شبیه سازی عددی عملکرد حرارتی سیستم گرمایش از کف با مواد تغییر فاز محصور (PCM)

مرتضی پیرعدل [۱]، سجاد پیرعدل [۲]

تاریخ دریافت مقاله:
۱۳۹۲/۰۳/۱۹
تاریخ پذیرش مقاله:
۱۳۹۲/۰۸/۱۴

چکیده:

در مقاله حاضر، یک نوع از مواد تغییر فاز محصور (PCM) مورد استفاده در گرمایش از کف آب گرم دما پایین و همچنین سیستم تابشی خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته است. برای به دست آوردن بهترین عملکرد خواص PCM، یک ساختار جدید گرمایشی طراحی گردیده که در آن لوله های انتقال حرارت در یک لایه محصور مواد تغییر فاز بدون بتن ریزی قرار می گیرند. رابطه زمان ذخیره سازی حرارتی PCM، با دمای لایه سطحی کف دردماهای مختلف آب گرم بررسی شده و با استفاده از روش آنتالپی، زمان ذخیره سازی حرارتی PCM تحت دماهای مختلف آب ذخیره، دبی آب ذخیره، پوشش کف و شرایط عایق مورد مطالعه قرار گرفته است.

کلمات کلیدی:
گرمایش از کف، ذخیره سازی انرژی، PCM، آنتالپی، زمان ذخیره سازی حرارتی

۱)) گروه مهندسی مکانیک دانشگاه پیام نور، تهران (نویسنده مسئول) mortezapiradl@pnu.ac.ir
۲) گروه آمار دانشگاه پیام نور sajjadpiradl@yahoo.com

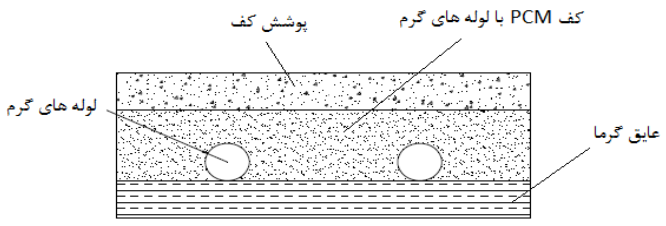
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

مقدمه

PCM[1] به مواد تغییر فاز دهنده گفته می شود. این مواد ترکیبات آلی یا معدنی هستند که قابلیت جذب و ذخیره مقادیر زیادی از انرژی گرمایی را درون خود دارا می باشند. ذخیره انرژی گرمایی در این مواد، طی فرایند تغییر فاز (جامد به مایع یا بالعکس) صورت می گیرد. گرمایش ذخیره ای از کف با مواد تغییر فاز، یک فناوری گرمایش پیشرفته می باشد که با استفاده از PCM گرمای نهان را جذب و دمای آن را در زمان تغییر فاز تقریبا ثابت نگه می دارد و دارای ظرفیت ذخیره انرژی بالایی می باشد. این فناوری بخوبی مغایرت عرضه و تقاضای انرژی را برطرف می سازد و به لطف استفاده آن از برق خارج از اوج و انرژی خورشیدی، یکی از بهترین راههای بهبود بهره وری انرژی است. در همین حال، گرمایش ذخیره ای از کف با تغییر فاز، همچنین می تواند دمای محیط را کنترل و آسایش هر چه بیشتر محیط داخلی را فراهم آورد. در نتیجه، این فناوری در حال تبدیل شدن به یک کانون توجه در زمینه معماری صرفه جویی در انرژی می باشد[۷-۳]. در صورت انتخاب نوع صحیح مواد تغییر فاز براساس اقلیم منطقه، تغییرات دمایی منطقه و متناسب با فصل، می توان کاهش ۲۰ درصدی در انرژی مصرفی ساختمان داشت[۲-۱]. مقاله حاضر اثرات عوامل مختلف در گرمایش ذخیره ای از کف با منبع حرارت درونی (لوله های آب و المنت های الکتریکی)و همچنین عملکرد حرارتی را تحت سه شرط مرزی مختلف ارائه می نماید.

