مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۵)
دوره‌ی ۳۲-۳، شماره‌ی ۲، ص. ۱۱۷-۱۲۳، (یادداشت فنی)

Research Note

بررسی تجربی تأثیر قطر کپسول بر عملکرد سیستم ذخیره‌ساز حرارتی حاوی مواد تغییر فازدهنده در آبگرمکن خورشیدی تخت

سیروس کوهیان افضل (دانشجوی کارشناسی ارشد)
محمد امینی (استادیار)
سید امیرحسین زمزمیان* (استادیار)
پژوهشکده‌ی انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی

با توجه به متناوب بودن تابش انرژی خورشیدی، وجود سیستمی برای ذخیره‌ی انرژی ضروری به نظر می‌رسد. ذخیره‌ی انرژی به‌صورت نهان در یک آبگرمکن خورشیدی، در مواد تغییر فاز دهنده انجام می‌گیرد. این مواد اغلب درون یک ظرف کپسوله شده و به‌صورت غیر مستقیم درون مخزن آب قرار می‌گیرند. شکل، جنس و اندازه‌ی این ظرف در عملکرد سیستم ذخیره تأثیر خواهد داشت. در این نوشتار تأثیر قطر کپسول بر عملکرد سیستم ذخیره‌ی حرارت به‌صورت تجربی بررسی شده است. بدین‌منظور پارافین به‌عنوان ماده‌ی تغییر فاز دهنده در لوله‌هایی از جنس آلومینیوم با قطرهای ۱۲، ۱۰ و ۶ میلی‌متر کپسوله شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج حاصله حاکی از آن است که میزان ذخیره‌ی انرژی نسبت به حالت بدون مواد تغییر فاز دهنده، با کپسول آلومینیومی به‌قطرهای ۱۲، ۱۰ و ۶ میلی‌متر، به‌ترتیب ۱۱٫۲٪، ۱۵٫۳٪ و ۴٫۴٪ افزایش داشته است.

واژگان کلیدی: انرژی خورشیدی، آبگرمکن خورشیدی، ذخیره‌ی انرژی حرارتی، مواد تغییر فاز دهنده، کپسوله کردن.

cyrus.koohian@gmail.com
mohammadaminy@merc.ac.ir
azamzamian@merc.ac.ir

۱. مقدمه

به‌دلیل ماهیت تناوبی تابش انرژی خورشید، استفاده از یک سیستم ذخیره‌ی انرژی در سیستم‌های خورشیدی برای ذخیره‌ی حرارت در مواقع با تابش زیاد و استفاده از آن در مواقع لزوم، ضروری به نظر می‌رسد. یکی از این سیستم‌ها «آبگرمکن خورشیدی» است که لزوم به‌کارگیری سیستم ذخیره‌ی حرارت در آن انکارناپذیر است. انرژی حرارتی به دو شکل قابل ذخیره است: ۱. ذخیره‌ی حرارت به‌شکل محسوس با افزایش دمای ماده‌ی ذخیره کننده، که در آبگرمکن‌های خورشیدی عمدتاً آب است؛ ۲. ذخیره‌ی حرارت به‌شکل نهان با تغییر فاز یک ماده‌ی ذخیره‌ساز. اشکال عمده‌ی ذخیره‌ی محسوس حرارت، ظرفیت کم مخزن برای ذخیره‌ی مواد به این روش است که نتیجه‌ی آن افزایش سطح جمع‌آوری لازم و حجم مخزن ذخیره خواهد بود. به‌علاوه، گرمای نهان ذوب مواد نسبت به گرمای ویژه‌ی آب بسیار بالاتر است و گرمای ذخیره شده به‌صورت نهان در یک ماده‌ی تغییر فاز دهنده، بسیار بیشتر از گرمای ذخیره شده به‌صورت محسوس در همان مقدار آب خواهد بود. مواد تغییر فاز دهنده[1] هم می‌توانند در تماس مستقیم با آب استفاده شوند و هم درون یک ظرف و در تماس غیر مستقیم با آب قرار داشته باشند. استقرار مواد تغییر فاز دهنده درون یک ظرف، برای جلوگیری از ایجاد تماس مستقیم با آب را «کپسوله‌کردن[2]» می‌نامند. اما این که کپسوله‌کردن را توسط چه موادی، با چه هندسه‌یی، و در چه اندازه‌یی باید انجام داد موضوعی است که در سال‌های اخیر مورد مطالعه‌ی بسیاری از محققین بوده است. سایتو و هیروس به‌صورت نظری و تجربی رفتار گرمایی گذرای یک واحد ذخیره‌ی انرژی نهانی در کپسول‌های کروی را بررسی کردند.[1] آنان آثار تغییر در قطر کپسول، نرخ انتقال حرارت سیال عامل (آب)، دمای ورودی، جنس کپسول و ماده‌ی تغییر فاز دهنده بر عملکرد این واحد ذخیره را با شبیه‌سازی رایانه‌یی انجام داده و با نتایج آزمایشگاهیِ یک نمونه واحد ذخیره کننده‌ی نهانی، به حجم ۳۰۰ لیتر مقایسه کردند. بیزلی و رامانارایانان با استفاده از فرمول‌بندی فازهای مجزا، یک مدل عددی یک‌بعدی برای بررسی پاسخ گذرای ترمودینامیکی یک بستر گلوله‌یی مواد تغییر فاز دهنده ساختند.[2] نتایج مدل برای بستر گلوله‌یی پلی‌پروپیلن که از پارافین به‌عنوان مواد تغییر فاز دهنده پر شده، در دو حالت شارژ و تخلیه گرمایی مقایسه شد. نالوسامی و همکاران نیز درخصوص تهویه‌ی مطبوع هوای ساختمان با استفاده از بستر مواد تغییر فاز دهنده به‌صورت آزمایشگاهی تحقیق کردند.[3] حالت‌های به‌کارگیری و مزایای چنین سیستمی در مدیریت انرژی ساختمان در این گزارش بررسی شده است. ملینگ و همکاران اثر اضافه‌کردن مدول‌های مواد تغییر فاز دهنده به‌صورت لوله‌های استوانه‌یی در بالای مخزن را بر افزایش عایق‌بندی مخزن و

