

تحلیل عملکرد مبادله‌کن گرمایی فوق گرمایش در سیستم ذخیره‌سازی انرژی گرمایی نیروگاه خورشیدی بخارمستقیم

محمدرضا کارگر

احسان بنی‌اسدی*

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

ماهیت تناوبی انرژی خورشیدی از مهمترین مشکلات این نوع انرژی به شمار می‌آید. در این راستا، یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی گرمایی کارآمد می‌تواند در افزایش بهره‌وری یک نیروگاه خورشیدی بسیار موثر باشد. در این مقاله، چندین چیدمان مختلف برای مبادله‌کن گرمایی فوق گرمایش بخار برای ذخیره‌سازی انرژی گرمایی بر اساس مواد تغییر فاز دهنده به صورت عددی شبیه‌سازی شده، سپس بر اساس قانون دوم ترمودینامیک مورد ارزیابی قرار گرفته است تا مناسب ترین چیدمان مشخص شود. همچنین عملکرد یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی بتنی با سیستم‌های دیگر مقایسه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد با افزایش تعداد ماژول‌های ماده تغییر فاز دهنده از یک تا سه عدد، میزان بازگشت ناپذیری کاهش می‌یابد و راندمان سیستم یک تا سه درصد افزایش می‌یابد. همچنین افزایش تعداد ماژول‌ها باعث کاهش گرادیان دمای خروجی می‌شود. نتایج بررسی تاثیر دبی و دمای ورودی بخار نشان می‌دهد با افزایش این دو پارامتر راندمان انرژی سیستم کاهش می‌یابد. با افزایش پنج برابری دبی ورودی و یا افزایش بیست درجه‌ای دمای بخار ورودی حین زمان شارژ سیستم ذخیره انرژی، راندمان سیستم تقریباً پنج درصد کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: مواد تغییر فاز دهنده، نیروگاه خورشیدی، ذخیره‌سازی انرژی گرمایی، انرژی.

Performance Analysis of Superheater Heat Exchanger of Thermal Energy Storage System in Direct Steam Solar Power Plant

M. R. Kargar

Department of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

E. Baniasadi

Department of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract

The unsteady nature of solar energy is one of its major drawbacks. In this regard, an efficient thermal energy storage system can enhance the performance of a solar power plant, effectively. In this paper, different configurations of a steam super-heater heat exchanger based on phase change materials for thermal energy storage are simulated numerically, and analyzed based on the second law of thermodynamics to identify the best configuration. Also, the performance of a concrete energy storage system is compared with other configurations. The results indicate that by increasing the storage modules of phase change materials from one to three, the thermodynamic irreversibility decreases and the system efficiency increases from one to three percent. The results indicate that increase of steam flow rate and inlet steam temperature leads to decrease of exergy efficiency. By increase of inlet steam flow rate by five times and increase of steam temperature by twenty degree in charging mode, the system efficiency decreases by almost five percent.

Keywords: Phase change material (PCM), Solar power plant, Thermal energy storage, Exergy.

۱- مقدمه

مستقیم، بدلیل بازدهی بالاتر و همچنین آرایش ساده‌تر نسبت به سایرین، مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند. در نتیجه، سیستم ذخیره‌سازی انرژی در آن نیز مستلزم توجه بیشتری می‌باشد. سیستم ذخیره‌سازی در این نوع نیروگاه بدیل تغییر فاز آب/بخار از پیچیدگی بیشتری نسبت به نیروگاه‌های سیال تک فاز برخوردار است. سیستم ذخیره‌سازی در این نیروگاه‌ها دارای سه مبادله‌کن گرمایی مجزا شامل مبادله‌کن پیش گرمایش جهت افزایش دمای آب ورودی در زمان دشارژ و رساندن آن به حالت آب اشباع، مبادله‌کن تبخیر/چگالش جهت چگالش بخار در زمان شارژ و تولید بخار در زمان دشارژ و مبادله‌کن فوق گرمایش جهت افزایش دمای بخار به حالت فوق اشباع می‌باشد [۳].

فلتیف و همکارانش [۴] طی یک پژوهش به مقایسه سه نظریه مختلف برای سیستم ذخیره‌سازی در نیروگاه تولید بخار مستقیم پرداخته‌اند. در نظریه اول، از دو سیستم بتنی برای قسمت‌های پیش

نیروگاه‌های خورشیدی را می‌توان بر اساس نوع سیال کاری به دو گروه کلی دسته بندی کرد. در گروه اول که از سیال تک فاز مانند روغن سنتتیک استفاده می‌شود و با افزایش دمای سیال کاری، تغییر فازی در آن رخ نمی‌دهد. گروه دیگر، نیروگاه‌های بخار مستقیم می‌باشند که در آنها از بخار آب به عنوان سیال کاری استفاده می‌شود و بخار مستقیماً در گردآورنده تولید می‌شود [۱]. رسیدن به دما و فشار بالا در خروجی سیستم ذخیره‌سازی طی فرآیند دشارژ، مستلزم تطابق نمودار آنتالپی-دمای سیال کاری و سیستم ذخیره‌سازی می‌باشد. در نتیجه مکانیزم ذخیره‌سازی در این دو گروه نیروگاه کاملاً متفاوت است [۲].

در نیروگاه با سیال کاری تک فاز، از مخازن حاوی نمک‌های مذاب استفاده می‌شود که انرژی گرمایی را بصورت محسوس ذخیره کرده و در مواقع نیاز تخلیه می‌کنند. نیروگاه‌های خورشیدی تولید بخار

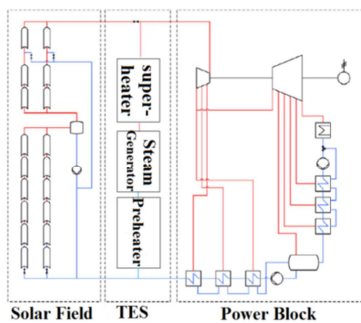
بررسی کارایی گرمایی کامپوزیت نیترا-گرافیت به عنوان PCM جهت ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی پرداخته‌اند. مطالعات آنها نشان می‌دهد که اضافه کردن ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی گرافیت به نیترا باعث افزایش به ترتیب ۲، ۴ و ۷ برابری در میزان رسانایی گرمایی PCM می‌شود.

آنچه در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته‌است شامل شبیه‌سازی عددی و تحلیل انرژی چند چیدمان مختلف برای مبادله‌کن گرمایی فوق گرمایش و مقایسه آنها با یکدیگر از لحاظ راندمان انرژی و دمای خروجی می‌باشد. به همین منظور با به کارگیری سیستم آشناری، یک ایده جدید برای ذخیره‌سازی انرژی در نیروگاه‌های خورشیدی مطرح شده است.

۲- تشریح مسئله

۱-۲ توصیف سیستم

چیدمان کلی نیروگاه خورشیدی و سیستم ذخیره انرژی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. مبادله‌کن گرمایی فوق گرمایش جهت کاهش دمای بخار ورودی و رساندن آن به دمای اشباع در حالت شارژ و همچنین افزایش دمای بخار اشباع ورودی در حالت دشارژ تعبیه می‌گردد. بخار تولیدی توسط نیروگاه‌های خورشیدی مختلف، دارای شرایط متفاوتی می‌باشند. از آنجا که در این پژوهش، از مواد تغییر فاز دهنده برای قسمت فوق گرمایش استفاده می‌شود، دمای ذوب آنها با توجه به دمای بخار ورودی تعیین می‌گردد. شرایط بخار ورودی مطابق با اطلاعات مرجع [۲] در نظر گرفته شده است. شرایط بخار ورودی به سیستم در حالت شارژ (ذوب ماده PCM و جذب انرژی در سیستم ذخیره‌سازی) و دشارژ (انجماد ماده PCM و تخلیه انرژی سیستم ذخیره‌سازی) در جدول ۱ آمده است. بخار ورودی بوسیله مبادله‌کن گرمایی فوق گرمایش تعبیه شده در مسیر به حالت اشباع می‌رسد. مبادله‌کن در نظر گرفته شده از نوع پوسته و لوله می‌باشد، به گونه‌ای که مواد تغییر فاز دهنده در پوسته قرار گرفته و سیال کاری از درون لوله‌ها عبور می‌کند.



