



بهبود عملکرد سیستم ذخیره‌ی انرژی آبگرمکن خورشیدی با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده

سلیمان ابراهیمی^۱، ولی کلانتر^{۲*}، جواد ابوالفضلی اصفهانی^۳

^۱دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، ایران

^{۲*}دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، ایران

^۳استاد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

یادداشت پژوهشی، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵

چکیده

مواد تغییر فاز دهنده (PCMs) در آبگرمکن‌های خورشیدی برای ذخیره مقدار اضافی انرژی گرمایی موجود در طول ساعات آفتابی می‌تواند استفاده شود. هدف از مطالعه‌ی حاضر، بررسی عملکرد سیستم آبگرمکن خورشیدی با لوله‌ی گرمایی، به‌همراه سیستم ذخیره‌ی انرژی حاوی مواد تغییر فاز دهنده (PCMs) است. در این مطالعه یک مخزن گالوانیزه استوانه‌ای با کویل دوگانه‌ی مارپیچ و حاوی PCM، به عنوان یک واحد ذخیره‌ی انرژی گرمایی عمل می‌کند. از پارافین به عنوان PCM و از آب به عنوان مایع انتقال حرارت (HTF) برای انتقال گرما از مخزن آبگرمکن به لوله‌های مارپیچ و از آنجا به مخزن ذخیره‌ی انرژی، استفاده می‌شود. آزمایشات فرآیند شارژ و تخلیه در روزهای آفتابی و در شرایط عملیاتی واقعی انجام می‌شود. اهمیت تغییرات دمایی مایع انتقال حرارت HTF و ماده‌ی تغییر فاز دهنده PCM و نیز بازه‌ی تغییرات، مورد بحث قرار گرفته و متغیرهای عملکردی انرژی شارژ و تخلیه و بازه انرژی حرارتی مورد مطالعه واقع شده‌است. بازه شارژ محاسبه شده، ۷۵/۷٪ و بازه واحد ذخیره‌ی انرژی برای فرآیند تخلیه، ۶۱،۱٪ بدست آمد. PCM، ۲۷۰۰ کیلوژول گرما را در ۷۰ دقیقه برای دمای ورودی HTF ۸۰ درجه‌ی سانتیگراد در حین شارژ، ذخیره کرد و ۱۶۵۰ کیلوژول گرما را در ۵۰ دقیقه در دمای HTF ورودی ۲۵ درجه سانتیگراد و ۴۲ لیتر در دقیقه در واحد ذخیره، تخلیه‌ی انرژی کرد. از آزمایش‌ها مشخص شد که PCM، عملکرد سیستم را با افزایش بازه انرژی شارژ و راندمان حرارتی مخزن ذخیره‌ی آب گرم، بهبود می‌بخشد.

کلمات کلیدی: انرژی خورشیدی؛ ماده‌ی تغییر فاز دهنده؛ آبگرمکن خورشیدی با لوله‌ی گرمایی؛ مخزن ذخیره‌ی انرژی؛ شارژ، تخلیه‌ی انرژی.

Optimizing the performance of solar water heater energy storage system using phase change materials

Salman Ebrahimi¹, Vali Kalantar^{2*}, Javad Abolfazli Esfahani³

¹Ph.D. Student, School of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

^{2*}Assoc. Prof., School of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

³Prof., Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Abstract

Phase change materials (PCMs) can be used in solar water heaters to store excess heat energy available during sunny hours. The purpose of this study is to investigate the performance of the solar water heater system with heat pipe, along with the energy storage system containing phase change materials (PCMs). In this study, a cylindrical galvanized tank with double spiral coil and containing PCM acts as a thermal energy storage unit. Paraffin is used as PCM and water is used as a heat transfer fluid (HTF) to transfer heat from the water heater tank to the spiral tubes and from there to the energy storage tank. The charging and discharging process tests are carried out on sunny days and in real operating conditions. The importance of temperature changes of HTF heat transfer fluid and PCM phase change material as well as the range of changes have been discussed. Functional variables of charge and discharge energy and thermal energy efficiency have been studied. The calculated charging efficiency, 75.7 % and the efficiency of the energy storage unit for the discharge process was 61.1 %. PCM saved 2700 kJ of heat in 70 minutes for 80 ° C during charging and 1650 kJ of heat in 50 minutes at 25 ° C and 42 liters per minute in storage, discharge. He made energy. From the tests, it was found that PCM improves the performance of the system by increasing the charging energy efficiency and the thermal efficiency of the hot water storage tank.

Keywords: solar energy; phase change material; water heater with heat pipe; energy storage tank; charge; discharge.

۱- مقدمه

انرژی خورشیدی به عنوان یکی از منابع انرژی، جایگزین عالی و پایدار برای آینده شناخته شده است. با این حال، استفاده موثر از انرژی خورشیدی، به دلیل ماهیت متناوب در دسترس بودن آن، محدودیت استفاده از آن و اثربخشی آن در کاربردهای خانگی به‌ویژه گرمایش آب، موانعی دارد. گرمایش آب، یکی از ویژگی‌های استفاده مستقیم از انرژی خورشیدی است و از دیدگاه اقتصادی یک کاربرد حرارتی جایگزین سوخت‌های فسیلی است. از این رو توسعه‌ی یک سیستم گرمایش آب خورشیدی کارآمد برای کاربردهای اقتصادی ضروری است. امروزه محققان (هدایتی زاده و همکاران ۲۰۱۳) توجه خود را بر تغییرات طراحی نوآورانه به منظور بهبود عملکرد سیستم گرمایش آب خورشیدی متمرکز می‌کنند [۱]. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی نهم حرارتی (LHTES) با استفاده از مواد تغییر فازدهنده (PCMs)، به عنوان یک واحد ذخیره‌سازی، دارای مزایایی مانند ظرفیت بالای ذخیره‌سازی گرما، حجم کم و رفتار همدما در طول فرآیند شارژ و تخلیه، هستند. از PCMها می‌توان در مخازن آبگرمکن‌های خورشیدی استفاده کرد تا لایه بندی را بهبود بخشد. رفتار PCM در شرایط واقعی (کابزا و همکاران ۲۰۰۶) با افزودن یک ماژول PCM در بالای یک مخزن ذخیره‌ی آب گرم با طبقه‌بندی، مطالعه شده است [۲]. سیستم آب گرم خانگی (DHW) مبتنی بر انرژی خورشیدی، به منظور بررسی مزایای استفاده از PCM، مورد مطالعه قرار گرفته است (کوشکسوت و همکاران ۲۰۱۱) [۳]. اثرات استفاده از PCM به عنوان یک منبع ذخیره بر عملکرد یک آبگرمکن خورشیدی (فضیلتی و عالم رجبی ۲۰۱۳) به صورت تجربی بررسی شده است [۴]. تعدادی از پژوهشگران در مورد استفاده از PCMها به عنوان کاربردهای ذخیره‌ی انرژی، برای بهبود سیستم‌های ذخیره‌ی انرژی حرارتی (TES)، مطالعه کرده‌اند (تالماتسکی و کریبوس ۲۰۰۸) [۵].

عملکرد حرارتی دوغاب میکروکپسول پارافین با تغییرات دمایی در محدوده‌ی ۶۵ درجه سانتیگراد و نرخ حرارتی ورودی متفاوت، به منظور بهبود سیستم‌های ذخیره‌سازی متناوب، مورد مطالعه قرار گرفته است (هوانگ و همکاران ۲۰۱۱) [۶]. ویژگی‌های دینامیکی سیستم ذخیره‌سازی حرارت انرژی خورشیدی با مخزن ذخیره حاوی کپسول‌های کروی، در طول فرآیند تخلیه، با پارافین به عنوان PCM و آب به عنوان سیال انتقال حرارت (HTF)، مورد مطالعه قرار گرفته است. اثرات دمایی ورودی HTF، سرعت جریان HTF و تخلخل مخزن ذخیره روی زمان تخلیه و نرخ گرمای آزاد شده، بررسی شده است (وو، فانگ و لیو ۲۰۱۱) [۷]. عملکرد یک آبگرمکن خورشیدی با گردش طبیعی (رضانیا، طاهریان و گنجی ۲۰۱۲) به صورت تجربی با نرخ طبیعی آب

گرم مصرفی مورد بررسی قرار گرفته است [۸]. تاثیر ماژول‌های PCM در یک سیستم طبقه‌بندی آبگرمکن خورشیدی خانگی (مازمن و همکاران ۲۰۰۹) با استفاده از پارافین-استئاریک اسید، پارافین-پالمیک اسید و پارافین-میریستیک اسید با نسبت وزنی ۲۰:۸۰ به عنوان ماده تغییر فاز دهنده، مورد بررسی قرار گرفته است [۹]. مشخص شد که پارافین-استئاریک اسید بیشترین تاثیر را در بهبود عملکرد حرارتی سیستم DHW خورشیدی دارد.

مخازن آب با لایه بندی حرارتی، کاربرد زیادی در استفاده‌های کوتاه مدت، برای ذخیره‌ی انرژی حرارتی دارند. در این گونه سیستم‌ها آب گرم از طریق نیروی شناوری از آب سرد جدا شده و در لایه‌های بالاتر ذخیره می‌شود. از این روش معمولاً برای انرژی خورشیدی و سیستم‌های بازبازی گرمای تلف شده استفاده می‌شود (روزن ۲۰۰۱) [۱۰]. در مخازن آب لایه‌بندی شده، می‌توانیم آب گرم مصرفی را از بالاترین لایه‌ها با بالاترین دما تامین کنیم. ضریب انتقال حرارت (کستل و همکاران ۲۰۰۸) به صورت تجربی، برای یک ماژول PCM در یک مخزن لایه بندی شده‌ی حرارتی با افزودن فیین‌های عمودی، محاسبه شده است [۱۱].

