



مدل سازی تغییر فاز سیالات غیرنیوتنی تغییر فاز دهنده در یک محفظه در حال چرخش با حضور پره های حرارتی

علیرضا کاظمی^۱، محسن ایزدی^{۲*}، احسان اله 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: ۱۴۰۴/۱۲/۰۹

چکیده

در این پژوهش فرایند ذوب ماده تغییر فاز دهنده غیرنیوتنی درون یک استوانه ای عمودی متخلخل و مجهز به فین به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا، معادلات حاکم و شرایط مرزی متناسب با آن ها بر پایه روش آنتالپی- تخلخل و در مختصات استوانه ای استخراج شده اند. در ادامه به شکل بی بعد خود انتقال یافته و در نهایت با استفاده از روش المان محدود حل شده اند. استقلال حل از اندازه شبکه محاسباتی ارزیابی شده و کد دینامیک سیالات محاسباتی ایجاد شده با پژوهش های 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 شده اند. مطابق با مشاهدات و بررسی های صورت گرفته، تغییر زاویه انحراف از محور افقی بر الگوی خطوط دما ثابت و جبهه ذوب تأثیر گذار نبوده؛ در بیانی دیگر، مقادیر مربوط به عدد ناسلت متوسط و کسر ذوب برای زوایای انحراف مختلف تغییرات محسوسی نداشته اند؛ از آنجایی که سرتاسر فضای مدنظر، متخلخل می باشد و مد انتقال حرارت رسانش، غالب است، تغییر در نیروهای شناوری (به عنوان نماینده انتقال حرارت جابه جایی طبیعی)، از طریق تغییر در زاویه انحراف، نرخ انتقال حرارت و جبهه ذوب را تحت تأثیر قرار نمی دهد.

* عهده دار مکاتبات: izadi.m@lu.ac.ir

کلمات کلیدی: فرآیند ذوب، انتقال حرارت جابه جایی طبیعی هم بسته، محیط متخلخل، نانوسیال، سیال غیرنیوتنی

نحوه استناد به این مقاله علیرضا کاظمی، محسن ایزدی، احسان اله عصاره و علی ارشادی. مدل سازی تغییر فاز سیالات غیرنیوتنی تغییر فاز دهنده در یک محفظه در حال چرخش با حضور پره های حرارتی. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۴؛ ۱۲ (۴): ۸۷-۱۰۸

۱- مقدمه

اهمیت و ظهور فرآیندهای ذوب و انجماد در منابع ذخیره انرژی [۱]، دستگاه هایی بر پایه انرژی های تجدیدپذیر همچون سیستم های خورشیدی [۲] و کنترل حرارت سیستم های 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 به منظور 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. آن ها با بهره گیری از خطوط جریان و خطوط گرما به نمایش نتایج پرداختند. حضور دیواره جامد در مرکز محفظه، رشد سریع مُد انتقال حرارت جابه جایی را در پی دارد.

موبدی [۵]، در یک مطالعه عددی، به ارزیابی انتقال حرارت جابه جایی 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 می دهد دیواره های ضخیم افقی به طور ویژه به ازای مقادیر بالای عدد رایلی و پارامتر نسبت ضرایب رسانش حرارتی، سبب کاهش نرخ انتقال حرارت می شوند. انتقال حرارت جابه جایی طبیعی نانوسیال آب- مس درون یک محفظه بسته با دیواره سینوسی در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت توسط شیخ الاسلامی و همکاران [۶] مورد بررسی قرار گرفته است. روش حجم محدود بر مبنای روش المان محدود، به منظور حل معادلات حاکم لحاظ گردید. آن ها 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 نانو ذرات) نیز لحاظ شده است. در پژوهشی دیگر، شیخ الاسلامی و شاملویی [۷]، انتقال حرارت جابه جایی طبیعی نانوسیال آب- اکسید آهن را در حضور میدان مغناطیسی موضعی و انتقال حرارت تشعشع ارزیابی کردند. نتایج نشان می دهد که با افزایش پارامتر تشعشع، سرعت نانوسیال درون محفظه بسته با هندسه پیچیده، تقویت خواهد شد. ارمغانی و همکاران [۸]، به صورت عددی، انتقال حرارت جابه جایی طبیعی نانوسیال آب- آلومینا درون یک محفظه بسته L شکل همراه با یک مانع را مورد ارزیابی قرار دادند. با افزایش طول مانع، اثربخشی نانوسیال به منظور خنک سازی محفظه کاهش می یابد. واکر و هومزی [۹]، با در نظر گرفتن مدل های مختلف به مطالعه انتقال حرارت جابه جایی طبیعی درون محفظه مستطیلی پر شده با ماده متخلخل پرداختند. آن ها مدل داری را انتخاب کردند و نتایج به دست آمده از مدل های مختلف تطابق خوبی باهم داشتند. بکرم و همکاران [۱۰]، مدلی از محفظه که با لایه ای از ماده متخلخل پر شده بود را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان می دهد با ورود سیال به لایه متخلخل، میدان سرعت و حرارت به طور کلی تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. هم چنین، نفوذ سیال به درون ماده متخلخل به حاصل ضرب اعداد رایلی و داری بستگی دارد. وارول و همکاران [۱۱] به مطالعه انتقال حرارت جابه جایی آزاد در یک محفظه نیمه متخلخل که توزیع دمای دیواره ی پایینی آن به صورت سینوسی تغییر می کرد، پرداختند. قانون داری بر محیط متخلخل حاکم بوده و فاز سیال و جامد در تعادل حرارتی فرض شدند. آن ها 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 جابه جایی طبیعی در محفظه متخلخل را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دهند. محفظه شامل دو دیواره ی افقی با ضخامت محدود بوده و دیواره های عمودی آن در دمای یکنواخت ولی متفاوت فرض شده اند. در پژوهش بیتاس و همکاران [۱۲]، تأثیر ضریب هدایت حرارتی دیواره های افقی بر روی انتقال حرارت و جریان سیال ارزیابی شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که با افزایش ضریب هدایت حرارتی، دمای سطح مشترک سیال و دیواره افقی کاهش خواهد یافت. زرگر طالبی و همکاران [۱۳]، به صورت عددی جریان جابه جایی لایه مرزی روی یک سطح تعبیه شده در محیط متخلخل و پر شده با نانوسیال را مطالعه کردند. آن ها از مدل غیرهمگن برای تحلیل رفتار نانوسیال استفاده کردند. نتایج پژوهش آن ها نشان می دهد با افزایش عدد لوییس، غلظت نانو ذرات روی صفحه زیاد می شود. 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 می دهد که حداکثر نرخ انتقال حرارت و حداقل میزان تولید آنتروپی به ازای قرارگیری منبع حرارتی در نواحی پایین محیط متخلخل دایروی رخ می دهد. انتقال حرارت جابه جایی طبیعی نانوسیال هیبریدی آلومینا- اکسید مس در یک محفظه با دیواره های موج دار و در حضور لایه ای از محیط متخلخل توسط

