J. Energy Conversion
Volume: 12, Issue: 4, 2026: 87-108

نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)

دوره ۱۲، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴، ص: ۱۰۸-۸۷

مدل‌سازی تغییر فاز سیالات غیرنیوتنی تغییر فاز دهنده در یک محفظه در حال چرخش با حضور پره‌های حرارتی

علیرضا کاظمی[۱]، محسن ایزدی*[۲]، احسان‌اله عصاره[۳]، علی ارشادی[۴]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، kalireza90@ymail.com
*۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران، izadi.m@lu.ac.ir
۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، e.assareh@gmail.com
۴- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، ali.ershadi@iau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۹/۱۲ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۱ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۹

چکیده

در این پژوهش فرایند ذوب ماده تغییر فاز دهنده غیرنیوتنی درون یک استوانه‌ای عمودی متخلخل و مجهز به فین به‌صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا، معادلات حاکم و شرایط مرزی متناسب با آن‌ها بر پایه روش آنتالپی- تخلخل و در مختصات استوانه‌ای استخراج شده‌اند. در ادامه به شکل بی‌بعد خود انتقال‌یافته و در نهایت با استفاده از روش المان محدود حل شده‌اند. استقلال حل از اندازه شبکه محاسباتی ارزیابی‌شده و کد دینامیک سیالات محاسباتی ایجادشده با پژوهش‌های معتبر عددی و آزمایشگاهی مورد مقایسه و اعتبارسنجی قرار گرفته است. نتایج برای چرخش محفظه با حضور سه پره حرارتی در قالب خطوط جریان، جبهه ذوب، خطوط دما ثابت، سرعت و عدد ناسلت متوسط و هم‌چنین میزان کسر ذوب نانو ماده تغییر فاز دهنده نمایش داده شده‌اند. مطابق با مشاهدات و بررسی‌های صورت گرفته، تغییر زاویه انحراف از محور افقی بر الگوی خطوط دما ثابت و جبهه ذوب تأثیرگذار نبوده؛ در بیانی دیگر، مقادیر مربوط به عدد ناسلت متوسط و کسر ذوب برای زوایای انحراف مختلف تغییرات محسوسی نداشته‌اند؛ ازآن‌جایی‌که سرتاسر فضای مدنظر، متخلخل می‌باشد و مُد انتقال حرارت رسانش، غالب است، تغییر در نیروهای شناوری (به‌عنوان نماینده انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی)، از طریق تغییر در زاویه انحراف، نرخ انتقال حرارت و جبهه ذوب را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد.

* **عهده‌دار مکاتبات:** izadi.m@lu.ac.ir

کلمات کلیدی: فرآیند ذوب، انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی هم‌بسته، محیط متخلخل، نانوسیال، سیال غیرنیوتنی

نحوه استناد به این مقاله علیرضا کاظمی، محسن ایزدی، احسان‌اله عصاره و علی ارشادی. مدل‌سازی تغییر فاز سیالات غیرنیوتنی تغییر فاز دهنده در یک محفظه در حال چرخش با حضور پره‌های حرارتی. **مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۴; ۱۲ (۴): ۸۷-۱۰۸**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.539]

۱- مقدمه

اهمیت و ظهور فرآیندهای ذوب و انجماد در منابع ذخیره انرژی [۱]، دستگاه‌هایی بر پایه انرژی‌های تجدیدپذیر همچون سیستم‌های خورشیدی [۲] و کنترل حرارت سیستم‌های الکتریکی [۳]، سبب شده تا محققان بیش از پیش به حل تحلیلی، مطالعه عددی و ارزیابی آزمایشگاهی فرآیندهایی از این دست مشتاق شوند. یک روش عددی- تجسمی به‌منظور ارزیابی انتقال حرارت و جرم درون یک محفظه بسته چهارضلعی به همراه یک دیواره جامد مربعی در مرکز آن توسط دنگ و تانگ [۴] تعریف شده است. آن‌ها با بهره‌گیری از خطوط جریان و خطوط گرما به نمایش نتایج پرداختند. حضور دیواره جامد در مرکز محفظه، رشد سریع مُد انتقال حرارت جابه‌جایی را در پی دارد.

موبدی [۵]، در یک مطالعه عددی، به ارزیابی انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی همبسته درون یک محفظه بسته چهارضلعی پرداخته است. تأثیر عددی رایلی و پارامتر نسبت ضرایب رسانش حرارتی مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج نشان می‌دهد دیواره‌های ضخیم افقی به‌طور ویژه به ازای مقادیر بالای عدد رایلی و پارامتر نسبت ضرایب رسانش حرارتی، سبب کاهش نرخ انتقال حرارت می‌شوند. انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب- مس درون یک محفظه بسته با دیواره سینوسی در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت توسط شیخ‌الاسلامی و همکاران [۶] مورد بررسی قرار گرفته است. روش حجم محدود بر مبنای روش المان محدود، به‌منظور حل معادلات حاکم لحاظ گردید. آن‌ها برای تحلیل رفتار نانوسیال و تعیین مقادیر ضریب انتقال حرارت رسانش و ضریب لزجت دینامیک مؤثر از رابطه KKL (کو- کلینستریر) استفاده کردند. در این رابطه، علاوه بر لزجت استاتیکی، لزجت متأثر از حرکت براونی (حرکت تصادفی نانوذرات) نیز لحاظ شده است. در پژوهشی دیگر، شیخ‌الاسلامی و شاملویی [۷]، انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب- اکسید آهن را در حضور میدان مغناطیسی موضعی و انتقال حرارت تشعشع ارزیابی کردند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش پارامتر تشعشع، سرعت نانوسیال درون محفظه بسته با هندسه پیچیده، تقویت خواهد شد. ارمغانی و همکاران [۸]، به‌صورت عددی، انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-آلومینا درون یک محفظه بسته L شکل همراه با یک مانع را مورد ارزیابی قراردادند. با افزایش طول مانع، اثربخشی نانوسیال به‌منظور خنک‌سازی محفظه کاهش می‌یابد. واکر و هومزی [۹]، با درنظر گرفتن مدل‌های مختلف به مطالعه انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی درون محفظه مستطیلی پرشده با ماده متخلخل پرداختند. آن‌ها مدل دارسی را انتخاب کردند و نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌های مختلف تطابق خوبی باهم داشتند. بکرمن و همکاران [۱۰]، مدلی از محفظه که با لایه‌ای از ماده متخلخل پرشده بود را مورد آزمایش قراردادند. نتایج نشان می‌دهد با ورود سیال به لایه متخلخل، میدان سرعت و حرارت به‌طورکلی تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. هم‌چنین، نفوذ سیال به درون ماده متخلخل به حاصل‌ضرب اعداد رایلی و دارسی بستگی دارد. وارول و همکاران [۱۱] به مطالعه انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد در یک محفظه نیمه متخلخل که توزیع دمای دیواره‌ی پایینی آن به‌صورت سینوسی تغییر می‌کرد، پرداختند. قانون دارسی بر محیط متخلخل حاکم بوده و فاز سیال و جامد در تعادل حرارتی فرض شدند. آن‌ها با استفاده از روش تفاضل محدود به بررسی اثر توزیع سینوسی بر روی انتقال حرارت و جریان سیال پرداختند. بیتاس و همکاران [۱۲] موفق شدند انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی در محفظه متخلخل را به‌صورت عددی مورد مطالعه قرار دهند. محفظه شامل دو دیواره‌ی افقی با ضخامت محدود بوده و دیواره‌های عمودی آن در دمای یکنواخت ولی متفاوت فرض شده‌اند. در پژوهش بیتاس و همکاران [۱۲]، تأثیر ضریب هدایت حرارتی دیواره‌های افقی بر روی انتقال حرارت و جریان سیال ارزیابی‌شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که با افزایش ضریب هدایت حرارتی، دمای سطح مشترک سیال و دیواره افقی کاهش خواهد یافت. زرگرطالبی و همکاران [۱۳]، به‌صورت عددی جریان جابه‌جایی لایه‌مرزی روی یک سطح تعبیه شده در محیط متخلخل و پرشده با نانوسیال را مطالعه کردند. آن‌ها از مدل غیرهمگن برای تحلیل رفتار نانوسیال استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد با افزایش عدد لوئیس، غلظت نانوذرات روی صفحه زیاد می‌شود. غلامعلی پور و همکاران [۱۴]، اثر خارج از مرکز بودن یک منبع حرارتی درون یک محیط متخلخل دایروی در حضور نانوسیال آب- مس را ارزیابی نمودند. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر نرخ انتقال حرارت و حداقل میزان تولید آنتروپی به ازای قرارگیری منبع حرارتی در نواحی پایین محیط متخلخل دایروی رخ می‌دهد. انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال هیبریدی آلومینا- اکسید مس در یک محفظه با دیواره‌های موج‌دار و در حضور لایه‌ای از محیط متخلخل توسط

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.539]

