



# Numerical Simulation of a New Design of the Windcatcher Containing Encapsulated Phase Change Materials and Investigating the Effect of Different Parameters on its Thermal Performance

Ehsan Mehrabi Gohari<sup>1\*</sup>, Moslem Mohammadi Soleymani<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran.

## ARTICLE INFO

### Article Type:

Original Research

**Received:** 06.16.2023

**Revised:** 11.28.2023

**Accepted:** 12.31.2023

### Keyword:

Phase Change Material  
Windcatcher  
Thermal Performance  
Porosity  
Particle Encapsulation

### \*Corresponding Author:

Ehsan Mehrabi Gohari

Email: [e.mehrabi@pnu.ac.ir](mailto:e.mehrabi@pnu.ac.ir)

## ABSTRACT

Considering the importance of saving energy consumption, particularly for providing comfortable conditions in the hot months of the year, and also paying attention to the fact that the wind catcher alone is not able to cool the air, and phase change materials have a high capacity in storing thermal energy. In this research, a new design of windcatcher containing encapsulated phase change materials was studied and the effect of diameter and amount of phase change particles as well as porosity and type of phase change material on the thermal performance of the proposed model was investigated. Investigations were carried out for 7 different geometries and 3 different types of phase change materials in a three-dimensional and unsteady simulation. The results showed that the proposed design has a better thermal performance compared to the usual windcatcher. The reduced porosity and increased diameter of the capsule particles decreased the average outlet temperature and improved the thermal performance of the system. In addition, the results showed that the higher the amount of capsule phase change material in the windcatcher, the better its thermal performance although it also caused a drop in outlet pressure. Finally, the results of the investigation for the type of phase change material showed that the use of SP-28 combined phase change material compared to CaCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O salt hydrate and RT21HC paraffin increased the thermal efficiency by 5.88% and 8.82%, respectively due to its improved properties and temperature stability.



## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Considering the importance of saving energy consumption, particularly for providing comfortable conditions in the hot months of the year, and also paying attention to the fact that the windcatcher alone is not able to cool the air, and phase change materials have a high capacity in storing thermal energy. In this research, a new design of windcatcher containing encapsulated phase change materials was studied and the effect of diameter and amount of phase change particles as well as porosity and type of phase change material on the thermal performance of the proposed model was investigated.

### Methodology

In this research, a new design of a windcatcher containing encapsulated phase change materials for a residential unit located in Kerman was studied. Simulation was conducted for 7 different geometries and 3 different phase change materials. Figure 1 shows a schematic of the simulation.

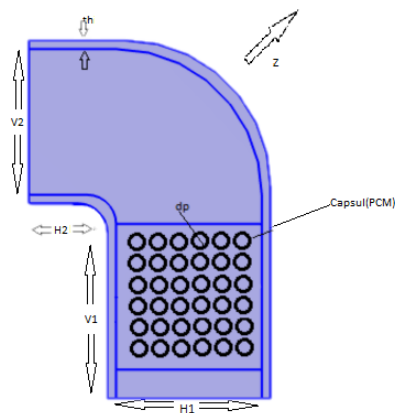


Figure 1. Schematic of the windcatcher under study.

A three-dimensional model in COMSOL software was presented in order to compile and formulate the heat transfer and fluid flow in the windcatcher under study. In this model, two series of momentum and energy equations are solved according to the physics of the problem. The momentum equation is solved in a steady state and the energy equation is solved in a non-steady state. And the accuracy of convergence for all cases is  $10^{-12}$ .

The assumptions included to derive the equations were as follows:

- 1- The thermophysical properties of solid and liquid phase change materials are assumed to be constant and not dependent on temperature.
- 2- During the phase change process, the volume change of the phase change material is insignificant.
- 3- The effect of natural displacement in liquid phase change materials is ignored.

According to the conditions of the problem, the flow field is considered to be turbulent. The standard  $\kappa$ - $\epsilon$  model was also used to model turbulence.

According to the climatic conditions of the studied area, the speed of the incoming wind flow to the windcatcher was equal to 3 m/s and the incoming air temperature was equal to the average temperature of the hot months of the year (i.e. 34 degrees Celsius). Moreover, by modelling the convection heat transfer in the walls, the convection heat transfer coefficient was considered equal to 5 W/(m<sup>2</sup>K).

## Results and Discussion

To validate the present study, the simulation results were compared with the experimental results of the research conducted by Barrientos et al.; the results have acceptable accuracy.

In this research, to compare the thermal performance of the designed windcatcher and common windcatcher, the windcatcher with and without phase change material was simulated. The results showed that temperature in the designed windcatcher decreased by 5 degrees Celsius, while in the common windcatcher, the temperature decrease does not exist.

Moreover, the effect of porosity on the thermal performance of the designed windcatcher was investigated. A windcatcher with three different geometries and porosity equal to 0.49, 0.25 and 0.75 was simulated. The findings demonstrate that temperature change where the porosity is equal to 0.25 occurred with a slower slope than other cases, so that after 3600 seconds, the average temperature was equal to 302 degrees Kelvin, showing a 4 degree decrease in average outlet temperature. However, with the increase in porosity equal to 0.49 and 0.75, an average temperature decrease of 3 and 2 degrees were observed, respectively. Therefore, reducing the porosity of the bed reduces the average temperature and improves the performance of the windcatcher.

One of the most important parameters in the thermal performance of the newly designed windcatcher was the diameter of the particles. For this purpose, the modelling of the windcatcher consisted of particles with diameters of 30 mm, 50 mm and 80 mm. The results showed that by increasing the diameter of the particles, it leads to an increase in the amount of phase change material and an increase in the contact surface between solid and fluid, so the thermal performance of the system is improved.

Another important parameter is volume occupied by the phase change material compared to the total volume of the windcatcher. For this purpose, modelling the case where the phase change material occupies all the space was compared with the reference case. The results illustrated that temperature in the windcatcher with a completely occupied phase change materials was 2 degrees Celsius lower than the reference state but it caused a pressure drop in output, which can be minimized by designing a suitable fan.

In this research, to investigate the effect of the type of phase change material on the thermal performance of the windcatcher, three types of phase change material from three different groups common in cooling and heating systems were selected. RT21HC (organic substances-paraffins) CaCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O (Inorganic - salt hydrate) and SP-28 (composite materials) were used in the modelling. The results showed that the use of SP-28 combined

phase change material compared to  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  salt hydrate and RT21HC paraffin increased the thermal efficiency by 5.88% and 8.82%, respectively due to its improved properties and temperature stability.

### **Conclusion**

In this research, a new design of windcatcher was studied. The results showed that the new design improved thermal performance of windcatchers. Furthermore, the investigations for the porosity of the phase change materials showed that the reduction of bed porosity leads to a decrease in the average temperature and the improvement of the windcatcher performance. In addition, increasing the amount of the phase change material improves thermal performance of windcatcher, although it causes a pressure drop in output, which can be minimized by designing a suitable fan. The simulation outputs for different diameters of particles showed that increasing the particle diameter improved the thermal performance of the system. Finally, the results of the investigation for the type of phase change material showed that the use of SP-28 combined phase change material compared to  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  salt hydrate and RT21HC paraffin increased the thermal efficiency by 5.88% and 8.82%, respectively due to its improved properties and temperature stability.

## شبیه‌سازی عددی طرحی نو از بادگیر مشتمل بر مواد تغییر فاز دهنده کپسوله و بررسی اثر پارامترهای مختلف بر عملکرد حرارتی آن

احسان مهرابی گوهری<sup>۱\*</sup>، مسلم محمدی سلیمانی<sup>۲</sup>

۱ و ۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

با توجه به اهمیت صرفه‌جویی در مصرف انرژی به‌ویژه برای تأمین شرایط آسایش در ماه‌های گرم سال و همچنین توجه به این نکته که بادگیر به‌تنهایی قادر به سرمایه‌های هوا نبوده و از طرفی مواد تغییر فاز دهنده ظرفیت بالایی در ذخیره‌سازی انرژی گرمایی را دارا هستند، در این پژوهش طرحی نو از بادگیر مشتمل بر مواد تغییر فاز دهنده کپسوله مورد مطالعه قرار گرفته و اثر قطر و میزان استفاده از ذرات کپسوله تغییر فاز دهنده و همچنین تخلخل و نوع ماده تغییر فاز دهنده بر عملکرد حرارتی مدل پیشنهادی بررسی شده است. بررسی‌ها برای ۷ هندسه متفاوت و ۳ نوع ماده تغییر فاز دهنده مختلف در حالت سه‌بعدی و غیر دائم انجام شده است. نتایج نشان داد که طرح پیشنهادی در مقایسه با بادگیرهای رایج عملکرد حرارتی بسیار مطلوب‌تری دارد همچنین کاهش تخلخل و افزایش قطر ذرات کپسوله، کاهش دمای میانگین خروجی و بهبود عملکرد حرارتی سیستم را به همراه دارد. علاوه بر این نتایج نشان داد هرچه میزان مواد تغییر فاز دهنده کپسوله در بادگیر بیشتر باشد عملکرد حرارتی آن مطلوب‌تر است. البته موجبات افت فشار خروجی را به همراه دارد. در نهایت نتایج بررسی برای نوع ماده تغییر فاز دهنده نشان داد که استفاده از ماده تغییر فاز دهنده ترکیبی SP-۲۸ به دلیل خواص بهبودیافته و ثبات دمایی ایجادشده، در مقایسه با هیدرات نمکی  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  و پارافین RT21HC به ترتیب ۵/۸۸٪ و ۸/۸۲٪ افزایش راندمان حرارتی مدل پیشنهادی را به همراه دارد.

### نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۶

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۰۷

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۱۰

### کلید واژگان:

ماده تغییر فاز دهنده  
بادگیر  
عملکرد حرارتی  
تخلخل  
ذرات کپسوله

\*نویسنده مسئول: احسان مهرابی گوهری

پست الکترونیکی:

[e.mehrabi@pnu.ac.ir](mailto:e.mehrabi@pnu.ac.ir)

## مقدمه

افزایش روزافزون مصرف انرژی فسیلی به‌عنوان منبعی را به اتمام و افزایش آلاینده‌های زیست محیطی، موجب افزایش توجه به راهکارهای کاهش مصرف انرژی و ذخیره‌سازی آن شده است (۱-۳). از این رو استفاده از سیستم‌های غیرفعال به‌ویژه در بخش تهویه طبیعی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. تهویه طبیعی راه کار غیرفعال است که با صرف هزینه‌ای کم بر اساس پتانسیل‌های دمایی و نرخ وزش باد منطقه‌ای برای بهبود آسایش حرارتی و کیفیت هوای داخل ساختمان استفاده می‌شود. در این راستا یکی از سیستم‌های غیرفعال انرژی، بادگیرها هستند که با استفاده از به‌کارگیری سیستم تهویه طبیعی در ساختمان، رسیدن به این مهم را امکان‌پذیر می‌نماید. لیکن عملکرد بادگیر و بهره‌مندی از تهویه طبیعی تابع دمای محیط است که این عامل سبب کاهش بهره‌مندی از بادگیر در طی ماه‌های گرم سال می‌شود. بنابراین یافتن راهکارهایی برای کاهش دمای محیط به دمای مطلوب دارای اهمیت می‌باشد. یکی از راهکارهای پیشنهادی جهت کاهش دما و افزایش کارایی بادگیرها استفاده از مواد تغییر فاز دهنده است. این مواد، ترکیبات آلی یا معدنی هستند که قابلیت جذب و ذخیره نهان مقادیر زیادی از انرژی گرمایی را درون خود دارند. ذخیره انرژی گرمایی در این مواد، در طی فرآیند تغییر فاز (تغییر حالت از جامد به مایع یا بالعکس) اتفاق می‌افتد. این مواد به هنگام تغییر فاز از جامد به مایع یا از مایع به جامد، این گرما را از محیط جذب نموده و یا به محیط پس می‌دهند. ماده تغییر فاز دهنده قابلیت آن را دارد که این انرژی نهفته گرمایی را بدون هیچ‌گونه تغییری حتی پس از هزاران چرخه تغییر فاز، درون خود حفظ نماید [۴]. با توجه به اهمیت تهویه طبیعی برای حفظ انرژی، کاهش انتشار آلاینده‌ها و بهبود آسایش حرارتی مطالعات متعددی توسط محققین انجام شده است، گئو<sup>۱</sup> و همکارانش با بیان اهمیت تهویه طبیعی، روشی برای مطالعه موردی و بهینه‌سازی تهویه طبیعی در ساختمان از طریق شبیه‌سازی عددی، از سه جنبه: برنامه‌ریزی سایت، شکل ساخت و پوسته ساختمان ارائه کردند [۵]. در همین راستا تأثیر چهار سیستم منفعل، از جمله: بام سبز، حوضچه سقفی، بادگیر و خانه زیرزمینی، بر صرفه‌جویی انرژی توسط گودرزی و مصطفایی‌پور، بررسی شد، نتایج تحقیق آنها نشان داد که بادگیرها کارآمدترین سیستم برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی و بام سبز، حوضچه سقفی و خانه‌های زیرزمینی رتبه‌های بعدی را به خود اختصاص داده‌اند [۶]. همچنین منتظری و همکاران ارزیابی دقیقی از تأثیر خروجی‌ها بر عملکرد تهویه یک واحد ساختمانی مجزا با استفاده از بادگیر را ارائه دادند. ارزیابی بر مبنای سه شاخص عملکردی تهویه: نرخ جریان هوای شامل شده، سن هوا و کارایی تغییر هوا مطرح شد. نتایج نشان داد ترکیبی از بادگیر و پنجره یکنواخت نسبت به استفاده از بادگیرهای دو طرفه که منجر به کمترین کیفیت هوا در محیط داخلی و بازده تغییر هوا می‌شوند، برتری ویژه‌ای دارند [۷]. در پژوهشی دیگر جمعه‌زاده و همکاران، تأثیر بادگیر بر کیفیت هوای داخل و آسایش حرارتی را مطالعه کردند. ایشان با بررسی عملکرد انواع بادگیرها، تأثیر آنها را بر نرخ جریان هوا، نرخ تعویض هوا، میزان کربن دی‌اکسید، تأثیر تعویض هوا و سن هوا مورد ارزیابی قرار دادند [۸]. نجات و همکاران نیز در پژوهشی با ارزیابی بادگیر دوطرفه جدید و بادگیرهای رایج، میزان تأثیر آنها بر تهویه طبیعی را در ساختمان مشخص کردند. در این پژوهش با استفاده از روش تجربی اندازه‌گیری در تونل باد و شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی، عملکرد سه بادگیر رایج با یک بادگیر دوطرفه مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت و به دست آمد که بادگیر دوطرفه ۵۳ درصد عملکرد تهویه‌ای بهتری در مقایسه بادگیرهای رایج داشته است [۹]. احمدی کیا و همکاران، یک مطالعه عددی جهت پیش‌بینی عملکرد دمایی و تهویه بادگیر مجهز به دو استخر آب در یزد انجام دادند. نتایج محاسباتی نشان داد که سیستم سرمایش تبخیری عملکرد بهتری در سرعت پایین باد نسبت به سرعت بالا دارد. همچنین یافت شد که عملکرد حرارتی بادگیر با افزایش میزان اسپری آب، افزایش رطوبت نسبی ۵٪ و کاهش دمای هوای داخلی ۴ درجه سلسیوس، به‌طور قابل توجهی بهبود یافته است [۱۰]. کلاتر، به ارزیابی تهویه و عملکرد حرارتی برج باد سنتی واقع در منطقه گرم و خشک یزد پرداخت، در این کار یک روش عددی

<sup>1</sup> Guo

برای شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل الگوی جریان هوا داخل برج باد با شرایط جریان ۳ بعدی و پایا توسعه داده شد. این مطالعه همچنین یک فن عددی برای شبیه‌سازی تأثیر استفاده از سیستم‌های خنک‌کننده تبخیری در عملکرد برج‌های باد ارائه داده است. نتایج نشان داد که ارتباط خوبی بین داده‌های شبیه‌سازی عددی و داده‌های تجربی برگرفته از نوشته‌ها وجود دارد. مشخص شد که برج بادگیر قادر به کاهش دمای ۱۰ تا ۱۵ کلون بوده است [۱۱]. صفاری و حسینیان، از روش عددی و تحلیلی جهت بررسی عملکرد حرارتی طرح‌های جدید برج باد تحت پارامترهای مختلف ساختاری و شرایط خارجی استفاده کردند. طرح جدید برج باد به پرده مرطوب آویزان شده از داخل ستون دستگاه خنک‌کننده مجهز شده بود که قطرات آب با سرعت بسیار پایینی به آن تزریق می‌شدند. نتایج عددی به دست آمده نشان داد که ستون‌های مرطوب با ارتفاع ۱۰ متر قادر به کاهش دمای ۱۲ کلون و افزایش ۲۲٪ رطوبت نسبی خواهد بود [۱۲]. شعرا و همکاران با استفاده از روش عددی تأثیر ماهیت و نوع مصالح بر تغییرات روزانه‌ی متوسط دمای جداره‌های ساختمان را مورد مطالعه قرار دادند [۱۳]. از سوی دیگر یکی از روش‌های افزایش کارایی تهویه طبیعی استفاده از مواد تغییر فاز دهنده است. در این راستا هو و هیزلبرگ<sup>۱</sup> به کاربرد مواد تغییر فاز دهنده جهت استفاده از خاصیت حرارتی آنها در تهویه ساختمان‌ها پرداخته‌اند؛ به نحوی که در تابستان، با تبدیل از حالت جامد به مایع حرارت را از محیط می‌گیرد و باعث خنک‌سازی هوای عبوری می‌شود و در شب هم با تبدیل شدن از حالت جامد به مایع با گرفتن سرمای محیط باعث گرم شدن هوای عبوری می‌شود [۱۴]. سینکا<sup>۲</sup> و همکاران نیز در ارزیابی تجربی مواد تغییر فاز دهنده را در شرایط تابستان گرم به منظور استفاده از موادی سبک وزن با جرم حرارتی مناسب برای کاهش دمای داخل مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در سقف ساختمان‌ها، دمای هوای اتاق، ۰ تا ۲ درجه سانتیگراد کاهش می‌یابد [۱۵]. لیزانا<sup>۳</sup> و همکاران در پژوهشی به مطالعه سرمایه‌گذاری غیرفعال در ساختمان با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده پرداختند. این پژوهش با نرم‌افزار ترنسپس به صورت پارامتریک، معیارهای تأثیرگذار و مهم در اجرای بهینه مواد تغییر فاز دهنده به منظور کاهش انرژی سرمایشی ساختمان شبیه‌سازی کرده است. نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهد که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده بدون استفاده از سیستم تهویه سبب کاهش ۶۵ درصد شرایط عدم آسایش حرارتی می‌شود [۱۶]. پرویز و همکاران اثر ترکیبی کندانسور و مواد تغییر فاز دهنده در عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی حوضچه تک شیب را به صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج پژوهش آنها افزایش ۱۷ درصدی بهره‌وری در روز برای آب شیرین‌کن پیشنهادی در مقایسه با آب شیرین‌کن معمولی را نشان می‌دهد [۱۷]. سیدآبادی و همکاران نیز در پژوهشی، بادگیر با جدارهایی از جنس مواد تغییر فاز دهنده را با استفاده از روش عددی شبیه‌سازی کردند و نشان دادند که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده باعث بهبود عملکرد سیستم می‌گردد [۱۸]. در این تحقیق در ابتدا برای نخستین بار طرحی نو از بادگیر مشتمل بر ذرات کپسوله از مواد تغییر فاز دهنده به صورت سه‌بعدی و غیر دائم شبیه‌سازی شده و نتایج با نتایج تجربی صحت سنجی شده است. در ادامه اثر قطر و میزان ذرات کپسوله و همچنین تخلخل و نوع ماده تغییر فاز دهنده بر عملکرد حرارتی مدل پیشنهادی بررسی شده است.

