



Comprehensive Sensitivity Analysis of Carbon Nanoparticles-Enhanced PCMs' Thermal Conductivity

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Gholami A.¹,
Pourfayaz F.^{1*}

How to cite this article

Gholami A., Pourfayaz F.,
Comprehensive sensitivity analysis
of carbon nanoparticles-enhanced
PCMs' thermal conductivity. Modares
Mechanical Engineering;
2025;25(03):137-146.

¹ School of Energy and Sustainable Resources Engineering, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran.

*Correspondence

Address: School of Energy and Sustainable Resources Engineering, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran.

pourfayaz@ut.ac.ir

Article History

Received: November 12, 2024

Accepted: April 12, 2025

ePublished: May 10, 2025

ABSTRACT

Phase change materials (PCMs) have low thermal conductivity, which can be improved by incorporating carbon nanoparticles. The aim of the present study is to examine the factors influencing improved thermal conductivity and to determine the optimal range of these factors for achieving the highest enhanced thermal conductivity. For this purpose, 480 experimental data points from previous studies on improving thermal conductivity using carbon nanoparticles were collected. These data were then analyzed using design of experiments (DOE), response surface methodology (RSM), and analysis of variance (ANOVA) to identify the sensitivity of the response to each independent variable. The results showed that over 80% of the changes in improved thermal conductivity in both solid and liquid phases were due to three factors: the concentration of nanoparticles, the interaction between nanoparticle concentration and the thermal conductivity of the phase change material, and the interaction between nanoparticle concentration and the thermal conductivity of the nanoparticles. Contour plots indicated that the minimum required concentration for achieving the maximum improved thermal conductivity in both solid and liquid phases is 8.6 wt%. Furthermore, when the nanoparticle concentration was below 1 wt%, the thermal conductivity of the liquid phase showed a positive correlation with the thermal conductivity of the pure PCM. This correlation became negative at nanoparticle concentrations exceeding 3 wt%. Given the several factors affecting PCM's thermal conductivity, focusing on the three mentioned parameters can help reduce the time and cost involved in manufacturing optimal PCMs at industrial scale.

Keywords: Phase Change Material, Carbon Nanoparticles, Thermal Conductivity, Response Surface Methodology, Sensitivity Analysis.

CITATION LINKS

1- Nano-enhanced phase change materials: A review... 2- Nano-enhanced phase change materials: Fundamentals... 3- Innovations in phase change materials ... 4- Biomimetic bone tissue structure: an ultrastrong... 5- Performance evaluation of nano-enhanced... 6- Progress of research on phase change energy storage... 7- Solar-assisted radiant heating system with... 8- Heat transfer enhancement of phase change... 9- Numerical analysis of latent heat thermal energy... 10- Discharging of PCM in various shapes... 11- Effects of nano-enhanced phase change ... 12- Experimental assessment of a solar water tank... 13- A highly accurate model for prediction of... 14- The experimental exploration of carbon nanofiber... 15- Single-walled carbon nanotube/phase change... 16- Multi-walled carbon nanotubes added... 17- Effect of carbon nanofiber additives... 18- Thermal properties of paraffin based... 19- Enhancing thermal conductivity of palmitic... 20- Thermal conductivity enhancement of MWNTs... 21- Effects of MWNTs on phase change enthalpy... 22- Solid-state electrochemiluminescence... 23- Preparation, thermal characterization and... 24- Increasing the thermal conductivity of... 25- Increased thermal conductivity of eicosane-based... 26- Increased thermal conductivity of eicosane-based... 27- Preparation and thermal properties of fatty acids/CNTs... 28- Multi-walled carbon nanotubes... 29- Single-walled carbon nanotube/phase change... 30- The experimental exploration of carbon nanofiber... 31- Single-walled carbon nanotube for shape stabilization... 32- Enhanced thermal conductivity of n-octadecane... 33- Experimental study on thermal conductivity of... 34- Thermal conductivity of carbon nanotubes and... 35- Thermal properties of beeswax/graphene... 36- Thermal conductivity of exfoliated graphite. 37- Thermal properties of heat storage composites containing... 38- Effects of various carbon nanofillers on... 39- The Effect of Al₂O₃ Addition on Solidification... 40- Enabling superior thermo-mechanical performance...

تحلیل حساسیت جامع عوامل مؤثر بر ضریب

رسانش حرارتی مواد تغییر فاز دهنده بهبود

یافته با نانو ذرات کربن

علی غلامی^۱، فتح اله پورفایز^{۱*}^۱ دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری های میان رشته ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

مواد تغییر فاز دهنده ضریب رسانش حرارتی پایینی دارند که جهت بهبود این کمیت می توان از نانوذرات کربن استفاده نمود. هدف از مطالعه حاضر بررسی اهمیت عوامل مؤثر بر ضریب رسانش حرارتی بهبود یافته و تعیین محدوده مناسب این عوامل برای حصول بیشترین ضریب رسانش حرارتی بهبود یافته است. بدین منظور تعداد ۴۸۰ داده تجربی حاصل از مطالعات گذشته در زمینه بهبود ضریب رسانش حرارتی با استفاده از نانوذرات کربن جمع آوری شد. سپس این داده ها با استفاده از روش سطح پاسخ و تحلیل واریانس بررسی گردید تا میزان حساسیت پاسخ به هر یک از متغیرهای مستقل مشخص شود. نتایج نشان داد که بیش از ۸۰٪ تغییرات در ضریب رسانش بهبود یافته در هر دو حالت جامد و مایع ناشی از سه فاکتور غلظت نانوذرات، برهمکنش غلظت نانوذرات و ضریب رسانش حرارتی ماده تغییر فاز دهنده، و برهمکنش غلظت و ضریب رسانش حرارتی نانوذرات است. همچنین تحلیل نمودارهای کانتور نشان داد که حداقل غلظت مورد نیاز برای دستیابی به ضریب رسانش حرارتی بهبود یافته بیشینه در دو فاز جامد و مایع برابر با ۸/۶٪ است. علاوه بر این، ضریب رسانش حرارتی بهبود یافته در فاز مایع در غلظت های کمتر از ۱٪ با افزایش ضریب رسانش حرارتی ماده تغییر فاز دهنده روند صعودی داشته و در غلظت های بیشتر از ۳٪ با این پارامتر رابطه معکوس دارد. با توجه به تعدد متغیرهای مؤثر، تمرکز بر روی سه پارامتر اشاره شده می تواند به کاهش زمان و هزینه دستیابی به یک ماده تغییر فاز دهنده بهینه در صنعت کمک شایانی نماید.

کلیدواژه ها: مواد تغییر فاز دهنده، نانو ذرات کربن، رسانش حرارتی، روش سطح پاسخ، تحلیل حساسیت.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳

*نویسنده مسئول: pourfayaz@ut.ac.ir

۱- مقدمه

از زمان اکتشاف زغال سنگ، استفاده فزاینده از سوخت های فسیلی و وابستگی بیش از حد بشر به این منابع تجدید ناپذیر منجر به بروز چالش های جدی در سراسر دنیا شده است. گرمایش جهانی، آلودگی های زیست محیطی و تهدید امنیت انرژی نسل های آینده از جمله مهم ترین معضلات ناشی از سوخت های فسیلی است که رفع آنها نیازمند راهکارهایی است که همسو با سیاست های توسعه پایدار باشد. بدین منظور در چند دهه اخیر بکارگیری منابع تجدیدپذیر و افزایش بازدهی انرژی به عنوان دو اصل اساسی مورد توجه اکثر کشورهای جهان بوده است.

