوهش حاضر، ارزیابی حرارتی لوله جاذب فولادی یک جمع کننده حرارتی سهموی حاوی نانوسیالات هیبریدی و مونو نانوسیالات برای شرایط اقلیمی شهر ایرانشهر (واقع در استان سیستان و بلوچستان) به منظور تولید بخار آب انجام شده است. در این مطالعه، مدل سازی عددی با روش حجم کنترل به کار گرفته شده است. نتایج نشان می دهد که استفاده از نانوسیال هیبریدی به ویژه در ماه اول فصل تابستان، اختلاف دمای بیشتری ایجاد کرده و نرخ تولید بخار را افزایش می دهد. همچنین، نرخ تولید حرارت حجمی در نانوسیال هیبریدی نسبت به نانوسیالات روغن سیلتروم ۸۰۰-آلومینیوم و آب-مس به ترتیب ۱۶/۲ و ۱۹/۳ درصد بهبود یافته است. نرخ تولید بخار آب حاصل از نانوسیال هیبریدی نسبت به مونو نانوسیال در طول ماه های تابستان به طور میانگین ۲۰ درصد افزایش یافته است. علاوه بر این، با افزایش دمای ورودی نانوسیال تا ۱۳۰ کلوین، تنش حرارتی وارد بر لوله جاذب فولادی حدود ۲۵ درصد کاهش را نشان داده است. این نتایج، پتانسیل بالای نانوسیالات هیبریدی در بهبود عملکرد و افزایش دوام جمع کننده های حرارتی خورشیدی را تأیید می کند.

واژه های کلیدی: لوله جاذب، نانوسیال هیبریدی، جمع کننده خورشیدی، تولید بخار، تنش حرارتی

## The investigation of Thermal Stress and Steam Generation by a Parabolic Trough Solar Collector System Containing Various Nanofluids for the specific climatic conditions

Meysam Mahmoudi, Seyyed Abuzar Fanaee

### Abstract

Parabolic solar thermal collectors efficiently harness high-temperature solar energy, and their performance can be significantly enhanced by using nanofluids as heat absorbers. This study numerically evaluates the thermal performance of a steel absorber tube in a parabolic solar thermal collector using both hybrid and mono nanofluids under the climatic conditions of Iranshahr, Sistan and Baluchestan province, with the goal of steam generation. Results show that hybrid nanofluids, particularly in early summer, create a greater temperature difference and increase steam production. The volumetric heat generation rate of the hybrid nanofluid improved by 16/2% and 19/3% compared to Silitrom800-oil aluminum and water-copper nanofluids, respectively. Over the summer months, the steam production rate from the hybrid nanofluid increased by an average of 20% compared to mono nanofluids. Furthermore, increasing the nanofluid inlet temperature to 130 K reduced thermal stress on the steel absorber tube by approximately 25%. These findings demonstrate the potential of hybrid nanofluids to improve the performance and durability of solar thermal collectors.

**Key words:** Absorber Tube, Hybrid Nano-fluid, Solar Collector, Steam Generation, Thermal Stress

## مقدمه

کاهش ذخایر سوخت فسیلی برای چندین دهه یک نگرانی بوده است [۲۰۱] و منابع انرژی تجدیدپذیر و پایدار را مورد توجه جدی قرار داده است. در میان چنین منابعی، انرژی خورشیدی به دلیل قابلیت دسترسی و تطبیق پذیری آن بسیار امیدوارکننده است. جمع کننده حرارتی خورشیدی نوعی فناوری حرارتی خورشیدی متمرکز است که در چند دهه اخیر توجه گسترده ای را به خود جلب کرده است [۳-۶]. در جمع کننده حرارتی خورشیدی سهموی، انرژی حرارتی تابش خورشیدی توسط یک گیرنده به یک سیال انتقال حرارت منتقل می شود و دمای سیال را تا مقادیر بالای  $400^{\circ}\text{C}$  افزایش می دهد. جمع کننده حرارتی خورشیدی باید دارای ضریب هدایت حرارتی، ضریب جذب بالا و ضریب صدور پایین بوده و در دماهای بالا پایدار باشد. [۷-۱۰]. عملکرد حرارتی جمع کننده های حرارتی اساساً به رفتار ویژگی های حرارتی در حالات مختلف بهره برداری بستگی دارند، پارامترهای بهره برداری مانند دما، شرایط محیطی، نوع سیال مبنای، اندازه ذرات و غلظت حجمی ذرات می باشند. در نتیجه، نیاز مبرمی برای بهبود بازده حرارتی جمع کننده حرارتی خورشیدی وجود دارد. سیالات کاری معمولی نیوتنی شامل آب، نمک مذاب و هوا است که در لوله جاذب جمع کننده حرارتی خورشیدی جریان دارد. این سیالات خواص ترموفیزیکی ضعیفی دارند و از این رو بازده جمع کننده حرارتی را کاهش می دهند [۱۱]. پارامتر اصلی در افزایش راندمان جمع کننده حرارتی خورشیدی سهموی مدل سازی هندسی، انتخاب سیال کاری و مواد لوله جاذب است [۱۲]. اندازه و سایر ویژگی های نانوذرات می توانند در مقیاس نانومتری تنظیم شوند تا رسانایی حرارتی نانوسیال به طور قابل توجهی افزایش یابد. [۱۳]. کاربردهای نانوسیالات با افزایش محبوبیت آنها افزایش یافته است و استفاده در تجهیزات پزشکی، انرژی خورشیدی، سلول های سوختی و مبدل های حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۴]. با استفاده از نانوسیالات در جمع کننده حرارتی خورشیدی، می توان کارایی حرارتی جمع کننده حرارتی را افزایش داد. در سال های اخیر، چندین مطالعه در زمینه کارایی جمع کننده حرارتی خورشیدی سهموی برای اثر افزودن نانوذرات را بررسی نموده اند برای مثال قاسمی و همکاران [۱۵] تلاش کردند تا عملکرد

حرارتی یک جمع کننده حرارتی خورشیدی سهموی را با افزودن نانوذرات آلومینیوم اکسید به سیال عامل بهبود بخشند. با فرض یک شار حرارتی متمرکز یکنواخت، این محققان نشان دادند که با افزایش غلظت نانوذرات، عدد ناسلت و نرخ انتقال حرارت افزایش می یابد. وانگ<sup>۱</sup> و همکاران [۱۶] از یک مدل عددی برای بررسی تأثیر افزودن نانوذرات بر عملکرد حرارتی جمع کننده حرارتی خورشیدی سهموی که با نانوسیال روغن مصنوعی و ذرات آلومینیوم اکسید کار می کند، استفاده نمودند. آن ها دریافتند که استفاده از چنین سیال کاری می تواند به طور قابل توجهی حداکثر دما را در جاذب کاهش دهد. علاوه بر این، کارایی حرارتی جمع کننده حرارتی خورشیدی سهموی نسبت به جمع کننده حرارتی خورشیدی معمولی بالاتر بود. مورایچ<sup>۲</sup> و همکاران [۱۷] اثرات جایگزینی آب با نانوسیال آب تیتانیوم اکسید بر کارایی حرارتی یک جمع کننده حرارتی خورشیدی صفحه تخت مربعی را بررسی کردند. آن ها نشان دادند که کارایی حرارتی برای نانوسیال های آب- تیتانیوم اکسید بیشتر از آب خالص است. آن ها همچنین دریافتند که افزایش غلظت نانوذرات می تواند کارایی جمع کننده حرارتی خورشیدی را افزایش دهد. چیانگ<sup>۳</sup> و همکاران [۱۸] از یک مدل عددی برای مطالعه ویژگی های حرارتی یک لوله جاذب که تحت یک شار حرارتی متمرکز ثابت تحت شرایط آرام قرار می گیرد، استفاده کردند. آن ها نشان دادند که عدد ناسلت را می توان با افزودن نانوذرات مس افزایش داد. کسایان و همکاران [۱۹]، یک شبیه سازی عددی را برای مطالعه تأثیر نانوسیال اکسید آلومینیوم در روغن مصنوعی انجام دادند. آن ها دریافتند که با افزایش غلظت حجمی نانوذرات، ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد. همچنین نشان دادند که استفاده از کسر حجمی ۵ درصد اکسید آلومینیوم، باعث افزایش ۱۴ درصدی ضریب انتقال حرارت می شود؛ همچنین افزایش دما از ۳۰۰ کلوین به ۵۰۰ کلوین، اثر کسر حجمی نانوذرات بر ضریب انتقال حرارت را کاهش می دهد. سوخان صفت و همکاران [۲۰]، انتقال حرارت نانوسیال روغن- اکسید آلومینیوم

