

تحلیل اثر هندسه جاذب گرمایی با بکارگیری مبردهای نانوسیال و مواد تغییر فاز دهنده میکروکپسوله بر عملکردهای پنل های فتوولتایی-گرمایی

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران، mmoein@jahromu.ac.ir
 استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران، s.rahmanian@jahromu.ac.ir
 دانش آموخته کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران، salehbarzegar6@gmail.com

مهید معین جهرمی
سعید رحمانیان*
صالح برزگرلو کوهی

چکیده

در این مقاله به منظور بهبود عملکرد پنل فتوولتایی-گرمایی از طریق مدیریت گرما، اثر چهار هندسه مختلف برای لوله‌های خنک‌کن شامل لوله دایروی مستقیم، لوله دایروی موج سینوسی، مجرای مستطیلی زیگزاکی، مجرای مستطیلی پله‌ای، و همچنین اثر نوع مبرد، و میزان دبی مبرد بر توزیع دمای پنل و راندمان الکتریکی و گرمایی آن از طریق مدلسازی عددی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که مجرای پله‌ای بهترین عملکرد را دارد، به طوری که راندمان گرمایی و الکتریکی به ترتیب ۱۵/۲٪ و ۲/۲٪ نسبت به لوله دایروی مستقیم افزایش یافته است. البته میزان افت هد نیز در مجرای پله‌ای ۲/۶ برابر نسبت به لوله دایروی مستقیم افزایش داشته است. نتایج همچنین حاکی از آن است که استفاده از سیال با مواد تغییر فاز دهنده میکرو کپسوله شده سبب افزایش راندمان گرمایی تا حدود ۴۰٪ نسبت به آب می‌شود در حالیکه استفاده از نانوسیال نقره حدود ۲۸٪ راندمان گرمایی را بهبود می‌بخشد. افزایش دبی مبرد نیز سبب بهبود ضریب انتقال گرما شده که منجر به کاهش میانگین دمای سطح پنل حدود ۶/۴°C و ۷/۵°C به ترتیب در لوله دایروی مستقیم و مجرای پله‌ای می‌شود.

واژه‌های کلیدی: جاذب گرمایی، پنل‌های فتوولتایی-گرمایی، مواد تغییر فاز دهنده میکرو کپسوله شده، نانوسیال، راندمان.

Investigation of heat absorber geometry effect using nanofluid and Microencapsulated PCM on the photovoltaic-thermal (PV/T) panel performance

M. Moein-Jahromi
S. Rahmanian
S. Barzagarloo Kohi

Mechanical Engineering Department, Jahrom University, Jahrom, Iran
 Mechanical Engineering Department, Jahrom University, Jahrom, Iran
 Mechanical Engineering Department, Jahrom University, Jahrom, Iran

Abstract

To improve the performance of photovoltaic-thermal (PV/T) system through thermal management, the effects of four different geometry of cooling pipes including circular direct pipe (CDP), circular sinusoidal pipe (CSP), rectangular zigzag duct (RZD), and rectangular step duct (RSD), type of refrigerant, and flow rate are investigated on the temperature distribution, thermal, and electrical efficiencies through numerical modeling in this paper. The results show that RSD has the best performance, so that the thermal and electrical efficiencies have been improved by 15.2% and 2.2%, respectively. On the other hand, the fluid head loss in RSD is increased by about 2.6 times compared to that of CDP. The results also indicate that microencapsulated phase change material (MPCM) fluid leads to an increase in the thermal efficiency of about 40% respect to the water, however, Ag nano-fluid just improves the thermal efficiency by 28%. Increasing the flow rate of refrigerant also caused to enhance the heat transfer coefficient and leads to a decrease in the average surface temperature of the PV panel by 6.4°C and 7.5°C in CDP and RSD, respectively.

Keywords: Heat absorber, Photovoltaic/Thermal panels, Microencapsulated phase change material, Nano-fluid, Efficiency.

۱- مقدمه

عملکردی این سیستم‌ها، آن‌ها را با گردآورهای خورشیدی تلفیق می‌کنند [3, 4]. در این حالت، گرمای جذب شده توسط سلول خورشیدی، از طریق یک صفحه جاذب به کانال‌های گردآور منتقل می‌شود و ضمن کاهش دمای سلول و در نتیجه افزایش راندمان تولید الکتریسیته، سبب افزایش دمای سیال درون کانال‌های جاذب نیز می‌گردد [5].

تحقیقات موجود در ادبیات فن حاکی از آن است که سطح مقطع کانال‌ها و نحوه چیدمان و پیکره‌بندی آن‌ها در قسمت گردآور سیستم-های فتوولتایی-گرمایی بر میزان انتقال گرما از سلول خورشیدی به سیال خنک‌کن و به تبع بر راندمان گرمایی و الکتریکی (و راندمان کلی) سیستم اثر گذار است. ابراهیم و همکارانش، عملکرد یک سیستم فتوولتایی-گرمایی دارای جاذبی با کانال‌هایی با سطح مقطع مستطیلی

با توجه به آخرین گزارش وضعیت انرژی‌های تجدیدپذیر بدون در نظر گرفتن توان هیدروالکتریک، ظرفیت کل انرژی‌های تجدیدپذیر دنیا در سال ۲۰۱۸ به میزان ۱۶۵ گیگاوات (معادل ۱۵/۲٪) نسبت به سال ۲۰۱۷ افزایش داشته است، که ۱۰۰ گیگاوات (معادل ۶۰٪) از ۱۶۵ گیگاوات) از این افزایش مربوط به سیستم‌های فتوولتایی می‌باشد [1]. این موضوع اهمیت سیستم‌های فتوولتایی و توجه ویژه‌ای که امروزه به آن‌ها می‌شود را به خوبی نشان می‌دهد. سیستم‌های فتوولتایی، انرژی دریافتی از خورشید را به الکتریسیته تبدیل می‌کنند. بازده و کارایی این سیستم‌ها به شدت تحت تاثیر دمای کارکرد می‌باشد، به طوری که با کاهش دمای عملکردی سیستم، راندمان تولید الکتریسیته افزایش می‌یابد [2]. بدین منظور اخیراً جهت خنک‌کاری و کاهش دمای

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: s.rahmanian@jahromu.ac.ir

را مورد ارزیابی قرار دادند [6]. آن‌ها نشان دادند که با استفاده از کانال‌های مستطیلی مساحت انتقال گرما افزایش یافته (نسبت به کانال‌های دایروی) و در پی آن فرآیند انتقال گرما بهبود می‌یابد. این موضوع توسط کیم و همکارش نیز مورد بررسی قرار گرفت [7]. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نیز نشان داد که راندمان الکتریکی و گرمایی سیستم‌های فتوولتایی-گرمایی با گردآور مقطع مربعی به ترتیب ۱٪ و ۵٪ نسبت به جاذب سطح مقطع دایروی بالاتر می‌باشد [7]. در ادامه محمدی و همکارانش، با استفاده از مدلسازی جریان سیال در سه جاذب با مقطع دایروی، مربعی و جعبه‌ای برای یک سیستم فتوولتایی-گرمایی میزان دمای سطح سلول فتوولتایی، دمای خروجی سیال از جاذب و همچنین راندمان‌های الکتریکی و گرمایی را محاسبه کردند [8]. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان می‌دهد که دمای سطح سلول در حالت جاذب با مقطع مربعی و چیدمان مارپیچی از مابقی موارد کمتر است. [8]. الشمانی و همکارانش با انجام یک شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی به مقایسه راندمان سیستم فتوولتایی-گرمایی مجهز به جاذبی با دو سطح مقطع دایروی و بیضوی پرداختند [9]. مدلسازی آن‌ها نشان داد که افت فشار سیال در مقطع بیضوی از دایروی کمتر است، همچنین نرخ انتقال گرما نیز در مقطع بیضوی افزایش می‌یابد [9]. البته این موضوع و مقایسه افت فشار و میزان انتقال گرما در این دو مقطع پیش از این نیز، توسط سان و همکارانش برای چکاننده یک چرخه تبرید تراکمی بررسی شده بود [10]. آن‌ها نیز در مقایسه دو مقطع دایروی و بیضوی به نتایج مشابهی رسیدند. علاوه بر سطح مقطع کانال‌های عبور سیال در قسمت جاذب گرمایی یک سیستم فتوولتایی-گرمایی، نحوه چیدمان و پیکربندی این کانال‌ها نیز در فرآیند انتقال گرما موثر است. روسلی و همکارانش سه نوع چیدمان مارپیچ حلقوی، مارپیچ زیگزاکی و یو-شکل را برای کانال‌های جاذب بررسی کردند [11]. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان داد که چیدمان یو-شکل نسبت به دو چیدمان دیگر دارای راندمان الکتریکی بالاتری می‌باشد، این در حالی است که راندمان کلی در چیدمان مارپیچ-حلقوی بالاترین مقدار را دارد. ابراهیم و همکارانش اثر هفت چیدمان مختلف برای کانال‌های جاذب بر عملکرد و راندمان یک سیستم فتوولتایی-گرمایی را مورد مطالعه قرار دادند [12]. چیدمان‌های در نظر گرفته شده در مطالعه آن‌ها عبارت است از: کانال با مقطع مستطیلی به صورت جریان مستقیم، کانال با مقطع دایره با چیدمان نوسانی، کانال با مقطع مستطیل با چیدمان مارپیچ-حلقوی، کانال با مقطع دایره با چیدمان مارپیچ-زیگزاکی، کانال با مقطع مستطیل با چیدمان مارپیچ-حلقوی-موازی، کانال با مقطع مستطیل با چیدمان مارپیچ-حلقوی-موازی (بهبودیافته). نتایج مدلسازی آن‌ها نشان می‌دهد که از بین تمامی این طرح‌ها بیشترین بازده الکتریکی و گرمایی مربوط به کانال با مقطع مستطیل با چیدمان مارپیچ-حلقوی می‌باشد. این در حالی است که کانال با مقطع دایره با چیدمان مارپیچ-زیگزاکی دارای کمترین میزان بازده الکتریکی و گرمایی است. استه و همکارانش، نیز به بررسی دو نوع چیدمان گردآور پرداختند [13]. آن‌ها چیدمان مارپیچ زیگزاکی را با چیدمانی شبیه ساز چنگ (که در آن ورودی و خروجی همه کانال‌ها به ترتیب به پخش‌کننده و جمع‌کننده جریان متصل است) در یک جاذب گرمایی، با کانالی با مقطع نیم بیضوی مقایسه کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها حاکی از آن است که چیدمان چنگی به دلیل توزیع