کادهیم و همکاران [۱۵]، بررسی شده است. مهران 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-50 و RT-35 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 هندسی 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 کارنو-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] ارزیابی شده 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 قرار دادند. 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] بررسی شده است. وی از مدل‌های پاورلاو، برینکمن و مکسول-گارتنس 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. ناز 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 پاورلاو 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] ارزیابی شده است. با بهره‌گیری از مدل‌های برینکمن و مکسول برای لزجت دینامیک و ضریب رسانش حرارتی نانوماده تغییر فاز دهنده غیرنیوتنی نازک شونده ($n > 0.7$)، آن‌ها دریافتند با کاهش شاخص پاورلاو، 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 کارنو برای تحلیل رفتار سیال غیرنیوتنی بهره بردند. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش شاخص غیرنیوتنی، گردش سیال و همچنین نرخ انتقال حرارت بهبود می‌یابد. مهران و همکارانش [۲۸] فرآیند ذوب پارافین و اکس غیرنیوتنی پاورلاو درون محفظه بسته استوانه‌ای با فوم آلومینیومی

ارزیابی کردند. آن ها از روش مش متحرک برای شبیه سازی 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 می یابد. 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 هندسی لوله سه گانه به عنوان سیستم ذخیره انرژی حرارتی، سه روش موردنظر را تشکیل داده اند. نتایج نشان می دهد که اضافه نمودن ۵ درصد از نانوذرات مس می تواند 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 می دهد. فدایی و همکارانش [۳۰] روند تغییر فاز و انتقال حرارت را در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله مطالعه کردند. آن ها اثرات پارامترهای مختلف نظیر عدد رینولدز، نسبت ابعادی و پارامترهای غیرنیوتنی را بر نرخ انتقال حرارت سیال های 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 می شود. ژانگ و همکارانش [۳۱] با استفاده از روش آنتالپی تخلخل ذوب انواع مختلف مواد تغییر فاز در یک مبدل حرارتی، تأثیر تخلخل، باله های مثلثی و افزودن اکسید آلومینیوم، اکسید تیتانیوم و اکسید مس، نانوذرات در رفتار حرارتی چهار نوع مواد به صورت عددی مورد مطالعه قرار می گیرند. مایع اصلی انتقال حرارت غیر نیوتونی است و لوله با یک محیط متخلخل پر می شود. بر اساس نتایج، افزودن باله ها و نانوذرات منجر به افزایش کسر مایع می شود. زمان شارژ کامل مواد با افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم کمی کم تر از سایر نانوذرات است. علاوه بر این، تأثیر استفاده از باله بیش تر از تأثیر افزودن نانوذرات برای کاهش زمان ذوب است. همچنین، حداکثر افزایش در بخش مایع به دلیل عدم وجود محیط متخلخل تقریباً ۳۰ درصد است. در مطالعه ای دیگر که توسط کیو و همکارانش [۳۲] انجام شد، به صورت عددی تأثیر هم افزایی نانوذرات و پره های 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 می شود. نتایج نشان می دهد 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 می یابد و میانگین شارژ متوسط است ۵۱/۱٪ افزایش یافته است. همچنین نتایج نشان می دهد که افزودن نانوذرات کسری با حجم بالا، شدت انتقال حرارت همرفت را کاهش می دهد. اضافه کردن نانوذرات با حجم کم باعث افزایش هدایت حرارتی PCM می شود و تأثیر ناچیزی در انتقال حرارت طبیعی همرفتی دارد.

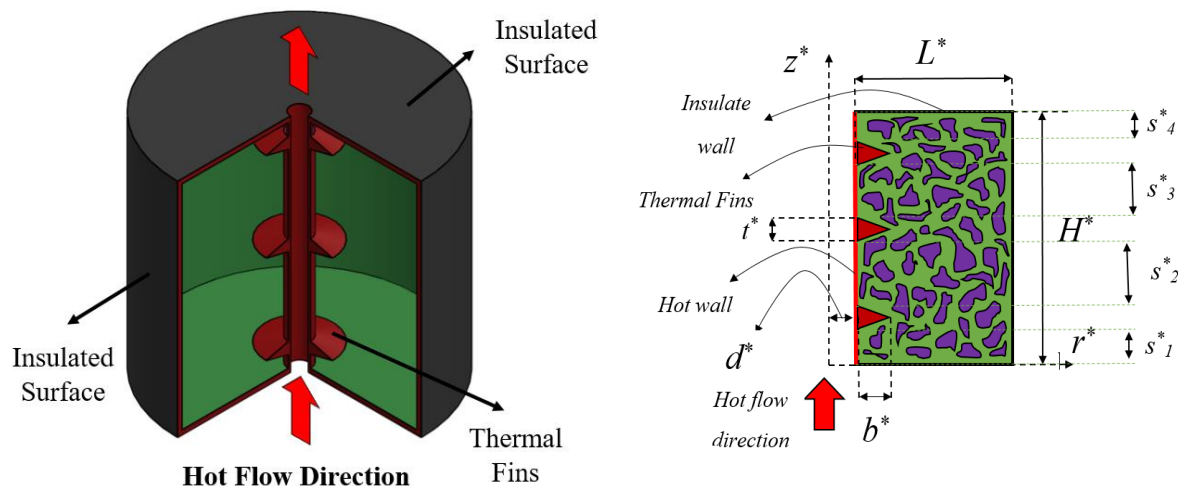
در این پژوهش تأثیر زاویه های چرخشی مختلف بر خطوط جریان، جبهه ذوب، خطوط دماتاب، سرعت و عدد ناسلت متوسط و همچنین میزان کسر ذوب نانوماده تغییر فاز دهنده غیر نیوتنی درون یک استوانه ای عمودی متخلخل به صورت عددی توسط نرم افزار comsol multiphysics 5.1 مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مدل فیزیکی و معادلات حاکم

