



## ارزیابی آزمایشی سامانه‌ی ذخیره‌سازی همزمان گرمای نهان و محسوس در سامانه‌های گرمایشی

محمدحسین رحمانی ده نوی<sup>۱</sup>، غلامحسن نجفی<sup>۲</sup>، برات قبادیان<sup>۳</sup>

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس؛ mohammadhossein@modares.ac.ir

عضو هیئت علمی، دانشیار، دانشگاه تربیت مدرس؛ g.najafi@modares.ac.ir

عضو هیئت علمی، استاد، دانشگاه تربیت مدرس؛ ghobadib@modares.ac.ir

### چکیده

هدف کار حاضر ارزیابی آزمایشی رفتار حرارتی ماژول‌های استوانه‌ای در یک واحد ذخیره‌ی انرژی گرمایی (TES) گرمای نهان و محسوس بصورت ترکیبی می‌باشد. یک واحد TES طراحی، ساخته و به یک منبع آب گرم و سرد با دماهای ثابت جهت بررسی عملکرد واحد ذخیره متصل می‌گردد. واحد TES شامل کپسول‌های استوانه‌ای حاوی واکس پارافین به عنوان ماده‌ی تغییر فازدهنده (PCM) می‌باشد که درون یک مخزن ذخیره‌ی استوانه‌ای عایق‌بندی قرار گرفته‌اند. آب به عنوان سیال انتقال حرارت (HTF) استفاده می‌شود که در طی فرآیند شارژ ماده‌ی PCM، گرما را از مخزن آب گرم به واحد TES انتقال داده و در فرآیند دشارژ، گرما را از واحد TES توسط مخزن آب سرد دریافت می‌کند. آزمایشات شارژ در دما و دبی ثابت ورودی انجام می‌گردد و اثرات آن‌ها بر روی عملکرد واحد ذخیره مورد بررسی قرار می‌گیرد. آزمایشات شارژ نیز توسط یک مخزن آب سرد با دمای ثابت انجام می‌گردد. در این پژوهش، معنی‌داری تغییرات دمایی آب در حین فرآیندهای شارژ و دشارژ به طور جزئی مورد بحث قرار گرفته و متغیرهای عملکردی چون مقدار گرمای ذخیره شده لحظه‌ای و تجمعی مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

کلمات کلیدی: ماژول‌های استوانه‌ای، واحد TES، ماده‌ی PCM، واکس پارافین.

## Experimental investigation on a combined sensible and latent heat storage system in heating systems

Mohammadhossein Rahmani dehnavi<sup>1</sup>, Gholamhassan Najafi<sup>2</sup>, Barat Ghobadian<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Tarbiat Modares University, Iran, Tehran, mohammadhossein@modares.ac.ir

<sup>2</sup>Tarbiat Modares University, Iran, Tehran, g.najafi@modares.ac.ir

<sup>3</sup>Tarbiat Modares University, Iran, Tehran, ghobadib@modares.ac.ir

### ABSTRACT

The present aim of this work is to evaluate the thermal behavior of cylindrical modules in a thermal energy storage (TES) unit, as a Combined sensible and latent heat. A TES unit is designed, constructed and connected to a cold and hot water supply at constant temperatures to monitor the performance of the storage unit. The TES unit contains cylindrical capsules containing paraffin waxes as a phase change material (PCM) that is located inside an insulating cylinder storage tank. Water is used as a heat transfer fluid (HTF) to transfer heat from a hot water reservoir to the TES unit during the PCM charging process and, in the process of discharging, receives heat from the TES unit by a cold water tank. Charge tests are carried out at constant temperature and inlet flow and their effects on storage unit performance are investigated. Charging tests are also performed by a cold water tank at a constant temperature. In this research, the significance of temperature variations in water

<sup>۱</sup> دکتر غلامحسن نجفی، دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم،

<sup>۲</sup>Thermal Energy Storage

<sup>۳</sup>Phase Change Material

<sup>۴</sup>Heat Transfer Fluid



during charging and discharging processes is discussed in detail and functional variables such as instantaneous heat stored and cumulative heat stored are studied.

**Keywords:** Cylindrical modules, TES unit, PCM material, Paraffin wax.

## مقدمه

سامانه‌های TES که در واقع وظیفه‌ی ذخیره‌سازی گرما یا سرما برای استفاده‌های بعدی را به عهده دارند، در تمامی جاهایی که میان عرضه و تقاضای انرژی عدم تطبیق وجود دارد مورد استفاده قرار می‌گیرند (M M Farid et al., 2004). در مسیر دستیابی به انرژی پایدار، کارآمد، سازگار با محیط زیست و کم کربن در بخش ساختمانی، ذخیره‌ی انرژی گرمایی طیف وسیعی از فرصت‌ها و فواید را به منظور کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در بر می‌گیرد (Agency. and Development., 2013). علاوه بر آن، استفاده از این سیستم‌ها می‌تواند میزان ورود آلاینده‌ی CO<sub>2</sub> به اتمسفر را به میزان ۵/۵٪ کاهش دهد (Gu et al., 2004).

