



بررسی عددی همرفت واداشته مگنتوهیدرودینامیک مواد تغییر فاز دهنده به روش شبکه بولتزمن

مصطفی احمدی^۱، ایمان زحمتکش^{۲*}، حمیدرضا گشایشی^۲

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران.

^۲ استاد، گروه مهندسی مکانیک، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۴

چکیده

این مقاله به شبیه‌سازی و تحلیل عددی انتقال گرمای همرفت واداشته نانوسیال پارافین-آلومینا در یک کانال متخلخل تحت میدان مغناطیسی خارجی می‌پردازد. برای این منظور، از معادلات بی‌بعد داری-برینکمن-فورچه‌ایمر در شرایط عدم تعادل گرمایی محلی استفاده می‌شود. شبیه‌سازی به روش شبکه بولتزمن گرمایی با زمان آسایش منفرد و توابع توزیع سرعت، دمای نانوسیال و دمای محیط متخلخل در حالت ناپایا انجام می‌شود. در این مقاله، اثر متغیرهایی از قبیل زاویه میدان مغناطیسی، عدد داری، ضریب تخلخل، کسر حجمی نانوذرات و عدد هارتمن بر روی عدد ناسلت میانگین، میزان عدم تعادل گرمایی محلی و درصد ذوب در بازه‌های زمانی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهند که بهترین عملکرد فرایند ذوب در حالت استفاده از زاویه میدان مغناطیسی ۹۰ درجه، عدد داری ۰/۰۰۱، ضریب تخلخل ۰/۵، عدد هارتمن ۳۰، کسر حجمی نانوذرات ۴ درصد و عدد رینولدز ۲۰۰ به‌دست می‌آید؛ که در آن، با گذشت زمانی به میزان کمتر از یک ساعت می‌توان به کسر ذوب ۸۸/۹۱ درصد رسید. در مقابل، ضعیف‌ترین عملکرد مربوط به عدد هارتمن ۵۰ می‌باشد؛ که زمان لازم برای رسیدن به کسر ذوب ۸۵ درصد را به ۱۹۸/۸۳ دقیقه افزایش می‌دهد. همچنین، مشخص می‌شود که افزایش عدد ناسلت میانگین با افزایش میزان عدم تعادل گرمایی محلی همراه است.

کلمات کلیدی: مواد تغییر فاز دهنده؛ محیط متخلخل؛ میدان مغناطیسی؛ عدم تعادل گرمایی محلی؛ روش شبکه بولتزمن.

Numerical investigation of magnetohydrodynamic forced convection of phase change materials using the lattice Boltzmann method

Mostafa Ahmadi¹, Iman Zahmatkesh^{2*}, Hamidreza Goshayeshi²

¹PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Ma.C., Islamic Azad University, Mashhad, Iran.

² Prof., Department of Mechanical Engineering, Ma.C., Islamic Azad University, Mashhad, Iran.

Abstract

This paper focuses on the numerical simulation and analysis of forced convection heat transfer of a paraffin-alumina nanofluid in a porous channel under an external magnetic field. To this aim, the dimensionless form of the Darcy-Brinkman-Forchheimer equations are solved under local thermal non-equilibrium conditions. The simulations are performed using the thermal lattice Boltzmann method with a single relaxation time scheme, incorporating distribution functions for velocity, nanofluid temperature, and porous medium temperature in an unsteady state condition. In this paper, the effects of parameters such as magnetic field angle, Darcy number, porosity, nanoparticle volume fraction, and Hartmann number on the average Nusselt number, degree of local thermal non-equilibrium, and melting fraction at different time intervals are investigated. The results show that the optimal melting performance occurs at the magnetic field angle of 90°, the Darcy number of 0.001, the porosity of 0.5, the Hartmann number of 30, the nanoparticle volume fraction of 4%, and the Reynolds number of 200, leading to a melting fraction of approximately 88.91% within less than an hour. Conversely, the weakest performance corresponds to the Hartmann number of 50, which increases the required time to reach the melting fraction of 85% to about 198.83 minutes. Furthermore, it is observed that an increase in the average Nusselt number is accompanied by an increased local thermal non-equilibrium.

Keywords: Phase change materials; Porous media; Magnetic field; LTNE; Lattice Boltzmann method.

۱- مقدمه

مواد تغییر فاز دهنده به دلیل قابلیت جذب و آزادسازی انرژی گرمایی در فرایندهای ذوب و انجماد، به عنوان روشی کارآمد برای ذخیره انرژی گرمایی مطرح هستند و کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف دارند. این مواد همانند یک باتری گرمایی، انرژی را در قالب گرمای نهان ذخیره کرده و هنگام انجماد آن را آزاد می‌کنند [۱]. عبدالله و همکاران [۲] در یک مطالعه مروری، به بررسی پیشرفت‌های اخیر در زمینه مواد ذخیره‌ساز انرژی با تغییر فاز پرداختند. آن‌ها بر بهبود خواصی مانند گرمای نهان، رسانایی حرارتی و پایداری چرخه‌ای تأکید کرده و کاربرد این مواد را در ساختمان، الکترونیک و انرژی‌های تجدیدپذیر بررسی کردند. مورچیانو و همکاران [۳] با بررسی کاربردهای نوین مواد تغییر فاز دهنده در سیستم‌های حرارتی، نشان دادند که این مواد می‌توانند بازده انرژی را بهبود بخشند، طول عمر تجهیزات را افزایش دهند و در مواردی مانند باتری، ساختمان و منسوجات هوشمند عملکرد حرارتی را بهینه کنند. اسماعیل و همکاران [۴] اثر میکروکپسول‌ها را بر خواص تازه و سخت‌شده مصالح ساختمانی تحلیل کرده و مروری بر مواد تغییر فاز دهنده، میکروکپسول‌ها، فرآیند تولید آن‌ها و روش‌های بهبود خواص گرمایی آن‌ها ارائه دادند. نتایج نشان داد مواد تغییر فاز دهنده زیستی جایگزینی سازگار با محیط زیست برای پارافین‌ها بوده و استفاده از میکروکپسول‌ها موجب بهبود عملکرد گرمایی مصالح ساختمانی می‌شود. توگان و همکاران [۵] جنبه‌های مختلف مواد تغییر فاز دهنده و روش‌های بهبود عملکرد و ترکیب آن‌ها را بررسی کردند. نتایج نشان داد روش‌های هیبریداسیون می‌تواند عملکرد واحدهای ذخیره انرژی بر پایه این مواد را ارتقا داده و جنبه‌های اقتصادی آن‌ها را برای پایداری بلندمدت تأمین کند.

چوی و همکاران [۶] با معرفی ایده پراکندگی نانوذرات در سیالات، نشان دادند که افزودن این ذرات می‌تواند به دلیل هدایت گرمایی بالا، نرخ انتقال حرارت را افزایش داده و در صورت پراکندگی مناسب، موجب بهبود پایداری و رسانایی گرمایی سیال شود. کالیداسان و همکاران [۷] به بررسی مواد تغییر فاز دهنده هیدرات نمک همراه با افزودنی‌های نانویی فلزی، کربنی و پلیمری برای ذخیره انرژی گرمایی پرداختند و تمرکز آن‌ها بر بهبود ویژگی‌های ترموفیزیکی و کاهش آلودگی محیطی از طریق پراکندگی مناسب نانوذرات بود. غلامی و

همکاران [۸] با تحلیل عوامل مؤثر بر رسانایی حرارتی مواد تغییر فاز دهنده تقویت‌شده با نانوذرات کربنی نشان دادند که نوع نانوذره، درصد حجمی و دمای کاری بیشترین اثر را در بهبود عملکرد حرارتی این مواد دارند. گانجو و همکاران [۹] پژوهشی را در خصوص بهبود اثربخشی ذخیره‌سازی گرمایی پارافین با افزودن نانوذرات آلومینا در یک مبدل گرمایی انجام دادند. نتایج نشان داد که با افزودن ۱۰ درصد نانوذرات آلومینا، سرعت ذوب پارافین خالص حدود ۲/۲۵ برابر بهبود یافت. خلیلی و همکاران [۱۰] انتقال حرارت همرفت طبیعی نانوسیال را در یک حفره مربعی با شار گرمایی ثابت به صورت عددی تحلیل کردند. نتایج نشان داد که با کسر حجمی ۲ درصد و عدد گراشوف ۱۰۵، میانگین عدد ناسلت حدود ۵۰ درصد نسبت به سیال پایه افزایش یافت؛ همچنین با افزایش کسر حجمی نانوذرات، گرانشی سیال افزایش و سرعت آن کاهش یافت. لی و همکاران [۱۱] اثر نانوکامپوزیت‌ها را بر عملکرد مواد تغییر فاز دهنده در ذخیره انرژی گرمایی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که افزودن نانوافزودنی‌های کربنی اگرچه موجب افزایش هدایت گرمایی می‌شود، اما منجر به کاهش آنتالپی و افزایش گرانشی، و در نتیجه کاهش کارایی کلی سیستم می‌گردد. علی و همکاران [۱۲] نیز با هدف مرور نوآوری‌ها و رویکردهای استراتژیک مواد تغییر فاز دهنده به بررسی خواص ترموفیزیکی با مقایسه استراتژی‌های مختلف مانند اشباع کردن و کپسوله‌سازی برای سنتز مواد تغییر فاز دهنده به منظور بهبود روش تولید، جنبه‌های اقتصادی و مسائل زیست محیطی پرداختند. احمدی تیغ‌چی و همکاران [۱۳] با استفاده از روش شبکه بولتزمن، عملکرد مواد تغییر فاز دهنده در نانوسیال را با در نظر گرفتن خواص تابشی نانوذرات بررسی کردند. نتایج نشان داد که اثر جریان طبیعی، درصد حجمی نانوذره و خواص ترموفیزیکی آن‌ها نقش مهمی در بهبود نرخ ذوب و کارایی ذخیره‌سازی انرژی حرارتی دارند.

محیط‌های متخلخل به دلیل ساختار ویژه خود، نقش مؤثری در عملکرد گرمایی مواد تغییر فاز دهنده دارند. این ساختار با افزایش سطح، تبادل گرما را تسهیل کرده و بازدهی سیستم‌های گرمایی و ذخیره‌سازی انرژی را بهبود می‌بخشد. در بررسی و مطالعه جریان سیال و انتقال گرما درون محیط متخلخل، دو مدل تعادل گرمایی محلی و عدم تعادل گرمایی محلی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۴]. در مدل تعادل گرمایی

تحلیل جریان و تبادل گرما در حضور میدان مغناطیسی خارجی را مگنتوهیدرودینامیک می‌گویند. بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که همرفت مگنتوهیدرودینامیک نانوسیالات در محیط‌های متخلخل مورد مطالعه بوده است. شیخ‌پور و همکاران [۲۳] مدل‌سازی عملکرد هیدرولیکی-حرارتی را در یک کانال نیمه متخلخل سینوسی با جریان نانوسیال و در حضور میدان مغناطیسی بررسی کردند. آنها دریافتند که وجود میدان مغناطیسی اثر مثبتی بر عملکرد حرارتی دارد و افزایش نفوذپذیری در محیط متخلخل، سبب تشدید عدد ناسلت می‌شود. ایزدی [۲۴] اثر چرخش حفره بر انتقال حرارت جابه‌جایی سیال نانو درون حفره متخلخل در معرض دو میدان مغناطیسی غیر یکنواخت را بررسی کرد. او دریافت که افزایش زاویه چرخش اثرات نوسانی روی بزرگی خطوط جریان دارد. طالبی و همکاران [۲۵] به بررسی تجربی اثر موقعیت و شدت میدان مغناطیسی ثابت بر انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال اکسید آهن/آب در ناحیه در حال توسعه حرارتی پرداختند. آنها دریافتند افزایش شدت میدان مغناطیسی عمود بر جریان در یک نقطه در رینولدز ثابت، باعث افزایش ناگهانی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی موضعی می‌شود. ژوانگ و همکاران [۲۶] به صورت عددی اثر ترکیبی نانوذرات مغناطیسی و میدان مغناطیسی غیریکنواخت را بر ذخیره‌سازی گرمای نهان PCM در یک حفره مکعبی حاوی فوم فلزی بررسی کردند. نتایج نشان داد گرادیان میدان مغناطیسی بر جهت و شدت نیروی مغناطیسی مؤثر است و تعامل آن با نیروی شناوری، موجب ذوب غیریکنواخت و نوسانات جریان، و در نتیجه بهبود انتقال و ذخیره گرما می‌شود. عایدی و همکاران [۲۷] تجزیه و تحلیل کاملی از خواص انتقال گرمای ناشی از ترکیب همرفت شناوری و مغناطیسی در یک محفظه متخلخل را ارائه دادند. سپس اثر متغیرهای مختلف مانند عدد رایلی، ضریب تخلخل، عدد دارسی و ضریب انتقال گرمای سطحی را بر روی خطوط جریان و دما و مقدار عدد ناسلت بررسی کردند. رحمتی و همکاران [۲۸] پژوهشی را در خصوص شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت جابه‌جایی فلزات مایع در یک چاه گرمایی میکروکانال تحت میدان مغناطیسی انجام دادند. آنها دریافتند که اعمال میدان مغناطیسی خارجی یکنواخت با عدد هارتمن ۵۱۷، عدد ناسلت بهبود یافته است. زحمتکش و همکاران [۲۹] پخش دوگانه در همرفت توام

