

مطالعه عددی و شبیه‌سازی عملکرد یک مبدل حرارتی پر شده با ماده تغییر فاز برای سامانه تهویه مطبوع یک ساختمان مسکونی در مناطق گرم و خشک ایران

علی میراحمد^۱، سید مجتبی صدرعاملی^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

Ali_Mirahmad@Yahoo.com

^۲ استاد دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

Sadramel@modares.ac.ir

چکیده:

به دلیل تغییرات آب‌وهوایی و افزایش استانداردهای زندگی، کنترل دمای هوای داخل منازل و تثبیت آن در دمای آسایش، اهمیت بسیاری یافته است. نیاز به سرمایش و خنک کردن هوا طی روزهای گرم تابستان، باعث رسیدن به اوج مصرف برق می‌شود. استفاده از مواد تغییر فاز در سامانه‌های ذخیره‌کننده انرژی سرمایشی و گرمایشی می‌تواند سبب جابجایی زمان اوج مصرف و راه حلی برای این مشکل باشد. در این مقاله، نتایج یک مدل‌سازی ریاضی مبتنی بر ظرفیت حرارتی مؤثر و شبیه‌سازی آن برای یک مبدل حرارتی پر شده با مواد تغییر فاز مورد استفاده در سامانه تهویه یک منزل مسکونی فرضی در مناطق کویری ایران ارائه شده است. همچنین برای ارزیابی هرچه بهتر سامانه پیشنهادی، گرمای جذب شده توسط ماده تغییر فاز در مقایسه با مصرف انرژی دمنده هوای سامانه، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان از آن دارد که حدود ۳ برابر انرژی مصرفی دمنده، گرمای نامطلوب توسط ماده تغییر فاز جذب می‌شود. نکته حائز اهمیت دیگر آن است که بیش از ۷۰ درصد انرژی مصرفی دمنده در طول شب صورت می‌پذیرد که این امر تأثیر بسزایی در جابجایی زمان اوج بار دارد.

واژه‌های کلیدی: سرمایش رایگان، ماده تغییر فاز، گرمای نهان، ذخیره‌سازی انرژی گرمایی، حل عددی.

۱. مقدمه

این فرایند، فرایند جذب انرژی نامیده می‌شود. ب. فرایند دفع انرژی: همان‌طور که در شکل (ب-۱) نشان داده شده، فرایند دفع انرژی در طول شب انجام می‌شود که دمای محیط از دمای اتاق کمتر است. هوای سرد با عبور از میان ماده تغییر فاز، گرما را جذب خود کرده و باعث جامد شدن ماده تغییر فاز در محدوده دمایی معینی می‌شود. فرایند دفع انرژی تا زمانی که دمای محیط کمتر از دمای آسایش باشد، می‌تواند ادامه پیدا کند [۱].

یکی از مطالعات ابتدایی درباره سرمایه‌های رایگان در ساختمان‌ها در سال ۲۰۰۰، توسط ترنپنی و همکاران [۲] انجام شد که آن‌ها لوله حرارتی را با سامانه ذخیره‌کننده انرژی که حاوی ماده تغییر فاز بود، ادغام کردند. این گروه با آزمایش‌هایی که بر روی سولفات سدیم به‌عنوان ماده تغییر فاز انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که چه در فرایند دفع انرژی و چه در فرایند جذب انرژی، بهتر است $15^{\circ}C$ اختلاف دما بین ماده تغییر فاز و هوای عبوری وجود داشته باشد، در غیر این صورت افزایش دبی هوا اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.

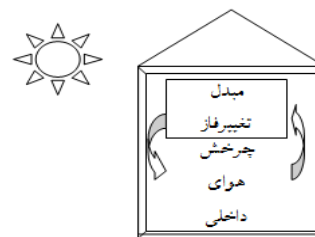
در تحقیق دیگری که توسط کوسکسو و بروئلدنر سال ۲۰۱۰ انجام شد [۳]، اثر نوسانات دمای هوای ورودی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج کار آن‌ها نشان از آن داشت که نحوه نوسانات دمای هوای ورودی (با ثابت ماندن نوع ماده تغییر فاز) می‌تواند بر روی کنترل مناسب دما در خروجی مبدل تغییر فاز تأثیر منفی بگذارد. این گروه علت ناکامی برخی مطالعات صورت گرفته در زمینه سرمایه‌های رایگان را با این موضوع مرتبط دانستند.

وکیل‌التجار و سامان در سال ۲۰۰۱ [۴] یک سامانه ذخیره‌کننده انرژی گرمایی را با سامانه تهویه ادغام کردند. آن‌ها ۳ مدل ریاضی انتقال حرارت را با فرضیات گوناگون ارائه کرده و سپس برای ارزیابی متغیرهای مؤثر آزمایش‌هایی را طراحی کردند. نتایج کار آن‌ها نشان می‌داد که هرچه فاصله میان پوشش‌های مکعب‌مستطیلی کمتر باشد، عملکرد دستگاه بهبود می‌یابد.

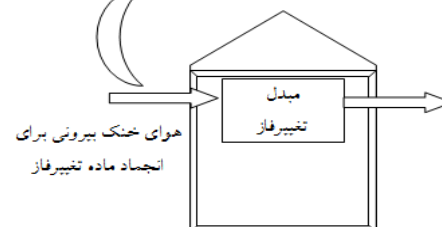
براساس یافته‌های زالبا و همکاران در سال ۲۰۰۴ [۵]، مبنی بر اینکه پوشش‌های مکعب‌مستطیلی نازک‌تر در سرمایه‌های رایگان عملکرد بهتری دارند، دو مبدل حاوی ماده تغییر فاز در مقیاس واقعی توسط لازارو و همکاران در سال ۲۰۰۹ [۶] ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. نمونه اول با کیسه‌های آلومینیومی که با ماده تغییر فاز غیرآلی پر شده بودند، ساخته شد؛ در حالی که در نمونه دوم، از قابی آلومینیومی که درون آن از ماده تغییر فاز غیرآلی پر شده بود، استفاده شد. با کمک اندازه‌گیری دمای هوای خروجی توان سرمایه‌های مبدل تخمین زده شد. قاب آلومینیومی ضخامت یکسانی داشت و با توجه به کم بودن مقاومت

حدود چهل درصد کل انرژی در دنیا سالانه در ساختمان‌های مسکونی و تجاری مصرف می‌شود که این به معنای سهم یک‌سومی ساختمان‌ها در صدور گازهای گلخانه‌ای در سرتاسر جهان است. بخش چشمگیری از این انرژی صرف خنک کردن، گرم کردن و در نتیجه، تهویه هوای ساختمان‌ها برای رسیدن به دمای آسایش می‌شود. «سرمایش رایگان» به‌عنوان جانشینی برای سامانه‌های تهویه کمپرسوردار در ساختمان‌ها معرفی شده است. در سرمایه‌های رایگان، سرمای هوای شب در سامانه‌های ذخیره و این سرما به هنگام نیاز در طول روز آزاد می‌شود. سامانه‌های ذخیره‌کننده گرمای نهان با کمک مواد تغییر فاز، به‌علت دارا بودن ظرفیت بالای حرارتی، می‌توانند در این زمینه به‌کار گرفته شوند. در سرمایه‌های رایگان با کمک مواد تغییر فاز، سرمای هوای شب برای جامد کردن ماده تغییر فاز به‌کار می‌رود (فرایند دفع انرژی) و فاز جامد تشکیل شده در طول روزهای گرم با جذب انرژی مایع می‌شود (فرایند جذب انرژی).