ذخیره‌ی انرژی حرارتی همواره یکی از مولفه‌های گرمایش و سرمایش خورشیدی، فضای منازل مسکونی بوده است. تابش خورشیدی یک منبع انرژی وابسته به زمان با ویژگی متناوب است. نیاز گرمایشی یک منزل مسکونی نیز وابسته به زمان است. با این حال، منبع انرژی و نیازهای یک خانه، عموماً در کاربردهای گرمایش خورشیدی، با یکدیگر مطابقت ندارند. اوج تابش خورشیدی نزدیک ظهر اتفاق می‌افتد؛ اما اوج تقاضا در اواخر شب یا صبح زود است که تابش خورشیدی به اندازه‌ی کافی در دسترس نیست. ذخیره‌ی انرژی حرارتی این امکان را فراهم می‌کند که یک منبع انرژی برای تنظیم این عدم تطابق و رفع نیاز انرژی در دسترس باشد و برای به حداقل رساندن شکاف بین عرضه و تقاضای انرژی استفاده شود؛ بنابراین ذخیره‌ی انرژی در آبگرمکن خورشیدی برای بهبود کارایی آن ضروری است.

از آب گرم برای مصارف خانگی، رفع نیازهای صنایع و کاربردهای تجاری استفاده می‌شود. ساختمان‌های مسکونی، تجاری و صنعتی اغلب نیاز به آب گرم حدود ۶۰ درجه‌ی سانتیگراد دارند و فعالیت‌هایی مانند حمام کردن، لباسشویی و نظافت در بخش خانگی معمولاً به آب حدود ۵۰ درجه‌ی سانتیگراد نیاز دارند. از PCMها با محدوده‌ی ذوب ۵۰ تا ۶۰ درجه‌ی سانتیگراد می‌توان در سیستم DHW خورشیدی برای برآوردن نیازهای آب

به منظور ایجاد شرایط واقعی، از لوله‌های گرمایی به عنوان منبع گرما برای گرم کردن آب در طی آزمایشات این تحقیق، استفاده شده است. همچنین مخزن ذخیره‌ی انرژی به طور مستقل از مخزن ذخیره‌ی آب عمل می‌کند. آزمایشات شارژ و تخلیه با PCM برای مطالعه عملکرد سیستم انجام شده است. در طول آزمایشات نمی‌توان آب را از چرخه خارج کرد. اهداف اصلی این مطالعه عبارتند از (الف) ارزیابی عملکرد گرمایی سیستم DHW خورشیدی با مخزن حاوی PCM با استفاده از لوله‌ی گرمایی (هیت پایپ) به عنوان منبع گرما، (ب) یافتن اثر ماده‌ی تغییر فاز دهنده (PCM) در یک آبگرمکن خورشیدی.

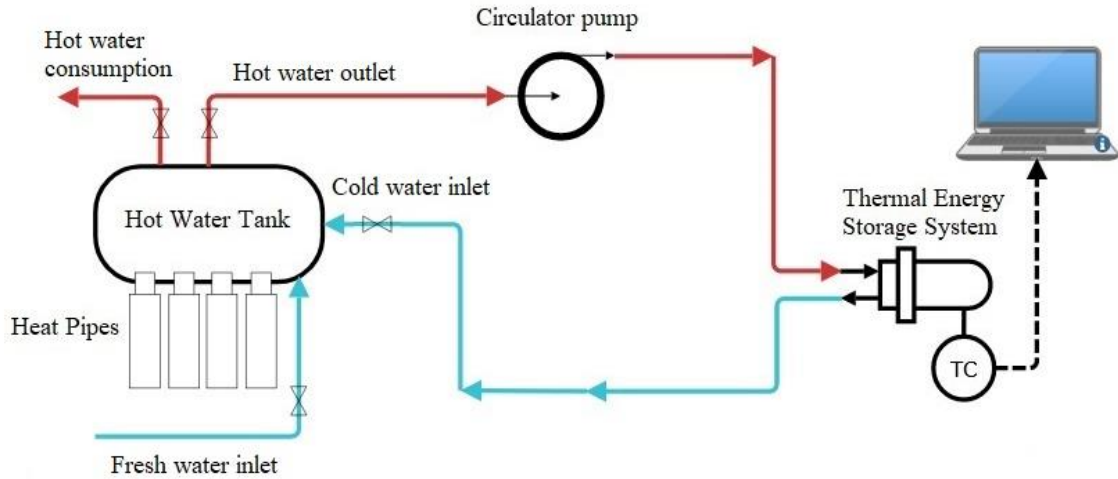
۲- بخش آزمایشگاهی

۲-۱- راه‌اندازی مجموعه‌ی آزمایشی

آزمایش‌ها در مرداد ماه در شمال شرق ایران، شهر مشهد (طول جغرافیایی: ۵۹/۶۰۴۲ شرقی، عرض جغرافیایی: ۳۶/۳۰۶۹ شمالی) که در ارتفاع میانگین ۱۰۵۰ متری از سطح دریا قرار دارد، انجام شده است. میانگین دمای هوا در تابستان ۲۵ تا ۳۵ درجه سانتیگراد و در زمستان ۱۳ تا ۲۵ درجه سانتیگراد است. یک نمودار شماتیک از راه‌اندازی دستگاه آزمایش در شکل (۱) نشان داده شده است. راه‌اندازی دستگاه شامل مخزن آب استوانه‌ای عایق بندی شده از جنس فولاد ضد زنگ، لوله‌های گرمایی، مخزن PCM گالوانیزه، دیتالاگر یا ثبت داده، ترموکوپل‌ها، لوله‌های ورودی و خروجی و پمپ سیرکوله است. مخزن ذخیره انرژی گرمایی از جنس گالوانیزه با ظرفیت ۲۴ لیتر بوده و با پشم شیشه و فوم عایق بندی شده است. انتقال حرارت بین PCM و HTF از طریق لوله‌های مسی مارپیچ دبل درون مخزن ذخیره‌ی انرژی، انجام می‌شود. مخزن آب دستگاه با ظرفیت ۱۲۰ لیتر، قادر به تامین آب برای یک خانواده‌ی ۴ نفره است. مخزن ذخیره انرژی حرارتی با مخزن HTF برای انتقال گرما به PCM یکپارچه شده است. مشخصات ترموفیزیکی ماده‌ی تغییر فاز دهنده‌ی پارافین در جدول (۱) و مشخصات فنی آبگرمکن خورشیدی در جدول (۲) آورده شده است.

گرم در ساختمان‌ها استفاده کرد. ذخیره‌ی انرژی تغییر فاز با چگالی بالاتر، جایگزین دیگری برای ذخیره‌سازی کوچک است (کستل ۲۰۰۸) [۱۱]؛ بنابراین ادغام واحد ذخیره‌سازی انرژی حرارتی با آبگرمکن خورشیدی، نیازهای استفاده‌ی مفید از انرژی را برآورده می‌کند. از یک مخزن با طراحی جدید، برای بهبود عملکرد آبگرمکن خورشیدی در شب، استفاده شده است (اوانی و همکاران ۲۰۲۱) [۱۲]. این تحقیق برآورد می‌کند که حدود ۴۲۶۵ دلار در مصرف انرژی در طول ۸ سال، صرفه جویی شود. از آنجایی که گران بودن انرژی در اکثر نقاط دنیا یکی از مواردی است که تحقیقات را به سمت صرفه جویی در انرژی سوق می‌دهد، این نوآوری می‌تواند کارساز باشد. از ماژول‌های PCM تعبیه شده درون یک مبدل حرارتی مارپیچی در سیستم یک آبگرمکن خورشیدی بهره برده شده است (فهد و کُک ۲۰۲۲) [۱۳]. عملکرد حرارتی سیستم در هنگام غروب خورشید با استفاده از PCM حدود ۱۸٪ نسبت به زمانی که از PCM استفاده نمی‌شود، بهبود می‌یابد. عملکرد جذب صفحه جاذب یک آبگرمکن خورشیدی ترموسیفون با و بدون ذخیره‌سازی PCM مورد بررسی قرار گرفت (سپارالدین و همکاران ۲۰۲۰) [۱۴]. نتایج نشان می‌دهد، استفاده از پارافین به عنوان PCM درون صفحه‌ی جاذب در مقایسه با صفحه جاذب بدون PCM، عملکرد بهتری را به دست می‌دهد. عملکرد یک صفحه کلکتور خورشیدی شکل ۷ ترکیب شده با ماده‌ی تغییر فاز دهنده‌ی استئاریک اسید در مقایسه با صفحه کلکتور تخت، مورد بررسی قرار گرفت (حلیم و همکاران ۲۰۲۰) [۱۵]. نتایج، نشان دهنده‌ی افزایش عملکرد ۳۷٪، ۹/۹٪ و ۱۱/۳٪ برای دی‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ لیتر بر دقیقه کلکتور ۷ شکل نسبت به کلکتور صفحه تخت معمولی بود.