محلی، دمای فاز سیال و جامد یکسان در نظر گرفته می‌شود، اما در مدل عدم تعادل گرمایی محلی، این دو فاز به صورت جداگانه بررسی می‌شوند و ممکن است اختلاف دمایی بین آنها وجود داشته باشد. این پدیده معمولاً زمانی رخ می‌دهد که ظرفیت گرمایی و رسانایی گرمایی فازهای سیال و جامد تفاوت زیادی داشته باشند [۱۵]. در پژوهشی که توسط دی و همکاران [۱۶] به انجام رسید، مشخص شد که مدل عدم تعادل گرمایی محلی، الگوی دقیق‌تری از توزیع دما را پیش‌بینی می‌کند. شوایی و همکاران [۱۷] نیز مروری تجربی و عددی بر انتقال گرمای مواد تغییر فاز دهنده در محیط متخلخل داشتند. نتایج بررسی تجربی آنها نشان داد که ترکیب پارافین و فوم فلزی می‌تواند مناسب‌ترین ویژگی‌های جریان و انتقال گرما را در منافذ ارائه دهد. کظیم و همکاران [۱۸] همرفت طبیعی نانوسیال در یک محفظه متخلخل با دیوارهای موج را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. در این پژوهش نشان داده شد که در نظر گرفتن عدم تعادل گرمایی محلی بین نانوسیال و محیط متخلخل، تبادل گرمای پیش‌بینی شده را افزایش می‌دهد. طهماسبی و همکاران [۱۹] در یک پژوهش تجربی اثر تعداد باله‌ها و استفاده از محیط متخلخل در لوله مارپیچ حاوی پارافین را بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از باله‌ها یا محیط متخلخل عملکرد گرمایی را به‌طور قابل توجهی بهبود می‌دهد و ترکیب همزمان آنها بیشترین افزایش انتقال حرارت و کاهش زمان شارژ/دشارژ را به همراه دارد. هان و همکاران [۲۰] ذخیره‌سازی انرژی گرمایی در یک شش‌وجهی سه‌بعدی متخلخل با مواد تغییر فاز دهنده تحت شرایط عدم تعادل گرمایی محلی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که میزان عدم تعادل گرمایی محلی با افزایش کسر حجمی و ناحیه اتصال ماده متخلخل به PCM افزایش می‌یابد. مبروک و همکاران [۲۱] یک ارزیابی عددی از اثر تخلخل بر انتقال گرما تحت همرفت واداشته در یک کانال افقی انتها باز پر شده با یک ساختار متخلخل (مس) و یک ماده تغییر فاز دهنده (پارافین) تحت شرایط عدم تعادل گرمایی محلی گزارش کردند. آنها دریافتند که استفاده از ضرایب تخلخل کوچک، سرعت ذوب ماده تغییر فاز دهنده را افزایش می‌دهد. پرهیزی و همکاران [۲۲] با بکارگیری مدل عدم تعادل گرمایی محلی، به تحلیل جریان و انتقال گرما در کانالی متخلخل با دیوارهای شار ثابت پرداختند.

یکی از روش‌های شبیه‌سازی مکانیک سیالات و انتقال گرما، روش شبکه بولتزمن است. در این روش، توابع توزیع سیال به عنوان مبنای تحلیل جریان سیال قلمداد می‌شوند. از توابع توزیع که بیانگر احتمال حضور ذرات سیال در یک مکان دلخواه هستند، به حل معادله ساده شده و شبه‌خطی انتقال بولتزمن به جای معادلات غیرخطی ناویر-استوکس استفاده می‌شود [۳۶]. فنگ و همکاران [۳۷] انتقال گرمای همرفت را در یک محیط متخلخل با استفاده از روش شبکه بولتزمن شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که با کاهش عدد دارسی، مقدار عدد ناسلت میانگین بیشتر می‌شود. مرادی و همکاران [۳۸] جریان در یک محیط متخلخل را به روش شبکه بولتزمن مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در یک تخلخل ثابت، تغییر تعداد موانع یا چیدمان آن‌ها، میدان‌های سرعت و دما و همچنین مقدار عدد ناسلت را عوض می‌کند. بازخانه و زحمتکش [۳۹] انتقال حرارت نانوسیال را در کانالی با میدان مغناطیسی و مانع متخلخل، با استفاده از مدل دارسی-برینکمن-فورچهمر و روش شبکه بولتزمن بررسی کردند. نتایج نشان داد نوع نانوذره با سهم ۶۲٪/۷۹ بیشترین تأثیر را بر انتقال حرارت دارد، در حالی که اثر ضریب تخلخل، جنس مانع و عدد دارسی ناچیز بود. حالت بهینه در عدد رینولدز ۳۰۰، عدد هارتمن ۱۰۰، کسر حجمی ۰٫۴٪ و استفاده از نانوذرات و مانع مسی با ابعاد ۴ سانتی‌متر و تخلخل ۰/۵ به دست آمد. سجادی و همکاران [۴۰] پژوهشی را بر روی اثر میدان مغناطیسی بر انتقال گرمایی همرفت طبیعی در یک محیط متخلخل به روش شبکه بولتزمن گزارش کردند. آن‌ها دریافتند که عدد ناسلت میانگین، با افزایش عدد دارسی و ضریب تخلخل بیشتر می‌شود.

هدف از این مقاله، بررسی انتقال گرمای همرفت واداشته در حضور همزمان نانوذرات، محیط متخلخل، میدان مغناطیسی و شرط عدم تعادل گرمایی محلی بین نانوسیال پارافین-آلومینا و ماده متخلخل (مس) است. در این پژوهش، برخلاف مطالعات گذشته که تنها ترکیبی از دو یا سه متغیر فوق را در نظر گرفته‌اند، تلاش شده تا برای نخستین بار، اثر همه عوامل به‌طور همزمان و در قالب یک مطالعه جامع و فراگیر بررسی شود. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از روش عددی شبکه بولتزمن گرمایی با زمان آسایش منفرد انجام شده و برای تحلیل رفتار محیط متخلخل، مدل کامل و پیشرفته دارسی-

نانوسیالات دوتایی را در حضور یک میدان مغناطیسی شعاعی مورد مطالعه قرار دادند. برای شبیه‌سازی مسأله، آن‌ها یک مدل ریاضی جدید پیشنهاد دادند. هی و همکاران [۳۰] به بررسی عددی و تجربی رفتار ذوب نانوکامپوزیت اکسید آهن و پارافین تحت میدان مغناطیسی با هدف بهینه‌سازی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی گرمایی در یک حفره مکعبی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که حضور نانوذرات و میدان مغناطیسی می‌تواند نرخ ذوب را بهبود دهد و توزیع دما را در فرآیند انتقال حرارت کنترل کند. احمد و همکاران [۳۱] تحقیقی را در مورد فرایند ذوب سه‌بعدی نانوکامپوزیت‌های تغییر فاز دهنده با تولید گرما تحت شرایط عدم تعادل گرمایی محلی و میدان مغناطیسی در یک محفظه مکعبی انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش شعاع سیلندر باعث افزایش در عدد ناسلت می‌شود. هرچاوی و همکاران [۳۲] با استفاده از روش حجم محدود، اثر زاویه شیب، میدان مغناطیسی و غلظت نانوذرات را بر فرایند ذوب ماده تغییر فاز دهنده بررسی کردند. نتایج نشان داد که هر یک از این عوامل نقش قابل توجهی در بهبود نرخ ذوب و الگوی توزیع دما دارند و می‌توانند بهینه‌سازی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی را امکان‌پذیر سازند. ورما و انصاری [۳۳] اثر میدان مغناطیسی را بر جریان دارسی-برینکمن در یک کانال متخلخل دوار بررسی کردند. تجزیه و تحلیل آن‌ها بر رفتار جریان در متغیرهای مختلف، از جمله عدد دارسی، عدد هارتمن و عدد تیلور متمرکز بود. علاوه بر این، آن‌ها سرعت جریان حجمی را در رابطه با میدان مغناطیسی در شرایط سرعت‌های دوران کم و زیاد ارزیابی کردند. ایزدی و همکاران [۳۴] به بررسی عددی اثر میدان مغناطیسی-همرفت بر پدیده تغییر فاز نانومواد تغییر فاز دهنده در یک ذخیره‌سازی انرژی گرمایی شش‌ضلعی پرداختند. مشخص شد زاویه میدان مغناطیسی می‌تواند برای کنترل عملکرد انتقال انرژی و ذوب در ذخیره انرژی گرمایی مناسب باشد. ادیبی طوسی و همکاران [۳۵] عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی را در چهار حالت مختلف به‌صورت آزمایشگاهی ارزیابی کردند. نتایج نشان داد استفاده از نانوماده تغییر فاز دهنده هیپریدی تحت میدان مغناطیسی، عملکرد دستگاه را تا ۹۸ درصد نسبت به حالت ساده بهبود داد.

واداشته و بدون هدررفت گرانشی است؛ به گونه‌ای که سهم انتقال گرمای همرفت طبیعی و تبادل تابش ناچیز می‌باشد. علاوه بر این، شرایط عدم تعادل گرمایی محلی بین فازهای جامد و سیال برقرار است. همچنین، خواص ترموفیزیکی ماده متخلخل (مس) و همچنین پارافین به همراه نانوذرات آلومینا ثابت می‌باشد.

با توجه به فرضیات ذکر شده، معادلات حاکم ماکروسکوپی را می‌توان به صورت زیر نوشت [۲۱]:

۳-۱- معادلات جریان در محیط متخلخل

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

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)(\varepsilon^{-1} \vec{V}) = -\nabla(\varepsilon P) + \nu_{nf} \nabla^2 \vec{V} + \vec{F} \quad (2)$$

در این جا، \vec{F} بردار نیروی حجمی است؛ که به شکل زیر به ترتیب به صورت ترکیبی از نیروی داریسی، نیروی فورچهیمیر و نیروی لورنتز ناشی از میدان مغناطیسی تعریف می‌شود:

$$\vec{F} = [\vec{F}_{Darcy} + c_F \rho_{nf} |\vec{V}| \vec{V} + \sigma_{nf} B_0^2 \vec{V}] \quad (3)$$

۳-۲- معادلات انرژی برای نانوسیال و ماده متخلخل

$$\varepsilon (\rho C_p)_{nf} \left(\frac{\partial T_{nf}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla T_{nf} \right) = \nabla \cdot (k_{nf} \nabla T_{nf}) + h_{sf} a_{sf} (T_s - T_{nf}) - \varepsilon \rho_{nf} L_a \frac{\partial \Gamma}{\partial t} \quad (4)$$

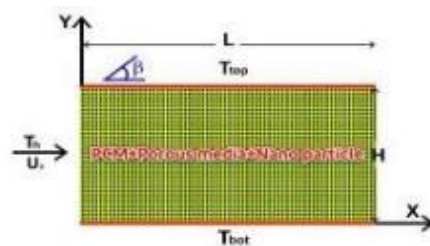
$$(1 - \varepsilon) (\rho C_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{eff,s} \nabla T_s) + h_{sf} a_{sf} (T_f - T_s) \quad (5)$$

که در آن، به ترتیب k_{eff} , \vec{a} , P , T_s , T_{nf} , ε , ρ , ν_{nf} , C_p معرف ظرفیت گرمایی ویژه، گرانشی حرکتی پارافین حاوی نانوذرات، چگالی، تخلخل مس، دمای پارافین حاوی نانوذرات، دمای محیط متخلخل، فشار، بردار سرعت، ضریب رسانش گرمایی مؤثر، کسر ذوب و گرمای نهان ذوب هستند. همچنین، زیرنویس‌های f و s به ترتیب به فاز سیال و جامد اشاره دارند. در معادله ۴ عبارت $\varepsilon \rho_{nf} L_a (\partial \Gamma / \partial t)$ به دلیل تغییر

برینکمن-فورچهیمیر به کار رفته است که دقت آن در مطالعات پیشین به اثبات رسیده است. نوآوری اصلی این تحقیق، دید جامع و کامل‌تری است که از تعامل چندوجهی بین مواد تغییر فاز دهنده، نانوذرات، محیط متخلخل و میدان مغناطیسی فراهم می‌آورد. انتظار می‌رود که نتایج این پژوهش در حوزه‌های کاربردی از جمله ذخیره‌سازی انرژی گرمایی، مدیریت گرمایی ادوات الکترونیکی و کنترل دقیق فرایند تغییر فاز، منجر به بهبود کارایی، افزایش پایداری و توسعه کاربردهای نوین شود.

۲- بیان مسأله

مسأله مورد بررسی، مطابق با شکل ۱، شامل یک کانال دوبعدی با دو انتهای باز است که فضای آن با یک ساختار متخلخل فلزی و نانوسیالی پر شده است که از پارافین به عنوان ماده تغییر فاز دهنده تشکیل شده و نانوذرات آلومینا به آن افزوده شده‌اند. ساختار متخلخل از مجموعه‌ای از حفره‌های دایروی با قطر d_p تشکیل شده است. طول و ارتفاع کانال به ترتیب با نمادهای L و H نشان داده شده‌اند. این کانال، تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی خارجی با شدت B_0 قرار دارد. دیواره‌های کانال دما ثابت، نفوذناپذیر و بدون لغزش در نظر گرفته شده‌اند. جریان هوای گرم با دمای ثابت T_h و سرعت یکنواخت اولیه U_0 به کانال وارد شده و سبب آغاز فرآیند ذوب در پارافین می‌شود؛ سپس، جریان از سمت راست کانال با دمای T_c خارج می‌شود. فرض می‌شود که جریان در خروجی کاملاً توسعه یافته است. همچنین، عدد رینولدز در بازه $200 \leq Re \leq 400$ تعریف می‌شود.