(الف)



(ب)



شکل (۱): اساس کار سرمایه‌های رایگان الف. جذب گرما ب. دفع گرما

اساس کار سرمایه‌های رایگان ساختمان‌ها که در شکل (۱) نشان داده شده، دو مرحله دارد:

الف. فرایند جذب انرژی: همان‌طور که در شکل (الف-۱) نشان داده شده است، سرمای ذخیره‌شده در ماده تغییر فاز، زمانی که دمای محیط بالاتر از دمای آسایش باشد، آزاد می‌شود. هوای گرمی که قرار است خنک شود، از میان مبدل حاوی ماده تغییر فاز عبور کرده و ماده تغییر فاز، گرما را از هوا جذب می‌کند. ماده تغییر فاز با جذب گرمای هوا به تدریج از حالت جامد به مایع تبدیل می‌شود.

بخش‌های مذاب ماده تغییر فاز صرف‌نظر شده بود. آن‌ها با مطالعه بر روی سامانه‌های دربرگیرنده تترادکان به‌عنوان ماده تغییر فاز که داخل لوله‌هایی از CPVC^۱ ریخته شده بودند، توانستند مدل خود را اثبات کنند [۱۳].

استرمن و همکاران در پژوهشی در سال ۲۰۱۵، به مطالعه کارکرد سرمایشی (طی فصول گرم سال)، گرمایشی (طی فصول سرد سال) سامانه‌های تغییر فاز در طول یکسال کامل پرداخته‌اند. این گروه ضمن معرفی مدلی ریاضی نشان داده‌اند که سامانه فوق منجر به کاهش مصرف انرژی به میزان ۱۴۲kWh/Year برای تهویه دفتر کاری در لیوبلیانا می‌شود [۱۴].

در ابتدای پژوهش حاضر، صحبتیک مدل ریاضی انتقال حرارت مبتنی بر ظرفیت گرمایی مؤثر که برای صفحات تخت حاوی ماده تغییر فاز توسعه یافته، اثبات شده است. سپس با کمک مدل ریاضی معرفی شده، به امکان‌سنجی کارکرد مواد تغییر فاز در کاهش انرژی مورد نیاز برای تهویه واحد مسکونی واقع در مناطق کویری ایران پرداخته شده است.

۱. مدل ریاضی به‌کاررفته برای مبدل تغییر فاز

با توسعه روابط انتقال حرارت برای جریان هوای عبوری از میان صفحات تخت که تصویر نمونه‌ای از آن در شکل (۲) آورده شده، با بهره‌گیری از فرضیات زیر مبدل تغییر فاز مدل‌سازی شده است:

۱. از هدایت حرارتی هوا در جهت محوری صرف‌نظر می‌شود، زیرا رسانش حرارتی سیال در سرعت‌های بسیار کم اهمیت پیدا می‌کند. در این زمینه، از عدد بدون بعد پکلت^۲ به‌عنوان معیار [۱۵] استفاده می‌شود:

$$Pe = Re \cdot Pr = \frac{\rho v c_p d_h}{k}; d_h = \frac{2ab}{a+b} \quad (1)$$

به‌گونه‌ای که در پکلت‌های بزرگ‌تر از ۱۰۰، هدایت محوری هوا بی‌اهمیت بوده و در اعداد پکلت کمتر از ۱۰۰، این موضوع اهمیت می‌یابد. محاسبات نشان می‌دهند که در کمترین سرعت (۰.۲m/s) که با کمترین مقدار پکلت نیز همراه است، عدد پکلت حدود ۱۷۰ است؛

$$Pe = \frac{\rho v c_p d}{k} = \frac{(1.127)(0.2)(1005) \left(\frac{2(0.0515 \times 0.013)}{0.0515 + 0.013} \right)}{0.0271} = 173$$

۲. بستر کاملاً عایق بوده و انتقال حرارتی با محیط اطراف ندارد.

رسانش انتقال حرارت درون آن، توان سرمایش بالاتری را نشان می‌داد. یکی از عیب‌های کیسه‌های آلومینیومی، پاره‌شدن و نشست کردن آن‌ها بود. این مطالعه نشان می‌داد انتخاب هندسه و جنس پوشش می‌تواند خود، به مهمی انتخاب ماده تغییر فاز باشد.

انطباق‌پذیری سرمایش رایگان حاوی ماده تغییر فاز برای کاهش انرژی مورد نیاز تهویه و سرمایش ساختمان‌ها، به‌جای وابستگی به میانگین دمای منطقه [۷]، به بزرگی دامنه‌نوسان‌های دمایی روزانه بستگی دارد [۸]. با توجه به موارد ذکرشده، سرمایش رایگان برای مناطق کویری مناسب‌تر از مناطق ساحلی و معتدل است. از مواد تغییر فازی با دمای بالا می‌توان برای کاهش انرژی مصرفی خنک کردن هوا در تابستان‌های مناطق گرم‌تر (مثل مناطق حاره‌ای) و از مواد تغییر فازی با دمای پایین می‌توان برای گرمایش در زمستان‌های مناطق بالای ۲۰°N عرض جغرافیایی استفاده کرد [۹]. برای اقلیم‌هایی با تفاوت دمایی شب و روز کمتر، به‌کارگیری ماده تغییر فاز در سامانه تهویه، نیازمند دقت و حساسیتی دوچندان، چه در مرحله انتخاب ماده تغییر فازی چه در مرحله انتخاب پوشش مناسب است، زیرا اگر دمای شب به اندازه کافی برای انجماد ماده تغییر فاز پایین نباشد و ماده تغییر فاز جامد نشود، استفاده از گرمای نهان نه تنها اثر مثبتی نمی‌گذارد، بلکه در روز بعد، انرژی مصرفی سامانه‌های متداول را هم افزایش می‌دهد؛ چون بخشی از سرمای تولیدی سامانه‌های خنک‌کننده صرف جامد شدن ماده تغییر فاز می‌شود [۱۰]. فلیکس رجین و همکاران در سال ۲۰۰۶، از روش آنتالپی برای مدل‌سازی سامانه ذخیره‌سازی گرمای نهان حاوی پوشش‌های استوانه‌ای استفاده کردند. آن‌ها از مشاهدات خود دریافتند که در شروع فرایند ذوب مبادله گرما مطلوب است؛ سپس به دلیل ظهور اولین لایه مایع، این مبادله گرما سریعاً کاهش می‌یابد و مقاومت حرارتی رشد می‌کند، اما با پیشروی فرایند ذوب و با شروع جابه‌جایی آزاد، روند نزولی مبادله گرما کند می‌شود [۱۱].