### شرح مسأله

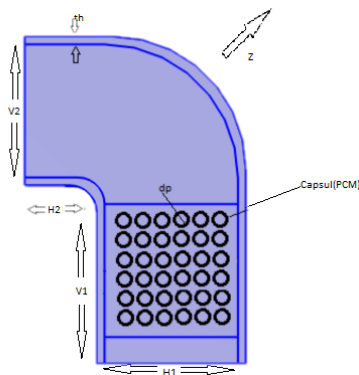
با توجه به اهمیت صرفه‌جویی در مصرف انرژی و توجه به این نکته که بادگیر به تنهایی قادر به سرمایه‌گذاری هوا نبوده و همچنین ظرفیت بالای مواد تغییر فاز دهنده در ذخیره‌سازی انرژی گرمایی در این پژوهش طرح جدیدی از بادگیر حاوی مواد تغییر فاز دهنده کپسوله برای یک واحد مسکونی واقع در شهر کرمان مورد مطالعه قرار گرفته است. شبیه‌سازی برای ۷ هندسه متفاوت از بادگیر مشتمل بر مواد کپسوله مختلف انجام شده است. شکل ۱ شماتیکی از بادگیر شبیه‌سازی

<sup>1</sup> Hu & Heiselberg

<sup>2</sup> Sinka

<sup>3</sup> Lizana

شده را نشان می‌دهد سایر جزئیات و ابعاد مدل‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین در این تحقیق به منظور بررسی اثر مواد تغییر فاز دهنده کپسوله بر عملکرد حرارتی بادگیر نوین شبیه‌سازی شده سه نوع ماده تغییر فاز دهنده مختلف مورد استفاده قرار گرفته است که خواص ترموفیزیکی آنها در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱. شماتیک طرح پیشنهادی بادگیر مورد مطالعه.

جدول ۱. مشخصات هندسی مدل‌های مورد مطالعه.

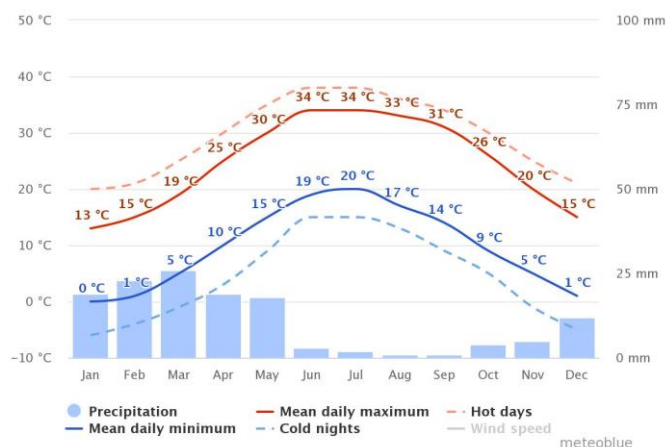
مشخصه هندسی	اندازه (m)
خروجی H1	۰.۵
ارتفاع بادگیر V1	۰.۷
طول دهانه ورودی H2	۰.۳
قطر ذرات dp	۰.۰۳, ۰.۰۵۵, ۰.۰۸
ضخامت جدارها Th	۰.۰۳
عرض بادگیر Z	۰.۵

جدول ۲. خواص ترموفیزیکی مواد استفاده شده در این مطالعه.

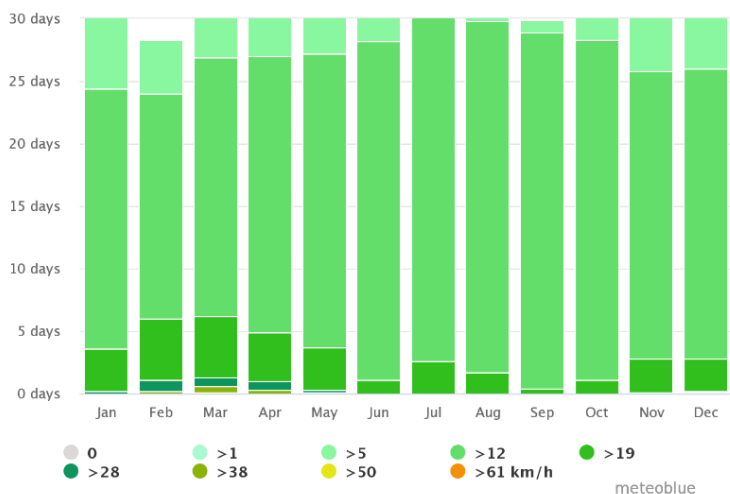
نوع ماده	دمای ذوب	گرمای نهان ذوب kJ/kg	گرمای ویژه J/kg°C	چگالی kg/m <sup>۳</sup>	رسانایی گرمایی W/m°C
CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	۲۹	۱۹۲	۱۴۳۰-۱۴۳۰	۱۵۳۰-۱۶۳۴	۰.۵۴-۱.۰۹
RT21HC	۲۱	۱۹۰	۲۳۸۴-۱۸۵۰	۷۷۰-۸۸۰	۰.۲-۰.۲
Sp-28	۲۸	۲۶۰	۲۰۰۰-۲۰۰۰	۱۲۰۰-۱۳۰۰	۰.۶-۰.۶
هوا	—	—	۱.۰۰۶۴	۱.۱۶۴۴	۰.۰۲۶۴
آجر	—	—	۸۰۰	۱۷۰۰	۰.۷۲

شهر کرمان دارای عرض جغرافیایی ۳۰/۲۸ درجه، طول جغرافیایی ۵۷/۰۸ درجه می‌باشد. شکل ۲ تغییرات دمایی، میانگین دماهای گرم و سرد و همچنین میزان بارندگی در ماه‌های مختلف سال برای شهر کرمان را نشان می‌دهد. علاوه

بر این نمودار تغییرات سرعت باد در ماه‌های مختلف سال شهر کرمان در شکل ۳ نشان داده شده است. در این نمودار میزان تغییرات سرعت باد در ماه‌های مختلف سال برحسب کیلومتر بر ساعت از صفر تا بیش از ۶۱ km/h ارائه شده است.



شکل ۲. تغییرات دمایی، میانگین دماهای گرم و سرد و میزان بارندگی در ماه‌های مختلف سال برای شهر کرمان [۱۹].



شکل ۳. تغییرات سرعت باد در ماه‌های مختلف سال برای شهر کرمان [۱۹].

با توجه به شکل‌ها، میانگین ماکزیمم دما در ماه‌های گرم سال در شهر کرمان ۳۴ درجه سلسیوس می‌باشد و میزان سرعت باد در این ماه‌ها بین ۵ الی ۱۹ کیلومتر بر ساعت اندازه‌گیری شده است. با توجه به این مقادیر می‌توان شرایط ورودی برای مساله را مشخص کرد.

## روش حل و معادلات حاکم

در این مطالعه، یک مدل سه بعدی در نرم افزار کامسول، به منظور تدوین و فرمول بندی انتقال حرارت و جریان سیال در بادگیر مشتمل بر مواد تغییر فاز دهنده کپسوله ارائه شده است. با استفاده از این مدل می توان بادگیر را به عنوان یک محیط متخلخل همگن، متشکل از کپسول های کروی در نظر گرفت. در این مدل سازی معادلات ممتموم و انرژی با توجه به فیزیک مسأله حل می شوند. معادله ممتموم در حالتی دائم و معادله انرژی در حالتی غیر دائم حل می گردند و به منظور افزایش دقت محاسبات، دقت همگرایی  $10^{-12}$  در نظر گرفته شده است. شکل ۴ نمودار همگرایی سرعت و فشار و متغیرهای جریان مغشوش برای شبیه سازی انجام شده در حالت دائم و شکل ۵ نمودار همگرایی حل غیر دائم را نشان می دهد، همچنین فرضیات لحاظ شده برای استخراج معادلات عبارت اند از:

- ۱- خواص ترموفیزیکی مواد تغییر فاز دهنده جامد و مایع ثابت فرض شده اند و وابسته به دما نیستند.
  - ۲- در طی فرآیند تغییر فاز، تغییر حجم ماده تغییر فاز دهنده ناچیز می باشد.
  - ۳- از تأثیر جابه جایی طبیعی در مواد تغییر فاز دهنده مایع صرف نظر شده است.
  - ۴- تحلیل جریان سیال در مساله مورد مطالعه دارای دو بخش می باشد. یک بخش که فقط شامل هوا به عنوان سیال بوده و بخش دیگر محیط متخلخل (ترکیبی از هوا و ذرات جامد) که در بخش اول از معادلات ناویراستوکس و در بخش دوم از معادله برینکمن برای توصیف جریان استفاده می شود.
- میدان سرعت برای ناحیه هوا با استفاده از روابط ۱ تا ۳ و برای ناحیه متخلخل با استفاده از روابط ۴ تا ۶ محاسبه می شود [۲۰؛ ۲۱].

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F} + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

$$\mathbf{K} = (\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \quad (3)$$

$$\frac{1}{\varepsilon_p} \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \frac{1}{\varepsilon_p} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}] - \left( \mu k^{-1} + \beta \rho |\mathbf{u}| + \frac{Q_m}{\varepsilon_p^2} \right) \mathbf{u} + \mathbf{F} + \rho \mathbf{g} \quad (4)$$

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = Q_m \quad (5)$$

$$\mathbf{K} = \frac{1}{\varepsilon_p} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \frac{1}{\varepsilon_p} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \quad (6)$$

با توجه به شرایط حاکم بر مسأله، میدان جریان در این مسأله به صورت آشفتنه در نظر گرفته شده است. برای مدل کردن آشفتگی نیز از مدل K-ε استاندارد استفاده شده است. معادلات ۷ و ۸ روابط حاکم بر این مدل برای ناحیه هوا و معادلات ۹ و ۱۰ روابط حاکم برای ناحیه متخلخل را نشان می دهد [۲۰؛ ۲۱].