۲-۱- مدل فیزیکی

با بهره گیری از روش آنتالپی تخلخل، فرآیند ذوب و انجماد نانوماده تغییر فاز دهنده کروسن- آلومینا درون یک محفظه متخلخل استوانه ای متقارن همراه با پره های حرارتی از جنس مس مورد ارزیابی قرار گرفته است. ماتریس جامد متخلخل از جنس آهن می باشد که نواحی خالی آن توسط نانوماده تغییر فاز دهنده اشباع شده است. همان طور که شکل (۱-الف) نشان می دهد، یک سیال گرم در جهت پایین به بالا از لوله میانی عبور می کند و دمای مقطع طولی لوله را به طور یکنواخت افزایش می دهد، حال آن که از عایق حرارتی برای وجوه افقی (بالا و پایین) و جداره بیرونی محفظه استوانه ای استفاده شده است. به طور دقیق تر و مطابق با شکل (۱-ب)، حرارت از دیواره گرم سمت چپ به پره های مسی و محیط متخلخل رسیده و ذوب شدن نانوماده تغییر فاز دهنده 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، به عنوان یک سیال غیرنیوتنی فرض شده که برای تحلیل رفتار آن از مدل کارنو استفاده

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 در این باره همواره معتبر می‌باشد.



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

ماده‌ای استفاده شده در فرآیند 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- خرد 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 خرد 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، ۳۸]:

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

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

$$\frac{\rho_{nf}}{\varepsilon} \frac{\partial w^*}{\partial t} + \frac{\rho_{nf}}{\varepsilon^2} \left(u^* \frac{\partial w^*}{\partial r^*} + w^* \frac{\partial w^*}{\partial z^*} \right) = - \frac{\partial P^*}{\partial z^*} + \quad (3)$$

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

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

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

در معادلات ۵ گانه بالا، r^* ، z^* ، u^* و w^* به ترتیب مؤلفه های افقی و عمودی با بعد مکان و همچنین مؤلفه های افقی و عمودی با بعد سرعت در مختصات استوانه ای هستند. علاوه بر این، ρ_{nf} ، ε ، P^* ، $\mu(\gamma^*)$ ، K و β_{nf} ، بیان گر، چگالی ماده تغییر فاز دهنده، ضریب تخلخل، فشار در حالت با بعد، لزجت دینامیک، ضریب نفوذ پذیری و ضریب پخش حرارتی ماده تغییر فاز دهنده هستند. همچنین، $s^*(T)$ ترم برآمده از معادله کارمن-کازنی می باشد و به صورت ذیل تعریف می شود [۳۴]:

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

همان طور که اشاره شد، نانوماده تغییر فاز دهنده کروسن-آلومینا در حالت مذاب رفتار غیرنیوتنی از خود بروز می دهد. لذا، لزجت دینامیک در معادلات مومنتوم (معادلات (۳) و (۴)) از مدل کارنو پیروی کرده، تابعی از نرخ تنش برشی بوده و به صورت ذیل تعریف می شود [۴۲]:

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

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

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

در رابطه بالا، λ^* و γ^* به ترتیب ترم وابسته به زمان و نرخ تنش برشی هستند. همچنین، n ، شاخص مدل غیرنیوتنی کارنو است. در صورتی که $n < 1$ و $n > 1$ باشد، نانوماده تغییر فاز دهنده مذاب، به ترتیب در زمره سیالات غیرنیوتنی پسودوپلاستیک (سیالات نازک شونده) و دیلاتنت قرار می گیرد. 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]:

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

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

$$T(r^*, z^*, 0) = T_c, \quad u(r^*, z^*, 0) = 0, \quad w(r^*, z^*, 0) = 0 \quad (10.a)$$

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

$$T(d^*, z^*, t > 0) = T_h, \quad (10.c)$$

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

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

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

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:

$$T = T_s, R_k \frac{\partial T_s}{\partial n^*} = \frac{\partial T}{\partial n^*}, \quad (11)$$

در وجه پایین پره پایین و وجه بالای پره پایین:

$$d^* \leq r^* \leq b^* + d^*, \frac{t^*}{2b^*}(r^* - d^*) + s_1^*,$$

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

در وجه پایین پره میانی و وجه بالای پره میانی:

$$d^* \leq r^* \leq b^* + d^*, \frac{t^*}{2b^*}(r^* - d^*) + s_1^* + s_2^* + t^*,$$

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

در وجه پایین پره بالایی و وجه بالای پره بالایی:

$$d^* \leq r^* \leq b^* + d^*, \frac{t^*}{2b^*}(r^* - d^*) + s_1^* + s_2^* + s_3^* + 2t^*,$$

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

با هدف ایجاد یک حل بی بعد و نتایجی اشتراک پذیر با سایر پژوهش های 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 آن ها قرار گرفته تا هر کدام از این معادلات به شکل بی بعد خود انتقال یابند [۳۳، ۳۴]:

$$\begin{aligned} r &= \frac{r^*}{L}, z = \frac{z^*}{L}, u^* = \frac{u \alpha_{bf}}{L}, w^* = \frac{w \alpha_{bf}}{L}, \theta = \frac{T - T_f}{T_h - T_f}, t = \frac{F_0 L^2}{\alpha_{bf}}, \\ P^* &= \frac{P \rho_{bf} \alpha_{bf}^2}{L^2}, \gamma^* = \frac{\gamma \alpha_{bf}}{L^2}, \lambda^* = \frac{\lambda L^2}{\alpha_{bf}}, S(\theta) = \frac{S(T) L^2}{\rho_{bf} \alpha_{bf}}, \theta = \frac{T - T_f}{T_h - T_f}. \end{aligned} \quad (12)$$

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

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

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

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

$$\begin{aligned} &\left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \\ &\frac{\mu_{nf} \rho_{bf} \text{Pr}}{\mu_{bf} \rho_{nf}} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial \left((1 + A_{mushy} (1 - \phi(\theta))) \left[1 + (\lambda \gamma)^2 \right]^{\frac{n-1}{2}} \right)}{\partial r} \right) - w - \\ &\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} S(\theta) w + \frac{\beta_{nf}}{\beta_{bf}} \theta Ra \text{Pr} \end{aligned}$$

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

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

که در معادلات بالا Pr ، Ra ، Da و Ste به ترتیب اعداد بی بعد پرانتل، رابلی، داری و استفان هستند که به صورت ذیل تعریف می‌شوند:

$$Pr = \frac{\nu_{bf}}{\alpha_{bf}}, Ra = \frac{g \beta_{bf} \Delta T L^3}{\nu_{bf} \alpha_{bf}}, Da = \frac{K}{L^2}, Ste = \frac{C_{p,bf} (T_h - T_f)}{L_f} \quad (18)$$

