



شبیه سازی محاسباتی تهویه آزاد یک ساختمان با بهره گیری از مواد تغییر فاز دهنده

مهدی کوهستانی¹، روح اله احمدی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی سیستم های انرژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- استادیار، دانشکده ی فناوری های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی 163-16765، ahmadi@iust.ac.ir

چکیده

با افزایش جمعیت و مدرنیزه شدن شهرها، تقاضای مصرف انرژی در بخش تهویه مطبوع به منظور افزایش فاکتور آسایش ساختمان ها در حال افزایش است. بنابراین، امروزه اهمیت استفاده از سیستم های ذخیره ساز انرژی حرارتی دو چندان شده است. از مزایای ذخیره سازی انرژی حرارتی نهان، می توان به چگالی ذخیره سازی انرژی بالا و تغییر دمای خیلی کم حین ذخیره سازی و آزادسازی حرارت اشاره نمود. در این مقاله بار برودتی یک اتاق از ساختمانی در شهر تبریز، با استفاده از نرم افزار کریر محاسبه شده است. سپس تحلیل عددی یک سیستم تهویه آزاد با ذخیره سازی حرارت نهان به کمک پارافین تجاری RT24 صورت گرفت و تاثیر دما و سرعت هوای ورودی به مبدل حرارتی در طول فرایند ذوب و انجماد بررسی شد. شبیه سازی فرایند ذخیره سرما نشان داد که با عبور دمای متوسط محیط 19 °C در طول شب، انجماد پارافین 4 ساعت طول می کشد. این سرمای ذخیره شده 1.2 کیلووات برودت را طی 2.5 ساعت در بعدازظهر تیر ماه به صورت تهویه آزاد به اتاق تزریق می کند.

کلید واژگان: ذخیره سازی حرارت نهان، مواد تغییر فاز دهنده، تهویه آزاد، تحلیل عددی

Computational Simulation of Free Cooling in a Building Using Phase Change Material

Mahdi Kouhestani, Roohollah Ahmadi*

School of new technologies, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 16765-163, Tehran, Iran, ahmadi@iust.ac.ir

ABSTRACT

With increase of population and modernization of the cities, energy demand for heating, ventilation and air conditioning systems increases rapidly to improve the satisfaction factor of buildings. Therefore, nowadays the importance of implementation of energy storage systems is significant. Latent heat thermal energy storage (LHTES) systems have many advantages due to their high-energy storage densities and small temperature variation during storage. In this paper, cooling load of a room in Tabriz was calculated by Career software. Then a numerical analysis of a free cooling system using commercial paraffin RT24, as phase change material (PCM), was performed and effect of inlet air temperature and flow rate of storage tank during charging and discharging processes was investigated. Cold energy storage simulation shows that air flow with the temperature 19°C during night, lead the paraffin to solidify in 4 hours. Stored cold energy with the amount of 1.2 kW in PCM liberates energy, via free cooling system, in the room during 2.5 hours of July afternoon.

Keywords: Latent heat thermal energy storage, Phase change material, Free cooling, Numerical analysis

1- مقدمه

بالتر می رود، هوای خنک ذخیره شده در ماده ی تغییر فاز دهنده تخلیه می گردد. به این صورت که هوای گرم از واحد ذخیره ساز انرژی عبور کرده، ماده ی تغییر فاز دهنده این گرما را دریافت می کند و در یک دمای ثابت ذوب شده و در نهایت هوای خنک شده ی مطلوب وارد اتاق می شود. بهره وری سیستم تهویه آزاد تا حد زیادی به شرایط آب و هوایی محیط بستگی دارد. خواص ماده ی تغییر فاز دهنده به ویژه دمای ذوب آن بسیار مهم بوده و این دما باید در محدوده ی تغییرات دمای روزانه باشد. جریان هوا اهمیت زیادی برای عملکرد موفق سیستم تهویه آزاد دارد و در صورتی که این جریان مناسب باشد، آن گاه انتقال حرارت موفقیت آمیز خواهد بود.

طبق تعریف استاندارد 55 آشری آسایش حرارتی شرایطی ذهنی است که احساس رضایت انسان از شرایط محیط را بیان می کند. این استاندارد لیستی پیشنهادی از دماها و جریان های هوا برای شرایط محیطی و ساختمان های مختلف ارائه نموده که به طور کلی، دمای آسایش اتاق در فصل تابستان °C

