

مطالعه عددی عملکرد یک گردآورنده حرارتی فتوولتائیک خورشیدی با نانو سیال برای جریان آرام

آقائی قهفرخی ایمان، سرحدی فرامرز، حسین نژاد دوین علیرضا

دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، Iman.aghaieghahfarokhi@gmail.com

استادیار گروه مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، fsarhaddi@eng.usb.ac.ir

دانشیار گروه مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، nezhadd@hamoon.usb.ac.ir

چکیده

در این مقاله به مطالعه عددی یک گردآورنده حرارتی فتوولتائیک خورشیدی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی پرداخته شده است. پس از بررسی معادلات حاکم، دمای میانگین سطح مدول فتوولتائیک، بیشینه توان الکتریکی و بازده گردآورنده حرارتی فتوولتائیک خورشیدی برای جریان آرام سیال عامل آب و نانو سیال محاسبه گردیده و مقایسه می شود. با توجه به اهمیت انتقال حرارت سیال و وجود ذرات با ضریب انتقال حرارت هدایتی بالا انتقال حرارت بهتر و بیشتر صورت گرفته، بازده حرارتی و الکتریکی گردآورنده حرارتی فتوولتائیک خورشیدی افزایش می یابد. برای اطمینان از صحت کار، نتایج این مطالعه عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده و از همخوانی مناسبی برخوردار می باشد.

واژه های کلیدی: گردآورنده حرارتی فتوولتائیک خورشیدی، دینامیک سیالات محاسباتی، انتقال حرارت، نانو سیال، مطالعه عددی، جریان آرام

مقدمه

استفاده از انرژی خورشیدی در تاریخ تمدن انسان سابقه‌ای کهن دارد. انرژی خورشیدی یکی از اولین منابعی بود که انسان برای تأمین گرمای مورد نیاز خود از آن استفاده کرد. استفاده از انرژی خورشیدی برای آتش زدن کشتی‌های جنگی در سال ۲۱۲ قبل از میلاد یکی از فصول درخشان تاریخ بشری است. ارشمیدس با نصب آینه‌های مربع شکل کوچک در کنار یکدیگر و روی یک پایه متحرک، نور خورشید را بر روی کشتی‌های مهاجم دشمن متمرکز کرد و آن‌ها را به آتش کشید. واقعیت تاریخی این داستان هنوز چندان روشن نیست. بنا به دلایلی همچون اتمام‌پذیر بودن، تولید آلودگی‌های زیست محیطی و قیمت گران سوخت‌های فسیلی، بشر بیش از پیش استفاده از انرژی‌های نو همچون انرژی خورشیدی را در دستور کار خویش قرار داده است. نسبت مقدار مصرف سالیانه انرژی سوخت‌های فسیلی و هسته‌ای و انرژی آب در دنیا به مقدار سالیانه انرژی که از خورشید به زمین می‌رسد، حدود ۱ به ۱۳۰۰۰ است [۲،۱]. این نسبت در ایران تقریباً ۱ به ۵۰۰۰ می‌باشد [۳]. این اعداد و ارقام نشان می‌دهند که استفاده از انرژی خورشید تا چه حد می‌تواند در برآورده کردن نیازهای انرژی کشور موثر باشد. گردآورنده حرارتی فتوولتائیک خورشیدی (PV/T) در حقیقت نوعی مبدل گرمایی است که انرژی خورشیدی را به انرژی الکتریکی و حرارتی مفید تبدیل می‌کند. گردآورنده‌های PV/T نسبت به گردآورنده‌های خورشیدی معمولی دارای مزایای زیر می‌باشند:

- ۱- استفاده از فضای بهینه نصب به دلیل ترکیب دو سیستم در یک سیستم واحد
 - ۲- افزایش راندمان مدول فتوولتائیک به دلیل جلوگیری از افزایش دمای مدول فتوولتائیک با جذب حرارت توسط سیال عاملی که در گردآورنده خورشیدی در حال گردش است
 - ۳- عدم نیاز به منبع الکتریکی خارجی برای گردش سیال عامل در گردآورنده خورشیدی با استفاده از الکتروسیسته ای که در مدول فتوولتائیک تولید می‌شود
 - ۴- افزایش راندمان انرژی نسبت به سیستم‌های متداول
- هزینه یک وات توان الکتریکی تولیدی توسط گردآورنده‌های حرارتی فتوولتائیک حدود هفت دلار و دوره بازپرداخت سرمایه‌گذاری روی چنین سیستم‌هایی در حدود ۱۵-۱۰ سال می‌باشد. واضح است که اگر عملکرد یک گردآورنده حرارتی فتوولتائیک بهینه باشد دوره بازپرداخت سرمایه‌گذاری روی آن کاهش می‌یابد و نقش مهمی در صرفه‌جویی و اصلاح الگوی مصرف خواهد داشت [۱].

نانوسیالات بوسیله پخش و منتشر کردن ذرات در اندازه‌های نانومتر در سیالات متداول منتقل کننده گرما، به منظور افزایش هدایت گرمایی و بهبود عملکرد انتقال حرارت، ساخته می‌شوند. نتایج آزمایش‌هایی که در رابطه با نحوه انتقال حرارت بر روی چندین نمونه نانو سیال انجام شد، نشان می‌دهد که عملکرد نانو سیالات در انتقال حرارت عموماً بیشتر از آن چیزی است که به صورت نظری پیش‌بینی شده است. این واقعیت یک کشف اساسی در مسئله انتقال حرارت می‌باشد. خواص استثنایی نانو سیالات شامل هدایت حرارتی بیشتر نسبت به سوسپانسیون‌های معمولی، رابطه غیرخطی بین هدایت و غلظت مواد جامد و بستگی شدید هدایت به دما است. البته ذکر این نکته نیز ضروری است که نانو سیال‌ها دارای محدودیت‌هایی نیز هستند، محدودیت‌هایی که باعث شدند نانو سیال‌ها نتوانند جای خود را به عنوان یکی از مهم‌ترین مواد در صنعت باز کنند. یکی از بزرگترین مشکلاتی که مهندسی در زمینه‌ی استفاده از نانو سیال‌ها با آن روبرو هستند، مساله‌ی پایداری فیزیکی و شیمیایی آن‌ها می‌باشد. مساله‌ی کلوخه شدن و رسوب در جداره‌ها باعث می‌شود که استفاده از نانو سیال‌ها در سیستم‌های

¹Solar Photovoltaic Thermal (PV/T) Collector

گرمایی با مشکل رو به رو شود. سیال‌های متداولی که در سیستم‌های گرمایی به عنوان عامل انتقال حرارت به کار می‌روند، دارای هدایت حرارتی پایینی هستند. اما همانطور که می‌دانیم فلزات و اکسیدهای فلزی نسبت به سیالات، هدایت حرارتی بالاتری دارا هستند. بنابراین مخلوط سیال پایه و ذرات فلزی می‌تواند قابلیت گرمایی بالاتری داشته باشد، که برای این منظور از ذرات با اندازه نانومتر در سیال پایه استفاده می‌شود.

