



تأثیر نانومواد تغییر فاز دهنده در سیستم گرمایش از کف در آب و هوای معتدل و مرطوب

نغمه جمشیدی^{1*}، نسیمه صادقی²

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران

2- استادیار، مهندسی معماری، دانشگاه پیام نور، تهران

* تهران، صندوق پستی 3697-19395، njamshidi@mpnu.ac.ir

چکیده

در این مقاله، استفاده از نانومواد تغییر فاز دهنده در سیستم گرمایش از کف ساختمانی در فصل زمستان بررسی شده است. هوای خارج از ساختمان برای آب و هوای معتدل و مرطوب در شمال ایران در نظر گرفته شده است. اثر دمای آب گرم در لوله‌ها، دمای تغییر فاز، گرمای نهان و هدایت حرارتی مواد تغییر فاز دهنده بررسی شده و عملکرد سیستم در هر حالت با سیستمی مشابه بدون مواد تغییر فاز دهنده مقایسه شده است. نتایج بیانگر ثابت شدن دمای اتاق و کاهش مصرف انرژی در اثر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده است. گرمای نهان مواد تغییر فاز دهنده تأثیر کمی در دمای اتاق دارد، در حالی که دمای تغییر فاز مواد تغییر فاز دهنده باعث تأخیر زمانی بین دمای هوای بیرون و دمای هوای اتاق می‌شود. با افزایش هدایت حرارتی مواد تغییر فاز دهنده نرخ افزایش دمای اتاق در واحد زمان بیشتر شده و در نهایت با افزایش درصد حجمی نانوذرات در مواد تغییر فاز دهنده میزان تغییرات دمای اتاق در طول روز کاهش می‌یابد. در نتیجه استفاده از نانومواد تغییر فاز دهنده تأثیر چشمگیری در بحث گرمایش و آسایش حرارتی ساکنین خانه خواهد داشت.

کلید واژگان: شبیه‌سازی عددی، نانو مواد تغییر فاز دهنده، سیستم گرمایش از کف، آب و هوای معتدل و مرطوب

The effect of Nano-phase change materials on hydronic floor heating system in temperate and humid climate

Naghmeh Jamshidi^{1*}, Nasibeh Sadafi²

1-Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran

2-Department of Art and Architecture, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran

*P.O. B. 19395-3697, Tehran, Iran, njamshidi@mpnu.ac.ir

ABSTRACT

In this paper, phase change material (PCM) was utilized in the hydronic floor heating system for house heating in the winter. The outdoor temperature was considered moderate and humid, as the climate in North of Iran. The effect of hot water temperature in tubes, transition temperature, latent heat and finally thermal conductivity of PCMs are investigated and the operating characteristics of the system were compared with that of the non-phase change energy storage system. The results showed that the PCM stabilized temperature within the room and decreased energy consumption. Latent heat of PCM found to have a minor effect on room temperature, whereas increase in the transition temperature of PCM caused increase of the lagging time between outside and inside room temperatures. Increasing the thermal conductivity of the PCM, the rise of room temperature per unit time was accelerated, in addition, increasing the weight fraction of Nano particles in PCM was dampened the amplitude of room temperature variation during the day. Therefore, using Nano-PCM was found to be of great significance for house heating and comfort condition of occupants.

Keywords: CFD simulation, Nano-PCM, hydronic floor heating system, moderate and humid climate

1- مقدمه

صورت تجربی اثر اضافه کردن لایه‌ای از مواد تغییر فاز دهنده در دیوارها جهت گرمایش ساختمان را مورد بررسی قرار دادند و بیان کردند اضافه کردن این لایه تا 15% از هزینه‌های انرژی سالیانه می‌کاهد. استتیو و فوستل [3] با حل عددی به صورت یک بعدی به بررسی استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در دیوارهای ساختمان پرداختند و بیان کردند استفاده از این مواد تا 28% از بار سرمایی مورد نیاز ساختمان می‌کاهد. هیم و کلارک [4] اثر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در پوشش درونی اتاق را مورد بررسی قرار دادند. نتایج کاهش 90% در بار حرارتی مورد نیاز به دلیل انرژی خورشیدی ذخیره شده در دیواره را نشان می‌دهد.

