



خنک سازی یک سیستم فتوولتائیک دارای متمرکز کننده با استفاده از هیت سینک حاوی مواد تغییر فاز دهنده و نانوذرات اکسید مس

رامین وطندوست^۱، آرش میرعبداله لواسانی^{۲*}، سعید دیناروند^۳، محمد سردارآبادی^۴، محمد افتخاری یزدی^۵

^{۱و۳و۵} گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

^۴ گروه انرژی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران

دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۷، بازنگری: ۱۴۰۳/۲/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۳/۲/۲۵

چکیده

در این مطالعه، خنک سازی یک سیستم فتوولتائیک متمرکز کننده دو بعدی به کمک هیت سینک حاوی مواد تغییر فاز دهنده و نانوذرات اکسیدمس به کمک روش عددی بررسی شده است. ماده تغییر فاز دهنده و نانو ذرات انتخابی به ترتیب از نوع n-octadecane و اکسید مس می باشد. نتایج این تحقیق نشان می دهد که اضافه کردن نانوذرات اکسید مس با کسر جرمی ۳ و ۵ درصد به ماده تغییر فاز دهنده پایه، باعث کاهش دمای سلول خورشیدی از 191°C به ترتیب به 185°C و 180°C می گردد.

*عهده دار مکاتبات: arashlavasani@iauctb.ac.ir

کلمات کلیدی: مواد تغییر فاز دهنده، سیستم فتوولتائیک متمرکز کننده، نانو ذرات اکسید مس.

نحوه استناد به این مقاله رامین وطندوست، آرش میرعبداله لواسانی، سعید دیناروند، محمد سردارآبادی، محمد افتخاری یزدی. خنک سازی یک سیستم فتوولتائیک دارای متمرکز کننده با استفاده از هیت سینک حاوی مواد تغییر فاز دهنده و نانوذرات اکسید مس. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۳؛ ۱۱ (۲) : ۱-۱۷.

۱- مقدمه

امروزه پنل های فتوولتائیک متمرکز کننده به دلیل مزایای مختلفی از جمله راندمان الکتریکی بالاتر، هزینه سرمایه گذاری کمتر به ازای هر وات، امکان استفاده در تجهیزات پیشرفته الکترونیکی و فضایی و ... مورد توجه قرار گرفته است. این نوع پنل ها حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد کارایی بیشتر نسبت به نمونه های فتوولتائیک معمولی دارند. در این نوع پنل ها، نور خورشید از محدوده وسیعی با استفاده از سه روش عدسی فرنل، آینه سهموی و بازتابنده بر روی سلول خورشیدی با ابعاد بسیار کوچک متمرکز می شود [۱]. بطور کلی در سیستم های فتوولتائیک تقریباً ۲۰-۱۸ درصد از انرژی خورشیدی دریافتی به انرژی الکتریکی و بقیه به گرما تبدیل می شود [۲]. این گرمای تولید شده باعث افزایش دمای سلول خورشیدی و در نهایت کاهش بازده عملکردی می شود. در سلول های خورشیدی مونو و پلی کریستال سیلیکونی، به ازای افزایش یک درجه سلسیوس دما، جریان اتصال کوتاه ۰/۰۶ تا ۰/۱ درصد و افت ولتاژ ۲ تا ۲/۳ میلی ولت افزایش می یابد که این موضوع باعث کاهش ۰/۴ تا ۰/۵ درصدی توان الکتریکی تولید شده می گردد [۳-۵].

با توجه به استفاده از سلول های خورشیدی مبتنی بر سیلیکون در ساختار پنل های متمرکز کننده ها، مشکل افزایش دمای سلول و کاهش راندمان در این سیستم ها نیز مشاهده می شود. سیستم های فتوولتائیک متمرکز کننده بر اساس میزان تمرکز (CR) به سه دسته تقسیم می شوند. در پنل هایی با نسبت تمرکز پایین بین ۲ تا ۱۰، تجهیزات خنک کننده و جابجایی برای چرخش پنل ها در جهت خورشید نیاز نبوده ولی بر خلاف این مورد، در نوع متمرکز کننده با نسبت های متوسط و نسبتاً بالا بین ۱۰ تا ۱۰۰۰، علاوه بر نیاز به استفاده از جابجا کننده ها جهت هم راستا شدن با خورشید، استفاده از روش های اکتیو و پسیو نیز از مهم ترین عوامل مورد نیاز است [۵].

یکی از مهم ترین روش های اکتیو و پسیو جهت خنک سازی پنل های فتوولتائیک استفاده از هیت سینک (HS)، به همراه مواد تغییر فاز دهنده (PCM) و نانو ذرات می باشد که با افزایش و بهبود انتقال حرارت در پنل های فتوولتائیک، باعث کاهش دمای عملکرد سلول خورشیدی و در نهایت افزایش بازده الکتریکی می شود [۶]. استفاده از روش های بیان شده، جهت خنک سازی سیستم های فتوولتائیک در مقالات مختلفی مورد بحث قرار گرفته است. ویرندا و همکاران [۷] در پژوهشی به استفاده از نانو ذرات اضافه شده به مواد تغییر فاز دهنده بعنوان یک روش پسیو جهت خنک سازی یک باتری لیتیومی پرداخته اند، نتایج این بررسی نشان می دهد که استفاده از نانو ذرات اکسید آلومینیوم در کنار ماده تغییر فاز دهنده پارافین واکس باعث افزایش انتقال حرارت در پشت باتری نسبت به دو حالت بدون خنک سازی و استفاده از ماده تغییر فاز دهنده بدون مواد نانو ذرات می گردد. رفایی و همکاران [۸] در مطالعه ای تجربی به بررسی تفاوت ۴ هندسه مختلف از هیت سینک جهت خنک سازی یک سلول خورشیدی از نوع متمرکز کننده پرداخته اند، نتایج این تحقیق سه موضوع را بصورت مستقل برای هر ۴ هندسه پیشنهادی بیان می نماید. اول مقادیر الکتریسته خروجی و راندمان حرارتی، دوم آنالیز اکسرژی و میزان هزینه های مربوطه، سوم آنالیز تاثیرات محیطی که با میزان کاهش کربن تولیدی در محیط و فاکتورهای دیگر قابل بررسی می باشد.

