



معرفی ضخامت بحرانی یک لایه متخلخل بر حسب نسبت تخلخل و اثر آن بر نرخ انتقال حرارت

محسن نظری*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۹ آذر ۱۳۹۳
بازنگری: ۲۴ اسفند ۱۳۹۳
پذیرش: ۹ اردیبهشت ۱۳۹۴
ارائه آنلاین: ۱ دی ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

انتقال حرارت
لایه متخلخل
ضخامت بحرانی
عایق حرارتی
روش شبکه بولتزمن

چکیده: بررسی اثرات لایه متخلخل در یک محفظه بر انتقال حرارت جابجایی و دستیابی به مقدار بهینه انتقال انرژی در عایق‌های حرارتی از جمله مباحث پژوهشی به‌روز در انتقال حرارت است و طرح جامعی نیز در ادبیات مساله وجود ندارد. با توجه به اینکه در یک محفظه بسته با دیواره‌های قائم دما ثابت، انتقال حرارت با وجود لایه‌های متخلخل عمودی بیشتر از لایه افقی می‌باشد، در این مقاله به بررسی اثر ضخامت لایه متخلخل عمودی بر انتقال حرارت جابجایی آزاد در یک محفظه برای طراحی بهینه عایق‌های حرارتی به روش شبکه بولتزمن پرداخته شده است. بر همین اساس، پس از بررسی اجمالی اثر موقعیت لایه متخلخل عمودی بر مقادیر عدد ناسلت متوسط، به بررسی اثر تغییر ضخامت لایه متخلخل پرداخته می‌شود. در ابتدا، با تغییر موقعیت لایه متخلخل عمودی در محفظه مشاهده شد که میزان حرارت منتقل شده در حالتی که لایه متخلخل در وسط محفظه قرار می‌گیرد بیشتر از سایر حالات می‌باشد. در ادامه با بررسی اثر ضخامت لایه متخلخل در این موقعیت نشان داده شد که در مقادیر مشخصی از عدد رایلی و دارسی، عدد ناسلت روند کاهشی از خود نشان می‌دهد که این روند بر اساس عدد رایلی اصلاح شده قابل تفسیر است. همچنین، ضخامت بحرانی لایه متخلخل، در مقادیر متوسط اعداد رایلی اصلاح شده برای اولین بار گزارش شده است.

۱- مقدمه

مومنتوم وارد می‌کند، معرفی شد [۲]. نیتیارژ و همکاران [۹]، با استفاده از این مدل، به بررسی جریان سیال و انتقال حرارت جابجایی آزاد در یک محفظه متخلخل همگن پرداختند. آن‌ها در این مطالعه با استفاده از روش المان محدود به بررسی اثر عوامل بی‌بعد، بر مقادیر عدد ناسلت پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش عدد دارسی و به تبع آن افزایش سرعت سیال در ماده متخلخل دیگر نمی‌توان از سهم نیروی پسای شکلی نسبت به نیروی پسای ویسکوز چشم‌پوشی کرد. به عبارتی در این رژیم، که رژیم غیر دارسی نامیده می‌شود، مقادیر عدد ناسلت متوسط به‌دست‌آمده بر اساس تعمیم‌یافته ناویر-استوکس اختلاف زیادی با نتایج به‌دست‌آمده بر اساس مدل‌های ساده‌شده دیگر مانند مدل دارسی-برینکمن و مدل دارسی-فورس هایمر نشان می‌دهند. همچنین در این مطالعه اثر جمله جابجایی در معادله مومنتوم بر دقت نتایج حل عددی بررسی شد. نتایج نشان داد که در رژیم دارسی، اثر جمله جابجایی بر مقادیر عدد ناسلت متوسط قابل ملاحظه نبوده اما با افزایش عدد دارسی و به عبارتی در رژیم غیر دارسی، اثر این جمله در مقادیر عدد ناسلت محفظه قابل ملاحظه می‌باشد. به طور کلی گزارش شد با در نظر گرفتن جمله جابجایی در معادله مومنتوم، مقادیر عدد ناسلت متوسط، مقادیر پایین‌تری را نشان می‌دهند.

در برخی از کاربردهای صنعتی از جمله کنترل فرآیند ریخته‌گری برای ساخت قطعات با خواص مورد نظر و نیز تکنولوژی ساخت عایق‌های حرارتی برای صرفه‌جویی در انرژی، سیستم فیزیکی به صورت لایه‌ای از

بررسی انتقال حرارت و جریان سیال در ماده متخلخل از مباحث نسبتاً قدیمی در انتقال حرارت و مکانیک سیالات به‌شمار می‌آید. به دلیل کاربردهای فراوان مواد متخلخل در صنعت، مانند تکنولوژی عایق‌های حرارتی، طراحی مبدل‌های حرارتی، صنایع ریخته‌گری و غیره نیاز به بررسی انتقال حرارت و جریان سیال در مواد متخلخل روبه‌روز گسترش یافته است [۱]. بنابراین مدل‌های مختلفی برای مدل‌سازی صحیح جریان و انتقال حرارت در مواد متخلخل ارائه شده است به‌طوری‌که این مدل‌ها به مرور زمان گسترش یافتند [۲]. از جمله ساده‌ترین این مدل‌ها می‌توان به مدل دارسی اشاره کرد. سپس فورس هایمر با اضافه کردن نیروی پسای غیرخطی به مدل دارسی توانست این مدل را برای مدل‌سازی صحیح جریان در سرعت‌های بالا بهبود بخشد. همچنین برینکمن با اضافه نمودن جمله تنش‌های ویسکوز به مدل دارسی موفق شد، شرط عدم لغزش را بر روی ماتریس جامد اعمال نموده و اثرات لایه مرزی ایجادشده در این ناحیه را وارد معادله مومنتوم کرده و مدل مذکور را بهبود بخشد. بنابراین در بسیاری از مطالعات عددی برای مدل‌سازی جریان در ماده متخلخل مدل‌های دارسی، دارسی-برینکمن و دارسی-فورس هایمر مورد استفاده قرار گرفتند [۳-۸]. سرانجام مدل ناویر-استوکس تعمیم‌یافته یا به عبارتی مدل برینکمن-فورس هایمر به عنوان مدلی کامل که اثرات تمام نیروهای وارد بر سیال در حضور ماده متخلخل را در معادله