کادهیم و همکاران [۱۵]، بررسی‌شده است. مهریان و همکاران [۱۶]، به ارزیابی انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی همبسته نانوسیال‌های مختلف درون یک محفظه بسته چهارضلعی سه لایه متشکل از دیواره ضخیم، محیط متخلخل و محیط ساده پرداختند. محیط متخلخل و سیال موردنظر در شرایط عدم تعادل حرارتی فرض شده؛ هم‌چنین از روش بونجیورنو (غیرهمگن) برای تحلیل رفتار نانوسیال استفاده شد. کامکاری و شکوهمند [۱۷]، در یک پژوهش آزمایشگاهی، فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده لوریک اسید درون محفظه بسته مستطیلی به‌همراه سه پره حرارتی قرار گرفته بر روی دیواره عمودی سمت راست را بررسی نمودند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش تعداد پره‌های حرارتی، زمان ذوب کاهش و نرخ کلی انتقال حرارت افزایش می‌یابد. کاشانی و همکاران [۱۸]، با بهره‌گیری از روش آنتالپی تخلخل، فرآیند انجماد نانوماده تغییر فاز دهنده آب- مس را درون محفظه بسته موج‌دار را ارزیابی کردند. نتایج نشان می‌دهد سطح موج‌دار با موج‌های زیاد و کم می‌تواند به‌عنوان یک عامل کنترلی برای مدت زمان ذوب بکار گرفته شود. سفیدان و همکاران [۱۹]، مقطع عرضی یک لوله متخلخل سه‌گانه (دو مقطع محیط متخلخل و یک مقطع دیواره ضخیم بیرونی) همراه با پره‌های حرارتی را در نظر گرفتند و فرآیند ذوب مواد تغییر فاز دهنده RT-35 و RT-50 را ارزیابی کردند. نتایج نشان می‌دهد که با قرارگیری RT-35 در مقطع داخلی و RT-50 در مقطع بیرونی، فرآیند انجماد سریع‌تر از قرارگیری RT-50 در مقطع داخلی و RT-35 در مقطع بیرونی رخ می‌دهد. لی و همکاران [۲۰]، از سه روش برای افزایش ضریب انتقال حرارت رسانش مواد تغییر فاز دهنده با ضریب رسانش حرارتی پایین استفاده نمودند. درنظر گرفتن محیط متخلخل (فوم فلزی)، حضور نانوذرات و اصلاحات هندسیِ لوله سه‌گانه به‌عنوان سیستم ذخیره انرژی حرارتی، سه روش موردنظر را تشکیل داده‌اند. حضور محیط متخلخل با ضریب ۹۵ درصد، زمان موردنیاز جهت انجماد را تا ۸۳ درصد کاهش می‌دهد. گیجسن و همکاران [۲۱]، تأثیر خواص سیال غیرنیوتنی خون را درون عروق بزرگ بررسی نمودند. با بهره‌گیری از روش کارئو- یاسودا، نتایج برای یک جریان پایا نشان می‌دهد که هم برای سیال نیوتنی و هم برای سیال غیرنیوتنی، تطابق مناسبی میان نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی برقرار خواهد بود. انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی سیال غیرنیوتنی در حضور میدان مغناطیسی در یک محفظه L شکل توسط جهانبخشی و همکاران [۲۲] ارزیابی‌شده است. در پژوهش آن‌ها از مدل پاورلاو برای تحلیل رفتار سیال غیرنیوتنی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که نرخ انتقال حرارت برای سیال غیرنیوتنی نازک شونده ($n<1$) و ضخیم شونده ($n>1$) نسبت به سیال نیوتنی، به‌ترتیب کاهش و افزایش خواهد یافت. خان و همکاران [۲۳]، انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی همبسته درون یک محفظه بسته پرشده با سیال غیرنیوتنی کاسون را مورد ارزیابی قراردادند. درون محفظه از یک پره حرارتی Y شکل استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که با حضور پره حرارتی Y شکل متصل به دیواره پایین محفظه، عدد رایلی و پارامتر کاسون، به بهبود نرخ انتقال حرارت کمک خواهند نمود. میزان بازگشت‌ناپذیری و انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال غیرنیوتنی آب- مس درون یک محفظه بسته مربعی سراسر متخلخل، توسط کفایتی [۲۴] بررسی‌شده است. وی از مدل‌های پاور لاو، برینکمن و مکسول-گارنِتس به ترتیب برای تحلیل رفتار سیال غیرنیوتنی، لزجت دینامیک و ضریب رسانش حرارتی نانوسیال استفاده نمود. در این پژوهش از روش لاتیس- بولتزمن تفاضل محدود برای مدل‌سازی و آنالیز مسئله بهره گرفته شده است. نانِز و همکاران [۲۵]، به ارزیابی انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی ناپایای همبسته درون محفظه بسته مستطیلی متخلخل پرداختند. در پژوهش آن‌ها از هوا، بافر و سیلیکا به ترتیب به‌عنوان سیال نیوتنی، سیال غیرنیوتنی و محیط متخلخل استفاده شده است. هم‌چنین برای تحلیل رفتار سیال غیرنیوتنی از مدل پاور- لاو بهره گرفته شد. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده، کد محاسباتی ایجادشده اختلاف ۱ درصدی با نتایج آزمایشگاهی دارد. فرآیند ذوب نانوماده تغییر فاز دهنده غیرنیوتنی در حضور میدان مغناطیسی موضعی با لحاظ نمودن اثرات فروهیدرودینامیک و مگنتوهیدرودینامیک درون یک محفظه بسته مربعی توسط قلم‌باز و همکاران [۲۶] ارزیابی‌شده است. با بهره‌گیری از مدل‌های برینکمن و ماکسول برای لزجت دینامیک و ضریب رسانش حرارتی نانوماده تغییر فاز دهنده غیرنیوتنی نازک شونده($n<1>0.7$) ، آن‌ها دریافتند با کاهش شاخص پاور- لاو، فرآیند ذوب با سرعت بیشتری رخ خواهد داد. الصابری و همکارانش [۲۷] به‌صورت عددی به بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی همبسته سیال غیرنیوتنی خون درون یک حلقه پرداختند. آن‌ها از مدل کارئو برای تحلیل رفتار سیال غیرنیوتنی بهره بردند. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش شاخص غیرنیوتنی، گردش سیال و هم‌چنین نرخ انتقال حرارت بهبود می‌یابد. مهریان و همکارانش [۲۸] فرآیند ذوب پارافین واکس غیرنیوتنی پاور-لاو درون محفظه بسته استوانه‌ای با فوم آلومینیومی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.539]

ارزیابی کردند. آن‌ها از روش مش متحرک برای شبیه‌سازی جبهه ذوب استفاده نمودند. با کاهش شاخص پاور- لاو از ۱ به ۰/۶، زمان موردنیاز برای ذوب کامل پارافین واکس، تا ۵۴ درصد کاهش می‌یابد. لی و همکاران [۲۹]، از سه روش برای افزایش ضریب انتقال حرارت رسانش مواد تغییر فاز دهنده با ضریب رسانش حرارتی پایین استفاده نمودند. در نظر گرفتن، محیط متخلخل (فوم فلزی)، حضور نانوذرات و اصلاحات هندسیِ لوله سه‌گانه به‌عنوان سیستم ذخیره انرژی حرارتی، سه روش موردنظر را تشکیل داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که اضافه نمودن ۵ درصد از نانوذرات مس می‌تواند زمان ذوب ماده تغییر فاز دهنده را در حدود ۲۶ درصد کاهش دهد. هم‌چنین، حضور محیط متخلخل با ضریب ۹۵ درصد، زمان موردنیاز جهت انجماد را تا ۸۳ درصد کاهش می‌دهد. فدایی و همکارانش [۳۰] روند تغییرفاز و انتقال حرارت را در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله مطالعه کردند. آن‌ها اثرات پارامترهای مختلف نظیر عدد رینولدز، نسبت ابعادی و پارامترهای غیرنیوتنی را بر نرخ انتقال حرارت سیال‌های غیرنیوتنی بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود که پارامترهای غیرنیوتنی تأثیر قابل توجهی بر نرخ انتقال حرارت دارند و با افزایش عدد رینولدز و نسبت ابعادی، نرخ انتقال حرارت بیشتر می‌شود. ژانگ و همکارانش[۳۱] با استفاده از روش آنتالپی تخلخل ذوب انواع مختلف مواد تغییر فاز در یک مبدل حرارتی، تأثیر تخلخل، باله‌های مثلثی و افزودن اکسید آلومینیوم، اکسید تیتانیوم و اکسید مس، نانوذرات در رفتار حرارتی چهار نوع مواد به‌صورت عددی مورد مطالعه قرار می‌گیرند. مایع اصلی انتقال حرارت غیر نیوتونی است و لوله با یک محیط متخلخل پر می‌شود. بر اساس نتایج، افزودن باله‌ها و نانوذرات منجر به افزایش کسر مایع می‌شود. زمان شارژ کامل مواد با افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم کمی کم‌تر از سایر نانوذرات است. علاوه بر این، تأثیر استفاده از باله بیش‌تر از تأثیر افزودن نانوذرات برای کاهش زمان ذوب است. هم‌چنین، حداکثر افزایش در بخش مایع به‌دلیل عدم وجود محیط متخلخل تقریباً ۳۰ درصد است. در مطالعه‌ای دیگر که توسط کیو و همکارانش[۳۲] انجام شد، به‌صورت عددی تأثیر هم‌افزایی نانوذرات و پره‌های متعامد را بر عملکرد انتقال حرارت مواد تغییر فاز دهنده با استفاده از روش آنتالپی-تخلخل تجزیه و تحلیل شد. انتقال گرمای همرفت طبیعی و هدایت گرما در طی فرآیند ذوب با کسری متفاوت از حجم نانوذرات و ارتفاع نصب پره هماهنگ می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که ارتفاع بهینه نصب باله افقی و کسر حجم نانوذرات پیدا شد. زمان ذوب کل مربوطه ۱۰۲۴ ثانیه و میانگین میزان شارژ انرژی ۴۸۴/۵ وات است. در مقایسه با شرایط بهینه بدون نانوذرات، زمان شارژ کل به میزان ۲۹/۸٪ کاهش می‌یابد و میانگین شارژ متوسط است ۵۱/۱ ٪ افزایش یافته است. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات کسری با حجم بالا، شدت انتقال حرارت همرفت را کاهش می‌دهد. اضافه کردن نانوذرات با حجم کم باعث افزایش هدایت حرارتی PCM می‌شود و تأثیر ناچیزی در انتقال حرارت طبیعی همرفتی دارد.

در این پژوهش تأثیر زاویه‌های چرخشی مختلف بر خطوط جریان، جبهه ذوب، خطوط دماثابت، سرعت و عدد ناسلت متوسط و هم‌چنین میزان کسر ذوب نانوماده تغییر فاز دهنده غیر نیوتنی درون یک استوانه‌ای عمودی متخلخل به‌صورت عددی توسط نرم افزار comsol moltiphysics 5.1 مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مدل فیزیکی و معادلات حاکم

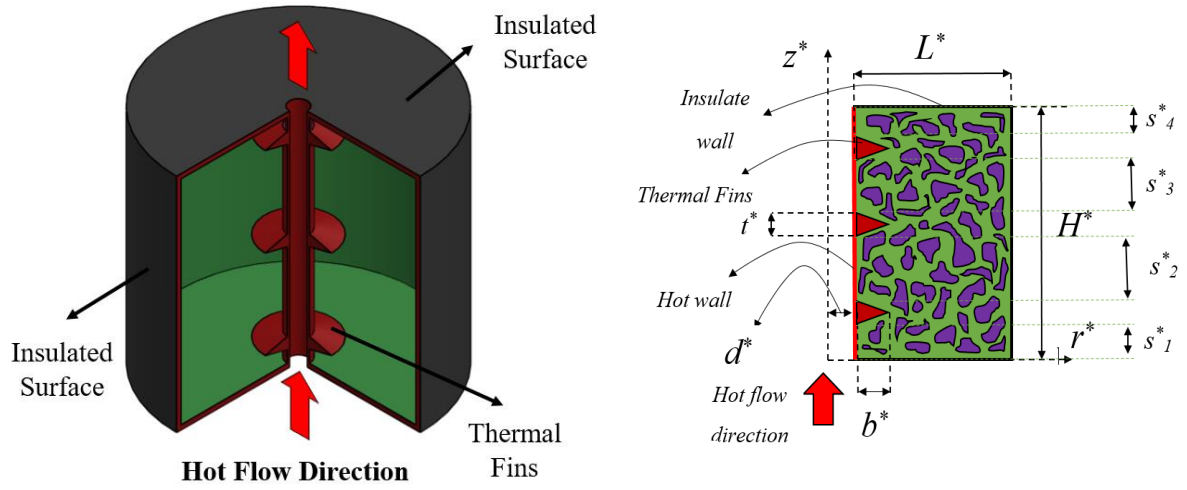
۲-۱- مدل فیزیکی

با بهره‌گیری از روش آنتالپی تخلخل، فرآیند ذوب و انجماد نانوماده تغییر فاز دهنده کروسن- آلومینا درون یک محفظه متخلخل استوانه‌ای متقارن همراه با پره‌های حرارتی از جنس مس مورد ارزیابی قرار گرفته است. ماتریس جامد متخلخل از جنس آهن می‌باشد که نواحی خالی آن توسط نانوماده تغییر فازدهنده اشباع شده است. همان‌طور که شکل (۱-الف) نشان می‌دهد، یک سیال گرم در جهت پایین به بالا از لوله میانی عبور می‌کند و دمای مقطع طولی لوله را به‌طور یکنواخت افزایش می‌دهد، حال‌آن‌که از عایق حرارتی برای وجوه افقی (بالا و پایین) و جداره بیرونی محفظه استوانه‌ای استفاده شده است. به‌طور دقیق‌تر و مطابق با شکل (۱-ب)، حرارت از دیواره گرم سمت چپ به پره‌های مسی و محیط متخلخل رسیده و ذوب شدن نانوماده تغییر فازدهنده را در پی دارد. ماتریس جامد متخلخل و کروسن- آلومینا همواره با یکدیگر در شرایط تعادل حرارتی موضعی خواهند بود. نانوماده تغییر فاز دهنده مذاب، به‌عنوان یک سیال غیرنیوتنی فرض شده که برای تحلیل رفتار آن از مدل کارئو استفاده

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.539]

می‌گردد. ضمن این‌که خواص ترموفیزیکی کروسن- آلومینا در حالت انجماد و در حالت مذاب، ثابت و بدون تغییر می‌باشد. لازم به‌ذکر است که نانوذرات آلومینا بدون تغییر فاز از ابتدا تا انتهای فرآیند، توزیع یکنواختی در کروسن خواهند داشت. پس از شروع فرآیند ذوب، انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی درون محفظه رخ می‌دهد و تقریب بوزینسک دراین‌باره همواره معتبر می‌باشد.