یکی از طرق گرمایش ساختمان سیستم گرمایش از کف است که از دیرباز به طرق مختلف انجام می‌شد. لین و همکاران [6,5] نوع جدیدی از سیستم‌های گرمایش از کف را مطرح کردند که در آن لایه‌ای از مواد تغییر فاز دهنده در کف قرار گرفته بود. نتایج این کار تجربی نشان داد افزودن این

در عصر حاضر با توجه به آلودگی‌های زیست محیطی و همچنین تجدیدنپذیر بودن سوخت‌های فسیلی نیاز به استفاده از روش‌های نوین برای تهیه سوخت‌هایی پاک و تجدیدنپذیر بیشتر احساس می‌شود. یکی از این انرژی‌های قابل تجدید، انرژی حرارتی است. یکی از مهم‌ترین روش‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی استفاده از مواد تغییر فاز دهنده¹ است. یکی از کاربردهای مواد تغییر فاز دهنده در صنعت ساختمان و جهت تامین گرما و انرژی نیاز منازل مسکونی است. مواد تغییر فاز دهنده در ساختمان‌ها به دو صورت استفاده می‌گردد؛ در دیوارها و اجزای سازنده ساختمان و دیگری برای ذخیره‌سازی گرما و سرما تولید شده توسط تجهیزات. اولین بار تلکس [1] به بررسی استفاده از این مواد در دیوارهای ساختمان پرداخت. پیپو و همکاران [2] به

¹ Phase Change Material (PCM)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

N. Jamshidi, N.Sadafi, The effect of Nano-phase change materials on hydronic floor heating system in temperate and humid climate, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Second International Conference on Air-Conditioning, Heating and Cooling Installations*, Vol. 16, No. 13, pp. 87-91, 2016 (in Persian فارسی)

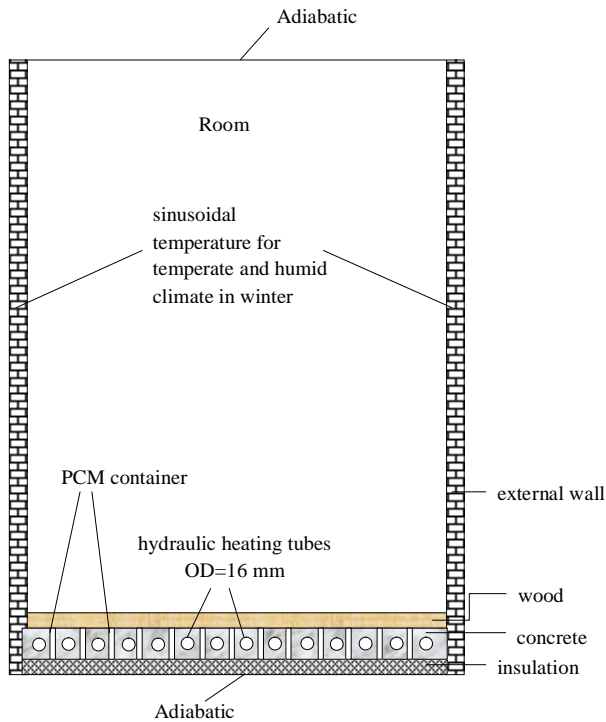


Fig. 1 The schematic of numerical domain and boundary conditions of floor heating system with PCM

شکل 1 ناحیه محاسباتی و شرایط مرزی اتاق با سیستم گرمایش از کف و مجهز به محفظه‌های حاوی مواد تغییر فاز دهنده

جدول 1 مشخصات مواد مورد استفاده در شبیه‌سازی

Table 1 Characteristics of the materials used in the simulation

چگالی	حرارت مخصوص	هدایت حرارتی	لزجت	گرمای نهان	گرمای دمایی
31	1340	0.04	789×10^{-5}	303	138000
31	1340	0.04		307	188000
1800	880	0.0257		-	-
2500	920	1.4		-	-
Ideal-gas	1006.43	0.0242		-	-

جدول 2 مشخصات مواد تغییر فاز دهنده

Table 2 Characteristics of the phase change materials

چگالی	حرارت مخصوص	هدایت حرارتی	لزجت	گرمای نهان	گرمای دمایی
PCM303	1510	1800	0.8	0.03	303
PCM307	1510	1800	0.8	0.03	307
Al ₂ O ₃	3970	765	47	-	-

گرمای نهان [9]:

$$L_{\text{Nano-PCM}} = \frac{(1 - \phi)(\rho L)_{\text{PCM}}}{\rho_{\text{Nano-PCM}}} \quad (4)$$

