مکانیک سازهها و شارهها/ سال۱۴۰۴/ دوره ۱۵/ شماره ۱/ صفحه ۱۰۵–۱۱۶



نشربه مكانيك سازه فاو شاره ف



 ${\rm DOI:}\ 10.22044/jsfm.2025.14245.3843$ 

# بررسي عددي تاثير شكل محفظه خنك كننده حاوى ماده تغيير فاز دهنده پارافين بر عملكرد پنل

های خورشیدی

**پیام جلیلی<sup>۱</sup>%، امیر خسروی صوفی<sup>۲</sup>** ۱<sup>۹</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران ۲ دانش آموخته مقطع کارشناسی ارشد، ، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۲۰/۱۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۱

#### چکیدہ

امروزه با توجه به اهمیت بالای انرژی و محدودیتهای سوخت فسیلی، استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر اهمیت فراوانی پیدا نمودهاست. با توجه به این که در پنلهای خورشیدی با افزایش دما راندمان کاهش پیدا می کند، اهمیت خنکسازی پنلها لازم و مهم است. بر این اساس با توجه به تحقیقهای انجام شده قبلی در حوزه استفاده از مواد تغییر فاز دهنده بهعنوان روش خنکسازی پنلهای خورشیدی، عملکرد خنکسازی ماده PureTemp29 بهعنوان ماده تغییر فاز دهنده در هندسههای مختلف که تا کنون عملکرد ترکیب این بررسی نشده است، تحقیق گردد. شبیهسازی انجام شده به روش المان محدود در نرمافزار انسیس APDL انجام گرفت. محفظهها با هندسههای ساده و پرهدار در حالتهای دوبعدی و سهبعدی مشخص شدند. نتایج نشان داد که بازدهی محفظه پرهدار از سایر محفظهها با هندسههای دمای مناسب در قسمتهای مختلف ماده تغییر فاز دهنده بهتر است. بهمنظور اعتبارسنجی خروجیهای دما در زمانهای مختلف در هندسه پره دار با یک پژوهش تجربی قبلی مقایسه گردید و مشخص شد که شبیهسازی از دقت خوبی برخوردار است.

كلمات كليدى: ماده تغيير فاز دهنده؛ پنل خورشيدى؛ محفظه خنك كننده؛ PureTemp29

# Numerical investigation of the effect of the shape of the cooling chamber containing paraffin phase change material on the performance of solar panels

#### , A. Kh. Soufi<sup>2</sup>\*P. Jalili<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Assist. Prof., Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran <sup>2</sup> MSc. Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran

#### Abstract

Nowadays, due to the high importance of energy and the limitations of fossil fuels, the use of renewable energy has become very important. Considering that the efficiency of solar panels decreases with increasing temperature, the importance of cooling the panels is necessary and important. Based on this, according to the previous researches in the field of using phase change materials as a cooling method for solar panels, the cooling performance of PureTemp29 material as a phase change material in different geometries was investigated. It was simulated by finite element method in AnsysAPDL software. The chambers were specified with simple and finned geometries in two-dimensional and three-dimensional modes. The results showed that the efficiency of the finned chamber with the depth of the fin equal to the depth of the tank is better than other chambers due to the proper temperature distribution in different parts of the phase change material. In order to validate the temperature outputs at different times in finned geometry, it was compared with a previous experimental research and it was found that the simulation has good accuracy.

Keywords: Phase change material; Solar Panel; Cooling chamber; PureTemp29.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: -</p.jalili@iau-tnb.ac.ir</p>

#### ۱– مقدمه

انرژی خورشیدی یک منبع انرژی رایگان و تجدیدپذیر محسوب میشود که استفاده از آن را بسیار جذاب کرده است. بر این اساس تاکنون تحقیقهای بسیاری چه در زمینه تئوری [۱–۱۳] و چه در زمینه تجربی در این خصوص [۱۴–۳۶] انجام شدهاست. در حالی که از پنلهای خورشیدی بهصورت گسترده اما باید یادآور شد که این پنلها تنها ۱۰ الی ۱۶٪ بازدهی دارند، به عبارت دیگر تنها ۱۰ الی ۱۶٪ از تابشهای خورشیدی را می توانند به الکتریسیته تبدیل کرد که مقدار نسبتاً کمی به حساب می آید. همین امر استفاده از انرژی خورشیدی برای تولید الکتریسیته را گران کرده است [۲۳].

دلیل این امر را میتوان این گونه بیان نمود که سلولهای فتوولتایک که به یکدیگر متصل می شوند و تشکیل یک پانل خورشیدی را میدهند، تنها میتوانند از یک محدود خاص از طيف فركانسهاى تابشى توليد الكتريسيته كنند؛ درنتيجه تمامی فرکانسهای نوری باقیمانده در تابش خورشیدی بدون استفاده باقی میماند و به صورت تلفات، تبدیل به انرژی حرارتی مىشود. همانطور كه عنوان شد، باقيمانده انرژى تابشى برخورد کرده به پانل خورشیدی به حرارت تبدیل می شود و منجر به افزایش دمای سطح پانل خورشیدی می شود. با افزایش دمای پانل، خروجی توان الکتریکی پانل خورشیدی کاهش می یابد که به معنی کاهش بازدهی پانل خورشیدی است. پژوهشهای مختلفی در این زمینه انجامشده است که همگی این امر را تائید میکنند. برای مثال در یک پانل خورشیدی ساختهشده از کریستال های سیلیکون برای دماهای کاری بالای ۲۵ درجه سانتی گراد، با افزایش دما توان الکتریکی خروجی پانل با ضریبی در حدود K/% ۴/۴ تا K/% ۰/۶۵ کاهش می یابد [۳۳–۳۵]؛ بنابراین، با کاهش دمای کارکرد پنلهای خورشیدی بهطور قابلتوجهی میتوان خروجی الكتريكي را بهبود بخشيد.