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mnazari@shahroodut.ac.ir

سیستم (به عنوان یک محیط پیوسته) مورد بررسی قرار می‌گیرد. این روش به‌طور موفقیت‌آمیزی برای مدل‌سازی جریان سیال تراکم‌ناپذیر [۲۰ و ۲۱] و مدل‌سازی جریان و انتقال حرارت در محیط متخلخل به کار گرفته شد [۲۲، ۲۳ و ۲۴]. از جمله برتری‌های این روش نسبت به سایر روش‌های متداول دینامیک سیالات محاسباتی می‌توان به تولید شبکه آسان، هزینه محاسباتی کم، سرعت همگرایی و پایداری مناسب این روش و به‌علاوه به کارگیری آسان این روش در مواجهه با معادلات پیچیده اشاره کرد [۲۵].

به‌طور کلی، برای مدل‌سازی جریان در ماده متخلخل از دو رویکرد اصلی مقیاس حفره و مقیاس متوسط حجمی استفاده می‌شود. در مقیاس حفره که مقیاس کوچکتری می‌باشد، محیط متخلخل به صورت بلوک‌های جامدی در داخل سیال مدل‌سازی شده و شرط مرزی عدم لغزش بر روی مرز بلوک‌های جامد اعمال می‌شود. هر چند اعمال این روش ساده می‌باشد اما این روش با کاستی‌هایی روبرو می‌باشد که از جمله آن‌ها می‌توان به ناتوانی این روش در ساختن هندسه صحیح ماده متخلخل، حجم محاسبات بالا در این روش و واگرایی آن در مقادیر بالای سرعت متوسط حجمی سیال [۲۲] اشاره کرد. گوا و ژائو [۲۲] با استفاده از معادلات ناویر-استوکس تعمیم‌یافته در مقیاس متوسط حجمی، معادلات شبکه بولتزمن را برای مدل‌سازی جریان سیال و انتقال حرارت در محیط متخلخل ارائه کردند که تطابق خوبی با حل‌های عددی گذشته از خود نشان داد. آن‌ها در بخشی از این مطالعه، به مدل‌سازی جریان سیال در داخل یک کانال که نیمه پایینی آن توسط لایه متخلخل اشغال شده بود و صفحه بالایی آن با سرعت ثابت حرکت می‌کرد (فرم خاصی از جریان کوئت) پرداختند. مقایسه نتایج با حل تحلیلی موجود نشان داد که این مدل بدون اعمال شرط مرزی پیوستگی سرعت و تنش برشی در سطح تماس سیال و لایه متخلخل، قادر به ارضای آنان و مدل‌سازی صحیح جریان در مرز بین سیال و لایه متخلخل می‌باشد.

در این رابطه رانگ و همکاران [۲۴] برای مدل‌سازی جریان سیال بر روی یک سیلندر پوشیده‌شده از ماده متخلخل در داخل یک کانال نشان دادند که برای مدل‌سازی جریان با استفاده از روش شبکه بولتزمن تنها کافی است ناحیه سیال به عنوان یک لایه متخلخل دارای نفوذپذیری بسیار بالا و ضریب تخلخل نزدیک به یک مدل‌سازی شود. گوا و ژائو [۲۳] با استفاده از معادله انرژی در مقیاس متوسط حجمی، معادلات تعمیم‌یافته شبکه بولتزمن را برای مدل‌سازی انتقال حرارت در محیط متخلخل ارائه کردند. آن‌ها با معتبرسازی نتایج در حالتی که لایه متخلخل عمودی در وسط محفظه قرار داشت، نشان دادند که این روش می‌تواند شرط مرزی پیوستگی دما و شار حرارتی در مرز بین سیال تمیز و لایه متخلخل را ارضا کند. نظری و همکاران [۲۶] به بررسی اثرات لایه متخلخل میانی با ضخامت ثابت در دو موقعیت عمودی و افقی بر میزان حرارت منتقل شده از محفظه با استفاده از روش شبکه بولتزمن پرداختند. آن‌ها در این مطالعه نشان دادند که لایه متخلخل عمودی حرارت بیشتری نسبت به لایه متخلخل افقی از محفظه منتقل می‌کند. با بررسی مطالعات انجام‌شده می‌توان به اهمیت اثر ضخامت