عموماً سامانه‌های TES به دو دسته‌ی سامانه‌های فعال<sup>۱</sup> و منفعل<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی می‌شوند. سامانه‌های ذخیره‌سازی فعال یا اکتیو شامل یک جزء کمکی مکانیکی برای ایجاد انتقال حرارت میان سامانه و منبع است. بنابراین در این نوع از سامانه‌ها، انتقال حرارت به صورت جابجایی اجباری اتفاق خواهد افتاد. بر خلاف آن، در سامانه‌های منفعل یا پسیو انتقال حرارت میان سامانه و منبع گرما توسط جریان همرفت طبیعی (جابجایی آزاد) یا نیروهای شناوری (در اثر اختلاف چگالی) بدون دخالت هیچ وسیله‌ی محرک خارجی اتفاق می‌افتد (Kalaiselvam and Parameshwaran, 2014).

سامانه‌های ذخیره‌سازی اکتیو، به دو دسته سامانه‌های مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی می‌شوند. در سامانه‌های مستقیم، سیال انتقال حرارت به عنوان ماده‌ی ذخیره‌ساز نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد، این در حالی است که در سامانه‌های غیرمستقیم، یک ماده‌ی ثانویه برای ذخیره‌ی گرما بکار می‌رود (Cabeza, 2014).

از سال‌ها پیش تحقیقات گسترده‌ای بر روی PCM به انجام رسیده، که اولین استفاده‌ی آن توسط دکتر ماریا تلکس آدر سال ۱۹۴۸ میلادی بود. از سال ۱۹۴۸ به بعد تحقیقات بیشتری بر روی PCM‌ها به انجام رسید، بطور نمونه در سال ۱۹۹۰، پیپو<sup>۳</sup> سهم بیشتر این تحقیقات را بر عهده داشت (جعفری، ۱۳۹۰). در پژوهشی، آقای یزدان‌شناس و همکاران (۱۳۸۹) از پارافین در طراحی یک مخزن حرارتی به منظور ذخیره‌ی انرژی خورشید استفاده کردند. نتایج حاصل از این پژوهش حاکی از افزایش راندمان حرارتی سامانه‌ی اصلی و راندمان آبرگرم‌کن‌های خورشیدی با وجود سامانه‌ی ذخیره‌سازی PCM نسبت به حالت بدون PCM داشت (یزدان‌شناس و خالصی دوست، ۱۳۸۹). در پژوهشی دیگر خانم نظری پور و بعنونی (۱۳۹۲) مدل‌سازی عددی یک آبرگرم‌کن خانگی با مخزن حاوی کپسول‌های کروی مواد تغییر فازدهنده را توسعه داده‌اند. نتایج نشان داده است که افزایش حجم مواد PCM در مخزن تا حد مشخصی موجب افزایش بازده سامانه می‌شود و بیش از آن تأثیر کمی دارد. اما در شرایط مورد بررسی در این پژوهش کاربرد این مواد به میزان ۹ الی ۱۴ درصد انرژی کمکی مورد نیاز آبرگرم‌کن را کاهش داده است (نظری پور و بعنونی، ۱۳۹۲). در پژوهشی چو و چویی (۲۰۰۰)، متغیرهای حرارتی سامانه‌ی ذخیره‌سازی با استفاده از کپسول‌های کروی پارافین را حین فرآیندهای ذوب و انجماد بطور

<sup>۱</sup>Active

<sup>۲</sup>Passive

<sup>۳</sup>Dr. Maria Telkes

<sup>۴</sup>Peippo



## یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



آزمایشی مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان داده است که، دوره‌ی تغییر فاز طی فرآیندهای ذوب و انجماد حتی با کاهش دمای ورودی به دلیل افزایش عدد رینولدز، کاهش یافته است، همچنین دوره‌ی تغییر فاز کپسول‌ها در لایه‌ی اول نسبت به لایه‌ی هفتم کوتاه‌تر است. همچنین دوره‌ی تغییر فاز در مرکز کپسول نسبت به لبه‌ی کپسول طولانی‌تر است، چون تخلخل در لبه‌ی مخزن نسبت به مرکز بزرگتر می‌باشد (Cho and Choi, 2000). در بازیابی گرمای خروجی از یک موتور دیزل با استفاده از یک مبدل حرارتی و به کمک مواد تغییر فاز دهنده، راندمان مبدل حرارتی در تمامی شرایط بارگذاری در پایان فرآیند ذوب نزدیک به ۹۹٪ گزارش شده است. نزدیک به ۱۰٪ تا ۱۵٪ از کل گرمای خروجی توسط این سامانه بازیابی شده، که بیشینه‌ی توان حرارتی مبدل در بار کامل و در حدود ۳/۶ کیلو وات به دست آمده است. سرعت و راندمان ذوب شدن در بارهای بالاتر، خیلی زیاد بوده و با توجه به بار کاهش یافته است (Pandiyarajan et al., 2011).

