

## بررسی عددی عملکرد حرارتی لوله جاذب کلکتور خورشیدی سهموی خطی با استفاده از نانوسیال اکسید مس - روغن حرارتی

مرتضی پاک‌نژاد راسخی<sup>۱</sup>، ناصر کردانی<sup>۲</sup>

naser.kordani@umz.ac.ir

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور

۲- استادیار دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه مازندران

### چکیده

انتقال حرارت نقش مهمی را در صنعت و نیروگاه‌ها ایفا می‌کند؛ لذا در پژوهش حاضر با جایگزینی نانو سیال با سیال پایه روغن، انتقال حرارت در کلکتور خورشیدی سهموی خطی شبیه سازی عددی خواهد شد. از این رو، اثر غلظت ذرات اکسیدمس در روغن سیلیکون بر نرخ انتقال حرارت از لوله جاذب بررسی می‌شود. غلظت‌های گوناگون نانوذرات (۱، ۳ و ۵ درصد در حجم) در دمای عملکردی ۵۰۰ درجه کلوین استفاده گردید. شار حرارتی در جهت محیطی با استفاده از روش ردیابی اشعه مونت کارلو و معادلات سه‌بعدی ناویر استوکس جرم، مومنتوم و انرژی با استفاده از نرم‌افزار تجاری فلوئنت، و استفاده از گسسته‌سازی مرتبه دوم برای ترم‌های جابجایی و پخش، و برای کوپل کردن سرعت- فشار روش سیمپل استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت جابجایی به صورت نمایی با حرکت در طول لوله و توسعه یافتگی حرارتی و هیدرودینامیکی سیال، کاهش، و ضریب انتقال حرارت جابجایی با افزایش غلظت حجمی نانوسیال افزایش می‌یابد. با افزایش غلظت حجمی نانوسیال، ضریب هدایت حرارتی و گرادیان دمایی سیال افزایش می‌یابد که در نهایت منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال می‌گردد. کانتور دمایی بر روی سطح خارجی کلکتور در زاویه صفر درجه در ناحیه توسعه نیافته در غلظت‌های حجمی گوناگون، تفاوت چندانی نمی‌کند. اما در ناحیه توسعه یافته با افزایش غلظت حجمی به میزان ۵٪ دما بر روی سطح خارجی کلکتور به میزان ۳ درجه کلوین کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: کلکتور سهموی، شار حرارتی غیر یکنواخت، مونت کارلو، نانوسیال.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۶/۰۵/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۷/۰۳/۰۲

## ۱- مقدمه

انتقال حرارت نقش مهمی را در صنعت و نیروگاه‌ها ایفا می‌کند و دارای کاربردهای مختلفی است. به عنوان مثال، در وسایل نقلیه، حرارت تولید شده توسط عامل محرک به منظور عملکرد مناسب باید از بین برود مانند قطعات الکترونیکی که نیاز به خنک کاری دارند. سیستم گرمایش و تهویه مطبوع نیز شامل فرایندهای مختلف انتقال حرارت می‌باشند. همچنین انتقال حرارت فرایند کلیدی در نیروگاه‌های حرارتی است. در مجموع در بسیاری از فرایندهای تولید انتقال حرارت نقش مهمی دارد و در بیشتر این کاربردها انتقال حرارت توسط برخی از دستگاه‌های انتقال حرارت مانند مبدل حرارتی، اواپراتور و چگالنده تحقق می‌یابد. چندین روش برای بهبود راندمان انتقال حرارت وجود دارد. برخی از این روش‌ها شامل استفاده از سطوح گسترده، استفاده از لرزش به سطوح انتقال حرارت و استفاده از کانال‌های میکرو است. یکی دیگر از روش‌های افزایش راندمان حرارتی و افزایش هدایت حرارتی سیال عامل است. کشور ایران به دلیل قرار گرفتن در کمربند تابشی خورشید از پتانسیل بالایی در زمینه بهره برداری از این موهبت خدادادی برخوردار است. به طوری که در ۹۰٪ خاک کشورمان بیش از ۳۰۰ روز آفتابی وجود دارد. ایران با دریافت تابش متوسط سالانه خورشید بیش از  $5/5 - w/m2.day$  یکی از مناطق مستعد جهان برای بهره‌گیری از انرژی خورشیدی است.

افزودن ذرات نانو به سیال پایه روغن و استفاده از آن به جای روغن‌های متداول طرحی بدیع است که 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 نانو روغن‌ها به جای سیال پایه روغن به منظور افزایش انتقال حرارت در شبیه سازی عددی کلکتور خورشیدی سهموی با نرم افزار فلوننت و گمبیت استفاده شود و در پایان تاثیر استفاده از نانوسیال بر عملکرد حرارتی و هیدرو دینامیکی کلکتور در مقایسه با سیال پایه روغن حرارتی مورد بررسی و مطالعه قرار بگیرد. مدل کردن لوله

دریافت کننده کلکتور خورشیدی از نوع سهموی با شار حرارتی غیر یکنواخت در راستای محیطی لوله در نرم افزار فلوننت و بررسی ویژگی‌های حرارتی این سیستم با استفاده از بکار بردن نانوسیال اکسید مس - روغن سیلیکون است. به منظور شبیه سازی عددی خواص ترموفیزیکی نانوسیال و سیال پایه، از مدل‌های ریاضی کلاسیک و وابسته به دما استفاده شده است. معادلات حاکم یک دستگاه معادلات بسیار غیر خطی را تشکیل می‌دهد که باید تحت شرایط مرزی مناسب حل شوند.

## ۲- بیان مسأله

شار حرارتی اعمال شده به لوله جاذب کلکتور خورشیدی سهموی خطی بر اساس نتایج بدست آمده از کد مونت-کارلو است. مدل شبیه سازی شده در این پژوهش بر اساس مدل واقعی کلکتور خورشیدی سهموی خطی LS-2 می‌باشد. 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. برای ایجاد هندسه و شبکه بندی از نرم افزار گمبیت<sup>۱</sup> استفاده شده است. همچنین بررسی لازم برای اطمینان از استقلال نتایج از شبکه صورت گرفته است. داخل لوله، روغن سیلیکونی جریان دارد. تغییرات خواص این سیال با دما در نظر گرفته شده است و به صورت کد UDF<sup>۲</sup> (توابع تعریف شده توسط کاربر) یا توابع چند جمله‌ای در نرم افزار فلوننت تعریف شده است. به منظور شبیه سازی عددی خواص ترموفیزیکی نانوسیال و سیال پایه، از مدل‌های ریاضی کلاسیک و وابسته به دما استفاده شده است. نانوسیال تک فاز فرض شده است. از مدل یو و چوی<sup>۳</sup> برای مدل کردن ضریب هدایت حرارتی، از مدل اینشتین<sup>۴</sup> برای ویسکوزیته<sup>۵</sup>، از مدل پاک و چو<sup>۶</sup> برای گرمای ویژه و چگالی نانوسیال استفاده شده است. معادلات حاکم با توجه به شرایط مرزی مناسب با استفاده از روش عددی مبتنی بر حجم محدود حل شده‌اند و حل این معادلات با استفاده از نرم افزار فلوننت انجام شده است. برای حل معادلات بقاء مومنتوم و بقاء انرژی از مدل توربولانسی<sup>۷</sup> دو معادله‌ای استفاده شده است. معادلات حاکم یک دستگاه معادلات

<sup>5</sup> Viscosity<sup>6</sup> Pak & Cho<sup>7</sup> Turbulence<sup>1</sup> Gambit<sup>2</sup> User Defined Functions<sup>3</sup> Yu & Choi<sup>4</sup> Einstein

عملی تاثیرات افزودن نانوسیال آب/آلومینا و Triton X-100 به عنوان عامل سطحی را در کلکتور صفحه تخت بررسی کردند. در تحقیق دیگری یوسفی و همکاران با استفاده از راه‌اندازی آزمایشی مشابه مطالعه قبلی خود، اثرات نانوسیال نانو لوله‌های کربنی چند جداره آب، در بازدهی کلکتور صفحه تخت آزمایش کردند [۷].

تیلور<sup>۵</sup> و همکاران [۸] به صورت تئوری و عملی به کار بردن نانوسیال را در کلکتورهای متمرکز کننده (هلیوستات و دیش) بررسی کردند و افزایش راندمان را گزارش کردند. المیر<sup>۶</sup> و همکاران [۹] بکارگیری نانوسیال را در سیستم سرمایش خورشیدی بصورت تئوری بررسی کردند و به افزایش ۲۷٪ انتقال حرارت در رینولدزهای پایین برای غلظت نانوذرات ۱۰٪ رسیدند. در این کار از نانوسیال آب/آلومینا استفاده شده است.