شکل ۱: دیاگرام شماتیک از مدل فیزیکی، سمت چپ: نمای سه بعدی و سمت راست دمای دو بعدی.

ماده‌ی استفاده شده در فرایند خشک کردن، بیومسی از نوع چوب روسی از درخت کاج است که همانگونه که در شکل (۱) مشخص است، در اندازه‌های مختلف به صورت قطعه‌ای درآمده است. قبل از انجام آزمایش ذرات در دو اندازه‌ی متفاوت بریده شده و آماده‌ی انجام آزمایش شدند. این قطعات به دو دسته‌ی : ۱- خرده چوب (Fine) که به‌صورت قطعات رنده شده و ۲- قطعات چوب درشت (Coarse) به‌صورت مکعب‌هایی به طول ۲ سانتی‌متر هستند تهیه گردید. برای سادگی در نحوه نگارش، در ادامه‌ی متن از حرف F برای خرده چوب و از حرف C برای قطعات چوب درشت استفاده می‌گردد. ضمناً ناخالصی‌ها و ذرات ریز از مواد آزمایش جدا شده و اندازه‌ی ذرات همگن در نظر گرفته شده است.

۲-۲- معادلات حاکم

مطابق با فرضیات ارائه شده در بالا، معادلات حاکم بر مسئله، برآمده از روش آنتالپی تخلخل، به شکل با بعد، شناسایی شده و در ادامه آمده‌اند. معادلات (۱) تا (۵)، یعنی پیوستگی نانوماده تغییر فاز دهنده، مومنتوم در راستای افقی (r^*) و عمودی (z^*)، انرژی نانوماده تغییر فاز دهنده و در نهایت انرژی در پره‌های صلب جامد، ساختار اصلی معادلات حاکم را تشکیل می‌دهند [۳۴, ۳۶-۳۸]:

$$\frac{1}{r^*}\frac{\partial\left(ru^*\right)}{\partial r^*}+\frac{\partial w^*}{\partial z^*}=0 \quad (1)$$

$$\frac{\rho_{nf}}{\varepsilon}\frac{\partial u^*}{\partial t}+\frac{\rho_{nf}}{\varepsilon^2}\left(u^*\frac{\partial u^*}{\partial r^*}+w^*\frac{\partial u^*}{\partial z^*}\right)=-\frac{\partial P^*}{\partial r^*}+ \quad (2)$$
$$\frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial\mu\left(\gamma^*\right)}{\partial r^*}+\frac{\partial\mu\left(\gamma^*\right)}{\partial z^*}\right)\left(\frac{1}{r^*}\frac{\partial}{\partial r^*}\left(r^*\frac{\partial u^*}{\partial r^*}\right)-\frac{u^*}{r^{*2}}+\frac{\partial^2 u^*}{\partial z^{*2}}\right)-$$
$$\frac{\mu\left(\gamma^*\right)}{K}u^*-s^*\left(T\right)u^*$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.539]

$$\frac{\rho_{nf}}{\varepsilon}\frac{\partial w^*}{\partial t}+\frac{\rho_{nf}}{\varepsilon^2}\left(u^*\frac{\partial w^*}{\partial r^*}+w^*\frac{\partial w^*}{\partial z^*}\right)=-\frac{\partial P^*}{\partial z^*}+ \frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial\mu(\gamma^*)}{\partial r^*}+\frac{\partial\mu(\gamma^*)}{\partial z^*}\right)\left(\frac{1}{r^*}\frac{\partial}{\partial r^*}\left(r^*\frac{\partial w^*}{\partial r^*}\right)+\frac{\partial^2 w^*}{\partial z^{*2}}\right)- \frac{\mu(\gamma^*)}{K}w^*-s^*(T)w^*+\rho_{nf}\,g\,\beta_{nf}\,(T-T_f) \tag{3}$$

$$(\rho c_p)_{eff}\frac{\partial T}{\partial t}+(\rho c_p)_{nf}\left(u^*\frac{\partial T}{\partial r^*}+w^*\frac{\partial T}{\partial z^*}\right)+\varepsilon\rho_{nf}L_f\frac{\partial\phi(T)}{\partial t}= k_{eff}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r^*}\left(\frac{\partial T}{\partial r^*}\right)+\frac{\partial^2 T}{\partial z^{*2}}\right) \tag{4}$$

$$(\rho c_p)_w\frac{\partial T}{\partial t}=k_w\left(\frac{1}{r^*}\frac{\partial}{\partial r^*}\left(\frac{\partial T^*}{\partial r^*}\right)+\frac{\partial^2 T^*}{\partial z^{*2}}\right) \tag{5}$$

در معادلات ۵ گانه بالا، r^*، z^*، u^* و w^* به‌ترتیب مؤلفه‌های افقی و عمودی با بعد مکان و هم‌چنین مؤلفه‌های افقی و عمودی با بعد سرعت در مختصات استوانه‌ای هستند. علاوه‌براین، ρ_{nf}، ε، P^*، $\mu(\gamma^*)$، K و β_{nf}، بیان‌گر، چگالی ماده تغییر فاز دهنده، ضریب تخلخل، فشار در حالت با بعد، لزجت دینامیک، ضریب نفوذپذیری و ضریب پخش حرارتی ماده تغییر فاز دهنده هستند. هم‌چنین، $s^*(T)$ ترم برآمده از معادله کارمن- کازنی می‌باشد و به‌صورت ذیل تعریف می‌شود [۳۴]:

$$s^*(T)=A_{mushy}\frac{(1-\phi(T))^2}{\phi(T)^3-e_s} \tag{6}$$

همان‌طور که اشاره شد، نانوماده تغییرفازدهنده کروسن- آلومینا در حالت مذاب رفتار غیرنیوتنی از خود بروز می‌دهد. لذا، لزجت دینامیک در معادلات مومنتوم (معادلات (۳) و (۴)) از مدل کارئو پیروی کرده، تابعی از نرخ تنش برشی بوده و به‌صورت ذیل تعریف می‌شود [۴۲]:

$$\frac{\mu(\gamma^*)-\mu_\infty}{\mu(\phi)-\mu_\infty}=\left[1+\left(\lambda^*\gamma^*\right)^2\right]^{\frac{n-1}{2}} \tag{7}$$

که در رابطه بالا، $\mu(\phi)$ μ_∞ می‌باشد و رابطه (۷)، به رابطه ذیل تقلیل می‌یابد [۴۳]:

$$\mu(\gamma^*)=\mu(\phi)\left[1+\left(\lambda^*\gamma^*\right)^2\right]^{\frac{n-1}{2}} \tag{8}$$

در رابطه بالا، λ^* و γ^* به ترتیب ترم وابسته به زمان و نرخ تنش برشی هستند. هم‌چنین، n، شاخص مدل غیرنیوتنی کارئو است. درصورتی‌که $n<1$ و $n>1$ باشد، نانوماده تغییر فاز دهنده مذاب، به ترتیب در زمره سیالات غیرنیوتنی پسودوپلاستیک (سیالات نازک شونده) و دیلاتنت قرار می‌گیرد. بدیهی است که به ازای $n=1$، کروسن- آلومینای مذاب، خصوصیات یک سیال نیوتنی را در خود خواهد داشت.

ضمن اینکه کسر ذوب نانوماده تغییر فاز دهنده $\phi(T)$، خود تابعی از دما بوده و در رابطه (۹) ارائه شده است [۴۲]:

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.539]

$$\phi(T)=\begin{cases}0 & T<T_f\\ \dfrac{T-T_f}{T_h-T_f} & T_f<T<T_f+\dfrac{\Delta T}{2}\\ 1 & T>T_f+\Delta T\end{cases} \tag{9}$$

شکل با بعد شرایط اولیه و مرزی مرتبط با معادلات حاکم، یعنی معادلات (۱) تا (۵)، به قرار ذیل است:

$$T\left(r^*,z^*,0\right)=T_c,\ \ u^*\left(r^*,z^*,0\right)=0,\ \ w^*\left(r^*,z^*,0\right)=0 \tag{10.a}$$

$u^*=w^*=0,$ در مجاورت دیواره‌ها در سرتاسر محفظه و زمان‌های بزرگتر از صفر (10.b)

$$T\left(d^*,z^*,t>0\right)=T_h, \tag{10.c}$$

$$\frac{\partial T}{\partial r^*}\left(r^*,H^*,t\right)=0, \tag{10.d}$$

$$\frac{\partial T}{\partial r^*}\left(d^*+L^*,z^*,t\right)=0, \tag{10.e}$$

$$\frac{\partial T}{\partial r^*}\left(r^*,0,t\right)=0. \tag{10.f}$$

در مجاورت پره‌های حرارتی (دیواره‌های رابط)، به‌ترتیب برای اولین پره در پایین محفظه، پره میانی و بالاترین پره درون محفظه و نیز برای زمان‌های بزرگ‌تر از صفر:

$$T=T_s, R_k\frac{\partial T_s}{\partial n^*}=\frac{\partial T}{\partial n^*}, \tag{11}$$

در وجه پایین پره پایین و وجه بالای پره پایین:

$$d^*\le r^*\le b^*+d^*, \frac{t^*}{2b^*}\left(r^*-d^*\right)+s_1^*,$$
$$d^*\le r^*\le b^*+d^*, \frac{t^*}{2b^*}\left(r^*-d^*\right)+s_1^*+\frac{t^*}{2}.$$

در وجه پایین پره میانی و وجه بالای پره میانی:

$$d^*\le r^*\le b^*+d^*, \frac{t^*}{2b^*}\left(r^*-d^*\right)+s_1^*+s_2^*+t^*,$$
$$d^*\le r^*\le b^*+d^*, \frac{t^*}{2b^*}\left(r^*-d^*\right)+s_1^*+s_2^*+\frac{3t^*}{2}.$$

در وجه پایین پره بالایی و وجه بالای پره بالایی:

$$d^*\le r^*\le b^*+d^*, \frac{t^*}{2b^*}\left(r^*-d^*\right)+s_1^*+s_2^*+s_3^*+2t^*,$$
$$d^*\le r^*\le b^*+d^*, \frac{t^*}{2b^*}\left(r^*-d^*\right)+s_1^*+s_2^*+s_3^*+\frac{5t^*}{2}.$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.539]

با هدف ایجاد یک حل بی‌بعد و نتایجی اشتراک‌پذیر با سایر پژوهش‌های معتبر در ادبیات تحقیق، از روابط (۱۵) استفاده شده است. لذا، این روابط در شکل با بعد معادلات حاکم همراه با شرایط اولیه و مرزی مرتبط با آن‌ها قرار گرفته تا هرکدام از این معادلات به شکل بی‌بعد خود انتقال یابند [۳۳, ۳۴]:

$$r=\frac{r^*}{L},z=\frac{z^*}{L},u^*=\frac{u\alpha_{bf}}{L},w^*=\frac{w_{bf}\alpha_{bf}}{L}\theta=\frac{T-T_f}{T_h-T_f},t=\frac{F_0L^2}{\alpha_{bf}},$$
$$P^*=\frac{P\rho_{bf}\alpha^2_{bf}}{L^2},\gamma^*=\frac{\gamma\alpha_{bf}}{L^2},\lambda^*=\frac{\lambda L^2}{\alpha_{bf}},S(\theta)=\frac{S(T)L^2}{\rho_{bf}\alpha_{bf}},\theta=\frac{T-T_f}{T_h-T_f}. \quad (12)$$