با توجه به پژوهش‌های انجام شده و با استناد به نتایج به دست آمده، ملاحظه شد که تأثیر استفاده از PCM در بهبود راندمان یک سامانه، نتایج مثبت و قابل قبولی را به دنبال داشته است، ولی پژوهش‌های انجام شده در کشور تأثیر بکارگیری سامانه‌هایی شامل شبکه‌هایی از کپسول‌های استوانه‌ای PCM در درون واحدهای TES را مورد بررسی قرار نداده‌اند. با توجه به مطالعات انجام شده احتمال می‌رود استفاده از این نوع بکارگیر ماده‌ی تغییر فاز دهنده به دلیل سطح تماس بیشتر با سیال انتقال حرارت عملکرد بهتری نسبت به دیگر انواع کپسول‌های بکار رفته باشد.

### روش‌های ذخیره‌سازی انرژی گرمایی

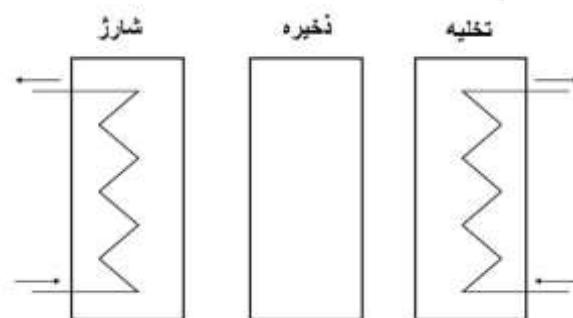
ذخیره‌سازی انرژی گرمایی، که عمدتاً با نام ذخیره‌ی سرما یا گرما شناخته می‌شود، اجازه‌ی ذخیره‌سازی گرما یا سرما برای استفاده در زمان‌های بعد را می‌دهد. برای این‌که بتوانیم گرما یا سرما را بعد از یک زمان مشخص بازیافت کنیم، بایستی روش ذخیره‌سازی برگشت‌پذیر باشد. ذخیره‌سازی انرژی گرمایی از طریق تغییر در انرژی درونی یک ماده صورت می‌گیرد که می‌توان طبق شکل (۱)، آن را به فرآیندهای گرمایی و شیمیایی تقسیم‌بندی کرد (Baylin, 1979).



شکل (۱) - روش‌های ذخیره‌سازی انرژی گرمایی

در هر یک از انواع ارائه شده در شکل بالا، بایستی به ترتیب فرآیندهای شارژ، ذخیره‌سازی و دشارژ انجام شود تا چرخه‌ی ذخیره‌سازی کامل

شود (شکل (۲)).

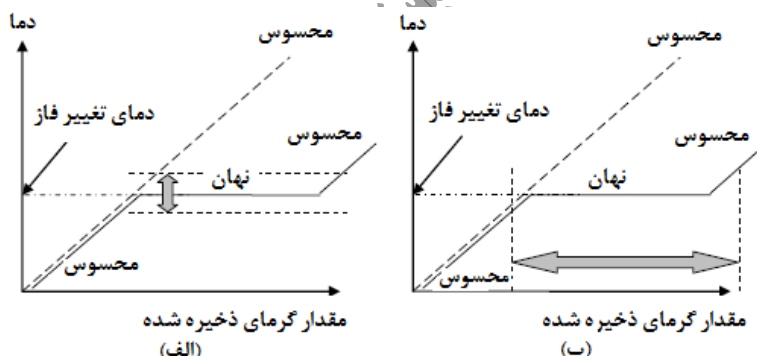


شکل (۲) - چرخه‌ی فرآیند ذخیره‌سازی کامل واحد TES

### ذخیره‌سازی گرمای نهان با استفاده از تغییر فاز جامد-مایع

از پتانسیل زمینه‌های کاربرد PCM می‌توان به اختلاف اساسی میان ذخیره‌ی گرمای نهان و محسوس پی برد. همانطور که در شکل (۵-۲) نشان داده شده است، آن‌ها را می‌توان جهت ساده‌سازی به کنترل دما و ذخیره و تأمین گرما یا سرما با تغییر دمایی کوچک تقسیم‌بندی کرد (Mehling and Cabeza, 2008).

