

شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مدیریت گرمایی در لوله‌های L شکل پوشش داده‌شده با نانوالیاف مواد تغییر فازدهنده

عزیز باباپور^{۱*}، مهدی احمدی مزجین^۲، آراز حسین اسدی^۳، سیدمحمد جوکار^۴، میثم پار^۵، سیدایمان گلستانه^۶

۱- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی

۲- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز

۳- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی

۴- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شیراز

۵- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی

۶- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز

پیام‌نگار: Babapoor@uma.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، نانوالیاف مواد تغییر فازدهنده (پلی‌اتیلن‌گلایکول به‌عنوان ماده تغییر فازدهنده و پلی‌آمید ۶ به‌عنوان نگهدارنده) در یک‌لوله L شکل، در شرایط مختلف و به‌کمک نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شده‌است. برای این منظور، آب در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس در داخل یک‌لوله L شکل قرار داده شده و اطراف محفظه با لایه نازکی از نانوالیاف پلی‌اتیلن‌گلایکول - پلی‌آمید پوشانده شده‌است. در ادامه، خواص ترموفیزیکی چندسازه نانوالیاف مواد تغییر فازدهنده در درصدهای مختلف وزنی بررسی شده و اثرهای تغییرات دما، چگالی، گرانیروی و ضریب هدایت حرارتی بر روی آن‌ها، باهم مقایسه شده‌است. نتیجه‌های پژوهش نشان داد که مناسب‌ترین سامانه برای مدیریت گرمایی، مربوط به نانوچندسازه مواد تغییر فازدهنده با بیشترین درصد وزنی پلی‌اتیلن‌گلایکول است. همچنین، استفاده از نانوالیاف مواد تغییر فازدهنده در بهبود مدیریت حرارتی و کنترل دما بسیار مؤثر هستند و می‌توانند به‌عنوان مواد مناسب برای ذخیره‌سازی و انتقال انرژی به‌کار برده شوند.

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۶/۱۳

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۲/۱۳

شماره صفحات: ۱۵ تا ۲۷

کلیدواژه‌ها: نانوالیاف، مواد تغییر فازدهنده، کامسول، کامپوزیت، مدیریت حرارتی

۱. مقدمه

فعالیت‌های بشری است؛ در چشم‌اندازی وسیع‌تر، انرژی با داشتن نقشی مهم در گسترش بخش‌های فناورانه، صنعتی، اقتصادی و اجتماعی، به‌عنوان سازمان‌دهنده اصلی تولید ثروت ملی

انرژی، مقوله سازمان یافته‌ای است که شاهره حیات همه

* اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده فنی و مهندسی

ماکرو و نانو را همزمان داراست و به سبب همین خواص متنوع و جالب، کاربردهای گسترده‌ای پیدا کرده‌است. یکی از روش‌های تاندازه‌ای نوین در تولید نانوالیاف، استفاده از میدان ایستابرقی قوی است؛ این روش به نام ریسندگی ایستابرقی الیاف یا الکتروریسی^۲ شناخته می‌شود [۱۰]. استفاده از مواد تغییر فازدهنده در ابعاد نانو با بهره‌جستن از تولید نانوالیاف به روش الکتروریسی، روشی نو در ذخیره‌سازی انرژی و مدیریت حرارتی است. در این روش، با قرار دادن مواد تغییر فازدهنده در داخل پوششی از یک مادهٔ بسپاری در نانوالیاف، مواد تغییر فازدهنده در سامانه‌های حرارتی در ابعاد کوچک کاربردی‌تر می‌شود.

اصول بنیادی علم- به‌طور گسترده‌ای- در تولید منسوجات نو و خلاقانه استفاده می‌شود. یکی از این اصول، تغییر فاز؛ یعنی تبدیل از یک حالت فیزیکی به حالت دیگر است. امروزه الیاف و منسوجاتی که خاصیت تطبیق دارند بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این خاصیت می‌تواند با استفاده از مواد تغییر فازدهنده به دست آید؛ یکی از راه‌های مؤثر ذخیرهٔ انرژی گرمایی، به‌کارگیری مواد تغییر فازدهنده است [۱۵-۱۱].

مواد تغییر فازدهنده را بر اساس دمای تغییر فاز، می‌توان به سه دستهٔ مهم تقسیم نمود؛ که عبارتند از: یوتکتیک‌ها^۳، معدنی و آلی. انواع مواد تغییر فازدهنده در شکل (۱) نشان داده شده‌است.

در حال حاضر استفاده از روش‌های حل عددی و نرم‌افزارهای شبیه‌سازی در محاسبات کامپیوتری، علوم و مهندسی کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است و به‌عنوان ابزاری کارآمد در طراحی وسایل مهندسی به کار می‌رود. در دههٔ ۱۹۸۰ با همت پژوهشگران بسیاری، نرم‌افزارهای شبیه‌سازی گوناگونی روانهٔ بازار شد. پژوهشگران بسیاری دقت بالای این نرم‌افزارها را تأیید کرده‌اند. در پژوهشی که صمیمی و همکارانش انجام داده‌اند، سل باتری با لایه‌های مواد تغییر فازدهنده شبیه‌سازی شد و مشخص شد که مدیریت دمایی به‌وسیلهٔ نرم‌افزار شبیه‌سازی مؤثر بوده‌است [۱۶]. در پژوهشی دیگر، باباپور و همکارانش مطالعات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی را با هم مقایسه کردند و نشان دادند که نتایج شبیه‌سازی با ضریب قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی قابل انطباق است [۸-۴].

عمل می‌کند. یک کشور توسعه‌یافته با منابع بالای انرژی و سامانهٔ مدیریت صحیح انرژی می‌تواند از کشورهای دیگر در حال توسعه، موقعیت اقتصادی بهتری داشته باشد؛ به عبارت دیگر می‌توان گفت تقاضای انرژی با رشد اقتصاد جهانی، خودبه‌خود افزایش می‌یابد [۱]. کمبود سوخت‌های فسیلی و افزایش روزافزون مصرف انرژی در دنیای امروزی، لزوم بهینه‌سازی انرژی را بیش از پیش نمایان می‌سازد؛ از این‌رو استفاده از انرژی‌های نوین و سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی در سال‌های گذشته مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته‌است. مواد تغییر فازدهنده (PCM)^۱ یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین مواد برای سامانه‌های ذخیره‌سازی و انتقال انرژی است. این مواد خواص ویژه‌ای مانند گرمای نهان بالا، بدون واکنش شیمیایی، قابلیت ذوب‌شدن به‌صورت متجانس و غیره دارند [۵-۲].