ولف [۲]، کرن و راسل [۳] در سال ۱۹۷۰ میلادی مفاهیم اساسی گردآورنده حرارتی فتوولتائیک را مطرح کردند. کاکس و راگهیورمن در سال ۱۹۸۵ برای پیدا کردن طرح بهینه گردآورنده حرارتی فتوولتائیک جهت افزایش جذب تابش خورشیدی یک شبیه‌سازی کامپیوتری انجام دادند [۴]. هگازی [۵] و سوپیان و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۰ یک کانال شیشه‌ای بر روی مدول فتوولتائیک قرار دادند و از انرژی حرارتی ایجاد شده برای گرم نمودن محیط و خشک کردن محصولات کشاورزی بهره بردند. زنداگ و همکاران در سال ۲۰۰۲ برای تحلیل عملکرد گردآورنده حرارتی فتوولتائیک با سیال عامل آب مدل‌های یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی را توسعه داده، نشان دادند که مدل یک بعدی پایا می‌تواند به خوبی مدل‌های دو بعدی و سه بعدی عملکرد گردآورنده حرارتی فتوولتائیک را پیش‌بینی کند [۷]. دویی و تایواری در سال ۲۰۰۸ یک گردآورنده حرارتی فتوولتائیک با سیال عامل آب را برای اقلیم شهر دهلی نو هند طراحی و آزمایش کردند. سیستم حرارتی فتوولتائیک آن‌ها انرژی حرارتی و الکتریکی را به طور همزمان تولید می‌کرد ولی مزیت خنک کاری مدول فتوولتائیک در آن دیده نمی‌شد [۸]. شهسوار و عامری در سال ۲۰۱۱ به بررسی آزمایشگاهی راندمان الکتریکی و راندمان حرارتی یک گردآورنده حرارتی فتوولتائیک پرداختند. آن‌ها توان الکتریکی که فن‌ها نیاز داشتند را مستقیماً از پنل فتوولتائیک گرفتند و نشان دادند برای حالتی که از دو فن استفاده می‌شود، بیشترین راندمان الکتریکی برای سیستم حرارتی فتوولتائیک را خواهیم داشت [۹]. کامیا و هانامورا در سال ۲۰۱۱ به بررسی تاثیر استفاده از نانوذرات معلق در افزایش جذب تشعشعات خورشیدی پرداختند و نشان دادند نانو ذرات با میانگین قطر ۴/۹ میلی‌متر و کسر حجمی ۰/۰۰۱ بیشترین ضریب جذب را دارند [۱۰]. یوسفی و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بررسی آزمایشگاهی تاثیر تغییر PH نانوسیال MWCNT-H₂O بر بازده گردآورنده‌های خورشیدی صفحه تخت پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بیشترین ضریب جذب برای PH=۹/۵ بوده و برای PH=۳/۵ و PH=۶/۵ برابر است [۱۱]. ماهیان و همکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی و مرور کاربردهای نانوسیال‌ها در انرژی خورشیدی پرداختند و گزارش دادند که در بعضی موارد استفاده از نانوسیال راندمان را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. البته استفاده از نانو سیال با کسر حجمی بالاتر همیشه بهترین انتخاب نیست و باید با کسرهای حجمی متفاوت تست کرده و کسر حجمی بهینه را بدست آورد [۱۲].

معادلات حاکم و روش حل عددی

در این مقاله به مطالعه عددی یک گردآورنده حرارتی فتوولتائیک خورشیدی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی پرداخته شده است. برای مدل کردن جریان سیال نانوی آب -نقره از مدل دو فاز مخلوط استفاده شده است همه خواص فیزیکی ثابت در نظر گرفته شده‌اند. معادلات بقا به صورت زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

معادله پیوستگی برای مخلوط چند فاز عبارت است از:

$$\nabla \cdot (\rho_m \mathbf{V}_m) = 0 \quad \rho_m = \frac{\sum_{k=1}^n \Phi_k \rho_k V_k}{\rho_m} = \sum_{k=1}^n \Phi_k \rho_k \quad (1)$$

در معادلات بالا \mathbf{V}_m و ρ_m به ترتیب سرعت جرمی متوسط^۲ و دانسیته مخلوط و Φ_k کسر حجمی فاز k است.

² mass-averaged velocity

معادله ممنوم مخلوط نیز که ترکیبی از معادلات ممنوم مربوط به هر کدام از فازها است، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\nabla \cdot (\rho_m \mathbf{V}_m \mathbf{V}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \mathbf{V}_m) - \rho_m \beta_{eff} g(T - T_0) + \nabla \cdot (\sum_{k=1}^n \Phi_k \rho_k \mathbf{V}_{dr,k} \mathbf{V}_{dr,k}) \quad (2)$$

که در آن n تعداد فازها و $\mathbf{V}_{dr,k}$ سرعت سوق فاز k نسبت به مخلوط و μ_{eff} ویسکوزیته موثر مخلوط است.