استفاده از انرژی ذخیره شده با کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره وری، کمک شایانی به پایداری محیط زیست و طول عمر بیشتر منابع موجود می کند^[1]. ذخیره سازی انرژی حرارتی به سه روش

امکان پذیر است: ذخیره سازی گرمای محسوس، ذخیره سازی گرمای نهان و ذخیره سازی انرژی شیمیایی. در این میان، استفاده از گرمای نهان مواد تغییر فاز دهنده (Phase change material یا به اختصار PCM) به عنوان محبوب ترین روش شناخته می شود^[2]. این مواد آلی و غیر آلی با جذب مقادیر قابل ملاحظه گرما تغییر فاز می دهند و بویژه برای ذخیره سازی انرژی حاصل از منابع تجدید پذیر با طبیعت غیر قابل پیش بینی و نوسانی، مانند انرژی خورشیدی و بادی، بسیار مفید هستند^[3]. در مواقعی که انرژی حاصل از منابع تجدیدپذیر بیش از مقدار مصرف باشد، مواد تغییر فاز دهنده با جذب انرژی مازاد تغییر فاز می دهند (معمولاً از حالت جامد به مایع). هنگامی که تقاضای انرژی از انرژی حاصل از منابع تجدیدپذیر بیشتر باشد (به عنوان مثال در طول شب یا روزهای ابری)، ماده با برگشت به حالت جامد، انرژی ذخیره شده را آزاد می کند. به این ترتیب نه تنها ناترازی انرژی جبران می شود، بلکه از اتلاف انرژی در زمان هایی که تولید انرژی از مصرف آن بیشتر است جلوگیری بعمل می آید^[4].

عملکرد مواد تغییر فاز دهنده در ذخیره سازی انرژی به عوامل مختلفی از جمله رسانش حرارتی، دمای تغییر فاز و چگالی ذخیره سازی بستگی دارد^[5]. در این میان، رسانش حرارتی در تعیین نرخ انتقال حرارت در طی فرآیند ذخیره سازی و آزاد سازی انرژی، و در نتیجه بازدهی سیستم ذخیره سازی انرژی، نقش اساسی دارد^[6]. با این وجود، مواد تغییر فاز دهنده در حالت خالص رسانش حرارتی پایینی دارند^[7]. به همین دلیل روش های مختلفی جهت افزایش رسانش حرارتی این مواد به کار گرفته شده است که از آن جمله می توان به استفاده از پر^[8]، کپسوله کردن (Encapsulation) در مقیاس میکرو و ماکرو^[9]، استفاده از چند ماده تغییر فاز دهنده^[10] و اضافه کردن نانو ذرات^[11] اشاره نمود.

در حال حاضر بخش عمده مطالعات در زمینه بهبود رسانش حرارتی مواد تغییر فاز دهنده بر استفاده از نانو ذرات متمرکز است^[12]. نانو ذرات فلزی، اکسید فلزی و کربن از جمله متداول ترین مواد به کار رفته در این زمینه هستند. در این میان نانو مواد کربنی مانند نانو لوله های کربنی، گرافیت و گرافن به دلیل رسانش حرارتی بیشتر در مقایسه با نانو مواد فلزی به عنوان یک گزینه مناسب جهت افزایش رسانش حرارتی مواد تغییر فاز دهنده مورد توجه قرار گرفته اند^[6]. عوامل مختلفی بر بهبود رسانایی حرارتی مواد تغییر فاز دهنده با استفاده از نانو ذرات کربن تأثیر می گذارند که مهم ترین آنها شامل رسانش حرارتی ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات کربنی مورد استفاده^[13]، غلظت نانو ذرات^[14]، اندازه نانو ذرات^[15] و دما^[16] است. تعیین مقادیر بهینه این متغیرها به منظور افزایش رسانش حرارتی مواد تغییر فاز دهنده موضوع بسیاری از مطالعات گذشته بوده است. در اغلب این مطالعات به منظور نیل به بالاترین ضریب رسانش حرارتی، تمامی متغیرهای تأثیر گذار ثابت در نظر گرفته شده و فقط یک متغیر در دامنه مشخصی دستخوش تغییر شده

شهرت دارند زیرا نحوه دست‌یابی مدل به راه حل مسئله مشخص نیست و تعیین میزان تأثیر دقیق هر یک از متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته دشوار است. همچنین بر خلاف روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی که اغلب به صرف زمان و هزینه بالا برای محاسبات نیاز دارند، روش سطح پاسخ با صرف حداقل زمان و هزینه، نتایجی با قابلیت تفسیر بالا ارائه می‌دهد. در نتیجه در مسائلی که شامل تحلیل حساسیت یک پارامتر نسبت به چند متغیر مستقل هستند، روش سطح پاسخ می‌تواند با صرف زمان و هزینه کمتر، نتایج با قابلیت اطمینان بالاتری ارائه دهد.

لذا مطالعه حاضر برای اولین بار به بررسی اهمیت و تحلیل حساسیت عوامل مؤثر بر رسانش حرارتی مواد تغییر فاز دهنده بهبود یافته با نانو ذرات کربن با استفاده از روش سطح پاسخ پرداخته است. بدین منظور داده‌های حاصل از مطالعات تجربی گذشته به عنوان ورودی نرم افزار دیزان اکسپرت (Design Expert) در نظر گرفته شده و سپس مدل سازی به روش سطح پاسخ انجام شده است. در نهایت تحلیل حساسیت و مقادیر بهینه متغیرهای مؤثر بر اساس نمودارهای حاصل از نرم افزار صورت گرفته است.

۲- شرح مسئله

روش سطح پاسخ گزینه‌ای مناسب در مدل سازی مسائلی است که در آنها یک یا چند متغیر وابسته تابعی از چند متغیر مستقل هستند. در مطالعه حاضر هدف یافتن رابطه بین ضریب رسانش حرارتی مواد تغییر فاز دهنده بهبود یافته با نانو ذرات کربن به عنوان متغیر وابسته (یا پاسخ) و پنج متغیر غلظت، اندازه نانو ذرات، دما، ضریب رسانش حرارتی ماده تغییر فاز دهنده و ضریب رسانش حرارتی نانو ذرات کربن به عنوان متغیرهای مستقل می‌باشد.

است. سپس این عمل برای تمامی متغیرهای مؤثر تکرار شده و مقدار بهینه ضریب رسانش حرارتی گزارش شده است. باین حال این مقدار لزوماً برابر با بیشترین ضریب رسانش حرارتی ممکن نیست زیرا برهمکنش بین متغیرهای مؤثر در نظر گرفته نشده است.

با توجه به محدودیت روش مذکور، Taheri و همکاران^[13] با ترکیب طراحی آزمایش (Design of Experiments) و روش‌های سطح پاسخ (Response Surface Methodology) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (Artificial Neural Networks) مدلی جهت پیش بینی ضریب رسانش حرارتی مواد تغییر فاز دهنده بهبود یافته با نانو ذرات کربن به دست آوردند. آنها با استفاده از ۴۸۰ داده تجربی حاصل از تحقیقات گذشته نشان دادند که روش شبکه‌های عصبی مصنوعی نسبت به روش سطح پاسخ، پیش بینی دقیق‌تری از مقدار بهینه ضریب رسانش حرارتی ارائه می‌دهد.

با توجه به آنچه ذکر گردید، تعیین مقادیر بهینه عوامل مؤثر بر ضریب رسانش حرارتی مواد تغییر فاز دهنده بهبود یافته با نانو ذرات کربن می‌تواند به پیشرفت تحقیقات و صنعت ذخیره سازی انرژی کمک شایانی نماید. این امر منجر به کاهش تعداد آزمون‌های لازم و نیز محدودتر شدن دامنه تغییرات لازم در هر پارامتر می‌شود. عامل تعیین کننده دیگر تحلیل حساسیت ضریب رسانش حرارتی نسبت به هر یک از متغیرهای مؤثر است. این امر با تعیین میزان اهمیت متغیرهای مؤثر، مسیر پژوهش‌های آینده را بر متغیرهای مهم‌تر متمرکز می‌کند.