لزجت دینامیکی [10]:

$$\mu_{\text{Nano-PCM}} = 0.983 e^{12.959\mu_{\text{PCM}}} \quad (5)$$

هدایت حرارتی نانومواد تغییر فاز دهنده با استفاده از فرمول پیشنهادی واجیها [11] به دست می‌آید:

$$k_{\text{Nano-PCM}} = \frac{k_{\text{np}} + 2k_{\text{np}} - 2(k_{\text{np}} - k_{\text{np}})\phi}{k_{\text{np}} + 2k_{\text{np}} + (k_{\text{np}} - k_{\text{np}})\phi} + \quad (6)$$

$$5 \times 10^4 \rho_{\text{PCM}} c_{p,\text{PCM}} \beta_k \xi \phi \sqrt{\frac{\kappa T}{\rho_{\text{NP}} d_{\text{NP}}}} f(T, P)$$

لایه علاوه بر اینکه موجب افزایش دمای اتاق می‌شود، باعث کاهش بار حرارتی مورد نیاز ساختمان نیز می‌شود. لو [7] با استفاده از بسته نرم‌افزاری به شبیه‌سازی یک اتاق که سیستم گرمایش از کف الکتریکی داشته و مجهز به مواد تغییر فاز دهنده است، پرداخته و دمای داخل اتاق با سیستمی که شامل مواد تغییر فاز دهنده نیست، مقایسه نمود.

ظرفیت گرمای ویژه و رسانایی حرارتی مواد تغییر فاز دهنده کم است که با استفاده از وارد نمودن نانومواد به داخل آن‌ها می‌توان خواص حرارتی را بهبود بخشید. وو و همکاران [8] با استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری دقیق به بررسی تأثیر استفاده از نانوذرات مس در مواد تغییر فاز دهنده پرداخته و نشان دادند با افزودن 2% وزنی از نانوذرات مس به پارافین هدایت حرارتی آن در حالت مایع و جامد به ترتیب 18.1%، 14.2% افزایش می‌یابد.

مطالعات در زمینه استفاده از روش‌های عددی جهت شبیه‌سازی انتقال حرارت در یک سیستم گرمایش از کف و مجهز به مواد تغییر فاز دهنده مخلوط با نانوذرات بسیار اندک می‌باشد. در این مقاله، با استفاده از شبیه‌سازی عددی یک اتاق که با سیستم گرمایش از کف در زمستان در منطقه معتدل و مرطوب گرم می‌شود، مدل شده و تأثیر عواملی نظیر مواد تغییر فاز دهنده، هدایت حرارتی و نهایتاً نانو مواد تغییر فاز دهنده بررسی می‌گردد.

2- توصیف مساله

در "شکل 1" مدل فیزیکی شامل اتاق، دیوارهای خارجی، لایه چوب، بتن، لوله‌های سیستم گرمایش از کف، محفظه‌های حاوی مواد تغییر فاز دهنده و لایه عایق نشان داده شده‌اند. عرض و ارتفاع اتاق 2.8m می‌باشد. قطر لوله‌ها 16mm و سیستم کف شامل چهار لایه می‌باشد: چوب به ضخامت 20mm، لایه بتن به ضخامت 30mm، لایه عایق به ضخامت 20mm، و در صورتی که اتاق مجهز به مواد تغییر فاز دهنده باشد، این مواد در داخل محفظه‌هایی به عرض 20mm در بتن قرار می‌گیرند. از آن‌جا که اتاق متقارن بوده و دیوارهای خارجی در هر دو سمت اتاق در معرض هوای بیرون می‌باشند، تنها نیمی از اتاق مدل شده و به صورت عددی بررسی می‌گردد.

دیوار بیرونی در معرض هوای محیط در فصل زمستان و در آب و هوای معتدل و مرطوب در شمال ایران (شهر ساری) می‌باشد. پروفیل دمای هوای محیط به صورت سینوسی با تغییرات دمای بین 4°C و 12°C می‌باشد:

$$T(^{\circ}\text{C}) = 12 + 8 \sin\left(\frac{2\pi t(\text{hour})}{24} - \frac{\pi}{2}\right) \quad (1)$$

مقاومت حرارتی دیوار بیرونی برای یک دیوار استاندارد با لایه عایق به ضخامت 3.5cm و هدایت حرارتی 0.0257 W/m.K در نظر گرفته شده است. شرط مرزی عایق برای سقف اعمال شده و از نشت حرارت از طریق کف به زمین نیز صرف‌نظر شده است. خواص ترموفیزیکی چهار لایه در جدول 1 آمده است.

در جدول 2 دو نوع ماده تغییر فاز دهنده مختلف با توجه به محدوده دمایی سیستم و خواص حرارتی نانوذرات آلومینا آمده است.

