

شبیه‌سازی مدیریت گرمایی مواد نانوکامپوزیت تغییر فاز دهنده توسط فناوری CFD

عزیز باباپور*⁺، رضا پیشکار آذری

گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

سید ایمان گلستانه

گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

زهره قاضی طباطبائی

گروه شیمی کاربردی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

چکیده: بحران انرژی در قرن حاضر، بشر را به فکر استفاده از منابع نوین انرژی رهنمون ساخته است. یکی از این منابع بسیار کارآمد، مواد تغییر فاز دهنده است. این مواد، افزون بر ذخیره‌ی انرژی به‌عنوان عایق‌های گرمایی نیز به‌کار می‌روند و استفاده از این مواد، نیاز به سامانه‌های ایمن‌سازی مصرف انرژی را نیز حذف می‌کند. این مواد با وجود همه برتری‌ها، مشکل‌هایی از جمله نشتی و کم بودن ضریب هدایت گرمایی دارند. در نتیجه استفاده از نانوذره‌های فلزی می‌تواند ویژگی‌های آن‌ها را بهبود بخشد. در این پژوهش، ذوب شدن واکس پارافین دارای نانوذره‌های ZnO و SiO_2 ، Fe_2O_3 ، Al_2O_3 (با درصد وزنی ۲٪ و ۸٪) در یک محفظه‌ی مستطیلی شکل، به وسیله‌ی نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شده است. تأثیر وجود نانوذره‌ها با درصد وزنی متفاوت بر توزیع دما، توزیع سرعت، دانسیته، ضریب هدایت گرمایی و هم‌چنین چگونگی ذوب‌شوندگی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که با افزودن ۸٪ وزنی نانوذره‌ها، ضریب هدایت گرمایی ۱۲٫۵٪ افزایش داشته است. با ایجاد شرایط مرزی و اولیه‌ی یکسان برای همه‌ی حالت‌ها، میزان ذوب شدن در حالت ۸٪ وزنی نانوذره‌ها، بیش‌تر از ۲٪ و پارافین خالص است و این نشان می‌دهد که افزودن نانوذره‌ها به پارافین به منظور افزایش نرخ ذوب شدن برای هدف‌های گوناگون مدیریت گرمایی مانند ذخیره‌سازی انرژی می‌تواند مفید باشد.

واژه‌های کلیدی: مواد تغییر فاز دهنده؛ نانوذره‌ها؛ کامسول؛ پارافین؛ هدایت گرمایی.

KEYWORDS: Phase Change Materials (PCMs); Nanoparticles; Comsol; Paraffin; Heat Conduction.

مقدمه

امروزه فناوری نانو، به‌عنوان یکی از فناوری‌های پیش‌تاز در عرصه‌ی جهانی ظهور کرده و بهینه‌سازی انرژی با استفاده از این فناوری مورد پژوهش فراوان قرار گرفته است. به دلیل محدودیت منابع انرژی و مسائل زیست‌محیطی،

*عهده دار مکاتبات

+E-mail: Babapoor2006@yahoo.com , babapoor@uma.ac.ir

مهندسی، هزینه‌های بالای تجهیزهای آزمایشگاهی و محدودیت استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری در بسیاری از کاربردهای علمی، از جمله دلایلی هستند که استفاده از روش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی را در مقایسه با روش‌های عددی محدود می‌کنند [۷، ۱۲].

وانگ^(۲) و همکاران [۱۳]، تأثیرهای افزودن نانوذره TiO_2 بر بهبود ویژگی‌های گرمایی واکس پارافین را بررسی کردند و اثر چشمگیر نانوذرها را بر بهبود ضریب هدایت گرمایی گزارش کردند. هو و همکاران [۱۴] با استفاده از سورفکتانت غیریونی، نانوذره‌های Al_2O_3 را در پارافین، پخش کردند و اثرهای افزودن نانوذرها بر ویژگی‌های ترموفیزیکی پارافین را بررسی کردند. نتیجه‌ها نشان داد که بهبود چشمگیری در بیش‌تر ویژگی‌های ترموفیزیکی پارافین به دست آمده است. والان آراسو و همکاران [۱۵] تأثیر افزودن نانوذره‌های Al_2O_3 را بر ویژگی‌های ترموفیزیکی پارافین، شبیه‌سازی کردند و متوجه شدند که نانوذره‌های آلومینوم اکسید ویژگی‌های گرمایی پارافین از جمله ضریب هدایت گرمایی را به میزان چشمگیری بهبود می‌بخشد.

با وجود برخی پژوهش‌ها، خلاء بسیار اساسی در شبیه‌سازی مواد نانوکامپوزیت تغییرفازدهنده وجود دارد. در هیچ پژوهشی، شبیه‌سازی نانوذره‌های گوناگون با درصد‌های وزنی گوناگون گزارش نشده است. در پژوهش‌های پیشین، ویژگی‌های گوناگون گرمایی بررسی نشده است. در این پژوهش، اثرهای نانوذره‌های Al_2O_3 ، Fe_2O_3 ، SiO_2 و ZnO (با درصد وزنی ۲٪ و ۸٪) در یک محفظه‌ی مستطیلی شکل، به وسیله نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شده است. تأثیر وجود نانوذرها با درصدوزنی متفاوت بر توزیع دما، توزیع سرعت، دانسیته، ضریب هدایت گرمایی و همچنین چگونگی ذوب‌شوندگی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتیجه‌های شبیه‌سازی، بهبود چشمگیری در ویژگی‌های ترموفیزیکی و گرمایی را نشان می‌دهد که می‌تواند در بهینه‌سازی مدیریت گرمایی سامانه‌های گوناگون مورد استفاده قرار بگیرد.

مدل‌سازی

شکل هندسی مسئله

به منظور شبیه‌سازی با نرم‌افزار کامسول، یک محفظه‌ی مستطیلی شکل دوبعدی در اندازه‌ی $20\text{mm} \times 15\text{mm}$ در نظر گرفته شده است که شکل ۲ این محفظه را نشان می‌دهد. دمای سطح

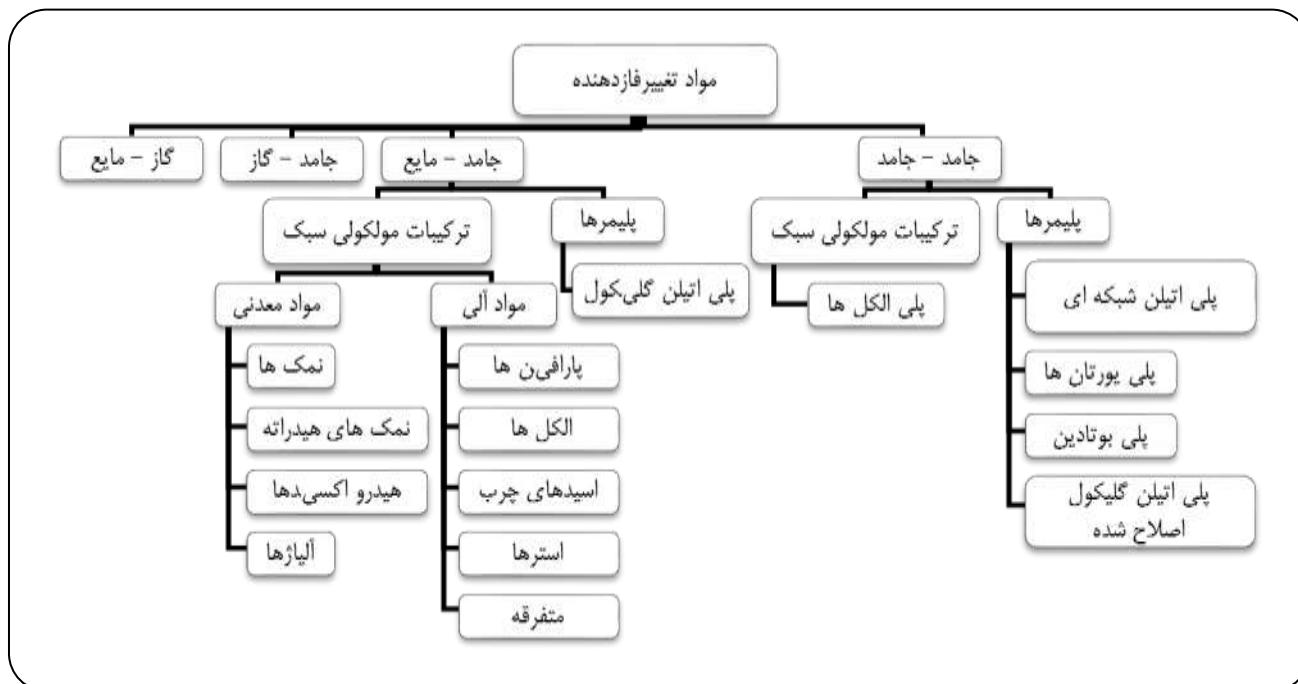
همه کشورها اعم از صنعتی و در حال توسعه، استفاده بهینه از انرژی را در دستور کار خود قرار داده‌اند [۱، ۲]. کمبود سوخت‌های فسیلی و افزایش روزافزون مصرف انرژی در دنیای امروزی، لزوم بهینه‌سازی انرژی را بیش از پیش نمایان می‌سازد. در نتیجه استفاده از انرژی‌های نوین و سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی در سال‌های گذشته، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. از مهم‌ترین روش‌های ذخیره‌سازی انرژی گرمایی، استفاده از مواد تغییرفازدهنده (PCMs)^(۱) هستند، موادی که در مواقع لزوم تغییر فاز می‌دهند، انرژی را در شکل‌های گوناگون در خود ذخیره کرده و در مواقع لزوم آزاد می‌کنند. مواد تغییرفازدهنده، قابلیت آن را دارند که این انرژی نهفته گرمایی (گرمای نهان ذوب و گرمای نهان انجماد) را بدون هیچ‌گونه تغییری حتی پس از هزاران چرخه تغییر فاز، درون خود حفظ نمایند. برای افزایش کارایی PCMها، انواع نانومواد تغییرفازدهنده در مطالعه‌های گوناگونی مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند که پارامترهایی مانند افزایش ضریب انتقال گرما، افزایش ظرفیت گرمایی، پایداری گرمایی و شیمیایی مدنظر بوده است. فناوری نانو و استفاده از نانومواد تغییرفازدهنده در این بین، با قابلیت جذب و ذخیره‌ی بالای انرژی گرمایی از روش‌های نوین این فناوری است [۱، ۳].