ماده متخلخل در کنار لایه‌ای از سیال در یک محفظه دوبعدی که دارای دو دیواره دماثابت در طرفین و دو دیواره عایق در بالا و پایین محفظه می‌باشد، مدل می‌شود [۱۱ و ۱۰]. برای مدل‌سازی مناسب، لازم است معادلات حاکم در هر دو ناحیه و نیز شرط مرزی مناسب برای کوبله‌شدن صحیح این معادلات شناسایی شود. بر همین اساس مطالعات عددی زیادی برای بررسی اثر لایه متخلخل بر انتقال حرارت و جریان سیال در موقعیت‌های مختلف با استفاده از مدل‌های داری و دو مدل تعمیم یافته آن (مدل برینکمن و فروش هایمر) به‌خصوص با استفاده از مدل برینکمن انجام شده است [۲، ۱۵-۱۲]. از جمله مطالعات انجام‌شده در زمینه مدل‌سازی جریان و انتقال حرارت در یک محفظه دارای لایه متخلخل می‌توان به مطالعه بکرمن و همکاران [۱۶] اشاره کرد. در این مطالعه با تغییر موقعیت لایه متخلخل در داخل یک محفظه دوبعدی، خطوط جریان و هم‌دما برای بررسی اثر عدد رایلی، داری و پراتل بر الگوی جریان و میزان حرارت منتقل شده در مقادیر مختلف نسبت ضرایب هدایت حرارتی ماده متخلخل به سیال گزارش شده‌است. در حقیقت، در این مطالعه نتایج آزمایشگاهی مشاهده‌شده با نتایج به‌دست‌آمده از حل عددی به روش حجم محدود مقایسه شده است. البته این نکته قابل توجه است که نتایج گزارش‌شده در این مطالعه، در اعداد داری کوچک برای لایه متخلخل (اعداد رایلی اصلاح‌شده پایین) گزارش شده است و به همین دلیل در این مطالعه مکانیزم حرارتی غالب مشاهده شده در لایه متخلخل به صورت هدایت حرارتی می‌باشد. همچنین در معادلات مربوط به لایه متخلخل، جمله جابجایی در نظر گرفته نشده‌است. هر چند که در این مطالعه عدد ناسلت به عنوان عامل مهم برای بررسی میزان حرارت منتقل شده از محفظه گزارش نشده است ولی همان‌طور که اشاره شد، مطالعه نیتیارژ و همکاران [۹] نشان داد که حذف جمله جابجایی در معادله مومنتوم به خصوص در رژیم غیر داری باعث ایجاد خطا در مقادیر عدد ناسلت متوسط می‌شود.

همچنین چن و همکاران [۱۱] در یک مطالعه عددی به روش حجم محدود بر اساس معادلات تعمیم‌یافته ناویر-استوکس به بررسی جریان سیال و انتقال حرارت جابجایی آزاد در یک محفظه دوبعدی به‌طوریکه دو لایه متخلخل افقی در بالا و پایین آن قرار داشت، پرداختند. آن‌ها در این مطالعه به بررسی اثر عدد رایلی، عدد داری و ضخامت دو لایه متخلخل بر روی الگوی جریان و عدد ناسلت بر روی دیواره سرد پرداختند. در کلیه مطالعات گفته‌شده از روش‌های رایج در دینامیک سیالات محاسباتی از جمله حجم محدود، المان محدود و تفاضل محدود استفاده شده‌است. اخیراً روش شبکه بولتزمن به عنوان ابزاری قدرتمند در شبیه‌سازی جریان سیال و انتقال حرارت توسعه یافته‌است [۱۷، ۱۸ و ۱۹].

برخلاف روش‌های متداول دینامیک سیالات محاسباتی که براساس دیدگاه میکروسکوپی می‌باشند، روش شبکه بولتزمن بر مبنای مدل‌های میکروسکوپی و معادله جنبشی (دیدگاه مزوسکوپی) استوار است که در آن رفتار جمعی ذرات تشکیل‌دهنده محیط سیال برای شبیه‌سازی رفتار

در دیدگاه ماکروسکوپی، معادله پیوستگی، معادله تعمیم یافته ناویر-استوکس و معادله انرژی برای جریان تراکم ناپذیر در مقیاس متوسط حجمی با در نظر گرفتن تقریب بوزینسک به ترتیب مطابق با رابطه (۱) عبارت است از [۲]:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (۱ \text{ الف})$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \left(\frac{\vec{u}}{\varepsilon} \right) = -\frac{1}{\rho_f} \nabla(\varepsilon p) + \nu_e \nabla^2 \vec{u} + \vec{F} \quad (۱ \text{ ب})$$

$$\sigma \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T = \vec{\nabla} \cdot (\alpha_m \vec{\nabla} T) \quad (۱ \text{ ج})$$

در رابطه (۱)، $\vec{u} = (\vec{u}, \vec{v})$ ، P و T به ترتیب نشان دهنده بردار سرعت، فشار و دمای سیال می باشند. همچنین ν_e ویسکوزیته موثر، ε ضریب تخلخل ماده متخلخل، ضریب σ بیانگر نسبت ظرفیت گرمایی جامد و سیال، ρ_f چگالی سیال و α_m ضریب پخش گرمایی موثر در ماده متخلخل [۲] می باشد. با توجه به فرض بوزینسک، تغییرات چگالی در معادله مومنتوم به صورت تابع خطی از اختلاف دما مدل می شود. در این صورت، تغییرات دمایی باید به اندازه کافی کوچک باشد تا بتوان این فرض را استفاده کرد. در رابطه (۱ب) بردار نیروی \vec{F} ناشی از وجود ماده متخلخل و دیگر نیروهای خارجی است که از رابطه (۲) محاسبه می شود.

$$\vec{F} = -\frac{\varepsilon \nu}{K} \vec{u} - \frac{\varepsilon F_\varepsilon}{\sqrt{K}} |\vec{u}| \vec{u} - \varepsilon \vec{g} \beta (T - T_{ref}) \quad (۲)$$