اخیراً استفاده از مواد تغییرفازدهنده بهعنوان یک منبع جاذب حرارت در صفحات PVT و یا BIPVT مطرحشده است که علاوه برافزایش بازدهی سیستم میتواند عمل تنظیم دما را

انجام دهد و یکنواختی دمای سطح پانل را تضمین کند. ما و همکاران [۳۲] در مطالعه مروری خود به بررسی خواص و کاربردهای مواد تغییرفازدهنده پرداختند و نشان دادند که این مواد قابلیت ذخیرهسازی مقدار زیادی انرژی حرارتی در یک محدوده اندک دمایی را دارا هستند. هاسلر و روگاب [۳۱] از یک تانک شیشهای پرشده از آب استفاده کردند که داخل آب از گویهایی پرشده از مواد تغییرفازدهنده استفادهشده بود. ضعف کار آنها به دلیل تماس حرارتی ضعیف و سطح تماس انتقال حرارت کم بین مواد تغییرفازدهنده و پانل خورشیدی بود که منجر به کاهش میزان انتقال حرارت گردیده و نمود پیدا نمود. طراحی دومی که مورد آزمایش قرار گرفت، مربوط به مواد تغییرفازدهنده ای بود که در تانکهای مسی مسطح قرارگرفته بودند، در حالی که داخل تانک شیشهای پرشده از آب پراکنده شده بودند. در این حالت میزان انتقال حرارت بهصورت چشمگیری بهبودیافته بود، اما خاصیت خورندگی بسیار بالای مواد تغییرفازدهنده استفاده شده منجر به خوردگی شدید تانکهای مسی شد و از طرف دیگر تغییر حجم ماده تغییرفازدهنده در حین تغییر فاز نیز مزید بر علت شده و درنتیجه نابودی تانکهای مسی و نشت مواد تغییرفازدهنده به داخل آب در تانک شیشهای را رقم زدند. بعدها این سیستم با طراحی جدیدی بهبود بخشیده شد. در طراحی جدید از جاذبهای آلومینیومی استفاده شده بود [۳۰]. در سال ۲۰۰۴ میلادی، هانگ<sup>۲</sup> و همکاران [۲۹] موفق به توسعه یکی از اولین مدلهای عددی برای سیستم تنظیم کننده دمای پانلهای خورشیدی به کمک مواد تغییرفازدهنده شدند. هانگ و همکاران در سال ۲۰۰۶ [۲۸] به بررسی تجربی و آزمایشگاهی سیستمهای پانل خورشیدی با مواد تغییرفازدهنده (-PV PCM) پرداختند که مجهز به پرههای داخلی بودند. همچنین آنها در پژوهش دیگری به بررسی و مقایسه نتایج مدل سهبعدی سیستم پانل خورشیدی به همراه ماده تغییرفازدهنده و مدل دوبعدی آن پرداختند که در پژوهش قبلی خود بررسی کرده بودند [۲۷]. در سال ۲۰۱۰ میلادی، حسن<sup>۳</sup>و همکاران [۲۶] به مطالعه تطبیقی تأثیرات سیستمهای مختلف -PV PCM روی دمای پانل خورشیدی پرداختند. آنها در بررسیهای خود از پنج نوع ماده تغییرفازدهنده مختلف

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Ma

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Huang

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Hasan

استفاده نمودند. آنها دریافتند که بیشینه افت دما برابر با ۱۸ درجه سانتیگراد است که در مدتزمان ۳۰ دقیقه به دست میآید.

بیوول<sup>۱</sup> و همکاران [۲۵] روشی مبتنی بر مدل المان محدود برای شبیه سازی عملکرد ماده تغییرفازدهنده ناخالص کوپل شده با پانل خورشیدی ارائه نمودند. آنها خطوط هم دمای به دست آمده از داده های عددی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. در این پژوهش که در سال ۲۰۱۳ میلادی انجام شده است، محققان دریافتند که با افزودن مواد تغییرفازدهنده به سیستم، دمای عملکردی پانل های خورشیدی برای حدود ۸۰ دقیقه کمتر از ۴۰ درجه سانتی گراد باقی می ماند؛ اما در صورت عدم استفاده از مواد تغییرفازدهنده، دمای سطح پانل خورشیدی در کمتر از پنج دقیقه به این حد می رسد.

در سال ۲۰۱۴ میلادی، لو برانو<sup>۲</sup> و همکاران [۲۴] یک مدل حرارتی مبتنی بر روش تفاضل محدود برای مواد تغییرفازدهنده ارائه نمودند که دو دسته از معادلات بازگشتی را برای دو دامنهی فضایی در سیستم PV-PCM حل می کرد. در سال ۲۰۱۴ میلادی، پارک<sup>۳</sup> و همکاران [۲۳] به بررسی بازدهی توان سیستم پانلهای BIPV-PCM پرداختند. شبیهسازی الکتریکی-حرارتی سیستم ترکیبی برای شرایط آبوهوایی مشابه آزمایش تجربی انجامشده، به کمک نرمافزار انسیس انجام شد. نشان داده شد که مطابقت خوبی بین نتایج

صفحه فتوولتایک و توان الکتریکی خروجی آن وجود دارد. آلینی<sup>†</sup> و همکاران [۲۲, ۲۲] یک مدل یک بعدی برای شبیه سازی انتقال حرارت برای بررسی نمونه آزمایشگاهی سیستم BIPV-PCM ارائه کردند. میتی<sup>6</sup> و همکاران [۲۰] یک سیستم PV-PCM، ۷ شکل را مورد بررسی قرارداده و میزان اثر بخشی آن را در صورت استفاده از وکس پارافین به عنوان ماده تغییرفاز دهنده با دمای ذوب ۵۶ تا ۵۸ درجه سانتی گراد محاسبه کردند. آن ها از گرد تراشه های فلزی در داخل ماده تغییرفاز دهنده به منظور افزایش میزان هدایت حرارتی آن و شکل گیری بهتر جریان حرارتی داخل پارافین استفاده کردند.

درصورتی که در یک محیط بسته (محیط داخلی) نصب شود برای مدتزمان ۳ ساعت تا حدود ۲۵ درجه سانتی گراد کاهش می ابد و درصورتی که در محیط خارجی نصب شود؛ دما تا حدود ۱۶ درجه سانتی گراد کاهش می ابد. در سال ۲۰۱۵ میلادی، حسن و همکاران [۱۹] به مقایسه تأثیر استفاده از مواد تغییرفازدهنده در پشت پانل فتوولتایک در دو شرایط آبوهوایی شهر دوبلین<sup>5</sup> و وهاری<sup>۷</sup> پرداختند. آنها نشاندادن که دستاوردهای استفاده از ماده تغییرفازدهنده در صورت استفاده در آبوهوای معتدل تر دوبلین کمتر است. اخیراً شارما<sup>۸</sup> و همکاران [۱۸] به صورت تجربی به بررسی بازدهی حرارتی سیستم فتوولتایک متمرکز کننده یکپارچه پرداختند که با دمای سطح آن با استفاده از ماده تغییرفازدهنده تنظیم می شود. آنها دریافتند که برای تمام سطوح تابش خورشیدی،

نتايج أزمايشهاي أنها نشان داد كه دماي صفحه فتوولتايك

الکتریکی و کاهش دمای سطح پانل می شود. هو<sup>۴</sup> و همکاران [۱۴–۱۷] از میکرو کپسول های حاوی مواد تغییرفازدهنده<sup>۱۰</sup> (MEPCM) به منظور بهبود بخشیدن به بازدهی BIPV ها استفاده کردند. آن ها نشان دادند که استفاده از لایه های MEPCM بازدهی را در حدود ۰/۴۲٪ نسبت به روش ها متداول قبلی افزایش می دهد.