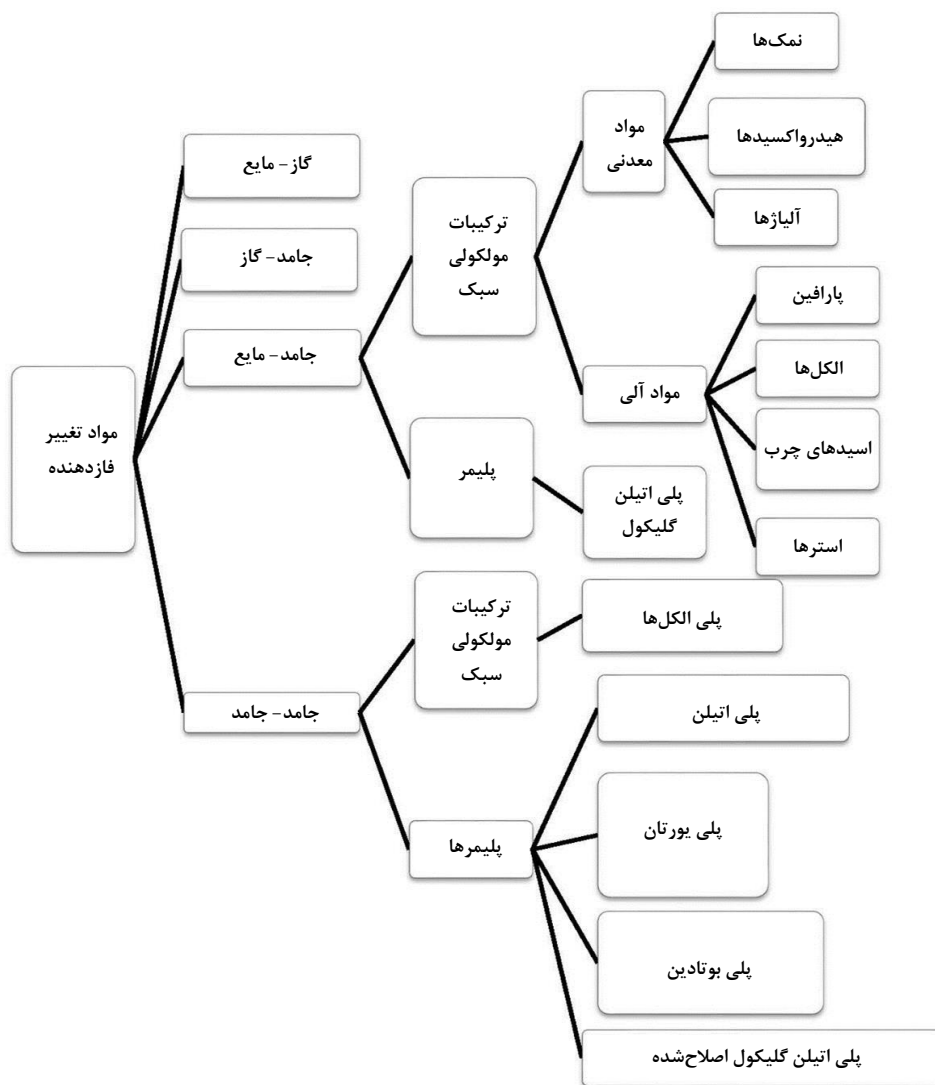
مواد تغییر فازدهنده طی فرآیند ذوب، انرژی گرمایی را به‌صورت گرمای نهان ذخیره و طی انجماد، این انرژی را آزاد می‌کنند. امروزه استفاده از این مواد در منسوجات به‌بهبود خواص گرمایی و سرمای آن‌ها کمک می‌کند. روش‌های مختلفی همچون روکش‌دادن، تورق و حبس داخل کپسولی برای این منظور وجود دارد؛ همچنین یکی از جدیدترین رویکردهای دانش مواد تغییر فازدهنده، استفاده از فناوری نانوالیاف به‌منظور پایداری ابعادی این مواد است [۸-۶].

علم مواد نانو و نانوفناوری باوجود نوپا بودن، توجه بسیاری از پژوهشگران و حتی سیاست‌گذاران را برای بهبود فرآیندهای مختلف و رسیدن به بهره‌وری بیشتر به خود جلب کرده‌است. یکی از زمینه‌هایی که به‌تازگی کاربرد نانوفناوری در آن به‌طور چشمگیری در حال گسترش است، انتقال حرارت به کمک نانومواد تغییر فازدهنده است؛ پژوهشگران، به‌دنبال ساخت و تهیهٔ نانومواد با انواع نانوذرات و نانولوله‌ها و با روش‌های تولید آن‌ها در اندازه‌های گوناگون، در حال مطالعه و انجام تحقیقات مختلف بر روی افزایش هدایت حرارتی و افزایش انتقال حرارت هستند [۹].

یکی از شکل‌های بسیار پرکاربرد در زمینهٔ انتقال حرارت از نانومواد، نانوالیاف است. از میان شکل‌های مختلف نانو ساختارها، نانوالیاف با داشتن قطر نانومتری و طول ماکرومتری، خواص مواد در مقیاس

2. Electrospinning
3. Eutectics

1. Phase Change Material (PCM)



شکل ۱. طبقه‌بندی مواد تغییر فازدهنده [۴].

فملب^۱ است؛ این نرم افزار را شرکت کامسول - که یکی از نام‌دارترین شرکت‌ها در تولید نرم‌افزارهای شبیه‌سازی است - وارد بازار کرده است که قابلیت مرتبط شدن ربا نرم‌افزارهای دیگری از جمله متلب و اتوکد^۲ و نظایر آن دارد. نرم‌افزار کامسول به‌عنوان یک نرم‌افزار مدل‌سازی قدرتمند از روش اجزای محدود، برای حل معادلات دیفرانسیل استفاده می‌کند که کاربرد این نرم‌افزار در صنایع گوناگون روزبه‌روز در حال گسترش است؛ نرم‌افزار کامسول در علوم مختلفی همچون مهندسی شیمی، مهندسی مکانیک، فیزیک، نجوم و مانند اینها به‌کار می‌رود [۱۹-۲۱].

پیچیدگی معادلات حاکم بر مسأله، تأثیر متغیرهای فیزیکی مختلف، گذرا بودن اغلب مسائل مهندسی، بالا بودن هزینه‌های تجهیزات 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 می‌کند [۱۶-۱۸].

۲. مدل‌سازی

یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارهای موجود در زمینه شبیه‌سازی، نرم‌افزار

1. FEMLAB
2. AutoCAD

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla \cdot \mathbf{P} + \rho \cdot \mathbf{g} + \nabla \cdot \bar{\tau} + \bar{\mathbf{F}} \quad (1)$$

ρ : جرم حجمی

\mathbf{u} : سرعت سیال

$\bar{\mathbf{F}}$: نیروی شناوری در واحد حجم

$$\left\{ \begin{array}{l} F_x = 0 \\ F_y = \rho g \beta (T_m - T_{ref}) \end{array} \right\} \quad (2)$$

که در این معادلات g شتاب گرانش، T_m دمای محیط سردکننده، T_{ref} دمای مرجع که ۲۹۵ درجه کلوین در نظر گرفته شده است و β ضریب انبساط حجمی و واحد آن $(1/K)$ است. شرایط مرزی و اولیه معادلات به شرح زیر است:

$$u_x = u_y = 0 \quad 1. \text{ شرایط مرزی}$$

$$t = 0 ; u_x = u_y = 0 \quad 2. \text{ شرایط اولیه}$$

$$t = 0 ; P = \rho g(h - y) \quad (3)$$

۳-۲ معادله انرژی

معادله انرژی در محفظه آلومینیومی (انتقال حرارت داخل جامد) مطابق رابطه (۴) است:

$$\rho C_p \frac{\partial T_m}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T_m) \quad (4)$$

در شبیه‌سازی انجام شده در این پژوهش، تغییرات حرارتی نانوالیاف مواد تغییر فاز دهنده (چندسازه پلی‌آمید ۶ و پلی‌اتیلن گلایکول) در اطراف یک محفظه L شکل از جنس آلومینیوم بررسی شد. علت انتخاب محفظه L شکل، این است که این حالت در بسیاری اوقات، در صنعت مشاهده می‌شود و از جمله قسمت‌هایی است که اتلاف انرژی در آن زیاد است. ضخامت دیواره محفظه برابر ۱۰ میلی‌متر و دمای آب داخل لوله ۱۰۰ درجه سلسیوس است. شکل (۲)، شکل هندسی مدل شده برای بررسی الگوریتم حرارتی نانوکامپوزیت را نشان می‌دهد. اطراف محفظه آلومینیومی که داخل آن، آب در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس قرار دارد با نانوجندسازه نانوالیافی پوشانده شده است. برخی از فرضیه‌های مهم که در مدل سازی فرایند تغییر فاز در این پژوهش در نظر گرفته شده است؛ عبارت است از:

۱. انبساط حجمی در طول تغییر فاز،

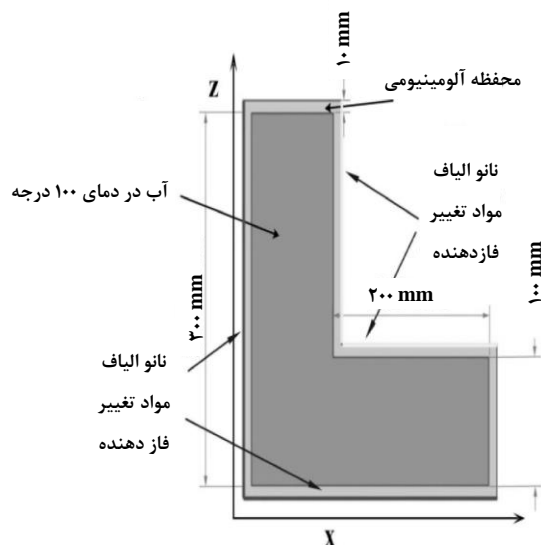
۲. جابه‌جایی در فاز مایع،

۳. حرکت فاز جامد در مذاب به دلیل تفاوت در دانسیته دو فاز.

۳. معادلات حاکم

۳-۱ معادله حرکت

معادله حرکت مواد تغییر فاز دهنده در فاز مایع مطابق رابطه (۱) است:



شکل ۲. شکل هندسی مدل شده برای بررسی الگوریتم حرارتی نانوالیاف مواد تغییر فاز دهنده.

شرایط اولیه به صورت زیر است:

$$\rho_{pcm} = \theta \rho_{phase1} + (1 - \theta) \rho_{phase2} \quad (9)$$

$$T = 0 ; T_m = 373.15 \text{ K}$$

معادلات انرژی در محیط ماده تغییر فاز دهنده به شرح زیر است:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (5)$$

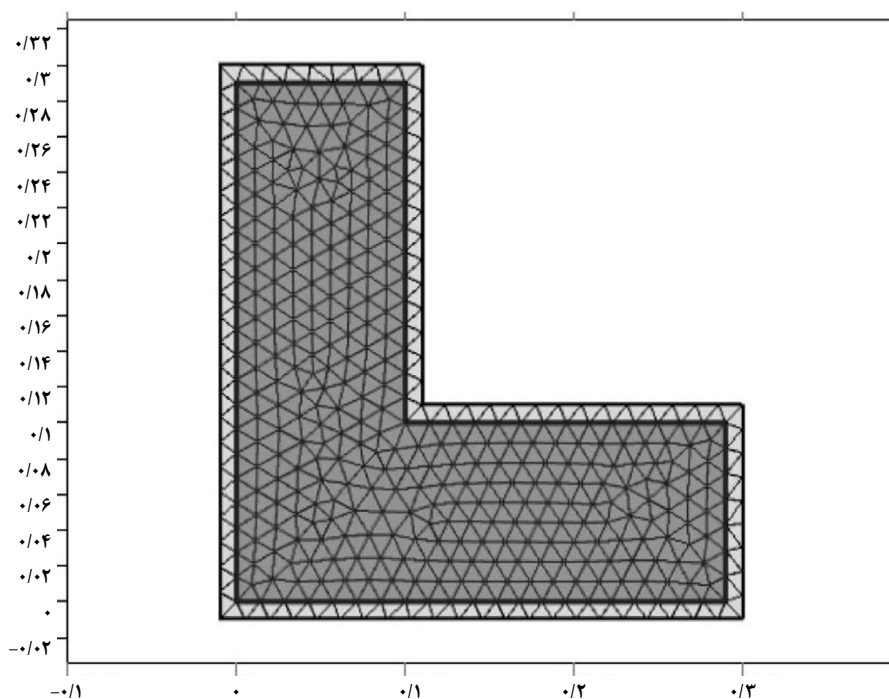
که در این معادله C_p ظرفیت گرمایی ویژه مواد تغییر فاز دهنده است. خواص ترموفیزیکی ماده تغییر فاز دهنده برای شرایط تغییر فاز از روابط زیر به دست می‌آید [۱۷ و ۱۸]:

$$k_{pcm} = \theta k_{phase1} + (1 - \theta) k_{phase2} \quad (6)$$

$$(C_p)_{pcm} = \frac{1}{\rho} (\theta (C_p)_{phase1} + (1 - \theta) (C_p)_{phase2}) + L \left(\frac{\partial \alpha_m}{\partial T} \right) \quad (7)$$

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \frac{\theta \rho_{phase1} - (1 - \theta) \rho_{phase2}}{\theta \rho_{phase1} + (1 - \theta) \rho_{phase2}} \quad (8)$$

در این روابط θ کسر ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده و L گرمای نهان ذوب ماده تغییر فاز دهنده است [۲۰-۲۱]. شرایط مرزی در شکل (۲) نشان داده شده است. مش بندی انجام شده برای این شبه‌سازی در شکل (۳) نشان داده شده است. نوع مش استفاده شده به شکل مثلثی بوده که اندازه بزرگترین المان آن 0.0165 متر و کوچکترین آن $9/3 \times 10^{-5}$ متر و تعداد المان‌های ایجاد شده برابر 2401 است. روش حل عددی حجم محدود، برای حل معادلات حاکم مورد استفاده قرار گرفته است. نرم افزار کامسول باتوجه به شرایط مرزی و مش بندی که در مراحل قبل انجام گرفت، معادلات (۱) تا (۹) را به روش عددی حل می‌کند و شاخصه‌های لازم مانند تغییرات جرم حجمی، ضریب هدایت حرارتی مؤثر و نحوه توزیع دما را به تصویر می‌کشد. روش عددی که کامسول برای حل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای در این شبه‌سازی استفاده می‌کند روش المان محدود است که در دو بعد، معادلات حاکم را بعد از مش بندی و اعمال شرایط اولیه و مرزی به روش عددی حل می‌کند.



شکل ۳. مش بندی مدل در کامسول.