لو<sup>۸</sup> و همکاران [۱۰] به بررسی تاثیرات نانوسیال آب-اکسید مس به صورت عملی در کلکتورهای لوله خلاء پرداختند و افزایش ۳۰٪ ضریب انتقال حرارت را گزارش کردند و همچنین درصد جرمی بهینه را ۱/۲٪ معرفی نمودند. نتایج حاصل از تحقیقات قبله و همکاران [۱۱]، نشان داد در یک جذب کننده خورشیدی با قرار دادن مواعی در جریان عبور سیال، با افزایش ضریب انتقال حرارت بین صفحه جاذب و هوا، راندمان حرارتی جذب کننده افزایش پیدا می‌کند؛ و به کاربردن سطح دریافت جذب کننده خورشیدی به فرم وی شکل، موج دار، لوله خلاء و مشبک، بازده آن را نیز افزایش داد؛ و عوامل محیطی نیز مانند دمای محیط، سرعت باد و از آن مهم تر شدت تابش نور خورشید، در عملکرد بالای کلکتور میسر بوده است.

فلاح و همکاران [۱۲] نشان دادند که راندمان متمرکز کننده خورشیدی، تابعی از شدت تابش می‌باشد و متمرکز کننده با یک پوشش شیشه‌ای بر روی لوله جاذب بیشترین راندمان را دارد. سلطانیپورخامنه و همکاران [۱۳]، در پژوهشی به روش شبیه سازی عددی به کمک نرم افزار گمبیت و فلوئنت سعی در بهینه کردن میزان حرارت انتقال یافته به سیال موجود در لوله جاذب نمودند و تمامی عوامل و پارامترهایی که در افزایش دمای خروجی سیال عامل، تاثیر دارد را مورد

بسیار غیرخطی را تشکیل می‌دهد که باید تحت شرایط مرزی مناسب حل شوند.

### ۳- مروری بر ادبیات

اولین کلکتور سهموی تجاری در سال ۱۹۱۲ در مصر ساخته شد که از انرژی آن به منظور پمپ کردن آب از رود نیل استفاده می‌کردند [۱]. در سال ۱۹۸۰ در جنوب غربی آمریکا نیروگاه کلکتورهای سهموی با توان ۳۵۴ مگاوات به صورت سری ساخته شدند، که در آن از کلکتورهای مدل  $LS-1, LS-2, LS-3$  استفاده شده است.

از سال ۱۹۸۸ تا ۲۰۰۱ فلگسل<sup>۱</sup> کلکتورهای جدیدی به نام یورو تراف<sup>۲</sup> را توسعه داد که از نظر ابعادی مانند  $LS-3$  بودند [۲]. هدف اصلی در این پروژه کاهش هزینه‌ها بوده است.

در ایران با وجود ظرفیت بالای تشعشع خورشید، به عنوان اولین پارامتر مهم در زمینه تولید الکتریسیته با استفاده از انرژی گرمایی خورشیدی و با توجه به پیشینه کلکتورهای سهموی خطی در جهان، طراحی و ساخت یک نیروگاه کامل خورشیدی سهموی خطی از طرف معاونت انرژی وزارت نیرو به علت وضعیت جغرافیایی شیراز به دانشگاه شیراز واگذار گردیده است. نیروگاه خورشیدی سهموی شیراز نخستین نیروگاه خورشیدی کشور است که در جنوب شرق شیراز و در کنار نیروگاه سیکل ترکیبی فارس ساخته شده است [۳]. تحقیقات پیشین در بررسی استفاده از نانوسیال در انرژی خورشیدی، به طور عمده مربوط به کاربرد انرژی خورشیدی در کلکتورهای تخت است. تیاگی<sup>۳</sup> و همکاران [۴] بصورت تئوری به بررسی افزایش راندمان کلکتور خورشیدی جذب مستقیم با استفاده از نانوسیال آب/آلومینا پرداختند. بر اساس این تحقیق با افزایش غلظت نانوذرات راندمان کلکتور با افزایش نانوذرات تا دو٪ افزایش می‌یابد و بعد از دو درصد تقریباً تاثیری نداشته است. اتانیکار<sup>۴</sup> و همکاران [۵] هر دو مورد تجربی و عددی اثرات نانوسیال‌های مختلف (نانو لوله‌های کربن، گرافیت و نقره) را در مقیاس میکرو در عملکرد جذب مستقیم انرژی خورشیدی در کلکتور خورشیدی بررسی کردند. یوسفی و همکاران [۶] به صورت

<sup>5</sup> Taylor

<sup>6</sup> Elmir

<sup>7</sup> Reynolds

<sup>8</sup> Lu

<sup>1</sup> Flagsol

<sup>2</sup> EuroTrough

<sup>3</sup> Tyagi

<sup>4</sup> Otanicar

بررسی لازم برای اطمینان از استقلال نتایج از شبکه مش بندی صورت گرفته است. برای این منظور ابتدا از شبکه ای به صورت  $78 \times 20 \times 300$  به ترتیب در جهت محیطی (Nc)، شعاعی (Nr) و محوری (Nz) استفاده شده است. با ریز کردن بیشتر مش تأثیری در جواب های حل صورت نمی گیرد. در جدول (۱) وابسته نبودن ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط در سه اندازه متفاوت شبکه مش بندی آمده است.

جدول (۱) ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط در دمای ۵۰۰ کلوین در سه اندازه شبکه مش بندی متفاوت.

اندازه شبکه ( $N_c \times N_r \times N_z$ )	ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط در غلظت صفر
78-20-300	۱۳۹/۸۷
78-30-400	۱۳۹/۶۹
90-20-480	۱۴۰/۰۱

#### ۴-۱- فرضیات و معادلات حاکم

لازم به یادآوری است که بیشتر نانو سیالات مورد استفاده در انتقال حرارت، محتوای ذرات کوچکتر از ۵۰ نانومتر می باشند. به دلیل ابعاد فوق العاده کوچک این ذرات می توانند به سادگی سیالیت پیدا نمایند و بنابراین می توان فرض کرد که مثل یک سیال عمل کنند [۱۴]. بنابراین با فرض اینکه حرکت لغزشی بین ذره و فاز پیوسته قابل صرفه نظر کردن باشد و تعادل حرارتی برقرار باشد، نانو سیال را می توان به صورت یک سیال تک فازی در نظر گرفت. خواص فیزیکی موثر تابعی از خواص سیال پایه، ذرات و غلظت ذره هستند.

#### ۴-۲- روش مونت کارلو مورد استفاده در کار حاضر

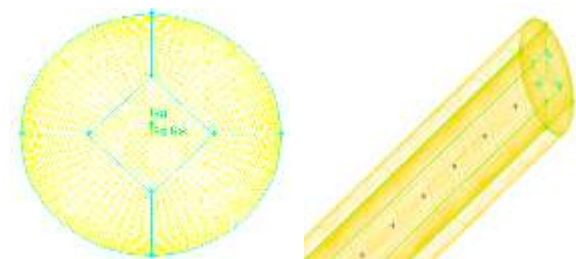
دقیق ترین روش، برای مدل سازی شار حرارتی غیر یکنواخت حول لوله دریافت کننده کلکتور، روش مونت کارلو است که توسط هی<sup>۴</sup> و همکاران [۱۵] برای هندسه لوله کلکتور خورشیدی و بازتابنده نور خورشید با ابعاد ارائه شد. ابتدا طول موجها، جهت و مکان برخورد و بازتابش فوتون هایی که از خورشید حاصل می شود بر اساس یک سری اعداد تصادفی تعریف می شود. سپس بر اساس اعداد تصادفی جدید طول موج هایی که سطح جاذب، جذب می کند محاسبه شده و از

بررسی قرار دادند که از جمله این عوامل نوع سیال عامل کلکتور خورشیدی سرعت ورودی سیال سطح مقطع لوله و اعمال سرعت دورانی به لوله جاذب کلکتور بود. نتایج حاصل از این شبیه سازی عددی، نشانگر این است که دمای خروجی سیال عامل در حالت دورانی به دلیل همگن شدن شار ورودی و متلاطم شدن جریان سیال در حدود ۱۵٪ بیشتر از حالت ساکن است.

#### ۴- مواد و روش ها

هدف از این بخش مدل کردن لوله دریافت کننده، کلکتور خورشیدی از نوع سهموی با شار حرارتی غیر یکنواخت در راستای محیطی لوله در نرم افزار فلونت و بررسی افزایش انتقال حرارت این سیستم با استفاده از بکار بردن نانو سیال اکسید مس-روغن سیلیکون است. در کلکتورهای خورشیدی برای انتقال حرارت از سیال های روغنی استفاده می شود ولی استفاده از نانو روغن ها میزان بازدهی این نوع سیستم ها را افزایش می دهد. اکسید مس به دلیل هدایت حرارتی بسیار بالاتر در مقایسه با دیگر نانو ذرات اکسید فلزی به عنوان نانو ذره مورد نظر انتخاب گردید.

