ارزیابی عملکرد حرارتی لوله گیرنده موجدار بیضوی محور متناوب در گردآورنده خورشیدی

محمد احسان خزائلی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران، ehsan.khazaeli7@gmail.com زهرا مهردوست* استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران، z.mehrdoost@iauahvaz.ac.ir

چکیدہ

در این پژوهش تأثیر هندسه لوله موجدار با سطح مقطع بیضوی محور متناوب بر بهبود عملکرد گرمایی لوله جاذب گردآورنده خورشیدی بررسی شده است. هندسه این لوله که از مبادله کن گرمای عروقی موجود در ماهی اوپا الهام گرفته شده، دارای یک مقطع عرضی بیضوی است که در جهت جریان به طور پیوسته تغییر می کند. تأثیر گام موج و نسبت منظری لوله موجدار در دو حالت سطح مقطع ثابت و قطر هیدرولیکی ثابت بررسی شده است. ده هندسه مختلف با نسبتهای منظری ۱/۲، ۱/۶، ۲ و گام موج ۸/۱، ۲/۲۵ و ۳ در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می دهد لوله های موجدار بیضوی محور متناوب نسبت به لوله دایرهای عملکرد گرمایی بهتری دارند. با کاهش گام موج و افزایش نسبت منظری، انتقال گرمای همرفتی افزایش می یابد. عدد ناسلت متوسط در نسبت منظری ۲ و گام موج ۸/۱ نسبت به لوله دایرهای در حالت سطح مقطع ثابت و قطر هیدرولیکی ثابت بررسی شده است. ده هندسه مختلف با دایره میملکرد گرمایی بهتری دارند. با کاهش گام موج و افزایش نسبت منظری، انتقال گرمای همرفتی افزایش می یابد. عدد ناسلت متوسط در نسبت منظری ۲ و گام موج ۸/۱ نسبت به لوله دایره ای در حالت سطح مقطع ثابت ۱۲۳ درصد افزایش می یابد. بالاترین ضریب کارایی برای لوله موجدار با سطح مقطع ثابت و ۲ و گام موج ۱/۵ نسبت به لوله دایره ای در حالت سطح مقطع ثابت ۲۵ درصد افزایش می یابد. بالاترین ضریب کارایی برای لوله موجدار با سطح مقطع ثابت و

واژههای کلیدی: لوله موجدار، گردآورنده خورشیدی، انتقال گرما، عدد ناسلت، مبادله کن گرما، شبیهسازی عددی.

Thermal Performance Evaluation of Alternating Axis Elliptical Corrugated Receiver Tube in Solar Collector

M. E. Khazaeli Z. Mehrdoost Department of Mechanical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran Department of Mechanical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Abstract

In this research, the effect of corrugated tube geometry with an alternating-axis elliptical cross-section to improve thermal performance of the solar collector absorber tube is investigated. The geometry of this tube, which is inspired by the vascular heat exchangers of opah fish, has an elliptical cross-section that changes continuously in the flow direction. The effect of wave pitch and aspect ratio of the corrugated tube is investigated for two cases including constant cross-section area and constant hydraulic diameter. Ten different geometries with aspect ratios of 1.2, 1.6 and 2 and wave pitches of 1.5, 2.25 and 3 are considered. Results show that the alternating-axis elliptical corrugated tubes have better thermal performance than circular tube. Convection heat transfer increases by decreasing wave pitch and increasing aspect ratio. The average Nusselt number increases by 123% for the aspect ratio of 2 and wave pitch of 1.5 compared to the circular tube in constant cross-section case. The highest performance coefficient is for the constant cross-section corrugated tube with aspect ratio of 1.6 and wave pitch of 1.5 with 36% better performance than the circular tube.

Keywords: Corrugated tube, Solar collector, Heat transfer, Nusselt number, Heat exchanger, Numerical simulation

۱- مقدمه

افزایش تقاضای انرژی باعث تسریع تحقیقات در مورد طرحهای جدید گردآورندههای خورشیدی برای استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر و پایدار شده است. امروزه گیرندههای سهموی خورشیدی که در تیروگاههای خورشیدی مورد استفاده قرار میگیرند، به دلیل عملکرد ترموهیدرولیکی بالا مورد توجه محققان قرار گرفتهاند [۳–۱]. این نوع گردآورندهها از تعدادی بازتابنده مقعر با سطح مقطع سهموی تشکیل شدهاند. بازتابندهها نور خورشید را در خط کانونی خود بازتابش و متمرکز میکنند. برای استفاده از گرمای تولید شده، لولهای حاوی یک سیال جاذب گرما در طول خط کانونی سهمی قرار میگیرد. لوله تحمل دمای بالا را دارد. سیال دریافتی کنده گرما که در لوله جریان ترده به نحوی طراحی شده است که توانایی جذب بیشترین انرژی و دارد، پس از عبور از لوله گیرنده وارد یک سیستم بسته شده و گرمای آن برای تولید بخار حهت چرخاندن توربین ژنراتور و تولید برق استفاده

و روشهای مختلفی برای افزایش عملکرد گرمایی این سیستمها پیشنهاد شده است [۷-۴]. یکی از روشهای بهبود عملکرد گرمایی گردآورندههای خورشیدی استفاده از آشوبگرها و مولدهای گردابی برای افزایش انتقال گرما است. بلوس و تزیوانیدیس عملکرد گرمایی یک گردآورنده خورشیدی را با استفاده از آشوبگرهای ستارهای شکل در لوله گیرنده بررسی کردند و نتیجه گرفتند تلفات گرمایی تا ۱۴ درصد کاهش یافته است [۸]. احمد و نتاراجان بهبود انتقال گرما در یک گردآورنده سهموی را با استفاده از حلقههای حلقوی داخلی به صورت عددی مطالعه کردند [۹]. آنها دریافتند استفاده از لوله گیرنده با انرژی را تا ۲/۳ درصد افزایش میدهد. پارلامیش و همکاران تأثیر استفاده از نوارهای مارپیچ در لوله گیرنده یک گردآورنده را بر انرژی، ایرژری و راندمان گرمایی به صورت تجربی بررسی کردند و دریافتند این نوع آشوبگرها راندمان گردآورنده را تا ۲۱ درصد افزایش میدهد