بخش خانگی و تجاری حدود 40 درصد از کل انرژی جهان را مصرف کرده و یک سوم از گازهای گلخانه ای را تولید می کند، که بخش قابل توجهی از این انرژی، صرف گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع ساختمان می گردد. یکی از راه های مؤثر در بهبود استفاده از منابع انرژی و محافظت از آن، توسعه ی سیستم های ذخیره ساز انرژی می باشد. ذخیره سازی انرژی حرارتی نهان با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده، دارای کارایی و قابلیت اطمینان بالا بوده و همچنین به علت ظرفیت ذخیره سازی انرژی بالا، مورد توجه زیادی قرار گرفته است. اساس استفاده از مواد تغییر فاز دهنده برای تهویه آزاد ساختمان ها دو مرحله دارد: ابتدا به هنگام شب که دمای محیط از دمای اتاق پایین تر است، جریان هوای خنک محیط از واحد ذخیره ساز انرژی عبور کرده و حرارت ماده ی تغییر فاز دهنده در حالت مایع را گرفته و این ماده شروع به انجماد در دمای ثابت می کند. سپس هنگامی که در طول روز، دمای اتاق از حد مطلوب

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M.Kouhestani, R.Ahmadi, Computational Simulation of Free Cooling in a Building Using Phase Change Material, Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Second International Conference on Air-Conditioning, Heating and Cooling Installations, Vol. 16, No. 13, pp. 135-140, 2016 (in Persian)

در "شکل 1" نشان داده شده و با استفاده از نرم‌افزار گمبیت این هندسه ایجاد شد، که ابعاد آن در "شکل 2" قابل مشاهده است. در محدوده‌ی مجاورت هوا با ماده‌ی تغییر فاز دهنده، به علت وجود گرادیان دما باید از مش ریزتری استفاده شود. فرایند استقلال جواب‌ها از مش انجام شده و در نهایت تعداد سلول‌های مش 15 هزار انتخاب شد.

3- مدل‌سازی عددی

نرم‌افزار فلوئنت از روش آنتالپی-تخلخل¹ برای مدل‌سازی فرایند ذوب و انجماد استفاده می‌کند. در این روش مکان سطح مشترک جدا کننده‌ی دو فاز به‌طور صریح مشخص نیست، در عوض یک مقدار با نام کسر حجمی مایع² وجود دارد که نشان‌دهنده‌ی کسری از حجم سلول است که مایع بوده و این مقدار در هر تکرار براساس تعادل آنتالپی محاسبه می‌شود. ناحیه‌ی خمیری³ بخشی است که کسر حجمی مایع بین صفر تا یک متغیر بوده و این ناحیه مانند یک شبه محیط متخلخل مدل‌سازی می‌شود که با انجماد ماده در آن، مقدار تخلخل از یک تا صفر تغییر می‌کند. هنگامی که درون سلول، ماده به‌طور کامل منجمد می‌شود، تخلخل صفر است.

3-1 معادلات حاکم

معادلات بقای جرم و مومنوم از روابط (1) و (2) به‌دست می‌آید. [8]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v) + \nabla \cdot (\rho v v) = \nabla \cdot [\mu (\nabla v + \nabla v^T)] - \nabla P + \rho g + S \quad (2)$$

S منبع مومنوم می‌باشد که حاوی سهم‌هایی از تخلخل ناحیه حساس، کشش سطحی در سطح مشترک دو فاز و سایر نیروهای خارجی وارد بر سطح می‌باشد. این مقدار با استفاده از رابطه‌ی (3) زیر محاسبه می‌شود.

$$S = \frac{C(1-\beta)^2}{\beta^3} v \quad (3)$$

جدول 1 خواص RT24 [7]

Table 1 Properties of RT24 [7]

مقدار	خاصیت
24	دمای ذوب و انجماد (°C)
155	حرارت نهان (kJ/kg)
2000	ظرفیت حرارتی (J/kg.K)
770	چگالی (kg/m ³)
0.2	هدایت حرارتی (W/m.K)

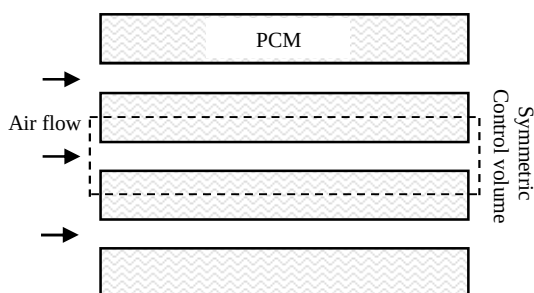


Fig. 1 Selected control volume for numerical analysis

شکل 1 حجم کنترل انتخابی برای تحلیل عددی

¹ Porosity

² Liquid Fraction

³ Mushy Zone

223.5 °C تا 25.5 °C در نظر گرفته شده است. بنابراین در کاربردهای تهویه آزاد برای ساختمان‌ها، مواد تغییر فاز دهنده با دمای تغییر فاز 18 °C تا 30 °C ترجیح داده می‌شوند [1].

یکی از اولین مطالعات در زمینه‌ی سیستم تهویه آزاد توسط تورنپنی و همکارانش [2] انجام شد، که هدف آن کاهش بار تهویه مطبوع در ساختمان‌ها بود. نمک هیدراته‌ی Na₂SO₄.10H₂O با دمای ذوب 21 °C به عنوان ماده‌ی تغییر فاز دهنده مورد استفاده قرار گرفت. نمونه اولیه‌ی این سیستم در یک دفتر معمولی نصب و آزمایش شد، که نتایج نشان می‌دهد طی 8 ساعت کار اداری 270 وات ساعت انرژی ذخیره شد. اگر این سیستم آزمایشی، جایگزین واحدهای سرمایش معمولی در 2000 اداره در انگلستان شود، تولید CO₂ به میزان 430 تن در سال کاهش می‌یابد.

