

مطالعه عددی اثر پره و دوران محفظه در فرایند ذوب ماده تغییر فازدهنده در یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی گرمای نهان مربعی

محمد گوهرخواه^{۱*}، صابر عبدالله زاده بناب^۲، علی زرگر صالح^۳

۱-دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران، Goharkhah@sut.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران، s_abdollahzadehbonab402@sut.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران، a.zargarsaleh@gmail.com

چکیده

با توجه به مصرف روزافزون انرژی در دنیای امروز و پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از آن، توسعه‌ی انرژی‌های تجدیدپذیر و روش‌های نوین ذخیره‌سازی انرژی به یکی از محورهای اصلی پژوهش‌های علمی تبدیل شده است. در میان روش‌های مختلف ذخیره‌سازی انرژی، ذخیره‌سازی حرارتی نهان (LHTES) جایگاه ویژه‌ای دارد. در این روش، مواد تغییر فازدهنده (PCM) به منظور افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی و آزادسازی انرژی به کار گرفته می‌شوند. این مواد قادرند در فرایند تغییر فاز از جامد به مایع و بالعکس، مقدار قابل توجهی انرژی را ذخیره یا آزاد نمایند. هدف اصلی پژوهش عددی حاضر، بررسی تأثیر جهت‌گیری محفظه‌ی ماده‌ی تغییر فازدهنده و همچنین به کارگیری پره بر فرایند ذوب، در یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی گرمای نهان با ساختار دولوله‌ای است. این سیستم شامل یک کانال مربعی خارجی عایق و یک لوله‌ی داخلی گرم مجهز به پره‌های خارجی بوده و فضای بین آن‌ها با ماده‌ی تغییر فازدهنده پر شده است. نتایج نشان می‌دهد که در حالت بدون پره، تغییر زاویه قرارگیری محفظه از ۰ تا ۴۵ درجه، زمان ذوب کامل سیستم را تا حدود ۱۶/۶۷ درصد افزایش می‌دهد. در مقابل، افزودن پره به لوله‌ی داخلی در زاویه محفظه ۴۵ درجه، زمان ذوب کامل را به میزان چشمگیری (۵۸/۱۷ درصد) نسبت به حالت بدون پره و حالت افقی کاهش می‌دهد. در حقیقت، حضور پره‌ها در نسبت‌های مختلف دوران، علاوه بر افزایش سطح انتقال حرارت، موجب تسریع فرایند ذوب در بخش‌های پایینی محفظه که ذوب کندتری دارند شده و همچنین با تقویت جریان‌های همرفتی در این نواحی، شرایط بهینه‌تری برای تغییر فاز فراهم می‌آورد.

کلمات کلیدی

سیستم ذخیره‌ساز انرژی حرارتی، ماده تغییر فاز دهنده، جابجایی طبیعی، مبدل حرارتی، پره

۱- مقدمه

ذخیره‌سازی انرژی گرمای نهان بر پایه مواد تغییر فازدهنده (PCM) به دلیل ظرفیت ذخیره‌سازی ۵ تا ۱۴ برابر بیش‌تر نسبت به سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارت محسوس، به طور گسترده در مخازن انرژی به کار گرفته می‌شود. این فناوری به واسطه‌ی چگالی بالای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی و تغییر دمای نسبتاً ثابت در طول فرآیندهای ذوب و انجماد، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده و قابلیت ادغام با سامانه‌های حرارتی گوناگون نظیر کلکتورهای خورشیدی، سلول‌های فتوولتائیک، تهویه مطبوع ساختمان و خنک‌سازی قطعات الکترونیکی را داراست [۱ و ۲]. مطالعات انجام گرفته روی ساختمان‌های پیش‌ساخته سبک‌وزن نشان می‌دهد که به کارگیری PCM

*نویسنده مسئول، محمد گوهرخواه Goharkhah@sut.ac.ir

می‌تواند موجب کاهش قابل توجه مصرف انرژی می‌شود؛ برای مثال یک مطالعه موردی شبیه‌سازی شده روی یک واحد پیش‌ساخته نشان داد صرفه‌جویی سالانه انرژی بسته به محل اجرای PCM بین حدود ۱۲٪ (اجرای روی دیوار جنوبی) تا حداکثر ۳۷.۲٪ (اجرای روی کل پوسته) متغیر است، و اجرای PCM به‌عنوان لایه داخلی دیوار با نقطه ذوب نزدیک ۲۱ درجه سانتیگراد بهترین عملکرد و بازده اقتصادی را ارائه می‌دهد [۳]. تحلیل رفتار حرارتی سطوح شیشه‌ای تحت تابش خورشیدی نشان می‌دهد که شدت تابش، زاویه برخورد و خصوصیات طیفی جداره شیشه‌ای نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان جذب انرژی و انتقال حرارت به فضای داخلی دارند. مطالعات انجام‌شده بر جداره‌های شیشه‌ای بیان می‌کند که تغییر در ویژگی‌های جذب و عبور تابشی می‌تواند به‌طور مستقیم بر دمای سطح، بار حرارتی و آسایش حرارتی داخل ساختمان اثر بگذارد؛ موضوعی که از نظر فیزیکی با سازوکار جذب انرژی در کلکتورهای خورشیدی مشابه بوده و می‌تواند با استفاده از PCM مورد ارزیابی قرار گیرد [۴]. کاربرد ترکیبی PCM با سامانه‌های انرژی خورشیدی نیز به‌طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است؛ چراکه کلکتورهای خورشیدی با نوسانات حرارتی روزانه مواجه‌اند و به‌کارگیری PCM به‌عنوان یک لایه ذخیره‌ساز، با جذب انرژی در ساعات اوج تابش و رهاسازی آن در زمان‌های کم‌تابش، موجب افزایش پایداری حرارتی و بهبود بازده کلی سامانه می‌شود [۵].

با وجود مزایای PCM ها، مشکل اصلی این مواد رسانایی حرارتی پایین آن‌ها است که موجب کاهش نرخ انتقال حرارت در طول فرآیندهای ذوب و انجماد می‌شود. برای رفع این محدودیت، روش‌های گوناگونی به منظور بهبود انتقال حرارت پیشنهاد شده است. این روش‌ها شامل استفاده از پره‌ها [۶]، شبکه‌های فلزی/گرافیتی [۷]، لوله‌های حرارتی [۸]، [۹]، پراکنده‌سازی نانوذرات با رسانایی بالا در داخل PCM [۱۰] و میکروکپسوله‌سازی PCM [۱۱] است. روش‌های یادشده در واقع تکنیک‌های غیرفعال برای بهبود سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی محسوب می‌شوند. در مقابل، روش‌های فعال مانند به‌کارگیری میدان مغناطیسی [۱۲ و ۱۳]، ایجاد ارتعاش [۱۴ و ۱۵]، دوران پیوسته محفظه حاوی مواد تغییر فاز [۱۶] و بهره‌گیری از دیوارهای گرم دورانی [۱۷] از جمله رویکردهای فعال برای بهبود سامانه‌های ذخیره‌ساز مبتنی بر مواد تغییر فازدهنده به شمار می‌آیند. بدیهی است طراحی و به‌کارگیری روش‌های غیرفعال هزینه کمتر، طراحی ساده‌تر، عملیاتی‌سازی آسان‌تر و پیچیدگی کمتری دارند. یکی از نخستین مطالعات در زمینه ذوب PCM در محفظه‌های مایل توسط وب و ویسکانتا [۱۸] انجام شد. آن‌ها به‌صورت تجربی فرآیند ذوب PCM را در یک محفظه مستطیلی با زوایای مایل ۰، ۳۰ و ۶۰ درجه و با عدد استفان ثابت بررسی کردند. نتایج نشان داد که نرخ ذوب PCM به‌شدت به زاویه مایل بودن محفظه وابسته است. کوشا و همکاران [۱۹] نیز اثر زاویه مایل (از ۰ تا ۹۰°) را بر عملکرد حرارتی یک واحد ذخیره‌سازی حرارتی پوسته-لوله بررسی کرده و دریافته‌اند که نرخ ذوب در حالت افقی بیش از سایر زوایا است. کامکاری و املشی [۲۰] به‌صورت عددی فرآیند ذوب ماده تغییر فازدهنده را در محفظه‌های مستطیلی عمودی و مایل مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با کاهش زاویه مایل محفظه، نرخ انتقال حرارت افزایش یافته و در نتیجه زمان ذوب کاهش می‌یابد. این امر به تشدید جریان‌های جابجایی و ایجاد جریان‌های چرخشی متنوع نسبت داده شد. همچنین، مستقل از عدد استفان، زمان ذوب کامل در محفظه‌های مایل با زوایای ۰ و ۴۵° به ترتیب حدود ۵۲٪ و ۳۷٪ کوتاه‌تر از محفظه عمودی بود. سیابی و همکاران [۲۱] به‌طور تجربی و عددی ویژگی‌های ذوب یک محفظه استوانه‌ای ذخیره‌سازی حرارتی مبتنی بر PCM را بررسی کردند. در این مطالعه، پارافین واکس به‌عنوان ماده تغییر فازدهنده انتخاب شد و سه موقعیت زاویه‌ای از حالت عمودی تا افقی مدنظر قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد زاویه مایل بودن سامانه ذخیره‌سازی تأثیر قابل توجهی بر توزیع دما، زمان ذوب و پروفیل ذوب PCM دارد. همچنین مشاهده شد که در زاویه ۴۵ درجه نسبت به حالت افقی، PCM سریع‌ترین نرخ ذوب را در مقایسه با زوایای ۰ و ۹۰° تجربه می‌کند.