شکل ۱- چیدمان کلی نیروگاه خورشیدی و سیستم ذخیره انرژی

جدول ۱- شرایط بخار ورودی در زمان‌های شارژ و دشارژ [۲]

چگالی (kg/m ³)	دما (°C)	فشار (bar)	
۴۰/۸۴	۴۰۰	۱۰۷	بخار فوق اشباع (شارژ)
۳۹/۴۷	۲۹۰	۷۵	بخار اشباع (دشارژ)

گرمایش و فوق گرمایش استفاده شده است که انرژی گرمایی را بصورت محسوس ذخیره می‌کنند. در نظریه دوم، از سه تانک حاوی نمک‌های مذاب برای پیش گرمایش و فوق گرمایش استفاده شده است. در نظریه سوم، مخزن حاوی مواد تغییر فاز دهنده تنها برای تبخیر/چگالش نیست، بلکه برای پیش گرمایش نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای فوق گرمایش نیز، از دو تانک نمک مذاب استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد حالت سوم مناسب‌ترین حالت از بین این سه حالت است.

مصطفی زمانی و همکارانش [۵]، به بررسی عملکرد چرخه روغن نیروگاه سهموی خورشیدی شیراز پرداخته‌اند. در این پژوهش، مدل‌سازی و مانیتورینگ چرخه روغن نیروگاه خورشیدی در محیط نرم افزاری MATLAB انجام گرفته و سپس با استفاده از داده‌های نیروگاه خورشیدی شیراز اعتبارسنجی شده است.

حسین نامی و همکارش [۶] در یک مقاله به تحلیل انرژی و انرژی چرخه ی اوکسی فیول S-GRAZ پرداخته‌اند و اطلاعاتی در مورد میزان اتلاف انرژی در قسمت‌های مختلف چرخه ارائه داده‌اند.

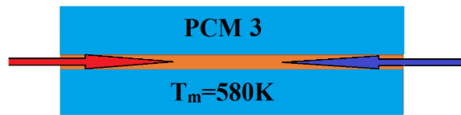
تلگا پیراساکی و همکارش [۷]، تاثیر طراحی در بازدهی سیستم ذخیره‌سازی به روش گرمای نهان در نیروگاه تولید بخار مستقیم را مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل طول و قطر لوله‌ها، فاصله بین آنها و دبی جریان را بررسی کرده‌اند.

یکی دیگر از طرح‌هایی که می‌توان برای مبادله‌کن گرمایی پیش گرمایش و فوق گرمایش پیشنهاد داد، بکارگیری چند PCM به صورت سری در کنار هم است که به آن اصطلاحاً آشناری می‌گویند. استفاده از چند PCM به صورت آشناری، جهت بهره‌وری بیشتر از PCM‌های موجود و دمای خروجی یکپوخت‌تر پیشنهاد می‌شود [۸].

مایکلز و همکارش [۹] طی یک مقایسه آزمایشگاهی بین دو سیستم آشناری و تک PCM به این نتیجه رسیدند که در سیستم آشناری، در پایان زمان شارژ، ۹۲٪ از PCM‌ها در مجموع ذوب شده و در پایان زمان دشارژ، ۶۷٪ آنها به طور کامل منجمد می‌شود. در حالی که در سیستم تک PCM، اگرچه در پایان زمان شارژ، ۱۰۰٪ از PCM ذوب می‌شود، ولی در پایان زمان دشارژ تنها ۲٪ از PCM به طور کامل منجمد می‌شود و ۹۸٪ انرژی تلف می‌شود. آلداس و همکارش [۱۰] نیز در مطالعه ای دیگر به مقایسه سیستم تک PCM و چند PCM پرداخته‌اند. در این مطالعه، یک سیستم تک PCM با دو سیستم دو و سه PCM از نظر کارایی، آهنگ انتقال گرما و ظرفیت ذخیره مورد بررسی قرار گرفته‌است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش تعداد مواد تغییر فاز دهنده، بازدهی سیستم افزایش می‌یابد که در تعداد PCM بیشتر از سه، این افزایش چندان قابل توجه نیست. همچنین فرید و همکارانش [۱۱-۱۲] با به کارگیری یک سیستم با سه نوع PCM و ارزیابی گرمایی آن با یک سیستم تک PCM، به افزایش ۱۰٪ آهنگ انتقال گرما حالت اول نسبت به دیگری در هر دو زمان شارژ و دشارژ پی‌بردند.

موران عزرا و همکارانش [۱۳] یک سیستم چند PCM آشناری را مورد آنالیز عددی قرار داده‌اند و پارامترهای مختلف را بررسی کرده‌اند. تاثیر تعداد لوله‌های مبادله‌کن، تعداد مواد تغییر فاز دهنده و دمای ذوب هرکدام و دبی سیال کاری مورد بررسی قرار گرفته و روابط بین آنها بدست آورده شده‌است.

شیائو و همکارانش [۱۴] در یک مطالعه آزمایشگاهی و عددی به

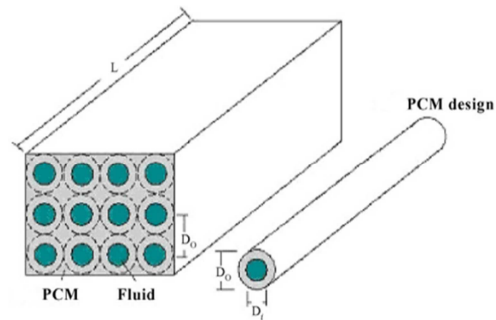


شکل ۵- چیدمان مبادله‌کن ۳ حاوی یک PCM

جدول ۲: خصوصیات مواد تغییر فاز دهنده مورد استفاده

نام PCM	T_m (°C)	Δh (kJ/kg)	k (W/K.m)	ρ (Kg/m ³)	C_p (J/K.mole)
PCM 1: NaCl-KCl (58:42)	۳۶۰	۱۱۹	۰/۴۸	۲۰۷۴	۳۶/۷۹
PCM 2: LiCl(41.5,0)-16.4LiVO3-7.0LiF-11.6Li2SO4-35.1Li2CrO4	۳۴۰	۱۷۷	۰/۵	۲۰۶۸	۴۰/۰۳
PCM 3: NaNO ₃	۳۰۷	۱۷۷	۰/۵	۲۲۵۷	۹۳/۰۵
PCM 4: h355	۳۵۳	۲۳۰	۰/۵۵	۲۰۶۰	۳۸/۲

با توجه به اینکه شرایط در تمام لوله‌ها یکسان بوده و PCM موجود در اطراف هر لوله رفتار مشابهی دارد، می‌توان برای کاهش زمان شبیه‌سازی و بالا بردن دقت آن، یک لوله را در نظر گرفت و نتایج را برای کل سیستم بسط داد. از این رو در این مقاله مطابق شکل ۲، تنها یک لوله از کل سیستم شبیه‌سازی شده است. ابعاد مبادله‌کن گرمایی مورد مطالعه در این مقاله در حالت‌های مختلف بدون تغییر باقی می‌ماند.