شکل ۱- طرح شماتیک هندسه مطالعه شده

۳- معادلات جریان متخلخل و انتقال گرما

فرضیات مورد استفاده در مقاله حاضر به شرح زیر است: جریان، ناپایا، آرام و تراکم‌ناپذیر می‌باشد و شیوه انتقال گرما، همرفت

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial \vec{t}} + (\vec{U} \cdot \nabla)(\varepsilon^{-1} \vec{U}) = -\nabla(\varepsilon P) + \frac{1}{Re} \nabla^2 \vec{U} + \varepsilon \vec{F} \quad (11)$$

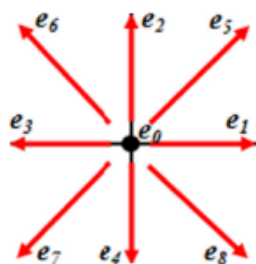
$$\frac{\partial \theta_{nf}}{\partial \vec{t}} + \vec{U} \cdot \nabla \theta_{nf} = \frac{1}{\varepsilon Re Pr} \nabla \cdot \left(\frac{k_{eff,nf}}{k_{nf}} \nabla \theta_{nf} \right) + \frac{k_r Bi}{Re Pr} \left(\frac{\theta_s - \theta_{nf}}{\varepsilon} \right) - \frac{1}{Ste} \frac{\partial \Gamma}{\partial \vec{t}} \quad (12)$$

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial \vec{t}} = \frac{k_r}{Rc} \cdot \frac{1}{Re \cdot Pr} \nabla \cdot \left(\frac{k_{eff,s}}{k_s} \nabla \left(\frac{\theta_s}{1 - \varepsilon} \right) \right) - \frac{k_r}{Rc} \cdot \frac{Bi}{Re \cdot Pr} \left(\frac{\theta_s - \theta_{nf}}{1 - \varepsilon} \right) \quad (13)$$

نیروی حجمی در معادله ۱۱ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{F} = - \left(\frac{1}{Re Da} + \frac{F_\varepsilon}{\sqrt{Da}} \|\vec{U}\| \right) \vec{U} - \frac{Ha^2}{Re} \vec{U} \quad (14)$$

که جملات سمت راست آن به ترتیب بیانگر نیروی داریسی، نیروی فورچهیمر و نیروی لورنتز ناشی از میدان مغناطیسی می‌باشند. لازم به ذکر است که در مدل در نظر گرفته شده، نسبت هدایت گرمایی به صورت $k_r = k_s/k_{nf}$ معرفی شده است. مقدار عدد بيو به عنوان یک متغیر کلیدی برای برقراری تعادل گرمایی محلی بر پایه با مطالعات قبلی [۲۱] برابر با ۰/۱ فرض شده است.



شکل ۲- طرح شماتیک D2Q9 (سرعت های دو بعدی و نه شبکه‌ای)

۳-۴- معادله شبکه بولتزمن برای جریان سیال

در روش شبکه بولتزمن، با تقریب بی.جی.کی و استفاده از زمان آسایش منفرد، تابع توزیع چگالی از معادله زیر به دست می‌آید [۲۱]:

فاز ماده تغییر فاز دهنده و عبارت $h_{sf} a_{sf} (T_s - T_{nf})$ به دلیل شرط عدم تعادل گرمایی محلی ظاهر می‌شوند.

مساحت سطح ویژه جامد-سیال (a_{sf}) و ضریب انتقال گرمای محلی (h_{sf}) در روابط بالا به صورت زیر تعیین می‌شوند.

$$h_{sf} = \begin{cases} 0.76 Re_d^{0.4} pr^{0.37} \frac{k_{nf}}{d_f} & 1 \leq Re_d \leq 40 \\ 0.52 Re_d^{0.5} pr^{0.37} \frac{k_{nf}}{d_f} & 40 \leq Re_d \leq 10^3 \\ 0.26 Re_d^{0.6} pr^{0.37} \frac{k_{nf}}{d_f} & 10^3 \leq Re_d \leq 2.10^5 \end{cases} \quad (6)$$

$$a_{sf} = \frac{3\pi d_f \left(1 - e^{-\frac{(1-\varepsilon)}{0.004}} \right)}{(0.59 d_p)^2} \quad (7)$$

در معادلات بالا، $d_p/H = 0.0135$ و $d_f = 1.18 \times$ در معادلات بالا، $d_p \times ((1 - \varepsilon)/3\pi)^{\frac{1}{2}}$ می‌باشند و کسر ذوب ماده تغییر فاز دهنده را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\Gamma(T) = \begin{cases} 0 & T_{nf} \leq T_m - \Delta T \\ \frac{T_{nf} - T_m + \Delta T}{2\Delta T} & T_m - \Delta T < T_{nf} < T_m + \Delta T \\ 1 & T_{nf} \geq T_m + \Delta T \end{cases} \quad (8)$$

۳-۳- بی‌بعدسازی و متغیرهای کلیدی

به منظور بی‌بعدسازی معادلات حاکم، متغیرهای بی‌بعد به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$(X, Y) = \frac{(x, y)}{H}, \vec{U} = \frac{\vec{V}}{U_0}, P = \frac{P}{\rho U_0^2}, \vec{t} = \frac{t U_0}{H}$$

$$\theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, \Delta T_{ref} = T_h - T_c, Da = \frac{K}{H^2}$$

$$Pr = \frac{\nu_{nf}}{\alpha_{nf}}, Re = \frac{U_{in} H}{\nu_{nf}}, Rc = \frac{(\rho C_p)_s}{(\rho C_p)_{nf}} \quad (9)$$

$$k_r = \frac{k_s}{k_{nf}}, Bi = \frac{h_{sf} a_{sf} H^2}{k_s}, Ec = \frac{U_0^2}{C_{p,nf} \Delta T_{ref}}$$

$$Ste = \frac{C_{p,nf} (T_h - T_m)}{La}, Ha = \sqrt{\frac{\sigma_{nf}}{\mu_{nf}}} B_0 H$$

با بهره‌گیری از متغیرهای بالا، معادلات ۱ تا ۵ به صورت زیر بی‌بعد می‌شوند:

$$F_\varepsilon = \frac{1.75}{\varepsilon \sqrt{150} \times \varepsilon} \quad (20)$$

$$K = Da \times m^2 \quad (21)$$

علاوه بر این، نیروی لورنتز ناشی از میدان مغناطیسی در شبکه بولتزن است؛ که به صورت زیر محاسبه می‌شود [۴۳]:

$$\vec{F}_L = A[v \sin\beta \cos\beta - u \sin^2\beta]i + A[u \sin\beta \cos\beta - v \cos^2\beta]j \quad (22)$$

در رابطه بالا، β زاویه میدان مغناطیسی با راستای افقی است؛ که در این پژوهش $\beta = \pi/2$ فرض می‌شود. همچنین، شاخص میدان مغناطیسی است که یک کمیت بعددار می‌باشد و با عدد هارتمن (Ha) که به صورت نسبت نیروی الکترومغناطیسی به نیروی گرانش تعریف می‌شود، به صورت زیر رابطه دارد [۴۲]:

$$A = \frac{Ha^2 v_{nf}}{H^2} \left(\frac{\sigma_{nf}}{\sigma} \right) \quad (23)$$

بر پایه قانون بقای جرم و قانون بقای اندازه حرکت در هر گره شبکه، چگالی ماکروسکوپی و سرعت به ترتیب از طریق روابط زیر به دست می‌آیند [۴۲]:

$$\rho_{nf} = \sum_i f_i \quad (24)$$

$$\vec{V} = \frac{\sum_i f_i \vec{e}_i}{\rho_{nf}} + \frac{\delta t \vec{E}}{2} \quad (25)$$

از آنجا که رابطه (۱۹) یک رابطه غیرخطی است، برای رفع مشکل آن از یک سرعت کمکی (\vec{V}^*) به صورت زیر استفاده می‌شود [۴۲]:

$$\vec{V} = \frac{\vec{V}^*}{c_0 + \sqrt{c_0^2 + c_1 |\vec{V}^*|}} \quad (26)$$

ضرایب C_0 و C_1 در معادلات بالا، از طریق معادلات زیر به دست می‌آیند:

$$f_i(\vec{x} + \vec{e}_i \delta t, t + \delta t) - f_i(\vec{x}, t) = -\omega_i [f_i(\vec{x}, t) - f_i^{eq}(\vec{x}, t)] + \delta t F_i \quad (15)$$

که $\omega_i = \delta t / \tau_v$ فرکانس برخورد است و زمان آسایش τ_v به صورت $\tau_v = 3v + 0.5$ محاسبه می‌شود. δt گام زمانی و $f_i^{eq}(\vec{x}, t)$ تابع توزیع تعادلی است که در مدل D2Q9 به صورت شکل ۲ بیان می‌شود [۴۱]:

$$f_i^{eq} = w_i \rho_{nf} \left[1 + \frac{\vec{e}_i \cdot \vec{V}}{c_s^2} + \frac{(\vec{e}_i \cdot \vec{V})^2}{2c_s^4 \varepsilon} - \frac{\vec{V} \cdot \vec{V}}{2c_s^2 \varepsilon} \right]_{i=0-8} \quad (16)$$

که بردار سرعت ماکروسکوپی سیال و F_i در رابطه (۱۵) نیروی حجمی در محیط متخلخل و در حضور میدان مغناطیسی است؛ که به شکل زیر تعیین می‌شود [۳۹]:

$$F_i = w_i \rho_{nf} \left(1 - \frac{1}{2\tau_{nf}} \right) \left[\frac{\vec{e}_i \cdot \vec{E}}{c_s^2} + \frac{(\vec{V} \cdot \vec{e}_i)(\vec{E} \cdot \vec{e}_i)}{\varepsilon c_s^4} - \frac{\vec{V} \cdot \vec{E}}{\varepsilon c_s^2} \right]_{i=0-8} \quad (17)$$

سرعت‌های مجزا در شبکه نیز به صورت زیر تعیین می‌شوند [۴۱]:

$$\vec{e}_i = \begin{cases} 0 & i = 0 \\ c \left(\cos\left(\frac{(i-1)\pi}{2}\right) \vec{i} + \sin\left(\frac{(i-1)\pi}{2}\right) \vec{j} \right) & i = 1, 2, 3, 4 \\ \sqrt{2}c \left(\cos\left(\frac{(2i-9)\pi}{4}\right) \vec{i} + \sin\left(\frac{(2i-9)\pi}{4}\right) \vec{j} \right) & i = 5, 6, 7, 8 \end{cases} \quad (18)$$

که در آن، $c = \delta x / \delta t$ و فاکتور وزن w_i به صورت $w_0 = 1/9$ ، $w_{1-4} = 1/9$ و $w_{5-8} = 1/36$ هستند. در روابط بالا، $c_s = c/\sqrt{3}$ سرعت صوت شبکه‌ای است. همچنین، مقدار \vec{E} در معادله ۱۷ از طریق معادله زیر محاسبه می‌شود [۳۹]:

$$\vec{E} = \varepsilon \left[\vec{F}_L - \frac{v_{nf}}{K} \vec{V} - \frac{F_\varepsilon}{\sqrt{K}} |\vec{V}| \vec{V} \right] \quad (19)$$

که F_ε و K ضریب نفوذپذیری و ضریب فورچهیمر هستند؛ که به صورت زیر تعیین می‌شوند [۴۳]:

ضمنا جملات پایانی معادلات (۳۰) و (۳۱)، ناپایایی و میزان تولید انرژی را به دلیل تغییر فاز نشان می‌دهد و توابع توزیع دمایی تعادلی در آنها از طریق معادلات زیر محاسبه می‌شوند [۲۱]:

$$g_{nf,i}^{eq} = w_i T_{nf} \left(1 + \frac{\vec{e}_i \vec{V}}{\varepsilon c_s^2} \right) \quad (۳۶)$$

$$g_{s,i}^{eq} = w_i T_s \quad (۳۷)$$

در نهایت، دماهای ماکروسکوپی سیال و جامد و عبارات $Sr_{i,s}$ و $Sr_{i,nf}$ به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند [۲۱]:

$$T_{nf} = \sum_{i=0}^8 g_{nf,i} \quad (۳۸)$$

$$T_s = \sum_{i=0}^8 g_{s,i} \quad (۳۹)$$

$$Sr_{i,nf} = w_i \left(La \frac{\gamma(t+\delta t) - \gamma(t)}{\delta t} / C_{p,nf} + h(T_s - T_{nf}) / (\varepsilon (\rho C_p)_{nf}) \right) \quad (۴۰)$$

$$Sr_{i,s} = w_i \left(\frac{h(T_s - T_{nf})}{(1 - \varepsilon)(\rho C_p)_s} \right) \quad (۴۱)$$