با جایگزینی روابط (۱۵) در معادلات (۱) تا (۵)، شکل بی‌بعد این معادلات حاصل خواهد شد:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial(ru)}{\partial r}+\frac{\partial w}{\partial z}=0, \quad (13)$$

$$\left(\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial u}{\partial F_0}+\frac{1}{\varepsilon^2}\left(u\frac{\partial u}{\partial r}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)\right)=-\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}}\frac{\partial P}{\partial r}+$$
$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}}\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}}\frac{\Pr}{\varepsilon}\left(\frac{\frac{\partial\left(\left(1+A_{mushy}\left(1-\phi(\theta)\right)\right)\left[1+(\lambda\gamma)^2\right]^{\frac{n-1}{2}}\right)}{\partial r}+}{\frac{\partial\left(\left(1+A_{mushy}\left(1-\phi(\theta)\right)\right)\left[1+(\lambda\gamma)^2\right]^{\frac{n-1}{2}}\right)}{\partial z}}\right)$$
$$\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial u}{\partial r}\right)-\frac{u}{r^2}+\frac{\partial^2u}{\partial z^2}\right)-$$
$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}}\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}}\Pr\frac{\left(1+A_{mushy}\left(1-\phi(\theta)\right)\right)\left[1+(\lambda\gamma)^2\right]^{\frac{n-1}{2}}}{Da}u-\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}}S(\theta)u \quad (14)$$

$$\left(\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial}{\partial F_0}+\frac{1}{\varepsilon^2}\left(u\frac{\partial w}{\partial r}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)\right)=-\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}}\frac{\partial P}{\partial z}+$$
$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}}\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}}\frac{\Pr}{\varepsilon}\left(\frac{\frac{\partial\left(\left(1+A_{mushy}\left(1-\phi(\theta)\right)\right)\left[1+(\lambda\gamma)^2\right]^{\frac{n-1}{2}}\right)}{\partial r}+}{\frac{\partial\left(\left(1+A_{mushy}\left(1-\phi(\theta)\right)\right)\left[1+(\lambda\gamma)^2\right]^{\frac{n-1}{2}}\right)}{\partial z}}\right)$$
$$\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial w}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2w}{\partial z^2}\right)-$$
$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}}\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}}\Pr\frac{\left(1+A_{mushy}\left(1-\phi(\theta)\right)\right)\left[1+(\lambda\gamma)^2\right]^{\frac{n-1}{2}}}{Da}w-$$
$$\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}}S(\theta)w+\frac{\beta_{nf}}{\beta_{bf}}\theta Ra\Pr \quad (15)$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.539]

$$\frac{\partial\theta}{\partial F_0}+\frac{(\rho c_p)_{nf}}{(\rho c_p)_{bf}}\frac{(\rho c_p)_{bf}}{(\rho c_p)_{eff}}\left(\frac{u\,\partial\theta}{\partial r}+\frac{w\,\partial\theta}{\partial z}\right)= \frac{k_{eff}}{k_{bf}}\frac{(\rho c_p)_{bf}}{(\rho c_p)_{eff}}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}r\left(\frac{\partial\theta}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2\theta}{\partial z^2}\right)-\frac{(\rho c_p)_{bf}}{(\rho c_p)_{eff}}\frac{\rho_{nf}}{\rho_{bf}}\frac{\partial\phi(\theta)}{\partial F_0}\frac{\varepsilon}{Ste} \tag{16}$$

$$\frac{\partial\theta}{\partial F_0}=\frac{\alpha_w}{\alpha_{bf}}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial\theta}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2\theta}{\partial z^2}\right) \tag{17}$$

که در معادلات بالا $\Pr$، Ra، Da و Ste به ترتیب اعداد بی‌بعد پرانتل، رایلی، دارسی و استفان هستند که به‌صورت ذیل تعریف می‌شوند:

$$\Pr=\frac{\upsilon_{bf}}{\alpha_{bf}},Ra=\frac{g\beta_{bf}\Delta TL^3}{\upsilon_{bf}\alpha_{bf}},Da=\frac{K}{L^2},Ste=\frac{C_{p,bf}\left(T_h-T_f\right)}{L_f} \tag{18}$$

ضمن این‌که چگالی، ظرفیت حرارتی ویژه، ضریب پخش حرارتی و ضریب انبساط حجمی ماده تغییر فاز دهنده، کسر حجمی نانوذرات و هم‌چنین ضریب پخش حرارتی و ظرفیت حرارتی ویژه مؤثر درون محیط متخلخل به‌صورت قابل ارائه می‌باشند [۳۶, ۴۰]:

$$\rho_{nf}=(1-\phi_0)\rho_{bf}+\phi_0\rho_{particles} \tag{19.a}$$

$$\left(\rho C_p\right)_{nf}=(1-\phi_0)\left(\rho C_p\right)_{bf}+\phi_0\left(\rho C_p\right)_{particles} \tag{19.b}$$

$$\alpha_{nf}=(1-\phi_0)\alpha_{bf}+\phi_0\alpha_{particles}=(1-\phi_0)\frac{k_{bf}}{\left(\rho C_p\right)_{bf}}+\phi_0\frac{k_{particles}}{\left(\rho C_p\right)_{particles}} \tag{19.c}$$

$$\beta_{nf}=(1-\phi_0)\beta_{bf}+\phi_0\beta_{particles} \tag{19.d}$$

$$C_{p,nf}=(1-\phi_0)C_{p,bf}+\phi_0C_{p,particles} \tag{19.e}$$

$$\alpha_{eff}=\varepsilon\alpha_{nf}+(1-\varepsilon)\alpha_{porous} \tag{19.f}$$

$$\left(\rho C_p\right)_{eff}=\varepsilon\left(\rho C_p\right)_{nf}+(1-\varepsilon)\left(\rho C_p\right)_{porous} \tag{19.g}$$

برای تعیین نسبت‌های لزجت دینامیک و ضریب رسانش حرارتی از روابط (۲۰) و (۲۱) استفاده شده است. دو پارامتر بی‌بعد Nv و Nc، بیانگر عدد لزجت دینامیک و عدد ضریب رسانش حرارتی بوده که پایه آزمایشگاهی دارند و به جنس، اندازه و شکل نانوذرات، جنس سیال پایه و دمای کارکرد وابسته می‌باشند. درواقع، دو پارامتر Nv و Nc، وابسته به موارد ۵ گانه ذکر شده در بالا، برای هر نانوسیال، دارای مقادیر انحصاری خواهند بود [۴۱, ۴۲]:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}}=1+Nv\phi_0 \tag{20}$$

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}}=1+Nc\phi_0 \tag{21}$$

در ادامه، کسر ذوب نانوماده تغییر فاز دهنده بی‌بعد به‌صورت ذیل تعریف شده است:

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.539]

$$\varphi(\theta)=\begin{cases}0 & \theta<0\\ \dfrac{T-T_f}{T_h-T_f} & 0<\theta<\Delta\theta\\ 1 & \theta>\Delta\theta\end{cases} \tag{22}$$

در این‌جا، شرایط اولیه و مرزی با بعد که در رابطه (۱۰) بیان شدند، به شکل بی‌بعد انتقال‌یافته و در روابط (۲۳) آورده شده‌اند:

$$\theta(r,z,0)=0,\ u(r,z,0)=0,\ w(r,z,0)=0 \tag{23.a}$$

$u=w=0,$ در مجاورت دیواره‌ها در سرتاسر محفظه (23.b)

$$\theta(d,z,Fo>0)=1, \tag{23.c}$$

$$\frac{\partial\theta}{\partial r}(r,H,Fo)=0, \tag{23.d}$$

$$\frac{\partial\theta}{\partial r}(d+L,z,Fo)=0, \tag{23.e}$$

$$\frac{\partial\theta}{\partial r}(r,0,Fo)=0. \tag{23.f}$$

شرایط مرزی مربوط به دیواره‌های رابط (در مجاورت پره‌های حرارتی) نیز در شکل بی‌بعد از قرار زیر هستند:

$$\theta=\theta_s, R_k\frac{\partial\theta_s}{\partial n}=\frac{\partial\theta}{\partial n}, \tag{24}$$

در وجه پایین و بالای پره پایین:

$$d\le r\le b+d,\frac{t}{2b}(r-d)+s_1,$$
$$d\le r\le b+d,\frac{t}{2b}(r-d)+s_1+\frac{t}{2}.$$

در وجه پایین و بالای پره میانی:

$$d\le r\le b+d,\frac{t}{2b}(r-d)+s_1+s_2+t,$$
$$d\le r\le b+d,\frac{t}{2b}(r-d)+s_1+s_2+\frac{3t}{2}.$$

در وجه پایین و بالای پره بالایی:

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.539]

$$d \le r \le b+d, \frac{t}{2b}(r-d)+s_1+s_2+s_3+2t,$$
$$d \le r \le b+d, \frac{t}{2b}(r-d)+s_1+s_2+s_3+\frac{5t}{2}.$$

عدد ناسلت متوسط کلی به‌عنوان معیار انتقال حرارت بر روی دیواره گرم سمت چپ، تحت تأثیر محیط متخلخل، حضور نانوذرات و پره‌های جامد عبارت است از :

$$Nu_{avg} = -\left(\begin{array}{l} \frac{k_{eff}}{k_{bf}} \int_0^{s_1} \frac{\partial \theta}{\partial r} dz + R_k \int_{s_1}^{s_1+t} \frac{\partial \theta_s}{\partial r} dz + \frac{k_{eff}}{k_{bf}} \int_{s_1+t}^{s_1+t+s_2} \frac{\partial \theta}{\partial r} dz + \\ R_k \int_{s_1+t+s_2}^{s_1+2t+s_2} \frac{\partial \theta_s}{\partial r} dz + \frac{k_{eff}}{k_{bf}} \int_{s_1+2t+s_2}^{s_1+s_2+s_3+2t} \frac{\partial \theta}{\partial r} dz + \\ R_k \int_{s_1+s_2+s_3+2t}^{s_1+s_2+s_3+3t} \frac{\partial \theta_s}{\partial r} dz + \frac{k_{eff}}{k_{bf}} \int_{s_1+s_2+s_3+3t}^{s_1+s_2+s_3+s_4+3t} \frac{\partial \theta}{\partial r} dz \end{array} \right) \quad (25)$$