نچار و حسن در سال ۲۰۰۸، به بررسی کارکرد مواد تغییر فاز در کاهش نوسانات دمایی گلخانه‌ها پرداختند. آن‌ها در بررسی خود نشان دادند که می‌توان گرمای زیاد ایجاد شده در طول روز را با کمک مواد تغییر فاز جذب کرده (با تشکیل فاز مایع) و از این طریق، از رشد بی‌رویه دما در گلخانه‌ها جلوگیری کرد. مطالعه آن‌ها نشان می‌داد با این روش می‌توان در گرم‌ترین ساعات روز، دما را تا ۵ درجه سانتی‌گراد کاهش داد [۱۲].

بورن و نوسلاک در سال ۲۰۱۵، مدلی را برای سامانه‌های حاوی ماده تغییر فاز معرفی کردند که در آن، از اثر جابه‌جایی آزاد در

1. Chlorinated Poly Vinyl Chloride
2. Peclet

از حل معادله دیفرانسیل مرتبه اول (۲) با شرط مرزی مشخص شده معادله (۴) حاصل خواهد شد:

$$T(x, t) = T_{PCM}(x, t) + (T_{in}(x, t) - T_{PCM}(x, t)) e^{\frac{-PU_p \Delta x}{VA \rho c_{pg}}} \quad (۴)$$

معادله (۴) با تبدیل $x \rightarrow i \Delta x$ و $t \rightarrow j \Delta t$ به صورت عددی درمی‌آید:

$$T(i+1, j) = T_{PCM}(i, j) + (T(i, j) - T_{PCM}(i, j)) e^{\frac{-PU_p \Delta x}{VA \rho c_{pg}}} \quad (۵)$$

بنابراین برای مقدار گرمای مبادله شده در هر المان، رابطه (۶) به دست خواهد آمد:

$$Q(i, j) = VA \rho c_{pg} (T(i+1, j) - T(i, j)) \quad (۶)$$

با ادغام دو معادله (۵) و (۶)، معادله (۷) حاصل می‌شود:

$$Q(i, j) = VA \rho c_{pg} (1 - e^{\frac{-PU_p \Delta x}{VA \rho c_{pg}}}) (T(i, j) - T_{PCM}(i, j)) \quad (۷)$$

از آنجایی که تمام گرمای منتقل شده به هوای سرد توسط ماده تغییر فاز تأمین می‌شود، می‌توان گفت که معادله (۷) مبین گرمای خروجی از ماده تغییر فاز است و با نوشتن موازنه انرژی برای هر حجم کنترل از ماده تغییر فاز، رابطه (۸) به این صورت حاصل می‌شود:

$$q_x - q_{x+dx} - Q = m_p C_p (T_{PCM}) \frac{dT_{PCM}}{dt} \quad (۸)$$

$$k_p a \delta \frac{\partial^2 T_{PCM}}{\partial x^2} dx - Q = m_p C_p (T_{PCM}) \frac{dT_{PCM}}{dt} \quad (۹)$$

برای حل رابطه (۹)، از دو شرط مرزی و یک شرط اولیه زیر استفاده می‌شود:

$$X \frac{\partial T_{PCM}}{\partial x} = 0 = \quad (۱۰)$$

$$X \frac{\partial T_{PCM}}{\partial x} = 0 = \quad (۱۱)$$

$$T_{PCM}(x, 0) = T_0 \quad (۱۲)$$

$$T_{PCM}(i, j+1) =$$

$$T_{PCM}(i, j) + \frac{\Delta t}{C_p (T_{PCM}(i, j)) m_p}$$

$$\times [VA \rho c_{pg} (1 - e^{\frac{-PU_p \Delta x}{VA \rho c_{pg}}}) (T(i, j) - T_{PCM}(i, j))] + \frac{k_p a \delta \Delta t}{C_p (T_{PCM}(i, j)) m_p \Delta x}$$

$$\times [T_{PCM}(i+1, j) - 2T_{PCM}(i, j) + T_{PCM}(i-1, j)] \quad (۱۳)$$

۳. از تأثیر بدنه بستر بر انتقال حرارت صرف نظر می‌شود.

۴. تمام خصوصیات هوا و ماده تغییر فاز، به جز ظرفیت حرارتی ماده تغییر فاز، ثابت و مستقل از دما در نظر گرفته می‌شوند.

۵. هیچ گونه واکنش شیمیایی در بستر به وجود نمی‌آید.

۶. سرعت جرمی و ضریب انتقال حرارت ثابت است.

۷. زمان ماند هوا در مقایسه با طول مدت هر فرایند ناچیز است.

۸. به دلیل پایین بودن و نیز محدود بودن گستره دمایی مورد

بحث، از انتقال حرارت به روش تشعشع صرف نظر می‌شود.

۹. فرض می‌شود ماده تغییر فاز به خوبی و به‌طور یکنواخت، در

پوشش‌های مکعب‌مستطیلی توزیع شده است.

۱۰. فرض می‌شود به هنگام تزریق ماده تغییر فاز هیچ هوایی وارد

پوشش‌های مکعب‌مستطیلی نشده است.

۱۱. از آثار مربوط به ابرسرد شدن ماده تغییر فاز چشم‌پوشی

می‌شود.

۱۲. ضرایب انتقال حرارت برای تمام صفحات و برای هر دو

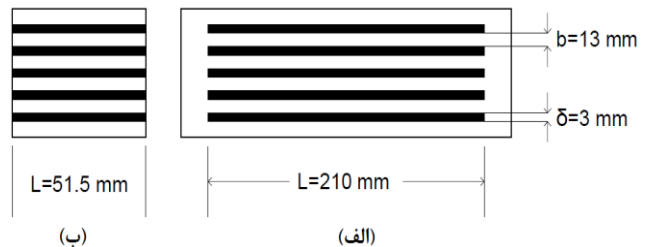
وجهشان یکسان فرض می‌شود.