با بررسی پژوهشهای انجامشده، مشخص شد که آزمایشهای تجربی، طراحیها، مدلهای عددی توسعه دادهشده و محاسبه بازدهی سیستمهای PV-PCM در سالهای اخیر موردتوجه قرارگرفته است. در این پژوهش نیز هدف اصلی مشابه پژوهشهای قبلی، جلوگیری از افزایش دمای سطح پانل فتوولتایک بهمنظور جلوگیری از افت توان الکتریکی خروجی پانل، با استفاده از مواد تغییرفازدهنده است. هندسههای مختلفی از مواد تغییرفازدهنده ارگانیک در این پژوهش مختلفی از مواد تغییرفازدهنده ارگانیک در این پژوهش بر اساس روش آنتالپی مدلسازی خواهد شد. برای تمامی طراحیها از شرایط مرزی مشابهی استفاده خواهد شد و سپس مسئله به صورت عددی و با استفاده از روش المان محدود حل

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Dublin

<sup>7</sup> Vehari

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Sharma

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup>Ho

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> microencapsulated phase change material

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Lo Bra: <sup>3</sup> Park

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Aelenei

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Maiti

خواهد شد، تا بتوان میزان اثرگذاری هر حالت را باحالتهای دیگر مقایسه کرد. دمای موقعیتهای مختلف در دامنه حل محاسبه خواهد شد تا بتوان فرآیند ذوب ماده تغییرفازدهنده را بهخوبی درک کرد. زمان اشباع ماده تغییرفازدهنده و دمای سطح پانل فتوولتایکبرای حالتهای مختلف با یکدیگر مقایسه خواهد شد.

#### ۲- هندسههای مورد بررسی در پژوهش

تغييرفازدهنده را ميتوان بررسي كرد.

با توجه به مطالب ارائهشده در بخشهای قبلی بخصوص پیشینه پژوهش میتوان دریافت، از ماده تغییرفازدهنده میتوان بهعنوان سیستم تنظیم کننده دمای سطح پانل خورشیدی استفاده کرد. در این پژوهش برای تکمیل مطالعات آزمایشگاهی انجامشده توسط سایر محققان، شبیهسازی عددی برای دو نوع آرایش مختلف ماده تغییرفازدهنده بررسی خواهد شد. ماده تغییرفازدهنده داخل یک مخزن قرار می گیرد که بهصورت مستقیم در تماس با پشت پانل خورشیدی است. با محاسبه و بررسی دمای پانل خورشیدی در طول زمان کارکرد آن، میزان تأثیر گذاری هندسههای مختلف برای ماده

در این پژوهش به بررسی سیستم خنککاری و کنترل دمای سطح پانل خورشیدی با توان تولیدی ۱۵ وات و ابعاد ۹۲۹ سانتیمترمربع پرداخته میشود. فرض میشود که در پشت پانل خورشیدی یک صفحه آلومینیومی وجود داشته باشد که یک سمت آن با پانل خورشیدی و سمت دیگر آن با ماده تغییرفازدهنده در تماس است و وظیفه اصلی آن انتقال حرارت از سطح پانل به ماده تغییرفازدهنده و برعکس است. ضخامت صفحه آلومینیومی ۱/۸ اینچ معادل۳/۱۷۵ میلیمتر در نظر گرفته میشود. لازم به ذکر است که صفحه مذکور باید از جنسی ساخته شود که ضریب هدایت حرارتی بسیار

بالایی داشته باشد؛ لذا اغلب این صفحه از جنس مس و یا آلومینیوم ساخته میشود. با توجه به بالا بودن هزینه مس نسبت به آلومینیوم در این پژوهش آلومینیوم استفادهشده است؛ همچنین فرض میشود که قسمت پشتی صفحه آلومینیومی در تماس مستقیم و کامل با ماده تغییرفازدهنده قرار دارد که محفظهای به ابعاد ۱۰×۱۰ اینچ معادل ۲۵/۴×۲۵/۴ سانتیمتر نگهداری میشود؛ همچنین فرض

<sup>1</sup> Bulk PCM

می شود که محفظه نگهداری ماده تغییرفازدهنده از صفحه آلومینیومی باضخامت ۳/۱۷۵ میلی متر ساخته شده باشد. همان طور که پیش تر نیز عنوان شد، علت انتخاب آلومینیوم علاوه بر بالا بودن ضریب انتقال حرارت هدایتی آن، ارزان قیمت تر بودن و نیز سبک تر بودن آن است. هر چقدر میزان ضریب هدایت حرارتی ماده انتخاب شده بیشتر باشد، مقاومت حرارتی آن کاهش یافته و درنتیجه انتقال حرارت به صورت مؤثر تری رخ می دهد.

با توجه به مدلهایی که برای پانل خورشیدی و محفظه حاوی ماده تغییرفازدهنده وجود دارد، دو هندسه مختلف را می توان برای سیستم تنظیم کننده دمای سطح پانل خورشیدی در نظر گرفت که در ادامه به بررسی این دو هندسه پرداخت می شود. در ادامه هر یک از دو هندسه به صورت عددی شبیه سازی شده و به مقایسه نتایج و انتخاب هندسه بهینه پرداخته خواهد شد.

#### ۲-۱- هندسه ماده تغییرفازدهنده بالک<sup>۱</sup>

هندسه اول شامل یک محفظه است که ماده تغییرفازدهنده بهصورت توده یکپارچه داخل آن قرار می گیرد و به پشت پانل خورشیدی متصل می شود. از این هندسه در تمام طول پژوهش بهعنوان هندسه ماده تغییرفازدهنده بالک نامبرده خواهد شد. نمای شماتیک از این هندسه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ – نمایی از هندسه کل سهبعدی و یکهشتم آن(بخش زردرنگ) که شبیهسازی خواهد شد.

در شکل ۲ سه موقعیت بحرانی را میتوان مشاهده نمود که برای اندازه گیری دما در مدل سه بعدی داخل هندسه تعریف شدهاست.