---

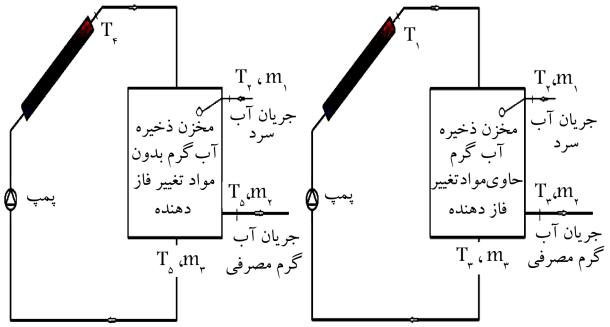
* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۱۰/۸، اصلاحیه ۱۳۹۴/۵/۲۵، پذیرش ۱۳۹۴/۷/۶.

زمان کارایی تانک آب به‌صورت عددی و تجربی بررسی کردند.[۴] فضیلتی و رجبی در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از پارافین در کپسول‌های کروی از جنس پلی‌اتیلن را به‌عنوان مواد تغییر فاز دهنده در آبگرمکن خورشیدی مدل مورد بررسی قرار دادند.[۵] الغنام و همکاران، فرایند ذوب و انجماد آب به‌عنوان مواد تغییر فاز دهنده را در کپسول‌های کروی با جنس‌های مختلف به‌صورت عددی مورد بررسی قرار دادند.[۶] تای و برونو تأثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده درون کپسول‌های لوله‌یی از جنس پی‌وی‌سی را به‌صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند.[۷]

در نوشتار حاضر، تأثیر قطر کپسول بر عملکرد آبگرمکن خورشیدی حاوی پارافین به‌عنوان مواد تغییر فاز دهنده به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. در این آزمایش، پارافین با دمای ذوب ۵۵°C به‌عنوان مواد تغییر فاز دهنده درون کپسول‌های استوانه‌یی از جنس آلومینیوم و با ضخامت جدار ۱ میلی‌متر با قطر ۱۲، ۱۰ و ۶ میلی‌متر مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج با هم مقایسه شد.

۲. روش تحقیق

در این مقاله تأثیر قطر کپسول در عملکرد سیستم ذخیره‌ی حرارت حاوی مواد تغییر فاز دهنده مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به متفاوت بودن شرایط جوی ــ شامل دمای هوا، سرعت و جهت وزش باد ــ و شرایط تابش خورشید در هر روز، برای تشخیص تأثیر تغییر پارامترها باید آبگرمکن خورشیدی حاوی و فاقد مواد تغییر فاز دهنده را مقایسه کرد. بدین‌منظور دو آبگرمکن خورشیدی کاملاً مشابه، یکی حاوی مواد تغییر فاز دهنده و دیگری فاقد آن، همزمان و در شرایط یکسان مورد آزمایش قرار خواهد گرفت. یک گردآورنده‌ی خورشیدی صفحه تخت، یک پمپ و یک مخزن ذخیره‌ی کاملاً مشابه، اجزاء اصلی تشکیل‌دهنده‌ی سیستم هر آبگرمکن است؛ مخزن ذخیره‌ی یکی از آبگرمکن‌ها فقط حاوی آب و دیگری حاوی آب و ماژول‌های مواد تغییر فاز دهنده است. آزمایش در روزهای شنبه مورخ ۹۲/۰۵/۱۲، دوشنبه ۹۲/۰۵/۱۴ و سه‌شنبه ۹۲/۰۵/۱۵ به‌ترتیب برای تانک حاوی مواد تغییر فاز دهنده با کپسول از جنس آلومینیوم با قطر ۱۰ میلی‌متر، تانک حاوی مواد تغییر فاز دهنده با کپسول از جنس آلومینیوم با اندازه‌ی ۱۲ میلی‌متر، و تانک حاوی مواد تغییر فاز دهنده با کپسول از جنس آلومینیوم با اندازه‌ی ۶ میلی‌متر انجام شده است. در ضمن هر روز آبگرمکن خورشیدی فاقد مواد تغییر فاز دهنده نیز در شرایط کاملاً یکسان مورد آزمایش قرار خواهد گرفت. مشخصات جمع‌آورنده‌ها و مخازن استفاده شده در سیستم به‌ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. جریان آب توسط دو دستگاه پمپ کاملاً مشابه درون آبگرمکن‌ها گردش می‌کند. برای اندازه‌گیری درجه حرارت در نقاط تعیین شده از یک دماسنج دیجیتال هشت کاناله با قابلیت اندازه‌گیری و ثبت داده در حافظه با حساسیت ۰٫۱°C و ترموکوپل از نوع K (آلومل ـ کرومل) استفاده شده است. در شکل ۱ شمایی از دستگاه مورد آزمایش و نقاط اندازه‌گیری درجه حرارت نشان داده شده است؛ همچنین نقاط اندازه‌گیری دما در جدول ۳



الف) حاوی مواد تغییر فاز دهنده؛ ب) فاقد مواد تغییر فاز دهنده.

شکل ۱. شمایی از مجموعه دستگاه مورد آزمایش.

شکل ۲. تصویری از کپسول‌های استفاده شده.

تشریح شده است. در این آزمایش از پارافین صنعتی با چربی حدود ۵٪ ـ ۷٪ به‌عنوان مواد تغییر فاز دهنده استفاده شده است. مشخصات فیزیکی این پارافین در جدول ۴ ارائه شده است.

