

بررسی عددی تاثیر تغییر فرکانس جریان ورودی سینوسی بر میزان انتقال گرمای گردآور خورشیدی سهموی SEGS LS2

سهند فردوس نیا

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، ferdosnia.sahand668@gmail.com

ایرج میرزایی

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، i.mirzaee@urmia.ac.ir

مجید عباسعلیزاده*

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، m.abbasalizadeh@urmia.ac.ir

مرتضی خلیلیان

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، m.khalilian@urmia.ac.ir

چکیده

در مطالعه حاضر گردآور خورشیدی سهموی مدل SEGS LS2 مورد بررسی عددی قرار گرفته است. گردآور مورد مطالعه از دسته گردآورنده های متمرکز کننده (Concentrator) به شمار می رود به طوری که می تواند بیش از ۹۰ درصد انرژی حاصل از نور خورشید را بر نقطه کانونی خود منعکس کرده و تحت هدایت سهموی های طراحی شده، انرژی جذب شده را به سیال ناقل گرما منتقل کند. در گردآور SEGS LS سیال مورد استفاده نوعی روغن با نام تجاری Syltherm 800 می باشد که به دلیل خواص ترمودینامیکی خاص (تابع دما) در سالیان اخیر بیشتر مورد توجه تولید کنندگان گردآورهای سهموی قرار گرفته است. در این مطالعه، تاثیر تغییر فرکانس تابع جریان ورودی (سینوسی)، ایده اصلی تحقیق بوده و در بازه ۰/۲ الی ۶ هرتز تحت توابع عددی (Function) مختلف تعریف و مورد تحلیل های عددی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده در قالب کانتورهای دما، بردارهای سرعت، تغییرات عدد ناسلت و ضریب انتقال گرما نشان داد که تغییر فرکانس می تواند سبب افزایش و یا حتی کاهش میزان انتقال گرمای گردآور شود به طوری که در بازه فرکانس ۰/۲ الی ۲ هرتز به دلیل تناوب طولانی مدت و افت و خیزهای کند فرکانسی ضریب انتقال گرما کاهش یافته است. از طرفی در بازه تغییر فرکانس ۳ الی ۵ هرتز عدد ناسلت محلی و ضریب انتقال گرمای گردآور افزایش یافته و برای بازه ۵ الی ۶ هرتز نیز تغییرات قابل توجهی مشاهده نشد. بیشترین میزان رشد انتقال گرما مربوط به فرکانس ۵ هرتز و به مقدار ۱۱ درصد گزارش شده است.

واژه های کلیدی: گردآور خورشیدی، تغییر فرکانس، عدد ناسلت، ضریب انتقال گرما، ورودی سینوسی، عدد استروهال.

Numerical investigation of the effect of changing the frequency of sinusoidal input flow on the amount of heat transfer of the parabolic solar collector SEGS LS2

S. Ferdosnia

Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

I. Mirzaei

Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

M. Abbasalizadeh

Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

M. Khalilian

Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

Abstract

The present study has numerically investigated the parabolic solar collector model SEGS LS2. The collector under study is considered a concentrator collector, so that it can reflect more than 90 percent of the energy from sunlight on its focal point and, under the guidance of the designed parabolas, transfer the absorbed energy to the heat transfer fluid. In the SEGS LS collector, the fluid used is a type of oil with the trade name Syltherm 800, which has received more attention from parabolic collector manufacturers in recent years due to its special thermodynamic properties (temperature function). In this study, the effect of changing the frequency of the input flow function (sinusoidal) is the main idea of the research and has been defined and analyzed numerically in the range of 0.2 to 6 Hz under different numerical functions. The results obtained in the form of temperature contours, velocity vectors, changes in Nusselt number and heat transfer coefficient showed that changing the frequency can increase or even decrease the heat transfer rate of the collector, so that in the frequency range of 0.2 to 2 Hz, the heat transfer coefficient decreased due to long-term periodicity and slow frequency fluctuations. On the other hand, in the frequency range of 3 to 5 Hz, the local Nusselt number and the heat transfer coefficient of the collector increased, and no significant changes were observed for the range of 3 to 5 Hz. The highest heat transfer growth rate was reported for the frequency of 5 Hz and was 11 percent.

Keywords: Solar Collector, Frequency Change, Nusselt Number, Heat Transfer Coefficient, Sinusoidal Input, Strouhal Number.

خاص خود را دارند. به همین دلیل می توان انرژی های تجدیدپذیر را به عنوان جایگزین مناسبی که فاقد آلودگی های محیطی است، معرفی کرد [۱]. در بسیاری از کشورهای صنعتی برای تولید و مصرف انرژی های تجدیدپذیر، سعی می گردد انرژی در محل مصرف تولید گردد. در این صورت علاوه بر افزایش سرعت انتقال انرژی، هزینه انتقال به خانه ها نیز کاهش چشمگیری خواهد داشت به طوری که می توان گفت هر

۱- مقدمه

استفاده از انرژی های تجدیدپذیر امری است که امروزه تمامی کشورهای صنعتی دنیا به آن اهتمام می ورزند چرا که منابع انرژی با توجه به مصرف روز افزون بشر در بخش های صنعتی و خانگی در حال اتمام بوده و منابعی همچون انرژی هسته ای نیز مشکلات و خطرات

خانه یک نیروگاه کوچک خواهد شد. بشر علاوه بر مصرف برق در بکارگیری دستگاه‌های الکتریکی و روشنایی، نیازمند صورت های دیگری از انرژی است تا به کمک آن بتواند دمای محیط زندگی را متعادل نماید. آب گرم مصرفی و گرمایش محیط، نمونه هایی هستند که به راحتی و به کمک انرژی های تجدید پذیر قابل ایجاد و بهره برداری هستند. از طرفی دیگر بهره گیری از انرژی های تجدیدپذیر در فرآیندهای سیستم های سرمایشی و گرمایشی پیچیده، علاوه بر برطرف سازی نیازهای صنعتی بشر، آلودگی زیست محیطی را نیز تشدید نخواهد کرد.

انرژی خورشیدی یکی از پاک ترین و ارزان ترین انرژی های تجدید پذیر دنیا می باشد که می تواند در حوزه های مختلف تولید انرژی از جمله برق، گرمایش و سرمایش به کار گرفته شود. گردآورهای خورشیدی تجهیزاتی هستند که انرژی خورشیدی را جذب و به واسطه سیال ناقل انرژی به محل مصرف منتقل می کنند. امروزه با استفاده از برخی تجهیزات جانبی و فناوری های جدید می توان انرژی را در طول روز ذخیره و در طول شب استفاده نمود. در بسیاری از کشور های توسعه یافته، انرژی خورشیدی نقش عمده ای در تولید انرژی مصرفی منازل را داراست به طوری که خانه ها علاوه بر استفاده از انرژی تولیدی، می توانند بخشی از آن را به مناطق دیگر ارسال نمایند. با این روش نه تنها هزینه ای بابت انرژی پرداخت نمی شود بلکه می تواند درآمد زایی نیز داشته باشد. پس می توان گفت انرژی خورشیدی علاوه بر پاک بودن و مقرون به صرفه بودن، می تواند اقتصادی نیز باشد. امروزه در سرتاسر جهان با توجه به اقلیم و شرایط آب و هوایی از انواع مختلف گردآورهای خورشیدی از جمله گردآورهای تخت، گردآورهای سهموی، گردآورهای تحت خلاء و غیره استفاده می گردد و در این بین تحقیقات آزمایشگاهی و عددی بسیاری در راستای افزایش راندمان انواع سیستم های انرژی خورشیدی انجام گرفته که به تعدادی از آن ها اشاره شده است. در سال ۱۹۳۰ میلادی دودلی و همکاران [۲] برای اولین بار گردآورهای سهموی مدل SEG-LS را مورد مطالعات آزمایشگاهی خود قرار دادند. آنها در این تحقیق با تغییر جنس قسمت های مختلف گردآور سعی کردند راندمان گرمایی را افزایش و تلفات گرمایی را کاهش دهند. در نهایت مطالعات آنها منجر به تولید نتایج آزمایشگاهی مفیدی شد که بعدها با نام Test Result در نشریه علمی ساندا ریپورت چاپ و مورد استفاده تولید کنندگان انواع گردآور قرار گرفت. صدقیانی و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۳] با استفاده از روش های عددی مختلف و کوپل راه کارهای جدیدی جهت بررسی عملکرد گردآورهای سهموی ارائه دادند. آنها در تحقیقات عددی خود از الگوریتم مونتو کارلو جهت پیش بینی میزان انعکاس نور خورشید به قسمت های مختلف لوله جاذب بهره بردند و به این نتیجه رسیدند که می توان با تغییر در ابعاد و زوایای منعکس کننده، انرژی بیشتری را به قسمت های تحتانی لوله جاذب انتقال داد.