شکل ۱ انواع مواد تغییرفازدهنده را نشان می‌دهد. یکی از مواد تغییرفازدهنده مهم و کاربردی، پارافین‌ها هستند. واکس‌های پارافینی به دلیل داشتن گرمای نهان بالا، فشار بخار پایین، پایداری شیمیایی، بی‌اثر بودن و ارزان بودن گزینه مناسبی برای کاربرد به عنوان مواد تغییرفازدهنده هستند. پارافین‌ها به طور عموم هدایت گرمایی پایینی دارند، بنابراین بهبود هدایت گرمایی این مواد تغییرفازدهنده، برای افزایش انتقال گرما، ضروری می‌باشد. یکی از بهترین روش‌ها برای بهبود ویژگی‌های گرمایی، افزودن نانوذره‌های گوناگون به پارافین و تولید نانوکامپوزیت است [۱۱-۳].

در حال حاضر، استفاده از روش‌های حل عددی و نرم‌افزارهای شبیه‌سازی در محاسبه‌های کامپیوتری، علوم و مهندسی کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند و به عنوان ابزاری کارآمد در طراحی وسایل مهندسی به کار می‌روند. در دهه ۱۹۸۰ میلادی با همت پژوهشگران زیادی، نرم‌افزارهای شبیه‌سازی گوناگونی روانه بازار شدند. دقت این نرم‌افزارها توسط پژوهشگران زیادی مورد تأیید قرار گرفته است. پیچیدگی معادله‌های حاکم بر مسئله، تأثیر متغیرهای فیزیکی گوناگون، غیر پایا بودن بیش‌تر مسئله‌های

(۱) Phase Change Materials (PCMs)

(۲) Wang



شکل ۱- طبقه‌بندی مواد تغییر فاز دهنده [۵].

فرضیه‌های مدل

- برای مدل‌سازی سامانه مورد نظر، فرضیه‌هایی برای ساده‌سازی به صورت زیر اعمال می‌شود [۱۶-۱۸]:
- جریان سیال پارافین ذوب شده، به صورت لایه‌ای بوده و تلفات به علت گرانشی، ناچیز در نظر گرفته شده است.
 - ویژگی‌های فیزیکی مخلوط نانوکامپوزیت، تابعی از دما در نظر گرفته شده است.
 - انتقال گرما در این سامانه هم به صورت هدایتی و هم به صورت جابه‌جایی صورت می‌گیرد.
 - تغییر حجم کل سامانه، با فرایند ذوب پارافین ناچیز در نظر گرفته شده است.
 - پارافین ذوب شده، یک سیال نیوتونی فرض می‌شود.

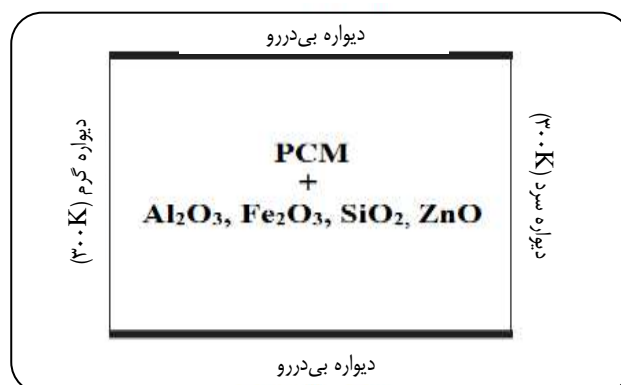
معادله‌های حاکم در وضعیت تک فازی

معادله‌های حاکم بر سامانه به صورت زیر می‌باشند [۱۶-۱۸]:
معادله پیوستگی:

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

معادله مومنتوم:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho \bar{U}) + \nabla \cdot (\rho \bar{U} \bar{U}) = -\nabla P + \rho \bar{g} + \nabla \cdot \bar{\tau} + \bar{F} \quad (2)$$



شکل ۲- هندسه سامانه.

سمت راست ۳۰۰ درجه کلون و دمای سطح سمت چپ ۳۳۰ درجه کلون قرار داده شده است. دو سطح بالا و پایین بی‌دررو در نظر گرفته شده است. مقدار درصدوزنی نانوذره‌های اکسید فلزی شامل Al_2O_3 ، Fe_2O_3 ، SiO_2 و ZnO در واکس پارافین، ۲ درصد و ۸ درصد می‌باشد. فشار مرجع 101.3 kPa و دمای مرجع ۲۷۳ درجه کلون است. با داشتن شرط اولیه ۳۰۰ درجه کلون، پس از گذشت زمان ۴۲۰۰ ثانیه چگونگی ذوب شدن قابل دیدن می‌باشد. زمان در نظر گرفته شده برای اجرای برنامه، ۴۲۰۰ ثانیه می‌باشد تا در این مدت پارافین بتواند در حد مناسبی برای استخراج نتیجه‌ها، ذوب شود.

معادله‌ی انرژی:

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{U} H) = \nabla \cdot (K \nabla T) + S \quad (3)$$

معادله‌ی هدایت غیرپایا، حاکم بر تمامی لایه‌ها در حالت تک فاز می‌باشد. شایان ذکر است که به دلیل جریان نیافتن ماده تغییرفازدهنده و قرارگیری این مواد بین مواد دیگر که تغییر فاز نمی‌دهند، از انتقال گرمای جابه‌جایی صرف‌نظر شده است.

$$k_n \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho_n C_n \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

شرایط مرزی مسئله نیز، به‌صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند که T_L دمای محیط بیرون و T_0 دمای محیط درون است:

$$T(\infty, t) = T_0 \quad (5)$$

$$T(L, t) = T_L(t) \quad (6)$$

در معادله‌های فوق k_n ، ρ_n و C_n به ترتیب ضریب هدایت گرمایی، چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه می‌باشند. با اعمال روش تفاضل‌های محدود بر معادله هدایت غیرپایا، بسط مرکزی برای مکان و بسط پیشرو برای زمان در درون هر یک از لایه‌ها به‌صورت زیر خواهد بود:

$$T_i^{j+1} = T_i^j + \frac{K_n \Delta t}{\rho_n c_n \Delta x^2} k_{pcm} (T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j) \quad (7)$$

برای فصل مشترک داخلی و خارجی نیز معادله هدایت غیرپایا به ترتیب به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$T_i^{j+1} = T_i^j + \frac{2\Delta t}{[(\rho c)_{ins} + (\rho c)_{pcm}] \Delta x^2} \times \quad (8)$$

$$[k_{ins} (T_{i-1}^j - T_i^j) + k_{pcm} (T_{i+1}^j - T_i^j)]$$

$$T_i^{j+1} = T_i^j + \frac{2\Delta t}{[(\rho c)_{ins} + (\rho c)_{pcm}] \Delta x^2} \times \quad (9)$$

$$[k_{pcm} (T_{i-1}^j - T_i^j) + k_{ins} (T_{i+1}^j - T_i^j)]$$

در معادله‌های بالا، زیرنویس pcm نشانگر ماده تغییرفازدهنده و زیرنویس ins، لایه‌های عایق را نشان می‌دهد.

مدل سازی ویژگی‌های ترموفیزیکی مواد تغییر فاز دهنده

ویژگی‌های ترموفیزیکی مواد نانوکامپوزیت تغییرفازدهنده با توجه به ویژگی‌های مواد تغییرفازدهنده و نانوذره‌ها استفاده شده، از جدول ۱ و معادله‌های زیر به‌دست می‌آیند [۱۸، ۱۷]:

$$\rho_{npcm} = \phi \rho_{np} + (1 - \phi) \rho_{pc} \quad (10)$$

$$K_{npcm} = \frac{K_{np} + 2K_{pc} - 2(K_{pc} - K_{np})\phi}{K_{np} + 2K_{pc} + (K_{pc} - K_{np})\phi} K_{pc} + \quad (11)$$

$$5 \times 10^{-4} \beta_k \xi \phi \rho_{pc} C_{pcm} \sqrt{\frac{BT}{\rho_{np} d_{np}}} f(T, \phi)$$

$$\beta_k = 8,440.7(1.0 - \phi)^{-1.77 \times 10^4} \quad (12)$$

$$f(T, \phi) = \left(2,8217 \times 10^{-2} \phi + 3,917 \times 10^{-3} \right) \frac{T}{T_{ref}} \quad (13)$$

$$(-3,0669 \times 10^{-2} \phi + 0.0391123)$$

$$\beta = 0 \quad \text{if} \quad T < T_{solidus} \quad (14)$$

$$\beta = 1 \quad \text{if} \quad T < T_{liquidus} \quad (15)$$

$$\beta = \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} \quad \text{if} \quad T_{solidus} < T < T_{liquidus} \quad (16)$$

اختلاف میان نقطه‌ی شروع فرایند ذوب و نقطه‌ی پایان فرایند ذوب (بازه‌ی دمای ذوب) منجر به تعریف پارامتری به نام بتا (β) می‌شود. β کسر مایع شدن پارافین می‌باشد که پیش از شروع ذوب صفر و پس از اینکه پارافین به طور کامل مایع شد، یک می‌باشد و در بازه‌ی ذوب شدن عددی بین صفر و یک است. B ضریب بولتزمن می‌باشد که برابر با $1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ می‌باشد. ضریب هدایت گرمایی، از مدل ماکسول و مدل حرکت براونی پیروی می‌کند. ∅ نشان دهنده‌ی کسر حجمی اکسید آلومینیوم در پارافین است [۱۷].

انتخاب مدل فیزیکی

در این نرم‌افزار، مدل‌های فیزیکی گوناگونی به صورت پیش‌فرض برای بررسی انواع مسائل در اختیار کاربر قرار می‌گیرد. همچنین در مواردی که مدل سامانه مورد بررسی، در پیش‌فرض‌های نرم‌افزار وجود نداشته باشد امکان وارد نمودن مدل جدید، برای کاربر فراهم شده است. در این پژوهش، مدل انتقال گرما^(۱) انتخاب شده است [۱۸].