از آنجایی که نتایج باید به صورت تغییرات عدد ناسلت میانگین ارائه شوند، ضریب همرفت میانگین به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۹]:

$$h_m = \left| \frac{k_{nf} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_w}{T_w - T_b} \right| \quad (۴۲)$$

T_b دمای کپه‌ای است که به صورت زیر آورده شده‌است و T_w دمای دیوار می‌باشد. پس از محاسبه ضریب همرفت میانگین، عدد ناسلت میانگین به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$T_b = \frac{\int_0^H T(y) dy}{H} \quad (۴۳)$$

$$Nu_m = \frac{h_m H}{k_{nf}} \quad (۴۴)$$

$$\vec{V}^* = \frac{\sum_{i=0}^8 \vec{e}_i f_i}{\rho_{nf}} + \frac{\delta t}{2} \varepsilon \vec{F}_L \quad (۲۷)$$

$$c_0 = \frac{1}{2} \left(1 + \varepsilon \frac{\delta t v_{nf}}{K} \right) \quad (۲۸)$$

$$c_1 = \varepsilon \frac{\delta t F_\varepsilon}{2 \sqrt{K}} \quad (۲۹)$$

۳-۵- روش شبکه بولتزمن برای انتقال گرما

در این مقاله، از دو تابع توزیع دمایی $g_{i,f,s}$ برای حل معادلات (۴) و (۵) و به دست آوردن میدان دمایی استفاده می‌شود. معادلات حاکم با فرض زمان آسایش منفرد برای سیال و ماده متخلخل به صورت زیر بیان می‌شوند [۲۱]:

$$g_{nf,i}(\vec{x} + \vec{e}_i \delta t, t + \delta t) - g_{nf,i}(\vec{x}, t) = -\omega_{T,nf} (g_{nf,i}(\vec{x}, t) - g_{nf,i}^{eq}(\vec{x}, t)) + (1 + \frac{\delta t \partial_t}{2}) \delta t Sr_{i,nf} \quad (۳۰)$$

$$g_{s,i}(\vec{x} + \vec{e}_i \delta t, t + \delta t) - g_{s,i}(\vec{x}, t) = -\omega_{T,s} (g_{s,i}(\vec{x}, t) - g_{s,i}^{eq}(\vec{x}, t)) + (1 + \frac{\delta t \partial_t}{2}) \delta t Sr_{i,s} \quad (۳۱)$$

در این جا، زیرنویس‌های nf و s فازهای سیال و جامد (ماده متخلخل) را مشخص می‌کنند و $\omega_{T,nf,s} = 1/\tau_{T,nf,s}$ فرکانس‌های برخورد هستند؛ که از طریق زمان آسایش بی‌بعد به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۴۲]:

$$\tau_{T,nf} = \frac{3\alpha_{eff,nf}}{\delta t c^2} + 0.5 \quad (۳۲)$$

$$\tau_{T,s} = \frac{3\alpha_{eff,s}}{\delta t c^2} + 0.5 \quad (۳۳)$$

در این روابط، $\alpha_{eff,nf}$ و $\alpha_{eff,s}$ به ترتیب ضرایب نفوذ مؤثر سیال و ماده متخلخل می‌باشند و از روابط زیر تعیین می‌شوند [۴۲]:

$$\alpha_{eff,nf} = \frac{k_{eff,nf}}{\varepsilon (\rho C_p)_{nf}} \quad (۳۴)$$

$$\alpha_{eff,s} = \frac{k_{eff,s}}{(1 - \varepsilon)(\rho C_p)_s} \quad (۳۵)$$

برای مرزهای بالا و پائین، شرط مرزی نبود لغزش سرعت را می‌توان به ترتیب زیر اعمال کرد که در آن، $0 \leq i \leq 8$. [۴۲]:

$$f_{i,n} = f_{i(opposite),n} \quad (۴۸)$$

f_4 و f_7 در رابطه بالا مجهولات بر روی دیوار بالایی و f_2 و f_5 مجهولات بر روی دیوار پایینی هستند. با توجه به شکل ۳ سرعت خروجی (سمت راست کانال)، برخلاف ورودی، نامعلوم است و شرایط مرزی در آنجا به صورت زیر نوشته می‌شوند [۴۲]:

$$f_{3,n-1} = f_{3,n}; f_{7,n-1} = f_{7,n}; f_{6,n-1} = f_{6,n} \quad (۴۹)$$

۴-۲- شرایط مرزی گرمایی

فرض می‌شود که سیال با دمای گرم $1/4$ از مرز $T_m = T_h =$ سمت چپ کانال وارد می‌شود. بر این اساس، توابع توزیع دمایی به ترتیب زیر تعیین می‌شوند [۴۲]:

$$g_1 = T_{in}(w_1 + w_3) - g_3, g_5 = T_{in}(w_5 + w_7) - g_7, g_8 = T_{in}(w_8 + w_6) - g_6 \quad (۵۰)$$

در این مقاله، از روش بازگشت به عقب و روش زو-هی [۴۳] برای اعمال شرط نبود پخش دمایی بر روی دیوارها استفاده می‌شود. به این ترتیب، برای دیوار بالا و پائین خواهیم داشت که [۴۲]:

$$g_4 = T_w(w_4 + w_2) - g_2, g_7 = T_w(w_7 + w_5) - g_5, g_8 = T_w(w_8 + w_6) - g_6 \quad (۵۱)$$

$$g_2 = T_w(w_2 + w_4) - g_4; g_5 = T_w(w_5 + w_7) - g_7; g_6 = T_w(w_6 + w_8) - g_8 \quad (۵۲)$$

به دلیل نامعلوم بودن دمای مرز سمت راست کانال، توابع توزیع دمایی به ترتیب زیر تعیین می‌شوند [۴۲]:

$$g_{3,n-1} = g_{3,n}, g_{7,n-1} = g_{7,n}, g_{6,n-1} = g_{6,n} \quad (۵۳)$$

با توجه به این‌که در مقاله حاضر، شرایط عدم تعادل گرمایی محلی در نظر گرفته شده‌است، متغیر عدم تعادل گرمایی محلی به صورت زیر تعریف و تحلیل می‌شود که در آن، $N = n \times m$ می‌باشد.

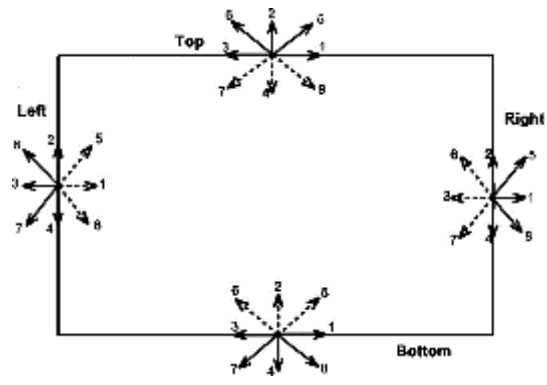
$$LTNE = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m |\theta_s - \theta_{nf}|}{N} \quad (۴۵)$$

۴- شرایط مرزی

برای اعمال درست شرایط مرزی در شبیه‌سازی‌های شبکه بولتزمن بر روی گره‌های مرزی، مقدار توابع توزیع در خلال گام انتشار به سمت خارج از میدان حل انتشار می‌یابند. با این وجود، مقادیر این توابع در جهت‌های رو به درون مرز، مجهول باقی می‌مانند. در مقاله حاضر، شرط مرزی برگشت-برگشت برای بیان شرایط نبود لغزش اعمال شده‌است.

۴-۱- شرایط مرزی سرعت

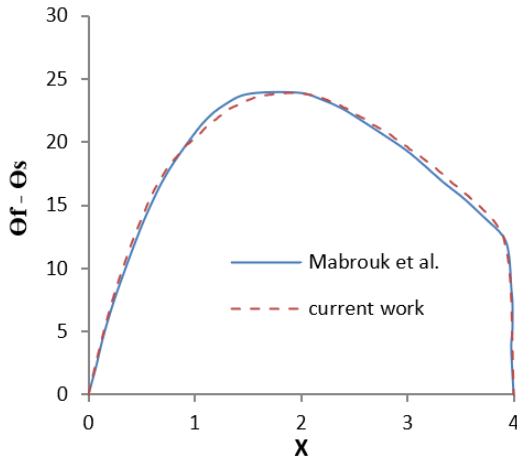
با استناد به شکل ۳، جهت اعمال شرایط مرزی در سمت چپ دامنه (مرز ورودی) در روش شبکه بولتزمن، از روش زو-هی [۴۳] بهره گرفته شده است. بر این اساس، توزیع‌های f_5 و f_8 با استفاده از روابط خاصی به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۴۲]:



شکل ۳- طرح شبکه سرعت و دمای D2Q9 در داخل و مرزهای میدان حل

$$\rho_{nf,in} = \frac{f_0 + f_2 + f_4 + 2(f_3 + f_6 + f_7)}{1 - u_{in}} \quad (۴۶)$$

$$f_1 = f_3 + \frac{2\rho_{nf}u_{in}}{3}; f_5 = f_7 + \frac{\rho_{nf}u_{in}}{6}; f_8 = f_6 + \frac{\rho_{nf}u_{in}}{6} \quad (۴۷)$$



شکل ۴- مقایسه اختلاف دمای سیال و ماده متخلخل در پژوهش حاضر با نتایج مبروک و همکاران [۲۱]

در مقایسه‌ای دیگر، یک کانال حاوی نانوسیال آب-گرافن با کسرحجمی ۴ درصد و عدد رینولدز ۲۰۰، میزان تخلخل ۰/۶ و دیواره‌های دما ثابت در نظر گرفته شده است. سپس مطابق شکل ۵ توزیع سرعت در اعداد دارسی مختلف رسم و با پژوهش بن الطیفا و همکاران [۴۴] مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که اختلاف در داده‌ها کمتر از ۲ درصد است که قابلیت اطمینان کد و اعتبار مدل اجرا شده را تأیید می‌کنند.

۷- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌شود. هدف از این بخش، بررسی اثر زاویه میدان مغناطیسی، عدد دارسی، عدد هارتمن، ضریب تخلخل و کسرحجمی نانوذرات بر روی عدد ناسلت میانگین، مقدار عدم تعادل گرمایی محلی ($LTNE$)، درصد کسر ذوب پارافین و زمان ذوب پارافین در کانال نشان داده شده در شکل ۱ می‌باشد. در حالت پایه، مقادیر زیر برای متغیرهای موثر در نظر گرفته شده است:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 0.7, \varphi = 4\%, T_{in} = 1.4, Da = 0.001, \\ \beta &= \frac{\pi}{2}, Ha = 30, T_w = 1, Pr = 50, \\ Re &= 200, T_m = 1.08, Bi = 0.5 \end{aligned}$$

۵- تحلیل استقلال شبکه

محاسبه شبکه‌بندی‌های 25×100 ، 30×120 ، 40×160 ، 50×200 برای انتخاب بهترین شبکه عددی برای پارافین با نانوذرات آلومینا با کسرحجمی ۴ درصد، تخلخل ۰/۷، عدد دارسی ۰/۰۰۱، در عدد رینولدز ۲۰۰، عدد بیو ۰/۵ و عدد هارتمن ۳۰ با دماهای دیواره ۰/۱، ۰/۴۹ و ۰/۵ و در حالت ناپایا انجام می‌شود. در جدول ۱ دمای ماده متخلخل در نقطه میانی کانال آمده‌است. مشخص است که با افزایش نقاط شبکه، از شبکه 40×160 به بعد، دمای ماده متخلخل در نقطه میانی کانال ثابت می‌ماند. از این رو، برای تحلیل مسأله در این مقاله از این شبکه استفاده خواهد شد.

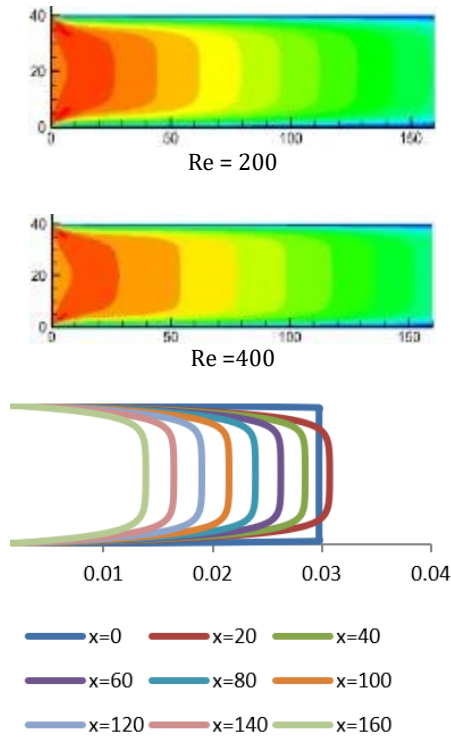
جدول ۱- تحلیل استقلال شبکه

ابعاد شبکه	دمای بی‌بعد دیوار		
	۰/۵	۰/۴۹	۰/۱
100×25	۰/۵۰۰۶	۰/۴۹۰۷	۰/۱۰۱۷
120×30	۰/۵۰۰۵	۰/۴۹۰۵	۰/۱۰۱۴
160×40	۰/۵۰۰۴	۰/۴۹۰۴	۰/۱۰۱۴
200×50	۰/۵۰۰۴	۰/۴۹۰۴	۰/۱۰۱۴

۶- اعتبار سنجی مدل

به منظور اعتبارسنجی مدل ریاضی و حل عددی پژوهش مورد مطالعه و در غیاب مطالعه آزمایشگاهی نزدیک به این پژوهش، در این بخش، نتایج با نتایج دو پژوهش عددی پیشین مقایسه می‌شود. در این راستا، ابتدا یک کانال حاوی پارافین با عدد رینولدز ۲۰۰، عدد پرانتل ۵۰، عدد بیو ۰/۱، عدد استفان ۱، عدد اکرت ۵، $K_f = 1000$ ، $Re = 1$ و دیواره‌های عایق در نظر گرفته شده است. سپس، مقادیر شدت عدم تعادل گرمایی محلی در مقادیر مختلف تخلخل و اختلاف دمای ماده تغییر فاز دهنده و ماده متخلخل در شکل ۴ با پژوهش مبروک و همکاران [۲۱] مقایسه شده است.