$$\mathbf{V}_{dr,k} = \mathbf{V}_k - \mathbf{V}_m \quad (3)$$

معادله انرژی مخلوط به صورت زیر خواهد بود:

$$\nabla \cdot (\sum_{k=1}^n (\Phi_k v_k (\rho_k E_k + p))) = \nabla \cdot (K_{eff} \nabla T) + Q \quad (4)$$

که در آن Q ترم تولید انرژی الکتریکی مدول فتوولتائیک است. در معادله (۴)، E_k به صورت زیر می‌باشد:

$$E_k = h_k \frac{p}{\rho_k} + \frac{V_k^2}{2} \quad (5)$$

که h_k آنتالپی محسوس فاز k است. همچنین K_{eff} ضریب هدایت حرارتی موثر است که در قسمت خواص فیزیکی توضیح داده می‌شود.

چگالی موثر سیال نانو به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\rho_{eff} = (1 - \Phi) \rho_f + \Phi \rho_p \quad (6)$$

ضریب انبساط حجمی سیال نانو مطابق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\beta_{eff} = \left[\frac{1}{1 + \frac{\Phi \rho_p}{(1 - \Phi) \rho_f}} \frac{\beta_p}{\rho_p} + \frac{1}{1 + \frac{\Phi \rho_p}{(1 - \Phi) \rho_f}} \right] \beta_f \quad (7)$$

ظرفیت گرمایی ویژه سیال نانو به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$C_{p,eff} = \left[\frac{(1 - \Phi) (\rho C_p)_f + \Phi (\rho C_p)_p}{(1 - \Phi) \rho_f + \Phi \rho_p} \right] \quad (8)$$

ضریب هدایت حرارتی موثر برای سیال نانو را با استفاده از رابطه چون و همکاران [۱۳]، که در آن حرکت برآونی و قطر متوسط نانو ذرات در نظر گرفته می‌شود، به دست آورده شده است، که به صورت زیر می‌باشد:

$$K_{eff} = \left[1 + 64.7 \times \Phi^{0.746} \left(\frac{d_f}{d_p} \right)^{0.369} \left(\frac{K_p}{K_f} \right)^{0.746} \times Pr^{0.9955} \times Re^{1.2321} \right] K_f \quad (9)$$

$$Pr = \frac{\mu_f}{\rho_f \alpha_f} \quad (10)$$

$$Re = \frac{\rho_f K_b T}{3\pi \mu^2 L_{bf}} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، L_{bf} طول مسیر آزاد نامیده می‌شود و برای آب در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد $0.17/10^{-9}$ نانومتر است. K_b ثابت بولتزمن است که مقدار آن و سایر پارامترها به صورت زیر می‌باشد:

$$K_b = 1.3807 \times 10^{-23} \left(\frac{J}{K} \right) \quad (12)$$

³ drift velocity

$$\mu = A \times 10^{\frac{B}{T-c}} \quad (13)$$

$$A = 2.414 \times 10^{-5} \text{ (Pa.s)} \quad (14)$$

$$B = 247K \quad (15)$$

$$C = 140 K \quad (16)$$

ویسکوزیته سیال نانو با استفاده از رابطه معصومی و همکاران [۱۴] به دست آمده است. رابطه مذکور تابعی از درجه حرارت، قطر متوسط نانو ذرات، دانسیته نانو ذرات و خواص فیزیکی سیال پایه است و به صورت زیر بیان می شود:

$$\mu_{eff} = \mu_f + \frac{\rho_p V_B d_p^2}{72C\delta} V_B = \frac{1}{dp} \sqrt{\frac{18K_b T}{\pi \rho_p d_p}} \delta = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6\Phi} d_p} \quad (17)$$

$$C = \mu_f^{-1} [(c_1 d_p + c_2)\Phi + (c_3 d_p + c_4)] \quad (18)$$

$$c_1 = -1.133 \times 10^{-6} \quad c_2 = -2.771 \times 10^{-6} \quad c_3 = 9 \times 10^{-8} \quad c_4 = -3.93 \times 10^{-7} \quad (19)$$

در رابطه (۱۷) سرعت برآونی و δ ضخامت لایه مرزی می باشند. لازم به ذکر است که d_p در معادلات بالا به صورت نانومتر بیان می شود.