چنگ و همکاران [۴] با استفاده از روش های عددی FVM و MCRT و کوپل به بررسی عددی گردآورهای سهموی پرداختند. آنها در این روش از سیال Syltherm 800 جهت مقایسه نتایج بهره بردند. نتایج آنها نشان داد عوامل مختلفی همچون نوع سیال ناقل گرما، خواص ترموفیزیکی سیال و نوع گاز تشکیل دهنده شرایط خلاء بر میزان افزایش راندمان گرمایی گردآور سهموی تاثیر گذار هستند.

وسیقی و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۵] تحقیقات همکاران قبلی را در زمینه تحلیل عملکرد و بررسی بازده گردآورهای سهموی ادامه داده و این بار مدل LS2 را با اضافه کردن صفحات سوراخ دار به منعکس کننده پیگیری نمودند. صفحات سوراخ دار تاثیر بسزایی در میزان جذب و انعکاس انرژی خورشیدی داشته و در صورتی که طراحی با دقت بالایی صورت گیرد، می تواند باعث افزایش چشم گیر بازده گردآور خورشیدی شود. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۶] در تحلیل عددی خود از کوپل دو روش FEM و Solar Ray Trace بهره برده اند. عمده تحلیل و بررسی تیم وانگ مربوط به میزان انتقال گرما و تنش های گرمایی ایجاد شده در سیستم PTC بوده است. هیمادری و همکاران [۷] در تحقیقات عددی خود یک لوله افقی ساده را بصورت دو بعدی مدل کرده و با اعمال شرط مرزی دما ثابت برای جداره خارجی سطح لوله، نسبت به استخراج نتایج عددی اقدام نمودند. تحقیقات آنها هرچند بسیار ساده و غیر قابل استناد بود اما بهرحال اولین قدم در راستای بررسی تاثیر جریان های پالسی بر عملکرد گرمایی به شمار می رود. نتایج بدست آمده در محدوده فرکانس ۲۰-۲۰۰ هرتز و دامنه های دبی کمتر از ۱ مترمکعب بر ثانیه صورت گرفته و نشان داد که هیچ ارتباطی بین عملکرد گرمایی و تغییر نوع دبی جریان از لحاظ پالسی بودن وجود ندارد. در ادامه گروهی دیگر از محققان هندی تحت مدیریت پاندابا پاترو [۸] به بررسی عددی جریان تلاطم لوله افقی تحت جریان های پالسی پرداختند. نتایج بدست آمده برای سه عدد رینولدز ۱۰۸۵۰، ۱۳۳۵۰ و ۲۰۰۰۰ نشان داد که در بعضی مواقع تغییرات فرکانس، منجر به تغییر عدد ناسلت متوسط می گردد. اما این افزایش ارتباط مستقیمی با عدد رینولدز ندارد به طوری که برای رینولدز ۲۰۰۰۰ (مربوط به جریانی با تلاطم غیر پالسی بیشتر) و فرکانس ۴۰ هرتز ناسلت متوسط ۰/۷ ولی برای رینولدز ۱۳۳۵۰ با همان فرکانس یاد شده مقدار بدست آمده برای ناسلت متوسط ۱/۱ بود. نتایج حاصل نشان دهنده وجود نواقصی در بررسی تاثیر پارامترهای تاثیرگذار، نوع تحلیل و یا شرایط مرزی است. اما نکته بسیار کلیدی تحقیق آنها مربوط به بررسی ناسلت محلی است، جایی که در طول لوله نمودار تغییرات ناسلت محلی نزولی بدست نیامد. هر دو فرکانس های ۲۰ و ۴۰ هرتز سبب تغییر ناسلت محلی می شوند. در واقع نتایج بدست آمده آنها ثابت کرد که تغییرات فرکانس و ایجاد جریان پالسی منجر به تغییر عدد ناسلت محلی می گردد ولی میزان افزایش به گونه ای نیست که بتواند منجر به افزایش ناسلت متوسط گردد. پاپادوپولوس و همکاران [۹] به بررسی عددی تاثیر جریان های پالسی در لوله افقی ساده پرداخته اند. در این تحلیل عددی فرکانس، دامنه و نسبت f/A به عنوان پارامترهای تاثیرگذار مورد بررسی قرار گرفته اند. در این تحلیل فرکانس ها به سه دسته فرکانس ضعیف، قوی و خیلی قوی تقسیم بندی شده و میزان تلاطم ایجاد شده در هر سه دسته بصورت جداگانه بررسی شده اند. نتایج تحلیل های عددی نشان داد، میزان و شدت تلاطم ها در دو دسته فرکانس قوی و خیلی قوی بیشتر از دسته فرکانس ضعیف است اما تفاوت محسوسی بین نتایج مربوط به فرکانس های قوی و خیلی قوی دیده نشد بطوری که محققان این مطالعه دریافتند، زمانی که محدوده فرکانس نزدیک به فرکانس های خیلی شدید می شود، تلاطم ایجاد شده یخ می زند. این یخ زدگی موجب ثبات ماندن موج تلاطم شده و تغییر محسوسی در عملکرد گرمایی