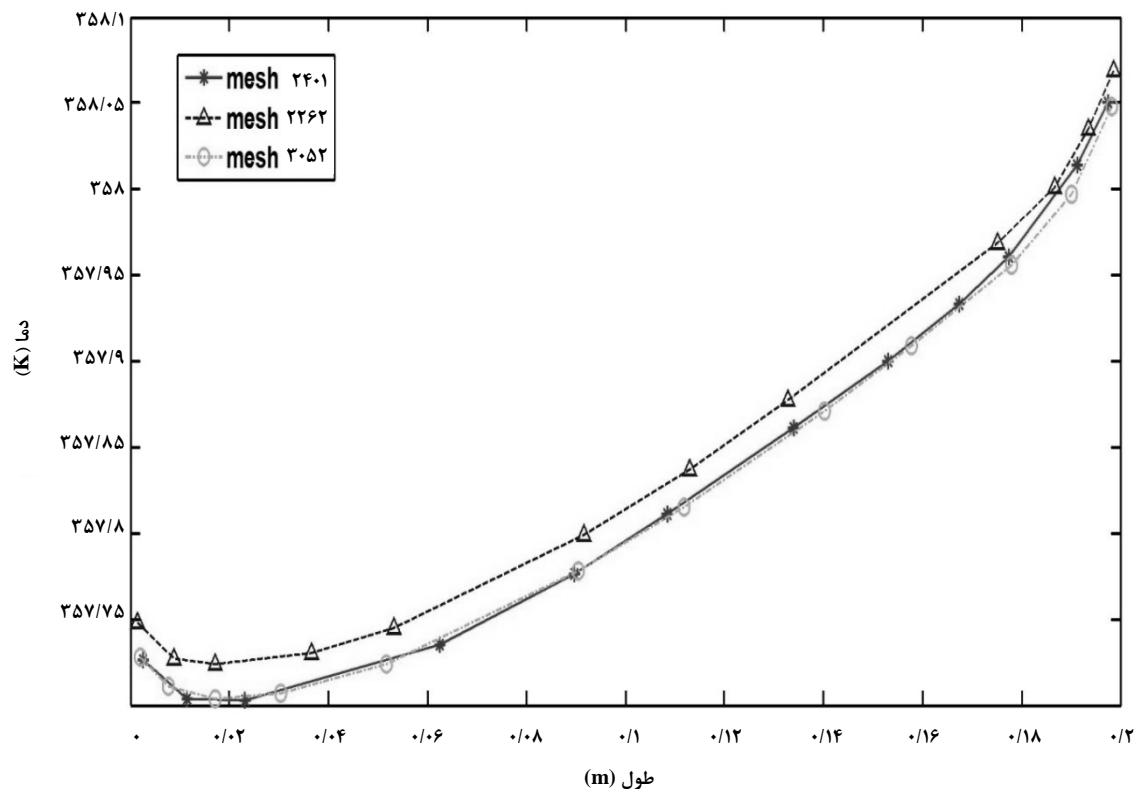
روش المان محدود دارای تفاوت کمی نسبت به اختلاف محدود در حل معادلات دیفرانسیلی پاره‌ای است، ولی هنگامی که با مسائلی که فیزیک پیچیدتری دارند کار می‌کند، از کارایی بهتری برخوردار است. متداول‌ترین روش برای حل مسائل مهندسی که معادلات دیفرانسیل پاره‌ای در آنها وجود دارد، روش المان محدود است، که بسیاری از نرم‌افزارها از جمله کامسول نیز از این روش برای حل معادلات پاره‌ای استفاده می‌کند [۲۵-۲۲]. معادلات حاکم در این پژوهش معادلات دیفرانسیلی پاره‌ای وابسته به زمان است، که به صورت دو بعدی حل شده است.

استقلال از مش یک شاخصه مهم در شبیه‌سازی است؛ مهم‌ترین مسأله در شبیه‌سازی‌های عددی، دستیابی به تعداد شبکه مناسب و کافی برای شروع حل است، از این رو ابتدا محاسبات را با یک شبکه مناسب شروع می‌کند و سپس برای بررسی استقلال حل از ساختار مش، چندین سائز متفاوت از شبکه برای حل استفاده می‌شود. می‌توان گفت در هر مدل‌سازی‌ای کمترین تعداد سلول لازم در ساختار مش برای شبیه‌سازی، یکی از شاخصه‌های کلیدی در حل با دقت خوب نتایج به‌شمار می‌رود؛ زیرا استفاده از ساختار مش کمتر از مش بهینه منجر به ایجاد خطای عددی در دقت نتایج می‌شود. همچنین افزایش بی‌رویه تعداد سلول‌ها در ساختار مش منجر به افزایش چشمگیر زمان حل و کاهش سرعت محاسبات و در نتیجه افزایش هزینه محاسباتی می‌شود. در مدل‌سازی محفظه L شکل از جنس آلومینیوم به‌همراه مواد تغییر فازدهنده به‌منظور رسیدن به تعداد سلول بهینه در ساختار مش، ابتدا از ۳ ساختار متفاوت با اندازه و تعداد سلول‌های مختلف برای شبیه‌سازی استفاده شد. در جدول (۱) اطلاعات مربوط به تعداد المان‌ها، کوچکترین و بزرگترین

اندازه مش در هر شبکه‌بندی ارائه شده است. برای ارزیابی نتایج در ساختار متفاوت مش و انتخاب مش بهینه شاخصه دما، در طول خط عمودی بر روی دیواره که در موقعیت یکسان برای هر سه حالت مش‌بندی ایجاد شده است، به‌طور متوسط محاسبه و با هم مقایسه شده اند. هدف از انتخاب این خط عمودی پوشش‌دهی کلی در کل ارتفاع محفظه از ابتدا تا انتها است. برای مشخص شدن تأثیر نحوه مش‌بندی بر روی نتایج به بررسی دما در محفظه در خط ایجاد شده در نمودار شکل (۴) می‌پردازیم. همان‌گونه که در شکل (۴) پیدا است، در ابتدای طول خط دیواره که در گوشه محفظه قرار گرفته است و با بیرون تبادل حرارتی بهتری دارد، دما افت می‌کند که به دلیل کوتاه بودن مسیر، دما تغییر زیادی نداشته است (حدود ۰/۰۵ درجه کلونین) با رسیدن به بخش‌های میانی و اثر دمای بالای داخل محفظه، دما سیر صعودی داشته، این روند را تا انتهای خط ادامه می‌دهد. این روند تغییر دما در همه ۳ نوع شبکه‌بندی دیده می‌شود. اما با مقایسه روند تغییر دما در مش‌بندی‌های مختلف، مشاهده می‌شود که کمترین تعداد مش (۲۴۰۱ المان) تفاوت زیادی با بقیه شبکه‌بندی‌ها و به‌ویژه شبکه با تعداد بالاتر ندارد. در ادامه با توجه به تغییرات ناچیز روند دما در این سه نوع شبکه‌بندی در پایان، کم‌ترین تعداد مش که دارای دقت بالاتری هم باشد از این سه نوع مش‌بندی یعنی تعداد ۲۴۰۱ انتخاب خواهد شد. همچنین با توجه به ستون آخر جدول (۱) که تعداد المان‌های قسمت دیواره آورده شده است، می‌توان نتیجه گرفت که تغییر تعداد المان‌ها و ابعاد مش‌بندی در این قسمت نیز تأثیر چشمگیری بر نتایج شبیه‌سازی نداشته است.

جدول ۱. مشخصات مش‌بندی‌های مختلف انجام گرفته.

تعداد المان	بزرگترین المان	کوچکترین المان	المان‌های دیواره
مش نوع ۱	۳۰۵۲	۰/۰۱۱۵	$3/8 \times 10^{-5}$
مش نوع ۲	۲۲۶۲	۰/۰۳۱	۶۵۴
مش نوع ۳	۲۴۰۱	۰/۰۱۶۴	۷۲۲



شکل ۴. تغییرات دما در طول محفظه برای سه نوع مش بندی.