با وجود سادگی و انعطاف کمتر روش سطح پاسخ نسبت به روش‌های دیگر نظیر شبکه‌های عصبی مصنوعی، درک و تفسیر نتایج حاصل از این روش به مراتب آسان‌تر بوده و تغییرات پاسخ با هر یک از متغیرهای مستقل به راحتی قابل مشاهده است. در مقابل روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی به مدل‌های "جعبه سیاه"

جدول ۱) عوامل مؤثر بر رسانایی حرارتی مواد تغییر فاز دهنده بهبود یافته با نانو ذرات کربن به همراه مقادیر آنها

مرجع	دما (°C)	اندازه نانو ذره (nm)	غلظت (% وزنی)	ماده تغییر فاز دهنده	نانو ذره
[17]	دمای اتاق	۱۰۰	۴،۳،۲،۱	پارافین وکس	نانو فیبرهای کربنی
[18]	۱۵-۷۵	۳۰	۵،۲،۱،۰/۵	پالمیتیک اسید	نانو لوله کربنی چند لایه ای
[19]	۱۵-۷۵	۳۰	۰/۰۱، ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۲	پالمیتیک اسید	نانو لوله کربنی چند لایه ای
[20]	۲۵	۲۰	۵،۲/۵، ۱،۰/۵	پلی آنیلین/تترا دکانول	نانو لوله کربنی چند لایه ای
[21]	۲۵	۲۰	۴،۲،۱،۰/۵، ۰	پالمیتیک اسید	نانو لوله کربنی چند لایه ای
[22]	۲۰	۳۵	۱۰،۷،۴،۱	پارافین وکس	گرافیت
[23]	۶۰-۷۰، ۴۵-۷۰، ۳۵-۷۰	۴۰، ۸، ۶	۳، ۲، ۱	میستریک اسید	گرافن، نانو لوله کربنی چند لایه ای، گرافیت
[24]	۱۵-۷۵	۳۰	۰/۰۱	پالمیتیک اسید	نانو لوله کربنی چند لایه ای
[25]	۷۰، ۶۰، ۴۵، ۳۵، ۲۵	۴۰، ۸، ۶	۳	میستریک اسید	گرافن، نانو لوله کربنی چند لایه ای، نانو گرافیت
[26]	۳۰، ۲۵، ۲۰، ۱۵، ۱۰	۵	۱۰، ۵، ۲، ۱	پارافین ایکوزان	گرافن
[27]	۲۵	۱۱/۵	۵۰، ۴۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰	اسیدهای چرب	نانو لوله کربنی چند لایه ای
[28]	۱۲۰، ۷۵، ۴۰	۱۱	۰/۵، ۰/۳، ۰/۲، ۰/۱	Na2CO3/MgO	نانو لوله کربنی چند لایه ای
[29]	۲۵	۱۱/۵، ۲	۲	پلیمر	نانو لوله‌های کربنی تک لایه
[30]	۲۵	۳۰	۱۰، ۵، ۲، ۱	سویا وکس	نانو فیبرهای کربنی
[31]	۸۰، ۷۰، ۶۰، ۵۰، ۴۰، ۳۰، ۲۰	۲۵	۱۰، ۸، ۶، ۴، ۲	پلی اتیلن گلاکلیک	نانو لوله‌های کربنی تک لایه

پژوهش حاضر با بررسی گسترده مطالعات قبلی در زمینه مواد تغییر فاز دهنده و مقادیر ارائه شده برای مقدار بهینه ضریب رسانش حرارتی در این مطالعات، انتظار می رود با ناحیه بهینه اختلاف چندانی وجود نداشته باشد و در نتیجه مدل درجه دو برای توضیح رابطه بین متغیرهای مستقل انتخاب گردید (رابطه ۱).

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ii} x_i^2 + \sum \sum \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

در رابطه فوق x و y نشان دهنده متغیرهای مستقل و وابسته بوده و β و ε معرف ضرایب چند جمله ای و خطای مشاهده شده در پاسخ هستند.

برای محاسبه کفایت مدل و ضرایب چند جمله ای پاسخ از تحلیل واریانس استفاده می شود. تحلیل واریانس با تعیین اهمیت هر جمله، میزان تأثیر متغیرهای مستقل بر پاسخ را مشخص می کند. این روش بر مبنای مجموع مربعات خطا استوار است که میزان انحراف متغیرها از مقدار میانگین را مشخص می کند و از روابط ۳ تا ۵ محاسبه می شود:

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 \quad (2)$$

$$SS_{Treatments} = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 \quad (3)$$

$$SS_E = SS_T - SS_{Treatments} \quad (4)$$

در روابط فوق SS_T نشان دهنده مجموع مربعات کل، y_{ij} مشاهده j ام تحت سطح i ، a تعداد سطوح، n تعداد مشاهدات تحت سطح i ، $\bar{y}_{i.}$ میانگین کل مشاهدات، $SS_{Treatments}$ مجموع مربعات بین سطوح، $\bar{y}_{..}$ میانگین مشاهدات تحت سطح i ، و SS_E مجموع مربعات ناشی از خطا هستند. هر چه انحراف متغیرها از مقدار میانگین بیشتر باشد، مجموع مربعات بزرگ تر و هر چه انحراف از میانگین کمتر باشد، مجموع مربعات کوچک تر خواهد بود.

به منظور بررسی اهمیت هر جمله در تحلیل واریانس میانگین مربعات $MS_{Treatments}$ و MS_E مورد نیاز هستند که از روابط ۵ و ۶ محاسبه می شوند:

$$MS_{Treatments} = \frac{SS_{Treatments}}{a - 1} \quad (5)$$

$$MS_E = \frac{SS_E}{N - a} \quad (6)$$

N در رابطه ۶ معرف تعداد کل مشاهدات است. پارامتر میانگین مربعات از تقسیم واریانس بر درجه آزادی به دست می آید. این کمیت اختلاف در تخمین هر واریانس بر اساس تعداد اندازه گیری ها را محاسبه می کند. در صورت عدم استفاده از این پارامتر، واریانس های محاسبه شده قابل مقایسه با یکدیگر نیستند و استفاده از نسبت واریانس ها در تحلیل منطقی نیست.

در نهایت، پارامتر F که صحت مدل را نشان می دهد، از رابطه ۷ محاسبه می شود:

$$F_0 = \frac{MS_{Treatments}}{MS_E} \quad (7)$$

بدین منظور داده های تجربی حاصل از مطالعات اخیر در زمینه بهبود رسانایی حرارتی مواد تغییر فاز دهنده با استفاده از نانوذرات کربن در فازهای جامد و مایع استخراج شد. جدول ۱ خلاصه ای از مقادیر و دامنه تغییرات متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده در مطالعات اخیر را نشان می دهد. همچنین در جداول ۲ و ۳ به ترتیب مقادیر ضریب رسانش حرارتی مواد تغییر فاز دهنده و نانو ذرات مختلف ارائه شده است.

جدول ۲) مقادیر ضریب رسانش حرارتی نانو ذرات در نظر گرفته شده در مطالعه حاضر

نانو ذرات	ضریب رسانش حرارتی (W/mK)	مرجع
نانو فیبرهای کربنی	۲۰۰۰، ۱۱۵۰	[32 33]
نانو لوله کربنی چند لایه	۳۰۰۰	[34]
گرافیت	۴۰۰	[34]
نانو ذرات گرافن	۳۰۰۰	[35]
گرافن تک لایه ای	۵۳۰۰	[36]
نانو لوله کربنی تک لایه ای	۴۰۰۰	[31]

جدول ۳) مقادیر ضریب رسانش حرارتی مواد تغییر فاز دهنده مختلف در نظر گرفته شده در مطالعه حاضر

ماده تغییر فاز دهنده	ضریب رسانش حرارتی (W/mK)	مرجع
پارافین وکس	۰/۲۴	[31]
پالمیتیک اسید	۰/۲۴	[37]
پلی آنیلین/تترا دکانول	۰/۳۳	[20]
پارافین	۰/۳۵	[22]
میستیریک اسید	۰/۲۲	[23]
پارافین	۰/۲۶	[38]
پارافین ایکوزان	۰/۳۹	[26]
Na2CO3/MgO	۰/۷۵	[16]
سویا وکس	۰/۳۲	[14]

داده های تجربی مذکور منجر به ۴۸۰ ترکیب متفاوت از متغیرهای مستقل و ضریب رسانایی حرارتی بهبود یافته متناظر شد که در جدول ۱ فایل تکمیلی ارائه شده است. این داده ها یک فضای طراحی (Design space) تشکیل می دهند که ورودی روش سطح پاسخ است.