بازده گرمایی سیستم می شود. به طوری که در تحقیق حاضر بیش ترین بازده مربوط به فرکانس ۱/۲ هرتز بوده است. مولوچنیکوف و همکاران در ادامه سال ۲۰۲۲ [۱۴] به بررسی تجربی لوله افقی صاف تحت جریان آرام و با استفاده از ورودی پالسی سینوسی پرداخته اند. در تحلیل آزمایشگاهی انجام شده، عدد رینولدز ۱۲۰۰ انتخاب شد بطوری در این بازه، جریان در کسری از زمان معکوس می شود. آن ها برای برای بررسی بردارهای سرعت تحت رژیم نوسانی از فناوری SIV بهره برده اند. نتایج بدست آمده نشان داد که با تغییر دامنه در فرکانس های بالا ناحیه استوکس (نزدیک دیواره لوله) بیش ترین تاثیرپذیری را دارد. در این لایه جریان نوسانی منجر به افزایش عدد ناسلت محلی شده و پارامترهای گرمایی تغییرات محسوس تری دارند. زیپی سو و همکاران در سال ۲۰۲۳ [۱۵] به مطالعه آزمایشگاهی لوله های گرمایی تحت جریان های نوسانی پرداخته اند. در این مطالعه هدف اصلی، بررسی میزان انتقال گرمای بین فاز مایع و بخار تحت جریان نوسانی بوده است. با توجه به پیچیدگی های مکانیسم انتقال گرما در تغییرات فازی تعیین پارامترهای تاثیر گذار بسیار سخت و طاقت فرسا است. آن ها در تحقیقات خود به بررسی عواملی همچون نسبت پر شدن، وضعیت گرانشی و نوع حالت گرمایشی پرداخته اند. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۳ [۱۶] در مطالعه آزمایشگاهی خود به بررسی تغییرات مشخصات گرمایی لوله پره دار تحت رژیم جریان لایه ای پرداخته اند. در این بررسی تجربی، از ترکیب نانو ذرات اکسید آلومینیوم و آب به عنوان نانوسیال عامل و جریان پالسی به عنوان شرط مرزی ورودی استفاده نموده اند. بررسی ها نشان داد که استفاده همزمان از ۰/۵ درصد حجمی نانو ذرات اکسید آلومینیوم و پالس های سینوسی در رینولدز ۱۱۰۰ موجب افزایش ۱۶ درصدی عدد ناسلت متوسط می شود. در این مطالعه عدد استروهال به عنوان نسبت نیروی فرکانسی به نیروی اینرسی نیز مورد بررسی قرار گرفت. به طوری که برای رینولدز های ۳۷۹، ۷۳۰ و ۱۱۱۵ به ترتیب اعداد استروهال ۰/۰۴۲، ۰/۰۳ و ۰/۰۲۴ بدست آمد. این نتایج نشان می دهد که صرفا با افزایش عدد رینولدز، مشخصات نوسانی افزایش نمی یابند. در بعضی از مواقع نیروی اینرسی بر نیروی فرکانسی غالب شده و مانع افزایش عدد استروهال می گردد و در بعضی اوقات نیز این نیروی فرکانسی است که بر نیروی اینرسی غالب می شود. بیش ترین ضریب انتقال گرمای موضعی در عدد استروهال ۰/۰۳۴، عدد رینولدز ۷۴۷ و در دامنه تغییرات ۳/۸۵ و به میزان ۱۴۷ درصد بدست آمده است.

با بررسی و مطالعه مقالات معتبر سالیان اخیر، می توان به این نتیجه رسید که استفاده از جریان ورودی سینوسی با فرکانس های مختلف برای بررسی راندمان گرمایی گردآورهای خورشیدی تخت و یا سهموی به طور کلی تا به امروز مطرح نشده است. به طوری که در تعدادی از مقالات عددی، از روش های دو فازی و نانوذرات جهت افزایش راندمان گرمایی گردآور استفاده شده و یا در برخی دیگر اضافه نمودن فضای متخلخل موضوع تحقیق بوده است. در تعداد محدودی از مطالعات همچون مقالات صدقیانی و چنگ بحث اصلی در خصوص نحوه مدل سازی گردآور سهموی و میزان انرژی جذب شده از انعکاس دهنده مطرح بوده که در این راستا استفاده از الگوریتم مونت کارلو (روش مورد استفاده در این تحقیق) پیشنهاد شده است. اما در سالیان اخیر و بخصوص در پنج سال گذشته تعدادی از نویسندگان از جمله

سیستم مشاهده نمی شود. از طرفی نتایج بدست آمده نشان داد تغییرات ایجاد شده در نواحی نزدیک به دیواره لوله شدیدتر است و می توان چنین استنباط کرد که تغییرات فرکانس سبب تغییر پارامترهای مربوط به انتقال گرما از جمله ناسلت محلی در نواحی لزج و بافر می شود. گولتسمن و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۱۰] به بررسی تجربی جریان های پالسی در یک کانال افقی پرداخته اند. در این مطالعه آزمایشگاهی از یک دستگاه تولید موج پالسی سیلندر- پیستونی استفاده گردید. کانال مورد بررسی دارای ابعاد ۱۵۰*۱۵۰ میلی متر و طول ۳۰۰ میلی متر، محدوده دامنه بین ۰/۴۵ الی ۰/۶۳ و محدوده فرکانس زاویه ای بین ۱۵ الی ۳۵ بوده و از انواع پره های فلپ، توپی و پروانه ای جهت ایجاد موج پالسی استفاده شده است. نتایج تحقیقات بدست آمده در محدوده فرکانس بین ۰/۰۳ الی ۰/۸ نشان داد که انحراف بین قانون هارمونیک با پالس زن فلپ در فرکانس ۱۵ هرتز سه مرتبه بیشتر از انحراف ایجاد شده برای پالس زن توپی و شش مرتبه بیشتر از پالس زن پروانه ای است. در این مطالعه اختلاف فاز بین سرعت متوسط سیال و سرعت نوسانی ایجاد شده توسط انواع پالس زن ها مورد بررسی قرار گرفته بطوری که این اختلاف فاز، با ایجاد فرکانس های بسیار شدید افزایش می یابد. از طرفی تغییر سرعت متوسط سیال عامل حین تغییر فرکانس بسیار شدیدتر از قبل گزارش شده است. کورتولموش و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۱۱] به بررسی آزمایشگاهی عملکرد گرمایی یک لوله افقی سینوسی تحت شرایط ورودی دبی جریان متغیر (ورودی پالسی) پرداخته و نتایج بدست آمده را با حالت پایا مقایسه کرده اند. این مقایسه در بازه عدد رینولدز ۴۰۰۰ الی ۷۰۰۰ و عدد استروهال ۰/۱۱ الی ۲/۰۷ صورت گرفته است. نتایج تحقیقات نشان داد زمانی که عدد استروهال ۱/۰۳ و عدد رینولدز ۴۰۰۰ انتخاب شود، ضریب انتقال گرما ۱/۵ مرتبه افزایش می یابد. اما نکته قابل تامل، تفاوت میان نتایج بین منطقه نزدیک هسته لوله و نواحی نزدیک به دیواره بدست آمده است. به طوری که اکثر افت و خیزهای مشاهده شده مربوط به نواحی نزدیک دیواره است. جایی که سهم نیروهای لزج بسیار بیشتر از نیروهای اینرسی است و این عامل سبب افزایش ضریب انتقال گرمای متوسط شده است. چونگ ژو و همکاران در کار تجربی خود در سال ۲۰۲۱ [۱۲] از ترکیب جریان های پالسی و نانو سیالات بهره برده اند. در این مطالعه آزمایشگاهی یک چاه گرمایی سه لایه در ابعاد میکرو با استفاده از پرینتر سه بعدی تولید شد. همچنین از چهار نوع پالس سیگنال مربعی، مثلثی، دنده اری و سینوسی به طور جداگانه در ترکیب با آب و نانو ذرات گرافن اکسید به عنوان سیال عامل استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان داد زمانی که نانوسیال مورد استفاده با سیگنال پالسی مربعی در بازه فرکانس ۳/۵ الی ۴ هرتز ترکیب شود، بازده گرمایی سیستم افزایش خواهد یافت. میزان این افزایش برای عدد ناسلت متوسط ۱۶/۵ درصد گزارش شده است. ایواتا و همکاران در سال ۲۰۲۲ [۱۳] به بررسی رفتار گرمایی پمپ های گرمایی توان بالا تحت شرایط ورودی پالسی پرداخته اند. لذا مکان عبوری سیال در بررسی پمپ ها بسیار حائز اهمیت است. لذا تغییر مکان سیال به مکانی دیگر تحت جریانات نوسانی می تواند منجر به تغییر بازده گرمایی شود. در این بررسی سیال مورد استفاده HFC بوده و قطر میکرو پمپ ۰/۳۲ میلی متر انتخاب شده است. نتایج تحقیقات آن ها نشان داد که استفاده از جریانات پالسی، موجب افزایش