معادله انرژی جنبشی آشفتگی K برای ناحیه هوا:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) k = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + p_k - \rho \varepsilon \quad (7)$$

برای ناحیه هوا  $\epsilon$  معادله نرخ پراکندگی:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\epsilon = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + c_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} p_k - c_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \quad \epsilon = \epsilon p \quad (8)$$

معادله‌ی انرژی جنبشی آشفتگی  $K$  برای ناحیه متخلخل:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \frac{k}{\epsilon_p} = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + p_k + p_{k,porous} - \rho \epsilon \quad (9)$$

معادله‌ی انرژی جنبشی آشفتگی  $K$  برای ناحیه متخلخل:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \frac{\epsilon}{\epsilon_p} = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + c_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} p_k + p_{\epsilon,porous} - c_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \quad \epsilon = \epsilon p \quad (10)$$

در روابط فوق مقادیر  $\mu_T$ ،  $p_k$ ،  $p_{k,porous}$  و  $p_{\epsilon,porous}$  از روابط ۱۱ تا ۱۵ محاسبه می‌شوند [۲۰؛ ۲۱].

$$\mu_T = \rho c_\mu \frac{k^2}{\epsilon \epsilon_p} \quad (11)$$

$$p_k = \frac{1}{\epsilon_p} \mu_T [\nabla \mathbf{u} : (\nabla \mathbf{u})^T] \quad (12)$$

$$p_{k,porous} = \rho \beta |\mathbf{u}|^3 \quad (13)$$

$$p_{\epsilon,porous} = c_{\epsilon 2} \frac{\rho C_{stpm} |\mathbf{u}|}{l_{pore} \epsilon_p} \epsilon \quad (14)$$

$$l_{pore} = \sqrt{k/\epsilon_p} \quad (15)$$

مسأله مورد مطالعه از منظر انرژی نیز، به بخش سیال و بخش محیط متخلخل تقسیم‌بندی می‌شود رابطه ۱۶ معادله انرژی برای ناحیه‌ای که تنها شامل هوا است و روابط ۱۸ تا ۲۴ معادله انرژی مورد استفاده برای محیط متخلخل را ارائه می‌نمایند [۲۰؛ ۲۱].

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_{vd}, \quad Q_{vd} = \tau : \nabla \mathbf{u} \quad (16)$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T \quad (17)$$

$$\epsilon_p \rho_f c_{p,f} \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f c_{p,f} \mathbf{u} \cdot \nabla T_f + \nabla \cdot \mathbf{q}_f = Q_{s,f} + \epsilon_p Q_f + \epsilon_p Q_{vd} \quad (18)$$

$$\mathbf{q}_f = -\epsilon_p k_f \nabla T_f \quad (19)$$

$$\theta_s \rho_s c_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q}_s = -Q_{s,f} + \theta_s Q_s \quad (20)$$

$$\mathbf{q}_s = -\theta_s k_s \nabla T_s \quad (21)$$

$$Q_{s,f} = s_b h_{sf} (T_s - T_f) \quad (22)$$

$$s_b = \frac{6\theta_s}{d_{pe}} \quad (23)$$

$$h_{sf} = [d_{pe} (\frac{1}{k_f Nu} + \frac{1}{10k_s})]^{-1} \quad (24)$$

در این روابط  $\rho_s$ ،  $\rho_f$ ،  $c_{p,s}$ ،  $c_{p,f}$  به ترتیب چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه ذرات جامد و سیال و  $d_{pe}$ ،  $\theta_s$  به ترتیب کسر حجمی جامد، قطر ذرات و تخلخل می‌باشند. در رابطه ۲۴،  $Nu$  عدد ناسلت می‌باشد که مقدار آن از رابطه ۲۵ به دست می‌آید:

$$Nu = 2.0 + 1.1pr^{1/3} Re_p^{0.6} \quad (25)$$

همچنین عدد رینولدز ذرات جامد و عدد پراتل از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$Re_p = \frac{d_{pe} \rho_f \|\mathbf{u}\|}{\mu} \quad (26)$$

$$pr = \frac{\mu c_{p,f}}{k_f} \quad (27)$$

توزیع دما در ذرات کروی با استفاده از رابطه ۲۰ و استفاده از تابع تغییر فاز دهنده  $\alpha$  محاسبه می‌شود این روش بیان می‌کند که تغییر فاز در محدوده  $(T_m + \Delta T_m / 2)$  تا  $(T_m - \Delta T_m / 2)$  رخ می‌دهد. تا زمانی که دما کمتر از  $(T_m - \Delta T_m)$  باشد مقدار  $\alpha$  برابر صفر و زمانی که دما بیشتر از  $(T_m + \Delta T_m / 2)$  مقدار  $\alpha$  برابر ۱ می‌باشد. در زمان تغییر فاز مقادیر ضریب انتقال حرارت هدایتی، چگالی و ظرفیت گرمایی تغییر می‌کنند. روابط ۲۸ تا ۳۲ نحوه این تغییرات را نشان می‌دهد [۲۲].

$$\theta_1 = 1 - \alpha \quad (28)$$

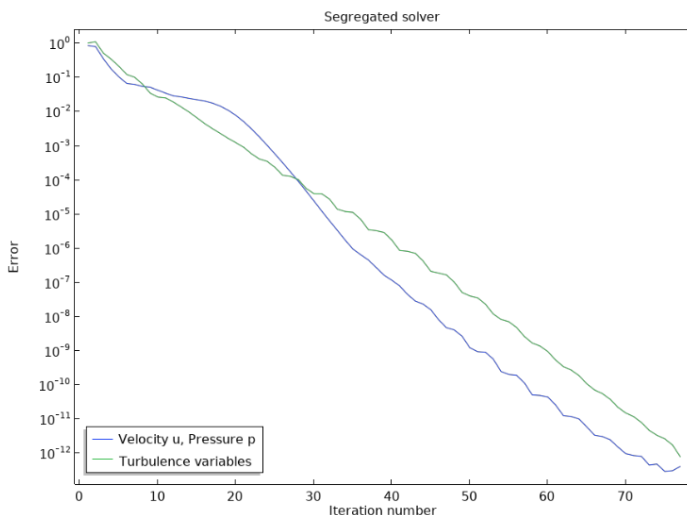
$$\rho = \theta_1 \rho_{\text{phase1}} + (1 - \theta_1) \rho_{\text{phase2}} \quad (29)$$

$$c_{p,s} = \frac{1}{\rho} (\theta_1 \rho_{\text{phase1}} C_{p\text{phase1}} + (1 - \theta_1) \rho_{\text{phase2}} C_{p\text{phase2}}) + L \frac{\partial \alpha_m}{\partial T} \quad (30)$$

$$K_s = \theta_1 K_{\text{phase1}} + (1 - \theta_1) K_{\text{phase2}} \quad (31)$$

$$\alpha_m = \frac{(1 - \theta_1) \rho_{\text{phase2}} - \theta_1 \rho_{\text{phase1}}}{2(\theta_1 \rho_{\text{phase1}} + (1 - \theta_1) \rho_{\text{phase2}})} \quad (32)$$

که در این روابط  $L$  گرمای نهان و  $\rho_{\text{phase1}}$ ،  $C_{p\text{phase1}}$  و  $K_{\text{phase1}}$  به ترتیب ضریب انتقال حرارت هدایتی، چگالی و ظرفیت گرمایی ماده تغییر فاز دهنده فاز جامد و  $\rho_{\text{phase2}}$ ،  $C_{p\text{phase2}}$  و  $K_{\text{phase2}}$  به ترتیب ضریب انتقال حرارت هدایتی، چگالی و ظرفیت گرمایی ماده تغییر فاز دهنده فاز مایع می‌باشند. با استفاده از معادلات ۱ تا ۳۲ عملکرد حرارتی بادگیر مشتمل بر سه نوع مواد تغییر فاز دهنده کپسوله و تأثیر محل قرارگیری، قطر ذرات و تخلخل بر آن محاسبه شده است.



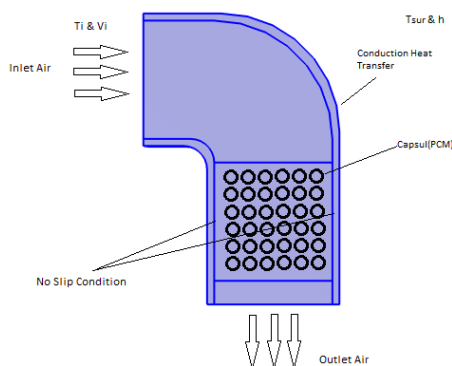
شکل ۴. نمودار همگرایی سرعت و فشار و متغیرهای جریان مغشوش برای شبیه‌سازی انجام شده.



شکل ۵. نمودار همگرایی حل غیر دائم برای شبیه‌سازی انجام شده.

