

بهبود عملکرد گردآور خورشیدی و افزایش بهره وری انرژی خورشید با بکارگیری مواد تغییر فازی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران،
ashrafi.mehrdad2019@gmail.com
استادیار، گروه مکانیک، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران، hmohammadiun@iaui-
shahrood.ac.ir
استادیار، گروه مکانیک، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران، diba_mr60@yahoo.com
دانشیار، گروه مکانیک، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران،
mmohammadiun@yahoo.com

مهرداد اشرفی

حمید محمدیون*

محمد حسین دیبایی بناب

محمد محمدیون

چکیده

گردآورهای خورشیدی از جمله تجهیزات پرکاربرد برای ذخیره انرژی خورشید به شمار می روند که در آنها انرژی تابشی خورشید به انرژی داخلی یک ماده انتقال دهنده منتقل می شود، اما این تجهیز به دلیل فاصله زمانی بین تابش خورشید و نیازمندی به انرژی، به ندرت می تواند پاسخگوی نیازهای گرمایشی باشد. لذا این مقاله جهت بهبود ذخیره سازی گرما و در نتیجه جلوگیری از اتلاف انرژی، استفاده از مواد تغییر دهنده فاز در گردآور را پیشنهاد می دهد. هدف اصلی این مطالعه، بررسی جریان دوغاب مواد تغییر فاز (PCM) در داخل یک صفحه خورشیدی و ارزیابی عملکرد گرمای آن می باشد. در این مقاله انتقال گرمای درون سیال حاوی مواد تغییر فاز که در یک صفحه خورشیدی جریان دارد، بررسی و این گردآورها ارزیابی می گردد. به منظور ارزیابی اولیه عملکرد روش پیشنهادی، مطالعه عددی به کمک نرم افزار Comsol ارائه شده است. نتایج تحلیل عددی نشان می دهد که این مواد می توانند به طور موثری کارایی گردآور خورشیدی را بهبود دهند.

واژه‌های کلیدی: گردآور خورشیدی، مواد تغییر فاز، انتقال گرما، کارایی، تحلیل عددی، نرم افزار Comsol.

Improvement of Solar Collector Performance and Increased Solar Energy Efficiency by Using Phase Change Materials

M. Ashrafi

Department of Mechanical Engineering, Shahrood branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

H. Mohammadiun

Department of Mechanical Engineering, Shahrood branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

M. H. Dibaei Bonab

Department of Mechanical Engineering, Shahrood branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

M. Mohammadiun

Department of Mechanical Engineering, Shahrood branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

Abstract

Solar collectors are among the most widely used equipment for solar energy storage, in which solar radiation is transferred to the internal energy of a transferring material, but this equipment can rarely fulfill thermal needs due to the solar time and energy requirement. Therefore, this paper proposes the use of phase change materials in the collector to improve thermal storage and prevent energy loss. The main objective of this study is to investigate PCM slurry fluid flow inside a solar plate and to evaluate its performance. A numerical analysis conducted with Comsol Software is presented to obtain a preliminary evaluation of the performance of the proposed concept. The numerical results show that these materials can effectively improve solar collector performance.

Keywords: Solar collector, Phase change material, Heat transfer, Efficiency, Numerical analysis, Comsol Software.

۱- مقدمه

گرما) در چند دهه‌ی اخیر رشد چشمگیری داشته است. در مناطق با آب و هوای گرم می‌توان تا ۷۵٪ نیاز گرمایش آب را با استفاده از سیستمهای گرمای خورشیدی تامین کرد. این درصد در مناطق با آب و هوای سرد اروپا تا ۲۰٪ کاهش می‌یابد [۱]. آبگرمکنهای خورشیدی به دلیل قیمت پایین و فناوری ساده‌تر، پرکاربردترین سیستم گرمایی خورشیدی در جهان محسوب می‌شوند. اصلی‌ترین بخش این سیستمها، گردآور خورشیدی است که انرژی تابشی خورشید توسط آن جذب می‌گردد. گردآور خورشیدی نوع خاصی از مبادله کن است

آلودگی های زیست محیطی ناشی از سوخت های فسیلی و پایان پذیر بودن منابع آنها، تلاش و تحقیقات وسیعی را در بکارگیری انواع دیگری از انرژی بخصوص انرژی های نو، موجب شده است. انرژی خورشیدی به جهت نامحدود بودن، قابل دسترس بودن و سازگاری با محیط زیست، جایگاه ویژه ای را در این بین به خود اختصاص داده است. نظر به اینکه بهره گیری از انرژی خورشیدی، نیاز به سرمایه گذاری اولیه نسبتا بالایی دارد. استفاده از این انرژی در دو مقیاس صنعتی (عمدتاً با هدف تولید برق) و خانگی (عمدتاً به منظور تولید

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: hmohammadiun@iaui-shahrood.ac.ir

که انرژی تابش خورشید را به گرما تبدیل می کند اما از جهات مختلف با مبادله کن های گرمایی تفاوت دارد. در مبادله کن های گرمایی، گرما معمولاً از طریق جابجایی یا هدایت به سیال دیگر منتقل می شود و انتقال گرما از طریق تابش در آنها بسیار ناچیز است درحالیکه در یک گردآور خورشیدی، انتقال گرما از طریق تابش دارای نقشی اساسی است. در سیستمهای خانگی عموماً از گردآورهای صفحه تخت و لوله ای خلاء استفاده می شود. شناخت و ارزیابی دقیق این گردآورها می تواند تاثیر زیادی در طراحی بهینه آنها داشته باشد [۲].

مشکلی که در سیستمهای خورشیدی وجود دارد این است که همیشه خورشید در دسترس نیست، بنابر این بیشتر سیستم های تبدیل کننده ی انرژی گرمایی خورشیدی نیازمند سیستمهای ذخیره کننده ی گرما می باشند. در میان روش های مختلف ذخیره کننده ی انرژی گرمایی، روش ذخیره سازی با گرماي نهران در دهه ی گذشته بیشتر مورد توجه بوده است. در میان مواد مختلف، مواد تغییر فاز دهنده بیشترین گرماي نهران را دارا هستند ولی مشکلی که باعث میشود این مواد دارای نرخ شارژ و تخلیه ی پایینی باشند، پایین بودن رسانایی گرمایی این مواد است که محققان با به کارگیری فلزات با رسانایی گرمایی بالا سعی در رفع این مشکل دارند. یکی از راههای به کار گیری فلزات به همراه مواد تغییر فاز دهنده استفاده از مبادله کن ها است که در میان این سیستمها، مبادله کن دولوله ای به علت حجم کم و پایین بودن افت فشار سیال عامل، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است و در بسیاری از کاربرد ها همانند کاربرد های فضایی، آبگرمکن های خورشیدی، باز یافت اتلافات گرمایی، سرمایه و گرمایش ساختمانها به کار می رود [۳]. در آبگرمکن های خورشیدی، بسته به نوع استفاده آنها ممکن است از انواع گردآور صفحه تخت، لوله ای خلاً یا متمرکز کننده استفاده شود که در سیستم های خانگی عموماً از نوع صفحه تخت یا لوله ای خلاً استفاده می گردد. استفاده از گردآورهای صفحه تخت، قدمت بیشتری داشته و نسبت به گردآورهای لوله ای خلاء که فناوری جدیدتری محسوب می شوند رواج بیشتری دارد [۴]. لذا در این پژوهش از گردآور صفحه تخت استفاده شده است.