شکل ۲- مبادله‌کن گرمایی حاوی مواد تغییر فاز دهنده

۲-۲- معادلات حاکم، شرایط اولیه و شرایط مرزی

جهت سهولت در حل ریاضی مسئله تغییر فاز PCM، فرضیات زیر لحاظ شده‌اند:

- PCM همگن و ایزوتروپیک می‌باشد.
- خواص ترموفیزیکی PCM با دما ثابت است.
- جریان همرفت طبیعی در فاز مایع PCM ناچیز و قابل چشم پوشی است (نیروی گرانش در نظر گرفته نشده است).
- معیار شارژ و دشارژ در سیستم ذخیره انرژی با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده پارامتر کسر جرمی مایع است که به صورت نسبت جرم ماده ذوب شده به جرم کل ماده تغییر فاز دهنده تعریف می‌شود. با در نظر گرفتن فرضیات فوق، می‌توان معادلات حاکم را در مختصات استوانه‌ای نوشت. برای محاسبه‌ی حالت PCM (مایع، جامد) کسر جرمی مایع برابر است با:

$$x = \frac{m_l}{m_{tot}} = x(H - c_s T_m) / q \quad (1)$$

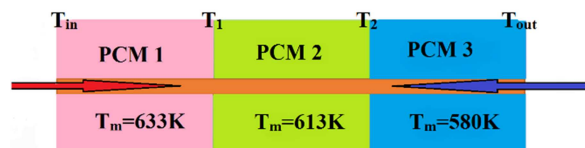
بنابراین:

$$\begin{cases} x \leq 0 & H \leq c_s T_m \\ 0 < x < 1 & c_s T_m < H < c_s T_m + q \\ x \geq 1 & H \geq c_s T_m + q \end{cases} \quad (2)$$

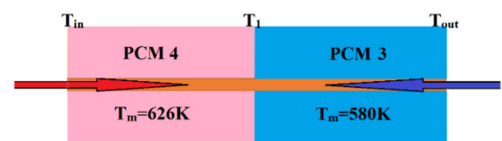
از آنجاکه جریان همرفت قابل چشم پوشی است، تنها معادلات انرژی در سیال کاری و PCM دارای اهمیت می‌باشند. با در نظر گرفتن A_{HTF} به عنوان سطح مقطع لوله، معادله‌ی بقای انرژی برای HTF از رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود:

در حالت اول، از سه PCM با ویژگی‌های ذکر شده در جدول ۲ استفاده شده است. این سه PCM از یکدیگر مجزا بوده و دیواره بین آنها نیز عایق است. مطابق شکل ۳، مواد تغییر فاز دهنده به ترتیب با توجه به دمای ذوبشان بصورت نزولی در کنار هم قرار گرفته‌اند، بطوریکه دمای سیال کاری را، در زمان‌های شارژ و دشارژ، در سه مقطع افزایش و کاهش می‌دهند. در زمان شارژ، بخار آب فوق اشباع با دمای 400 °C از سمت چپ (پیکان قرمز رنگ) و در زمان دشارژ، بخار اشباع با دمای 290 °C از سمت راست (پیکان آبی رنگ) وارد سیستم می‌شود و دما در مقطع خروجی و دو مقطع میانی محاسبه می‌گردد. منظور از مقطع میانی، مقطعی می‌باشد که در مبادله‌کن‌های آبشاری نوع PCM تغییر می‌کند و دما در آن مقطع جهت محاسبات انرژی مورد نیاز است.

مطابق شکل‌های ۴ و ۵، در چیدمان مبادله‌کن‌های نوع دوم و سوم به ترتیب از دو و یک ماده تغییر فاز دهنده با ویژگی‌های ذکر شده در جدول ۲ استفاده شده است، و در نهایت عملکرد این سه چیدمان با سیستم ذخیره‌سازی بتنی مقایسه می‌شوند.



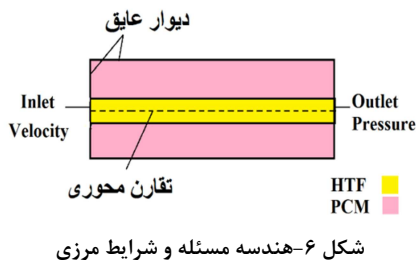
شکل ۳- چیدمان مبادله‌کن ۱ حاوی سه PCM



شکل ۴- چیدمان مبادله‌کن ۲ حاوی دو PCM

و متقارن محوری در GAMBIT طراحی و مش ریزی شده، سپس در نرم افزار FLUENT شبیه‌سازی شده است. در شبکه مورد نظر سلول‌ها مربعی شکل می‌باشند و مدل شامل ۱۳۶۰۰۰ سلول و ۱۴۴۰۰۰ گره است.

طول و قطر لوله‌ها در تمام چیدمان‌ها یکسان و به ترتیب برابر با 6 m و 2 cm می‌باشد. لوله‌ها در هر سه چیدمان با PCM به ضخامت 5 cm احاطه شده‌اند، ولی در سیستم بتنی بدلیل ظرفیت ذخیره کمتر این مقدار 7 cm در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۶، دیواره‌های خارجی عایق و دیواره لوله از جنس مس در نظر گرفته شده است. شرط مرزی ورودی به سیستم Inlet temperature و شرط مرزی خروجی سیستم Outlet pressure، می‌باشد. سرعت سیال ورودی در تمام حالات یکسان و برابر یک می‌باشد. هندسه سیستم نیز به صورت دوبعدی و تقارن محوری، مطابق شکل ۶ (نقط چین)، در نظر گرفته شده است.



شکل ۶- هندسه مسئله و شرایط مرزی

در سیستم‌های حاوی PCM، دمای اولیه به گونه‌ای انتخاب شده است که مواد تغییر فاز دهنده در آستانه‌ی ذوب شدن قرار دارند و از ذخیره انرژی بصورت محسوس صرف نظر شده است. برای این کار از UDF در شبیه‌سازی استفاده شده است.

روش حل در حالت شارژ، در تمام چیدمان‌ها SIMPLE، برای حل معادلات فشار Second order، برای حل معادلات مومنوم و انرژی First order upwind و در حالت دشارژ Coupled و سایر معادلات مانند زمان شارژ در نظر گرفته شده است. معیار همگرایی در این شبیه‌سازی، مقدار باقیمانده در حل معادلات انرژی، سرعت و پیوستگی می‌باشد که در مورد انرژی، این مقدار کوچکتر از 10^{-8} و در مورد سرعت و پیوستگی کوچکتر از 10^{-5} در نظر گرفته شده است. در الگوریتم حل ابتدا سیال با دما و سرعت مشخص وارد سیستم شده و دما در خروجی و مقاطع میانی سیستم اندازه‌گیری می‌شود، سپس با توجه به اینکه PCM در دمای ثابت تغییر فاز می‌دهد، اختلاف دمای ورودی و خروجی سیستم محاسبه شده و در معادلات انرژی مربوطه جایگذاری می‌شود و میزان برگشت ناپذیری محاسبه می‌گردد.

۴-۲- صحت سنجی روش حل عددی

صحت روش شبیه‌سازی عددی بر اساس نتایج یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی در مرجع [۱۵] مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعه آزمایشگاهی شامل یک واحد ذخیره‌سازی انرژی حاوی یک لوله، جهت عبور سیال کاری و PCM اطراف آن می‌باشد. PCM به کار رفته در این پژوهش، پارافین واکس با دمای ذوب ۶۱ درجه سلسیوس می‌باشد. سیال کاری با دبی جرمی 0.07 kg/min و دمای ورودی ۸۸ درجه سلسیوس در زمان شارژ و ۲۵ درجه سلسیوس در زمان دشارژ وارد

$$\rho_{hft} c_{hft} \frac{\partial T_{hft}}{\partial t} = - \frac{c_{hft} m_{hft}}{A_{hft}} \frac{\partial T_{hft}}{\partial x} + \quad (3)$$

$$\frac{h \pi D_i}{A_{hft}} (T_w - T_{hft})$$

با نادیده گرفتن مقاومت دیوار، معادله‌ی بقای انرژی مطابق رابطه‌ی (۴) نوشته می‌شود:

$$\rho_w c_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{h \pi D}{A_w} (T_{hft} - T_w) + \quad (4)$$

$$\frac{1}{s_w} \left(\frac{k_w A_w^1}{A_w} + \frac{k_{pcm} A_{pcm}^1}{A_w} \right) (T_{pcm} - T_w)$$

همچنین با نادیده گرفتن هدایت گرمایی PCM در راستای طول لوله، معادله بقای انرژی برای PCM مطابق رابطه زیر ارائه می‌گردد:

برای اولین سلول در مرز دیواره:

$$\rho_{pcm} \frac{\partial H_{pcm}}{\partial t} = \frac{1}{s_w} \left[\frac{k_w A_w^l}{A_w} + \frac{k_{pcm} A_{pcm}^l}{A_w} \right] (T_{pcm} - T_w) + \quad (5)$$

$$\frac{1}{s_w} \frac{k_{pcm}}{A_{pcm}} \left[\frac{H_{pcm}^{j+1}}{A_w} - \frac{H_{pcm}^j}{A_w} \right]$$

