

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۴/۱۸

مطالعه عددی گرادیان حرارتی و انرژی عبوری از دیوارهای پیرامونی ساختمان دارای مواد تغییر فاز دهنده (PCM) در شرایط دمایی گرم کاشان

حمیدرضا عصارزاده نوش آبادی^۱، مرتضی مدح‌خوان^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

h.asarzadeh@cv.iut.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

madhkhan@cc.iut.ac.ir

چکیده: به کارگیری مواد تغییر فاز دهنده (PCM) در بخش‌های مختلف ساختمان به دلیل بالا بودن ظرفیت گرمایی این مواد، به بهبود شرایط آسایش حرارتی و کاهش مصرف انرژی می‌انجامد. با توجه به عملکرد بهتر این مواد در شرایط دمایی با نوسانات شدید، کاربرد آن‌ها در اقلیم کویری در کاهش مصرف انرژی و کاهش نوسانات تأثیر زیادی دارد. در تحقیق حاضر، شرایط دمایی گرم کاشان به عنوان دمای محیط و دیوارها با بتن معمولی به ضخامت‌های ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر در نرم‌افزار فلوئنت مدل‌سازی شده‌اند. چند نوع ماده تغییر فاز دهنده برای این شرایط دمایی در نظر گرفته شده و بهترین نوع آن انتخاب شده است. نتایج عددی نشان می‌دهد که وجود ماده تغییر فاز دهنده نوسانات دمایی سطح داخل دیوارها را تا حدود ۴ °C کاهش می‌دهد و همچنین موقعیت آن در سمت داخلی دیوار عملکرد بهتری دارد، ولی به‌طور کلی تغییر در موقعیت ماده تغییر فاز دهنده تأثیر زیادی بر روی نتایج نهایی ندارد. علاوه بر آن، تغییر در تعداد ضخامت ماده تغییر فاز دهنده تأثیر زیادی بر عملکرد دمایی آن ندارد. با توجه به نتایج برای منطقه کاشان، پارافین عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد؛ به عبارت دیگر برای هر منطقه باید ماده تغییر فاز دهنده متناسب با آن مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: مواد تغییر فاز دهنده، مصرف انرژی، دیوار، مدل‌سازی، عملکرد دمایی.

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، مسئله انرژی یکی از مهم‌ترین مسائل قابل توجه مهندسان بوده است. با توجه به اینکه ساختمان‌ها بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی محسوب می‌شوند و با رشد روزافزون جمعیت در جهان این مقدار افزایش می‌یابد، صرفه‌جویی در ساختمان از اهمیت بسیاری برخوردار است. آمارهای منتشرشده میزان انرژی مصرفی ساختمان‌ها را بیش از ۳۷٪ کل انرژی مصرفی کشور عنوان کرده‌اند. مسلم است که چنین وضعیتی، صرف‌نظر از هزینه‌های کلان اقتصادی که برای هر کشور و به تبع آن مردم به دنبال دارد، اثرات زیان‌بار دیگری را نیز موجب می‌شود. پیش‌بینی شده است که تا سال ۲۰۲۵ بخش ساختمان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده انرژی باشد [۱ و ۲].

کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها به وسیله افزایش کارایی انرژی، مورد توجه بسیاری از کارشناسان قرار گرفته است [۳]. روش‌های متفاوتی برای کاهش هدررفت انرژی از میان دیوارها، سقف‌ها و کف ساختمان‌ها معرفی شده است؛ این روش‌ها چگونگی نگره داشتن دمای داخل ساختمان‌ها در سطح دمای آسایش را پیشنهاد داده‌اند [۴ و ۵].

عوامل زیادی در دمای داخل ساختمان مؤثرند؛ از جمله:

- متغیرهای محیطی بیرون ساختمان مانند دما، سرعت باد، تابش خورشید و...؛

- مشخصات گرمایی پوشش‌های ساختمانی مانند مقاومت گرمایی، ظرفیت گرمایی؛

- منابع گرمایی داخل ساختمان.

در کشور ما با توجه به اینکه انواع اقلیم آب‌وهوایی وجود دارد، بحث انرژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. سالانه هزینه هنگفتی در ایران صرف انرژی می‌شود که با روش‌های نوین می‌توان این مقدار را کاهش داد. در سال‌های اخیر، روش‌های متنوعی از جمله شیشه‌های دوجداره یا سه‌جداره، استفاده از لایه‌های عایق حرارتی در داخل دیوارها یا سقف‌ها مانند پلی‌استایرن‌ها، سیستم‌های گرمایشی نوین و...، مورد استفاده قرار گرفته است. اضافه کردن مواد تغییر فاز دهنده (PCM) در سازه‌ها با هدف افزایش کارایی انرژی در ساختمان یکی از این روش‌هاست [۶ و ۷].

مواد تغییر فاز دهنده به دلیل دارا بودن گرمای نهان بالا مورد توجه محققان قرار گرفته است. این مواد با داشتن قابلیت تغییر فاز تأثیر زیادی در متعادل نگه داشتن دمای اتاق دارند [۸]. تفاوت بین استفاده از یک عایق و یک ماده تغییر فاز دهنده، ناشی از ظرفیت ذخیره گرمایی نهان آن است. بالا بودن ذخیره انرژی و کمتر بودن عبور جریان گرما به دلیل پایین بودن هدایت گرمایی از لایه‌های ماده تغییر فاز دهنده جزء

ویژگی‌های آن محسوب می‌شود. آنالیزهای متعددی برای انتخاب مواد تغییر فاز دهنده مختلف برای مکان‌های متفاوت انجام شده است. اگر هدایت گرما و سرما در ساختمان بتواند کنترل شود، بحث ذخیره انرژی گرمایی در محیط داخل ساختمان می‌تواند محقق شود. ذخیره انرژی گرمایی به کمک ذخیره گرمای نهان و ذخیره گرمای محسوس انجام می‌شود [۹-۱۱].

استریتی و نوآک در سال ۱۹۹۶ یک دیوار خورشیدی برای تهیه ساختمان که انرژی خورشیدی را در بلوک‌های پارافین (با نقطه ذوب ۲۵-۳۰ °C) جذب می‌کرد، آماده کردند. بدین وسیله انرژی ذخیره‌شده برای گرم کردن ساختمان استفاده می‌شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که این پانل‌ها گرما را به صورت آشکار و نهان ذخیره می‌کنند و نقطه ذوب ماده تغییر فاز دهنده متأثر از دمای هوای بیرون است. آنالیز دیوار با گرمای مختلف فصول، ضخامت بهینه را در حدود ۵۰mm و نقطه ذوب را کمی بالاتر از دمای اتاق ارائه داد [۱۲].