شکل۲ - سمت چپ) نمای بالایی از هندسه سهبعدی شبیهسازیشده که در آن سه محل اندازهگیری دما نشان دادهشده است، سمت راست) نمای جنبی

#### ۲-۲- محفظه با پرههای مستقیم'

هندسه دوم که موردبررسی قرار خواهد گرفت، به این صورت است که ماده تغییرفازدهنده داخل محفظه ألومینیومی با عمق ۱ اینچ نگهداری میشود و بهمنظور افزایش جریان حرارت از سطح پانل خورشیدی به ماده تغییرفازدهنده، تعدادی پره آلومینیومی مستقیم نیز در داخل محفظه تعبیه خواهد شد. در حالت سهبعدی با توجه به تقارن هندسه و بهمنظور کاهش دامنه حل یکچهارم هندسه اصلی موردبررسی قرار خواهد گرفت. در شکل ۳ هندسه کامل محفظه پرهدار و قسمتی که بهصورت عددی شبیه ازی خواهد شد(قسمت زردرنگ) نشان دادهشده است.



شکل۳ - نمایی از هندسه سهبعدی محفظه پرهدار و بخشی از آن که بهصورت عددی شبیهسازی خواهد شد (قسمت زردرنگ)

برای این هندسه ۶ محل بحرانی تعریف میشود که دما در آنها اندازهگیری خواهد شد. در شکل ۴ موقعیت نقاط در نظر گرفتهشده در هندسه نشان دادهشدهاست.



شکل ۴ – نمای بالا از یک چهارم هندسه محفظه پرهدار

در شکل ۵ نیز نمای پشتی هندسه نشان دادهشده است.



# ۳- شرایط مرزی

ماده تغییر فاز دهنده مورداستفاده از نوع مواد تغییرفازدهنده آلی مبتنی بر اسیدهای چرب است که بانام تجاری PureTemp29 شناخته میشود.29 PureTemp به عنوان یک ماده ذخیره کننده انرژی حرارتی، خواص ترمودینامیکی بسیار مهمی دارد که عملکرد آن را در کاربردهای مختلف تعیین میکند. در ادامه به بررسی برخی از این خواص می پردازیم:

۳–۱– گرمای نهان ذوب بالا: این ماده دارای گرمای نهان ذوب بالایی است، به این معنی که برای تغییر فاز از جامد به مایع یا برعکس، به انرژی زیادی نیاز دارد. این ویژگی باعث

میشود که 29 PureTemp بتواند مقدار زیادی انرژی حرارتی را در خود ذخیره کند و در هنگام تغییر فاز آن را آزاد کند.

۲-۳- دمای ذوب مشخص و پایدار: دمای ذوب PureTemp 29 به طور دقیق مشخص شده و در طول سیکلهای ذوب و انجماد مکرر، تغییرات ناچیزی دارد. این ویژگی باعث می شود که بتوان از این ماده برای کنترل دقیق دما استفاده کرد.

۳-۳- چگالی مناسب: چگالی 29 PureTemp به گونهای است که امکان جابجایی و استفاده آسان از آن را فراهم میکند.

۳–۴– ظرفیت گرمایی ویژه: این ماده ظرفیت گرمایی ویژه بالایی دارد، به این معنی که برای افزایش دمای یک گرم از آن به اندازه یک درجه سانتی گراد، به انرژی زیادی نیاز است. این ویژگی باعث میشود که 29 PureTemp بتواند تغییرات دمایی را به آرامی و تدریجی انجام دهد. خواص ترمو فیزیکی این ماده تغییرفازدهنده در جدول ۱ آورده شدهاست.

جدول ۱ – خواص ترمو فیزیکی ماده تغییرفازدهنده

استفادهشده در این پژوهش					
مقدار		احد	ت ماخ		
فاز مايع	فاز جامد	واحت	فاضيت		
٨۵٠	940	Kg/m <sup>3</sup>	چگالی		
194.	144.	J/kg.K	ظرفيت حرارتي ويژه		
۰,۱۵	۰/۲۵	W/m.K	ضريب هدايت حرارتي		
۲٩/۶	۲۷/۶	°C	بازه دمای ذوب		
7.7		J/kg	گرمای نهان ذوب		

برای شبیه سازی در این پژوهش از مدل آنتالپی ارائه شده توسط شمسوندار<sup>۱</sup> و اسپارو<sup>۲</sup> [۳۷] استفاده می شود. این مدل یک روش توده ای است که در آن وجود سطح تماس بین فاز مایع و جامد و جابجایی طبیعی موجود در فرآیند ذوب در نظر گرفته نمی شود. بااین حال ثابت شده است که این مدل برای پیش بینی توزیع دما در طی فرآیند تغییر فاز با دقت مناسبی عمل می کند [۳۷].

<sup>1</sup> Shamsundar

در جدول ۲ مقادیر آنتالپی ماده تغییرفازدهنده استفادهشده در این پژوهش، در دماهای مختلف آورده شدهاست.

جدول ۲ - مقدار آنتالپی ماده تغییرفازدهنده PureTemp29

[٣٨]				
آنتالپی(J/m <sup>3</sup> )	دما(درجه سانتیگراد)			
•	•			
40920000	۲۷/۶			
22	<b>۲۹</b> /۶			
75851.98.	۵۰			

خواص ترمو فیزیکی سایر مواد استفاده شده در این پژوهش در جدول ۳ آورده شدهاست (۳۸].

جدول ۳ – خواص ترمو فیزیکی مواد استفادهشده در پژوهش

.[۳۸]			
آلومينيوم	خاصيت ترمو فيزيكى		
۲۷۰۰	چگالی(kg/m <sup>3</sup> )		
٩٠٣	ظرفیت حرارتی ویژه(J/kg.K)		
***	ضريب هدايت		
11.	(W/m K) ::1 ~		

تمامی مرزهای خارجی بهغیراز سطحی که با پانل خورشیدی در تماس است، آدیاباتیک فرض میشوند؛ درنتیجه تمامی حرارت ورودی در ماده تغییرفازدهنده ذخیره میشود.

شار حرارتی ثابت برابر با 2 W/m ۵۲۵ بر روی سطح بالایی صفحه آلومینیومی اعمال میشود. دلیل انتخاب این مقدار پژوهش انجام شده توسط محمد کریمی فیروز جایی و همکارانش در سال ۲۰۱۷ [۴۸] است؛ همچنین فرض شده است که بهطور متوسط ۱۲ ساعت تابش خورشیدی در روز وجود داشته باشد.

همچنین دمای اولیه پانل خورشیدی ثابت و یکنواخت و برابر با ۲۵ درجه سانتیگراد فرض میشود.