برای سایر سلول‌ها:

$$\rho_{pcm} \frac{\partial H_{pcm}}{\partial t} = \frac{k_{pcm}}{c_{pcm}} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial H_{pcm}}{\partial r} \right) \right] \quad (6)$$

شرایط اولیه و مرزی سیستم نیز مطابق جدول‌های ۳ و ۴ است:

جدول ۳- شرایط اولیه مسئله

مختصات شعاعی	مختصات محوری	شرایط اولیه
$0 < R < R_i$	$0 < X < L$	$T_{hft} = T_{in}$
$R_i < R < R_o$	$0 < X < L$	$T = T_{m,PCM}$

جدول ۴- شرایط مرزی مسئله

مختصات شعاعی	مختصات محوری	شرایط مرزی
$0 < R < R_i$	$X = 0$	$T_{hft} = T_{in}$
$\frac{\partial T_{PCM}}{\partial x} = 0$	$X = 0$	$R_i < R < R_o$
$\frac{\partial T_{PCM}}{\partial x} = 0$	$X = L$	$R_i < R < R_o$
$\frac{\partial T_{PCM}}{\partial x} = 0$	$0 < X < L$	$R = R_o$

۳-۲- شبیه‌سازی عددی

در این پژوهش، شبیه‌سازی‌های عددی به کمک نرم افزارهای GAMBIT و FLUENT انجام گرفته است. مدل‌ها به صورت دو بعدی

۳-۱- فرآیند شارژ سیستم

تحلیل انرژی فرآیند شارژ شامل محاسبه انرژی کلی داده شده به سیستم، انرژی ذخیره شده در سیستم و در نهایت راندمان انرژی در هر چیدمان می‌باشد. محتوای انرژی سیستم ذخیره‌سازی را می‌توان از رابطه (۸) محاسبه کرد:

$$Ex = m [(u - u_0) - T_0(s - s_0)] \quad (8)$$

انرژی کلی داده شده به سیستم برابر با تفاضل مقدار انرژی ورودی به سیستم و انرژی خروجی از آن بوسیله سیال کاری می‌باشد. با توجه به تغییر دمای خروجی با زمان، این مقدار از طریق رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$Ex_{char} = m C_p \int_0^t (T_{in} - T_{out}) - T_e \ln\left(\frac{T_{in}}{T_{out}}\right) dt \quad (9)$$

انرژی ذخیره شده در سیستم نیز از طریق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$Ex_{store} = Q_{store} \left[1 - \frac{T_e}{T_m}\right] \quad (9)$$

که در رابطه (۱۰)، Q_{store} ، مقدار انرژی نهان ذخیره‌شده در سیستم است و از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$Q_{store} = m_{PCM} \Delta h_{PCM} \quad (10)$$

با توجه به معادله (۹) و (۱۰)، بازدهی انرژی سیستم در زمان شارژ مطابق به صورت معادله (۱۲) تعریف می‌شود:

$$\psi_{char} = \frac{Ex_{store}}{Ex_{char}} \quad (11)$$

۳-۲- فرآیند دشارژ سیستم

تحلیل انرژی فرآیند دشارژ شامل محاسبه انرژی منتقل شده به سیال کاری، انرژی تخلیه شده از سیستم و در نهایت راندمان انرژی سیستم در زمان دشارژ می‌باشد. مشابه با فرآیند شارژ، انرژی منتقل شده به سیال کاری و انرژی تخلیه شده از سیستم از روابط (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌شوند:

$$Ex_{dis} = m C_p \int_0^t (T_{out} - T_{in}) - T_e \ln\left(\frac{T_{out}}{T_{in}}\right) dt \quad (12)$$

$$Ex_{store} = Q_{dis} \left[1 - \frac{T_e}{T_m}\right] \quad (13)$$

بازدهی انرژی سیستم در زمان دشارژ نیز، با توجه به معادلات (۱۲) و (۱۳)، از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود:

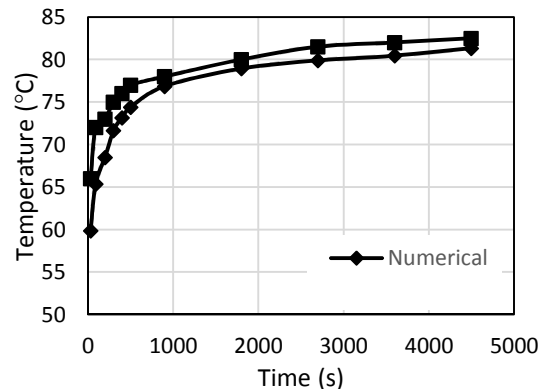
$$\psi_{dis} = \frac{Ex_{dis}}{Ex_{store}} \quad (14)$$

۳-۳- چرخه کامل شارژ و دشارژ سیستم

در نهایت، بازدهی انرژی سیستم در یک چرخه کامل شارژ و دشارژ از رابطه (۱۵) محاسبه می‌گردد:

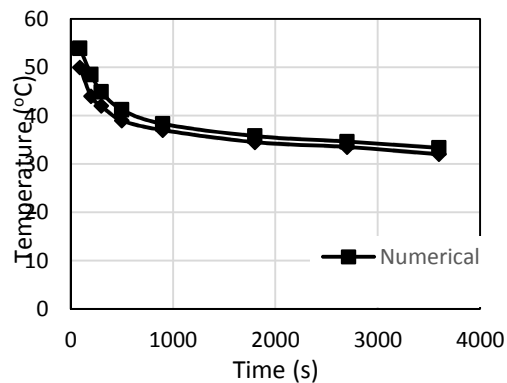
$$\psi_{over} = \psi_{char} \times \psi_{dis} \quad (15)$$

سیستم شده، سپس دمای خروجی در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شده است.



شکل ۷- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و حل عددی طی زمان شارژ

جهت انجام صحت سنجی، شبیه‌سازی عددی مطابق با مشخصات مطالعه‌ی آزمایشگاهی و فرض دو بعدی مسئله انجام گرفته است و نتایج آن با نتایج مرجع مقایسه شده است. مطابق شکل‌های ۷ و ۸ مدل شبیه‌سازی شده، اختلافی بین ۱/۹ تا ۶/۱ درصد در زمان شارژ و ۴/۱ تا ۷/۹ درصد در زمان دشارژ با مدل آزمایشگاهی دارد و نتایج نشان می‌دهند روش عددی از اعتبار مناسب برخوردار است.



شکل ۸- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و حل عددی طی زمان دشارژ

۳- تحلیل انرژی و انرژی

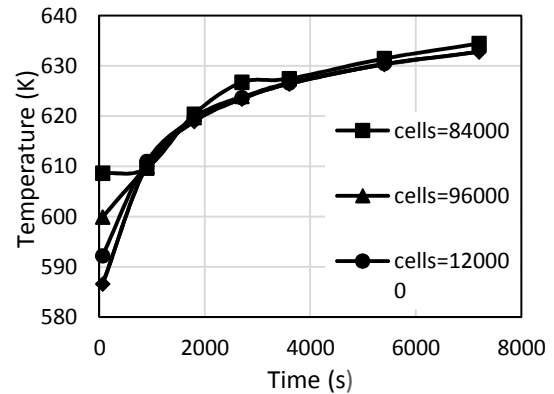
تحلیل انرژی سیستم ذخیره‌سازی انرژی، شامل مقدار انرژی داده شده به سیستم از طریق سیال کاری و مقدار انرژی نهان ذخیره شده در سیستم می‌باشد، که با توجه به نادیده گرفتن اتلافات گرمایی مبادله‌کن این دو مقدار برابر بوده و از رابطه (۷) محاسبه می‌گردد.

$$Q_{char} = mc(T_{in} - T_{out}) \quad (7)$$

تحلیل انرژی مبادله‌کن گرمایی فوق گرمایش شامل فرآیند شارژ، دشارژ و یک چرخه ی کامل ذخیره‌سازی می‌باشد. برای هر یک از چیدمان‌های ذکر شده، راندمان انرژی در هر مرحله محاسبه شده و با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

۴- بررسی استقلال شبکه

جهت حصول اطمینان از استقلال شبکه مورد استفاده در شبیه‌سازی، تاثیر تعداد سلول ها در نتایج حاصل مورد بررسی قرار می‌گیرد. از این رو، ابتدا از ۴ مدل با تعداد سلول مختلف استفاده شده تا در نهایت شبکه مناسب انتخاب شده است. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، با افزایش تعداد سلول‌ها از ۸۴۰۰۰ تا ۱۳۶۰۰۰، تغییرات دمای خروجی مبادله‌کن گرمایی به تدریج کاهش یافته و در نهایت با افزایش تعداد سلول‌ها از ۱۳۶۰۰۰ به ۱۸۰۰۰۰، دمای خروجی تغییر نمی‌کند و استقلال شبکه محرز می‌شود.