### شرایط مرزی

با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه مورد مطالعه و با توجه به شکل‌های ۲ و ۳ سرعت جریان باد ورودی به بادگیر برابر با ۳ متر بر ثانیه و دمای هوای ورودی برابر با میانگین دمای هوای ماه‌های گرم سال یعنی ۳۴ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. همچنین با مدل‌سازی انتقال حرارت جابجایی در جدارها، ضریب انتقال حرارت جابجایی برابر با  $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  در نظر گرفته شده است. شکل ۶ شماتیکی از شرایط مرزی در مدل مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



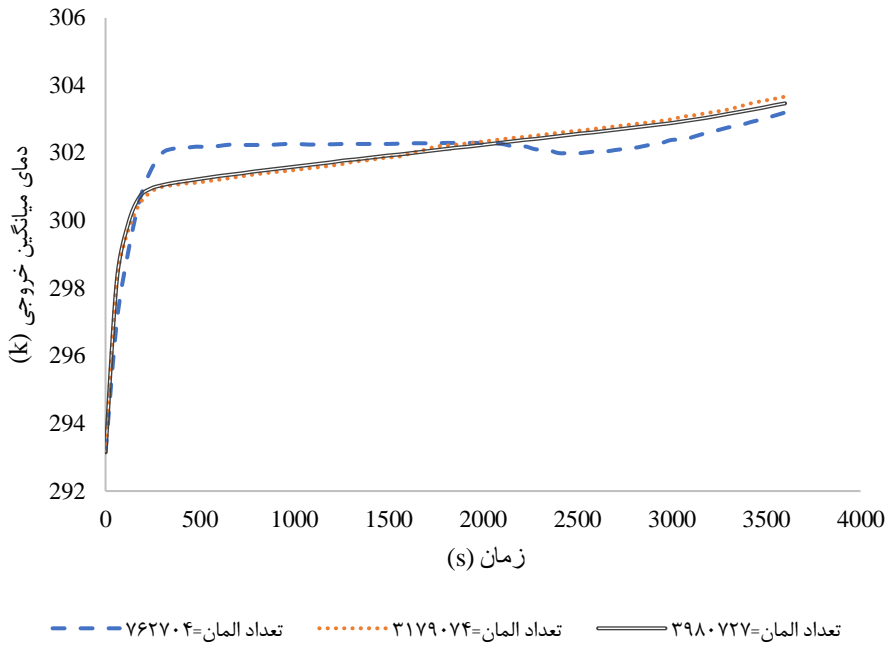
شکل ۶. شماتیک شرایط مرزی حاکم بر مسأله.

### نتایج

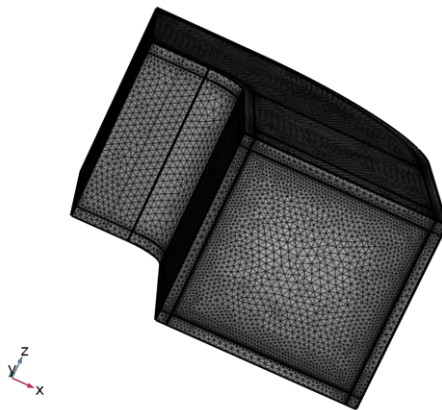
#### استقلال از شبکه

برای بررسی استقلال مدل عددی ارائه شده از شبکه محاسباتی و برای حصول اطمینان از تغییرات ناچیز کمیت ارزیابی شده با ریز کردن شبکه محاسباتی، بادگیر با ماده تغییر فاز دهنده  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  و میزان تخلخل ۰/۴۹ و قطر

ذرات ۰/۵۵ میلی‌متر با سه نوع شبکه‌بندی به ترتیب برابر با ۷۶۲۷۰۴، ۳۱۷۹۰۷۴ و ۳۹۸۰۷۲۷ تعداد المان شبیه‌سازی و نتایج در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اختلاف بین حالت ۲ و ۳ بسیار ناچیز می‌باشد. بنابراین شبکه‌بندی نوع دوم جهت کاهش هزینه‌های محاسباتی در مدل‌سازی عددی در نظر گرفته شده است. شکل ۸ شبکه‌بندی استفاده شده جهت مدل‌سازی در این پژوهش را نشان می‌دهد.



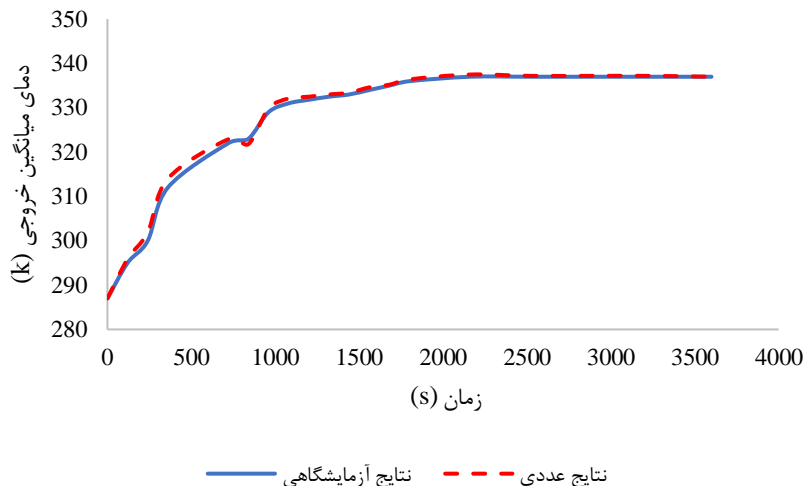
شکل ۷. نمودار تغییرات دمای میانگین خروجی مدل شبیه‌سازی شده برای تعداد گره‌های مختلف به منظور بررسی استقلال از شبکه.



شکل ۸. شبکه استفاده شده جهت مدل‌سازی در این پژوهش.

## اعتبار سنجی

به منظور اعتبارسنجی مطالعه حاضر، نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی تحقیق انجام شده توسط ایزکویردو-بارینتوس<sup>۱</sup> و همکاران [۲۳] مقایسه شده است، آنها آزمایش خود را روی بستر ثابت شامل مواد تغییر فاز دهنده با تخلخل ۰/۴۶۸ و قطر ذرات میانگین ۱/۶۴ و هوا به عنوان سیال انتقال حرارت انجام دادند. شکل ۹ نمودار تغییرات دمای میانگین خروجی مدل شبیه‌سازی شده و مدل تجربی نسبت به زمان را نشان می‌دهد همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج از دقت قابل قبولی برخوردار است و اختلاف اندک نتایج به دلیل این است که در حالت واقعی امکان عایق صدرصدی وجود ندارد و همچنین ضریب انتقال حرارت جابجایی در شبیه‌سازی و مدل واقعی متفاوت می‌باشد.



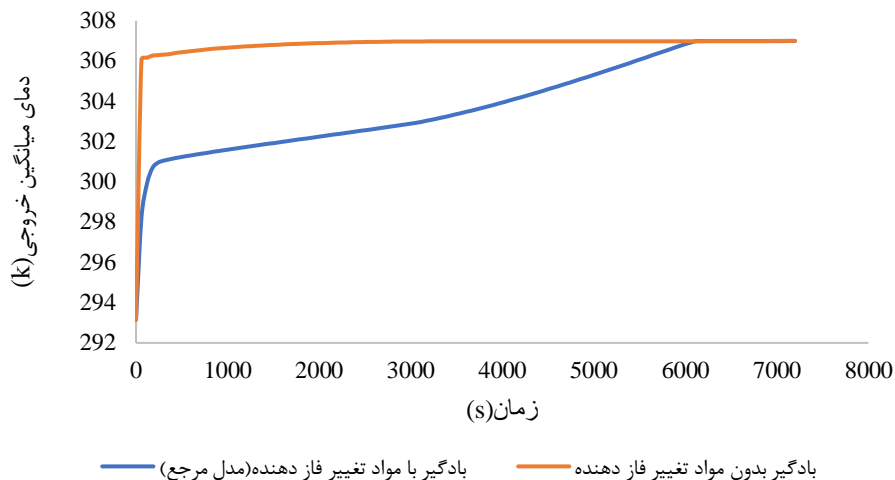
شکل ۹. نمودار تغییرات دمای میانگین خروجی مدل شبیه‌سازی شده و مدل تجربی نسبت به زمان.

## مقایسه بادگیر پیشنهادی مشتمل بر مواد تغییر فاز دهنده با بادگیرهای رایج

در این پژوهش به منظور مقایسه عملکرد حرارتی بادگیر مشتمل بر مواد تغییر فاز دهنده و بادگیرهای رایج، بادگیر با دو حالت بدون در نظر گرفتن مواد تغییر فاز دهنده کپسوله و بادگیر مشتمل بر ماده تغییر فاز دهنده  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (طرح پیشنهادی) شبیه‌سازی شده و اثر تغییرات دمای میانگین خروجی بادگیر برحسب زمان برای دو حالت مختلف مقایسه شده است.

شکل ۱۰ نمودار تغییرات دمای میانگین برحسب زمان برای دو حالت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بادگیر شامل مواد تغییر فاز دهنده کپسوله کاهش دما به میزان ۵ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد در حالی که در حالت بدون ماده تغییر فاز، کاهش دمایی وجود ندارد و هوا با همان دمای ۳۴ درجه سانتی‌گراد بادگیر را ترک می‌کند. بنابراین کاملاً روشن است که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده می‌تواند تأثیر قابل توجهی در سیستم بادگیر و عملکرد حرارتی آن داشته‌باشد.