توان الکتریکی خروجی (P_{el}) از مدول فتوالکتریک، بازده الکتریکی (η_{el}) و بازده حرارتی (η_{th}) گردآورنده به صورت زیر تعریف می شوند [۱]:

$$P_{el} = V_{mp} * I_{mp} \quad (20)$$

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{G N_s N_m L_1 L_2} \quad (21)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_u}{G L_1 L_2} \quad (22)$$

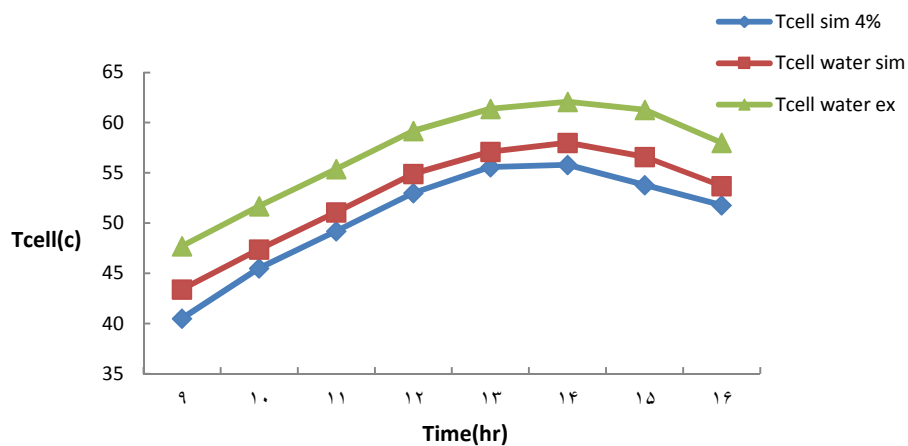
در روابط فوق \dot{Q}_u و L_2 ، L_1 ، N_m ، N_s ، G ، $V_{mp,ref}$ ، $I_{mp,ref}$ به ترتیب نشان دهنده شدت جریان در بیشینه توان، ولتاژ در بیشینه توان، شار خورشیدی رسیده به سطح مدول، تعداد رشته‌ها، تعداد مدول‌ها در هر رشته، طول و عرض مدول فتوولتائیک و نرخ حرارت مفید جذب شده در گردآورنده می باشند.

برای حل معادلات و گسسته سازی ناحیه حل، از شبکه سازمان یافته استفاده شده و روش حجم محدود برای گسسته سازی به کار رفته است. طرح اختلاف بالادست مرتبه دوم برای گسسته سازی عبارات نفوذ و جابجایی معادلات حاکم، استفاده شده و برای ارتباط بین میدان سرعت و فشار، الگوریتم سیمپل سی (SIMPLEC) مورد استفاده قرار گرفته است.

نتایج و بحث

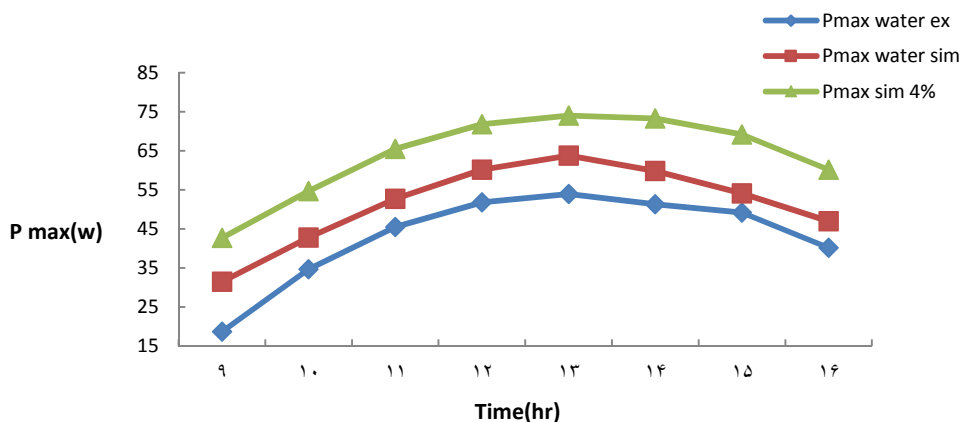
جهت حصول اطمینان از صحت نتایج، ابتدا استقلال شبکه از تعداد گره‌ها بررسی گردید و نتایج برای $45 * 50 * 150$ به ترتیب در راستاهای محیطی، شعاعی و محوری مستقل از افزایش گره‌ها بود. نتایج بدست آمده برای سیال عامل آب با کار آزمایشگاهی داستانیان [۱۵] مقایسه گردیده است. همخوانی این نتایج دلیل دیگری بر صحت نتایج بدست آمده دارد. برای نشان دادن تاثیر استفاده از نانوسیال بر افزایش بازده سیستم، نتایج برای سیال عامل آب و نانوسیال نقره با کسر حجمی ۴٪