مدل ریاضی

ساختار گرمایش از کف با PCM و منبع گرمایی داخلی درشکل (۱) نشان داده شده و پارامترهای ترموفیزیکی مواد گرمایشی آن در جدول (۱) داده شده است. PCM انتخاب شده یک نوع هیدرات نمک بوده که درجه حرارت تغییر فاز آن حدود 29°C می باشد. برای جلوگیری از نشت PCM هنگام ذوب و خوردگی بتن، PCM بسته بندی می شود. لوله های گرم روی عایق قرار گرفته و PCM بسته بندی شده در اطراف لوله های گرم که بالای آنها پوشش کف می باشد، قرار می گیرد. زمانی که لوله ها گرم می شوند، گرما به PCM در کف منتقل شده و ذخیره می شود وسپس در مواقع نیاز به اتاق منتشر می شود.



شکل ۱) ساختار سیستم گرمایش ذخیره ای از کف

1) Phase Change Material

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

به کمک نظریه انتقال حرارت تغییر فاز، مدل عملکرد حرارتی بر اساس کف ذخیره کننده حرارت تشریح شده در بالا شبیه سازی می گردد. همانند مطالعه سیستم های ذخیره سازی انرژی تغییر فاز، در اینجا نیز اغلب آنتالپی و گرمای ویژه استفاده می شود که گرمای ویژه به طور مستقیم تابع دما می باشد که البته نیازمند متابعت از خط جامد – مایع می باشد. بر خلاف گرمای ویژه، آنتالپی تابع گرمای نهان و دما می باشد که با اعمال رابطه دما و گرمای نهان در معادله انرژی، توزیع دما به دست خواهد آمد. تغییر فاز مواد تغییر فاز PCM اغلب در محدوده دمایی گسترده و نه در یک نقطه دمای خاص رخ می‌دهد. مزیت آنتالپی آن است که نیاز به متابعت از خط جامد – مایع نبوده و معادله انرژی برای حالت های جامد، جامد – مایع و مایع مناسب می باشد و این امر به طور قابل ملاحظه ای شبیه سازی را ساده می سازد و بر این اساس، بویژه برای مدل‌های چند بعدی مناسب است. به منظور ساده سازی شبیه سازی، فرضیات زیر در نظر گرفته می شود:

١. انتقال حرارت از پوشش کف، PCM بسته بندی شده و عایق حرارت به صورت دو بعدی منظور شده و انتقال حرارت در طول لوله ها نادیده گرفته می شود.

٢. اطراف لوله های حرارتی پر از PCM می باشد.

٣. با چشم پوشی از اثر انتقال حرارت جابجایی در مایع PCM، انتقال حرارت به صورت هدایتی در نظر گرفته می شود.

۴. دمای داخلی ثابت فرض می شود.

۵. ضریب انتقال حرارت جابجایی بین سطح کف و هوای داخل ثابت در نظر گرفته می شود.

جدول ١) پارامترهای ترمو فیزیکی

	کف چوبی	کف گرانیتی	PCM	عایق حرارت
چگالی $[Kg/m^3]$	٧۴۶	٨٢٠	١۵١٠	٣١
ضریب هدایت گرمایی [W/m.k]	٠,٨ عرضی ٢,۴ طولی	٣,١	٠,٨	٠,٠٣١
گرمای ویژه [KJ/Kg.K]	٢,۴٣١	٢,٨	١,۴٣جامد ٢,٣١مایع	١٣۴٠
دمای تغییر فاز [°C]			٢٩	
گرمای نهان تغییر فاز [KJ/Kg]			١٨٨	
شعاع تغییر فاز [°C]			١	