سمت راست رابطه (۲)، به ترتیب نشان دهنده جمله دارسی (نیروی پسای خطی)، جمله فورس هایمر (نیروی پسای غیر خطی) و نیروی شناوری می باشد. به علاوه در رابطه (۲)، \vec{g} شتاب ثقلی، β ضریب انبساط حجمی بوده و T_{ref} دمای مرجع می باشد که از رابطه (۳) پیروی می کند.

$$T_{ref} = \frac{T_h + T_c}{2} \quad (۳)$$

همچنین در رابطه (۲)، F_ε تابع هندسی و K نفوذپذیری ماده متخلخل می باشد که بر اساس تحقیقات آزمایشگاهی ارگن [۲۷] تابعی از ضریب تخلخل ماده (ε) می باشد که با استفاده از این نتایج، وفایی [۲۸] روابط (۴) را ارائه کرده است.

$$F_\varepsilon = \frac{1.75}{\sqrt{150\varepsilon^3}}, K = \frac{\varepsilon^3 d_p^2}{150(1-\varepsilon)^2} \quad (۴)$$

در رابطه (۴)، d_p قطر ذرات ماده متخلخل را نشان می دهد. همان طور که گفته شد، در این مطالعه از روش شبکه بولتزمن برای مدل سازی جریان سیال و بررسی انتقال حرارت استفاده شده است. این روش که از مدل های مزوسکوپی برای مدل سازی جریان سیال و انتقال حرارت بهره می برد، از روش شبکه گاز نشأت گرفته است. در این روش برای حل معادلات (۱الف)

لایه متخلخل بر الگوی جریان سیال و به خصوص میزان حرارت منتقل شده از محفظه پی برد. به علاوه در اکثر مطالعات قبلی برای مدل سازی جریان در ماده متخلخل از روش های رایج در دینامیک سیالات محاسباتی بر اساس مدل های ساده شده مانند دارسی و دو مدل تعمیم یافته آن (برینکمن و فورس هایمر) استفاده شده است که همان طور که اشاره شد با ساده سازی معادلات و حذف جمله هایی از معادلات تعمیم یافته ناویر-استوکس، مقادیر عدد ناسلت گزارش شده دچار خطا خواهند شد. همچنین در این مطالعات اثرات موقعیت و ضخامت لایه متخلخل عمودی به طور همزمان بر الگوی جریان و به خصوص حرارت منتقل شده از محفظه به منظور گزارش حالت بهینه انتقال حرارت بررسی نشده است. در این مقاله پس از بررسی اجمالی اثر موقعیت لایه متخلخل عمودی بر میزان حرارت منتقل شده و نیز الگوی جریان، به بررسی اثر ضخامت لایه متخلخل بر میزان حرارت منتقل شده از محفظه پرداخته شده است تا اثرات ضخامت لایه متخلخل بر میزان انتقال حرارت برای طراحی بهینه عایق های حرارتی مشخص شود. به این منظور الگوی جریان و مقادیر عدد ناسلت متوسط در مقادیر مختلف اعداد بی بعد حاکم بر مساله از جمله عدد رایلی، عدد دارسی و ضریب تخلخل گزارش شده تا میزان حرارت منتقل شده از محفظه بررسی شود.

۲- مدل سازی عددی

در مطالعه حاضر، مطابق شکل ۱ جریان سیال و انتقال حرارت جابجایی آزاد در داخل یک محفظه مربعی به ابعاد $L \times L$ بررسی می شود. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، دیواره های بالایی و پایینی محفظه عایق بوده و دیواره های کناری آن در دمای گرم (T_h) و سرد (T_c) قرار دارند. به علاوه لایه متخلخل عمودی (دارای ضخامت S) و محل قرارگیری آن نسبت به دیواره گرم که با X نشان داده شده است، قابل مشاهده می باشد. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، اثرات تغییر ضخامت لایه متخلخل بررسی می شود.

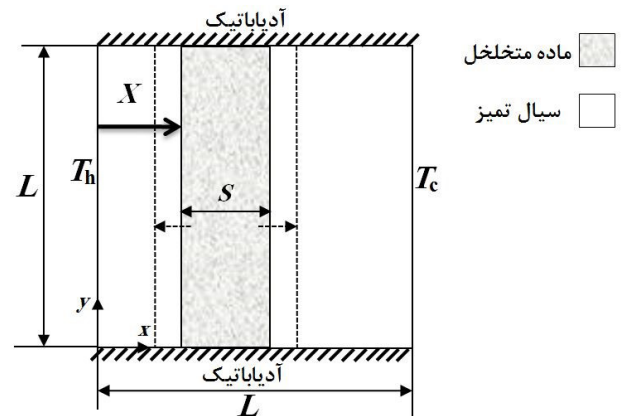


Fig. 1. Schematic of geometry and coordinate axis including a porous layer with thickness of S

شکل ۱: شماتیک از هندسه مورد نظر و سیستم مختصات مربوطه با ضخامت متغیر S ماده متخلخل داخلی در محل X

نشان می‌دهد. به علاوه، ω_i ضریب وزنی بوده و مقدار آن از رابطه (۱۱) پیروی می‌کند.

$$\omega_i = \begin{cases} \frac{4}{9} & i=0 \\ \frac{1}{9} & i=1-4 \\ \frac{1}{36} & i=5-8 \end{cases} \quad (11)$$

همچنین c_s برابر با سرعت صوت در شبکه بوده و مقدار آن از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$c_s = \frac{c}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