یکنواخت تر و کمتر بودن دمای سطح، دارای راندمان بالاتری است [13]. اخیراً یو و همکارانش در مطالعه‌ای تجربی به بررسی و مقایسه چیدمان چنگی با چیدمان شبکه‌ای در یک سیستم فتوولتایی-گرمایی پرداخته‌اند [14]. چیدمان شبکه‌ای که آن‌ها پیشنهاد داده‌اند شامل شبکه‌ای از موانع مربع-شکل در گردآور می‌باشد که جریان سیال را به مراتب در سطوح بیشتری از سلول پخش می‌کند. نتایج آزمایش آن‌ها نشان داد که میانگین دمای سطح سلول بین ۳ تا ۶ درجه سلسیوس در چیدمان شبکه‌ای کمتر از چیدمان چنگی می‌باشد، همچنین راندمان الکتریکی و گرمایی نیز در چیدمان شبکه‌ای به مراتب بالاتر از چیدمان چنگی است [14]. البته افت فشار سیال نیز در چیدمان شبکه‌ای افزایش می‌یابد، که این موضوع به دلیل برخورد بیشتر سیال با موانع و پخش شدن یکنواخت تر آن در سطح گردآور است.

در این پژوهش سعی شده است تا راهکارهای مختلفی که برای افزایش کارایی یک سیستم فتوولتایی-گرمایی وجود دارد، بررسی شده و با یکدیگر مقایسه گردند. در این راستا، ابتدا اثر هندسه‌های مختلف برای لوله‌های خنک‌کن جاذب گرمایی بر میزان گرمای انتقال یافته و بازده الکتریکی و گرمایی یک سیستم فتوولتایی-گرمایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. چهار هندسه لوله دایروی مستقیم، لوله دایروی موج سینوسی، مجرای مستطیلی زیگزاکی، مجرای مستطیلی پله‌ای برای جاذب گرمایی پیشنهاد شده است و عملکرد سیستم فتوولتایی گرمایی تحت هر یک از این چهار نوع جاذب شبیه سازی می‌شود. همچنین در ادامه تحقیقی در مورد تاثیر نوع مبرد و میزان دبی مبرد بر توزیع دمای پنل فتوولتایی و راندمان الکتریکی و گرمایی انجام شده است. اثر سه مبرد آب، نانوسیال نقره و سیال با مواد تغییر فاز دهنده‌ی میکرو کپسوله شده بر توزیع دمای پنل فتوولتایی و میزان بازده الکتریکی و گرمایی آن بررسی می‌شود. همچنین اثر شدت دبی مبرد نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده در حالات مختلف با یکدیگر و با نتایج حالت پایه یعنی کانال دایروی مستقیم با مبرد آب مقایسه می‌شوند. نوآوری این پژوهش، بررسی همزمان اثر فاکتورهای بهبود دهنده عملکرد یک سیستم فتوولتایی-گرمایی اعم از اثر هندسه جاذب گرمایی، اثر نوع مبرد و دبی آن بر کارایی این سیستم به منظور ارائه یک ترکیب نهایی از این فاکتورها به عنوان راه حلی جهت بهبود بازدهی می باشد. شایان ذکر است آنالیز گرمایی ارائه شده در این پژوهش، با استفاده از یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی سه بعدی از یک سیستم فتوولتایی-گرمایی در محیط نرم‌افزار Ansys-Fluent انجام می‌شود. نتایج بدست آمده برای سازندگان گردآورها و همچنین سیستم‌های فتوولتایی-گرمایی می‌تواند بسیار مفید واقع گردد.

۲- شرح مسئله

ماژول‌های فتوولتایی-گرمایی عموماً از شش بخش تشکیل می‌شوند [15]: ۱- لایه اتیلن-وینیل استات (EVA)، ۲- سلول‌های فتوولتایی (PV)، ۳- لایه تدار پلی وینیل فلورید (Tedlar)، ۴- صفحه جاذب آلومینیومی، ۵- مجرای آلومینیومی عبور سیال و ۶- مبرد خنک کننده. شکل ۱ طرحواره‌ای از یک ماژول فتوولتایی-گرمایی را که شامل این شش بخش است نشان می‌دهد. در این مطالعه جهت کاهش دمای کاری سلول فتوولتایی و بهبود راندمان الکتریکی آن از یک سو و همچنین افزایش میزان گرمای جذب شده توسط مبرد و در پی آن

فرضیات این شبیه سازی عبارتند از:

- شبیه سازی حالت پایا است
- مقاومت تماسی بین لایه های ماژول ناچیز است
- مجموع جذب و بازتابش انرژی تابشی خورشید به صورت یک چشمه گرمایی در پنل فتوولتایی در نظر گرفته می-شود [4, 16]
- تابش خورشید به سطح پنل عمودی است
- صفحه جاذب و لوله/مجرا به صورت یکپارچه و از جنس آلومینیوم می باشد (به دلیل از بین بردن مقاومت تماسی)
- مبرد کاملا همگن، یکنواخت، نیوتنی، و غیر قابل تراکم است.

۱-۳- معادلات حاکم

با توجه به فرضیات مدل، معادلات حاکم شامل بقای انرژی در تمام دامنه حل نشان داده شده در شکل ۱ و همچنین معادله پیوستگی، و مومنتوم (ناویر-استوکس) برای جریان سیال در لوله/مجرا می باشد. این معادلات به شرح زیر هستند [16, 17]:

$$\begin{aligned} (1) \quad K\nabla^2 T + \dot{q}_{gen} &= 0 && \text{معادله بقای انرژی جامدات} \\ (2) \quad \rho C_p (\vec{V} \cdot \nabla T) &= K\nabla^2 T && \text{معادله بقای انرژی سیال} \\ (3) \quad \nabla \cdot (\rho \vec{V}) &= 0 && \text{معادله پیوستگی} \\ (4) \quad \rho (\vec{V} \cdot \nabla u_i) &= -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu (\nabla^2 u_i) - \rho g_i && \text{معادله بقای مومنتوم} \end{aligned}$$

که در آن \vec{V} بردار سرعت سیال، T دما، P فشار سیال و u_i مولفه سرعت سیال در جهت X_i می باشد. \dot{q}_{gen} میزان گرمای تولید شده در واحد حجم است. بر اساس فرض (ت)، این جمله به صورت چشمه گرمایی و صرفاً در پنل فتوولتایی در نظر گرفته می شود و مقدار آن از تقسیم خالص انرژی جذب شده بر ضخامت سلول بدست می آید، به طوری که [4, 16]:

$$\dot{q}_{gen} = \frac{q''_{sun} (\alpha_{pv} - \eta_{e,net})}{t_{pv}} \quad (5)$$

q''_{sun} شار تابش خورشید به صورت عمود بر سطح، α_{pv} ضریب جذب پنل فتوولتایی، و $\eta_{e,net}$ بازده الکتریکی خالص سلول است.