هم‌چنین، کسر ذوب نانوماده تغییر فاز دهنده در سرتاسر محیط متخلخل به شرح ذیل قابل حصول خواهد بود:

$$MVF = \frac{\int_A \phi(\theta) dA}{\int_A dA} \quad (26)$$

۳- روش عددی و استقلال شبکه

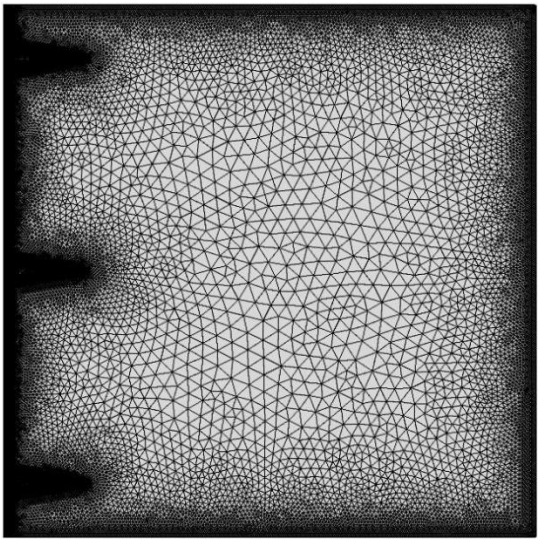
معادلات حاکم بر مسئله به همراه شرایط مرزی مرتبط با آن‌ها در زمره معادلات دیفرانسیل پاره‌ای قرار می‌گیرند؛ لذا، به‌منظور حل این معادلات می‌بایست از روش‌های رایج محاسبات عددی استفاده نمود. در پژوهش حاضر از روش قدرتمند المان محدود برای حل معادلات حاکم و شرایط مرزی مرتبط با آن‌ها بهره گرفته شده است. در کد دینامیک سیالات محاسباتی ایجادشده، دامنه حل به المان‌های کوچک تبدیل شده و معادلات پیوستگی، مومنتوم (در راستای افقی و عمودی) و حرارت (برای نانوماده تغییر فاز دهنده و پره‌های حرارتی) برای هر یک از المان‌ها حل شده‌اند. پس از اینکه دامنه حل از طریق روش المان محدود به المان‌های کوچک مثلثی تبدیل گردید، به بررسی استقلال حل از اندازه شبکه محاسباتی پرداخته شد. بدین منظور، پنج اندازه شبکه محاسباتی مختلف از درشت به ریز در سه زمان پیش‌فرض $Fo=1.3\times10^{-4}$، $Fo=1.3\times10^{-3}$ و $Fo=1.3\times10^{-2}$ مورد توجه قرار گرفتند. سپس، مقادیر عدد ناسلت متوسط، سرعت متوسط و کسر ذوب نانوماده تغییر فاز دهنده کروسن- آلومینا در زمان‌های یادشده ارزیابی گردید و میزان درصد خطای آن‌ها نیز مشخص شد. جدول (۱) ترتیب نشان دهنده درصد خطای به‌دست‌آمده برای سه خروجی یادشده در اندازه شبکه‌های مختلف است. چنانچه مشاهده می‌شود، میزان درصد خطا برای عموم نتایج در اندازه شبکه چهارم، به حداقل مقدار خود رسیده، لذا شبکه ایجادشده با ۵۴۰۰۹۸ المان دامنه‌ای و ۲۲۰۰ المان مرزی به‌عنوان شبکه مناسب انتخاب شد. تصاویری از هندسه موردنظر همراه با شبکه منتخب در ادامه نشان داده شده است (شکل ۲). لازم به‌ذکر است که به‌منظور ایجاد یک حل دقیق‌تر، تمرکز المان‌ها در نواحی اطراف پره‌های حرارتی و نیز دیواره‌های افقی و عمودی بیشتر از سایر نواحی در نظر گرفته شده است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

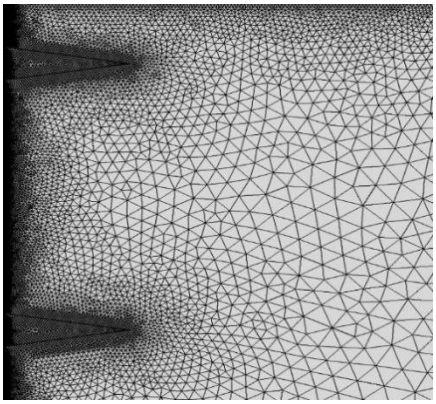
[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.539]

جدول ۱: آزمون استقلال شبکه برای عدد ناسلت، سرعت متوسط و کسر ذوب ماده تغییر فاز دهنده کروسن- آلومینا به ازای مقادیر پیش‌فرض در سه زمان $Fo=1.3\times10^{-4}$، $Fo=1.3\times10^{-3}$ و $Fo=1.3\times10^{-2}$

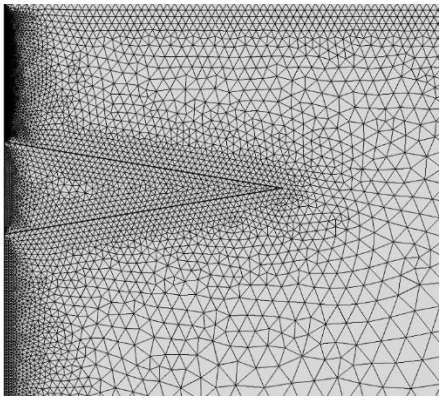
Domain element +Boundary element	$Fo=1.3\times10^{-4}$			$Fo=1.3\times10^{-3}$			$Fo=1.3\times10^{-2}$		
	***Nu* (%)**	***V* (%)**	**Ø (%)**	***Nu* (%)**	***V* (%)**	**Ø (%)**	***Nu* (%)**	***V* (%)**	**Ø (%)**
26426+ 1150	-0.0178	-5.6371	0.1802	0.0280	-0.7943	-0.0087	0.0165	-1.0169	0.0032
35476+ 1500	0.0024	-3.7296	-0.1021	0.0065	-2.8150	-0.0288	-0.4101	1.5380	0.9287
49774+ 1850	-0.0012	-2.4874	0.1490	0.0172	1.2244	-0.0231	0.4052	-2.2510	-0.9147
54098+ 2200	0.0036	1.6052	-0.0785	0.0108	0.1578	-0.0202	0.0265	-0.1631	-0.0587
63854+ 2550	0.0059	1.8220	-0.0157	-0.0065	-1.6697	-0.0115	0.0033	-0.0643	-0.0053



(الف)



(ب)



(پ)

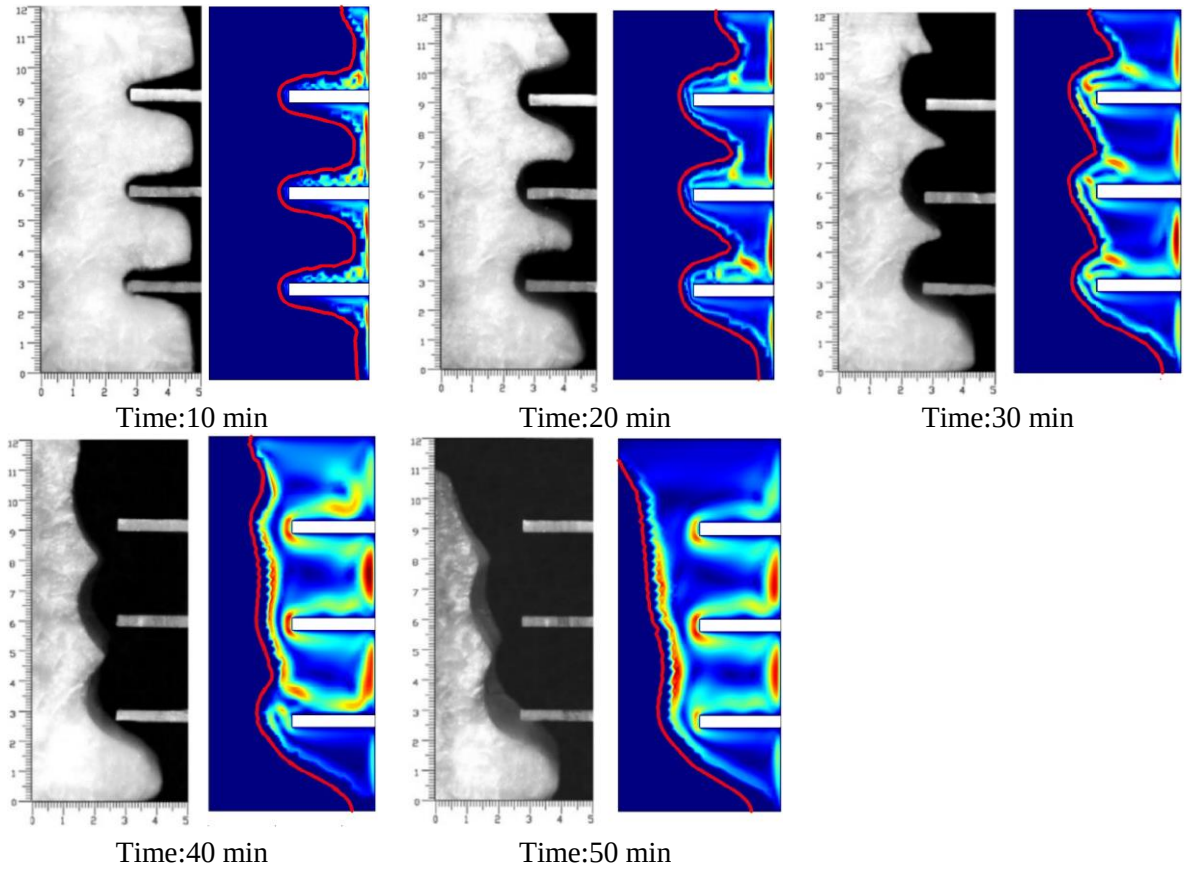
شکل ۲: تصاویری از هندسه به همراه اندازه شبکه انتخاب شده، (الف) تصویر کلی هندسه، (ب) تمرکز بر روی دو پره بالایی و (پ) تمرکز بر روی یکی از پره ها

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.539]

۴- اعتبارسنجی

به‌منظور اطمینان از درستی کد دینامیک سیالاتی محاسباتی مطرح شده در پژوهش حاضر، مقایسه‌ای میان نتایج کد و پژوهش آزمایشگاهی کامکاری و شکوه‌مند [۱۷] پرداخته شده است. در این پژوهش، فرآیند ذوب در یک محفظه بسته مستطیلی با ابعاد 50 mm ×120 mm حاوی ماده تغییر فاز دهنده لوریک اسید همراه با سه پره حرارتی آلومینیومی متصل به دیواره سمت راست، بررسی گردید. دیواره سمت راست در دمای بالای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و سایر دیواره‌های به‌صورت عایق در نظر گرفته شده‌اند. در مجموعه شکل‌های (۳) نتایج مربوط به کار آزمایشگاهی شکوهمند و همکاران [۱۷] برای هر زمان، تصاویر سمت چپ و کد دینامیک سیالات محاسباتی ایجادشده در پژوهش حاضر، تصاویر سمت راست را تشکیل می‌دهند. چنان‌چه در این تصاویر ملاحظه می‌گردد، فرآیند ذوب درون محفظه بسته از دقیقه ۱۰ تا دقیقه ۵۰ ارزیابی‌شده است. پیش‌روی جبهه ذوب پس از هر ۱۰ دقیقه به وضوح قابل مشاهده است. هم‌چنین، ازآن‌جایی‌که انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی همبسته درون محفظه بسته رخ می‌دهد، میزان پیش‌روی جبهه ذوب در نواحی بالایی محفظه بیش‌تر از نواحی زیرین می‌باشد. شباهت در الگو و میزان پیش‌روی جبهه ذوب به وضوح برای هر دو مطالعه قابل مشاهده است، لذا تطابق بسیار مناسبی میان کد دینامیک سیالات محاسباتی مربوط به پژوهش حاضر و فرآیند آزمایشگاهی طی شده توسط شکوهمند و کامکاری [۱۷] برقرار است.



شکل ۳: مقایسه فرآیند ذوب در پژوهش عددی حاضر و کار آزمایشگاهی کامکاری و شکوهمند [۱۷] درون یک محفظه بسته مستطیلی پره شده با لوریک اسید به همراه سه پره حرارتی آلومینیومی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.539]

۵- نتایج و بحث

نتایج در این قسمت از پژوهش حاضر به ازای مقادیر پیش‌فرض پارامترها و اعداد بی‌بعد موجود در جدول (۲)، به‌دست‌آمده‌اند. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌شود، اعداد بی‌بعد استفان (Ste)، رایلی (Ra)، دارسی (Da) و هم‌چنین پارامترهایی همچون کسر حجمی نانوذرات (ϕ_0)، شاخص کارئو (n) و ضریب تخلخل (ε) دارای مقادیر پیش‌فرض و کران بالا و پایین می‌باشند. هم‌چنین، عدد پرانتل (Pr)، پارامتر ضریب رسانش حرارتی (Nc) و پارامتر لزجت دینامیک (Nv) نانوسیال کروسن-آلومینا در تمام نتایج ارائه‌شده دارای مقدار ثابت و به ترتیب برابر با ۲۸/۱، ۱۴/۱ و ۱۵/۶۲ در نظر گرفته شده است. سایر خواص ترموفیزیکی برای پره‌های حرارتی آلومینیومی، ماتریس جامد آهنی، نانوذرات و ماده تغییر فاز دهنده پایه کروسن در جدول (۳)، نشان داده شده‌اند.