(۱) Heat Transfer

جدول ۱- ویژگی‌های ترموفیزیکی پارافین و نانوذره‌های استفاده شده.

Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	ZnO	واکس پارافین	خاصیت
۳۹۰۰	۵۲۴۰	۲۴۰۰	۵۶۰۶	۷۵۰/۰٫۰۱(T-۳۱۹/۱۵)+۱	دانسیته (kg/m ³)
۴۱٫۱	۶٫۴	۲٫۴	۲۱	۰٫۲۱ if T < T _{solidus} ۰٫۱۲ if T > T _{liquidus}	ضریب هدایت حرارتی (W/m K)
-	-	-	-	۱۷۳۴۰۰	گرمای نهان ذوب (J/kg)
-	-	-	-	۳۱۹	دمای انجماد (K)
-	-	-	-	۳۲۱	دمای ذوب (K)
۲۰	۲۰	۲۰	۵۰	-	اندازه نانوذرات (nm)

تغییرفازدهنده، باعث افزایش دمای ذوب این نانوکامپوزیت‌ها می‌شود که اندازه‌ی مناسب و توزیع همگن نانوذره‌ها نیز، بر این تغییرهای دمایی می‌تواند تأثیرگذار باشد. همچنین با گذشت زمان برای درصد‌های وزنی گوناگون نانوکامپوزیت‌ها، دما افزایش پیدا کرده و برای نانوکامپوزیت با درصدوزنی زیاد نانوذره‌ها، در قسمت بیش‌تری از سامانه، تغییرهای دمایی وجود دارد. مقایسه نمودارهای تغییرهای دمایی کامپوزیت‌ها نشان می‌دهد که تغییرهای دمایی در نانوکامپوزیت‌های SiO₂ و ZnO بیش‌تر از سایر نانوکامپوزیت‌ها می‌باشد. این می‌تواند به علت ساختار مناسب این نانوذره‌ها و توزیع یکنواخت آن‌ها در داخل پارافین باشد. در نتیجه می‌توان گفت از نظر تغییرهای دمایی، نانوکامپوزیت‌های SiO₂ و ZnO بهترین نانوکامپوزیت‌ها بوده و می‌توانند در انتقال گرمای بیش‌تر در مدیریت گرمایی سامانه‌های گوناگون مورد استفاده قرار گیرند.

ب) تغییرهای دانسیته

شکل‌های ۷، ۸، ۹ و ۱۰ به ترتیب نمودار تغییرهای دانسیته در حضور نانوذره‌های آلومینیوم اکسید، آهن اکسید، سیلیس اکسید و روی اکسید با ۲٪ وزنی (الف و ب) و ۸٪ وزنی (ج و د) درون پارافین را در سه زمان متفاوت نشان می‌دهند. همان‌گونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود، با گذشت زمان، میزان دانسیته نانوکامپوزیت‌ها افزایش می‌یابد. هر چه میزان بیش‌تری از پارافین ذوب شود حرکت مواد ذوب شده، بیش‌تر شده و برخورد آن‌ها با یکدیگر بیش‌تر می‌شود. و با افزایش درصدوزنی این نانوذره‌ها، دانسیته افزایش می‌یابد. که این مسئله، با توجه به دانسیته بالای نانوذره‌ها، قابل توجیه است.

شرایط اولیه و مرزی

برای حل رابطه‌های مذکور، به شرایط مرزی و اولیه‌ی مناسبی نیاز است تا بتوان تابع توزیع دما را به دست آورد. نرم‌افزار کامسول نیز، برای حل عددی این رابطه و به دست آوردن دمای تک‌تک نقطه‌های جسم، به شرایط مرزی مناسب نیاز دارد که کاربر باید آن را تعریف کند [۱۷]. در این پژوهش، مهم‌ترین شرط مرزی، به تبادل گرما از طریق دیواره سطوح و محیط اطراف آن مربوط می‌شود. هنگامی که یک صفحه داغ در مجاورت سیال قرار می‌گیرد گرما به روش جابه‌جایی مبادله می‌شود. در نتیجه بین دیواره‌ها و محیط، شرط مرزی زیر برقرار است:

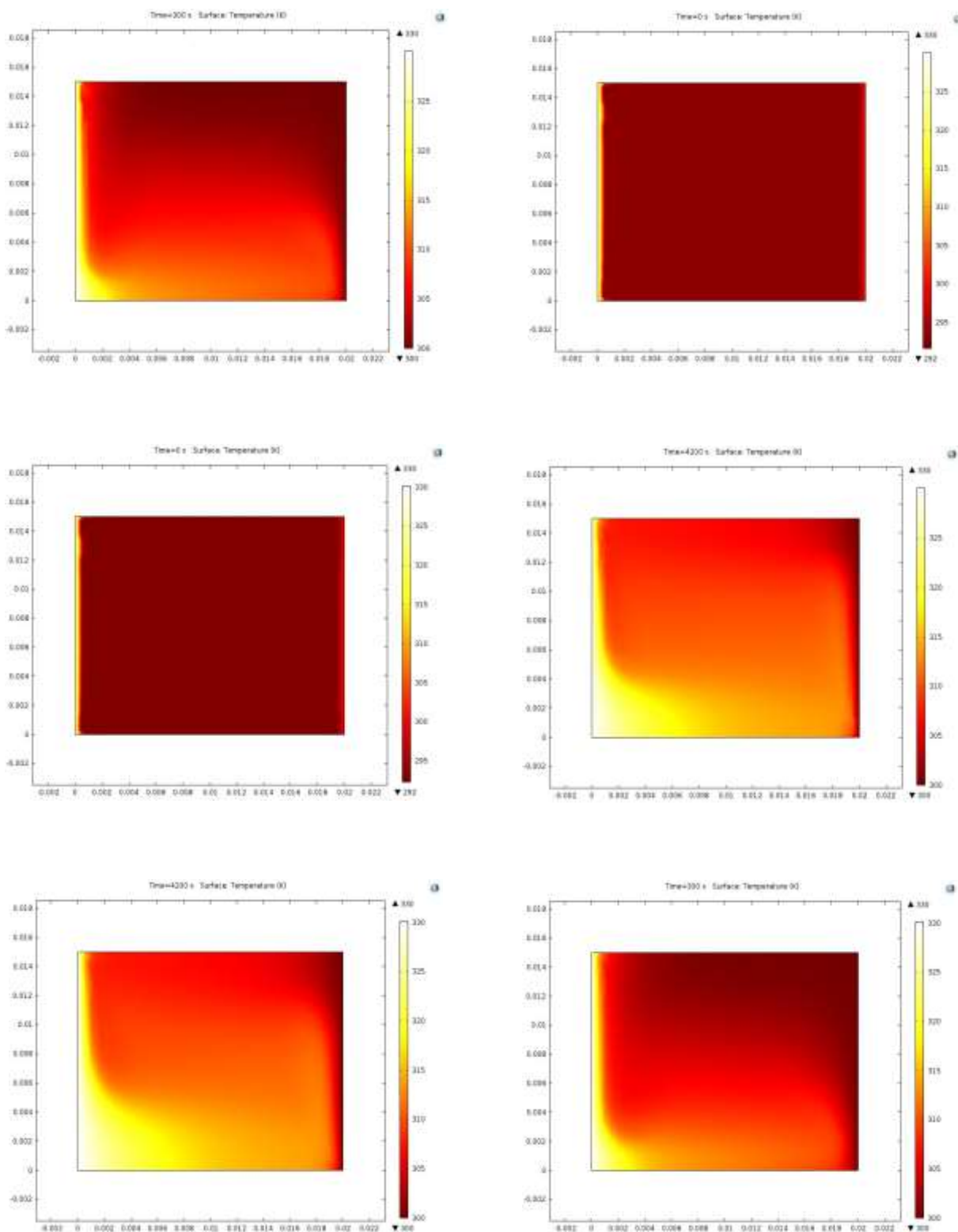
$$n \cdot (k \nabla T) = hA(T_w - T_\infty) \quad (17)$$

شرایط اولیه نیز برای این نرم‌افزار، تعریف می‌شود.