۳- روش حل

روش سطح پاسخ مجموعه ای از روش های آماری و ریاضی است که رابطه بین چند متغیر مستقل و یک یا چند متغیر وابسته را تعیین می کند. اغلب هنگامی که در نقطه ای روی سطح پاسخ قرار داریم که از ناحیه بهینه فاصله زیادی دارد، انحنای کمی در سیستم مشاهده شده و مدل درجه یک مناسب خواهد بود. با نزدیک شدن به ناحیه بهینه و مشاهده انحنا می توان مدلی با دقت بیشتر نظیر چند جمله ای درجه دو را برای توضیح پاسخ به کار گرفت. در

ضریب رسانش حرارتی ماده	تغییر فاز	دهنده (E)	۰/۰۹۷	۱	۰/۰۹۷	۱۷۱/۵۰	< ۰/۰۰۰۱
AB	۰/۰۷۴	۱	۰/۰۷۴	۱۳۲/۲۸	< ۰/۰۰۰۱		
AC	۰/۰۱۹	۱	۰/۰۱۹	۳۳/۵۵	< ۰/۰۰۰۱		
AD	۰/۱۰	۱	۰/۱۰	۱۸۶/۳۷	< ۰/۰۰۰۱		
AE	۰/۳۲	۱	۰/۳۲	۵۶۶/۳۵	< ۰/۰۰۰۱		
BC	$۲/۰۴۵ \times ۱۰^{-۴}$	۱	$۲/۰۴۵ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۳۶	۰/۵۴۸۵		
BD	$۶/۷۵۸ \times ۱۰^{-۶}$	۱	$۶/۷۵۸ \times ۱۰^{-۶}$	۰/۱۲	۰/۹۱۳۰		
BE	$۱/۲۶۶ \times ۱۰^{-۳}$	۱	$۱/۲۶۶ \times ۱۰^{-۳}$	۲/۲۵	۰/۱۳۷۹		
CD	$۱/۵۰۹ \times ۱۰^{-۶}$	۱	$۱/۵۰۹ \times ۱۰^{-۶}$	$۲/۶۸۱ \times ۱۰^{-۳}$	۰/۹۵۸۸		
CE	$۳/۷۷۱ \times ۱۰^{-۴}$	۱	$۳/۷۷۱ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۶۷	۰/۴۱۵۶		
DE	$۵/۳۲۹ \times ۱۰^{-۳}$	۱	$۵/۳۲۹ \times ۱۰^{-۳}$	۹/۴۷	۰/۰۰۲۹		
A ²	۰/۰۲۶	۱	۰/۰۲۶	۴۵/۴۹	< ۰/۰۰۰۱		
B ²	$۳/۲۹۱ \times ۱۰^{-۴}$	۱	$۳/۲۹۱ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۵۸	۰/۴۴۶۸		
C ²	$۱/۴۵۰ \times ۱۰^{-۵}$	۱	$۱/۴۵۰ \times ۱۰^{-۵}$	۰/۰۲۶	۰/۸۷۲۹		
D ²	$۲/۳۴۷ \times ۱۰^{-۴}$	۱	$۲/۳۴۷ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۴۲	۰/۵۲۰۴		
E ²	$۱/۶۸۵ \times ۱۰^{-۳}$	۱	$۱/۶۸۵ \times ۱۰^{-۳}$	۲/۹۹	۰/۰۸۷۸		
باقیمانده	۰/۰۴۲	۷۴	$۵/۶۲۸ \times ۱۰^{-۴}$				
کل	۹/۰۰	۹۴					
فاز مایع							
مدل	۸۷/۵۷	۲۰	۴/۳۸	۶۷/۱۱	< ۰/۰۰۰۱		
غلظت (A)	۰/۰۱۲	۱	۰/۰۱۲	۰/۱۹	۰/۶۶۴۲		
اندازه (B)	۰/۴۲	۱	۰/۴۲	۶/۵۰	۰/۰۱۱۵		
دما (C)	$۵/۱۹۶ \times ۱۰^{-۳}$	۱	$۵/۱۹۶ \times ۱۰^{-۳}$	۰/۰۸۰	۰/۷۷۸۰		
ضریب رسانش حرارتی نانوذره (D)	۰/۳۲	۱	۰/۳۲	۴/۸۸	۰/۰۲۸۲		
ضریب رسانش حرارتی ماده	۰/۵۴	۱	۰/۵۴	۸/۲۰	۰/۰۰۴۶		
تغییر فاز							
دهنده (E)							
AB	۳/۹۲	۱	۳/۹۲	۶۰/۱۱	< ۰/۰۰۰۱		
AC	$۶/۷۳۹ \times ۱۰^{-۳}$	۱	$۶/۷۳۹ \times ۱۰^{-۳}$	۰/۱۰	۰/۷۴۸۲		
AD	۴/۷۰	۱	۴/۷۰	۷۲/۱۱	< ۰/۰۰۰۱		
AE	۴/۹۴	۱	۴/۹۴	۷۵/۷۶	< ۰/۰۰۰۱		
BC	۰/۱۵	۱	۰/۱۵	۲/۲۳	۰/۱۳۶۶		
BD	۰/۳۰	۱	۰/۳۰	۴/۶۰	۰/۰۳۳۹		
BE	۰/۱۱	۱	۰/۱۱	۱/۶۲	۰/۲۰۴۳		
CD	۰/۰۱۵	۱	۰/۰۱۵	۰/۲۳	۰/۶۳۵۴		
CE	$۸/۷۹۳ \times ۱۰^{-۳}$	۱	$۸/۷۹۳ \times ۱۰^{-۳}$	۰/۱۳	۰/۷۱۳۹		
DE	$۲/۹۰۴ \times ۱۰^{-۳}$	۱	$۲/۹۰۴ \times ۱۰^{-۳}$	۰/۰۴۵	۰/۸۳۳۱		
A ²	۲۴/۰۸	۱	۲۴/۰۸	۳۶۹/۱۶	< ۰/۰۰۰۱		

به منظور بررسی میزان دقت معادله حاصل در برازش نقاط واقعی از ضریب تعیین (R^2) استفاده می‌شود (رابطه ۸).

$$R^2 = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (۸)$$

باید توجه داشت که افزودن یک متغیر، فارغ از اهمیت آماری آن، همواره موجب افزایش ضریب تعیین می‌شود. به همین دلیل، مقادیر بزرگ ضریب تعیین لزوماً به معنای یک معادله برازش با دقت بالا نیست. از این رو، از ضریب تعیین تعدیل شده (R^2_{adj}) استفاده می‌شود (رابطه ۹):

$$R^2_{adj} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p} \right) (1 - R^2) \quad (۹)$$

در رابطه فوق p معرف تعداد جملات اصلی مدل است. اغلب با اضافه شدن یک جمله کم اهمیت، مقدار ضریب تعیین تعدیل شده کاهش می‌یابد.

۴- تحلیل نتایج

۴-۱- بررسی اهمیت عوامل مؤثر بر ضریب رسانش حرارتی

به منظور تعیین ضرایب جملات رابطه درجه دو و همچنین میزان اهمیت جملات، تحلیل واریانس برای این مدل انجام شد که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. معیار تصمیم‌گیری در خصوص بهترین مدل برازش مقدار کمیت F و کمیت P متناظر با آن است. هر چه مقدار کمیت F بیشتر و در نتیجه میزان کمیت P کمتر باشد، مدل اهمیت بیشتری دارد. در این تحلیل سطح اطمینان ۹۵٪ برای انجام تحلیل واریانس در نظر گرفته شده است. بدین معنی که اگر مقدار P کمتر از ۵٪ باشد، مدل دارای اهمیت است.

با توجه به اینکه مقدار P برای مدل کمتر از ۵٪ است، کفایت مدل درجه دو برای توصیف تغییرات ضریب رسانایی حرارتی در هر دو فاز جامد و مایع تأیید می‌شود. مقدار P نشان می‌دهد که احتمال داشتن مقدار F بزرگ (۷۹۵/۸۹) برای فاز جامد و ۶۷/۱۱ برای فاز مایع برای مدل به دلیل اختلال (Noise) در داده‌های تجربی تنها ۰/۰۱٪ است.