استفاده بهینه از گردآورندههای خورشیدی همواره مورد توجه بوده

^{*} نویسندگان مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: z.mehrdoost@iauahvaz.ac.ir تاریخ دریافت: ۲/۰۴/۲۹ تاریخ پذیرش: ۸۲۸،۸۲۸

[۱۰]. او و همکاران استفاده از آشوبگر نوار مخروطی در لوله گیرنده گردآورنده سهموی را به صورت عددی مطالعه کردند [۱۱]. نتایج نشان داد در مقایسه با لوله صاف، دمای دیواره لوله تا ۱۶۸ کلوین کاهش یافته و بازده تا ۳/۳ درصد بهبود مییابد. همچنین، تولید انتروپی و اتلاف اگزرژی به ترتیب ۴۹/۳ و ۴۵/۹ درصد کاهش می یابد. فرشاد و شیخ الاسلامی افزایش انتقال گرمای نانوسیال در گردآوردنده خورشیدی را با استفاده از نوار پیچشی چند کاناله در داخل لوله به صورت عددی بررسی کردند [۱۲]. نتایج نشان داد افرایش تعداد کانال، نسبت قطر و پیچش باعث افزایش ضریب انتقال گرما و افت فشار می شود. معین و همکاران اثر چهار هندسه مختلف شامل لوله دایروی مستقیم، لوله دایروی موج سینوسی، مجرای مستطیلی زیکزاکی و مجرای مستطیلی پلهای به همراه مبردهای نانوسیال و مواد تغییر فاز دهنده بر عملکرد پنلهای فتوولتایی-گرمایی بررسی کردند [۱۳]. نتایج نشان داد مجرای پلهای با افزایش راندمان گرمایی تا ۱۵٪ بهترین عملکرد را دارد. ابزاره و شیخ الاسلامی عملکرد گرمایی گردآورنده خورشیدی سهموی را با استفاده از نانوسیال و نوار تابیده بررسی کردند [۱۴]. نتایج بدست آمده نشان داد کاهش زاویه بال و افزایش تعداد دور نوار تابیده موجب افزایش آشفتگی و در نتیجه افزایش انتقال گرما و عدد ناسلت میشود. احمدی و همکاران بهبود عملکرد گرمایی هواگرمکنهای خورشیدی را با افزودن بافلهای ۷ شکل مطالعه کردند [۱۵]. پارامترهای هندسی شامل تعداد ردیف بافل، گام و ارتفاع بافلها در اعداد رینولدز مختلف بررسی شد. نتایج نشان داد با افزایش تعداد رديف و ارتفاع بافلها سرعت جريان عبورى افزايش يافته و ضريب عملکرد تا ۲۸٪ افزایش مییابد. پازارلی اوغلو و همکاران یک مطالعه عددی بر لوله گیرنده یک گردآورنده سهموی حاوی پرههای فرورفته بیضی شکل با نسبت قطرهای مختلف انجام دادند و نتیجه گرفتند راندمان گرمایی تا ۸۰ درصد در اعداد رینولدز پایین افزایش مییابد. [۱۶]. دزفولی زاده و همکاران تأثیر شکل هندسی سطح مقطع لوله گیرنده در گردآورنده سهموی و همچنین تأثیر قرار دادن یک نوع آشوبگر ترکیبی ابداعی در آن را بررسی کردند [۱۷]. نتایج بدست آمده نشان داد تغییر هندسی سطح مقطع لوله گیرنده و قرار دادن آشوبگر ترکیبی عملکرد گرمایی و راندمان انرژی را افزایش میدهد. یکی دیگر از روشهای بهبود عملکرد گرمایی، تغییر ساختار لولههای گیرنده مورد استفاده در گردآورندههای خورشیدی برای افزایش انتقال گرما است [۱۸]. وانگ و همکاران تأثیر استفاده از لولههای گیرنده موجدار محدب متقارن و نامتقارن را بر عملکرد گردآورندههای سهموی مطالعه کردند و نتیجه گرفتند عملکرد گرمایی نسبت به لولههای گیرنده صاف و هموار متداول در دو حالت به ترتیب ۱۳۵ درصد و ۱۴۵ درصد افزایش می یابد [۱۹]. هوانگ و همکاران عملکرد گرمایی لولههای گیرنده فرورفته را به صورت عددی مطالعه کردند و دریافتند در لولههای فرورفته با عمق ۷ میلیمتر عدد ناسلت تا ۳۴ درصد و برای عمق کمتر ۱ میلیمتر تا ۲۸ درصد افزایش می یابد [۲۰]. گونگ و همکاران برای افزایش انتقال گرما و کاهش اختلاف دمای محیطی، آرایهای از پرههای میخی در سمت پايين ديواره لوله جاذب اضافه كردند و نتيجه گرفتند عدد ناسلت متوسط تا ۹ درصد افزایش می یابد [۲۱]. بیتام و همکاران یک لوله جاذب سینوسی شکل پیشنهاد دادند و نشان دادند عدد ناسلت تا ۶۳ درصد افزایش یافته و ضریب اصطکاک کمتر از ۴۰ درصد بیشتر

می شود که منجر به افزایش معیار ارزیابی عملکرد تا ۱۳۵ درصد خواهد شد [۲۱]. تیروناوکاراسو و چرالاتان راندمان انرژی و اگزرژی گردآورندههای سهموی با لولههای گیرنده مارپیچی را مطالعه کردند و نتیجه گرفتند راندمان گرمایی با لولههای مارپیچی بیش از ۵۰ درصد است [٢٣]. اولفیان و همکاران به صورت عددی اثر مواد تغییر فاز دهنده در یک گردآورنده خورشیدی مجهز به لولههای مارپیچ U شکل را بررسی کردند [۲۴]. نتایج آنها نشان داد که استفاده از لولههای مارپیچی دندانهدار U شکل انتقال گرما را تا ۲۱ درصد نسبت به لولههای مارپیچی ساده افزایش میدهد. شی و همکاران استفاده از لولههای گیرنده محدب مارپیچی در گردآورندههای سهموی را پیشنهاد دادند و نتیجه گرفتند راندمان کلی انتقال گرما نسبت به لولههای ساده متداول تا ۳۴ درصد افزایش می یابد [۲۵]. هو و همکاران برای کاهش اتلاف گرمای تابشی، یک هندسه جدید برای لوله گیرنده گردآورنده سهموی با سطوح بالایی و پایینی صاف با زوایای مختلف بررسی کردند و دریافتند راندمان گرمایی لوله پیشنهادی با زاویه بهینه تا ۴/۶ درصد بهبود می یابد [۲۶]. سانتوش و همکاران استفاده از لوله جاذب بیضوی در گردآورندههای سهموی را به صورت عددی مطالعه کردند و نتیجه گرفتند سطح مقطع بیضوی با افزایش دما به میزان ۴۲ درصد بهتر از لوله دایرهای عمل می کند [۲۷].