۱۳. سطوح انتقال حرارت، سطوح بالا و پایین پوشش‌ها در نظر

گرفته می‌شود و از انتقال حرارت از سطوح کناری صرف نظر می‌شود.

۱۴. به دلیل ضخامت کم صفحات حاوی ماده تغییر فاز از

جابه‌جایی آزاد در بخش‌های مذاب ماده تغییر فاز صرف نظر می‌شود.



شکل (۲): نحوه قرارگیری صفحات تخت حاوی ماده تغییر فاز درون مبدل ذخیره‌کننده گرمای نهان: الف. از وجه کناری، ب. از وجه روبه‌رو

با در نظر گرفتن فرضیات فوق و شکل (۲)، معادلات ریاضی

مربوط برای هوای عبوری به صورت زیر توسعه داده می‌شوند:

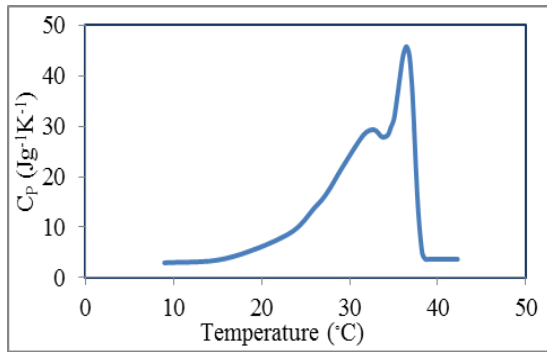
(۲)

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial x} + \frac{PU_p}{VA \rho c_{pg}} T(x, t) - \frac{PU_p}{VA \rho c_{pg}} T_{PCM}(x, t) = 0$$

شرط مرزی:

$$T(0, t) = T_{inlet}(t) \quad (۳)$$

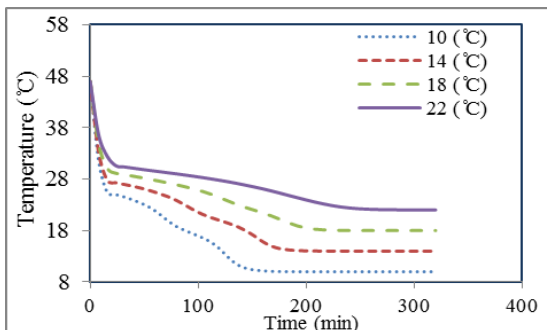
1. Super Cooling



شکل (۴): تغییرات ظرفیت حرارتی ماده تغییر فاز با دما

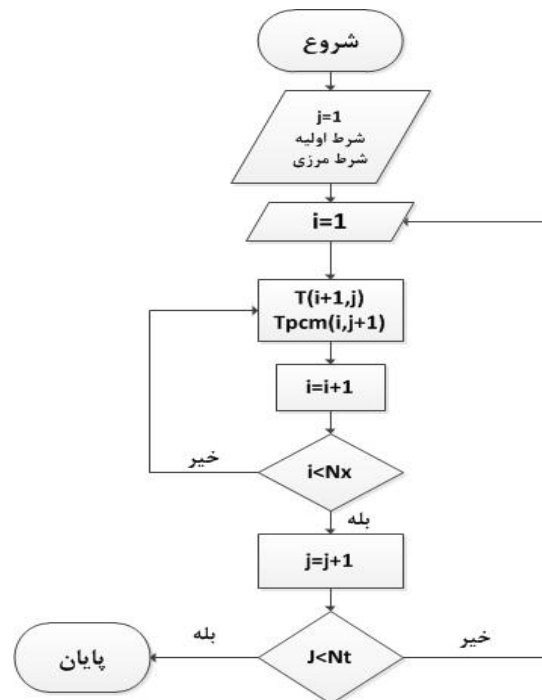
۴. شبیه‌سازی مبدل تغییر فاز

به منظور بررسی مدل ارائه شده، شبیه‌سازی این سامانه با شرایط گوناگون انجام شده است که نتایج حاصل از آن، در شکل‌های (۵) تا (۸) آورده شده است. گفتنی است مشخصات در نظر گرفته شده برای مبدل تغییر فاز در جدول (۱) گزارش شده است. همان‌طور که از شکل‌های (۵) و (۶) کاملاً مشخص است، دمای هوای ورودی نقش مهمی در مدت زمان رسیدن به پایان فرایند دارد. پایان فرایند زمانی در نظر گرفته می‌شود که دمای هوای ورودی و خروجی از بستر یکسان شود. در فرایند دفع انرژی، کاهش دمای هوای ورودی و در فرایند جذب انرژی، افزایش دمای هوای ورودی به بستر، به علت بهتر کردن انتقال حرارت از طریق افزودن نیروی محرکه انتقال حرارت، مدت زمان جذب و دفع انرژی را کاهش می‌دهد. اثر سرعت هوای ورودی به بستر نیز در شکل‌های (۷) و (۸) گزارش شده است. همان‌طور که از شکل‌های مذکور مشخص است، چه در فرایند جذب انرژی و چه در فرایند دفع انرژی افزایش سرعت هوا تأثیر بسزایی در مدت زمان رسیدن به پایان فرایند دارد. البته از نمودارهای نشان داده شده مشخص است که این تأثیر اهمیت خود را در سرعت‌های بالاتر از دست می‌دهد.



شکل (۵): اثر دمای هوای ورودی در دوره دفع انرژی (سرعت هوای عبوری از میان صفحات ۰/۲۵ متر بر ثانیه)

همان‌طور که از روابط نوشته شده مشخص است، برای شبیه‌سازی مبدل تغییر فاز لازم است معادلات (۵) و (۱۳) به صورت همزمان حل شوند. برای نشان دادن هرچه بهتر روش حل، نمودار جریانی مربوط در شکل (۳) آورده شده است. بر اساس آنچه در شکل (۳) نشان داده شده است و حل عددی با کمک نرم‌افزار متلب (MATLAB)، در هر گام زمانی دمای تمام نقاط بستر و در پی آن، دمای تمام نقاط هوای عبوری محاسبه می‌شود. با محاسبه شدن دمای هوای خروجی از بستر، همین محاسبات از نقطه ابتدایی برای گام زمانی بعدی تکرار می‌شود. این مراحل تا آنجا ادامه می‌یابد که فرایند پایان پذیرد.