با توجه به شکل (۳-الف)، گرما را می‌توان از یک ماده‌ی تغییر فاز بدون این‌که تغییر قابل توجهی در دمای آن ایجاد شود، تأمین یا استخراج کرد. بنابراین از PCM می‌توان در جهت تثبیت دمای تجهیزات استفاده کرد. مواردی هم‌چون، استفاده از یخ برای سرد نگه‌داشتن غذا و نوشیدنی‌ها، تثبیت دمای داخلی ساختمان‌ها و یا دمای داخلی جعبه‌های حمل و نقل، مثال‌هایی از این قبیل‌اند (Mehling and Cabeza, 2008).



شکل (۳) - پتانسیل زمینه‌های کاربرد PCM: (الف) کنترل دما و (ب) ذخیره و تأمین گرما یا سرما با تغییر دمایی کوچک

از نقطه نظر دیگر PCM قادر به ذخیره‌ی مقادیر زیادی گرما یا سرما در تغییر دمایی نسبتاً کوچک است (شکل ۳-ب)

### مواد و روش‌ها

#### مواد آزمایش

در این کار پژوهشی از ماده‌ی تغییر فاز دهنده‌ی واکس پارافین جهت ذخیره‌سازی انرژی گرمای نهان درون مخزن ذخیره‌ی گرمایی، استفاده گردید. مشخصات ماده‌ی تغییر فاز دهنده‌ی مورد استفاده در جدول ۱ خلاصه شده است. همچنین جهت کپسوله کردن مواد تغییر فاز دهنده به صورت استوانه‌ای از ظروف فلزی از جنس آهن که قابلیت انتقال حرارتی بهتری نسبت به ظروف پلی اتیلنی مورد استفاده در پژوهش‌های پیشین دارند، استفاده گردید. جهت پر کردن کپسول‌های استوانه‌ای ماده‌ی PCM بایستی ابتدا ذوب گردد. کپسول‌های استوانه‌ای در ۴ طبقه ۹ تایی از



## یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



مخزن ذخیره‌ی گرمایی با حجم ۴۰ لیتر قرار می‌گیرند. جنس مخزن ذخیره‌ی گرمایی که این کپسوله‌های استوانه‌ای درون آن قرار می‌گیرند، به منظور حفظ بیشتر حرارت دریافتی توسط آن پلاستیک در نظر گرفته شد، که میزان ضخامت عایق بکار رفته را در نمونه و ابعاد مشابه به میزان نصف کاهش داد.

جهت ارزیابی این مخزن ذخیره‌ی گرمایی از یک مخزن آب گرم برای فرآیند شارژ و یک مخزن آب سرد برای فرآیند دشارژ استفاده گردید.

جدول (۱) - خواص فیزیکی و حرارتی واکس پارافین

حالت ماده	جامد	مایع
چگالی $(\rho_{PCM}) (kg/m^3)$	866	774
گرمای ویژه $(C_{PCM}) (kJ/kg.K)$	1/97	2/1
هدایت حرارتی $(K_{PCM}) (W/m.K)$		0/19
محدوده‌ی دمای تغییر فاز $(^{\circ}C)$		54/2 - 61
گرمای نهان $(L_f) (kJ/kg)$		195/27

جهت اندازه‌گیری درجه حرارت در نقاط مختلف مبدل در سیالات سرد و گرم و در نتیجه در تحلیل سیستم، ۵ عدد سنسور از نوع

SMT160 در ۳ نقطه مختلف ارتفاعی و همچنین ورودی و خروجی مخزن نصب گردید (شکل (۵)).



شکل (۵) - مخزن و سنسورهای بکار رفته

جهت تشخیص کارآمدی مخزن ذخیره‌ی گرمایی، توان گرمایی و عملکرد حرارتی مخزن ذخیره بصورت لحظه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفتند.

عملکرد حرارتی مخزن PCM را می‌توان از تقسیم انرژی حرارتی لحظه‌ای  $(\dot{Q}_s)$  در مخزن PCM و بیشترین انرژی‌ای که PCM می‌تواند

ذخیره کند  $(Q_p)$  به دست آورد.



$$\dot{Q}_s = \dot{m}_w \cdot C_w \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad (1)$$

$$Q_p = m_{pcm} \cdot C_{pcm} \cdot (T_{pcm} - T_{air}) \quad (2)$$

که در روابط بالا،  $\dot{m}_w$  دبی جرمی آب،  $C_w$  ظرفیت گرمایی ویژه آب،  $(T_{in}-T_{out})$  اختلاف دمای ورودی و خروجی HTF،  $m_{pcm}$  جرم ماده PCM،  $C_{pcm}$  ظرفیت گرمایی ماده PCM و  $(T_{pcm}-T_{air})$  اختلاف دمای ذوب ماده PCM با دمای هوا است.