در طول آزمایش‌های پیشین اشاره شده است که معمولاً از گرمکن الکتریکی به عنوان منبع گرمایی، برای گرم کردن آب در هنگام آزمایشات مطالعه‌ی عملکرد آبگرمکن‌های خورشیدی، استفاده شده است که این کار شرایط عملیاتی واقعی را ایجاد نمی‌کند. همچنین در برخی موارد از ماده‌ی PCM به صورت ماژول درون مخزن ذخیره‌ی آب استفاده شده است؛ بنابراین



شکل ۱- شماتیک دستگاه آزمایش

PCMها در سه دسته قرار می‌گیرند: ۱- نمک‌های هیدراته، ۲- پارافین‌ها و ۳- مواد آلی غیر پارافینی. در این آزمایش از پارافین درجه‌ی ۵۸ به عنوان PCM استفاده شده است که دمای ذوب آن بین 56°C و 58°C بوده و خواص آن در جدول (۲) آمده است [۱۶]. دلیل استفاده از پارافین این است که، به راحتی در دسترس بوده و معمولاً از نمک‌های هیدراته ارزان تر است. کارهای متعددی برای مطالعه‌ی خصوصیات گرمایی پارافین در طی فرآیندهای ذوب و انجماد انجام شده است. پارافین به عنوان یک ماده‌ی غیر سمی جذاب و پایدار از نظر شیمیایی و بدون اثرات تخریبی شناخته می‌شود و دارای ظرفیت ذخیره‌سازی گرمای نهان بالا، در یک بازه‌ی دمایی کم است. PCM درون مخزن استوانه‌ای گالوانیزه با قطر داخلی ۲۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۷۱۰ میلی‌متر با ضخامت دیواره‌ی ۲ میلی‌متر قرار می‌گیرد. مخزن PCM حاوی ۱۲ کیلوگرم پارافین است. PCM قبل از قرار گرفتن در مخزن، بالاتر از نقطه ذوب گرم شد، تا از هر گونه مشکلی که ممکن است به دلیل افزایش حجم ایجاد شود، جلوگیری شود. دمای PCM و HTF در فواصل ۱۰ دقیقه با استفاده از یک دیتالاگر HEATCON ۸۰۰۳/USB ثبت می‌شود که می‌تواند دما را با دقت 1°C اندازه‌گیری کند. همچنین سرعت جریان HTF از طریق سیستم در بازه‌ی زمانی ۱۰ دقیقه اندازه‌گیری می‌شود. تابش خورشیدی با استفاده از تابش سنسور TES-۱۳۳۳ با دقت $\pm 10\text{W}/\text{m}^2$ اندازه‌گیری شده است.

شکل (۲) پیکربندی واحد TES استوانه‌ای را نشان می‌دهد که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت و شامل یک مبدل حرارتی کوئیل دوگانه‌ی ماریپیج و یک پوسته‌ی استوانه‌ای است. مبدل حرارتی از مس ساخته شده بود تا از هدایت حرارتی خوب اطمینان حاصل شود. قطر داخلی کوئیل بیرونی و داخلی به ترتیب ۱۵ و ۱۰ میلی‌متر و ضخامت لوله‌ی کوئیل 0.63 میلی‌متر بود. طول هر کدام از کوئیل‌های بیرونی و داخلی ۱۵ متر بود. گام کوئیل

جدول ۱- مشخصات آبگرمکن خورشیدی

مشخصات	نوع و مدل
ENSUN-CPS ۱۰۰	نوع و مدل
$\varnothing 58\text{mm} \times 1800\text{mm}$	مشخصات لوله
عدد ۱۲	تعداد لوله
مقاوم در برابر حرارت با فویل آلومینیومی جاذب	نوع و پوشش لوله
1.25m^2	مقدار سطح مفید جاذب
۱۲۰ (L)	ظرفیت مخزن

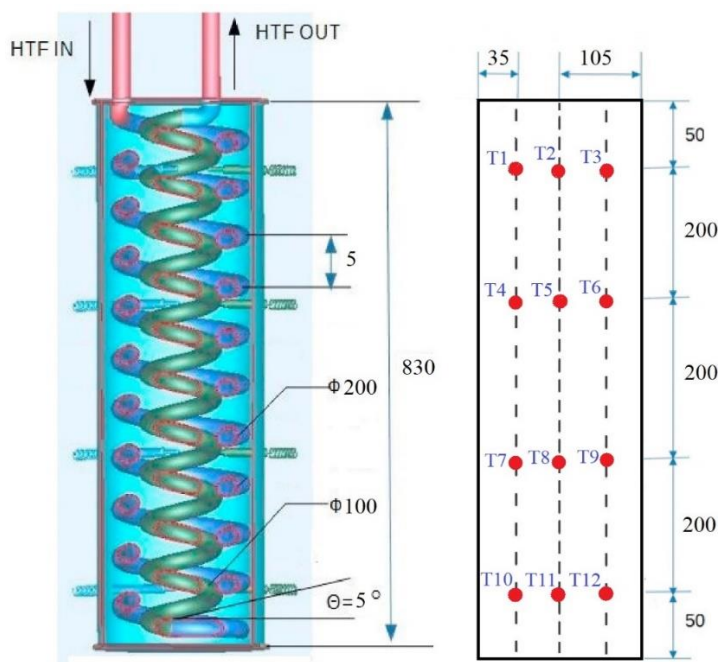
هنگامی که تابش خورشیدی روی لوله‌های گرمایی می‌افتد، لوله‌های گرمایی انرژی خورشیدی را جذب می‌کنند و گرما از طریق مایع جاذب درون لوله‌های گرمایی که به طور غیر مستقیم به مخزن حاوی HTF متصل است، منتقل می‌شود و باعث گرم شدن آب می‌شود. در اینجا از آب به عنوان HTF برای انتقال گرما به مخزن ذخیره‌ی انرژی استفاده می‌شود. آب گرم که در بالاترین لایه از مخزن قرار دارد، از طریق لوله‌های عایق‌بندی شده و با فشار پمپ که در مسیر می‌باشد وارد مخزن ذخیره‌ی انرژی شده و پس از طی کردن مسیر کوئیل داخل آن، مجدداً به پایین‌ترین لایه از مخزن وارد می‌شود.

جدول ۲- مشخصات ترموفیزیکی ماده‌ی تغییر فاز دهنده‌ی پارافین

خواص	فاز جامد	فاز مایع
نقطه‌ی ذوب	$56 - 58^{\circ}\text{C}$	$56 - 58^{\circ}\text{C}$
گرمای نهان	$142/7\text{ (kJ/kg)}$	$142/7\text{ (kJ/kg)}$
ضریب هدایت گرمایی (k)	$0.4\text{ (W/m}^{\circ}\text{C)}$	$0.2\text{ (W/m}^{\circ}\text{C)}$
چگالی (ρ)	$670\text{ (kg/m}^3\text{)}$	$640\text{ (kg/m}^3\text{)}$
گرمای مخصوص	$2/4\text{ (kJ/kg}^{\circ}\text{C)}$	$1/6\text{ (kJ/kg}^{\circ}\text{C)}$

متر بود. خروجی HTF در مرکز سیلندر قرار داشت، فاصله بین ورودی و خروجی ۷۰ میلی‌متر بود.

(LH) ۱۰ میلی‌متر و قطر مارپیچ کویل (Dh) ۱۴۰ میلی‌متر بود. پوسته‌ی واحد ذخیره از ورق گالوانیزه ساخته شده بود تا استحکام، انعطاف پذیری و پایداری حرارتی خوبی داشته باشد. ارتفاع پوسته (Hs) ۷۱۰ میلی‌متر و قطر پوسته (Ds) ۲۱۰ میلی‌



شکل ۲- شماتیک مخزن ذخیره انرژی

۳-۲- انرژی ذخیره شده

مقدار انرژی ذخیره شده در PCM به جرم، اختلاف دما، گرمای ویژه، گرمای نهان و کسر جرمی مذاب آن بستگی دارد. انرژی ذخیره شده در PCM را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد:

$$Q_c = mC_p(T - T_{ini}) + m\theta L_f = m(C_p\Delta T_c + \theta L_f) \quad (2)$$

۳- نتایج آزمایش و بررسی آنها

در این بخش، نتایج به دست آمده برای فرآیندهای شارژ و تخلیه، به طور جداگانه ارائه شده است. آزمایش شارژ و تخلیه برای سرعت جریان حجمی $14,21,42 \text{ L/min}$ در سه روز مختلف انجام شده است.

۳-۱- فرآیند شارژ

فرآیند شارژ با رسیدن دمای HTF درون مخزن به ۸۰ درجه‌ی سانتیگراد، از ساعت ۱۰ صبح و در سه روز مختلف آغاز می‌شود. در طول فرآیند شارژ، ورودی آب سرد جبرانی و خروجی آب گرم مصرفی مخزن، بسته است. علت این امر کنترل بهتر دمای مخزن روی ۸۰ درجه به منظور فراهم کردن شرایط بهتر شارژ مخزن PCM است.

دوازده ترموکوپل برای اندازه‌گیری دمای پارافین در چهار لایه‌ی مختلف با فواصل یکنواخت در داخل مخزن PCM قرار داده شده است. ترموکوپل‌ها در فاصله‌ی ۲۰۰ میلی‌متری در چهار لایه از مخزن ذخیره قرار می‌گیرند و فاصله‌ی هر ترموکوپل با ترموکوپل دیگر در هر لایه، ۵۰ میلی‌متر است. علاوه بر این، از دو ترموکوپل برای اندازه‌گیری دمای ورودی و خروجی آب از کویل مارپیچ مخزن ذخیره‌ی PCM و یک ترموکوپل نیز برای اندازه‌گیری دمای آب داخل مخزن، استفاده می‌شود.