به منظور شبکه بندی هندسه لوله جاذب کلکتور خورشیدی سهموی خطی از شبکه غیر یکنواخت سازمان یافته استفاده شد. برای مش<sup>۱</sup> زدن هندسه از المان چهاروجهی<sup>۲</sup> با نوع کوپر<sup>۳</sup> استفاده گردید. از شبکه ای به صورت  $78 \times 20 \times 300$  به ترتیب در جهت محیطی (Nc)، شعاعی (Nr) و محوری (Nz) استفاده شده است. شبکه غیر یکنواخت طراحی شده بدین صورت است که از دیواره به سمت محور لوله با ضریب  $1/06$  منبسط شده است که در شکل (۱) قابل مشاهده است.



شکل (۱) هندسه مش بندی شده لوله جاذب کلکتور خورشیدی سهموی خطی.

<sup>3</sup> Cooper

<sup>4</sup> Hey

<sup>1</sup> Mesh

<sup>2</sup> Element Quad

#### ۴-۳- مدل های ریاضی استفاده شده جهت مدل کردن نانوسیال

با فرض اینکه حرکت لغزشی بین ذره و فاز پیوسته قابل صرف نظر کردن است و تعادل حرارتی برقرار است، نانوسیال به صورت یک سیال تک فازی در نظر گرفته شده است. خواص فیزیکی موثر تابعی از خواص سیال پایه، نانوذرات و غلظت ذره است. همانطور که شرح دادیم مدل های تئوری و عملی بسیاری برای مدل کردن نانوسیالات ارائه شده است. در کار حاضر برای مدل کردن ضریب هدایت حرارتی از مدل یو و چوی (با در نظر گرفتن  $\beta=0.1$  برای نانو ذرات کرومی)، برای مدل کردن ویسکوزیته از مدل اینشتین، برای مدل کردن گرمای ویژه از مدل پاک و چو و برای مدل کردن چگالی نانوسیال از مدل پاک و چو استفاده شده است. مشخصات سیال پایه استفاده شده در ادامه تشریح می گردد. چگالی سیال پایه روغنی با استفاده از رابطه (۶) بدست می آید که وابسته به دما است:

$$\rho_{bf} = -0.9985T + 1236Kg / m^3 \quad (6)$$

ویسکوزیته سیال پایه وابسته به دما با استفاده از رابطه (۷) بدست می آید:

$$\mu_{bf} = 6.67 * 10^{-7} T^4 - 1.56 \quad (7)$$

$$* 10^{-3} T^3 + 1.38 * T^2 - 5.541$$

$$* 10^2 T + 8.848 * 10^4 \mu Pa.s$$

ضریب هدایت حرارتی سیال پایه با استفاده از رابطه (۸) بدست می آید:

$$k_{bf} = -5.753496 * 10^{-10} T^2 - 1.875266 * 10^{-4} T \quad (8)$$

$$+ 1.900210 * 10^{-1} W / mK$$

به منظور محاسبه خواص نانوسیال از جمله هدایت حرارتی نانوسیال با استفاده از رابطه یوچوی که اصلاح شده مدل ماکسول است بدست می آید [۲۰]. ظرفیت گرمایی سیال پایه با رابطه (۹) بدست می آید که تابعی از دما است:

$$C_{pbf} = 0.001708T + 1.107798Kj / (Kg K) \quad (9)$$

چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه از روابط پاک و چو محاسبه می شود [۲۱]. مدل های بسیاری به منظور محاسبه ضریب هدایت حرارتی نانوذرات با در نظر گرفتن لایه بندی مولکولی مایع در سطح مشترک مایع- جامد ارائه شده است. برخی از این مدل ها اثرات حرکت براونی و خوشه ای شدن نانوذرات را

طریق یک شمارشگر تعداد فوتون هایی که لوله جاذب جذب می کند محاسبه می شود.

برای محاسبه تشعشع خورشیدی حول لوله کلکتور توسط این روش ابتدا باید مکان برخورد فوتون ها با کلکتور و جهت فوتون ها مشخص شود. مکان فوتون ها با مختصات کارتزین  $x, y, z$  و جهت آن ها با کسینوس های هادی  $u_x, u_y, u_z$  مشخص می شود. مکان برخورد فوتون ها به کلکتور به صورت رابطه (۱) است [۱۶].

$$x' = x_o + \xi_1 \times x_L$$

$$z' = z_o + \xi_2 \times z_L \quad (1)$$

$$y' = y_o + \xi_3 \times z^2 / 4 \times f$$

در معادلات بالا  $x_L$  و  $z_L$  به ترتیب طول بازتابنده در راستای  $x$  و  $y$  و  $z$  فاصله کانونی و  $\xi_1$  و  $\xi_2$  و  $\xi_3$  اعداد تصادفی هستند، جهت فوتون ها نیز از فرمول (۲) محاسبه می شود [۱۷]:

$$u_x = \sin(\theta) \times \cos(\phi)$$

$$u_y = \sin(\theta) \times \sin(\phi) \quad (2)$$

$$u_z = \cos(\theta)$$

$\phi$  زاویه سمت می باشد که برابر است با:

$$\phi = 2\pi\xi_3 \quad (3)$$

$\theta$  زاویه انحراف نیز به صورت زیر تعریف می شود [۱۸]:

$$\theta = \sin^{-1} \sqrt{\sin^2 \theta_{sun} \times \xi_4} \quad (4)$$

در مرحله بعدی باید بررسی کرد که آیا فوتون از کلکتور بازتاب می شود یا نه؟ همچنین باید جهت جدید فوتون را پس از بازتاب تعیین کرد. جهت فوتون پس از بازتاب بصورت زیر است [۱۹].

$$u'_x = u_x$$

$$u'_y = u_y - y' \times \left[ \frac{y'}{2f} \sin(\theta) \times \sin(\phi) + \cos(\theta) \right] / \left[ f \left( 1 + \frac{y'^2}{4f^2} \right) \right]$$

$$u'_z = u_z + 2 \times \left[ \frac{y'}{2f} \sin(\theta) \times \sin(\phi) + \cos(\theta) \right] / \left[ \left( 1 + \frac{y'^2}{4f^2} \right) \right] \quad (5)$$

پس از این مرحله یک عدد تصادفی جدید  $\xi_6$  تعریف می شود. این عدد با  $T_g$  (ضریب عبور شیشه) مقایسه می شود. فوتون از شیشه عبور می کند اگر  $\xi_6 < T_g$  باشد. در مرحله آخر تعداد فوتون هایی که به لوله جاذب رسیده و جذب شده اند با یک شمارشگر محاسبه و در نهایت شار حرارتی تعیین می گردد.

<sup>1</sup> Cartesian

در رابطه بالا  $\lambda$  مسیر آزاد متوسط فتون‌ها است. پاک و چو<sup>۱</sup> [۲۸] رابطه (۱۷) و ژوان و همکاران [۲۹] رابطه (۱۸) را برای تعیین ظرفیت گرمای ویژه ارائه نموده‌اند.

$$(C_p)_{eff} = (1-\phi)(C_p)_{bf} + \phi C_p \quad (17)$$

$$(\rho C_p)_{eff} = (1-\phi)(\rho C_p)_{bf} + \phi(\rho C_p)_s \quad (18)$$

به منظور محاسبه  $\rho_{eff}$  در رابطه (۱۹) از رابطه زیر استفاده می‌شود [۲۸].

$$(\rho)_{eff} = (1-\phi)\rho_{bf} + \phi\rho_s \quad (19)$$

وجهها و داس<sup>۲</sup> بصورت عملی به بررسی سه نانوذره آلومینا، دی اکسید سیلیسیوم و اکسید روی پرداختند. آن‌ها از آب و اتیلن گلیکول به عنوان سیال پایه استفاده کردند و غلظت‌ها و دماهای مختلف را در آزمایشات بررسی کرده‌اند. پس از انجام آزمایشات رابطه زیر را به منظور محاسبه گرمای ویژه نانوسیال ارائه کرده‌اند:

$$(C_p)_{eff} = (C_p)_{bf} \times \frac{A \times \frac{T}{T_o} + B \left( \frac{(C_p)_s}{(C_p)_{bf}} \right)}{C + \phi} \quad (20)$$

$A$ ،  $B$  و  $C$  اعداد ثابت هستند.

در تحقیقی ژو و همکاران به بررسی نانوسیال اکسید مس / اتیلن گلیکول پرداختند. مدل آن‌ها بر اساس تعادل حرارتی بین ذرات و مایع اطراف آن است. ویسکوزیته نانوسیال از آن‌جا که تاثیر مستقیم بر روی افت فشار در جابجایی آزاد دارد یکی از پارامترهای مهم است. اینشتین<sup>۳</sup> [۳۰] رابطه زیر را برای محاسبه ویسکوزیته نانوسیالات بیان کرده است. در این رابطه از برهمکنش بین ذرات صرفه نظر شده است.

$$\mu_{eff} = (1 + 2.5\phi)\mu_{bf} \quad (21)$$

برخی از مطالعات برهمکنش میان ذرات را در نظر گرفته‌اند، به عنوان نمونه می‌توان از مدل ارائه شده توسط بچلر<sup>۴</sup> [۳۱] نام برد، که در رابطه زیر نمایش داده شده است.

$$\mu_{eff} = (1 + 2.5\phi + 6.2\phi^2)\mu_{bf} \quad (22)$$

نوبین<sup>۵</sup> و همکاران [۳۲] با بررسی تجربی نانوسیال آب-آلومینا رابطه زیر را به منظور محاسبه ویسکوزیته نانوسیال ارائه نموده‌اند.