با استفاده از خواص مواد تغییر فاز دهنده و نانوذرات (جدول 2) و روابط زیر می‌توان خواص ترموفیزیکی نانو-مواد تغییر فاز دهنده را بدست آورد:

چگالی [9]:

$$\rho_{\text{Nano-PCM}} = \phi \rho_{\text{NP}} + (1 - \phi) \rho_{\text{PCM}} \quad (2)$$

ظرفیت حرارتی مخصوص [9]:

$$C_{p,\text{Nano-PCM}} = \frac{\phi(\rho c_p)_{\text{NP}} + (1 - \phi)(\rho c_p)_{\text{PCM}}}{\rho_{\text{Nano-PCM}}} \quad (3)$$

جدول 3 اعتباربخشی حل عددی با نتایج کارابای [13] با اعمال شرایط مرزی یکسان
Table 3 validation of current study with Karabay et al. [13] with the same boundary conditions

دمای لوله	اتاق	سقف	دیوار خارجی	دیوار داخلی	کف	
30°C	کار حاضر	296.9	297.38	294.9	297.1	299.2
	مرجع [13]	297.6	297.58	295.5	297.4	299.1
	خطا (%)	0.2	0.07	0.2	0.1	0.02
40°C	کار حاضر	306.4	306.15	303.2	305.9	308.4
	مرجع [13]	306.1	306.07	303.5	305.9	308
	خطا (%)	0.11	0.03	0.12	0.01	0.13
50°C	کار حاضر	314.6	314.74	311.3	314.4	317.2
	مرجع [13]	314.6	314.59	311.7	314.4	316.8
	خطا (%)	0.01	0.05	0.11	0	0.12

4- نتایج

1-4 بررسی اثرات مواد تغییر فاز دهنده

جهت افزایش قابلیت جذب انرژی ساختمان می‌توان از مواد تغییر فاز دهنده در لایه‌های ساختمان استفاده نمود. در این بخش تاثیر استفاده از دو نمونه مواد تغییر فاز دهنده در دمای داخلی اتاق بررسی شده و نتایج آن در "شکل 3" با اتاق اولیه مقایسه شده است. با تغییر دادن مواد تغییر فاز دهنده دمای تغییر فاز و انرژی نهان آن به‌طور همزمان تغییر می‌نماید. دمای لوله حاوی آب گرم در 40°C ثابت نگه‌داشته شده است. با توجه به "شکل 3" در صورتیکه اتاق به صورت اولیه شبیه‌سازی شود، دمای داخل اتاق با دمای هوای بیرون نوسان شدیدی دارد؛ اما در صورت استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در کف اتاق تغییرات دمای اتاق کاهش می‌یابد. علت این امر در میزان انرژی ذخیره شده در مواد تغییر فاز دهنده و آزادسازی آن حین نوسانات دمای هوای بیرون است. با مقایسه دو نوع ماده تغییر فاز دهنده PCM303 و PCM307 می‌توان دریافت که PCM307 تاخیر زمانی بیشتری نسبت به دمای هوای بیرون داشته و در مقایسه با PCM303 جهت تامین آسایش ساکنین اتاق مناسب‌تر است.

2-4 بررسی اثرات دمای تغییر فاز

دمای تغییر فاز یک فاکتور مهم در کارایی حرارتی ساختمان‌های مجهز به

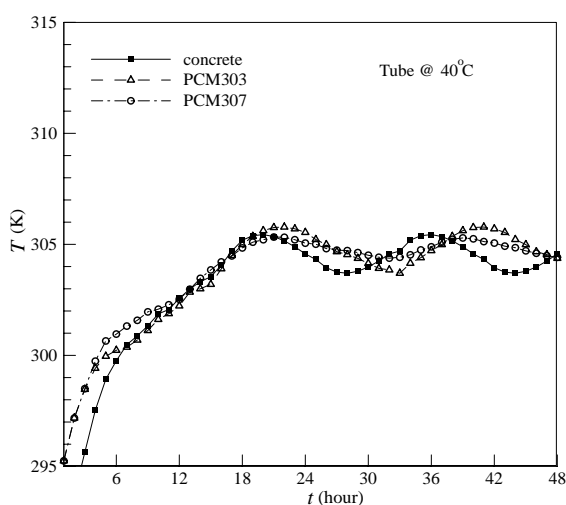


Fig. 3 The effect of using PCM in room average temperature

شکل 3 اثرات استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در دمای متوسط اتاق