در انتها مقادیر ماکروسکوپیکی چگالی و دما از جمع توابع توزیع مطابق با رابطه (۱۳) محاسبه می‌شوند [۲۳].

$$\rho = \sum_i f_i, \quad \sigma T = \sum_i g_i \quad (13)$$

به علاوه مقدار ماکروسکوپیکی سرعت نیز با استفاده از رابطه (۱۴) قابل محاسبه است [۲۳].

$$\vec{u} = \frac{\vec{V}}{c_0 + \sqrt{c_0^2 + c_1 |\vec{V}|}} \quad (14)$$

که \vec{V} از رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود [۲۳].

$$\rho \vec{V} = \sum_i \vec{e}_i f_i + \frac{\delta_t}{2} \varepsilon \rho \vec{G} \quad (15)$$

دو ضریب c_0 و c_1 از رابطه (۱۶) به دست می‌آیند.

$$c_0 = \frac{1}{2} \left(1 + \varepsilon \frac{\delta_t}{2} \frac{v}{K} \right), \quad c_1 = \varepsilon \frac{\delta_t}{2} \frac{F_\varepsilon}{\sqrt{K}} \quad (16)$$

همان‌طور که ذکر شد، در مطالعه حاضر از مدل آسایش واحد استفاده شده است که در آن $\alpha_m = \alpha$ در نظر گرفته می‌شود. همچنین $\sigma = 1$ در نظر گرفته شده است که تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی موجود دارد [۱۶].

۲-۱ عوامل بی‌بعد

با توجه به معادله (۱) در مطالعه انتقال حرارت جابجایی آزاد در یک محفظه حاوی ماده متخلخل، از جمله عوامل بی‌بعد حاکم بر مسئله می‌توان به عدد دارسی $Da = K/L^2$ ، عدد پرانتل $Pr = \nu/\alpha$ ، عدد رایلی $Ra = g\beta(T_h - T_c)$ ، $L^3/\nu\alpha$ ، نسبت لزجت $J_{ev} = \nu/\nu$ و نسبت ضریب پخش حرارتی $J_{ea} = \alpha_m/\alpha$ ، مولفه سرعت افقی $u^* = uL/\alpha$ و عمودی بی‌بعد $v^* = \nu L/\alpha$ و نیز دمای بی‌بعد $\theta = (T - T_c)/(T_h - T_c)$ اشاره کرد به طوری که ν و α به ترتیب لزجت و ضریب پخش حرارتی سیال می‌باشند. در این مطالعه، نسبت لزجت و نسبت ضریب

تا (ج) از دو تابع توزیع احتمال جریان و دما، به ترتیب $f_i(\vec{x}, t)$ و $g_i(\vec{x}, t)$ برای بررسی میدان سیال و انتقال حرارت استفاده می‌شود. معادلات حاکم در این روش، با توجه به مدل گرمایی روش شبکه بولتزمن که توسط گوا و ژائو [۲۳] برای ماده متخلخل ارائه شده است عبارتند از:

$$f_i(\vec{x} + \vec{e}_i \delta_t, t + \delta_t) - f_i(\vec{x}, t) = -\frac{1}{\tau} [f_i(\vec{x}, t) - f_i^{(eq)}(\vec{x}, t)] + \delta_t \vec{F}_i \quad (الف) \quad (5)$$

$$g_i(\vec{x} + \vec{e}_i \delta_t, t + \delta_t) - g_i(\vec{x}, t) = -\frac{1}{\tau} [g_i(\vec{x}, t) - g_i^{(eq)}(\vec{x}, t)] \quad (ب) \quad (5)$$

که $f_i(\vec{x}, t)$ و $g_i(\vec{x}, t)$ احتمال یافتن یک ذره با سرعت \vec{e}_i در مکان x و زمان t و δ_t معرف گام زمانی می‌باشد. به علاوه در رابطه (۵)، $f_i^{(eq)}(\vec{x}, t)$ و $g_i^{(eq)}(\vec{x}, t)$ توابع توزیع تعادلی بوده و با استفاده از روابط (۶) و (۷) قابل محاسبه‌اند [۲۳].

$$f_i^{(eq)} = \omega_i \rho \left[1 + \frac{\vec{e}_i \cdot \vec{u}}{c_s^2} + \frac{\vec{u}\vec{u} : (\vec{e}_i \vec{e}_i - c_s^2 I)}{2\varepsilon c_s^4} \right] \quad (6)$$

$$g_i^{eq} = \omega_i T \left(1 + \frac{\vec{e}_i \cdot \vec{u}}{c_s^2} \right) \quad (7)$$

همچنین جمله نیرو در معادله (۵ الف) با استفاده از رابطه (۸) قابل بیان است [۲۳].

$$\vec{F}_i = \omega_i \rho \left(1 - \frac{1}{2\tau} \right) \left[\frac{\vec{e}_i \cdot \vec{F}}{c_s^2} + \frac{\vec{u}\vec{F} : (\vec{e}_i \vec{e}_i - c_s^2 I)}{\varepsilon c_s^4} \right] \quad (8)$$

همچنین زمان‌های آسودگی در رابطه (۵) مطابق با رابطه (۹) تعریف می‌شود.