نیز در نظر گرفته‌اند. یو و چوی [۲۲] با اصلاح مدل ماکسول [۲۳] و افزودن اثرات لایه‌بندی مولکول مایع، رابطه زیر را ارائه کردند. در این مدل نانوذره و لایه اطراف آن به عنوان یک ذره در نظر گرفته شده است.

$$k_{nf} = k_f \times \left[ \frac{k_{pe} + 2k_f - 2(1+\beta)^3 \phi(k_f - k_{pe})}{k_{pe} + 2k_f + (1+\beta)^3 \phi(k_f - k_{pe})} \right] \quad (10)$$

که در آن  $k_{pe}$  ضریب هدایت حرارتی نانو ذره معادل است که با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۲۴].

$$k_{pe} = k_p \times \left[ \frac{[2(1-\gamma) - (1+\beta)^3(1+2\gamma)\gamma]}{-(1+\gamma) + (1+\beta)^3(1+2\gamma)} \right] \quad (11)$$

$\gamma$  و  $\beta$  از روابط (۱۲) و (۱۳) بدست آورده می‌شوند.

$$\gamma = \frac{k_l}{k_p} \quad (12)$$

$$\beta = \frac{t}{r_p} \quad (13)$$

در آن  $k_l$  ضریب هدایت حرارتی لایه نانو،  $t$  ضخامت لایه نانو و  $r_p$  شعاع نانوذرات می‌باشند. یو و چوی [۲۵]، به همین صورت مدل همیلتون و کراسر [۲۶] را اصلاح کردند و مدل جدیدی را با در نظر گرفتن لایه نانو ارائه کردند. رابطه (۱۴) بیان‌گر این مدل است.

$$k_{nf} = k_f \times \left[ \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)(1+\beta)^3 \phi(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + (1+\beta)^3 \phi(k_f - k_p)} \right] \quad (14)$$

لی و همکاران [۲۷]، اثرات حرکت براونی، خوشه‌ای شدن و لایه مایع حول نانوذره را در نظر گرفته‌اند و رابطه زیر را برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی نانوذرات ارائه کردند، با جایگزینی این رابطه در معادله که توسط ژوان ارائه شده است، می‌توان ضریب هدایت حرارتی نانوسیال را محاسبه کرد. در این مدل ضریب هدایت حرارتی نانولایه برابر با نانوذره در نظر گرفته شده است.

$$k_p = k_b \times \left[ \frac{3r^* / 4}{3r^* / 4 + 1} \right] \quad (15)$$

که در آن  $k_b$  ضریب هدایت حرارتی توده است و  $r^*$  از رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود.

$$r^* = \frac{r_p}{\lambda} \quad (16)$$

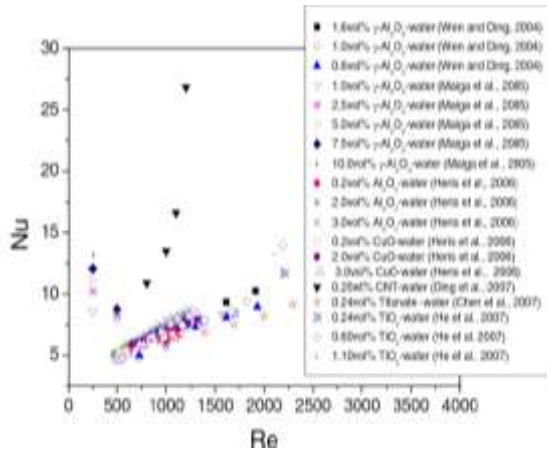
<sup>4</sup> Batchelor

<sup>5</sup> Nguyen

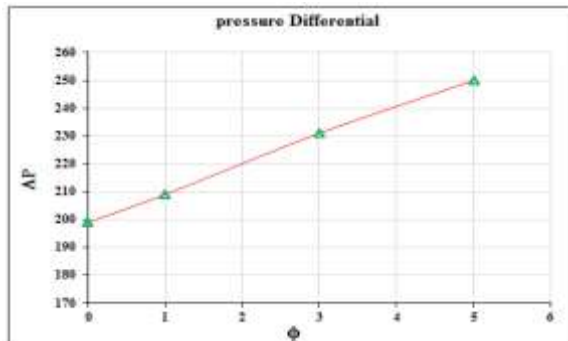
<sup>1</sup> Pak and Cho

<sup>2</sup> Vajjha and Das

<sup>3</sup> Einstein



شکل (۲) تغییرات عدد ناسلت با عدد رینولدز و درصد حجمی نانوذرات مختلف [۳۸].



شکل (۳) اختلاف فشار در دو سر لوله کلکتور در غلظت‌های حجمی متفاوت نانوسیال.

شار حرارتی اعمال شده به سطح خارجی لوله کلکتور که با استفاده از کد مونت کارلو استخراج گردیده است به صورت شکل (۴) است. شکل نشان دهنده شار حرارتی اعمال شده به سطح خارجی لوله جاذب در نرم افزار فلوئنت است. در زاویه صفر درجه کمترین شار حرارتی به آن اعمال می‌گردد و در ناحیه توسعه نیافته تفاوت چندانی در غلظت‌های حجمی گوناگون مشاهده نمی‌گردد اما در ناحیه توسعه یافته با افزایش غلظت حجمی به میزان ۵٪ دما بر روی سطح خارجی کلکتور به میزان ۳ درجه کلون کاهش می‌یابد. در زاویه صفر درجه که شار حرارتی تقریباً معادل با  $0\text{W}/\text{m}^2$  است، میزان افزایش ضریب انتقال حرارت جابه جایی بیش از میزان افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی است. لذا عدد ناسلت با افزایش غلظت حجمی افزایش می‌یابد (مطابق شکل (۵)).

$$\mu_{eff} = (1 + 2.5\phi + 150\phi^2) \mu_{bf} \quad (23)$$

روابط دیگری نیز برای محاسبه ویسکوزیته نانوسیالات مختلف بصورت تجربی ارائه شده‌اند. تنگ و لین<sup>۱</sup> [۳۳] با بررسی نانوسیال آب/دی اکسید تیتانیوم رابطه (۲۴)، مایگا<sup>۲</sup> و همکاران [۳۴] با بررسی نانوسیال آب/اکسید آلومینیوم رابطه (۲۵) را ارائه کردند. همچنین کولکارنی<sup>۳</sup> و همکاران [۳۵]، با بررسی نانوسیال آب/اکسید مس رابطه (۲۶) به منظور محاسبه ویسکوزیته نانوسیال مذکور را ارائه نموده‌اند.

$$\mu_{eff} = (13.47e^{35.98\phi}) \mu_{bf} \quad (24)$$

$$\mu_{eff} = (1 + 7.3\phi + 123\phi^2) \mu_{bf} \quad (25)$$

$$\mu_{eff} = \exp \left[ \frac{-(2.87 + 53.54\phi + 107.12\phi^2)}{(1078.3 + 15857\phi + 20587\phi^2) \times (1/T)} \right] \quad (26)$$

آثار نانوذرات بر پارامترهای ذکر شده در نهایت با تاثیر بر ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط و عدد ناسلت، باعث افزایش انتقال حرارت سیال می‌شود. تاکنون کارهای عددی و تجربی زیادی این افزایش را تایید کرده‌اند [۳۶ و ۳۷]. در شکل (۲) این افزایش برای چند نمونه نانوسیال قابل مشاهده است. همانگونه که در این نمودار قابل مشاهده است با افزایش درصد حجمی نانوسیال، عدد ناسلت افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش عدد رینولدز، افزایش عدد ناسلت قابل مشاهده است. شار حرارتی اعمال شده به لوله جاذب کلکتور خورشیدی سهموی خطی بر اساس نتایج بدست آمده از کد مونت-کارلو است. سرعت ورودی جریان معادل با  $2169$  متر بر ثانیه که معادل با عدد رینولدز  $17300$  است. دمای جریان ورودی معادل با  $500$  درجه کلون است. با افزودن ذرات نانو به سیال پایه، ویسکوزیته و چگالی سیال پایه افزایش می‌یابد. این امر سبب افزایش اختلاف فشار در دو سر لوله کلکتور می‌گردد. با افزایش ۵٪ غلظت حجمی اختلاف فشار به اندازه  $50\text{Pa}$  که معادل با ۲۵٪ است، افزایش می‌یابد.

<sup>3</sup> Kulkarni

<sup>1</sup> Tseng and Lin

<sup>2</sup> Maiga

کاهش عدد ناسلت با افزایش غلظت حجمی ممکن است اهمیت کاربرد نانوسیال در کلکتورهای خورشیدی را کم رنگ نماید. لذا محققین زیادی توصیه کردند که در محاسبه عدد ناسلت از ضریب هدایت حرارتی سیال پایه استفاده گردد. شرایط مرزی در ادامه تشریح می‌گردد.