۲-۲- نسبت فاز مایع

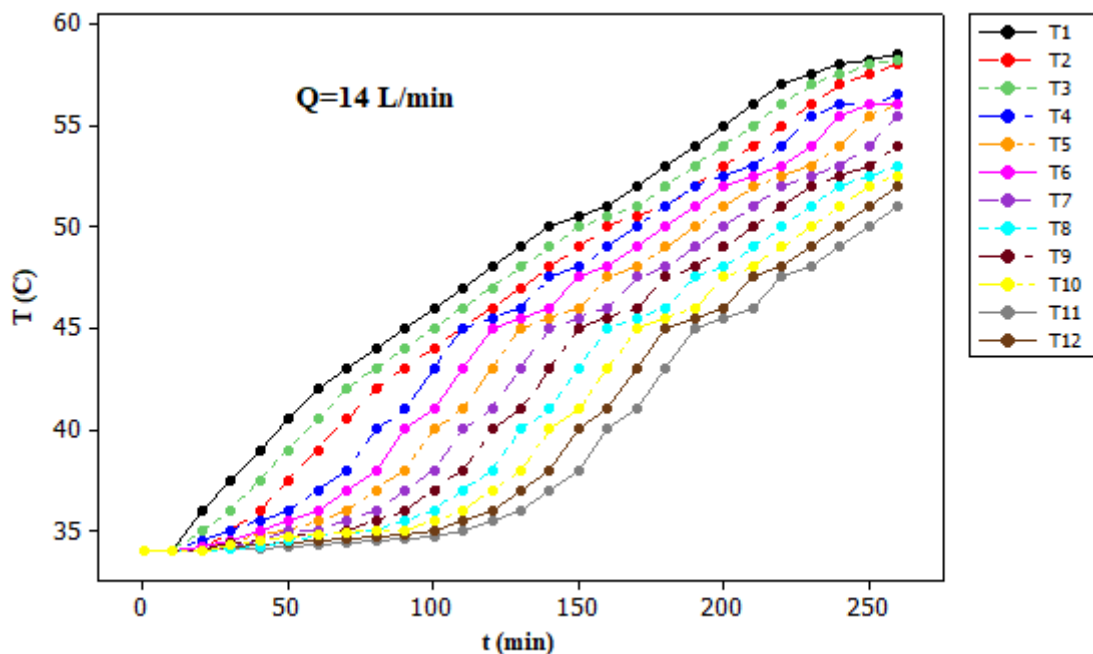
نسبت فاز مایع یک پارامتر بی‌بعد است که درصد فاز مایع را در ناحیه‌ی خمیری تعیین می‌کند. نسبت فاز مایع PCM را می‌توان با استفاده از قانون اعمال شده بین دمای مایع و جامد محاسبه کرد [۱۷]:

$$\theta = \begin{cases} 0 & T \leq T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & T_l < T < T_s \\ 1 & T \geq T_l \end{cases} \quad (1)$$

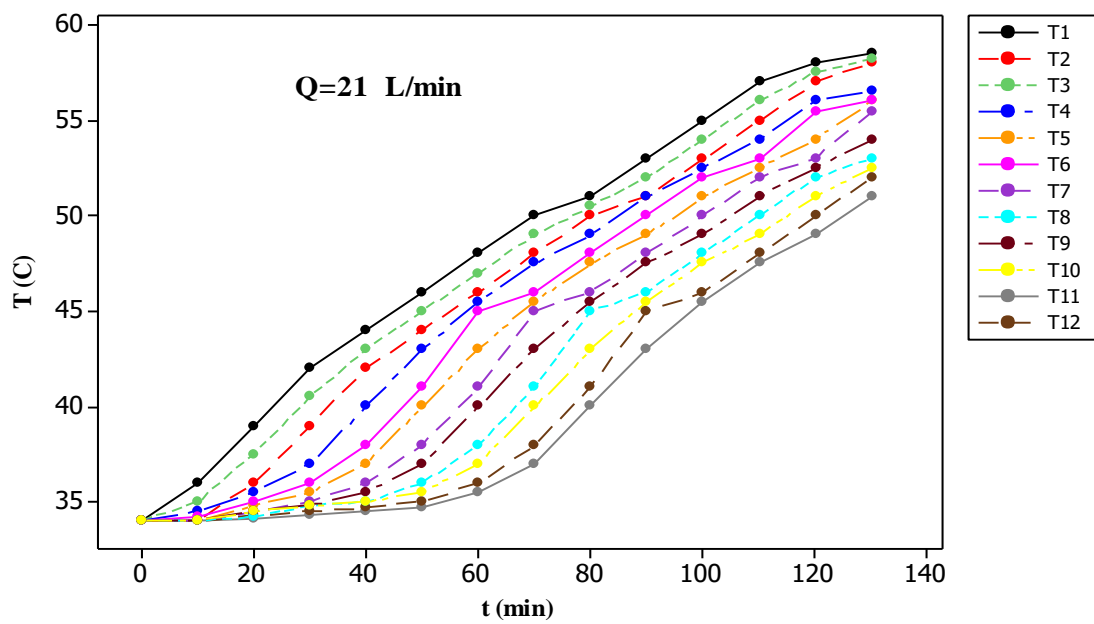
۳-۱-۱- پروفیل دما در واحد ذخیره‌سازی

در طی فرآیند ذوب، HTF با دمای بالا وارد قسمت ابتدایی واحد ذخیره‌سازی شده و از طریق لوله‌های مارپیچی وارد شده در واحد ذخیره‌ی انرژی، جریان می‌یابد. PCM این گرما را جذب کرده و به فاز مایع تبدیل می‌شود. ۱۲ ترموکوپل که در قسمت‌های مختلف واحد ذخیره‌سازی قرار داده شده بودند، تغییرات دمای PCM را در طول فرآیند شارژ، ثبت کردند. تغییرات دما در فواصل ۱۰ دقیقه ثبت شده است. داده‌ها در یک بازه‌ی زمانی طولانی‌تر برای درک مناسب فرآیند، ارائه می‌شوند. پروفیل دمای پارافین برای HTF با دمای ورودی ۸۰ درجه‌ی سانتیگراد با سرعت جریان حجمی $14.21, 42 \text{ Lit/min}$ در شکل ۳-الف، ب و ج نشان داده شده است. در سرعت ورودی پایین‌تر، دمای HTF (یعنی ۸۰ درجه سانتیگراد) ۲۰ درجه‌ی سانتیگراد بالاتر از میانگین دمای نهایی PCM (یعنی ۶۰ درجه سانتیگراد) بود که همان‌طور که در شکل ۳-الف نشان داده شده است، در طول مدت ۲۶۰ دقیقه قابل دستیابی است. زمان ذوب ذکر شده برای سرعت ورودی ۲۱ و ۴۲، به ترتیب ۱۳۰ و ۷۰ دقیقه بود. در طول فرآیند ذوب، ابتدا PCM گرمای محسوس را از دیواره‌ی کویل از طریق رسانش جذب کرده و دمای آن تا نقطه‌ی ذوب می‌رسد. این تغییر دمای سریع به دلیل اختلاف دمای زیاد بین کویل مارپیچ و PCM جامد در مراحل اولیه‌ی فرآیند ذوب است؛

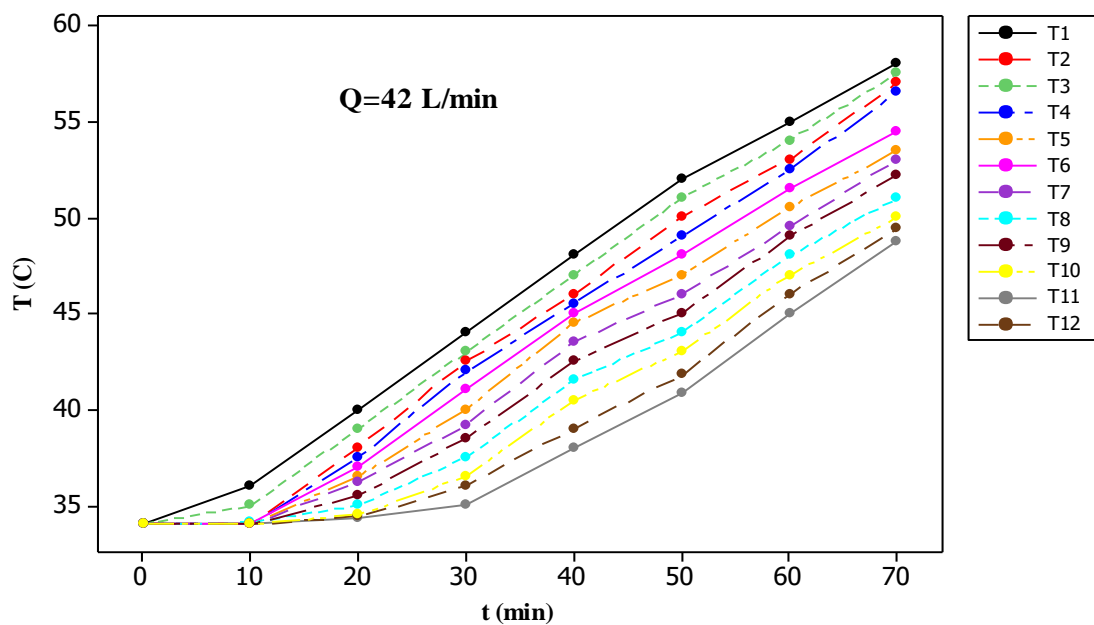
در نتیجه، آن قسمت از PCM که در مجاورت دیواره‌ی کویل مارپیچ قرار دارد، افزایش سریع دما را تجربه می‌کند؛ در حالی که به دلیل هدایت حرارتی کم PCM (یعنی 0.4 W/m K) برای قسمت‌های دورتر از دیواره، زمان بیشتری طول می‌کشد. پس از تغییرات سریع اولیه‌ی دمای PCM، دما در طول فرآیند ذوب PCM تثبیت شده و به دنبال آن یک افزایش سریع دما به دلیل تبادل گرمای محسوس ایجاد می‌شود. این تغییر شدید دما به دلیل تبادل ناگهانی انرژی به‌وسیله‌ی جابجایی است. در نهایت دمای PCM پس از رسیدن به دمای نهایی تثبیت می‌شود. از شکل ۳-الف، ب، ج مشخص است که PCM در قسمت‌های بالایی مخزن ذخیره سریع‌تر از قسمت‌های پایینی ذوب می‌شود. دلیل این امر، تاثیر پتانسیل بالای انتقال گرمای و افزایش جابجایی طبیعی در ناحیه‌ی بالای مخزن ذخیره است [۱۸]. در هنگام ذوب، یک جریان گردشی جابجایی توسط PCM ایجاد شده و در نتیجه نیروهای شناوری به سمت بالا حرکت می‌کنند و سرعت انتقال گرما را افزایش می‌دهد [۱۹، ۱۸]؛ در نتیجه، سرعت ذوب در پایین‌ترین بخش واحد ذخیره‌سازی آهسته بود و مقادیر دما برای مدت طولانی ثابت ماند که در شکل ۳-الف، ب، ج نشان داده شده است.