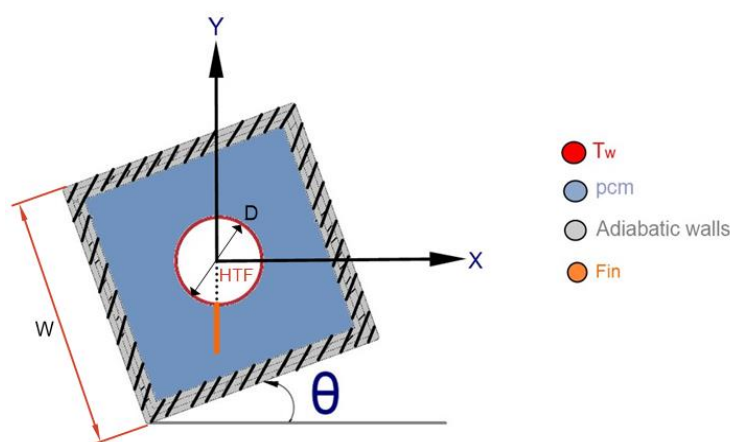
مت و همکاران [۲۲] به‌صورت عددی فرآیند تغییر فاز PCM نوع RT82 را در یک سامانه ذخیره‌سازی سه‌لوله‌ای با و بدون استفاده از پره بررسی کردند. به‌منظور تعیین مؤثرترین پیکربندی، شبیه‌سازی‌ها روی سه نوع پره شامل داخلی، خارجی و ترکیبی داخلی-خارجی انجام شد. همچنین تکنیک‌های گرمایش لوله از داخل، خارج و هر دو سمت بررسی شدند. نتایج نشان داد که استفاده از پره‌های ترکیبی داخلی-خارجی موجب کاهش ۴۳/۳٪ در زمان شارژ PCM نسبت به حالت بدون پره می‌شود. افزون بر این، تفاوت میان نتایج سه روش افزایش انتقال حرارت چندان چشمگیر نبود. نخچی و اصفهانی [۲۳] با استفاده از روش آنتالپی-تخلخل عملکرد شارژ یک محفظه ذخیره‌سازی حرارتی نهان مستطیلی مبتنی بر PCM با پره‌های پلکانی را بررسی کردند. ماده تغییر فاز انتخاب‌شده در این مطالعه اسید لوریک بود و دیواره جانبی محفظه برای ذوب PCM گرم شد. سه نوع پره پلکانی موازی با نسبت‌های متفاوت که به سمت بالا و پایین

قرار داشتند، برای یافتن مؤثرترین گزینه مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج نشان داد پره پلکانی رو به پایین با نسبت پلکان ۴ بیشترین تأثیر را داشته و موجب افزایش ۵۶/۳٪ در زمان ۸۰۰ ثانیه و ۶۵/۵٪ در زمان ۳۶۰۰ ثانیه شد. مهدی و همکاران [۲۴] پیکربندی‌های نوین پره را بررسی کردند و دریافتند که این پیکربندی‌ها می‌توانند زمان ذوب را تا ۳۰٪ نسبت به پیکربندی استاندارد پره کاهش دهند. این یافته اهمیت قرارگیری هوشمندانه پره‌ها را نشان می‌دهد. همچنین مشخص شد که مکانیزم‌های متفاوت ذوب در نیمه بالایی و پایینی مبدل حرارتی لوله‌ای سه‌لوله‌ای (TTHX) نیازمند پیکربندی پره متفاوت برای هر نیمه به منظور بهینه‌سازی فرآیند ذوب هستند. اسماعیل و همکاران [۲۵] فرآیند انجماد PCM پیرامون یک سیلندر محوری مجهز به پره را به صورت عددی و تجربی تحلیل کردند. نتایج آنها نشان داد که طول پره و تعداد پره‌ها از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر هستند و این یافته‌ها می‌تواند برای طراحی ساختارهای نوین پره بسیار مفید باشد. سفری و همکاران [۲۶] پیشنهاد کردند که استفاده از پره‌های بلندتر و نازک‌تر نسبت به پره‌های کوتاه و ضخیم‌تر، مزیت بیشتری برای افزایش نرخ ذوب دارد. همچنین مشخص شد که در محفظه‌های افقی با طول پره‌های ۲۵ و ۳۵ میلی‌متر، افزایش تعداد پره‌ها الزاماً باعث تسریع ذوب نمی‌شود. یو و همکاران [۲۷] به منظور تقویت عملکرد ذوب واحدهای ذخیره‌سازی حرارتی نهان افقی مطالعه‌ای انجام دادند. آن‌ها اثر نسبت طول و شاخص ضخامت پره‌ها را بر عملکرد حرارتی به طور دقیق بررسی کردند. در مقایسه با پره‌های صفحه‌ای، توزیع پره‌های شبیه درخت مناسب‌تر بود؛ زیرا بهبود هدایت حرارتی بر سرکوب جابجایی غالب غلبه می‌کرد. پره شبیه درخت بهینه با نسبت طول ۱۰۰۷ و شاخص ضخامت ۰۰۶۵ پیشنهاد شد که موجب کاهش ۲۶۰۷٪ در زمان ذوب و افزایش ۴۵۰۴٪ در نرخ متوسط ذخیره حرارت شد. سینگ و همکاران [۲۸] نیز اثرات پیکربندی‌های مختلف پره در یک واحد استوانه‌ای عمودی را بررسی کردند. نتایج نشان داد پیکربندی‌ای که در آن طول پره‌ها متغیر بوده و پره‌های بلند در پایین لوله قرار دارند، بیشترین نرخ شارژ سریع را ایجاد می‌کند.

مبدل‌های حرارتی دو لوله‌ای به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین پیکربندی‌های هندسی در سامانه‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان شناخته می‌شوند و بهبود عملکرد آن‌ها اهمیت بالایی دارد. در این میان محفظه مربعی به دلیل چیدمان فشرده بدون فضای هدررفته، عایق‌کاری راحت، ساخت سریع و یکپارچه‌سازی در سیستم چندماژولی اهمیت می‌یابد. کاهش زمان ذوب یکی از اهداف بهبود عملکرد سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی بر پایه مواد تغییرفاز دهنده است. هدف این مقاله ترکیب دو روش تغییر زاویه قرارگیری محفظه حاوی مواد تغییرفازدهنده و همچنین استفاده از پره فلزی برای بهبود فرآیند ذوب در یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی بر پایه گرمای نهان در یک مبدل گرمایی پوسته مربعی است. با استفاده از روش حجم محدود، کسر حجمی فاز مایع و توزیع دما در محفظه برای حالت‌های مختلف بررسی و بیشترین میزان بهبود ذوب و حالت بهینه معین می‌گردد. روش پیشنهادی حاضر می‌تواند در سیستم‌های ذخیره انرژی حرارتی به منظور افزایش کارایی مورد استفاده قرار گیرد.

۲- بیان مساله

مسئله مورد بررسی، یک مبدل حرارتی شامل یک کانال با مقطع مربعی به ضلع $W = 40 \text{ mm}$ و یک لوله دایروی به قطر $D = 18 \text{ mm}$ که در مرکز کانال قرار دارد، است. ماده تغییرفازدهنده پارافین RT60 در ناحیه بین کانال و دایره پر شده و سیال گرم، که دمای آن بیشتر از دمای ذوب PCM در داخل لوله جریان دارد. دیواره‌های خارجی کانال نیز به صورت آدیاباتیک در نظر گرفته شده است (شکل ۱). با توجه به اینکه تغییرات دما در راستای طولی بسیار کم است، فرض دما ثابت بودن جریان سیال در راستای محوری لحاظ شده و مسئله به صورت دو بعدی مورد مطالعه قرار گرفته است. دو حالت مختلف در شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت اول، به همین منظور محفظه حاوی PCM در زاویه‌ی (θ) ۰، ۱۵، ۲۲/۵، ۳۰ و ۴۵ درجه قرار گرفته و زمان و رفتار ذوب ماده مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت دوم، علاوه بر زاویه قرارگیری محفظه، تأثیر اضافه شدن پره روی سطح خارجی لوله گرم نیز بر زمان ذوب مورد بررسی قرار گرفته است. پره داخلی به ضخامت ۲ mm از جنس مس و در جهت $-Y$ است. طول پره به نسبت ۷۵٪ فاصله لوله داخلی با پایین‌ترین قسمت پوسته در هر زاویه دوران در نظر گرفته شده است. دمای اولیه برای تمامی حالت‌های در نظر گرفته شده ۳۰۰ کلوین می‌باشد. مشخصات ترموفیزیکی PCM مورد استفاده نیز در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱: نحوه قرار گیری محفظه PCM و پره روی لوله گرم

جدول ۱: خواص ترموفیزیکی پارافین RT60

Property	Value (Solid)	Value (Liquid)	Units
Density	880	760	kg/m ³
Thermal Conductivity	0.2	0.15	(W/m.K)
Specific Heat	2000	2100	(J/kg.K)
Latent Heat of Fusion	-	200000	(J/kg)
Solidus Temperature	329.15	-	K
Liquidus Temperature	-	335.15	K
Viscosity	-	0.02	Pa.s
Thermal Expansion Coefficient	-	0.0002	(1/K)

۳- روابط ریاضی حاکم برمساله

با توجه به فرضیات اراده شده در بخش ۲، معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی به ترتیب بصورت روابط ۱ تا ۳ بیان می گردد [۷ و ۱۲].