تغییر فاز می تواند به صورت جامد-جامد، جامد-مایع، جامد-گاز و مایع-گاز صورت گیرد. در تغییر فاز جامد-جامد، گرما به صورت تغییر ماده از یک حالت بلوری به حالت دیگر خواهد بود. این تغییر فاز اصولاً دارای توانایی ذخیره سازی پایین تر و تغییر حجم کمتری نسبت به تغییر فاز جامد-مایع است، ولی از لحاظ شرایط نگهداری و ظرف های نگهدارنده نسبت به حالات دیگر مشکلات کمتری خواهد داشت. تغییر فاز جامد-گاز و مایع-گاز، دارای گرماي نهران تغییر فاز بالایی است، ولی تغییر حجم زیاد آن در هنگام تغییر فاز مشکلاتی از لحاظ نگهداری این مواد ایجاد خواهد کرد. تغییر حجم زیاد، این سیستم های ذخیره کننده را پیچیده می سازد. تغییر فاز جامد-مایع دارای گرماي نهران کمتری نسبت به تغییر فاز مایع-گاز است، اما به هر حال این تغییر فاز نیز دارای تغییر حجم با درصد کم (حدود ۱٪) است. تغییر فاز جامد مایع از لحاظ اقتصادی توجه زیادی را به خود جلب کرده است و نسبت به حالت های دیگر به دلیل گرماي نهران بالا

و محدوده دمای ذوب مختلف و شرایط استفاده آن پر کاربردتر است [۵].

رابل و همکارانش [۶] پژوهش خود را بر روی گردآورهای خورشیدی غیر مستقیم دارای مواد تغییر فاز دهنده به عنوان واحد ذخیره کننده ی انرژی در گردآور متمرکز نمودند. شرایط به وسیله ی نرم افزار Fluent شبیه سازی شده و نتایج نشان می دهد که استفاده از مواد PCM^۱ امکان وجود هوا با دمای ایده آل 32 ± 2 درجه سلسیوس به مدت حداقل ۱۲ ساعت را فراهم می سازد.

هگزری و همکارانش [۷] به بررسی آزمایشگاهی تاثیرات ماده تغییر فاز سیلیکاژل^۲ با سیال پایه مخلوط ۵۰ درصد حجمی آب و اتیلن گلیکل به عنوان سیال عامل در گردآورهای صفحه تخت خورشیدی در سیستم آب گرمکن خورشیدی در ساختمان پرداختند. بدین منظور سیال سیلیکا در غلظت های مختلف تا یک درصد حجمی و در سه دبی مختلف مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان دهنده ی پتانسیل مناسب سیال سیلیکا در افزایش راندمان گرمای و بهره وری انرژی گردآور صفحه تخت خورشیدی به عنوان اصلی ترین جزء آبگرمکن های خورشیدی می باشد. به طوری که بر خلاف پایین بودن رسانایی گرمایی ذرات سیلیکاژل، نتایج بدست آمده، افزایش ۴ تا ۸ درصدی بازدهی گرمای و بهره وری انرژی سیستم آبگرمکن خورشیدی را نشان می دهند. اگر اول^۳ و همکارانش [۸] در تحقیق خود به بررسی تاثیر استفاده از ماده تغییر فاز دهنده در گردآور تک منظوره و دوم منظوره پرداختند. نتایج آزمایشات تک منظوره نشان داد که بیشترین میزان نرخ ذوب PCM در ساعت ۱۲:۰۰ تا ۱۲:۴۰ بوده است زیرا میزان افزایش دمای متوسط مخزن با کاهش شدید مواجه شده است همچنین نتایج برای آزمایشات دوم منظوره نشان داد که از ساعت ۱۷:۴۰ به بعد میزان اختلاف دمای هوای خروجی هواگرم کن با محیط، برای آزمایشی که از ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده بود بیشتر از آزمایش بدون استفاده از ماده تغییر فاز دهنده بوده است.

دوبی و همکارانش [۹] در پژوهش خود تلاش نمودند تا با افزایش دمای سیال عامل با کار گذاری مواد تغییر فاز دهنده در زیر صفحه جاذب و با استفاده از گرماي نهران و تغییر در سیستم لوله کشی گردآور خورشیدی بتوانند در زمان نبود تابش خورشیدی، مدت زمان بیشتری همچنان آب گرم داشته باشند. در آزمایش های انجام شده اختلاف دمای متوسط صفحه جاذب و دمای متوسط مخزن در آزمایش دوم در ساعت ۱۵:۰۰ برابر با ۲۰/۹۹ درجه سلسیوس بود و همین اختلاف دمای متوسط در آزمایش آخر در همان زمان ۲۰/۵ درجه سلسیوس شد. با مقایسه نمودن بازده در دو آزمایش دوم و سوم با و بدون (PCM) در یافتند که میزان بازده در حالت بدون استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در ساعات کمتر از حدود ۱۵:۰۰ بیشتر از آزمایش با مواد تغییر فاز دهنده می باشد و علت آن جذب گرما به وسیله مواد تغییر فاز دهنده برای ذوب می باشد که در ساعات غروب آفتاب این رابطه عکس می شد و دلیل آن ذوب شدن مواد تغییر فاز دهنده و انتقال گرماي نهران آن به سیال عامل بود.

¹ phase change material

² Silica gel

³ Agrawal

گلائیکول		
گرمای ویژه	۳۶۰۰	ژول بر کیلوگرم، کلونین
رسانایی گرمایی	۰/۳۶۹	وات بر متر، کلونین
لزجت	۰/۰۰۱	پاسکال.ثانیه

ذرات مواد تغییر فاز میکروکپسوله (mPCM) که سوسپانسیون سیال نهایی را تشکیل داده و از جنس پارافین هستند، دارای خواصی مطابق با جدول زیر می‌باشند.

جدول ۲- خواص میکروکپسولها (mPCM) و سوسپانسیون سیال

مشخصه	مقدار	واحد
چگالی (جامد-مایع)	۷۸۰-۸۱۰	کیلوگرم بر متر مکعب
گرمای ویژه (جامد-مایع)	۲۴۸۰-۲۷۶۰	ژول بر کیلوگرم کلونین
رسانایی گرمایی (جامد-مایع)	۰/۱۷-۰/۴	وات بر متر کلونین
گرمای نهان ذوب	۱۷۴	کیلوژول بر کیلوگرم
محدوده دمای تغییر فاز	۵۲-۵۴	درجه سلسیوس

۲-۱- چگالی سیال

این مشخصه در دو حالتی که ذرات جامد و مایع باشند، به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{چگالی سیال حامل} = \text{چگالی سیال مخلوط} / (\text{چگالی mPCM}) \quad (1)$$

$$\text{چگالی سیال حامل} * (\text{درصد وزنی mPCM}) + (\text{چگالی سیال مخلوط} * (\text{درصد وزنی } 1 - \text{mPCM}))$$

در زمانی که ذرات جامد هستند، چگالی مخلوط برابر است با

$$\rho = \frac{1044 * 810}{0.6 * 1044 + 0.4 * \rho} \rightarrow \rho = 868.42 \frac{kg}{m^3} \quad (2)$$