رابطه β_k برای نانوذرات Al_2O_3 به صورت معادله (7) بدست می‌آید:

$$\beta_k = 8.4407 (100\phi)^{-1.07304} \quad (7)$$

و ξ ضریب تصحیح جهت در نظر گرفتن حرکت بروانی نانوذرات در محیط پایه است که به صورت رابطه (8) تعریف می‌گردد:

$$\xi = \begin{cases} 0, & \text{اگر } T < T_{\text{solidus}} \\ \frac{T - T_{\text{solidus}}}{T_{\text{liquidus}} - T_{\text{solidus}}}, & \text{اگر } T_{\text{solidus}} < T < T_{\text{liquidus}} \\ 1, & \text{اگر } T > T_{\text{liquidus}} \end{cases} \quad (8)$$

κ ثابت بولتزمن و مقدار آن برابر با $\kappa = 1.381 \times 10^{-23} (\frac{J}{K})$ و $f(T, \phi)$ از رابطه (9) بدست می‌آید [12].

$$f(T, \phi) = (2.8217 \times 10^{-2} \phi + 3.917 \times 10^{-3}) \frac{T}{T_0} + (-3.0669 \times 10^{-2} \phi - 3.91123 \times 10^{-3}) \quad (9)$$

3- مدل محاسباتی

شبکه محاسباتی در محیط نرم‌افزار گمبیت ایجاد و سپس در نرم افزار فلونت شبیه‌سازی می‌گردد. شبکه محاسباتی در نزدیکی لوله‌های قرار گرفته در کف در "شکل 2" نشان داده شده است. جهت حل معادلات ناویر استوکس با استفاده از روش حجم محدود کل شبکه به محیط فلونت وارد می‌گردد. معادلات با استفاده از الگوریتم سیمپلک و روش کوئیک حل می‌گردد. ضرایب تخفیف به قرار زیر انتخاب می‌شود: فشار (0.1)، چگالی (0.3)، نیروی حجمی (0.3)، ممنتوم (0.15)، به‌روزرسانی نسبت مایع (0.2) و انرژی (0.15). معیار همگرایی برای باقیمانده معادله انرژی 10^{-7} می‌باشد. جهت مدل‌سازی پدیده تابش از مدل سطح به سطح (S2S) استفاده شده است.

1-3 شبکه‌بندی و مطالعه گام زمانی

سه گام زمانی 0.1s, 0.5s, 1s و چهار اندازه شبکه $(200 \times 120, 350 \times 200 \times 120, 90, 420 \times 200)$ استفاده و اثرات هر حالت در میزان شار حرارتی کف اتاق محاسبه شده است. در نهایت شبکه‌ای با تعداد سلول 350×120 و گام زمانی 1s انتخاب گردید.

2-3 اعتبار سنجی

جهت اعتبار بخشیدن به روش حل، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج کارابای [13] مقایسه شده است. مدل استفاده شده توسط کارابای [13] شامل اتاقی مشابه اما با شرایط مرزی دیوار متفاوت بوده و در آن از مواد تغییر فاز دهنده استفاده نشده است. شرط مرزی یک دیوار به صورت دیوار خارجی در معرض دمای هوای 3°C- و دیوار دیگر دیوار داخلی فرض شده است. با اعمال شرایط مرزی مشابهی نتایج در جدول 3 مقایسه شده است. حداکثر تفاوت بین نتایج شبیه‌سازی حاضر و کارابای [13] 0.2% می‌باشد و در نتیجه مدل محاسباتی و روش حل شبیه‌سازی حاضر تایید می‌گردد.

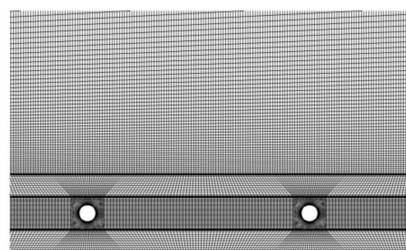


Fig. 2 The non-uniform mesh with more refined grids near the tubes

شکل 2 شبکه‌بندی غیر یکنواخت با تمرکز شبکه در نزدیکی لوله‌ها

4-4- بررسی اثرات هدایت حرارتی مواد تغییر فاز دهنده

مواد تغییر فاز دهنده هدایت حرارتی کمتری نسبت به بتن دارند، بنابراین اگر هدایت حرارتی مواد تغییر فاز دهنده را برابر با لایه بتن در نظر بگیریم؛ این مواد می‌توانند خصوصیات ماده‌ای با هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی بالا را داشته باشند. نتایج این حالت شبیه‌سازی در "شکل 6" در طول دو روز زمستانی شهر ساری نشان داده شده است. با افزایش هدایت حرارتی PCM به مقداری برابر با بتن، تغییرات دمای اتاق بر واحد زمان افزایش می‌یابد. در مقایسه با سیستم اولیه گرمایش بدون مواد تغییر فاز دهنده نیز این سیستم جرم حرارتی و توانایی جذب و ذخیره حرارت بیشتری خواهد داشت.