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

در این مقاله، شرایط مرزی قطبی به کار برده می شود و معادله گسسته سازی شده به طور جداگانه با توجه به شرط مـرزی اول (دمای دیواره ثابت)، شرط مرزی دوم (شار حرارتی یکنواخت) و شـرط مـرزی سـوم (جابجـایی روی سـطح) حـل می‌شود. فرایند ذخیره حرارت زمانی به پایان می رسد که آخرین نقطه در PCM تغییر فاز دهد. واحدهای شبکه کف ذخیره کننده حرارت در شکل (۲) نشان داده شده است. توصیف ریاضی مدل ذکر شده در بالا به شرح زیر می باشد:

$$\rho \frac{\partial H}{\partial \tau} = k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (۱)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y}\Big|_{y=\text{floor surface}} = h\left[T_{y=\text{floor surface}} - T_f \right] \quad (۲)$$

که در آن، k ضریب هدایت حرارتی ماده بر حسب [W/m.K] ، T_f دمای متوسط هوای محیط داخلـی بـر حـسب [K] و H آنتالپی مخصوص بر حسب [J/Kg] می باشد. رابطه T و H به صورت زیر است:

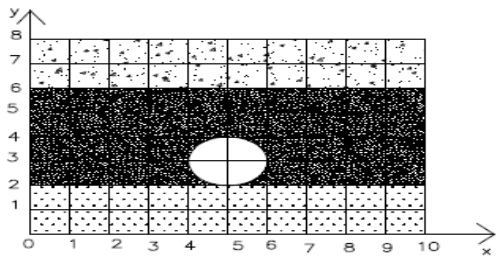
$$T = H/C_{ps} \qquad H<H_s$$

$$T = \frac{H + (T_m - \varepsilon) L/2\varepsilon}{c_{ps} + L/2\varepsilon} \qquad H_s \le H \le H_l$$

$$T_m + \varepsilon + \frac{H - H_l}{c_{pl}} \qquad H>H_l$$

که در آن، C_{ps} گرمای ویژه جامد و C_{pl} گرمای ویژه مایع ماده تغییر فاز بر حسب [J/Kg.K] ، ε نـیم دمـای تغییـر فاز (شعاع تغییر فاز) بر حسب [K] ، T_m دمای تغییر فاز بر حسب {K] ، L گرمای نهان مواد تغییر فاز پایـدار بـر حـسب [J/Kg] و H_s و H_t به ترتیب آنتـالپی مخـصوص اشـباع جامـد و آنتـالپی مخـصوص اشـباع مـایع بـر حـسب [J/Kg] می باشند. بنابراین:

$$H_s = C_{ps}(T_m - \varepsilon), \quad H_l = C_{ps}(T_m + \varepsilon) + L \quad (۳)$$



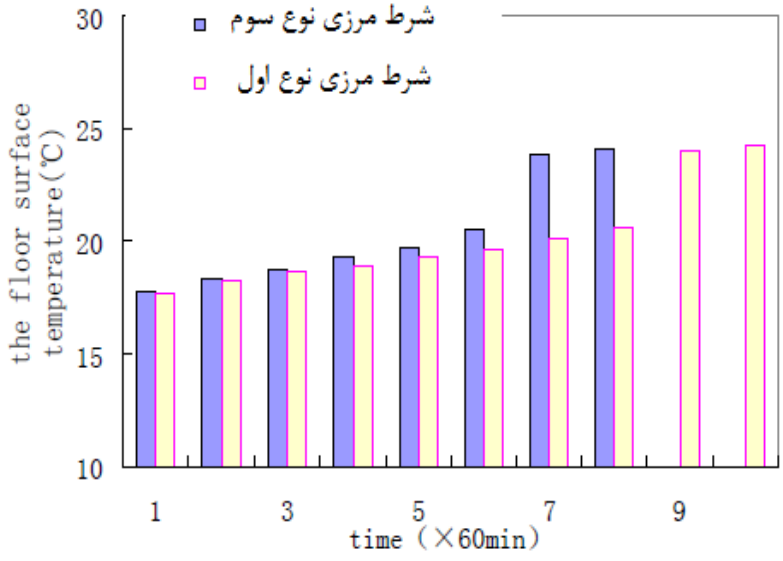
شکل ۲) واحدهای شبکه بندی مدل کف ذخیره کننده حرارت