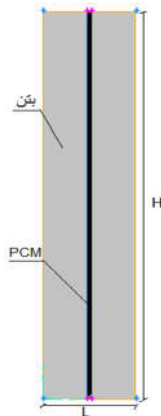
زوانزیک و همکاران در سال ۲۰۱۳ به کمک شبیه‌سازی عددی، عملکرد دیوارها و سقف‌های حاوی ماده تغییر فاز دهنده را بررسی کردند. جریان گرما یک‌بعدی در نظر گرفته شد. دمای چهار فصل به عنوان شرایط مرزی محیطی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد موقعیت ماده تغییر فاز دهنده نزدیک سطح داخل، عملکرد بهتری نشان می‌دهد و این موقعیت به مقاومت گرمایی بین لایه‌ها و شرایط مرزی محیطی وابسته است. پتانسیل ذخیره انرژی به کمک مقایسه عملکرد دیوارهای حاوی و بدون ماده تغییر فاز دهنده مورد ارزیابی قرار گرفت. علاوه بر آن، ماده تغییر فاز دهنده بار سرمایی سالیانه را در حدود ۱۹/۷٪ به کمک دیوارها و ۸/۱٪ به کمک سقف‌ها کاهش داد و به طور مشابه بار گرمایی را ۶٪ به کمک دیوارها و ۶/۴٪ به کمک سقف‌ها کاهش داد. همچنین نتایج نشان داد که بار اوج بیش از سه ساعت برای دیوارهای سمت جنوبی انتقال داده شد و نتایج برای سه ناحیه متفاوت نشان داد که عملکرد ماده تغییر فاز دهنده در نواحی مختلف کاملاً متفاوت است [۱۳].

رویان و همکاران در سال ۲۰۱۴ بر روی عملکرد مواد تغییر فاز دهنده در سقف‌های هالوکور تحقیق کردند. آن‌ها در یک شبیه‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار کمسول مواد تغییر فاز دهنده با نقطه ذوب ۲۷ °C را در حفره‌های سقف جاسازی کرده و نتایج دمای سطح داخلی این سقف‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج بیانگر اختلافی در حدود ۲/۵ بین سقف حاوی PCM و سقف بدون آن بود. در ادامه، نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و تطابق نسبتاً خوبی در نتایج مشاهده شد [۱۴].

مشتاقی در سال ۱۳۹۵، تأثیر مواد تغییر فاز دهنده بر روی مصالح بتن

خواص ترموفیزیکی مواد به جز مقدار تخلخل ϵ که در ادامه به آن اشاره شده است، ثابت فرض می‌شود.

(گفتنی است برای کاهش خطر آتش‌سوزی، مقدار ماده تغییر فاز دهنده به ۲۰٪ حجم دیوار محدود شده است). نحوه قرارگیری آن در داخل دیوار در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): نحوه قرارگیری ماده تغییر فاز دهنده در داخل دیوار

در این تحقیق، ۳ نوع مصالح شامل بتن معمولی، بتن سبک و گچ برای دیوار و ۹ نوع ماده تغییر فاز دهنده با توجه به شرایط دمایی شهرها انتخاب شده است. مشخصات گرمایی تمام این مصالح در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱): مشخصات گرمایی مصالح [۱۶ و ۱۷]

چگالی (ρ) (kg/m^3)	گرمای ویژه (C_p) ($\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{C}}$)	هدایت گرمایی (k) ($\text{w/m}\cdot\text{C}$)	گرمای نهان (L) (kJ/kg)	دمای تغییر فاز		نوع
				$^{\circ}\text{C}$	K	
۲۴۰۰	۷۵۰	۱/۴۵	-	-	-	بتن معمولی
۱۱۲۶	۲۱۳۵	۰/۲	۱۴۶/۵	۱۵-۲۵	۲۸۸-۲۹۸	PEG600
۸۰۰	۲۵۰۰	۰/۳۵	۲۴۵	۲۷/۵-۲۹	۳۰۰/۵-۳۰۲	Paraffin
۱۷۰۰	۳۰۲۰	۱	۱۹۰	۲۹-۳۱	۳۰۲-۳۰۴	CaCl
۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰/۱۴۹	۱۵۳	۳۱-۳۳	۳۰۴-۳۰۶	Capric Acid (CA)

کلی در مسائل گذرا (تابعی از زمان)، اگر مسئله تا چند تکرار سریع همگرا شود، می‌توان آن Δt را مناسب دانست. به همین منظور $t = 0/1$ ثانیه مینا قرار داده شده و Δt بهینه از روش زیر محاسبه می‌شود (تا ۵ تکرار حل همگرا می‌شود).

یک دمای مشخص به‌عنوان دمای مینا در نظر گرفته شده $(T=292/15945\text{k})$ سپس زمان رسیدن به این دما با $\Delta t = 1$ ثانیه ثبت شده و مقدار خطای موجود محاسبه می‌شود.

از در یک کار آزمایشگاهی بررسی کرد. او دو نوع ماده تغییر فاز دهنده با نام تجاری پلی اتیلن و هیدرات نمک را بررسی کرد. به‌منظور به‌کارگیری این مواد، سنگدانه‌های بتن را در این مواد غوطه‌ور کرده و در ادامه از ترکیب به‌دست‌آمده در ساخت بتن استفاده کرد. نتایج نشان داد که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده برحسب میزان مصرف بر واکنش هیدراتاسیون تأثیرگذار بوده و باعث کاهش مقاومت می‌شود که با حضور میکروسیلیس در طرح‌های اختلاط، میزان کاهش مقاومت به حداقل می‌رسد [۱۵].

با توجه به تحقیقات گذشته، در این پژوهش سعی شده انواع مختلفی از مواد تغییر فاز دهنده بررسی و بهینه‌ترین ماده انتخاب شود. مواد تغییر فاز دهنده به‌صورت چندلایه با موقعیت‌های متفاوت در نظر گرفته شده و برای بازه زمانی طولانی تری مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲. مدل‌سازی

۲.۱. هندسه و مصالح

به‌طور کلی در این تحقیق، دو ضخامت ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱ متر برای دیوار در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است ضخامت‌های موجود، فرضی بوده و انتخاب آن‌ها بر اساس استاندارد خاصی نبوده است اما سعی شده مقداری منطقی در نظر گرفته شود. ضخامت ماده تغییر فاز دهنده بسته به ضخامت دیوار بین ۵ تا ۲۰ درصد متغیر بوده است. لذا برای دیوار با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر مواد تغییر فاز دهنده با ضخامت ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ سانتی‌متر، و برای دیوار با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر، مواد تغییر فاز دهنده با ضخامت ۱، ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. تمام

۲.۲. شرایط مرزی

قبل از تحلیل توسط نرم‌افزار، باید مقادیر اولیه به نرم‌افزار معرفی شود. لذا مقدار دمای اولیه هوای سمت داخل 19°C فرض شده و تا پایان تحلیل، ثابت مانده است. نحوه تأثیر این دما بر سطح داخل دیوار به‌کمک ضریب انتقال گرمای همرفتی (h) در نظر گرفته شده است. انتخاب Δt بهینه در سرعت تحلیل نتایج، اهمیت زیادی دارد. به‌طور

اتمسفر در طول حل مقدار P_0 برابر 101325 kPa در نظر گرفته می‌شود. برای کوپل سرعت-فشار حالت پیژو^۱ فرض شده است. مقادیر جداسازها برای فشار پیش فرض پرستو^۲ و برای انرژی و مومنتوم ضریب بادسو مرتبه دوم^۳ در نظر گرفته شده و برای ضرایب زیر تخفیف، فشار 0.3 ، چگالی 1 ، نیروی بدنه 0.7 و انرژی 1 فرض شده است.