نتایج مبروک و همکاران [۲۱] می‌باشد. این به آن علت است که در طی فرآیند، هوا با دمای T_h وارد کانال می‌شود و پارافین شروع به ذوب شدن می‌کند و حجم ماده تغییر فاز دهنده جامد را کاهش می‌دهد و مسیر خود را تا انتها ادامه می‌دهد.

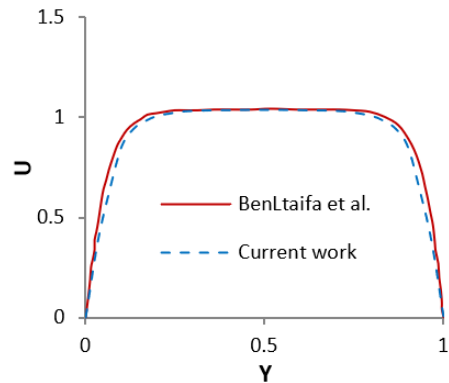


شکل ۶- کانتورها و پروفیل سرعت

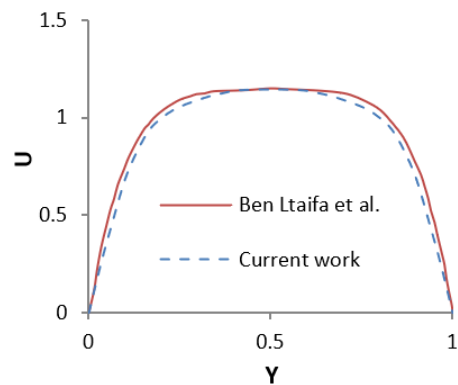
در ادامه، اثر متغیرهای مختلف بر مسأله حاضر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۷-۱- اثر زاویه میدان مغناطیسی

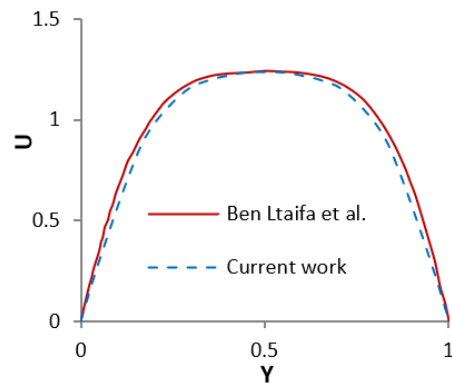
طبق نتایج ارائه شده در جدول ۲ و شکل‌های ۷ و ۸، با افزایش زاویه میدان مغناطیسی، عدد ناسلت میانگین افزایش یافته و میزان عدم تعادل گرمایی محلی نیز بیشتر می‌شود. این به آن علت است که افزایش زاویه میدان باعث تقویت مؤلفه عمودی میدان مغناطیسی شده و در نتیجه نیروی لورنتز قوی‌تری بر جریان سیال وارد می‌شود. این نیرو با ایجاد مقاومت در برابر حرکت سیال، توزیع سرعت و دما را در کانال تغییر داده و موجب نازک شدن لایه مرزی گرمایی می‌شود. این تغییرات،



الف) $Da = 0.01$



ب) $Da = 0.1$



ج) $Da = 1$

شکل ۵- مقایسه میدان سرعت نتایج حاضر با پژوهش بن الطیفا و همکاران [۴۴]

برای بررسی وضعیت توسعه جریان در خروجی کانال مطابق شکل ۶، کانتورهای سرعت برای دو عدد رینولدز ۲۰۰ و ۴۰۰ در $\varepsilon = 0.7$ و همچنین، پروفیل سرعت در عدد رینولدز ۲۰۰ نشان می‌دهند که جریان صرفنظر از مقدار عدد Re ، پس از گذر از یک چهارم ابتدایی کانال، توسعه می‌یابد که مشابه

جدول ۳- اثر زاویه میدان مغناطیسی بر درصد ذوب پارافین در بازه‌های زمانی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه

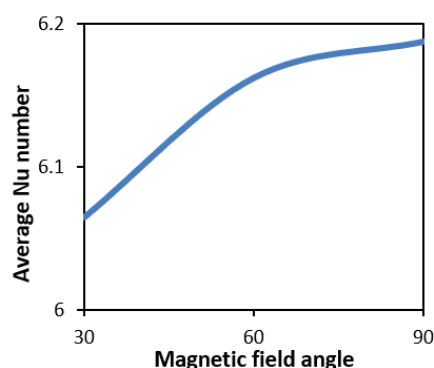
درصد ذوب	تعداد نقاط ذوب شده	زمان (دقیقه)	زاویه میدان (درجه)
۲۳/۱۰	۱۴۷۸/۹۲	۲۰	۳۰
۵۱/۷۳	۳۳۱۰/۹۰	۴۰	۳۰
۶۹/۸۱	۴۴۶۸/۳۸	۶۰	۳۰
۲۲/۶۲	۱۴۴۷/۷۶	۲۰	۶۰
۵۴/۵۳	۳۴۹۰/۰۱	۴۰	۶۰
۷۳/۳۱	۴۶۹۱/۸۶	۶۰	۶۰
۲۲/۴۴	۱۴۳۶/۱۶	۲۰	۹۰
۵۵/۷۱	۳۵۶۵/۹۱	۴۰	۹۰
۷۴/۷۳	۴۷۸۲/۷۲	۶۰	۹۰

جداول ۳ و ۴ تغییرات کسر ذوب پارافین در زمان‌ها و زوایای مختلف میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد. روند نزولی کسر ذوب در ۲۰ دقیقه اول در زاویه‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه به دلیل تغییرات دینامیکی اولیه در میدان گرمایی و جریان است. در این بازه زمانی، در زاویه‌های بزرگتر به دلیل کاهش حرکت سیال، گرما به آرامی از ورودی کانال به سیال منتقل می‌شود. اما به دلیل زمان‌بر بودن فرآیند انتقال گرما و تشکیل جریان‌های همرفتی، ذوب اولیه به صورت غیریکنواخت رخ می‌دهد و ممکن است بخشی از پارافین در نزدیکی ورودی کانال ذوب شود؛ درحالی‌که بخش‌های دیگر هنوز در حالت جامد باقی بمانند. این شرایط موجب کاهش نسبی کسر ذوب می‌شود. با این حال، در دقیقه‌های ۴۰ و ۶۰، میدان‌های گرمایی و جریان به تدریج به حالت پایا می‌رسند و انتقال گرما نیز به صورت یکنواخت‌تر و مؤثرتر انجام می‌شود؛ به ویژه در زاویه‌های ۶۰ و ۹۰ درجه که جریان‌ها قوی‌تری هستند، این امر منجر به افزایش تدریجی و پایدار کسر ذوب در این بازه‌های زمانی می‌شود.

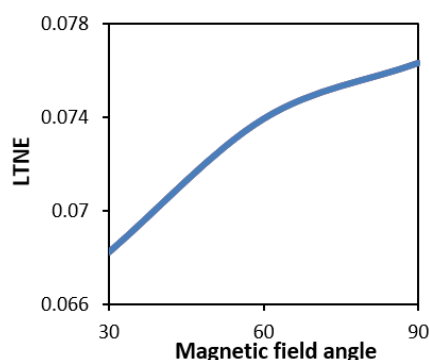
جدول ۴- زمان لازم برای بیشترین درصد ذوب در زاویه‌های مختلف

بیشترین درصد ذوب	زمان (دقیقه)	زاویه (درجه)
۸۰/۹۸۵۷	۱۶۲/۸۶	۳۰
۸۱/۱۲۸۳	۱۰۲/۱	۶۰
۸۲/۳۰۴	۹۳/۱۳	۹۰

نرخ انتقال گرما همرفتی را افزایش داده و در نهایت به رشد عدد ناسلت میانگین منجر می‌شود. از سوی دیگر، به دلیل تفاوت در رسانایی گرمایی میان فاز جامد و سیال پایه، دمای این دو فاز با نرخ متفاوتی تغییر می‌کنند. افزایش زاویه میدان موجب افزایش این اختلاف و در نتیجه افزایش اختلاف دما بین فازها شده که خود عامل افزایش عدم تعادل گرمایی محلی است.



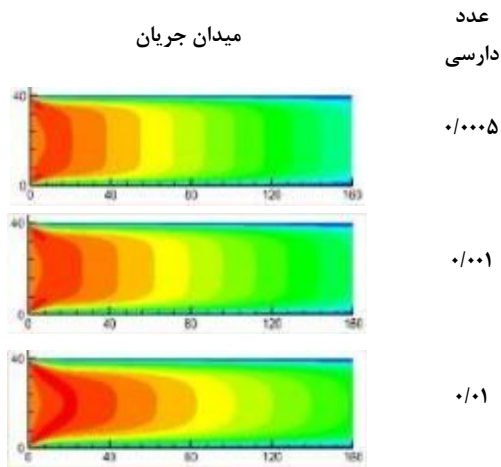
شکل ۷- اثر زاویه میدان مغناطیسی بر عدد ناسلت میانگین



شکل ۸- اثر زاویه میدان مغناطیسی بر عدم تعادل گرمایی محلی

جدول ۲- مقدار عدد ناسلت میانگین و عدم تعادل گرمایی محلی در زوایای مختلف میدان مغناطیسی

زاویه میدان (درجه)	عدد ناسلت میانگین	عدم تعادل گرمایی محلی
۳۰	۶/۰۶۴۷	۰/۰۶۸۲۲
۶۰	۶/۱۶۲۳	۰/۰۷۳۹۳
۹۰	۶/۱۸۷۷	۰/۰۷۶۳۲



شکل ۹- اثر عدد داری بر میدان جریان

جدول ۵- تغییرات عدد ناسلت میانگین و عدم تعادل گرمایی محلی در اعداد داری مختلف

عدد داری	عدد ناسلت میانگین	عدم تعادل گرمایی محلی
۰/۰۰۰۵	۶/۰۳۷۳	۰/۰۶۸۰۹
۰/۰۰۱	۶/۱۸۷۷	۰/۰۷۶۳۲
۰/۰۱	۶/۲۵۹۵	۰/۰۸۱۲۷

۷-۲- اثر عدد داری

عدد داری متغیری برای بررسی میزان نفوذپذیری در محیط‌های متخلخل است و می‌تواند به‌طور چشمگیری بر عدم تعادل گرمایی محلی اثر بگذارد.

براساس جدول ۵ و شکل ۹، افزایش عدد داری موجب افزایش عدد ناسلت میانگین و مقدار عدم تعادل گرمایی محلی می‌شود. این تغییرات بیانگر تأثیر مستقیم نفوذپذیری بر جریان و انتقال گرما در محیط متخلخل هستند. با افزایش عدد داری، نفوذپذیری پارافین در محیط متخلخل افزایش می‌یابد و در نتیجه، جریان هوا با سهولت بیشتری درون کانال حرکت می‌کند. این بهبود در جریان موجب تقویت همرفت در محیط متخلخل و افزایش نرخ انتقال گرما می‌شود؛ که خود را در افزایش عدد ناسلت میانگین نشان می‌دهد. از دیدگاه میدان جریان، در مقادیر پایین عدد داری به دلیل محدودیت در نفوذپذیری، جریان در ناحیه مرکزی کاهش سرعت را تجربه می‌کند. اما با بالا رفتن عدد داری، مقاومت جریان کاهش یافته و سرعت در ناحیه مرکزی بیشتر می‌شود. مطابق شکل ۹، این روان‌تر شدن جریان منجر به نازک‌تر شدن لایه مرزی گرمایی شده و در نتیجه، همرفت تقویت می‌شود. علاوه بر این، افزایش نفوذپذیری موجب می‌شود که فاز سیال بیشتر تحت تأثیر تغییرات گرمایی قرار گیرد، در حالی که دمای فاز جامد محیط متخلخل (که معمولاً هدایت حرارتی بالاتری دارد) کمتر تغییر می‌کند. این تفاوت در واکنش دمایی بین دو فاز، عامل اصلی افزایش عدم تعادل گرمایی محلی است؛ موضوعی که با نتایج گزارش شده توسط نم‌دچیان و همکاران [۴۵] تطابق دارد.