برای شبیهسازی عددی مسئله بصورت سهبعدی و گذرا از نرمافزار انسیس APDL استفاده شد که یک روش المان محدود محسوب میشود.

برای شبیهسازی حالت دو فازی از روش اویلری در نرمافزار استفاده گردیده است.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Sparrow

مدل اویلری جز پیچیده ترین روشهای شبیهسازی جریان های دو و چند فازی در نرم افزار انسیس است. با استفاده از روش اولرین، n معادله مومنتوم و پیوستگی برای هر فاز حل میشود. در این مدل، کوپلینگ بین فازها از طریق ضرایب فشار و تبادل درون فازی ایجاد میشود.

استفاده از مدل اولرین برای شبیه سازی جریان های سیال در انسیس هزینه محاسباتی بسیار بالایی دارد و تنها زمانی از این مدل استفاده می گردد که دو مدل شبیه سازی VOF و Mixture جواب گوی شیبه سازی نباشند. لازم به ذکر است که برای شبیه سازی گام زمانی از روش گام زمانی خود کار <sup>۱</sup> با گام زمانی بین ۴ تا ۱۰ ثانیه استفاده می شود. کل زمان شبیه سازی نیز ۵ ساعت در نظر گرفته می شود.

#### ۳-۵- بررسی استقلال حل از شبکهبندی

برای بررسی استقلال حل از شبکهبندی، حالت اول هندسه محفظه مجهز به پرههای مستقیم با طول پره ۱ میلیمتر با سه اندازه مختلف مش بندی می شود. برای مش بندی اول تعداد المانها ۴۰۳۷۰ و برای مش بندی دوم تعداد المانها ۵۸۴۱۲ و برای مش بندی سوم تعداد المانها ۹۲۴۰۰ در نظر گرفته می شود. بیشینه اختلاف دما برای موقعیتهای  $l_1$   $_2$  و  $l_1$ برای مش بندی دوم و سوم ۵/۰٪ محاسبه شده است که بیان گر استقلال حل از مش بندی است.

جدول ۴ – بررسی استقلال حل از شبکه

اختلاف	دمای موقعیت <i>1</i> 1 در زمان ۱ ساعت	تعداد المانها
-	۴۳/۵	4.77.
·/. ۲/۳	۴۲/۵	01411
7. •/Δ	۴۲/۳	974

## ۴– اعتبار سنجی

به منظور اعتبار سنجی مدل عددی توسعه داده شده در پژوهش حاضر، با توجه به نبود بررسی کاملا مشابه، با تغییر شرایط مرزی شبیهسازی به شرایط مرزی پژوهش آزمایشگاهی انجام شده توسط بیولی و همکاران [۲۵] نتایج مطابق شکل ۶

با هم مقایسه شدهاست. نمودار زیر نشان میدهد که شبیه سازی انجام شده از دقت خوبی برخوردار است. بر این اساس قطر پره ۴ میلی متر، شدت تابش ۱۰۰۰ وات برمتر مربع و دمای اولیه ۲۰ درجه سانتی گراد لحاظ شد.



شکل۶ – اعتبار سنجی مدل عددی توسعه داده شده

در راستای اعتبار سنجی نحوه شبیه سازی، با تغییر شرایط مرزی در نرم افزار مشاهده گردید، تغییرات دمایی پنل در طول زمان با نتایج تغییرات دمایی حاصل از پژوهش مبنا قرارداده شده تا حد زیادی مطابقت داشته است. تفاوت جزیی در آن را می توان با توجه ساده سازی های انجام شده در شبیه سازی و بدنبال آن تفاوت اندک پارامترهای تاثیر گذار در آزمون عملی نتیجه گیری نمود.

## ۵- معادلات انتقال حرارت

بر روی سطح جلویی پانل خورشیدی، انتقال حرارت از نوع هدایت حرارتی، جابجایی حرارتی و تشعشع حرارتی در نظر گرفته میشود. میتوان از تابشهای تشعشعی با طولموج بلند که از آسمان انجام میشود صرفنظر نمود؛ درنتیجه رابطه انتقال حرارت بهصورت زیر نوشته میشود:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -k \frac{\partial T}{\partial x} + h_e (T_e - T) + \alpha E(t)$$
(1- $\Delta$ )

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Automatic time-stepping

 $\begin{cases} B_{1}(T_{m} - \Delta T) = 0, \\ B_{1}'(T_{m} - \Delta T) = 0, \\ B_{1}''(T_{m} - \Delta T) = 0, \\ B_{1}(T_{m}) = 0.5 \\ B_{1}(T_{m} + \Delta T) = 0, \\ B_{1}'(T_{m} + \Delta T) = 0, \\ B_{1}''(T_{m} + \Delta T) = 0 \end{cases}$ (f- $\Delta$ )

در رابطه فوق  ${}^{\prime}B_{1}$  و  ${}^{\prime}{}^{\prime}B_{1}$  به ترتیب مشتق اول و دوم (T)  $B_{1}$  هستند. مقدار تابع  $B_{1}(T)$  مشابه تابع (T) است و تنها تفاوت این دو تابع در این است که تابع (T) دارای مشتق مرتبه دوم پیوسته است. این امر به همگرایی تابع کمک می کند. از تابع  $B_{1}(T)$  برای مدلسازی تغییرات خواص ترمو فیزیکی ماده تغییرفازدهنده به صورت زیر استفاده می شود:

$$\rho(T) = \rho_{solid} + (\rho_{liquid}$$

$$-\rho_{solid}) \cdot B_{1}(T)$$

$$k(T) = k_{solid} + (k_{liquid} - k_{solid}) \cdot B_{1}(T)$$

$$(\beta - \Delta)$$

در روابط فوق *Q* بیان *گ*ر چگالی ماده تغییرفازدهنده و *k* بیان *گ*ر ضریب هدایت حرارتی ماده تغییرفازدهنده است. مدلسازی گرمای ویژه شامل ترم اضافی می شود که بیان *گ*ر گرمای نهان ذوب است که در طی فرآیند ذوب جذب می شود:

$$C_{p}(T) = C_{P \ s} + (C_{P \ l} - C_{P \ s}) \cdot B_{1}(T) + L_{F} \cdot D(T)$$
(Y- $\Delta$ )

که در رابطه فوق

$$D(T) = \frac{e^{\frac{-T(T-T_m)^2}{\Delta T^2}}}{\sqrt{\pi \Delta T^2}}$$
 (A- $\Delta$ )

تابع D تابع دلتای دیراک هموارشده ۲ است که همه جا به غیراز در بازه  $[T_m - \Delta T, T_m + \Delta T]$  صفر است. مرکز تقارن تابع است و انتگرال تابع روی بازه مذکور برابر با یک است. نقش در رابطه فوق  $\alpha$  ضریب جذب حرارتی ۱ ماده تشکیل دهنده سطح پانل خورشیدی، E شدت تابش خورشیدی میباشد. معادله انتقال حرارت دیفیوز بر روی ماده تغییرفاز دهنده، لایه هوا و دامنه سطح پانل خورشیدی اعمال می شود. در نتیجه می توان نوشت:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla (-k \nabla T) + \rho C_p \bar{u} \cdot \nabla T =$$

$$0 \qquad (\Upsilon - \Delta)$$

میدان سرعت در معادله (۲–۵) که با نماد u نشان دادهشده است، به کمک نوشتن معادله ناویر استوکس برای جریان تراکم ناپذیر محاسبه میشود.