مقایسه می‌گردد. با تابش خورشید به گردآورنده، دمای مدول فتوولتائیک، افزایش می‌یابد. با عبور سیال از زیر مدول، گرمای مدول فتوولتائیک به سیال عامل منتقل شده و دمای سلول کاهش می‌یابد. به دلیل افزایش ضریب انتقال حرارت هدایت نانوسیال نقره نسبت به آب، انتقال گرما از مدول فتوولتائیک به نانوسیال بیشتر صورت می‌گیرد. همانطور که در نمودار شکل (۱) نیز مشهود است با جایگزینی نانوسیال بجای آب، دمای سلول کاهش می‌یابد.



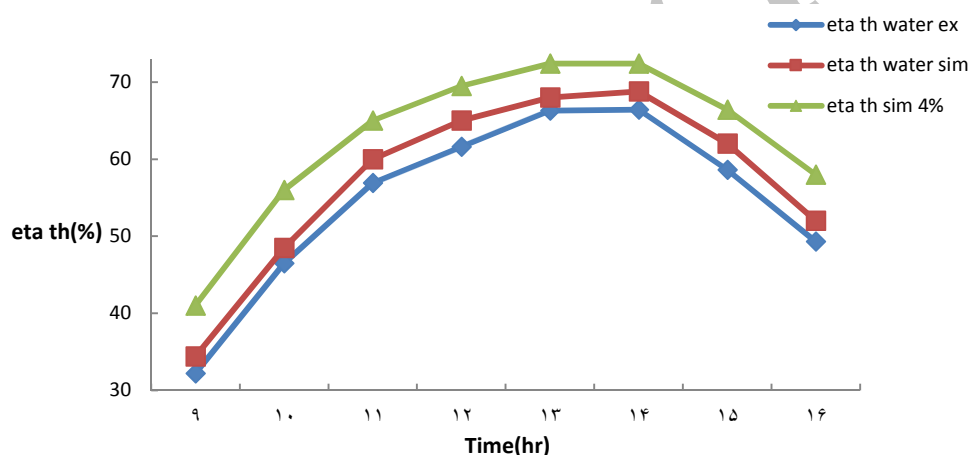
شکل (۱): نمودار دمای میانگین مدول برای مدل عددی و آزمایشگاهی در ساعات مختلف برای آب و نانوسیال نقره

زمانی که بیشترین شار خورشیدی به مدول می‌رسد، دمای مدول بیشینه مقدار خود را دارد. در نمودار شکل (۲)، بیشینه توان الکتریکی از یک مقدار کم در صبح شروع می‌شود. در ظهر به بیشینه مقدار خود رسیده دوباره از مقدار آن کاسته می‌گردد. علت مقدار بیشینه در ظهر هم افزایش میزان شار خورشیدی رسیده به مدول می‌باشد. شدت جریان الکتریکی تولید شده بوسیله سلول با دمای سلول رابطه عکس دارد که این جزء خواص سلول‌های فتوولتائیک می‌باشد. از آنجایی که با بکارگیری نانوسیال شدت جریان افزایش می‌یابد پس مطابق رابطه (۲۰) بیشینه توان الکتریکی نیز زیاد می‌شود که شکل (۲) این مطلب را به خوبی نشان می‌دهد.