<sup>1</sup> Wang

<sup>2</sup> Moravei

<sup>3</sup> Xiong

درون لوله جاذب جمع کننده حرارتی خورشیدی سهموی با شار حرارتی غیریکنواخت را شبیه سازی کردند. آن ها از نانوذرات اکسید آلومینیوم با غلظت های مختلف در دمای عملیاتی مختلف استفاده نمودند. نتایج عددی آن ها نشان داد که ضریب انتقال حرارت، رابطه مستقیمی با غلظت حجمی نانوذرات داشته است، ولی با افزایش دما، تاثیر نانوذرات بر انتقال حرارت کم می شود. با بسوس<sup>۱</sup> و همکاران [۲۱]، در حل عددی خود، اثر نانوذرات اکسید آلومینیوم، اکسید مس، مس و نقره با کسر حجمی ۵ درصد در سیال پایه روغنی سیلترم-۸۰۰ بر عملکرد حرارتی جمع کننده حرارتی خورشیدی سهموی را بررسی کردند. نتایج آن ها نشان داد که عدد رینولدز برای همه نانوذرات افزایش و عدد پراتل برای همه آن ها کاهش یافته است، همچنین نتایج آن ها نشان داد هرچه ویسکوزیته نانوسیالات بیشتر باشد، عملکرد حرارتی آن ها نیز بهتر می شود؛ همچنین در بین نانوذرات، نقره بیشترین راندمان حرارتی شد. بلوس<sup>۲</sup> و تزیواندیس<sup>۳</sup> [۲۲]، در مطالعه عددی خود، اثر نانوسیالات در جمع کننده های حرارتی خورشیدی سهموی را بررسی نمودند. آن ها نانوذره آلومینیوم اکسید و تیتانیوم اکسید را در سیال پایه سیلترم-۸۰۰ مطالعه کرده و به این نتیجه رسیدند که استفاده از نانوسیالات منجر به افزایش راندمان حرارتی می شود. ونکی<sup>۴</sup> و همکاران [۲۳]، انتقال حرارت جریان نانوذره اکسید آلومینیوم درون سیال پایه آب را برای کسر حجمی ۱ درصد به صورت تک فازی و دوفازی شبیه سازی کردند. مقایسه نتایج آن ها با مقادیر تجربی نشان داد که مدل دوفازی دقیق تر بوده است، ولی روی عدد ناسلت اثری ندارند. قاسمی و رنجبر [۲۴] انتقال حرارت اجباری نانوسیال درون جاذب جمع کننده حرارتی سهموی را برای جریان مغشوش شبیه سازی کردند. نتایج آن ها نشان داد که استفاده از نانوسیال به جای سیال پایه، باعث افزایش عملکرد انتقال حرارت می شود. علاوه بر این با افزایش کسر حجمی نانوذرات، عدد ناسلت افزایش می یابد. کندوال<sup>۵</sup> و همکارانش [۲۵] در یک بررسی تجربی، تاثیر دو نانوسیال آب-اکسید مس و اتیلن

گلیکول-اکسید مس را با کسرهای حجمی ۱ درصد و ۵ درصد مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن ها نشان داد استفاده از نانوسیال آب-اکسید مس نسبت به اتیلن گلیکول-اکسید مس، راندمان حرارتی را ۸۲ درصد افزایش می دهد. چودهاری<sup>۶</sup> و همکاران [۲۶]، اثر استفاده از نانوسیال در جمع کننده حرارتی خورشیدی سهموی را مورد بررسی تجربی قرار دادند. آن ها نانوذرات اکسید آلومینیوم را با غلظت حجمی ۱ درصد در سیال پایه آب استفاده کردند. نتایج آن ها نشان داد که ضریب انتقال حرارت و راندمان حرارتی به ترتیب ۳۲ درصد و ۷ درصد و عدد ناسلت هم ۳۲ درصد افزایش می یابد. آنها اثر تیتانیوم، اکسید روی، اکسید سلسیم، اکسید آلومینیوم و طلا با کسرهای حجمی متفاوت از ۱ درصد تا ۳.۵ درصد در سیال پایه آب را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن ها نشان داد اثر استفاده از نانوسیالات مختلف بر روی راندمان حرارتی در مقایسه اثری که باعث افت فشار می شود، ناچیز است. منباری<sup>۷</sup> و همکاران [۲۷]، در یک مطالعه تجربی و عددی اثر نانوسیال آب-اکسید مس را در جمع کننده های حرارتی خورشیدی سهموی با کسر حجمی متفاوت بررسی نمودند. نتایج آن ها نشان داد که راندمان حرارتی جمع کننده برای نانوسیال آب-اکسید مس با کسر حجمی از ۲ درصد تا ۸ درصد، به ترتیب ۱۸ تا ۵۲ درصد افزایش می یابد. عابد و همکاران [۲۸] انتقال حرارت نانوذرات غیرفلزی در لوله های جاذب کلکتورهای حرارتی با شار حرارتی غیریکنواخت، به صورت عددی در محدوده مشخصی از اعداد رینولدز و با غلظت حجمی ۲ تا ۶ درصد بررسی نمودند. نانوذرات مورد استفاده آن ها شامل اکسید آلومینیوم، اکسید سریم، اکسید مس، اکسید آهن، دی اکسید تیتانیوم و دی اکسید سیلیسیوم در سه سیال پایه ترمینول، آب و نمک مذاب بودند. نتایج آن ها نشان داد که بدون توجه به نوع سیال پایه، دی اکسید سیلیسیوم بهترین عملکرد حرارتی را دارد. هانگ<sup>۸</sup> و همکاران [۲۹]، جریان آشفته نانوسیال آب-مس درون لوله یک جمع کننده حرارتی خورشیدی سهموی با شار غیر یکنواخت را به روش حجم محدود مدل سازی کردند. نتایج آن ها نیز نشان داد که افزایش کسر حجمی نانوذرات مس منجر به افزایش عدد

<sup>1</sup> Basbous

<sup>2</sup> Bellos

<sup>3</sup> Tzivanidis

<sup>4</sup> Vanaki

<sup>5</sup> Kandwal

<sup>6</sup> Chaudhari

<sup>7</sup> Menbari

<sup>8</sup> Hong

ناسلت می‌گردد. علاوه بر این، نتایج آن‌ها نشان داد افزودن نانوذرات مس راندمان حرارتی و افت فشار را همزمان افزایش داد. فاروک<sup>۱</sup> و همکاران [۳۰]، اثر دو نوع نانوسیال اکسید آلومینیوم و نانوسیال اکسید مس بر بازده حرارتی جمع کننده حرارتی سهموی را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. همچنین اثر جنس و طول لوله جمع کننده حرارتی سهموی را نیز بررسی شد. بیشترین راندمان حرارتی در دبی  $0.224 \text{ Kg/s}$  برای نانوذرات اکسید مس و اکسید آلومینیوم به ترتیب ۱۳/۱ درصد و ۱۴/۷۹ درصد گزارش گردید. تغییر جنس لوله از فولاد به مس و آلومینیوم دمای خروجی سیال را افزایش داد. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد حداکثر دمای خروجی سیال برای لوله از جنس مس، آلومینیوم و فولاد را گزارش نمودند. بررسی تحقیقات صورت گرفته در این زمینه نشان می‌دهد سیال عامل یکی از مهم‌ترین پارامترهای جمع کننده حرارتی است که نقش بسزایی در میزان انتقال حرارت دارد [۳۱ و ۳۲]. فنایی و همکاران [۳۳] جریان و انتقال حرارت جابجایی نانوسیال نانولوله کربنی چند جداره/آب در یک حفره مثلی با یک گرمکن خورشیدی را مورد بررسی قرار دادند. تأثیر پارامترهایی مانند، کسر حجمی نانوذرات و موقعیت گرمکن خورشیدی بر میدان‌های جریان و گرما نشان داد که برای همه اعداد ریلی مورد مطالعه، عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد علاوه بر این، نتایج آن‌ها نشان داد که انتقال حرارت را می‌توان با تنظیم موقعیت گرم‌کن خورشیدی بهینه کرد. همچنین فنایی و رضاپور [۳۴-۳۶] به بررسی های حرارتی نانوسیال در کوپل های حرارتی متخلخل و غیر متخلخل تحت شار حرارتی خورشیدی متمرکز شدند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش کسر حجمی، میزان ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت افزایش یافته و در نتیجه، گرمای منتقل شده به کوپل حرارتی متخلخل افزایش می‌یابد. مرور کارهای انجام گرفته در این زمینه نشان می‌دهد افزایش انتقال حرارت توسط نانوذرات و افزایش کارایی حرارتی جمع کننده های حرارتی خورشیدی موضوع بسیاری از تحقیقات در دهه های اخیر بوده است و کارهای عددی و تجربی بسیاری در زمینه مطالعه جریان و انتقال حرارت لوله جاذب جمع کننده حرارتی سهموی برای انواع سیال های عامل مختلف صورت