برای مدل سازی تغییرات خواص ترمو فیزیکی که در حین تغییر فاز ماده رخ می هده می توان از مدل PCM RT25 استفاده نمود. تابع  $B_0$  به عنوان کسر حجمی مایع در دامنه ماده  $T_m$  می یوازدهنده تعریف می شود. همچنین فرض می شود که تغییر فازده دمای ذوب باشد. آنگاه می توان نوشت:

$$\begin{split} B_0(T) &= \\ \begin{cases} 0 &, \quad T < (T_m - \Delta T) \\ \frac{(T - T_m + \Delta T)}{2\Delta T} &, \quad (T_m - \Delta T) \leq T < (T_m + \Delta T) \\ 1 &, \quad T > (T_m + \Delta T) \end{split}$$

همانطور که در معادله (-0) می توان مشاهده نمود، مقدار  $B_0$  وقتی که ماده تغییرفازدهنده به طور کامل در فاز جامد قرار دارد برابر با صفر است و وقتی که به طور کامل در فاز مایع قرار دارد برابر با یک است. بر اساس مدل استفاده شده در این پژوهش فرض می شود که  $B_0$  به صورت خطی از مقدار صفر به یک افزایش یابد. برای اطمینان از پیوستگی دیفرانسیل مرتبه دوم کسر حجمی در تمام دامنه دمایی، ( $T_0$ , با یک تابع دیفرانسیل مرتبه دوم به نام  $B_1$  تخمین زده می شود. که با استفاده از شرایط زیر محاسبه می شوند:

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Smoothed Delta Dirac function

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Thermal absorptivity

اصلی این تابع تعیین کیفیت توزیع گرمای نهان در اطراف نقطه ذوب متوسط است.

## **۶- محفظه تغییر فاز دهنده بالک**

این طراحی شامل یک مخزن ذخیره پرشده با ماده تغییرفازدهنده است که در قسمت پشتی سطح پانل خورشیدی قرار می گیرد. پیش تر جزییات هندسه مسئله آورده شده است.

## ۶–۱– مدل سەبعدى

مدل سهبعدی برای مخزن حاوی ماده تغییرفازدهنده با عمق I اینچ با شرایط اولیه و شرایط مرزیای مشابه شرایط اولیه و شرایط مرزی حالت دوبعدی، شبیهسازی شد. دما در نقاط مختلف و در فاصلههای مختلف از دیوار کناری محاسبه و  $L_2$  گردید و سپس با نتایج بهدستآمده برای مدل دوبعدی مقایسه شد. وقتی که دما در موقعیتهای  $L_1$  و  $L_2$ برای شبیهسازی دوبعدی و سهبعدی مقایسه شد، اختلاف بسیار زیادی حتی تا ۳۱ درجه سانتی گراد اختلاف در دما مشاهده گردید. البته با نزدیک شدن به مرکز هندسی مخزن نخیره ماده تغییرفازدهنده این اختلاف دما برای حالت دوبعدی و سهبعدی کمتر می شود و با نزدیک شدن به دیوارهها، اختلاف در سه موقعیت مختلف (مطابق شکل ۲) در مدل سهبعدی و دوبعدی را نشان می دهد.



شکل ۷ - مقایسه تغییرات دمای پانل خورشیدی در زمانهای مختلف برای مدل دوبعدی و سهبعدی در سه محل مختلف برای هندسه ماده تغییرفازدهنده بالک با مخزن ذخیره عمق ۱ اینچ

در شکل ۷ دمای پانل خورشیدی در طی فرآیند ذوب ماده تغییرفازدهنده در مدل دوبعدی با شیب بیشتری افزایش پیدا مي كند؛ زيرا حرارت وارد شده در اثر وجود لايه هاي بالايي ماده تغییرفازدهنده انباشته می شود. حالت مشابهی برای مدل سهبعدی نیز مشاهده می شود، اما شیب اولیه آن نسبت به مدل دوبعدى كمتر است. البته اين اختلاف به دليل نوع تنظيمات شبیهسازی است؛ زیرا برای مدل دوبعدی فرض میشود که طول مخزن بينهايت بزرگ باشد و تنها بين بخش بالايي و پایینی مخزن ذخیره از طریق ماده تغییرفازدهنده که داخل مخزن پرشده است، تماس حرارتی برقرار باشد، اما در مدلسازی سهبعدی علاوه بر صفحه بالایی و پایینی مخزن ذخیره بین صفحههای کناری مخزن ذخیره نیز از طریق ماده تغییرفازدهنده تماس حرارتی برقرار است. ازآنجایی که جنس دیوارهها از آلومینیوم فرض شدهاست و آلومینیوم نیز دارای ضریب هدایت حرارتی بالایی است، دیوارههای کناری به صورت مؤثری منجر به کاهش مقاومت حرارتی بر سر مسیر حرکت جریان حرارت ورودی از بالای مخزن به سمت پایین آن می شوند. این موضوع بر نحوه ی توزیع حرارت داخل ماده تغییرفازدهنده تأثیرگذار است. در حالت سهبعدی به دلیل وجود دیوارههای کناری آلومینیومی و انتقال حرارت از طریق آن آخرین قسمتهایی از ماده تغییرفازدهنده که ذوب در آنها رخ میدهد، بخشهای میانی مخزن میباشند. این موضوع بهخوبی در شکل ۸ نشان دادهشده است.