ضمن این که 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 به صورت قابل ارائه می‌باشند [۳۶، ۴۰]:

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

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \phi_0) (\rho c_p)_{bf} + \phi_0 (\rho c_p)_{particles} \quad (19.b)$$

$$\alpha_{nf} = (1 - \phi_0) \alpha_{bf} + \phi_0 \alpha_{particles} = (1 - \phi_0) \frac{k_{bf}}{(\rho c_p)_{bf}} + \phi_0 \frac{k_{particles}}{(\rho c_p)_{particles}} \quad (19.c)$$

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

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

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

$$(\rho c_p)_{eff} = \varepsilon (\rho c_p)_{nf} + (1 - \varepsilon) (\rho c_p)_{porous} \quad (19.g)$$

برای تعیین نسبت‌های لزجت دینامیک و ضریب رسانش حرارتی از روابط (۲۰) و (۲۱) استفاده شده است. دو پارامتر بی بعد 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]:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + Nv \phi_0 \quad (20)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 1 + Nc \phi_0 \quad (21)$$

در ادامه، کسر ذوب نانوماده تغییر فاز دهنده بی بعد به صورت ذیل تعریف شده است:

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

در این جا، شرایط اولیه و مرزی با بعد که در رابطه (۱۰) بیان شدند، به شکل بی بعد انتقال یافته و در روابط (۲۳) آورده شده اند:

$$\theta(r, z, 0) = 0, \quad u(r, z, 0) = 0, \quad w(r, z, 0) = 0 \quad (23.a)$$

$$u = w = 0, \quad \text{در مجاورت دیواره ها در سرتاسر محفظه} \quad (23.b)$$

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

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

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

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

شرایط مرزی مربوط به دیواره های رابط (در مجاورت پره های حرارتی) نیز در شکل بی بعد از قرار زیر هستند:

$$\theta = \theta_s, \quad R_k \frac{\partial \theta_s}{\partial n} = \frac{\partial \theta}{\partial n}, \quad (24)$$

در وجه پایین و بالای پره پایین:

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

در وجه پایین و بالای پره میانی:

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

در وجه پایین و بالای پره بالایی:

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

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

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

$$Nu_{avg} = - \left(\frac{k_{eff}}{k_{bf}} \int_0^{s_1} \frac{\partial \theta}{\partial r} dz + R_k \int_{s_1}^{s_1+t} \frac{\partial \theta_s}{\partial r} dz + \frac{k_{eff}}{k_{bf}} \int_{s_1+t}^{s_1+t+s_2} \frac{\partial \theta}{\partial r} dz + \right. \\ \left. R_k \int_{s_1+2t+s_2}^{s_1+2t+s_2} \frac{\partial \theta_s}{\partial r} dz + \frac{k_{eff}}{k_{bf}} \int_{s_1+s_2+s_3+2t}^{s_1+s_2+s_3+2t} \frac{\partial \theta}{\partial r} dz + \right. \\ \left. R_k \int_{s_1+t+s_2}^{s_1+t+s_2+s_3+3t} \frac{\partial \theta_s}{\partial r} dz + \frac{k_{eff}}{k_{bf}} \int_{s_1+s_2+s_3+4t}^{s_1+s_2+s_3+4t} \frac{\partial \theta}{\partial r} dz \right) \quad (25)$$

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

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

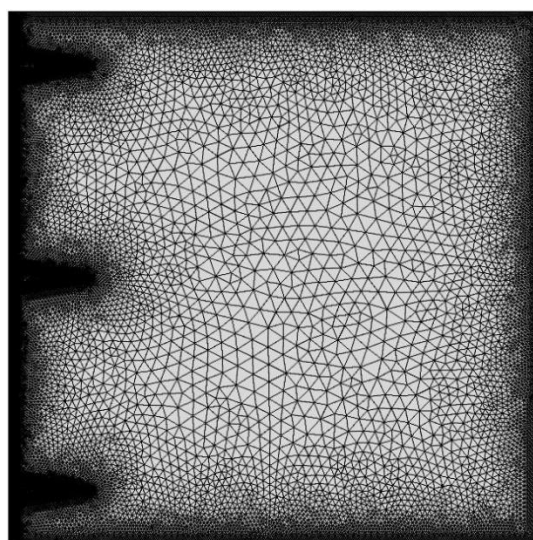
۳- روش عددی و استقلال شبکه

معادلات حاکم بر مسئله به همراه شرایط مرزی مرتبط با آن‌ها در زمره معادلات دیفرانسیل پارهای قرار می‌گیرند؛ لذا، به منظور 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 پیش فرض $Fo=1.3 \times 10^{-2}$ و $Fo=1.3 \times 10^{-3}$ ، $Fo=1.3 \times 10^{-4}$ مورد توجه قرار گرفتند. سپس، مقادیر عدد ناسلت متوسط، سرعت متوسط و کسر ذوب نانوماده تغییر فاز دهنده کروسن-آلمینا در زمان‌های یادشده ارزیابی گردید و میزان درصد خطای آن‌ها نیز مشخص شد. جدول (۱) ترتیب نشان دهنده درصد خطای به دست آمده 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 540098 المان دامنه‌ای و 2200 المان مرزی به عنوان شبکه مناسب انتخاب شد. تصاویری از هندسه موردنظر همراه با شبکه منتخب در ادامه نشان داده شده است (شکل ۲). لازم به ذکر است که به منظور 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.