خدادادی و همکاران [۹] در مطالعه ای، به بررسی استفاده همزمان مواد تغییر فاز دهنده و نانو ذرات اکسید آلومینیوم در سیستم فتوولتائیک با رفلکتور فرنل، در شرایط مختلف از نظر نرخ جریان گرمی پرداخته اند، نتایج بررسی نشان می دهد که با وجود اضافه نمودن نانو ذرات در جریان های گرمی پایین، راندمان الکتریکی سیستم فتوولتائیک کاهش می یابد، این نتایج نشان می دهد که اضافه نمودن مواد تغییر فاز دهنده به همراه نانو ذرات تاثیر بسیار خوبی بر تبادل حرارتی داشته و راندمان سیستم را افزایش می دهد. کوتاری و همکاران [۱۰] در مطالعه ای، به بررسی همزمان تاثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده حاوی نانو ذرات و شکل فین دار و بدون فین در یک مبدل هیت سینک پرداخته اند، نتایج تحقیق نشان می دهد که از بین مقادیر نانو ذرات اکسید آلومینیوم با غلظت صفر، ۲، ۴، ۶ درصد استفاده شده، مقادیر با غلظت پایین دارای بیشترین بازده انتقال حرارت می باشد. محمد آقیب و همکاران [۱۱] در مطالعه ای تجربی، به بررسی موردی تاثیر استفاده از نانو ذرات اکسید آلومینیوم و

نانو لوله های کربنی بر خنک سازی مواد تغییر فاز دهنده پرداخته اند، نتایج این تحقیق نشان میدهد که در زمان استفاده از ترکیب پارافین بعنوان ماده تغییر فاز دهنده و ذرات اکسید آلومینوم و نانو لوله های کربنی، راندمان انتقال حرارت نسبت به نوع بدون مواد افزودنی، افزایش قابل ملاحظه دارد. اسماعیل و همکاران [۱۲] در مطالعه ای، به بررسی افزایش راندمان یک مبدل حرارتی هیت سینک جهت خنک سازی پنل فوتولتاییک از نوع متمرکز کننده با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده به همراه نانو ذراتی از جنس اکسید آلومینوم و اکسید مس و اکسید سیلیسیم پرداخته اند، نتایج این تحقیق نشان می دهد که استفاده از نانو ذرات همراه مواد تغییر فاز دهنده نسبت به نوع بدون مواد نانو، باعث افزایش راندمان مبدل حرارتی می گردد و ضمناً استفاده از نانو ذرات اکسید المینیوم نسبت به دو اکسید اشاره شده، باعث افزایش بیشتر انتقال حرارت و سرعت ذوب بالاتر مواد و کاهش دمای سلول فوتولتاییک می گردد.

محمد امام و همکاران [۱۳] در پژوهشی خنک سازی سیستم فوتولتاییک متمرکز کننده با استفاده از مبدل هیت سینک حاوی مواد تغییر فاز دهنده را بررسی کردند. هندسه های مورد بررسی در این پژوهش دارای چهار شکل مختلف، شامل تک حفره، سه حفره موازی، پنج حفره موازی، سه حفره سری می باشد، نتایج این تحقیق نشان می دهد استفاده از مبدل با هندسه موازی و تعداد حفره بیشتر باعث افزایش راندمان حرارتی و کاهش موثر دما و نهایتاً "افزایش راندمان الکتریکی پنل متمرکز کننده می گردد.

نجفی و همکاران [۱۴] بررسی استفاده از یک هیت سینک با ساختار مینی کانال همراه نانو مواد تغییر فاز دهنده به عنوان دو روش پسیو و اکتیو برای خنک سازی یک چپ الکترونیکی را انجام داده اند، در این مقاله تاثیرات تغییر مقادیر شار حرارتی - سرعت جریان سیال - نوع مواد تغییر فاز دهنده - نوع نانو مواد بر روی پارامترهای حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. امام و همکاران [۱۵] در مطالعه ای، راندمان و آنالیز سیستم فوتولتاییک متمرکز کننده زاویه دار را بررسی کردند، در این پژوهش تاثیر چند پارامتر مختلف شامل تغییرات زاویه پنل از صفر تا $+90^\circ$ درجه و ضریب تراکم پذیری از 5 تا 20 و مقادیر ضخامت مواد تغییر فاز دهنده از 50 تا 200 میلی متر، بر راندمان پنل فوتولتاییک مورد بررسی قرار گرفته است، نتایج تحقیق نشان دهنده حداکثر راندمان در حالت زاویه $+45^\circ$ درجه با ضریب تراکم 5 می باشد.

علی رادوان و همکاران [۱۶]، به شبیه سازی و آنالیز یک نمونه مبدل هیت سینک جهت خنک سازی سیستم فوتولتاییک متمرکز کننده در شرایط مختلف بهره برداری مانند نسبت تمرکز از 20 تا 40 درصد، سرعت جریان جرمی تا 100 رینولدز، سرعت باد و دمای سیال ورودی متفاوت، پرداخته اند. نتایج حاصل از کار آنها نشان می دهد که با افزایش مقادیر ضریب تمرکز و سرعت جریان جرمی، راندمان انتقال حرارت و نهایتاً تولید الکتریسیته افزایش می یابد.

در مقاله دیگری علی رادوان و همکاران [۱۷] به بررسی افزایش راندمان مبدل حرارتی هیت سینک دارای میکروکانال با استفاده از نانوسیال جهت خنک سازی سیستم فوتولتاییک متمرکز کننده پرداخته اند، ترکیبات نانو مورد استفاده در این پژوهش شامل اکسید آلومینوم و کاربید سیلیسیم بوده که با بررسی نتایج مربوطه راندمان حرارتی بالاتر در مبدل حاوی کاربید سیلیسیم نسبت به نوع دیگر را به اثبات رسیده است. هووانک و همکاران [۱۸] در مطالعه ای، به بررسی خنک سازی سیستم فوتولتاییک متمرکز کننده با استفاده از مبدل هیت سینک حاوی مواد تغییر فاز دهنده متخلخل پرداخته اند، نتایج تحقیق آنها نشان می دهد که با افزایش ارتفاع و میزان تخلخل مواد مورد استفاده، حداکثر راندمان الکتریکی حاصل می گردد.

با توجه به مطالعات انجام شده در خصوص روش های مورد استفاده جهت بهبود انتقال حرارت و افزایش راندمان سیستم های فوتولتاییک، در این مطالعه جهت افزایش راندمان حرارتی و الکتریکی یک سلول خورشیدی دارای متمرکز کننده از یک هیت سینک حاوی ماده تغییر فاز دهنده از نوع ان اوکتادسین (N-octadecane) به همراه نانو ذرات اکسید مس با کسر جرمی 3 و 5 درصد استفاده شده است.

خنک سازی یک سیستم فتوولتائیک دارای متمرکز کننده با استفاده از هیت سینک حاوی مواد تغییر فاز دهنده و نانوذرات اکسید مس

جدول شماره ۱: مشخصات ترموفیزیکی سلول فتوولتائیک

چگالی kg/m ³	ضریب هدایت حرارتی W/mK	ظرفیت گرمای ویژه kJ/kg K	اجزا
3000	2	500	شیشه
2330	148	677	سلول خورشیدی

جدول شماره ۲: مشخصات مواد تغییر فاز دهنده و آلومینیوم و نانوذرات اکسید مس

PCM n-octadecane	آلومینیوم Al	اکسیدمس CuO	اجزاء
0.358 w/mk 0.148 w/mk	211	18	ضریب هدایت حرارتی در حالت جامد /مایع W/mK
865 w/mk 770 w/mk	2675	6510	چگالی در حالت جامد /مایع kg/m ³
1934 w/mk 2196 w/mk	0.903	540	ظرفیت گرمای ویژه در حالت جامد /مایع kJ/kg K
28°C	-	-	دمای ذوب (°C)