مطالعه پژوهشهای پیشین نشان می دهد استفاده از آشوبگرها یا تغییر ساختار لولههای گیرنده روشهای موثری برای افزایش عملکرد گرمایی گردآورندههای خورشیدی هستند. در این پژوهش تأثیر استفاده از لوله گیرنده موجدار با سطح مقطع بیضوی محور متناوب به صورت عددی بررسی می شود که این هندسه تاکنون در گردآورندههای خورشیدی بررسی نشده است. هندسه این لوله که از مبادله کن گرمایی عروقی موجود در ماهی اوپا الهام گرفته شده است، در هر دو جهت عرضی و حلقوی موجدار شده است [۲۸]. تغییر پیوسته پروفیل سطح امزایش انتقال گرما می شود، در حالی که افت فشار کمتر افزایش پیدا افزایش انتقال گرما می شود، در حالی که افت فشار کمتر افزایش پیدا می کند. تأثیر پارامترهای هندسی لوله موجدار شامل گام موج و نسبت میکند. تأثیر پارامترهای هندسی لوله موجدار شامل گام موج و نسبت میکرد گرمایی لوله گیرنده بررسی و نتایج به صورت پارامترهای عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و ضریب کارایی با لوله صاف دایرهای مقایسه ناسلت، خریب اصطکاک و ضریب کارایی با لوله صاف دایره ای مقایسه

۲- معادلات حاکم

(1)

معادلات حاکم بر جریان سیال تراکمناپذیر درون لوله گیرنده شامل معادله بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی به صورت زیر بیان میشوند [۲۹]:

$$\frac{\partial \mathbf{u}_i}{\partial \mathbf{x}_i} = 0$$

$$\rho \frac{\partial (\mathbf{u}_{i} \mathbf{u}_{j})}{\partial x_{i}} = -\frac{\partial P}{\partial x_{i}} +$$
(7)

$$\frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[(\mu + \mu_{t})(\frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial u_{j}}{\partial x_{i}} - \frac{2}{3}\frac{\partial u_{l}}{\partial x_{l}}\delta_{ij}) \right] = 0$$

$$\rho \frac{\partial (C_p T u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[C_p \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] = 0$$
 (7)

مدل آشفتگی ε − k برای محاسبات جریان آشفته به کار گرفته شده است که با معادلات (۴) و (۵) بیان میشود:

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$-\rho \epsilon = 0$$
(*)

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon \mathbf{u}_{i})}{\partial x_{i}} = \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left(\mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_{i}} + \frac{\varepsilon c_{1}}{k} \mu_{t} \left(\frac{\partial \mathbf{u}_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial \mathbf{u}_{j}}{\partial x_{i}} \right)$$
$$-c_{2}\rho \frac{\varepsilon^{2}}{k} = 0$$
(Δ)

لزجت آشفتگی µ_t به صورت زیر تعریف میشود:

$$\mu_t = \frac{C_{\mu}\rho k^2}{\epsilon} \tag{9}$$

در معادلات فوق ۸، به ترتیب چگالی، k، є، μ، C_p, p، T، u، ρ, به ترتیب چگالی، سرعت، دما، فشار، گرمای ویژه، لزجت سیال، اتلاف آشفتگی و انرژی $C_{\mu} \circ_{\epsilon} \cdot \sigma_{k} \cdot c_{2} \cdot c_{1}$ ، شفتگی، $\sigma_{\epsilon} \cdot \sigma_{k} \cdot c_{2} \cdot c_{1} \circ \sigma_{\epsilon} - \sigma_{\epsilon} \circ \eta$ مقادیر ثابت هستند، ۱۰ c_µ = ۰/۰۹ ، ۱ c₂ = /۹۲، ۱ c₁ = /۴۴ $\sigma_{\epsilon} = 7$ و $\sigma_{k} = 3$

به منظور ارزیابی ویژگیهای ترموهیدرولیکی لوله گیرنده، پارامترهای عدد ناسلت، ضریب اصطکاک، عدد رینولدز و ضریب کارایی با استفاده از معادلات (۲) تا (۱۰) تعریف شدهاند.

$$Nu = \frac{hD_h}{K_f}$$
(Y)

$$f = \frac{\Delta P D_h}{\frac{1}{2} \rho V^2 L}$$
(A)

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu}$$
(9)

$$PEC = \frac{Nu / Nu_s}{(f / f_s)^{1/3}}$$
(1.)

در معادلات فوق، Nu عدد ناسلت، h ضریب انتقال گرما، D_h قطر هیدرولیکی، K_f رسانندگی گرمایی آب، f ضریب اصطکاک، PE افت فشار در طول لوله، L طول لوله گیرنده، ، Re عدد رینولدر، GE ضریب کارایی و زیرنویس s بیانگر لوله گیرنده صاف است.

۳- هندسه لوله موجدار بيضوى محور متناوب

در این پژوهش برای لوله گیرنده گردآورنده خورشیدی سهموی یک هندسه موجدار با سطح مقطع بیضی درنظر گرفته شده است. سطح لوله در هر دو جهت عرضی و حلقوی موجدار شده است به طوری که انتقال بین پروفیلهای مقطعی به طور پیوسته در جهت جریان رخ میدهد. این تغییر مقطع پیوسته باعث ایجاد اختلال در لایه مرزی گرمایی و افزایش انتقال گرما میشود. شکل ۱ هندسه یک لوله موجدار بیضوی محور متناوب را نشان میدهد.