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = \frac{1}{\rho} (-\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g} \beta (T - T_{ref})) + \vec{S} \quad (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V} H) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{\rho} \nabla T \right) \quad (3)$$

آنتالپی ماده نیز به صورت زیر محاسبه می شود :

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

که در آن h و ΔH به ترتیب آنتالپی محسوس و گرمای نهان هستند. این دو پارامتر به صورت زیر تعریف می شوند :

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

$$\Delta H = \lambda L \quad (6)$$

که T_{ref} و h_{ref} به ترتیب آنتالپی و دمای مرجع، L نشان دهنده گرمای نهان ماده و λ نشان دهنده کسر مایع است. در نتیجه، گرمای نهان در بازه صفر (فاز جامد) تا L (فاز مایع) قرار می گیرد. همچنین، کسر مایع را می توان به صورت زیر بیان نمود.

$$\lambda = \begin{cases} 0 & \text{if } T < T_s \\ \frac{T-T_s}{T_l-T_s} & \text{if } T_s < T < T_l \\ 1 & \text{if } T > T_l \end{cases} \quad (7)$$

در معادله مومنتوم (معادله ۲)، برای در نظر گرفتن اثر تغییر فاز در انتقال حرارت جابجایی، $\vec{S}$ به عنوان عبارت مربوط به قانون دارسی اضافه شده و به صورت زیر تعریف می شود:

$$\vec{S} = \frac{(1-\lambda)^2}{\lambda^3 + \epsilon} A_{mush} \vec{V} \quad (8)$$

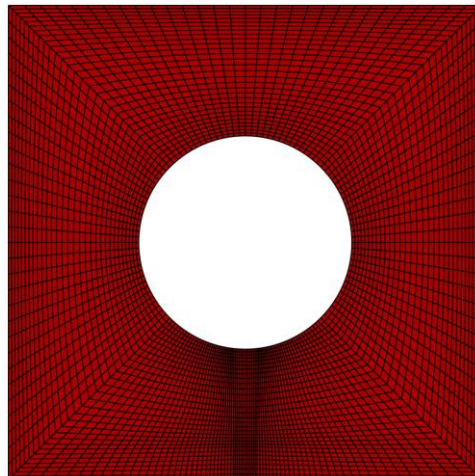
که A_{mush} فاکتور منطقه شبکه بوده و در بیشتر مطالعات عددی، مقدار آن در بازه $10^5 - 10^6$ در نظر گرفته می شود. در کار حاضر A_{mush} برابر با 10^6 فرض شده است، زیرا این مقدار، بهترین نتایج را ارائه می دهد. ϵ نیز ثابت دیگری برابر با یک عدد کوچک (0.001) است که برای جلوگیری از تقسیم بر صفر قرار داده شده است. شرایط مرزی برای حل معادلات حاکم عبارتند از شرط عدم لغزش در تمام دیوارهای جامد، شرط دما ثابت بر روی لوله و شرط آدیاباتیک برای سطح کانال مربعی. همچنین لازم به ذکر است که دمای اولیه PCM و پره ها ۳۰۰ کلوین در نظر گرفته شده است.

۴- روش مطالعه عددی

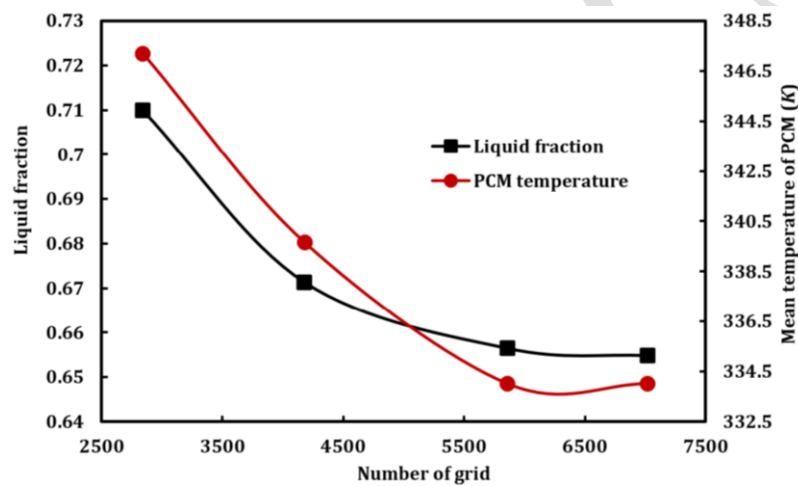
در مطالعه حاضر از روش حجم محدود به همراه روش آنتالپی-تخلخل (EPM) برای مدل سازی فرآیند تغییر فاز در نرم افزار تجاری عددی انسیس فلوئنت استفاده شده است. همچنین، فرضیاتی نیز برای ساده سازی معادلات حاکم در نظر گرفته شده است. جریان فاز مایع PCM به صورت آرام، غیر قابل تراکم و گذرا در نظر گرفته شده است. ترم اتلاف ویسکوز در معادله انرژی نادیده گرفته شده است. خواص ترموفیزیکی PCM ثابت در نظر گرفته شده اند. برای گرا دیان چگالی، تقریب بوزینسک (Boussinesq) لحاظ شده است. برای گسسته سازی معادلات از شبکه با سازمان در دامنه محاسباتی استفاده شده است. لازم به ذکر است که از روش PRESTO برای معادله اصلاح فشار و الگوریتم معادله فشار-پیوندی نیمه صریح (Semi-Implicit Pressure-Linked Equation) برای کوپلینگ فشار-سرعت استفاده شده است. مقادیر ضرایب مانده برای فشار، سرعت، انرژی، و کسر مایع به ترتیب ۰/۳، ۰/۲، ۱، و ۰/۹ در نظر گرفته شده است.

۵- شبکه بندی و بررسی استقلال از شبکه

برای بررسی استقلال نتایج از شبکه بندی، مقایسه ای میان کسر حجمی متوسط PCM ذوب شده و دمای میانگین PCM حاصل از شبکه های مختلف انجام شد. در این راستا، پوسته-لوله ی پره دار در حالت بدون دوران برای انجام آزمون استقلال از مش مورد استفاده قرار گرفت که در شکل ۲(الف) نمایش داده شده است. به منظور مقایسه، مقادیر مربوط به کسر حجمی و دمای میانگین PCM در زمان ۷۰ دقیقه پس از آغاز شبیه سازی استخراج و در شکل ۲(ب) ارائه گردیده است. همان گونه که مشاهده می شود، با افزایش تعداد مش از ۵۸۶۰ به ۷۰۲۰ تغییرات کسر حجمی ذوب شده و دمای میانگین ناچیز است بنابراین شبکه بندی با ۵۸۶۰ مش به عنوان وضعیت نهایی انتخاب و در تمامی حالت های شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفت.



(الف)

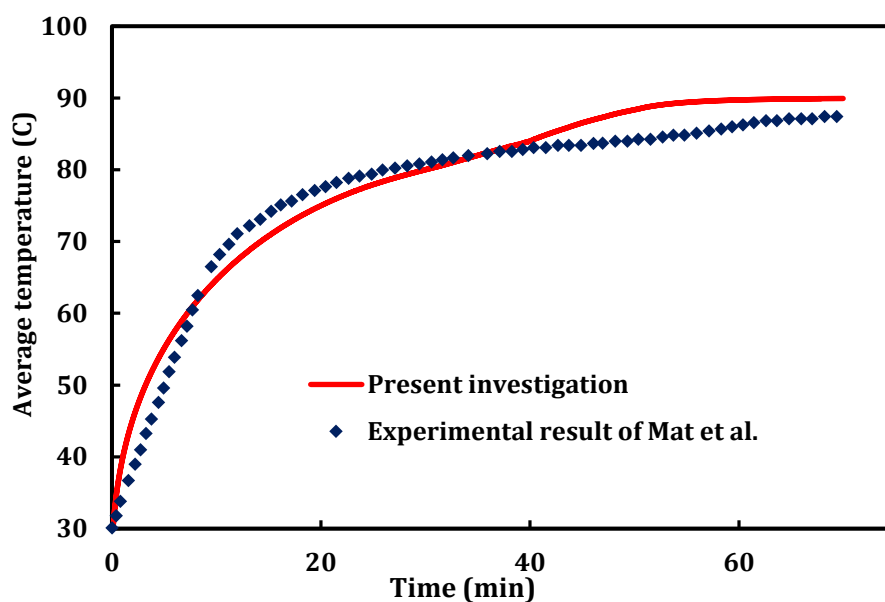


(ب)

شکل ۲: (الف) نمایش شبکه‌بندی، (ب) تغییرات کسر حجمی ذوب‌شده و دمای میانگین PCM در زمان ۷۰ دقیقه پس از آغاز شبیه‌سازی.

۶- مقایسه و اعتبارسنجی

برای بررسی دقت روش عددی، مقایسه‌ای بین نتایج روش عددی حاضر و کار پیشین انجام شده توسط مت و همکاران [۲۹] انجام شده است. آن‌ها فرآیند ذوب ماده تغییر فاز RT 82 را در یک مبدل حرارتی سه‌لوله‌ای با در نظر گرفتن سه روش بهبود انتقال حرارت پره داخلی، پره خارجی و ترکیب پره داخلی-خارجی بررسی کردند. یافته‌های آزمایشگاهی آن‌ها برای دمای میانگین، با نتایج عددی حاضر در شکل ۳ مقایسه شده است که همبستگی خوبی را نشان می‌دهد.



شکل ۳: تغییرات دمای میانگین PCM به دست آمده با استفاده از روش عددی حاضر و نتایج تجربی کار مت و همکاران [۲۲]

۷- نتایج و بحث

پارامتر اصلی مورد بررسی در این مطالعه، تغییر زاویه قرارگیری محفظه حاوی PCM (زوایای ۰، ۱۵، ۲۲/۵، ۳۰ و ۴۵ درجه) نسبت به افق است. شبیه‌سازی‌ها برای دو حالت مختلف با و بدون پره متصل به لوله سیال گرم انجام شده است که در ادامه ارائه می‌گردد.

۷-۱- سیستم ذخیره‌سازی حرارت نهان پوسته و لوله در حالت بدون پره

در این بخش، عملکرد حرارتی سیستم ذخیره‌سازی حرارت نهان در حالت ذوب بدون پره مورد بررسی قرار می‌گیرد. کانتورهای میانگین دما و کسر حجمی در زمان‌های ۱۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ دقیقه و در زوایای مختلف قرارگیری سیستم، به ترتیب در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده است.