شکل (۳): نمودار جریانی حل معادلات مبدل تغییر فاز

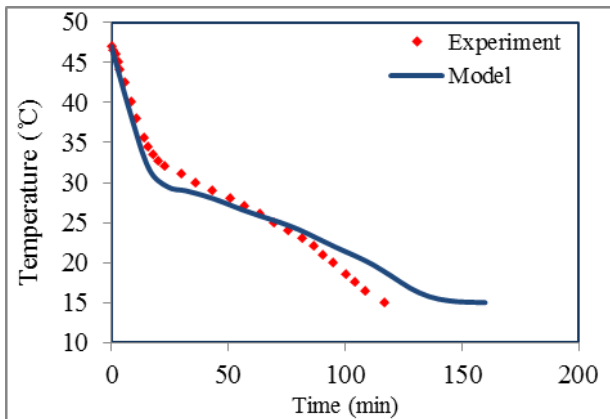
۲. ماده تغییر فاز استفاده شده در بستر

در این بررسی، از خواص پلی اتیلن گلایکول ۱۰۰۰ به عنوان ماده تغییر فاز استفاده شده است. نتیجه حاصل از آزمایش گرماسنجی روبشی دیفرانسیلی برای این ماده که امکان استخراج رابطه میان ظرفیت حرارتی مؤثر با دما را در گستره تغییر فاز فراهم می‌کند، در شکل (۴) آورده شده است.

جدول (۱): مشخصات دستگاه و شرایط آزمایش

۵	تعداد صفحات مکعب‌مسطی
۲۱۰×۵۱/۵×۳	ابعاد صفحات مکعب‌مسطی (mm)
۲۰۰	جرم کل ماده تغییر فاز (gr)
۱۵	دمای هوای ورودی (°C)
۴۷	دمای اولیه بستر (°C)
۰/۰۰۱۲	دبی جرمی هوای ورودی (kg.s ⁻¹)
۱۳	فاصله میان پوشش‌های مکعب‌مسطی (mm)

به‌منظور مقایسه هرچه بهتر، نتایج عددی و تجربی به‌دست‌آمده در نمودار شکل شماره (۹) نشان داده شده‌اند.



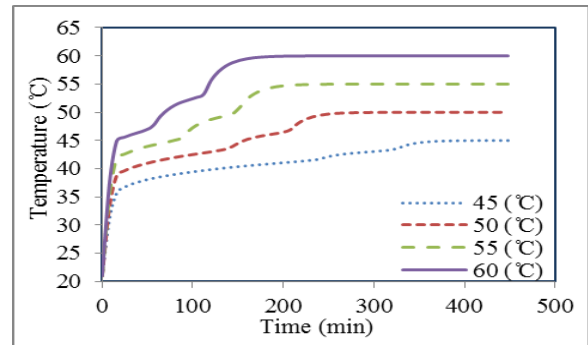
شکل (۹): مقایسه نتایج عددی و تجربی

همان‌طور که از نتایج ارائه‌شده در شکل (۹) مشخص است، انطباق خوبی میان داده‌های تجربی و عددی وجود دارد. اندک اختلافات موجود را می‌توان به توزیع نایک‌نواخت ماده تغییر فاز در داخل پوشش‌های مکعب‌مسطی و همچنین وجود هوا در داخل آن‌ها مرتبط دانست.

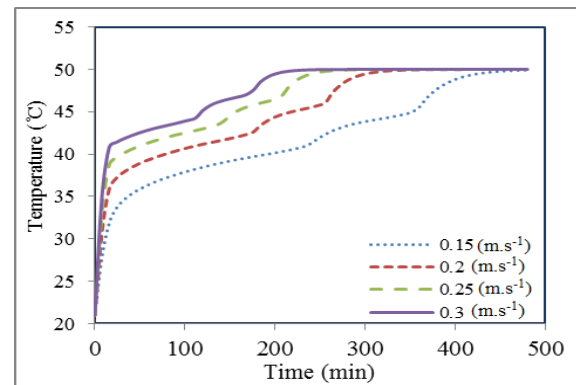
۶. شبیه‌سازی سامانه تهویه مطبوع

در ابتدا ذکر چند نکته و فرضیه ضروری به نظر می‌رسد:

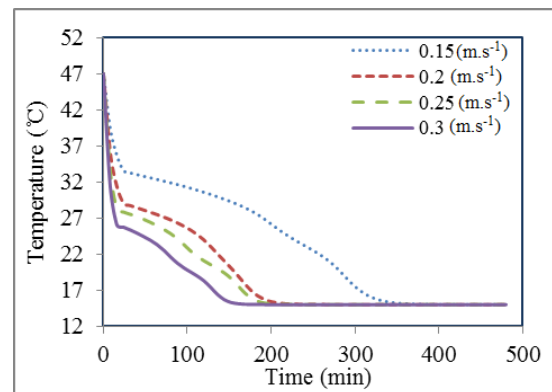
۱. مساحت و ارتفاع سقف واحد مسکونی به ترتیب ۱۰۰ متر مربع و ۳ متر و در نتیجه، حجم هوای لازم برای تهویه، ۳۰۰ m^۳ در نظر گرفته می‌شود.
۲. شدت تهویه^۱ واحد مسکونی مفروض در طول روز ۶ hr⁻¹ در نظر گرفته می‌شود.
۳. به دلیل کم بودن زمان دسترسی هوای خنک برای فرایند دفع انرژی، دبی هوا در این فرایند، ۵ برابر فرایند جذب انرژی در نظر گرفته می‌شود تا فرایند تغییر فاز تکمیل شود (اثر افزایش سرعت



شکل (۶): اثر دمای هوای ورودی در دوره جذب انرژی (سرعت هوای عبوری از میان صفحات ۰/۲ متر بر ثانیه)



شکل (۷): اثر سرعت هوای ورودی در دوره جذب انرژی



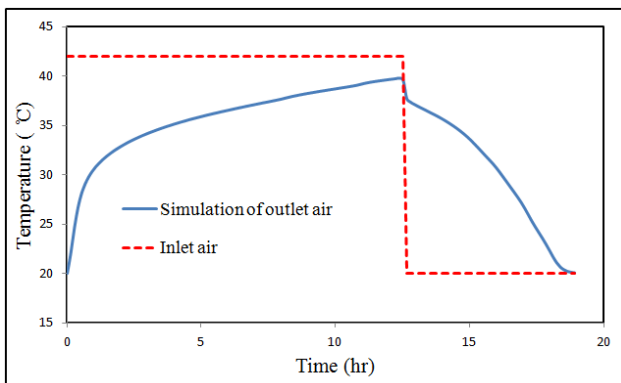
شکل (۸): اثر سرعت هوای ورودی در دوره دفع انرژی

۵. اعتبارسنجی مدل ارائه‌شده

به‌منظور اعتبارسنجی مدل ریاضی و بررسی صحت روابط ارائه‌شده، در این بخش، نتایج حل عددی «مدل ریاضی معرفی‌شده» و نتایج تجربی حاصل از «نمونه آزمایشگاهی یک سامانه ذخیره‌سازی انرژی گرمایی حاوی ماده تغییر فاز» ساخته شده در آزمایشگاه مقایسه شده‌اند. مشخصات نمونه آزمایشگاهی سامانه ساخته‌شده و همچنین شرایط آزمایش انجام‌شده در جدول (۱) آورده شده است.