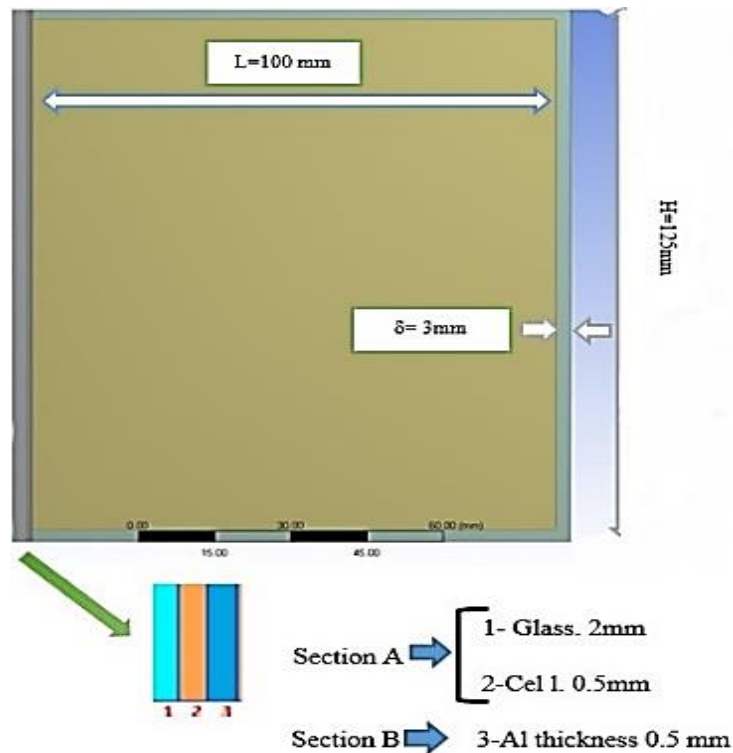
۲- هندسه پیشنهادی

هندسه انتخاب شده در این مطالعه، در شکل ۱ نشان داده شده است. این شکل شامل ۲ بخش اصلی می باشد:

الف - ماژول فتوولتائیک

ب - باکس آلومینیومی حاوی PCM و نانو ذرات

ماژول فتوولتائیک از ۲ لایه (لایه اول شیشه به ضخامت ۲ میلی متر و لایه دوم سلول خورشیدی سیلیکونی با ضخامت ۰/۵ میلی متر) تشکیل شده است. باکس نیز متشکل از یک ظرف مستطیلی از جنس آلومینیوم که دارای ارتفاع داخلی ۱۲۵ میلی متر در جهت *y* و طول ۱۰۰ میلی متر در جهت *x* است که با مواد تغییر فاز و نانو ذرات پر شده است. همچنین خواص آلومینیوم و PCM، نانوذرات، در جدول ۲ و ۱ نشان داده شده است.



شکل شماره ۱: شماتیک سیستم فتوولتائیک متمرکز کننده

۳- معادلات حاکم

۳-۱- فرضیات

- در مطالعه حاضر فرضیات زیر در نظر گرفته شده است.
- ابعاد هندسی هیت سینک ثابت در نظر گرفته شده است.
- ترکیب فاز مایع بصورت دو بعدی، نیوتنی و تراکم ناپذیر بوده است.
- پارامترهای دبی جرمی، دمای محیط و حجم کل مواد تغییر فاز دهنده و نانوذرات ثابت فرض شده است.
- پارامتر غلظت حجمی نانوذرات و مواد تغییر فاز دهنده متغیر در نظر گرفته شده است.
- خواص ترموفیزیکی مواد تغییر فاز دهنده و سلول فتوولتائیک، نانوذرات و آلومینیوم در فاز جامد، ایزوتروپ و مستقل از دما بوده است.

۳-۲- سیستم فتوولتائیک متمرکز کننده

با توجه به وجود لایه آلومینیوم کوپل شده با سیستم فتوولتائیک متمرکز کننده در هندسه پیشنهادی، معادله انتشار انتقال حرارت در مختصات دکارتی به صورت زیر بیان می گردد [۱۹،۲۰].

$$\nabla \cdot (k_i \nabla T_i) + q_i = \rho_i C_{p,i} \left(\frac{\partial T_i}{\partial t} \right) \quad (1)$$

Where $i = 1, 2 \dots$

در معادله ۱، q_i ، ρ_i ، C_{pi} ، $T_i(x, y)$ ، ki ، به ترتیب هدایت حرارتی، دما، گرمای ویژه، چگالی، تولید گرمای داخلی هستند، همچنین تولید گرما در واحد حجم لایه i به شرح زیر است [۱۳،۲۱]:

$$q_i = \frac{(1-\eta_{sc}) G(t) \alpha_i \tau_j A_i}{V_i} \quad (2)$$

در معادله ۲، η_{sc} راندمان الکتریکی لایه سیلیکونی در سلول خورشیدی، $G(t)$ میزان تابش متمرکز، α_i ، V_i ، A_i ، τ_i به ترتیب ضریب جذب، حجم، مساحت لایه i و ضریب انتقال پذیری بوده است. همچنین از معادله ۳ برای محاسبه بهره وری توان سلول سیلیکونی استفاده شده است [۱۲،۱۳،۲۲].

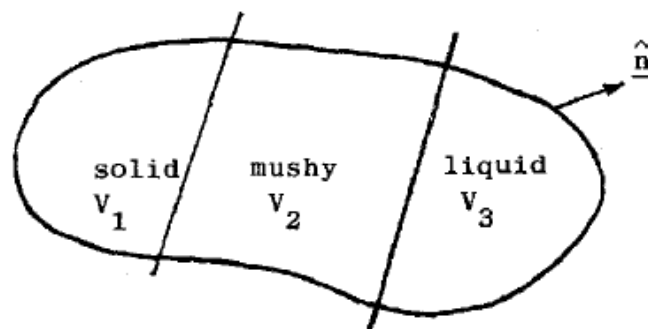
$$P_{elec} = \eta_{sc} \cdot G(t) \cdot H_{1,sc} \cdot \tau_g \cdot \tau_E \quad (3)$$

$$\eta_{sc} = \eta_{ref} (1 - \beta_{ref} (T_{sc} - T_{ref})) \quad (4)$$

در معادله ۳، G معادل 1000 W/m^2 فرض شده که این مقدار برای اکثر سلول های فتوولتائیک PV توسط شرکت های سازنده در برگه اطلاعات دستگاه ارایه می گردد و $\tau_g \cdot \tau_E$ بترتیب قابلیت انتقال لایه های EVA و شیشه بر روی لایه سیلیکونی می باشد [۲۷]. در حالت کلی در سلول خورشیدی فتوولتائیک، لایه سیلیکونی در بین دو لایه EVA و یک لایه شیشه رویی قرار دارد. همچنین ارتفاع سلول خورشیدی و η_{sc} به کمک معادله ۴ محاسبه گردیده است.