و برای ذرات مایع، چگالی بدست خواهد آمد:

$$\rho = \frac{1044 * 780}{0.6 * 1044 + 0.4 * \rho} \rightarrow \rho = 844.5 \frac{kg}{m^3} \quad (3)$$

۲-۲- گرمای ویژه سیال

برای محاسبه این ویژگی در هر ۲ فاز از رابطه زیر استفاده شده است:

$$/ (\text{هسته چگالی mPCM} * \text{گرمای ویژه mPCM} * (\text{درصد وزنی mPCM}) + (\text{چگالی مخلوط سیال سوسپانسیونی}))$$

$$/ (\text{گرمای ویژه سیال حامل} * \text{چگالی سیال حامل} * (\text{درصد وزنی } 1 - \text{mPCM})) + (\text{چگالی مخلوط سیال سوسپانسیونی}) \quad (4)$$

در این رابطه چگالی هسته mPCM، همان چگالی ذره در نظر گرفته شد. بنابراین زمانی که ذرات جامد داریم

$$Cp0 = \frac{0.6 * 2.48 * 10^3 * 810 + 0.4 * 1044 * 3600}{868.42} = 3119 \frac{kJ}{kg.K} \quad (5)$$

و برای ذرات مایع، چگالی سیال بصورت زیر محاسبه خواهد شد:

در این پژوهش سامانه ای برای بازیابی گرمای اضافی از سلولهای خورشیدی به کمک مواد تغییر فاز، طراحی و شبیه سازی شده است. تقریباً اکثر مدل های بررسی شده در زمینه مواد تغییر فاز و دوغاب آنها بر پایه یکسان دانستن آنتالپی فاز مایع و جامد و هم چنین بر پایه گرمای ویژه صورت پذیرفته اند. مدل شبیه سازی شده در این تحقیق، بر مبنای مدل آنتالپی - تخلخل صورت پذیرفته و عملکرد سیال مورد ارزیابی قرار گرفته است. هم چنین در بیشتر مطالعات صورت گرفته، سعی در بکاربردن مواد تغییر فاز در ساختار گردآور خورشیدی بوده است و استفاده از میکروکپسول های مواد تغییر فاز کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این مواد به دلیل دارا بودن گرمای نهان بسیار زیاد در عملیات ذوب، میتوانند با دریافت مقدار زیادی گرما، دمای سلول خورشیدی را در دمای ذوب نگاه دارند و مانع از بالا رفتن دمای سلول خورشیدی شوند. این سامانه از یک سری کانالهای آلومینیومی که مواد تغییر فاز درون آن ریخته میشود، تشکیل شده است. بعلاوه در این سامانه لوله های گذر آب در داخل کانالها در نظر گرفته شده است که کار بازیابی گرما از PCM را انجام می دهد. ذخیره سازی گرمای نهان هنگامی رخ می دهد که ماده دچار تغییر فاز می شود. این نوع ذخیره سازی براساس جذب و آزاد سازی انرژی است. همچنین سعی می شود تا به کمک نرم افزار Comsol^۴، پدیده انتقال گرمای درون سیال حاوی مواد تغییر فاز که در یک صفحه خورشیدی جریان دارد، مورد بررسی قرار گرفته و عملکرد این گردآورها ارزیابی گردد. با استفاده از نتایج شبیه سازی های انجام گرفته بر روی این سامانه ها، به مدل سازی یک گردآور خورشیدی حاوی مواد تغییر فاز با کمک نرم افزار Comsol مبادرت شده است. شبیه سازی بر مبنای المان محدود این امکان را به نرم افزار Comsol می دهد تا بتواند پدیده های انتقال گرما و سیال را با دقت بالایی شبیه سازی نماید. همچنین وجود ماژول تغییر فاز قابلیت شبیه سازی PCM در محیط نرم افزار را فراهم می نماید. شبیه سازی به منظور حل معادله ی انتقال گرما و مومنتوم با نرم افزار Comsol انجام می گیرد. برای شبیه سازی سیستم ذخیره سازی انرژی از مدل هاتل-ویلییر^۵ استفاده شده است.

۲-۲- خواص سیال

مخلوط آب-گلائیکول (۴۰٪) که کاربرد گسترده ای در پنل های خورشیدی قدیمی و امروزی دارد، بعنوان سیال حامل انتخاب گردید. در جدول زیر خواص سیال قابل مشاهده است.

جدول ۱- خواص سیال مخلوط حامل مواد سوسپانسیونی

مشخصه	مقدار	واحد
چگالی آب	۱۰۰۰	کیلوگرم بر متر مکعب
چگالی گلیکول	۱۱۱۰	کیلوگرم بر متر مکعب
درصد جرمی گلائیکول	۴۰	%
چگالی مخلوط آب-	۱۰۴۴	کیلوگرم بر متر مکعب

⁴ COMSOL Multiphysics

⁵ Hottel-Willier

$$Cp00 = \frac{0.6 * 2.76 * 10^3 * 780 + 0.4 * 1044 * 3600}{844.5} \quad (۶)$$

$$= 3310 \frac{kJ}{kg.K}$$

۳-۲- رسانایی گرمایی سیال

رابطه زیر نحوه محاسبه رسانایی گرمایی سیال ورودی را نشان می‌دهد؛ در این رابطه مقدار $B=3$ ، $\omega=0/643$ ، $n=1/5$ و عدد پرنتل $0/006$ (طبق محاسبات) در نظر گرفته شدند [۱۰].

(رسانایی گرمایی سیال حامل) / (رسانایی گرمایی mPCS)

$$1+B*\varphi*Pe^n = \quad (۷)$$

در نتیجه داریم:

$$K = 0.369 * (1 + 3 * 0.643 * (0.006)^{1.5}) \frac{W}{m.K} \quad (۸)$$

$$= 0.3691 \frac{W}{m.K}$$

۴-۲- گرمای نهان ذوب سیال

در این پژوهش از مدل هاتل-ویلیبیر برای محاسبه گرمای نهان ذوب سیال ورودی حاوی مواد تغییر فاز استفاده شده است. طبق این مدل گرمای نهان سیال، ترکیبی از گرمای نهان ذوب ذرات و گرمای محسوس سیال حامل در محدوده دمایی تغییر فاز می باشد، عبارتی دیگر:

$$\text{گرمای نهان ذوب سیال} = \text{گرمای ویژه سیال حامل} * (\text{درصد وزنی mPCM} - 1) * (\text{محدوده دمایی}) + \text{گرمای نهان ذوب mPCM} * (\text{درصد وزنی mPCM}) \quad (۹)$$

بنابراین:

$$\text{latent heat} = 174 * 10^3 * 0.6 + 3600 * 2 * 0.4 = 1073 \frac{kJ}{kg} \quad (۱۰)$$

۳- فرضیات شبیه سازی گردآور خورشیدی با

استفاده از PCM

- ۱- طبق بررسی منابع مشابه [۱۰]، رسانایی گرمایی سیال در زمان عبور از گردآور خورشیدی ثابت در نظر گرفته می‌شود.
- ۲- گرمای ویژه سیال در فاز یک برابر با $Cp0$ در نظر گرفته شد.
- ۳- گرمای ویژه سیال در فاز ثانویه به شکل ذیل تابعی از دما خواهد بود.

$$Cp = Cp00 + a * T + b * T^2 + c * T^3 \quad (۱۱)$$

که ضرایب در جدول زیر بیان شده اند:

جدول ۳- ضرایب گرمای ویژه سیال

a	b	c
0.176(J/kg*K ²)	0.00165(J/kg*K ³)	0.00000111(J/kg*K ⁴)

بنابراین گرمای ویژه سیال بصورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$Cpa = Cp0(T < 325.15) + \left(\frac{H}{T_t}\right) (325.15 < T < 327.15) + Cp * (327.15 < T) \quad (۱۲)$$

در این رابطه T_t محدوده دمایی تغییر فاز می‌باشد.