تاکدا و همکارانش [3] سیستم ذخیره‌سازی با بستری از مجموعه مواد تغییر فاز دهنده، به منظور تهویه مطبوع ساختمان در شرایط آب و هوایی ژاپن را مورد مطالعه قرار دادند. دمای اتاق به منظور تهویه بر روی 26 °C تثبیت شده و مدل آزمایشگاهی شامل یک مجرای تهویه مطبوع مستطیلی شکل با ماده‌ی تغییر فاز دهنده تجاری گرانول (دمای تغییر فاز 22.5 °C تا 25 °C) بود. با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری، پتانسیل این سیستم در کاهش بار تهویه مطبوع در طول تابستان برای هشت شهر ژاپنی مورد بررسی قرار گرفت، که بیشترین بازدهی مربوط به شهر کیوتو با کاهش بار تهویه در حدود 62.8 درصد بود.

یاماها و میساکی [4] یک سیستم توزیع هوا با مواد تغییر فاز دهنده درون کانال هوا در نظر گرفتند، که هدف از طراحی این سیستم، سرمایش هوا و کاهش هزینه‌ی مصرف برق در ژاپن بود. ماده‌ی تغییر فاز دهنده ترکیبی از اسید چرب و پارافین بود، که در ابتدا خواص ماده‌ی ترکیبی اندازه‌گیری و ثبت شد. فرایند شارژ ماده‌ی تغییر فاز دهنده (ذخیره‌ی سرما) از ساعت 5 تا 8 صبح و فرایند تخلیه از ساعت 13 تا 16 بعد از ظهر انجام شد. برای یک ساختمان اداری معمولی در شهر ناگويا، 5.4 kg/m² ماده‌ی تغییر فاز دهنده توانست دمای اتاق را ثابت و مطلوب نگه دارد و همچنین دمای ذوب مناسب ماده برای عملکرد موفق سیستم، 19 °C بود.

استریتی و بوتالا [5] یک واحد ذخیره‌ساز حرارت نهان برای تهویه آزاد در نظر گرفتند، که حاوی 3.6 کیلوگرم پارافین تجاری RT20 با دمای ذوب 22 °C و ظرفیت ذخیره‌سازی حرارت 172 kJ/kg بود. نتایج شبیه‌سازی عددی و کار آزمایشگاهی بسیار به هم نزدیک بوده است. نتایج نشان می‌داد، هنگامی که دمای هوای ورودی 26 °C و سرعت هوای ورودی 1 متربرانه باشد، سرمای ذخیره شده می‌تواند هوا را به مدت 2.5 ساعت زیر 24 °C نگه دارد.

در مقاله حاضر، ابتدا بار برودتی یکی از اتاق‌های یک ساختمان مغفوض در شهر تبریز با اقلیم سرد و خشک، در گرم‌ترین ماه تابستان (تیر ماه) محاسبه شد. سپس شبیه‌سازی عددی سیستم تهویه آزاد با ذخیره‌سازی حرارت نهان به کمک ماده‌ی تغییر فاز دهنده‌ی RT24 از نوع پارافین‌های تجاری ساخته شده توسط شرکت روبیترم آلمان، صورت گرفته تا پتانسیل تهویه آزاد برای ایجاد برودت در اتاق بررسی شود.

2- مدل فیزیکی

در این مقاله، یک مبدل حرارتی صفحه تخت [6] دارای لایه‌هایی حاوی مواد تغییر فاز دهنده مورد استفاده قرار گرفته است. علت انتخاب این نوع مبدل حرارتی، انعطاف‌پذیری در تنظیم مساحت سطح، کنترل میزان دبی هوای عبوری و ساخت آسان می‌باشد. حجم کنترل انتخابی برای شبیه‌سازی عددی

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D_h}{\mu} \quad (9)$$

که در آن ρ چگالی، V سرعت هوای ورودی، D_h قطر هیدرولیکی کانال و μ لزجت دینامیکی هوا است.

$$Ste = \frac{C_p(T_{in} - T_m)}{L} \quad (10)$$

که در آن C_p ظرفیت گرمایی ویژه، T_{in} دمای هوای ورودی، T_m دمای ذوب ماده و L حرارت نهان ماده است.

شرایط اولیه در طول فرایند ذوب و انجماد به طور خلاصه در جدول 2 آمده است. در طول فرایند شارژ، با توجه به اینکه دمای تغییر فاز RT24 حدود 24°C می‌باشد، فرض شده که دمای اولیه‌ی ماده‌ی درون مخزن، 3°C درجه بالاتر از دمای انجماد یعنی 27°C باشد. با توجه به "شکل 3" دمای خشک تبریز در طول شب تا صبح به طور متوسط 19°C است. همچنین به علت پایین بودن جریان هوا، با استفاده از یک فن تهویه سرعت هوای ورودی به مخزن افزایش پیدا می‌کند.