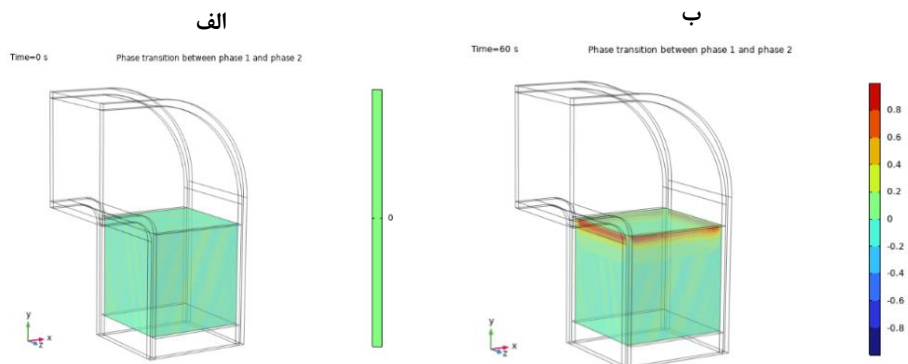
<sup>1</sup> Izquierdo-Barrientos

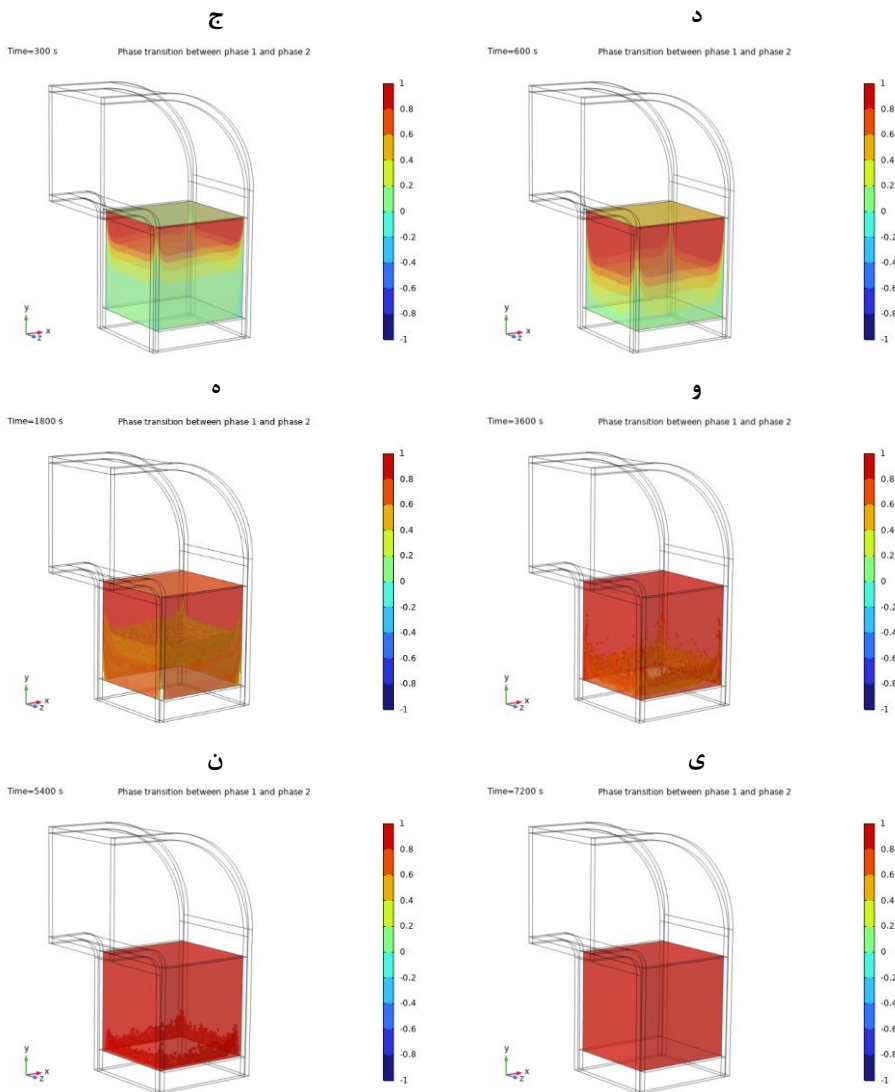


شکل ۱۰. تغییرات دمای میانگین نسبت به زمان برای دو حالت مشتعل بر ماده تغییر فاز دهنده و بدون ماده تغییر فاز دهنده.

### میزان ذوب ماده تغییر فاز دهنده در طول زمان

شکل ۱۱ میزان ذوب ماده تغییر فاز دهنده  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  در طول زمان در بادگیر با تخلخل  $0.49$  و قطر ذرات برابر با  $0.55$  میلی‌متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ابتدا ماده تغییر فاز دهنده در فاز جامد (شکل ۱۱ - الف) قرار دارد و با گذشت زمان  $60$  ثانیه فرآیند تغییر فاز قابل مشاهده است (شکل ۱۱ - ب) و بعد از گذشت  $3600$  ثانیه بخش زیادی از ماده تغییر فاز دهنده ذوب شده است و سرانجام بعد از گذشت زمان  $7200$  ثانیه (شکل ۱۱ - ج) ماده تغییر فاز دهنده به‌طور کامل ذوب می‌شود.



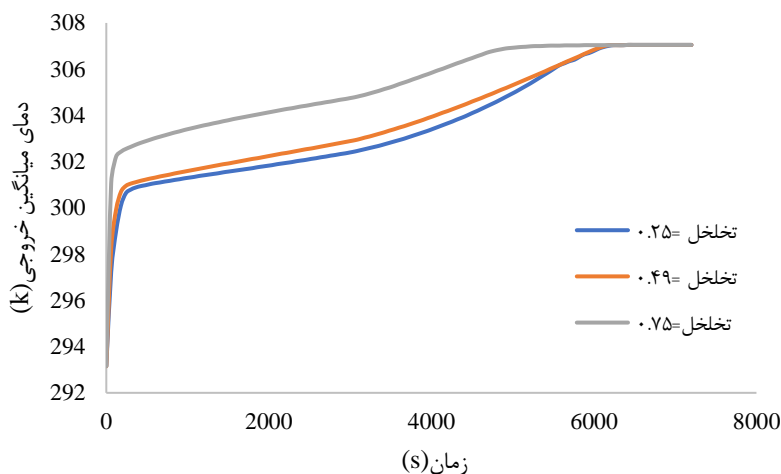


شکل ۱۱. تغییرات فاز در طول زمان، ماده تغییر فاز دهنده  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ .

### بررسی اثر تخلخل

میزان تخلخل به صورت نسبت حجم اشغال شده توسط هوا به حجم کل مجرای جریان (بادگیر) تعریف می‌شود. در این پژوهش به منظور بررسی اثر تخلخل بر عملکرد حرارتی بادگیر طراحی شده، بادگیر با سه هندسه متفاوت و تخلخل برابر با ۰/۴۹ و ۰/۲۵ و ۰/۱۷۵ و ماده تغییر فاز دهنده  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  شبیه‌سازی شده است. لازم به ذکر است با توجه به ثابت بودن حجم محفظه شامل مواد تغییر فاز دهنده در هر سه مدل شبیه‌سازی شده و تعریف تخلخل، حجم و در نتیجه جرم ذرات جامد یکسان نبوده و در حالت تخلخل ۰/۲۵ دارای بیشترین مقدار می‌باشند. شکل ۱۲

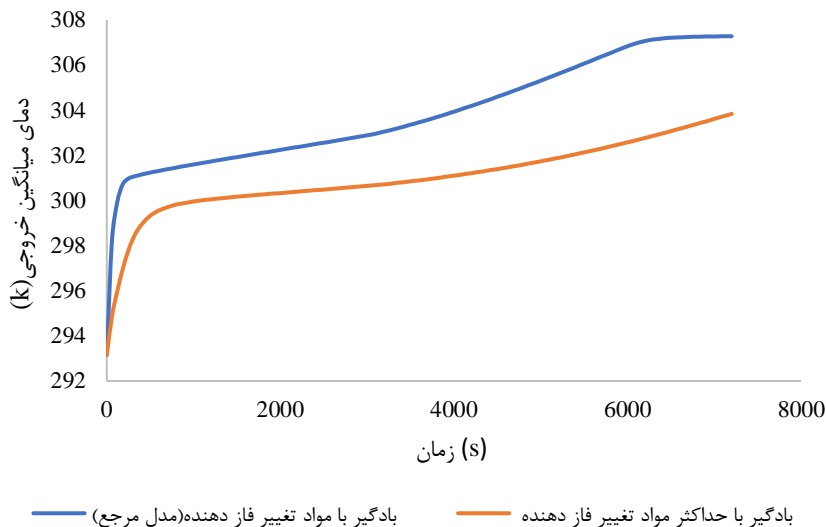
نمودار تغییرات دمای میانگین خروجی از بادگیر نسبت به زمان را نشان می‌دهد همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر سه حالت مختلف بعد از گذشت حدوداً ۶۰۰۰ ثانیه ماده تغییر فاز دهنده به‌طور کامل ذوب می‌شود و دمای میانگین خروجی به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد اما تغییرات در حالتی که تخلخل برابر ۰/۲۵ می‌باشد، با شیب کندتری از سایر حالات روی می‌دهد. به‌نحوی که بعد از گذشت ۳۶۰۰ ثانیه دمای میانگین برابر ۳۰۲ درجه کلونین می‌باشد که ۴ درجه کاهش دما را به همراه دارد درحالی‌که با افزایش تخلخل به ۰/۴۹ و ۰/۷۵ دمای میانگین خروجی بادگیر به ترتیب ۳ و ۲ درجه کاهش دما را بعد از گذشت همین زمان نشان می‌دهد. بنابراین کاهش تخلخل بستر موجب کاهش دمای میانگین و بهبود عملکرد بادگیر می‌گردد. دلیل این پدیده این است که با کاهش تخلخل، میزان ماده تغییر فاز دهنده در حجم ثابت افزایش یافته است.



شکل ۱۲. نمودار تغییرات دمای میانگین خروجی بادگیر نسبت به زمان برای بادگیر با میزان تخلخل مختلف.

### ارتفاع ذرات، میزان فضای اشغال شده

یکی دیگر از پارامترهای مهم در عملکرد حرارتی بادگیر نوین طراحی شده، حجم فضای اشغال شده توسط ماده تغییر فاز دهنده در مقایسه با حجم کل بادگیر می‌باشد. برای این منظور در این بخش مدل‌سازی برای حالتی که مواد تغییر فاز دهنده همه فضا را اشغال کرده‌اند باحالتی که مواد تغییر فاز دهنده بخش عمودی بادگیر را اشغال کرده‌اند (طرح پیشنهادی شبه‌سازی شده در بخش ۳-۴ که در این مقاله به عنوان مدل مرجع در نظر گرفته شده است) مقایسه شده است. شکل ۱۳ نمودار تغییرات دمای میانگین خروجی بادگیر نسبت به زمان برای دو حالت بادگیر مرجع و بادگیر با فضای کاملاً اشغال شده با مواد تغییر فاز دهنده را نشان می‌دهد همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت بادگیر با فضای کاملاً اشغال شده با مواد تغییر فاز دهنده، دما در مدت‌زمان یکسان حدود ۲ درجه سانتی‌گراد کمتر از حالت مرجع است و برخلاف حالت مرجع بعد از گذشت ۷۲۰۰ ثانیه کاملاً دیس شارژ نمی‌شود در این حالت دمای خروجی بادگیر ۳۰۳/۸۴ درجه کلونین است که بیش از ۲ درجه خنک‌تر از دمای هوای خارج می‌باشد. دلیل این پدیده این است که با افزایش مواد تغییر فاز دهنده در بادگیر هوای ورودی در حجم بزرگتری در تماس با مواد تغییر فاز دهنده قرار گرفته و میزان انتقال گرما به مواد تغییر فاز دهنده و ذوب آنها افزایش می‌یابد بنابراین کاهش دمای هوا را به همراه دارد.