۳-۳- نانو ذرات اضافه شده به مواد تغییر فاز دهنده (NEPCM)

در این مطالعه روش آنتالپی- متخلخل برای تجزیه و تحلیل فرآیند تغییرات فاز در ترکیب مواد تغییر فاز دهنده (PCM) با نانوذرات استفاده شده است. این روش توسط ولر Voler ارایه شده است [۲۳،۲۴]. ناحیه مووشی (mushy) با رفتار متخلخل و ژله ای در ناحیه بین فاز جامد و مایع در شکل ۲ نشان داده شده است. در هر سلول برابر با کسر مایع موجود در آن سلول می باشد که در مناطق کاملاً جامد برابر با صفر است.



شکل ۲: تغییرات فاز در مواد تغییر فاز دهنده و ناحیه مووشی mushy

معادلات حاکم شامل پیوستگی، مومنوم برای روش آنتالپی- متخلخل به شرح ذیل می باشد.

الف) معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

(ب) معادله مومنوم :

X-direction:

$$\rho_{l, npcm} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + \rho_{l, npcm} \cdot u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho_{l, npcm} \cdot v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu_{l, npcm} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + S_x \quad (6)$$

Y-direction:

$$\rho_{l, npcm} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + \rho_{l, npcm} \cdot u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho_{l, npcm} \cdot v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu_{l, npcm} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + F_B + S_y \quad (7)$$

که در آن S_x و S_y عملگرهای قانون داریسی می باشند که با اضافه شده به معادله مومنوم تاثیرات جابجایی (همرفت) را بیان می کنند.

$$S_x = \frac{(1-\lambda)^2}{(\lambda^3 + \gamma)} \cdot A_{mush} \cdot u \quad (8)$$

$$S_y = \frac{(1-\lambda)^2}{(\lambda^3 + \gamma)} \cdot A_{mush} \cdot v \quad (9)$$

که در آن λ کسر حجمی مایع و γ عدد کوچکی با مقدار 0.001 است که صرفاً برای جلوگیری از صفر شدن کسر می باشد. [۲۵]. همچنین عدد ثابت A_{mush} بعنوان نشانگر ناحیه مووشی (mushy) یا دوفازی بوده که در معادله بالا این ثابت بیان کننده گذر حالت فازی از ناحیه دوفازی و تبدیل شدن به فاز مایع می باشد. [۲۵]. در بسیاری از تحقیقات مشابه، میزان توصیه شده برای ثابت A_{mush} مقدار 10^6 می باشد که این مقدار بهترین همبستگی بین نتایج تحقیقات عددی و داده های تجربی را نشان می دهد [۱۹،۲۰].

(پ) معادله انرژی :

تحقیقات عددی و تجربی زیادی برای ارزیابی انتقال حرارت در مواد تغییر فاز دهنده PCM انجام شده است، در این مقاله از روش آنتالپی (H-P) Enthalpy methods برای تجزیه و تحلیل نتایج استفاده شده است [۲۶]. در حالت کلی برای محاسبه آنتالپی واقعی مواد، از مجموع آنتالپی محسوس h و انرژی نهان ΔH استفاده می گردد.

$$H = h_l + \Delta H \quad (10)$$

$$h_l = h_{ref} + \int_{T_{REF}}^T c_p dT \quad (11)$$

که داریم :

h_{ref} = reference enthalpy

T_{ref} = reference temperature

C_p = specific heat at constant pressure

همچنین گرمای نهان ترکیب نانو ذرات مواد تغییر فاز دهنده بدین صورت بازنویسی می شود که :

$$\Delta H = \lambda \cdot L \quad (12)$$

ΔH برای حالت مایع برابر یک و جامد برابر صفر خواهد بود و کسر مولی جز مایع بصورت زیر تعریف می گردد.

$$\lambda = 0 \quad \text{if } T < T_{solid}$$

$$\lambda = 1 \quad \text{if } T > T_{\text{liquid}}$$

$$\lambda = (T - T_{\text{solid}}) / (T_{\text{liquid}} - T_{\text{solid}})$$

$$\text{if } T_{\text{solid}} < T < T_{\text{liquid}}$$

بنابراین با استفاده از روش آنتالپی می توان معادله انرژی را بصورت زیر باز نویسی کرد:

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot v \cdot H) = \nabla \cdot (k \cdot \nabla \cdot T) + S \quad (13)$$

در معادله شماره ۱۳ S, v, ρ, H به ترتیب آنتالپی، چگالی، سرعت سیال و جمله چشمه می باشد: جمله S بصورت زیر می شود:

$$S = \rho \cdot \frac{\partial \Delta H}{\partial t} \quad (14)$$

به طور کلی، در ترکیب مواد تغییر فاز دهنده و نانوذرات، ذرات نانو بر خواص ترموفیزیکی مواد تغییر فاز دهنده تأثیر دارند، این خواص شامل مقادیر چگالی و ظرفیت حرارتی و ضریب انتقال حرارت بوده که به کسر حجمی ذرات نانو در ترکیب بستگی دارد. معادله شماره ۱۵ برای بیان ارتباط بین کسر حجمی \emptyset و کسر وزنی $\emptyset wt$ شده است [۲۷].

$$\emptyset = \frac{\emptyset wt \cdot \rho_{pcm}}{\emptyset wt \cdot \rho_{pcm} + (1 - \emptyset wt) \cdot \rho_p} \quad (15)$$

به دلیل تغییر مقادیر دانسیته بین فاز جامد و مایع، مقادیر کسر حجمی برای PCM ثابت نمی باشد. معادله مربوط به دانسیته ترکیب نانو ذرات - PCM بدین صورت می باشد:

$$\rho_n pcm = (1 - \emptyset) \rho_{pcm} + \emptyset \rho_p \quad (16)$$

$$\rho_{pcm} = \begin{cases} \rho_s & T < T_m \\ \frac{(\rho_s + \rho_l)}{2} & T_m < T < T_m + \Delta T_m \\ \rho_l & T \geq T_m + \Delta T_m \end{cases} \quad (17)$$

در معادله ۱۷ بترتیب T_m دمای ذوب PCM و ΔT_m اختلاف دمایی بین فاز مایع و جامد می باشد که بدین صورت تعریف می گردد:

$$\Delta T_m = T_{\text{liquids}} - T_{\text{solidus}} \quad (18)$$

معادلات شماره ۱۹ و ۲۰ بترتیب ظرفیت حرارتی ترکیب نانو ذرات - PCM و همچنین ترم بوزینسک آنها را نشان می دهند.

$$(\rho \cdot Cp) n_{pcm} = (1 - \emptyset) (\rho Cp)_{pcm} + \emptyset (\rho \cdot Cp)_p \quad (19)$$

$$(\rho \cdot \beta) n_{pcm} = (1 - \emptyset) (\rho \cdot \beta)_{pcm} + \emptyset (\rho \cdot \beta)_p \quad (20)$$

تعریف ویسکوزیته برای ترکیبات کلوییدی حاوی ذرات کوچک کره ای توسط برینکمن [۲۸] در معادله شماره ۲۱ آورده شده است، در این معادله μl مقادیر ویسکوزیته در فاز مایع می باشد.