از ساعت 16 بعد از ظهر به بعد که دمای محیط بیشترین مقدار ممکن است، تهویه‌ی رایج ساختمان خاموش شده و از تهویه آزاد به منظور سرمایش استفاده می‌شود. دمای هوای ورودی به مخزن در فرایند ذوب ماده با یک متوسط‌گیری دمایی، 30°C و 31°C می‌باشد. همچنین با استفاده از فن تهویه، سرعت هوای ورودی به مخزن به 3 m/s و 4 m/s می‌رسد.

4-3- شرایط حل

نرم‌افزار فلوئنت دارای دو روش حل متفاوت، یکی فشار مبنا و دیگری چگالی مبنا بوده که در شبیه‌سازی فرایند ذوب و انجماد، فقط می‌توان از روش حل فشار مبنا⁵ استفاده نمود. جریان گذرا بوده و برای مدل‌سازی آشفته‌گی از روش استاندارد k-ε استفاده شده است. الگوریتم پیزو برای ارتباط فشار- سرعت، همچنین روش پرزتو⁶ برای گسسته‌سازی فشار و روش طرح بالا دست مرتبه

جدول 2 شرایط اولیه

Table 2 Initial Conditions

فرایند	سرعت (m/s)	عدد رینولدز	دما ($^\circ\text{C}$)	عدد استفان
شارژ	7	10811	19	-
شارژ	9.3	14446	19	-
تخلیه	3	4660	30	0.075
تخلیه	4	6213	31	0.088

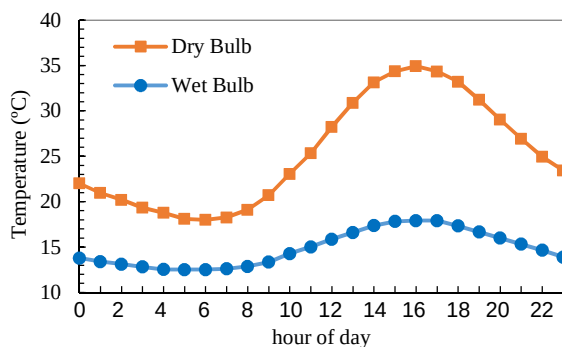


Fig. 3 Graph temperature of Tabriz city in hottest day of July

شکل 3 پروفیل دمایی شهر تبریز در گرم‌ترین روز ماه تیر

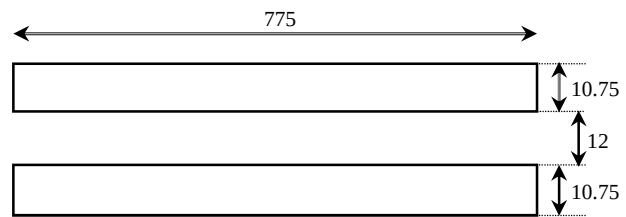


Fig. 2 Geometry of problem (mm)

شکل 2 هندسه‌ی مسئله (ابعاد به میلی‌متر)

طبق رابطه‌ی (4) آنتالپی ماده به صورت مجموع آنتالپی محسوس (h) و حرارت نهان (ΔH)، نوشته می‌شود، که آنتالپی محسوس (h) از رابطه‌ی (5) به دست می‌آید.

$$H = h + \Delta H \quad (4)$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p \cdot dT \quad (5)$$

کسر حجمی مایع (β) به صورت رابطه‌ی (6) تعریف می‌شود.

$$\beta = \begin{cases} 0 & T \leq T_s \\ 1 & T \geq T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & T_s \leq T \leq T_l \end{cases} \quad (6)$$

مقدار حرارت نهان ΔH را می‌توان براساس حرارت نهان ماده (L) به صورت فرمول (7) نوشت.

$$\Delta H = \beta L \quad (7)$$

در نهایت معادله‌ی انرژی به صورت رابطه‌ی (8) نوشته می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho v H) = \nabla \cdot (K \nabla T) + S_n \quad (8)$$

3-2- شرایط مرزی

در این مقاله، شرایط مرزی به این گونه است که هوای ورودی با سرعت و دمایی مشخص وارد سیستم می‌شود، بنابراین ورودی از نوع سرعت ورودی¹ انتخاب می‌شود. در قسمتی که هوا خارج می‌شود، شرط مرزی جریان خروجی² انتخاب شده و شرط مرزی لایه‌های بین هوا و ماده‌ی تغییر فاز دهنده از نوع دیواره³ می‌باشد. به علت تقارن موجود در مسئله و با توجه به حجم کنترل انتخاب شده، دیواره‌های بالا و پایین به صورت متقارن⁴ در نظر گرفته شده است.