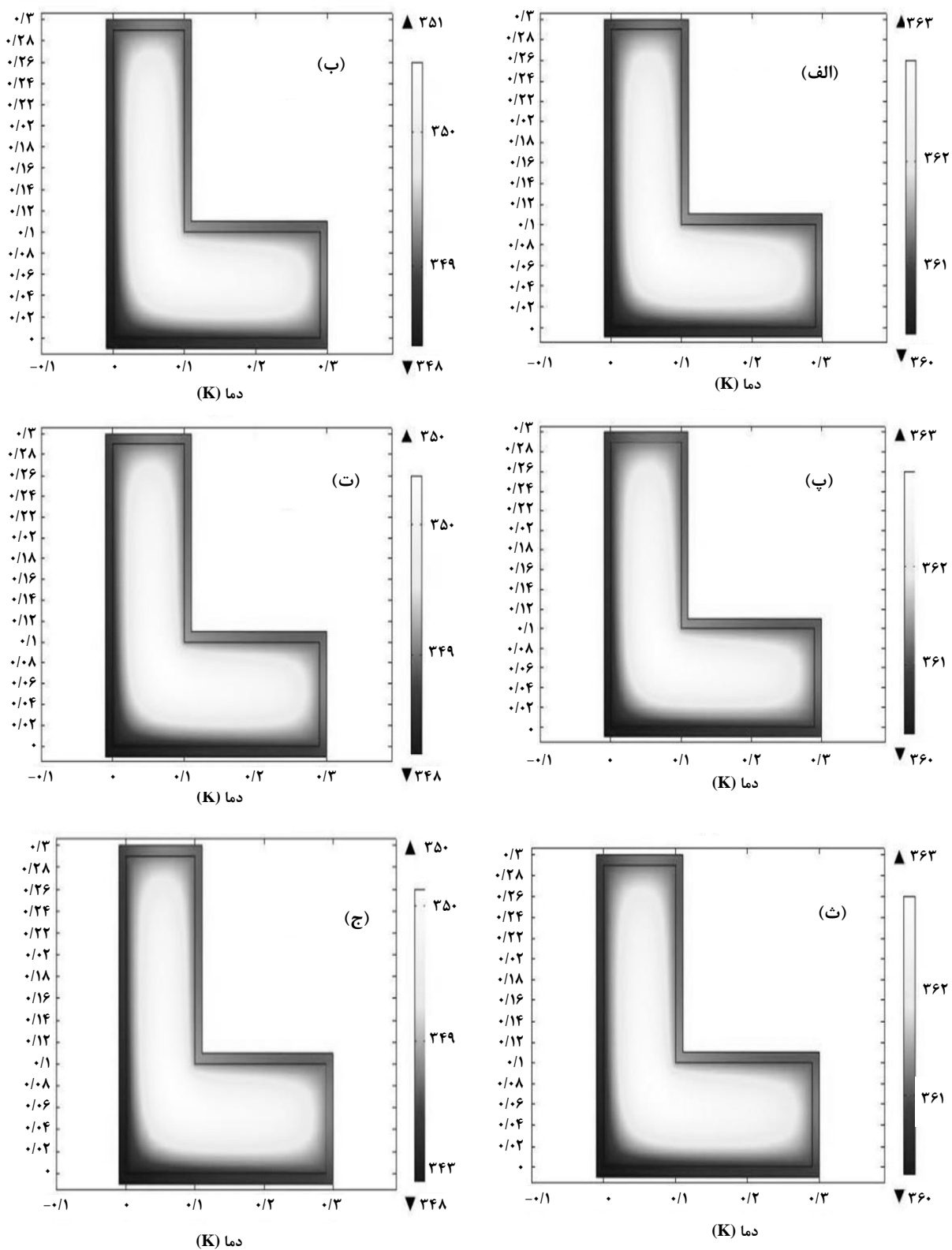
۴-۲ تغییرات توزیع گرانشی

پلی اتیلن گلايکول، با جذب گرما، دچار تغییر فاز شده، از جامد به مایع تبدیل می‌شود. در نتیجه گرانشی نانوالیاف دچار تغییراتی می‌شود. شکل (۶) تغییرات توزیع گرانشی را در محفظه، در زمان‌های ۳۰ و ۱۲۰ دقیقه با ترکیب درصد وزنی مختلف نانوالیاف کامپوزیتی نشان می‌دهد. با توجه به اینکه نقطه ذوب پلی آمید حدود 219°C است و نقطه ذوب پلی اتیلن گلايکول در محدوده 20 تا 45 درجه سلسیوس است (با توجه به جرم مولکولی آن متغیر است)، بنابراین با جذب گرما از آب داغ داخل لوله L شکل، پلی اتیلن گلايکول به عنوان ماده تغییر فازدهنده، بیشتر در معرض تغییرات گرانشی قرار می‌گیرد. از این رو همان گونه که در قسمت‌های مختلف شکل (۶) مشاهده می‌شود، هرچه درصد وزنی پلی اتیلن گلايکول در نانوالیاف بیشتر باشد تغییرات گرانشی بیشتر خواهد بود. در ضمن با گذشت زمان، گرمای بیشتری به وسیله پلی اتیلن گلايکول جذب و تغییرات گرانشی بیشتری مشاهده می‌شود.