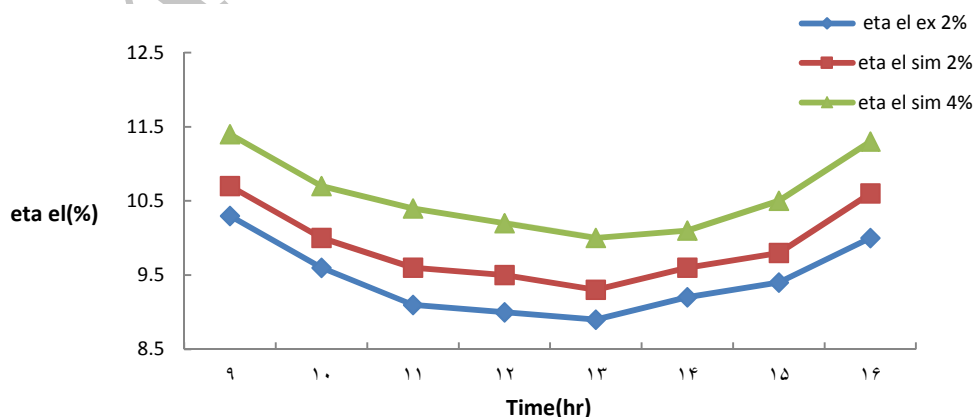


شکل (۲): نمودار بیشینه توان الکتریکی تولیدی برای مدل عددی و آزمایشگاهی در ساعات مختلف برای آب و نانوسیال نقره

مقادیر مربوط به بازده حرارتی و بازده الکتریکی برای آب و نانوسیال با کسر حجمی ۴٪ در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است. به منظور اطمینان از صحت نتایج، مقادیر بازده الکتریکی و بازده مکانیکی برای آب با کار داستانیان [۱۵] مقایسه گردیده است. با توجه به روابط (۲۱) و (۲۲) مشخص می‌شود که بازده حرارتی و بازده الکتریکی با شار خورشیدی رسیده به مدول رابطه عکس دارند. از طرفی بازده حرارتی با نرخ حرارت مفید جذب شده و بازده الکتریکی با بیشینه توان الکتریکی رابطه مستقیم دارند. از آنجایی که شار خورشیدی رسیده به مدول از نظر عددی نسبت به نرخ حرارت مفید جذب شده کوچکتر و نسبت به بیشینه توان الکتریکی بزرگتر است، بازده حرارتی با افزایش شار خورشیدی رسیده به مدول افزایش و بازده الکتریکی با افزایش شار خورشیدی رسیده به مدول کاهش می‌یابد. کاهش دمای سلول باعث افزایش بازده الکتریکی می‌شود و همانطور که در نمودار شکل (۴) نیز نشان داده شده است، انتقال حرارت با حضور نانوسیال نقره بهتر از آب صورت گرفته و بازده الکتریکی افزایش می‌یابد. هرچه انتقال حرارت بیشتر صورت گیرد بازده حرارتی نیز افزایش می‌یابد، که با نانوسیال نقره این امر محقق می‌شود شکل (۳).



شکل (۳): نمودار بازده حرارتی برای مدل عددی و آزمایشگاهی در ساعات مختلف برای آب و نانوسیال نقره



شکل (۴): نمودار بازده الکتریکی برای مدل عددی و آزمایشگاهی در ساعات مختلف برای آب و نانوسیال نقره

نتیجه گیری

در این مقاله عملکرد یک گردآورنده حرارتی فتوولتائیک خورشیدی با نانو سیال به کمک دینامیک سیالات محاسباتی مورد مطالعه قرار گرفت. افزودن ذرات نقره به آب و تولید نانوسیال نقره باعث می شود که انتقال حرارت بین مدول فتوولتائیک و سیال عامل بهتر صورت پذیرد. دمای مدول فتوولتائیک برای نانوسیال نقره ۴٪ نسبت به آب کاهش و بیشینه توان الکتریکی، بازده الکتریکی و بازده حرارتی افزایش می یابند و این امر نشان دهنده آن است که استفاده از نانوسیالات می تواند تاثیر زیادی در بهبود عملکرد گردآورنده های حرارتی فتوولتائیک خورشیدی داشته باشند.