و در نهایت بازدهی لحظه‌ای مخزن بصورت زیر می‌باشد که در این معادله ضریب ۱ و ۶۰ به علت این می‌باشد که اطلاعات دمایی هر ۱ دقیقه یکبار دریافت و برای تبدیل واحد صورت و مخرج به کیلوژول (kJ) در ۶۰ ثانیه نیز ضرب شده تا بازده مخزن حرارتی بی بعد گردد.

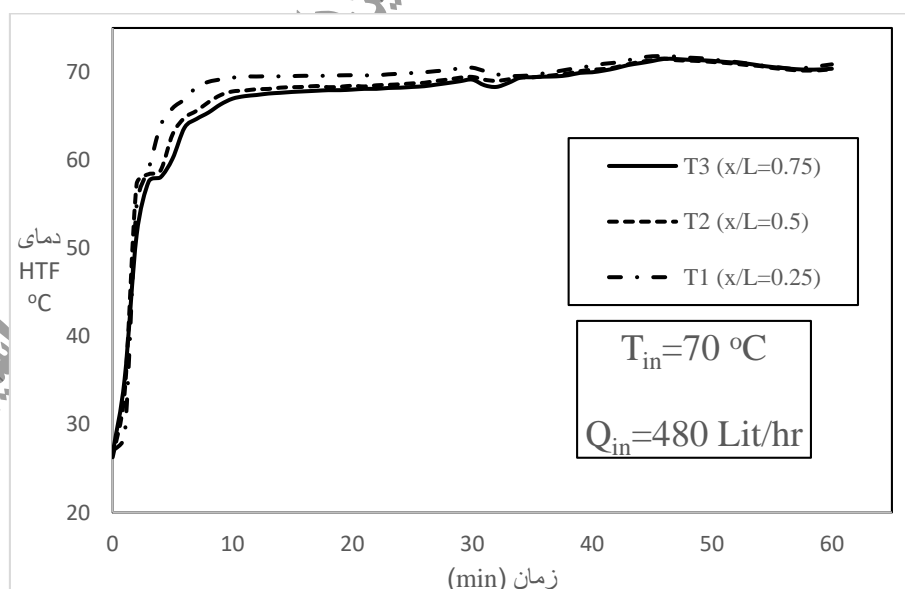
$$N_t = \frac{1 \times 60 \times \dot{Q}_s}{Q_p} \quad (3)$$

### روش آزمایش

در این آزمایشات، دبی سیکل مصرفی، توزیع دما در راستاهای مختلف، دمای آب مصرفی اندازه‌گیر شده است تا بتوانیم با استفاده از اطلاعات میزات توان گرمایی مبادله شده و عملکرد حرارتی مخزن را با توجه روابط ارائه شده در بالا محاسبه کنیم.

آزمایشات در دماهای ورودی مختلف HTF، ۵، ۲۰ و ۱۵ درجه‌ی سلسیوس بالاتر از محدوده‌ی ذوب (۶۵، ۷۰، ۷۵ درجه‌ی سلسیوس) و همچنین دبی‌های ورودی مختلف ۳۰۰، ۴۸۰ و ۶۶۰ لیتر بر ساعت انجام می‌گیرد.