$\theta = 0^\circ$

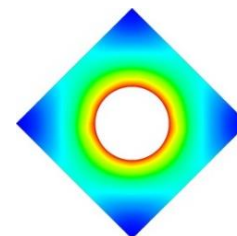
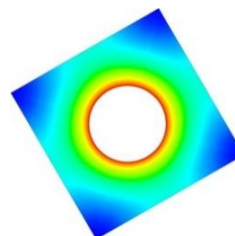
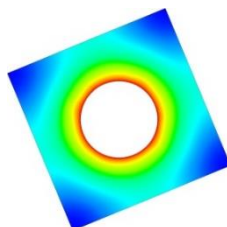
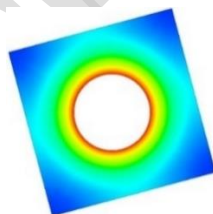
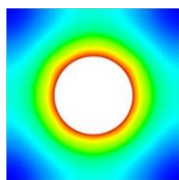
$\theta = 15^\circ$

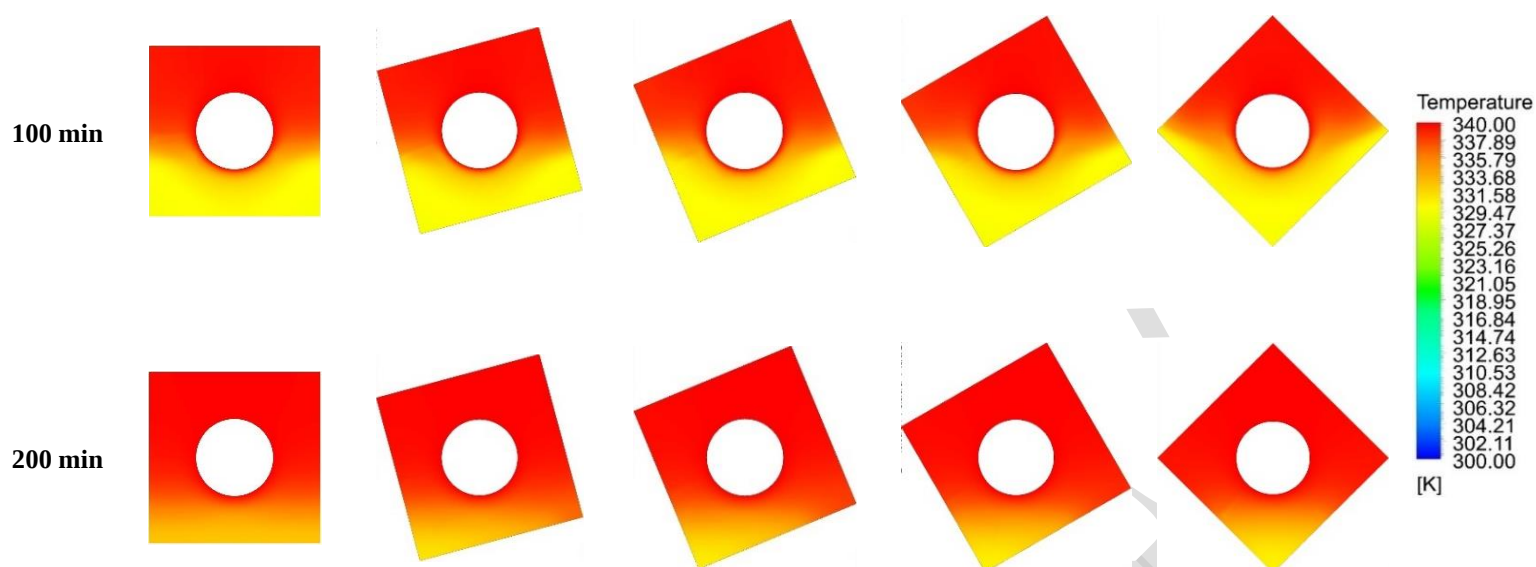
$\theta = 22.5^\circ$

$\theta = 30^\circ$

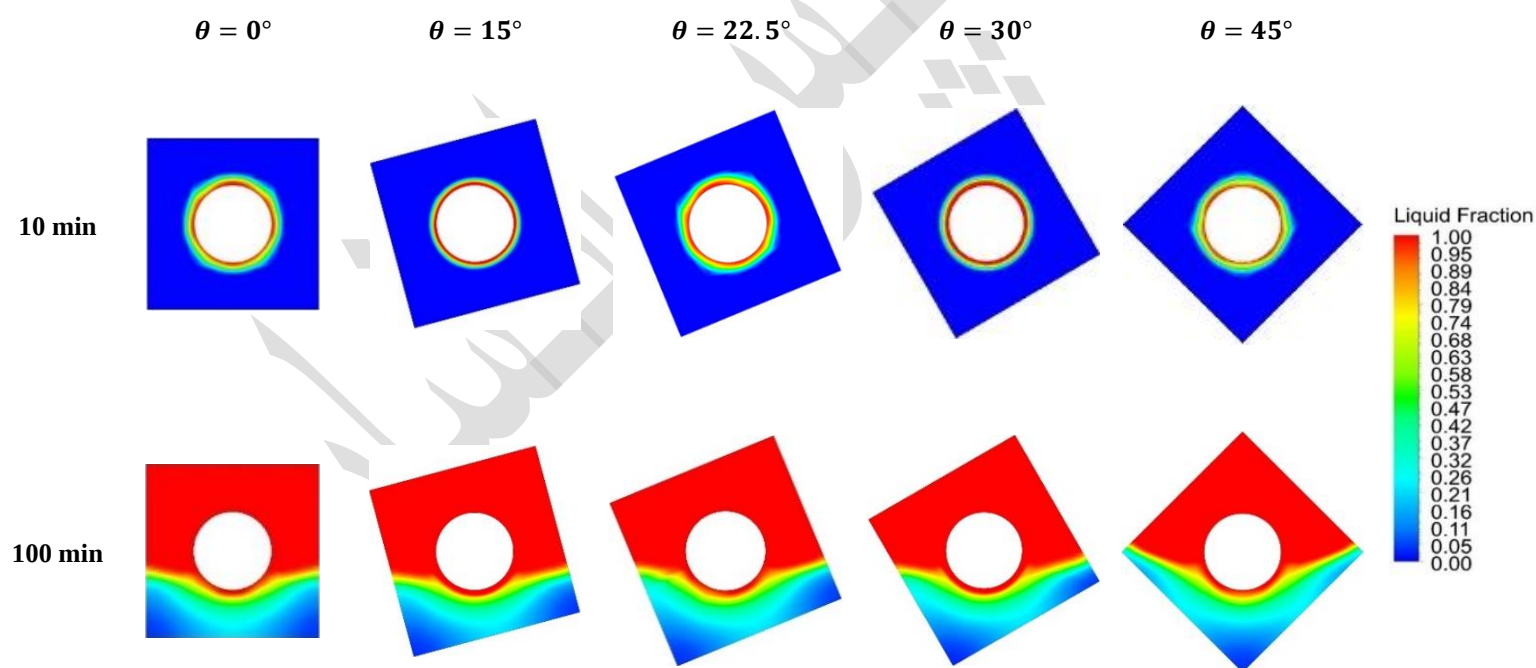
$\theta = 45^\circ$

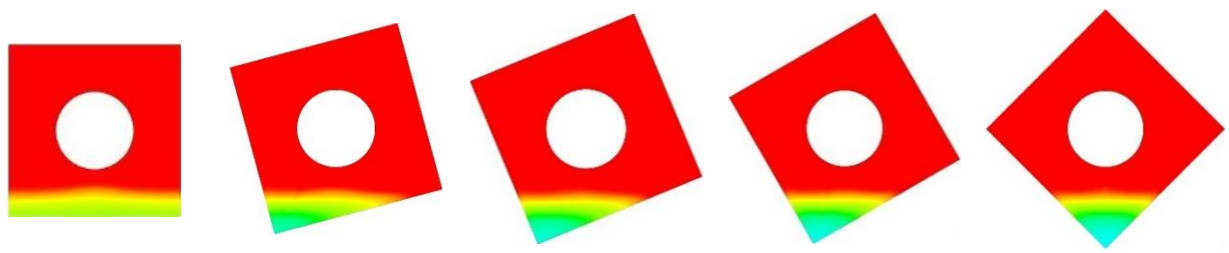
10 min





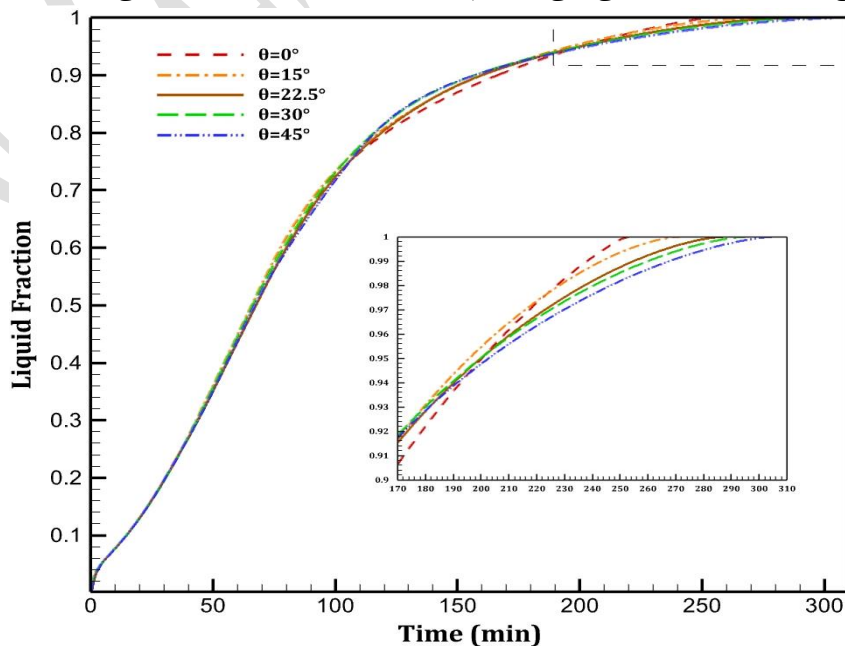
شکل ۴: توزیع دمای PCM در زمان ۱۰، ۱۰۰، ۲۰۰ دقیقه از شبیه‌سازی و در زوایای مختلف قرارگیری محفظه در حالت بدون پره