5-4- بررسی اثرات نانومواد تغییر فاز دهنده

استفاده از ذرات جامد در اندازه نانومتر در محیط پایه می‌تواند باعث تغییرات خواص حرارتی محیط گردد [10]. یکی از ضعف‌های مواد تغییر فاز دهنده هدایت حرارتی پایین این مواد می‌باشد. در نتیجه محققین بسیاری با اضافه نمودن نانواد به مواد تغییر فاز دهنده بر این عیب فائق آمده‌اند.

هدف در این بخش از مطالعه بررسی عددی اضافه نمودن نانوذرات آلومینا (Al_2O_3) به مواد تغییر فاز دهنده و بررسی استفاده از آن در کف اتاق در سیستم گرمایش از کف می‌باشد. بررسی در درصدهای وزنی مختلف

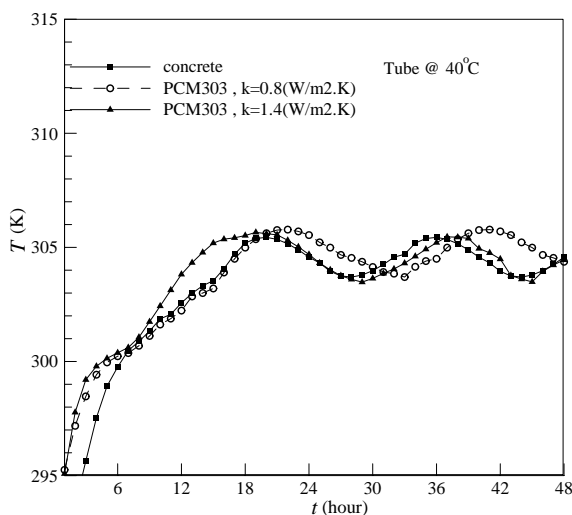


Fig. 6 The effect of PCM thermal conductivity on room average temperature

شکل 6 اثر هدایت حرارتی مواد تغییر فاز دهنده در دمای متوسط اتاق

مواد تغییر فاز دهنده است. قابل ذکر است که مواد تغییر فاز دهنده دارای گرمای نهان متفاوتی در صورت تغییر دمای تغییر فاز هستند. جهت بررسی اثر دمای تغییر فاز به صورت مجزا، گرمای نهان در مقدار 188000 J ثابت نگه داشته شده و دمای تغییر فاز آن تغییر می‌نماید. "شکل 4" دمای متوسط اتاق را در دماهای مختلف تغییر فاز ماده تغییر فاز دهنده با هم مقایسه می‌نماید. در مقایسه با سیستم گرمایشی اولیه، تاخیر زمانی PCM303 و PCM307 بیشتر از حالت اولیه بوده و در صورت استفاده از PCM307 دمای هوای بیرون تأثیرات کمتری بر روی دمای هوای اتاق نسبت به PCM303 خواهد داشت.

3-4- بررسی اثرات گرمای نهان مواد تغییر فاز دهنده

با ثابت نگه داشتن دمای تغییر فاز و تغییرات گرمای نهان در "شکل 5" به بررسی اثرات گرمای نهان مواد تغییر فاز دهنده پرداخته شده است. بنابر نتایج قابل مشاهده در "شکل 5"، گرمای نهان مواد تغییر فاز دهنده تأثیر بسیار کمی در دمای متوسط اتاق خواهد داشت.