۳- چگالی سیال طبق رابطه زیر در گردآور تابعی خطی از دما می‌باشد:

$$\rho = -11.96 * T + 4757.214 \quad (۱۳)$$

این تابع به کمک دو مقدار به دست آمده (ρ_s و ρ_l) در دماهای ۳۲۵/۱۵ و ۳۲۷/۱۵ کلوین، از رگراسیون خطی نتیجه شده است.

۴- معادلات حاکم

معادلات حاکم در حالت کلی به صورت زیر می باشند:

معادله زیر معادله بقای جرم است و برای تمام جریان‌ها، اعم از تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر معتبر است:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (۱۴)$$

در معادله فوق، ρ چگالی و V سرعت می باشد.

۴-۱- معادله مومنتوم

فرم کلی معادله بقای مومنتوم به صورت زیر است:

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \rho(V \cdot \nabla)V = -\nabla P + \mu_{eff} \nabla^2 V + \rho g \beta(T - T_{ref}) \quad (۱۵)$$

که در رابطه فوق P فشار، μ_{eff} لزجت موثر، β ضریب انبساط گرمایی، T دما، T_{ref} دمای نقطه مرجع و g شتاب گرانشی می باشند. آخرین جمله در معادله مومنتوم بیانگر نیروی شناوری می باشد. لزجت موثر، دربرگیرنده لزجت سیال در دو حالت جریان لایه ای (μ_l) و آشفته (μ_t) می‌باشد:

$$\mu_{eff} = \mu_l + \mu_t \quad (۱۶)$$

۴-۲- معادله انرژی

معادله انرژی بیانگر توزیع دما در یک محیط غیرهم‌دما می باشد. با فرض ناچیز بودن اثر دفور^۶ (نفوذ گرمایی ناشی از اختلاف غلظت) و هم چنین اسکالر بودن رسانایی گرمایی، معادله انرژی را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \rho(V \cdot \nabla)h + q = \lambda_{eff} \nabla^2 h \quad (۱۷)$$

که در آن $(h=CT)$ بیانگر آنتالپی و q نشان دهنده منبع گرمایی می باشد. λ_{eff} رسانایی گرمایی موثر بوده و به صورت زیر بیان می شود:

$$\lambda_{eff} = \lambda_l + \lambda_t \quad (۱۸)$$

که λ_l رسانایی گرمایی فیزیکی و λ_t رسانایی گرمایی آشفته می باشد.

$$\lambda_t = \frac{C_p \mu_t}{Pr_t} \quad (۱۹)$$

در رابطه فوق C_p گرمای ویژه و Pr_t نشان دهنده عدد پرانتل برای حالت آشفته است.

۴-۳- مدل آشفستگی

مدل آشفستگی K-ε یکی از مدل های آشفستگی متداول است. انتخاب این مدل بر پایه شبیه سازی های صورت گرفته در مطالعات

⁶ Dufour

به این روش، نیاز به تعیین مکان مرز متحرک در هر لحظه به عنوان بخشی از حل می‌باشد که این موضوع حل مسأله به کمک روش تفاضل محدود یا المان محدود را بسیار مشکل می‌کند. در روش انتالی به جای استفاده از دو معادله انرژی مجزا برای دو فاز جامد و مایع، از یک معادله انرژی واحد برای هر دو فاز استفاده می‌گردد و دیگر نیازی به تعیین مکان مرز متحرک نخواهد بود. و میان دو فاز ناحیه خمیر مانند (Mushy Zone) ایجاد شده که از ناپیوستگی سریع در معادلات ممانعت می‌نماید. بنابراین ضخامت و کمیت گسسته سازی این ناحیه تاثیر زیادی بر روی عملکرد مدل دارد. مدل آنتالی برای هر دو مساله دما ثابت و Mushy Zone قابل استفاده می‌باشد.

در این پژوهش با تلفیق دو روش شبکه ثابت و آنتالی که روش آنتالی-تخلخل نامیده می‌شود مساله تغییر فاز شبیه سازی شده است. این روش توانائی تشخیص محل انجماد(ذوب) در هر لحظه را دارد و یک روش ضمنی است و معادلات ناویر استوکس با استفاده از روش المان محدود در یک شبکه ثابت حل می‌شوند. در این روش، مرز مشترک بطور صریح دنبال نمی‌شود و با معرفی کمیتی به عنوان کسر مایع که نشان دهنده کسری از سطح سلول است که به صورت مایع می‌باشد حالت سیال (مایع یا جامد) در هر سلول مشخص میگردد. در این روش ناحیه‌ای به عنوان محیط خمیری معرفی می‌شود که کسر مایع بین ۰ و ۱ قرار می‌گیرد. ناحیه خمیری به عنوان یک محیط متخلخل کاذب مدل-سازی می‌شود بطوریکه در حین انجماد تخلخل از ۱ تا ۰ کاهش پیدا می‌کند. زمانی که سیال در یک سلول کاملا منجمد می‌شود، سرعتها به صفر می‌رسند. لذا معادلات حاکم به صورت زیر می‌باشد:

معادله مومنتوم:

معادله مومنتوم برای سیستم تغییر فاز به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \rho(V \cdot \nabla)h = -\nabla P + \mu \nabla^2 V + \rho g^r \beta(T - T_{ref}) + S_v \quad (27)$$

در این رابطه S_v اثر تخلخل بوده و در معادله مومنتوم در هر سه جهت موثر می‌باشد. در و به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$S_v = -A(\gamma)V \quad (28)$$

$$A = -C \frac{(1-\gamma)^2}{\gamma^3 + b} \quad (29)$$

از معادلات کوژنی-کارمن^{۱۲} برای جریان در محیط متخلخل نتیجه می‌شود و A تابع تخلخل نام دارد، ثابت C عدد بزرگی است که میتواند با ضریب نفوذ پذیری محیط متخلخل مقایسه شود. اگر $\gamma = 1$ باشد فاز مایع است و $A=0$ ، اگر $\gamma = 0$ باشد فاز جامد است و برای جلوگیری از اینکه A به سمت بینهایت برود مقدار ثابت b که عددی بسیار کوچک است تعریف می‌شود. برای تعیین مقادیر ثابت C و b پس از حل‌های متعدد، بهترین مقادیر برای آن انتخاب شده است ($C = 10^9, b = 3 \times 10^{-4}$).

معادله انرژی:

با حذف جمله اتلاف گرمای، معادله انرژی به صورت زیر بیان می‌شود:

پیشین و کارایی آن در پیش بینی آشفتگی در مبادله کن های لوله ای صورت پذیرفته است. مدل K-ε یک مدل دو معادله ای است، به عبارتی شامل دو معادله انتقالی اضافی برای محاسبه خواص آشفتگی جریان میباشد. از این معادلات میتوان برای محاسبه تاثیرات جابجایی و پخش در انرژی آشفتگی بهره برد. اولین متغیر انتقالی، انرژی آشفتگی جنبشی یا همان K است و دومین متغیر انتقالی در این مدل، اتلاف آشفتگی یا همان ε است. به عبارتی میتوان گفت که K، انرژی را در آشفتگی و ε مقیاس آشفتگی را معین می‌کند. در مدل های لزجت ادی K-ε، میدان آشفتگی بر حسب دو متغیر بیان می‌شود.