#### الف) شرط مرزی ورودی (Velocity Inlet)

سیال با سرعت یکنواخت مشخص  $(V=0.2 \text{ m/s})$  و دمای ورودی مشخص  $(500 \text{ کلوین})$  وارد لوله می‌شود.

$$\begin{aligned} u(x, y, 0) &= 0 \\ v(x, y, 0) &= 0 \\ w(x, y, 0) &= w_{inlet} \\ T_f(x, y, 0) &= T_{inlet} \end{aligned} \quad (27)$$

#### ب) شرط مرزی دیواره (No Slip & Couple)

برای مشخص کردن مرز یک ناحیه ی سیال یا جامد از این شرط مرزی استفاده می‌شود. برای جریان‌های لزج، شرط عدم لغزش به صورت پیش فرض در نظر گرفته می‌شود. شرط مرزی شار حرارتی غیر یکنواخت در راستای محیطی و یکنواخت در راستای محوری بر دیواره برقرار است.  $S$  به معنای دیواره لوله که در تماس و مرز مشترک با نانوسیال قرار دارد.

$$K_{nf} \frac{\partial T_{nf}}{\partial n} = K_s \frac{\partial T_s}{\partial n} \quad (28)$$

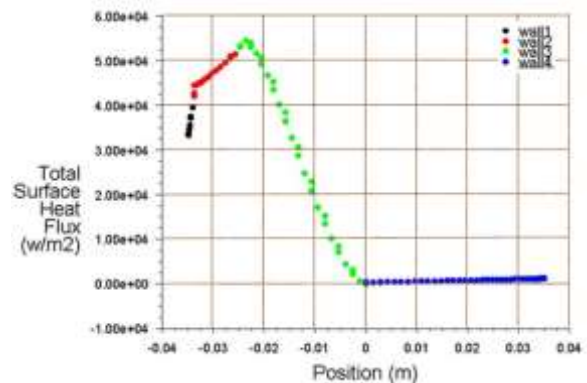
#### ج) شرط مرزی خروجی (Pressure outlet)

شرط مرزی در خروجی، جریان خروجی در نظر گرفته شده است. به این معنا که گرادیان سرعت و فشار در خروجی صفر است. طول لوله برابر  $L$  است.

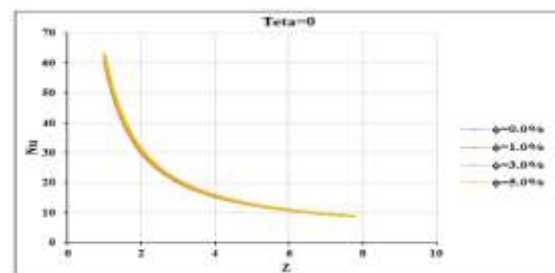
$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial z}(x, y, L) &= 0, \\ \frac{\partial v}{\partial z}(x, y, L) &= 0, \\ \frac{\partial w}{\partial z}(x, y, L) &= 0, \\ \frac{\partial T_f}{\partial z}(x, y, L) &= 0 \end{aligned} \quad (29)$$

#### ۵- مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

اسماعیل زاده و همکاران (۲۰۱۳) [۱۹] ویژگی‌های انتقال حرارت و هیدرودینامیکی جریان آرام نانوسیال آلومینا درون

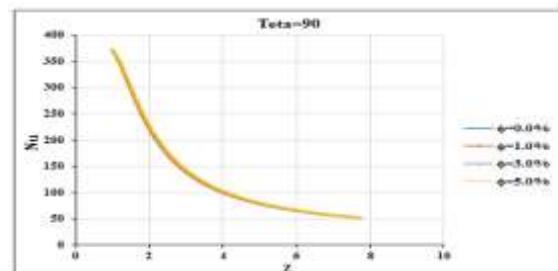


شکل (۴) شار حرارتی اعمال شده به سطح خارجی لوله جاذب.

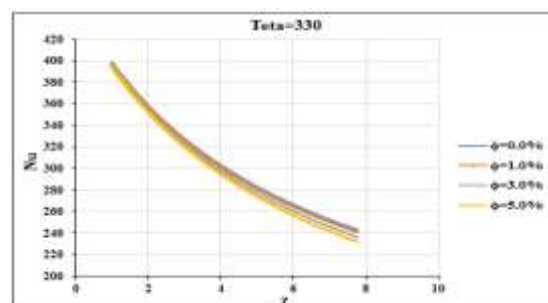


شکل (۵) عدد ناسلت سیال در زاویه ۰ درجه.

با افزایش شار حرارتی در زاویه ۹۰ و ۳۳۰ درجه (شکل‌های (۶) و (۷)) مشاهده می‌گردد که با افزایش غلظت حجمی عدد ناسلت کاهش می‌یابد این امر در افزایش ضریب هدایت حرارتی بیش از افزایش ضریب جابه‌جایی حرارتی است.

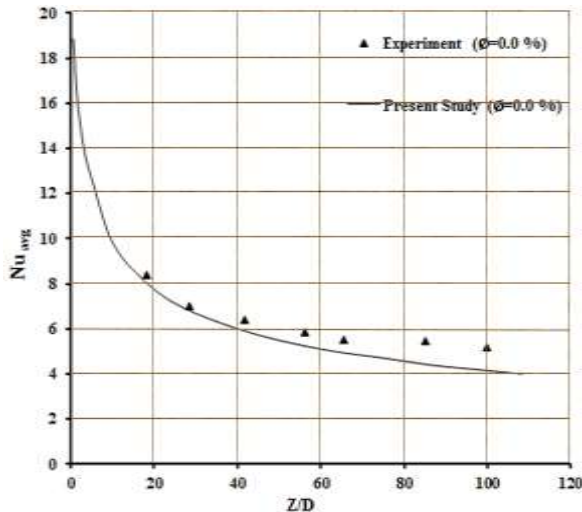


شکل (۶) عدد ناسلت سیال در زاویه ۹۰ درجه.



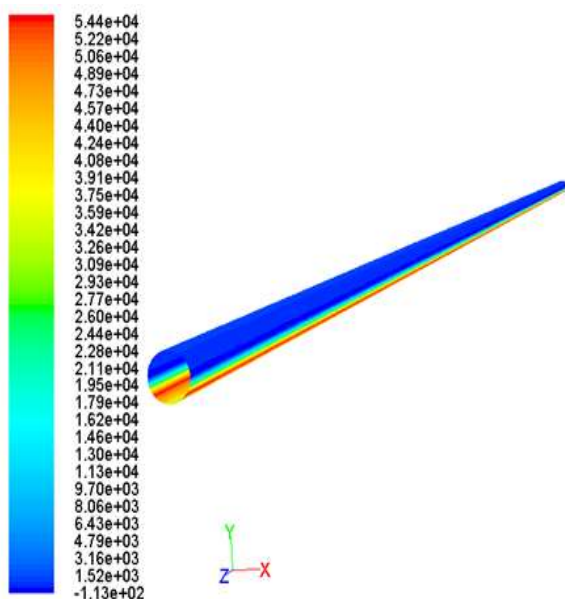
شکل (۷) عدد ناسلت سیال در زاویه ۳۳۰ درجه.





شکل (۹) مقایسه عدد ناسلت در طول راستای محوری، مطالعه عددی حاضر با مقادیر آزمایشگاهی موجود.

به عبارتی معادل ۲۰٪ خطا وجود دارد و یا بیشینه اختلاف در شکل (۷) در  $\phi=0.0\%$  باز هم در  $Z/D=100$  رخ داد و با میزان ۱۴٪ خطا. اما اینکه چرا این خطاها وجود دارد، می‌توان گفت که به هر حال در ماهیت شبیه‌سازی مقداری خطا رخ میدهد که به دلیل تعداد المان، شکل المان و ماهیت نرم افزار می‌تواند این خطا وجود داشته باشد؛ اما نکته حائز اهمیت اینست که رفتار نمودار در هر دو شکل (۶) و (۷)، همخوانی مناسبی را با مقادیر تجربی دارد. توزیع شار حرارتی روی سطح خارجی لوله جاذب در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

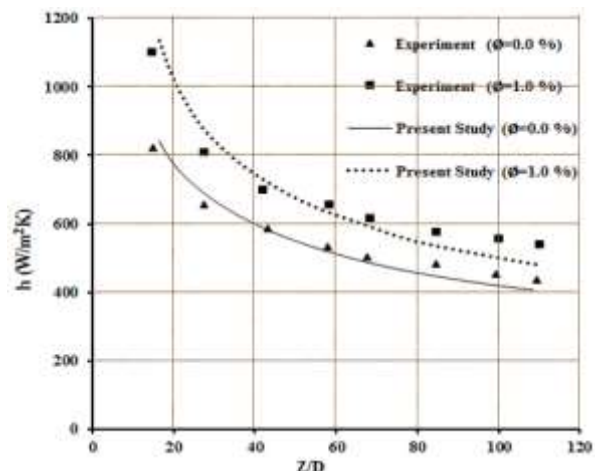


شکل (۱۰) توزیع شار حرارتی روی سطح خارجی لوله جاذب.