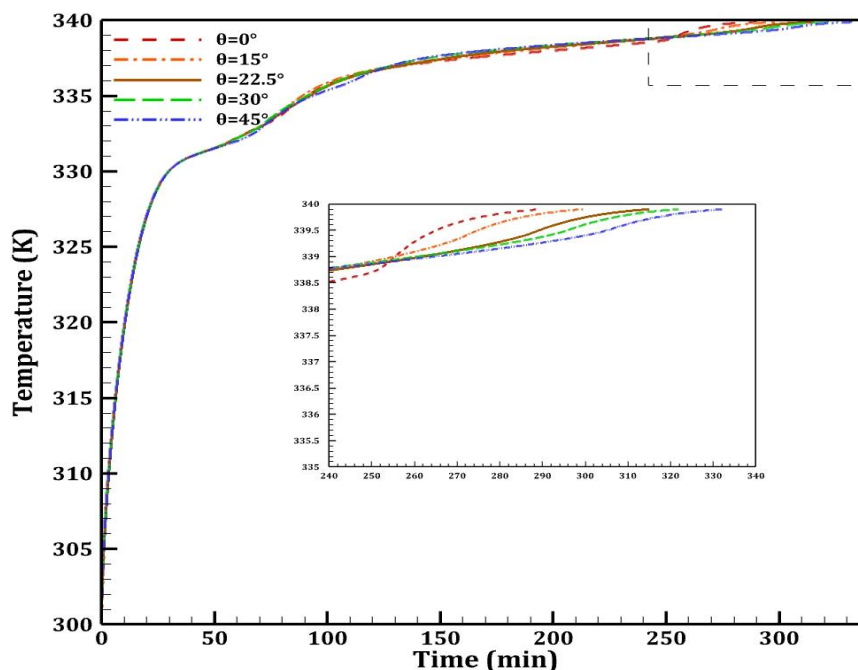


شکل ۵: توزیع کسر مایع PCM در زمان‌های ۱۰، ۱۰۰، ۲۰۰ دقیقه از شبیه‌سازی و در زوایای مختلف قرارگیری محفظه در حالت بدون پره

همان‌طور که در شکل ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، به دلیل دمای بالای HTF در داخل لوله، ذوب از نواحی اطراف آن شروع شده و لایه‌نازکی از PCM ذوب شده اطراف لوله ایجاد می‌شود. در مراحل اولیه فرایند ذوب تا زمان ۱۰ دقیقه، مکانیزم غالب انتقال گرما به صورت رسانشی بوده و سرعت بالای ذوب در شروع فرایند به این دلیل است. PCM تا مدتی ذوب شده و به صورت شعاعی پیشروی می‌کند. در همین حال، بخش جامد PCM نیز به دلیل دریافت گرمای محسوس، افزایش دما پیدا می‌کند. با گذشت زمان، ذوب بیشتر شده و لایه نازک اطراف لوله بزرگتر می‌شود. به دلیل جابجایی طبیعی و نیروی شناوری (گرادیان چگالی)، منطقه ذوب‌شده به قسمت بالایی مخزن صعود کرده و در نتیجه، مقدار PCM ذوب‌شده در قسمت بالایی سیستم LHTES بیشتر از قسمت پایینی می‌شود. به این ترتیب، دما در این منطقه نیز به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، در حالی که در منطقه پایین لوله، دما به آرامی افزایش می‌یابد. در واقع، اثر شناوری باعث جریان چرخشی در منطقه ذوب‌شده گردیده و این چرخش جریان، بهبود انتقال حرارت در داخل سیستم LHTES را به همراه دارد. کانتور توزیع دما به خوبی مکانیزم انتقال گرما در مراحل مختلف فرایند ذوب را نشان می‌دهد. در زوایای مختلف قرارگیری محفظه‌ی مربعی (15° ، 22.5° ، 30° و 45°)، ناحیه‌ی تحت تأثیر جریان‌های شناوری تغییر می‌کند. با افزایش زاویه، ماده‌ی تغییر فازدهنده‌ی سرد (PCM) در گوشه‌ها و بخش پایینی محفظه تجمع می‌یابد. این پدیده باعث کاهش سطح تماس میان فاز مایع و فاز جامد شده و در نتیجه، فرایند انتقال حرارت در نواحی پایینی تضعیف می‌شود. در نیمه پایانی فرایند ذوب برای زاویه 45° درجه مشخص است که PCM جامد فاصله بیشتری از HTF گرفته و سطح مشترک بین فاز مایع و جامد نسبت به زاویه‌های قبلی کاهش یافته و با باریک‌تر شدن قسمت پایینی، چرخش سیال در این نواحی نیز ضعیف‌تر شده و به همین دلیل، این نواحی با تأخیر بیشتری گرم و ذوب می‌گردند و در نهایت کارایی کلی سیستم ذخیره‌سازی حرارت نهان کاهش می‌یابد.



شکل ۶: تغییرات زمانی میانگین کسر مایع PCM در حالت بدون پره



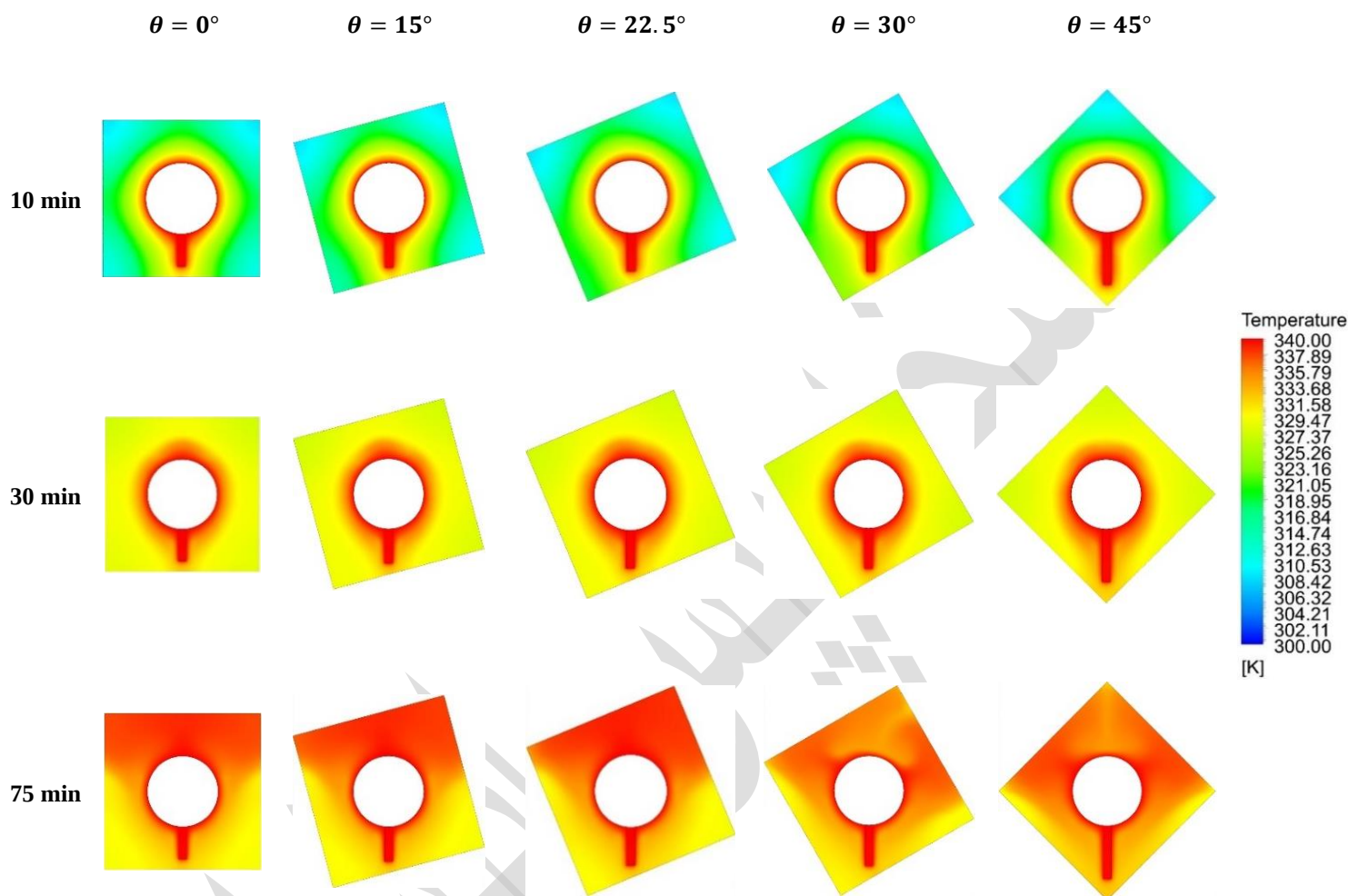
شکل ۷: تغییرات زمانی میانگین دمای PCM در حالت بدون پره

شکل ۶ و ۷ به ترتیب تغییرات زمانی کسر حجمی و دمای میانگین PCM را در زوایای مختلف قرارگیری محفظه مربعی نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل ۶ و ۷ مشاهده می‌گردد، در حدود ۵۰ دقیقه ابتدایی، تغییر زاویه محفظه تاثیری بر دمای متوسط و کسر مایع نداشته و همه منحنی‌ها بر هم منطبق هستند. علت این امر این است که همانطور که در شکل ۴ و ۵ نیز مشاهده می‌شود، در لحظات ابتدایی انتقال حرارت غالب از نوع هدایت حرارتی بوده و در این لحظات، تنها ناحیه کوچکی در اطراف لوله گرم، شروع به ذوب می‌نماید. با گذشت زمان، ناحیه ذوب گسترش یافته و محفظه مربعی در زوایای مختلف، موجب گسترش متفاوت ناحیه مذاب می‌شود. در نتیجه تغییرات در منحنی‌های کسر مایع و دمای متوسط ایجاد می‌گردد. به عبارت دقیق‌تر با افزایش زاویه قرارگیری محفظه، سطح مشترک PCM ذوب شده و گرم با PCM جامد کاهش یافته و در نتیجه به علت انتقال حرارت کمتر به جامد، زمان ذوب کامل کاهش می‌یابد. همچنین نواحی پایین به دلیل جابجایی طبیعی نرخ ذوب پایین‌تری را تجربه می‌کنند با افزایش زاویه دوران مشاهده می‌شود که در زمان پایانی ذوب PCM جامد در فاصله دورتری از HTF قرار گرفته و نواحی گوشه‌ای، اثرات جریان و چرخش PCM ذوب شده را محدود می‌کند. برای مثال، زمان ذوب کامل در زاویه 45° برابر با $304/9$ دقیقه است. در حالی که زمان ذوب کامل در زاویه صفر درجه $254/05$ دقیقه است. این شرایط نشان می‌دهد که در حالت افقی، به میزان $50/85$ دقیقه نسبت به چرخش محفظه در زمان ذوب صرفه‌جویی می‌شود.