$$\mu = \frac{\mu l}{(1 - \emptyset)^{2.5}} \quad (21)$$

ضریب انتقال حرارت ترکیب نانو ذرات - PCM با استفاده از معادله ماکسول بدین صورت تعریف می گردد.

$$\frac{K n_{pcm}}{K_{pcm}} = \frac{K_p + 2K_{pcm} - 2\emptyset(K_{pcm} - K_p)}{K_p + 2K_{pcm} + \emptyset(K_{pcm} - K_p)} \quad (22)$$

که در معادله ۲۵، K_{pcm} و $K n_{pcm}$ و K_p بترتیب ضریب انتقال حرارت ماده تغییر فاز دهنده، ترکیب نانو ذره - ماده تغییر فاز دهنده و نانو ذره به تنهایی می باشد.

$$Kpcm = \begin{cases} Ks & T < TM \\ \frac{(Ks+Kl)}{2} & Tm < T < Tm + \Delta Tm \\ Kl & T \geq Tm + \Delta Tm \end{cases} \quad (22)$$

همچنین در معادله ۲۳، Ks و Kl بترتیب ضریب انتقال حرارت ماده تغییر فاز دهنده در حالت جامد و مایع می باشد.

۴- شرایط مرزی :

شرایط مرزی در نظر گرفته شده در شکل شماره ۱ بدین صورت است:

- شرط مرزی عدم لغزش در ناحیه بین فاز جامد- مایع حاکم می باشد.

$$\left. \begin{cases} x = \delta_{Al}, (L - \delta_{Al}): y=0, H1 \text{ for } t \geq 0 \\ x = \delta_{Al}: y=0, \text{ for } t \geq 0 \end{cases} \right\} u = v = 0$$

- شرایط آغازین برابر است با :

$$u(x, y, 0) = v(x, y, 0) = 0$$

- دمای محیط ۲۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است.

- شرایط مرزی دیواره ورودی CPV ترکیبی از انتقال حرارت جابجایی و تشعشی می باشد .

$$-k \frac{\partial T}{\partial X} = h_{conv} (T_{amb} - T_g) + h_{rad} (T_{sky} - T_g) \quad (24)$$

- شرایط مرزی دیواره بین سیستم CPV و باکس :

$$-k \frac{\partial T}{\partial X} = h_{conv} (T_{amb} - T_{Al}) \quad (25)$$

در معادله ۲۴ مقادیر ضریب انتقال حرارت جابجایی و تشعشی بدین صورت تعریف می گردد.

$$h_{rad, g-sky} = \sigma \cdot \epsilon \cdot g \frac{(T_g^4 - T_{sky}^4)}{(T_g - T_{sky})} \quad (26)$$

$$h_{conv, glass-amb} = 5.7 + 3.8 Vm \quad (27)$$

همچنین در معادله شماره ۲۷ میزان سرعت باد Vm برابر با 1 m/s در نظر گرفته شده است.

- دیواره های بالا و پایین و انتهایی بصورت آدیاباتیک در نظر گرفته شده است.

$$-k \frac{\partial T}{\partial X} = 0 \quad (28)$$

۵- حل عددی

در این مطالعه برای حل معادلات حاکم از نرم افزار انسیس فلونت نسخه ۱۷.۴ [۲۹] استفاده شده است. بهمین منظور از روش های زیر در جهت شبیه سازی استفاده گردیده است.

- مدل Energy and solidification & melting بمنظور بررسی و شبیه سازی تغییرات فازی ترکیب نانو ذرات با مواد تغییر فازدهنده استفاده گردیده است.

- شرط SIMPLE جهت کوپل معادله فشار- سرعت انتخاب شده است.
- شرط second order upwind جهت حل معادله مومنتوم - انرژی در نظر گرفته شده است.

۱-۵- استقلال از شبکه

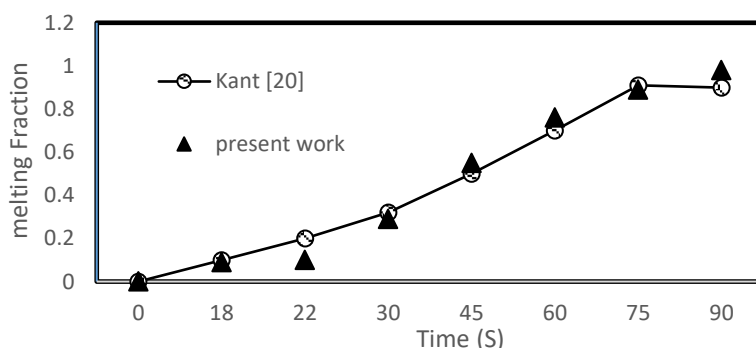
برای بررسی استقلال از شبکه در مدل پیشنهادی، از ۴ شبکه بندی مختلف (A تا D) استفاده شده است. در جدول ۳ هر یک از این شبکه بندی ها، شامل تغییرات تعداد نود و اندازه المان ها نسبت به متغیر کسر مایع آورده شده است. بررسی نشان می دهد که افزایش تعداد نودهای موجود از ۸۲۲۶۷ تا ۱۸۵۹۰۳ و کاهش اندازه المانها از ۰/۴ به ۰/۲۵ (بترتیب از شبکه A تا شبکه D) باعث تغییر مقدار متغیر کسر مایع از عدد ۰/۴۱ به عدد ثابت ۰/۳۴ می گردد. ادامه این روند در شبکه شبیه سازی شده نشان دهنده عدم تغییر عدد کسر مایع از مقدار ثابت بیان شده می باشد. بنابراین شبکه C انتخاب شده است.

جدول شماره ۳: استقلال از شبکه، حل عددی

اجزاء	A	B	C	D
تعداد نودها	82267	145189	166455	185903
اندازه المان	0.4	0.31	0.28	0.25
کسر مایع	0.041	0.035	0.034	0.034

۲-۵- اعتبارسنجی

جهت اعتبارسنجی از مقایسه نتایج تجربی تحقیق کانت و همکاران استفاده شده است [۲۲]. در مطالعه فوق از نانو ذرات گرافن با درصد جرمی ۵٪ به همراه مواد تغییر فاز دهنده از نوع $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ استفاده شده است. مقایسه بین نتایج ارائه شده در کار کانت و همکاران [۲۲] با نتایج مطالعه حاضر برای متغیر کسر ذوب (melting fraction) نسبت به زمان در شکل ۳ مشخص شده است. نتایج نشان می دهد که اختلاف در حدود ۲ درصد وجود داشته و لذا شبیه سازی انجام شده قابل قبول می باشد.