کورتولموش (۲۰۲۰)، چونگ ژو (۲۰۲۱)، مولوچنیکوف (۲۰۲۲) و زبیبی سو (۲۰۲۳) به بررسی تاثیر فرکانس بر عملکرد گرمایی لوله افقی ساده و یا پره دار پرداخته اند و تاکنون هیچ گاه هندسه گردآور چه از نوع سهموی و چه از نوع تخت آن با استفاده از ورودی سینوسی با فرکانس های مختلف مورد بررسی و تحلیل قرار نگرفته است و تمام نتایج عددی و آزمایشگاهی ارائه شده در خصوص لوله افقی ساده بوده است. در نهایت با توجه به نبود تحقیقات جامع، تعداد بسیار کم مقالات معتبر، پراکندگی نتایج (با هندسه لوله افقی ساده) و ابهامات موجود در نتایج منجر به ایجاد ایده بررسی تاثیر فرکانس بر عملکرد گرمایی گردآور سهموی LS2 شده است. لازم به ذکر است بررسی عددی فرکانس، نیازمند بکارگیری روش های عددی ناپایا و متلاطم می باشد. بررسی عددی زیرلایه های مرزی نزدیک دیواره از جمله زیر لایه لزج و ناحیه بافر جزو مهم ترین بحث های تحقیق حاضر می باشد. با توجه به توضیحات ارائه شده، بررسی تاثیر فرکانس بر روی عملکرد گرمایی گردآور خورشیدی سهموی که به عنوان یکی از منابع انرژی پاک و مقرون به صرفه شناخته می شود، امری ضروری و غیر قابل اجتناب است. لذا با توجه به ناترازی و مصرف بی رویه انرژی های فسیلی در ایران، امید است گردآور خورشیدی سهموی فرکانسی بتواند جایگزین مناسبی برای دستگاه های مصرف کننده انرژی فسیلی باشد.

۲- مبانی و روش ها

۲-۱- تعریف مسئله

گردآورهای خورشیدی سهموی به دو دسته کلی متمرکز کننده و غیر متمرکز کننده تقسیم بندی می شوند. گردآورهای متمرکز کننده از سهموی هایی تشکیل شده اند که نور خورشید را بر نقطه کانونی خود منعکس می کنند که با کنار هم قرار دادن این سهموی ها و حرکت دادن یک سیال از روی نقطه کانونی آنها، می توان گرمای تابشی خورشید را جذب کرد و برای گرمایش و یا تولید برق استفاده نمود. گردآورهای سهموی از نوع متمرکز کننده و گردآورهای تخت و تحت خلاء از نوع غیر متمرکز کننده می باشند. در این تحقیق سعی شده است تاثیر فرکانس جریان ورودی سینوسی بر متغیرهای ترمودینامیکی همچون ضریب انتقال گرما، عدد ناسلت و بازده گرمایی گردآور نشان داده شود. به طور کلی یک گردآور خورشیدی سهموی [۱۷] از اجزای زیر تشکیل شده است.

الف) منعکس کننده (Reflector)

ب) لوله جاذب (Absorber Tube)

ج) فضای تحت خلاء (Evacuated Space)

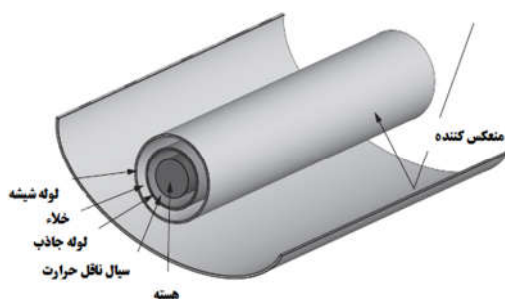
چ) سیال انتقال دهنده گرما (Heat Transfer Fluid)

ح) لوله شیشه ای (Glass Tube)

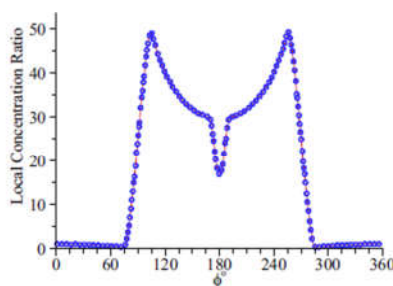
خ) هسته جامد (Solid Plug)

همان طور که در شکل ۱ مشاهده می گردد صفحه منعکس کننده نور خورشید را دریافت کرده و در جهت های مختلف منعکس می کند. از آنجایی که انتقال انرژی به صورت تابشی صورت می گیرد، نیاز به محیط مادی نیست. لذا این صورت از انرژی تحت زوایای مختلف در سطح جانبی لوله جاذب جذب می گردد. نکته بسیار مهم در میزان جذب انرژی تابشی توسط صفحه جاذب است. نور خورشید با انرژی

تابشی تقریبی و ثابت ۱۰۰۰ وات بر متر مربع بر منعکس کننده وارد می شود. منعکس کننده با ثابت نگه داشتن انرژی، آن را در جهت های مختلف ساطع می کند. با توجه پایین بودن میزان جذب تابش شیشه پیرکس و عبور انرژی تابشی از فضای خلاء، بیش از ۹۰٪ انرژی تابشی خورشیدی، جذب لوله جاذب می گردد. اما میزان جذب به زاویه ساطع شدن نور خورشید نیز بستگی دارد. قسمتی از لوله، انرژی بیشتر و قسمت های دیگر سهم کمتری دارند. طبق آزمایشات انجام شده [۱۸] بر روی مدل SEG-LS2 با سیال عامل سیلترم ۸۰۰، میزان جذب تابش در نواحی مختلف سطح لوله جاذب گزارش شده است. گزارشات بر اساس ضریب جذب مکانی و زاویه لوله جاذب در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱- اجزای تشکیل دهنده گردآور سهموی خورشیدی [۱۷]



شکل ۲- تغییرات ضریب جذب انرژی بر اساس زاویه لوله جاذب [۱۸]

۲-۲- معادلات حل

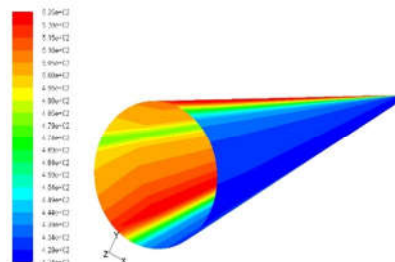
کلیه روش های عددی بر پایه معادلات اصلی پیوستگی، مومنوم و انرژی تعریف می شوند. معادلات (۱)، (۲) و (۳) به ترتیب معادلات پیوستگی، مومنوم و انرژی را نشان می دهند.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (2)$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My}$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz}$$