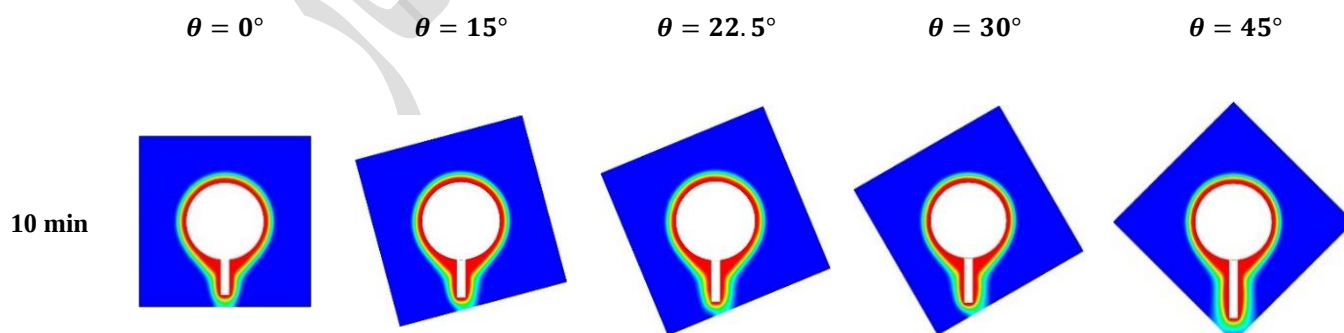
۷-۲- سیستم ذخیره‌سازی حرارت نهان پوسته و لوله با پره داخلی

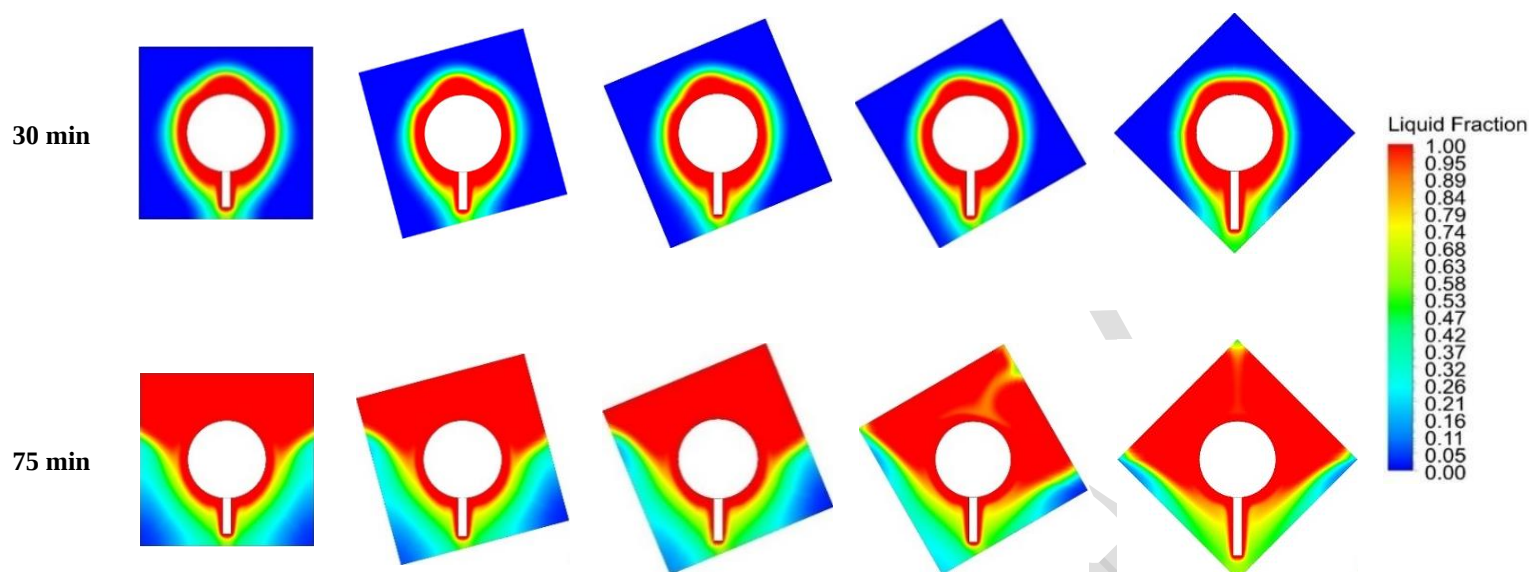
در بخش قبل، نتایج مربوط به محفظه و لوله بدون پره نشان داد که انتقال حرارت در نواحی پایین محفظه، نسبت به نواحی بالایی به کندی صورت می‌گیرد، این مسئله بخاطر ماهیت انتقال حرارت جابجایی طبیعی است که منجر به انتقال مایع ذوب‌شده‌ی گرم به نواحی بالا می‌شود. در نتیجه، قسمت پایین محفظه دیرتر از سایر نقاط ذوب می‌شود. در این بخش با استفاده از یک پره مسی با ضریب هدایت گرمایی $378/6 \text{ W/m.K}$ و در جهت $-Y$ بر روی لوله گرم، تلاش شده است تا اثر انحراف جریان‌های جابجایی طبیعی بوسیله

پره به سمت دیواره محفظه بررسی شود. شکل ۸ و ۹ به ترتیب توزیع دما و کسر مایع PCM را در زوایای مختلف قرارگیری محفظه، در سه زمان ۱۰، ۳۰ و ۷۵ دقیقه نشان می‌دهد.



شکل ۸: توزیع دمای PCM در زمان ۱۰، ۳۰، ۷۵ دقیقه از شبیه‌سازی و در زوایای مختلف قرارگیری محفظه در حالت با پره

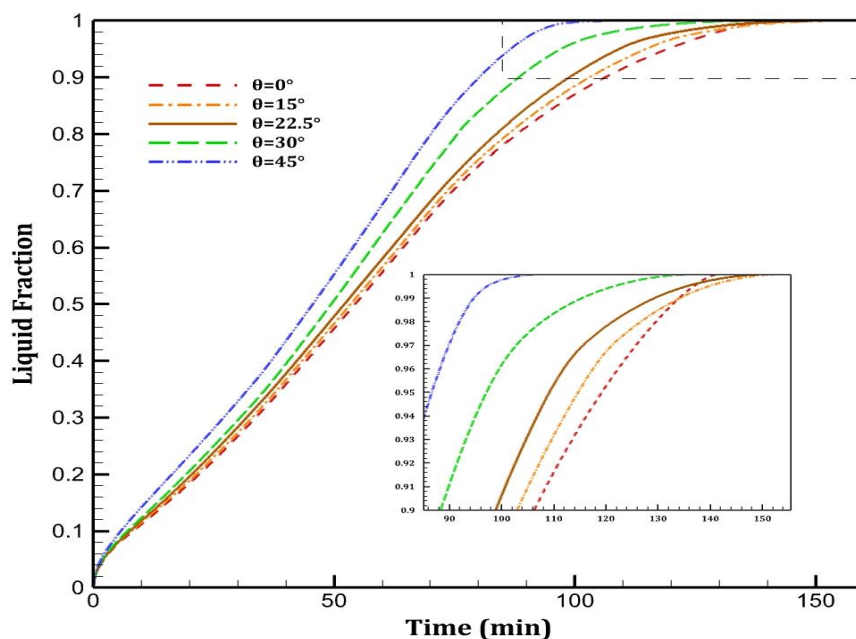




شکل ۹: توزیع کسر مایع PCM در زمان ۱۰، ۳۰، ۷۵ دقیقه از شبیه‌سازی و در زوایای مختلف قرارگیری محفظه در حالت با پره

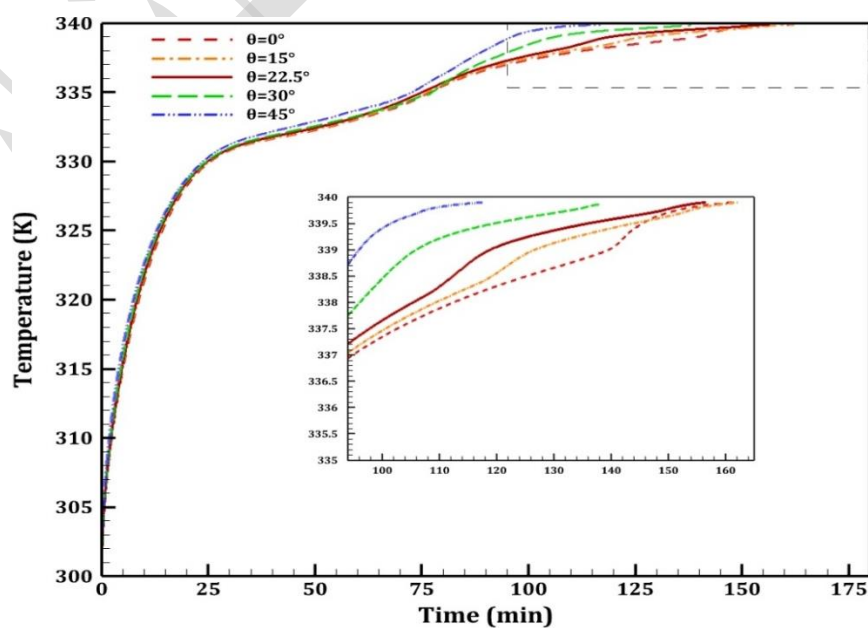
باتوجه به ضریب هدایت گرمایی نسبتاً بالای پرهی مسی، در شکل ۸ و در زمان ۱۰ دقیقه، مشاهده می‌شود که دمای پره به سرعت به دمای سطح لوله HTF رسیده و انتقال حرارت به PCM جامد که در مجاورت پره و سطح HTF قرار دارد، از طریق فرآیند رسانش افزایش می‌یابد. زیرا علاوه بر لوله گرم، انتقال حرارت از پره نیز به PCM جامد انجام می‌گیرد. به دلیل افزایش سطح گرم، لایه نازک PCM اطراف HTF و پره، ذوب شده و جبهه‌ی ذوب در این نواحی با گذشت زمان پیشروی می‌کند. به عبارت دیگر، نرخ ذوب با وجود پره تشدید شده و علاوه بر دلیل جابجایی طبیعی در قسمت‌های بالایی، وجود پره روند ذوب در نیمه‌پایینی محفظه را نیز بهبود می‌دهد. بنابراین در حالت با پره نیز، انتقال