شکل ۳: مقایسه بین نتایج ارائه شده در کار کانت و همکاران [۲۰] با نتایج مطالعه حاضر برای متغیر کسر ذوب (melting fraction) نسبت به زمان برای نانو ذرات گرافن با درصد جرمی ۵٪ به همراه مواد تغییر فاز دهنده از نوع $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

۶- نتایج:

در این مطالعه، نتایج حاصل در دو بخش ارزیابی شده است:

- ۱- در مرحله اول با استفاده از روش آنتالپی، تاثیر نانو ذرات اکسیدمس با کسر جرمی ۳ و ۵ درصد بر مواد تغییر فاز دهنده از نوع n-octadecane با استفاده از تغییرات کسرمایع (liquid fraction) و سرعت (velocity) بیان شده است.
- ۲- در مرحله دوم تاثیر خصوصیات ترموفیزیکی نانو ذرات اکسید مس (جدول ۴) بر روی دمای کارکردی سلول های متمرکز کننده مورد ارزیابی قرار می گیرد.

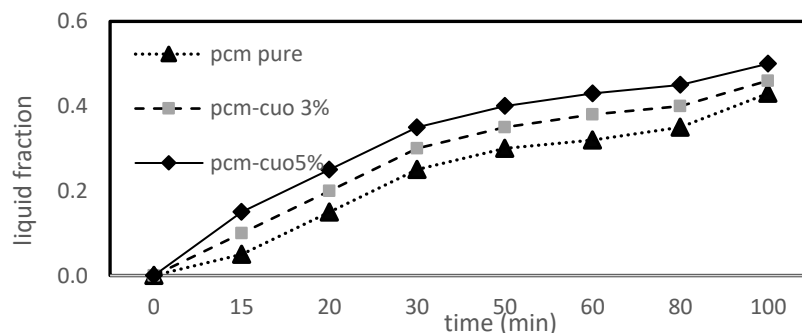
جدول ۴- خصوصیات ترموفیزیکی ترکیب نانوذرات اکسید مس-PCM

n-octadecane- Cuo 3%	n-octadecane- Cuo 5%	اجزاء
0.358	0.359	ضریب هدایت حرارتی W/mK
868.14	870.1	چگالی kg/m ³
1928.18	1924.6	ظرفیت گرمای ویژه kJ/kg K

۶-۱- بررسی تاثیر نانو ذرات بر مواد تغییر فاز دهنده

۶-۱-۱- کسر مایع

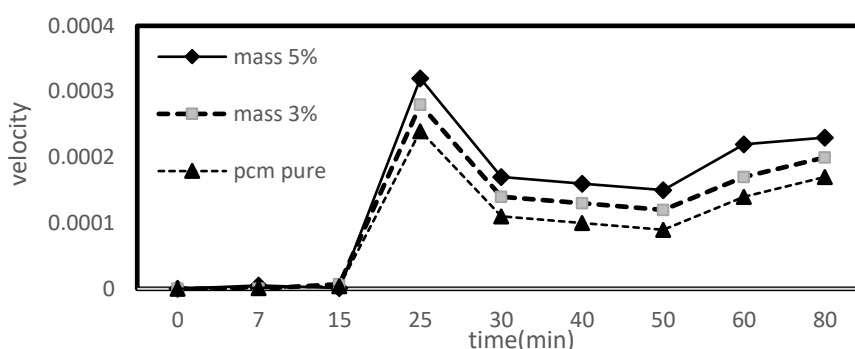
نتایج حاصل از بررسی کسر مایع برای مواد تغییر فاز دهنده خالص و ترکیب نانو ذرات با مواد تغییر فاز دهنده با اکسید مس ۳ و ۵ درصد در شکل ۴ مشخص شده است. با مقایسه نتایج، میزان زمان لازم برای رسیدن به حالت ذوب کامل برای مواد تغییر فاز دهنده خالص و ترکیب مواد تغییر فاز دهنده با اکسید مس ۳ و ۵ درصد بترتیب برابر با ۹۹ دقیقه، ۹۵ دقیقه و ۹۳ دقیقه است. در ۳ ترکیب مورد اشاره، بدلیل اضافه شدن نانو ذرات به مواد تغییر فاز دهنده خالص پایه، افزایش ضریب انتقال حرارت به نسبت درصد جرمی نانو ذره اضافه شده، مشاهده می گردد، که نهایتاً این موضوع توجیه کننده دلیل تفاوت در زمان مورد نیاز جهت رسیدن به حالت ذوب کامل در سه ترکیب مورد اشاره می باشد [۱۲]. افزایش درصد جرمی نانو ذرات، خارج از محدوده بهینه و استاندارد، موجب بالا رفتن ویسکوزیته دینامیکی ترکیب و کاهش نیروی بویانسی گردیده و در صورت ادامه این روند موجب ایجاد رسوب می شود [۳۰]. بنابراین یکی از مهمترین مسائل تعیین مقادیر بهینه نانو ذرات قابل استفاده در ترکیبات مواد تغییر فاز دهنده می باشد.



شکل ۴: تغییرات کسرمایع براساس زمان برای ترکیب مواد تغییر فاز دهنده خالص و نانو ذرات اکسید مس ۳ و ۵ درصد

۶-۱-۲- سرعت

تغییرات سرعت براساس زمان برای ترکیب مواد تغییر فاز دهنده خالص از نوع n-octadecane و نانو ذرات اکسید مس با کسر جرمی ۳ و ۵ درصد در شکل ۵ نشان داده شده است، نتایج نشان می دهد که مقادیر سرعت نسبت به زمان برای ترکیب n-octadecane و اکسید مس ۵ درصد نسبت به نمونه ۳درصد و ماده تغییر فاز دهنده خالص بالاتر می باشد. این موضوع می تواند بدلیل افزایش سرعت انتقال حرارت و افزایش نیروی حجمی مابین فاز جامد- مایع ترکیب نانو ذره و مواد تغییر فاز دهنده می باشد. نتایج بدست آمده برای تغییرات سرعت نسبت به زمان در این مقاله روندی مشابه با مطالعه کانت و همکاران [۲۲]، زارما و همکاران [۱۲] برای ترکیبات حاوی مواد تغییر فاز دهنده - نانو ذرات می باشد.



شکل ۵: تغییرات سرعت براساس زمان برای ترکیب مواد تغییر فاز دهنده خالص و نانو ذرات اکسید مس ۳ و ۵ درصد

۶-۱-۳- تاثیر ترکیب نانو ذرات- مواد تغییر فاز دهنده بر روی دمای سلول خورشیدی

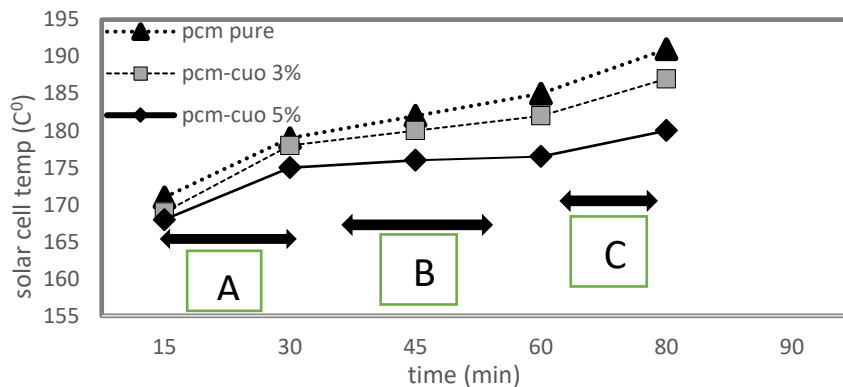
مهمترین دلیل انجام تحقیق حاضر، استفاده از ترکیب نانو ذرات - مواد تغییر فاز دهنده جهت افزایش انتقال حرارت هیت سینک و کاهش دمای کارکردی سلول خورشیدی بمنظور افزایش راندمان تولید الکتریسیته می باشد. برای بررسی این موضوع دمای سلول خورشیدی با استفاده از ترکیبات فوق الذکر در شکل ۷ آورده شده است. با بررسی شکل مذکور ۳ سطح دمایی مشخص می گردد.