شکل ۵- توزیع دمای سطح لوله جاذب مطابق با الگوریتم مونته کارلو

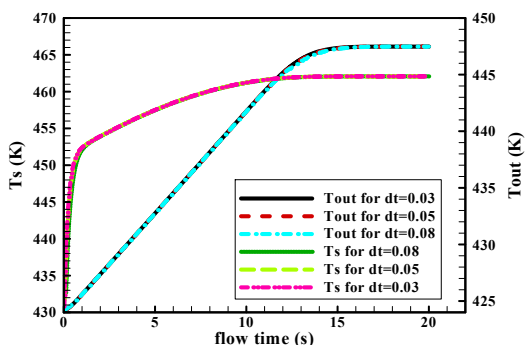
تحلیل های عددی با استفاده از روش FVM^۱ نیازمند تعیین شرایط مرزی و نوع حل می باشند. مطابق آنچه که گفته شد کد نویسی صورت گرفته مطابق با الگوریتم مونته کارلو به عنوان شرط مرزی Heat Flux در نظر گرفته شده است. ورودی جریان سیال بصورت شرط مرزی Mass Flow Inlet تعریف شده و با استفاده روش UDF^۲ نویسی بصورت معادله (۵) ارائه و به صورت معادله قابل شناسایی نرم افزار به شرایط مرزی اضافه می گردد. همچنین برای خروجی جریان از گردآور نیز از شرط مرزی pressure Outlet استفاده شده است. با توجه به اینکه کلیه متغیرها از جمله فرکانس و دامنه تابع زمان می باشند، لذا نوع حل بصورت ناپایا می باشد. گام زمانی، متغیری است که به شدت وابسته به ابعاد شبکه و عدد کورانت می باشد. در این مطالعه محدوده عدد کورانت بصورت معادله (۶) تعریف شده است.

$$U_{in} = U_{ave} [1 + A \sin(2\pi f t)] \quad (5)$$

$$C = \frac{U_{ave} \Delta T}{\Delta h} \leq 1 \quad (6)$$

در تمامی تحلیل های عددی دامنه بصورت A تعریف شده و ثابت (۰/۲۵) در نظر گرفته شده است. فرکانس با نماد f تعریف شده و در محدوده ۰/۲ الی ۶ هرتز مورد بررسی های عددی قرار گرفته است. یکی از شروط استفاده از معادله توربلانسی k-ε نوع RNG برای حل ناپایا محدوده عدد کورانت است به طوری که در هر شرایط، عدد کورانت باید کمتر از یک تعریف شود. با اعمال این محدودیت و با فرض ثابت بودن ابعاد سلول ها، متغیر گام زمانی تعیین کننده خواهد بود به طوری که مدت زمان مورد نیاز جهت همگرایی نتایج برای فرکانس های کوچک حدود ۸ ساعت و برای فرکانس های بزرگتر از جمله فرکانس ۶ هرتز بیش از ۱۷۰ ساعت بوده است. با توجه به حل ناپایای معادلات به مدت زمان ۲۰ ثانیه، لازم است استقلال نتایج عددی از گام زمانی ارائه گردد. شکل ۶ نمودار تغییرات دمای خروجی و سطح لوله جاذب در محدوده زمانی ۰ الی ۲۰ ثانیه نشان داده شده است. محور عمودی سمت چپ دمای سطح جانبی لوله جاذب و محور سمت راست دمای خروجی لوله جاذب را نشان می دهد. نتایج عددی برای سه گام زمانی ۰/۰۳، ۰/۰۵ و ۰/۰۸ در نمودار ۶ نشان داده شده است. با توجه به نتایج نشان داده شده اختلافی در نتایج بدست آمده تحت گام های زمانی مختلف وجود ندارد لذا اصلی ترین دلیل استفاده از گام های زمانی کوچکتر ارضای شرط استفاده از مدل RNG برای تحلیل های

عددی ناپایاست. در همین راستا با توجه به ثابت بودن تعداد شبکه ها و سرعت متوسط جریان، اندازه گام های زمانی مطابق با معادله (۶) بصورتی انتخاب شده است که همواره عدد کورانت مساوی و یا کمتر از یک بدست آید. در کلیه تحلیل ها شامل گام های زمانی ۰/۰۳، ۰/۰۵ و ۰/۰۸ عدد کورانت کمتر از یک بدست آمده و شرط مدل RNG رعایت شده است.



شکل ۶- تغییرات نتایج عددی تحت گام های زمانی متفاوت

۳- نتایج

۳-۱- اعتبار سنجی نتایج عددی

با توجه به ناپایا بودن مطالعه حاضر، جهت اعتبارسنجی نتایج بدست آمده از نتایج تجربی و عددی ناپایا استفاده شده است. کورتولموش و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۲۰ به بررسی آزمایشگاهی کانال موجی با ورودی سینوسی پرداخته اند. آن ها در بررسی های خود برای کانال موجی شکل، از ورودی سینوسی استفاده نموده اند. آن ها برای این کار از یک موتور DC^۳ و فلپ دوار دور متغیر بهره برده اند. موتور تحت دستور کاربر نسبت به ایجاد فرکانس های مختلف در محدوده عدد استروال ۰/۱۱ < St < ۲/۰۷ عمل می نماید به طوری با گذشت زمان متغیرهای هیدرودینامیکی و گرمایی کانال رفته رفته تغییر می یابد. در این مطالعه جهت اعتبار سنجی نتایج عددی از نتایج آزمایشگاهی کورتولموش برای میانگین زمانی عدد ناسلت استفاده شده است. در شکل ۷ تغییرات میانگین زمانی عدد ناسلت متوسط در عدد رینولدز ۷۰۰۰، نسبت به تغییرات عدد استروال نشان داده شده است. در این نمودار علاوه بر نتایج آزمایشگاهی کورتولموش، نتایج عددی حمزه و همکاران [۲۲] نیز نشان داده شده است. با مقایسه نتایج مطالعه حاضر با نتایج آزمایشگاهی، خطایی در حدود ۶ درصد مشاهده گردید. همچنین میزان خطای نتایج حاضر با نتایج عددی حمزه و همکاران در حدود ۵ درصد بدست آمده است. در تمامی محاسبات از معادله ۷ برای بدست آوردن میزان خطا استفاده شده است.

$$\varepsilon\% = \left| \frac{\eta_n - \eta_{ex}}{\eta_{ex}} \right| * 100 \quad (7)$$

³ Direct Current

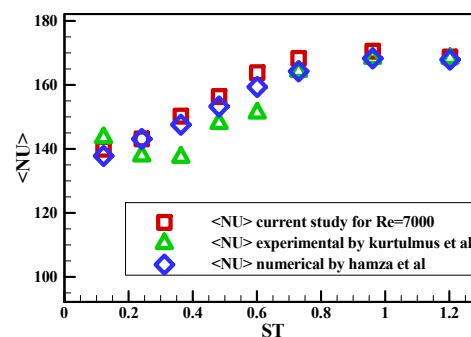
¹ Finite Volume Method

² User Defined Function

طوری که وسعت نواحی دارای کمترین دما در فرکانس ۰ هرتز (آبی پر رنگ) بسیار بیشتر از نواحی آبی رنگ در فرکانس های ۲ و ۵ هرتز است. این نواحی در فرکانس ۵ هرتز به حداقل مقدار خود رسیده است. می توان چنین استنباط کرد که تلاطم های آبی و پیوسته سبب تغییر کانتور دما و در نهایت منجر به افزایش دمای متوسط خروجی لوله جاذب شده است.