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

نتایج شبیه سازی عددی و بحث در مورد آنها

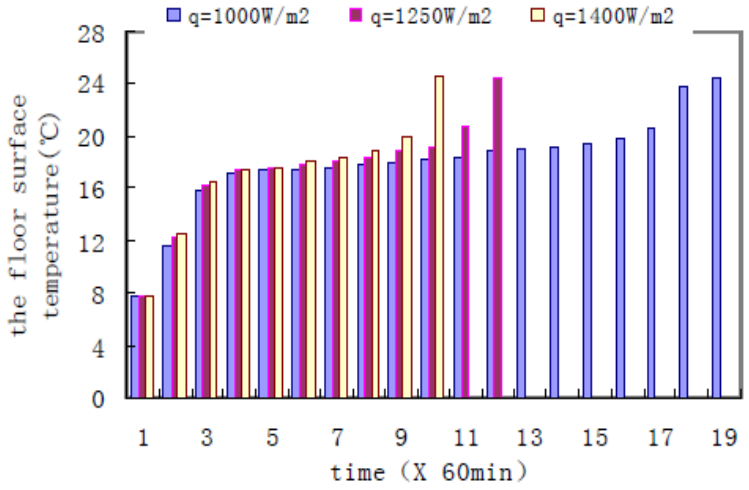
ضروری بود تاثیر مدل ذخیره حرارتی پیشنهادی کف ذخیره کننده حرارت با منبع حرارتی داخلی تحت شرایط مرزی مختلف بررسی شود. با توجه به اینکه اندازه لوله های حرارتی درهمان درجه ابعاد PCM می باشد، شرط مرزی قطبی لوله‌ها تحت سه شرط حرارتی مختلف مورد بررسی قرار گرفت که گرمای تولیدی کف ذخیره کننده حرارت به وسیله المنت‌های جریان الکتریکی، از نوع شرط مرزی دوم (شار حرارتی یکنواخت) و به وسیله لوله های آب گرم، از نوع شرط مرزی سوم (جابجایی روی سطح) می باشد که اگر در حالت دوم (ناشی از لوله های آب گرم)، آب در حال سکون بوده و یا با سرعت خیلی کم جریان یابد، می توان آن را از نوع شرط مرزی اول (دمای دیواره ثابت) فرض نمود.

شکل (٣) مقایسه زمان ذخیره حرارت را زمانی که دمای سطوح کف چوبی ذخیره کننده حرارت به دمای یکسان با وجود لوله های آب گرم PEX(φ20×2) با فضای بین لوله های 60mm ، دمای آب ذخیره 55°C ، اختلاف دمای آب ذخیره و آب بازگشتی60°C ، دبی آب 5 L/min ، درصد از دست دادن حرارت 10% و حرارت متوسط ذخیره شده تحت شرایط مرزی اول و سوم می‌رسد، ارائه می‌دهد و با وجود المنت های جریان الکتریکی، شکل (۴) رابطه بین تغییر دمای سطح کف با زمان ذخیره حرارت با سه روش مختلف الکتریکی تحت شرایط ذکر شده در بالا و با قطر خارجی المنت‌های الکتریکی 20 mm را نشان می دهد.



شکل ٣) رابطه دمای سطح کف و زمان ذخیره حرارت تحت شرایط مرزی مختلف

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]