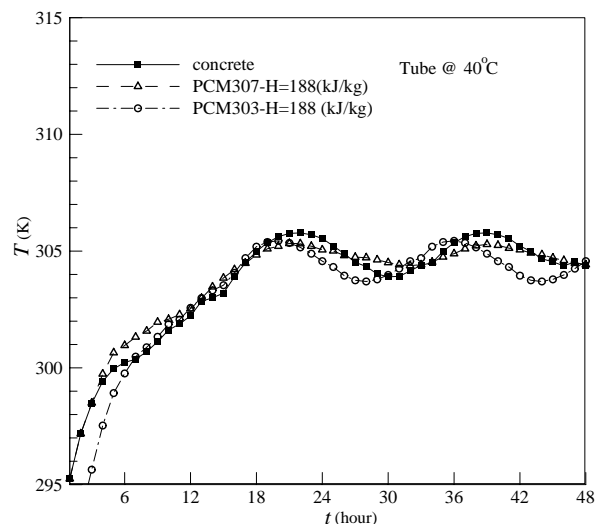


Fig. 4. The effect of PCM melting temperature on room average temperature

شکل 4 اثرات دمای تغییر فاز مواد تغییر فاز دهنده در دمای متوسط اتاق

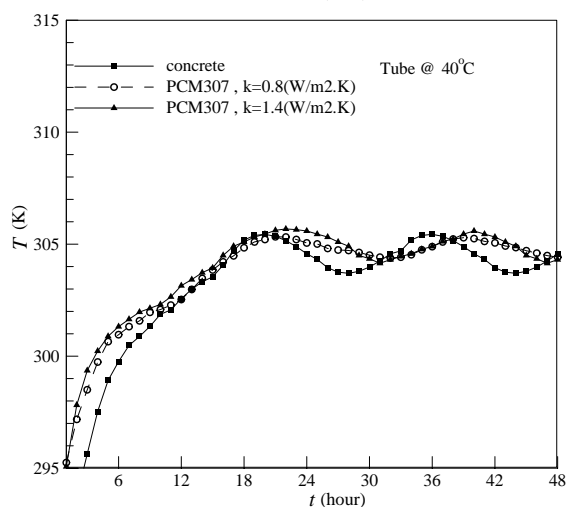


Fig. 6 The effect of PCM thermal conductivity on room average temperature

شکل 6 اثر هدایت حرارتی مواد تغییر فاز دهنده در دمای متوسط اتاق

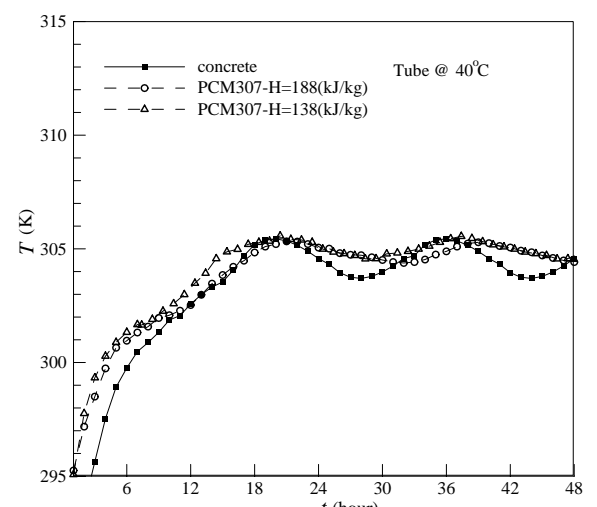


Fig.5 The effect of PCM latent heat on room average temperature

شکل 5 اثر گرمای نهان مواد تغییر فاز دهنده در دمای متوسط اتاق

علایم یونانی

ثابت بولتزمن	κ
لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)	μ
چگالی (kgm^{-3})	ρ
ویسکوزیته سینماتیکی (m^2/s)	ν
نسبت حجمی ذرات (%)	ϕ

زیرنویس‌ها

نانو سیال	nf
نانوذرات	np

7- مراجع

- [1] M. Telkes, *Thermal storage for solar heating and cooling, Proceedings of the workshop on Solar Energy Storage Subsystems for the heating and cooling of buildings*, Charlottesville Virginia, USA, 1975.
- [2] C. Stetiu and H. Feustel, *Phase change wallboard and mechanical night ventilation in commercial buildings*, Lawrence Berkeley National laboratory, 1998.
- [3] K. Peoppo, P. Kauranen and P. D. Lund, A Multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating, *Energy and Buildings*, Vol. 17, pp. 259-70, 1991.
- [4] D. Heim, J. A. Clarke, Numerical modelling and thermal simulation of PCM -gypsum composites with ESP-r, *Energy and Buildings*, Vol. 36, pp. 795-805, 2004.
- [5] K. P. Lin, Y. P. Zhang, X. Xu, Experimental Study of Under-floor Electric Heating System with Shape-stabilized PCM Plates, *Energy and Buildings*, Vol. 3, pp. 215-220, 2005.
- [6] K. P. Lin, Y. P. Zhang, H. F. Di, R. Yang, Study of an Electrical Heating System with Ductless Air Supply and Shape-stabilized PCM for Thermal Storage, *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, pp. 2016-2024, 2007.
- [7] X. X. Luo, Y. P. Zhang, K. P. Lin, Numerical Simulation and Analysis on Thermal Performance of Electrical Heating Floor with Phase Change Material Heat Storage, *Heating, Ventilating and Air Conditioning*, Vol. 34, No. 11, pp. 5-9, 2004.
- [8] S. Y. Wu, H. Wang, S. Xiao, D. S. Zhu, An investigation of melting/freezing characteristics of nanoparticle-enhanced phase change materials, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 110, pp. 1127-1131, 2012.
- [9] L. C. Chow, J. K. Zhong, Thermal conductivity enhancement for phase change storage media, *International Communication of Heat and mass transfer*, Vol. 23, pp. 91-100, 1996.
- [10] A. V. Arasu, A. P. Sasmito, A. S. Mujumdar, Numerical performance study of paraffin wax dispersed with alumina in concentric pipe latent heat storage system, *Thermal science*, Vol. 17, pp. 419-430, 2013.
- [11] R. S. Vajjha, D. K. Das, P. K. Namburu, Numerical study of fluid dynamic and heat transfer performance of Al_2O_3 and CuO nanofluids in the flat tubes of a radiator, *International Journal of Heat and fluid flow*, Vol. 31, pp. 613-621, 2013.
- [12] R. S. Vajjha, D. K. Das, Measurement of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 4675-4682, 2009.
- [13] H. Karabay, M. Arici, M. Sandik, A numerical investigation of flow and heat transfer inside a room for floor heating and wall heating systems, *Energy and Buildings*, Vol. 67, pp. 471-478, 2013.