الف) انرژی جنبشی جریان آشفته K^v

$$K = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (20)$$

ب) نرخ اضمحلال لزجی انرژی جنبشی آشفته^۸

$$\varepsilon = \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \overline{u'_{i,j} u'_{i,j}} \quad (21)$$

لزجت آشفته μ_t را میتوان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$\mu_t = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (22)$$

که در آن C_{μ} یک ضریب تجربی است که مقدار آن را معمولا برابر ۰/۰۹ در نظر میگیرند. در مدل استاندارد $k - \varepsilon$ مقادیر k و ε توسط معادله های نیمه تجربی زیر بدست می‌آیند.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \varepsilon \quad (23)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P_k + C_{3\varepsilon} P_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (24)$$

که در آن $C_{1\varepsilon}$ ، $C_{2\varepsilon}$ و $C_{3\varepsilon}$ ضرایب تجربی بوده و σ_k و σ_{ε} به ترتیب اعداد پراوتل و اشمیت آشفته می‌باشند. عبارات $C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k$ و $C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$ در معادله فوق به ترتیب بیانگر فرآیند های تولید برشی ε^9 و فرآیند های اضمحلال لزجی ε می‌باشند. عبارت $C_{1\varepsilon} C_{3\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_b$ بیانگر اثرات شناوری می‌باشد. در معادله فوق عبارت P_k بیانگر میزان تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از اندرکنش بین جریان متوسط^{۱۰} و میدان جریان آشفته می‌باشد و از همین رو به آن اصطلاحا عبارت تولید برشی گفته می‌شود. عبارت P_b نیز بیانگر تولید انرژی جنبشی ناشی از شناوری می‌باشد. روابط صریح^{۱۱} برای P_k و P_b به صورت زیر هستند:

$$P_k = -\rho \overline{u'_i u'_i} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (25)$$

$$P_b = \overline{\rho' u'_i g_i} \quad (26)$$

در شرایط تغییر فاز ماده، معادله انرژی به طور جداگانه برای هر فاز نوشته می‌شود و سپس این دو معادله توسط معادله موازنه انرژی روی مرز متحرک به هم کوپل می‌شوند اما برای حل مسأله تغییر فاز

⁷ Turbulent Kinetic Energy

⁸ Viscous Dissipation Rate of Turbulent Kinetic Energy

⁹ Shear Generation Processes

¹⁰ Mean Flow

¹¹ Exact Realltions

¹² Kozeny-Carman equation

برای حل معادلات از یک تفکیک روش اجزا محدود به همراه روش بالادستی مرتبه دو برای معادلات مومنتوم و پارامترهای آشفستگی و مرتبه اول برای انرژی و کمیت های اسکالر استفاده می شود که شامل تبدیل المان های جداگانه با استفاده از یک شبکه محاسباتی، انتقالگیری معادلات در هر یک از المان ها برای ایجاد معادلات جبری با متغیرهای وابسته (مجهولات مانند سرعت، فشار، دما و اسکالرهایی مانند انرژی) و خطی سازی معادلات مستقل و حل این سیستم معادلات خطی برای دستیابی به متغیرهای وابسته می باشد. در روش اجزا محدود با گسسته سازی معادلات، مجموعه ای از معادلات خطی ایجاد می گردد. این مجموعه معادلات خطی را می توان به صورت زیر نوشت:

$$FP=S \quad (41)$$

برای حل معادلات از روش PARDISO^{۱۳} استفاده شده است. ماتریس F با استفاده از روش گراف به ماتریس های بالا و پایین مثلثی تجزیه می شود. برای شبیه سازی دینامیکی، از بازه های زمانی ۰/۰۰۵ ثانیه استفاده می شود. برای ارضای قیود همگرایی بیشینه مقدار تکرار در هر بازه زمانی ۷۰ تنظیم گردید.

۵- شبیه سازی

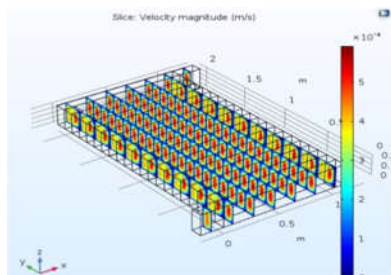
گردآور خورشیدی طراحی شده در این پژوهش گردآور صفحه تخت شامل ۲۱ سلول و دارای یک ورودی و یک خروجی است. در جدول زیر ابعاد این پنل مشاهده می شود.

جدول ۵- ابعاد پنل مورد مطالعه

بخش	ارتفاع(متر)	عرض(متر)	طول(متر)
مکعب مستطیل اصلی	۰/۲	۱/۱	۲/۱
مکعب مستطیل ورودی و خروجی	۰/۲	۰/۲	۰/۱
سلول ها	۰/۲	۱/۱	۰/۱

پروفایل سرعت درون گردآور خورشیدی

مسیر عبور سیال درون گردآور خورشیدی در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۱- پروفایل سرعت سیال درون گردآور در نمای ۳ بعدی

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla(\rho V H) = \nabla(\lambda_{eff} \nabla T) + S_H \quad (30)$$

H نشان دهنده آنتالپی می باشد. آنتالپی برای فرآیند تغییر فاز به شکل زیر تعریف می شود:

$$H = h + \Delta H \quad (31)$$

h آنتالپی گرمای محسوس و ΔH آنتالپی گرمای نهان می باشد.

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (32)$$

h_{ref} آنتالپی دمای مرجع می باشد. آنتالپی گرمای نهان از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$\Delta H = \gamma L \quad (33)$$

γ کسر حجمی مایع (تابع دما) در یک گره که برای تغییر فاز غیر

همدما به شکل زیر تعریف می شود:

$$\gamma = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ 1 & T > T_L \\ \frac{T - T_s}{T_L - T_s} & T_s < T < T_L \end{cases} \quad (34)$$

که در آن T_s کران پایین و T_L کران بالای دامنه دمایی تغییر فاز می باشد. همچنین کسر حجمی مایع برای تغییر فاز همدما به شکل زیر تعریف می شود:

$$\gamma = \begin{cases} 0 & T < T_f \\ 1 & T > T_f \end{cases} \quad (35)$$

که در آن T_f دمای انجماد می باشد. با ترکیب معادلات فوق خواهیم داشت:

$$S_h = \frac{\partial(\rho \Delta H)}{\partial t} + \nabla(\rho V H) \quad (36)$$

با تعریف یک تابع پیوسته برای کسر حجمی مایع می توان آنرا بطور مستقیم در معادله انرژی جایگذاری کرد که باعث سریعتر شدن و همگرایی پایدار حل می شود و اجازه می دهد معادله انرژی بدون بروزرسانی حل شود. بنابراین با استفاده از تابع خطا، رابطه زیر برای کسر حجمی مایع تعریف می گردد:

$$\gamma = 0.5 \operatorname{erf} \left[\frac{4(T - T_f)}{T_l - T_s} \right] + 0.5 \quad (37)$$