گرفته است تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از نانوسیال های هیبریدی به جای مونو نانوسیال باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود، علی‌رغم پیشرفت های قابل توجهی که تاکنون انجام شده است، اطلاعات کمی در مورد مقایسه مونو نانوسیال برپایه آب یا روغن نسبت به نانوسیالات هیبریدی بر عملکرد حرارتی جمع کننده حرارتی خورشیدی سهموی در شرایط عملکردی وجود دارد. همچنین در زمینه میزان توانایی هریک از سیال های عامل جاذب در جمع کننده های حرارتی سهموی برای تولید بخار جهت بهره برداری از آن و نیز مطالعه تنش حرارتی لوله جاذب آن‌ها برای شرایط اقلیم مشخصی مورد بررسی قرار نگرفته است در کار حاضر با انتخاب عملی ترین و مطلوب ترین نوع جاذب به عنوان سیال های عامل (مونو نانوسیال ها و نانوسیال هیبریدی) جهت افزایش کارایی سیستم، به بررسی های حرارتی و همچنین توانایی تولید بخار جریان نانوسیال با کسر حجمی های مختلف پرداخته می‌شود. در این پژوهش، بررسی حرارتی نانوسیالات مختلف درون لوله جاذب یک جمع کننده حرارتی خورشیدی سهموی به جهت تولید بخار به عنوان یک منبع حرارت برای بویلر در شرایط اقلیم مشخص (شهر ایرانشهر واقع در استان سیستان و بلوچستان) مدل سازی و مورد بررسی قرار می‌گیرد. علاوه بر آن بررسی اثر نانوذرات بر میزان انتقال حرارت، اثر آنها برای تولید نرخ بخار و دمای خروجی مورد بهره برداری به کمک نانوسیالات مختلف و تنش حرارتی لوله جاذب فولادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

#### معرفی مساله

مساله حاضر یک مجموعه شامل جمع کننده حرارتی خورشیدی از نوع سهموی که جهت تولید بخار برای یک واحد بهره بردار برای یک اقلیم مشخص (شهرستان ایرانشهر واقع در استان سیستان و بلوچستان با دمای متوسط سالانه ۳۲ درجه سانتی گراد و متوسط تابش مستقیم خورشیدی (DNI) در فصل تابستان (۸۵۰ وات بر مترمربع) در نظر گرفته شده است. شکل ۱ نمایی از مجموعه و همچنین جمع کننده حرارتی خورشیدی سهموی و نمای روبرو از لوله جاذب حاوی نانوسیال مورد بررسی را نشان می‌دهد. هندسه لوله جاذب مورد بررسی مسئله حاضر یک مدل سه بعدی با همراه شار حرارتی ثابت لوله جاذب (متناسب با اقلیم مفروض) با حضور نانوسیالات

<sup>1</sup> Farooq

جدول ۱ - مشخصات جمع کننده حرارتی سهموی LS-2 [۳۷]

اندازه مازول	7/8 m × 5m
بازتاب کلکتور	0/935
منطقه دیافراگمی و ناحیه دهانه	39/2 m2
نسبت غلظت	22/74
قطر بیرونی پوشش شیشه ای	115 mm
قطر داخلی پوشش شیشه ای	109 mm
ضریب عبور پوشش شیشه ای	0/95
قابلیت جذب لوله جاذب	0/96
قطر داخلی لوله جاذب	66 mm
قطر بیرونی لوله	70 mm
بازده نوری (بازده تابشی)	75/5%
ضریب انتشار پوشش	0.86

اثر استفاده از نانوسیالات در کسرحجمی متفاوت و بررسی دمای خروجی و میانگین دمای سطح لوله جاذب در شرایط اقلیم مشخص برای عملکرد حرارتی جمع کننده حرارتی، و نرخ تولید بخار آب برای یک مبدل حرارتی جهت بهره برداری مورد بررسی، مطالعه و مقایسه می گردد. همچنین تنش حرارتی لوله جاذب با جنس فولادی برای روزهای مشخصی از اقلیم مفروض با حضور نانوسیال مورد بررسی قرار می گیرد.

#### معادلات حاکم، شرایط مرزی، خواص نانوسیال و روش حل عددی

در این بررسی تعادل حرارتی بین سیال پایه و نانوذرات برای نانو سیال در نظر گرفته می شود. با صرف نظر از تلفات حرارتی اصطکاکی و جابجایی آزاد، نیروهای خارجی و همچنین تراکم ناپذیر بودن سیال، معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی حاکم بر جریان سیال پایا درون لوله جاذب با فرض ثابت بودن خواص سیال عبارتند از [۲۸]:

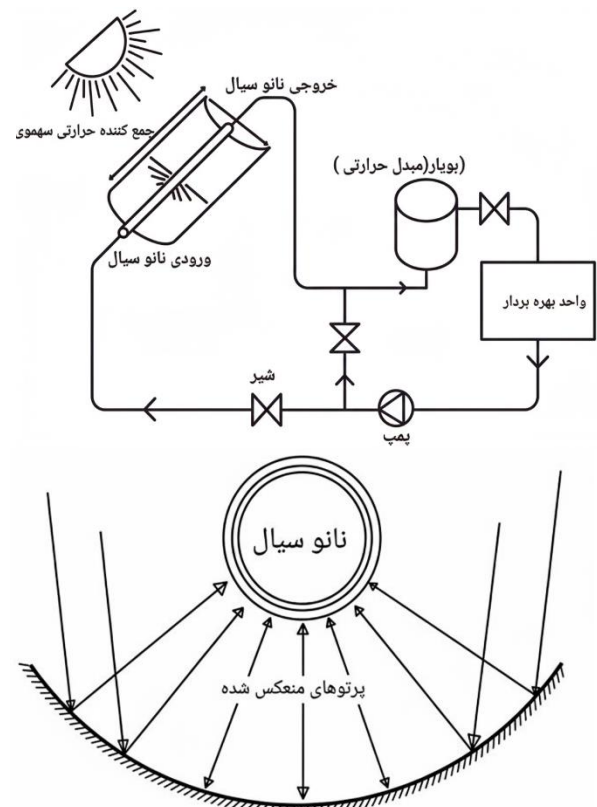
معادله پیوستگی:

$$\nabla \cdot (\rho_{eff} \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

معادله مومنتوم:

$$\nabla \cdot (\rho_{eff} \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau) \quad (2)$$

مختلف در آن فرض می شود. جمع کننده حرارتی خورشیدی از نوع سهموی صنعتی LS-2 با شرکت سازنده لوز<sup>۱</sup> انتخاب که مورد استفاده در آزمایشگاه بین المللی سانديا<sup>۲</sup> است و مشخصات آن مطابق جدول ۱ می باشد [۳۷]. نانوسیال های عامل مورد مطالعه در این پژوهش نانوسیال آب-مس، نانوسیال روغن سیلترم ۸۰۰- اکسید آلومینیوم و نانوسیال هیبریدی Cuo-Swnc<sup>t</sup> می باشند. پرتوهای خورشیدی بر روی قسمت سهموی تابش می شوند و سپس به لوله فولادی جمع کننده حرارتی متمرکز می شوند و سیال عامل را که درون آن جریان دارد گرم می کنند. سیال کاری در شرایط پایا و از نانوسیالات نیوتنی مختلف در کسر حجمی مختلف در نظر گرفته شده و جریان دارند. همچنین با دبی جرمی مشخص و دمای ورودی مشخصی (متناسب با اقلیم مورد نظر شهر ایرانشهر واقع در استان سیستان و بلوچستان) وارد لوله می شوند.



شکل ۱ - نمایش شماتیک مجموعه جمع کننده حرارتی سهموی و لوله جاذب فولادی حاوی نانوسیال برای تولید بخار

<sup>1</sup> Luz industrial

<sup>2</sup> Sandia National Laboratory

معادله انرژی:

$$C_{p,np} = \frac{\varphi_1 C_{p,np_1} + \varphi_2 C_{p,np_2}}{\varphi} \quad (11)$$

$$K_{np} = \frac{\varphi_1 k_{np_1} + \varphi_2 k_{np_2}}{\varphi} \quad (12)$$

زیر نویس های  $\mu$  و  $\rho$  به ترتیب اشاره به سیال خالص پایه، نانوذرات و نانوسیال دارد. در روابط فوق  $\phi$  کسر حجمی نانوذرات است. نانوذرات به کار رفته در این پژوهش دارای قطر یکسان و با صرف نظر کردن از حرکت لغزشی بین ذره ها و فاز سیال و همچنین فرض تعادل حرارتی می توان نانوسیال را به عنوان یک سیال تک فازی در نظر گرفتن از این رو تئوری های کلاسیک تعمیم یافته برای سیال تک فاز را برای نانوسیال می توان به کار برد. خواص ترموفیزیکی نانوسیالات آب-مس و روغن سیلتروم ۸۰۰- آلومینیوم و نانوسیال هیبریدی آب- cuo/swnct در کسر حجمی های مختلف به ترتیب در جداول ۲ تا ۴ آمده است.