کپسول‌ها به‌شکل استوانه‌یی انتخاب شده و مبدل آن شامل ۸۸ استوانه به ارتفاع ۲۸۰ میلی‌متر است که ابتدا و انتهای آنها با دو صفحه از جنس پلکسی‌گلاس پوشانده شده است. کپسول‌ها از جنس آلومینیوم و با قطر ۱۲، ۱۰ و ۶ میلی‌متر انتخاب شده است. ضخامت جدار کپسول‌ها در تمام موارد ۱ میلی‌متر است. مشخصات کپسول‌ها در جدول ۵ مشخص شده است. همچنین در شکل ۲ نمایی از ماژول‌های مواد تغییر فاز دهنده‌ی مورد استفاده در مخزن نشان داده شده است. شرایط در نظر گرفته شده هنگام آزمایش دستگاه عبارت است از:

- زمان شروع آزمایش ساعت ۹ صبح است.
- = با توجه به قابل استفاده بودن آب گرم بهداشتی تا دمای حدود ۴۵°C، آزمایش

جدول ۱. مشخصات گردآورنده‌ی خورشیدی صفحه‌تخت.

ردیف	قسمت	توضیحات
۱	قاب	از ورق آلومینیوم به ضخامت ۱ میلی‌متر و ابعاد ۵۰۰ × ۱۳۳۵ میلی‌متر و عمق ۸۰ میلی‌متر
۲	شیشه	شیشه‌ی معمولی تک‌جداره به ضخامت ۳ میلی‌متر و ابعاد ۴۴۵ × ۱۲۸۰ میلی‌متر
۳	جاذب	ورق آلومینیومی پوشیده شده با رنگ سیاه مخصوص به ابعاد ۴۳۵ × ۱۲۷۰ میلی‌متر، چگالی ۲۷۰۰ kg/m^3 و گرمای ویژه ۰٫۹۱ kJ/kg
۴	عایق	ورق فوم پلی‌اورتان به ضخامت ۲۵ میلی‌متر و ضریب انتقال حرارت ۰٫۰۴۵ $W/m^2 \cdot K$

جدول ۲. مشخصات مخزن.

ردیف	قسمت	توضیحات
۱	مخزن	استوانه‌یی با کف و درب بسته شده، قطر داخلی ۲۸۰ میلی‌متر، ضخامت جدار ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰۰ میلی‌متر، چگالی ۷۷۸۰ kg/m^3، گرمای ویژه ۰٫۴۹ kJ/kg، ضریب انتقال حرارت ۵۵ $W/m^2 \cdot K$
۲	عایق	ورق اسفنجی پلی‌اتیلن به‌ضخامت ۱۳ میلی‌متر و ضریب انتقال حرارت ۰٫۰۴۵ $W/m^2 \cdot K$

جدول ۳. محل قرارگیری ترموکوپل‌ها.

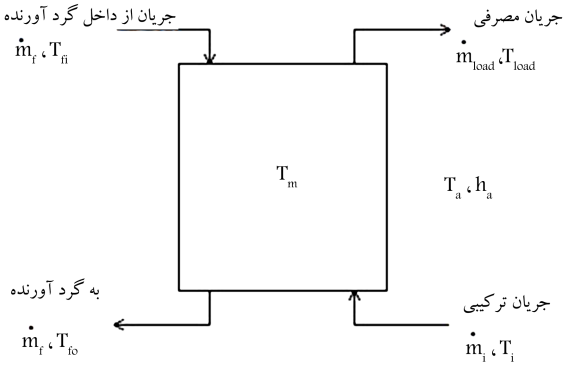
ردیف	شماره ترموکوپل	توضیحات
۱	۱	دمای آب خروجی از کلکتور در آبگرمکن حاوی PCM
۲	۲	دمای آب سرد ورودی به مخزن در هر دو آبگرمکن
۳	۳	دمای آب خروجی از مخزن در آبگرمکن حاوی PCM (آب گرم مصرفی و آب ورودی به کلکتور)
۴	۴	دمای آب خروجی از کلکتور در آبگرمکن فاقد PCM
۵	۵	دمای آب خروجی از مخزن در آبگرمکن فاقد PCM (آب گرم مصرفی و آب ورودی به کلکتور)
۶	۶	دمای هوا

جدول ۴. مشخصات پارافین به‌عنوان ماده‌ی تغییر فاز دهنده در چرخه‌ی آزمایش.

خاصیت	مقدار
دمای نقطه ذوب	۵۵°C
گرمای ویژه در حالت جامد	۲ $kJ/kg^\circ K$
گرمای ویژه در حالت مایع	۲٫۱۵ $kJ/kg^\circ K$
گرمای نهان ذوب	۱۸۷ kJ/kg
چگالی حالت جامد (در ۱۵°C)	۹۱۰ kJ/m^3
چگالی حالت مایع (در ۷۰°C)	۷۹۰ kJ/m^3

دستگاه و ثبت داده‌ها تا مادامی که دمای آب گرم مصرفی مطابق (T_2) بوده، ادامه داشت.

- هر دو پمپ در دور کم کار کرده و دبی آنها در کم‌ترین مقدار برابر با ۲٫۶ Lit/min تنظیم شده است.
- علی‌رغم اینکه هیچ روند ثابتی برای مصرف آب گرم بهداشتی نمی‌توان در نظر گرفت، عمده‌ی مصرف آب گرم بهداشتی را می‌توان در ۳ دوره پیک در ساعت‌های ۸، ۱۳ و ۱۷ در نظر گرفت.[۸] با توجه به این که شروع کار دستگاه مورد آزمایش ساعت ۹ صبح است، لذا در دو دوره در ساعت‌های ۱۳ و ۱۷ از آبگرمکن‌های مورد نظر آب برداشت شده است. برداشت آب همزمان شروع شده و در یک زمان به اتمام خواهد رسید. در هر بار برداشت، ۵ لیتر آب گرم مصرف شده و بلافاصله و به‌صورت همزمان ۵ لیتر آب سرد به آبگرمکن‌ها اضافه می‌شود.
- در پایان آزمایش دستگاه، مواردی برای هر مرحله‌ی آزمایش محاسبه و مورد بحث قرار می‌گیرد. در شکل ۳ شمایی از موازنه‌ی انرژی در مخزن ذخیره‌ی آب نشان داده شده است. برای مخزن ذخیره‌ی آب موازنه‌ی انرژی مطابق رابطه‌ی ۱



شکل ۳. موازنه انرژی در تانک ذخیره‌ی آب.