شکل ۱- لوله موجدار بیضوی محور متناوب

لوله موجدار بیضوی محور متناوب در دو حالت سطح مقطع ثابت و قطر هیدرولیکی ثابت بررسی شده است. در حالت سطح مقطع ثابت، سرعت متوسط سیال ثابت است در حالی که امکان تغییر افت فشار در امتداد جریان وجود دارد. در حالتی که قطر هیدرولیکی ثابت نگه داشته میشود، سطح مقطع و در نتیجه سرعت متوسط سیال در جهت جریان میتواند تغییر کند. هندسه لوله موجدار بیضوی محور متناوب برای سطح مقطع ثابت و قطر هیدرولیکی ثابت به ترتیب با معادلات (۱۱) و (۱۲) تعریف میشوند:

$$\begin{cases} x = R \times AR^{\frac{\sin\left(\frac{2\pi}{k}z\right)}{z}} \\ y = R \times AR^{\frac{-\sin\left(\frac{2\pi}{k}z\right)}{z}} \end{cases}$$
(11)

$$\begin{cases} y = R \times AR & z \\ x = \frac{R}{2}AR^{\sin\left(\frac{2\pi}{k}z\right)} + \frac{R}{2} \\ y = \frac{R}{2}AR^{-\sin\left(\frac{2\pi}{k}z\right)} + \frac{R}{2} \end{cases}$$
(17)

در معادلات فوق، R شعاع یک لوله مستقیم معادل، AR نسبت منظری بین محورهای x و y (نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک سطح مقطع بیضی)، z محور مختصات در جهت طول لوله و k گام موج است.

در این پژوهش برای بررسی تأثیر هندسه موجدار دوگانه بیضوی بر عملکرد گرمایی لوله گیرنده گردآورنده، ۱۰ حالت درنظر گرفته شده است: پنج حالت برای سطح مقطع ثابت و پنج حالت برای قطر هیدرولیکی ثابت با نسبت منظری ۱/۲، ۱/۶، ۲ و گام موج ۱/۵، ۲/۲۵ و۳. در شکلهای ۲ و ۳ هندسههای به کار گرفته شده برای لوله گیرنده در این پژوهش نمایش داده شده است. طول لوله ۹۰۰ میلی متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- لولههای موجدار بیضوی محور متناوب در نسبت منظری و گامهای موج مختلف (سطح مقطع ثابت)

۴- شرایط مرزی و روش حل عددی

در مرز ورودی لوله گیرنده سرعت و دما ثابت در نظر گرفته میشوند. دمای ورودی ۳۰۰ کلوین و عدد رینولدز از ۵۰۰ تا ۱۶۰۰۰ تغییر می کند. در مرز خروجی لوله فرض کاملا توسعه یافته استفاده

شده است. در سطح داخلی لوله گیرنده شرط عدم لغزش برای سرعت و در سطح بیرونی آن شرط مرزی شار گرمایی یکنواخت W/m² اعمال شده است.

برای شبیهسازی جریان و انتقال گرما در لوله گیرنده از نرمافزار تجاری Ansys Fluent استفاده شده است. معادلات حاکم بر مسئله بر اساس روش حجم محدود حل شدهاند. جملات همرفتی در معادلات مومنتوم و انرژی با استفاده از روش بالادست مرتبه دوم گسستهسازی شدهاند. برای کوپل فشار و سرعت از الگوریتم SIMPLE استفاده شده



۵- مطالعه شبکه و اعتبارسنجی

شبکه تولید شده در دامنه محاسباتی از نوع بیسازمان و در نواحی نزدیک به دیواره لوله از المانهای لایه مرزی استفاده شده است. به منظور بررسی استقلال نتایج حل عددی از اندازه شبکه محاسباتی، عدد ناسلت برای هفت شبکه با تعداد سلولهای مختلف محاسبه شده است. عدد ناسلت محاسبه شده مربوط به لوله موجدار بیضوی محور متناوب با نسبت منظری ۱/۲ و گام موج ۱/۵ در حالت سطح مقطع ثابت است. شکل ۴ تغییرات عدد ناسلت را بر حسب تعداد سلولهای شبکه نشان میدهد. با توجه به نمودار، از شبکه ششم به بعد تغییر قابل ملاحظهای در مقدار عدد ناسلت مشاهده نمی شود. بنابراین شبکه ششم با تعداد در مقدار عدد ناسلت مشاهده است. شکل ۵ شبکه محاسباتی تولیده شده در لوله گیرنده را نشان می دهد.

برای اعتبارسنجی عددی، لوله گیرنده با سطح مقطع دایرهای و سیال آب در نظر گفته شده است و عدد ناسلت متوسط حاصل از شبیه سازی عددی با رابطه هاوسن [۳۰] مقایسه شده است:

$$Nu = 3.66 + \frac{0.0668((D_h / L)RePr)}{1 + 0.04((D_h / L)RePr)^{2/3}}$$
(1°)

شکل ۶ مقایسه عدد ناسلت متوسط حاصل از شبیه سازی عددی و رابطه هاوسن را در اعداد رینولدز مختلف نشان میدهد. بیشترین اختلاف عدد ناسلت بدست آمده از شبیه سازی و رابطه هاوسن ۷ درصد و میانگین خطا ۶ درصد است.



شکل ۴- نتایج بررسی استقلال حل عددی از اندازه شبکه محاسباتی



شکل ۵- شبکه محاسباتی تولیده شده در لوله موجدار بیضوی محور متناوب



شکل ۶- عدد ناسلت بدست آمده از شبیهسازی عددی و رابطه هاوسن

۶- نتایج شبیهسازی عددی

در این بخش نتایج بدست آمده از حل عددی جریان سیال درون لوله گیرنده با هندسه موجدار بیضوی محور متناوب در دو حالت سطح مقطع ثابت و قطر هیدرولیکی ثابت ارائه شده و تأثیر گام موج و نسبت منظری بر عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و ضریب کارایی بررسی شده است.

۱-۶- بررسی تأثیر گام موج

به منظور بررسی تأثیر هندسه موجدار بیضوی محور متناوب بر عملکرد گرمایی لوله گیرنده، سه گام موج ۱/۵، ۲/۲۵ و ۳ با نسبت منظری ۱/۶ در نظر گرفته شده و نتایج با لوله صاف دایرهای مقایسه شده است.