جدول ۶- اثر عدد داری بر درصد ذوب پارافین در بازه‌های زمانی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه

عدد داری	زمان (دقیقه)	تعداد نقاط ذوب شده	درصد ذوب
۰/۰۰۰۵	۲۰	۱۵۰۳/۸۶	۲۳/۴۹
۰/۰۰۰۵	۴۰	۳۳۱۳/۰۸	۵۱/۷۶
۰/۰۰۰۵	۶۰	۴۴۶۲/۳	۶۹/۷۲
۰/۰۰۱	۲۰	۱۴۳۶/۱۶	۲۲/۴۴
۰/۰۰۱	۴۰	۳۵۶۵/۹۱	۵۵/۷۱
۰/۰۰۱	۶۰	۴۷۸۲/۷۲	۷۴/۷۳
۰/۰۱	۲۰	۱۴۱۶/۲۶	۲۲/۱۲
۰/۰۱	۴۰	۳۷۳۰/۶۵	۵۸/۲۹
۰/۰۱	۶۰	۴۹۷۳/۵۱	۷۷/۷۱

جدول ۷- زمان لازم برای بیشترین درصد ذوب در اعداد داری مختلف

عدد داری	زمان (دقیقه)	بیشترین درصد ذوب
۰/۰۰۰۵	۱۷۳/۴۶	۸۱
۰/۰۰۱	۹۳/۱۳	۸۲/۳۰۴
۰/۰۱	۱۷۳/۴۶	۸۴/۱۴۳

جدول ۸- تغییرات عدد ناسلت میانگین و عدم تعادل گرمایی محلی در مقادیر مختلف از ضریب تخلخل

ضریب تخلخل	عدد ناسلت میانگین	عدم تعادل گرمایی محلی
------------	-------------------	-----------------------

ضریب تخلخل یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر ویژگی‌های انتقال گرما و جریان در مواد متخلخل و به‌ویژه در سیستم‌های تغییر فاز دهنده است. مطابق جدول ۸ و شکل ۱۰، با افزایش ضریب تخلخل، عدد ناسلت میانگین کاهش یافته و مقدار عدم تعادل گرمایی محلی نیز به‌طور محسوسی کمتر می‌شود. کاهش عدد ناسلت میانگین به‌دلیل کاهش هدایت گرمایی مؤثر محیط متخلخل و افت سطح تماس بین فاز جامد و سیال رخ می‌دهد. با افزایش تخلخل، مقدار کمتری از فاز جامد در ساختار باقی می‌ماند و در نتیجه نرخ انتقال گرما کاهش می‌یابد. همچنین، کاهش عدم تعادل گرمایی محلی نشان‌دهنده نزدیک‌تر شدن دمای فاز جامد و سیال است که به‌دلیل کاهش تأثیر فاز جامد در توزیع گرما در کل سیستم رخ می‌دهد. این نتایج با یافته‌های مبروک و همکاران [۲۱] مطابقت دارد.

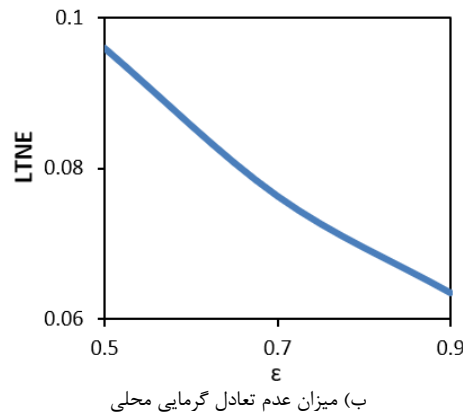
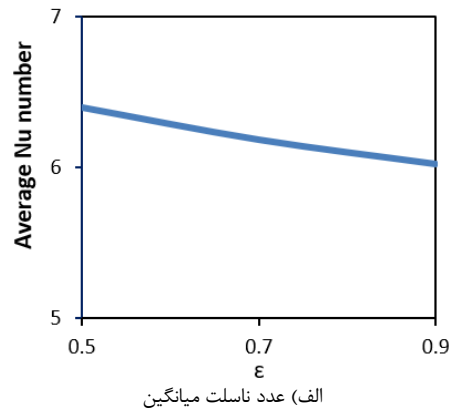
جدول ۹- اثر ضریب تخلخل بر درصد ذوب پارافین در بازه‌های زمانی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه

ضریب تخلخل	زمان (دقیقه)	تعداد نقاط ذوب شده	درصد ذوب
۰/۵	۲۰	۱۹۲۵/۷	۳۰/۰۸
۰/۵	۴۰	۴۵۶۱/۵۸	۷۱/۲۷
۰/۵	۶۰	۵۴۰۸/۲۲	۸۴/۵
۰/۷	۲۰	۱۴۳۶/۱۶	۲۲/۴۴
۰/۷	۴۰	۳۵۶۵/۹۱	۵۵/۷۱
۰/۷	۶۰	۴۷۸۲/۷۲	۷۴/۷۳
۰/۹	۲۰	۹۵۸/۵۱	۱۴/۹۷
۰/۹	۴۰	۲۸۷۹/۴۰	۴۴/۹۹
۰/۹	۶۰	۴۱۶۰/۹۵	۶۵/۰۱

جدول ۱۰- زمان لازم برای بیشترین درصد ذوب در ضریب تخلخل‌های مختلف

ضریب تخلخل	زمان (دقیقه)	بیشترین درصد ذوب
۰/۵	۵۸/۳۶	۸۸/۹۱
۰/۷	۹۳/۱۳	۸۲/۳۰۴
۰/۹	۱۹۶/۲	۷۵/۴۱۰۹

۰/۵	۶/۴۰۰۷	۰/۹۵۹۹
۰/۷	۶/۱۸۷۷	۰/۷۶۳۲
۰/۹	۶/۰۲۷	۰/۶۳۴۷



شکل ۱۰- اثر ضریب تخلخل محیط بر عدد ناسلت میانگین و عدم تعادل گرمایی محلی

بر اساس جدول‌های ۶ و ۷، با افزایش عدد دارسی، درصد ذوب نهایی افزایش یافته و زمان لازم برای رسیدن به بیشترین مقدار ذوب کاهش می‌یابد. با این حال، در ۲۰ دقیقه ابتدایی، درصد ذوب برای عدد دارسی کوچک، بیشتر است. در عدد دارسی پایین، به‌دلیل نفوذپذیری کم، انتقال گرمای غالب از طریق هدایت انجام می‌شود و همرفت نقشی ناچیز دارد. اما اختلاف دمای زیاد در لحظات اولیه موجب ذوب سریع‌تری می‌شود. با افزایش عدد دارسی، همرفت تقویت شده و در نتیجه، نرخ کلی انتقال گرما و درصد ذوب افزایش می‌یابد.

۷-۳- اثر ضریب تخلخل

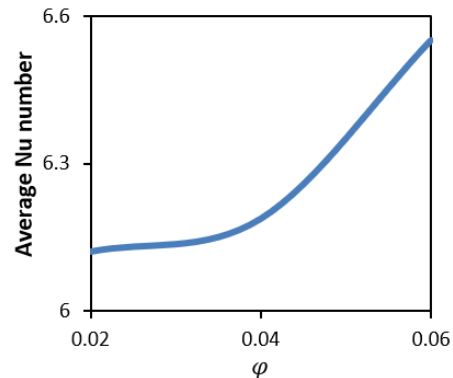
میانگین به دلیل بهبود رسانش گرمایی در نانوسیال و افزایش انتقال گرمای همرفتی است. از سوی دیگر، افزایش عدم تعادل گرمایی محلی ناشی از تفاوت بیشتر در نرخ انتقال گرما بین فاز جامد و سیال بوده و نشان‌دهنده کاهش هماهنگی دمایی بین دو فاز در حضور نانوذرات است. میدان مغناطیسی ممکن است بر توزیع سیال در حضور نانوذرات تأثیر بگذارد که این اثرات می‌توانند به افزایش ناسلت و تشدید عدم تعادل گرمایی محلی کمک کنند.

مطابق جدول ۱۲، افزایش کسر حجمی نانوذرات باعث افزایش درصد ذوب پارافین در تمام بازه‌های زمانی می‌شود. این روند افزایشی، به‌ویژه در زمان‌های اولیه، نشان‌دهنده نقش مؤثر نانوذرات در سرعت‌بخشی به فرآیند انتقال گرما است. بالاترین درصد ذوب در کسر حجمی ۰/۰۶ و زمان ۶۰ دقیقه مشاهده می‌شود. دلیل این افزایش، بهبود رسانش گرمایی مؤثر نانوسیال به واسطه حضور بیشتر نانوذرات و افزایش سرعت ذوب پارافین در محیط متخلخل است.

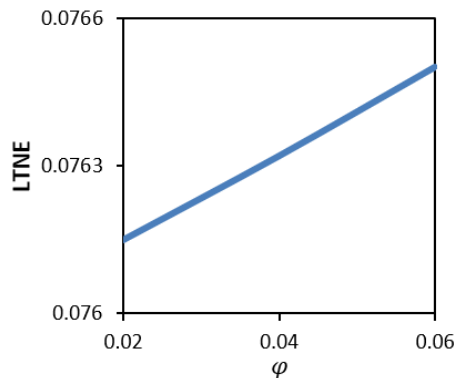
جدول ۱۲- اثر کسر حجمی نانوذرات بر درصد ذوب پارافین در بازه‌های زمانی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه

کسر حجمی نانوذرات (ϕ)	زمان (دقیقه)	تعداد نقاط ذوب شده	درصد ذوب
۰/۰۲	۲۰	۱۴۳۴/۵۹	۲۲/۴۱
۰/۰۲	۴۰	۳۵۶۷/۷۳	۵۵/۷۴
۰/۰۲	۶۰	۴۷۸۱/۶۹	۷۴/۷۱
۰/۰۴	۲۰	۱۴۳۶/۱۶	۲۲/۴۴
۰/۰۴	۴۰	۳۵۶۵/۹۱	۵۵/۷۱
۰/۰۴	۶۰	۴۷۸۲/۷۲	۷۴/۷۳
۰/۰۶	۲۰	۱۴۳۷/۳۶	۲۲/۴۵
۰/۰۶	۴۰	۳۵۶۶/۸۳	۵۵/۷۳
۰/۰۶	۶۰	۴۷۸۶/۷۹	۷۴/۷۹

نتایج ارائه شده در جدول ۱۳ نشان می‌دهد که افزودن ۶ درصد نانوذرات موجب دستیابی به حدود ۸۹ درصد ذوب در ۲۰۰ دقیقه می‌شود؛ در حالی که با ۲ درصد نانوذرات، در ۷۸ دقیقه می‌توان به حدود ۸۰ درصد ذوب رسید. بنابراین افزایش بیشتر نانوذرات از نظر زمان و هزینه مقرون‌به‌صرفه نیست.



الف) عدد ناسلت میانگین



ب) میزان عدم تعادل گرمایی محلی

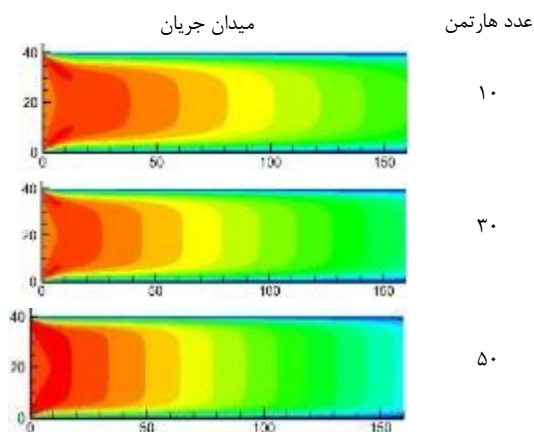
شکل ۱۱- اثر کسر حجمی نانوذرات بر عدد ناسلت میانگین و عدم تعادل گرمایی محلی

جدول ۹ نشان‌دهنده تأثیر ضریب تخلخل بر درصد ذوب پارافین در بازه‌های زمانی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه است. با افزایش ضریب تخلخل از ۰/۵ به ۰/۹، درصد ذوب پارافین در تمامی زمان‌ها کاهش می‌یابد. آنچه مشخص است، در تخلخل‌های بالا به دلیل کاهش نقش رسانش گرمایی، تبادل گرما کاهش یافته که نتیجه آن کاهش کسر ذوب می‌باشد.

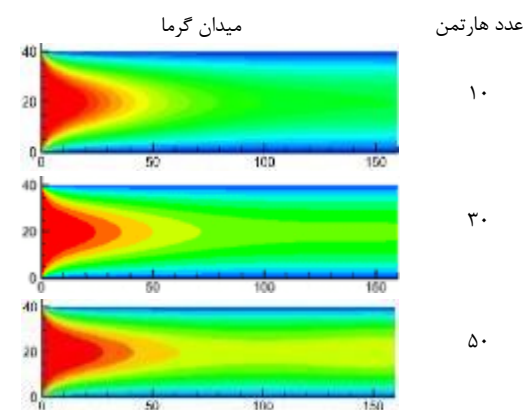
جدول ۱۰، زمان لازم برای رسیدن به بیشترین درصد ذوب در ضریب تخلخل‌های مختلف را نشان می‌دهد. پیداست که با افزایش ضریب تخلخل از ۰/۵ به ۰/۹، زمان لازم برای رسیدن به بیشترین درصد ذوب افزایش می‌یابد.