خواهد بود.[۹]

$$[(\rho cv)_{water} + (\rho Vc)_{tank} + (\rho vc)_{pcm}]\frac{dT_{fi}}{dt} + (\rho v\Delta H)_{pcm} = q_u - q_{load} - (UA)_{tank}(T_m - T_a) \quad (۱)$$

$$q_u = \dot{m}_f c_p (T_{fi} - T_{fo}) \quad (۲)$$

$$q_{load} = \dot{m}_{load} c_p (T_{load} - T_i) \quad (۳)$$

در رابطه‌ی ۱ جمله‌ی $(\rho v\Delta H)_{pcm}$ نشان‌گر انرژی ذخیره شده به‌صورت گرمای نهان در مواد تغییر فاز دهنده است. با توجه به این که تمامی اجزاء در این رابطه قابل محاسبه است، مقدار انرژی ذخیره شده به‌صورت نهان نیز قابل محاسبه خواهد بود. با توجه به روابط ۱ تا ۳، پس از انجام آزمایش نسبت به محاسبه‌ی مقدار انرژی ورودی به مخزن، انرژی استفاده شده به‌صورت آب گرم مصرفی، انرژی تلف شده از جدارهای مخزن، انرژی ذخیره شده به‌صورت محسوس و انرژی ذخیره شده‌ی نهانی اقدام شده است. موارد مقایسه شده برای حالت‌های مختلف کپسول‌ها عبارت است از:

جدول ۵. مشخصات کپسول‌ها.

ردیف	جنس کپسول	قطر کپسول (میلی‌متر)	ضخامت جدار (میلی‌متر)	ارتفاع کپسول (میلی‌متر)	مشخصات حرارتی
۱	آلومینیوم	۱۲	۱	۲۸۰	چگالی ۲۷۰۰ kg/m^3 ـ گرمای ویژه ۰٫۹۱ kJ/kg ـ ضریب انتقال حرارت ۲۰۵ $W/m^2\,^\circ K$
۲	آلومینیوم	۱۰	۱	۲۸۰	چگالی ۲۷۰۰ kg/m^3 ـ گرمای ویژه ۰٫۹۱ kJ/kg ـ ضریب انتقال حرارت ۲۰۵ $W/m^2\,^\circ K$
۳	آلومینیوم	۶	۱	۲۸۰	چگالی ۲۷۰۰ kg/m^3 ـ گرمای ویژه ۰٫۹۱ kJ/kg ـ ضریب انتقال حرارت ۲۰۵ $W/m^2\,^\circ K$

ردیف	جنس کپسول	قطر کپسول (میلیمتر)	طول کپسول (میلیمتر)	جرم کپسول خالی (گرم)	جرم کپسول پر (گرم)	تعداد کپسول در مجموعه	حجم کل مجموعه کپسول (لیتر)	حاصل ضرب $\rho \times V \times C$ مجموعه کپسول (KJ)
۱	آلومینیوم	۱۲	۲۸۰	۲۶٫۱	۴۶٫۱	۸۸	۳٫۸	۷٫۱۱
۲	آلومینیوم	۱۰	۲۸۰	۲۱٫۴	۳۴٫۲	۸۸	۲٫۹	۵٫۷۱
۳	آلومینیوم	۶	۲۸۰	۱۱٫۹	۱۵٫۱	۸۸	۱٫۷	۳٫۲۵۶

ـ نسبت انرژی ذخیره شده به‌صورت نهان به کل انرژی ذخیره شد:

$$\frac{q_{lat}}{q_{sen}+q_{lat}}$$

ـ نسبت انرژی ذخیره شده نهان به کل انرژی نهان قابل ذخیره در حالت نظری:

$$\frac{q_{lat}}{q_{lat,\max}}$$

ـ درصد افزایش ذخیره‌ی انرژی با استفاده از پارافین نسبت به حالت پایه:

$$\frac{q_{storage_{pcm+water}}-q_{storage_{water}}}{q_{storage_{water}}}$$

با توجه به شکل ۳ و رابطه‌های ۱، ۲ و ۳ و با توجه به شرایط در نظر گرفته شده برای دستگاه مورد آزمایش، خواهیم داشت:

- $\dot{m}_f = ۲٫۶ \text{ lit/ min}$
- $m_{load} = m_i = ۵ \text{ lit/charge or discharge}$
- $T_{fi} = T_۱ \text{ or } T_۴$
- $T_{fo} = T_{load} = T_m = T_۳ \text{ or } T_۵$
- $T_i = T_۲$
- $T_a = T_۶$
- $h_{air} = ۲۰ \text{ w/m}^2\,^\circ\text{k}$
- $h_{water} = ۵۰ \text{ w/m}^2\,^\circ\text{k}$

با توجه به مشخص بودن تمامی آیتم‌ها در رابطه‌ی ۱، مقدار انرژی ذخیره شده‌ی نهانی در مواد تغییر فاز دهنده قابل محاسبه خواهد بود و می‌توان رابطه‌ی ۱ را برای مخزن حاوی مواد تغییر فاز دهنده چنین نوشت:

$$\begin{aligned} q_{lat} &= q_u - q_{load} - UA_{tank}(T_m - T_a) - [(\rho vc)_{water} \\ &\quad +(\rho vc)_{tank} + (\rho vc)_{pcm}]\frac{dT_m}{dt} \\ q_{lat} &= \dot{m}_f C_{water}(T_۱ - T_۲) - \dot{m}_{load}C_{tank}(T_۳ - T_۲) \\ &\quad -UA_{tank}(T_۳ - T_۶) - [(\rho vc)_{water} + (\rho vc)_{tank} \\ &\quad +(\rho vc)_{pcm\ modules}]\frac{dT_۳}{dt} \end{aligned} \quad (۴)$$