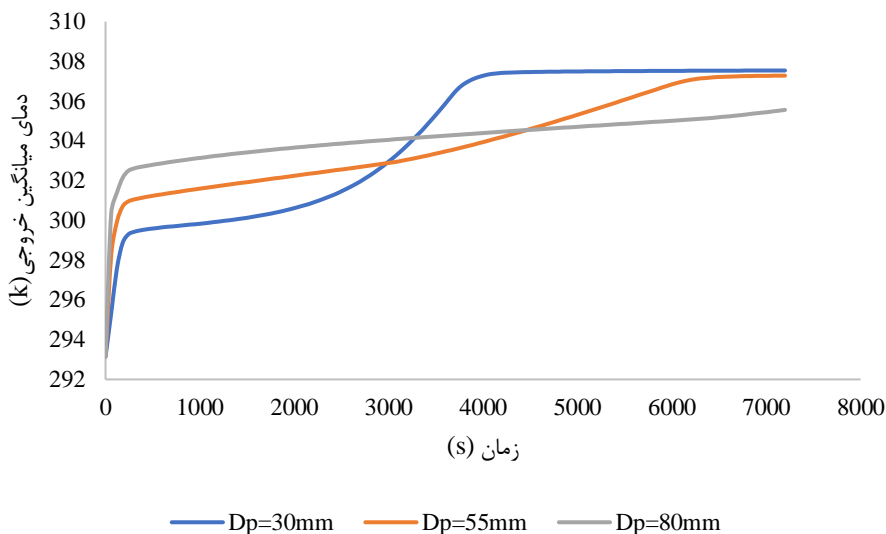
شکل ۱۳. نمودار تغییرات دمای میانگین خروجی بادگیر نسبت به زمان برای بادگیرهایی با ذرات کپسوله با ارتفاع‌های مختلف.

از طرفی وجود کپسول‌های مواد تغییر فاز دهنده به عنوان موانعی در مقابل جریان هوا هستند و باعث افت فشار در سیستم می‌گردند بنابراین در ادامه با فرض سرعت ورودی هوا ثابت برابر با ۳ متر بر ثانیه، افت فشار برای مدل مرجع (طرح پیشنهادی شبیه‌سازی شده در بخش ۳-۴ که در این مقاله به عنوان مدل مرجع در نظر گرفته شده است) و حالت کاملاً پر شده با مواد تغییر فاز دهنده کپسوله محاسبه شده است و مقادیر آن به ترتیب برابر با  $754/66$  و  $1588/89$  به دست آمد بر اساس نتایج به دست آمده افت فشار برای حالتی که مواد تغییر فاز دهنده همه فضا را اشغال کرده‌اند بسیار بیشتر از حالت مرجع می‌باشد که البته می‌توان با طراحی فن مناسب تأثیر این افت فشار را به حداقل رساند.

### بررسی اثر قطر ذرات

یکی از پارامترهای مهم در عملکرد حرارتی بادگیر نوین طراحی شده قطر ذرات کپسوله می‌باشد. برای این منظور مدل‌سازی بادگیر مشتمل بر ذرات تغییر فاز دهنده با قطرهای ۳۰ میلی‌متر، ۵۰ میلی‌متر و ۸۰ میلی‌متر و در نظر گرفتن  $CaCl_2 \cdot 6H_2O$  به عنوان ماده تغییر فاز دهنده و ثابت نگه‌داشتن حجم اشغال شده توسط هوا نسبت به حجم کل انجام شده است. سایر پارامترها نیز به منظور مقایسه ثابت نگه‌داشته شده است. لازم به ذکر است با توجه به ثابت بودن حجم کل و نوع ماده تغییر فاز دهنده در هر سه مدل شبیه‌سازی شده جرم ذرات جامد در هر سه مدل مورد مطالعه یکسان می‌باشد. شکل ۱۴ نمودار تغییرات دمای میانگین خروجی بادگیر نسبت به زمان برای بادگیر با ذرات کپسوله با قطرهای مختلف را نشان می‌دهد همان‌طور که مشاهده می‌شود بعد از گذشت ۷۲۰۰ ثانیه حداکثر دمای میانگین خروجی بادگیر با قطر ذرات ۸۰ میلی‌متر، ۳۰۵ درجه کلون می‌باشد که ۲ درجه خنک‌تر از دمای محیط خارج می‌باشد به عبارت دیگر هنوز ماده تغییر فاز دهنده به‌طور کامل ذوب نشده است. دلیل این پدیده این است که با افزایش قطر ذرات و با توجه به یکسان بودن جرم ماده متخلخل در هر سه حالت، گرمای نهان در هر سه مورد در زمان طولانی یکسان می‌باشد اما در

گذر زمان چون قطره‌های کوچکتر دارای جرم کمتری هستند سریعتر تغییر فاز می‌دهند و دما در زمان‌های اولیه کاهش شدید پیدا می‌کند و در قطره‌های بالاتر چون جرم هر کره بیشتر است این تغییر فاز به آرامی انجام می‌شود بنابراین همان گونه که از نمودارها پیدا است با افزایش قطر ذرات عملکرد حرارتی سیستم بهبود می‌یابد. همچنین توجه به نمودار نشان می‌دهد در حالت قطر ۸۰ میلی‌متر نسبت به حالت قطر ۵۵ میلی‌متر و حالت قطر ۵۵ میلی‌متر نسبت به حالت قطر ۳۰ میلی‌متر محدوده ثابت دمایی بیشتری دارد به عبارت دیگر در حالتی که قطر ذرات کمترین مقدار خود را دارد در محدوده زمان ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ ثانیه تغییرات دمایی با شیب تند اتفاق می‌افتد (ماده تغییر فاز دهنده ذوب شده) در حالی که در حالت قطر ۵۵ میلی‌متر این اتفاق در زمان طولانی‌تر و با شیب کمتر در محدوده ۴۰۰۰ تا ۶۰۰۰ ثانیه روی می‌دهد. در حالت قطر ۸۰ میلی‌متر تغییرات با شیب ملایم در محدوده ۱۰۰ تا ۷۰۰۰ ثانیه روی می‌دهد.

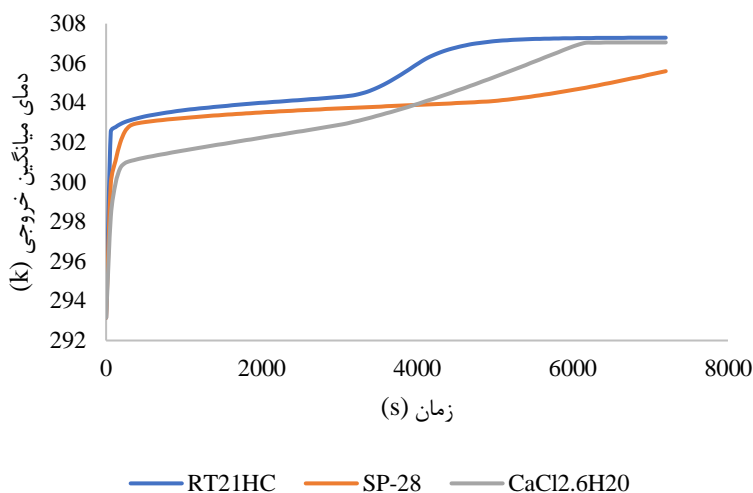


شکل ۱۴. نمودار تغییرات دمای میانگین خروجی بادگیر نسبت به زمان برای بادگیر با ذرات کپسوله با قطرهای مختلف.

### بررسی نوع ماده تغییر فاز دهنده

تغییر فاز مواد می‌تواند در ۴ صورت؛ جامد به جامد، جامد به مایع، گاز به جامد و گاز به مایع طبقه‌بندی شود. از میان این ۴ صورت تنها تغییر فاز جامد به مایع می‌تواند در سیستم سرمایشی و گرمایشی ساختمان مورد استفاده قرار گیرد. این امر به خاطر محدودیت تکنیکی سایر موارد می‌باشد [۲۴]. تنوع زیادی از مواد تغییر فاز دهنده با محدوده نقطه ذوب متفاوت وجود دارد که رایج‌ترین طبقه‌بندی برای آنها؛ تقسیم‌بندی در سه گروه آلی، غیر آلی و ترکیبی می‌باشد. در این پژوهش به منظور بررسی اثر نوع ماده تغییر فاز دهنده بر عملکرد حرارتی بادگیر طراحی شده سه نوع ماده تغییر فاز دهنده از سه گروه مختلف رایج در سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی (از گروه مواد آلی - پارافین‌ها)  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (از گروه غیر آلی - هیدرات نمکی) و  $\text{SP-28}$  (از گروه مواد ترکیبی) در مدل‌سازی استفاده شده است که جزئیات آن در جدول ۲ ارائه شده است. شکل ۱۵ نمودار تغییرات دمای سیال خروجی بر حسب زمان را برای سه ماده متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر سه مدل مختلف شبه‌سازی شده، بادگیر حاوی ماده تغییر فاز دهنده توانسته دمای میانگین خروجی را کاهش دهد اما بعد از گذشت زمان با ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده دما

افزایش یافته است. علاوه بر این توجه به شکل ۱۵ نشان می‌دهد برای حالتی که ماده تغییر فاز دهنده هیدرات نمکی  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  است. تغییرات دما در محدوده ۲۰۰ تا ۶۳۰۰ ثانیه با شیب نسبتاً ملایم روی می‌دهد و دما از ۳۰۱ به ۳۰۶ درجه کلون افزایش می‌یابد و در حالت استفاده از ماده پارافینی RT21HC در محدوده ۲۰۰ تا ۳۵۰۰ ثانیه تغییرات دمایی بسیار کم و در حدود یک درجه می‌باشد البته بعد از این زمان با ذوب ماده تغییر فاز دهنده با شیب تند افزایش دما روی می‌دهد. برای حالت ماده تغییر فاز دهنده ترکیبی SP-۲۸ تغییرات دمایی در محدوده زمانی ۲۰۰ تا ۵۰۰۰ ثانیه بسیار کم می‌باشد و دما در حدود ۳۰۳ درجه کلون تقریباً ثابت باقی‌مانده است (۴ درجه کاهش دما) و بعد از ۵۰۰۰ ثانیه با شیب نسبتاً زیاد دما افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود استفاده از ماده تغییر فاز دهنده ترکیبی SP-۲۸، به دلیل خواص بهبود یافته و ثبات دمایی ایجاد شده، در مقایسه با هیدرات نمکی  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  و پارافین RT21HC به ترتیب ۵/۸۸٪ و ۸/۸۲٪ افزایش راندمان حرارتی مدل پیشنهادی را به همراه دارد.