### نتایج و بحث



شکل (۶) - توزیع دما در راستای طولی مخزن با دما و دبی ورودی ثابت





## یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران

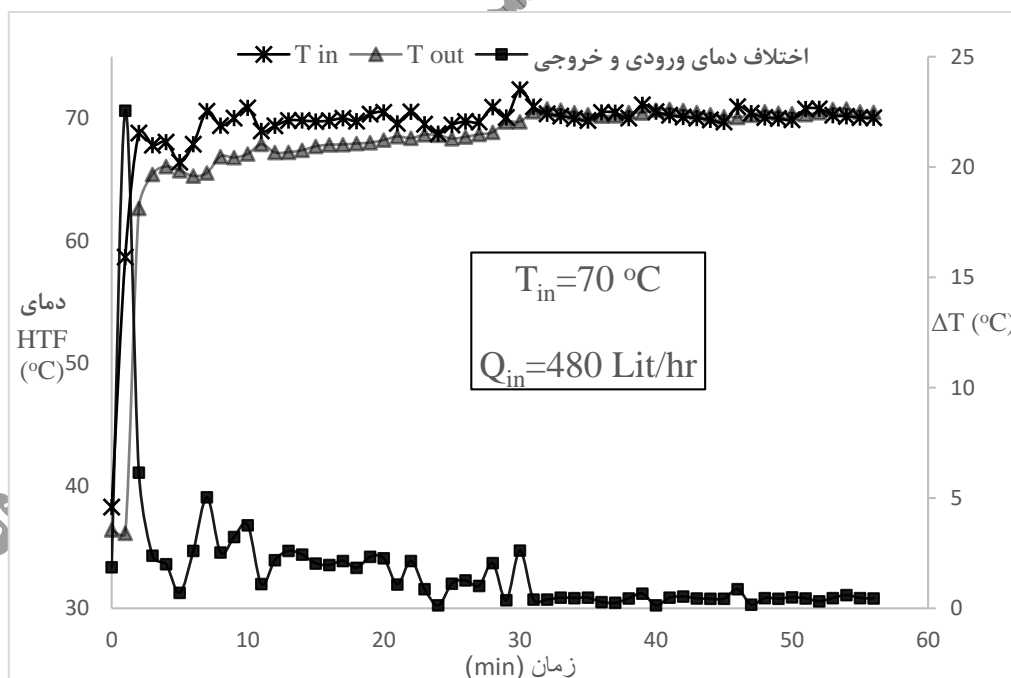


در شکل (۶) نمودار تغییرات دمایی HTF در راستای طولی مخزن TES ( $x/L=0/25, 0/5, 0/75$ ) برای دمای ورودی  $70^\circ\text{C}$  و دبی حجمی  $480\text{ Lit/hr}$  ترسیم شده است. مشاهده می‌شود دمای آب در تمامی لایه‌ها تا زمان رسیدن به دمای ذوب PCM با سرعت بیشتری افزایش می‌یابد. با این وجود افزایش دمای HTF در بالاترین ارتفاع ( $x/L=0/25$ ) به دلیل این که آب گرم از بالای مخزن وارد می‌شود سریع‌تر است. در این لایه دما در طی ۷ دقیقه به  $70^\circ\text{C}$  می‌رسد و پس از آن بطور تقریباً یکنواختی ادامه می‌یابد تا زمانی که PCM بطور کامل ذوب شود.

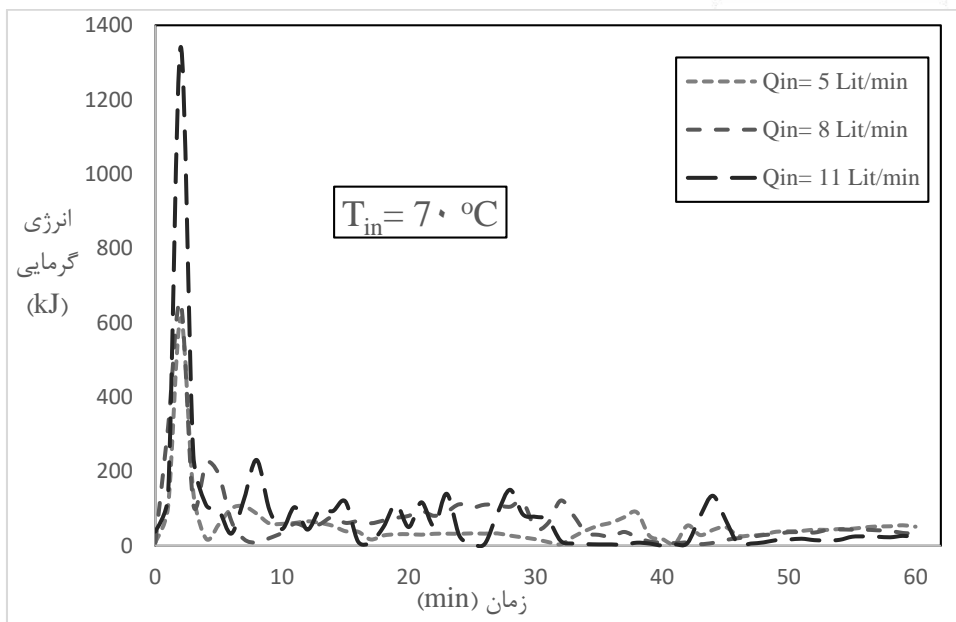
در شکل (۷) تغییرات دمای ورودی ( $T_{in}$ )، خروجی ( $T_{out}$ ) و اختلاف دما ( $\Delta T$ ) با زمان در حین فرآیند شارژ مخزن PCM تحت دما ( $70^\circ\text{C}$ ) درجه‌ی سلسیوس) و دبی ( $480\text{ لیتر بر ساعت}$ ) ورودی را نشان می‌دهد. دماهای ورودی و خروجی با زمان افزایش می‌یابند. مقدار  $\Delta T$  در ۵ دقیقه‌ی اول تا  $23^\circ\text{C}$  درجه‌ی سلسیوس افزایش می‌یابد، اما بعد از این زمان شروع به کاهش می‌کند. چون PCM تا دمای ذوب خود گرم شده و مقدار قابل توجهی گرمای نهان جذب می‌کند.