۳. تئوری

بنا بر اصل دوم ترمودینامیک، اگر قسمتی از یک سیستم نسبت به قسمت‌های دیگر آن اختلاف دما داشته باشد، انرژی حرارتی از نقاط گرم به سمت نقاط سرد جریان می‌یابد؛ بنابراین انتقال حرارت به صورت انرژی انتقال یافته از یک سیستم به سیستم دیگر در اثر وجود اختلاف دما بین دو سیستم تعریف می‌شود. لذا به زبان ساده‌تر، انتقال حرارت ناشی از اختلاف دماست. پس نیروی محرکه انتقال حرارت گرادیان دماست؛ بنابراین نرخ انتقال حرارت در یک جهت مشخص به میزان اختلاف دما در واحد طول بستگی دارد و هرچه اختلاف دما بین دو سیستم زیادتر باشد، نرخ انتقال حرارت بیشتر می‌شود. انتقال حرارت به کلی به سه روش هدایت، جابه‌جایی و تابشی صورت می‌گیرد. در اکثر مسائل کاربردی انتقال حرارت به صورت ترکیبی از دو یا سه روش فوق است و از بیان معادلات آن صرف نظر می‌شود.

۳.۱. تقریب آنتالپی تخلخل

برای فرایند تغییر فاز ماده تغییر فاز دهنده از تکنیک معروف آنتالپی-تخلخل^۴ استفاده می‌شود. در این تکنیک، مرز بین جامد و مایع به صورت صریح دنبال نمی‌شود. در تقریب آنتالپی-تخلخل کل دامنه حل به صورت یک محیط متخلخل در نظر گرفته شده و میزان تخلخل، کسر مایع را نشان می‌دهد. اگر ε میزان تخلخل یا به عبارتی کسر مایع در هر سلول را نشان دهد، طبق تعریف خواهیم داشت:

$$\varepsilon = 0 \quad \text{if } T \leq T_{\text{solidus}}$$

$$\varepsilon = 1 \quad \text{if } T \geq T_{\text{liquidus}}$$

$$\varepsilon = \frac{T - T_{\text{solidus}}}{T_{\text{liquidus}} - T_{\text{solidus}}}$$

در رابطه (۵)، T_{solidus} دمایی است که ماده تغییر فاز دهنده به طور کامل در حالت جامد و T_{liquidus} دمایی است که ماده تغییر فاز دهنده در حالت مایع قرار دارد. این شرط در نرم‌افزار قابل اجراست [۲۱].

صورت مناسب معادله انرژی در فرایند تغییر فاز توسط معادله (۶)

نوشته می‌شود:

$$T=292/15945K \left\{ \begin{array}{l} \Delta t=0/1s \rightarrow t=4589/8 \\ \Delta t=1s \rightarrow t=4586 \end{array} \right\} \text{خطا} = 0/06$$

به همین ترتیب خطا برای Δt های 10 ، 20 ، 60 و 120 ثانیه محاسبه شده و خطای آن‌ها به ترتیب 0.3 ، 0.34 ، 1 و 2.7 درصد ثبت می‌شود. با توجه به منطقی بودن خطای 1% در این مدل‌سازی، مقدار $\Delta t=60$ ثانیه به عنوان Δt بهینه انتخاب شده است. (شایان ذکر است که در 60 ثانیه تا زیر 20 تکرار همگرا می‌شود.)

در مدل‌سازی دیوارها از مش مربعی 4 گرهی برای المان انتقال حرارت استفاده شده است. به منظور انتخاب مش بندی بهینه نیز مانند Δt عمل کرده و مش‌های با بعد 1 cm برای بتن و 0.1 cm برای ماده تغییر فاز دهنده به عنوان مینا در نظر گرفته می‌شود. سپس مش‌های با ابعاد بزرگ‌تر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای مش‌بندی با ابعاد 1 cm برای بتن و 0.1 cm برای ماده تغییر فاز دهنده خطایی برابر 0.37% ثبت می‌شود. برای مش‌بندی با ابعاد 2 cm برای بتن و 0.1 cm برای ماده تغییر فاز دهنده خطایی برابر 0.85% ثبت می‌شود. برای مش‌بندی با ابعاد 4 cm برای بتن و 0.2 cm برای ماده تغییر فاز دهنده خطایی معادل 0.41% ثبت شده و در نهایت برای مش‌بندی 2 cm برای بتن و 0.2 cm برای ماده تغییر فاز دهنده به عنوان مش بهینه انتخاب شده است.

در تمام تحلیل‌های دیوار مقدار ضریب انتقال گرمای همرفتی برای داخل (h_{int}) برابر $5 \text{ w}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$ و برای خارج (h_{out}) برابر $20 \text{ w}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$ فرض شده است [۱۶]. دو سطح بالا و پایین دیوار ایزوله فرض شده است. دمای اولیه تحلیل نیز با فرض نزدیک بودن دمای داخل با سطح داخلی دیوارها، نزدیک به دمای سطح داخل فرض شده است. سرعت نیز صفر فرض شده است.