3-3- شرایط اولیه

سرعت و دمای هوای ورودی به مخزن دو متغیر مهم برای بررسی عملکرد سیستم ذخیره‌ساز انرژی حرارتی در فرایندهای ذوب و انجماد هستند. برای در نظر گرفتن حالات مختلف برای دما و سرعت، بهتر است این متغیرها بی‌بعد شوند. برای بی‌بعد سازی سرعت از عدد رینولدز استفاده می‌شود، که این عدد برای جریان درون کانال با استفاده از رابطه‌ی (9) محاسبه می‌شود. برای اعداد رینولدز کمتر از 2300، جریان آرام و برای اعداد رینولدز بزرگتر از 2300، جریان آشفته است. برای بی‌بعد سازی دمای هوای ورودی در فرایند ذوب بهتر است عدد استفان به کار گرفته شود، که با استفاده از رابطه‌ی (10) تعریف می‌شود.

¹ Velocity Inlet

² Outflow

³ Wall

⁴ Symmetry

⁵ Pressure-based solver

⁶ Presto

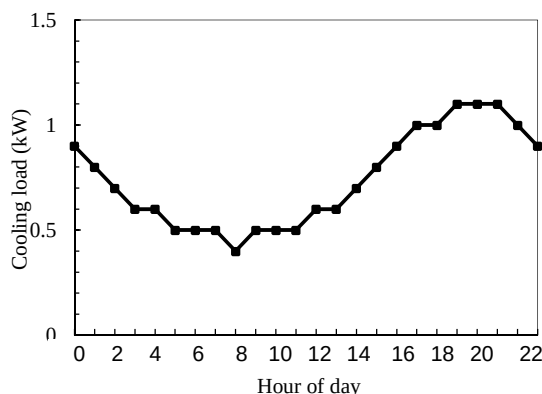


Fig. 5 Cooling load of sleeping room A

شکل 5 بار برودتی اتاق خواب A

2-5- فرایند ذخیره سازی برودت

"شکل 7" تغییر دمای ماده‌ی تغییر فاز دهنده و هوای خروجی از سیستم را با گذشت زمان نشان می‌دهد. با ورود هوای خنک به سیستم به علت جذب حرارت از ماده، ابتدا دمای ماده کاهش یافته تا به دمای انجماد برسد، سپس تغییر فاز شروع شده و دما با شیب ملایمی کاهش پیدا می‌کند. در نهایت پس از انجماد کامل ماده، کاهش دما دوباره با شیب تندتری صورت می‌گیرد. در یک دمای ثابت هر چه سرعت هوای ورودی به سیستم بیشتر باشد، ماده

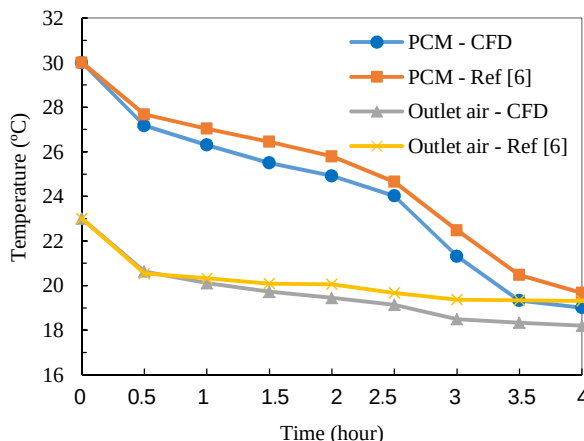


Fig. 6 Validation of Numerical analysis during charging process

شکل 6 اعتبارسنجی شبیه سازی عددی در طول فرایند شارژ

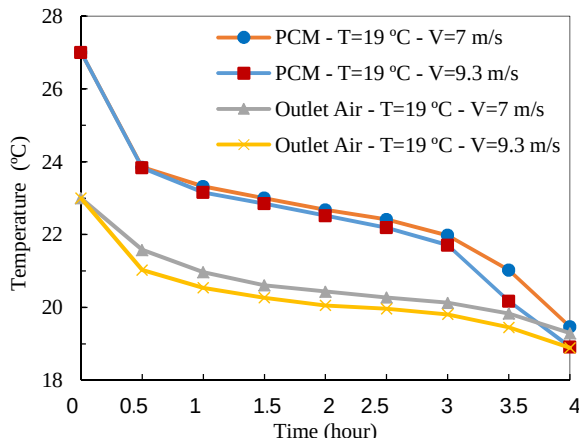


Fig. 7 Temperature of the PCM and outlet air during the charging process

شکل 7 دمای ماده‌ی تغییر فاز دهنده و هوای خروجی در طول فرایند شارژ

دو برای گسسته سازی انرژی انتخاب شده است. ضرایب زیر تخفیف¹ برای فشار، چگالی، مومنتوم، کسر حجمی مایع و انرژی به ترتیب 0.3، 1، 0.7، 0.9 و 1 در نظر گرفته شده است. معیار همگرایی مقادیر 10^{-4} برای بقای جرم و مومنتوم و 10^{-8} برای بقای انرژی انتخاب شد.