$$\tau = \frac{V_e}{c_s^2 \delta_t} + 0.5 \quad (الف) \quad (9)$$

$$\tau' = \frac{\alpha_m}{c_s^2 \delta_t} + 0.5 \quad (ب) \quad (9)$$

مولفه‌های گسسته سرعت \vec{e}_i برای مدل D_2Q_9 (که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است)، از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$\vec{e}_i = \begin{cases} [0, 0] & i=0 \\ c \left[\cos\left(\frac{(i-1)\pi}{2}\right), \sin\left(\frac{(i-1)\pi}{2}\right) \right] & i=1-4 \\ \sqrt{2}c \left[\cos\left(\frac{(i-5)\pi}{2} + \frac{\pi}{4}\right), \sin\left(\frac{(i-1)\pi}{2} + \frac{\pi}{4}\right) \right] & i=5-8 \end{cases} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، $c = \delta_x / \delta_t$ بوده و δ_x فواصل مکانی شبکه بولتزمن را

عمودی و افقی در بالا و پایین آن قرار داشت، نشان دادند که با تغییر دو عامل β_1 و β_2 عدد ناسلت به دست آمده با دقت ۵٪ گزارش شده است. در تحقیق حاضر از مدل گرمایی شبکه بولتزن استفاده شده است که شرط مرزی پیوستگی سرعت مطابق با رابطه (۲۱) ارضا می شود [۲۲].

$$\left. \frac{\partial u_t}{\partial n} \right|_{\text{porous}} = \left. \frac{\partial u_t}{\partial n} \right|_{\text{fluid}} \quad (21)$$

با استفاده از این روش تنها کافی است که سیال تمیز به عنوان یک ماده متخلخل با ضریب تخلخل نزدیک به یک و عدد دارسی بی نهایت مدل سازی شود [۲۲ و ۲۴] (به معادله (۱) رجوع شود). همچنین برای اعمال شرایط مرزی دما، در دیواره های آدیاباتیک بار دیگر از شرط مرزی پرش به عقب برای تابع توزیع دما استفاده می شود و شرط مرزی در دیواره های دماتاب (دیواره های چپ و راست) با استفاده از روابط (۲۲) و (۲۳) تعریف می شود [۲۹]:

$$(T=T_h) \text{ برای دیواره سمت چپ}$$

$$\begin{aligned} g_1 &= T_h(\omega_1 + \omega_3) - g_3 \\ g_5 &= T_h(\omega_5 + \omega_7) - g_7 \\ g_8 &= T_h(\omega_8 + \omega_6) - g_6 \end{aligned} \quad (22)$$

$$(T=T_c) \text{ برای دیواره سمت راست}$$

$$\begin{aligned} g_3 &= T_c(\omega_1 + \omega_3) - g_1 \\ g_7 &= T_c(\omega_5 + \omega_7) - g_5 \\ g_6 &= T_c(\omega_8 + \omega_6) - g_8 \end{aligned} \quad (23)$$

همان طور که اشاره شد، با استفاده از مدل گرمایی شبکه بولتزن شرط پیوستگی شار گرمایی در مرز بین سیال و لایه متخلخل ارضا می شود [۲۳].

۳- مطالعه استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی

در این بخش استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی، مورد بررسی قرار می گیرد. برای این منظور، حل عددی جریان و انتقال حرارت در یک محفظه متخلخل همگن برای مقادیر $\varepsilon=0.6$ و $Ra=10^5$ در $Da=10^{-2}$ و $Da=10^{-4}$ بررسی شده است. در جدول ۱، مقادیر خطای نسبی عدد ناسلت متوسط در شبکه های مختلف، گزارش شده است. در اینجا، برای محاسبه خطای نسبی از یک شبکه یکنواخت مربعی شکل به ابعاد $212 \times 212 = N_x \times N_y$ به عنوان یک حالت مرجع استفاده شده است به طوری که N_x و N_y به ترتیب تعداد گره های شبکه محاسباتی در راستاهای x و y می باشند. در این جدول تعداد گره های مربعی در راستای x و y با N نشان داده شده است. همان طور که در جدول ۱ مشاهده می شود، به ازای تعداد سلول های بیشتر از 154×154 میزان خطای نسبی کمتر از ۳/۰٪ می باشد، بنابراین می توان

پخش حرارتی برابر با یک در نظر گرفته شده اند. همچنین برای برقراری شرط تراکم ناپذیری جریان سیال لازم است که مقدار عدد ماخ مطابق با رابطه (۱۷) [۲۹] کمتر از ۰/۳ در نظر گرفته شود که در این مطالعه عدد ماخ برابر با ۰/۱ در نظر گرفته شده است.

$$Ma = \sqrt{\frac{Ra \nu^2}{N^2 Pr C_s^2}} \quad (17)$$

در رابطه (۱۷)، N^2 تعداد نودها در شبکه مربعی می باشد. همچنین برای بررسی اثرات اعداد بی بعد دارسی و رایلی بر جریان سیال و انتقال حرارت در حضور لایه متخلخل می توان از عدد رایلی اصلاح شده Ra_m که مطابق با رابطه (۱۸) تعریف می شود بهره برد.

$$Ra_m = Ra \cdot Da \quad (18)$$

به علاوه برای بررسی میزان حرارت منتقل شده از محفظه از عدد ناسلت متوسط محفظه طبق رابطه (۱۹) تعریف می شود [۲۵ و ۳۰].

$$\overline{Nu} = \frac{1}{L(T_h - T_c)} \int_{x=0}^L \int_{y=0}^L \left(\frac{\bar{u}T(x,y)}{\chi(x,y)} - \frac{\partial T(x,y)}{\partial x} \right) dx dy \quad (19)$$

در رابطه (۱۹)، عامل χ ضریب پخش گرمایی ماده را در ناحیه مربوطه نشان می دهد. بدین معنا که در ناحیه سیال تمیز مقدار آن برابر با α و در لایه متخلخل برابر با α_m می باشد.