1. Air Change per Hour (ACH)

شکل (۱۰) نتیجه حاصل از شبیه‌سازی هوای خروجی از سامانه تهویه مطبوع منزل مسکونی فرضی را به همراه هوای محیط بیرونی نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل (۱۰) مشخص است، در سامانه پیشنهادی با تبدیل شدن فاز جامد به فاز مایع تا حد چشمگیری دمای هوای گرم طول روز کاهش می‌یابد. علت زیادتر بودن دمای هوای خروجی از گستره آسایش (۲۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد)، بالا بودن محدوده تغییر فاز پلی‌اتیلن گلایکول ۱۰۰۰ است که در این بررسی، به‌عنوان ماده تغییر فاز در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۰): شبیه‌سازی سامانه تغییر فاز به‌کاررفته برای تهویه یک منزل مسکونی فرضی واقع در مناطق کویری ایران

در طول فرایند دفع انرژی که با عبور هوای خنک از میان بستر در طول شب صورت می‌گیرد، فاز مایع با دفع گرمای خود به هوای عبوری، به فاز جامد تبدیل شده و ضمن دفع گرمای نامطلوبی که در طول روز جذب کرده است، برای روز بعد آماده می‌شود.

۷. ارزیابی عملکرد سامانه پیشنهادی

در این بخش، ابتدا شاخص‌های گوناگونی که توسط نویسندگان مختلف برای دسترسی به پتانسیل سرمایش سامانه‌های سرمایش رایگان استفاده شده‌اند، آورده شده است.

- تاکدا و همکاران [۷] رابطه زیر را برای محاسبه کاهش مصرف انرژی صورت گرفته در سرمایش رایگان به کار بردند:

$$\eta = \frac{\text{required energy in presence of PCM}}{\text{required energy in the absence of PCM}} \quad (14)$$

- CDH : آرکار و مدود [۸] از متغیر CDH برای ارزیابی پتانسیل سرمایش رایگان استفاده کردند. CDH به این ترتیب محاسبه می‌شود:

$$CDH = \sum_{i=1}^{2208} (T_a - T_0) \delta \quad (15)$$

هوای عبوری در کاهش مدت زمان دفع انرژی و منجمد شدن ماده تغییر فاز در شکل (۸) نشان داده شده است.

۴. درخصوص شرایط دمایی مناطق کویری فرضیه‌های زیر به عمل آمده است:

- مدت زمان فرایند جذب انرژی در حدود ۱۲ ساعت و دمای هوای محیط در این مدت، ثابت و معادل $42^\circ C$ در نظر گرفته می‌شود.
- مدت زمان فرایند دفع انرژی حدود ۶/۵ ساعت و دمای هوای ورودی در این مدت، ثابت و معادل $20^\circ C$ در نظر گرفته می‌شود.
- در ۵/۵ ساعت دیگر روز فرض می‌شود هوا نیازی به تهویه ندارد.
- دمای بستر در پایان فرایند دفع، معادل دمای بستر در ابتدای فرایند جذب در نظر گرفته می‌شود و بالعکس.

سایر اطلاعات مربوط به بستر و ماده تغییر فاز در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): اطلاعات مبدل تغییر فاز و $PEG1000$ جهت ماده تغییر فاز

مشخصه	مقدار
ابعاد صفحات (mm)	$2400 \times 593 / 5 \times 3$
تعداد صفحات	۶۰
فاصله میان صفحات (mm)	۱۳
سرعت هوای عبوری از میان صفحات ($m.s^{-1}$)	۱/۰۶
چگالی هوا ($kg.m^{-3}$)	۱/۱۲
ظرفیت حرارتی هوا ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)	۱۰۰۵
گستره دمایی تغییر فاز $PEG1000$ ($^\circ C$)	۳۳-۴۰
چگالی $PEG1000$ ($kg.m^{-3}$)	۱۰۹۳
گرمای نهان ($kJ.kg^{-1}$)	۱۵۹
وزن کل ماده تغییر فاز (kg)	۳۰۰
ویسکوزیته ماده تغییر فاز در $60^\circ C$ (cP)	۵۸
ضریب انبساط گرمایی ماده تغییر فاز در $20^\circ C$ ($^\circ C^{-1}$)	۰.۰۰۰۷۳
هدایت حرارتی ماده تغییر فاز در $20^\circ C$ ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	۰.۲۳
شدت تهویه در طول روز (hr^{-1})	۶
شدت تهویه در طول شب (hr^{-1})	۳۰

۸. نتیجه‌گیری

در ابتدای این پژوهش، به تعریف مفهوم سرمایه‌گذاری رایگان پرداخته شده است. سپس با کمک یک مدل ریاضی که برای مبدل‌های تغییر فاز حاوی صفحات تخت پیشنهاد شده است، ضمن ارزیابی نحوه تأثیر پارامترهای عملیاتی، به شبیه‌سازی سامانه تغییر فاز به کاررفته برای تهیه یک منزل مسکونی فرضی، در شرایط آب‌وهوایی نواحی کویری ایران پرداخته شده است. ارزیابی صورت گرفته نشان از اهمیت دما و سرعت هوای ورودی، بر عملکرد سامانه معرفی شده دارد، به گونه‌ای که اختلاف دما و سرعت بالاتر هوای عبوری مدت زمان دفع و جذب انرژی را به طرز چشمگیری کاهش می‌دهد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی منزل مسکونی نیز نشان از آن دارد که با تبدیل کردن فاز جامد به فاز مایع در چنین تبدیلی، می‌توان دمای هوای گرم روز را به میزان زیادی کاهش داد. در ادامه و با کمک هوای سرد شب هم می‌توان فاز مایع را به فاز جامد تبدیل کرد و هم ضمن دفع گرمای نامطلوب، برای روز بعد آماده شد. به منظور بررسی هرچه بهتر مصرف انرژی دمنده سامانه پیشنهادی در مقابل گرمای جذب شده، به محاسبه ضریب عملکرد دستگاه ذخیره‌کننده گرمای نهان پرداخته شده است. مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که چنین سامانه‌ای ضمن جذب گرما به میزان حدوداً ۳ برابر انرژی مصرف شده در دمنده، می‌تواند با جابجا کردن زمان مصرف برق به نیمه‌های شب، از مصرف برق در زمان‌های اوج بار جلوگیری کند.