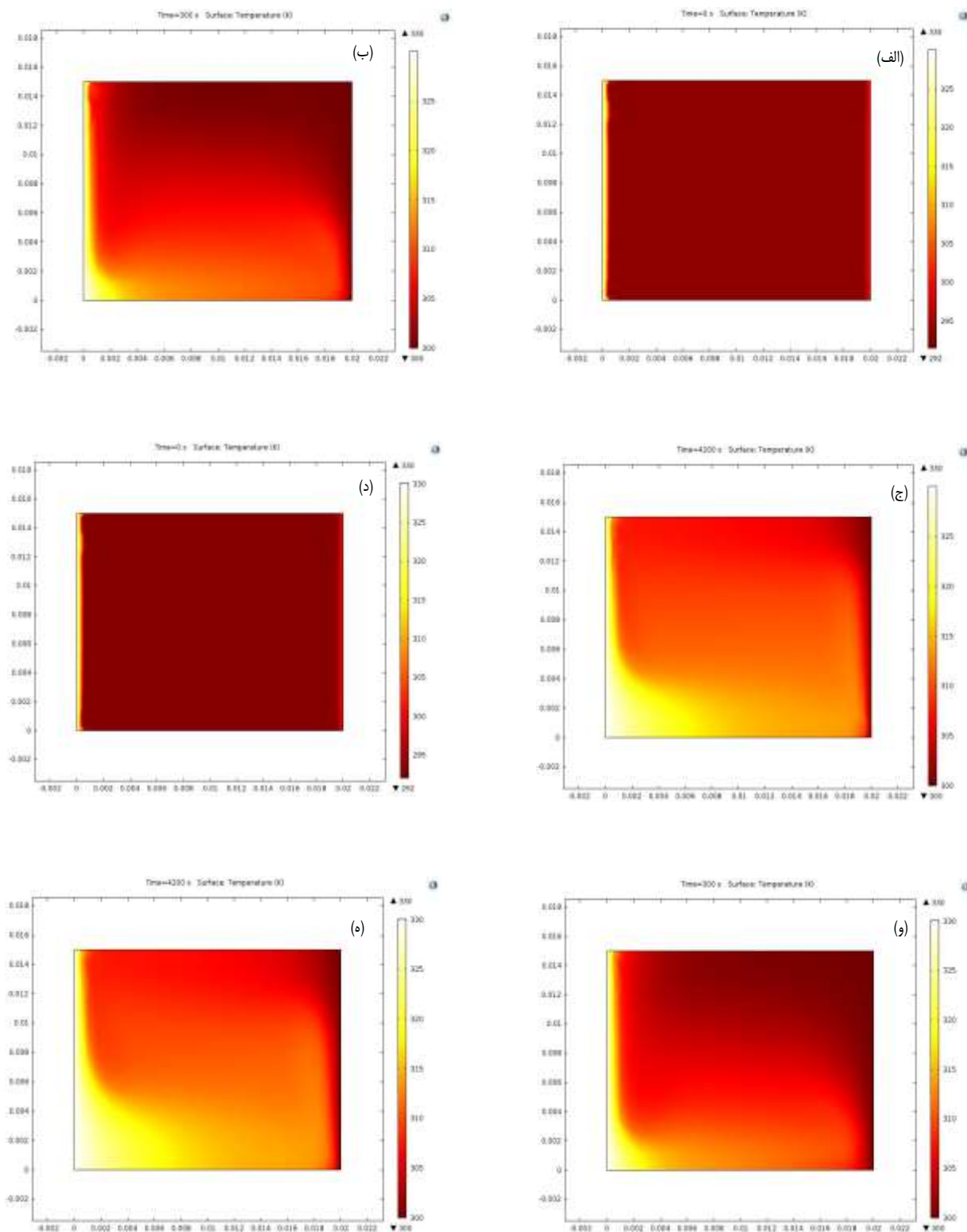
نتیجه‌ها و بحث

الف) توزیع دما

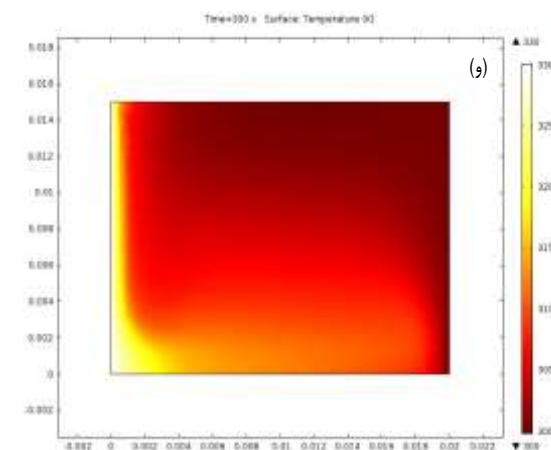
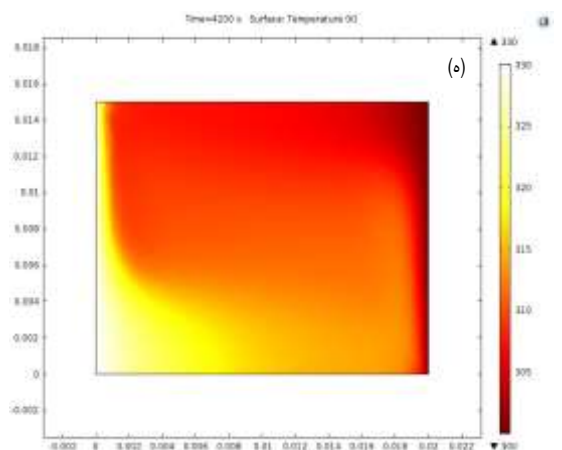
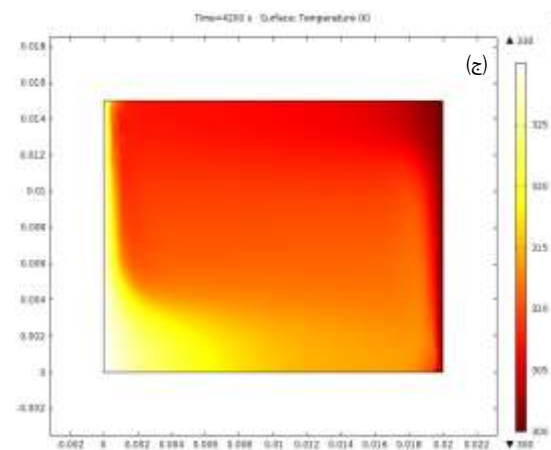
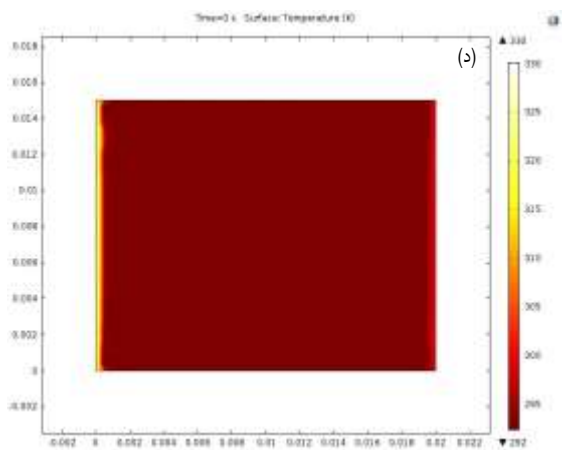
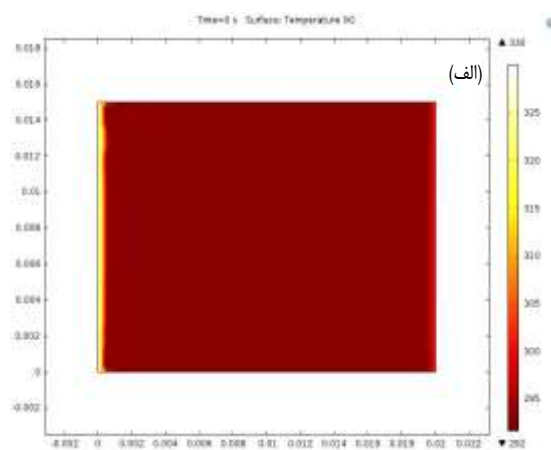
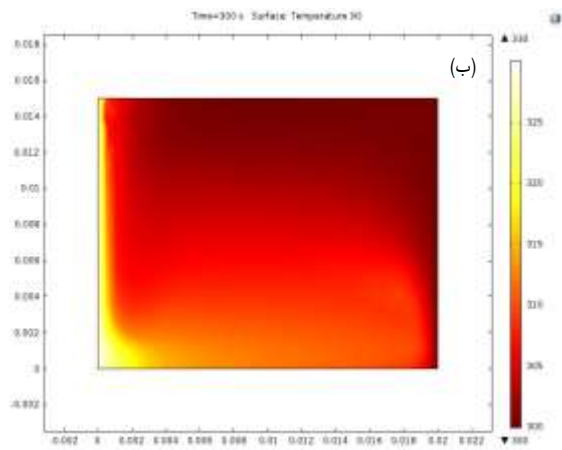
شکل‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ به ترتیب نمودار توزیع دما در حضور نانوذره‌های آلومینیوم اکسید، آهن اکسید، سیلیس اکسید و روی اکسید با ۲٪ وزنی (الف، ب، ج) و ۸٪ وزنی (د، و، ه) درون پارافین را در سه زمان متفاوت نشان می‌دهند. همان‌گونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود، نخست نانوکامپوزیت‌ها جامد بوده و با گذشت زمان به تدریج، ذوب می‌شوند. با افزایش درصدوزنی نانوذره‌ها، دمای ذوب افزایش می‌یابد. دلیل این امر، این است که نانوذره‌های اکسیدهای فلزی، ترکیب‌های معدنی هستند و دمای ذوب بالایی دارند. افزایش درصدوزنی نانوذره‌های اکسیدهای فلزی در درون نانوکامپوزیت‌های مواد



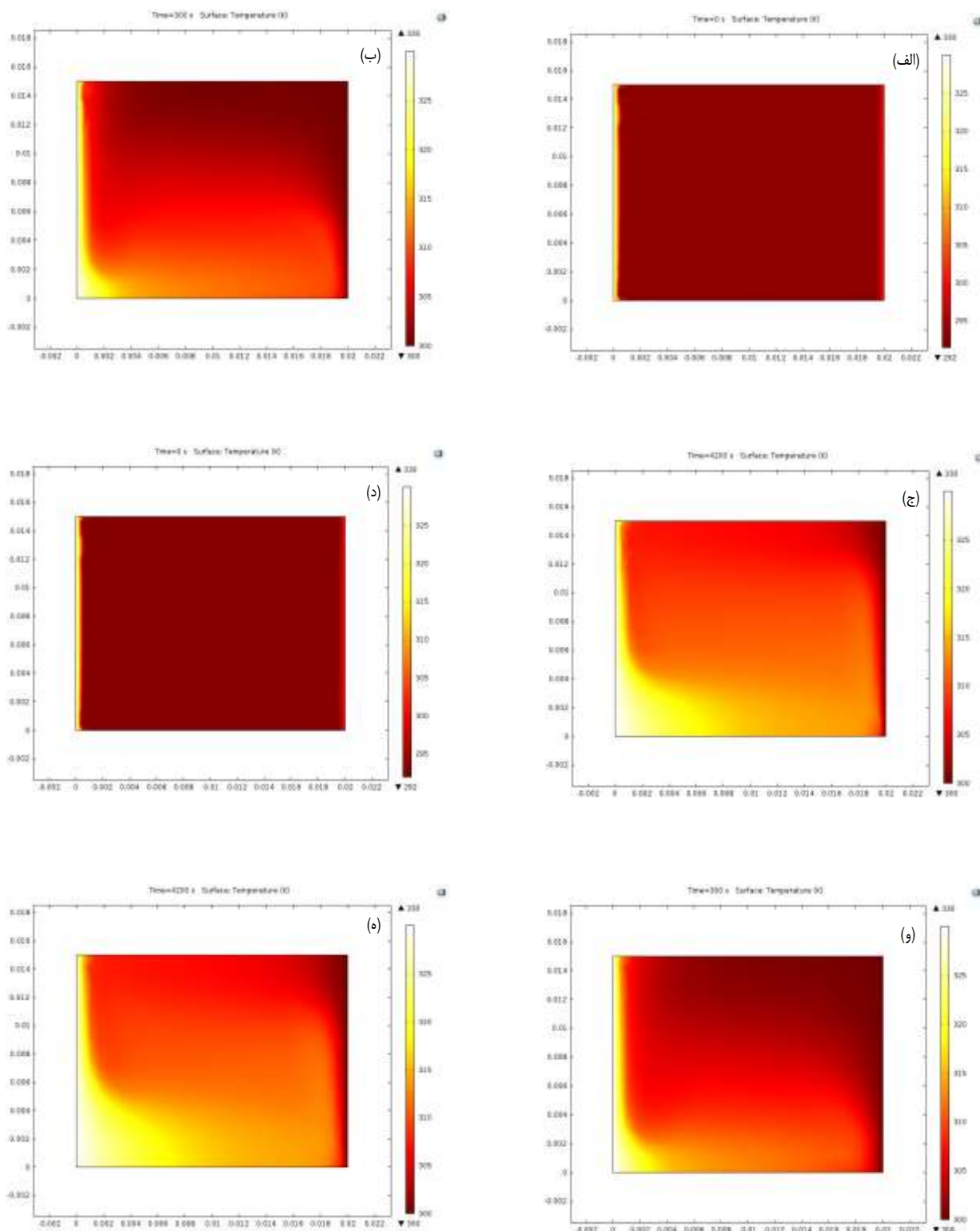
شکل ۳- توزیع دما در ۲٪ وزنی (الف، ب، ج) و ۸٪ وزنی (د، و، ه) نانوکامپوزیت آلومینیوم اکسید در زمان‌های صفر، ۳۰۰ و ۴۲۰۰ ثانیه.