۳-۳- بررسی بردار سرعت تحت فرکانس های مختلف

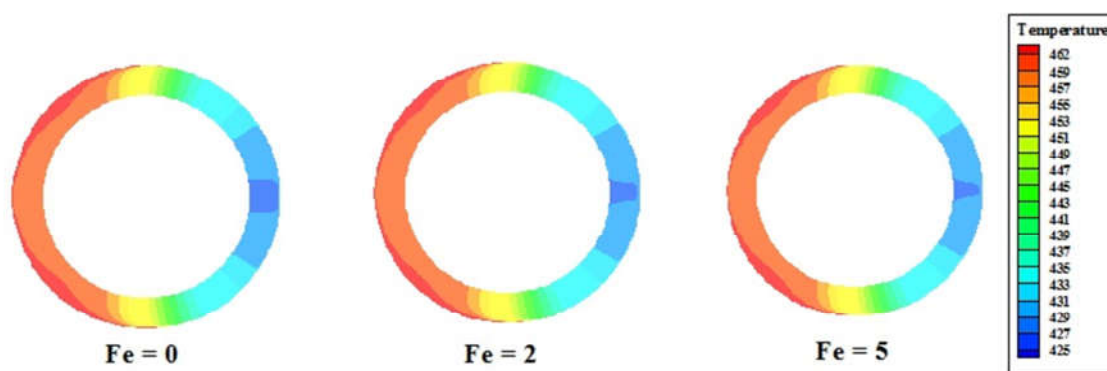
در شکل ۹ به بررسی بردارهای سرعت در فاصله ۳/۵ متر از ورودی لوله جاذب تحت ۴ فرکانس ۰، ۲، ۵ و ۶ هرتز پرداخته شده است. در هر ۴ حالت دامنه تغییرات ورودی جریان ثابت بوده و مقدار آن ۰/۲۵ فرض شده است. با مقایسه بردارهای سرعت واضح است که پروفیل های سرعت با تغییر فرکانس تغییر یافته اند. پروفیل سرعت در فرکانس ۰ هرتز همان پروفیل تخت مربوط به جریان متلاطم عادی است اما با افزایش فرکانس، پروفیل های سرعت دست خوش تغییرات غیر عادی شده اند به طوری که برای فرکانس ۵ هرتز این تغییرات بسیار ملموس تر است. در این فرکانس شکل پروفیل جریان متلاطم بسیار نامنظم تر شده است به طوری که نواحی نزدیک دیواره ها دارای سرعت بیشتری هستند (رنگ پروفیل سرعت به زرد تغییر کرده است) می توان گفت تنها عاملی که می تواند منجر به چنین تغییری گردد افزایش تلاطم های عرضی و طولی آبی و پیوسته است که به سبب افزایش فرکانس جریان ورودی سینوسی رخ داده است. با افزایش فرکانس به ۶ هرتز از میزان این تغییرات آبی کاسته شده است استنباط نویسنده بر این است که افزایش بیشتر فرکانس سبب یخ زدگی تلاطمی شده است به طوری که فرکانس به حدی افزایش یافته که جریان سیال، تغییرات ایجاد شده را حس نمی کند و مانند جریان متلاطم عادی به حرکت خود ادامه می دهد.



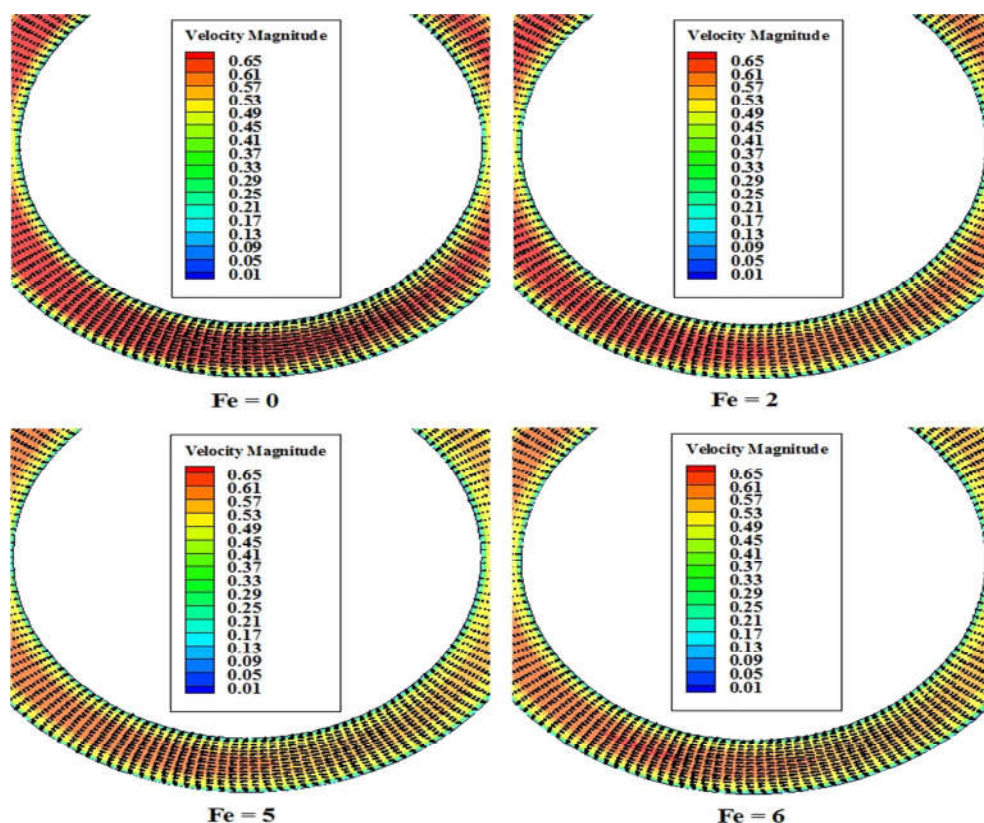
شکل ۷- اعتبار سنجی با نتایج آزمایشگاهی کورتولموش [۲۲]

۳-۲- بررسی کانتور دما تحت فرکانس های مختلف

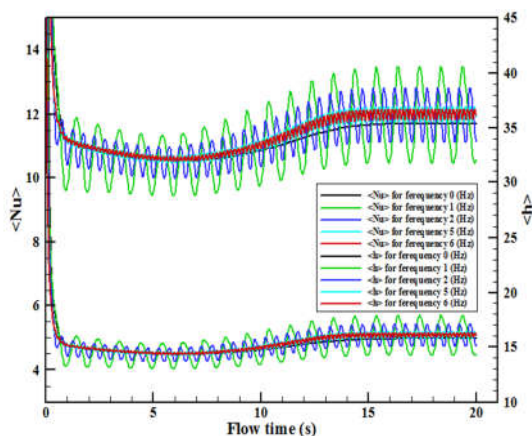
در شکل ۸ به بررسی کانتور دمای لوله جاذب گردآور خورشیدی مدل SEG-LS2 پرداخته شده است. در این شکل کانتورهای دمای خروجی لوله جاذب برای سه فرکانس ۰، ۲ و ۵ هرتز نشان داده شده است. مدت زمان کل تحلیل عددی در نرم افزار Ansys Fluent ۲۰ ثانیه، گام زمانی آن ۰/۰۱ ثانیه و تعداد تحلیل ها ۲۰۰۰ در نظر گرفته شده است. با بررسی دقیق تر کانتورها در شکل ۸ مشاهده می گردد که در فرکانس ۵ هرتز لایه مرزی و به خصوص لایه های لزج و بافر تحت تاثیر تغییرات آبی و پیوسته سرعت قرار گرفته اند. کانتور دما در حالت فرکانس ۰ نشان دهنده دمای بالای سیال نزدیک دیواره سطح دریافت کننده انرژی خورشیدی است (قطر خارجی) اما با افزایش فرکانس به ۵ هرتز رنگ کانتور در نزدیک دیواره خارجی لوله جاذب به زرد تغییر کرده است. (با مشاهده دقیق تر به قسمت زیرین لوله جاذب) از طرفی با توجه به نوع گردآور و زاویه تابش انرژی خورشیدی، سمت راست لوله جاذب به مراتب انرژی کمتری را دریافت کرده است اما رنگ کانتور دما در این نواحی تحت تغییرات فرکانس به شدت تغییر یافته است به



شکل ۸- تغییرات کانتور دمای خروجی لوله جاذب گردآور در فرکانس های مختلف



شکل ۹- تغییرات بردارهای سرعت برای فرکانس های مختلف در فاصله ۳/۵ متر از ورودی لوله جاذب گردآور