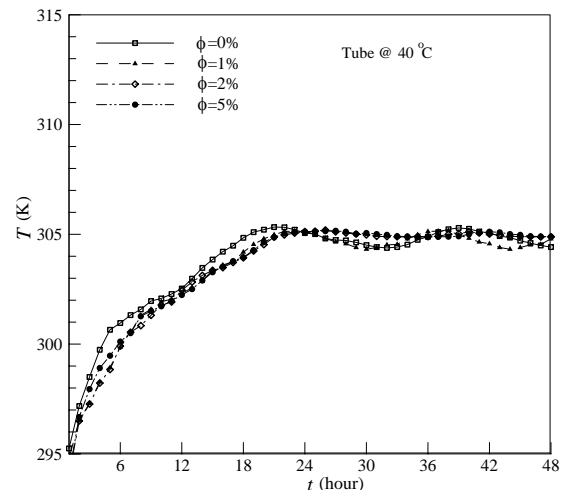


Fig. 7 The effect of Al_2O_3 nanoparticles weight fraction in PCM as the base medium on room average temperature

شکل 7 اثر درصد وزنی نانوذرات آلومینا در ماده تغییر فاز دهنده بر دمای متوسط اتاق

انجام شده و نتایج مربوط به دمای متوسط اتاق در "شکل 7" نشان داده شده است. افزودن نانوذرات به ماده تغییر فاز دهنده باعث کاهش نوسانات دمایی در طول شبانه روز در اتاق مورد بررسی شده و در نتیجه آسایش حرارتی ساکنین اتاق را افزایش می‌دهد.

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله با بهره‌گیری از مواد تغییر فاز دهنده ظرفیت حرارتی مصالح موجود در ساختمان افزایش داده شده است. مواد تغییر فاز دهنده باعث افزایش تاخیر زمانی بین دمای هوای بیرون از ساختمان و دمای متوسط اتاق شده و در نتیجه دمای اتاق کمتر تحت تاثیر هوای بیرون می‌باشد. علت در نحوه عملکرد مواد تغییر فاز دهنده و ذخیره و آزادسازی انرژی حرارتی در این مواد می‌باشد. از طرفی تغییرات گرمای نهان و ثابت نگاه داشتن دمای تغییر فاز مواد تغییر فاز دهنده بیانگر اثرات قابل اغماض گرمای نهان در دمای اتاق می‌باشد. با افزایش هدایت حرارتی مواد تغییر فاز دهنده به هدایت حرارتی بتن، تغییرات دمای اتاق بر واحد زمان افزایش یافته و سیستم گرمایش بهتر عمل می‌نماید. با افزودن نانوذرات آلومینا در درصد‌های وزنی مختلف دامنه تغییرات دمای متوسط اتاق کاهش یافته و آسایش حرارتی بیشتری برای ساکنین اتاق به همراه خواهد داشت.

6- فهرست علایم

ظرفیت حرارتی ($\frac{\text{W}}{\text{kg.K}}$)	C_p
ضریب هدایت حرارتی ($\frac{\text{W}}{\text{m}^2.\text{K}}$)	k
گرمای ویژه ($\frac{\text{J}}{\text{kg}}$)	L
دما (K)	T
زمان (hour)	t