شکل ۳-الف- پروفیل دمای شارژ برای نرخ جریان 14 L/min



شکل ۳-ب- پروفیل دمای شارژ برای نرخ جریان ۲۱ L/min

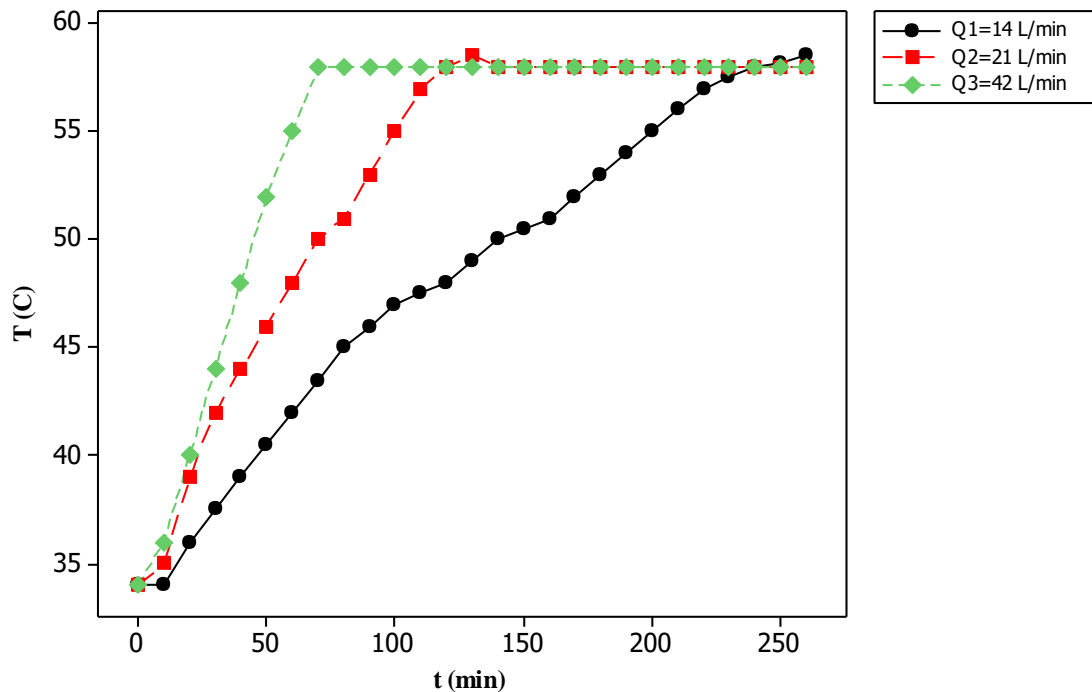


شکل ۳-ج- پروفیل دمای شارژ برای نرخ جریان ۴۲ L/min

۳-۱-۲- تأثیر نرخ جریان HTF ورودی

حجمی HTF ایجاد شد، فرآیند ذوب را افزایش داد و در نتیجه زمان ذوب PCM کاهش یافت [۲۰].

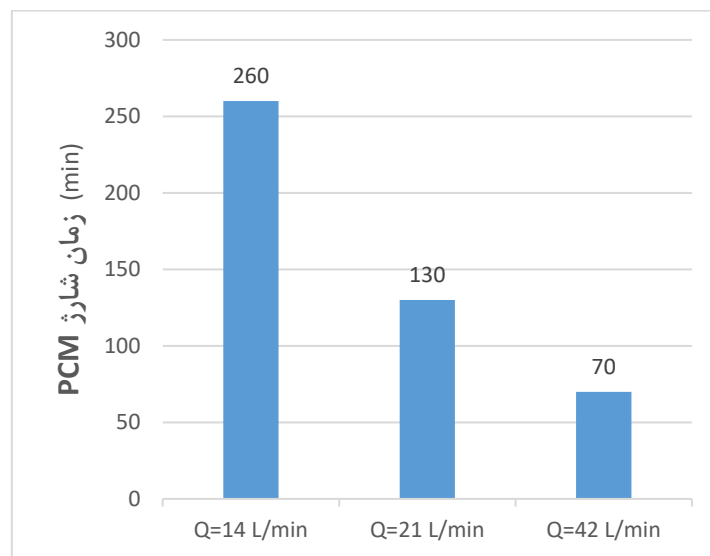
تأثیر نرخ جریان HTF بر فرآیند ذوب در شکل (۴) نشان داده شده است. جریان آنتالپی بالا که به دلیل افزایش سرعت جریان



شکل ۴- اثر نرخ جریان HTF حین فرآیند شارژ PCM

دقیقه و برای سرعت ۴۲ لیتر بر دقیقه ۷۰ دقیقه بود. دلیل این امر، تأثیر پتانسیل انتقال حرارت بالا و جابجایی در سرعت جریان بالا است؛ بنابراین، نرخ انتقال حرارت افزایش یافته و زمان ذوب مربوط به تمام سرعت‌های ورودی HTF کوتاه شده است (شکل (۵) را ببینید).

شکل (۴) خلاصه‌ی نتایج را برای سه سرعت جریان HTF نشان می‌دهد. از شکل (۴) واضح است که برای نرخ‌های جریان بالاتر، زمان ذوب PCM در مقایسه با نرخ جریان پایین کوتاه شده است. بر این اساس، زمان ذوب معادل شرایط ورودی HTF با سرعت ۱۴ لیتر بر ثانیه ۲۶۰ دقیقه، برای سرعت ۲۱ لیتر بر دقیقه ۱۳۰



شکل ۵- مقایسه‌ی زمان شارژ PCM

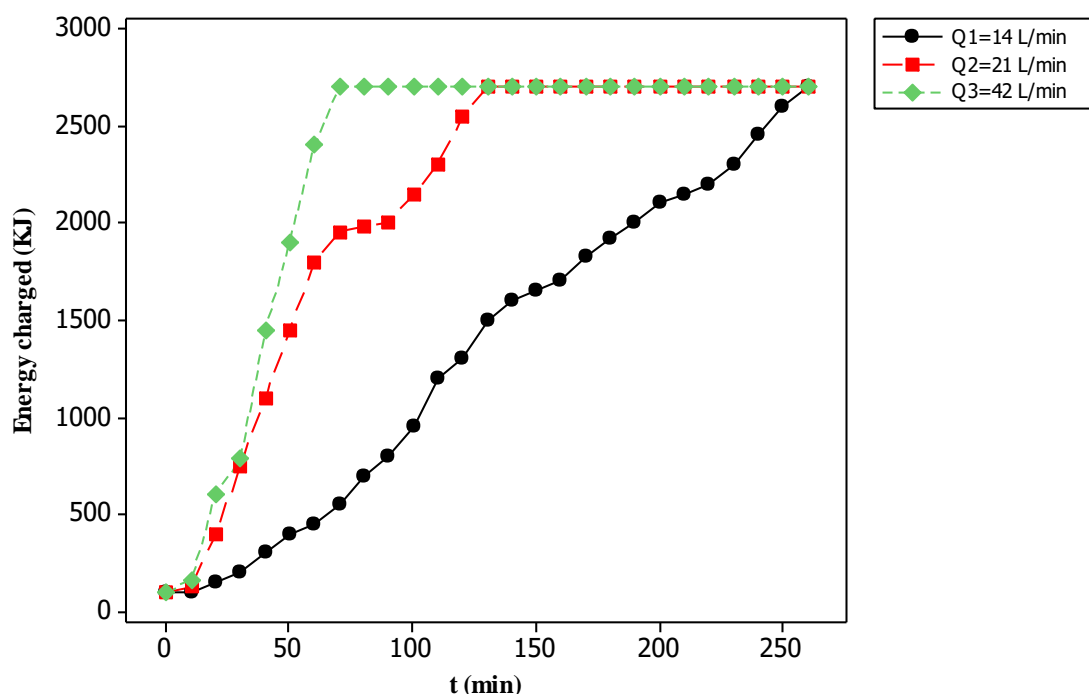
۳-۱-۳- نرخ ذخیره‌ی انرژی

کل انرژی ذخیره شده‌ی حاصل از ذوب PCM در واحد ذخیره‌ی انرژی، مجموع گرمای محسوس و نهان است که با استفاده از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است [۲۱]:

$$Q_i = \begin{cases} mC_{ps}(T_i - T_{ini}) & T \leq T_s \\ mC_{ps}(T_s - T_{ini}) + m\theta_i L_f & T_s \leq T \leq T_l \\ mC_{ps}(T_s - T_{ini}) + mL_f + mC_{pl}(T_i - T_l) & T \geq T_l \end{cases} \quad (3)$$

که در آن T_{ini} دمای اولیه‌ی PCM (۳۴ درجه‌ی سانتیگراد)، m نشان‌دهنده‌ی جرم کل PCM و T_s ، T_l و T_i به ترتیب، دمای مایع، جامد و ثبت شده‌ی PCM است. تغییرات دما در فواصل ۱۰

دقیقه با استفاده از ۱۲ ترموکوپل ثبت شد و نرخ ذخیره‌ی گرما در همان بازه با استفاده از رابطه (۳) محاسبه گردید. شکل ۶، انرژی ذخیره شده در پارافین را برای سرعت‌های HTF ورودی ۱۴، ۲۱ و ۴۲ لیتر بر دقیقه و دمای ورودی ۸۰ درجه‌ی سانتیگراد نشان می‌دهد. مطابق نمودار، پارافین حدود ۲۷۰۰ کیلوژول گرما ذخیره می‌کند. از آنجایی که دمای PCM مقدار کل انرژی ذخیره شده در واحد را تعیین می‌کند، نمودارهای نسبت فاز مایع و تغییرات سرعت متوسط مشابه نمودارهای نرخ ذخیره انرژی هستند. جرم PCM و گرمای نهان آن نیز عوامل دیگری هستند که میزان ذخیره انرژی را تعیین می‌کنند. در مجموع، زمان ذخیره‌ی انرژی با افزایش سرعت ورودی HTF کاهش یافت.