با تغییر گام موج میزان آشفتگی و افت فشار جریان تغییر خواهد کرد. با کاهش گام موج، سد مقاومتی جریان بیشتر شده و اختلاط جریان افزایش مییابد. لایههای سیال در حالت اندرکنش با یکدیگر

قرار گرفته و میزان آشفتگی بیشتر و خواص جریان تغییرات بیشتری پیدا خواهند کرد. هر چه میزان گام موج بیشتر باشد میزان صافی سطح بیشتر خواهد شد و جریان به راحتی در مسیر لوله عبور خواهد کرد و میزان انحنا لوله نیز کمتر و پیچیدگی جریان نیز کمتر میشود. شد و افت فشاط سکون کمتری در مسیر جریان سیال تشکیل خواهد شد و افت فشار کاهش مییابد. در شکل ۷ تأثیر گام موج بر ضریب اصطکاک لوله در دو حالت سطح مقطع ثابت و قطر هیدرولیکی ثابت نمایش داده شده است. با افزایش گام موج از ۱/۵ تا ۳، ضریب اصطکاک در سطح مقطع ثابت به طور متوسط حدود ۵۴ درصد و در قطر هیدرولیکی ثابت حدود ۵۰ درصد کاهش مییابد. همچنین در مقایسه با لوله دایرهای، ضریب اصطکاک به طور متوسط در گام موج ۱/۵ در دو حالت سطح مقطع و قطر هیدرولیکی ثابت به ترتیب ۲۱۸ درصد و ۱۹۰ درصد افزایش پیدا کرده است.

در شکل ۸ توزیع دما در سطح لوله گیرنده برای گامهای موج مختلف به نمایش در آمده است. با توجه به کانتورها با افزایش گام موج میزان انتقال گرما همرفتی جریان کاهش و دمای بیشینه بر روی سطح افزایش یافته است که منجر به افزایش تنش گرمایی خواهد شد.



(الف) سطح مقطع ثابت (ب) قطر هیدرولیکی ثابت

شکل ۹ تأثیر گام موج بر دمای میانگین سطح لوله گیرنده را در دو حالت سطح مقطع ثابت و قطر هیدرولیکی ثابت نشان میدهد. با کاهش گام موج از ۳ تا ۱/۵، دمای میانگین سطح در حالت سطح مقطع ثابت به طور متوسط ۲ درجه و در حالت قطر هیدرولیکی ثابت به طور متوسط ۱/۹ درجه کاهش یافته است. همچنین، دمای میانگین

سطح در گام موج ۱/۵ نسبت به لوله مستقیم در دو حالت سطح مقطع و قطر هیدرولیکی ثابت به ترتیب ۳/۲ درجه و ۲/۹ درجه کاهش یافته است.



شکل ۸- توزیع دما در سطح لوله گیرنده برای گامهای موج مختلف

کاهش گام موج باعث افزایش سرعت انتقال ممنتوم، انرژی و گرما می شود. همچنین گرادیان دما شدیدتر شده که خود باعث افزایش ضریب انتقال گرمای همرفتی خواهد شد. با کاهش نسبت گام، سیال دارای نوسانات رفتاری بیشتری در الگوی حرکتی خود خواهد شد و همین تغییر رفتار رسانایی گرمایی موثر را افزایش می دهد و باعث بهبود رفتار گرمایی سیال خواهد شد. در شکل ۱۰ نمودار تأثیر گام موج بر عدد ناسلت متوسط، در دو حالت سطح مقطع ثابت و قطر هدرولیکی ثابت نمایش داده شده است. با کاهش گام موج از ۳ تا ۱/۵، عدد ناسلت متوسط در حالت سطح مقطع ثابت به طور متوسط حدود یافته است. همچنین، عدد ناسلت متوسط برای لوله موجدار دوبل یافته است. همچنین، عدد ناسلت متوسط برای لوله موجدار دوبل بیضوی در نسبت منظری ۱/۶ و گام موج ۱/۵ نسبت به لوله مستقیم در بیضوی در نسبت منظری ۱/۶ و گام موج ۸/۵ نسبت به لوله مستقیم در دو حالت سطح مقطع و قطر هیدرولیکی ثابت به ترتیب ۹۹ درصد و در حالت سطح مقطع و قطر هیدرولیکی ثابت به ترتیب ۹۹ درصد و

نتایج بررسی تأثیر گام موج بر ضریب کارایی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با افزایش عدد R ضریب کارایی ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است. این روند نشان دهنده آن است که در اعداد رینولدز بالاتر مکانیزم انتقال گرما ضعیفتر از اصطکاک عمل کرده است. در عدد رینولدز یکسان، در هر دو حالت سطح مقطع ثابت و قطر هیدرولیکی ثابت، با کاهش گام موج از ۳ تا ۱/۵، ضریب کارایی افزایش یافته است. افزایش متوسط ضریب کارایی با کاهش گام در سطح مقطع ثابت حدود ۲۲ درصد و در قطر هیدرولیکی ثابت حدود ۲۰ درصد است. همچنین لوله موجدار بیضوی محور متناوب با سطح مقطع ثابت ضریب کارایی بالاتری نسبت به در قطر هیدرولیکی ثابت دارد. بالاترین ضریب کارایی در محدوده اعداد رینولدز مورد بررسی برای لوله موجدار بیضوی محور متناوب با سطح مقطع ثابت در نسبت منظری ۱/۶ و گام موج ۱/۵ برابر با ۱/۴۰ است.





۲-۶ بررسی تأثیر نسبت منظری

در این بخش اثر نسبت منظری لوله موجدار بیضوی محور متناوب بر عملکرد گرمایی بررسی شده است. بدین منظور، سه نسبت منظری ۱/۲، ۱/۶ و ۲ با گام موج ۱/۵ در نظر گرفته شده و نتایج با لوله دایرهای مقایسه شده است.

با افزایش نسبت منظری میزان انحنا در لوله افزایش یافته و درنتیجه پیچش جریان نیز بیشتر خواهد شد. بدین ترتیب نقاط سکون زیادتری تشکیل شده و افت فشار نیز افزایش خواهد یافت. در شکل ۱۲ تأثیر نسبت منظری بر ضریب اصطکاک لوله در دو حالت سطح مقطع ثابت و قطر هیدرولیکی ثابت نمایش داده شده است. با افزایش نسبت منظری از ۱/۲ تا ۲، ضریب اصطکاک در سطح مقطع ثابت به طور متوسط حدود ۳۴۰ درصد و در قطر هیدرولیکی ثابت حدود ۲۹۰ مرصد افزایش مییابد. همچنین در مقایسه با لوله مستقیم، ضریب اصطکاک در نسبت منظری ۲ در دو حالت سطح مقطع و قطر هیدرولیکی ثابت به طور متوسط به ترتیب ۴۸۰ درصد و ۳۸۰ درصد افزایش اصطکاک بیشتر از گام موج است.