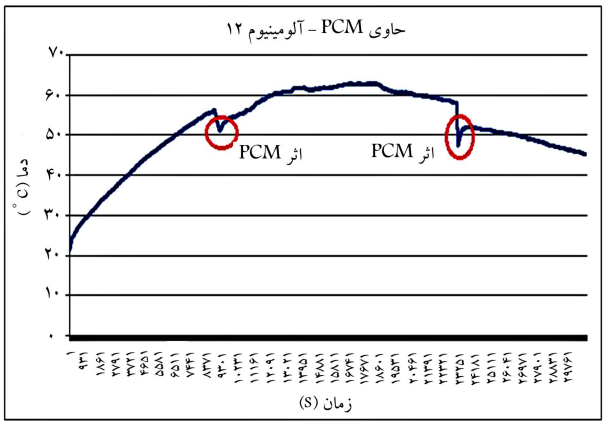
برای مخزن فاقد مواد تغییر فاز دهنده، میزان ذخیره‌ی انرژی نهانی وجود نخواهد داشت و کل انرژی ذخیره شده به‌صورت محسوس خواهد بود. در این مورد رابطه‌ی ۴ به‌صورت رابطه‌ی ۵ ساده خواهد شد.

$$\begin{aligned} [(\rho vc)_{water} + (\rho vc)_{tank}]\frac{dT_۵}{dt} &= \dot{m}_f C_{water}(T_۴ - T_۵) \\ - \dot{m}_{load}C_{tank}(T_۵ - T_۲) - UA_{tank}(T_۵ - T_۶) \end{aligned} \quad (۵)$$

لازم به ذکر است که انرژی ذخیره شده به‌صورت محسوس در تانک حاوی مواد تغییر فاز دهنده ـ شامل آب، پارافین، کپسول‌ها و تمامی مواد استفاده شده برای ثابت نگه داشتن کپسول‌ها ـ خواهد بود.

۳. نتایج و بحث

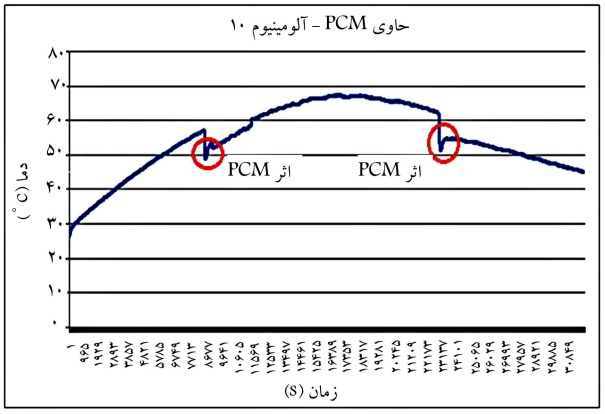
نتایج حاصل از آزمایش کپسول‌های آلومینیومی با قطر ۱۲، ۱۰ و ۶ میلی‌متر به‌ترتیب در شکل‌های ۴ تا ۶ نشان داده شده است. در این شکل‌ها، اثر مواد تغییر فاز دهنده روی تغییرات دمای آب نشان داده شده است. در دو مرحله تخلیه آب در ساعت‌های ۱۳ و ۱۷ تأثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده نمایان می‌شود. در این نقاط در حالی که با تخلیه‌ی آب گرم و ورود آب سرد، دمای آب در حال کاهش است، با رسیدن پارافین به دمای انجماد و شروع فرایند انجماد آن، انرژی ذخیره شده‌ی نهانی در دمای ثابت آزاد شده و باعث بالا رفتن دمای آب موجود در مخزن شده است. در شکل‌های ۷ تا ۹ نیز مقایسه‌ی دمای آب گرم موجود در مخزن برای حالت با/بدون مواد تغییر فاز دهنده مشخص شده است.



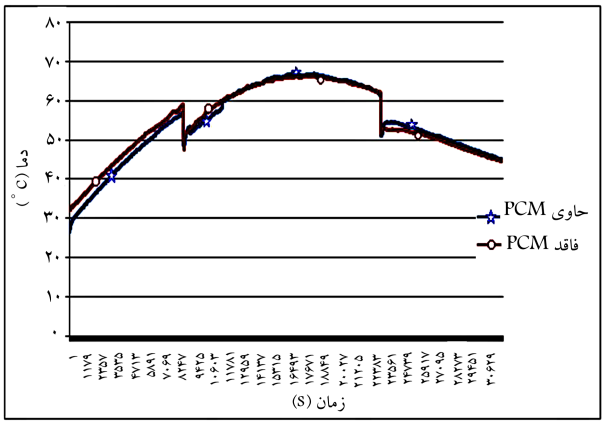
شکل ۴. تغییرات دما در مخزن حاوی PCM با کپسول‌های از جنس آلومینیوم با قطر ۱۲ میلی‌متر.

جدول ۶. مقدار انرژی ذخیره شده به‌صورت نهان و محسوس.

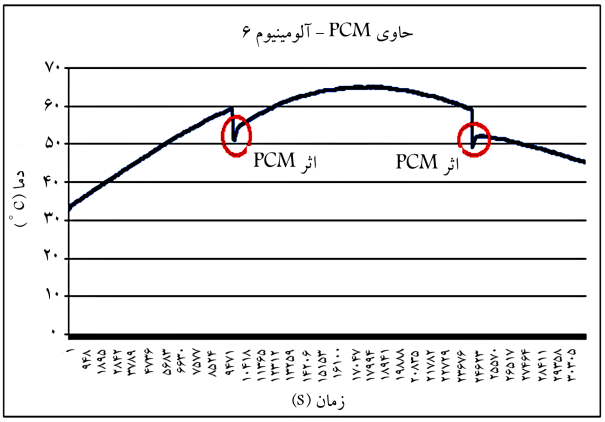
ردیف	روز آزمایش	مخزن	q_{sen} (Mj)	q_{lat} (Mj)	$\left(\frac{q_{lat}}{q_{sen}+q_{lat}}\right)\times$ ٪۱۰۰
۱	اول	حاوی PCM ـ آلومینیوم ۱۲	۲۳۷۷٫۶	۴۶۹٫۴	۱۶٫۵
۲	دوم	حاوی PCM ـ آلومینیوم ۱۰	۱۸۸۱٫۸	۳۷۱٫۶	۱۶٫۵
۳	سوم	حاوی PCM ـ آلومینیوم ۶	۱۲۹۹٫۹	۱۰۷٫۴	۷٫۶