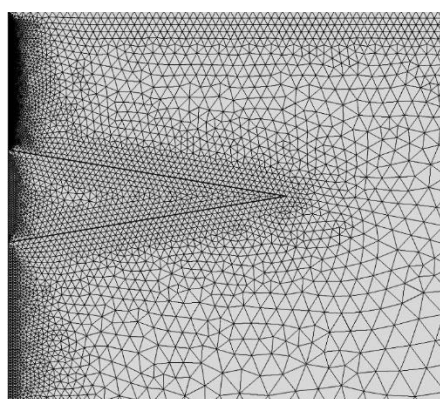
جدول ۱: آزمون استقلال شبکه برای عدد ناسلت، سرعت متوسط و کسر ذوب ماده تغییر فاز دهنده کروسن - آلومینا به ازای

مقادیر پیش فرض در سه زمان $Fo=1.3 \times 10^{-4}$, $Fo=1.3 \times 10^{-3}$ و $Fo=1.3 \times 10^{-2}$

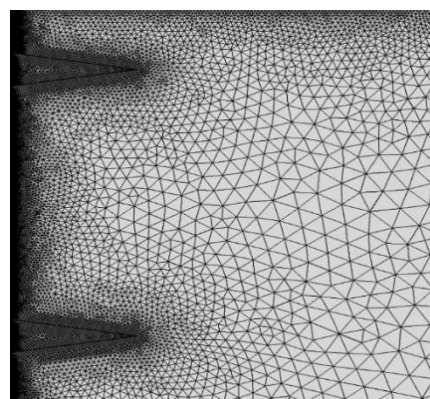
Domain element +Boundary element	$Fo=1.3 \times 10^{-4}$			$Fo=1.3 \times 10^{-3}$			$Fo=1.3 \times 10^{-2}$		
	Nu (%)	V (%)	$\emptyset$ (%)	Nu (%)	V (%)	$\emptyset$ (%)	Nu (%)	V (%)	$\emptyset$ (%)
26426+ 1150	-0.0178	-5.6371	0.1802	0.0280	-0.7943	-0.0087	0.0165	-1.0169	0.0032
35476+ 1500	0.0024	-3.7296	-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)

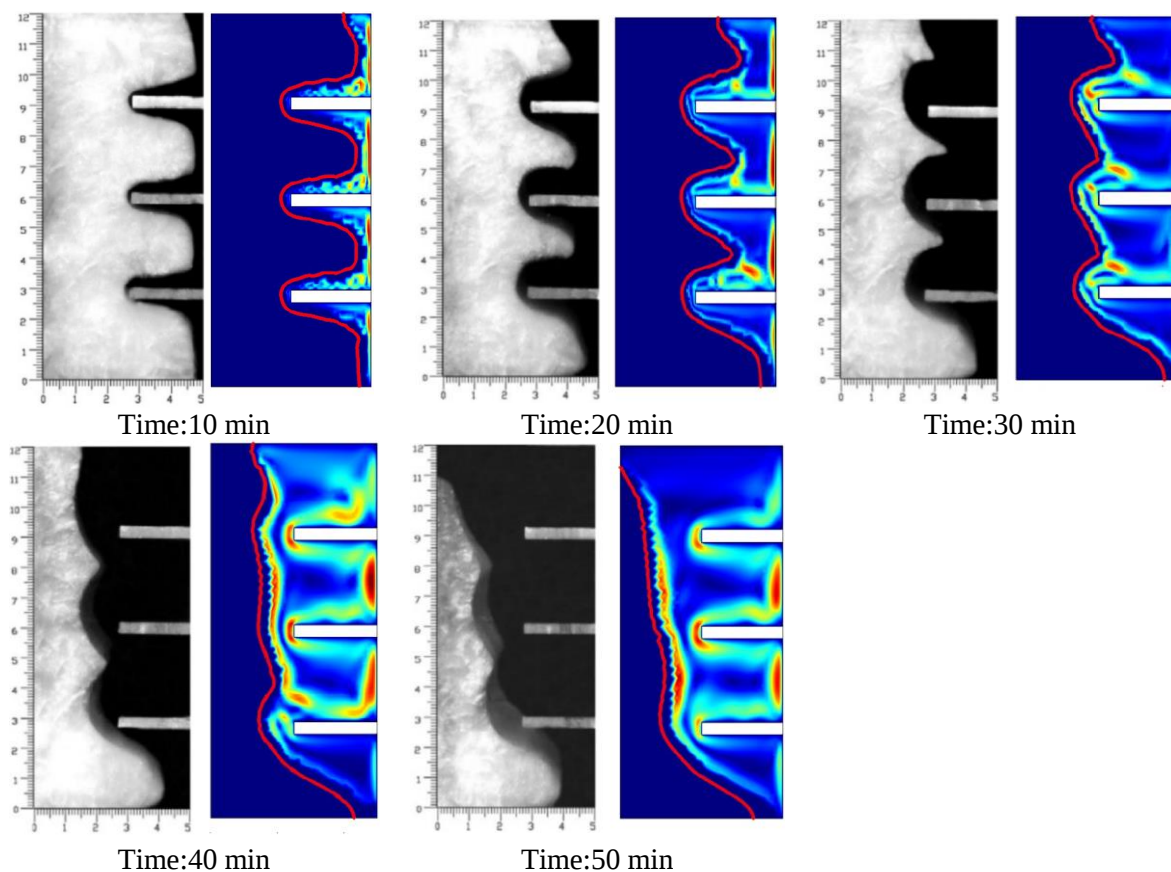


(ب)

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

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 120×50 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 70°C 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 ارزیابی شده است. پیش‌روی جبهه ذوب پس از هر ۱۰ دقیقه به وضوح قابل مشاهده است. همچنین، از آنجایی که 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

۵- نتایج و بحث

نتایج در این قسمت از پژوهش حاضر به ازای مقادیر پیش فرض پارامترها و اعداد بی بعد موجود در جدول (۲)، به دست آمده اند. همان طور که در این جدول ملاحظه می شود، اعداد بی بعد استفان (Ste)، رایلی (Ra)، دارسی (Da) و همچنین پارامترهایی همچون کسر حجمی نانوذرات (ϕ_0)، شاخص کارنو (n) و ضریب تخلخل (ε) دارای مقادیر پیش فرض و کران بالا و پایین می باشند. همچنین، عدد پرانتل (Pr)، پارامتر ضریب رسانش حرارتی (Nc) و پارامتر لزجت دینامیک (Nv) نانوسیال کروسن-آلومینا در تمام نتایج ارائه شده دارای مقدار ثابت و به ترتیب برابر با $28/1$ ، $14/1$ و $15/62$ در نظر گرفته شده است. سایر خواص ترموفیزیکی برای پره های حرارتی آلومینیومی، ماتریس جامد آهنی، نانوذرات و ماده دهنده پایه کروسن در جدول (۳)، نشان داده شده اند.