که در آن T_f دمای تغییر فاز بوده و برابر میانگین عددی T_s و T_l می باشد. این تابع پیوسته تقریبی از کسر حجمی انجماد غیر همدما را ارائه می دهد. برای جایگذاری تابع کسر مایع در معادله انرژی باید از این تابع نسبت به زمان مشتق گرفته و همچنین گرادیان تابع کسر مایع را محاسبه نمود:

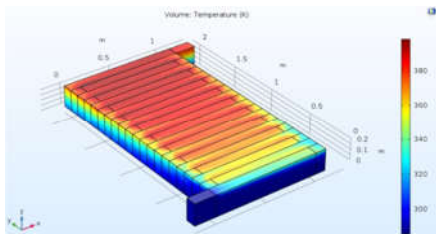
$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} = \frac{4 \exp \left[- \left(\frac{4(T - T_f)}{T_l - T_s} \right)^2 \right]}{(T_l - T_s) \sqrt{\pi}} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (38)$$

$$\nabla \gamma = \frac{4 \exp \left[- \left(\frac{4(T - T_f)}{T_l - T_s} \right)^2 \right]}{(T_l - T_s) \sqrt{\pi}} \nabla T \quad (39)$$

با جایگذاری در رابطه خواهیم داشت:

$$S_h = -\rho L \frac{4 \exp \left[- \left(\frac{4(T - T_f)}{T_l - T_s} \right)^2 \right]}{(T_l - T_s) \sqrt{\pi}} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V \cdot \nabla T \right) \quad (40)$$

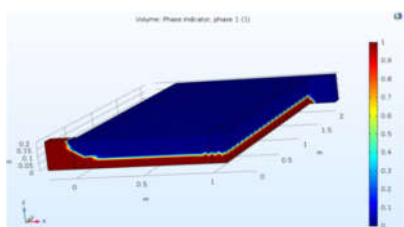
¹³ parallel sparse direct solver



شکل ۴- پروفایل دمایی سیال فاقد مواد تغییر فاز

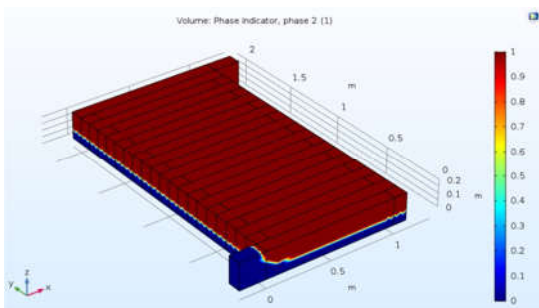
پروفایل تغییر فاز

در شکل زیر بخوبی می‌توان تغییر فاز ۱ ذرات در سیال را مشاهده نمود. با دقت در این شکل مشخص می‌گردد که هر چه از صفحه انرژی ورودی به سمت سطوح پایینتر می‌رویم، هدر رفت انرژی از طریق انتقال گرمای جا به جایی تاثیرگذارتر بوده و حتی در صفحه زیرین تغییر فاز صورت نگرفته است. نکته قابل توجه دیگر، تغییر فاز کامل مواد تغییر فاز در خروجی و یکنواختی سیال می‌باشد.



شکل ۵- پروفایل تغییر فاز اذرات در سیال

این پروفایل طول تغییر فاز کامل ذرات در گردآور خورشیدی را ۲۳/۱۴ متر نشان می‌دهد. شکل زیر نیز ذرات دارای فاز ثانویه را به نمایش می‌گذارد.



شکل ۶- فاز دوم در سیال

محاسبه راندمان

راندمان گردآور خورشیدی عبارت است از میزان گرمای خالص جذب شده توسط سیال به کل گرمای خالص ورودی به گردآور. برای محاسبه راندمان باید میزان گرمای جذب شده در سیال را طبق رابطه زیر بدست آورد.

$$Q = \dot{m}(C_{pout}T_{out} - C_{pin}T_{in}) \quad (42)$$

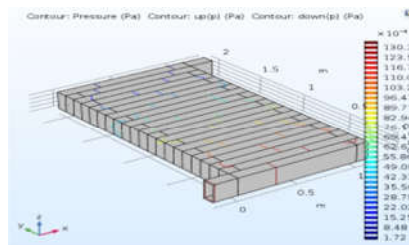
حال به محاسبه و تعیین پارامترهای رابطه فوق می‌پردازیم:

$$\dot{m} = 0.0003 \frac{m}{s} * (0.1m * 0.2m) * 868.42 \frac{kg}{m^3} = 0.0052 \frac{kg}{s} \quad (43)$$

نکته ای که از این اشکال استنباط می‌گردد، بیشینه بودن سرعت سیال در مرکز سلول‌های پنل و کمینه بودن آن در انتها می‌باشد که این مطلب گواه منطقی بودن شبیه‌سازی صورت گرفته در بخش دینامیکی است.

پروفایل فشار درون گردآور خورشیدی

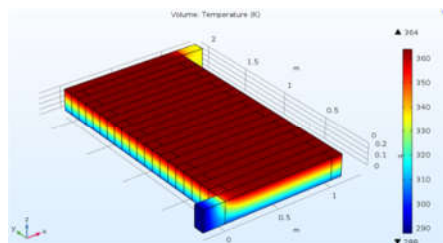
با توجه به این شکل مشخص می‌گردد که فشار سیال درون پنل بتدریج کاهش یافته و به فشار نسبی محیط در خروجی می‌رسد که این امر بدلیل عبور سیال از درون گردآور بدیهی می‌باشد.



شکل ۲- پروفایل ۳ بعدی فشار سیال درون گردآور

پروفایل دمای درون گردآور خورشیدی

توزیع دمای سیال در ۳ بعد دیده می‌شود. بخوبی افزایش دمای جسم از صفحه بالایی به سطوح زیرین قابل مشاهده بوده و تاثیر هدر رفت انرژی از طریق انتقال گرمای جابه‌جایی محسوس است. در خروجی که سیال تحت شرایط ایزوله گرمایی قرار دارد، توزیع دما در سیال یکنواخت می‌باشد. شکل زیر توزیع دمایی برش میانی گردآور را نشان می‌دهد.



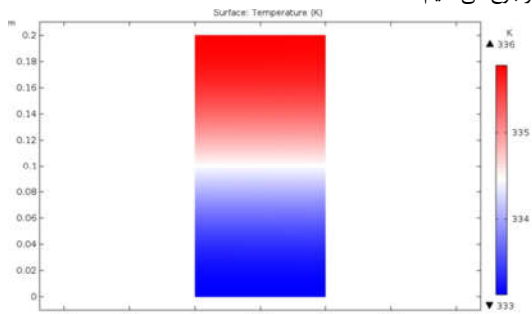
شکل ۳- توزیع دمای سیال در ۳ بعد

در شکل زیر تغییرات دما در سیال فاقد مواد تغییر فاز نشان داده شده است. با توجه به این شکل، تفاوت زیاد دو سیال در تغییرات دمایی مشخص می‌گردد. در گردآور دوم تغییرات دمایی نامنظم‌تر و غیر یکنواخت‌تر می‌باشد. این موضوع نشان دهنده پایینتر بودن چگالی ذخیره گرما در این سیال است.