جدول (۲)، مقادیر پیش‌فرض اعداد و پارامترهای بی‌بعد [۳۳, ۳۴, ۳۵, ۴۴]

مقدار پیش‌فرض	پارامتر/ عدد بی‌بعد
۰/۱۵	عدد استفان
$۱۰^{۴}$	عدد رایلی
۰/۱	کسر حجمی نانوذرات
۰/۵	شاخص کارئو
۰/۵	ضریب تخلخل
۵×۱۰^{-۳}	عدد دارسی

جدول (۳): خواص ترموفیزیکی مربوط به مواد بکار رفته در پژوهش حاضر [۴۵, ۴۶]

ماده موردنظر / خواص ترموفیزیکی	پره‌های حرارتی آلومینیومی	محیط متخلخل آهنی	نانوذرات آلومینا	ماده تغییرفازدهنده پایه کروسن
ضریب رسانش حرارتی $\left[W/mK\right]$	۲۳۷	۸۰/۲۰	۴۰	۰/۱۰۱
چگالی $\left[kg/m^3\right]$	۲۷۰۲	۷۸۷۰	۳۹۵۰	۷۹۰
ظرفیت حرارتی ویژه $\left[J/kgK\right]$	۹۰۳	۴۴۷	۷۷۳	۲۰۱۰
ضریب پخش حرارتی $\left[m^2/s\right]\times10^{-7}$	۹۷۱/۳۴	۲۲۷/۹۷	۱۱۳	۰/۶۳۱
عدد پرانتل	-	-	-	۲۸/۱

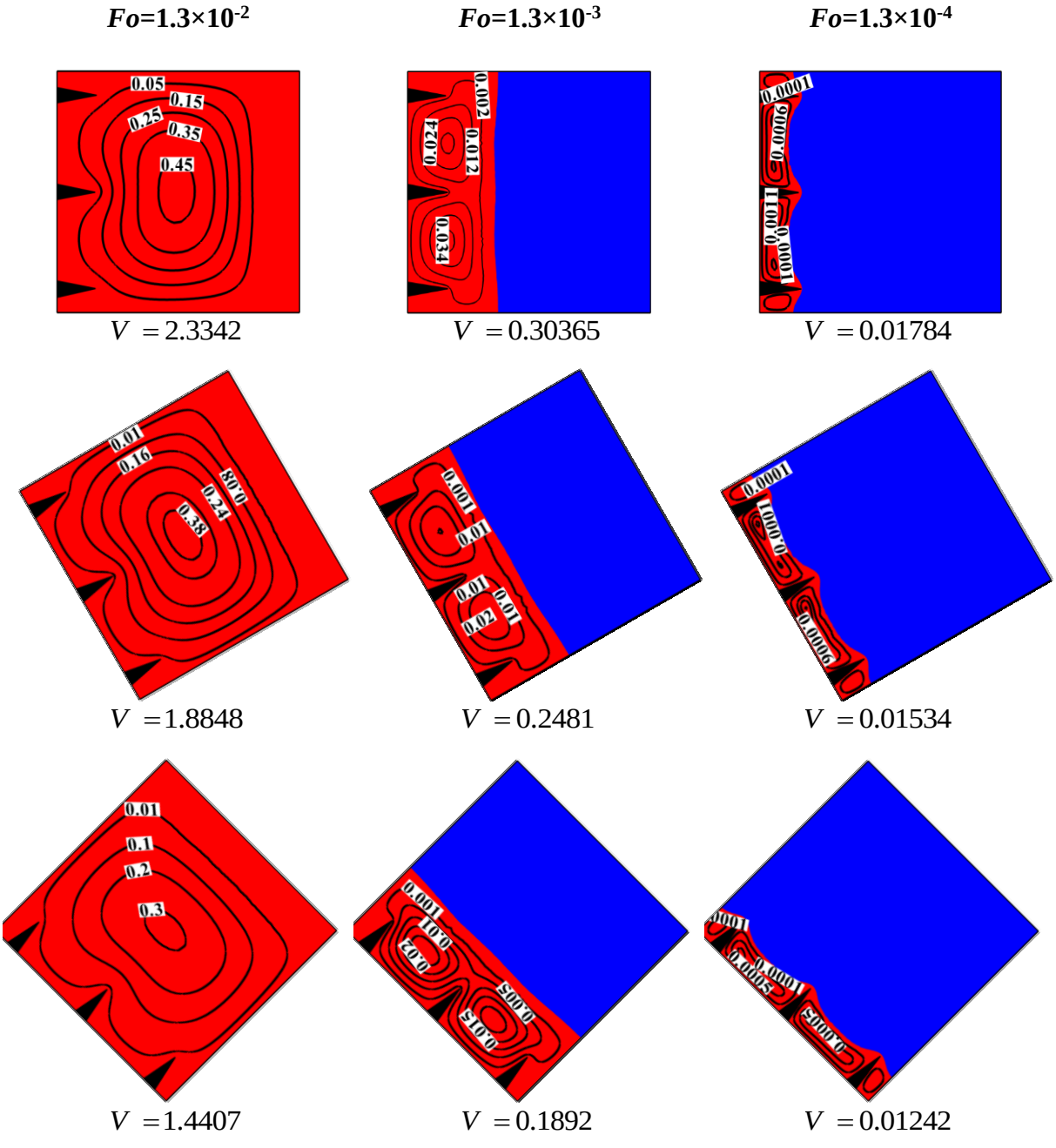
۵-۱- تأثیر زاویه انحراف

تأثیر زاویه انحراف از محور افقی بر خطوط دما ثابت، خطوط جریان و جبهه ذوب در سه زمان بی‌بعد از پیش‌تعیین شده، مورد ارزیابی قرار گرفته است. زوایای صفر، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه، زوایای انتخابی می‌باشند. لازم به‌ذکر است که زاویه انحراف صفر درجه، همان هندسه پیش‌فرض معرفی شده در شکل (۱) می‌باشد. مطابق با مشاهدات و بررسی‌های صورت گرفته، تغییر زاویه انحراف از محور افقی بر الگوی خطوط دما ثابت و جبهه ذوب تأثیرگذار نبوده؛ در بیانی دیگر، مقادیر مربوط به عدد ناسلت متوسط و کسر ذوب برای زوایای انحراف مختلف تغییرات محسوسی نداشته‌اند؛ ازآن‌جایی‌که سرتاسر فضای مدنظر، متخلخل می‌باشد و مُد انتقال حرارت رسانش، غالب است، تغییر در نیروهای شناوری (به‌عنوان نماینده انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی)، از طریق تغییر در زاویه انحراف، نرخ انتقال حرارت و جبهه ذوب را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. بنابراین، در این‌جا از تکرار تصاویر و مقادیر مشابه یکدیگر صرف‌نظر شده است. اما، تغییرات الگوی خطوط جریان و سرعت متوسط نانوسیال مذاب به ازای زوایای انحراف مختلف چشم‌گیر بوده و در مجموعه شکل‌های (۴) و (۵)، به ارزیابی این خطوط پرداخته شده است. همان‌طور که در این تصاویر مشخص است، با افزایش زاویه انحراف از صفر تا ۹۰ درجه، الگوی خطوط جریان به‌تدریج تغییر یافته‌اند؛ اما سرعت

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

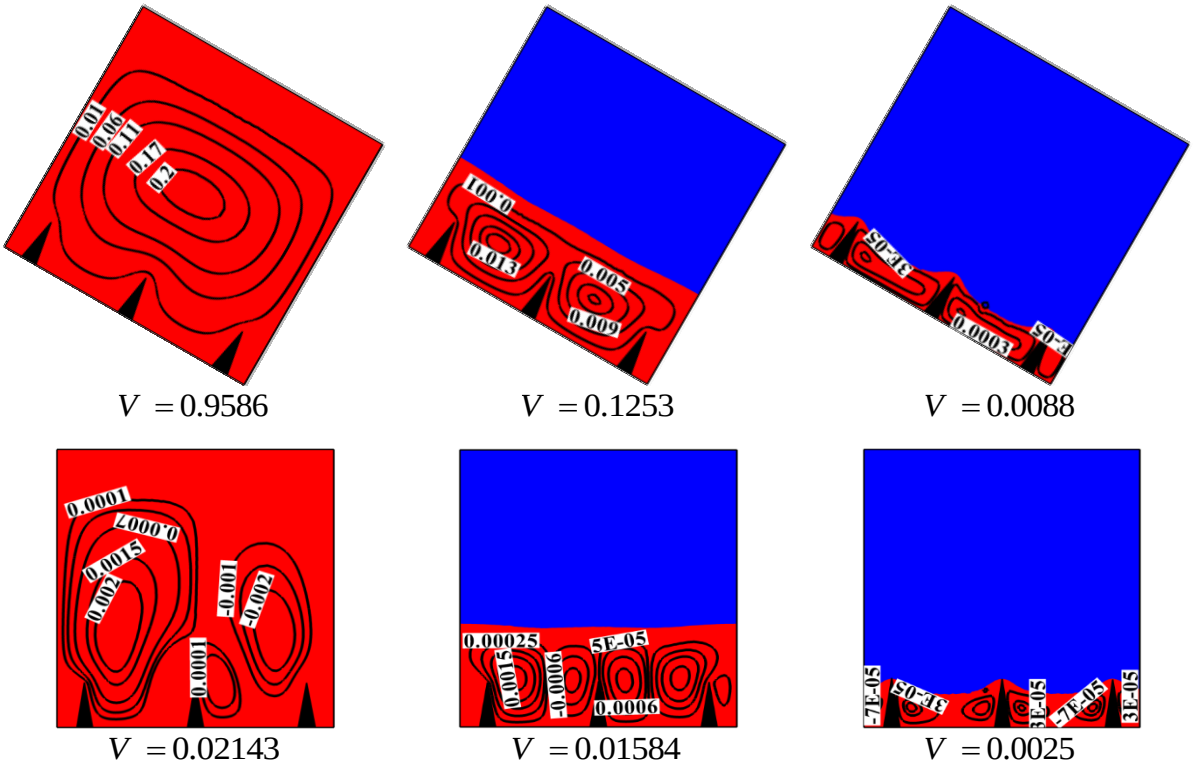
[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.539]

متوسط به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است. تضعیف و تغییر الگوهای یاد شده تا زاویه ۴۵ درجه، به کُندی پیش رفته است. در زمان پیش‌فرض میانی و زاویه انحراف ۶۰ درجه، محسوس‌ترین تغییر رخ داده است. لحظه‌ای که جهت چرخش جریان نانوسیال مذاب از حالت صرفاً ساعت‌گرد به حالت توأماً ساعت‌گرد-پادساعت‌گرد تغییر یافته است. بدیهی است که رنگ قرمز ناحیه ذوب شده در سرتاسر منبع ذخیره حرارتی، در زمان و زاویه یادشده، خطوط و سرعت نزدیک به صفر را نشان می‌دهد. اما، با گذشت زمان و در همان زاویه، الگوی خطوط جریان توسعه یافته و دوباره به حالت ساعت‌گرد بازگشته است. زاویه انحراف ۹۰ درجه از محور افقی، وضعیتی است که در آن، به‌طورکلی خطوط جریان شمایلی ساعت‌گرد-پادساعت‌گرد به خود گرفته‌اند. در این زاویه، منبع ذخیره انرژی حرارتی، عملاً تحت گرمایش از کف قرار گرفته و به نوعی سلول‌های رایلی- برنارد برای نانوماده تغییر فاز دهنده کروسن- آلومینای مذاب تشکیل شده‌اند. چنان‌چه اشاره شد، تغییر الگوی جریان از ساعت‌گرد به ساعت‌گرد-پادساعت‌گرد، می‌تواند تغییر چندانی بر جبهه ذوب داشته باشد.