۹. فهرست علائم

a	عرض صفحات تخت (m)
A	مساحت برای هوای عبوری، (m^2)
C_p	ظرفیت حرارتی بستر ($kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)
C_{pg}	ظرفیت حرارتی هوا ($kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)
d_h	قطر هیدرولیکی (m)
DP_T	فشار دیفرانسیلی کل (kPa)
E	بازدهی
i	شمارنده مکان
j	شمارنده زمان
k_{Bed}	هدایت حرارتی بستر ($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)
m_{Bed}	وزن هر المان بستر (gr)
m_g	دبی جرمی هوای عبوری ($kg \cdot s^{-1}$)
N_x	تعداد نقاط مکانی
N_t	تعداد نقاط زمانی
P	محیط هر المان، $2a$ (m)

در رابطه (۱۵)، T_a دمای محیط و T_0 دمای هوای خروجی از بستر ذخیره‌سازی حاوی ماده تغییر فاز است. زمانی که $hr, T_a > T_0$ $\delta = 0$ است و زمانی که $hr, T_a < T_0$ $\delta = 1$ است (۲۴×۹۲=۲۲۰۸). لذا CDH حداکثر توان سرمایه‌گذاری رایگان برای هر ساختمان را نشان می‌دهد.

در مطالعه حاضر، به منظور بررسی کردن میزان انرژی مصرفی توسط دمنده هوا و مقایسه آن با میزان انرژی گرمایی جذب شده در این روش، از محاسبه ضریب عملکرد (COP^1) استفاده شده است:

$$COP = \frac{\text{Excess Heat absorbed by the PCM}}{\text{Energy Consumption of the Fan}} \quad (16)$$

در رابطه (۱۶)، میزان انرژی گرمایی جذب شده توسط ماده تغییر فاز و انرژی مصرفی دمنده به ترتیب از روابط (۱۸) و (۱۹) به دست می‌آیند:

$$Q_{recovery} = m_g c_{pg} \int_0^{\tau} (T_{out}(t) - T_{inlet}(t)) dt \quad (17)$$

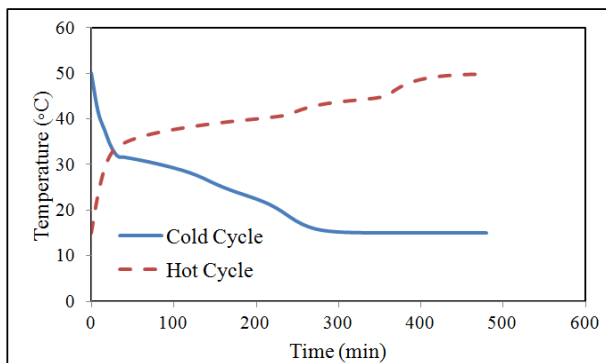
$$Power(kW) = 0.001 Q_{air} DP_T \quad (18)$$

در رابطه (۱۸) DP_T و Q_{air} به ترتیب دبی هوای عبوری و فشار دیفرانسیلی کل (kPa) هستند که DP_T از تفاضل مجموع فشار استاتیک و فشار سرعت در ورودی و خروجی محاسبه می‌شود. شایان ذکر است که در تمام محاسبات $DP_T = 0.641 kPa$ لحاظ شده است [۱۶]. نتایج محاسبات انجام شده در جدول (۳) گزارش شده است. همان‌طور که از این نتایج مشخص است، سامانه پیشنهادی از نظر مصرف انرژی، عملکردی ممتاز دارد و حدود ۳ برابر انرژی برقی را که توسط دمنده مصرف می‌شود، با کمک ماده تغییر فاز جذب می‌کند. نکته قابل توجه دیگر آن است که بیش از ۷۰ درصد از انرژی مصرفی دمنده را می‌توان با برق ارزان شب تأمین کرد. این امر تأثیر چشمگیری بر کاهش میزان مصرف برق در زمان‌های اوج بار و نیز کاهش هزینه‌های برق مصرفی دارد.

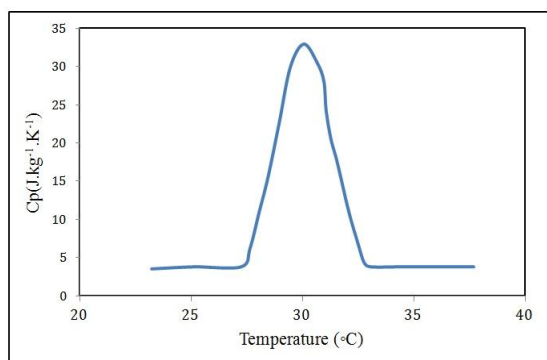
جدول (۳): محاسبات تحلیل انرژی سامانه پیشنهادی

COP	انرژی گرمایی جذب شده (kWh)	انرژی مصرفی دمنده	
		شب (kWh)	روز (kWh)
۲/۹۱۶	۴۱/۶	۱۰/۴۱	۳/۸۴۶

نمودارهای گزارش شده تقارنی میان تغییرات دمایی در دو دوره سرد و گرم دیده نمی‌شود. اکنون فرض می‌شود از ماده‌دیگری در ساخت سامانه تغییر فاز استفاده شده باشد که نحوه تغییرات ظرفیت گرمایی آن با دما، همانند آنچه در شکل (۱۲) آورده شده است، متقارن باشد.



شکل (۱۱): عدم تقارن منحنی‌های دما- زمان برای TES حاوی پلی‌اتیلن گلایکول ۱۰۰۰ در دوره‌های سرد و گرم. دمای هوای ورودی دوره‌های سرد و گرم به ترتیب 15°C و 50°C ، سرعت هوای عبوری از میان صفحات در هر دو دوره $0.15(\text{m.s}^{-1})$



شکل (۱۲): تغییرات متقارن ظرفیت حرارتی ماده تغییر فاز فرضی با دما در هنگام تبدیل شدن از جامد به مایع

نمودار ترسیمی در شکل (۱۳)، نحوه تغییرات دمای هوای خروجی با زمان را برای دو دوره سرد و گرم کاملاً متقارن هوای ورودی نشان می‌دهد. از بررسی این نمودار می‌توان به وجود تقارن میان دماهای خروجی در دوره‌های سرد و گرم نیز پی برد.

با استناد به بررسی‌های عددی انجام شده، باید از ماده تغییر فازی در انجام مطالعات سرمایه‌شماره رایگان کمک گرفت که با داشتن منحنی دما-ظرفیت حرارتی نامتقارن، گرمای هوا را در طی روزهای بلند تابستان جذب کرده و در طول شب‌های کوتاه نیز سریعاً جامد گردد تا برای روز بعد آماده باشد.