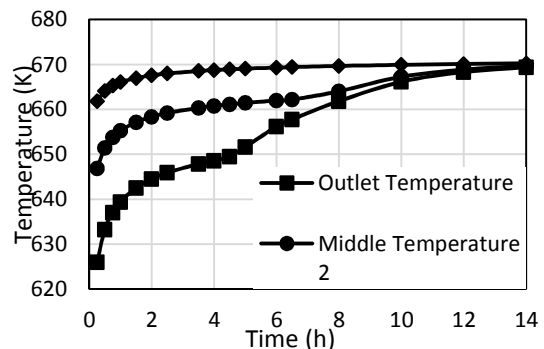
شکل ۹- تغییرات دمای خروجی با تغییر اندازه شبکه

۵- نتایج

نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرآیند انتقال حرارت در مبادله‌کن‌های مورد نظر در این بخش ارائه شده است. زمان فرآیند شبیه‌سازی با توجه به زمان شارژ یا دشارژ هر مبادله‌کن متفاوت است. لذا نتایج در گستره زمانی متفاوت ارائه شده است.

۵-۱- زمان شارژ سیستم

دمای بخار در دو مقطع میانی و مقطع خروجی در مبادله‌کن ۱ در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

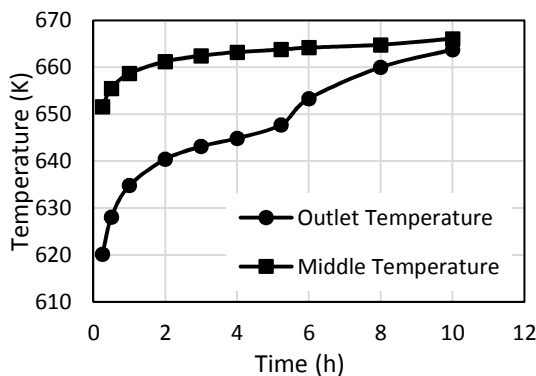


شکل ۱۰- تغییرات دمای بخار در سه مقطع مبادله‌کن ۱

مطابق شکل ۱۰، در ابتدای فرآیند شارژ، مواد تغییر فاز دهنده موجود در مبادله‌کن، در فاز جامد می‌باشند و اختلاف دمای سیال کاری ورودی به سیستم و مبادله‌کن زیاد است، به همین دلیل آهنگ ذخیره‌سازی انرژی بالا بوده و کاهش دما در طول مبادله‌کن با گرادبان

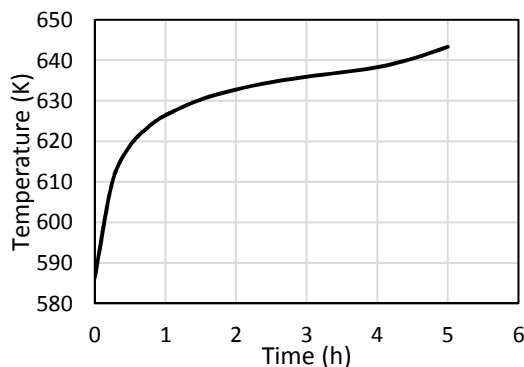
زیادی همراه است. در نتیجه اختلاف دمای سه مقطع زیاد است. به مرور زمان، با ذوب شدن PCM موجود و افزایش دمای میانگین مبادله‌کن، آهنگ ذخیره‌سازی انرژی کاهش می‌یابد و دمای سیال کاری در طول مبادله‌کن، یکنواخت می‌شود. مدت زمان لازم برای ذوب کامل مواد تغییر فاز دهنده در این حالت ۵ ساعت می‌باشد. انرژی ذخیره شده در آن 1.28×10^4 kJ و سیستم به 1.18×10^4 kJ است. در نتیجه، راندمان انرژی در زمان شارژ برای حالت فوق 92.35% می‌باشد که مقداری مطلوب است. علاوه بر راندمان انرژی بالا، میانگین دما در خروجی سیستم 643.36 K می‌باشد که با توجه به دمای مورد نیاز برای ادامه فرآیند، به اندازه کافی کاهش یافته است.

تغییرات دمای بخار در مقطع میانی و خروجی مبادله‌کن ۲ نیز در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. روند تغییرات نمودار در شکل ۱۱ نیز مطابق حالت قبل (شکل ۱۰) قابل توجه است، با این تفاوت که در این مبادله‌کن دو PCM به کار برده شده است. مدت زمان لازم برای ذوب کامل مواد تغییر فاز دهنده در این حالت ۱۰ ساعت، انرژی ذخیره شده در آن 2.03×10^4 kJ و سیستم به 2.22×10^4 kJ و انرژی ذخیره شده در آن 91.6% است. میانگین دمای خروجی در این حالت 647.3 K می‌باشد که نسبت به حالت قبل کمی بالاتر است.

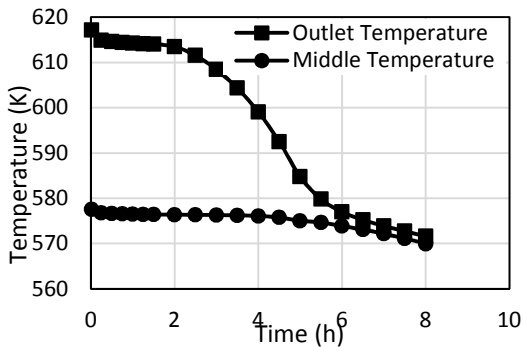


شکل ۱۱- تغییرات دمای بخار در دو مقطع مبادله‌کن ۲

در حالت سوم، مبادله‌کن گرمایی تنها حاوی یک PCM می‌باشد که تغییرات دمای بخار خروجی آن در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲- تغییرات دمای بخار خروجی مبادله‌کن ۳



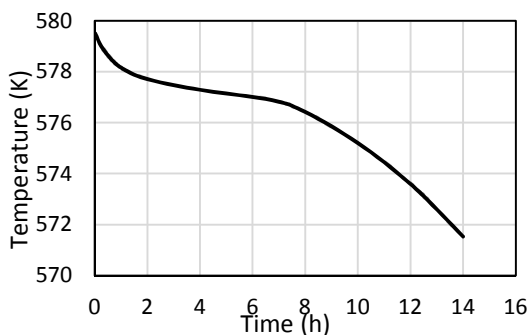
شکل ۱۴- تغییرات دمای بخار در دو مقطع مبادله‌کن ۲

در مبادله‌کن دوم، فرآیند دشارژ طی ۸ ساعت انجام می‌شود که طی آن راندمان اگزرژی سیستم ۹۳.۸۴٪ و میانگین دمای خروجی بخار برابر با ۵۹۵.۵ K است. تغییرات دما در مقطع خروجی و مقاطع میانی این مبادله‌کن، در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

در مبادله‌کن سوم، فرآیند دشارژ ۱۴ ساعت زمان می‌برد که طی آن راندمان اگزرژی سیستم ۹۸.۰۸٪ و میانگین دمای خروجی بخار برابر با ۵۷۶.۱۴ K است. تغییرات دما در مقطع خروجی این مبادله‌کن گرمایی، در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

برای مبادله‌کن چهارم که سیستم بتنی می‌باشد، فرآیند دشارژ ۴ ساعت زمان می‌برد که طی آن راندمان اگزرژی سیستم ۹۱.۱۷٪ و میانگین دمای خروجی بخار برابر با ۵۶۵.۳۷ K است.