۷-۴- اثر کسر حجمی نانوذرات

بر پایه نتایج جدول ۱۱ و شکل ۱۱، افزودن نانوذرات آلومینا به پارافین سبب افزایش عدد ناسلت میانگین و همچنین، عدم تعادل گرمایی محلی می‌شود. این افزایش در عدد ناسلت



شکل ۱۱- اثر عدد هارتمن بر میدان جریان



شکل ۱۲- اثر عدد هارتمن بر میدان دما

مطابق با جدول ۱۵، با افزایش عدد هارتمن، زمان لازم برای رسیدن به بیشترین درصد ذوب افزایش می‌یابد. در اعداد هارتمن پایین، درصد ذوب سریع‌تر به مقدار بیشینه خود می‌رسد؛ در حالی که در اعداد هارتمن بالاتر، زمان بیشتری برای دستیابی به درصد ذوب بیشتر لازم است.

مطابق با جدول ۱۶ و شکل ۱۴، با افزایش عدد هارتمن، درصد ذوب پرافین در بازه‌های زمانی مختلف افزایش می‌یابد. این تغییرات ناشی از تأثیر میدان مغناطیسی قوی‌تر بر بهبود انتقال گرما و یکنواخت‌تر شدن جریان نانوسیال در کانال است. یکی از اهداف مهم این پژوهش، تحلیل عدد ناسلت میانگین و عدم تعادل گرمایی محلی به‌ازای متغیرهای مختلف از قبیل زاویه میدان مغناطیسی، عدد دارسی، ضریب تخلخل، کسرحجمی نانوذرات و عدد هارتمن بود. در قسمت‌های قبل اثر این متغیرها به تفسیر آمد. در ادامه، مطابق جدول ۱۷

جدول ۱۳- زمان لازم برای بیشترین درصد ذوب در کسر

حجمی نانوذرات مختلف		
کسر حجمی نانوذرات (ϕ)	زمان (دقیقه)	بیشترین درصد ذوب
۰/۰۲	۷۷/۶۶	۷۸/۵۷
۰/۰۴	۹۳/۱۳	۸۲/۳۰۴
۰/۰۶	۱۹۶/۶۶	۸۸/۷۸

۷-۵- اثر عدد هارتمن

مطابق جدول ۱۴، با افزایش عدد هارتمن، عدد ناسلت میانگین روند افزایشی دارد. این افزایش ناشی از اعمال میدان مغناطیسی قوی‌تر بر جریان سیال است که موجب پایداری بیشتر جریان و کاهش ضخامت لایه مرزی گرمایی در نزدیکی دیوارها می‌شود. همچنین، افزایش هارتمن موجب بهبود تعادل میان نیروی مگنتوهیدرودینامیکی و نیروی گرانشی شده و در نتیجه توزیع گرما یکنواخت‌تر و انتقال گرما مؤثرتر می‌شود.

جدول ۱۴- تغییرات عدد ناسلت میانگین و عدم تعادل

گرمایی محلی در اعداد هارتمن مختلف		
عدد هارتمن	عدد ناسلت میانگین	عدم تعادل گرمایی محلی
۱۰	۶/۰۱۶۴	۰/۰۶۳۸۵
۳۰	۶/۱۸۷۷	۰/۰۷۶۲۶
۵۰	۶/۳۳۲۷	۰/۰۸۷۷۵

در شکل ۱۲ پیداست که افزایش عدد هارتمن موجب اعمال نیروی لورنتز قوی‌تری بر نانوسیال می‌شود و میدان جریان را منظم‌تر و پایدارتر می‌کند. این پایداری، باعث کاهش نوسانات سرعت و تضعیف حرکت نانوسیال در نواحی مرکزی کانال می‌شود؛ در نتیجه، جریان یکنواخت‌تر می‌شود.

شکل ۱۳ نشان می‌دهد که افزایش عدد هارتمن موجب توزیع یکنواخت‌تر گرما در محیط متخلخل می‌شود. دلیل آن اثر نیروی لورنتز در کنترل جهت و سرعت جریان نانوسیال و کاهش ضخامت لایه مرزی گرمایی است. در نتیجه، میدان گرمایی هموارتر شده و انتقال گرما در کل کانال به شکل مؤثرتری انجام می‌گیرد.

جدول ۱۸- بیشترین درصد ذوب به ازای متغیرهای مختلف

متغیر	حالت	زمان (دقیقه)	کسر ذوب (%)
زاویه میدان	۹۰ درجه	۹۳/۱۳	۸۶/۳۰۴
عدد دارسی	۰/۰۱	۱۶۷/۱۶	۸۴/۱۴۳
ضریب تخلخل	۰/۵	۵۸/۳۶	۸۸/۹۱
کسر حجمی	۶٪	۱۹۶/۶۶	۸۸/۷۸
عدد هارتمن	۵۰	۱۹۸/۸۳	۸۴/۶۹۷

بیشترین عدد ناسلت میانگین و عدم تعادل گرمایی محلی در متغیرهای مختلف بررسی شده است.

بررسی کسر ذوب به ازای متغیرهای مختلف یکی دیگر از اهداف این مقاله بود. برای این کار ابتدا بیشترین درصد ذوب در بهترین حالت متغیر بررسی و زمان رسیدن به این کسر ذوب آورده شده است. جدول ۱۸ نتیجه این بررسی را نشان می دهد.

جدول ۱۵- زمان لازم برای بیشترین درصد ذوب در اعداد هارتمن مختلف

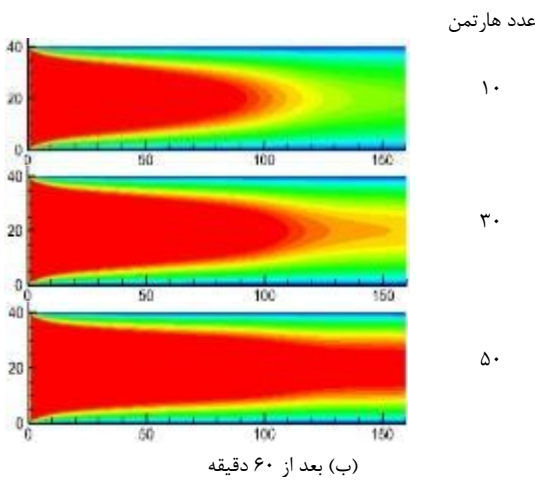
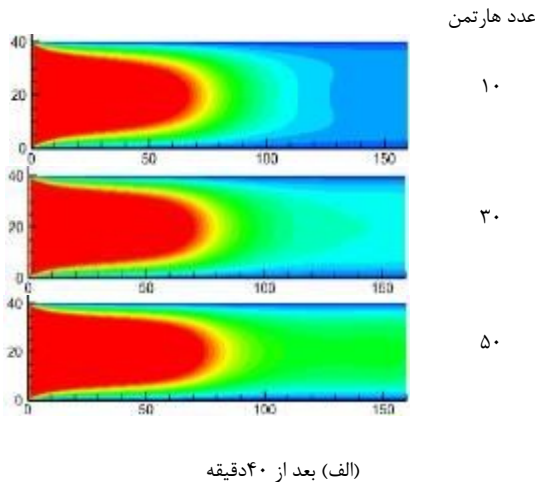
عدد هارتمن	زمان (دقیقه)	بیشترین درصد ذوب
۱۰	۹۰/۴۸	۷۸/۲۵۵۴
۳۰	۹۳/۱۳	۸۲/۳۰۴
۵۰	۱۹۸/۸۳	۸۴/۶۹۷

جدول ۱۶- اثر عدد هارتمن بر درصد ذوب پارافین در بازه های زمانی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه

عدد هارتمن	زمان (دقیقه)	تعداد نقاط ذوب شده	درصد ذوب
۱۰	۲۰	۱۴۸۷/۸۸	۲۳/۲۴
۱۰	۴۰	۳۲۵۳/۷۴	۵۰/۸۳
۱۰	۶۰	۴۳۹۴/۳۰	۶۸/۶۶
۳۰	۲۰	۱۴۳۶/۱۶	۲۲/۴۴
۳۰	۴۰	۳۵۶۵/۹۱	۵۵/۷۱
۳۰	۶۰	۴۷۸۲/۷۲	۷۴/۷۳
۵۰	۲۰	۱۴۱۷/۸۰	۲۲/۱۵
۵۰	۴۰	۳۹۴۱/۶۵	۶۱/۵۸
۵۰	۶۰	۵۱۷۹/۱۱	۸۰/۹۲

جدول ۱۷- بیشترین عدد ناسلت میانگین و عدم تعادل گرمایی محلی به ازای متغیرهای مختلف

متغیر	حالت	عدد ناسلت میانگین	عدم تعادل گرمایی محلی
زاویه میدان	۹۰ درجه	۶/۱۸۷۷	۰/۰۷۶۳۲
عدد دارسی	۰/۰۱	۶/۲۵۹۵	۰/۰۸۱۲۷
ضریب تخلخل	۰/۵	۶/۴۰۰۷	۰/۰۹۵۹۹
کسر حجمی	۶٪	۶/۵۵۰۶	۰/۰۷۶۵۰
عدد هارتمن	۵۰	۶/۳۳۲۷	۰/۰۸۷۷۵



شکل ۱۴- اثر عدد هارتمن بر توزیع کسر ذوب در زمان های مختلف

۸- نتیجه گیری

در این مقاله، یک ارزیابی عددی از مدل غیرتعادلی در شبیه سازی همرفت واداشته نانوسیال پارافین-آلومینا در یک

مجموع نیروهای حجمی ناشی از تخلخل و میدان مغناطیسی، kg. m. s^{-2}	E	کانال افقی پر شده با ماده متخلخل در حضور میدان مغناطیسی خارجی ارائه شد. به این منظور، روش شبکه بولتزمن مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه، اثر متغیرهای مؤثر شامل زاویه میدان مغناطیسی، عدد دارسی، ضریب تخلخل، کسر حجمی نانوذرات و عدد هارتمن بر روی عدد ناسلت میانگین، مقدار عدم تعادل گرمایی محلی، کسر ذوب و زمان ذوب مطالعه شد. بر پایه نتایج ارائه شده، نتایج زیر به دست آمد:
سرعت گسسته در جهت i	e_i	(۱) با ضریب تخلخل ۰/۵ در زمان کمتر از یک ساعت می توان به کسر ذوب ۸۸/۹۱ رسید.
ضریب شکل فورچیمبر	F_ε	(۲) کمترین زمان لازم برای رسیدن به کسر ذوب بالای ۸۸ درصد، ۵۸ دقیقه می باشد.
نیروی حجمی بر واحد جرم، N. kg^{-1}	F	(۳) بهترین حالت برای رسیدن به درصد ذوب بالای ۸۵ در کمترین زمان ممکن، استفاده از ضریب تخلخل حداقلی است.
نیروی حجمی، kg. m. s^{-2}	F_i	(۴) ضعیف ترین حالت عملکرد زمانی مربوط به استفاده از عدد هارتمن ۵۰ است؛ به طوری که برای دستیابی به ۸۵ درصد کسر ذوب، زمان نسبتاً طولانی ۱۹۸/۸۳ دقیقه مورد نیاز است.
نیروی لورنتز، kg. m. s^{-2}	F_L	(۵) افزایش عدد ناسلت میانگین با افزایش مقدار عدم تعادل گرمایی محلی همراه است.
نیروی حجمی در جهت i ، $\text{kg. m}^3. \text{s}^{-1}$	F_{ei}	(۶) انتخاب زاویه ۹۰ درجه، عدد دارسی ۰/۰۰۱، ضریب تخلخل ۰/۵، عدد هارتمن ۳۰، درصد کسر حجمی ۴ درصد و عدد رینولدز ۲۰۰ بهترین عملکرد را در فرایند ذوب برای رسیدن به کسر ذوب ۸۴ درصد در کمترین زمان ممکن ارائه می کند.
توابع توزیع	f_{i, g_i}	
توابع توزیع تعادلی	f_i^{eq}, g_i^{eq}	
عرض کانال، m	H	
عدد هارتمن	Ha	
ضریب انتقال گرمای میان فازی، $\text{W. m}^{-2}. \text{K}^{-1}$	h_{sf}	
ضریب نفوذپذیری، m^2	K_p	
نسبت ضریب گرمای رسانشی	k_r	
ضریب انتقال گرمای رسانشی، $\text{W. m}^{-1}. \text{K}^{-1}$	K	
گرمایی نهان ذوب، J. kg^{-1}	La	
فشار، Pa	P	
عدد پرانتل	Pr	
عدد رینولدز	Re	
عدد رینولدز ذرات	Re_d	
نسبت ظرفیت گرمایی	Rc	
عدد استفان	Ste	
دما، K	T	
دمای دیوار، K	T_w	
زمان، s	t	
سرعت، m. s^{-1}	u, v	مساحت ناحیه بین سطحی میان جامد و سیال، a_{sf}
مختصات دکارتی، m	x, y	شاخص مغناطیسی، A
سرعت بیشینه در ورودی، m. s^{-1}	U_0	شدت میدان مغناطیسی، B_0
بردار سرعت بی بعد	\vec{U}	عدد بیو Bi
اندازه سرعت	$\ \vec{U}\ $	سرعت شبکه ای، m. s^{-1} c
بردار سرعت ماکروسکوپی سیال، m. s^{-1}	V	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت، $\text{J. kg}^{-1}. \text{K}^{-1}$ C_p
بردار سرعت کمکی، m. s^{-1}	V^*	عدد دارسی Da
مختصات بی بعد	X, Y	قطر لیگامنت، m d_f
		قطر میانگین حفره ها، m d_p
حروف یونانی	∇	عدد اکرت Ec
عملگر گرادیان	∇	
عملگر دیورژانس	∇	

۱۰- علائم و نشانه ها

storage performance in construction materials: A critical review, *Constr Build. Mater.* 401, 132877.