شکل ۱۰- تغییرات زمانی عدد ناسلت و ضریب انتقال گرما

۳-۵- تغییرات عدد ناسلت تحت تغییرات عدد استروهال

در شکل ۱۱ تغییرات میانگین زمانی عدد ناسلت متوسط نسبت به تغییرات عدد استروهال نشان داده شده است. مطابق نتایج نشان داده شده در این نمودار، بیشترین افزایش انتقال گرما مربوط به عدد استروهال ۰/۱۰۵ (فرکانس ۵ هرتز) بوده است جایی که میانگین زمانی عدد ناسلت متوسط به بیشترین مقدار خود یعنی ۵/۱ رسیده است. اما نکته مهم دیگری را می توان از این نمودار استخراج کرد. می توان گفت افزایش بی رویه فرکانس و عدد استروهال همیشه مزیت نیست. با دقت

۳-۴- بررسی تغییرات میانگین زمانی عدد ناسلت

در شکل ۱۰ نمودار تغییرات عدد ناسلت متوسط تحت تغییرات زمان نشان داده شده است. در این نمودار محور قائم سمت چپ تغییرات میانگین زمانی عدد ناسلت متوسط، محور قائم سمت راست تغییرات میانگین زمانی ضریب انتقال گرمای متوسط و محور افقی تغییرات زمان را نشان می دهند. همانطور که مشاهده می گردد در تمامی حالت ها میانگین زمانی عدد ناسلت متوسط و ضریب انتقال گرمای متوسط از زمان آغاز تحلیل تا ۷ ثانیه کاهش و پس از آن تا زمان ۱۴ ثانیه افزایش یافته و سپس تغییر خاصی نداشته است. (از تغییرات فرکانسی صرف نظر شده است) با دقت بیشتر می توان مشاهده کرد که مقادیر میانگین زمانی عدد ناسلت متوسط و ضریب انتقال گرمای متوسط در فرکانس های ۵ و ۶ هرتز از مقادیر عدد ناسلت سایر فرکانس ها بیشتر است به طوری که بیشترین مقادیر میانگین زمانی عدد ناسلت متوسط و ضریب انتقال گرمای متوسط برای فرکانس ۵ هرتز بوده و مقادیر آن به ترتیب ۱۱/۴ و ۱۶/۲ بدست آمده است. از طرفی با افزایش بیشتر فرکانس (نتایج مربوط به فرکانس ۶ هرتز)، دامنه تغییرات میانگین زمانی عدد ناسلت متوسط و ضریب انتقال گرمای متوسط به شدت کاهش یافته است و عملاً افزایش بیشتر فرکانس تاثیری در عملکرد گرمایی لوله جاذب گردآور سهموی نخواهد داشت.

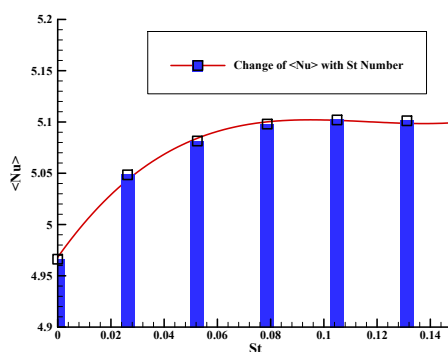
گرمای خورشیدی از دیواره های جانبی به سیال ناقل گرما منتقل می شود و هر چه بتوان میزان تلاطم و افت و خیزهای این نواحی را افزایش داد، سرعت انتقال گرما و میزان انرژی دریافتی بیشتر خواهد بود. لذا از تغییر فرکانس به عنوان ابزاری برای ایجاد تلاطم های طولی و عرضی آبی و غیر قابل پیش بینی استفاده شده است. افزایش سرعت در لایه مرزی به ضخامت لایه مرزی و سرعت جریان آزاد وابسته است. با افزایش فرکانس بیشتر در محدوده عدد استروهال ۰/۱۰۵، پخش بیشتری از نیروهای اینرسی در قالب نیروی فرکانسی به نواحی بافر و زیرلایه های لزج منتقل می شوند. به طوری که می توان گفت ۱۰ درصد کل نیروهای اینرسی، متعلق به افت و خیزهای فرکانسی است. در چنین حالتی می توان گفت سرعت جریان آزاد در نزدیکی لایه مرزی افزایش یافته و به موجب آن از ضخامت لایه مرزی کاسته شده است. از طرفی فرکانس های کوچک (محدوده ۰/۲ الی ۲ هرتز) به جهت بزرگ بودن میزان تناوب، توانایی زیادی در کاهش ضخامت لایه مرزی ندارند. ولی فرکانس های بزرگتر (محدوده ۳ الی ۶ هرتز) می توانند با تغییر لایه هیدرودینامیکی، میانگین زمانی عدد ناسلت متوسط را تحت تاثیر قرار دهند. با توجه به نتایج ارائه شده و در تکمیل تحلیل های عددی پیرنیا و همکاران [۲۳] تابع سینوسی می تواند منجر به افزایش بازده گرمایی گردآور سهوی شود. در مطالعه حاضر فرکانس ۵ هرتز و دامنه ۰/۲۵ جهت افزایش ضریب انتقال گرمای گردآور مورد مطالعه پیشنهاد می گردد. به جهت تکمیل نتایج و افزایش بیشتر بازده گرمایی، مطالعات عددی ذیل پیشنهاد می گردد.

الف) بررسی عددی تاثیر فرکانس تحت توابع پله ای
ب) بررسی آزمایشگاهی نصب شیرهای فرکانسی در گردآور سهومی
ج) تحلیل دو فازی تاثیر تغییر فرکانس با حضور نانو ذرات.

۵- نمادها

T	دما (K)
L	طول (m)
D_h	قطر هیدرولیکی (m)
δ	ضخامت لایه مرزی (m)
C_f	ضریب اصطکاک جدار (بی بعد)
p	فشار (Pa)
h	ضریب انتقال گرمای متوسط (W/m^2K)
$\langle Nu \rangle$	میانگین زمانی عدد ناسلت متوسط
Fe	فرکانس (Hz)
t	زمان (s)
St	عدد استروهال
C	عدد کورانت
Δh	ابعاد سلول (m)
U_{ave}	سرعت میانگین (m/s)
u_x	سرعت در لایه مرزی (m/s)
dt	گام زمانی (s)
T_s	دمای متوسط سطح (K)
Re	عدد رینولدز

به نمودار ۱۱ و نتایج مربوط به عدد استروهال ۰/۱۳ مشاهده می شود که با افزایش بیشتر فرکانس و عدد استروهال نه تنها میانگین عدد ناسلت متوسط نسبت به حالت قبلی افزایش نیافته بلکه در حال کاهش جزئی است. استدلال نویسنده بر این است که افزایش بیشتر فرکانس سبب کاهش شدید تناوب دبی جرمی می گردد به طوری که با افزایش فرکانس از ۵ به ۶ هرتز، الگوی حالت های قبل تکرار نمی شود. می توان گفت کاهش بیشتر تناوب، سبب یخ زدگی جریان و دبی جرمی شده است به طوری که دیگر جریان سیال، تغییرات فرکانسی را احساس نکرده و تاثیر بیشتری در پروفیل سرعت در نزدیکی دیواره مشاهده نمی گردد.