سطح A: انرژی ساطع شده از خورشید توسط انتقال حرارت از نوع تشعشع به سلول خورشیدی انتقال پیدا می کند. این انرژی در ادامه با تقویت انتقال حرارت جابه جایی طبیعی از پشت سلول خورشیدی به دیواره آلومینیومی و از این طریق به داخل باکس حاوی ترکیب نانو ذرات-مواد تغییر فاز دهنده انتقال می یابد.

در این حالت ترکیبات با شروع تغییر فاز از حالت اولیه وارد ناحیه بین فازی یا مووشی mushy zone می گردند. **سطح B:** در این بخش که به اصطلاح ناحیه بین فازی یا مووشی نامیده می شود، افزایش دما، کاهش پیدا نموده و روند ثابتی پیدا می کند. دلیل این موضوع را می توان در ثابت بودن مقادیر انرژی دریافتی از طریق انتقال حرارت تشعشعی، در ارتباط دانست. در این ناحیه انتقال حرارت جابجایی مهمترین نقش را در ادامه گذر ترکیبات از حالت با فاز شبه جامد (دوفازی) به حالت ذوب کامل (مایع) دارند

سطح C: در این سطح، افزایش دمای سلول می تواند گواه بر بالا رفتن مقادیر انتقال حرارت جابه جایی باشد که این امر منجر به گذر کامل ترکیبات از حالت دوفازی و تبدیل شدن مواد به حالت مایع یا ذوب کامل می باشد.

نتایج شکل ۶ نشان می دهد که دمای سلول خورشیدی در زمان ۸۰ دقیقه برای ماده تغییر فاز دهنده خالص و اکسید مس ۳ درصد و ۵ درصد بترتیب 191°C و 185°C و 180°C می باشد، چرایی این موضوع به تاثیر مواد نانو در افزایش مقادیر ضریب انتقال حرارت و نهایتاً کاهش دمای سلول خورشیدی مربوط می شود.



شکل ۶: تغییرات دمای سلول خورشیدی نسبت به زمان برای ترکیب مواد تغییر فاز دهنده خالص و نانو ذرات اکسید مس ۳ و ۵ درصد

۷- نتیجه گیری :

در این تحقیق مدل عددی از یک هیت سینک حاوی نانوذرات اکسید مس به همراه مواد تغییر فاز دهنده جهت افزایش راندمان حرارتی سلول خورشیدی از نوع متمرکز کننده با استفاده از نرم افزار انسیس فلونت شبیه سازی و توسعه داده شده است. در این تحقیق مقادیر ۳ و ۵ درصد جرمی از نانو ذرات اکسید مس به ماده تغییر فاز دهنده از نوع N-octadecane اضافه گردید. در ادامه مقادیر متغیر کسرهای و سرعت برای هر ۳ ترکیب ماده تغییر فاز دهنده خالص به همراه ترکیب این ماده با نانو ذرات مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد که با افزایش نانو ذرات به ماده تغییر فاز دهنده خالص، ضریب انتقال حرارت به ازای افزایش کسر جرمی نانو ذرات، افزایش پیدا می کند که این موضوع به تاثیر مواد نانو در افزایش مقادیر ضریب انتقال حرارت مربوط بوده و نهایتاً باعث کاهش دمای سلول خورشیدی برای ماده تغییر فاز دهنده خالص و اکسید مس ۳ درصد و ۵ درصد بترتیب 191°C و 185°C و 180°C گردیده است.

۸- علائم اختصاری :

A_{mush} ثابت ناحیه موشی [$\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$]

C_p ظرفیت گرمای ویژه در فشار ثابت [$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{k}$]

CR نسبت تمرکز سلول فوتوولتاییک متمرکز کننده

G (t) نرخ انرژی تابشی دریافتی [W/m^2]

G شتاب گرانشی [m/s^2]

H آنتالپی کلی ماده [J/kg]

H1 ارتفاع سلول خورشیدی [mm]

H ضریب انتقال حرارت همرفت [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{k}$]

h_1 آنتالپی محسوس [J/kg]
 k ضریب هدایت حرارتی [W/m · K]
 L طول باکس [mm]
 L_m گرمای نهان [J/kg]
 m جرم [kg]
NPCM ترکیب نانو ذرات و ماده تغییر فاز دهنده
 Q انرژی گرمایی ذخیره شده [J/kg]
 q''_w شار حرارتی ثابت در دیواره
 T دما [°C]
 t زمان [min.]
 V سرعت [m/s]
 u, v سرعت در جهت x و y [m/s]
 x, y مختصات کارتیزین
 ΔT_m محموده دمایی ذوب

علائم یونانی

α جذب
[1/K] ضریب دمایی سلول خورشیدی β
[1/K] ضریب انبساط حرارتی β_1
 ε انتشار
 T قابلیت انتقال
 μ ویسکوزیته [Pa·s]
 σ ثابت استفان-بولتزمن
 ρ دانسیته [kg/m³]
 δ ضخامت [m]
 η راندمان
 λ کسر مایع
 ϕ کسر حجمی نانو ذرات در سیال پایه

زیر نویس

amb محیط
Al آلومینیوم
Conv انتقال حرارت همرفت
g شیشه
ini آغازین
l مایع
m ذوب
PCM مواد تغییر فاز دهنده

Rad تشعشع
Refl بازتابش
ref رفرنس
s جامد
Sc سلول سلیکونی
T حرارت

۸- منابع :