لوله افقی دایروی با شار حرارتی ثابت را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. قطر داخلی لوله مورد آزمایش ۷ میلی‌متر، قطر خارجی لوله ۹/۴۶ میلی‌متر و طول لوله ۱۰۰۰ میلی‌متر است. نتایج آنها بهبود ضریب انتقال حرارت نانوسیال را در مقایسه با سیال پایه و بهبود عملکرد انتقال حرارت با افزایش غلظت حجمی را نشان می‌دهد. تغییرات ضریب انتقال حرارت در طول لوله برای نانوسیال با غلظت حجمی ۱٪ و سیال پایه در عدد رینولدز  $Re=1300$  و شار حرارتی  $q'' = 9000 \text{ W/m}^2$  حاصل از نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه شده است که در شکل (۷) قابل مشاهده است.

همچنین از شکل (۸) قابل مشاهده است در هر دو حالت عددی و آزمایشگاهی، ماکسیمم نرخ انتقال حرارت در ورودی لوله و یا در نسبت کمتر  $Z/D$  بدست می‌آید. بنابراین به منظور بهره مندی از جایجایی ذرات، نانوسیال باید در نسبت کمتر  $Z/D$  به منظور افزایش انتقال حرارت جایجایی استفاده شود.

در شکل (۹) عدد ناسلت حاصل از نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی برای سیال پایه در عدد رینولدز  $Re=799.53$  و شارحرارتی ثابت  $q'' = 9000 \text{ W/m}^2$  مقایسه شده است. شکل (۸) تطابق خوبی بین نتایج بدست آمده از روش عددی مورد استفاده و نتایج آزمایشگاهی موجود نشان می‌دهد. لازم به ذکر است در شکل (۹) بیشترین اختلاف در  $Z/D=100$  اتفاق می‌افتد، که در این  $Z/D$  داده آزمایشگاهی برابر با  $NU=4$  و مقدار تجربی برابر با  $NU=5$  است.

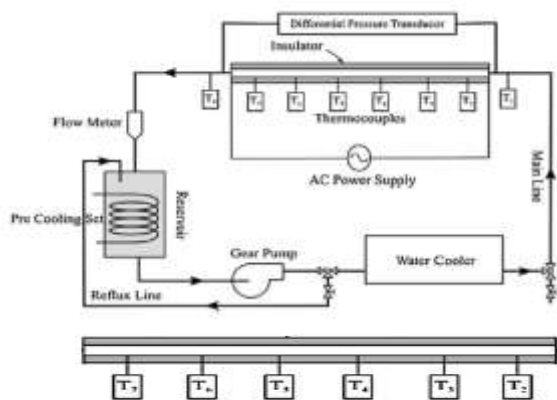


شکل (۸) مقایسه ضریب انتقال حرارت جایجایی در طول راستای محوری، مطالعه عددی حاضر با مقادیر آزمایشگاهی موجود.

سعیدی نیا و همکاران (۲۰۱۲) [۳۹] ویژگی‌های انتقال حرارت جریان آرام نانوسیال روغن/اکسید مس درون لوله افقی دایروی با شار حرارتی ثابت را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج آنها بهبود ضریب انتقال حرارت نانوسیال را در مقایسه با سیال پایه روغن و بهبود عملکرد انتقال حرارت با افزایش غلظت حجمی و افزایش عدد رینولدز را نشان می‌دهد. شکل شماتیک سیکل آزمایشگاهی و تست سکشن<sup>۱</sup> شامل لوله دایروی با قطر داخلی ۱۴ میلی‌متر، قطر خارجی ۱۵/۸ میلی‌متر و طول ۱۲۰۰ میلی‌متر در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

به منظور صحت‌گذاری، تغییرات ضریب انتقال حرارت نسبت به عدد رینولدز برای نانوسیال با غلظت حجمی ۱٪ و ۲٪ در شار حرارتی  $q'' = 9900 \text{ W/m}^2$  حاصل از نتایج عددی، با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه شده است که در شکل (۱۳) قابل مشاهده است. از شکل (۱۳) قابل مشاهده است در هر دو حالت عددی و آزمایشگاهی، با افزایش عدد رینولدز و غلظت حجمی نانوسیال، ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌یابد. شکل (۱۳) تطابق خوبی بین نتایج بدست آمده از روش عددی مورد استفاده و داده‌های آزمایشگاهی موجود نشان می‌دهد.

تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی حاصل از نتایج مدل عددی نسبت به دیتاهای موجود آزمایشگاهی در شکل (۱۴) قابل مشاهده است. خط مورب (بدون نقطه چین) دارای زاویه ۴۵ درجه است به این معنی که در حالت ایدآل و در صورت صورت عدم وجود خطا بین نتایج عددی و آزمایشگاهی نقاط موجود در نمودار بر این خط واقع خواهند شد.



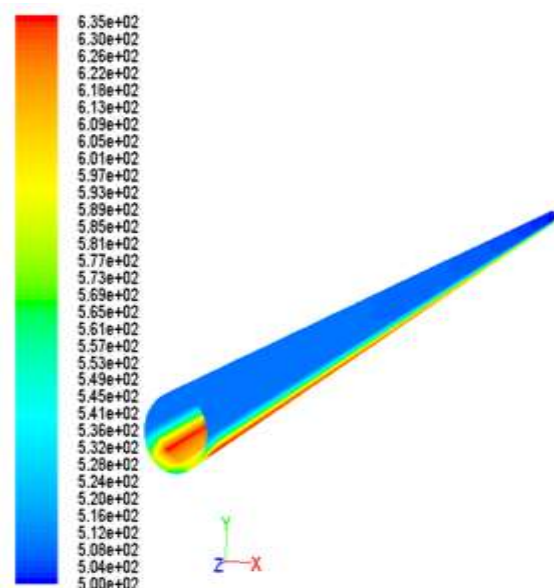
شکل (۱۲) طرح شماتیک تست سکشن [۳۹].

توزیع دما روی سطح خارجی لوله جاذب در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در زاویه صفر درجه که کمترین شار حرارتی به آن اعمال می‌گردد در ناحیه توسعه نیافته تفاوت چندانی در غلظت‌های حجمی گوناگون مشاهده نمی‌گردد اما در ناحیه توسعه یافته با افزایش غلظت حجمی به میزان ۵٪ دما بر روی سطح خارجی کلکتور به میزان ۳ درجه کلوین کاهش می‌یابد.

در زاویه ۲۷۰ درجه که شار حرارتی معادل با ۳۵۰۰۰۰  $q/w.m^2$  بر آن اعمال می‌گردد، با افزایش غلظت حجمی به میزان ۵٪، کاهش دمای سطح خارجی کلکتور در ناحیه توسعه نیافته به میزان ۱۲ درجه کلوین و در ناحیه توسعه یافته به میزان ۱۴ درجه کلوین مشاهده می‌گردد.

در زاویه ۳۱۵ درجه که بیشترین شار حرارتی وجود دارد با افزایش غلظت حجمی به میزان ۵٪، دمای لوله کلکتور به میزان ۲۰ درجه کلوین کاهش می‌یابد. این میزان کاهش دما با افزایش غلظت حجمی بسیار قابل توجه است و در ساخت لوله‌های کلکتور که در رنج دمایی خاصی قابل کاربرد هستند، بسیار قابل اهمیت است.

در زاویه ۳۳۰ درجه که شار حرارتی معادل با ۴۳۰۰۰۰  $q/w.m^2$  بر آن اعمال می‌گردد، با افزایش غلظت حجمی به میزان ۵٪، کاهش دمای سطح خارجی کلکتور در ناحیه توسعه نیافته به میزان ۱۲ درجه کلوین و در ناحیه توسعه یافته به میزان ۲۰ درجه کلوین مشاهده می‌گردد.



شکل (۱۱) توزیع دما روی سطح خارجی لوله جاذب.

<sup>۱</sup> Test Section

پراکنده (ذرات معلق) وجود ندارد و تعادل حرارتی بین سیال و ذرات جامد برقرار است. در حالی که به دلیل تاثیر عواملی نظیر جاذبه، نیروی براونی و اصطکاک بین سیال و ذرات جامد بسیار ریز، پدیده نفوذ براونی، ته نشینی و پراکندگی ممکن است در جریان نانوسیال وجود داشته باشد و در نتیجه با وجود بسیار ریز بودن ذرات جامد، اختلاف سرعت بین سیال و ذرات جامد نانو ممکن است صفر نباشد.

حرکات بی قاعده و تصادفی ذرات، شدت تبادل انرژی را در سیالات افزایش میدهد و همچنین گرادیان دما بین سیال و دیواره را زیاد می کند و انتقال حرارت بین سیال و دیواره افزایش می یابد. برای در نظر گرفتن این پراکندگی مدل هموژن اصلاح شده یا مدل پراکندگی را برای نانوسیال می توان استفاده کرد. بنابراین با صرفه نظر کردن از فرض مدل هموژن و با حل همزمان معادله انتقال جرم و معادلات ناویر-استوکس برای نانوسیالها می توان جواب دقیقتری برای انتقال حرارت جابجایی اجباری و توزیع دقیق تر نانوذرات در سیال پایه را بدست آورد [۴۰].