در شکل ۱۳ توزیع دما در سطح لوله گیرنده برای نسبتهای منظری مختلف نشان داده شده است. مشاهده می شود با افزایش نسبت منظری میزان دمای بیشینه کاهش یافته است. با افزایش نسبت منظری میزان کشیدگی سطح بیشتر شده و الگوی جریان دارای حرکت گردابی و پیچشی خواهد شد و درنتیجه انتقال گرمای همرفتی بیشتر شده و دمای بیشینه بر روی سطح کاهش مییابد.

شکل ۱۴ تأثیر نسبت منظری بر دمای میانگین سطح لوله گیرنده را در دو حالت سطح مقطع ثابت و قطر هیدرولیکی ثابت نشان می دهد. در هر دو حالت با افزایش نسبت منظری، دمای میانگین سطح کاهش یافته است. زیرا آشفتگی سیال بیشتر شده و برخورد سیال به سطح و درنتیجه انتقال گرمای همرفتی افزایش یافته است. با افزایش نسبت منظری از ۲/۱ تا ۲، دمای میانگین سطح در حالت سطح مقطع ثابت به طور متوسط ۲/۲ درجه و در حالت قطر هیدرولیکی ثابت به طور متوسط ۲/۷ درجه کاهش یافته است. همچنین، دمای میانگین سطح در نسبت منظری ۲ نسبت به لوله مستقیم در دو حالت سطح مقطع و قطر هیدرولیکی ثابت به ترتیب ۳/۶ درجه و ۲/۳ درجه کاهش یافته است.



شکل ۱۲- تأثیر نسبت منظری بر ضریب اصطکاک (الف) سطح مقطع ثابت (ب) قطر هیدرولیکی ثابت



شکل ۱۳- توزیع دما در سطح لوله گیرنده برای نسبتهای منظری مختلف

در شکل ۱۵ نمودار تأثیر نسبت منظری بر عدد ناسلت متوسط، در دو حالت سطح مقطع ثابت و قطر هیدرولیکی ثابت نمایش داده شده است. با افزایش نسبت منظری، آشفتگی سیال در اثر حرکت گردابهای و پیچشی افزایش یافته و برخورد سیال با سطح لوله و در نتیجه انتقال گرما بیشتر خواهد شد. با افزایش نسبت منظری از ۱/۲ تا ۲، عدد ناسلت متوسط در حالت سطح مقطع ثابت به طور متوسط حدود ۵۹ درصد و در حالت قطر هیدرولیکی ثابت حدود ۸۸ درصد افزایش یافته است. همچنین، عدد ناسلت متوسط در نسبت منظری ۲ و گام موج ۱۸۸ نسبت به لوله مستقیم در دو حالت سطح مقطع و قطر هیدرولیکی ثابت به ترتیب ۱۲۳ درصد و ۱۰۵ درصد افزایش پیدا کرده است.



شکل ۱۴– تأثیر نسبت منظری بر دمای میانگین سطح لوله (الف) سطح مقطع ثابت (ب) قطر هیدرولیکی ثابت

نتایج بررسی تأثیر نسبت منظری بر ضریب کارایی در شکل ۱۶ نشان داده شده است. در هر دو حالت سطح مقطع ثابت و قطر هیدرولیکی ثابت، نسبت منظری ۱/۶ ضریب کارایی بالاتری دارد. نتایج نشان میدهد لوله موجدار بیضوی محور متناوب در نسبت منظری ۱/۶ و گام موج ۱/۵ به طور متوسط ۳۶ درصد در حالت سطح مقطع ثابت و ۳۲ درصد در حالت قطر هیدرولیکی ثابت راندمان بالاتری نسبت به لوله دایرهای دارد.

به منظور بررسی هندسه موجدار بیضوی محور متناوب بر عملکرد گرمایی لوله گیرنده در اعداد رینولدز بالاتر، برای حالت سطح مقطع ثابت و گام موج ۱/۵، شبیهسازی عددی انجام شده و نتایج حاصل از آن در ادامه ارائه شده است.

در شکل ۱۷ تأثیر نسبت منظری بر ضریب اصطکاک لوله در حالت

سطح مقطع ثابت برای محدود اعداد رینولدز ۴۰۰۰ تا ۱۶۰۰۰ نشان داده شده است. با افزایش نسبت منظری از ۱/۲ تا ۲، ضریب به طور متوسط حدود ۴۶۰ درصد افزایش مییابد. همچنین در مقایسه با لوله دایرهای، ضریب اصطکاک در نسبت منظری ۲ به طور متوسط ۶۴۰ درصد افزایش پیدا کرده است.

تأثیر نسبت منظری بر دمای میانگین سطح لوله گیرنده در شکل ۱۸ نمایش داده شده است. با افزایش نسبت منظری از ۱/۲ تا ۲، دمای میانگین سطح به طور متوسط ۰/۳۵ درجه کاهش یافته است. همچنین، دمای میانگین سطح در نسبت منظری ۲ نسبت به لوله دایرهای ۰/۴۸ درجه کاهش یافته است. بنابراین، در اعداد رینولدز بالاتر روند تغییرات دمای میانگین سطح کمتر شده است.

در شکل ۱۹ نمودار تأثیر نسبت منظری بر عدد ناسلت متوسط نشان داده شده است. با افزایش نسبت منظری از ۱/۲ تا ۲، عدد ناسلت متوسط به طور متوسط حدود ۵۵ درصد افزایش یافته است. همچنین، عدد ناسلت متوسط در نسبت منظری ۲ نسبت به لوله دایرهای ۷۴ درصد افزایش پیدا کرده است.

تغییر ضریب کارایی با نسبت منظری در محدوده اعداد رینولدز بالاتر در شکل ۲۰ نشان داده شده است. همانظور که مشاهده می شود، با افزایش عدد رینولدز ضریب کارایی لوله موجدار بیضوی محور متناوب نسبت به لوله مستقیم کاهش پیدا کرده است. با توجه به نمودار، لوله موجدار با نسبت منظری ۱/۲ و گام موج ۱/۵ در محدوده اعداد رینولدز بالاتر ضریب کارایی بهتری دارد.