جدول ۲ - خواص نانوسیال آب - مس در کسر حجمی های مختلف

	$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	$C_p(\text{J}/\text{Kg}\cdot\text{K})$	$\mu(\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}))$	$k(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$
آب	997	4178	0.00085	0.613
مس	8933	383	-	400
$\phi=2\%$	1156.2	3591.1	0.0010	0.6366
$\phi=5\%$	1294.9	2960.7	0.0011	0.6943

جدول ۳ - خواص نانوسیال روغن سیلتروم ۸۰۰ - آلومینیوم اکسید در کسر حجمی های مختلف

	$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	$C_p(\text{J}/\text{Kg}\cdot\text{K})$	$\mu(\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}))$	$k(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$
روغن سیلتروم ۸۰۰	747/2	1962	0/00084	0/0961
آلومینیوم	3970	765	-	40
$\phi=2\%$	1033/1	1021/1	0/0010	0/084
$\phi=5\%$	1104/2	1012/2	0/011	0/094

جدول ۴ - خواص نانوسیال هیبریدی در کسر حجمی های مختلف

	$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	$C_p(\text{J}/\text{Kg}\cdot\text{K})$	$\mu(\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}))$	$k(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$
cuo	6400	531.02	-	33
Swcnt	1600	730	-	3180
آب	997	4178	0/00085	0/613
$\phi=2\%$	1027/03	4037/51	0/000873	0/622234
$\phi=4\%$	1057/06	3905/002	0/00089	0/63156
$\phi=6\%$	1117/12	3661/359	0/00094	0/65050

$$\nabla \cdot (\vec{u} \rho_{eff} c_{p,eff} T) = -\nabla \cdot (k_{eff} \nabla T + \tau \cdot \vec{u}) \quad (3)$$

تانسور تنش برشی به صورت رابطه (۴) حاصل می شود.

$$\tau = \mu_{eff} (\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{u} \vec{I}) \quad (4)$$

در این پژوهش بررسی عددی لوله جاذب حاوی نانوسیال به کمک سیالات محاسباتی و با استفاده از نرم افزار انسیس فلونت پرداخته می شود. الگوریتم حل سیمپل برای کوپل شدن سرعت و فشار و با روش حجم محدود برای حل مساله استفاده می شود. سیال کاری، نانوسیالات مختلف شامل ( آب -مس/ روغن سیلتروم ۸۰۰- اکسید آلومینیوم/ هیبریدی بر پایه آب اکسید مس- swnct) به صورت تک فاز در نظر گرفته شده است. چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیالات می تواند با استفاده از روابط ۵ و ۶ محاسبه می شوند [۳۸-۴۰]:

$$\rho_{nf} = \rho_{bf} \cdot (1 - \varphi) + \rho_{np} \cdot \varphi \quad (5)$$

$$C_{p,nf} = \frac{\rho_{bf} \cdot (1 - \varphi)}{\rho_{nf}} \cdot C_{p,bf} + \frac{\rho_{np} \cdot \varphi}{\rho_{np}} \cdot C_{p,np} \quad (6)$$

$\rho_{nf}$ ،  $C_{p,np}$  و  $\varphi$  به ترتیب چگالی، ظرفیت گرمایی نانوسیالات و کسر حجمی نانوذرات است. با در نظر گرفتن حالت تعادل حرارتی بین مایع پایه و نانوذرات هدایت گرمای با رابطه ماکسول محاسبه می شود [۳۶-۳۴]:

$$k_{nf} = \frac{k_{np} + 2 k_{bf} - 2\varphi(k_{bf} - k_{np})}{\frac{k_{np}}{k_{bf}} + 2 + \frac{k_{bf} - k_{np}}{k_{bf}} \cdot \varphi} \quad (7)$$

برای یافتن ویسکوزیته نانوسیالات از رابطه (۸) استفاده می شود:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} (1 + 2.5\varphi + 6.5\varphi^2) \quad (8)$$

برای محاسبه کسر حجمی نانوسیال هیبریدی و خواص ترموفیزیکی آن از روابط ۹ تا ۱۲ به شرح زیر استفاده می شود [۳۳]:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (9)$$

$$\rho_{np} = \frac{\varphi_1 \rho_{np_1} + \varphi_2 \rho_{np_2}}{\varphi} \quad (10)$$

$$0 \leq r \leq R, 0 \leq \theta \leq 2\pi, Z = l, T = 0 \quad (21)$$

شرط مرزی حرارتی برای سطح:

$$0 \leq Z \leq L, 0 \leq r \leq ro, 0 \leq \theta \leq 2\pi \rightarrow q'' = cte \quad (22)$$

شار حرارتی غیر یکنواخت متمرکز در سطح بیرونی لوله جاذب با اقلیم مشخص در شرایط ماهانه محاسبه می گردد. برای بررسی ها اقلیم مشخص شهر ایرانشهر واقع در استان سیستان و بلوچستان انتخاب شده است. این شهر در ۲۷/۲۰ درجه شمالی و ۶۰/۶۹ درجه جنوبی و با ۵۹۱ متر ارتفاع از سطح دریا واقع شده است. متوسط دمای سالانه ۳۲ درجه سانتی گراد را دارد. برای بررسی ها از میزان شدت تابش متوسط ماهانه و متوسط ماکزیمم شدت تابش (ساعت ۱۲ ظهر) روزهای آن ماه و میزان شار حرارتی ثابت منتقل شده از طریق جمع کننده حرارتی سهموی به لوله جاذب بهره گرفته می شود. نرخ انرژی خورشیدی رسیده به سطح جمع کننده حرارتی سهموی طبق رابطه ۲۳ محاسبه می گردد [۲۹]:

$$\dot{Q}_S = G \times A_a \quad (23)$$

که در آن  $G$  شدت تابش عمودی رسیده به واحد سطح  $A_a$  مساحت تصویر شده عمودی جمع کننده حرارتی است. بدلیل وجود اتلافات اپتیکی بخشی از توان رسیده به سطح جمع کننده حرارتی توسط آئینه های آن به لوله جاذب مرکزی منتقل می شود که از رابطه ۲۴ محاسبه می گردد:

$$\dot{Q}_{abs} = \eta_{opt} \times \dot{Q}_S \quad (24)$$

پارامتر  $\eta_{opt}$  بیانگر نسبت تابش جذب شده به تابش کل بوده و مقدار آن از رابطه ۲۵ محاسبه می گردد:

$$\eta_{opt} = \rho_{ref} \times \tau \times \alpha \times \gamma \quad (25)$$

که در آن ضریب بازتاب ضریب گذردهی کاور ضریب جذب دریافت کننده و ضریب عبور است و مقادیر آن در جدول موجود است. نرخ انرژی خالص انتقالی به سیال برابر تفاضل نرخ انرژی سیال خروجی و ورودی و از رابطه ۲۶ قابل محاسبه است.

$$\dot{Q}_u = m_f C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (26)$$

از آنجایی که دمای خروجی سیال مجهول است لذا از رابطه ۲۷ برای محاسبه نرخ انرژی مفید استفاده می گردد [۲۹].

پارامترهای مهم دیگری برای محاسبه مانند عدد ناسلت، عدد رینولدز و عدد پرانتل وجود دارد. انتقال حرارت جابجایی از طریق جمع کننده حرارتی به این پارامترها بستگی دارد. عدد رینولدز متغیر است زیرا سرعت جرمی جریان انتقال حرارت درون جمع کننده حرارتی مطابق معادله ۱۳ تغییر خواهد کرد.

$$Re = \frac{4 \dot{m}}{P_{cs} \mu} \quad (13)$$

در اینجا  $P_{cs}$  قسمت داخلی لوله جمع کننده حرارتی سهموی می باشد. برای پیدا کردن عدد ناسلت برای نواحی مختلف، اول عدد پرانتل را از طریق تساوی معادله ۱۴ محاسبه می کنیم و سپس ضریب انتقال حرارت جابجایی ( $h_{conv}$ ):

$$Pr = \frac{\mu_{nf} C_{p,nf}}{k_{nf}} \quad (14)$$

$$h_{همرفتی} = \frac{Nu_{nf} k_{nf}}{D_h} \quad (15)$$

در اینجا  $D_h$  قطر هیدرولیک است.  $D_h = \frac{4 A_{cs}}{P_{cs}}$  انتقال حرارت جابجایی از طریق نانوسیالات با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$Q_{همرفتی} = h_{همرفتی} A_{ri} (T_r - T_{avg}) \quad (16)$$

که در آن  $T_r$  و  $T_{avg}$  به ترتیب دمای سطح جمع کننده حرارتی سهموی و میانگین دمای سیال جاذب انتقال حرارت هستند.