#### ۵-۲- عدم توانایی مدل های ریاضی برای شبیه سازی

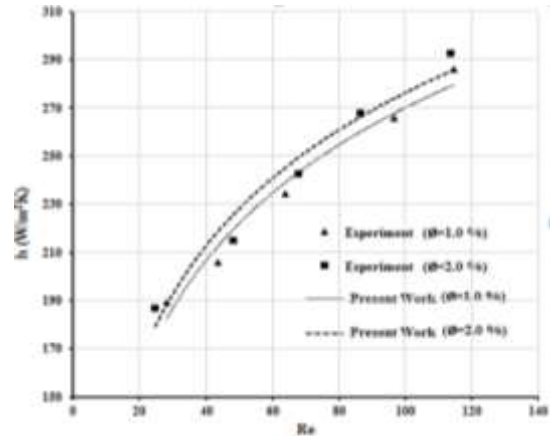
##### خواص ترموفیزیکی نانوسیال در دمای کاری

با استفاده از مدل های جدید که اثر پارامترهای بیشتری همچون اثر دما و نانولایه ها و قطر نانوذرات و اثر حرکت براونی و دیگر مکانیزم های موثر را در نظر میگیرند، استفاده نمود.

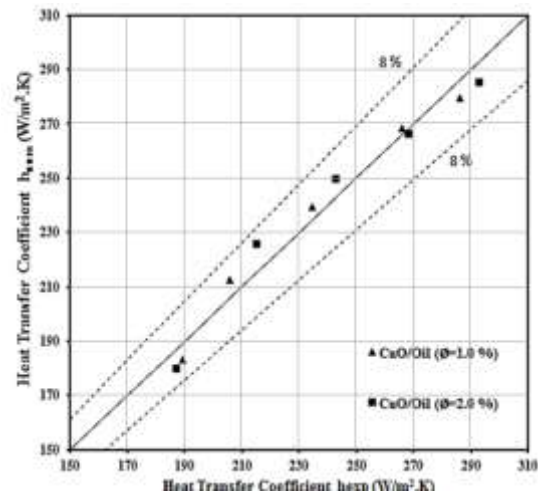
#### ۵-۳- فرض تک فاز بودن نانوسیال (بیان دیگر از فرض

##### مدل هموژن)

یعنی فرض عدم بر هم کنش نانوذرات و سیال پایه برقرار باشد. بنابراین با فرض اینکه حرکت لغزشی بین ذره و فاز پیوسته قابل صرفه نظر کردن باشد و تعادل حرارتی برقرار باشد، نانوسیال را می توان به صورت یک سیال تک فازی در نظر گرفت. در حالی که با در نظر گرفتن سرعت لغزش بین ذرات نانو و سیال پایه در نانوسیال و عوامل مؤثر در ایجاد سرعت لغزش مانند نفوذ براونی و ترموفورسیس، سپس با استفاده از مدل مخلوط دو فاز معادلات حاکم بر جریان و انتقال حرارت نانوسیال را بدست آورد و با حل همزم آن معادله انرژی و معادله بقای ذرات نانو، تغییر خواص



شکل (۱۳) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابجایی در راستای محوری، مطالعه عددی حاضر با مقادیر آزمایشگاهی موجود [۳۹].



شکل (۱۴) صحت سنجی<sup>۱</sup> ضریب انتقال حرارت جابجایی.

اما به دلیل وجود خطا این نقاط در محدوده اطراف این خط مورب ۴۵ درجه پراکنده شده اند. شکل (۱۴) تطابق خوبی بین نتایج بدست آمده از روش عددی مورد استفاده و داده های آزمایشگاهی موجود نشان می دهد به طوری که خطای داده های آزمایشگاهی موجود و نتایج عددی برای نانوسیال کمتر از ۸٪ است. علل بروز خطا نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود عبارتند از:

#### ۵-۱- فرض توزیع یکنواخت و همگن نانو ذرات در

##### سیال پایه (مدل هموژن)

مبنای مدل هموژن عدم تاثیر پذیری شکل معادلات انتقال حرارت و جریان سیال مبنا در اثر وجود ذرات نانو است. تحت این فرض هیچ گونه لغزشی بین فاز پیوسته (سیال) و فاز

<sup>۱</sup> Validation

با بررسی تاثیر افزودن نانوذرات به سیال پایه بر پروفیل دمایی در ناحیه توسعه نیافته دیده شد که افزایش غلظت حجمی سبب تخت تر شدن پروفیل دمایی می‌گردد.

کانتور دمایی بر روی سطح خارجی کلکتور در زاویه صفر درجه در ناحیه توسعه نیافته در غلظت‌های حجمی گوناگون، تفاوت چندانی نمی‌کند اما در ناحیه توسعه یافته با افزایش غلظت حجمی به میزان ۵٪ دما بر روی سطح خارجی کلکتور به میزان ۳ درجه کلون کاهش می‌یابد. ضریب انتقال حرارت جابه جایی به صورت نمایی با افزایش طول لوله و توسعه یافتگی حرارتی و هیدرودینامیکی سیال، کاهش می‌یابد.

عدد ناسلت با افزایش غلظت حجمی در زاویه صفر درجه افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع این است که میزان افزایش ضریب انتقال حرارت جابه جایی بیش از میزان افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی است.

ترموفیزیکی نانوسیال را نسبت به غلظت حجمی نانوذرات و دما در نقاط مختلف جریان در نظر گرفت. همچنین به جای مخلوط دو فاز می‌توان از روش‌های دیگر مانند روش همگن، اویلری- لاگرانژی برای مدل سازی انتقال حرارت نانوسیال در کانال دایروی استفاده کرد.

اما مطالعات گذشتگان نشان می‌دهند که رفتار نانوسیال تقریباً مستقل از روش به کار رفته است. همچنین می‌توان با در نظر گرفتن لایه سطح تماس نانوذره- مایع به صورت بیضوی هم کانون و بکار بردن مدل سه فاز برای نانوسیال نتایج دقیق تری بدست آورد. در مدل سه فاز لایه سطح تماس بین ذره و مایع و به صورت فاز مجزا که ضریب هدایت حرارتی آن با ضریب هدایت حرارتی ذره و مایع فرق می‌کند، مدل می‌شود [۴۰].

#### ۵-۴- فرض رفتار نانوسیال به عنوان سیال نیوتنی

سیال نیوتنی سیالی است که رابطه تنش و نرخ کرنش برشی آن خطی است و از مبدا مختصات می‌گذرد، بنابراین تعریف گرانیوی یک سیال نیوتنی مستقل از نیروی وارده بر آن است اگر چه می‌تواند تابعی از دما و فشار باشد در حالی که سیال غیر نیوتنی به عنوان سیالی که از رابطه لزجت تبعیت نکند و مقدارش ثابت نباشد تعریف می‌شود [۴۱].

#### ۶- نتیجه گیری

با فرض اینکه حرکت لغزشی بین ذره و فاز پیوسته قابل صرفه نظر کردن باشد و تعادل حرارتی برقرار باشد، نانوسیال را می‌توان به صورت یک سیال تک فازی در نظر گرفت.

با بررسی تغییر خواص ترموفیزیکی در مقطع لوله با دما دیده می‌شود که با افزایش دما چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب هدایت حرارتی به صورت خطی و ویسکوزیته به صورت نمایی کاهش می‌یابند.

افزایش اختلاف فشار در دو سر لوله کلکتور، ناشی از افزایش ویسکوزیته و چگالی سیال پایه به دلیل افزودن نانوذرات به سیال پایه است.

با بررسی تاثیر افزودن نانوذرات به سیال پایه بر توسعه یافتگی هیدرولیکی فهمیده می‌شود که در فاصله  $Z/D=30$  جریان به طور کامل به توسعه یافتگی هیدرولیکی خواهد رسید و پس از آن تغییری در پروفیل سرعت مشاهده نمی‌گردد.