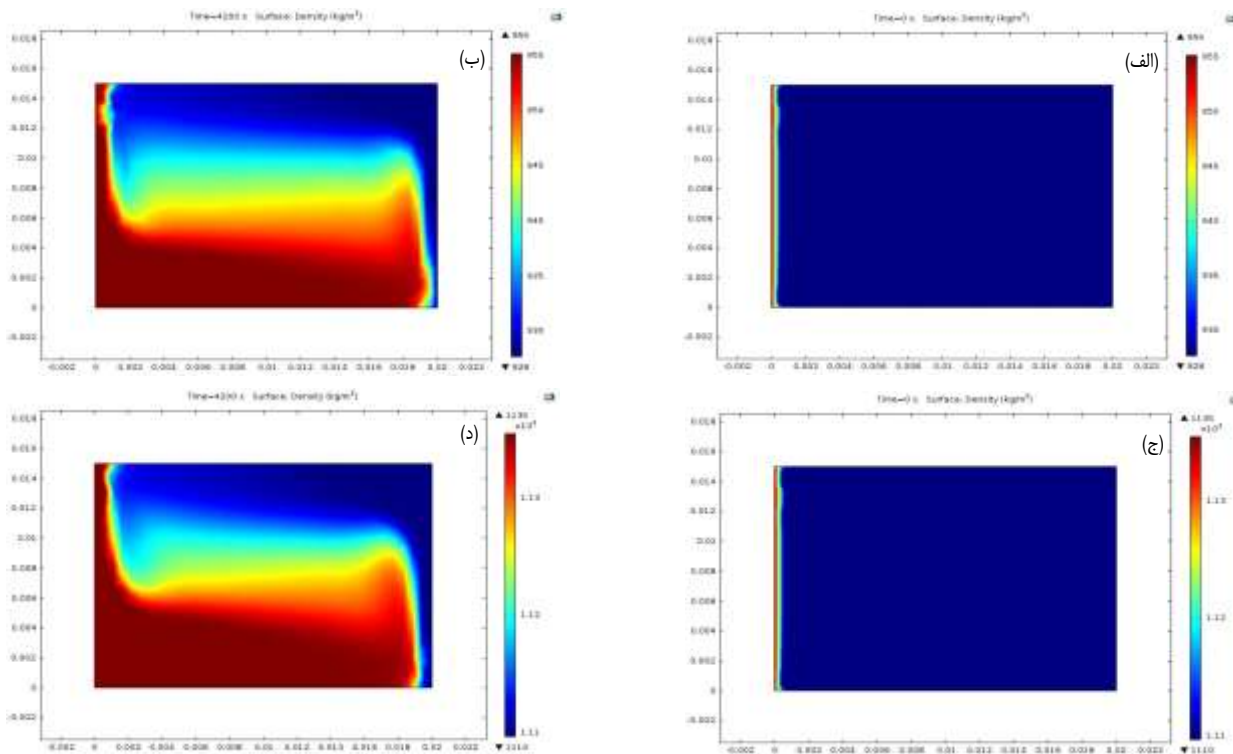
شکل ۴- توزیع دما در ۲٪ وزنی (الف، ب، ج) و ۸٪ وزنی (د، و، ه) نانوکامپوزیت آهن اکسید در زمان‌های صفر، ۳۰۰ و ۴۲۰۰ ثانیه.



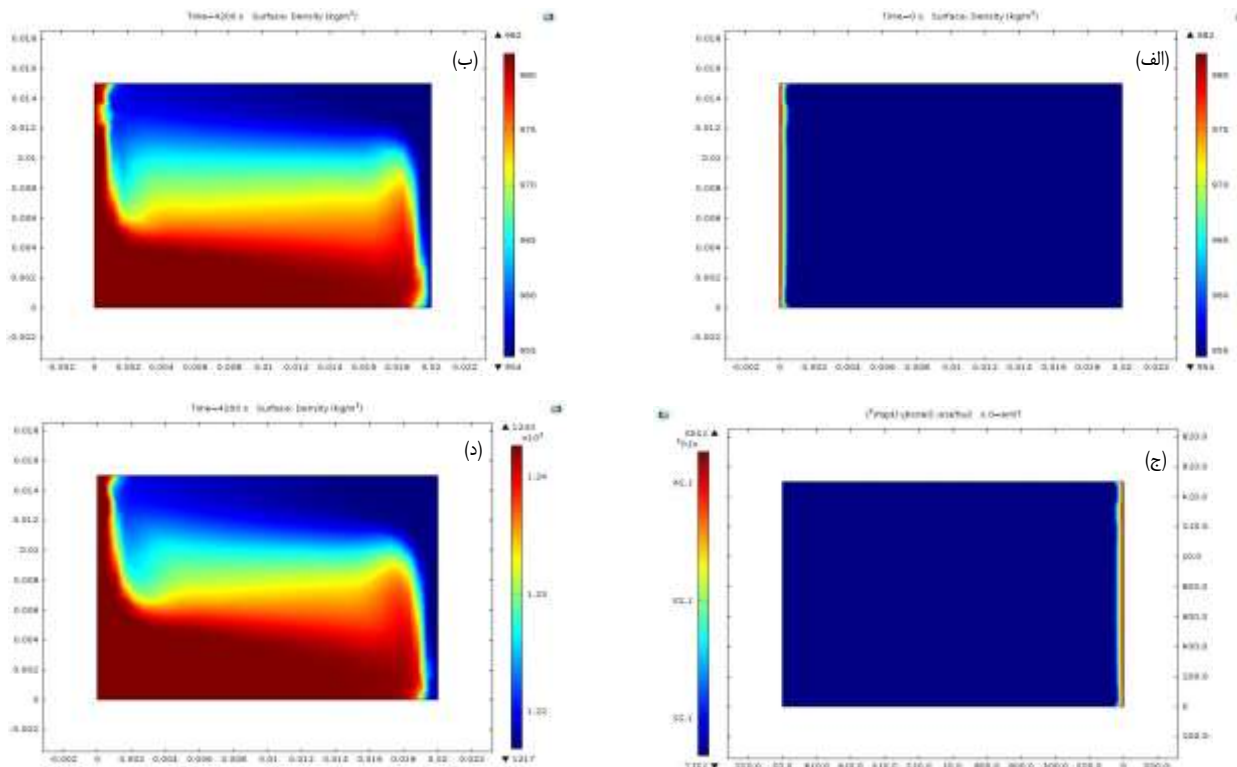
شکل ۵ - توزیع دما در ۲٪ وزنی (الف، ب، ج) و ۸٪ وزنی (د، و، ه) نانوکامپوزیت سیلیس اکسید در زمان‌های صفر، ۳۰۰ و ۴۲۰ نانیه.