[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.539]

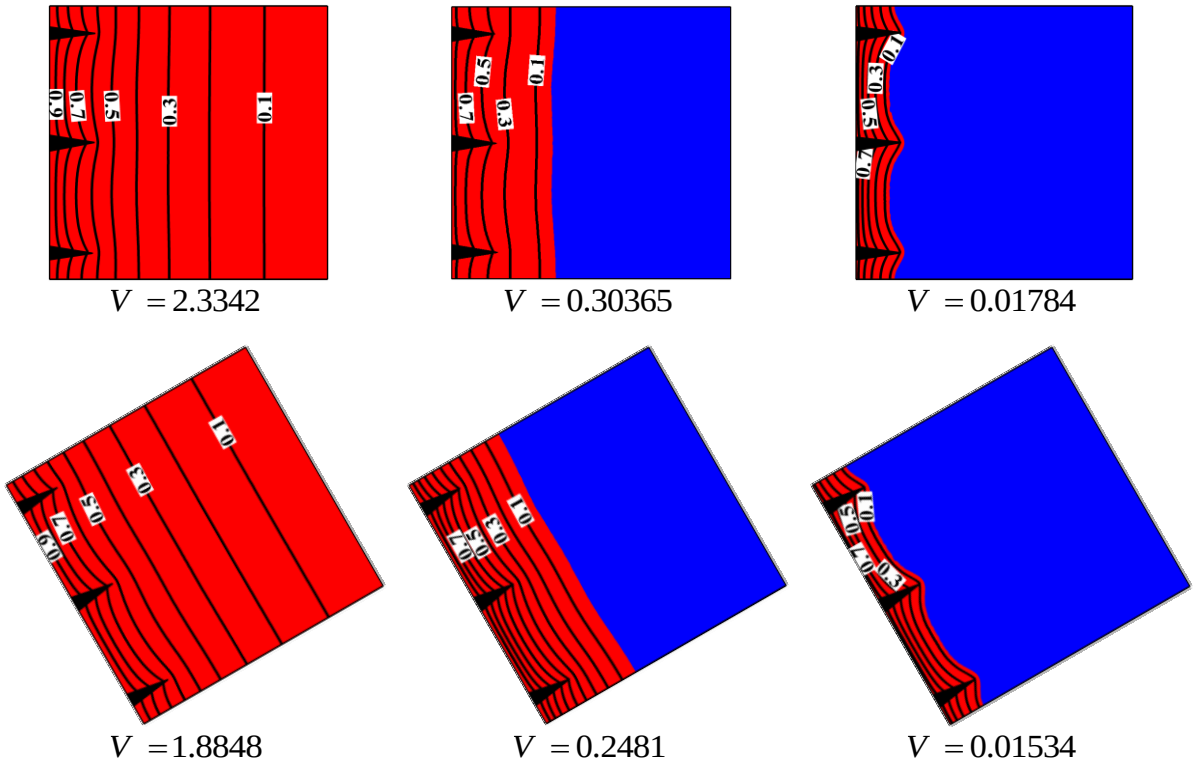


$V = 0.9586$ $V = 0.1253$ $V = 0.0088$

$V = 0.02143$ $V = 0.01584$ $V = 0.0025$

شکل ۴: تأثیرگذاری زاویه انحراف بر خطوط جریان و سرعت متوسط نانوسیال کروسن-آلومینای مذاب در سه زمان بی‌بعد از پیش تعیین شده (سطر اول: زاویه صفر درجه، سطر دوم: زاویه ۳۰ درجه، سطر سوم: زاویه ۴۵ درجه، سطر چهارم: زاویه ۶۰ درجه و سطر پنجم: زاویه ۹۰ درجه)

***Fo*=1.3×10^{-2}** ***Fo*=1.3×10^{-3}** ***Fo*=1.3×10^{-4}**

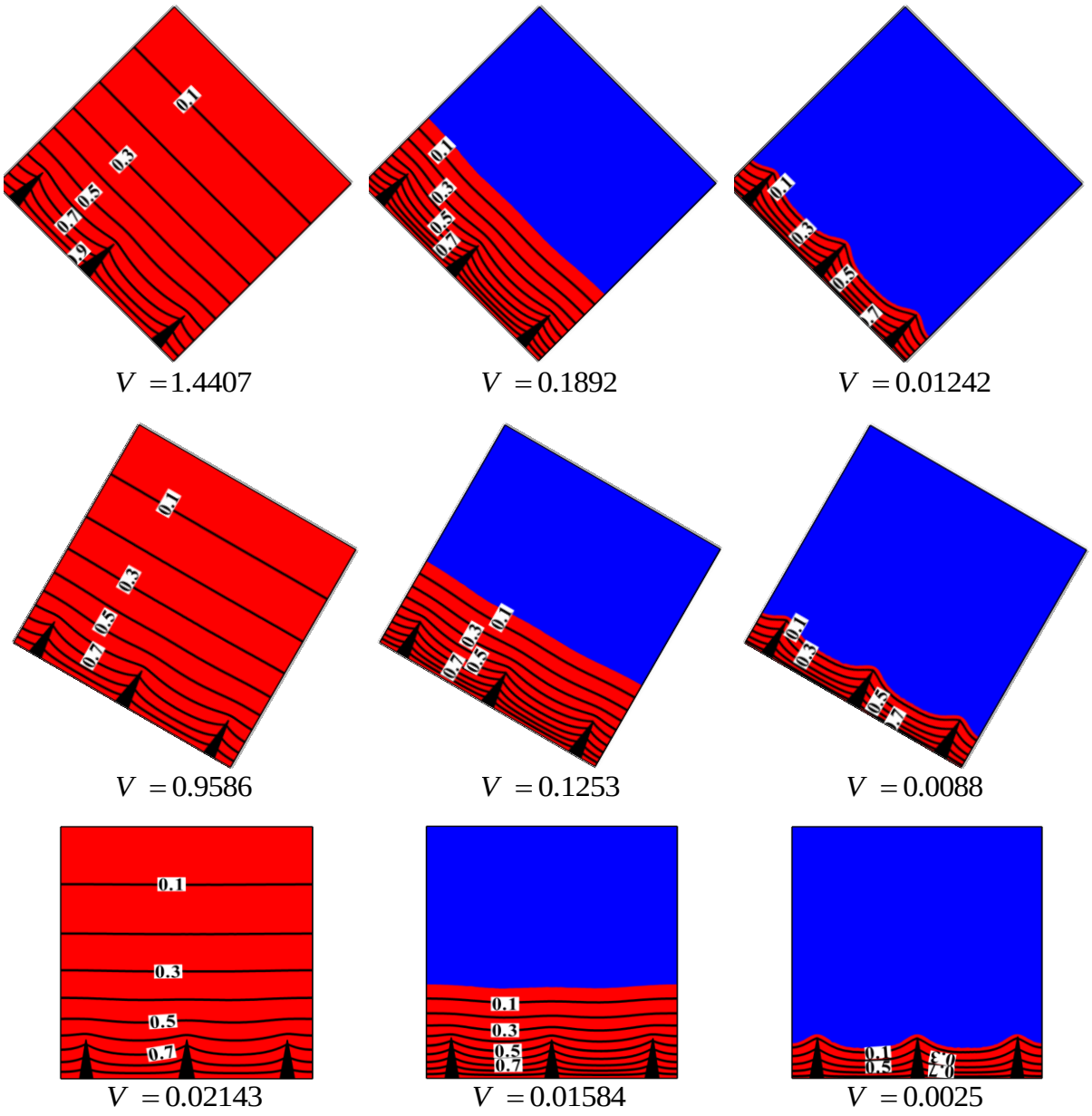


$V = 2.3342$ $V = 0.30365$ $V = 0.01784$

$V = 1.8848$ $V = 0.2481$ $V = 0.01534$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.539]



شکل ۵: تأثیرگذاری زاویه انحراف بر خطوط دماثابت نانوسیال کروسن-آلومینای مذاب در سه زمان بی‌بعد از پیش تعیین شده (سطر اول: زاویه صفر درجه، سطر دوم: زاویه ۳۰ درجه، سطر سوم: زاویه ۴۵ درجه، سطر چهارم: زاویه ۶۰ درجه و سطر پنجم: زاویه ۹۰ درجه)

۶- نتیجه‌گیری

فرآیند ذوب نانوماده تغییر فاز دهنده غیرنیوتنی کروسن- آلومینا درون یک محفظه بسته متخلخل با ماتریس جامد آهنی و در حضور پره‌های حرارتی آلومینیوم مورد ارزیابی قرار گرفت. فرآیند ذوب با بهره‌گیری از روش آنتالپی تخلخل و تعیین رفتار ماده تغییر فاز دهنده مذاب غیرنیوتنی با استفاده از مدل کارئو بررسی شد. ماده تغییر فاز دهنده مذاب به‌صورت همگن فرض گردید که با ماتریس جامد متخلخل در شرایط تعادل حرارتی موضعی قرار گرفته است. برای تعیین نسبت ضریب رسانش حرارتی و نسبت ضریب لزجت دینامیک ماده تغییر فاز دهنده مذاب از دو پارامتر بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی استفاده گردید. معادلات موردنظر به شکل بی‌بعد انتقال یافتند و با استفاده از روش المان محدود حل شدند. مطابق با مشاهدات و بررسی‌های صورت

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.539]

گرفته، تغییر زاویه انحراف از محور افقی بر الگوی خطوط دماثابت و جبهه ذوب تأثیرگذار نبوده؛ در بیانی دیگر، مقادیر مربوط به عدد ناسلت متوسط و کسر ذوب برای زوایای انحراف مختلف تغییرات محسوسی نداشته‌اند؛ ازآن‌جایی‌که سرتاسر فضای مدنظر، متخلخل می‌باشد و مُد انتقال حرارت رسانش، غالب است، تغییر در نیروهای شناوری (به‌عنوان نماینده انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی)، از طریق تغییر در زاویه انحراف، نرخ انتقال حرارت و جبهه ذوب را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد.

۷- فهرست علایم و نشانه‌ها

علایم خاص			
n	ضریب کارئو $[-]$	g	شتاب گرانش $\left[\frac{m}{s^2}\right]$
Pr	عدد پرانتل $[-]$	A_{mushy}	ناحیه موشی $[-]$
Ste	عدد استفان $[-]$	AR	نسبت ابعادی $[-]$
R_i	باقیمانده غیر خطی $[-]$	Da	عدد دارسی $[-]$
ΔT	دامنه دمای ناحیه موشی $[K]$	Es	انرژی ذخیره شده کل بی بعد $[-]$
r	مختصات شعاعی $[m]$	e_s	ثابت معادله کارمن کازنی $[-]$
$S(T)$	معادله کارمن کازنی $[-]$	Fo	عدد فوریه در زمان بی بعد $[-]$
z	مختصات z $[m]$	k	رسانش حرارتی $\left[\frac{W}{mK}\right]$
T	دما $[K]$	H	ارتفاع محفظه $[m]$
t	Dimensional time $[s]$	K	نفوذپذیری $[m^2]$
u	سرعت در راستای شعاع $\left[\frac{m}{s}\right]$	L_f	گرمای نهان ذوب $\left[\frac{J}{kg}\right]$
w	سرعت در جهت عمود $\left[\frac{m}{s}\right]$	R_k	نسبت هدایت حرارتی پره به ماده تغییر فاز $[-]$
MVF	کسرذوب حجمی $[-]$	L	طول محفظه $[m]$
Nc	رسانایی حرارتی $[-]$	Ra	عدد رایلی $[-]$
P	فشار $[Pa]$	Nu	عدد ناسلت $[-]$
Nv	ویسکوزیته دینامیکی $[-]$	MVF	کسرذوب حجمی $[-]$
		N	تعداد گره ها $[-]$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.539]

علایم یونانی		زیرنویس ها	
چگالی $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	ρ	سرما	c
تنش پیچشی $\left[\frac{1}{s}\right]$	γ	گرما	h
ضریب حل $[-]$	Υ	موثر	eff
ضریب انبساط حرارتی $\left[\frac{1}{K}\right]$	β	ذوب	f
انتشار حرارتی $\left[\frac{m^2}{s}\right]$	α	سیال پایه	bf
ضریب تخلخل $[-]$	ε	نانو سیال	nf
کسرحجمی نانوذرات $[-]$	ϕ_0	جامد	s
کسرمایع $[-]$	$\phi(T)$	دیواره	w
ویسکوزیته دینامیک $\left[\frac{kg}{ms}\right]$	μ	سرما	c
دمای بی بعد $[-]$	θ	**Superscript**	
پارامتر وابسته به زمان $[s]$	λ	علامت با بعد	*
دامنه حل $[-]$	Ω		
تابع پایه	ζ		

مراجع

[1] Z., Khan, A., Ghafoor, A review of performance enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of materials, thermal stability and compatibility. Energy conversion and management, 115 (2016) 132-158.