راندمان الکتریکی ناخالص (η_e) سیستم فتوولتایی-گرمایی را می توان با استفاده از رابطه تجربی مانند رابطه اسکوپلاکی و همکارش بدست آورد [18]. با در نظر گرفتن توان لازم برای پمپاژ، بازدهی الکتریکی خالص ($\eta_{e,net}$) نهایتاً به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\eta_{e,net} = \frac{\eta_{ref} [1 - 0.0045(T_{pv} - 298.15)]}{\eta_e} = \frac{\frac{\Delta P \dot{m}}{\eta_p \rho}}{q''_{sun} \times W \times L} \quad (6)$$

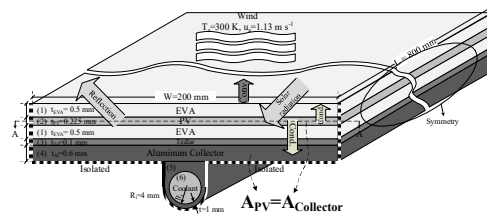
در رابطه (۶)، T_{pv} متوسط دمای سطح پنل فتوولتایی، η_{ref} راندمان الکتریکی سیستم فتوولتایی در شرایط استاندارد و دمای ۲۹۸/۱۵ کلوین، ΔP و \dot{m} به ترتیب توان و دبی جرمی مورد نیاز برای پمپاژ مبرد و η_p نیز بازده پمپ می باشد.

بازده گرمایی را نیز می توان با تعریف نسبت گرمای جذب شده توسط مبرد به انرژی گرمایی دریافت شده از خورشید توسط پنل تعریف کرد، به طوری که:

$$\eta_h = \frac{Q_c}{Q_{sun}} = \frac{\dot{m}(h_{out} - h_{in})}{q''_{sun} \times W \times L} \quad (7)$$

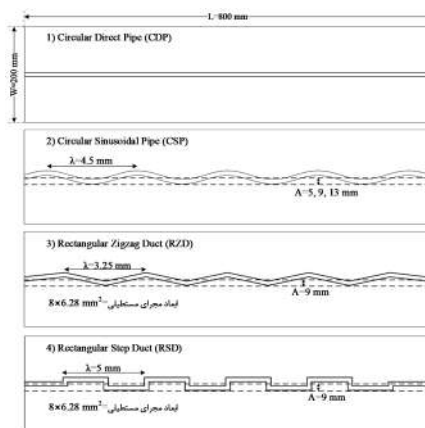
افزایش راندمان گرمایی از سوی دیگر، سه راهکار مورد بررسی قرار می-گیرد. این سه راهکار عبارتند از:

- ارائه چهار طرح مختلف برای جاذب گرمایی جهت بهبود فرآیندهای انتقال گرما،
- افزایش دبی مبرد،
- استفاده از مبردهایی تقویت شده جهت افزایش نرخ انتقال گرما نظیر نانوسیال نقره و سیال با مواد تغییر فاز دهنده میکرو کپسوله شده.



شکل ۱- طرحواره ی سیستم فتوولتایی-گرمایی.

چهار طرح در نظر گرفته شده برای لوله های جاذب گرما عبارتند از: لوله دایروی مستقیم، لوله دایروی موج سینوسی، مجرای مستطیلی زیگزاک، مجرای مستطیلی پله ای. هر یک از این طرح ها در شکل ۲ نشان داده شده است. به منظور مقایسه این طرح ها، سطح مقطع در همه چهار طرح با هم برابر در نظر گرفته شده است. در این مقاله اثر دامنه کانال (A) و طول موج کانال (λ) نیز بر میزان گرمای دفع شده و راندمان الکتریکی و گرمایی ماژول مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۲- چهار طرح پیشنهادی به عنوان مجرای سیال خنک کن.

۳- شبیه سازی

هدف این پژوهش شبیه سازی گرمایی-سیالاتی یک سیستم فتوولتایی-گرمایی با طرح های گوناگون برای کانال های جاذب گرما و همچنین مبردهای مختلف است.

مکانیزم های انتقال گرما اعم از جابه جایی آزاد سطح بالایی ماژول با هوا، جذب و بازتابش تابش خورشیدی توسط پنل فتوولتایی و رسانش گرمایی از پنل فتوولتایی به سمت لایه های فوقانی و تحتانی ماژول در شکل ۱ نشان داده شده است. در ادامه این بخش، به نحوه ی مدل سازی گرمایی-سیالاتی ماژول و شبیه سازی این مکانیزم های انتقال گرما اشاره می شود.

که در آن، h انتقالی، \dot{m} دبی جرمی میرد، q''_{sun} شار گرمایی خورشید، L و W نیز به ترتیب طول و عرض پنل هستند. راندمان الکتریکی با در نظر گرفتن متوسط راندمان نیروگاهی (۳۸٪)، با راندمان گرمایی همسنگ شده و نهایتاً راندمان کل، از مجموع راندمان گرمایی و الکتریکی تراز شده محاسبه می‌شود:

$$\eta_t = \frac{\eta_{e,net}}{0.38} + \eta_h \quad (۸)$$

K در رابطه (۱) نیز رسانایی گرمایی است. همچنین ρ ، C_p و μ به ترتیب چگالی، ظرفیت گرمای ویژه و لزجت سیال می‌باشند. هنگامی که سیال آب باشد این خواص با استفاده از روابط زیر بر حسب دما در گستره بین ۲۷۳ K تا ۳۷۳ K با بیشینه خطای ۳/۵٪ تخمین زده می‌شوند [19]:

$$\rho_f = 1000 \left[1 - \frac{(T - 273) - 4}{119000 + 1365(T - 273) - 4(T - 273)^2} \right] \quad (۹)$$

$$(C_p)_f = 4217.63 - 3.21(T - 273) + 0.095(T - 273)^2 - 0.00132(T - 273)^3 + 9.415 \times 10^{-6}(T - 273)^4 - 2.5479 \times 10^{-6}(T - 273)^5 \quad (۱۰)$$

$$\mu_f = 1.69 \times 10^{-3} - 4.253 \times 10^{-5}(T - 273) + 4.92 \times 10^{-7}(T - 273)^2 - 2.01 \times 10^{-9}(T - 273)^3 \quad (۱۱)$$

$$K_f = 0.561 + 0.00193(T - 273) - 2.60 \times 10^{-6}(T - 273)^2 - 6.09 \times 10^{-8}(T - 273)^3 \quad (۱۲)$$

اما اگر میرد نانوسیال نقره و یا سیال با مواد تغییرفاز دهنده‌ی میکرو کپسوله شده باشد آنگاه هریک از این خواص با استفاده از روابط که در ادامه توضیح داده می‌شوند، محاسبه می‌شوند.

به منظور ارزیابی و مقایسه دقیق تر هر یک از میردهای معرفی شده با آب، پارامتری بی بعد تحت عنوان نسبت بهبود انتقال گرما به میزان افزایش توان پمپاژ (TPR) به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$TPR = \frac{\left[\frac{(Q_c)_{coolant} - (Q_c)_{water}}{(Q_c)_{water}} \right]}{\left[\frac{(\Delta P)_{coolant} - (\Delta P)_{water}}{(\Delta P)_{water}} \right]} \quad (۱۳)$$

۳-۱-۱- خواص نانو سیال نقره

خواص موثر نانوسیال بر اساس نسبت حجمی ذرات نانو (ϕ) به صورت زیر محاسبه می‌شود [17]:

$$\rho_{nf} = \phi \rho_{np} + (1 - \phi) \rho_f \quad (۱۴) \quad \text{چگالی}$$

$$C_{p,nf} = \frac{\phi(\rho C_p)_{np} + (1 - \phi)(\rho C_p)_f}{\rho_{nf}} \quad (۱۵) \quad \text{ظرفیت گرمایی}$$

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\phi)\mu_f \quad \text{for } \phi = 3\% \quad (۱۶) \quad \text{لزجت}$$

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\phi + 6.5\phi^2)\mu_f \quad \text{for } \phi = 6, 9\%$$

$$K_{nf} = K_f \times \frac{K_{np} + 2K_f - 2\phi(K_{np} - K_f)}{K_{np} + 2K_f + \phi(K_{np} - K_f)} + \frac{\rho_{np}\phi C_{np}}{2K_f} \sqrt{\frac{K_B T}{3\pi r_c \mu_f}} \quad (۱۷) \quad \text{رسانایی گرمایی}$$

که در آن ϕ کسر حجمی ذرات نانو می‌باشد. اندیس‌های np و nf به ترتیب نشان دهنده خاصیت نانو سیال، ذرات نانو و سیال پایه می‌باشد. تمامی خواص سیال پایه و ذرات نانو مورد استفاده در معادلات (۱۴) - (۱۷) در جدول ۱ گزارش شده است.