جدول ۴) تحلیل واریانس برای مدل سطح پاسخ درجه دو فازهای جامد و مایع

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
فاز جامد					
مدل	۸/۹۶	۲۰	۰/۴۵	۷۹۵/۸۹	< ۰/۰۰۰۱
غلظت (A)	۰/۸۹	۱	۰/۸۹	۱۵۸۹/۴۸	< ۰/۰۰۰۱
اندازه (B)	$۴/۲۳۶ \times ۱۰^{-۳}$	۱	$۴/۲۳۶ \times ۱۰^{-۳}$	۷/۵۳	۰/۰۰۷۶
دما (C)	$۳/۳۱۳ \times ۱۰^{-۵}$	۱	$۳/۳۱۳ \times ۱۰^{-۵}$	۰/۰۵۹	۰/۸۰۹۰
ضریب رسانش حرارتی نانوذره (D)	۰/۰۱۵	۱	۰/۰۱۵	۲۶/۱۱	< ۰/۰۰۰۱

دارند. نکته جالب تأثیر ناچیز دما در فاز جامد و عدم تأثیر آن در فاز مایع است. بنابراین در فضای طراحی مطالعه حاضر می توان از اثر دما صرف نظر نمود. در مقابل غلظت نانو ذرات مهم ترین پارامتر در هر دو فاز بوده و اثر قابل توجهی بر ضریب رسانش حرارتی دارد.

جدول ۶) تحلیل حساسیت ضریب رسانش حرارتی به متغیرهای مستقل به ترتیب اولویت

فاز جامد		فاز مایع	
پارامتر	میزان	پارامتر	میزان
معادل	حساسیت پارامتر	معادل	حساسیت پارامتر
(%)	(%)	(%)	(%)
A	غلظت نانو ذرات	A ²	مربع غلظت نانو ذرات
۵۸/۷۰			
AE	برهمکنش غلظت نانو ذرات و رسانش حرارتی ماده تغییر فاز دهنده	AE	برهمکنش غلظت نانو ذرات و رسانش حرارتی ماده تغییر فاز دهنده
۲۰/۴۵		۱۲/۰۴	
AD	برهمکنش غلظت و ضریب رسانش حرارتی نانو ذرات	AD	برهمکنش غلظت و ضریب رسانش حرارتی نانو ذرات
۶/۷۳		۱۱/۴۶	
E	ضریب رسانش حرارتی ماده تغییر فاز دهنده	AB	برهمکنش غلظت و اندازه نانو ذرات
۶/۱۹		۹/۵۵	
AB	برهمکنش غلظت و اندازه نانو ذرات	D ²	مربع ضریب رسانش حرارتی نانو ذرات
۴/۷۷		۴/۳۸	
A ²	مربع غلظت نانو ذرات	E	ضریب رسانش حرارتی ماده تغییر فاز دهنده
۱/۶۴		۱/۳۰	
AC	برهمکنش غلظت نانو ذرات و دما	B	اندازه نانو ذرات
۱/۲۱		۱/۰۳	
D	ضریب رسانش حرارتی نانو ذرات	D	ضریب رسانش حرارتی نانو ذرات
۰/۹۴		۰/۷۷	
DE	برهمکنش ضرایب رسانش حرارتی نانو ذرات و ماده تغییر فاز دهنده	BD	برهمکنش اندازه و ضریب رسانش حرارتی نانو ذرات
۰/۳۴		۰/۷۷	
B	اندازه نانو ذرات		
۰/۳۱			

۴-۳- تعیین محدوده مناسب متغیرهای مستقل

در این بخش به منظور درک بصری نحوه تغییرات ضریب رسانش حرارتی با متغیرهای مستقل و همچنین تعیین بهترین دامنه متغیرهای مستقل مؤثر بر پاسخ از نمودارهای کانتور استفاده شده است. این نمودارها با ارائه رنگ های متفاوت برای سطوح تغییرات، درک مناسبی از اثرات متقابل پارامترهای مهم بر متغیر وابسته ارائه می دهند.

B ²	۰/۲۴	۱	۰/۲۴	۳/۷۴	۰/۰۵۴۲
C ²	۰/۰۲۸	۱	۰/۰۲۸	۰/۴۳	۰/۵۱۰۹
D ²	۱/۸۰	۱	۱/۸۰	۲۷/۵۷	< ۰/۰۰۰۱
E ²	۰/۰۹۰	۱	۰/۰۹۰	۱/۳۸	۰/۲۴۱۳
باقیمانده	۱۵/۲۷	۲۳۴	۰/۰۶۵		
کل	۱۰۲/۸۳	۲۵۴			

همچنین با توجه به اینکه مقدار P برای جملات A, B, D, E, AB, AC, AD, AE, DE و A² در فاز جامد و برای جملات A, B, D, E, AB, AD, AE, BD و A² در فاز مایع کمتر از ۵٪ است، تمامی جملات فوق در مدل درجه دو دارای اهمیت هستند. مقادیر P بیش از ۰/۱ نشان دهنده اهمیت کم مابقی جملات در ضریب رسانش حرارتی فازهای جامد و مایع بوده و می توان از اثر آنها صرف نظر نمود.

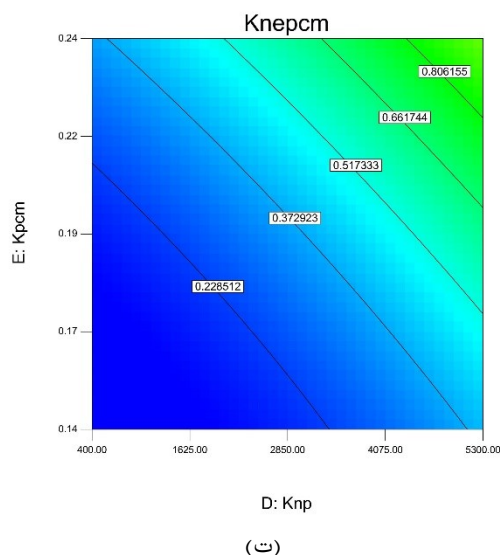
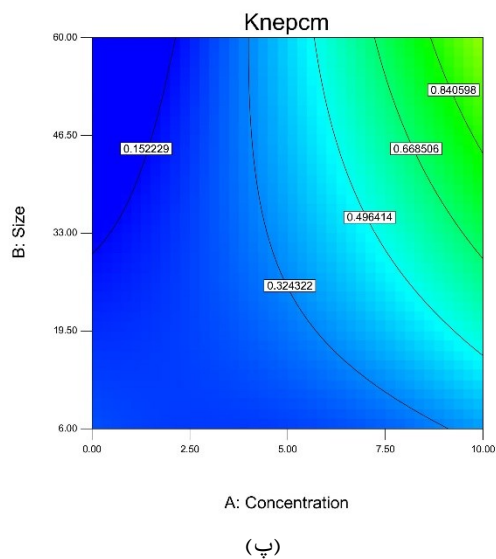
جدول ۵ میزان دقت مدل بدست آمده برای توصیف تغییرات ضریب رسانش حرارتی فازهای جامد و مایع در سراسر فضای طراحی را نشان می دهد. مقدار ضریب همبستگی در فاز جامد نزدیک به ۱ بوده و در فاز مایع نیز قابل قبول است. در هر دو فاز جامد و مایع مقدار R²_{pred} با مقدار R²_{adj} توافق منطقی دارد. همچنین مقدار دقت کفایت بیش از ۴ نشان می دهد که به منظور بررسی تغییرات ضریب رسانش حرارتی در سراسر فضای طراحی در هر دو حالت جامد و مایع می توان از این مدل به خوبی استفاده نمود.