با مقایسه سه سیستم حاوی PCM، مشاهده می‌شود که بالاترین راندمان مربوط به حالت سوم می‌باشد. این راندمان اگزرژی بالا بدلیل نزدیک بودن دمای ماده ذخیره ساز و سیال کاری به دست می‌آید که البته منطقی است. اما با توجه به دمای میانگین کم خروجی، نمی‌تواند کاربردی باشد. در مورد سیستم بتنی نیز راندمان و میانگین دمای خروجی نشان از ناکارآمدی آن در مقایسه با سایر مبادله‌کن‌ها دارد.



شکل ۱۵- تغییرات دمای بخار خروجی مبادله‌کن ۳

۵-۳- چرخه کامل

راندمان اگزرژی در یک چرخه کامل، برای مبادله‌کن اول ۸۸/۰۸٪، برای مبادله‌کن دوم ۸۵/۹۶٪، برای مبادله‌کن سوم ۸۸/۸۷٪ و برای مبادله‌کن چهارم نیز ۸۶/۴۱٪ می‌باشد.

مطابق شکل ۱۲، دمای بخار ورودی به سیستم به مرور زمان و با ذوب PCM موجود، افزایش می‌یابد. مدت زمان لازم برای ذوب کامل مواد تغییر فاز دهنده در این حالت ۱۰ ساعت، اگزرژی داده شده به سیستم 1.75×10^4 kJ و اگزرژی ذخیره شده در آن 1.57×10^4 kJ می‌باشد. در نتیجه راندمان اگزرژی برابر با ۸۹.۵۹٪ است. میانگین دمای خروجی در این حالت ۶۳۱.۲۸ K می‌باشد.

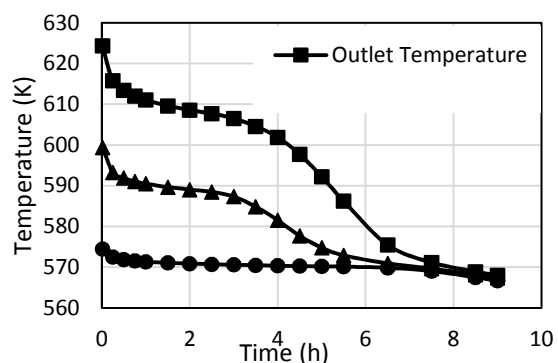
در حالت نهایی، ذخیره‌سازی در سیستم بتنی شبیه‌سازی شده است. در این حالت که مکانیزم ذخیره‌سازی انرژی بصورت محسوس انجام می‌گیرد، مدت ذخیره‌سازی ۱۰ ساعت، اگزرژی داده شده به سیستم 9.25×10^3 kJ و اگزرژی ذخیره شده در آن 8.64×10^3 kJ می‌باشد. راندمان اگزرژی در این حالت ۹۴.۷۸٪ و میانگین دمای خروجی ۶۵۳.۲۴ K است.

مطابق انتظار، با افزایش تعداد مواد تغییر فاز دهنده، دمای میانگین سیال کاری به دمای سیستم ذخیره‌سازی نزدیک شده و از بازگشت‌ناپذیری فرآیند ذخیره‌سازی کاسته می‌شود. در نتیجه راندمان اگزرژی افزایش می‌یابد. در مورد مبادله‌کن ۴، اگرچه این سیستم دارای راندمان اگزرژی بالاتری نسبت به سایرین می‌باشد، اما میانگین دمای خروجی بالای آن نسبت سیستم حاوی PCM، کارایی کلی سیستم را کاهش می‌دهد.

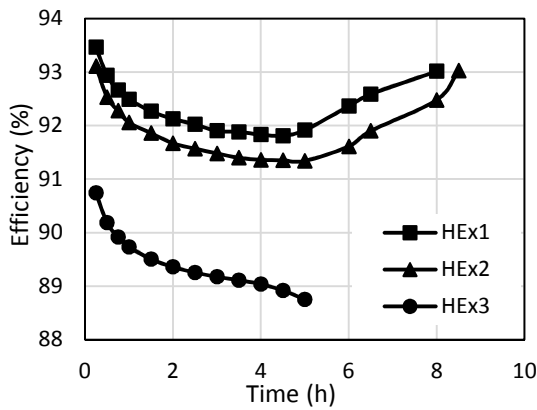
۵-۲- زمان دشارژ سیستم

در زمان دشارژ، بخار اشباع وارد سیستم شده و همزمان با تخلیه انرژی شارژ شده، به حالت فوق اشباع می‌رسد. در مبادله‌کن اول، فرآیند دشارژ ۹ ساعت طول می‌کشد که طی آن راندمان اگزرژی سیستم ۹۵.۳۸٪ و میانگین دمای خروجی بخار برابر با ۵۹۱.۲۵ K است. تغییرات دما در مقطع خروجی و مقاطع میانی، در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

مطابق شکل ۱۳، در ابتدای فرآیند دشارژ مواد تغییر فاز دهنده در فاز مایع است و اختلاف زیاد بین دمای سیال کاری و دمای مبادله‌کن، همانند فرآیند شارژ، باعث گرادیان شدید دمایی در طول مبادله‌کن می‌شود، که این گرادیان دمایی به مرور زمان و با انجماد دوباره‌ی مواد تغییر فاز دهنده موجود در مبادله‌کن کاهش یافته و دما در طول مبادله‌کن یکنواخت می‌شود.

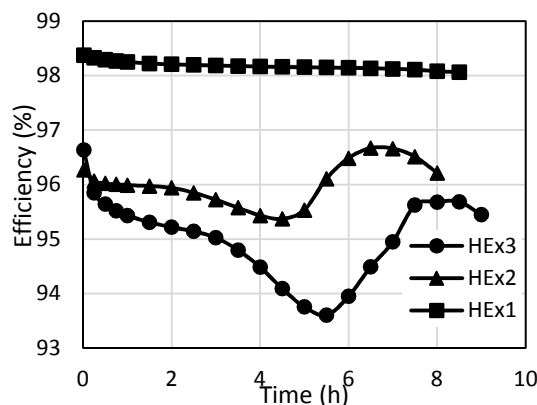


شکل ۱۳- تغییرات دمای بخار در سه مقطع مبادله‌کن ۱



شکل ۱۸- مقایسه راندمان مبادله‌کن‌ها طی زمان شارژ

مطابق شکل ۱۸، در مبادله‌کن‌های یک و دو به این دلیل که از چند PCM جهت ذخیره‌سازی انرژی بهره گرفته شده است و مطابق با توضیحاتی که در شکل ۱۶ داده شد، تغییرات راندمان بر حسب زمان روندی نزولی- صعودی دارد. لیکن در مبادله‌کن سه تنها از یک PCM استفاده شده است و با ذوب کامل آن فرآیند شارژ پایان می‌یابد. لذا، نمودار راندمان در این مبادله‌کن کاملاً نزولی بوده و زمان فرآیند شارژ نیز کوتاه تر است.



شکل ۱۹- مقایسه راندمان اگزرژی مبادله‌کن‌ها طی زمان دشارژ

در فرآیند دشارژ نیز مطابق شکل ۱۹، روند تغییرات راندمان مبادله‌کن‌ها نسبت به زمان مشابه به فرآیند شارژ است، با این تفاوت که در زمان دشارژ به دلیل اختلاف کم دمای سیال و سیستم در مبادله‌کن سه راندمان این مبادله‌کن بالاتر از سایرین می‌باشد.

مطابق شکل ۲۰، دبی سیال کاری سیستم بر راندمان اگزرژی اثر معکوس دارد. با افزایش پنج برابری دبی ورودی به مبادله‌کن ۱ طی فرآیند شارژ، راندمان سیستم از ۹۵/۳۷٪ به ۹۰/۷۹٪ و با افزایش ده برابری دبی، راندمان سیستم به ۹۰/۵۶٪ کاهش می‌یابد.