Q	گرمای مبادله شده (kJ)
Q_{air}	دبی هوا (lit.s^{-1})
t	زمان (s)
T	دمای هوای عبوری (K)
T_{ci}	دمای هوای سرد ورودی (K)
T_{he}	دمای هوای گرم خروجی (K)
T_{hi}	دمای هوای گرم ورودی (K)
T_{PCM}	دمای بستر (K)
U_p	ضریب کلی انتقال حرارت ($\text{W.m}^{-2}.\text{C}^{-1}$)

علائم یونانی

Δt	طول هر گام زمانی (s)
Δx	طول هر گام مکانی (m)
ρ	چگالی هوا (kg.m^{-3})
δ	ضخامت صفحات (m)
ν	سرعت هوا در میان صفحات (m.s^{-1})

زیرنویس‌ها

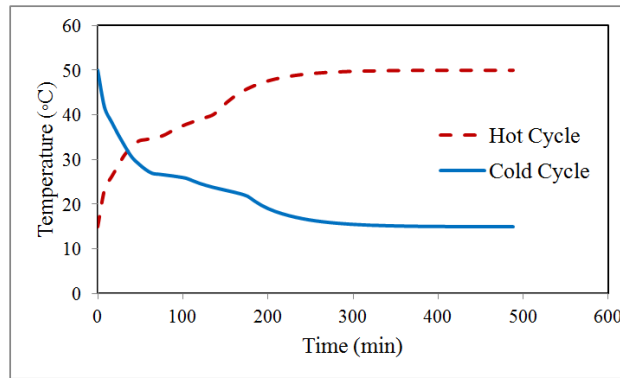
air	هوا
PCM	ماده تغییر فاز
Inlet	ورودی

سپاسگزاری

در پایان از شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت و معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس، به دلیل حمایت‌های مالی در راستای انجام این طرح پژوهشی تشکر و قدردانی می‌شود.

ضمایم

یکی از نکات حائز اهمیت در مطالعات امکان‌سنجی عملکرد سامانه‌های تغییر فاز در سرمایه‌شماره رایگان، نحوه تغییرات ظرفیت حرارتی ماده تغییر فاز با دما می‌باشد. در بررسی حاضر، همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، هیچ‌گونه تقارنی برای نمودار تغییرات ظرفیت حرارتی پلی‌اتیلن گلایکول ۱۰۰۰ با دما وجود ندارد. همین امر سبب آن می‌شود تا ماده تغییر فاز در طول روز، ۱۲ ساعت گرمای هوا را جذب کند و در طول شب، در عرض تنها ۵/۵ ساعت مجدداً جامد گردد. برای بررسی هرچه بیشتر موضوع شکل (۱۱) نتایج شبیه‌سازی دو دوره جذب و دفع انرژی را برای شرایط کاملاً متقارن هوای ورودی، برای سامانه تغییر فاز حاوی PEG۱۰۰۰ نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج ترسیم شده مشخص است، در



شکل (۱۳): تقارن منحنی‌های دما-زمان برای TES حاوی ماده فرضی در دوره‌های سرد و گرم. دمای هوای ورودی دوره‌های سرد و گرم به ترتیب 15°C و 50°C ، سرعت هوای عبوری از میان صفحات در هر دو دوره $0.15(\text{m.s}^{-1})$.

مراجع

- [1] Zalba, B., Marin, J. M., Cabeza, L. F., Mehling, H., "Review on thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications". Applied Thermal Engineering, Vol. 23, pp.251–283, 2003.
- [2] Turnpenny, J. R., Etheridge, D. W., Reay, D. A., "Novel Ventilation Cooling System for Reducing Air Conditioning in Buildings. Part I: Testing and Theoretical Modeling". Applied Thermal Engineering, Vol.20, pp. 1019-1037, 2000.
- [3] Kousksou, T., Bruel, P., "Encapsulated Phase Change Material under Cyclic Pulsed Heat Load". International journal of refrigeration, Vol. 33, pp. 1648-1656, 2010.
- [4] Vakalaltojjar, S. M., Saman, W., "Analysis And modeling of a Phase Change Storage System for Air Conditioning Applications". Applied Thermal Engineering, Vol. 21, pp. 249±263, 2001.
- [5] Zalba, B., Marin, J. M., Cabeza, L. F., Mehling, H., "Free – Cooling of Buildings with Phase Change Materials". International Journal of Refrigeration, Vol. 27, pp. 839–849, 2004.
- [6] Lazaro, A., Dolado, P., Marin, J. M., Zalba, B., "PCM – air Heat Exchangers for Free-Cooling Applications in Buildings: Experimental Results of Two Real-Scale Prototypes". Energy Conversion and Management, Vol. 50, pp. 439–443, 2009.
- [7] Takeda, S., Nagano, K., Mochida, T., Shimakura, K., "Development of a ventilation System Utilizing Thermal Energy Storage for Granules Containing Phase Change Material", Solar Energy, Vol. 77, pp. 329–338, 2004.
- [8] Medved, S., Arkar, C., "Correlation between the Local Climate and the Free - Cooling Potential of Latent Heat Storage". Energy and Buildings, Vol. 40, pp. 429–437, 2008.
- [9] Antony Aroul Raj, V., Velraj, R., "Review on free Cooling of Building Using Phase Change Materials". Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, pp. 2819-2829, 2010.
- [10] Zhou, G., Yang, Y., Xu, H., "Energy Performance of a Hybrid Space- Cooling System in an Office Building Using SSPCM Thermal Storage and Night Ventilation". Solar Energy, Vol. 85, pp. 477–485, 2011.
- [11] Felix Regin, A., Solanki, S. C., Saini, J. S., "Latent Heat Thermal Energy Storage Using Cylindrical Capsule: Numerical and Experimental Investigations". Renewable Energy, Vol. 31, pp. 2025–2041, 2006.
- [12] Najjar, A., Hasan, A., "Modeling of Greenhouse with PCM Energy Storage". Energy Conversion and Management, Vol. 49, pp. 3338-3342, 2008.
- [13] Bourne, S., Novoselac, A., "Compact PCM-Based Thermal Stores for Shifting Peak Cooling Loads". BUILD SIMUL, pp. 1-16. Tsinghua University Press, 2015.
- [14] Osterman, E., V. Butala, and U. Stritih. "PCM Thermal Storage System for 'Free' heating and Cooling of Buildings", Energy and Buildings, Vol.106, pp. 125-133, 2015.
- [15] Papoutsakis, E., "Nusselt Numbers Near Entrance of Heat-Exchange Section in Flow Systems". AIChE Journal, Vol. 4, pp.687-689, 1981.
- [16] Energy Management Series for Industry, Commerce and Institution, Chapter 13, Fans & Pumps, http://www.nrcan.gc.ca/sites/oe.nrcan.gc.ca/files/pdf/commercial/password/downloads/EMS_13_fans_and_pumps.pdf. بازدید شده در ۱۳۹۳/۰۲/۰۲.