مراجع

۱. سرحدی، ف. (۱۳۸۹): «بهینه سازی چند تابع هدف (NSGA) گردآورنده های حرارتی فتوولتائیک خورشیدی بر اساس مفهوم اکسرژی»، دکتر سعید فراهت، زاهدان: دانشگاه سیستان و بلوچستان.
2. Wolf, M., 1976, "Performance Analysis of Combined Heating and Photovoltaic Power Systems for Residences", Energy Conversion and Management, Vol. 16, pp. 79–90.
3. Kern Jr., E.C., Russell, M.C., 1978, "Combined Photovoltaic and Thermal Hybrid Collector Systems", In: Proceedings of 13th IEEE Photovoltaic Specialists, Washington, DC, USA, pp. 1153–1157.
4. Cox III, C.H., 1985, Raghuraman, P., "Design Considerations for Flat-Plate Photovoltaic/Thermal Collectors", Solar Energy, Vol. 35, pp. 227–241.
5. Hegazy, A.A., 2000, "Comparative Study of the Performances of Four Photovoltaic/Thermal Solar Air Collectors", Energy Conversion and Management, Vol. 41, pp. 861–81.
6. Sopian, K, Liu, H.T, Kakac, 2000, S, Veziroglu, T.N, "Performance of a Double Pass Photovoltaic Thermal Solar Collector Suitable for Solar Drying Systems", Energy Conversion and Management, Vol. 41, No. 4, pp. 353–365.
7. Zondag, H.A, De Vries, D.W, Van Helden, W.G.J, Van Zolengen, R.J.C, Van Steenhoven, A.A., 2002, "The Thermal and Electrical Yield of a PV–Thermal Collector", Solar Energy, Vol. 72, No. 2, pp. 113–128.
8. Dubey, S, Tiwari, G.N., 2008, "Thermal Modeling of a Combined System of Photovoltaic Thermal (PV/T) Solar Water Heater", Solar Energy, Vol. 82, pp. 602–612.
9. Shahsavari, A, Ameri, M., 2010, "Experimental Investigation and Modeling of a Direct-Coupled PV/T Air Collector", Solar Energy, Vol. 84:1111, pp. 1938–1958.
10. Kameya, Y, Hanamura, K., 2011, "Enhancement of solar radiation absorption using nanoparticle suspension", Solar Energy, vol 85, pp. 299–307.
11. Yousefi, T, Veysi, F, Shojaeizadeh, E, Zinadini, S., 2012, "An experimental investigation on the effect of pH variation of MWCNT–H₂O nanofluid on the efficiency of a flat-plate solar collector", Renewable Energy vol. 39, pp. 293–298.
12. Mahian, O, Kianifar, A, Kalogirou, S, Pop, I, Wongwises, S., 2013, "A review of the applications of nanofluids in solar energy", International Journal of Heat and Mass Transfer vol. 57, pp. 582–594.



13. Chon, C.H., Kenneth D., Kihm, Lee, S.P., Stephen U. Choi, "Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al₂O₃) thermal conductivity enhancement", *Applied Physics Letters*, Vol. 87, pp. 1-3, 2005.
14. Masoumi, N., Sohrabi, N., Behzadmehr, A., "A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids", *J. Phys, D: ApplPhys*, Vol. 42, pp. 1-6, 2009.
۱۵. داستانیان، م، (۱۳۹۲)؛ "بررسی آزمایشگاهی عملکرد یک گردآورنده حرارتی فتوولتائیک خورشیدی با نانو سیال به عنوان خنک کننده"، دکتر سعید فراهت، زاهدان: دانشگاه سیستان و بلوچستان.

Archive of SID