دمای ورودی = ۲۸۸/۱۵ کلوین
 گرمای ویژه ورودی =

$$Cp_{in} = 3119 \frac{J}{kg.K} + 0.176 * (288.15) + 0.00165 * (288.15)^2 + 0.000003 * (288.15)^3 = 3378 \frac{J}{kg.K} \quad (44)$$

برای یافتن دمای خروجی سیال به پروفایل دو بعدی دمای خروجی رجوع می‌کنیم:



شکل ۷- پروفایل دمایی سیال در خروجی

با توجه به شکل، مشخص می‌شود که مقدار بیشینه و کمینه دما ۳ درجه با یکدیگر اختلاف دارند که این میزان بسیار کم بوده و اجازه میانگین گیری بین این دو دما را می‌دهد. از طرفی تقارن دمایی نیز در شکل محسوس است. بنابراین دمای خروجی ۳۳۴/۵ کلوین در نظر گرفته خواهد شد. حال باتوجه به این دما، گرمای ویژه در خروجی را محاسبه می‌نماییم:

$$Cp_{out} = 3310 \frac{J}{kg.K} + 0.176 * (334.5) + 0.00165 * (334.5)^2 + 0.000003 * (334.5)^3 = 3666 \frac{J}{kg.K} \quad (45)$$

در نتیجه داریم:

$$Q = 0.0052 * (3666 * 334.5 - 3378 * 288.15) = 1315 W \quad (46)$$

میزان گرمای ورودی خالص نیز از حاصل ضرب سطح در معرض تابش در شار گرمایی ورودی بدست می‌آید:

$$q = 800 \frac{W}{m^2} * (1.1m * 2.1m) = 1848 \quad (47)$$

بنابراین راندمان گردآور برابر خواهد بود با:

$$\eta = \frac{1315 W}{1848 W} = 71\% \quad (48)$$

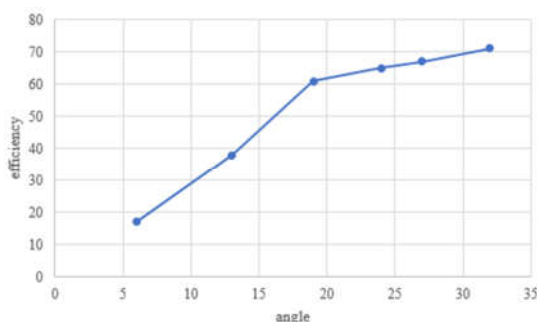
پس از مشخص شدن راندمان گردآور خورشیدی با مواد تغییر فاز، یک گردآور خورشیدی با شرایط کاملا مشابه شبیه‌سازی شد تا میزان افزایش راندمان سامانه‌های خورشیدی با مواد تغییر فاز بدست آید.

راندمان گردآور خورشیدی که سیال حاوی مواد تغییر فاز در آن جریان داشت، بیش از ۷۱٪ بدست آمد؛ این در حالی است که همین مشخصه در گردآوری با سیال فاقد مواد تغییر فاز (سیال ثانویه) ۶۳/۸٪ محاسبه شد. بنابراین با استفاده از مواد تغییر فاز می‌توان بیش از ۷٪ راندمان جذب انرژی گردآور خورشیدی را بهبود بخشید. این میزان از بهینه‌سازی در پژوهش مشابه [۱۰] با نرم افزار MATLAB ۳/۵٪ بدست آمده است. در پژوهش مذکور مدل‌سازی بر پایه گرمای ویژه صورت پذیرفته بود. مقایسه نتایج با مطالعه مذکور نشان دهنده

کارایی روش آنتالپی نسبت به روش گرمای ویژه می‌باشد. نکته مهم دیگر پایین تر بودن دمای خروجی از گردآور اولیه نسبت پنتل دوم است، که این امر عملکرد صحیح مواد تغییر فاز در کاهش قله دمایی را نشان می‌دهد.

تاثیر زاویه پنتل با افق بر راندمان گردآور خورشیدی

عرض جغرافیایی تعیین کننده‌ترین عامل زاویه بهینه گردآور با افق می‌باشد. در این پژوهش استان سمنان با عرض جغرافیایی ۳۲/۶ درجه انتخاب شد تا تاثیر تغییر زاویه پنتل خورشیدی صفحه تخت با سطح افقی بر عملکرد گردآور مشخص گردد. در پژوهش های بسیاری مشخص شده است که بیشترین تابش دریافتی گردآور زمانی محقق می‌شود که زاویه آن با سطح افقی برابر با زاویه عرض جغرافیایی باشد [۱۱]. در این پژوهش این زاویه ۳۲/۶ درجه است.

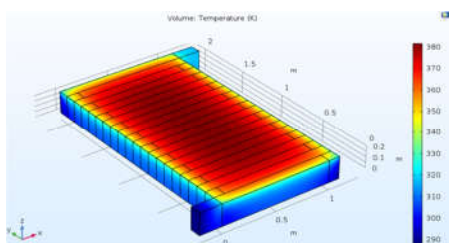


شکل ۸- تغییرات راندمان گردآور با تغییر زاویه گردآور با افق

در بازه ۸ درجه کمتر از زاویه عرض جغرافیایی (۲۴ درجه) راندمان کمتر از ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. با توجه به شرایط محیطی و برایندهای مهندسی، هرچه زاویه گردآور با افق کمتر باشد، نصب و نگهداری بهتر صورت می‌گیرد. بنابراین زاویه ۲۴ درجه می‌تواند گزینه مناسبی باشد که نسبتا راندمان مناسبی را در جذب انرژی توسط گردآور فراهم می‌آورد.

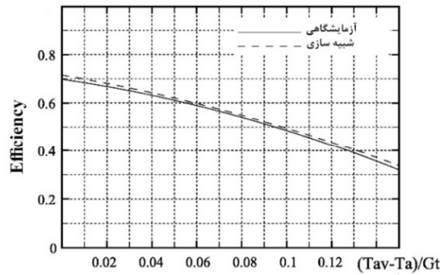
تاثیر سطوح عایقی

در تمام شبیه‌سازی های گذشته دیواره‌های جانبی را عایق فرض نمودیم. حال برای شبیه‌سازی فصل بهار، سطح زیرین گردآور را عایق نموده و سطوح جانبی دارای انتقال گرمای جابه‌جایی در نظر گرفته می‌شوند تا تاثیر عایق بندی سطوح در راندمان گردآور مشخص گردد.



شکل ۹- توزیع دمای سیال در گردآور با عایق بندی جدید

شبیه سازی توانسته است با دقت بالایی نتایج آزمایشگاهی را برازش نماید.



شکل ۱۲- ارزیابی مدل شبیه سازی شده

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش سعی شد تا یک گردآور خورشیدی با مواد تغییر فاز mPCM بکمک نرم افزار Comsol شبیه سازی گردد تا نحوه انتقال مومنتوم و گرما مورد بررسی قرار گیرد. پس از این گام، گردآوری با سیال فاقد مواد تغییر فاز و شرایط یکسان با گردآور اصلی، شبیه سازی شد و راندمان دو پنل مقایسه گشت. در نهایت عملکرد گردآور خورشیدی با مواد تغییر فاز در فصول مختلف ارزیابی شد. با بکارگیری مواد تغییر فاز در گردآور خورشیدی قله گرمایی کاهش و راندمان جذب گرما توسط گردآور به میزان ۷ درصد افزایش یافت. راندمان جذب گرما در فصول تابستان، بهار و پاییز یکسان و برابر ۷۱٪ بدست آمد. توزیع دما در گردآور حاوی مواد تغییر فاز به طور یکنواخت و منظم توزیع شد. عملکرد گردآور در ذخیره انرژی با عایق بندی دیواره های جانبی نسبت به دیواره های زیرین بهتر شد. در شبیه سازی ذره، رفتار گرمایی یک ذره معلق PCM مشخص گشت که زمان تغییر فاز کامل ذره نسبت به دمای سیال روندی نزولی داشته و هر چه ذره در نواحی بالایی گردآور قرار می گیرد، زمان تغییر فاز کاهش می یابد.