شرایط مرزی جریان:

شرط مرزی جریان برای ورودی:

$$0 \leq r \leq R, 0 \leq \theta \leq 2\pi, Z = 0 \rightarrow V = Vi \quad (17)$$

شرط مرزی جریان برای خروجی:

$$0 \leq r \leq R, 0 \leq \theta \leq 2\pi, Z = l \rightarrow V = 0 \quad (18)$$

شرط مرزی جریان برای سطوح خارجی لوله:

$$0 \leq Z \leq L, 0 \leq r \leq R, 0 \leq \theta \leq 2\pi \rightarrow V = 0 \quad (19)$$

شرایط مرزی حرارتی:

شرط مرزی حرارتی برای ورودی:

$$0 \leq r \leq R, 0 \leq \theta \leq 2\pi, Z = 0, T = Ti \quad (20)$$

شرط مرزی حرارتی برای خروجی:

$$q = q''_s A_s = q''_s N \pi d L \quad (33)$$

$$q''_s = \dot{m} h_{fg}$$

با ترکیب روابط خواهیم داشت:

$$\Delta T_e = \frac{C_{s,f} h_{fg} Pr_l^n}{C_{p,l}} \left( \frac{q''_s}{\mu_l h_{fg}} \right)^{1/3} \left( \frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right)^{1/6} \quad (34)$$

$$\Delta T_e + T_{sat} = T_s$$

به طور مشابه شار حرارتی طبق رابطه ۳۵ بدست می آید:

$$q''_s = \mu_l h_{fg} \left( \frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right)^{1/2} \left( \frac{C_{p,l} \Delta T_e}{C_{s,f} h_{fg} Pr_l^n} \right)^3 \quad (35)$$

شار حرارتی بحرانی (برای لوله های بلند افقی) طبق رابطه ۳۶ محاسبه می شود [۳۷]:

$$q''_{max} = 0.62 h_{fg} \rho_v \left( \frac{\sigma g(\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right)^{1/4} \quad (36)$$

کارایی و بازده حرارتی جمع کننده حرارتی سهموی برابر است با نسبت انرژی خورشیدی تابیده شده به انرژی قابل تبدیل به سیال کاری جریان یافته در جمع کننده حرارتی که برای محاسبه عملکرد واحد بهره بردار مورد استفاده قرار می گیرد از رابطه ۳۷ محاسبه می شود.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A_a - DNI} = \frac{\dot{m} C_p (T_{out} - T_{in})}{A_a - DNI} \quad (37)$$

$\dot{m}$  دبی جرمی،  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه،  $A_a$  سطح موثر جمع کننده حرارتی سهموی و  $DNI$  شدت تابش مستقیم عمودی می باشد. مقدار متوسط تنش حرارتی در اثر گرادیان حرارتی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\sigma = \frac{E \alpha \Delta T}{1 - \vartheta} \quad (38)$$

که در آن  $\sigma$  تنش حرارتی وارده، مدول یانگ، ضریب انبساط حرارتی، گرادیان دما و نسبت پواسون است.

### نتایج و بحث

برای بررسی استقلال حل از شبکه، دمای میانگین خروجی برای شبکه بندی های مختلف محاسبه شده است. با توجه به

$$\dot{Q}_u = F_R [(G \times \eta_{opt} \times A_a) - (A_r U_r (T_{out} - T_{amb}))] \quad (27)$$

که  $A_r$  مساحت جانبی لوله جاذب  $U_L$  ضریب اتلاف جمع کننده  $T_{amb}$  دمای محیط  $F_R$  ضریب حذف حرارتی می باشد. پس از محاسبه گرمای مفید مطابق رابطه ۲۸ مقدار گرمای تلف شده بدست می آید [۲۹].

$$\dot{Q}_l = \dot{Q}_s - \dot{Q}_u \quad (28)$$

چنانچه مایعی در مجاور سطح قرار گیرد که دمای سطح بیشتر از دمای اشباع مایع باشد مایع می جوشد لذا برای بررسی و مقایسه میزان توانایی هر یک از نانوسیال های عامل در لوله جاذب سیستم جمع کننده حرارتی سهموی جهت تولید بخار برای راه اندازی مجموعه آب شیرین کن به بررسی پدیده جوشش می پردازیم:

با توجه به رابطه عدد رینولدز که در رابطه ۲۹ آمده است:

$$Re = \frac{\rho u d_h}{\mu} \quad (29)$$

که در رابطه عدد رینولدز  $d_h$  قطر هیدرولیکی می باشد. گرمای جذب شده توسط سیال عامل کاری و گرمای آزاد شده توسط دیواره لوله از طریق انتقال حرارت جابجایی بر طبق روابط زیر بدست می آید:

$$Q_{fluid} = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (30)$$

$$Q_{conv} = h_m A (T_w - T_m)$$

$A$  مساحت دیواره داخلی لوله می باشد  $T_m$  دمای میانگین سیال و  $T_w$  دمای دیواره لوله است که از رابطه زیر حاصل می شوند:

$$T_m = \frac{(T_{out} + T_{in})}{2} \quad (31)$$

$$A = \pi d L$$

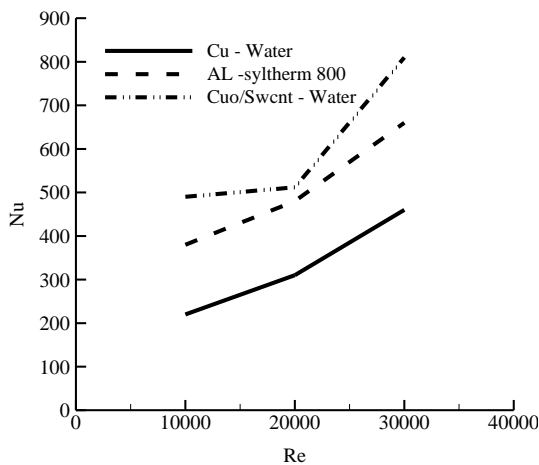
ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت از روابط زیر بدست می آیند:

$$h_m = \frac{\dot{m} C_p (T_{out} - T_{in})}{A (T_w - T_m)} \quad (32)$$

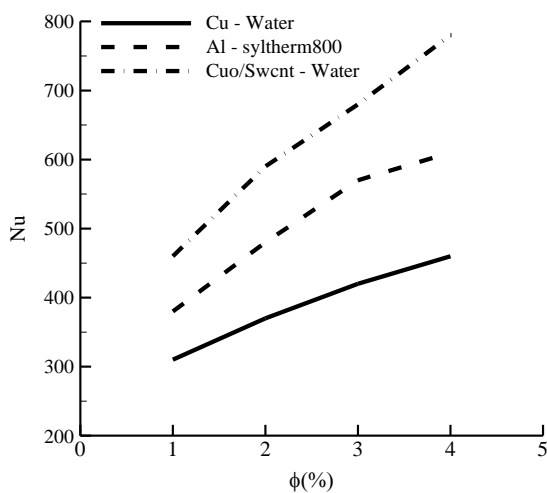
$$Nu = \frac{h_m d_h}{K}$$

برای محاسبه انتقال حرارت کل  $q$  و شار حرارتی  $q''_s$  و تعداد لوله  $N$  مورد نیاز جهت ایجاد پدیده جوشش خواهیم داشت:

با توجه به اقلیم انتخابی و محاسبه مقادیر متوسط گیری شده ماکزیمم شدت تابش ماهانه برای (ساعت ۱۲ ظهر) روزهای ماه های تابستان و همچنین محاسبه میزان شار حرارتی ثابت منتقل شده از طریق جمع کننده حرارتی سهموی به لوله جاذب، بررسی ها برای نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیالات انتخابی به عنوان سیالات جاذب حرارت صورت پذیرفت. شکل ۲ و شکل ۳ به ترتیب تغییرات عدد ناسلت در اعداد رینولدز مختلف و تغییرات عدد ناسلت در کسر حجمی های مختلف را برای نانوسیالات مفروض نشان می دهند.



شکل ۲ - تغییرات عدد ناسلت در اعداد رینولدز مختلف برای نانوسیالات متفاوت برای لوله جاذب جمع کننده حرارتی سهموی در کسر حجمی ثابت ۲ درصد

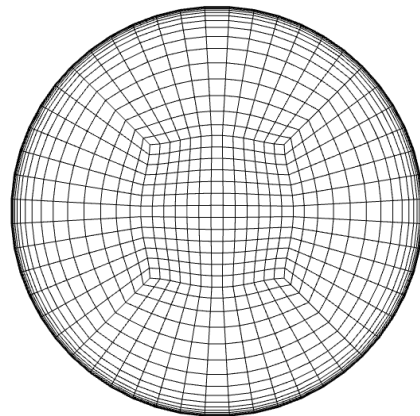


شکل ۳ - تغییرات عدد ناسلت در کسر حجمی های مختلف برای نانوسیالات متفاوت برای لوله جاذب جمع کننده حرارتی سهموی در عدد رینولدز ثابت

مقادیر جدول ۵ شبکه با تعداد ۸۱۰۵۱۷ انتخاب گردید. شکل ۲ نمایی از شبکه مورد استفاده در مدل سازی حاضر را نشان می دهد. مشاهده می شود، برای بخش مرکزی جریان از شبکه نامنظم و برای بخش کنار دیواره، شبکه منظم استفاده شده است.