[2] A.F.,Regin, S., Solanki, J., Saini, Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12(9) (2008) 2438-2458.

[3] S.,Shi, et al., Non-steady experimental investigation on an integrated thermal management system for power battery with phase change materials. Energy Conversion and Management, 138 (2017) 84-96.

[4] Q. H., Deng,. G.F., Tang, Numerical visualization of mass and heat transport for conjugate natural convection/heat conduction by streamline and heatline. International Journal of Heat and Mass Transfer, 45(11) (2002) 2373-2385.

[5] M., Mobedi, Conjugate natural convection in a square cavity with finite thickness horizontal walls. International Communications in Heat and Mass Transfer, 35(4) (2008) 503-513.

[6] M., Sheikholeslami, et al., Natural convection heat transfer in a cavity with sinusoidal wall filled with CuO–water nanofluid in presence of magnetic field. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 45(1) (2014) 40-49.

[7] M., Sheikholeslami, M., Shamlooei, Fe_3O_4–H_2O nanofluid natural convection in presence of thermal radiation. International Journal of Hydrogen Energy, 42(9) (2017) 5708-5718.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.539]

[8] T., Armaghani, et al., Numerical investigation of water-alumina nanofluid natural convection heat transfer and entropy generation in a baffled L-shaped cavity. Journal of Molecular Liquids,. 223(2016) 243-251.
[9] K.L., Walker, G.M., Homsy, Convection in a porous cavity. Journal of Fluid Mechanics, 87(3) (1978) 449-474.
[10] C., Beckermann, S., Ramadhyani, R., Viskanta, Natural convection flow and heat transfer between a fluid layer and a porous layer inside a rectangular enclosure, (1987).
[11] Y., Varol, H.F., Oztop, I., Pop, Numerical analysis of natural convection for a porous rectangular enclosure with sinusoidally varying temperature profile on the bottom wall. International Communications in Heat and Mass Transfer, 35(1) (2008) 56-64.
[12] A.,Baytaş, et al., Conjugate natural convection in a square porous cavity. Heat and Mass transfer, 37(4-5) (2001) 467-473.
[13] H., Zargartalebi, et al., Natural convection boundary layer flow over a horizontal plate embedded in a porous medium saturated with a nanofluid: case of variable thermophysical properties. Transport in Porous Media,. 107(1) (2015) 153-170.
[14] P., Gholamalipour, M., Siavashi, M.H., Doranehgard, Eccentricity effects of heat source inside a porous annulus on the natural convection heat transfer and entropy generation of Cu-water nanofluid. International Communications in Heat and Mass Transfer, 109 (2019) 104367.
[15] H.T., Kadhim, F. A., Jabbar, A., Rona, Cu-Al_2O_3 hybrid nanofluid natural convection in an inclined enclosure with wavy walls partially layered by porous medium. International Journal of Mechanical Sciences, 186 (2020) 105889.
[16] S., Mehryan, M., Ghalambaz, M., Izadi, Conjugate natural convection of nanofluids inside an enclosure filled by three layers of solid, porous medium and free nanofluid using Buongiorno's and local thermal non-equilibrium models. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 135(2) (2019) 1047-1067.
[17] B., Kamkari, H., Shokouhmand, Experimental investigation of phase change material melting in rectangular enclosures with horizontal partial fins. International Journal of Heat and Mass Transfer,. 78 (2014) 839-851.
[18] S., Kashani, et al., Solidification of nano-enhanced phase change material (NEPCM) in a wavy cavity. Heat and Mass Transfer,. 48(7) (2012) 1155-1166.
[19] A.M., Sefidan, et al., Multi-layer PCM solidification in a finned triplex tube considering natural convection. Applied Thermal Engineering, 123 (2017) 901-916.
[20] Z., Li, et al., Effect of porous medium and nanoparticles presences in a counter-current triple-tube composite porous/nano-PCM system. Applied Thermal Engineering, 167 (2020) 114777.
[21] F.J., Gijsen, F.N., van de Vosse, J., Janssen, The influence of the non-Newtonian properties of blood on the flow in large arteries: steady flow in a carotid bifurcation model. Journal of biomechanics,. 32(6) (1999) 601-608.
[22] A., Jahanbakhshi, A. A., Nadooshan, M., Bayareh, Magnetic field effects on natural convection flow of a non-Newtonian fluid in an L-shaped enclosure. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,. 133(3) (2018) 1407-1416.
[23] Z.H., Khan, W.A., Khan, M., Hamid, Non-Newtonian fluid flow around a Y-shaped fin embedded in a square cavity. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, (2020) 1-13.
[24] G., Kefayati, Heat transfer and entropy generation of natural convection on non-Newtonian nanofluids in a porous cavity. Powder technology, 299 (2016) 127-149.
[25] K., Rodríguez-Núñez, E., Tabilo, N.O., Moraga, Conjugate unsteady natural heat convection of air and non-Newtonian fluid in thick walled cylindrical enclosure partially filled with a porous media. International Communications in Heat and Mass Transfer, 108 (2019) 104304.
[26] M., Ghalambaz, et al., Non-Newtonian behavior of an electrical and magnetizable phase change material in a filled enclosure in the presence of a non-uniform magnetic field. International Communications in Heat and Mass Transfer, 110 (2020) 104437.
[27] A.I., Alsabery, et al., Numerical study of conjugate natural convection heat transfer of a blood filled horizontal concentric annulus. International Communications in Heat and Mass Transfer, 114 (2020) 104568.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.539]

[28] S., Mehryan, et al., Numerical study of melting-process of a non-Newtonian fluid inside a metal foam. Alexandria Engineering Journal, 59(1) (2020) 191-207.
[29] Z., Li, et al., Effect of porous medium and nanoparticles presences in a counter-current triple-tube composite porous/nano-PCM system. Applied Thermal Engineering, 167 (2020) 114777.
[30] M., Fadaei, M., Izadi, E., Assareh, A., Ershadi, Conjugated non-Newtonian phase change process in a shell and tube heat exchanger: A parametric-geometric analysis, Applied Thermal Engineering 220, (2023) 119795.
[31] L., Zhang, A. S., Moghaddam, P. S., Bains, A., Basem, M., Al-Bahrani, A. Y., Mortatha, A. J., Sultan, A. A., Alizadeh, R., Alam Numerical investigation of heat transfer improvement in a latent thermal energy storage system using a composite of phase change material and nanoparticles in a porous medium. Thermal Science and Engineering Progress. 1;51 (2024) 102632.
[32] M., Qiu, B., Peng, X., Xu, Y., Zhou, R., Zhang, F., Su, J., Xin, Synergistic impact of horizontal fin installation height and nanoparticle volume fraction to enhance charging performance of phase change materials (PCMs). International Communications in Heat and Mass Transfer. 1;154 (2024) 107441.
[33] M., Sabour, M., Ghalambaz, A., Chamkha, Natural convection of nanofluids in a cavity: criteria for enhancement of nanofluids. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, (2017).
[34] M., Ghalambaz, et al., Phase-change heat transfer in a cavity heated from below: the effect of utilizing single or hybrid nanoparticles as additives. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 72 (2017) 104-115.
[35] S., Mehryan, et al., Numerical study of melting-process of a non-Newtonian fluid inside a metal foam. Alexandria Engineering Journal, 59(1) (2020) 191-207.
[36] D.A., Nield, A., Bejan, Convection in porous media. 3 (2006) Springer.
[37] V., Costa, Natural convection in partially divided square enclosures: Effects of thermal boundary conditions and thermal conductivity of the partitions. International journal of heat and mass transfer, 55(25-26) (2012). 7812-7822.
[38] K., Khellaf, G., Lauriat, Numerical study of heat transfer in a non-Newtonian Carreau-fluid between rotating concentric vertical cylinders. Journal of non-newtonian fluid mechanics, 89(1-2) (2000) 45-61.
[39] R.B., Bird, et al., Transport phenomena. Journal of The Electrochemical Society, 108(3) (1961) 78C.
[40] K., Khanafer, K., Vafai, A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids. International journal of heat and mass transfer, 54(19-20) (2011) 4410-4428.
[41] J., Buongiorno, et al., A benchmark study on the thermal conductivity of nanofluids. Journal of Applied Physics, 106(9) (2009) 094312.
[42] D.C., Venerus, et al., Viscosity measurements on colloidal dispersions (nanofluids) for heat transfer applications. Applied rheology, 20(4) (2010).
[43] T., Basak, S., Roy, A., Balakrishnan, Effects of thermal boundary conditions on natural convection flows within a square cavity. International Journal of Heat and Mass Transfer, 49(23-24) (2006) 4525-4535.
[44] R., Pravesh, A., Dhiman, R., Bharti, Non-Newtonian power-law fluid's thermal characteristics across periodic array of circular cylinders. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering,. 41(2) (2019) 88.
[45] F.P., Incropera, et al., Fundamentals of heat and mass transfer, (2007) Wiley.
[46] www.EngineeringToolbox.com. densities and specific volumes propertices. Retrieved 2013-1 11., (2013), 868-880.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.539]

Melting Process of Carreau Non-Newtonian Nano-phase change material inside Cylindrical Energy Storage System rotating

Alireza kazemi[1],Mohsen izadi[2*],ehsanolah assareh[1], Ali Ershadi[1]

[1]Department of Mechanical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran
[2]Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran

Received: Autumn 2025 Accepted: Winter 2026

Abstract

In this research, the melting process of the non-Newtonian phase change material inside a porous vertical cylinder equipped with fins has been numerically investigated. First, the governing equations and corresponding boundary conditions have been derived based on the enthalpy-porosity method and in cylindrical coordinates. In the following, they were transferred to their dimensionless form and finally solved using the finite element method. The independence of the solution from the computational grid size has been evaluated and the computational fluid dynamics code created has been compared and validated with valid numerical and laboratory researches. The results for the rotation of the storage with the presence of three thermal fins are shown in the form of flow lines, melting front, constant temperature lines, speed and average Nusselt number as well as the amount of melting fraction of phase change nano material. According to the observations and investigations, changing the angle of deviation from the horizontal axis did not affect the pattern of temperature constant lines and melting front; In other words, the values related to the average Nusselt number and melting fraction have not changed significantly for different deviation angles; Since the entire space in question is porous and the conduction heat transfer mode is dominant, the change in buoyancy forces (as representative of natural convection heat transfer), through the change in the deflection angle, does not affect the heat transfer rate and the melting front to give.

Key words: Melting process, Natural convection, Conjugate heat transfer, porous media, Carreau non-Newtonian fluid, nanofluid.

*corresponding author: izadi.m@lu.ac.ir

Cite this article as: Alireza kazemi,Mohsen izadi,ehsanolah assareh, Ali Ershadi. Melting Process of Carreau Non-Newtonian Nano-phase change material inside Cylindrical Energy Storage System rotating. **Journal of Energy Conversion, 2026, 12(4), 87-108**.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.539]