جدول (۲)، مقادیر پیش فرض اعداد و پارامترهای بی بعد [۴۴، ۳۵، ۳۴، ۳۳]

مقدار پیش فرض	پارامتر / عدد بی بعد
۰/۱۵	عدد استفان
10^4	عدد رایلی
۰/۱	کسر حجمی نانوذرات
۰/۵	شاخص کارنو
۰/۵	ضریب تخلخل
5×10^{-3}	عدد دارسی

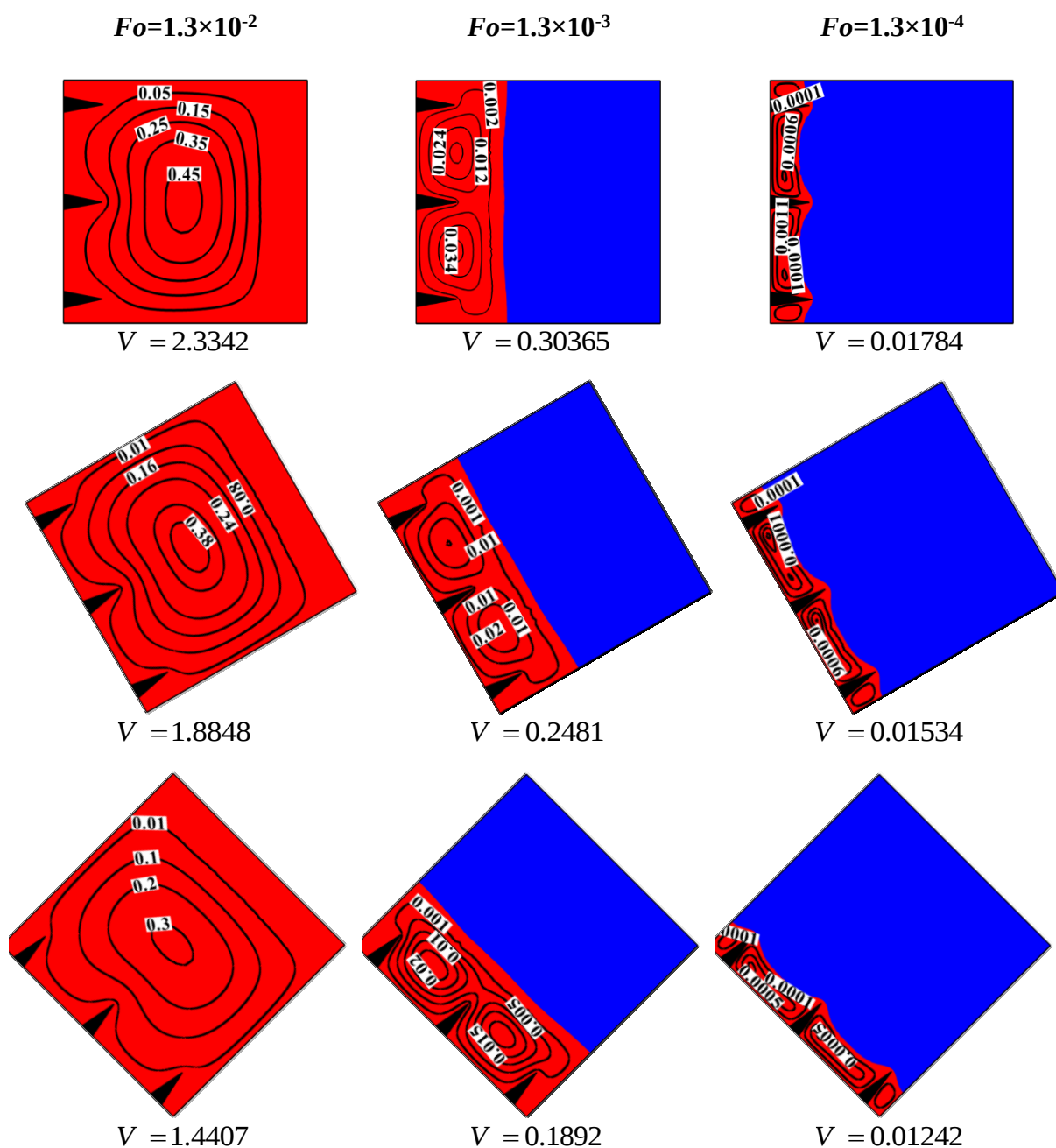
جدول (۳): خواص ترموفیزیکی مربوط به مواد بکار رفته در پژوهش حاضر [۴۵، ۴۶]

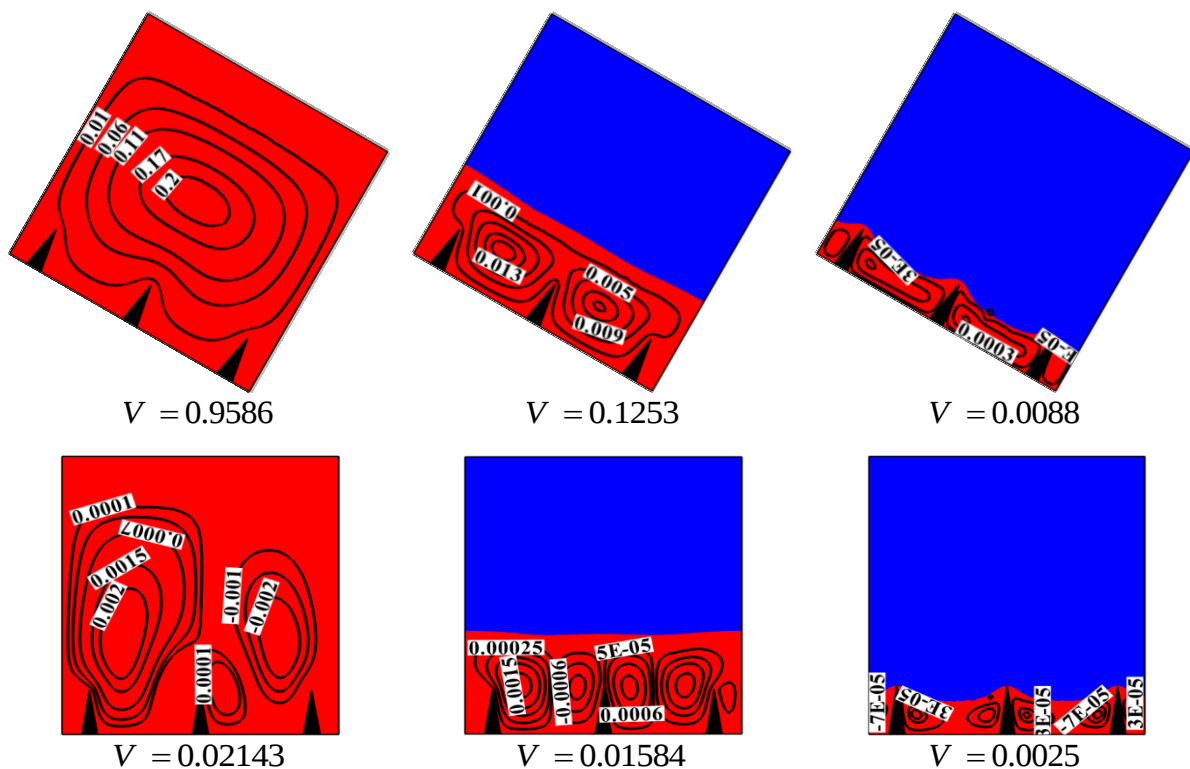
ماده مورد نظر	پره های حرارتی آلومینیومی	محیط متخلخل آهنی	نانوذرات آلومینا	ماده تغییر فاز دهنده پایه کروسن
ضریب رسانش حرارتی $[W/mK]$	۲۳۷	۸۰/۲۰	۴۰	۰/۱۰۱
چگالی $[kg/m^3]$	۲۷۰۲	۷۸۷۰	۳۹۵۰	۷۹۰
ظرفیت حرارتی ویژه $[J/kgK]$	۹۰۳	۴۴۷	۷۷۳	۲۰۱۰
ضریب پخش حرارتی $[m^2/s] \times 10^{-7}$	۹۷۱/۳۴	۲۲۷/۹۷	۱۱۳	۰/۶۳۱
عدد پرانتل	-	-	-	۲۸/۱