جدول ۵- مقادیر دمای میانگین خروجی لوله جاذب برای شبکه

تعداد المان ها	میانگین دمای خروجی
409348	304.7898
810517	305.0290
1593355	305.3833
2049861	305.3554



شکل ۲ - نمایی از شبکه مورد استفاده در مدل سازی حاضر

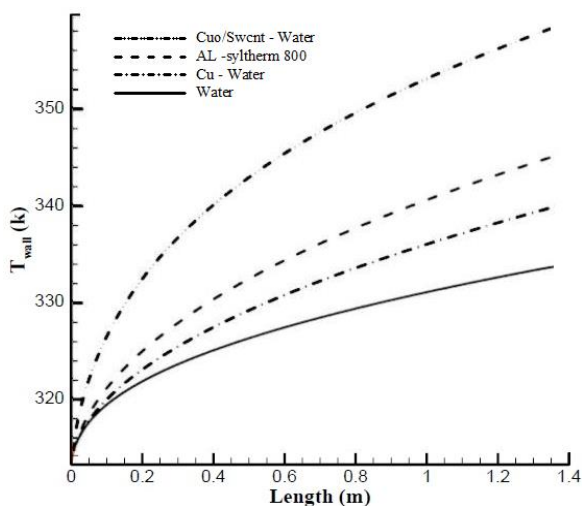
مقایسه بین نتایج مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی وو<sup>۱</sup> و همکاران [۴۲] برای شرایط  $Re = 2 * 10^5$  در جدول ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که محدوده خطای محاسباتی زیر دو درصد است و این نشان می دهد که نتایج مدل سازی قابل اعتماد می باشند.

جدول ۶- مقایسه دمای خروجی کار حاضر با کار تجربی [۴۲]

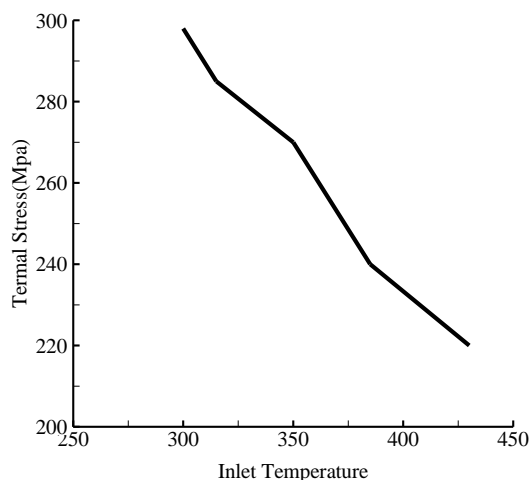
خطا درصد	$T_{out}(K)$ کار حاضر	$T_{out}(K)$ کار وو و همکاران	$T_{in}(K)$	$m(kg/s)$	$DNI(W/m^2)$ Direct Normal Irradiation
1/6	399	397	375	0/63	933
1/4	448/5	446	424	0/67	968
1/2	493/5	492	471	0/64	972

<sup>۱</sup> Wu

بر روی لوله جاذب داشته است. می توان دریافت که با افزایش دمای نانوسیال ورودی، تنش حرارتی ایجاد شده بر روی لوله جاذب کاهش می یابد. به طوری که با افزایش دمای سیال ورودی از ۳۰۰ کلوین به ۴۳۰ کلوین تنش حرارتی ایجاد شده بر روی لوله جاذب در حدود ۲۵ درصد کاهش یافته است.



شکل ۴ - تغییرات دمای سطح دیواره لوله جاذب جمع کننده حرارتی سهموی برای نانوسیالات مختلف در کسر حجمی ثابت



شکل ۵ - نمودار تاثیر دمای نانوسیال ورودی برای ماه های تابستان اقلیم مفروض بر تنش حرارتی لوله جاذب فولادی جمع کننده حرارتی سهموی

در جداول ۷ و ۸ به ترتیب مقادیر دمای خروجی و میانگین دمای سطح لوله جاذب برای نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیالات جهت تولید بخار و بهره برداری از دمای خروجی

مشاهده می شود با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی مقادیر عدد ناسلت برای نانوسیال هیبریدی نسبت به مونو نانوسیالات افزایش قابل توجهی دارد. برای اقلیم مفروض برای شرایط گرم ترین ماه تابستان در کسر حجمی ثابت، بیشترین افزایش نرخ انتقال حرارت برای جاذب نانوسیال هیبریدی نسبت به جاذب های مونو نانوسیالات، روغن سیلتروم ۸۰۰ - ذرات آلومینیوم، آب - ذرات مس گزارش گردید. که مقادیر افزایش نرخ حرارت برای نانوسیال هیبریدی به ترتیب نسبت به جاذب های، روغن سیلتروم ۸۰۰ - ذرات آلومینیوم، آب - ذرات مس برابر با ۱۶/۲ و ۱۹/۳ درصد ثبت گردید. بیشترین میزان را در کسر حجمی های بالاتر می توان مشاهده نمود. نانوسیال هیبریدی هدایت حرارتی بالاتر و ظرفیت گرمایی بهینه نسبت به نانوسیالات مونو دارد. ترکیب SWNT (هدایت بالا) و CuO (پایداری حرارتی) انتقال حرارت را بهبود می بخشد نانوسیال هیبریدی به دلیل ترکیب رسانایی حرارتی می تواند عملکرد انتقال حرارت بهتری نسبت به نانوسیالات مونو داشته باشد. بنابراین با مقایسه مقادیر در کسر حجمی های مختلف می توان نتیجه گرفت نانوسیالات هیبریدی بر پایه آب نسبت به مونو نانوسیالات کارایی حرارتی مطلوب تری جهت استفاده در جمع کننده حرارتی سهموی خورشیدی دارند. شکل ۴ نمودار تغییرات دمای سطح لوله جاذب را برای نانوسیالات مختلف در کسر حجمی ثابت نشان می دهد. مشاهده می شود با افزایش طول لوله دمای سطح برای همه نانوسیالات به طور یکنواخت با شیب ملایم کاهشی، افزایش می یابد. که دلیل این امر جذب انرژی خورشیدی که دمای سطح را افزایش و تلفات حرارتی به محیط (از طریق همرفت و تشعشع) که با افزایش دما تشدید شده و از نرخ گرمایش می کاهد. مقایسه نانوسیالات نشان می دهد نانوسیالات هیبریدی با افزایش هدایت حرارتی (k) و ضریب انتقال حرارت (h)، انتقال انرژی به سیال را نسبت به مونو نانوسیالات بهبود بخشیده و تلفات را کاهش می دهند. با بهینه سازی انتقال حرارت، دمای سطح را کاهش داده و بازده جمع کننده حرارتی را از طریق حداقل سازی تلفات حرارتی افزایش می دهند.

در شکل ۵ تغییرات تنش حرارتی ایجاد شده بر روی لوله جاذب فولادی بر حسب مگا پاسکال با توجه به تغییرات دمای نانوسیال ورودی برای شرایط ماه های فصل تابستان اقلیم مفروض نشان داده شده است. همانطور که مشخص است دمای نانوسیال ورودی تاثیر قابل توجهی بر تنش حرارتی ایجاد شده

جدول ۹ مقادیر نرخ بخار تولیدی جهت بهره برداری به کمک روابط جوشش انتقال حرارت (روابط ۳۳ تا ۳۶) با تعداد لوله جاذب  $n=2$  مورد نیاز برای نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیالات را در کسر حجمی ثابت ۲ درصد برای شرایط اقلیم مفروض در ماه های تابستان را نشان می دهد. نتایج حاصل نشان می دهد استفاده از نانوسیال هیبریدی ضمن ایجاد اختلاف دمای مناسب برای تولید حجم بخارآب بیشتری را، برای بهره برداری فراهم می سازد. به طوری که مقایسه مقادیر عددی نشان می دهد بیشترین مقادیر عددی محاسبه شده نرخ بخار آب تولیدی برای جاذب نانوسیال هیبریدی نسبت به مونو نانوسیال در هریک از ماه های تابستان به طور متوسط ۲۰ درصد رشد را نشان می دهد. ترکیب SWNT (هدایت بالا) و CuO (پایداری حرارتی) انتقال حرارت را بهبود می بخشد و تولید بخار را نسبت به مونو نانوسیالات افزایش می دهد، بنابراین در شرایط مطالعه حاضر نانوسیال هیبریدی نسبت به مونو نانوسیالات عملکرد حرارتی بهتری دارد. بنابراین بررسی ها برای میزان توانایی هریک از نانوسیالات انتخابی به عنوان جاذب حرارت جهت بهره برداری و استفاده برای تولید بخارخالص آب نشان می دهد که استفاده از نانوسیال هیبریدی در ماه اول تابستان برای اقلیم شهر مفروض یعنی شهر ايرانشهر واقع در استان سیستان و بلوچستان سودمند خواهد بود.