۳-۱-۲- خواص سیال با مواد تغییرفاز دهنده‌ی میکرو کپسوله شده

ماده تغییر فاز دهنده میکرو کپسوله شده در نظر گرفته شده در پژوهش حاضر، شامل هیدروکربن ان-ایکوسین (n-eicosane) پوشیده شده با پوسته‌ای از اکسید تیتانیوم (TiO_2) که شامل ۷۸٪ وزن کل ماده است، می‌باشد [17]. خواص سیال ساخته شده با این ماده، به ویژگی-های مواد تغییرفاز دهنده‌ی میکرو کپسوله شده و سیال پایه بستگی دارد به طوری که چگالی، لزجت و رسانایی گرمایی این سیال با توجه به کسر حجمی مواد تغییر فاز دهنده (c) بدین صورت محاسبه می‌گردد [17]:

$$\rho_{MPCM,f} = c\rho_{PCM} + (1 - c)\rho_f \quad (۱۸) \quad \text{چگالی}$$

$$\mu_{MPCM,f} = (1 - c + 1.16c^2)^{2.5} \mu_f \quad (۱۹) \quad \text{لزجت}$$

$$K_{MPCM,f} = K_f \times \frac{2 + K_{PCM}/K_f - 2c(K_{PCM}/K_f - 1)}{2 + K_{PCM}/K_f - c(K_{PCM}/K_f - 1)} \quad (۲۰) \quad \text{رسانایی گرمایی}$$

که در آن c نسبت حجمی مواد تغییرفاز دهنده‌ی میکرو کپسوله شده می‌باشد. اندیس‌های $MPCM$ ، f و PCM نشان دهنده خاصیت سیال با مواد تغییرفاز دهنده‌ی میکرو کپسوله شده، مواد تغییرفاز دهنده‌ی میکرو کپسوله شده و سیال پایه می‌باشد. برای محاسبه ظرفیت گرمایی ویژه در این سیال باید فرآیند تغییر فاز (ذوب) این مواد را نیز در نظر گرفت. ما و همکارانش تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه مواد تغییرفاز دهنده را بدین صورت مدل‌سازی کرده‌اند [20]:

$$C_{p,PCM} = C_{p,s} + (T - T_s) \left[\frac{C_{p,l} - C_{p,s}}{T_l - T_s} \leq \frac{T_s \leq T}{T_s + T_l} \leq \frac{T_s + T_l}{2} \right] + \frac{4I_{sf}}{(T_l - T_s)^2} \quad (۲۱)$$

$$C_{p,PCM} = C_{p,l} + (T_l - T) \left[\frac{4I_{sf}}{(T_l - T_s)^2} \leq \frac{T_s + T_l}{2} \leq T \right] - \frac{C_{p,l} - C_{p,s}}{T_l - T_s} \quad (۲۲)$$

فرآیند ذوب در این مواد تغییر فاز دهنده کپسوله شده در گستره دمایی یک کلون بالا و پایین تر از نقطه ذوب رخ می‌دهد. به طوری که اگر T_m دمای ذوب باشد آنگاه دمای که جامد شدن و مایع شدن شروع می‌شود به ترتیب $T_s = T_m - 1$ و $T_l = T_m + 1$ می‌باشد. $C_{p,s}$ ، $C_{p,PCM}$ ، $C_{p,l}$ و I_{sf} به ترتیب ظرفیت گرمایی مواد تغییرفاز دهنده، ظرفیت گرمایی فاز جامد، ظرفیت گرمایی فاز مایع و گرمای نهان ذوب این مواد می‌باشند.

اکنون با توجه به روابط (۲۱) و (۲۲) که ظرفیت گرمایی ویژه مواد تغییر فاز دهنده را محاسبه می‌کند، و با استفاده از کسر حجمی این مواد در سیال پایه (c) ظرفیت گرمایی ویژه سیال با مواد تغییر فاز دهنده کپسوله شده به صورت زیر محاسبه می‌شود:

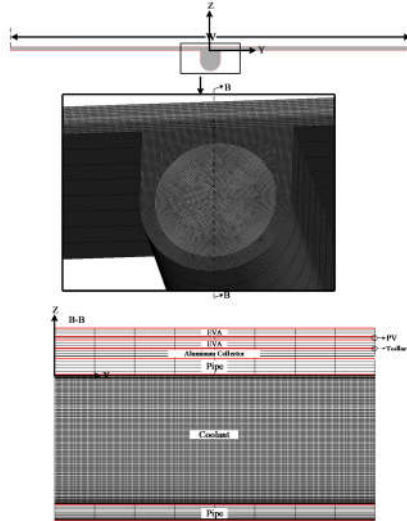
$$C_{p,MPCM,f} = \frac{c(\rho C_p)_{PCM} + (1 - c)(\rho C_p)_f}{\rho_{MPCM,f}} \quad (۲۳)$$

که در آن $\rho_{MPCM,f}$ و $(C_p)_{PCM}$ به ترتیب چگالی سیال با مواد تغییر فاز دهنده و ظرفیت گرمایی ماده تغییر فاز دهنده می‌باشد که به ترتیب از رابطه (۱۸) و روابط (۲۱) و (۲۲) بدست می‌آیند.

۳-۲- شرایط مرزی

دبی جرمی و دما سیال در ورودی کانال معلوم است. فرض بر این

محاسباتی استفاده شده برای هندسه لوله دایروی مستقیم به عنوان نمونه نشان می‌دهد. شبکه استفاده شده در راستای طول سیستم فتوولتایی-گرمایی نیز با در نظر گرفتن نسبت منطقی مناسب ایجاد شده که در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- نمایی از شبکه بندی میدان حل برای کانال با لوله دایروی.

۵- پارامترهای ورودی

جهت دست یابی به نتایج معتبر، پارامترهای ورودی به مدل باید دقیق تعیین شوند. در شکل ۱ پارامترهای هندسی و در جدول ۱، پارامترهای ساختاری، عملکردی، انتقالی و ترموفیزیکی مورد نیاز برای سیستم فتوولتایی-گرمایی و تمام لایه‌های تشکیل دهنده آن گزارش شده است.

جدول ۱- پارامترهای ورودی در حالت پایه.

پارامتر	نماد	یکا	مقدار/مرجع
ساختاری			
ضریب جذب سلول فتوولتایی	α_{PV}	-	0.9 / [22]
ضریب نشر لایه اتیلن-وینیل استات	ϵ_{EVA}	-	0.9
راندمان حالت استاندارد سلول فتوولتایی	η_{ref}	%	12 / [22]
شعاع ذرات نانو نقره	r_c	nm	10 / [17]
عملکردی			
دبی سیال ورودی	\dot{m}_{in}	$kg s^{-1}$	0.00222
دمای سیال ورودی	T_{in}	K	303
دمای آسمان	T_{sky}	K	270
شار گرمایی خورشید	q''_{sun}	$W m^{-2}$	1000 / [17]
انتقالی و ترموفیزیکی			
نانو ذره نقره	ρ_{np}	$kg m^{-3}$	10500 / [17]
ماده تغییر فاز دهنده	ρ_{PCM}	$kg m^{-3}$	946.4 / [17]
لایه اتیلن-وینیل استات	ρ_{EVA}	$kg m^{-3}$	960 / [15]
سلول فتوولتایی	ρ_{PV}	$kg m^{-3}$	2330 / [15]
تدلار پلی وینیل	ρ_{Td}	$kg m^{-3}$	1200 / [15]

است که در خروجی کانال سیال به محیط تخلیه شود لذا فشار پیمانه-ای در خروجی کانال صفر است، همچنین با فرض توسعه یافتگی جریان در خروجی کانال، آنگاه تغییرات دما در خروجی کانال نیز صفر خواهد بود. بنابراین شرایط مرزی در این دو مرز عبارتند از:

$$\dot{m} = \dot{m}_{in} \quad (24) \quad \text{شرط مرزی در ورودی:}$$

$$T = T_{in}$$

$$P = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (25) \quad \text{شرط مرزی در خروجی:}$$

به منظور کاهش حجم محاسبات صرفاً قسمتی از ماژول که شامل یک لوله/مجرا جاذب گرما بوده و به صورت واحد تکرار شونده در کل مساحت یک ماژول واقعی وجود دارد شبیه سازی می‌گردد. بنابراین شرایط مرزی در صفحات کناری قسمت تکرار شونده در نظر گرفته شده در شکل ۱، (صفحات با هاشور افقی) به صورت شرط تقارن اعمال می‌گردد یعنی:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (26)$$

قسمت تحتانی ماژول‌های فتوولتایی-گرمایی را معمولاً به منظور انتقال گرما بیشتر به سیال ایزوله می‌کنند. بنابراین شرط مرزی در قسمت تحتانی (صفحاتی که با هاشور عمودی در شکل ۱ نشان داده شده است) به صورت شرط عایق اعمال می‌گردد، بنابراین:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (27)$$

سطح فوقانی ماژول با هوای آزاد و اطراف بزرگ در ارتباط است لذا شرط مرزی در این سطح، ترکیبی از تعادل انتقال گرما جابه‌جایی آزاد و تابشی این سطح با هوا و اطراف بزرگ، و انتقال گرما رسانشی در جسم جامد است یعنی:

$$-K_{EVA} \frac{\partial T}{\partial n} = h_{nat}(T - T_a) + \epsilon_{EVA} \sigma (T^4 - T_{sky}^4) \quad (28)$$