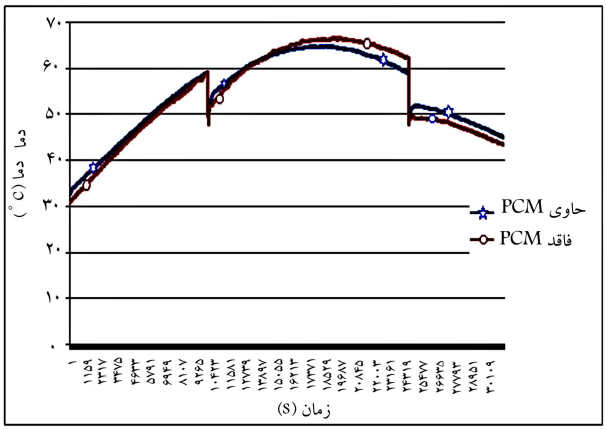
شکل ۵. تغییرات دما در مخزن حاوی PCM با کپسول‌های از جنس آلومینیوم با قطر ۱۰ میلی‌متر.



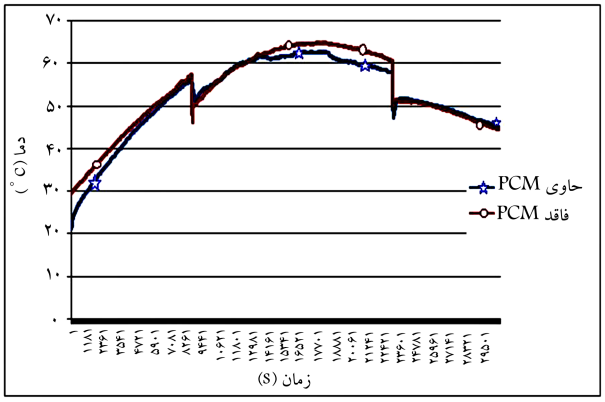
شکل ۸. مقایسه‌ی تغییرات دما در مخزن با/بدون PCM با کپسول‌های از جنس آلومینیوم با قطر ۱۰ میلی‌متر.



شکل ۶. تغییرات دما در مخزن حاوی PCM با کپسول‌های از جنس آلومینیوم با قطر ۶ میلی‌متر.



شکل ۹. مقایسه‌ی تغییرات دما در مخزن با/بدون PCM با کپسول‌های از جنس آلومینیوم با قطر ۶ میلی‌متر.



شکل ۷. مقایسه‌ی تغییرات دما در مخزن با/بدون PCM با کپسول‌های از جنس آلومینیوم با قطر ۱۲ میلی‌متر.

درصد گرمای نهانی ذخیره شده در سیستم به کل گرمای ذخیره شده برای کپسول آلومینیومی برای اندازه‌های متفاوت نیز در جدول ۶ ثبت شده است. این درصد برای کپسول با قطر ۱۲، ۱۰ و ۶ میلی‌متر به‌ترتیب برابر ۱۶٫۵٪، ۱۶٫۵٪ و ۷٫۶٪ است. تفاوت در این مقدار به میزان پارافین موجود در کپسول‌ها و همچنین قطر کپسول‌ها مرتبط است. هرچه قطر کپسول‌ها کوچک‌تر باشد، نسبت سطح به حجم پارافین افزایش می‌یابد و به‌تبع آن انتقال حرارت کامل‌تر انجام می‌شود.[۱۰] همچنین هرچه مقدار پارافین موجود در کپسول کم‌تر باشد، مقدار گرمای نهان کم‌تری در آن ذخیره خواهد شد. همین تأثیر دوگانه باعث شده که برای قطر کپسول ۱۲ و ۱۰ میلی‌متر درصد گرمای نهان به کل گرمای ذخیره شده برابر شود. از یک سو با کاهش قطر کپسول، انتقال حرارت کامل‌تر انجام می‌شود و از سوی دیگر، با کاهش مقدار پارافین موجود، میزان گرمای نهان قابل ذخیره کاهش می‌یابد. در مورد کپسول

با قطر ۶ میلی‌متر، کاهش مقدار پارافین به حدی بوده که تأثیر بیشتری روی عملکرد کپسول‌ها داشته و کاهش درصد گرمای نهان به کل گرمای ذخیره شده را به دنبال داشته است.