#### ۷- مراجع

- [1] Yousefi, T., Veysi, F., Shojaeizadeh, E., and Zinadini, S., "An Experimental Investigation on the Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O Nanofluid on the Efficiency of Flat-Plate Solar Collectors", *Renewable Energy*, Vol.39, No.1, pp.293-298, 2012.
- [2] Yousefi, T., Veysi, F., Shojaeizadeh, E., and Zinadini, S., "An Experimental Investigation on the Effect of MWCNT- H<sub>2</sub>O Nanofluid on the Efficiency of Flat-Plate Solar Collectors", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.39, pp.207-212, 2012
- [3] Taylor, R.A., Phelan, P.E., Otanicar, T.P., Walker, C. A., Nguyen M., Trimble S., and Prasher, R. "Applicability of Nanofluids in High Flux Solar Collectors", *Renewable and Sustainable Energy*, Vol.3, No.2, 2011.
- [4] Khullar, V., Tyagi, H., Phelan, P.E., Otanicar, T.P., Singh, H., and Taylor, R.A., "Solar Energy Harvesting Using Nanofluids-Based Concentrating Solar Collector". *Nanotechnology in Engineering and Medicine*, 2013.
- [5] Kasaeian, A.B., Sokhansefat, T., "Numerical Study of Heat Transfer Enhancement by using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> /Synthetic Oil Nanofluid in a Parabolic TroughCollector Tube", in *World Academy of Science, Engineering and Technology*. Rome. pp.1154-1159, 2012.
- [6] Emir, M., R. Mehdaoui, R., and Mojtabi, A., "Numerical Simulation of Cooling a Solar Cell by Forced Convection in the Presence of a Nanofluid", *Energy Procedia*, Vol.18, pp.594-603, 2012.
- [7] Lu, L., Liu, Z., and Xiao, H., "Thermal Performance of An Open Thermosyphon Using Nanofluids for High Temperature Evacuated Tubular Solar Collectors", *Solar Energy Engineering*, Vol.85, pp.379-387, 2012.

- [20] Yu, W., and Choi, S., "The Role of Interfacial Layers in the Enhanced Thermal Conductivity of Nano Fluids: A Renovated Maxwell Model", *Journal of Nanoparticle Research*, Vol.5, No.2, pp.167-171, 2003.
- [21] Pak, B.C., and Cho, Y.I., "Hydro Dynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles, *Experimental Heat Transfer an International Journal*, Vol.11, No.2, pp.151-170, 1998.
- [22] Maxwell, J.C., "A Treatise on Electricity and Magnetism", Vol.1, UK, Oxford.
- [23] Yu, W., and Choi, S. U. S., "The Role of Interfacial Layers in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids: A Renovated Maxwell Model". *Journal of Nanopart*, Vol.5, No.1, pp.161-171, 2003.
- [24] Schwartz, L.M., Garboczi, E. J., and Bentz, D. P., "Interfacial Transport in Porous Media: Application to DC Electrical Conductivity of Mortars. *J. Appl. Phys*, Vol.78, No.10, p.5898-5908, 1995.
- [25] Yu, W. and Choi, S.U.S., "The Role of Interfacial Layers in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids: A renovated Hamilton-Crosser Model", *Journal of Nanoparticle Research*, Vol.6, No.4, pp.355-361, 2004.
- [26] Hamilton, R.L., and Crosser, O.K., "Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems". *Ind. Eng. Chem. Fund*, Vol.1, No.2, pp.187-191, 1962.
- [27] Li, Y., Qu, W., and Feng, J., "Temperature Dependence of Thermal Conductivity of Nanofluids", *Chinese Phys. Lett*, Vol.25, No.9, pp.3319-3322, 2008.
- [28] Pak, B.C., and Cho, Y. I., "Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles", *Exp. Heat Transfer*, Vol.11, No.2, pp.151-170, 1998.
- [29] Xuan, Y., and Roetzel, W., "Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids". *International Journal. Heat Mass Tran*, Vol.43, No.19, pp.3701-3707, 2000.
- [30] Einstein, A., "A New Determination of the Molecular Dimensions". *Ann. Phys*, Vol.32, No.2, pp.289-306, 1906.
- [31] Batchelor, G.K., "The Effect of Brownian Motion on the Bulk Stress in a Suspension of Spherical Particles". *J. Fluid Mech*, Vol.83, No.1, pp.97-117, 1977.
- [32] Nguyen, C., Desgranges, F., Roy, G., Galanis, N., Maré, T., Boucher, S., and AngueMintsa, H., "Temperature and Particle-Size Dependent Viscosity Data for Water-Based Nanofluids - Hysteresis Phenomenon". *Int. J. Heat Fluid Fl*, Vol.28, No.6, pp.1492-1506, 2007.
- [33] Tseng, W.J., and Lin, K., "Rheology and Colloidal Structure of Aqueous TiO<sub>2</sub> Nanoparticle Suspensions", *Mater. Sci. Eng. A*, Vol.355, No.2, pp.102-181, 2003.
- [8] Otanicar, T.P., and Golden, J.S., "Comparative Environmental and Economic Analysis of Conventional and Nanofluid Solar Hot Water Technologies", *Environmental Science and Technology*, Vol.43, pp.6082-7, 2009.
- [9] Dudley, V.E., "Segs Ls2 Solar Collector-Test Results", *Sandianatinal Laboratories: SANDIA*, 1994.
- [10] Shalchi-Tabrizi, A., and Seyf, H. R. "Analysis of Entropy Generation and Convective Heat Transfer of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanofluid Flow in a Tangential Micro Heat Sink". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.55, No.15, pp.4366-4375, 2012.
- [11] Ghebleh, N., and Askari Asli A.E., "Studying the Parameters on the Type of Solar Absorbers, the Second International Conference on New Ideas in Agriculture", *Environment and Tourism*, Ardabil, Institute of Environmental Sighted Supporters", *Ideal Environment*, 2016.
- [12] Falah, A. and Khalilian. M, "Reviews the Performance of the Heat Pipe in order to Improve its Efficiency Concentrator Solar Collectors", *The first International Congress of Earth, Space and Clean Energy*, Ardebil University researcher, 2015.
- [13] Soltanpurkhameneh, M., Pestehei M. and Soltanpurkhameneh, M., "To Studied Heat Transfer in a Linear Parabolic Solar Collectors", *Sixth International Conference on Heating, Cooling and Ventilation Systems*, Tehran, Research Institute for Housing and Urban Development, 2015.
- [14] He, Y.L., Ze, Xiao, Cheng Z.D., and Tao, Y.B., "A MCRT and FVM Coupled Simulation Method for Energy Conversion Process in Parabolic Trough Solar Collector", *Renewable Energy*, Vol.36, No.3, pp.976-985. 2011.
- [15] Vajjha, R.S., Das, D.K., and Kulkarni, D.P., "Development of New Correlations for Convective Heat Transfer and Friction Factor in Turbulent Regime for Nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.53, No.21, pp.4607-4618, 2010.
- [16] Saeedinia, M., Akhavan-Behabadi, M. A., and Razi, P., "Thermal and Rheological Characteristics of CuO-Base Oil Nanofluid Flow Inside a Circular Tube". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol.39, No.1, pp.152-159, 2012.
- [17] Khanafer, K., Vafai, K., and Lightstone, M., "Buoyancy-Driven Heat Transfer Enhancement in a Two-Dimensional Enclosure Utilizing Nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.46, No.19, pp.3639-3653, 2003.
- [18] White, F.M., and Corfield I., "Viscous Fluid Flow", Vol.2. New York: McGraw-Hill, 1991.
- [19] Esmaeilzadeh, E., Almohammadi, H., Vatan, S.N., and Omrani, A.N., "Experimental Investigation of Hydrodynamics and Heat Transfer Characteristics of  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Water under Laminar Flow Inside a Horizontal Tube". *International Journal of Thermal Sciences*, Vol.63, pp.31-37, 2013.

- [34] Maïga, S.E.B., Nguyen, C.T., Galanis, N., and Roy, G., "Heat Transfer Behaviours of Nanofluids in a Uniformly Heated Tube. Superlattices and Microstructures", Vol.35, No.3, pp.543-557, 2004.
- [35] Kulkarni, D.P., Das, D.K., and Chukwu, G.A., "Temperature Dependent Rheological Property of Copper Oxide Nanoparticles Suspension (Nano fluid)", J. Nanosci. Nanotechno, Vol.6, pp.1150-1154, 2006.
- [36] Ayatollahi, M., Nasiri, S., and Kasaeian A., "Convective Heat Transfer Modeling of AG Nanofluid Using Different Theories", Journal of IIUM Engineering, Vol.13, No.1, pp.1-10, 2012.
- [37] Ben Mansour, R., Galanis, N., and Nguyen, C.T., "Experimental Study of Mixed Convection with Water-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanofluid in Inclined Tube with Uniform Wall Heat Flux", International Journal of Thermal Sciences, Vol.50, No.3, pp.403-410, 2011.
- [38] Chen, H., and Ding, Y., "Heat Transfer and Rheological Behaviour of Nanofluids- A Review. Springer", Verlag Berlin Heidelberg, pp.135-177, 2009.
- [39] Saeedinia, M., Akhavan-Behabadi, M. A., and Razi, P., "Thermal and Rheological Characteristics of CuO-Base Oil Nanofluid Inside a Circular Tube", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol.39, No.1, pp.152-159, 2012.
- [40] Khanafer, K., Vafai, K., Lightstone, M., "Buoyancy-Driven Heat Transfer Enhancement in a Two-Dimensional Enclosure Utilizing Nanofluids" International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.46, No.19, pp.3639-3653, 2003.
- [41] White, F.M., and Corfield, I., "Viscous Fluid Flow, New York: McGraw-Hill, Vol.2, 1991.