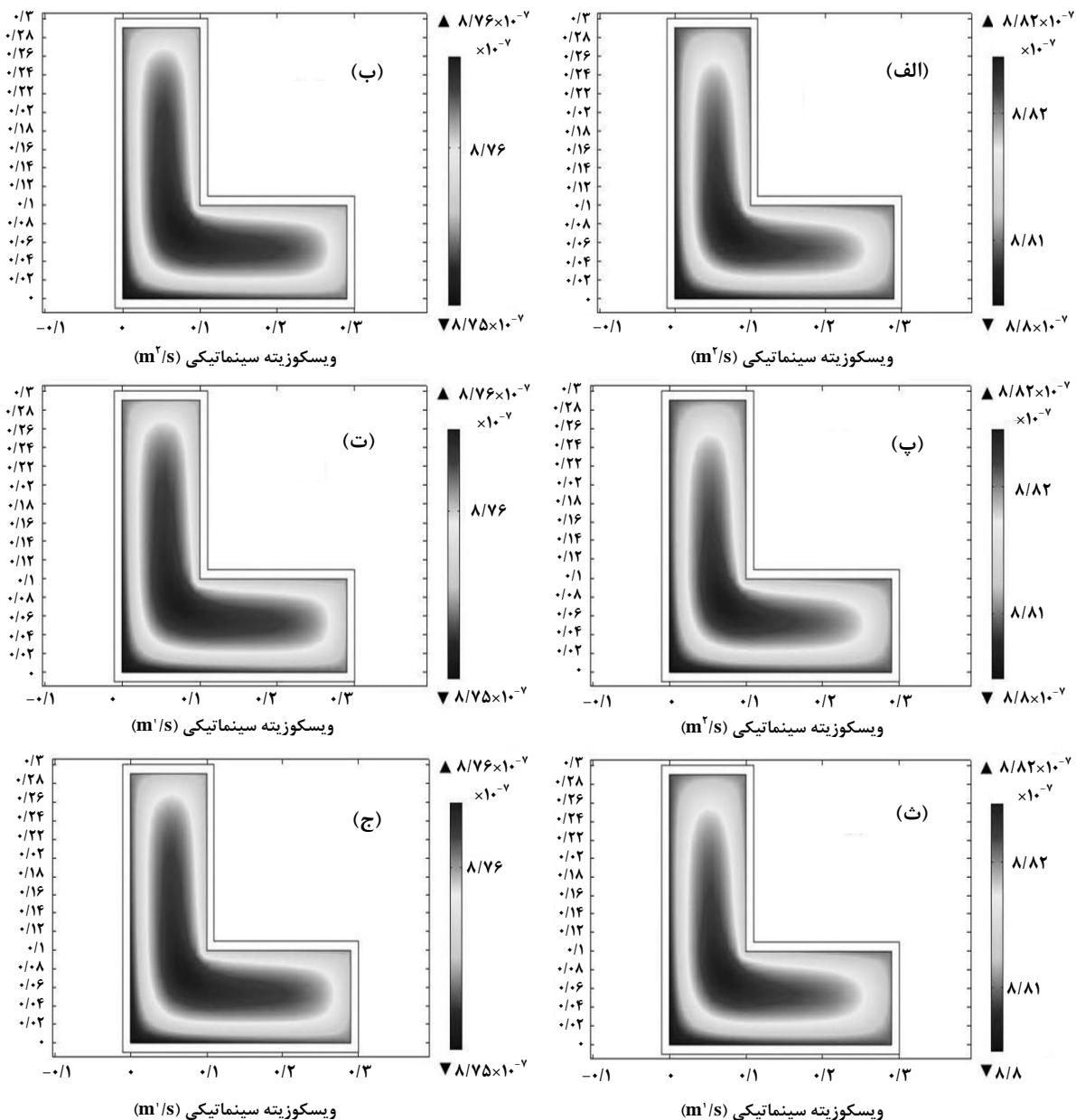
۴. نتایج و بحث

۴-۱ مقایسه تغییرات توزیع دما

شکل (۵) توزیع دما در قسمت‌های مختلف محفظه را در ترکیب درصدی وزنی متفاوت از چندسازه مواد تغییر فازدهنده (پلی اتیلن گلايکول و پلی آمید) در زمان‌های ۶۰ و ۱۸۰ دقیقه نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود با گذشت زمان، انتقال حرارت بیشتری انجام گرفته است. حضور هوا تأثیر چندانی بر مدیریت گرمایی محفظه ندارد. با قراردادن لایه نازکی از نانوالیاف کامپوزیتی بر روی محفظه، با توجه به بالا بودن ظرفیت حرارتی ماده تغییر فازدهنده (پلی اتیلن گلايکول) و توانایی خوب آنها در ذخیره‌سازی و جذب گرما، دمای داخل محفظه کاهش پیدا می‌کند، که استفاده از پلی اتیلن گلايکول به عنوان یک ماده تغییر فازدهنده و به دلیل بیشتر بودن ظرفیت گرمایی آن نسبت به پلی آمید تأثیر بیشتری دارد. مقایسه حالت‌های مختلف نشان می‌دهد که هرچه درصد وزنی پلی اتیلن گلايکول بیشتر باشد میزان جذب گرما بیشتر است و دما تندتر کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۵. توزیع دما به ترتیب (الف-ب) نانوالیاف با ۹۰٪ وزنی اتیلن گلایکول-۱۰٪ پلی آمید در زمان های ۶۰ و ۱۸۰ دقیقه، (ت-پ) نانوالیاف با ۷۵٪ وزنی اتیلن گلایکول-۲۵٪ پلی آمید در زمان های ۶۰ و ۱۸۰ دقیقه، (ث-ج) نانوالیاف با ۵۰٪ اتیلن گلایکول-۵۰٪ پلی آمید وزنی در زمان های ۶۰ و ۱۸۰ دقیقه.

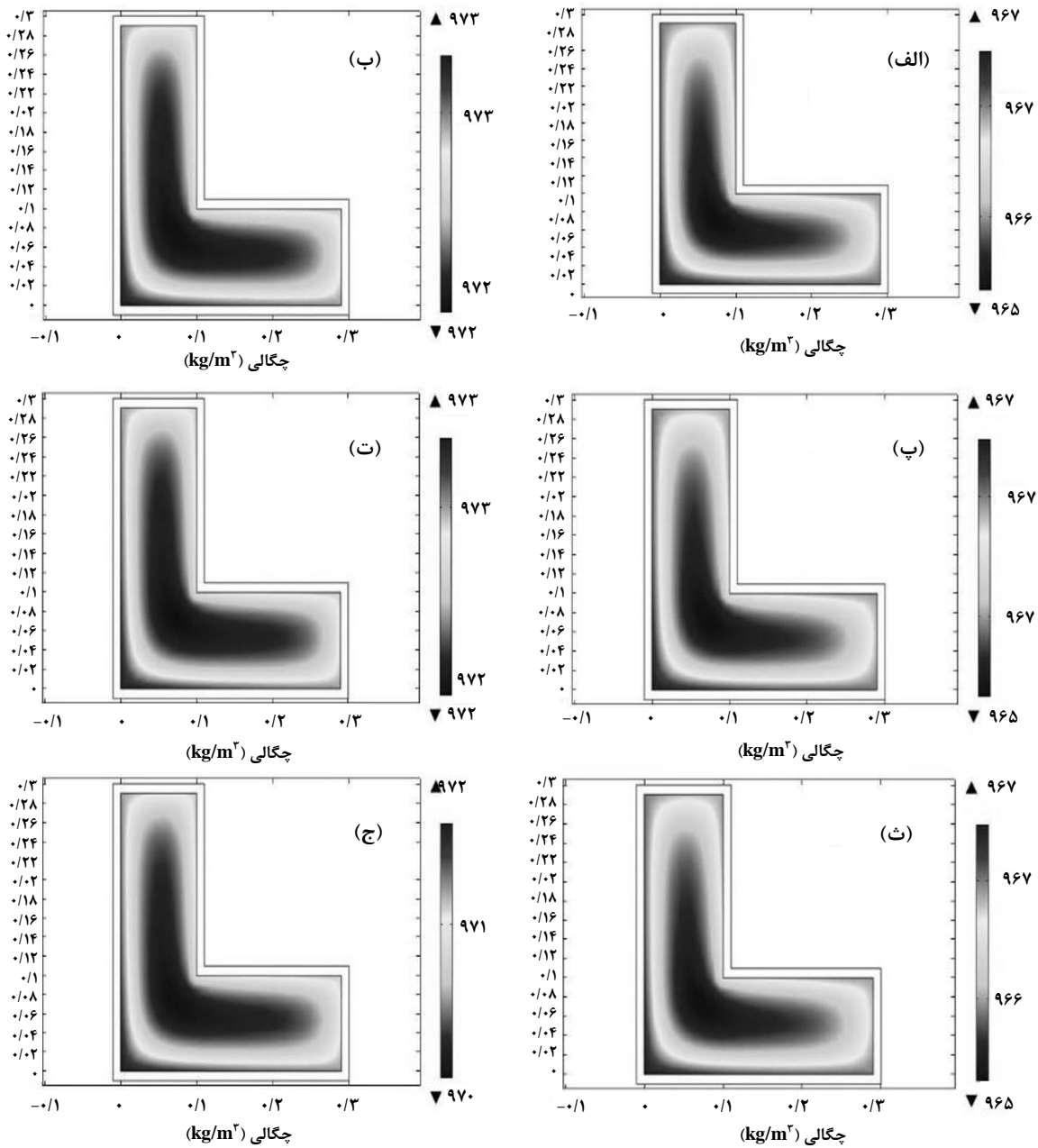


شکل ۶. تغییرات گرانیوی نانوکامپوزیت به ترتیب (الف-ب): نانوالیاف با ۹۰٪ وزنی پلی اتیلن گلایکول-۱۰٪ پلی آمید در زمان‌های ۳۰ و ۱۲۰ دقیقه، (پ-ت) نانوالیاف با ۷۵٪ وزنی پلی اتیلن گلایکول-۲۵٪ پلی آمید در زمان‌های ۳۰ و ۱۲۰ دقیقه، (ث-ج) نانوالیاف با ۵۰٪ وزنی پلی اتیلن گلایکول-۵۰٪ پلی آمید در زمان‌های ۳۰ و ۱۲۰ دقیقه.