حرارت غالب در لحظات اولیه هدایت حرارتی بوده و موجب ذوب لایه PCM در مجاورت لوله و پره می‌شود. با گذشت زمان جابجایی طبیعی نیز افزایش یافته و سهم بیشتری به خود اختصاص می‌دهد که موجب ذوب کامل قسمت‌های بالایی محفظه می‌گردد. همچنین مشاهده می‌گردد که به علت وجود پره، PCM جامد در قسمت‌های پایینی آهنگ ذوب بهتری نسبت به وضعیت بدون پره دارد. همچنین اضافه شدن پره موجب افزایش سطح جبهه‌ی ذوب در قسمت‌های پایینی شده و تغییر فاز را بهبود می‌دهد. در حالت ۴۵ درجه، مشاهده می‌شود روند ذوب و توزیع دما بهتر شده و از طرفی یکنواختی بهتری نسبت به حالت‌های دیگر ایجاد می‌گردد.



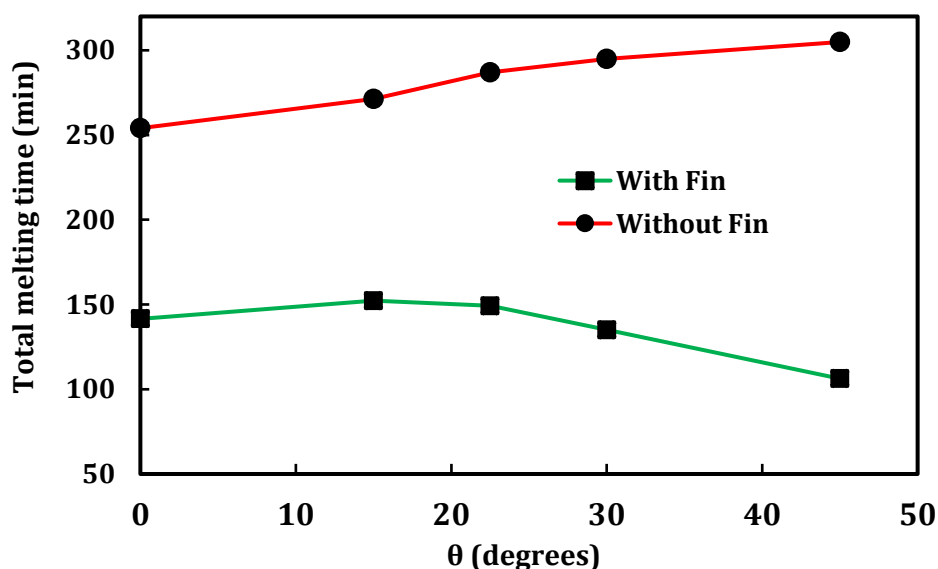
شکل ۱۰: تغییرات زمانی میانگین کسر مایع PCM در حالت با پره داخلی

شکل ۱۰ نمودار تغییرات کسر حجمی PCM با زمان در حالت‌های مختلف قرارگیری محفظه را نشان می‌دهد که می‌توان مشاهده کرد در نیمه نخست فرآیند ذوب، جاییکه PCM شروع به ذوب شدن می‌کند، نرخ ذوب در تمامی نمونه‌ها مشابه بوده و منحنی‌ها بر روی هم قرار گرفته‌اند. با گذشت زمان، اثر زاویه قرارگیری محفظه و پره داخلی به خوبی نمایان شده و منحنی‌ها از هم فاصله می‌گیرند. به عبارتی اثر پره و زاویه از زمانی که مکانیزم هدایت و جابجایی طبیعی هر دو بر فیزیک مساله حاکم می‌شود قابل مشاهده است. این روند تا پایان فرآیند ذوب ادامه می‌یابد و مشاهده می‌شود که حالت دوران یافته با زاویه ۴۵ درجه در زمان کوتاه‌تری نسبت به بقیه‌ی حالت‌ها به ذوب کامل می‌رسد و در میان تمامی حالت‌های در نظر گرفته شده از نظر زمان ذوب مطلوب سیستم ذخیره‌ساز می‌باشد.



شکل ۱۱: تغییرات زمانی میانگین دمای PCM در حالت با پره داخلی

شکل ۱۱ تغییرات دمای میانگین PCM را در طول فرآیند ذوب برای حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود تغییرات نمودارها مطابق با کسر حجمی مایع بوده و در شروع فرآیند تغییرات دمای میانگین روند مشابهی دارد. با گذشت زمان، شیب منحنی‌ها و در نتیجه دمای میانگین با افزایش زاویه محفظه افزایش می‌یابد. این پدیده در شکل ۸ و ۹ نیز قابل مشاهده بود جایی که محفظه با زاویه ۴۵ درجه کسر حجمی بیشتر و یکنواختی بیشتری در ذوب و دما را در دقیقه ۷۵ نشان می‌داد. دلیل عمده این اتفاق جهت‌گیری محفظه‌ی مربعی است که در حالت اشاره شده به شکل لوزی بوده و در نتیجه جابجایی طبیعی در قسمت‌هایی بالایی تقویت می‌یابد. از طرفی سهم PCM جامد در قسمت پایینی کمتر می‌شود و در نیمه‌ی پایانی فرآیند PCM جامد فقط در گوشه‌ی پایینی باقی می‌ماند و این در حالی است که پره‌ی داخلی با نسبت گفته‌شده درست در راستای گرانش و PCM جامد گسترده شده که موجب انتقال گرمای بهتر از HTF به PCM جامد می‌شود.



شکل ۱۲: تغییرات زمان کامل ذوب برای پیکربندی‌های بدون پره و پره‌دار نسبت به زاویه قرارگیری محفظه حاوی مواد تغییر فاز دهنده

شکل ۱۲ تغییرات زمان ذوب کامل در پیکربندی‌های مختلف و در زوایای قرارگیری گوناگون محفظه را نشان می‌دهد. شکل ۱۲ نشان می‌دهد که در حالت بدون پره، با افزایش زاویه دوران محفظه، زمان ذوب کامل به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که این زمان در زوایای ۰، ۱۵، ۲۲/۵، ۳۰ و ۴۵ درجه به‌ترتیب برابر با ۲۵۴/۰۵، ۲۷۱/۳۵، ۲۸۷/۰۴، ۲۹۴/۹۷ و ۳۰۴/۰۹ دقیقه است. در مقابل، افزودن پره به لوله داخلی موجب کاهش قابل توجه زمان ذوب کامل در تمامی زوایا نسبت به حالت بدون پره می‌شود. در این حالت، زمان ذوب کامل در زوایای ۰، ۱۵، ۲۲/۵، ۳۰ و ۴۵ درجه به‌ترتیب برابر با ۱۴۱/۵۴، ۱۵۲/۲۸، ۱۴۹/۱۹، ۱۳۵/۰۵ و ۱۰۶/۲۵ دقیقه به دست آمده است. بنابراین استفاده از پره داخلی در حالت افقی محفظه، موجب ۴۴٪ کاهش زمان ذوب می‌گردد. همچنین مشاهده می‌شود که در پیکربندی پره‌دار، تغییر زاویه محفظه نقش مؤثری در بهبود فرآیند ذوب ایفا کرده و با افزایش زاویه، زمان ذوب کامل در اکثر حالت‌ها کاهش یافته است. این امر منجر به ایجاد واگرایی مشخص میان روند تغییرات زمان ذوب کامل در حالت‌های بدون پره و پره‌دار گردیده و نشان‌دهنده افزایش محسوس کارایی سیستم ذخیره‌سازی حرارت نهان در حضور پره و چرخش محفظه است. به بیان کمی، در حالت

با پره، تغییر زاویه قرارگیری محفظه از حالت افقی به زاویه ۴۵ درجه، موجب ۲۵٪ کاهش زمان ذوب می‌شود. بطور کلی نسبت به حالت افقی و بدون پره، استفاده از پره و تغییر زاویه قرارگیری محفظه به ۴۵ درجه، باعث تسریع ۵۸٪ فرایند ذوب می‌گردد.

۸- نتیجه‌گیری

در مطالعه عددی حاضر به بررسی بررسی رفتار و نحوه ذوب ماده تغییر فازدهنده PCM در یک سیستم‌های LHTEs با پوسته‌ی مربعی و لوله داخلی پرداخته شده‌است. تاثیر استفاده از پره بر روی سطح خارجی لوله و همچنین زاویه قرارگیری محفظه بررسی شده و میزان افزایش و کاهش زمان ذوب کامل محاسبه گردیده است. نتایج مهم بدست آمده به شرح زیر است:

- تغییر زاویه محفظه در شرایط بدون پره‌ی اثر مطلوبی بر زمان ذوب نداشته و زمان ذوب افزایش می‌یابد.
- استفاده از پره داخلی در حالت افقی محفظه، موجب ۴۴٪ کاهش زمان ذوب می‌گردد.
- در پیکربندی پره‌دار، تغییر زاویه محفظه نقش مؤثری در بهبود فرآیند ذوب ایفا کرده و با افزایش زاویه، زمان ذوب کامل کاهش می‌یابد.
- به بیان کمی، در حالت با پره، تغییر زاویه قرارگیری محفظه از حالت افقی به زاویه ۴۵ درجه، موجب ۲۵٪ کاهش زمان ذوب می‌شود. بطور کلی نسبت به حالت افقی و بدون پره، استفاده از پره و تغییر زاویه قرارگیری محفظه به ۴۵ درجه، باعث تسریع ۵۸٪ فرایند ذوب می‌گردد.
- علت بهبود فرایند ذوب، افزایش سطح انتقال حرارت مایع- جامد و امکان انتقال حرارت مناسب در ناحیه پایینی محفظه با استفاده از پره‌ها است.