شکل ۸ – کانتور دمای برای مدل سهبعدی مخزن حاوی ماده تغییرفازدهنده بالک در دمای اشباع

#### ۷- محفظه حاوی پره

بهمنظور توزیع گرما بهصورت مساوی در تمام حجم ماده تغییرفازدهنده برای اینکه دمای پانل خورشیدی در طی فرآیند ذوب ماده تغییرفازدهنده در حداقل مقدار ممکن قرار گیرد، از پرههای آلومینیومی مستقیم در مخزن ذخیره ماده تغییرفازدهنده می توان استفاده کرد. این پرهها به صفحه بالایی

مخزن متصل میشوند که در تماس مستقیم با پانل خورشیدی است،.

#### ۷-۱- مدلسازی سهبعدی

در این حالت به مقایسه مدل دوبعدی و سهبعدی برای محفظه حاوی ماده تغییرفازدهنده مجهز به پره پرداخته میشود. در هر دو حالت فرض میشود که طول پره برابر با ۱ اینچ باشد. در این حالت عمق پره برابر با ۱ اینچ و فاصله بین پرهها برابر با 0/1 اینچ در نظر گرفته میشود؛ درنتیجه توزیع دما در بخشهای مختلف مخزن و روی پانل خورشیدی برای مدل سهبعدی محاسبه میشود و با دادههای مدل دوبعدی مقایسه میشود. شکل ۹ تغییرات دما در موقعیت 1را نشان میدهد.



همان طور که در شکل ۹ مشاهده می شود، در زمان انتهایی شبیه سازی (۵ ساعت) مدل دوبعدی دمای سطح پانل خورشیدی را در حدود ۵ درجه سانتی گراد بیشتر از مدل سه بعدی پیش بینی می کند. دلیل این امر را می توان این گونه بیان نمود که در مدل سه بعدی حرارت بیشتری به واسطه دیواره های جانبی مخزن ذخیره ماده تغییرفازدهنده منتقل می شود که این مورد در هند سه دو بعدی دیده نمی شود.

# ۸- نتایج ۸-۱ - نتیجهگیری نهایی

با توجه به شبیه سازی های انجام شده و مقایسه نتایج دو شبیه سازی شکل ۱۰ مشاهده گردید که با افزودن پرهها به محفظه زمان اشباع اندکی کاهش اما دما در تمامی مراحل به شکل چشمگیری کاهش می یابد. این مهم نشان می دهد که در محفظه پرهدار با توجه به اینکه رسانش بسیار بهتر اتفاق می افتد و نقاط مختلف ماده تغییر فاز دهنده بصورت همزمان درگیر عملیات حرارتی می شوند، اثر گذاری استفاده از ماده تغییر فاز دهنده در شکل دوم بیشتر شده و این محفظه عملکرد بهتری ارایه می دهد.



شکل ۱۰ – مقایسه نتایج حاصل از محفظه بالک و محفظه یره دار حاوی ماده PureTemp29

#### ۸-۲ - توصیههایی برای مطالعه بیشتر

با توجه به این که تاکنون تحقیقهای تجربی بسیاری در این زمینه انجام شدهاست و مطالعه حاضر نیز به شکل شبیهسازی بوده ولی همین مطالعه میتواند به صورت محاسباتی و و تئوری نیز انجام بشود. مطالعه تئوری میتواند به این صورت انجام بشود که که معادلههای حاکم بر مسئله نوشته شده و به وسیله روش های نیمه تحلیلی، عددی و ترکیبی از این دو روش یعنی روش ترکیبی تحلیلی و عددی<sup>۱</sup> حل بشوند . این روش در بسیاری از مطالعههای تئوری [۳۹–۴۷] به کار گرفته شد.

#### مراجع

 Jawad, M., (2023) Insinuation of Arrhenius Energy and Solar Radiation on Electrical Conducting Williamson Nano Fluids Flow with Swimming Microorganism: Completion of Buongiorno's

<sup>1</sup> The Hybrid Analytical and Numerical Method

- [13] Jalili, P., et al., (2023) Study of nonlinear radiative heat transfer with magnetic field for non-Newtonian Casson fluid flow in a porous medium. Results in Physics. 48: p. 106371.
- [14] Ho, C., C.-C. Chen, and W.-M. Yan, (2016) Experimental and numerical study on transient thermal energy storage of microencapsulated phase change material particles in an enclosure. Int. J. Heat Mass Transfer, 94: p. 191-198.
- [15] Ho, C., W.-L. Chou, and C.-M. Lai, (2016) Thermal and electrical performances of a water-surface floating PV integrated with double water-saturated MEPCM layers. Applied Thermal Engineering. 94: p. 122-132.
- [16] Ho, C., et al., (2013) Performance assessment of a BIPV integrated with a layer of water-saturated MEPCM. Energy and buildings. 67: p. 322-333.
- [17] Ho, C.-J., A. Tanuwijava, and C.-M. Lai, (2012)Thermal and electrical performance of a BIPV integrated with a microencapsulated phase change material layer. Energy and Buildings. 50: p. 331-338.
- [18] Sharma, S., et al., (2016) Performance enhancement of a Building-Integrated Concentrating Photovoltaic system using phase change material. Solar Energy Materials and Solar Cells. 149: p. 29-39.
- [19] Hasan, A., et al., (2015) Increased photovoltaic performance through temperature regulation by phase change materials: Materials comparison in different climates. Solar Energy. 115: p. 264-276.
- [20] Maiti, S., et al., (2011) Self regulation of photovoltaic module temperature in V-trough using a metal-wax composite phase change matrix. Solar energy. 85(9): p. 1805-1816.
- [21] Aelenei, L., et al., (2014) Building Integrated Photovoltaic System with integral thermal storage: a case study. Energy Procedia. 58: p. 172-178.
- [22] Aelenei, L., et al., (2014) Thermal performance of a hybrid BIPV-PCM: modeling, design and experimental investigation. Energy Procedia. 48: p. 474-483.
- [23] Park, J., T. Kim, and S.-B. Leigh, (2014) Application of a phase-change material to improve the electrical performance of vertical-buildingadded photovoltaics considering the annual weather conditions. Solar Energy. 105: p. 561-574.
- [24] Brano, V.L., et al., (2014) Finite difference thermal model of a latent heat storage system coupled with a photovoltaic device: description and experimental validation. Renewable Energy. 68: p. 181-193.
- [25] Biwole, P.H., P. Eclache, and F. Kuznik, (2013) Phase-change materials to improve solar panel's performance. Energy and Buildings, 2013. 62: p. 59-67.

Model. East European Journal of Physics, p. 135-145.