شرایط مرزی دیوار مطابق تعاریف زیر ارائه می‌شود:

$$h_o(T_{\infty,0} - T_{X=0}) = -k \frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{X=0} \quad (1)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{X=L} = h_i(T_{X=L} - T_{\infty,i}) \quad (2)$$

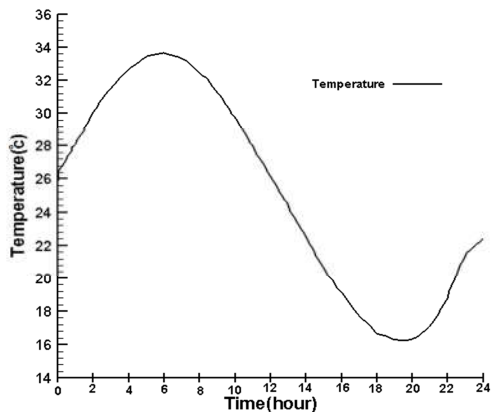
$$-k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \quad (3)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=H} = 0 \quad (4)$$

برای همگرایی معادلات مقدار باقی مانده در معادله انرژی برابر 10^{-9} و در معادله مومنتوم 10^{-5} فرض شده است [۱۸]. با توجه به پایین بودن سرعت در فرایند تغییر فاز از مدل جریان آرام و فشار

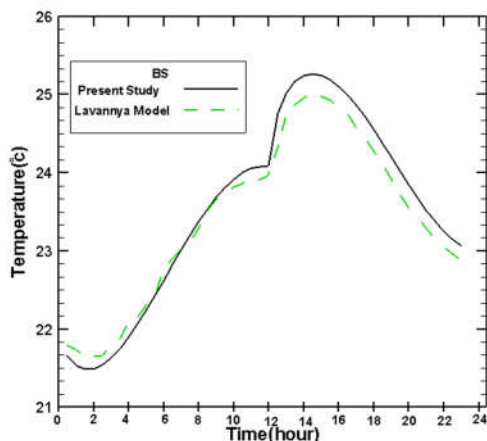
1. Piso
2. Presto
3. Second Order Upwind
4. Enthalpy-porosity

گرفته شده است. در این صحت‌سنجی، دو نوع ماده تغییر فاز دهنده و فقط دمای شهر لس‌آنجلس برای مقایسه نتایج در نظر گرفته شده است. لازم است بیان شود به علت زیاد بودن محدوده دمایی، نمودار آن در شکل جداگانه آورده شده است (شکل ۳). ضریب هدایت حرارت جابه‌جایی برای هوای بیرون $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$ و برای هوای داخلی $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$ به‌عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته شد. هر دو سطح بالا و پایین دیوار ایزوله فرض شد. مشخصات ماده تغییر فاز دهنده و بتن به‌کاررفته در این مدل در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل (۳): پروفیل دمایی لس‌آنجلس [۱۶]

برنامه حل عددی مورد استفاده در تحقیق آن‌ها ABAQUS بوده است. حال در این تحقیق به‌منظور صحت‌سنجی مدل‌های استفاده‌شده، مدل توصیف‌شده در بالا با تفاوت‌هایی ناشی از شرایط مدل‌سازی این تحقیق ساخته شده است. با توجه به نتایج اختلافی حداکثر در حدود $0/3$ تا $0/4$ درجه سانتی‌گراد در نتایج مشاهده شد. نتایج این صحت‌سنجی در شکل‌های (۴) و (۵) ارائه شده است. گفتنی است که تمامی نتایج، دمای سطح داخلی دیوار هستند. در ادامه، چند مورد از دلایل مهم اختلاف‌های موجود با نتایج به‌دست‌آمده توسط مدل به‌کاررفته در این تحقیق اشاره شده است.



شکل (۴): عملکرد دمایی BS

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho H \vec{V}) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (6)$$

با تعریف آنتالپی کل (H) که مجموع آنتالپی نهان و محسوس ماده بوده $H = h + \Delta H$ و با جای‌گذاری در معادله (۶) خواهیم داشت:

$$\frac{\partial \Delta}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u h) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v h) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + S_h + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (7)$$

عبارت u و v مقادیر سرعت در جهت مختصات هستند. عبارت S_h مربوط به جمله چاه در معادله انرژی به‌صورت معادله (۸) است.

$$S_h = \frac{-\partial(\rho \Delta H)}{\partial t} - \nabla \cdot (\rho \Delta H \vec{V}) \quad (8)$$

که ΔH تغییرات گرمای نهان سلول بوده و مطابق با رابطه $\Delta H = \varepsilon l$ به دست می‌آید.

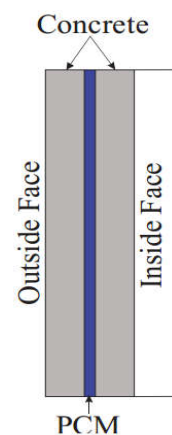
مقدار انرژی عبوری از سطح داخل دیوار (E_f) طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$E_f = \int_{t_i}^{t_f} \int_{y_1}^{y_2} \tau_x dy dt \quad (9)$$

۴. صحت‌سنجی

۴.۱. مقایسه با نتایج عددی همباد و همکاران [۱۶]

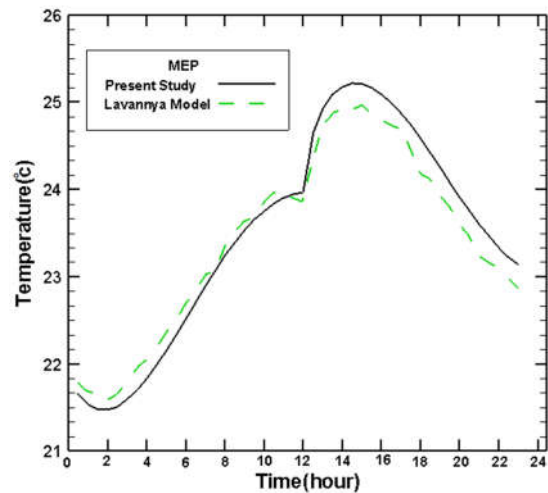
در این بخش، مطالعه حاضر با نتایج همباد مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است؛ لذا فرضیات در نظر گرفته‌شده منجر به نتایجی شده است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. در پایان نیز با نتایج این تحقیق مقایسه شده است.



شکل (۲): نحوه قرارگیری PCM در مدل همباد و همکاران [۱۶]

یک دیوار به ارتفاع ۱m و ضخامت ۲۰cm در نظر گرفته شده است. یک مش‌بندی مربعی یکنواخت با اندازه‌های ۵cm و یک دوره ۲۴ ساعته با گام‌های زمانی ۳۰ دقیقه در نظر گرفته شده است. دمای هوای داخل در ۱۲ ساعت اول $19 \text{ } ^\circ\text{C}$ و در ۱۲ ساعت دوم $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ و دمای شهر لس‌آنجلس و فینیکس به‌عنوان دمای محیط بیرونی در نظر

تغییر فاز دهنده‌ای که محدوده دمایی ذوب آن‌ها مناسب شرایط دمایی مورد نظر باشد، مورد سنجش قرار گرفته و دو نوع بهینه انتخاب شده است. از این رو ماده تغییر فاز دهنده با ضخامت ۱cm در یک دیوار ۲۰cm با بتن نرمال قرار داده شده و نتایج آن‌ها در شکل (۶) ارائه شده است. نتایج موجود دمای سطح داخلی دیوار را نشان می‌دهد. پروفیل دمایی شهر کاشان به عنوان دمای محیط و دمای داخل ۱۹ °C در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که ماده تغییر فاز دهنده در مرکز دیوار و به صورت لایه در نظر گرفته شده است. به منظور درک بهتر عملکرد ماده تغییر فاز دهنده در داخل دیوار، نتایج با دیوار در حالت بدون PCM مقایسه شده است. در شکل (۶) وجود ماده تغییر فاز دهنده نوسانات دمایی را کاهش داده است. مقدار کاهش نوسانات متناسب با ویژگی مواد تغییر فاز دهنده از جمله دمای تغییر فاز، ظرفیت گرمایی نهان و... متفاوت هستند. از آنجا که هدف از این تحقیق انتخاب ماده تغییر فاز دهنده با عملکرد دمایی مناسب است، PCM‌هایی با بیشترین کاهش نوسانات دمایی انتخاب شده‌اند.