۲-۲- شرایط مرزی

برای مدل سازی جریان سیال و اعمال شرط مرزی عدم لغزش در دیواره های محفظه، طرح پرش به عقب در روش شبکه بولتزن به کار گرفته شده است [۲۹]. همچنین در روش های مختلف دینامیک سیالات محاسباتی، در مرز بین سیال تمیز و لایه متخلخل شرط مرزی های مختلفی به کار گرفته شده است. از جمله آن ها می توان به شرط مرزی پرش تنش [۱۱] در رابطه (۲۰) اشاره کرد.

$$\left. \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial u_t}{\partial n} \right|_{\text{porous}} - \left. \frac{\partial u_t}{\partial n} \right|_{\text{fluid}} = \beta_1 \frac{1}{\sqrt{Da}} u_t \Big|_{\text{interface}} + \beta_2 \frac{1}{Pr} u_t^2 \quad (20)$$

در رابطه (۲۰)، u_t مولفه سرعت بی بعد در راستای مماس بر سطح مشترک دو لایه سیال و متخلخل می باشد. همچنین n نشان دهنده راستای عمود بر سطح می باشد. همچنین با حل تحلیلی که توسط اوچانو-تیبیا و ویتاکر [۳۱] ارائه شد، نشان داده شد که دو عامل β_1 و β_2 می توانند مقادری بین ۱ تا -۱ داشته باشند [۳]. چن و همکاران [۱۱] با استفاده از شرط مرزی مذکور و محاسبه عدد ناسلت در یک محفظه که دارای دو لایه متخلخل

حل‌های عددی گذشته داشته و خطای نسبی کمتر از ۳٪ می‌باشد. در حالت حدی دوم، انتقال حرارت در داخل محفظه (مطابق با شکل ۱)، زمانی بررسی می‌شود که طول لایه متخلخل برابر با صفر باشد ($S/L=1$). به عبارتی در این حالت به بررسی انتقال حرارت جابجایی آزاد در یک محفظه در غیاب لایه متخلخل و تنها در حضور سیال تمیز پرداخته می‌شود. همان طور که ذکر شد، معادلات حاکم بر محیط متخلخل زمانی که $\varepsilon \rightarrow 1$ و $Da \rightarrow \infty$ به معادلات ناویر-استوکس حاکم بر سیال تمیز ساده می‌شود. بر همین اساس برای مدل‌سازی جریان می‌توان از معادلات حاکم به روش شبکه بولتزمن در حالتی که $\varepsilon=0/9999$ و $Da=10^7$ می‌باشد استفاده کرد.

جدول ۳: مقایسه ناسلت متوسط در یک محفظه متخلخل همگن

Table 3. Comparison of the average Nusselt numbers in a uniform porous cavity

الف- $Ra_m = 10$				
Da	ε	۰/۴	۰/۶	۰/۹
10^{-2}	مرجع [۲۵]	-	-	۱/۰۱۲
	مرجع [۲۳]	۱/۰۰۸	۱/۰۱۲	-
	مرجع [۹]	۱/۰۱	۱/۰۱۵	۱/۰۲۳
10^{-4}	مطالعه حاضر	۱/۰۲۳	۱/۰۲۸	۱/۰۳۳
	خطا* (%)	۱/۲۸۷	۱/۲۸۱	۰/۹۷۸
	مرجع [۲۵]	۱/۰۶۰	۱/۰۶۳	۱/۰۶۵
10^{-4}	مرجع [۲۳]	۱/۰۶۶	۱/۰۶۸	-
	مرجع [۹]	۱/۰۶۷	۱/۰۷۱	۱/۰۷۲
	مطالعه حاضر	۱/۰۷۴	۱/۰۷۷	۱/۰۷۹
خطا* (%)	۰/۶۵۶	۰/۵۶۰	۰/۶۵۳	
ب- $Ra_m = 10^3$				
Da	ε	۰/۴	۰/۶	۰/۹
10^{-2}	مرجع [۲۵]	-	-	۱/۶۲۱
	مرجع [۲۳]	۱/۳۶۷	۱/۴۹۹	-
	مرجع [۹]	۱/۴۰۸	۱/۵۳۰	۱/۶۴۰
10^{-4}	مطالعه حاضر	۱/۳۷۸	۱/۵۱۰	۱/۶۵۱
	خطا* (%)	۲/۱۳۱	۱/۳۰۷	۰/۶۷۱
	مرجع [۲۵]	-	-	۳/۹
10^{-2}	مرجع [۲۳]	۲/۹۸۸	۳/۴۲۲	-
	مرجع [۹]	۲/۹۸۳	۳/۵۵۵	۳/۹۱
	مطالعه حاضر	۳/۰۱۴	۳/۴۶۳	۳/۹۴۶
خطا* (%)	۱/۰۳۹	۲/۵۸۸	۰/۹۲۱	
ج- $Ra_m = 10^5$				
Da	ε	۰/۴	۰/۶	۰/۹
10^{-2}	مرجع [۲۵]	-	-	۳/۹
	مرجع [۲۳]	۲/۹۸۸	۳/۴۲۲	-
	مرجع [۹]	۲/۹۸۳	۳/۵۵۵	۳/۹۱
10^{-4}	مطالعه حاضر	۳/۰۱۴	۳/۴۶۳	۳/۹۴۶
	خطا* (%)	۱/۰۳۹	۲/۵۸۸	۰/۹۲۱