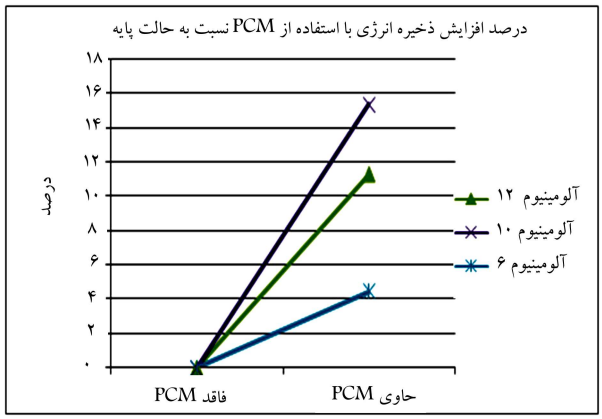
نسبت گرمای نهان ذخیره شده‌ی عملی به گرمای نهان قابل ذخیره‌ی نظری برای کپسول‌های با اندازه‌ی مختلف، متفاوت خواهد بود. چنان که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، این درصد برای کپسول آلومینیومی با قطر ۱۲، ۱۰ و ۶ میلی‌متر به‌ترتیب برابر ۷۴/۷٪، ۸۸٪ و ۹۵/۹٪ است. مثل مورد قبل با کاهش قطر کپسول‌ها، نسبت سطح به حجم برای کپسول افزایش یافته و انتقال حرارت بهتر انجام می‌گیرد و به‌تبع آن نسبت گرمای نهان ذخیره شده‌ی عملی به گرمای نهان قابل ذخیره‌ی نظری افزایش می‌یابد. دلیل این که در هیچ‌کدام از موارد این نسبت به ۱۰۰٪ نرسیده این است که در مرحله‌ی اول مصرف آب، چون تابش در حال افزایش و به تبع آن دمای آب در حال افزایش است، فرایند انجماد به‌صورت کامل انجام نمی‌شود. در ضمن بروز مشکل رسیدن به شرایط زیر حالت خنک‌کنندگی[3] نیز عاملی در جهت انحراف میزان ذخیره‌ی گرمای نهان در حالت واقعی و نظری خواهد بود.

به‌طورکلی در روش مطروحه برای کپسوله کردن مواد تغییر فاز دهنده، و به‌عبارتی کپسول‌های PCM متشکل از یک هسته‌ی اصلی حاوی مواد تغییر فاز دهنده و یک پوسته‌ی حاوی مواد کپسوله، ممکن است یک کیسه‌ی هوا هم در آن قرار گیرد. وجود این کیسه‌ی هوا باعث تطبیق تغییر حجم مواد تغییر فاز دهنده یا PCM هنگام تغییر فاز خواهد شد. پوسته باید توانایی کافی برای مقابله با تنش ایجاد شده بر اثر این پدیده را داشته باشد. «ضخامت پوسته» معیاری مهم در فرایند کپسوله‌کردن است. پوسته‌ی نازک باعث افت خصوصیات مکانیکی کپسول، و پوسته‌ی کلفت باعث کاهش مقدار ماده‌ی تغییر فاز دهنده یا PCM خواهد شد که در نتیجه‌ی آن مقدار ذخیره‌ی انرژی کاهش می‌یابد. در این شرایط پارامترهای کلیدی در کپسوله کردن PCM عبارت‌اند از:

- اندازه کپسول؛
- ضخامت پوسته؛
- مواد پوسته؛
- هندسه‌ی پوسته.

انرژی کل ذخیره شده (مجموع گرمای نهان و محسوس) در سیستم ذخیره‌ی آبگرمکن خورشیدی برای حالت با/بدون استفاده از مواد تغییر فاز دهنده برای کپسول‌های مختلف در جدول ۸ مشخص شده است. با توجه به این که آزمایش دستگاه با استفاده از کپسول‌های مختلف در روزهای متفاوت انجام شده، و با توجه به شرایط هوایی و تابش متفاوت روزهای انجام آزمایش، عملکرد سیستم با کپسول‌های متفاوت را می‌توان صرفاً با مقایسه‌ی این نسبت سنجید.

در واقع این نسبت بیان‌گر میزان افزایش ذخیره‌ی انرژی با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده نسبت به حالت پایه است؛ در شکل ۱۰ شیب این تغییرات نشان داده شده است. چنان که در جدول ۸ و شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، بیشترین میزان افزایش ذخیره‌ی انرژی برای مخزن حاوی پارافین کپسوله شده در لوله‌های آلومینیومی با قطر ۱۰ میلی‌متر، و کم‌ترین میزان افزایش برای مخزن حاوی پارافین کپسوله شده در لوله‌های آلومینیومی با قطر ۶ میلی‌متر اتفاق افتاده است. میزان افزایش ذخیره‌ی انرژی در مخزن حاوی پارافین برای کپسول آلومینیومی با قطر ۱۲ میلی‌متر، کپسول



شکل ۱۰. شیب افزایش ذخیره‌ی انرژی با استفاده از PCM.

جدول ۷. مقدار انرژی نهان ذخیره شده در حالت واقعی و ایده‌آل.

ردیف	روز آزمایش	مخزن	q_{lat} (Mj)	$q_{lat,max}$ (Mj)	$\left(\frac{q_{lat}}{q_{lat,max}}\right) \times ٪۱۰۰$
۱	اول	حاوی PCM ـ آلومینیوم ۱۲	۴۶۹/۴	۶۲۸/۳	۷۴/۷
۲	دوم	حاوی PCM ـ آلومینیوم ۱۰	۳۷۱/۶	۴۲۲	۸۸
۳	سوم	حاوی PCM ـ آلومینیوم ۶	۱۰۷/۴	۱۱۲	۹۵/۹

جدول ۸. درصد افزایش ذخیره‌ی انرژی با استفاده از PCM نسبت به حالت پایه.

ردیف	روز آزمایش	مخزن	q_{sen} (Mj)	q_{lat} (Mj)	$q_{storage}$ (Mj)	$\left(\frac{q_{storage_{pcm+water}} - q_{storage_{water}}}{q_{storage_{water}}}\right) \times ٪۱۰۰$
۱	اول	حاوی PCM ـ آلومینیوم ۱۲	۲۳۷۷/۶	۴۶۹/۴	۲۸۴۷	۱۱/۲
		آب	۲۵۵۹/۴	۰	۲۵۵۹/۴	
۲	دوم	حاوی PCM ـ آلومینیوم ۱۰	۱۸۸۱/۸	۳۷۱/۶	۲۲۵۳/۴	۱۵/۳
		آب	۱۹۵۴/۱	۰	۱۹۵۴/۱	
۳	سوم	حاوی PCM ـ آلومینیوم ۶	۱۲۹۹/۹	۱۰۷/۴	۱۴۰۷/۳	۴/۴
		آب	۲۵۵۹/۴	۰	۲۵۵۹/۴	

آلومینیومی با قطر ۱۰ میلی‌متر، و کپسول آلومینیومی با قطر ۶ میلی‌متر به‌ترتیب برابر ۱۱٫۲٪، ۱۵٫۳٪ و ۴٫۴٪ است.