۵-۱- تأثیر زاویه انحراف

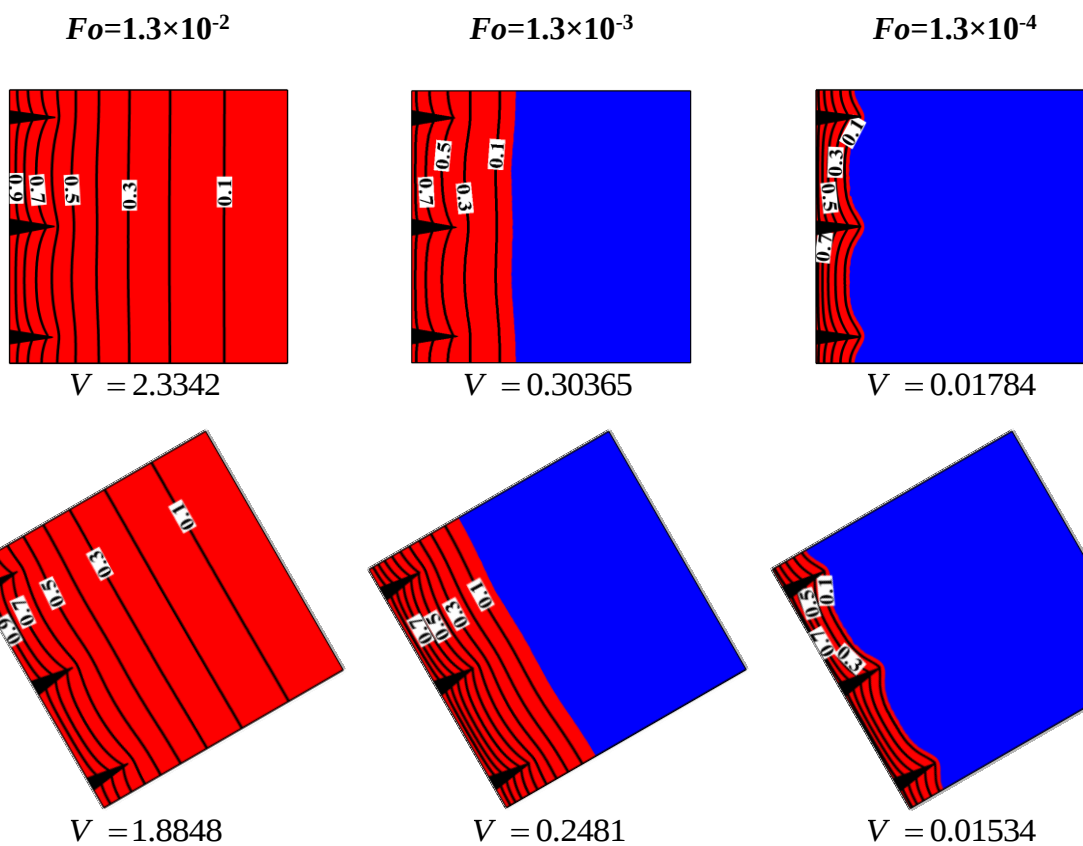
تأثیر زاویه انحراف از محور افقی بر خطوط دما ثابت، خطوط جریان و جبهه ذوب در سه زمان بی بعد از پیش تعیین شده، مورد ارزیابی قرار گرفته است. زوایای صفر، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه، زوایای انتخابی می باشند. لازم به ذکر است که زاویه انحراف صفر درجه، همان هندسه پیش فرض معرفی شده در شکل (۱) می باشد. مطابق با مشاهدات و بررسی های صورت گرفته، تغییر زاویه انحراف از محور افقی بر الگوی خطوط دما ثابت و جبهه ذوب تأثیر گذار نبوده؛ در بیانی دیگر، مقادیر مربوط به عدد ناسلت متوسط و کسر ذوب برای زوایای انحراف مختلف تغییرات محسوسی نداشته اند؛ از آنجایی که سرتاسر فضای مدنظر، متخلخل می باشد و مدت انتقال حرارت رسانش، غالب است، تغییر در نیروهای شناوری (به عنوان نماینده انتقال حرارت جابه جایی طبیعی)، از طریق تغییر در زاویه انحراف، نرخ انتقال حرارت و جبهه ذوب را تحت تأثیر قرار نمی دهد. بنابراین، در این جا از تکرار تصاویر و مقادیر مشابه یکدیگر صرف نظر شده است. اما، تغییرات الگوی خطوط جریان و سرعت متوسط نانوسیال مذاب به ازای زوایای انحراف مختلف چشم گیر بوده و در مجموعه شکل های (۴) و (۵)، به ارزیابی این خطوط پرداخته شده است. همان طور که در این تصاویر مشخص است، با افزایش زاویه انحراف از صفر تا ۹۰ درجه، الگوی خطوط جریان به تدریج تغییر یافته اند؛ اما سرعت