جدول ۵) خلاصه پارامترهای مؤثر بر دقت مدل بدست آمده در توصیف تغییرات ضریب رسانش حرارتی

فاز	R ²	R ² _{adj}	R ² _{pred}	دقت کفایت
جامد	۰/۹۹۵۴	۰/۹۹۴۱	۰/۹۹۱۵	۱۲۶/۰۰۵
مایع	۰/۸۵۱۵	۰/۸۳۸۹	۰/۸۱۶۷	۴۷/۳۸۹

۴-۲- تحلیل حساسیت ضریب رسانش حرارتی

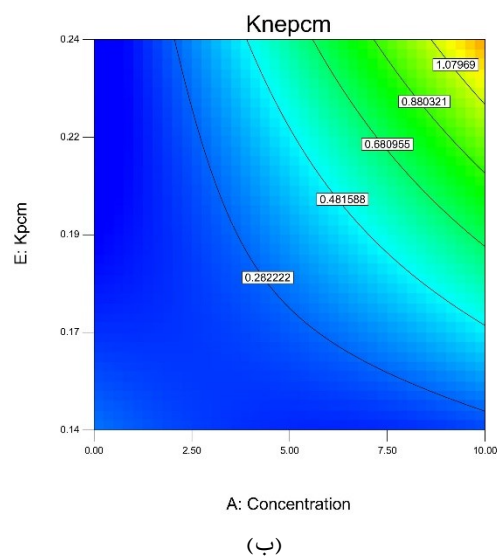
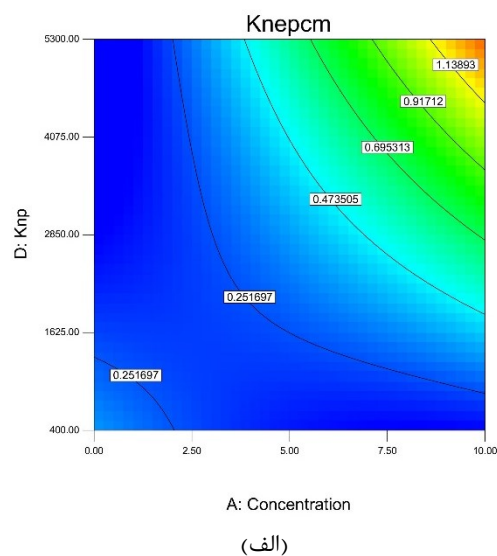
با توجه به مقادیر F در جدول ۴ می توان میزان حساسیت ضریب رسانش حرارتی به متغیرهای مستقل را تفسیر نمود. جدول ۶ میزان تأثیر هر یک از متغیرهای مستقل بر ضریب رسانش حرارتی در فاز جامد و مایع به ترتیب اولویت را نشان می دهد. با توجه به جدول، حساسیت ضریب رسانش حرارتی به سه پارامتر غلظت نانو ذرات، برهمکنش غلظت نانو ذرات و رسانش حرارتی ماده تغییر فاز دهنده و برهمکنش غلظت و ضریب رسانش حرارتی نانو ذرات در هر دو فاز بیش از ۸۰ درصد است. پس از این سه پارامتر، ضریب رسانش حرارتی ماده تغییر فاز دهنده و برهمکنش غلظت و اندازه نانو ذرات (مجموعاً حدود ۱۱ درصد) در فاز جامد و برهمکنش غلظت و اندازه نانو ذرات و مربع ضریب رسانش حرارتی ماده تغییر فاز دهنده (مجموعاً حدود ۱۴ درصد) در فاز مایع نقش کلیدی

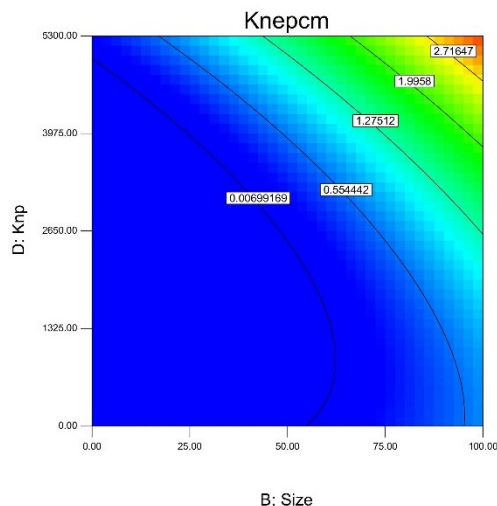


شکل ۱) نمودارهای کانتور برهمکنش عوامل مؤثر بر ضریب رسانایی حرارتی مواد تغییر فاز دهنده بهبود یافته با نانو ذرات کربن در فاز جامد: الف) اثر غلظت (A) و ضریب رسانایی حرارتی نانو ذرات (D)، ب) اثر غلظت (A) و ضریب رسانایی حرارتی ماده تغییر فاز دهنده (E)، پ) اثر غلظت (A) و اندازه نانو ذرات (B)، ت) اثر ضریب رسانایی حرارتی نانو ذرات (D) و ضریب رسانایی حرارتی ماده تغییر فاز دهنده (E).

نمودارهای کانتور برهمکنش عوامل مؤثر بر ضریب رسانش حرارتی در فاز مایع در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل های ۱- الف، ۱- ب و ۱- پ، غلظت در فاز مایع نیز بیشترین تأثیر را دارد به گونه ای که برای حصول K_{nepcm} بیشینه (نواحی زرد و قرمز رنگ) غلظت های بیش از ۷/۵% مورد نیاز است. در صورتی که پارامتر غلظت در حداکثر میزان خود قرار داشته باشد، مقادیر حداقل ضریب رسانش حرارتی و اندازه نانو ذرات به ترتیب برابر با 4700 W/mK و 85 nm، و مقدار حداکثر ضریب رسانش ماده تغییر فاز دهنده برابر با 0/32 W/mK است. در حالتی که ضریب رسانش حرارتی و اندازه نانو ذرات در مقدار بیشینه و ضریب رسانش حرارتی ماده تغییر فاز دهنده در مقدار کمینه باشند، حداقل مقدار غلظت

شکل ۱ نمودارهای کانتور برهمکنش عوامل مؤثر بر ضریب رسانش حرارتی در فاز جامد را نشان می دهد. در نمودارهای ارائه شده با دور شدن از رنگ آبی تیره و نزدیک شدن به رنگ های زرد و قرمز مقدار ضریب رسانش حرارتی ماده تغییر فاز دهنده حاوی نانو ذرات کربن (K_{nepcm}) افزایش می یابد. با دقت به شکل های ۱- الف، ۱- ب و ۱- پ تأثیر قابل ملاحظه غلظت نانو ذرات در قیاس با دیگر پارامترهای مؤثر به وضوح مشخص است. در غلظت های کمتر از ۲/۵% افزایش ضریب رسانش حرارتی و اندازه نانو ذرات و همچنین ضریب رسانش حرارتی ماده تغییر فاز دهنده تأثیر چندانی بر K_{nepcm} ندارد. اما با افزایش غلظت نانو ذرات تأثیر پارامترهای دیگر نیز بیشتر می شود. بنابراین با فرض نیل به حداکثر مقدار K_{nepcm} ، در حالتی که غلظت ۱۰% باشد حداقل مقادیر ضریب رسانش حرارتی نانو ذرات 4500 W/mK، ضریب رسانش حرارتی ماده تغییر فاز دهنده 0/22 W/mK و اندازه نانو ذرات 44 nm خواهد بود. همچنین در صورتی که سایر پارامترها در حداکثر مقدار خود در نظر گرفته شوند، حداقل مقدار غلظت مورد نیاز ۸/۶% خواهد بود.





(ت)

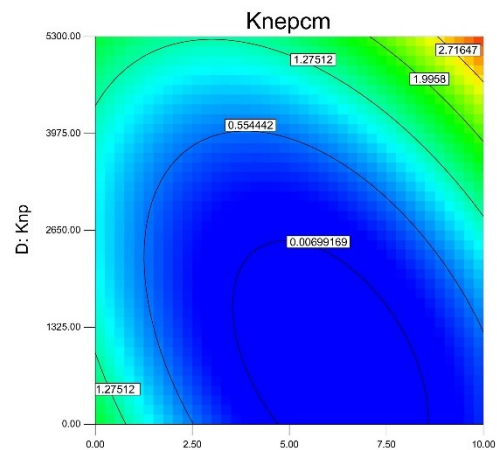
شکل ۲) نمودارهای کانتور برهمکنش عوامل مؤثر بر ضریب رسانایی حرارتی مواد تغییر فاز دهنده بهبود یافته با نانو ذرات کربن در فاز مایع: الف) اثر غلظت (A) و ضریب رسانایی حرارتی نانو ذرات (D)، ب) اثر غلظت (A) و ضریب رسانایی حرارتی ماده تغییر فاز دهنده (E)، پ) اثر غلظت (A) و اندازه نانو ذرات (B)، ت) اثر اندازه نانو ذرات (B) و ضریب رسانایی حرارتی نانو ذرات (D).