- [2] Sharma, B.K., et al., (2023) Entropy generation and thermal radiation analysis of EMHD Jeffrey nanofluid flow: Applications in solar energy. Nanomaterials. 13(3): p. 544.
- [3] Jeelani, M.B. and A. Abbas, (2023) Al2O3-Cu/Ethylene glycol-based magnetohydrodynamic non-Newtonian Maxwell hybrid nanofluid flow with suction effects in a porous space: energy saving by solar radiation. Symmetry. 15(9): p. 1794.
- [4] Ullah, M.I., et al., (2023) A fractional approach to solar heating model using extended ODE system. Alexandria Engineering Journal. 81: p. 405-418.
- [5] Jalili, B., et al., (2023) Squeezing flow of Casson fluid between two circular plates under the impact of solar radiation. ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik: p. e202200455.
- [6] Obalalu, A., et al., (2023) Two-Phase Numerical Simulation for the Heat and Mass Transfer Evaluation Across a Vertical Deformable Sheet with Significant Impact of Solar Radiation and Heat Source/Sink. Arabian Journal for Science and Engineering: p. 1-19.
- [7] Abbas, A., et al., (2023) Numerical simulation of variable density and magnetohydrodynamics effects on heat generating and dissipating Williamson Sakiadis flow in a porous space: Impact of solar radiation and Joule heating. Heliyon. 9(11).
- [8] Dawar, A., et al., (2023) MHD stagnation point flow of a water-based copper nanofluid past a flat plate with solar radiation effect. Journal of Petroleum Science and Engineering. 220: p. 111148.
- [9] Sharma, B.K., et al., (2023) Computational analysis of melting radiative heat transfer for solar Riga trough collectors of Jeffrey hybrid-nanofluid flow: a new stochastic approach. Case Studies in Thermal Engineering. 52: p. 103658.
- [10] Hussain, S.M., et al., (2023) Chemical reaction and thermal characteristiccs of Maxwell nanofluid flowthrough solar collector as a potential solar energy cooling application: A modified Buongiorno's model. Energy & Environment. 34(5): p. 1409-1432.
- [11] Muto, Y., C. Kojima, and Y. Okura, (2023) Mathematical modeling of road heating system with underground distribution line based on nonlinear ODE model. Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE. 14(2): p. 378-402.
- [12] El-dawy, H., M.F. El-Amin, and Z.A. Raizah, (2023) Joule Heating and Viscous Dissipation Effects on a Stretching/Shrinking Cannel Filled by Micropolar Hybrid Nanofluid in Presence Thermal/Solar Radiation. Journal of Nanofluids. 12(3): p. 738-744.

- [38] Farooq, U., et al., (2018) Transpiration and viscous dissipation effects on entropy generation in hybrid nanofluid flow over a nonlinear radially stretching disk. Entropy. 20(9): p. 668.
- [39] Jalili, P., et al., (2022) Heat transfer analysis in cylindrical polar system with magnetic field: a novel hybrid analytical and numerical technique. Case Studies in Thermal Engineering. 40: p. 102524.
- [40] Jalili, B., et al., (2023) Analytical approach for micropolar fluid flow in a channel with porous walls. Alexandria Engineering Journal. 79: p. 196-226.
- [41] Jalili, P., et al., (2023) A novel technique for solving unsteady three-dimensional brownian motion of a thin film nanofluid flow over a rotating surface. Scientific Reports, 2023. 13(1): p. 13241.
- [42] Azar, E.A., et al., (2023) An exact analytical solution of the Emden–Chandrasekhar equation for self-gravitating isothermal gas spheres in the theory of stellar structures. Physics of the Dark Universe. 42: p. 101309.
- [43] Jalili, B., et al., (2023) impact of variable viscosity on asymmetric fluid flow through the expanding/contracting porous channel: A thermal analysis. Case Studies in Thermal Engineering. 52: p. 103672.
- [44] Jalili, B., et al., (2024) A novel approach to micropolar fluid flow between a non-porous disk and a porous disk with slip. Chinese Journal of Physics. 87: p. 118-137.
- [45] Jalili, P., et al., (2023) A Novel analytical investigation of a swirling fluid flow and a rotating disk in the presence of uniform suction. Arabian Journal for Science and Engineering: p. 1-17.
- [46] Ahmadi Azar, A., et al., (2023) Investigating the effect of structural changes of two stretching disks on the dynamics of the MHD model. Scientific Reports. 13(1): p. 21833.
- [47] Jalili, P., et al., (2023) The HAN method for a thermal analysis of forced non-Newtonian MHD Reiner-Rivlin viscoelastic fluid motion between two disks. Heliyon, 2023.
- [48] Karimi, M., et al., (2017) A Spatial and Mathematical Based Model for Solar Energy Potential Assessment and Optimal Lands for Solar Power Plant Construction in Iran.

- [26] Hasan, A., et al., (2010) Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaics. Solar Energy. 84(9): p. 1601-1612.
- [27] Huang, M., P. Eames, and B. Norton, (2006) Comparison of a small-scale 3D PCM thermal control model with a validated 2D PCM thermal control model. Solar energy materials and solar cells, 2006. 90(13): p. 1961-1972.
- [28] Huang, M., P. Eames, and B. Norton, (2006) Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics. Solar energy. 80(9): p. 1121-1130.
- [29] Huang, M., P. Eames, and B. Norton, (2004) Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials. International Journal of heat and mass transfer. 47(12-13): p. 2715-2733.
- [30] Hausler, T. and H. Rogaß. (2020) Latent heat storage on photovoltaics. in Sixteenth European Photovoltaic Solar Energy Conference. Routledge.
- [31] Häusler, T. and H. Rogaß. (1998) Photovoltaic module with latent heat-storage-collector. in 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, proceedings of the international conference held at Vienna, Austria, 6-10 July, vol. 1. 1998. Office for Official Publications of the European Communities.
- [32] Ma, T., et al., (2015) Using phase change materials in photovoltaic systems for thermal regulation and electrical efficiency improvement: A review and outlook. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 43: p. 1273-1284.
- [33] Radziemska, E., (2003) The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells. Renewable energy. 28(1): p. 1-12.
- [34] Krauter, S. and R. Hanitsch. (1994) Actual optical and thermal performance of photovoltaic modules. in IEEE 24 th Photovoltaic Specialist Conference..
- [35] Weakliem, H. and D. Redfield, (1979)Temperature dependence of the optical properties of silicon. Journal of Applied Physics. 50(3): p. 1491-1493.
- [36] EIA, U., (2017) US electric generating capacity increase in 2016 was largest net change since 2011. Today in Energy. 27.
- [37] Shamsundar, N. and E. Sparrow, (1975) Analysis of multidimensional conduction phase change via the enthalpy model. 1975.