همانطور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، انرژی گرمایی در ابتدای شارژ بالا بوده و سپس کاهش می‌یابد. این افت دمایی ناشی از کاهش اختلاف دمای میان HTF و مخزن ذخیره می‌باشد که همزمان با پیشروی فرآیند شارژ، PCM شروع به ذوب شدن کرده و انرژی گرمایی ذخیره شده به دلیل ثابت بودن اختلاف دمای HTF و مخزن ذخیره، تقریباً یکنواخت است.

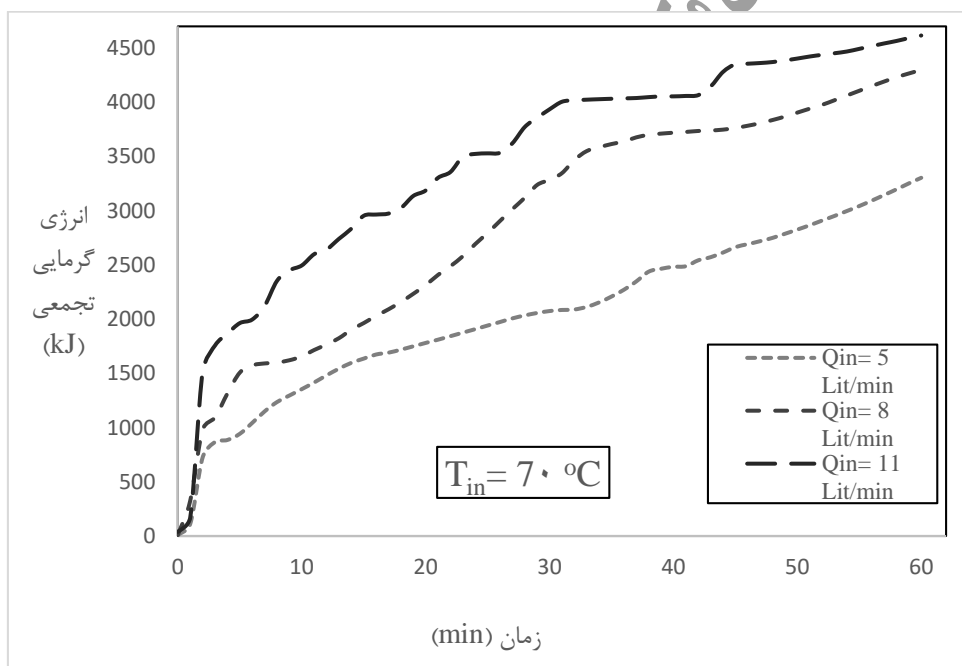
با توجه به شکل (۹)، زمان موردنیاز برای ذخیره‌ی یک مقدار خاص انرژی گرمایی با افزایش دبی حجمی HTF کاهش می‌یابد و همچنین مقدار گرمای ذخیره شده در زمان یکسان درون مخزن ذخیره‌ی گرمایی با افزایش دبی افزایش می‌یابد.



شکل (۷) - تغییرات دمای ورودی و خروجی و اختلاف دما با زمان در حین فرآیند شارژ مخزن PCM



شکل (۸) - انرژی گرمایی ذخیره شده در طی فرآیند شارژ PCM با دبی‌های مختلف HTF



شکل (۹) - انرژی ذخیره شده‌ی تجمعی در حین فرآیند شارژ PCM با دبی‌های مختلف HTF

### نتیجه گیری

در این پژوهش عملکرد واحد TES جهت ذخیره‌سازی گرما در تجهیزات گرمایشی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق یک مخزن ۴۰ لیتری جهت بررسی عملکرد ماکروکپسول‌های استوانه‌ای حاوی ماده‌ی تغییر فاز واکس پارافین مورد استفاده قرار گرفت. آزمایشات مربوط به بررسی رفتار حرارتی واحد TES بر اساس دما و دبی ورودی شارژ انجام گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده در قسمت قبل، می‌توان نتیجه گرفت:





## یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



(۱) افزایش دمای ورودی شارژ در دبی ثابت موجب افزایش توان گرمایی و عملکرد حرارتی واحد TES شده است که بیشترین تأثیر را بر روی متغیرهای خروجی نسبت به دیگر فاکتورها داشته است.

(۲) افزایش دبی ورودی شارژ در دماهای ورودی ثابت شارژ نیز هم چون فاکتور دمای شارژ موجب افزایش متغیرهای خروجی گشته است اما این میزان در مقایسه با اثر دمای ورودی شارژ بسیار کمتر بوده است.