شکل (۵): عملکرد دمایی MEP

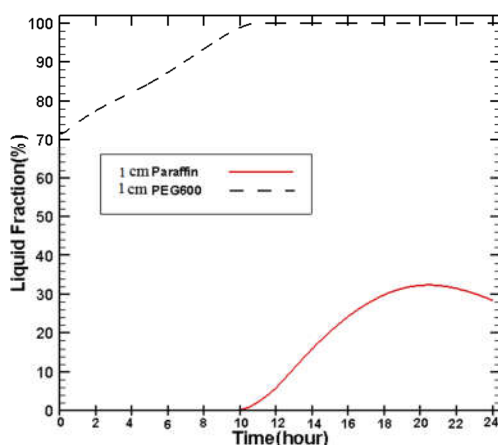
۵. تحلیل نتایج

۵.۱. انتخاب ماده تغییر فاز دهنده مناسب

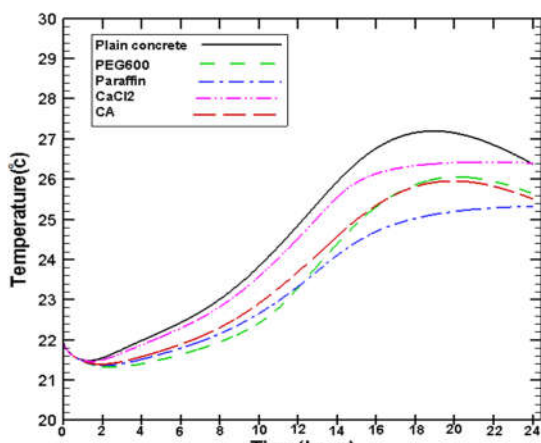
به منظور کاهش حجم بالای نتایج، دو نوع ماده تغییر فاز دهنده از لحاظ عملکرد مناسب‌تر انتخاب و ادامه کار با آن‌ها انجام شده است. لذا مواد

جدول (۲): مشخصات گرمایی مصالح در مدل همباد و همکاران [۱۶]

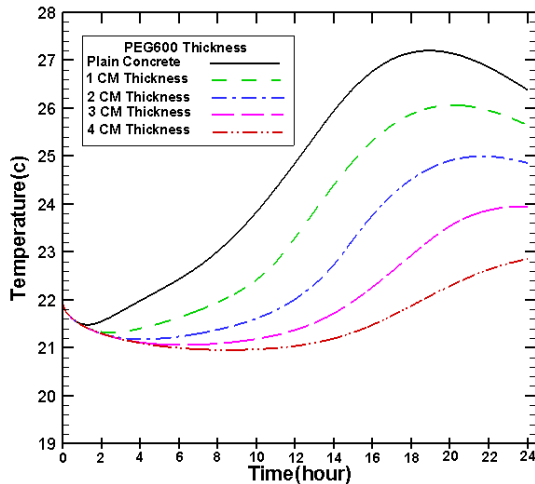
چگالی ρ	گرمای ویژه C_p	هدایت گرمایی K	گرمای نهان L	دمای تغییر فاز		نوع مصالح
				°C	K	
kg/m ³	J/kg-°C	W/m-°C	kJ/kg	-	-	بتن
۲۴۰۰	۷۵۰	۱/۴۵	-	-	-	بتن
۸۵۰	۱۳۸۶	۰/۲۲۵۶	۱۴۰	۱۸.۲۰	۲۹۱-۲۹۳	BS ^۱
۸۰۰	۲۴۰۰	۰/۲	۱۶۹	۲۷-۳۱	۳۰۰-۳۰۴	MEP ^۲



شکل (۷): درصد ذوب PCM در شرایط دمایی گرم کاشان



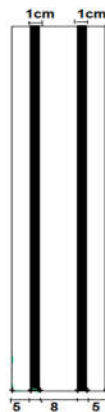
شکل (۶): عملکرد دمایی PCM در شرایط دمایی گرم کاشان



شکل (۹): تغییرات دمایی سطح داخلی دیوار ۲۰ سانتی متر با ضخامت‌های متفاوت PEG600

۲.۵ بررسی تأثیر نحوه چیدمان PCM (دولایه) در ذخیره انرژی

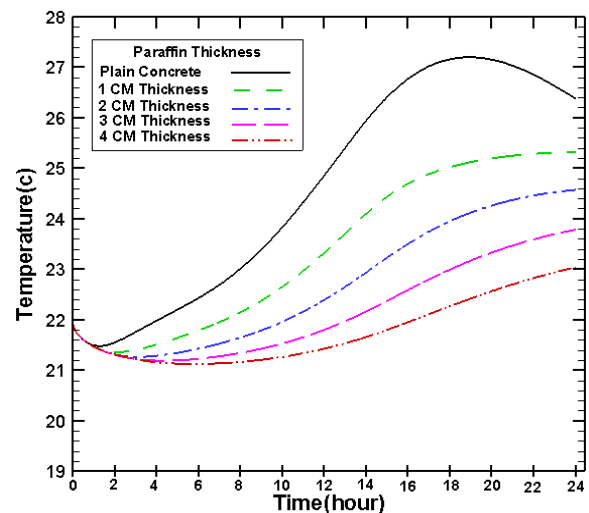
در این بخش سعی شده است به جای قرار دادن تمامی مواد تغییر فاز دهنده در وسط لایه بتن، آن‌ها را به دو قسمت مساوی تقسیم کرده و در دو قسمت نزدیک به سطح داخلی و نزدیک به سطح خارج قرار داده شوند (شکل ۱۰).



شکل (۱۰): نحوه چیدمان PCM در حالت دولایه

در این تحقیق، دو ضخامت ۱۰ و ۲۰ سانتی متر برای دیوار با بتن معمولی، PEG600 به عنوان ماده تغییر فاز دهنده در نظر گرفته شده است. نتایج این بررسی در جدول (۳) ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۳) تغییر در تعداد لایه‌ها تأثیر زیادی بر عملکرد ماده تغییر فاز دهنده نداشته و مقدار انرژی ذخیره شده را حداکثر ۱٪ افزایش می‌دهد. درصد کاهش در این جدول نسبت به حالت دیوار بدون ماده تغییر فاز دهنده ارائه شده است. دلیل این افزایش دسترسی راحت‌تر PCM به انرژی در حالت دولایه بوده است. شایان ذکر است ضخامت دیوار تأثیر چندانی بر افزایش انرژی ذخیره شده در دیوار در حالت دولایه نداشته است.