شکل ۶- انرژی ذخیره شده برای سرعت‌های HTF ورودی مختلف

کیلوژول گرما را همانگونه که در شکل (۶) نشان داده شده است، ذخیره می‌کند. با این وجود، مجموع گرمای داده شده‌ی HTF برای شارژ ۲۷۰۰ کیلوژول گرما در واحد ذخیره‌سازی که با استفاده از رابطه‌ی (۵) محاسبه گردید، برابر ۳۵۶۷ کیلوژول بود. بازده انرژی شارژ (η_c) واحد ذخیره سازی را می‌توان به‌عنوان نسبت انرژی ذخیره شده‌ی PCM به مجموع انرژی داده شده‌ی HTF تعریف کرد [۲۴،۲۳]:

$$\eta_c = \frac{m[C_{ps}(T_s - T_{ini}) + L_f + C_{pl}(T_f - T_l)]}{Q_{c,HTF}} \quad (6)$$

۳-۱-۴- بازده انرژی شارژ

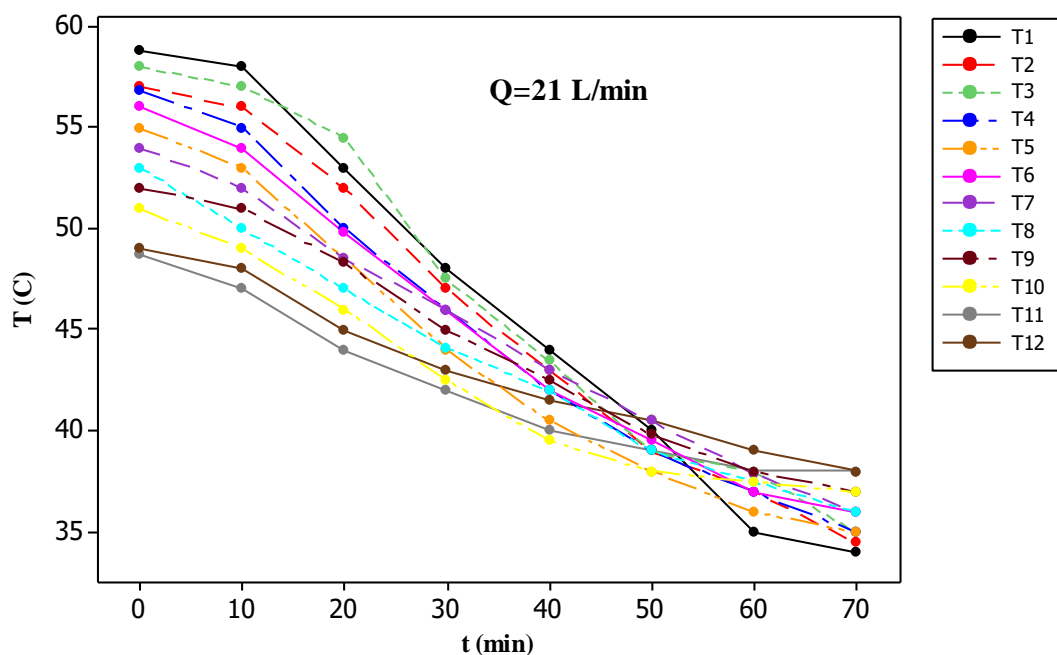
توان انرژی شارژ HTF ($\dot{Q}_{c,HTF}$)، از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [۲۳،۲۲]:

$$\dot{Q}_{c,HTF} = \dot{m}_{HTF} C_{p,HTF} (T_{in} - T_{out}) \quad (4)$$

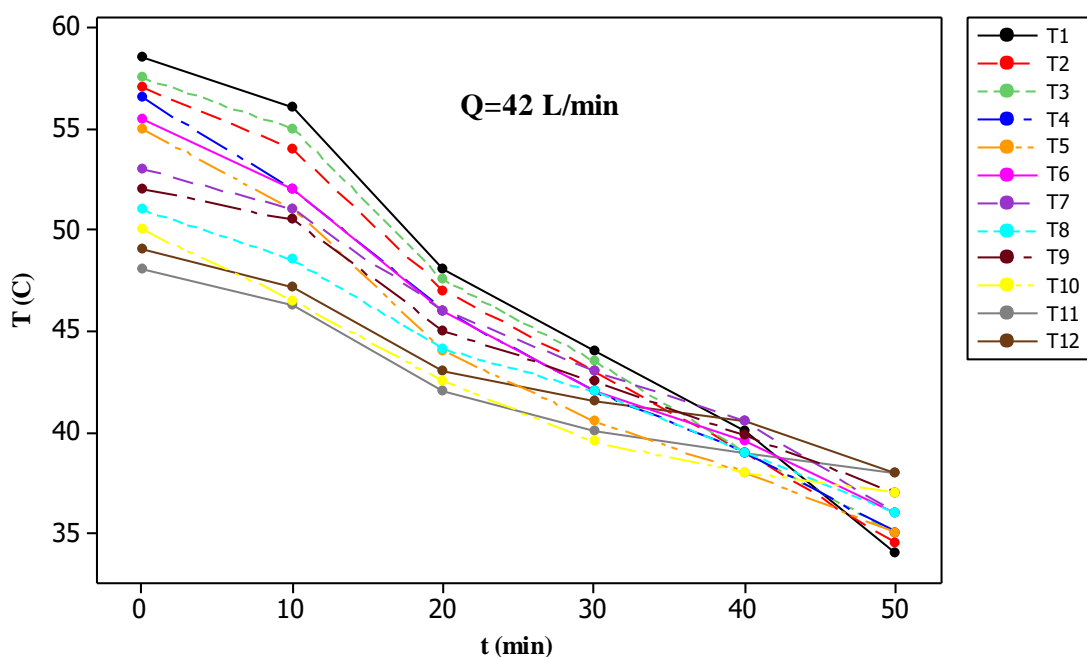
در نتیجه، مجموع انرژی HTF ($Q_{c,HTF}$) را می‌توان با جمع کردن توان داده شده در طول شارژ محاسبه کرد [۲۳،۲۲]:

$$Q_{c,HTF} = \sum_{t=0}^{t_c} (\Delta t_c \dot{Q}_{c,HTF}) \quad (5)$$

در اینجا Δt_c فاصله‌ی زمانی (s) بین هر دو مرحله و t_c مدت زمان ذوب است. در طول فرآیند شارژ، PCM حدود ۲۷۰۰



شکل ۷-ب- پروفیل دمای تخلیه‌ی انرژی برای نرخ جریان ۲۱ L/min



شکل ۷-ج- پروفیل دمای تخلیه‌ی انرژی برای نرخ جریان ۴۲ L/min

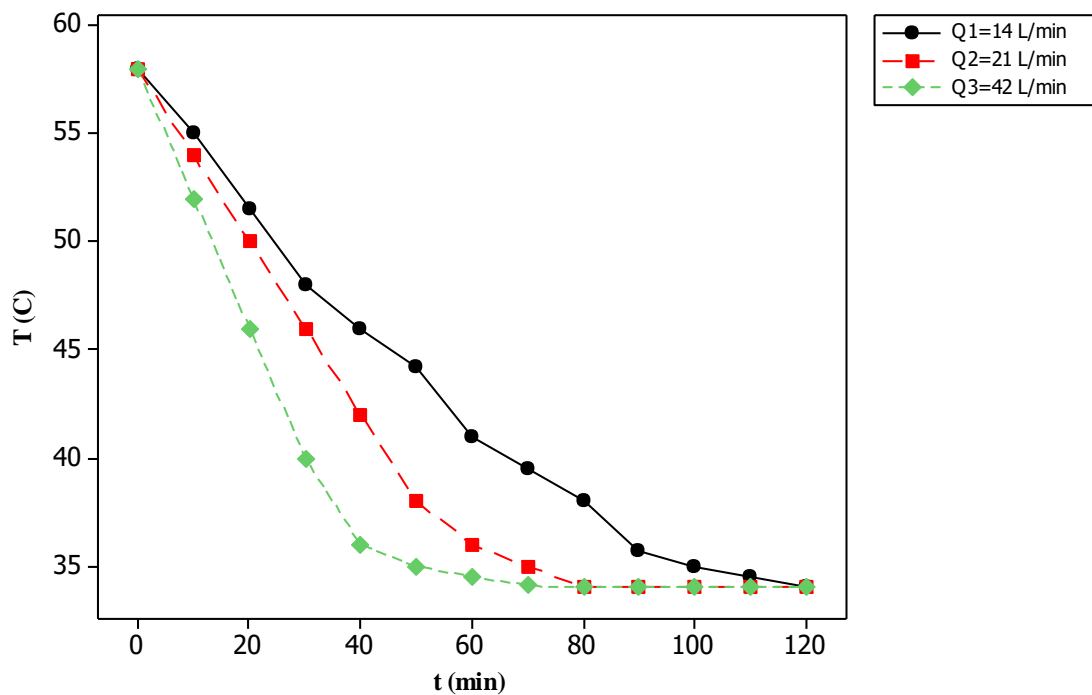
۲۵ درجه‌ی سانتیگراد انجام شده است. در طول انجماد، زمان فرآیند تخلیه تحت تأثیر نرخ جریان HTF قرار می‌گیرد که در آن نرخ‌های جریان بالا منجر به زمان‌های تخلیه‌ی کوتاه‌تر می‌شود [۲۵]. برای دمای ورودی HTF ۸۰ درجه‌ی سانتیگراد،

۳-۲-۲- اثر نرخ جریان HTF

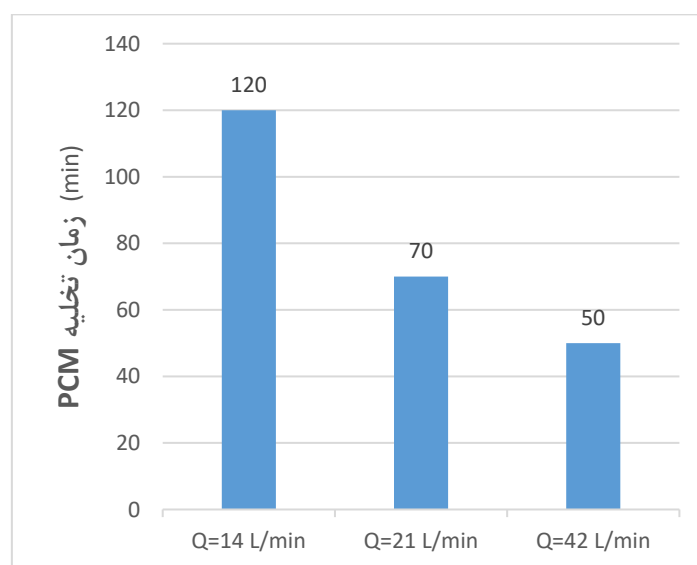
جهت مقایسه، شکل (۸) تأثیر نرخ جریان HTF را بر فرآیند تخلیه‌ی PCM نشان می‌دهد. آزمایش‌ها برای مقادیر نرخ جریان HTF ۱۴، ۲۱ و ۴۲ لیتر بر دقیقه در دمای ورودی HTF ثابت

سرعت جریان بالا است. نرخ انجماد PCM در واحد ذخیره، با نرخ جریان HTF بالاتر افزایش یافت. هنگامی که سرعت جریان حجمی به ۴۲ لیتر بر دقیقه افزایش یافت، رژیم جریان تقریباً متلاطم شد. به همین دلیل، سرعت انتقال گرما افزایش یافت و زمان انجماد همان‌طور که در شکل (۹) نشان داده شده است، کاهش یافت.