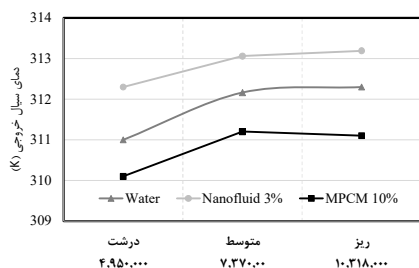
T_a و T_{sky} به ترتیب دمای هوای اطراف ماژول و دمای آسمان در حال تبادل تابش با پنل است. ضریب انتقال گرما جابه‌جایی آزاد، h_{nat} با استفاده از رابطه‌ای که با سرعت جریان باد توسط سردارآبادی و پسندیده فرد [21] ارائه شده است بدست می‌آید:

$$h_{nat} [W m^{-2} K^{-1}] = 3.8 u_a [m s^{-1}] + 5.7 \quad (29)$$

۴- روند حل

معادلات بقای انرژی، جرم و مومنتوم ذکر شده در روابط (۱) تا (۴) قسمت ۳-۱ با استفاده از شرایط مرزی بیان شده در قسمت ۳-۲ حل می‌شوند. حل عددی بر اساس روش محاسباتی حجم محدود بوده که در فضای محیط نرم افزار Ansys-Fluent انجام می‌گردد. در این نرم افزار از روش حجم محدود سلول مرکزی بر مبنای طرح بازسازی خطی چند بعدی که امکان استفاده از المان‌های چند وجهی دلخواه را فراهم می‌سازد استفاده می‌شود. از الگوریتم سیمپل برای مدیریت کوپلینگ فشار-سرعت استفاده شده است. جهت اعمال خواص‌های مختلف سیال مبرد از کد نویسی در قالب توابع تعریفی کاربر (UDF) استفاده شده است. گسسته سازی معادلات با استفاده از روش پیشرو مرتبه دو برای جملات جابه‌جایی معادلات مومنتوم و انرژی انجام شده است. مقدار 10^{-6} به عنوان معیار همگرایی برای باقیمانده‌های معادلات بقا جرم و مومنتوم و 10^{-8} برای بقای انرژی در نظر گرفته شده است. یک شبکه بندی با کیفیت با تعداد حدود ۷۳۷۰۰۰۰ المان، به منظور ردیابی گرادینانها در تمامی دامنه حل ارائه شده است. شکل ۳ شبکه

تعداد المان‌های ۴۹۵۰۰۰ (درشت)، ۷۳۷۰۰۰ (متوسط)، و ۱۰۳۱۸۰۰۰ (ریز) برای هندسه لوله دایروی مستقیم در نظر گرفته شد. نتایج دمای سیال خروجی به ازای سه نوع میرد مختلف برای این هندسه در هر سه شبکه در شکل ۵ با هم مقایسه شده است. عدم وابستگی دمای خروجی به ابعاد شبکه در گذر از شبکه متوسط به ریز مشهود است، بنابراین به منظور صرفه جویی در هزینه‌های محاسباتی نتایج گزارش شده بر مبنای شبکه متوسط در ادامه ارائه می‌گردد.



شکل ۵- اثر اندازه شبکه بر دمای سیال خروجی (استقلال شبکه).

۷- نتایج

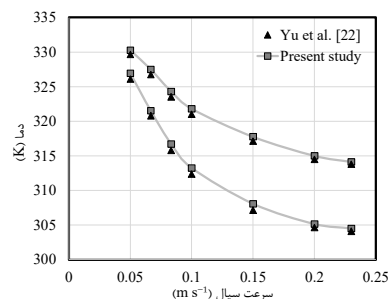
در این قسمت به بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی هر چهار طرح نشان داده شده در شکل ۲ پرداخته می‌شود. در شکل ۶ کانتور دما در صفحه A-A واقع در وسط ضخامت پنل فتوولتایی (مطابق با شکل ۱) و همچنین کانال طراحی شده در جذب گرمایی برای همه طرح‌های ارائه شده، نشان داده شده است. با توجه به توزیع دمای رسم شده در شکل ۶ می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از کانال‌های موج‌دار نظیر کانال موج سینوسی، کانال زیگزاکی و کانال پله‌ای سبب کاهش دما و جذب گرمای بیشتر از پنل فتوولتایی می‌شود. این موضوع به خوبی در شکل ۶ مشاهده می‌شود. در این میان کانال پله‌ای با جذب گرمای بیشتر سبب افزایش ناحیه دما پایین در کانتور دما، نسبت به دیگر طرح‌ها شده است. اثر افزایش دامنه موج، در کانال سینوسی-شکل نیز بررسی شده است. مطابق شکل ۶، با افزایش دامنه موج از ۵ میلی‌متر به ۱۳ میلی‌متر گرمای جذب شده از پنل توسط کانال جذب افزایش یافته و توزیع دمای پنل به سمت دماهای کمتر می‌رود. شایان ذکر است جهت مشاهده بهتر کانتورهای دما در جهت عرضی و طولی مقیاس شده‌اند.

به منظور مقایسه صریح، دمای سیال خروجی و میانگین دمای سطح پنل خورشیدی در شکل ۷ (الف) به صورت نمودار میله‌ای مقایسه شده‌اند. نتایج حاکی از آن است که بیشترین دمای سیال خروجی که متناظر با کمترین دمای سطح پنل است مربوط به کانال پله‌ای با دامنه ۹ میلی‌متر می‌باشد. کانال مارپیچ سینوسی با دامنه ۱۳ میلی‌متر، مارپیچ سینوسی با دامنه ۹ میلی‌متر، زیگزاکی با دامنه ۹ میلی‌متر و مارپیچ سینوسی با دامنه ۵ میلی‌متر به ترتیب در رتبه‌های بعدی (نسبت به کانال دایروی مستقیم) قرار دارند. البته عملکرد بهتر کانال پله‌ای در خصوص جذب گرما از یکسو، با افزایش میزان افت فشار سیال از سوی دیگر همراه است. میزان افت فشار سیال در همه طرح‌های مورد بررسی در شکل ۷ (ب) مقایسه شده است. مطابق نتایج بدست آمده میزان افت فشار میرد در کانال‌های موج دار به دلیل وجود انحنا و ایجاد افت‌های فرعی از کانال دایروی مستقیم بیشتر است. البته

رسانایی گرمایی		
فلورید آلومینیوم	ρ_{Al}	$kg\ m^{-3}$ [15] / 2719
نانو ذره نقره	K_{np}	$W\ m^{-1}K^{-1}$ [17] / 429
ماده تغییر فاز دهنده	K_{PCM}	$W\ m^{-1}K^{-1}$ [17] / 0.749
لایه اتیلن-وینیل استات	K_{EVA}	$W\ m^{-1}K^{-1}$ [15] / 0.35
سلول فتوولتایی	K_{PV}	$W\ m^{-1}K^{-1}$ [15] / 148
تدلار پلی وینیل فلورید	K_{Td}	$W\ m^{-1}K^{-1}$ [15] / 0.2
آلومینیوم	K_{Al}	$W\ m^{-1}K^{-1}$ [15] / 871
نانو ذره نقره	$(C_p)_{np}$	$J\ kg^{-1}K^{-1}$ [17] / 235
ماده تغییر فاز دهنده (جامد)	$(C_p)_{s,PCM}$	$J\ kg^{-1}K^{-1}$ [20] / 1754
ماده تغییر فاز دهنده (مایع)	$(C_p)_{L,PCM}$	$J\ kg^{-1}K^{-1}$ [20] / 2014
لایه اتیلن-وینیل استات	$(C_p)_{EVA}$	$J\ kg^{-1}K^{-1}$ [15] / 2090
سلول فتوولتایی	$(C_p)_{PV}$	$J\ kg^{-1}K^{-1}$ [15] / 677
تدلار پلی وینیل فلورید	$(C_p)_{Td}$	$J\ kg^{-1}K^{-1}$ [15] / 1250
آلومینیوم	$(C_p)_{Al}$	$J\ kg^{-1}K^{-1}$ [15] / 202.4
دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده	T_m	K [17] / 310
گرمای نهان ذوب ماده تغییر فاز دهنده	l_{sf}	$kJ\ kg^{-1}$ [17] / 167

۶- صحت سنجی نتایج

در این بخش به منظور اطمینان از مدلسازی، نتایج مطالعه پیش رو با نتایج حل عددی یو و همکارانش [22] صحت سنجی می‌شود. به منظور انجام صحت سنجی ابعاد جاذب $2\ m^2 \times 0.2\ m$ ، ضخامت گردآور ۲ mm و از جنس مس، قطر لوله ۸ mm، ابعاد سلول فتوولتایی $2\ m^2 \times 0.164\ m$ ، دمای سیال ورودی و هوای اطراف ۲۷۳/۱۵ K و شار گرمایی خورشید $1000\ W\ m^{-2}$ در نظر گرفته شده است [22]. میانگین دمای سلول فتوولتایی و همچنین دمای خروجی سیال میرد از کانال جاذب گرمایی با نتایج گزارش شده توسط یو و همکارانش [22] در شکل ۴ مقایسه شده است. صحت سنجی انجام شده حاکی از آن است که به ازای سرعت‌های سیال مختلف، نتایج مدل با داده‌های مرجع [22] همخوانی بسیار خوبی دارد.