با توجه به نتایج Paraffin و PEG600 برای شرایط دمایی گرم کاشان در نظر گرفته شده‌اند و نمودارهای درصد ذوب این دو ماده در شکل (۷) ارائه شده است. بعد از تحلیل دیوار حاوی ماده تغییر فاز دهنده مشاهده می‌شود که وجود آن در هسته مرکزی دیوار، شرایط دمایی داخل را نسبت به حالت بدون PCM بهبود می‌بخشد. اگر به نتایج به دست آمده توجه شود، در ابتدای اکثر نمودارها یک افت مشاهده می‌شود که ناشی از کاهش دما در ساعات‌های اولیه است و پس از آن دما افزایش می‌یابد. همان گونه که در نتایج مشاهده می‌شود، در دیوار بدون ماده تغییر فاز دهنده دمای داخل با تبعیت از این تغییرات محیطی افزایش می‌یابد؛ ولی در دیوارهای حاوی PCM چون این مواد شروع به ذوب شدن می‌کنند، اجازه عبور گرما از دیوار داده نمی‌شود و گرما را در خود ذخیره می‌کنند. بعد از اینکه دما به حداکثر خود می‌رسد، در ادامه دما کاهش یافته و می‌توان آن را در حالت دیوار بدون ماده تغییر فاز دهنده مشاهده کرد. ولی در صورت وجود آن، زمانی که دما کاهش می‌یابد، ماده تغییر فاز دهنده مقدار گرمایی را که در خود ذخیره کرده است، با منجمد شدن دوباره به محیط بازمی‌گرداند. اگر به نمودار درصد ذوب توجه شود، مشاهده می‌شود که درصدی از ماده تغییر فاز دهنده در ابتدای تحلیل ذوب می‌شود. با مقایسه‌ای که بین نمودارهای تغییرات دمایی و درصد ذوب صورت گرفته، مشاهده می‌شود که ماده تغییر فاز دهنده که در پایان شروع به منجمد شدن کرده، نسبت به ماده‌ای که در پایان تغییری در درصد ذوب آن اتفاق نیفتاده است، نتایج بهتری ارائه می‌دهد. لذا می‌توان افزایش اختلاف میان نمودارها را با گذشت زمان به دلیل تفاوت در درصد ذوب این مواد در نظر گرفت. در ادامه، در شکل‌های (۸) و (۹) این دو ماده تغییر فاز دهنده با ضخامت‌های مختلف ارائه شده است.



شکل (۸): تغییرات دمایی سطح داخلی دیوار ۲۰ سانتی متر با ضخامت‌های متفاوت Paraffin

جدول (۳): مقایسه مقادیر انرژی عبوری (E_f) در حالت PCM تک لایه و

دو لایه					
ضخامت دیوار	PCM در دو لایه		PCM در یک لایه		ضخامت PCM (PEG600) Cm
	درصد کاهش	E_f kJ	درصد کاهش	E_f kJ	
۱۰ cm	-	۳۴۵۹	-	۳۴۵۹	۰
	۹/۵	۳۱۳۰	۸/۹۳	۳۱۵۰	۰/۵
	۱۷/۸	۲۸۴۳	۱۷/۱۷	۲۸۶۵	۱
	۲۵/۴۹	۲۵۷۷	۲۴/۷۷	۲۶۰۲	۱/۵
	۳۲/۶۶	۲۳۲۹	۳۱/۹۴	۲۳۵۴	۲
۲۰ cm	-	۲۴۱۴	-	۲۴۱۴	۰
	۱۹/۵	۱۹۵۴	۱۸/۲۲	۱۹۷۴	۱
	۳۴/۷۱	۱۵۷۶	۳۳/۵۹	۱۶۰۳	۲
	۴۷/۱۸	۱۲۷۵	۴۶/۴۳	۱۲۹۳	۳
	۵۵/۶۳	۱۰۷۱	۵۵/۵۵	۱۰۷۳	۴

است. نتایج این تحقیق در جدول (۴) ارائه شده است.

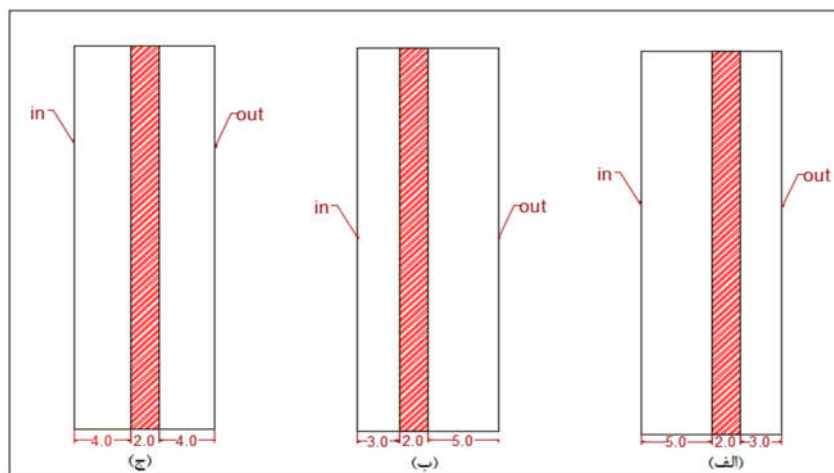
با توجه به نتایج، ماده تغییر فاز دهنده نزدیک به سطح داخل عملکرد بهتری نسبت به دیگر موقعیت‌ها دارد. حداکثر کاهش انرژی عبوری از سطح داخل در حالت نزدیک به سطح داخل ۲/۵٪ بیشتر از حالت ماده تغییر فاز دهنده در مرکز لایه بتن است؛ اما به طور کلی تغییر موقعیت آن تأثیر قابل توجهی بر عملکرد آن ندارد. مطابق نتایج در جدول مقدار انرژی عبوری با افزایش مقدار ماده تغییر فاز دهنده کاهش یافته است که قابل پیش‌بینی بود. اما نکته قابل توجه خطی نبودن این کاهش است؛ به عبارت دیگر با دو برابر شدن مقدار ماده تغییر فاز دهنده مقدار انرژی عبوری کمتر از دو برابر کاهش یافته است، و تنها علت آن کاهش کارایی با افزایش مقدار ماده تغییر فاز دهنده است.