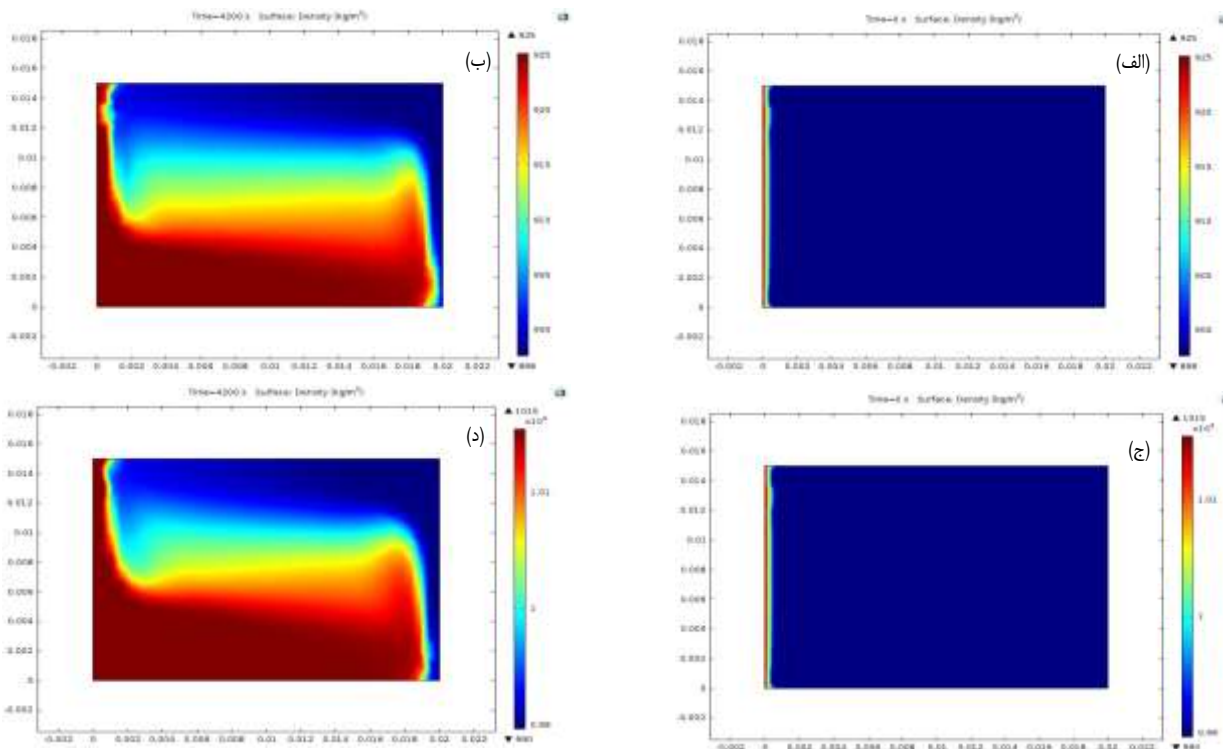
شکل ۶ - توزیع دما در ۲٪ وزنی (الف، ب، ج) و ۸٪ وزنی (د، و، ه) نانوکامپوزیت روی اکسید در زمان‌های صفر، ۳۰۰ و ۴۲۰۰ ثانیه.



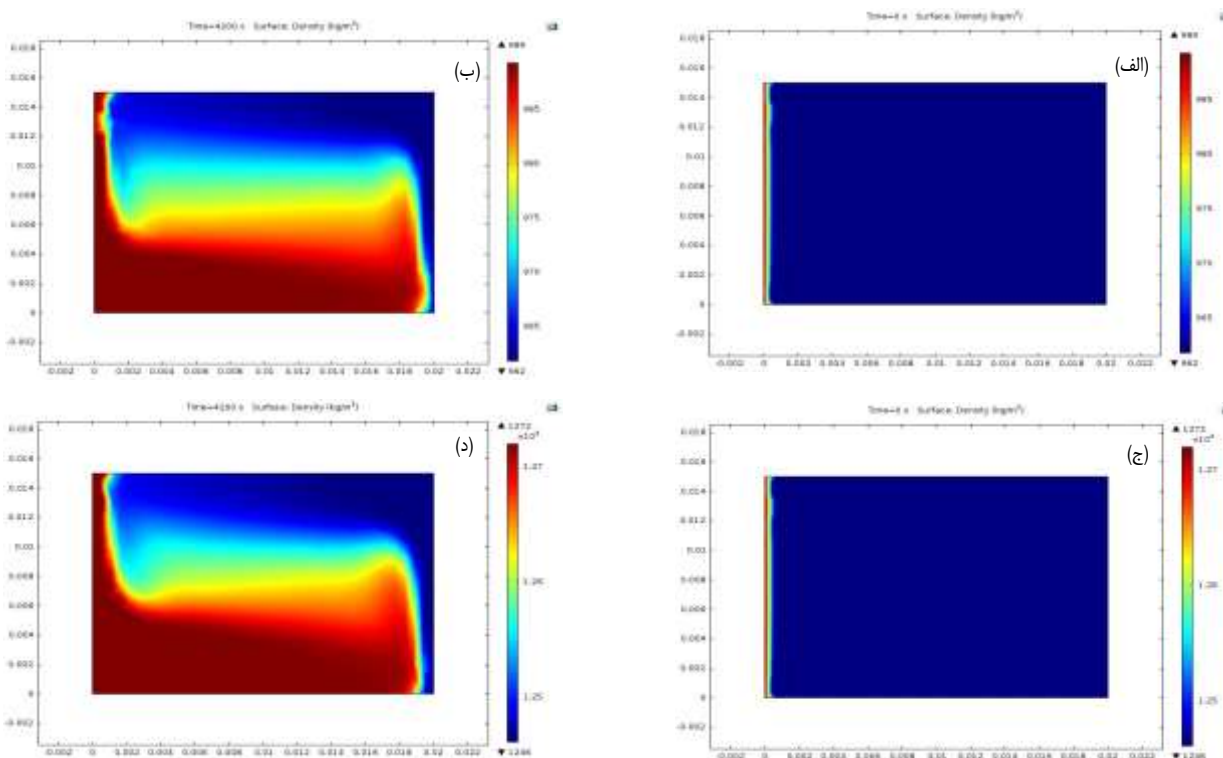
شکل ۷ - توزیع دانسیته در ۲٪ وزنی (الف و ب) و ۸٪ وزنی (ج و د) نانوکامپوزیت آلومینیوم اکسید در زمان‌های صفر و ۴۲۰۰ ثانیه.



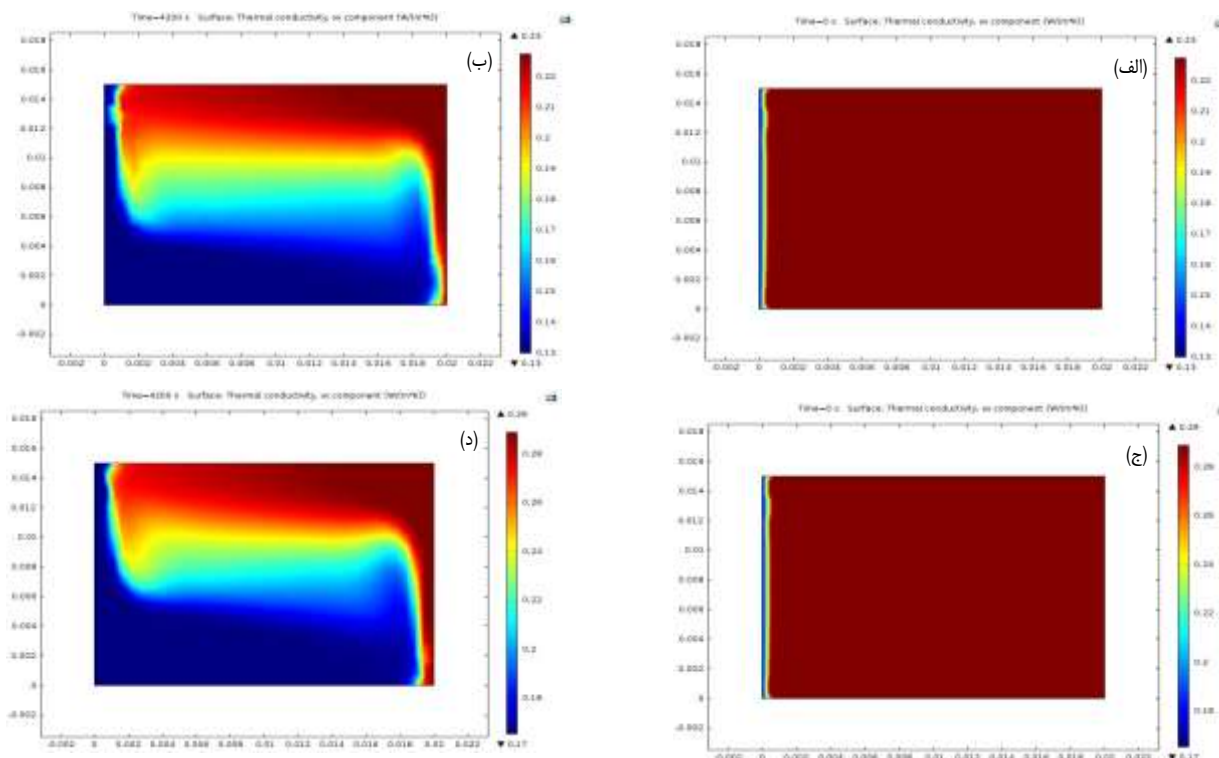
شکل ۸ - توزیع دانسیته در ۲٪ وزنی (الف و ب) و ۸٪ وزنی (ج و د) نانوکامپوزیت آهن اکسید در زمان‌های صفر و ۴۲۰۰ ثانیه.



شکل ۹ - توزیع دانسیته در ۲٪ وزنی (الف و ب) و ۸٪ وزنی (ج و د) نانوکامپوزیت سیلیس اکسید در زمان‌های صفر و ۴۲۰۰ ثانیه.



شکل ۱۰ - توزیع دانسیته در ۲٪ وزنی (الف و ب) و ۸٪ وزنی (ج و د) نانوکامپوزیت روی اکسید در زمان‌های صفر و ۴۲۰۰ ثانیه.



شکل ۱۱ - ضریب هدایت حرارتی در ۲٪ وزنی (الف و ب) و ۸٪ وزنی (ج و د) نانوکامپوزیت آلومینیوم اکسید در زمان‌های صفر و ۴۲۰۰ ثانیه.

گرفته شده است و در q ثابت طبق قانون فوریه $(q = -kAdT/dx)$ ، اگر dT/dx افزایش یابد میزان k (ضریب هدایت گرمایی) کاهش خواهد یافت. این بدین منظور هست که با ذوب شدن پارافین، ارتعاش مولکولی (یکی از عامل‌ها و مکانیسم‌های انتقال گرمای هدایتی در جامدها) کمتر می‌شود که باعث کاهش ضریب هدایت گرمایی نانوکامپوزیت‌ها می‌شود. همچنین با افزایش درصد وزنی نانوذره‌ها، ضریب هدایت گرمایی افزایش خواهد یافت [۴، ۱۹]. این هم، به این خاطر است که طبق جدول ۱ نانوذره‌های اکسیدهای فلزی، ضریب هدایت گرمایی بالاتری نسبت به پارافین خالص دارند و هر چقدر درصد وزنی این نانوذره‌ها بیشتر شود ضریب هدایت گرمایی نانوکامپوزیت‌ها بیشتر خواهد شد. در این قسمت، بیش‌ترین افزایش مربوط به نانوکامپوزیت آلومینیوم اکسید هست. در نتیجه به عنوان نانوکامپوزیت بهینه انتخاب می‌شود.