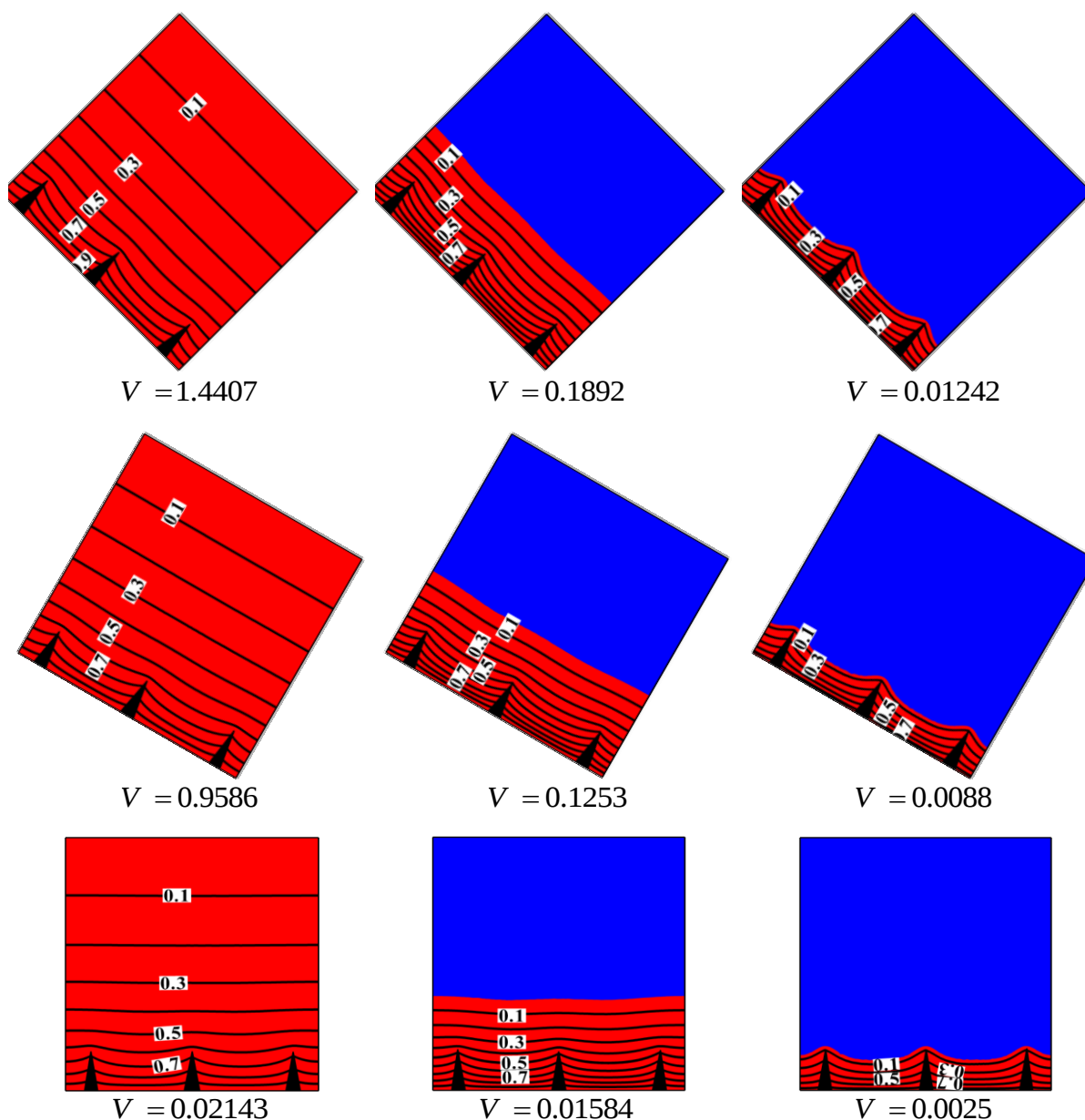
متوسط به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است. تضعیف و تغییر الگوهای یاد شده تا زاویه ۴۵ درجه، به کندی پیش رفته است. در زمان پیش‌فرض میانی و زاویه انحراف ۶۰ درجه، محسوس‌ترین تغییر رخ داده است. لحظه‌ای که جهت چرخش جریان نانوسیال مذاب از حالت صرفاً ساعت‌گرد به حالت توأماً ساعت‌گرد-پادساعت‌گرد تغییر یافته است. 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، به‌طور کلی خطوط جریان شمالی 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-آلمینای مذاب تشکیل شده‌اند. چنان‌چه اشاره شد، تغییر الگوی جریان از ساعت‌گرد به ساعت‌گرد-پادساعت‌گرد، می‌تواند تغییر چندانی بر جبهه ذوب داشته باشد.





شکل ۴: تأثیرگذاری زاویه انحراف بر خطوط جریان و سرعت متوسط نانوسیال کروسن-آلومینای مذاب در سه زمان بی بعد 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)





شکل ۵: تأثیرگذاری زاویه انحراف بر خطوط دماتابت 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 کارنو بررسی شد. ماده تغییر فاز دهنده مذاب به صورت 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

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 نداشته اند؛ از آنجایی که سرتاسر فضای مدنظر، متخلخل می باشد و مُد انتقال حرارت رسانش، غالب است، تغییر در نیروهای شناوری (به عنوان نماینده انتقال حرارت جابه جایی طبیعی)، از طریق تغییر در زاویه انحراف، نرخ انتقال حرارت و جبهه ذوب را تحت تأثیر قرار نمی دهد.

۷- فهرست علائم و نشانه ها

علائم خاص			
n	ضریب کارنو $[-]$	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	کسر ذوب حجمی $[-]$	L	طول محفظه $[m]$
Nc	رسانایی حرارتی $[-]$	Ra	عدد رایلی $[-]$
P	فشار $[Pa]$	Nu	عدد ناسلت $[-]$
Nv	ویسکوزیته دینامیکی $[-]$	MVF	کسر ذوب حجمی $[-]$
		N	تعداد گره ها $[-]$

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

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, Fe₃O₄–H₂O nanofluid natural convection in presence of thermal radiation. International Journal of Hydrogen Energy, 42(9) (2017) 5708-5718.

- [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-Al₂O₃ 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., Gijzen, 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.

- [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., Praves, 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.

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

Alireza kazemi¹, Mohsen izadi^{2*}, ehsanolah assareh¹, Ali Ershadi¹

¹Department of Mechanical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

²Mechanical 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.