شکل ٤) رابطه دمای سطح کف و زمان ذخیره حرارت تحت شارهای گرمایی مختلف

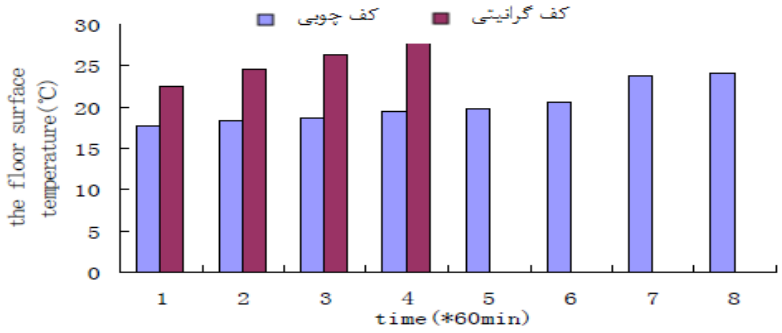
از نتایج محاسبات دیده می شود که زمان ذخیره حرارت شرط مرزی سوم زمانی که دمای سطح کف بـه همـان دمـا برسد، کمتر از شرط مرزی اول است. واضح است که جابجایی ناشی از جریان سیال باعث افزایش سرعت انتقـال حـرارت و کاهش زمان ذخیره حرارت می شود. همچنین در شرایط گرمایی الکتریکی مختلف، شار حرارتی بالاتر، زمان ذخیره حـرارت کمتری را نتیجه می دهد. در این مقاله، عملکرد حرارتی کف با منبع حرارتی، تحت شرایط دو نوع پوشش کف مختلف، سـه نوع فضای بین لوله های حرارتی مختلف و شرایط ذخیره حرارت مختلف شبیه سازی شده اسـت. تمـام پارامترهـای متغیـر مورد شبیه سازی در جدول (۲) آمده است.

جدول۲) پارامترهای متغیر

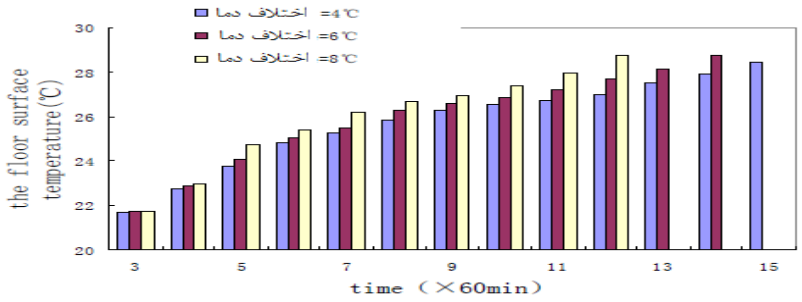
	عوامل متغیر	مقادیر متغیر
پارامترهای گرمایشی سیستم	دمای آب ذخیره	51,53,55 (°C)
	اختلاف دمای آب ذخیره و آب بازگشتی	4,6,8 (°C)
	دبی آب ذخیره	3,5,7 (L/min)
پارامترهای مرزی لوله های گرم	دمای ثابت	$T_w= (t_g+t_h) / 2$ (°C)
	شار حرارتی ثابت	Q_w= 1000, 1250, 1400 (W/m^2)
	ضریب حرارتی ثابت و دمای سیال	H= 10 (W/m^2 . °C) Tw= (tg+ th) / 2 (°C)
پارامترهای ساختار کف	ماده پوشش کف	کف چوبی کف گرانیتی
	فضای بین لوله ها	60,80,100 (mm)
	اتلاف حرارت از زیر	0,10%, 15%

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

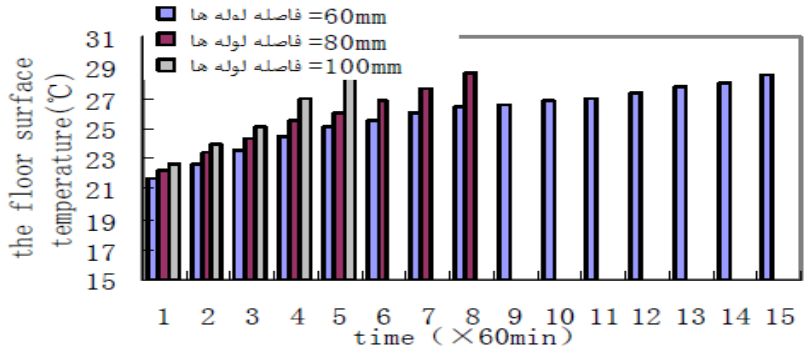
شکل (۵) رابطه تغییر دمای سطح کف با دو نوع پوشش کف مختلف را با زمان ذخیره حرارت تحت دمای آب ذخیره 51°C ، اختلاف دمای آب ذخیره و آب بازگشتی°C 6، دبی آب 5 L/min ، فضای بین لوله ها 60mm و درصد از دست دادن حرارت 10% ارائه می دهد. رابطه بین تغییرات دمای سطح کف گرانیتی با زمان ذخیره حرارت تحت دماهای ذخیره و بازگشت مختلف و نیز فضای بین لوله های مختلف در شکل های (۶) و (۷) آمده است.