4- محاسبه ی بار برودتی اتاق

اصولاً تخمین صحیح بار برودتی، بستگی زیاد به بررسی دقیق اجزای بار در محیط مورد تهویه دارد و نقشه های کامل ساختمان و همچنین طرح کلی فضا، قسمتی از یک بررسی کامل محسوب می شود. در این مقاله، ساختمان مورد نظر که در "شکل 4" نشان داده شده، یک واحد مسکونی با متراژ 120 متر مربع به صورت یک طبقه همکف جنوبی می باشد. اطراف و محوطه ساختمان آسفالت می باشد که در نتیجه متوسط ضریب بازتابش سطح زمین 0.2 و همچنین ضریب هدایت حرارتی خاک منطقه 1.35 W/m.K در نظر گرفته شده است. ابتدا به منظور بررسی میزان بار برودتی مورد نیاز جهت طراحی سیستم تهویه آزاد، بار برودتی یکی از اتاق ها که در این جا اتاق خواب A انتخاب شده است، محاسبه می شود. درب اتاق از جنس چوب با ابعاد 0.9 در 2.5 متر مربع، پنجره از جنس آلومینیوم با ابعاد 1.8 در 1.2 متر مربع، تجهیزات روشنایی یک عدد لامپ مهتابی و یک عدد لامپ رشته ای می باشد. همچنین تعداد افراد استفاده کننده از اتاق یک نفر در نظر گرفته شده است. با استفاده از نرم افزار کریر برای ماه تیر محاسبات میزان بار برودتی در طول یک شبانه روز انجام شده و در "شکل 5" نشان داده شده است. همچنین مقدار هوادهی مورد نیاز برای اتاق، حدود $420 \text{ m}^3/\text{h}$ می باشد.

5- نتایج و بحث

5-1- اعتبارسنجی شبیه سازی عددی

برای صحت سنجی شبیه سازی عددی ابتدا نتایج آن، با کار تجربی انجام شده در مرجع [6] مقایسه شده و در "شکل 6" آمده است. میزان خطای متوسط بین نتایج عددی و تجربی حدود 4 درصد بوده که در نتیجه نتایج عددی معتبر می باشد.