شکل ۱۱- تغییرات عدد ناسلت برحسب تغییرات عدد استروهال

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر گردآور خورشیدی سهومی مدل SEG-LS2 به طول ۷/۸ متر و قطر هیدرولیکی ۱۵/۲ میلی متر با استفاده از نرم افزار Gambit مدل سازی و سپس تحت نرم افزار Ansys Fluent تحلیل گردید. مراحل انجام یافته شامل مدل سازی اولیه، شبکه بندی سازمان یافته، اعمال شرایط مرزی، انتخاب و اعمال معادلات عددی، استقلال از تعداد شبکه و گام زمانی، اعتبار سنجی، تحلیل عددی و استخراج نتایج می باشد. سیال مورد استفاده روغن سیلترم ۸۰۰ بوده که به دلیل لزجت و افت فشار کمتر نسبت به سایر سیالات ارجح تر بوده است. با توجه به محدوده عدد رینولدز، جریان متلاطم و ناپایا بوده است. لوله جاذب گردآور سهومی به دلیل دارا بودن دو مرز جامد خارجی و داخلی تحت نیروهای لزج بیشتری قرار دارد و اعمال تغییرات فرکانسی همزمان، دو ساختار لایه مرزی را تحت تاثیر قرار می دهد. مطابق نتایج بدست آمده برای عدد استروهال صفر (فرکانس صفر هرتز)، پروفیل سرعت به جز نواحی بافر و زیرلایه لزج، در سایر نقاط کاملاً تخت بوده و بازده گرمایی آن حدود ۷۴ درصد می باشد. مطابق با نتایج بدست آمده، با اعمال تغییرات فرکانسی در محدوده صفر الی ۶ هرتز، لایه هیدرودینامیکی مجاور دیواره ها و به تبع آن پروفیل عرضی سرعت تغییر کرده است به طوری که برای عدد استروهال ۰/۱۰۵ و فرکانس ۵ هرتز بیشترین مقدار سرعت در نواحی نزدیک دیواره و زیرلایه های لزج مشاهده شده است. افزایش سرعت در نواحی مرزی دیواره موجب افزایش ضریب انتقال گرما و بازده گرمایی گردآور شده است. از دیدگاه نویسنده، گردآور سهومی مدل LS2 به دلیل دارا بودن دو ساختار لایه مرزی و دیواره جامد به تغییرات فرکانسی حساس تر است. زیرا شار

- [15] Applied Thermal Engineering Recent advances in visualization of pulsating heat pipes: A review. Vol. 221. Elsevier; 2023.
- [16] Zhang H, Guo W, Guo L, Li G, Zheng Y, Dong C, et al. Experimental study of heat transfer performance in a mini-corrugated pipe coupling nanofluids and pulsating wave. Powder Technol. 2023;426(118613):118613.
- [17] Kaloudis E, Papanicolaou E, Belessiotis V. Numerical simulations of a parabolic trough solar collector with nanofluid using a two-phase model. Renew Energy. 2016;97:218–29.
- [18] Cheng ZD, He YL, Cui FQ, Xu RJ, Tao YB. Numerical simulation of a parabolic trough solar collector with nonuniform solar flux conditions by coupling FVM and MCRT method. Sol Energy. 2012;86(6):1770–84.
- [19] Matsson JE. An introduction to Ansys fluent 2024. Mission, KS: SDC Publications; 2024.
- [20] McKelvey R, McLennan A. Gambit 2.3: Software tools for game theory. California Institute of Technology, Usa; 2006.
- [21] Kurtulmuş N, Sahin B. Experimental investigation of pulsating flow structures and heat transfer characteristics in sinusoidal channels. Int J Mech Sci. 2020;167(105268):10528.
- [22] Hamzah H, Sahin B. Analysis of SWCNT-water nanofluid flow in wavy channel under turbulent pulsating conditions: Investigation of homogeneous and discrete phase models. Int J Therm Sci. 2023;184(108011):108011.
- [۲۳] عباسیان پیرنیا، میرزایی، عباسعلیزاده، بررسی عددی جریان و انتقال گرما در گردآور خورشیدی سهموی SEGS LS تحت شرایط ورودی پله ای- سینوسی. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۴۰۰، د. ۵۱، ش. ۱، ص ۱۳۷-۱۴۴.

T_{out}	دمای متوسط خروجی (K)
A	دامنه تغییرات دبی جرمی (kg/s)
$\langle h \rangle$	میانگین زمانی ضریب انتقال گرمای متوسط (W/m ² K)
ρ	چگالی (kg/m ³)
C_p	گرمای ویژه (J/kgK)
K	رسانایی گرمایی (W/mK)
ΔT	تغییرات دما (K)
η	بازده گرمایی (%)
ε	خطای محاسبات عددی (%)
μ	لزجت سینماتیکی (kg/mS)
I_b	شار انرژی خورشیدی (w/m ²)
U_{in}	سرعت ورودی (m/s)

۶- مراجع

- [1] Norton B, Probert SD. Measured performances of natural-circulation solar-energy water-heaters. Appl Energy. 1984;16(1):1–26.
- [2] Dudley VE. Test results: SEGS LS-2 solar collector. In: SAND94-1884 Sandia National Lab(SNL-NM). Albuquerque, NM (United States; 1994.
- [3] Karimi Sadaghiyani O, Mehdi Pesteei S, Mirzaee I. Numerical study on heat transfer enhancement and friction factor of LS-2 parabolic Solar Collector. J Therm Sci Eng Appl. 2014;6(1):012001
- [4] Cheng ZD, He YL, Cui FQ, Xu RJ, Tao YB. Numerical simulation of a parabolic trough solar collector with nonuniform solar flux conditions by coupling FVM and MCRT method. Sol Energy. 2012;86(6):1770–84
- [5] Mwesigye A, Bello-Ochende T, Meyer JP. Multi-objective and thermodynamic optimisation of a parabolic trough receiver with perforated plate inserts. Appl Therm Eng. 2015;77:42–56
- [6] Wang Y, Liu Q, Lei J, Jin H. Performance analysis of a parabolic trough solar collector with non-uniform solar flux conditions. Int J Heat Mass Transf. 2015;82:236–49
- [7] Chattopadhyay H, Durst F, Ray S. Analysis of heat transfer in simultaneously developing pulsating laminar flow in a pipe with constant wall temperature. Int Commun Heat Mass Transf. 2006;33(4):475–81
- [8] Patro P, Gupta R, Khuntia AK. Numerical study for the prediction of heat transfer in a pulsating turbulent flow in a pipe. Procedia Eng [Internet]. 2015;127:854–61.
- [9] Papadopoulos PK, Vouras AP. Pulsating turbulent pipe flow in the current dominated regime at high and very-high frequencies. Int J Heat Fluid Flow. 2016;58:54–67.
- [10] Goltsman A, Saushin I, Mikheev N, Paereliy A. Generation of sinusoidal pulsating flows in the channels of experimental setups. Flow Meas Instrum. 2019;66:60–6.
- [11] Kurtulmuş N, Sahin B. Experimental investigation of pulsating flow structures and heat transfer characteristics in sinusoidal channel Int J Mech Sci. 2020;167(105268):105268
- [12] Xu C, Xu S, Wang Z, Feng D. Experimental investigation of flow and heat transfer characteristics of pulsating flows driven by wave signals in a microchannel heat sink. Int Commun Heat Mass Transf. 2021;125(105343):105343.
- [13] Iwata N, Bozzoli F, Pagliarini L, Cattani L, Vocale P, Malavasi M, et al. Characterization of thermal behavior of a micro pulsating heat pipe by local heat transfer investigation. Int J Heat Mass Transf. 2022;196(123203):123203.
- [14] Molochnikov VM, Mikheev NI, Mikheev AN, Paereliy AA, Dushina OA. The onset of turbulence in pulsating flows in smooth pipes. Int J Heat Fluid Flow. 2022;96(108984):108984.