۴. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر تأثیر اندازه‌ی کپسول بر عملکرد سیستم ذخیره‌ی حرارت حاوی مواد تغییر فاز دهنده مورد بررسی قرارگرفته است. آبگرمکن مذکور شامل دو دستگاه گردآورنده‌ی خورشیدی صفحه تخت، دو پمپ و دو مخزن ذخیره‌ی آب بود که یکی از مخزن‌ها حاوی مواد تغییر فازدهنده و دیگری فاقد آن بود که در شرایط کاملاً مشابه مورد آزمایش قرارگرفته‌اند. از پارافین صنعتی با چربی ۵ تا ۷ درصد به‌عنوان ماده‌ی تغییر فاز دهنده درون مخازن به‌صورت کپسول‌های استوانه‌یی استفاده شد. آزمایش در ۳ روز و به‌مدت تقریبی ۱۲ ساعت برای اندازه‌های مختلف کپسول شامل آلومینیوم با قطر ۱۲، ۱۰ و ۶ میلی‌متر مورد آزمایش قرار گرفت. محاسبات انجام شده روی نتایج حاصل از این آزمایش‌ها به نکات زیر رهنمون شد:

- نسبت گرمای نهان ذخیره شده‌ی عملی به گرمای نهان قابل ذخیره‌ی نظری برای کپسول آلومینیومی با قطر ۱۲، ۱۰ و ۶ میلی‌متر به‌ترتیب برابر ۷۴٫۷، ۸۸ و ۹۵٫۹ درصد است. با کاهش قطر کپسول‌ها، نسبت سطح به حجم برای کپسول افزایش یافته و انتقال حرارت بهتر انجام می‌گیرد و به تبع آن نسبت گرمای نهان ذخیره‌شده‌ی عملی به گرمای نهان قابل ذخیره‌ی نظری افزایش می‌یابد. دلیل این که در هیچ‌کدام از موارد، این نسبت به ۱۰۰ درصد نرسید این است که در مرحله‌ی اول مصرف آب، چون تابش، و به‌تبع آن دمای آب در حال افزایش است، فرایند انجماد به‌صورت کامل انجام نمی‌شود. در ضمن بروز مشکل حاصل از رسیدن به شرایط زیر حالت خنک کنندگی سیال، نیز عاملی در جهت انحراف میزان ذخیره‌ی گرمای نهان در حالت واقعی و نظری خواهد بود.
- درصد تغییرات انرژی ذخیره شده‌ی کلی (مجموع نهان و محسوس) در سیستم ذخیره‌ی آبگرمکن خورشیدی برای حالت با/بدون استفاده از مواد تغییر فازدهنده برای مخزن حاوی پارافین برای کپسول آلومینیومی با قطر ۱۲، ۱۰ و ۶ میلی‌متر، به‌ترتیب برابر ۱۱٫۲، ۱۵٫۳ و ۴٫۴ درصد است.
- راندمان ذخیره‌ی انرژی عبارت است از نسبت انرژی ذخیره شده به کل انرژی ورودی به مخزن (انرژی قابل ذخیره). میزان افزایش ذخیره‌ی انرژی در مخزن حاوی پارافین برای کپسول آلومینیومی با قطر ۱۲، ۱۰ و ۶ میلی‌متر به‌ترتیب برابر ۱۲٫۱، ۱۵٫۷ و ۴٫۸ درصد است.

پانوشت‌ها

1. phase change materials (PCM)
2. encapsulated
3. sub-cooling

منابع (References)

1. Saitoh, T. and Hirose, K. "High performance phase-change thermal energy storage using spherical capsules", *Chemical Eng. Communication*, **41**(1-6), pp. 39-58 (1986).
2. Beasley, D.E. and Ramanarayanan, C. "Thermal response of a packed bed of spheres containing a phase change material", *International Journal of Energy Res*, **13**, pp. 253-265 (1989).
3. Nallusamy, N., Sampath, S. and Velraj, R. "Energy management Through PCM based thermal storage system for building air conditioning" *Tiled Park, Chennai. In: Proceedings of the International Symposium on Renewable Energy: Environment Protection and Energy Solution* (2006).
4. Dr. N. Nallusamy, "Energy management through PCM based thermal storage system for building air-conditioning - tidel park, chennai", Proc. of the International Symposium on Renewable energy -Environment Protection and Energy Solution for Sustainable Development, Kuala Lumpur, Malaysia, 14 - 17, pp. 623-631, (september 2003).
5. Mehling, H., Cabeza, L.F., Hippeli, S. and Hiebler, S. "PCM-module to improve hot water heat storage with stratification", *Renewable Energy*, **28**, pp. 699-711 (2003).
6. Fazilati, M.A., and Alemrajabi, A.A.,"Improvement of solar water heater using phase change material (PCM)", *Proceedings of the 17th International Conference on Mechanical engineering*, Tehran University, Iran, **2**, May 19-21 (2009).
7. ElGhnam, R.I., Abdelaziz, R.A., Sakr, M.H. and Abdelrhman, H.E "An experimental study of freezing and melting of water inside spherical capsules used in thermal energy storage systems", *Ain Shams Engineering Journal*, **3**, pp. 33-48 (2012).
8. Kousksou, T., Bruel, P., Cherreau, G., Leoussoff, V. and Elrhafiki, T. "PCM storage for solar DHW: From an unfulfilled promise to a real benefit", *Solar Energy*, **85**, pp. 2033-2040 (2011).
9. Dincer, I. and Rosen, M.A., *Thermal Energy Storage SYSTEMS and APLICATIONS*, 2nd ed, John Wiley and Sons (2010).
10. Cruickshank, C.A. "Evaluation of a stratified multi-tank thermal storage for solar heating applications", PhD Thesis, Queen's University (2009).