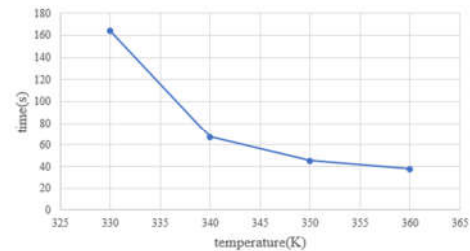
۷- نماد ها

گرمای ویژه	C_p
عدد پراکتل برای حالت آشفته	P_r
فشار	P
لزجت موثر	μ_{eff}
لزجت سیال در حالت جریان لایه ای	μ_l
لزجت سیال در حالت جریان آشفته	μ_t
ضریب انبساط گرمایی	β
دمای نقطه مرجع	T_{ref}
شتاب گرانشی	g
دما	T
دمای انجماد	T_f
بیانگر آنتالپی	h
آنتالپی دمای مرجع	h_{ref}
منبع گرمای	q
رسانایی گرمایی موثر	λ_{eff}

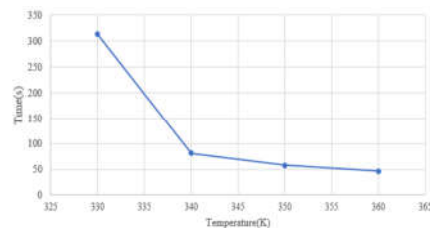
با دقت در شکل بخوبی می توان فهمید که دمای سیال در سطح بالایی گردآور افزایش چشمگیر ۱۸ درجه ای نسبت به گردآور با عایق بندی اولیه دارد، اما دمای متوسط خروجی سیال ۳۱۷ کلوین است که این مقدار کمتر از دمای متوسط خروجی گردآور اولیه می باشد. با عایق بندی جدید راندمان گردآور ۲۱ درصد کاهش یافت که بیانگر این است که عایق بندی سطوح جانبی نسبت به سطوح زیرین عملکرد بهتری را برای گردآور در ذخیره گرما رقم می زند.

شبیه سازی تغییرات دمایی و فازی ذره کروی PCM در گردآورهای خورشیدی حاوی مواد تغییر فاز

از مقایسه شکل های ۱۰ و ۱۱ مشخص می شود که در دماهای بالاتر سیال، تغییر فاز سریعتر رخ می دهد و فاز ذره به حالت پایا تبدیل می شود. اگر ذره در نواحی بالایی گردآور قرار گیرد، مدت زمان تغییر فاز کامل آن کاهش می یابد؛ این پدیده به سبب جذب گرما خورشید از سطح رویی گردآور می باشد. افزایش دما سبب می گردد گرادیان دمایی افزایش یافته و در نتیجه آن پدیده انتقال گرما تشدید گردد. افزایش انتقال گرما به سیال و از سیال به میکروکپسول ها نرخ تغییر فاز آنها را افزایش می دهد. این یافته با نتایج تحقیقات پیشین مطابقت دارد [۱۴-۱۲].



شکل ۱۰- روند نزولی کاهش مدت زمان انتقال فاز کامل در نواحی مختلف سیال



شکل ۱۱- روند نزولی کاهش مدت زمان انتقال فاز کامل در نواحی مختلف سیال

ارزیابی مدل شبیه سازی شده

برای بررسی صحت نتایج شبیه سازی، از داده های آزمایشگاهی شوینگر^{۱۴} [۱۵]، استفاده گردید. نتایج در شکل قابل مشاهده می باشد. همانطور که از نمودار پیداست برای گردآور بدون مواد تغییر فاز، مدل

¹⁴ Schweiger

- [15] Schweiger, H., Optimization of Solar Thermal Absorber Elements with Transparent Insulation. Ph.D. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 1997.

چگالی	ρ
سرعت	V
رسانایی گرمایی فیزیکی	λ_1
رسانایی گرمایی آشفته	λ_t
اثر تخلخل	S_v
کسر حجمی مایع	γ
انرژی جنبشی جریان آشفته	K

۸-مراجع

- [1] Corbin C. D., Zhiqiang John Z., Experimental and numerical investigation on thermal and electrical performance of a building integrated photovoltaic-thermal collector system, *Energy and Buildings*, Vol.42, No. 1, pp. 76-82, 2010.
- [2] Mishra R.K., Tiwari G.N., Energy and exergy analysis of hybrid photovoltaic thermal water collector for constant collection temperature mode, *Solar Energy*, vol. 90, pp. 58-67, 2013.
- [3] Buker M.S., Blaise M., Performance evaluation and techno-economic analysis of a novel building integrated PV/T roof collector: an experimental validation, *Energy and Buildings*, vol. 76, pp. 164-175, 2014.
- [4] Zhao X., Zhang X., B. Riffat S., Su Y., Theoretical study of the performance of a novel PV/e roof module for heat pump operation, *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, No. 1, pp. 603-614, 2015.
- [5] Salyer I.O., Sircar A. K., Phase change materials for heating and cooling Of residential buildings and other applications, *Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (IECEC'90)*, Reno, Nevada, 1990.
- [6] Rabl A., *Active solar collectors and their applications*. Oxford University Press, New York Oxford, 2016.
- [7] Hegazy A. A., Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors, *Energy Conversion and Management*, vol. 41, No. 8, pp. 861-881, 2000.
- [8] Agrawal S., Tiwari G.N., Overall energy, exergy and carbon credit analysis by different type of hybrid photovoltaic thermal air collectors, *Energy Conversion and Management*, Vol.65, pp.628-636, 2013.
- [9] Dubey S., Sandhu G.S., Tiwari G.N., Analytical expression for electrical efficiency of PV/T hybrid air collector, *Applied Energy*, vol. 86, No. 5, pp. 697-705., 2009.
- [10] Olivares A., Rekstad J., Meir M., Kahlen S., Wallner G., A test procedure for extruded polymeric solar thermal absorbers, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 92, No.4, pp. 445-452, 2008.
- [11] Agrawal B., Tiwari G.N., Life cycle cost assessment of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) systems, *Energy and Buildings*, Vol. 42, No. 9, pp. 1472-1481, 2010.
- [12] Ma F., Zhang P., Performance investigation of the direct absorption solar collector based on phase change slurry, *Applied Thermal Engineering*, Vol.162, 2019.
- [13] Allouhi A., Ait Msaad A., Benzakour Amine M., Saidur R., Optimization of melting and solidification processes of PCM: Application to integrated collector storage solar water heaters (ICSSWH), *Solar Energy*, Vol.171, pp. 562-570, 2018.
- [14] A. E Mohamed., H. M., Nabil., M. I., Mostafa, An experimental investigation of the phase change process effects on the system performance for the evacuated tube solar collectors integrated with PCMs, *Energy Conversion*