۳-۴ تغییرات چگالی نانوالیاف

شکل (۷) تغییرات چگالی نانوجندسازه موجود در محفظه را در شرایط مختلف در زمان‌های ۳۰ و ۱۲۰ دقیقه نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، با گذشت زمان، میزان چگالی نانوکامپوزیت‌ها افزایش می‌یابد. هرچه میزان بیشتری

از پلی اتیلن گلایکول ذوب شود حرکت مواد ذوب‌شده، بیشتر و برخورد آنها با یکدیگر بیشتر می‌شود. نقش پلی آمید به‌عنوان ماتریکس (نگهدارنده) مهم است که با گرماگرفتن و ذوب‌شدن پلی اتیلن گلایکول به‌عنوان ماده تغییر فزاینده از حرکت و نشی آن جلوگیری می‌کند.

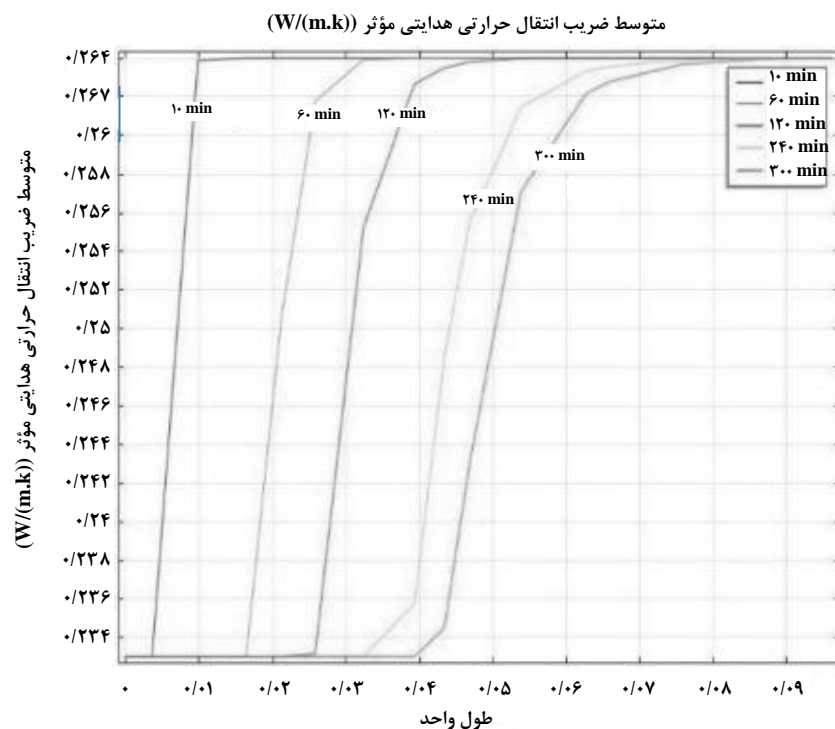


شکل ۷. تغییرات چگالی نانوکامپوزیت (الف-ب) نانوالیاف با ۹۰٪ وزنی پلی اتیلن گلیکول-۱۰٪ پلی آمید در زمان‌های ۳۰ و ۱۲۰ دقیقه، (پ-ت) نانوالیاف با ۷۵٪ وزنی پلی اتیلن گلیکول-۲۵٪ پلی آمید در زمان‌های ۳۰ و ۱۲۰ دقیقه، (ث-ج) نانوالیاف با ۵۰٪ وزنی پلی اتیلن گلیکول-۵۰٪ پلی آمید در زمان‌های ۳۰ و ۱۲۰ دقیقه

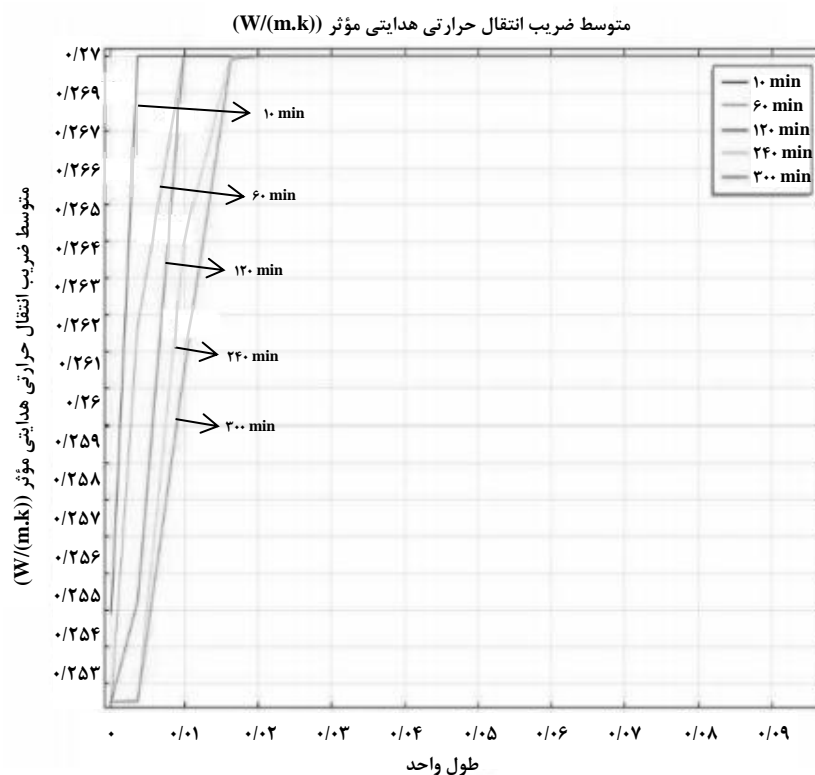
پلی آمید و ۹۰ درصد وزنی پلی اتیلن گلیکول) و (۲۵ درصد وزنی پلی آمید و ۷۵ درصد وزنی پلی اتیلن گلیکول) به ترتیب در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد.

۴-۴ مقایسه ضریب انتقال حرارت

شکل‌های (۸) و (۹)، ضریب انتقال حرارت در طول محفظه را در ۲ ترکیب درصد وزنی مختلف از نانوجندسازی مواد تغییر فازدهنده (پلی اتیلن گلیکول و پلی آمید) با درصد وزنی‌های (۱۰ درصد وزنی



شکل ۸. ضریب انتقال حرارت هدایتی در نانوکامپوزیت نانوالیاف ۹۰ درصد وزنی پلی‌اتیلن گلاکول در طول محفظه در زمان‌های مختلف.



شکل ۹. ضریب انتقال حرارت هدایتی در نانوجندساز نانوالیاف ۷۵ درصد وزنی پلی‌اتیلن گلاکول در طول محفظه در زمان‌های مختلف.

در ذخیره‌سازی انرژی حرارتی"، فناوری نانو، سال دهم، ۱۶۵، ۱۶-۲۰، (۱۳۹۰).

[۳] سیف‌پور، م.، نوری، م.، مختاری، ج.، "مواد تغییر فازدهنده و کاربرد آنها در منسوجات"، مجله علوم و فناوری نساجی، دوره اول، ۱، ۱۰-۱۸، (۱۳۹۰).

[4] Pielichowska, K., Pielichowski, K., "Phase change materials for thermal energy storage", Journal of Progress in Material Science, 65, pp. 67-123, (2014).

[5] Babapoor, A., Azizi, M., Karimi, G., "Thermal management of a Li-ion battery using carbon fiber-PCM composites", Applied Thermal Engineering, 85, pp. 281-290, (2015).

[6] Babapoor, A., Karimi, G., Khorram, M., "Fabrication and characterization of nanofiber-nanoparticle-composites with phase change materials by electrospinning", Applied Thermal Engineering, 99, pp. 1225-1235, (2016).

[7] Babapoor, A., Karimi, G., Sabbaghi, S., "Thermal characteristic of nanocomposite phase change materials during solidification process", Journal of Energy Storage, 7, pp. 74-81, (2016).