- [۱] [Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy](#)". IEA. 2014.
- [۲] Natarajan SK, et al. Numerical investigations of solar cell temperature for photovoltaic concentrator system with and without passive cooling arrangements. *Int J Therm Sci* 2011; 50(12):2514–21.
- [۳] Sharma S, Micheli L, Chang W, Tahir AA, Reddy KS, Mallick TK. Nano-enhanced phase change material for thermal management of BICPV. *Appl Energy* 2017 (September):1-15.
- [۴] Huang MJ, Eames PC, Norton B. Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials. *Int J Heat Mass Transfer*, 2004; 47(12–13):2715–33
- [۵] Solanki CS. *Solar photovoltaics: fundamentals* Ahmed M, Radwan A. Prentice-Hall of India Pvt. Limited: Delhi, India; 2009.
- [۶] Performance evaluation of new modified low-concentrat polycrystalline silicon or photovoltaic/thermal systems. *Energy Convers Manage* 2017; 149:593–607.
- [۷] Virendra Talele, Peng Zhao, Effect of nano-enhanced phase change material on the thermal management of a 186500 battery pack, *Energy Storage*, 64(2023):107068
- [۸] H.A.Refaey, Mathkar A. Alharthi, Samir Bendoukha, Said Ghani Khane, Mohamad Emam, M.A. Abdelrahman, An experimental investigation on passive cooling of a triple-junction solar cell at high concentrations using various straight-finned heat sink configurations, *Thermal Engineering*, 51(2023) 103626
- [۹] M. Khodadadi, Seyyed Ali Farshad, Z. Ebrahimpour, M. Sheikholeslami, Thermal performance of Nanofluid with employing of NEPCM in a PVT-LFR system, *Technologies and Assessments*, 47(2021)101340.
- [۱۰] Rohit Kothari, Santosh Kumar Sahu, Shailesh Ishwarlal Kundalwal. Investigation on thermal characteristics of Nano enhanced phase change material based finned and unfinned heat sinks for thermal management system, *Chemical Engineering and Processing*, 162(2021)108328.
- [۱۱] Muhammad Aqib, Azar Hussain, Hafiz Muhammad Ali, Ammar Naseer, Experimental case studies of the effect of Al₂O₃ and MWCNTs nanoparticles on heating and cooling of PCM, *Case Study Thermal Engineering*, 22(2020)100753
- [۱۲] Ismail Zarma, Mahmoud Ahmad, Shinichi Ookawara, Enhancing the performance of photovoltaic systems using Nanoparticle-phase change material heat sink, *Energy Conversion Management*, 179(2019) 229-242
- [۱۳] Mohamad Emam, Mahmoud Ahmed, Cooling various configurations of phase-change material heat sink, *Energy Conversion Management*, 158(2018)298-314.

- [۱۴] Faezeh Najafi, Darya Ramezani, Sareh Sheykh, Alireza Aldaghi, Amin Taheri, Mohammad Sardarabadi, Msohammad Passandideh Fard, 2018; 222:101–110
- [۱۵] M. Emama, Shinichi Ookawara, Mahmoud Ahmed, Performance study and analysis of an inclined concentrated photovoltaic-phase change material system, *Solar Energy Advances*, 150(2017) 229-245.
- [۱۶] Ali Radwan, Shinichi Ookawara, Mahmoud Ahmed. Analysis and simulation of concentrating photovoltaic systems with a micro channel heat sink. *Solar Energy*, 136(2016)35-48
- [۱۷] Ali Radwan, Mahmoud Ahmed, Shinichi Ookawara, Performance enhancement of concentrated photovoltaic systems using a micro channel heat sink with nanofluids, *Energy*
- [۱۸] M.J. Huang a, P.C.Eames b, B.Norton c, N.J.Hewitt. Natural convection in an internally finned phase change material heat sink for the thermal management of photovoltaics, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 95(2011) 1598-1603.
- [۱۹] Emam M, Ahmed M. Cooling concentrator photovoltaic systems using various configurations of phase-change material heat, 2019; 101:500–610
- [۲۰] Radwan A, Ahmed M. The influence of micro channel heat sink configurations on the performance of low concentrator photovoltaic systems. *Appl Energy* 2017; 206:594–611
- [۲۱] Zhou J, Yi Q, Wang Y, Ye Z. Temperature distribution of photovoltaic module based on finite element simulation. *Sol Energy* 2015; 111:97–103.
- [۲۲] Kant K, Shukla A, Sharma A, Biwole PH. Heat transfer studies of photovoltaic panel coupled with phase change material. *Sol Energy* 2016; 140:151–61.
- [۲۳] Brent AD RK, Voller VR. Enthalpy-porosity technique for modeling convection diffusion phase change: application to the melting of a pure metal. *Numer Heat Transfer Int J Comput Method* 1988:1–23.
- [۲۴] M. Cross, N. C. Markatos, Voller VR, An Enthalpy method for convection/Diffusion phase change, *International Journal For Numerical In Engineering*, VOL. 24, 271-284 (1987)
- [۲۵] Kheirabadi AC, Groulx D. The effect of the mushy-zone constant on simulated phase change heat transfer. In: *Proceeding proc CHT-156th int symp adv comput heat transfer*, May 25–29, 2015. NJ, USA: Rutgers University New Brunswick; 2015. p. 22.
- [۲۶] N. Soares, N. Rosa, J.J. Costa, A.G. Lopes, T. Matias, P.N. Simoes, L. Duraes. Validation of different numerical models with benchmark experiments for modelling microencapsulated-PCM-based applications for buildings. *International Journal of Thermal Sciences*, *International Journal of Thermal Sciences*, 159 (2021) 106565.
- [۲۷] Dhaidan NS, Khodadadi JM, Al-Hattab TA, Al-Mashat SM. Experimental and numerical investigation of melting of phase change material/nanoparticle suspensions in a square container subjected to a constant heat flux. *Int J Heat Mass Transf*, 2013; 66:672–83.
- [۲۸] H.C. Brinkman, The viscosity of concentrated suspensions, and solutions, *J. Chem. Phys.* 20 (1952) 571–581.
- [۲۹] *Ansys Fluent* product with Ansys Inc ۱۷/۴ 2014.
- [۳۰] Khodadadi JM, Hosseinizadeh SF. Nanoparticle-enhanced phase change materials (NEPCM) with great potential for improved thermal energy storage. *Int Commune Heat Mass Transf*, 2007; 34(5):534

Cooling of a concentrator photovoltaic system with using a heat sink containing phase change materials and copper oxide nanoparticles

Ramin Watandost¹, Arash MirAbdollah Lavasani ^{*2}, Saeed Dinarund³,
Mohammad Sardarabadi⁴, Mohammad Iftikhari Yazdi⁵

1, 2, 3, and 5 Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran

4 Department of Energy, Qochan University of Technology, Qochan, Iran

Received: February 2024

Accepted: May 2024

Abstract

In this study, the cooling of a photovoltaic system with a concentrator is done with the help of a heat sink containing phase change materials and copper oxide nanoparticles using a numerical method. The photovoltaic module has a two-dimensional concentrator, and n-octadecane is chosen as the phase change material, and the mass fraction of copper oxide nanoparticles is 3 and 5%. The results of this research show that adding copper oxide nanoparticles with a mass fraction of 3% and 5% to the basic phase change material reduces the temperature of the solar cell from 191 °C to 185 °C and 180 °C, respectively.

Keywords: Phase Change Material, Concentrator Photo Voltaic, CuO nanoparticles.

*corresponding author: arashlavasani@iauctb.ac.ir

Cite this article as: Ramin Watandost, Arash MirAbdollah Lavasani, Saeed Dinarund, Mohammad Sardarabadi, Mohammad Iftikhari Yazdi. Cooling of a concentrator photovoltaic system with using a heat sink containing phase change materials and copper oxide nanoparticles. *Journal of Energy Conversion*, 2024, 11(2), 1-17.