[5] Togun H, Sultan HS, Mohammed HI, Sadeq AM, Biswas N, Hasan HA, Homod RZ, Abdulkadhim AH, Yaseen ZM, Talebizadehsardari P (2024) A critical review on phase change materials (PCM) based heat exchanger: Different hybrid techniques for the enhancement, *J. Energy Storage* 79, 109840.

[6] Choi SUS (1998) *Nanofluid technology: Current status and future research*, Argonne National Lab, Argonne.

[7] Kalidasan B, Pendey A.K, Saider R, Samukano M, Tyagi VV (2023) Nano additive salt hydrate phase change materials for thermal energy storage, *Int. Mater. Rev.* 68, pp. 140-183.

[۸] غلامی، ع، پورفیاض، ف (۱۴۰۳) تحلیل حساسیت جامع عوامل مؤثر بر ضریب رسانش حرارتی مواد تغییر فاز دهنده بهبود یافته با نانوذرات کربن، ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس ۲۵، ۱۳۷-۱۴۶.

[9] Gunjo DG, Yadav V.K, Sinha D.K, Elkotb MA, Ahmed GMS, Hossain N, Abdelmohimen MA (2022) Improvement in Thermal Storage Effectiveness of Paraffin with Addition of Aluminum Oxide Nanoparticles, *Mater.* 15, 4427.

[10] Khalili R, Tavousi E, B.Kazerooni R, Noghrehabadi A, Taheripour S (2024) Lattice Boltzmann method simulation of nanofluid natural convection heat transfer in a square cavity with constant heat flux at walls, *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Mech. Eng.* 48, pp. 1957-1972.

[11] Li ZR, Hu N, Fan LW (2023) Nanocomposite phase change materials for high-performance thermal energy storage: A critical review, *Energy Storage Mater.* 55, pp. 727-753.

[12] Ali S.A, Habib K, Younas M, Rahman S, Das L, Rubbi F, Mulk WU, Rezakazemi M (2024) Advancements in thermal energy storage: A review of material innovations and strategic approaches for phase change materials, *Energy Fuels* 38, pp. 19336-19392.

[13] Ahmadi T H, Sobhani M, Isfahani J A (2025) Simulation of energy storage through phase change materials placed in nanofluids considering the radiative properties of nanoparticles: Lattice Boltzmann method, *Proceedings of the 21st Conference on Fluid Dynamics of Iran*, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

[14] Vafai K (2015) *Handbook of Porous Media*, CRC Press.

[15] Kaviany M (1995) *Principles of Heat Transfer in Porous Media*, Second ed, Springer-Verlag, New York.

عملگر لاپلاسین	∇^2
گام شبکه	Δx
گام زمانی	Δt
ضریب پخش گرما، $m^2 \cdot s^{-1}$	α
زاویه میدان مغناطیسی با راستای افق، radians	β
ضریب تخلخل	ε
کسر حجمی نانوذرات	φ
اندازه گام زمانی شبکه	δt
دمای بی‌بعد	θ
گرانروی حرکتی، $m^2 \cdot s^{-1}$	ν
چگالی، $kg \cdot m^{-3}$	ρ
زمان آسایش	τ
فاکتور وزنی	ω_i
ضریب رسانش الکتریکی، $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$	σ
گرانروی دینامیکی، Pa.s	μ
کسر ذوب ماده تغییر فاز دهنده	Γ

زیر نویس ها

سیال	f
ماده متخلخل	s
گرم	h
ورودی	in
خروجی	out
مرجع	ref
مؤثر	eff

مراجع

[1] Rostami S, Afrand M, Shahsavari A, Sheikholeslami M, Kalbasi R, Aghakhani S, Shadloo MS, Oztop H (2020) A review of melting and freezing processes of PCM/nano-PCM and their application in energy storage, *Energy* 211, 118698.

[2] Abdullah M, Obayedullah M, Musfika SA (2025) Recent Advances in Phase Change Energy Storage Materials: Developments and Applications, *Int. J. Energy Res.* 6668430.

[3] Morciano M, Fasano M, Chiavazzo E, Mongibello L (2025) Trending applications of Phase Change Materials in sustainable thermal engineering: An up-to-date review, *Energy Convers. Manag.* X 25, 100862.

[4] Ismail A, Wang J, Salami BA, Oyedele LO, Otukogbe GK (2023) Microencapsulated phase change materials for enhanced thermal energy

- and melting heat transfer characteristics of nanoparticles enhanced PCM within metal porous media, *J. Energy Storage* 97, 112864.
- [27] Ayadi B, Hajjar A, Izadi M, Elidi MM, BenSaid L, Lam Q, Alqurashi F, Mohamed MH, Ali MR, Hendy A (2024) Investigation of natural convection heat transfer in various structures of a partitioned triple porous enclosure under permanent magnetic field, *Case Stud. Therm. Eng.* 60, 104579.
- [۲۸] ملایی، ع، رحمتی، ا، ر (۱۴۰۳) بهبود انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی فلز مایع در یک چاه حرارتی تک‌کانالی تحت میدان مغناطیسی خارجی یکنواخت، *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* ۱۴، ۷۷-۹۴.
- [29] Zahmatkesh I, Habibi Shandiz MR (2022) MHD double-diffusive mixed convection of binary nanofluids through a vertical porous annulus considering Buongiorno's two-phase model, *J. Therm. Anal. Calorim.* 147, pp 173-180.
- [30] He W, Zhuang Y, Chen Y, Wang C (2023) Experimental and numerical investigation on the melting behavior of Fe₃O₄ nanoparticles composited paraffin wax in a cubic cavity under a magnetic field, *Int. J. Therm. Sci.* 184, 107961.
- [31] Ahmed SE, Rashed ZZ, Al-hanaya A (2023) Three dimensional melting case of phase change material composited with heat generating and local thermal non-equilibrium copper foam under the magnetic impacts, *Appl. Therm. Eng.* 219, 119662.
- [32] Harchaoui M, Bendaraa A, Elorch M, Amlal W, Charafi MM (2025) Effect of inclination, magnetic field and nanoparticles concentration on phase change material melting: Comprehensive study based on finite volume method, *Numer. Heat Transfer A* 88(6), pp. 489-510.
- [33] Verma VK, Ansari AF (2024) Effect of magnetic field on Darcy-Brinkman flow through rotating porous channel system, *Spec. Top. Rev. Porous Media* 11, pp. 99-110.
- [34] Izadi MM, Sheremet M, Hajjar A, Galal AG, Mahariq I, Jarad F, Ben Hamida MB (2023) Numerical investigation of magneto-thermal-convection impact on phase change phenomenon of nano-PCM with in a hexagonal shaped thermal energy storage, *Appl. Therm. Eng.* 223, 119984.
- [۳۵] ادیبی طوسی، س.س، گشایشی، ح.ر، زحمتکش، ا.، نجاتی، و (۱۴۰۲) ارزیابی آزمایشگاهی آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی همراه با نانومواد تغییر فاز دهنده هیبریدی تحت میدان مغناطیسی، *نشریه مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز* ۵۳، ۱۳-۲۲.
- [36] Aliu O, Sakidin H, Foroozesh J, Yahya N (2020) Lattice Boltzmann application to nanofluids dynamics-a review, *J. Mol. Liq.* 300, 112284.
- [16] Dey S, Kumar BR (2024) Finite element analysis of a thermal non-equilibrium hybrid nanofluid model for natural convection in a complex porous enclosure, *Comput. Math. Appl.* 169, pp.177-194.
- [17] Shuai Z, Daili F, Lei S, Li W, Yingai J, Limei T, Ziyuan L, Guoyong W, Lei Z, Yuying Y (2021) A review of phase change heat transfer in shape-stabilized phase change materials (ss-PCMs) based on porous supports for thermal energy storage, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 135, 110127.
- [18] Kadhim HT, Al Dulaimi, ZM, Rona, A (2023) Local thermal non-equilibrium analysis of Cu-Al₂O₃ hybrid nanofluid natural convection in a partially layered porous enclosure with wavy walls, *J. Appl. Comput. Mech.* 9(3), pp 712-727.
- [19] Tahmasbi M, Siavashi M, Karimi AR, Tousi R, Keshtkaran AH (2024) The effects of fins number, metal foam, and helical coil on the thermal storage enhancement of the phase change material: An experimental study, *Appl. Therm. Eng.* 253, 123780.
- [20] Han P, Wang H, Fan J, Li T, She X, Zhao X (2024) The local non-equilibrium heat transfer in phase change materials embedded in porous skeleton for thermal energy storage, *J. Energy Storage* 82, 110450.
- [21] Mabrouk R, Naji H, Dhahri H, Hammouda S, Younsi Z (2020) Numerical investigation of porosity effect on a PCM's thermal performance in a porous rectangular channel via thermal lattice Boltzmann method, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 119, 104992.
- [22] Parhizi M, Torabi M, Jain A (2021) Local thermal non-equilibrium (LTNE) model for developed flow in porous media with spatially-varying Biot number, *Int. J. Heat Mass Transfer* 164, 120538.
- [۲۳] شیخ‌پور، ن، میرعبداله لواسانی، آ، صالحی، غ (۱۴۰۳) مدل‌سازی عملکرد هیدرولیکی-حرارتی یک کانال نیمه‌متخلخل سینوسی با جریان نانوسیال و اعمال میدان مغناطیسی، *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* ۱۴، ۱۰۷-۱۲۳.
- [۲۴] ایزدی، م (۱۴۰۱) تأثیرات چرخش حفره بر انتقال حرارت جابجایی سیال نانو درون حفره متخلخل در معرض دو میدان مغناطیسی غیریکنواخت، *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* ۱۲، ۲۵۳-۲۶۵.
- [۲۵] طالبی، م.ح، کارگر شریف‌آباد، ه، کلانتر، ولی، نظری، م (۱۴۰۰) بررسی تجربی تأثیر موقعیت و شدت میدان مغناطیسی ثابت بر انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال Fe₂O₃/آب در ناحیه در حال توسعه حرارتی، *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* ۱۱، ۴۳-۵۸.
- [26] Zhuang Y, Huang T, Feng JC (2024) Effect of non-uniform magnetic field on non-Newtonian fluid

- [۴۲] احمدی، م، زحمتکش، ا، گشایشی، حر (۱۴۰۳) تحلیل شبکه بولتزمن همرفت مگنتوهیدرودینامیک نانوسیال آب-گرافن در یک کانال پرشده با مواد متخلخل در شرایط عدم تعادل گرمایی محلی، مجله یافته‌های نوین کاربردی و محاسباتی در سیستم‌های مکانیکی، ۴، ۴۳-۵۸.
- [43] Zou Q, He X (1997) On pressure and velocity boundary conditions for the lattice Boltzmann BGK model, *Phys. Fluids* 9(6), pp 1591-1598.
- [44] Ben Ltaifa K, D’Orazio A, Naji H, Hammouda S, Mabrouk R, Dhahri H (2023) Simulating nanofluid forced convection flow by thermal lattice Boltzmann approach, *J. Thermophys. Heat Transfer* 37(1), pp 64-78.
- [۴۵] نمدچیان، ح، زحمتکش، ا، ابوالحسن علوی، سم (۱۴۰۰) شبیه‌سازی عددی جریان نانوسیال در یک کانال حلقوی با موانع متخلخل با استفاده از ترکیب مدل داریسی-برینکمن-فرچهمر و مدل مخلوط دوفازی، نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، ۵۳، ۱۸۹۷-۱۹۱۴.
- [37] Feng X-B, Liu Q, He Y-L (2020) Numerical simulations of convection heat transfer in porous media using a cascaded lattice Boltzmann method, *Int. J. Heat Mass Transfer* 151, 119410.
- [38] Moradi I, D’Orazio A (2023) Lattice Boltzmann method pore-scale simulation of fluid flow and heat transfer in porous media: Effect of size and arrangement of obstacles in to a channel, *Eng. Anal. Bound. Elem.* 152, pp. 83-103.
- [۳۹] بازخانه، س، زحمتکش، ا (۱۳۹۹) انتقال گرمای نانوسیال در یک کانال دارای میدان مغناطیسی و موانع متخلخل با استفاده از مدل داریسی-برینکمن-فرچهمر در روش شبکه بولتزمن، نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک، ۳۲، ۱۵۳-۱۷۲.
- [40] Sajjadi H, Delouei A.A, Izadi M, Mohebbi R (2019) Investigation of MHD natural convection in a porous media by double MRT lattice Boltzmann method utilizing MWCNT-Fe₃O₄/water hybrid nanofluid, *Int. J. Heat Mass Transfer* 132, pp. 1087-1104.
- [41] De Rosi A, Al-Adham J, Al-Ali H, Meng R (2021) Double-D2Q9 lattice Boltzmann models with extended equilibrium for two-dimensional magnetohydrodynamic flows, *Phys. Fluids* 33, pp. 1-29.

]