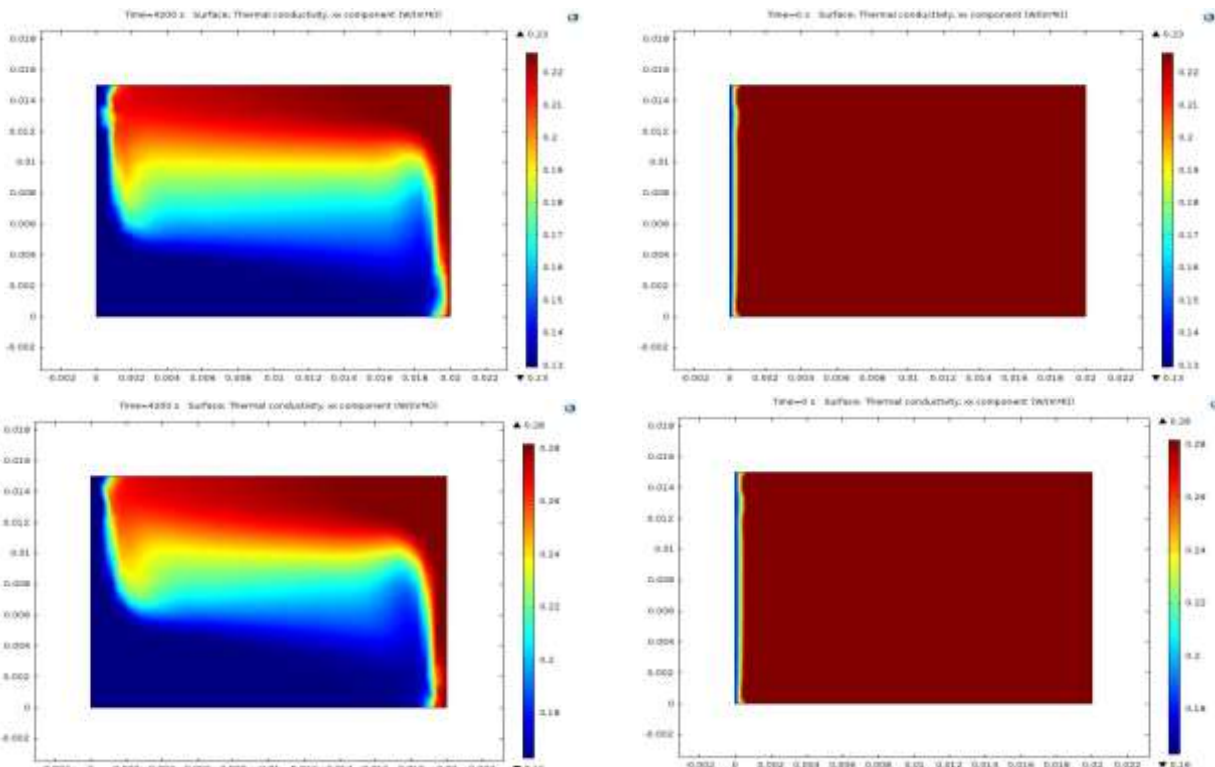
نتیجه‌گیری

مواد تغییرفازدهنده، منبع خوبی برای ذخیره‌سازی انرژی و مدیریت گرمایی می‌باشند. با وجود همه برتری‌ها، یکی از عیب‌های اصلی

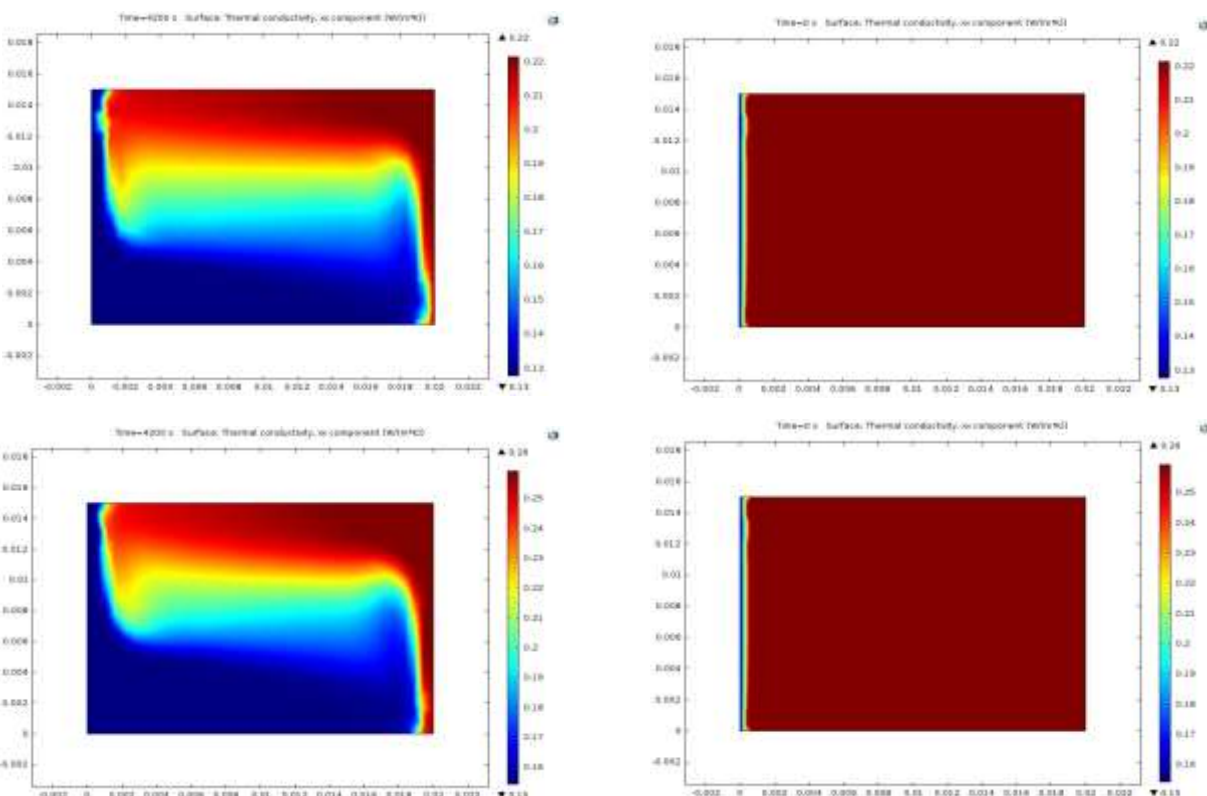
چون طبق جدول ۱ نانوذره‌های اکسیدهای فلزی، دانسیته بالایی دارند و هر چقدر درصد وزنی آن‌ها در درون پارافین بیشتر شود باعث افزایش دانسیته نانوکامپوزیت می‌شوند.

(ج) تغییرهای ضریب هدایت گرمایی

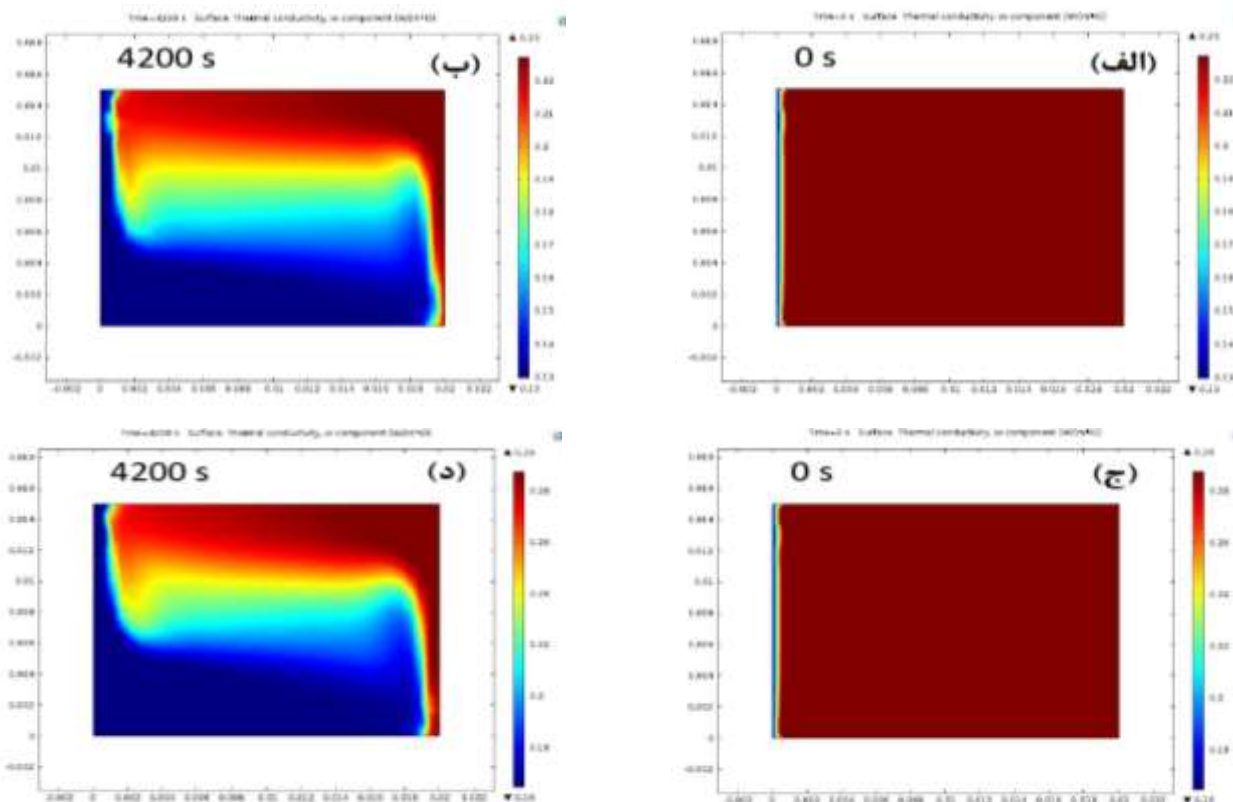
شکل‌های ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ به ترتیب نمودار تغییرهای ضریب هدایت گرمایی در حضور نانوذره‌های آلومینیوم اکسید، آهن اکسید، سیلیس اکسید و روی اکسید با ۲٪ وزنی (الف و ب) و ۸٪ وزنی (ج و د) داخل پارافین را در سه زمان متفاوت نشان می‌دهند. ضریب هدایت گرمایی، یکی از ویژگی‌های اصلی مواد تغییرفازدهنده است، زیرا نرخ ذخیره‌سازی و انتقال گرما به این عامل بستگی دارد. مواد تغییرفازدهنده برای ذخیره‌سازی و انتقال انرژی گرمایی در محیط‌های گوناگونی استفاده می‌شوند که در آن‌ها تغییرهای دمایی وجود دارد. بنابراین، مهم است که ضریب هدایت گرمایی PCM معلوم باشد. همان‌گونه که در این نمودارها دیده می‌شود، با گذشت زمان، ضریب هدایت گرمایی نانوکامپوزیت‌ها از سمت چپ رو به کاهش است و این کاهش به دلیل افزایش تغییرهای دما می‌باشد. چون میزان شار انتقال گرما ثابت در نظر



شکل ۱۲ - ضریب هدایت حرارتی در ۲٪ وزنی (الف و ب) و ۸٪ وزنی (ج و د) نانوکامپوزیت آهن اکسید در زمان‌های صفر و ۴۲۰۰ ثانیه.