شکل ۱۵- تأثیر نسبت منظری بر عدد ناسلت متوسط (الف) سطح مقطع ثابت (ب) قطر هیدرولیکی ثابت



شکل ۱۶- تأثیر نسبت منظری بر ضریب کارایی (الف) سطح مقطع ثابت (ب) قطر هیدرولیکی ثابت



شکل ۱۷- تأثیر نسبت منظری بر ضریب اصطکاک در اعداد رینولدز بالا (سطح مقطع ثابت)



شکل ۱۸- تأثیر نسبت منظری بر دمای میانگین سطح لوله در اعداد رینولدز بالا (سطح مقطع ثابت)



شکل ۱۹- تأثیر نسبت منظری بر عدد ناسلت متوسط در اعداد رینولدز بالا (سطح مقطع ثابت)



شکل ۲۰- تأثیر نسبت منظری بر ضریب کارایی در اعداد رینولدز بالا (سطح مقطع ثابت)

۷- نتیجهگیری

در این پژوهش تأثیر هندسه موجدار بیضوی محور متناوب بر عملکرد لوله گیرنده گردآورنده خورشیدی با استفاده از شبیهسازی عددی بررسی شده است. برای لوله موجدار بیضوی محور متناوب، دو حالت سطح مقطع ثابت و قطر هیدرولیکی ثابت درنظر گرفته شد. تأثیر پارامترهای هندسی شامل گام موج و نسبت منظری بر عملکرد گرمایی لوله گیرنده به صورت پارامترهای عدد ناسلت متوسط و ضریب کارایی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج شبیه سازی عددی نشان میدهد

لولههای موجدار بیضوی محور متناوب نسبت به لوله صاف با مقطع دایره به طور قابل توجهی عملکرد گرمایی بهتری دارند. در لولههای موجدار بيضوى با گام موج كمتر، انتقال گرماى همرفتى افزايش يافته و ضریب کارایی بالاتری دارند. با کاهش گام موج از ۳ تا ۱/۵، عدد ناسلت متوسط در حالت سطح مقطع ثابت به طور متوسط ۵۸ درصد افزایش يافته است. همچنين، عدد ناسلت متوسط براى لوله موجدار دوبل بیضوی در نسبت منظری ۱/۶ و گام موج ۱/۵ نسبت به لوله مستقیم در حالت سطح مقطع ثابت ۹۹ درصد افزایش پیدا کرده است. افزایش نسبت منظری در لولههای موجدار بیضوی محور متناوب هرچند باعث افزایش انتقال گرما می شود، از طرفی افزایش افت فشار و ضریب اصطکاک حاصل از آن منجر به کاهش ضریب کارایی خواهد شد. با افزایش نسبت منظری از ۱/۲ تا ۲، عدد ناسلت متوسط در حالت قطر هیدرولیکی ثابت حدود ۸۸ درصد افزایش یافته است. همچنین، عدد ناسلت متوسط در نسبت منظری ۲ و گام موج ۱/۵ نسبت به لوله مستقیم در حالت سطح مقطع ثابت ۱۲۳ درصد افزایش پیدا کرده است. در محدوده اعداد رینولدز پایین مورد بررسی در این پژوهش، بالاترین ضریب کارایی برای لوله موجدار بیضوی محور متناوب با سطح مقطع ثابت و نسبت منظری ۱/۶ و گام موج ۱/۵ است که نسبت به لوله دایرهای به طور متوسط ۳۶ درصد عملکرد بهتری دارد. در اعداد رینولدز بالاتر، نسبت منظری کمتر (۱/۲) ضریب کارایی بهتری را نشان میدهد. در پایان می توان نتیجه گرفت هندسه موجدار بیضوی محور متناوب با افزایش قابل توجه انتقال گرما در مقابل افت فشار قابل قبول، برای بهبود عملکرد گرمایی لولههای گیرنده گردآورندههای خورشیدی مي تواند مورد مطالعه و بررسي بيشتري قرار بگيرد.

۸- نمادها

	علائم انگلیسی
نسبت منظرى	AR
گرمای ویژه (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	C_p
قطر (m)	D
ضريب اصطكاك	f
ضریب انتقال گرمای همرفتی (^{۱-} (W.(m ² K))	h
رسانندگی گرمایی (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Κ
انرژی جنبشی آشفتگی (m².s ⁻²)	k
طول (m)	L
عدد ناسلت	Nu
فشار (Pa)	р
ضریب کارایی	PEC
عدد پرانتل	Pr
شعاع (m)	R
عدد رينولدز	Re
دما (K)	Т
سرعت سیال (m.s ⁻¹)	u
مختصات دکارتی (m)	x, y, z
	علائم يونانى
اتلاف آشفتگی (m².s ⁻³)	3
لزجت دینامیکی سیال (kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)	μ

[۱۵] احمدی ع، رحیمـی م، پهملـی ی. بهبـود عملکـرد حرارتـی یـک کانـال

مستطیلی به کمک آرایش مختلف بافلهای V شکل. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۴۰۱، د. ۵۲، ش. ۲، ص. ۵۹–۶۸.

[16] Pazarlıoğlu HK, Ekiciler R, Arslan K, Mohammed NAM. Energetic, and entropy production evaluations of parabolic trough collector retrofitted with elliptical dimples receiver tube filled with hybrid nanofluid. Applied Thermal Engineering. 2023;223:120004.