باید توجه داشت که استفاده از روش سطح پاسخ به منظور برازش داده‌های تجربی بدون به کارگیری طراحی آزمایش (Design of experiments) دارای اشکالاتی است. عدم استفاده از طراحی آزمایش موجب محدود شدن تعداد داده‌ها در بخش یا بخش‌هایی از ناحیه طراحی می‌شود. در نتیجه مدل حاصل رفتار دقیق سیستم را در این نواحی منعکس نمی‌کند. همچنین تعداد زیاد داده‌ها در برخی از نواحی می‌تواند موجب برازش بیش از اندازه (Overfitting) شود. این امر دقت مدل در پیش بینی مقدار پاسخ در نقاط جدید را کاهش می‌دهد. در نهایت طراحی آزمایش به گونه‌ای ساختار یافته است تا برهمکنش‌های خطی و غیر خطی را تشخیص دهد. در صورت استفاده مستقیم از روش سطح پاسخ ممکن است اثرات غیر خطی در نظر گرفته نشود.

۴-۴- کاربرد در صنعت

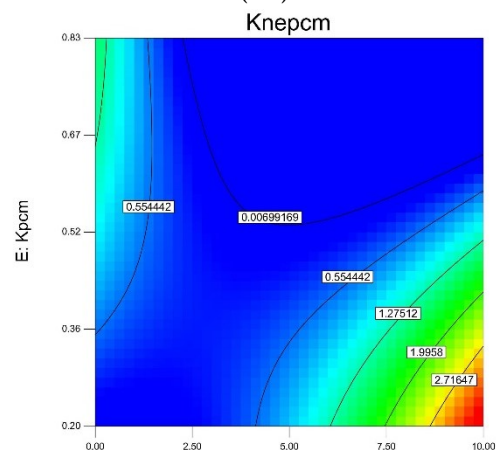
مواد تغییر فاز دهنده در بسیاری از صنایع از جمله غذا، دارو، نساجی، الکترونیک، خودرو سازی، و ساخت و ساز کاربرد دارند. در خودروهای برقی، مواد تغییر فاز دهنده نقش بسزایی در مدیریت انرژی حرارتی در باتری ایفا می‌کنند. این مواد به حفظ دما، ایمنی در طی چرخه‌های شارژ و تخلیه کمک نموده و موجب افزایش عمر و بهبود عملکرد باتری می‌شوند. مواد تغییر فاز دهنده به مدیریت انرژی در داخل کابین خودرو نیز کمک می‌کنند. پارافین وکس بهبود یافته با نانوذرات آلومینیوم اکسید می‌تواند دمای داخل کابین یک خودروی سدان استاندارد را تا ۲۹ درصد افزایش دهد [39].

برای نیل به بیشینه برابر با ۸/۷٪ است. همچنین ضریب رسانش حرارتی بهبود یافته در فاز مایع در غلظت‌های کمتر از ۱٪ با افزایش ضریب رسانش حرارتی ماده تغییر فاز دهنده روند صعودی داشته و در غلظت‌های بیشتر از ۳٪ با این پارامتر رابطه معکوس دارد.



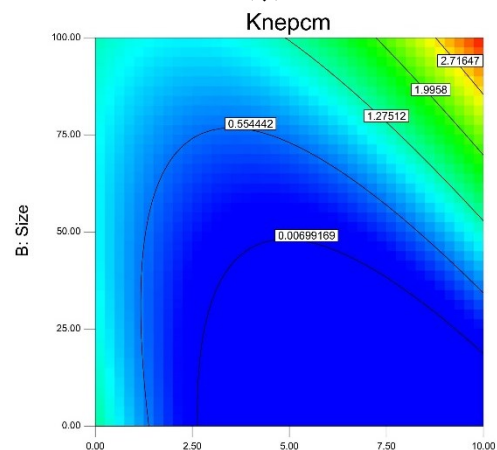
A: Concentration

(الف)



A: Concentration

(ب)



A: Concentration

(پ)

- physical properties, applications and challenges. *Journal of Energy Storage*. 2019;21:18-31.
- 2- Said Z, Pandey AK, Tiwari AK, Kalidasan B, Jamil F, Thakur AK, Tyagi VV, Sarı A, Ali HM. Nano-enhanced phase change materials: Fundamentals and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2024;104:101162.
- 3- Reddy VJ, Ghazali MF, Kumarasamy S. Innovations in phase change materials for diverse industrial applications: A comprehensive review. *Results in Chemistry*. 2024;101552.
- 4- Lin X, Qiu C, Wang K, Zhang Y, Wan C, Fan M, Wu Y, Sun W, Guo X. Biomimetic bone tissue structure: an ultrastrong thermal energy storage wood. *Chemical Engineering Journal*. 2023;457:141351.
- 5- Karaağaç MO. Performance evaluation of nano-enhanced phase change materials for thermal energy storage: An experimental study. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024;64:105412.
- 6- Tan S, Zhang X. Progress of research on phase change energy storage materials in their thermal conductivity. *Journal of Energy Storage*. 2023;61:106772.
- 7- Gür M, Gürgeç E, Coşanay H, Öztop HF. Solar-assisted radiant heating system with nano-B4C enhanced PCM for nearly zero energy buildings. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2025;65:105544.
- 8- Rashid FL, Dhaidan NS, Mahdi AJ, Azziz HN, Parveen R, Togun H, Homod RZ. Heat transfer enhancement of phase change materials using letters-shaped fins: A review. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2024;159:108096.
- 9- Bhagat K, Saha SK. Numerical analysis of latent heat thermal energy storage using encapsulated phase change material for solar thermal power plant. *Renewable energy*. 2016;95:323-36.
- 10- Dhaidan N, Hashim H, Abbas A, Khodadadi J, Almosawy W, Al-Mousawi F. Discharging of PCM in various shapes of thermal energy storage systems: a review. *Journal of Thermal Science*. 2023;32(3):1124-54.
- 11- Shoeibi S, Kargarsharifabad H, Rahbar N. Effects of nano-enhanced phase change material and nano-coated on the performance of solar stills. *Journal of Energy Storage*. 2021;42:103061.
- 12- Dhaou MH, Mellouli S, Alresheedi F, El-Ghoul Y. Experimental assessment of a solar water tank integrated with nano-enhanced PCM and a stirrer. *Alexandria Engineering Journal*. 2022;61(10):8113-22.
- 13- Taheri M, Pourfayaz F, Hemmati S. A highly accurate model for prediction of thermal conductivity of carbon-based nano-enhanced PCMs using an artificial neural network. *Energy Reports*. 2023;10:1249-58.
- 14- Cui Y, Liu C, Hu S, Yu X. The experimental exploration of carbon nanofiber and carbon nanotube additives on thermal behavior of phase change materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2011;95(4):1208-12.
- 15- Wang Y, Tang B, Zhang S. Single-walled carbon nanotube/phase change material composites: sunlight-driven, reversible, form-stable phase

استفاده از نانوذرات کربن نه تنها موجب افزایش ضریب رسانش حرارتی ماده تغییر فاز دهنده می شود، بلکه ترکیب ماده حاصل با سیمان استحکام مکانیکی آن را بهبود می بخشد. به عنوان نمونه، ترکیب حاصل از نانوذرات اکسید گرافن، هیدرات نمک و رزین پلی یورتان اکریلات موجب افزایش مقاومت مکانیکی سیمان شده است [40].