۴.۵. عملکرد PCM برای یک دوره هفت‌روزه

در این بخش به منظور تکمیل سیکل‌های ذوب و انجماد ماده تغییر فاز دهنده، یک دوره دمای هفت‌روزه به منظور عملکرد آن در شرایط واقعی تری در نظر گرفته شده است. از این رو پروفیل دمایی هفت‌روزه گرم کاشان به عنوان دمای محیط (شکل ۱۲) در نظر گرفته شده است. ضخامت ۲۰ cm برای دیوار، بتن معمولی و ۴ سانتی‌متر PEG600 به عنوان ماده تغییر فاز دهنده در نظر گرفته شده است. نحوه عملکرد آن در کاهش نوسانات دمای سطح داخل در شکل (۱۳) ارائه شده است. نتایج گویای عملکرد نسبتاً مناسب ماده تغییر فاز دهنده در کاهش نوسانات دمایی سطح داخل است. در حالت وجود آن محدوده نوسانات حداکثر ۴ °C کاهش می‌یابد و علاوه بر کاهش محدوده نوسانات، اوج گرمایی نیز منتقل می‌شود. برای مثال در سیکل اول، اوج گرمایی در حدود ۸ ساعت منتقل می‌شود که مقدار قابل توجهی است؛ اما هرچه زمان می‌گذرد این مقدار کاهش می‌یابد و علت آن پایدار شدن وضعیت PCM در ادامه سیکل‌هاست.

۵.۳. بررسی تأثیر موقعیت PCM در داخل دیوار

به منظور بهبود عملکرد PCM، موقعیت قرارگیری آن در داخل دیوار تغییر داده می‌شود و نحوه عملکرد آن بررسی می‌گردد. نتایج برای سه موقعیت در مرکز دیوار، نزدیک به سطح داخل و نزدیک به سطح خارج مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. دو ضخامت ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر با بتن معمولی و PEG600 به عنوان ماده تغییر فاز دهنده در نظر گرفته شده است. گفتنی است فاصله لایه ماده تغییر فاز دهنده از سطح داخل در دیوار ۱۰ cm در حالت نزدیک به سطح داخل برابر ۳cm و در دیوار ۲۰ cm برابر ۶cm در نظر گرفته می‌شود. فاصله لایه ماده تغییر فاز دهنده از سطح خارجی در دیوار ۱۰ cm در حالت نزدیک به سطح خارج برابر ۳cm و در دیوار ۲۰ cm برابر ۶cm در نظر گرفته می‌شود. نحوه قرارگیری این مواد تغییر فاز دهنده در موقعیت‌های مختلف به صورت طرح‌واره برای دیوار ۱۰ cm در شکل (۱۱) نشان داده شده



شکل (۱۱): نحوه قرارگیری PCM در داخل دیوار در سه حالت، (الف) نزدیک به سطح خارجی، (ب) نزدیک به سطح داخلی، (ج) در مرکز

جدول (۴): مقادیر انرژی عبوری از دیوار (E_f) در موقعیت‌های مختلف PCM

نزدیک به سطح خارجی		در مرکز		نزدیک به سطح داخلی		ضخامت PCM	ضخامت دیوار
درصد کاهش	E_f	درصد کاهش	E_f	درصد کاهش	E_f		
%	kJ	%	kJ	%	KJ	Cm	
-	۳۴۵۹	-	۳۴۵۹	-	۳۴۵۹	۰	cm۱۰
۹/۴۸	۳۱۳۱	۸/۹۳	۳۱۵۰	۹/۶۵	۳۱۲۵	۰/۵	
۱۷/۶۹	۲۸۴۷	۱۷/۱۷	۲۸۶۵	۱۷/۸۶	۲۸۴۱	۱	
۲۵/۱۵	۲۵۸۹	۲۴/۷۷	۲۶۰۲	۲۵/۴۹	۲۵۷۷	۱/۵	
۳۲/۲۶	۲۳۴۳	۳۱/۹۴	۲۳۵۴	۳۲/۶۳	۲۳۳۰	۲	
-	۲۴۱۴	-	۲۴۱۴	-	۲۴۱۴	۰	cm۲۰
۱۸/۸	۱۹۶۰	۱۸/۲۲	۱۹۷۴	۲۰	۱۹۳۱	۱	
۳۳/۵۱	۱۶۰۵	۳۳/۵۹	۱۶۰۳	۳۵/۷۹	۱۵۵۰	۲	
۴۵/۸۵	۱۳۰۷	۴۶/۴۳	۱۲۹۳	۴۸/۵۵	۱۲۴۲	۳	
۵۵/۵۰	۱۰۷۴	۵۵/۵۵	۱۰۷۳	۵۶/۶۶	۱۰۴۶	۴	

است. برای شرایط آب‌وهوایی دو نوع ماده تغییر فاز دهنده با مشخصات متفاوت با ضخامت ۵ تا ۲۰ درصد حجم دیوار در نظر گرفته شد. نحوه استفاده از آن به صورت چندلایه و همچنین تغییر در موقعیت آن در داخل دیوار مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این قسمت نتایج به دست آمده از تحلیل‌های انجام گرفته به طور خلاصه جمع‌بندی شده و ذکر می‌گردد.

➤ به طور کلی وجود ماده تغییر فاز دهنده نوسانات دمایی را کاهش می‌دهد. این کاهش متناسب با نوع PCM متفاوت است و حداکثر آن برای شرایط دمایی کاشان در حدود ۴ درجه سانتی‌گراد است.

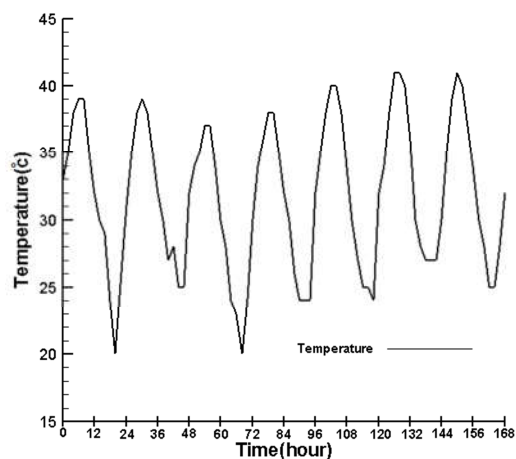
➤ بعضی از مواد تغییر فاز دهنده مانند PEG600 در برخی از شرایط دمایی بعد از ذوب شدن منجمد نمی‌شوند و به عبارت دیگر سیکل ذوب و انجماد تکمیل نمی‌شود؛ لذا از تمام قابلیت آن استفاده نمی‌شود.

➤ به طور کلی Paraffin برای شرایط دمایی گرم کاشان عملکرد مناسب‌تری دارند.