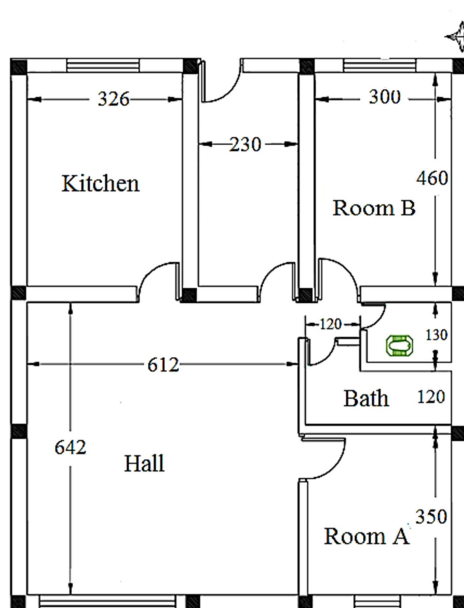


Fig. 4 Plan of building

شکل 4 پلان ساختمان

¹ Under-relaxation factors

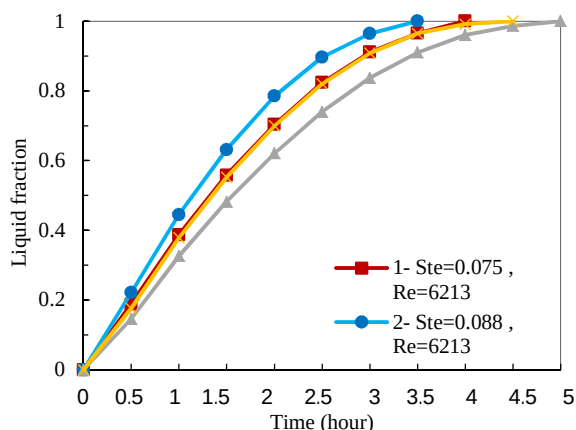


Fig. 9 Variation of liquid fraction during the discharging process

شکل 9 تغییر کسر حجمی مایع در طول فرایند تخلیه

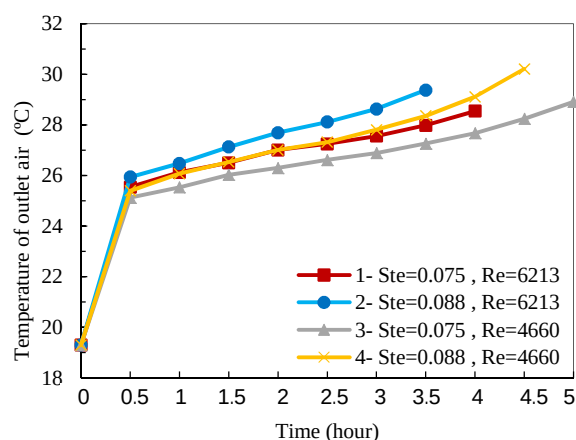


Fig. 10 Temperature variation of the outlet air during the discharging process

شکل 10 تغییر دمای هوای خروجی در طول فرایند تخلیه

جدول 3 نتایج فرایند تخلیه

Table 3 Result of discharging process

حالت	دمای هوای خروجی (°C)	هوادهی (m ³ /h)	مدت زمان تهویه (hour)	میزان ذوب (%)
اول	25.5 – 26.5	570	1.5	56
دوم	25.9 – 26.5	570	1	45
سوم	25.1 – 26.5	420	2.5	74
چهارم	25.4 – 26.5	420	1.5	55

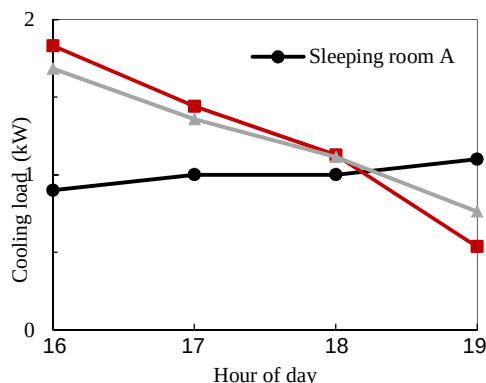


Fig. 11 Comparison of cooling load during the discharging process

شکل 11 مقایسه ی بار برودتی در طول فرایند تخلیه

سریع‌تر منجمد می‌شود. وقتی هوا با دمای 19 °C و سرعت 7 m/s وارد مخزن می‌شود، انجماد کامل ماده 4 ساعت به طول می‌انجامد. با افزایش سرعت هوای ورودی به 9.3 m/s، مدت زمان انجماد کامل ماده به 3.5 ساعت می‌رسد.

3-5- فرایند تخلیه انرژی برودتی

با توجه به پروفیل دمای هوای محیط در طول روز برای شهر تبریز، فرایند تخلیه انرژی سرمایش در چهار شرایط مختلف زیر بررسی شده است. در حالت اول و دوم عدد رینولدز 6213 بوده و عدد استفان از 0.075 به 0.088 تغییر می‌کند. در حالت سوم و چهارم عدد رینولدز 4660 بوده و عدد استفان از 0.075 به 0.088 تغییر می‌کند.

"شکل 8" تغییر دمای ماده‌ی تغییر فاز دهنده را با گذشت زمان نشان می‌دهد. با ورود هوای گرم به داخل مخزن، ماده‌ی تغییر فاز دهنده منجمد، حرارت را از هوای گرم جذب کرده و پس از گذشت 0.5 ساعت به دمای ذوب خود می‌رسد. سپس تغییر فاز شروع شده و دما با شیب ملایمی افزایش می‌یابد و در نهایت پس از ذوب کامل ماده، افزایش دما دوباره با شیب تندتری صورت می‌گیرد. کسر حجمی مایع در طول فرایند ذوب در "شکل 9" نشان داده شده است. در یک عدد رینولدز ثابت با افزایش 17 درصدی عدد استفان، مدت زمان ذوب 0.5 ساعت کاهش یافته و در یک عدد استفان ثابت با کاهش 25 درصدی عدد رینولدز، مدت زمان ذوب 1 ساعت افزایش یافته است.

یکی از مهم‌ترین نتایج مقاله، دمای هوای خروجی از مخزن به منظور تهویه اتاق می‌باشد، که در "شکل 10" نشان داده شده است. با گذشت زمان و ذوب هر چه بیشتر ماده، دمای هوای خروجی افزایش می‌یابد. شاهین حیدری و شهلا غفاری جباری [9] پژوهشی با هدف تعیین محدوده‌ی آسایش حرارتی برای شهر تبریز انجام داده‌اند که نتایج نشان داده دمای آسایش داخل اتاق برای ماه تیر، حدود 23 °C تا 28.5 °C است. با توجه به محاسبات انجام شده دمای هوای خروجی از مخزن ذخیره‌ساز به‌منظور تهویه اتاق تا 26.5 °C به‌عنوان دمای مجاز در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل به طور خلاصه در جدول 3 آمده که با توجه به آن، در کمترین عدد رینولدز و کمترین عدد استفان، بهترین حالت اتفاق افتاده و به مدت 2.5 ساعت هوای مطلوب برای تهویه اتاق موجود هست.