- [17] Dezfulizadeh A, Aghaei A, Sheikhzadeh GA. Comprehensive 3D analyses of a parabolic trough collector equipped with an innovative combined twisted turbulator. Engineering Analysis with Boundary Elements. 2023;150:507-527.
- [18] Gholipour S, Afrand M, Kalbasi R. Improving the efficiency of vacuum tube collectors using new absorbent tubes arrangement: introducing helical coil and spiral tube adsorbent tubes. Renewable Energy. 2020;151:772-781.
- [19] Wang FQ, Lai QZ, Han HZ, Tan JY. Parabolic trough receiver with corrugated tube for improving heat transfer and thermal deformation characteristics. Applied Energy. 2016;164:411-424.
- [20] Huang Z, Li ZY, Yu GL, Tao WQ. Numerical investigations on fully-developed mixed turbulent convection in dimpled parabolic trough receiver tubes. Applied Thermal Engineering. 2017;114:1287-1299.
- [21] Gong X, Wang F, Wang H, Tan J, Lai Q, Han H. Heat transfer enhancement analysis of tube receiver for parabolic trough solar collector with pin fin arrays inserting. Solar Energy. 2017;144:185-202,.
- [22] Bitam EW, Demagh Y, Hachicha AA, Benmoussa H, Kabar Y. Numerical investigation of a novel sinusoidal tube receiver for parabolic trough technology. Applied Energy. 2018;218:494-510,.
- [23] Thirunavukkarasu V, Cheralathan M. An experimental study on energy and exergy performance of a spiral tube receiver for solar parabolic dish concentrator. Energy. 2020;192:116635.
- [24] Olfian H, Ajarostaghi SSM, Farhadi M, Ramiar A. Melting and solidification processes of phase change material in evacuated tube solar collector with U-shaped spirally corrugated tube. Applied Thermal Engineering. 2021;182:116149.
- [25] Shi X, Zhao X, Wang F, Cheng Z, Dong Y, Xu J. Improving overall heat transfer performance of parabolic trough solar receiver by helically convex absorber tube. Applied Thermal Engineering. 2022;213:118690.
- [26] Hu T, Kwan TH, Zhang H, Wang Q, Pei G. Thermal performance investigation of the newly shaped vacuum tubes of parabolic trough collector system. Energy. 2023;278:127802.
- [27] Santosh R, Kumaresan G, Pon Pavithiran CK, Mathu P, Velraj R. Effect of geometric variation and solar flux distribution on performance enhancement of absorber tube thermal characteristics for compound parabolic collectors. Renewable Energy. 2023;210:671-686.
- [28] Navickaite K, Mocerino A, Cattani L, Bozzoli F. Enhanced heat transfer in tubes based on vascular heat exchangers in fish: experimental investigation. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019;137:192-203.
- [29] Zeynalpour S, Mehrdoost Z. Numerical study of flow and heat transfer in cavity receiver tube of a solar power tower with different inserts under non-uniform heat flux. Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics. 2023;35:17-36.
- [30] Incropera FP, DeWitt DP, Bergman TL, Lavine AS. Fundamentals of heat and mass transfer. 6th ed., John Wiley & Sons, United States of America, 2007.

۹- مراجع

- [۱] اشرفی م، محمدیون ح، دیبایی م، محمدیون م. بهبود عملکرد گردآور خورشیدی و افزایش بهرهوری انرژی خورشید با بکارگیری مواد تغییر فازی. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز.۱۴۰۰، د. ۵۱، ش. ۱، ص. ۲۹-۳۸.
- [۲] عباسیان پیرنیا ۱، میرزایی ۱، عباسعلیزاده م. بررسی عددی جریان و انتقال گرما در گردآور خورشیدی سهموی SEGS LS2 تخت شرایط ورودی پلهای-سینوسی. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۴۰۰، د. ۵۱، ش. ۱، م. ۱۴۲–۱۴۲.
- [۳] محمدصادقی آزاد م، رفیعی ا. بررسی عددی اثر استفاده از نانوسیال به عنوان سیال واسط بر عملکرد گرمایشی سیستم گردآور خورشیدی سهموی مرکب بر اساس قطر بهینه لوله داخلی. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۳۹۹، د. ۵۰، ش. ۱، ص. ۲۱۵–۲۲۱.
- [4] Abbasian Arani AA, Memarzadeh A. Nanofluid multimorphology effect on dual-fluid sinusoidal-wavy grooved absorber tube parabolic trough solar collector performances enhancement based on experimental data. International Communications in Heat and Mass Transfer 2021;123:105201.
- [5] Saffarian MR, Moravej M, Doranehgard MH. Heat transfer enhancement in a flat plate solar collector with different flow path shapes using nanofluid. Renewable Energy. 2020;146:2316-2329.

[۶] فرهادی ر، تاکی م، رهنما م. تعیین زاویه بهینه برای گردآورهای

خورشیدی صفحه تخت و صفحات فتوولتایی در استان خوزستان.

مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۴۰۲، د. ۵۳، ش. ۳، ص. ۱۵۲–۱۶۲.

[۲] کریمی س، ترابی ا، قاسمی ب، رئیسی ا. اثر نانوسیال های مختلف با

خواص تابع دما بر راندمان گرمایی دریافت کننده خورشـیدی. مهندسـی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۴۰۲، د. ۵۳ ش. ۱، ص. ۳۱–۳۲۱.

- [8] Bellos E, Tzivanidis C. Investigation of a star flower insert in a parabolic trough solar collector. Applied Energy. 2018;224:86-102.
- [9] Ahmed K, Natarajan E. Thermal performance enhancement in a parabolic trough receiver tube with internal toroidal rings: A numerical investigation. Applied Thermal Engineering. 2019;162:114224.
- [10] Parlamis H, Ozden E, Buker MS. Experimental performance analysis of a parabolic trough solar air collector with helical-screw tape insert: a comparative study. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2021; 47:101562.
- [11] Ou G, Liu P, Liu Z, Liu W. Performance analyses and heat transfer optimization of parabolic trough receiver with a novel single conical strip insert. Renewable Energy. 2022; 199:335-350.
- [۱۲] فرشاد ع، شیخ الاسلامی م. بررسی عددی افزایش انتقال گرما نانوسیال در گردآورنده خورشیدی صفحه تخت با قرار دادن نوار پیچشی چند کاناله در داخل لوله. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۳۹۹، د. ۵۰، ش. ۴، ص. ۱۴۹-۱۴۱.
- [۱۳] معین جهرمی م، رحمانیان س، یرزگرلو کوهی ص. تحلیـل اثـر هندسـه جاذب گرمایی با بکارگیری مبردهای نانوسیال و مواد تغییـر فـاز دهنـده میکروکپسوله بـر عملکردهـای پنلهـای فتوولتـایی-گرمـایی. مهندسـی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۴۰۰، د. ۵۱، ش. ۴، ص. ۴۱۳-۴۲۲.
- [۱۴] ابزاره ش، شیخ الاسلامی م. بررسی عددی عملکرد حرارتی گردآورنده خورشیدی سهموی با بکارگیری نانوسیال و مغشوش کننده. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۴۰۱، د. ۵۲ ش. ۱، ص. ۲۳۷–۲۴۶.