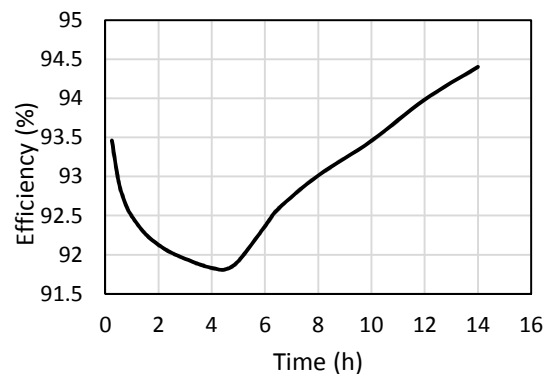
جدول ۵- جمع بندی نتایج

Ψ_{cycle} (%)	Ψ_{dis} (%)	Ψ_{chr} (%)	$EX_{dis} \times 10^{-4}$ (kJ)	$EX_{chr} \times 10^{-4}$ (kJ)	
۸۸/۰۸	۹۲/۳۵	۹۵/۳۸	۳/۲۵۶	۱/۱۸۲	مبادله‌کن ۱
۸۵/۹۶	۹۱/۶	۹۳/۸۴	۳/۳۲۳	۲/۰۳۴	مبادله‌کن ۲
۸۷/۸۸	۸۹/۵۹	۹۸/۰۸	۲/۱۷۹	۱/۵۳۷	مبادله‌کن ۳
۸۶/۴۱	۹۴/۷۸	۹۱/۱۷	۱/۲۲۹	۰/۸۷۶	مبادله‌کن ۴

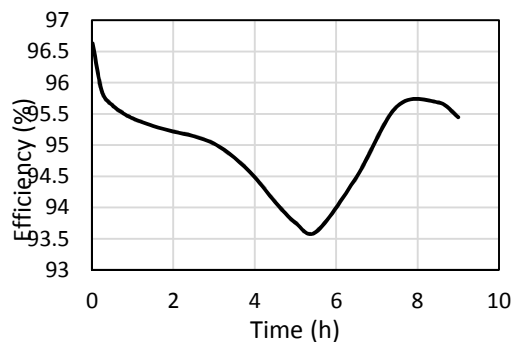
۴-۵- بررسی تغییرات راندمان بر حسب زمان و تاثیر دبی و دمای ورودی

تغییرات راندمان اگزرژی مبادله‌کن ۱ طی فرآیند شارژ، در شکل ۱۵ نشان داده شده است. راندمان سیستم در ابتدا روندی نزولی دارد که علت آن نرخ بیشتر اگزرژی ورودی به سیستم نسبت به اگزرژی ذخیره شده در آن است. اما پس از ذوب شدن کامل یکی از قسمت‌ها، نرخ اگزرژی ورودی به سیستم کمتر شده و راندمان سیستم روندی صعودی می‌یابد.

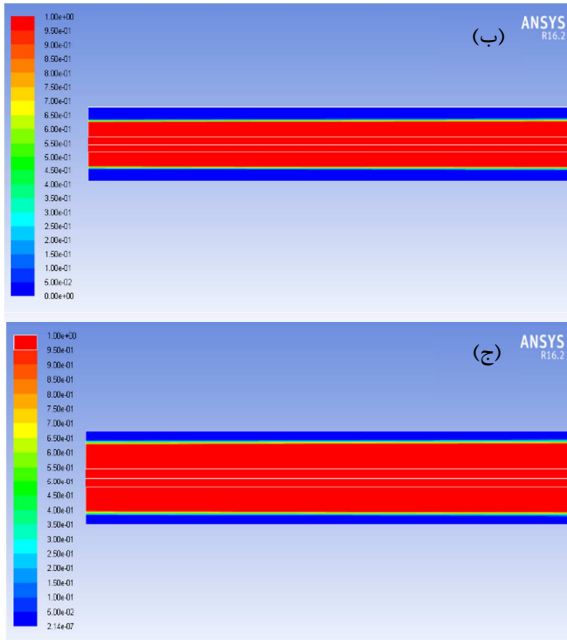
در زمان دشارژ نیز این تغییرات تقریباً روندی مشابه به زمان شارژ دارد که در شکل ۱۷ نشان داده شده است.



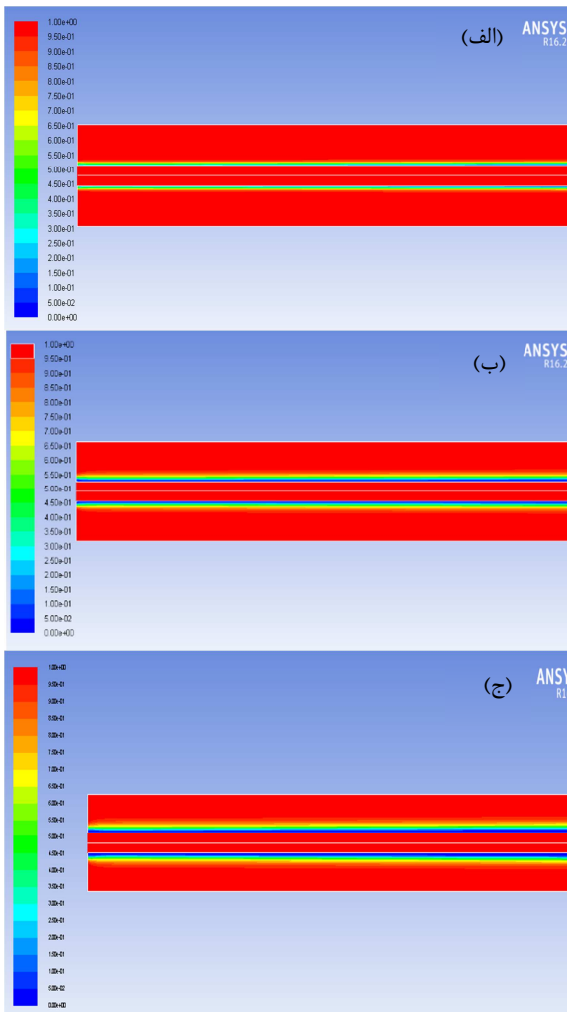
شکل ۱۶- تغییرات راندمان بر حسب زمان طی زمان شارژ



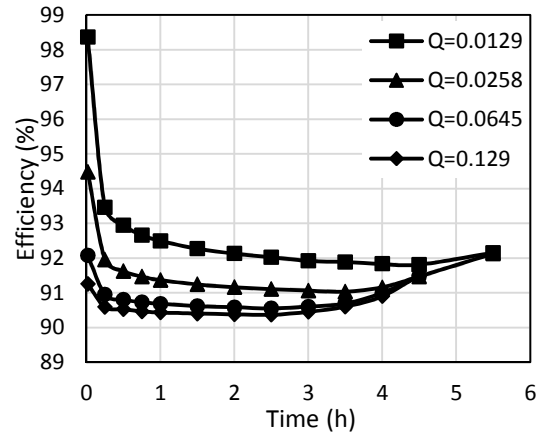
شکل ۱۷- تغییرات راندمان بر حسب زمان در زمان دشارژ



شکل ۲۲- کانتور کسر جرمی مذاب طی فرآیند شارژ در زمان های (الف) یک ساعت، (ب) دو ساعت، (ج) سه ساعت

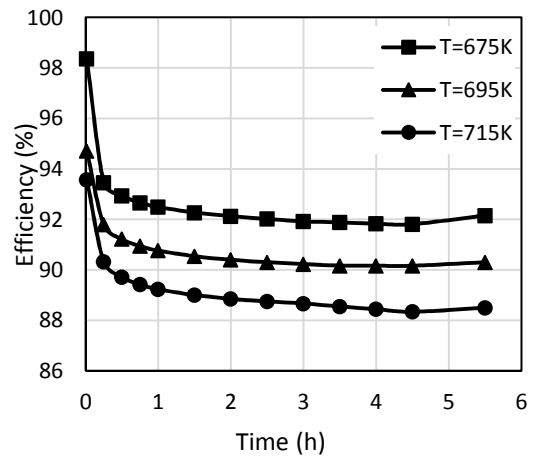


شکل ۲۳- کانتور کسر جرمی مذاب طی فرآیند دشارژ در زمان های (الف) یک ساعت، (ب) دو ساعت، (ج) سه ساعت