تغییر نرخ جریان HTF از ۱۴ به ۲۱ لیتر بر دقیقه، طول مدت انجماد را تا ۴۲٪ کاهش داد. با این حال، برای سرعت HTF ورودی ۴۲ لیتر بر دقیقه، کاهش مربوط به تغییر نرخ جریان، ۲۹٪ بود. زمان انجماد مربوط به شرایط HTF ورودی ۲۵ درجه‌ی سانتیگراد و ۱۴ لیتر بر دقیقه، ۱۲۰ دقیقه، ۲۱ لیتر بر دقیقه، ۷۰ دقیقه و ۴۲ لیتر بر دقیقه، ۵۰ دقیقه بود. دلیل آن، تأثیر پتانسیل انتقال گرمای بالا و انتقال گرمای هدایت مؤثر، در



شکل ۸- اثر نرخ جریان HTF حین فرآیند تخلیه‌ی انرژی PCM



شکل ۹- مقایسه‌ی زمان تخلیه‌ی انرژی PCM

از PCM جذب می‌کند. شکل (۱۰) انرژی تخلیه شده از PCM را نسبت به زمان در نرخ جریان HTF ۱۴، ۲۱ و ۴۲ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. برای جریان ورودی HTF با سرعت ۴۲ لیتر بر ثانیه، PCM حدود ۱۶۵۰ کیلوژول گرما را همانطور تخلیه کرد که در شکل (۱۰) نشان داده شده است. با توجه به فاصله‌ی زمانی بین فرآیند شارژ و تخلیه، مقداری از انرژی ذخیره شده، در حین فرآیند تخلیه از مخزن ذخیره و مسیر لوله‌ها و سایر اجزای سیستم تلف می‌شود. توجه داشته باشید که زمان تخلیه‌ی کل انرژی با افزایش سرعت ورودی HTF کاهش یافت.

۳-۲-۳- نرخ انرژی تخلیه

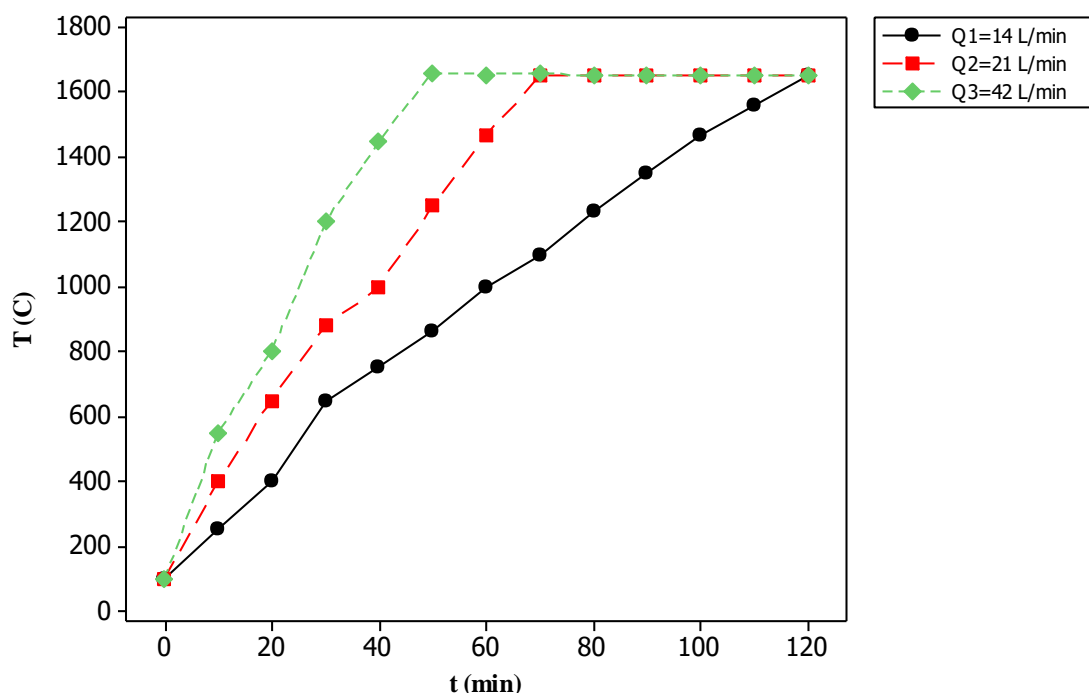
توان انرژی تخلیه‌ی HTF ($\dot{Q}_{d,HTF}$)، از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [۲۳،۲۲]:

$$\dot{Q}_{d,HTF} = \dot{m}_{HTF} C_{p,HTF} (T_{out} - T_{in}) \quad (7)$$

انرژی تخلیه‌ی HTF ($Q_{d,HTF}$)، مجموع توان دریافت شده (بازیابی شده) از PCM در طول دوره‌ی تخلیه است [۲۳،۲۲]:

$$Q_{d,HTF} = \sum_{t=0}^{t_d} (\Delta t_d \dot{Q}_{d,HTF}) \quad (8)$$

در اینجا Δt_d فاصله‌ی زمانی (s) بین هر دو مرحله و t_d مدت زمان انجام است. HTF هنگام عبور از کوئل ماریپیچی گرما را



شکل ۱۰- انرژی تخلیه شده برای سرعت‌های HTF ورودی مختلف

۳-۳- تغییرات دمای HTF حین فرآیند شارژ و تخلیه

هدف استفاده از مخزن ذخیره‌ی انرژی در مدار آبگرمکن خورشیدی، تامین آب گرم مصرفی در ساعاتی از روز است که انرژی خورشیدی در دسترس نیست؛ از این رو، افزایش دمای مخزن آب گرم با استفاده از تخلیه‌ی انرژی PCM، نتیجه‌ی مطلوب است. شکل (۱۱) روند تغییرات دمای HTF مخزن در سه آزمایش با نرخ جریان HTF ۱۴، ۲۱ و ۴۲ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌کنید، انرژی تخلیه شده از PCM در تبادل با HTF باعث گرم شدن آن می‌شود. دمای HTF برای سرعت‌های ورودی ۱۴، ۲۱ و ۴۲ لیتر بر ثانیه، به ترتیب پس از ۱۲۰، ۷۰ و ۵۰ دقیقه به دمای ۳۴ درجه رسیده و در

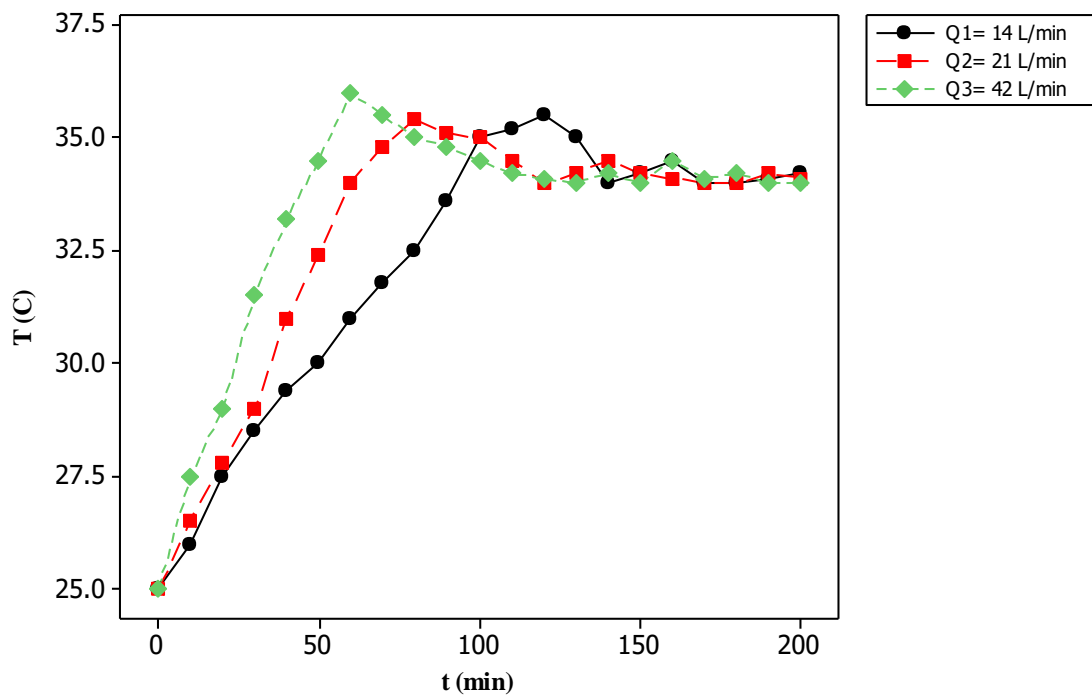
۳-۲-۴- بازده انرژی تخلیه

مشابه بازده انرژی شارژ، بازده انرژی تخلیه واحد ذخیره‌ی انرژی را می‌توان به عنوان نسبت گرمای دریافت شده (بازیابی شده) توسط HTF در حین فرآیند تخلیه به گرمای ذخیره شده در واحد تعریف کرد [۲۷،۲۶،۲۳]:

$$\eta_d = \frac{Q_{d,HTF}}{m [C_{ps}(T_s - T_{ini}) + L_f + C_{pl}(T_f - T_l)]} \quad (9)$$

با استفاده از رابطه‌ی (۹)، بازده واحد ذخیره‌ی انرژی برای فرآیند تخلیه، ۶۱،۱٪ است.