شکل ۵) رابطه دمای سطح کف و زمان ذخیره حرارت برای دو نوع پوشش مختلف کف



شکل ٦) رابطه دمای سطح کف و زمان ذخیره حرارت تحت اختلاف دماهای مختلف آب ذخیره و آب بازگشتی



شکل ۷) رابطه دمای سطح کف و زمان ذخیره حرارت برای فواصل لوله های مختلف

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

نتیجه‌گیری

از نتایج شبیه سازی دیده می شود:

۱-زمان ذخیره حرارت تحت دمای یکسان زمانی که هدایت حرارتی کف بهتر باشد، کمتر می شود.

۲-زمان ذخیره حرارت با کاهش اختلاف دمای بین آب ذخیره ای و بازگشتی طولانی تر می شود.

۳-زمان ذخیره حرارت با کاهش فضای بین لوله ها کمتر می شود. البته زمان آزادسازی حرارت نیز کمتر می شود به طوری که نمی تواند به حرارت مورد نیاز برسد. لذا فضای بین لوله ها می بایست به گونه ای باشد که حرارت ذخیره ای مورد نیاز PCM را تامین کند.

به طور کلی، دمای سطح کف طی زمان ذخیره گرما با نسبت ملایمی تغییر می‌کند، به این معنی که دمای سطح کف طی زمان ذخیره و آزادسازی گرما، نوسانات قابل ملاحظه ای انجام نمی دهد و این امر منجر به شرایط هوای مطلوب داخل اتاق می گردد.

کف ذخیره کننده حرارت با منبع حرارتی داخلی، کمک شایانی به ذخیره انرژی کرده و می تواند سازوکار مصرف انرژی را تنظیم کند. در همین حال، کف ذخیره کننده حرارت می تواند هوای داخل را مطلوب ساخته و موجب بهبود آسایش داخلی و کیفیت زندگی گردد. توسعه این فناوری یقینا به نفع اقتصاد ملی خواهد بود.

منابع

[۱] آرامی، حمیدرضا. مختاری یزدی، مطهره. (۱۳۹۲)، ذخیره سازی انرژی در ساختمان با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده، نشریه انرژی ایران/ دوره ۱۶ شماره ۱، ۱۰۲- ۸۹.

[۲] معرفت، م. کیان، س. (۱۳۸۸)، بکار گیری مواد تغییر فاز دهنده در ساختمان جهت صرفه جویی در انرژی گرمایی، مهندسی مکانیک، شماره ۶۸، سال هجدهم.

[3] Bakos G. 2000. "Energy management method for auxiliary energy saving in a passive solar heated residence using low-cost off-peak electricity", Journal of Energy and Buildings, Vol. 31, PP. 237 -241.

[4] Barrio M., Font J., Lopez D.O. and et al. 1992. "Floor radiant system with heat storage by a solid phase transition material", Journal of Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 27, PP. 127 -133.

[5] Farid M. and Kong W.J. 2001. "Underfloor with Latent Heat Storage", Journal of Proceedings of Institute of Mechanical Engineers, 215(A), PP. 601-609.

[6] Hong Ye. and Xinshi Ge. 2000. "Preparation of polyethylene paraffin compound as a form stable solid-liquid phase change material", Journal of Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 6, PP. 437-441.

[7] Jain L. and Sharma S.D. 2009. "Phase change materials for day lighting and glazed insulation in buildings", Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 4, No. 3, PP. 322-327.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]