از نتایج مهم دیگر، میزان برودتی است که توسط تهویه آزاد ایجاد می‌شود. در طول فرایند ذوب، بار برودتی همواره در حال کاهش بوده و هرچه

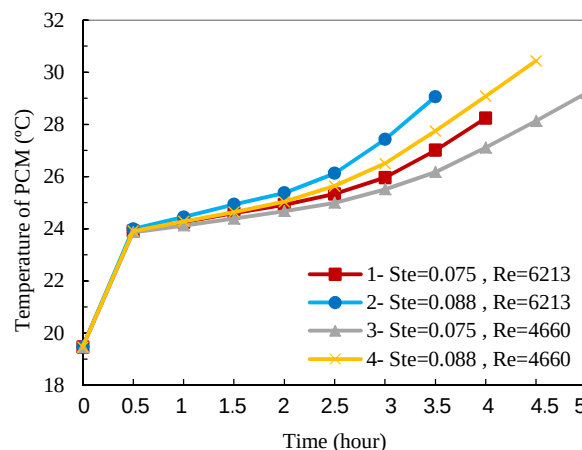


Fig. 8 Temperature variation of the PCM during the discharging process

شکل 8 تغییر دمای ماده‌ی تغییر فاز دهنده در طول فرایند تخلیه

H	آنتالپی (Jkg^{-1})
L	حرارت نهان ذوب (Jkg^{-1})
K	هدایت حرارتی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
T	دما ($^{\circ}\text{C}$)
v	سرعت (ms^{-1})

علائم یونانی

ρ	چگالی (kgm^{-3})
β	کسر حجمی مایع

زیرنویس‌ها

ref	مرجع
I	فاز مایع
S	فاز جامد

8- مراجع

- [1] ASHRAE Standard 55-1992, Thermal Environmental conditions for Human occupancy, American Society of heating, Refrigerating and Air conditioning Engineer, Atlanta.1992
- [2] Tumpenny, J., D. Etheridge, and D. Reay, Novel ventilation cooling system for reducing air conditioning in buildings.: Part I: testing and theoretical modelling. *Applied Thermal Engineering*, 2000. 20(11): p. 1019-1037.
- [3] Takeda, S., et al., Development of a ventilation system utilizing thermal energy storage for granules containing phase change material. *Solar Energy*, 2004. 77(3): p. 329-338.
- [4] Yamaha, M. and S. Misaki, The evaluation of peak shaving by a thermal storage system using phase-change materials in air distribution systems. *Hvac&R Research*, 2006. 12(S3): p. 861-869.
- [5] Stritih, U. and V. Butala, Energy savings in building with a PCM free cooling system. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 2011. 57(2): p. 125-134.
- [6] M. Rajagopal & R. Velraj, Experimental Investigation on the Phase Change Material Based Modular Heat Exchanger for Thermal Management of a Building, *International Journal of Green Energy*, 2016.
- [7] *Characteristics of organic PCM-RT*, Accessed on 20 March 2016; <http://www.rubitherm.com>
- [8] FLUENT 6.3 User's Guide, Fluent Inc. Lebanon; 2006
- [9] Heidari, S. and J.S. Ghafari, Determining thermal comfort for Tabriz. *Modares Mechanical Engineering*, 2011. (in Persian).

عدد رینولدز یا عدد استفان بیشتر باشد، مقدار بار برودتی بیشتر است. در "شکل 11" مقایسه‌ای بین میزان برودت موردنیاز اتاق و برودت ایجاد شده توسط تهویه آزاد از ساعت 16 ظهر به بعد که دما ماکزیمم بوده، در حالات اول و سوم انجام شده است. با توجه به این نمودار، تهویه آزاد تا حدود 2.5 ساعت به خوبی برودت موردنیاز اتاق را فراهم کرده و در این مدت زمان به طور متوسط 1.2 کیلووات برودت به اتاق تزریق شده است.

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله تاثیرات دما و سرعت هوای ورودی به سیستم تهویه آزاد با ذخیره‌سازی برودت توسط یک شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

- در فرایند شارژ، وقتی هوا با دمای 19°C و سرعت 7 m/s وارد مبدل حرارتی می‌شود، انجماد کامل ماده‌ی تغییر فاز دهنده 4 ساعت به طول می‌انجامد.

- در فرایند تخلیه، در یک عدد رینولدز ثابت با افزایش 17 درصدی عدد استفان، مدت زمان ذوب 0.5 ساعت کاهش یافته و در یک عدد استفان ثابت با کاهش 25 درصدی عدد رینولدز، مدت زمان ذوب یک ساعت افزایش یافته است.

- در فرایند تخلیه، در کمترین عدد رینولدز یعنی 4660 و کمترین عدد استفان یعنی 0.075، بهترین حالت تهویه اتفاق می‌افتد. در این حالت، فرایند ذوب 5 ساعت به طول انجامیده به مدت 2.5 ساعت هوای مطلوب برای تهویه‌ی اتاق موجود هست. میزان هوادهی در این حالت 420 متر مکعب بر ساعت بوده که کافی می‌باشد. همچنین در این مدت زمان به طور متوسط 1.2 کیلووات برودت به اتاق تزریق شده است.

7- فهرست علائم

C	ثابت ناحیه حساس ($\text{kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$)
c_p	گرمای ویژه در فشار ثابت ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
g	شتاب جاذبه (ms^{-2})
h	آنتالپی محسوس (Jkg^{-1})