نهایت با جامد شدن PCM درون مخزن ذخیره دمای آن ثابت می‌ماند.



شکل ۱۱- تغییرات دمای آب درون مخزن حین فرآیند تخلیه انرژی

ذخیره‌سازی گرمای نهان، به‌ویژه برای کاربردهای گرمایش خورشیدی قابل استفاده باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار ذوب و انجماد پارافین در یک مبدل حرارتی با کوئل مارپیچ دوگانه‌ی افقی، طی فرآیندهای ذوب و انجماد، مورد بررسی قرار گرفت. تأثیر پارامتر عملیاتی سرعت جریان HTF به‌طور دقیق مورد مطالعه قرار گرفت و فیزیک انتقال حرارت در طول فرآیند تغییر فاز پارافین توضیح داده شد. هدایت گرمایی کم PCM باعث مقاومت گرمایی قابل توجهی در برابر انتقال گرما در PCM شد؛ بنابراین، تغییر نرخ جریان برای غلبه بر مقاومت حرارتی PCM موثر بود. مشخص شد که زمان شارژ PCM با افزایش سرعت ورودی HTF به دلیل افزایش جابجایی و اختلاف دمای زیاد بین PCM و HTF کاهش می‌یابد. سرعت جریان تأثیر قابل توجهی بر فرآیند انجماد PCM داشت؛ زیرا تخلیه عمدتاً توسط هدایت کنترل می‌شد. مشاهده شد که زمان تخلیه تحت تأثیر نرخ جریان HTF قرار گرفت و نرخ جریان بالاتر منجر به زمان تخلیه‌ی کوتاه‌تر شد. PCM ۲۷۰۰ کیلوژول گرما را در ۷۰ دقیقه برای دمای ورودی HTF ۸۰ درجه‌ی سانتیگراد در حین شارژ، ذخیره کرد و ۱۶۵۰ کیلوژول گرما را در ۵۰ دقیقه در دمای HTF ۲۵ درجه سانتیگراد و ۴۲ لیتر در دقیقه در واحد ذخیره، تخلیه‌ی انرژی کرد. انتظار می‌رود که نتایج این تحلیل برای طراحی مبدل‌های گرمایی مارپیچی

نمادها

ظرفیت گرمایی مخصوص ($J/Kg^{\circ}C$)	C_p
ضریب هدایت حرارتی ($W/m^{\circ}C$)	k
ظرفیت گرمایی نهان (J/Kg)	L_f
جرم کل PCM (kg)	m
نرخ جریان جرمی (kg/s)	\dot{m}
انرژی (J)	Q
توان (W)	\dot{Q}
ضریب عملکرد	R
زمان (s)	t
دما ($^{\circ}C$)	T
حجم واحد ذخیره‌سازی (m^3)	V

نمادهای یونانی

نسبت فاز مایع	θ
بازده	η

[10] Rosen, M. A. 2001. The exergy of stratified thermal energy storages. *Solar Energy* 71:173–85.

[11] Castell, A., C. Sole, M. Medrano, J. Roca, L. F. Cabeza, and D. Garcia. 2008. Natural convection heat transfer coefficients in phase change material (PCM) modules with external vertical fins. *Applied Thermal Engineering* 28:1676–86.

[12] Awani, ., R. Chargui, and B. Tashtoush. 2021. Experimental nd numerical evaluation of a new design of a solar thermosyphon water heating system with phase change material. *J. Energ. Stor.* 41,102948.

[13] Fahad, F. S. and I. Koc . 2022. An experimental study to improve solar heating water using PCM and integrated with helical heat exchanger. *Basrah J. Eng. Sci.*, Vol. 22, No. 2, 72-79.

[14] Syahrudin, A., Jalaluddin and A. Hayat. 2020. Performance analysis of solar water heating system with plate collector integrated PCM storage. *Int. J. of Eng.*. pISSN 2615-5109 Volume 3, Number 2, pp. 143-149.

[15] Halim, A., Jalaluddin, A. A. Mochtar and E. Arif. Performance investigation of solar water heating system integrated with PCM storage. 2020. *J. Mech. Eng. Research and Developments*. Vol. 43, No. 3, pp. 291-300.

[16] Omara, A., A., M., et al. Energy and exergy analysis of solar water heating system integrated with phase change material (PCM). 2018. *International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering*.

[17] H. Niyas, C.R.C. Rao, P. Muthukumar, Performance investigation of wania lab-scale latent heat storage prototype – experimental results, *Sol. Energy* 155 (2017) 971–984.

[18] S. Seddegh, M.M. Joybari, X. Wang, F. Haghighat, Experimental and numerical characterization of natural convection in a vertical shell-and-tube latent thermal energy storage system, *Sustain. Cities Soc.* 35 (2017) 13–24.

[19] M.M. Joybari, F. Haghighat, S. Seddegh, Y. Yuan, Simultaneous charging and discharging of phase change materials: development of correlation for liquid fraction, *Sol. Energy* 188 (2019) 788–798.

[20] S.P. Jesumathy, M. Udayakumar, S. Suresh, S. Jegadheeswaran, An experimental study on heat transfer characteristics of paraffin wax in horizontal double pipe heat latent heat storage unit, *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 45 (2014) 1298–1306.

[21] R. Anish, V. Mariappan, M. Mastani Joybari, Experimental investigation on the melting and solidification behavior of erythritol in a horizontal shell and multi-finned tube latent heat storage unit, *Appl. Therm. Eng.* 161 (2019) 114194.

[22] M. Kabbara, D. Groulx, A. Joseph, A parametric experimental investigation of the heat transfer in a coil-in-tank latent heat energy storage system, *Int. J. Therm. Sci.* 130 (2018) 395–405.

[23] F. Agyenim, the use of enhanced heat transfer phase change materials (PCM) to improve the coefficient of performance (COP) of solar powered LiBr/H₂O absorption cooling systems, *Renew. Energy* 87 (2016) 229–239.

زیر نویس ها

شارژ	c
تخلیه انرژی	d
نهایی	f
داخلی	i
ورودی	in
اولیه	ini
خروجی	out
مایع	l
تغییر فاز	m
جامد	s

مراجع

[1] Hedayatizadeh, M., Y. Ajabshirchi, F. Sarhaddi, A. Safavinejad, S. Farahat, and H. Chaji. 2013. Thermal and electrical assessment of an integrated solar photovoltaic thermal (PV/T) water collector equipped with a compound parabolic concentrator (CPC). *Int. J. Green Energ.* 10:494–522.

[2] Cabeza, L. F., M. Ibanez, C. Sole, J. Roca, and M. Nogue's. 2006. Experimentation with a water tank, including a PCM module. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 90:1273–82.

[3] Kousksou, T., P. Bruel, G. Cherreau, V. Leousoff, and T. El Rhafiki. 2011. PCM storage for solar DHW: From an unfulfilled promise to a real benefit. *Solar Energy* 85:2033–40.

[4] Fazilati, M.A., and A. A. Alemrajabi. 2013. Phase change material for enhancing solar water heater, an experimental approach. *Energy Conversion and Management* 71:138–45.

[5] Talmatsky, E., and A. Kribus. 2008. PCM storage for solar DHW: An unfulfilled promise. *Solar Energy* 82:861–69

[6] Huang, M. J., P. C. Eames, S. McCormack, P. Griffiths, and N. J. Hewitt. 2011. Microencapsulated phase change slurries for thermal energy storage in a residential solar energy system. *Renewable Energy* 36:2932–39.

[7] Wu, S., G. Fang, and X. Liu. 2011. Dynamic discharging characteristic simulation on solar heat storage system with spherical capsules using paraffin as heat storage material. *Renewable Energy* 36:1190–95.

[8] Rezanian, A., H. Taherian, and D. D. Ganji. 2012. Experimental investigation of a natural circulation solar domestic water heater performance under standard consumption rate. *Int. J. Green Energ.* 9:322–34.

[9] Mazman, M., F. Luisa, L. F. Cabeza, H. Mehling, M. Nogue, H. Evliya, and H. O. Paksoy. 2009. Utilization of phase change materials in solar domestic hot water systems. *Renewable Energy* 34:1639–43.

- [26] A. Al-Abidi, S. Mat, K. Sopian, Y. Sulaiman, A. Mohammad, Heat transfer enhancement for PCM thermal energy storage in triplex tube heat exchanger, *Heat Tran. Eng.* 37 (2016) 705–712.
- [27] M. Rezaei, M.R. Anisur, M.H. Mahfuz, M.A. Kibria, R. Saidur, I.H.S.C. Metselaar, Performance and cost analysis of phase change materials with different melting temperatures in heating systems, *Energy* 53 (2013) 173–178.
- [24] D.K. Johar, D. Sharma, S.L. Soni, P.K. Gupta, R. Goyal, Experimental investigation on latent heat thermal energy storage system for stationary C.I. engine exhaust, *Appl. Therm. Eng.* 104 (2016) 64–73.
- [25] Y. Wang, L. Wang, N. Xie, X. Lin, H. Chen, Experimental study on the melting and solidification behavior of erythritol in a vertical shell-and-tube latent heat thermal storage unit, *Int. J. Heat Mass Tran.* 99 (2016) 770–781.