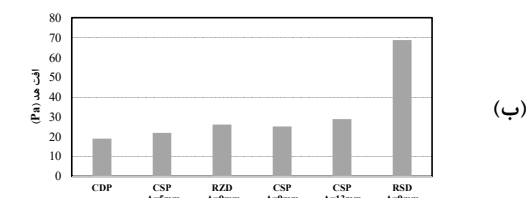
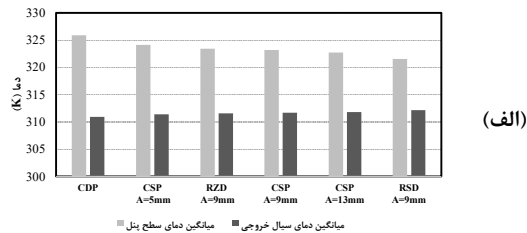


شکل ۴- صحت سنجی میانگین دمای سطح پنل فتوولتایی و دمای سیال خروجی با نتایج ارائه شده در مرجع [22].

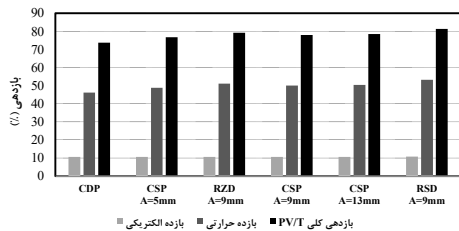
به منظور اطمینان از استقلال نتایج از ابعاد شبکه، سه شبکه با

باشد. در حالی که در هیچ یک از دیگر طرح‌ها تغییر جهت حرکت سیال تا ۹۰ درجه وجود ندارد. در ادامه به بررسی اثر طرح‌های کانال-های جاذب گرما بر میزان بازدهی الکتریکی، گرمایی و کل سیستم فتوولتایی-گرمایی پرداخته می‌شود. بازدهی الکتریکی با استفاده از رابطه (۶) قابل محاسبه است.

بازدهی الکتریکی، گرمایی و کل سیستم فتوولتایی-گرمایی در شکل ۸ برای همه طرح‌ها با هم مقایسه شده است. کانال پله‌ای با بیشترین میزان دمای سیال خروجی، بیشترین جذب گرما را داشته و لذا دارای بیشینه بازده گرمایی در بین دیگر طرح‌ها است. از طرفی مطابق شکل ۷ (الف) کمترین دمای سطح پنل نیز متعلق به همین کانال جاذب گرمایی است، لذا بازده الکتریکی و در نتیجه بازده کلی آن نیز طبق روابط (۶) و (۸) از طرح‌های دیگر بیشتر است. به طوری که استفاده از این کانال به عنوان جاذب گرمایی سبب افزایش راندمان گرمایی، الکتریکی و کلی به ترتیب به میزان $1.5/2\%$ ، $2/2\%$ و $1.3/1\%$ نسبت به کانال دایروی مستقیم می‌شود.



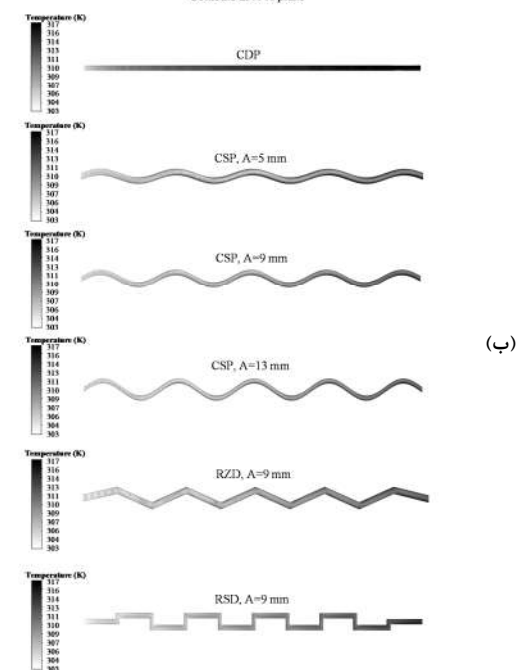
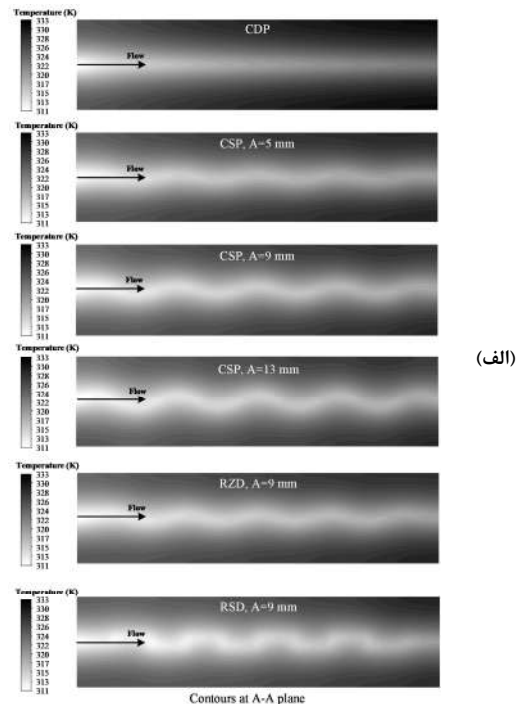
شکل ۷- (الف) دمای سطح پنل و دمای خروجی سیال، (ب) افت هد سیال برای طرح‌های ارائه شده جاذب گرمایی.



شکل ۸- بازده گرمایی، الکتریکی و کل برای طرح‌های ارائه شده جاذب گرمایی.

در ادامه به منظور افزایش بیشتر کارایی اثر دبی و همچنین نوع مبرد بررسی می‌شود. اثر تغییرات دبی بر میانگین دمای سطح پنل در شکل ۹ نشان داده شده است. با افزایش دبی از نیم برابر دبی پایه (در جدول ۱) تا چهار برابر آن مقدار، دمای سطح پنل به دلیل افزایش سرعت سیال و در نتیجه بهبود ضریب انتقال گرما جابه‌جایی کاهش می‌یابد. این میزان کاهش در لوله دایروی مستقیم حدود $1/9\%$ و در کانال پله‌ای حدود $2/4\%$ است. البته افزایش چند برابری دبی به منظور افزایش گرمای بازیافتی از سیستم فتوولتایی به معنی افزایش چند

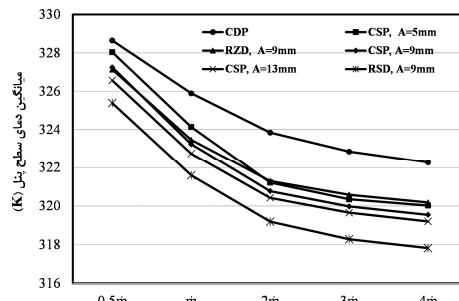
افت فشار در کانال سینوسی با دامنه‌های مختلف ۵، ۹ و ۱۳ میلی‌متر، و همچنین کانال زیگزاکی در محدوده بین ۲۰ تا ۳۰ پاسکال است. این در حالی است که این عدد برای کانال پله‌ای نزدیک به ۷۰ پاسکال (حدود $2/6$ برابر بیشتر) می‌باشد.



شکل ۹- کانتورهای دما در صفحه A-A واقع در وسط ضخامت پنل فتوولتایی و دمای سیال در کانال برای طرح‌های مختلف جاذب گرمایی.

این میزان افزایش افت فشار به دلیل عبور سیال از زانویی‌های ۹۰ درجه در کانال پله‌ای و ایجاد افت فرعی قابل ملاحظه ناشی از آن می-

برابری توان مورد نیاز برای پمپاژ نیز می‌باشد. از این رو در ادامه به بررسی یکی دیگر از راهکارهای افزایش کارایی یعنی استفاده از مبردهایی نظیر نانوسیال نقره یا سیال با مواد تغییر فاز دهنده‌ی میکرو کپسوله شده پرداخته می‌شود. اثر استفاده از نانوسیال نقره با کسر حجمی ۳، ۶ و ۹ درصدی و سیال با مواد تغییر فاز دهنده‌ی میکرو کپسوله شده با کسر حجمی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصدی به جای آب در میزان بازدهی سیستم، دمای سطح پل، اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی، افت هد و نسبت TPR در شکل ۱۰ برای دو کانال دایروی مستقیم و مجرای پله‌ای بررسی شده است. از آنجایی که چگالی این سیال‌ها با هم برابر نیست لذا به منظور مقایسه آن‌ها به جای دبی جرمی، دبی حجمی ورودی همه موارد با هم یکسان در نظر گرفته شده است.



شکل ۹- اثر دبی سیال (آب) بر میانگین دمای سطح پل برای طرح-های ارائه شده جاذب گرمایی.

همانگونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود استفاده از نانوسیال و همچنین سیال با مواد تغییر فاز دهنده سبب افزایش راندمان کلی سیستم به ترتیب به اندازه ۳/۱۸٪ و ۲/۲۵٪ در لوله دایروی و ۸/۵٪ و ۱۱/۷٪ در مجرای پله‌ای می‌شود. این میزان بهبود راندمان قابل توجه است.