جدول ۹- مقادیر نرخ بخار تولیدی جهت بهره برداری با تعداد لوله جاذب  $n=2$  مورد نیاز برای نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیالات در کسر حجمی ثابت ۲ درصد برای شرایط اقلیم مفروض در ماه های تابستان

نرخ بخار ( $\dot{m}$ ) (kg/s)	نانوسیال عامل جاذب	میزان شار حرارتی منتقل به لوله جاذب (تابستان)	ماه
0/180573	water - CuO/SWNT	823/86	تیر
0/163210	روغن سیلترم ۸۰۰- آلومینیوم		
0/152143	آب- مس	761/23	مرداد
0/081619	water - CuO/SWNT		
0/054671	روغن سیلترم ۸۰۰- آلومینیوم	677/41	شهریور
0/050102	آب- مس		
0/027633	water - CuO/SWNT	677/41	شهریور
0/013345	روغن سیلترم ۸۰۰- آلومینیوم		
0/0202341	آب- مس		

برای حالت های مختلف ارائه شده است. نتایج حاصل نشان می دهد استفاده از نانوسیال هیبریدی اختلاف دمای مناسبی جهت تولید حجم بخارآب تولیدی بیشتری را برای بهره برداری ایجاد می کند. به طوری که مقادیر عددی دمای خروجی لوله جاذب برای نانوسیال هیبریدی نسبت به مونو نانوسیال در هریک از ماه های تابستان به طور متوسط ۲۰ درصد افزایش یافته است بنابراین با استفاده از مقادیر دمای خروجی لوله جاذب نتایج حاصل نشان می دهد در ابتدای ماه تابستان برای اقلیم شهر ايرانشهر واقع در استان سیستان و بلوچستان نرخ تولید بخار بیشتر خواهد بود و برای نانوسیال هیبریدی ماکزیمم دمای خروجی مطلوب تری جهت تولید نرخ بخار بیشتر قابل دستیابی خواهد بود.

جدول ۷- مقادیر دمای خروجی و میانگین دمای سطح لوله جاذب حاوی نانوسیالات مختلف در کسر حجمی ۲ درصد برای دبی ورودی 0.1

شهریور	مرداد	تیر	ماه (تابستان)
677/41	761/23	823/86	میزان شار حرارتی منتقل به لوله جاذب
299/14	297/15	293/15	دمای ورودی
302/14	301/46	300/83	آب- مس
302/22	301/51	301/027	دمای خروجی (عددی)
299/14	301/64	302/42	هیبریدی آب- cuo/swnt
314/88	314/83	315/92	آب- مس
314/78	314/98	316/51	دمای متوسط سطح (عددی)
318/97	318/88	318/97	هیبریدی آب- cuo/swnt

جدول ۸- مقادیر دمای خروجی و میانگین دمای سطح لوله جاذب

حاوی نانوسیال مختلف در کسر حجمی ۲ درصد برای دبی ورودی 0.6

شهریور	مرداد	تیر	ماه (تابستان)
677/41	761/23	823/86	میزان شار حرارتی منتقل به لوله جاذب
299/14	297/15	293/15	دمای ورودی
303/17	307/10	308/08	آب- cuo/swnt
299/17	304/10	306/07	دمای خروجی (عددی)
319/87	325/48	328/64	آب- cuo/swnt
316/81	322/67	325/39	دمای متوسط سطح (عددی)
			هیبریدی آب- آلومینیوم

## نتیجه‌گیری

هدف از کار حاضر بررسی حرارتی تولید بخار به وسیله لوله جاذب فولادی سیستم جمع کننده حرارتی خورشیدی سهموی حاوی نانوسیالات مختلف برای اقلیم گرم و خشک شهر ایرانشهر واقع در استان سیستان و بلوچستان می باشد. بررسی ها برای نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیالات انتخابی به عنوان سیالات جاذب حرارت صورت پذیرفت. مهمترین نتایج حاصل با شرایط مطالعه حاضر عبارتند از:

۱- با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی مقادیر عدد ناسلت برای نانوسیال هیبریدی نسبت به مونو نانوسیالات افزایش قابل توجهی دارد. برای اقلیم مفروض برای شرایط گرم ترین ماه تابستان در کسر حجمی ثابت، بیشترین افزایش نرخ انتقال حرارت برای جاذب نانوسیال هیبریدی نسبت به جاذب های مونو نانوسیالات، روغن سیلتروم ۸۰۰ - ذرات آلومینیوم، آب - ذرات مس گزارش گردید. که مقادیر افزایش نرخ حرارت برای نانوسیال هیبریدی به ترتیب نسبت به جاذب های، روغن سیلتروم ۸۰۰- ذرات آلومینیوم، آب - ذرات مس برابر با  $16/2$  و  $19/3$  درصد ثبت گردید. همچنین تغییرات دمای سطح لوله جاذب را برای نانوسیالات مختلف در کسر حجمی ثابت نشان داد با افزایش طول لوله دمای سطح برای همه نانوسیالات به طور یکنواخت با شیب ملایم کاهشی، افزایش می یابد. که دلیل این امر جذب انرژی خورشیدی که منجر به افزایش دمای سطح و تلفات حرارتی به محیط (از طریق همرفت و تشعشع) که با افزایش دما تشدید شده و از نرخ گرمایش می کاهد. مقایسه مونو نانوسیالات با نانوسیال هیبریدی نشان می دهد نانوسیالات هیبریدی با افزایش هدایت حرارتی (k) و ضریب انتقال حرارت (h)، انتقال انرژی به سیال را نسبت به مونو نانوسیالات بهبود بخشیده و تلفات را کاهش می دهند. با بهینه سازی انتقال حرارت، دمای سطح را کاهش داده و بازده جمع کننده حرارتی را از طریق حداقل سازی تلفات حرارتی افزایش می دهند بیشترین میزان را در کسر حجمی های بالاتر می توان مشاهده نمود. بنابراین با مقایسه می توان نتیجه گرفت نانوسیالات هیبریدی بر پایه آب نسبت به مونو نانوسیالات کارایی حرارتی مطلوب تری جهت استفاده در جمع کننده حرارتی سهموی خورشیدی دارند.

۲- استفاده از نانوسیال هیبریدی اختلاف دمای مناسبی جهت تولید حجم بخار آب تولیدی بیشتری را برای بهره برداری ایجاد می کند. به طوری که مقادیر عددی دمای خروجی لوله جاذب و نرخ بخار آب خالص تولید شده برای نانوسیال هیبریدی نسبت به مونو نانوسیال در هریک از ماه های تابستان به طور متوسط ۲۰ درصد افزایش یافته است بنابراین در ابتدای ماه تابستان برای اقلیم شهر ایرانشهر واقع در استان سیستان و بلوچستان نرخ تولید بخار بیشتر خواهد بود و برای نانوسیال هیبریدی ماکزیمم دمای خروجی مطلوب تری جهت تولید نرخ بخار بیشتر قابل دستیابی خواهد بود.

۳- تغییرات تنش حرارتی ایجاد شده بر روی لوله جاذب فولادی بر حسب مگا پاسکال با توجه به تغییرات دمای نانوسیال ورودی برای شرایط روزهای مختلف ماه های تابستان اقلیم مفروض نشان داد که با افزایش دمای سیال ورودی تا  $130$  درجه کلین اختلاف تنش حرارتی ایجاد شده بر روی لوله جاذب در حدود ۲۵ درصد کاهش می یابد.

۴- نتایج حاصل کلی نشان داد که معیار ارزیابی عملکرد جمع کننده حرارتی خورشیدی وقتی از نانوسیال هیبریدی استفاده شود، بیشتر از شرایطی است که از مونو نانوسیال استفاده می شود.

## منابع و مراجع

- [1]Ho ok, M. Tang, X. "Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change", A review. *Energy Policy*; vol.52, pp.797-809, 2013.
- [2]Naderi, A., Qasemian, A., Shojaeefard, M. H., Samiezadeh, S., Younesi, M., Sohani, A., & Hoseinzadeh, S. "A smart load-speed sensitive cooling map to have a high-performance thermal management system in an internal combustion engine". *Energy*, vol.229, pp.120667, 2021.
- [3]Hemmat Esfe M, Kamyab MH, Valadkhani M. "Application of nanofluids and fluids in photovoltaic thermal system an updated review". *Sol Energy*, vol.199, pp.796-818, 2020.