شکل ۱۳ - ضریب هدایت حرارتی در ۲٪ وزنی (الف ب) و ۸٪ وزنی (ج و د) نانوکامپوزیت سیلیس اکسید در زمان‌های صفر و ۴۲۰۰ ثانیه.



شکل ۱۴ - ضریب هدایت حرارتی در ۲٪ وزنی (الف و ب) و ۸٪ وزنی (ج و د) نانوکامپوزیت روی اکسید در زمان‌های صفر و ۴۲۰۰ ثانیه.

نانوذره‌ها، نرخ ذوب شدن نانوکامپوزیت‌ها افزایش یافته و کسر بیشتری از این نانوکامپوزیت‌ها، به مایع تبدیل شده است که به علت بهبود ضریب هدایت گرمایی نانوکامپوزیت‌ها، با افزایش درصد وزنی نانوذره‌ها می‌باشد. (ج) در استفاده از مواد تغییرفازدهنده، باید از مقدار بهینه نانوذره‌ها برای بهبود ضریب هدایت گرمایی آن‌ها استفاده کرد. همچنین با افزایش درصد وزنی نانوذره‌ها، ضریب هدایت گرمایی نانوکامپوزیت‌ها افزایش خواهد یافت. نتیجه‌های این پژوهش نشان داد که می‌توان به کمک نانوذره‌ها، عیب‌های مواد تغییر فازدهنده را تا حد زیادی بهبود بخشید که این امر می‌تواند در مدیریت گرمایی سامانه‌های گوناگون استفاده شود.

فهرست نمادها

\dot{q}	آهنگ انرژی تولید شده در واحد حجم به وسیله چشمه گرمایی
c	گرمای ویژه ماده
k	ضریب هدایت گرمایی
ρ	چگالی ماده

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۳/۱۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۹/۲۱

مواد تغییرفازدهنده، پایین بودن میزان هدایت گرمایی آن‌ها می‌باشد. در این پژوهش، نانوذره‌های گوناگون اکسید فلزی به پارافین خالص افزوده شد و ویژگی‌های گوناگون آن‌ها شبیه‌سازی شد. نتیجه‌های این پژوهش عبارتند از: (الف) با افزودن نانوذره‌ها به سامانه، می‌توان ضریب هدایت گرمایی پارافین را بهبود بخشید. با مقایسه ضریب هدایت گرمایی ترکیب بدون نانوذره (پارافین خالص) و نانوکامپوزیت‌های ۲٪ و ۸٪ وزنی از نانوذره‌ها، این نتیجه به دست آمد که وجود نانوذره‌ها باعث افزایش ضریب هدایت گرمایی کامپوزیت تا ۱۲/۵٪ شده است. (ب) در هر نانوکامپوزیت، مواد تغییرفازدهنده از سمت چپ گرم می‌شود (طبق هندسه سامانه) و مکانیسم اولیه انتقال گرما به صورت انتقال گرمای هدایتی است. با پیشرفت زمان، سرعت انتقال گرما در نانومواد تغییرفازدهنده در نواحی دیواره سمت چپ، بیش‌تر شده و گرم می‌شوند. در نتیجه ذوب شدن این نانومواد آغاز می‌شود. در این مرحله، انتقال گرما جابه‌جایی آزاد در پارافین ذوب شده وجود دارد که باعث می‌شود مواد ذوب شده (با چگالی کم‌تر) به سمت بالا حرکت کنند. پس ناحیه بالای سمت چپ، گرم‌تر می‌شود. در بازه‌ی دمایی ۳۰۴ تا ۳۱۶ درجه کلوین، با افزایش درصد وزنی

مراجع

- [۱] باباپور، عزیز؛ بخشوده‌نیا، یاسر؛ بخشوده‌نیا، محمد؛ "مروری بر مدل‌سازی عددی و آنالیز کاربرد مواد تغییرفازدهنده در ساختمان جهت کاهش مصرف انرژی"، پنجمین کنفرانس انرژی‌های تجدیدپذیر، پاک و کارآمد، اسفند (۱۳۹۲).
- [۲] ضامن، محمد؛ رضاخانی، ناصر؛ رجبی، مهدیه؛ زینالی دانالو، میرعلی اصغر؛ ارزیابی عملکرد سامانه ترکیبی آب گرم‌کن/ آب شیرین‌کن خورشیدی خانگی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۳): ۳۴ تا ۹۱ تا ۱۰۲ (۱۳۹۴).
- [۳] باباپور، عزیز؛ مسعودی ریحان، مهدیه؛ "مروری بر مواد تغییر فاز دهنده به عنوان منبع ارزشمند انرژی"، پنجمین کنفرانس انرژی‌های تجدیدپذیر، پاک و کارآمد، اسفند (۱۳۹۲).
- [4] Babapoor A., Karimi G., [Thermal Properties Measurement and Heat Storage Analysis of Paraffin-Nanoparticles Composites Phase Change Material: Comparison and Optimization](#), *Appl. Therm. Eng.*, **90**: 945-951 (2015).
- [5] Pielichowska K., Pielichowski K., [Phase Change Materials for Thermal Energy Storage](#), *Prog. Mater. Sci.*, **65**: 67–123 (2014).
- [6] Babapoor A., Azizi M.M., Karimi G., [Thermal Management of a Li-Ion Battery Using Carbon Fiber-PCM Composites](#), *Appl. Therm. Eng.*, **82**: 281–290 (2015).
- [7] Samimi F., Babapoor A., Azizi M.M., Karimi G., [Thermal Management Analysis of a Li-Ion Battery Cell Using Phase Change Material Loaded with Carbon Fibers](#), *Energy*, **96**: 355-371 (2016).
- [8] Babapoor A., Karimi G., Khorram M., [Fabrication and Characterization of Nanofiber-Nanoparticle-Composites with Phase Change Materials by Electrospinning](#), *Appl. Therm. Eng* **99**: 1225-1235 (2016).
- [9] Babapoor A., Karimi G., Sabbaghi S., [Thermal Characteristic of Nanocomposite Phase Change Materials During Solidification Process](#), *J. Energy Storage*, **7**: 74-81 (2016).
- [10] Karimi G., Azizi M.M., Babapoor A., [Experimental Study of a Cylindrical Lithium Ion Battery Thermal Management Using Phase Change Material Composites](#), *J. Energy Storage*, **8**: 168-174 (2016).
- [11] Babapoor A., Karimi G., Golestaneh S.I., Ahmadi Mezjin M., [Coaxial Electro-Spun PEG/PA6 Composite Fibers: Fabrication and Characterization](#), *Appl. Therm. Eng.*, **118**: 398-407 (2017).
- [12] Cai L., White R.E., [Mathematical Modeling of a Lithium Ion Battery with Thermal Effects in COMSOL Inc. Multiphysics \(MP\) Software](#), *J. Power Sources*, **196**: 5985–5989 (2011).
- [13] Wang J., Xie H., Guo Z., Li Y., [Improved Thermal Properties of Paraffin Wax by the Addition of TiO₂ Nanoparticles](#), *Appl. Therm. Eng.*, **73**: 1541-1547 (2014).
- [14] Ho C.J., Gao J.Y., [Preparation and Thermophysical Properties of Nanoparticle in Paraffin Emulsion as Phase Change Material](#), *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, **36**: 467-470 (2009).

- [15] Valan Arasu A., Mujumdar A.S., Numerical Study on Melting of Paraffin Wax with Al_2O_3 in a Square Enclosure, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, **39**: 8–16 (2012).
- [۱۶] کریمی، هجیر؛ سبزه میدانی، محمد مهدی؛ مطالعه عددی تأثیر عامل‌های هندسی بر انتقال گرمای نانوسیال آب - Al_2O_3 در یک میکروکانال، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۴): ۳۵ تا ۱۳۷ تا ۱۵۰ (۱۳۹۵).
- [17] Kaplan F., Vivero C.D., Howes S., Arora M., Homayoun H., Burlison W., Tullsen D., Coskun A.K., “Modeling and Analysis of Phase Change Materials for Efficient Thermal Management”, University Boston, (2014).
- [18] Pryor R.W., “Modeling Materials through a Phase Transition: Using COMSOL Multiphysics and Applying Physics First Principles Techniques”, Excerpt from the Proceedings of the *COMSOL Conference, Boston* (2007).
- [۱۹] اتابکی، فریبرز؛ یوسفی، محمد حسن؛ آل کرم، ایمان؛ بررسی و بهبود رسانایی پلی (۳،۴- اتیلن دی اکسی تیوفن): پلی (استایرن سولفونیک اسید) (PEDOT:PSS) با افزودن نانوذرات نقره و مایع یونی ۲- متیل ایمیدازولیوم، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۴): ۳۵ تا ۳۹ تا ۴۸ (۱۳۹۵).