در شکل ۱۰ (ب) چگونگی تغییرات دمای سطح پل فتولتایی و همچنین اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی در اثر استفاده از این دو نوع سیال نسبت به آب جهت مقایسه ارائه شده است. استفاده از این دو سیال سبب کاهش دمای سطح پل و همچنین افزایش میزان اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی نسبت به آب می‌شود. در مورد نانوسیال نقره می‌توان نتیجه گرفت که در هر دو نوع کانال با افزایش کسر حجمی ذرات نانو میانگین دمای سطح پل کاهش و اختلاف دمای ورودی و خروجی افزایش می‌یابد. اگر چه با افزایش کسر حجمی ذرات نانو، ظرفیت گرمایی ویژه سیال کاهش می‌یابد اما از سوی دیگر میزان چگالی آن نیز افزایش یافته و لذا به ازای دبی حجمی برابر میزان دبی جرمی افزایش می‌یابد. این موضوع سبب بهبود گرمایی جذب شده توسط سیال می‌گردد. در خصوص سیال با مواد تغییر فاز دهنده میکرو کپسوله شده نیز باید گفت با افزایش کسر حجمی مواد تغییر فاز دهنده، ظرفیت گرمایی ویژه به دلیل فرآیند تغییر فاز این مواد از جامد به مایع به شدت افزایش می‌یابد، در حالی که چگالی سیال به دلیل نزدیکی چگالی این نوع مواد با چگالی آب تقریباً ثابت است و دست خوش تغییر نمی‌شود. این موضوع سبب افزایش میزان گرمایی جذب شده (به دلیل افزایش قابل توجه ظرفیت گرمایی ویژه) می‌شود در عین

حالی که میزان اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی هم نسبت به حالت نانوسیال نقره کاهش یافته است. به عنوان نتیجه می‌توان گفت با افزایش کسر حجمی، میزان گرمایی جذب شده در هر دو نانوسیال و سیال با مواد تغییر فاز دهنده افزایش یافته و لذا دمای سطح پل کاهش می‌یابد. با این تفاوت که افزایش گرمایی جذب شده در نانوسیال ناشی از افزایش دبی جرمی و در سیال با مواد تغییر فاز دهنده ناشی از افزایش قابل توجه ظرفیت گرمایی ویژه می‌باشد.

در نهایت در شکل ۱۰ (پ) میزان افت هد و نسبت TPR، برای این مبردها در دو نوع لوله دایروی مستقیم و مجرای پله‌ای با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتیجه حاکی از آن است که استفاده از این دو نوع سیال در بدترین حالت در لوله دایروی مستقیم ۱/۵۸٪ و در کانال پله-ای ۱۷/۶٪ باعث افزایش افت هد و در نتیجه افزایش توان پمپاژ می‌شود. این میزان در مقایسه با افزایش توان پمپاژ ناشی از افزایش دبی به مراتب پایین‌تر است. نکته قابل ملاحظه دیگر این است که بیشینه افت هد در لوله دایروی مستقیم مربوط به سیال با مواد تغییر فاز دهنده و در کانال با مجرای پله‌ای مربوط به نانوسیال است. دلیل این موضوع این است که در لوله دایروی مستقیم صرفاً افت هد اصلی در جریان وجود دارد، و افت هد اصلی نیز به مجذور سرعت، طول، قطر و ضریب اصطکاک بستگی دارد. با توجه به اینکه دبی حجمی برابر در نظر گرفته شده و اینکه برای همه موارد طول و قطر لوله یکسان است، پس اختلاف در افت هد اصلی صرفاً به دلیل اختلاف در ضریب اصطکاک است. از طرفی با فرض لوله کاملاً صاف، ضریب اصطکاک با معکوس عدد رینولدز متناسب است. بنابراین به دلیل اینکه در نانوسیال

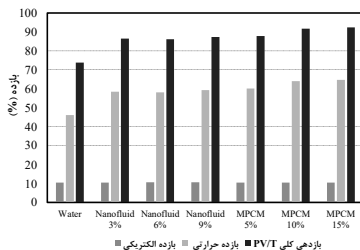
میزان $(\frac{\rho}{\mu})$ بیشتر از سیال با مواد تغییر فاز دهنده است، لذا عدد رینولدز نیز بیشتر و ضریب اصطکاک کمتر است و از این رو افت هد اصلی نانوسیال از سیال با مواد تغییر فاز دهنده کمتر است. اما در مورد کانال پله‌ای به دلیل این که قسمت عمده افت هد ناشی از افت هد فرعی به دلیل وجود زانوبی‌های ۹۰ درجه است و این افت هد نیز با (ρV^2) متناسب است، لذا با توجه به سرعت برابر میزان افت هد در نانوسیال نقره که چگالی بیشتری دارد به مراتب بالاتر از افت هد سیال با مواد تغییر فاز دهنده است.

در شکل ۱۰ (پ) به منظور ارزیابی و مقایسه عملکرد هر یک از مبردها، نسبت TPR معرفی شده در رابطه (۱۳)، برای نانوسیال نقره، و سیال با مواد تغییر فاز دهنده میکرو کپسوله شده در کانال دایروی مستقیم و مجرای پله‌ای نشان داده شده است. در مورد کانال دایروی مستقیم، نسبت TPR برای نانوسیال ۳٪ بیشترین مقدار (حدود ۳/۳۲) را دارد، چرا که نانوسیال ۳٪ هم از یکسو میزان گرمایی جذب شده را افزایش داده و هم از سوی دیگر میزان افت افزایش چندانی نداشته است. سیال با مواد تغییر فاز دهنده میکرو کپسوله ۵٪ در رتبه دوم با نسبت TPR=2.25 قرار دارد. اما در مورد مجرای پله‌ای با توجه به افزایش چشمگیر میزان افت هد در نانوسیال‌ها، رتبه نخست برای پارامتر TPR از آن سیال با مواد تغییر فاز دهنده میکرو کپسوله ۵٪ با TPR=2.02 است.

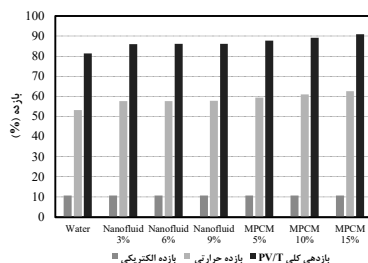
۸- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر به منظور افزایش کارایی یک سیستم فتولتایی- گرمایی، چهار طرح برای مجرای کانال خنک‌کن جاذب گرمایی شامل لوله دایروی مستقیم، کانال دایروی موج سینوسی با دامنه‌های مختلف، کانال زیگزاکی با مقطع مستطیلی و کانال پله‌ای ارائه شده است. با توجه به آنالیز گرمایی انجام شده بر روی کل مدل، مشخص گردید که کانال پله‌ای با جذب گرمای بیشتر دارای بهترین کارایی در بین سایر دیگر طرح‌ها است. اگر چه استفاده از این کانال سبب افزایش میزان افت هد سیال تا حدود ۲/۶ برابر می‌گردد. در ادامه اثر میزان دبی سیال و همچنین استفاده از نانوسیال نقره و سیال با مواد تغییر فاز دهنده میکرو کپسوله شده با درصد کسر حجمی‌های مختلف نیز بر میزان جذب گرما و کارایی سیستم ارزیابی گردید. در نهایت، مهمترین نتایج این پژوهش را می‌توان در نکات ذیل خلاصه نمود:

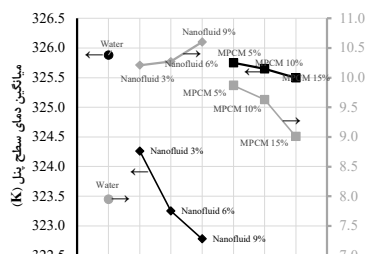
- استفاده از طرح کانال پله‌ای نسبت به طرح‌های دیگر سبب افزایش راندمان و بهبود عملکرد سیستم می‌شود به نحوی که راندمان گرمایی، الکتریکی و کلی سیستم به ترتیب ۲/۲٪، ۱۵/۲٪، ۱۰/۳٪ و ۱۰/۳٪ افزایش خواهد یافت. شایان ذکر است که میزان افت هد سیال در این کانال نیز ۲/۶ برابر کانال دایروی مستقیم می‌باشد.
- افزایش دبی سیال عبوری در کانال سبب افزایش ضریب انتقال گرما جابه‌جایی شده و این موضوع باعث دفع گرمای بیشتر از سطح پنل و لذا کاهش میانگین دمای سطح پنل می‌گردد. به طوری که اگر میزان دبی جرمی عبوری ۸ برابر شود، دمای سطح پنل در لوله دایروی مستقیم حدود ۱/۹٪ و در کانال پله‌ای حدود ۲/۴٪ کاهش خواهد یافت. البته به نظر می‌رسد با توجه به افزایش چشمگیر توان پمپاژ مورد نیاز در اثر ۸ برابر شدن دبی، این میزان کاهش دمای سطح پنل احتمالاً به صرفه نخواهد بود.
- استفاده از نانوسیال نقره یا سیال با مواد تغییر فاز دهنده میکرو کپسوله شده می‌تواند در بهبود کارایی و عملکرد سیستم موثر باشد. به طوری که استفاده از نانوسیال و همچنین سیال با مواد تغییر فاز دهنده سبب افزایش راندمان کلی سیستم به ترتیب به اندازه ۱۸/۳٪ و ۲۵/۲٪ در لوله دایروی و ۵/۸٪ و ۱۱/۷٪ در مجرای پله‌ای می‌شود. از سوی دیگر نتایج حاکی از آن است که اگرچه افت هد سیال با مواد تغییر فاز دهنده در لوله دایروی مستقیم از نانوسیال نقره بیشتر است اما این موضوع در مورد کانال پله‌ای که افت هد بیشتر به دلیل افت هد فرعی (زانویی) می‌باشد کاملاً برعکس است.
- نسبت بهبود در میزان گرمای جذب شده به درصد افزایش افت هد (نسبت TPR)، در کانال کانال دایروی مستقیم برای نانوسیال نقره ۳٪ و در مجرای پله‌ای برای سیال با مواد تغییر فاز دهنده میکرو کپسوله شده ۵٪ بیشترین مقدار را دارد.
- در نهایت با توجه به نتایج ارائه شده نتیجه می‌شود استفاده از طرح‌های دیگری برای کانال خنک‌کن در جاذب گرمایی به جای لوله دایروی مستقیم از یکسو و همچنین ارتقا خواص سیال مبرد با استفاده از سیال با مواد تغییر فاز دهنده میکرو کپسوله شده از