- [12] A. Ghomrassi, H. Mhiri, and P. Bournot, "Numerical study and optimization of parabolic trough solar collector receiver tube," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 137, p.051003, 2015.
- [13] M. Farooq, M. Farhan, G. Ahmad, M. Usman, M. Sultan, M. S. Hanif, et al., "Thermal performance enhancement of nanofluids based parabolic trough solar collector (NPTSC) for sustainable environment," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, pp. 8943-8953, 2022.
- [14] N. J. Vickers, "Animal communication: when i'm calling you, will you answer too?," *Current biology*, vol. 27, pp. R713-R715, 2017.
- [15] Ghasemi SE, Ranjbar AA. "Effect of using nanofluids on efficiency of parabolic trough collectors in solar thermal electric power plants". *Int J Hydrogen Energy*, vol. 42, pp. 21626–21634, 2017.
- [16] Wang Y, Xu J, Liu Q, Chen Y, Liu H. "Performance analysis of a parabolic trough solar collector using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/synthetic oil nanofluid". *Appl Therm Eng*, vol.107, pp. 469–78, 2016.
- [17] Moravei,M, Bozorg MV, Guan Y, Li LKB, Doranehgard MH, Hong K, et al. "Enhancing the efficiency of a symmetric flat-plate solar collector via the use of rutile TiO<sub>2</sub>-water nanofluids". *Sustainable Energy Technol Assess*, vol.40, pp.100783, 2020.
- [18] Xiong,Q, Siavashi M, Doranehgard MH, Mousavi Nezhad M."Recent developments of advanced numerical heat transfer in porous media". *J Therm Anal Calorim*, vol.141, pp.1489–1491, 2020.
- [19] Kasaeian A B, Sokhansefat T, Abbaspour, M J and Sokhansefat M "Numerical study of heat transfer enhancement by using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/synthetic oil nanofluid in a parabolic trough collector tube". *World acad. eng. Technol*, vol.69, pp.1154-1159, 2012.
- [20] Sokhansefat T, Kasaeian A B and Kowsary F "Heat transfer enhancement in
- [4] Han X, Chen X, Sun Y, Qu J. "Performance improvement of a PV/T system utilizing Ag/CoSO<sub>4</sub>-propylene glycol nanofluid optical filter" *Energy*, vol.192 pp.116611, 2020.
- [5] Ali, H. M. "Recent advancements in PV cooling and efficiency enhancement integrating phase change materials based systems—A comprehensive review", *Solar Energy*, vol.197, pp.163-198, 2020.
- [6] Sohani A, Shahverdian MH, Sayyaadi H, Samiezadeh S, Doranehgard MH, Nizetic S, et al. "Selecting the best nanofluid type for A photovoltaic thermal (PV/T) system based on reliability, efficiency, energy, economic, and environmental criteria". *J Taiwan Inst Chem Eng*; vol.124, pp.351–358, 2021.
- [7] Hu G, Ning X, Hussain M, Sajjad U, Sultan M, Ali HM, et al. "Potential evaluation of hybrid nanofluids for solar thermal energy harvesting: A review of recent advances". *Sustainable Energy Technol Assess*, vol.48 pp.101651, 2021.
- [8] Shahverdian MH, Sohani A, Sayyaadi H, Samiezadeh S, Doranehgard MH, Karimi N, et al. "A dynamic multi-objective optimization procedure for water cooling of a photovoltaic module". *Sustainable Energy Technol Assess*, vol.45, pp.101111, 2021.
- [9] Alqahtani S, Ali HM, Farukh F, Silberschmidt VV, Kandan K. "Thermal performance of additively manufactured polymer lattices". *J Build Eng*, , vol.39, pp.102243, 2021.
- [10] Pordanjani AH, Aghakhani S, Afrand M, Sharifpur M, Meyer JP, Xu H, et al. "Nanofluids Physical phenomena, applications in thermal systems and the environment effects-a critical review". *J Cleaner Prod*, , vol.320, pp.128573, 2021.
- [11] A. Siuta-Olcha, T. Cholewa, and K. Dopieralska-Howoruszko, "Experimental investigations of energy and exergy efficiencies of an evacuated tube solar collector," *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, vol. 16, p. 2, 2019.

- A “Thermal performance enhancement of nanofluids based parabolic trough solar collector (NPTSC) for sustainable environment”. *Alex. Eng. J.*, vol 61(11), pp. 8943-8953, 2022.
- [31] Olia H, Torabi M, Bahiraei M, Ahmadi M H, Goodarzi M and Safaei M R “Application of nanofluids in thermal performance enhancement of parabolic trough solar collector”: *state-of-the-art. Appl. Sci*, vol 9(3), pp. 463, 2019.
- [32] Kaloudi E, Papanicolaou E and Belessiotis V “Numerical simulations of a parabolic trough solar collector with nanofluid using a two-phase model”. *Renew. Energy*, vol 97, pp. 218-229, 2016.
- [33] Fanaee, S. A., Shahriari, A., & Nikpour, S. The Lattice Boltzmann Simulation of Free Convection Heat Transfer of a Carbon-Nanotube Nanofluid in a Triangular Cavity with a Solar Heater. *Journal of Nanofluids*, vol 13(3), pp. 694-709, 2024.
- [34] Rezapour, M., & Fanaee, S. A. Modeling the effect of porosity on a solar water-cooled coil filled with water and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid. *Energy Engineering and Management*, vol 10(1), pp. 100-111, 2023.
- [35] Fanaee, S. A., & Rezapour, M. Analysis of the Fluid-Thermal Regime with the Developed Brinkman Model in a Porous Coil for Solar Energy Application. *Modares Mechanical Engineering*, vol 19(4), pp. 855-863, 2019.
- [36] Fanaee, S. A., & Rezapour, M. The modeling of constant/variable solar heat flux into a porous coil with concentrator. *Journal of Solar Energy Engineering*, vol 142(1), pp.011004, 2020.
- [37] Dudley VE, Kolb GJ, Mahoney AR, et al. Test results: SEGS LS-2 solar collector. *Sand Natl Lab*, vol 96, pp. 11437. 1994.
- [38] Ekiciler, R., Arslan, K., Turgut, O. and Kurşun, B., "Effect of hybrid nanofluid on heat transfer performance of parabolic trough solar collector receiver", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol 143, pp.1-18, 2020.
- parabolic trough collector tube using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/synthetic oil nanofluid”. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol.33, pp. 636-644, 2014.
- [21] Basbous N, Taqi M and Belouaggadia N “Numerical study of a parabolic trough collector using a nanofluid”. *Asian j. curr. eng. Math*, vol.4, pp. 40-44. 2015.
- [22] Bellos E and Tzivanidis C “Optimization of a solar-driven trigeneration system with nanofluid-based parabolic trough collectors” *Energies*, vol. 10(7), pp.848, 2017.
- [23] Vanaki S M, Ganesan P and Mohammed H A “Numerical study of convective heat transfer of nanofluids: a review”. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol.54, pp.1212-1239, 2016.
- [24] Ghasemi S E, Ranjbar A A “Effect of using nanofluids on efficiency of parabolic trough collectors in solar thermal electric power plants”. *Int. J. Hydrog. Energy*, vol.42(34), pp. 21626-21634, 2017.
- [25] Kandwal S and Lal K G “An Experimental Investigation into Nanofluids (CuO-H<sub>2</sub>O & CuO-Ethylene Glycol) Based Parabolic Solar Collector”, 2015.
- [26] Chaudhari K S, Walke P V Wankhede U S and Shelke R S “An experimental investigation of a nanofluid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ H<sub>2</sub>O) based parabolic trough solar collectors”. *Curr. Appl. Sci. Technol*, vol 9(6), pp. 551-557, 2015.
- [27] Menbari A, Alemrajabi A A and Rezaei A “Heat transfer analysis and the effect of CuO/Water nanofluid on direct absorption concentrating solar collector”. *Appl. Therm. Eng.*, vol 104, pp. 176-183, 2016.
- [28] Abed N, Afgan I, Cioncolini A, Iacovides H, Nasser A and Mekhail T “Thermal performance evaluation of various nanofluids with non-uniform heating for parabolic trough collectors”. *Case Stud. Therm. Eng.*, vol 22, pp. 100769, 2020.
- [29] Hong K, Yang Y, Rashidi S, Guan Y. and Xiong Q “Numerical simulations of a Cu-water nanofluid-based parabolic-trough solar collector”. *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol 143, pp. 4183-419, 2021.
- [30] Farooq M, Farhan M, Ahmad G, Usman M, Sultan M, Hanif M S, Imran M, Anwar S, El-Sherbeeney A M and Shakir M

- [39] Brinkman H. C., "The viscosity of concentrated suspensions and solutions", *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 20, No. 4, p. 571, 1952.
- [40] Maxwell J. C., A treatise on electricity and magnetism, vol. 1. *Oxford: Clarendon Press*, 1873.
- [41] Incropera Frank P., Introduction to Heat Transfer. *ohn Wiley & Sons*, 2011.
- [42] Wu, Z., Li, S., Yuan, G., Lei, D., & Wang, Z. " Three-dimensional numerical study of heat transfer characteristics of parabolic trough receiver". *Applied Energy*, vol 113, pp. 902-911, 2014.