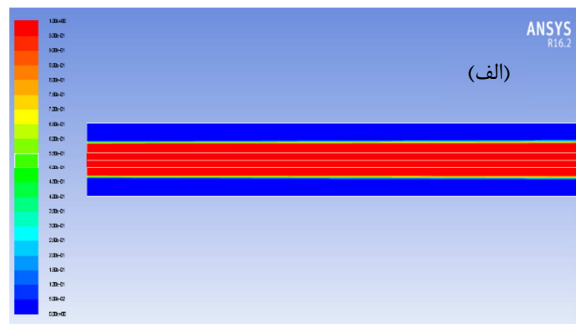
شکل ۲۰- تاثیر دبی بخار بر راندمان اگزرژی

همچنین با افزایش دمای ورودی به سیستم طی زمان شارژ، میزان بازگشت ناپذیری افزایش یافته و راندمان کاهش می‌یابد. مطابق شکل ۲۱، با افزایش ۲۰ درجه دمای ورودی به مبادله‌کن ۱ طی زمان شارژ، راندمان سیستم به ۹۰/۷۳٪ و با افزایش ۴۰ درجه‌ای دمای ورودی، راندمان سیستم به ۸۹/۱۸٪ کاهش می‌یابد.



شکل ۲۱- مقایسه تاثیر دمای بخار ورودی بر راندمان اگزرژی

کانتورهای کسر جرمی مذاب PCM در طول ابتدایی مبادله‌کن شماره ۳ در سه بازه زمانی در زمان شارژ و دشارژ برای نمونه در شکل‌های ۲۲ و ۲۳ نشان داده شده است.



[2] Laing D., Bahl C., Bauer T., Lehmann D., Steinmann, W. D., Thermal energy storage for direct steam generation. *Solar Energy*, Vol. 85, No.4, pp. 627-633, 2011.

[3] Seitz M., Cetin P., Eck M., Thermal storage concept for solar thermal power plants with direct steam generation. *Energy Procedia*, Vol. 49, pp. 993-1002, 2014.

[4] Feldhoff J. F., Schmitz K., Eck M., Schnatbaum-Laumann L., Laing D., Ortiz-Vives F., Schulte-Fischedick J., Comparative system analysis of direct steam generation and synthetic oil parabolic trough power plants with integrated thermal storage. *Solar Energy*, Vol. 86, No.1, pp. 520-530, 2012.

[5] ازمانی محی آبادی م., صفوی س., نقوی س., محمدی س., بررسی عملکرد چرخه روغن نیروگاه سهموی خورشیدی شیراز بخش اول: مدلسازی و ماینوتورینگ. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*, د. ۴۵, ش. ۱, ص ۶۱-۶۷, ۱۳۹۵.

[6] نامی ح., رنجبر س., تحلیل انرژی و انرژی چرخه ی اوکسی فیول S-GRAZ. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*, د. ۴۶, ش. ۱, ص ۱۰۱-۱۰۷, ۱۳۹۵.

[7] Pirasaci T., Goswami D. Y., Influence of design on performance of a latent heat storage system for a direct steam generation power plant. *Applied Energy*, Vol. 162, pp. 644 -652, 2016.

[8] Michels H., Hahne E., Cascaded latent heat storage for solar thermal power stations. In EuroSun'96, *Proc. of 10th Int. Solar Forum*, 1996.

[9] Michels H., Pitz-Paal R., Cascaded latent heat storage for parabolic trough solar power plants. *Solar Energy*, Vol. 81, No.6, pp. 829-837, 2007.

[10] Aldoss T. K., Rahman M. M., Comparison between the single-PCM and multi-PCM thermal energy storage design. *Energy Conversion and Management*, Vol. 83, pp. 79-87, 2014.

[11] Farid M. M., Kanzawa A., Thermal performance of a heat storage module using PCM's with different melting temperatures: mathematical modeling. *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 111, No.2, pp. 152-157, 1989.

[12] Farid M. M., Kim Y., Kansawa A., Thermal performance of a heat storage module using PCM's with different melting temperature: experimental. *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 112, No.2, pp. 125-131, 1990.

[13] Ezra M., Kozak Y., Dubovsky V., Ziskind G., Analysis and optimization of melting temperature span for a multiple-PCM latent heat thermal energy storage unit. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 93, pp. 315-329, 2016.

[14] Xiao X., Zhang P., Li M., Experimental and numerical study of heat transfer performance of nitrate/expanded graphite composite PCM for solar energy storage. *Energy Conversion and Management*, Vol. 105, pp. 272-284, 2015.

[15] Kibria M. A., Anisur M. R., Mahfuz M. H., Saidur R., Metselaar I. H. S. C., Numerical and experimental investigation of heat transfer in a shell and tube thermal energy storage system. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 71-78, 2014.

[16] Xu, Y., He, Y. L., Li, Y. Q., Song, H. J., Exergy analysis and optimization of charging-discharging processes of latent heat thermal energy storage system with three phase change materials. *Solar Energy*, Vol. 123, pp. 206-216, 2016.

[17] Jegadheeswaran, S., Pohekar, S. D., Kousksou, T., Exergy based performance evaluation of latent heat thermal storage system: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No.9, 2580-2595, 2010.

۶- نتیجه گیری

سه سیستم فوق گرمایش حاوی PCM جهت شبیه‌سازی انرژی در یک نیروگاه خورشیدی بخار مستقیم طراحی و شبیه‌سازی شد و نتایج حاصل با یک سیستم فوق گرمایش بتنی مقایسه گردید. نتایج حاصل را می‌توان در سه بند خلاصه کرد:

- ۱- با بکارگیری چند PCM در کنار یکدیگر با چیدمان آبشاری، علاوه بر اختلاف دمای کافی سیال کاری در مبادله‌کن، راندمان انرژی نیز افزایش می‌یابد.
- ۲- راندمان انرژی تنها پارامتر مهم در انتخاب سیستم مناسب نیست، بلکه دمای خروجی در زمان دشارژ نیز باید به حد کافی رسیده باشد تا جوابگوی شرایط کاری توربین بخار باشد. لذا اگرچه سیستم تک PCM در حالت دشارژ، راندمان بالایی دارد ولی دمای بخار خروجی بسیار پایین بود و برای بکارگیری در توربین بخار ایجاد مشکل می‌کند.
- ۳- با مقایسه سیستم بتنی با سیستم حاوی PCM، مشاهده می‌شود که علاوه بر راندمان انرژی پایین این سیستم، دمای خروجی سیال نیز طی زمان دشارژ به اندازه کافی افزایش نمی‌یابد و همچنین از حجم بسیار بیشتری در مقایسه با سایرین برخوردار است. لذا بکارگیری سیستم حاوی PCM بسیار موثرتر می‌باشد.
- ۴- با افزایش دبی بخار ورودی به سیستم، سیال زمان کافی جهت انتقال گرما ندارد و این امر منجر به افزایش اختلاف دمای سیال کاری و سیستم شده و بازگشت‌ناپذیری را افزایش می‌دهد. در نتیجه راندمان انرژی سیستم کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش دمای ورودی در زمان شارژ، راندمان سیستم در اثر افزایش اختلاف دمای سیال کاری و سیستم کاهش می‌یابد.

۷- نمادها

A	سطح مقطع (m^2)
C	ظرفیت گرمایی ویژه ($J/kg \cdot ^\circ C$)
D	قطر (m)
h	ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی ($W/m^2 \cdot K$)
H	آنتالپی (kJ)
k	رسانایی گرمایی ($W/m \cdot K$)
m	جرم (kg)
T	دما ($^\circ C$, K)
X	کسر مایع
PCM	مواد تغییر فاز دهنده
ρ	چگالی (kg/m^3)
ψ	راندمان انرژی (%)

۸- مراجع

[1] Alguacil M., Prieto C., Rodriguez A., Lohr, J., Direct steam generation in parabolic trough collectors. *Energy Procedia*, Vol. 49, pp. 21-29, 2014.