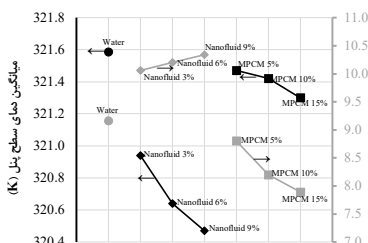
(الف)



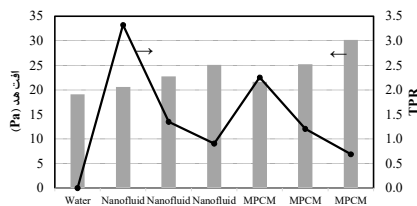
(ب)



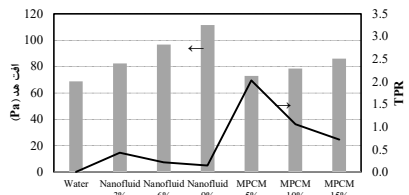
(پ)



(ت)



(ث)



(ج)

شکل ۱۰- بازده گرمایی، الکتریکی و کل در (الف) کانال دایروی مستقیم، (ب) مجرای پله‌ای، و مقایسه میانگین دمای سطح پنل و اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی در (پ) کانال دایروی مستقیم، (ت) مجرای پله‌ای، و مقایسه افت هد و نسبت TPR در (ث) کانال دایروی مستقیم، (ج) مجرای پله‌ای، برای نانوسیال ۳٪، ۶٪، ۹٪ و سیال با مواد تغییر فاز دهنده میکرو کپسوله شده ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪.

- [15] Energy, Vol. 175, No.1, pp. 300–8, 2019.
Hamrouni N., Jraidi M., and Chérif A., Solar Radiation And Ambient Temperature Effects On The Performances Of A PV Pumping System. *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 11, No.1, pp. 95–106, 2008.
- [16] Maadi SR., Khatibi M., Ebrahimnia-Bajestan E., and Wood D., Coupled Thermal-Optical Numerical Modeling Of PV/T Module – Combining CFD Approach And Two-Band Radiation DO Model. *Energy Conversion and Management*, Vol. 198, 2019.
- [17] Eisapour M., Eisapour AH., Hosseini MJ., and Talebizadehsardari P., Exergy And Energy Analysis Of Wavy Tubes Photovoltaic-Thermal Systems Using Microencapsulated PCM Nano-Slurry Coolant Fluid. *Applied Energy*, Vol. 266, No.1, pp. 1–19, 2020.
- [18] Evans DL., Simplified Method For Predicting Photovoltaic Array Output. *Solar Energy*, Vol. 27, No.6, pp. 555–60, 1981.
- [19] Azmi WH., Sharma K V., Mamat R., Alias ABS., and Izwan Misnon I., Correlations For Thermal Conductivity And Viscosity Of Water Based Nanofluids. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 36, No.1, pp. 1–6, 2012.
- [20] Ma F., Zhang P., and Shi XJ., Investigation Of Thermo-Fluidic Performance Of Phase Change Material Slurry And Energy Transport Characteristics. *Applied Energy*, Vol. 227, No.1, pp. 643–54, 2018.
- [21] Sardarabadi M., and Passandideh-Fard M., Experimental And Numerical Study Of Metal-Oxides/Water Nanofluids As Coolant In Photovoltaic Thermal Systems (PVT). *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 157, No.1, pp. 533–42, 2016.
- [22] Yu Q., Romagnoli A., Yang R., Xie D., Liu C., Ding Y., and Li Y., Numerical Study On Energy And Exergy Performances Of A Microencapsulated Phase Change Material Slurry Based Photovoltaic/Thermal Module. *Energy Conversion and Management*, Vol. 183, No.1, pp. 708–20, 2019.
- سوی دیگر بهترین راهکارها برای بهبود عملکرد الکتریکی و گرمایی یک سیستم فتوولتایی-گرمایی می‌باشد.
- ### ۹- مراجع
- [1] Zervos A., Renewables 2019 Global Report. Paris; 2019 [accessed 2020 Sep 20]. Available from: www.ren21.net.
- [2] Alobaid M., Hughes B., O'Connor D., Calautin J., and Heyes A., Improving Thermal And Electrical Efficiency In Photovoltaic Thermal Systems For Sustainable Cooling System Integration. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, Vol. 6, No.2, pp. 305–22, 2018.
- [3] Ibrahim A., Jin GL., Daghigh R., Salleh MHM., Othman MY., Ruslan MH., Mat S., and Sopian K., Hybrid Photovoltaic Thermal (PV/T) Air And Water Based Solar Collectors Suitable For Building Integrated Applications. *American Journal of Environmental Sciences*, Vol. 5, No.5, pp. 618–24, 2009.
- [4] Hosseinzadeh M., Salari A., Sardarabadi M., and Passandideh-Fard M., Optimization And Parametric Analysis Of A Nanofluid Based Photovoltaic Thermal System: 3D Numerical Model With Experimental Validation. *Energy Conversion and Management*, Vol. 160, No.1, pp. 93–108, 2018.
- [5] Rejeb O., Gaillard L., Giroux-Julien S., Ghenai C., Jenni A., Bettayeb M., and Menezo C., Novel Solar PV/Thermal Collector Design For The Enhancement Of Thermal And Electrical Performances. *Renewable Energy*, Vol. 146, No.1, pp. 610–27, 2020.
- [6] Ibrahim A., Othman MY., Ruslan MH., Mat S., and Sopian K., Recent Advances In Flat Plate Photovoltaic/Thermal (PV/T) Solar Collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No.1, pp. 352–365, 2011.
- [7] Kim JH., and Kim JT., The Experimental Performance Of An Unglazed PVT Collector With Two Different Absorber Types. *International Journal of Photoenergy*, Vol. 2012, No.1, pp. 1–6, 2012.
- [8] Sardouei MM., Mortezaipour H., and Jafari Naeimi K., Temperature Distribution And Efficiency Assessment Of Different PVT Water Collector Designs. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, Vol. 43, No.6, pp. 1–13, 2018.
- [9] Al-Shamani AN., Mat S., Ruslan MH., Abed AM., and Sopian K., Effect Of New Ellipse Design On The Performance Enhancement Of PV/T Collector: CDF Approach. *International Journal of Environment and Sustainability*, Vol. 5, No.2, pp. 54–60, 2016.
- [10] Sun L., Yang L., Shao LL., and Zhang CL., Overall Thermal Performance Oriented Numerical Comparison Between Elliptical And Circular Finned-Tube Condensers. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 89, No.1, pp. 234–44, 2015.
- [11] Rosli MAM., Ping YJ., Misha S., Akop MZ., Sopian K., Mat S., Al-Shamani AN., and Saruni MA., Simulation Study Of Computational Fluid Dynamics On Photovoltaic Thermal Water Collector With Different Designs Of Absorber Tube. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, Vol. 52, No.1, pp. 12–22, 2018.
- [12] Ibrahim A., Othman MY., Ruslan MH., Alghoul MA., Yahya M., Zaharim A., and Sopian K., Performance Of Photovoltaic Thermal Collector (PVT) With Different Absorbers Design. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, Vol. 5, No.3, pp. 321–30, 2009.
- [13] Aste N., Del Pero C., and Leonforte F., Thermal-Electrical Optimization Of The Configuration A Liquid PVT Collector. *Energy Procedia*, Vol. 30, No.1, pp. 1–7, 2012.
- [14] Yu Y., Yang H., Peng J., and Long E., Performance Comparisons Of Two Flat-Plate Photovoltaic Thermal Collectors With Different Channel Configurations.