(۳) با توجه به این که مدت زمان شارژ مخزن با PCM و مخزن بدون PCM با توجه به نحوه‌ی به کارگیری این ماده در مخزن ذخیره‌ی گرمایی، تقریباً یکسان می‌باشد، بنابراین استفاده از این نوع مخازن در جهت ذخیره‌سازی گرما نسبت به مخزن بدون PCM دارای عملکرد بهتری می‌باشد.

### ۱- فهرست علائم (در صورت لزوم)

نماد	شرح	واحد
Q	انرژی گرمایی	kJ
$\rho$	چگالی سیال	kg/m <sup>3</sup>
T <sub>i</sub>	دمای اولیه	°C
T <sub>f</sub>	دمای نهایی	°C
T <sub>o</sub>	دمای سطح خارجی	°C
T <sub>m</sub>	دمای ذوب	°C
T <sub>air</sub>	دمای محیط	°C
C <sub>p</sub>	گرمای ویژه	kJ/kg.°C
C <sub>p,s</sub>	گرمای ویژه‌ی فاز جامد	kJ/kg.°C
C <sub>p,l</sub>	گرمای ویژه‌ی فاز مایع	kJ/kg.°C
$\lambda$	گرمای نهان ویژه	kJ/kg
m	جرم ماده‌ی ذخیره	kg
$\dot{m}$	دبی سیال	m <sup>3</sup> /s
$\mu$	گرانروی دینامیکی	kg/m.s
N <sub>t</sub>	عملکرد حرارتی	%
P	توان گرمایی	kW

### ۲- مراجع

- یزدان شناس، ا. و خالصی دوست، ع. (۱۳۸۹). مبدل حرارتی با مواد تغییرفازدهنده (PCM) برای ذخیره انرژی خورشیدی. اولین کنفرانس سالانه انرژی پاک مرکز بین المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، ۱-۱۳.
- موسوی محمدی، س. ز. (۱۳۹۰). بهینه سازی راندمان و هزینه سیستم های ذخیره سازی ترکیبی انرژی خورشیدی. دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات.
- نظری پور، م. و بعنونی، س. (۱۳۹۲). طراحی و بررسی عملکرد آبگرمکن خورشیدی خانگی با مخزن حاوی مواد تغییرفازدهنده کپسولی. بیست و یکمین همایش سالانه بین المللی مهندسی مکانیک ایران، ۱-۵.

4) Baylin, F. (1979). Low temperature thermal energy storage: a state-of-the-art survey. Solar Energy Research



Inst., Golden, CO (USA).

- 5) **Cho, K., & Choi, S. H.** (2000). Thermal characteristics of paraffin in a spherical capsule during freezing and melting processes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **43**(17): 3183–3196.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(99\)00329-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0017-9310(99)00329-4)
- 6) **Farid, M. M., Khudhair, A. M., Ali, S., & Razack, K.** (2004). *A review on phase change energy storage : materials and applications* (Vol. 45).
- 7) **Gu, Z., Liu, H., & Li, Y.** (2004). Thermal energy recovery of air conditioning system—heat recovery system calculation and phase change materials development. *Applied Thermal Engineering*, **24**(17): 2511–2526.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.03.017>
- 8) **Mehling, H., & Cabeza, L. F.** (2008). *Heat and cold storage with PCM*. Berlin: Springer (Vol. 16). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1128/AAC.03728-14>
- 9) **Pagliarini, G., & Rainieri, S.** (2010). Modeling of a thermal energy storage system coupled with combined heat and power generation for the heating requirements of a University Campus. *Applied Thermal Engineering*, **30**(10): 1255–1261. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.02.008>
- 10) **Pandiyarajan, V., Chinna Pandian, M., Malan, E., Velraj, R., & Seeniraj, R. V.** (2011). Experimental investigation on heat recovery from diesel engine exhaust using finned shell and tube heat exchanger and thermal storage system. *Applied Energy*, **88**(1): 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.023>
- 11) **Arteconi, A., Hewitt, N. J., & Polonara, F.** (2012). State of the art of thermal storage for demand-side management. *Applied Energy*, **93**(Supplement C): 371–389.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.045>
- 12) **Agency., I. E., & Development., O. for E. C. and.** (2013). *Transition to sustainable buildings : strategies and opportunities to 2050*. Paris: OECD/IEA. Retrieved from <http://public.eblib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=1336591>
- 13) **Cabeza, L. F.** (2014). *Advances in Thermal Energy Storage Systems\_ Methods and Applications*. Woodhead Publishing Series in Energy.
- 14) **Kalaiselvam, S., & Parameshwaran, R.** (2014). *Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability: Systems Design, Assessment and Applications*. Elsevier.

مکانیزاسیون و مکانیزاسیون ایران