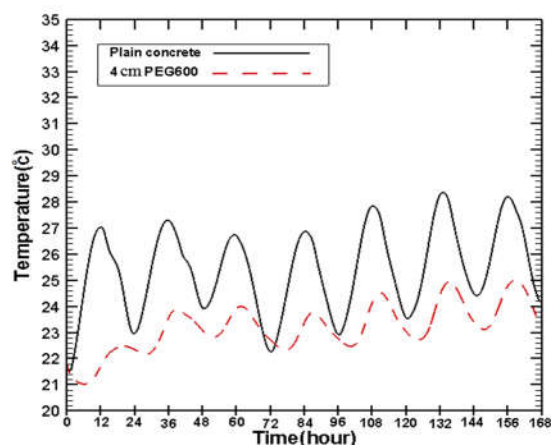
➤ استفاده از ماده تغییر فاز دهنده به صورت چندلایه باعث افزایش ذخیره انرژی در دیوار می‌شود؛ اما این مقدار بسیار ناچیز است.

➤ وجود ماده تغییر فاز دهنده نزدیک به سطح داخلی دیوار در شرایط دمایی کاشان عملکرد بهتری نسبت به دیگر موقعیت‌ها (نزدیک به سطح خارج و مرکز) دارد؛ اما اختلاف آن ناچیز است.

به طور کلی با توجه شرایط کشور و نوسانات شدید دمایی، استفاده از مواد جدید ضرورت پیدا می‌کند. هزینه هنگفت مصرف انرژی سبب



شکل (۱۲): دمای هفت‌روزه کاشان دیوار



شکل (۱۳): نوسانات دمایی سطح داخلی

۶. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق سعی شده است به عملکرد ماده تغییر فاز دهنده در اجزای ساختمان به طور وسیع پرداخته شود. در ابتدا در مورد دیوارها با دو ضخامت ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر، شامل مصالح بتن معمولی، بحث شده

K	ضریب هدایت حرارتی	می‌شود که کاهش نوسانات مطابق مقاله ارائه شده تا حدود ۴ °C نقش
L	گرمای نهان	بسیاری در کاهش آن‌ها داشته باشد.
C_p	گرمای ویژه	
ρ	چگالی	
ε	میزان تخلخل	
V	سرعت	
E_f	انرژی عبوری از سطح داخلی دیوار	
τ_x	جریان گرم	
t_i	زمان اولیه	
t_f	زمان نهایی	
S_h	جمله چاه	
H	آنتالپی کل	
		فهرست علائم
		h ضریب انتقال گرمای همرفتی
		h_{int} ضریب انتقال گرمای همرفتی داخل
		h_{out} ضریب انتقال گرمای همرفتی خارج
		t زمان
		$T_{\infty,0}$ دما محیط بیرونی
		$T_{\infty,i}$ دمای محیط داخل
		$T_{X=0}$ دمای سطح بیرون
		$T_{X=L}$ دمای سطح داخل

مراجع

- [۱] صدیق ضیابری، سیده حدیثه، «بررسی نمونه‌هایی از استفاده تکنولوژی سبز در معماری ساختمان‌های برتر جهان»، مجموعه مقالات اولین همایش ملی معماری پایدار، ۱۳۸۸.
- [2] Wang, X., Zhang, Y., Xiao, W., Zeng, R., Zhang, Q. and Di, H., "Review on Thermal Performance of Phase Change Energy Storage Building Envelope", Chinese Science Bulletin, Vol. 54, No. 6, pp. 920-928, 2009.
- [3] Biswas, K. and Abhari, R., "Low-Cost Phase Change Material as an Energy Storage Medium in Building Envelopes: Experimental and Numerical Analysis", Energy Conversion and Management, Vol. 88, pp. 1020-1031, 2014.
- [4] Feng, Y., "Thermal Design Standards for Energy Efficiency of Residential Buildings in Hot Summer/Cold Winter Zones", Energy and Buildings, Vol. 36, No. 12, pp. 1309-1312, 2004.
- [5] Nicol, J. F. and Humphreys, M. A., "Adaptive Thermal Comfort and Sustainable Thermal Standards for Buildings", Energy and Buildings, Vol. 34, No. 6, pp. 563-572, 2002.
- [6] Kuznik, F. and Virgone, J., "Experimental Assessment of a Phase Change Material for Wall Building Use", Applied Energy, Vol. 86, No. 10, pp. 2038-2046, 2009.
- [7] Baetens, R., Jelle, B. P. and Gustavsen, A., "Phase Change Materials for Building Applications: a State-of-the-Art Review", Energy and Buildings, Vol. 42, No. 9, pp. 1361-1368, 2010.
- [8] Raoux, S., "Phase Change Materials", Annual Review of Materials Research, Vol. 39, pp. 25-48, 2009.
- [9] Kuznik, F., David, D., Johannes, K. and J. J. Roux, "A Review of PCM Integrated in Building Walls", Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 15, pp. 379-391, 2011.
- [10] Mehling, H. and Cabeza, L. F. Heat and Cold Storage with PCM. Berlin: Springer, 2008.
- [11] Demirbas, M. F., "Thermal Energy Storage and Phase Change Materials: an Overview", Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy, Vol. 1, pp. 85-95, 2006.
- [12] Strith, U. and Novak, P., "Solar Heat Storage Wall for Building Ventilation", Renewable Energy, Vol. 8, pp. 268-271, 1996.
- [13] Zwanzig, S. D., Lian, Y. and Brehob, E. G., "Numerical Simulation of Phase Change Material Composite Wallboard in a Multi-Layered Building Envelope", Energy Conversion and Management, Vol. 69, pp. 27-40, 2013.
- [14] Royon, L., Karim, L. and Bontemps, A., "Optimization of PCM Embedded in a Floor Panel Developed for Thermal Management of the Lightweight Envelope of Buildings", Energy and Buildings, Vol. 82, pp. 385-390, 2014.
- [15] مشتاقی، امین، بررسی تأثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCM) در بتن از نقطه نظر خواص مکانیکی و حرارتی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۵.
- [16] Hembade, L., Neithalath, N. and Rajan, S. D., "Understanding the Energy Implications of Phase-Change Materials in Concrete Walls Through Finite-Element Analysis", Journal of Energy Engineering, Vol. 140, pp. 04013009, 2013.
- [17] Kalnæs, S. E. and Jelle, B. P., "Phase Change Materials and Products for Building Applications: A State-of-the-Art Review and Future Research Opportunities", Energy and Buildings, Vol. 94, pp. 150-176, 2015.
- [18] FLUENT 6.3 User's Guide, 2006.
- [19] Holman, J. P., Heat transfer. Mc Gran-Hill Book Company, Soythern Methodist University, 1986.
- [20] Bergman, T. L. and Incropera, F. P., Introduction to Heat Transfer. John Wiley and Sons, 2011.
- [21] Voller, V.R., Cross, M. and Markatos, N. C., "An Enthalpy Method for Convection Diffusion Phase Change", Int. J. Numer. Methods Eng., Vol. 24, pp. 271-284, 1987.
- [22] Kern, D. Q., Process Heat Transfer. Tata McGraw-Hill Education, 1950.