۹- فهرست علائم

نمادها علائم نشانه‌ها	واژه نامه	پیشنهادی نویسنده
$Q (W)$	واژه لاتین	ماده تغییر فازدهنده
$m (kg)$	PCM (Phase Change Material)	ذخیره‌سازی انرژی گرمایی نهان
$c_p (\frac{J}{kg.s})$	Latent heat thermal energy storage (LHTES)	سیال انتقال گرما
$T (K)$	HTF (heat transfer fluid)	روش درون‌یابی فشار
$l_F (\frac{J}{kg})$	PRESTO	تقریب بوزینسک
$\vec{V} (\frac{m}{s})$	Boussinesq approximation	روش آنتالپی-تخلخل
$g (\frac{m}{s^2})$	Enthalpy-Porosity Method (EPM)	مبدل حرارتی لوله‌ای سه‌لوله‌ای
$\vec{S}$	Triplex-Tube Heat Exchanger (TTHX)	مرجع
$H (\frac{J}{kg})$	Reference (ref)	فاز جامد
$h (\frac{J}{kg})$	Solid	فاز مایع
$t (s)$	Liquid	درجه (زاویه)
$k (\frac{W}{m.k})$	degree	دمای میانگین
A_{mush}	Average temperature	ذوب‌شدن
$X, Y (m)$	Melting	

۱۰- منابع و مراجع

- [1] A. Arabsolghar, N. Heidari, M. Shafiey Dehaj, and A. Iranmanesh, "Investigation of Down-Draught Effect on The Thermal Comfort Indexes in The Building with Glazing Envelope," *J. Appl. Comput. Sci. Mech.*, 2021.
- [2] A. Haghighi Poshtiri and M. Alipour Dehsari, "Evaluation of the performance of radiant ceiling cooling system from the perspective of thermal comfort, considering human presence and non-uniformity of the ceiling surface temperature," *J. Appl. Comput. Sci. Mech.*, 2025.
- [3] A. Amiri-Jaghargh and A. Yarinezhad, "Investigating the Effect of Phase Change Materials on Energy Consumption in Lightweight," *J. Appl. Comput. Sci. Mech.*, vol. 34, pp. 2022-2057, 2022.
- [4] A. Zanganeh Inalo, M. Sefid, and M. Saleh Barghi Jahromi, "Numerical Simulation of Flat Plate Solar Air Heater with Optimal Absorber Effect and Double Glazed Glass," *J. Appl. Comput. Sci. Mech.*, vol. 37, 2025.
- [5] M. Saleh Barghi Jahromi, M. Iranmanesh, and H. Samimi Akhijahani, "Thermo-Economic evaluation of a solar dryer with evacuated heat pipe collector and energy storage," *J. Appl. Comput. Sci. Mech.*, 2021.
- [6] Z. Wang, H. Zhang, and X. Xia, "Experimental investigation on the thermal behavior of cylindrical battery with composite paraffin and fin structure," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 109, pp. 958-970, 2017.
- [7] E. Fleming, S. Wen, L. Shi, and A. K. da Silva, "Experimental and theoretical analysis of an aluminum foam enhanced phase change thermal storage unit," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 82, pp. 273-281, 2015.
- [8] C. W. Robak, T. L. Bergman, and A. Faghri, "Enhancement of latent heat energy storage using embedded heat pipes," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 54, no. 15-16, pp. 3476-3484, 2011.
- [9] S. Motahar and R. Khodabandeh, "Experimental study on the melting and solidification of a phase change material enhanced by heat pipe," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 73, pp. 1-6, 2016.
- [10] S. Motahar, N. Nikkam, A. A. Alemrajabi, R. Khodabandeh, M. S. Toprak, and M. Muhammed, "A novel phase change material containing mesoporous silica nanoparticles for thermal storage: a study on thermal conductivity and viscosity," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 56, pp. 114-120, 2014.
- [11] W. Su, J. Darkwa, and G. Kokogiannakis, "Review of solid-liquid phase change materials and their encapsulation technologies," *Renewable Sustainable Energy Rev.*, vol. 48, pp. 373-391, 2015.
- [12] S. A. Zonouzi and S. A. Bonab, "Improvement of the performance of thermal energy storage systems with conical annular enclosure using magnetic field," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 245, p. 122906, 2024.
- [13] S. A. Bonab, M. Goharkhah, and S. A. Zonouzi, "Magnetic field and chamber partitioning effects on charging performance of a latent heat thermal energy storage system," *Appl. Therm. Eng.*, p. 128762, 2025.
- [14] R. Jahangiri, A. Allahverdizadeh, B. Dadashzadeh, and H. Azimzadeh, "Nonlinear Vibration Analysis of Fluid Conveying Microtube under Parametric Magnetic Excitation," *J. Appl. Comput. Sci. Mech.*, 2020.
- [15] Y. Wu, M. Luo, S. Chen, W. Zhou, Y. Yu, and Z. Zhou, "Numerical simulation study of the effect of mechanical vibration on heat transfer in a six-fin latent heat thermal energy storage unit," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 207, p. 123996, 2023.

- [16] X. Huang, F. Li, Y. Li, X. Gao, X. Yang, and B. Sundén, "Investigation and optimization on melting performance of a triplex-tube heat storage tank by rotational mechanism," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 205, p. 123892, 2023.
- [17] N. A. Qasem et al., "Effect of a rotating cylinder on convective flow, heat and entropy production of a 3D wavy enclosure filled by a phase change material," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 214, p. 118818, 2022.
- [18] B. W. Webb and R. Viskanta, "Natural-convection-dominated melting heat transfer in an inclined rectangular enclosure," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 29, no. 2, pp. 183-192, 1986.
- [19] N. Kousha, M. J. Hosseini, M. R. Aligoodarz, R. Pakrouh, and R. Bahrampoury, "Effect of inclination angle on the performance of a shell and tube heat storage unit – An experimental study," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 112, pp. 1497-1509, 2017.
- [20] B. Kamkari and H. J. Amlashi, "Numerical simulation and experimental verification of constrained melting of phase change material in inclined rectangular enclosures," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 88, pp. 211-219, 2017.
- [21] I. Al Siyabi, S. Khanna, T. Mallick, and S. Sundaram, "An experimental and numerical study on the effect of inclination angle of phase change materials thermal energy storage system," *J. Energy Storage*, vol. 23, pp. 57-68, 2019.
- [22] S. Mat, A. A. Al-Abidi, K. Sopian, M. Y. Sulaiman, and A. T. Mohammad, "Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal–external fins," *Energy Convers. Manag.*, vol. 74, pp. 223-236, 2013.
- [23] M. E. Nakhchi and J. A. Esfahani, "Improving the melting performance of PCM thermal energy storage with novel stepped fins," *J. Energy Storage*, vol. 30, p. 101424, 2020.
- [24] J. M. Mahdi, S. Lohrasbi, D. D. Ganji, and E. C. Nsofor, "Accelerated melting of PCM in energy storage systems via novel configuration of fins in the triplex-tube heat exchanger," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 124, pp. 663-676, 2018.
- [25] K. A. Ismail, C. L. Alves, and M. S. Modesto, "Numerical and experimental study on the solidification of PCM around a vertical axially finned isothermal cylinder," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 21, no. 1, pp. 53-77, 2001.
- [26] V. Safari, B. Kamkari, K. Hooman, and J. M. Khodadadi, "Sensitivity analysis of design parameters for melting process of lauric acid in the vertically and horizontally oriented rectangular thermal storage units," *Energy*, vol. 255, p. 124521, 2022.
- [27] C. Yu, S. Wu, Y. Huang, F. Yao, and X. Liu, "Charging performance optimization of a latent heat storage unit with fractal tree-like fins," *J. Energy Storage*, vol. 30, p. 101498, 2020.
- [28] R. P. Singh, H. Xu, S. C. Kaushik, D. Rakshit, and A. Romagnoli, "Effective utilization of natural convection via novel fin design & influence of enhanced viscosity due to carbon nano-particles in a solar cooling thermal storage system," *Sol. Energy*, vol. 183, pp. 105-119, 2019.
- [29] S. Mat, A. A. Al-Abidi, K. Sopian, M. Y. Sulaiman, and A. T. Mohammad, "Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal–external fins," *Energy Convers. Manag.*, vol. 74, pp. 223-236, 2013.

Numerical Study of the Effect of Shell Rotation and Internal Fin Addition on Heat Transfer in a Square Shell Latent Heat Thermal Energy Storage System

Mohammad Goharkhah^{a1}, Saber Abdollahzadeh Bonab^a, Ali Zargar Saleh^a

^a Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

ABSTRACT

Given the increasing global energy consumption and the environmental challenges associated with it, the development of renewable energy sources and energy storage systems has become a primary focus of modern research. In latent heat thermal energy storage (LHTES) systems, the use of phase change materials (PCMs) to enhance energy storage/release capacity has attracted significant attention in energy management research. The primary objective of this study is to examine the melting process and the temperature distribution within a latent heat energy storage system comprising a square shell and tube configuration. The system consists of a double-tube storage unit, with a square external cross-section and a hot inner tube, where the gap between the tubes is filled with a PCM. In this study, the hot tube is assumed to have a constant temperature, and the outer walls are insulated. A numerical analysis, using the Fluent software and the finite volume method, is performed to assess the impact of shell rotation and the use of an internal fin. The results indicate that, in the absence of fins, the rotation of the square shell delays the complete melting time in the system. However, the addition of fins to the inner tube significantly reduces the time required for full melting.

KEYWORDS

Energy storage system, phase change material, natural convection, square shell storage system, internal fin.

¹ Corresponding Author: Email: Goharkhah@sut.ac.ir