[8] Karimi, G., Azizi, M., Babapoor, A., "Experimental study of a cylindrical lithium ion battery thermal management using phase change material composites", Journal of Energy Storage, 8, pp. 168-174, (2016).

[۹] حسینی، م.، محمدیون، م.، مرتضوی، س.، "بررسی انتقال حرارت و تحلیل انرژی مبدل حرارتی دو لوله‌ای مجهز به آشفته‌ساز با بکارگیری نانوسیال TiO_2 "، مجله تحقیقاتی مواد نانوکامپوزیتی، دوره هشتم، ۲۵، ۴۱-۵۱، (۱۳۹۵).

[۱۰] اکبری خرمی، ج.، کیان‌پور راد، م.، واعظی، ر.، "سنتر نانوالیاف کامپوزیتی SnO_2/ZnO به روش الکترورسی و بررسی عوامل مؤثر محلولی و فرایندی بر مورفولوژی نانوالیاف حاصل"، مجله تحقیقاتی مواد نانوکامپوزیتی، دوره دوم، ۵، ۱-۱۱، (۱۳۸۹).

[11] Babapoor, A., Karimi, G., Golestaneh, S. I., Ahmadi, M., "Coaxial electro-spun PEG/PA6 composite fibers: fabrication and characterization", Applied Thermal Engineering, 118, pp. 398-407, (2017).

[12] Golestaneh, S. I., Karimi, G., Babapoor, A., Torabi, F., "Thermal performance of co-electrospun fatty acid nanofiber composites in the presence of nanoparticles", Applied Energy, 212, pp. 552-564, (2018).

ضریب انتقال حرارت چندسازه مواد تغییر فازدهنده پلی‌اتیلن گلیکول و پلی‌آمید در طول محفظه به دلیل وجود دو فاز جامد و مایع داخل محفظه از فاز جامد تا مایع تغییر می‌کند و در فاز جامد مقدار آن بیشتر است. با گذشت زمان به دلیل افزایش دما چندسازه بیشتری ذوب و مقدار ضریب انتقال حرارت بیشتر به مقادیر آن در فاز مایع نزدیک می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش نانوالیاف پلی‌اتیلن گلیکول (به‌عنوان ماده تغییر فازدهنده) - پلی‌آمید ۶ (به عنوان نگهدارنده) به کمک نرم‌افزار کامسول و در یک لوله L شکل در حالت‌های مختلف، شبیه‌سازی شده‌اند. علت انتخاب محفظه L شکل، این است که این حالت در بسیاری اوقات، در صنعت مشاهده می‌شود و از جمله بخش‌هایی است که اتلاف انرژی در آن زیاد است. از این پژوهش نتایج مختلفی به دست آمده است که از مهمترین آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. استفاده از مواد تغییر فازدهنده در بهبود مدیریت حرارتی و کنترل دما بسیار مؤثر است و از سویی می‌تواند به‌عنوان یک ماده مناسب برای ذخیره‌سازی انرژی به کار برده شود.
۲. پلی‌اتیلن گلیکول ماده مناسبی برای جذب و ذخیره انرژی است و در کنترل و مدیریت حرارتی بهتر عمل می‌کند.
۳. پلی‌آمید به دلیل نقطه ذوب بالا می‌تواند به‌عنوان ماتریکس (نگهدارنده) PEG عمل کند.
۴. استفاده از این دو ماده به صورت نانوالیاف کامپوزیت باعث به دست آمدن خواص حرارتی بهتر و کارآمدتر برای کنترل دما می‌شود.
۵. افزایش میزان پلی‌آمید موجود در کامپوزیت موجب افزایش گرانشی سیال می‌شود. بالا بودن گرانشی پلی‌آمید موجب کاهش سرعت سیال می‌شود.
۶. خواص ترموفیزیکی نانوالیاف به دما و زمان وابسته است.

مراجع

- [1] IEA, "World energy outlook 2010", International Energy Agency, (2010).
- [۲] شیخ جابری، ف.، شریعتی‌نیاسر، م.، "استفاده از فناوری نانو

- [20] Bahari, M., Najafi, B., Babapoor, A., "Evaluation of α -AL₂O₃-PW nanocomposites for thermal energy storage in the agro-products solar dryer", *Journal of Energy Storage*, 28, (2020).
- [21] Haghghi, A., Babapoor, A., Azizi, M., Javanshir, Z., Ghasemzadeh, H., "Optimization of the thermal performance of PCM nanocomposites", *Journal of Energy Management and Technology (JEMT)*, 4, pp. 14-19, (2020).
- [22] Sakkaki, M., Sadegh Moghanlou, F., Parvizi, S., Baghbanijavid, H., Babapoor, A., Shahedi Asl, M., "Phase change materials as quenching media for heat treatment of 42CrMo4 steels", *Journal of Central South University*, (2019).
- [۲۳] باباپور، ع.، کریمی، غ.، "سنتز و بررسی پایداری حرارتی نانومواد تغییر فاز دهنده هسته-پوسته دوغابی"، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۱۳۹۷).
- [24] Sabahi Namini, A., Ahmadi, Z., Babapoor, A., Shokouhimehr, M., Shahedi Asl, M., "Microstructure and thermomechanical characteristics of spark plasma sintered TiC ceramics doped with nano-sized WC", *Ceramics International*, 45, pp. 2153-2160, (2019).
- [۲۵] حقیقی، ع.، باباپور، ع.، "استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر راهی مؤثر جهت کاهش آلودگی محیط زیست"، نشریه دوفصلنامه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو، سال پنجم، ۹، ۴۰-۵۰، (۱۳۹۷).
- [۱۳] باباپور، ع.، مسعودی ریحان، م.، "مروری بر مواد تغییر فاز دهنده به‌عنوان منبع ارزشمند انرژی"، پنجمین کنفرانس انرژی‌های تجدیدپذیر، پاک و کارآمد، تهران، اسفند (۱۳۹۲).
- [14] Cari, L., White, R., "Mathematical modeling of a lithium ion battery with thermal effects in COMSOL Inc. Multiphysics (MP) software", *Journal of Power Sources*, 196, p. 5985-5989, (2011).
- [۱۵] باباپور، ع.، بخشوده‌نیا، ی.، بخشوده‌نیا، م.، "مروری بر مدل‌سازی عددی و آنالیز کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در ساختمان جهت کاهش مصرف انرژی"، پنجمین کنفرانس انرژی‌های تجدیدپذیر، پاک و کارآمد، تهران، اسفند (۱۳۹۲).
- [16] Samimi, F., Babapoor, A., Azizi, M., Karimi, G., "Thermal management analysis of a Li-ion battery cell using phase change material loaded with carbon fibers", *Energy*, 96, pp. 355-371, (2016).
- [۱۷] باباپور، ع.، پیشکار آذری، ر.، گلستانه، ا.، قاضی طباطبائی، ز.، "شبیه‌سازی مدیریت حرارتی مواد نانوکامپوزیت تغییر فاز دهنده توسط تکنیک CFD"، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، دوره ۳۷، ۴، (۱۳۹۷).
- [۱۸] باباپور، ع.، کریمیان، ف.، کریمی، غ.، "مدلسازی عددی کاربرد نانومواد تغییر فاز دهنده"، کنفرانس ملی مهندسی مکانیک، ملایر، ایران، (۱۳۹۲).
- [۱۹] باباپور، ع.، هروی، م.، محمودی، م.، کریمی، غ.، "مدیریت گرمایی در باتری‌های یون لیتیوم با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده"، کنفرانس ملی مهندسی مکانیک، ملایر، ایران، (۱۳۹۲).