مطالعه حاضر با تعیین میزان حساسیت ضریب رسانش حرارتی مواد تغییر فاز دهنده بهبود یافته با نانو ذرات کربن می تواند به بهینه سازی این مواد در بخش صنعت کمک شایانی نماید. با توجه به حساسیت بیش از ۸۰ درصدی ضریب رسانش حرارتی ماده تغییر فاز دهنده به سه پارامتر غلظت نانو ذرات کربن، ضریب رسانش حرارتی ماده تغییر فاز دهنده، و ضریب رسانش حرارتی نانو ذرات کربن، تمرکز بر متغیرهای فوق موجب کاهش زمان و هزینه بهینه سازی مواد می گردد. بدین ترتیب در تحقیقات آینده، بویژه در مراحل ابتدایی و مطالعات امکان سنجی، می توان از متغیرهای اندازه نانو ذرات و دما صرف نظر نمود.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از داده های تجربی گذشته و به کارگیری طراحی آزمایش و روش سطح پاسخ، تأثیر استفاده از نانو ذرات کربن در بهبود رسانش حرارتی مواد تغییر فاز دهنده مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ضریب رسانش حرارتی ماده تغییر فاز دهنده بهبود یافته با نانو ذرات کربن به عنوان تابعی از غلظت نانو ذرات، اندازه نانو ذرات، دما، ضریب رسانش حرارتی نانو ذرات و ماده تغییر فاز دهنده خالص در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که غلظت نانو ذرات نقش کلیدی در ضریب رسانش حرارتی بهبود یافته در هر دو فاز جامد و مایع را دارد، در حالی که می توان از اثر دما صرف نظر نمود. بررسی نمودارهای کانتور اثرات متقابل متغیرهای مستقل نشان داد که ضریب رسانش حرارتی بهبود یافته در فاز جامد با افزایش غلظت نانو ذرات، اندازه نانو ذرات، ضریب رسانش حرارتی نانو ذرات و ماده تغییر فاز دهنده افزایش می یابد. در مقابل ضریب رسانش حرارتی بهبود یافته در فاز مایع در غلظت های کمتر از ۱٪ با افزایش ضریب رسانش حرارتی ماده تغییر فاز دهنده روند صعودی داشته و در غلظت های بیشتر از ۳٪ با این پارامتر رابطه معکوس دارد.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: تعارض منافی برای اظهار وجود ندارد.

منابع

- 1- Leong KY, Rahman MR, Gurunathan BA. Nano-enhanced phase change materials: A review of thermo-

- 30- Cui Y, Liu C, Hu S, Yu X. The experimental exploration of carbon nanofiber and carbon nanotube additives on thermal behavior of phase change materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2011;95(4):1208-12.
- 31- Qian T, Li J, Feng W, Nian HE. Single-walled carbon nanotube for shape stabilization and enhanced phase change heat transfer of polyethylene glycol phase change material. *Energy Conversion and Management*. 2017;143:96-108.
- 32- Motahar S, Alemrajabi AA, Khodabandeh R. Enhanced thermal conductivity of n-octadecane containing carbon-based nanomaterials. *Heat and Mass Transfer*. 2016;52(8):1621-31.
- 33- Qu Y, Wang S, Zhou D, Tian Y. Experimental study on thermal conductivity of paraffin-based shape-stabilized phase change material with hybrid carbon nano-additives. *Renewable Energy*. 2020;146:2637-45.
- 34- Han Z, Fina A. Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: A review. *Progress in polymer science*. 2011;36(7):914-44.
- 35- Amin M, Putra N, Kosasih EA, Prawiro E, Luanto RA, Mahlia TM. Thermal properties of beeswax/graphene phase change material as energy storage for building applications. *Applied Thermal Engineering*. 2017;112:273-80.
- 36- Xiang J, Drzal LT. Thermal conductivity of exfoliated graphite nanoplatelet paper. *Carbon*. 2011;49(3):773-8.
- 37- Wang J, Xie H, Xin Z. Thermal properties of heat storage composites containing multiwalled carbon nanotubes. *Journal of applied physics*. 2008;104(11).
- 38- Fan LW, Fang X, Wang X, Zeng Y, Xiao YQ, Yu ZT, Xu X, Hu YC, Cen KF. Effects of various carbon nanofillers on the thermal conductivity and energy storage properties of paraffin-based nanocomposite phase change materials. *Applied Energy*. 2013;110:163-72.
- 39- Gürbüz H, Aytaç HE, Hamamcıoğlu E, Akçay H. The Effect of Al₂O₃ Addition on Solidification Process of Phase Change Material: A Case Study on Heating of Automobile Cabin in Cold Climate Conditions. *International Journal of Automotive Science and Technology*. 2022;6(3):275-83.
- 40- Jia M, Yu K, Liu Y, Yang Y. Enabling superior thermo-mechanical performance of hydrated salt-based phase change energy storage cementitious composite using graphene oxide reinforced micro-interface. *Journal of Building Engineering*. 2023;76:107166.
- transitions for solar thermal energy storage. *Advanced Functional Materials*. 2013;23(35):4354-60.
- 16- Ye F, Ge Z, Ding Y, Yang J. Multi-walled carbon nanotubes added to Na₂CO₃/MgO composites for thermal energy storage. *Particuology*. 2014;15:56-60.
- 17- Elgafy A, Lafdi K. Effect of carbon nanofiber additives on thermal behavior of phase change materials. *Carbon*. 2005;43(15):3067-74.
- 18- Wang J, Xie H, Xin Z. Thermal properties of paraffin based composites containing multi-walled carbon nanotubes. *Thermochimica Acta*. 2009;488(1-2):39-42.
- 19- Wang J, Xie H, Xin Z, Li Y, Chen L. Enhancing thermal conductivity of palmitic acid based phase change materials with carbon nanotubes as fillers. *Solar Energy*. 2010;84(2):339-44.
- 20- Zeng JL, Liu YY, Cao ZX, Zhang J, Zhang ZH, Sun LX, Xu F. Thermal conductivity enhancement of MWNTs on the PANI/tetradecanol form-stable PCM. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2008;91:443-6.
- 21- Zeng JL, Cao Z, Yang DW, Xu F, Sun L, Zhang X, Zhang L. Effects of MWNTs on phase change enthalpy and thermal conductivity of a solid-liquid organic PCM. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2009;95(2):507-12.
- 22- Li MJ, Shi YQ, Lan TY, Yang HH, Chen GN. Solid-state electrochemiluminescence of two iridium (III) complexes. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2013;702:25-30.
- 23- He M, Yang L, Lin W, Chen J, Mao X, Ma Z. Preparation, thermal characterization and examination of phase change materials (PCMs) enhanced by carbon-based nanoparticles for solar thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*. 2019;25:100874.
- 24- Wang J, Xie H, Xin Z, Li Y. Increasing the thermal conductivity of palmitic acid by the addition of carbon nanotubes. *Carbon*. 2010;48(14):3979-86.
- 25- Fang X, Fan LW, Ding Q, Wang X, Yao XL, Hou JF, Yu ZT, Cheng GH, Hu YC, Cen KF. Increased thermal conductivity of eicosane-based composite phase change materials in the presence of graphene nanoplatelets. *Energy & Fuels*. 2013;27(7):4041-7.
- 26- Fang X, Fan LW, Ding Q, Wang X, Yao XL, Hou JF, Yu ZT, Cheng GH, Hu YC, Cen KF. Increased thermal conductivity of eicosane-based composite phase change materials in the presence of graphene nanoplatelets. *Energy & Fuels*. 2013;27(7):4041-7.
- 27- Meng X, Zhang H, Sun L, Xu F, Jiao Q, Zhao Z, Zhang J, Zhou H, Sawada Y, Liu Y. Preparation and thermal properties of fatty acids/CNTs composite as shape-stabilized phase change materials. *Journal of thermal analysis and calorimetry*. 2013;111:377-84.
- 28- Ye F, Ge Z, Ding Y, Yang J. Multi-walled carbon nanotubes added to Na₂CO₃/MgO composites for thermal energy storage. *Particuology*. 2014;15:56-60.
- 29- Wang Y, Tang B, Zhang S. Single-walled carbon nanotube/phase change material composites: sunlight-driven, reversible, form-stable phase transitions for solar thermal energy storage. *Advanced Functional Materials*. 2013;23(35):4354-60.