شکل ۱۵. نمودار تغییرات دمای میانگین خروجی بادگیر نسبت به زمان برای سه نوع ماده تغییر فاز دهنده مختلف.

## نتیجه گیری

در این پژوهش طرحی نو از بادگیر مشتمل بر مواد تغییر فاز دهنده کپسوله شبیه سازی شده است که با استفاده از این مدل می‌توان بادگیر را به عنوان یک محیط متخلخل همگن، متشکل از کپسول‌های کروی در نظر گرفت. در این مدل‌سازی معادلات ممنتوم و انرژی با توجه به فیزیک مسأله حل می‌شوند. معادله ممنتوم در حالتی دائم و معادله انرژی در حالتی غیر دائم حل می‌گردند. شبیه سازی برای ۷ هندسه متفاوت و ۳ نوع ماده تغییر فاز دهنده مختلف در حالت سه بعدی انجام شده و اثر قطر و میزان استفاده از ذرات کپسوله تغییر فاز دهنده و همچنین تخلخل و نوع ماده تغییر فاز دهنده بر عملکرد حرارتی مدل پیشنهادی بررسی شده است. نتایج نشان داد دمای میانگین هوای خروجی از بادگیر مشتمل بر مواد تغییر فاز دهنده کپسوله در مقایسه با بادگیر رایج به میزان قابل توجهی کاهش یافته و بنابراین استفاده از ماده تغییر فاز دهنده کپسوله در بادگیر موجب بهبود عملکرد حرارتی آن می‌گردد. همچنین بررسی‌ها برای میزان تخلخل مواد تغییر دهنده در بادگیر نشان داد کاهش تخلخل بستر موجب کاهش دمای میانگین و بهبود عملکرد بادگیر می‌گردد. علاوه بر این بررسی‌ها برای حجم اشغال شده توسط ماده تغییر فاز دهنده نشان داد هرچه میزان مواد تغییر

فاز دهنده کپسوله در بادگیر بیشتر باشد عملکرد حرارتی آن مطلوب‌تر است البته موجبات افت فشار خروجی را به همراه دارد که می‌توان با طراحی فن مناسب تأثیر این افت فشار را به حداقل رساند. خروجی‌های شبه‌سازی برای قطرهای مختلف ذرات کپسوله از مواد تغییر فاز دهنده نشان داد افزایش قطر ذرات، افزایش میزان ماده تغییر فاز دهنده و افزایش سطح تماس جامد و سیال را به همراه دارد بنابراین موجب بهبود عملکرد حرارتی سیستم می‌گردد. در نهایت نتایج بررسی برای نوع ماده تغییر فاز دهنده نشان داد که استفاده از ماده تغییر فاز دهنده ترکیبی SP-۲۸ (به دلیل خواص بهبودیافته و ثبات دمایی)، در مقایسه با هیدرات نمکی  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  و پارافین RT21HC راندمان حرارتی را به ترتیب ۵/۸۸٪ و ۸/۸۲٪ افزایش می‌دهد.

## References

- [1] Heydari, E., Mehdinezhad, J., & Doulabi, P. (2022). Strategic Principles of Designing the form of a Residential Building in Bushehr Based on Reducing Energy Consumption. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 18(4), 345-361. <https://doi.org/10.48301/kssa.2022.306864.1761>
- [2] Sabri, R., Rostami, R., & Mozaffari Qhadikolaei, F. (2023). Thermal performance of double-layer green walls in optimizing energy consumption in a typical commercial office building in Tehran. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 20(4), 179-194. <https://doi.org/10.48301/kssa.2023.388810.2473>
- [3] Shayanian, A., Mozaffari Qhadikolaei, F., & Pahlavan, A. (2022). The Effect of Materials in Reducing Energy Consumption in Atrium Commercial Centers in the North and Center of Tehran Province. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 18(4), 429-440. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.281281.1482>
- [4] Demirbas, M. F. (2006). Thermal Energy Storage and Phase Change Materials: An Overview. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 1(1), 85-95. <https://doi.org/10.1080/009083190881481>
- [5] Guo, W., Liu, X., & Yuan, X. (2015). Study on Natural Ventilation Design Optimization Based on CFD Simulation for Green Buildings. *Procedia Engineering*, 121, 573-581. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.1036>
- [6] Goudarzi, H., & Mostafaeipour, A. (2017). Energy saving evaluation of passive systems for residential buildings in hot and dry regions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 432-446. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.002>
- [7] Montazeri, H., & Montazeri, F. (2018). CFD simulation of cross-ventilation in buildings using rooftop wind-catchers: Impact of outlet openings. *Renewable Energy*, 118, 502-520. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.032>
- [8] Jomehzadeh, F., Nejat, P., Calautit, J. K., Yusof, M. B. M., Zaki, S. A., Hughes, B. R., & Yazid, M. N. A. W. M. (2017). A review on windcatcher for passive cooling and natural ventilation in buildings, Part 1: Indoor air quality and thermal comfort assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 736-756. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.254>
- [9] Nejat, P., Calautit, J. K., Majid, M. Z. A., Hughes, B. R., Zeynali, I., & Jomehzadeh, F. (2016). Evaluation of a two-sided windcatcher integrated with wing wall (as a new design) and comparison with a conventional windcatcher. *Energy and Buildings*, 126, 287-300. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.025>
- [10] Ahmadikia, H., Moradi, A., & Hojjati, M. (2012). Performance Analysis of a Wind-Catcher With Water Spray. *International Journal of Green Energy*, 9(2), 160-173. <https://doi.org/10.1080/15435075.2011.622019>

- [11] Kalantar, V. (2009). Numerical simulation of cooling performance of wind tower (Baud-Geer) in hot and arid region. *Renewable Energy*, 34(1), 246-254. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.03.007>
- [12] Saffari, H., & Hosseinnia, S. M. (2009). Two-phase Euler-Lagrange CFD simulation of evaporative cooling in a Wind Tower. *Energy and Buildings*, 41(9), 991-1000. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.05.006>
- [13] Shoara, S., Mofidi Shemirani, S. M., Shahriari, S. K., & Zarabadi, Z. S. S. (2023). Investigation of the Effect of Urban Street Canyon Materials on Microclimate by CFD in Shiraz. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 19(4), 261-277. <https://doi.org/10.48301/kssa.2023.354640.2225>
- [14] Hu, Y., & Heiselberg, P. K. (2018). A new ventilated window with PCM heat exchanger—Performance analysis and design optimization. *Energy and Buildings*, 169, 185-194. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.060>
- [15] Sinka, M., Bajare, D., Jakovics, A., Ratnieks, J., Gendelis, S., & Tihana, J. (2019). Experimental testing of phase change materials in a warm-summer humid continental climate. *Energy and Buildings*, 195, 205-215. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.030>
- [16] Lizana, J., De-Borja-Torrejón, M., Barrios-Padura, A., Auer, T., & Chacartegui, R. (2019). Passive cooling through phase change materials in buildings. A critical study of implementation alternatives. *Applied Energy*, 254, 113658. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113658>
- [17] Parwez, S. M., Sefid, M., & Perzai Khabazi, N. (2023). Experimental Investigation of the Combined Effect of Condenser and Phase Change Materials in the Performance of Single Slope Solar Still. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 20(3), 81-98. <https://doi.org/10.48301/kssa.2023.368106.2333>
- [18] Seidabadi, L., Ghadamian, H., & Aminy, M. (2019). A novel integration of PCM with wind-catcher skin material in order to increase heat transfer rate. *International Journal of Renewable Energy Development*, 8(1), 1-6. <https://doi.org/10.14710/ijred.8.1.1-6>
- [19] Meteoblue. (2024). *Simulated historical climate & weather data for Kerman*. [https://www.meteoblue.com/en/weather/historyclimate/climatemodelled/kerman\\_united-states\\_5362909](https://www.meteoblue.com/en/weather/historyclimate/climatemodelled/kerman_united-states_5362909)
- [20] Mohammadnejad, F., & Hossainpour, S. (2020). A CFD modeling and investigation of a packed bed of high temperature phase change materials (PCMs) with different layer configurations. *Journal of Energy Storage*, 28(5), 101209. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101209>
- [21] Nield, D. A., & Bejan, A. (2013). *Convection in porous media* (4 ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5541-7>
- [22] Wakao, N., Kaguei, S., & Funazkri, T. (1979). Effect of fluid dispersion coefficients on particle-to-fluid heat transfer coefficients in packed beds: Correlation of nusselt numbers. *Chemical Engineering Science*, 34(3), 325-336. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(79\)85064-2](https://doi.org/10.1016/0009-2509(79)85064-2)
- [23] Izquierdo-Barrientos, M. A., Sobrino, C., & Almendros-Ibáñez, J. A. (2013). Thermal energy storage in a fluidized bed of PCM. *Chemical Engineering Journal*, 230, 573-583. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.06.112>
- [24] Qian, T., Li, J., Min, X., Deng, Y., Guan, W., & Ning, L. (2015). Diatomite: A promising natural candidate as carrier material for low, middle and high temperature phase change material. *Energy Conversion and Management*, 98, 34-45. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.071>