جدول ۱: مقادیر خطای نسبی عدد ناسلت متوسط در شبکه‌های مختلف نسبت به شبکه 212×212 در $\varepsilon=0/6$ و $Ra=10^5$

Table 1. Relative error of the average Nusselt numbers for different grid sizes in the case of $Ra=10^5$ and $\varepsilon=0.6$

N						
Da	۶۴	۹۴	۱۲۴	۱۵۴	۱۷۴	۱۹۲
10^{-4}	۲/۲۳	۱/۱	۰/۶۵	۰/۲۷۸	۰/۱۸۶	۰/۰۹۳
10^{-2}	۱/۴	۰/۷۸	۰/۴۳	۰/۲۶	۰/۱۴۴	۰/۰۸

ادعا نمود که در این تعداد سلول‌ها، حل عددی مستقل از شبکه محاسباتی می‌باشد. بنابراین برای اجتناب از هرگونه وابستگی تحلیل به شبکه، در این تحقیق کلیه محاسبات مربوط به $Ra=10^5$ از شبکه 192×192 استفاده می‌شود. به همین ترتیب، در جدول ۲ شبکه‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر، برای رایلی‌های مختلف ارائه شده‌اند.

جدول ۲: شبکه‌های مختلف استفاده شده در تحقیق حاضر

Table 2. Different grids used in the present simulations

Ra	10^3	10^4	10^5
$N_x \times N_y$	128×128	128×128	192×192

۴- ارزیابی صحت نتایج

در این بخش صحت نتایج حاصل از حل عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور، نتایج به‌دست‌آمده از حل عددی حاضر به روش شبکه بولتزمن، در دو حالت با نتایج موجود در این زمینه مقایسه می‌شود که عبارتند از:

۱. بررسی انتقال حرارت جابجایی آزاد در حضور و عدم حضور ماده متخلخل در محفظه
۲. بررسی انتقال حرارت جابجایی آزاد در حضور دو لایه متخلخل افقی

۴-۱- بررسی انتقال حرارت جابجایی آزاد در حضور و عدم حضور ماده متخلخل در محفظه

در این قسمت، انتقال حرارت جابجایی آزاد در یک محفظه مطابق با هندسه ترسیم شده در شکل ۱ برای دو حالت حدی بررسی می‌شود. در اولین حالت انتقال حرارت جابجایی آزاد زمانیکه ضخامت لایه متخلخل برابر با طول محفظه مربعی است ($S/L=1$)، بررسی می‌شود. در این حالت مقادیر عدد ناسلت متوسط از حل عددی حاضر با نتایج منتشرشده در این زمینه [۹، ۲۳ و ۲۵] در بازه عدد رایلی $10^3 \leq Ra \leq 10^5$ ، عدد دارسی $10^{-2} \leq Da \leq 10^{-4}$ و تخلخل ۰/۹، ۰/۶، ۰/۴ برای یک محفظه متخلخل همگن مورد بررسی قرار گرفته‌است. مقادیر عدد ناسلت متوسط از حل عددی حاضر به روش شبکه بولتزمن در جدول ۳ گزارش شده است. همانطور که در این جدول نشان داده شده است، نتایج به‌دست‌آمده از حل حاضر تطابق خوبی با

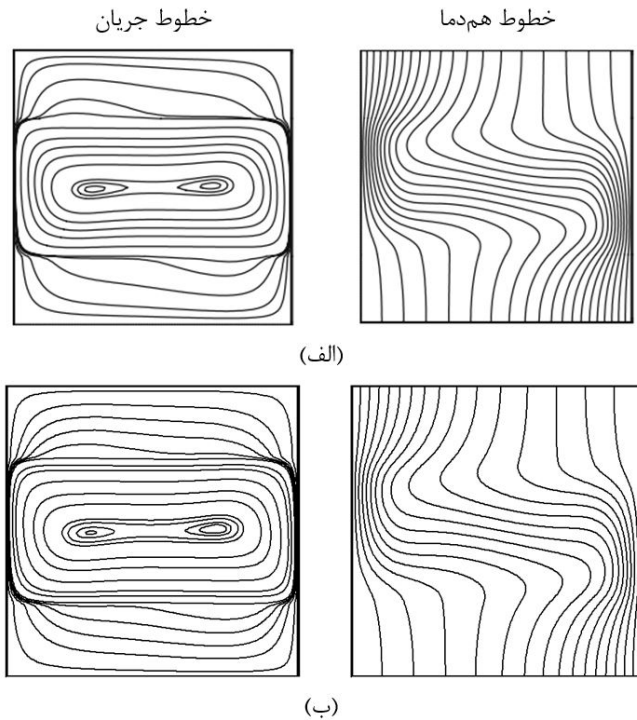


Fig. 2. Streamlines and isotherm contours, a) results of Chen et al. [11], b) present results for $Da=10^{-5}$, $Ra=10^5$, $\epsilon=0.4$, $Pr=1$.

شکل ۲: مقایسه خطوط جریان و هم‌دما (الف) نتایج چن و همکاران [۱۱] (ب) تحقیق حاضر در $Da=10^{-5}$ ، $Ra=10^5$ ، $\epsilon=0.4$ و $Pr=1$

جدول ۵: مقایسه مقادیر ناسلت در دیواره سرد برای حل عددی حاضر و نتایج چن و همکاران [۱۱]

Da	مرجع [۱۱]	حل حاضر	خطا (%)
10^{-6}	۲/۴۷۶	۲/۴۴۹	۱/۱
10^{-5}	۲/۴۸۵	۲/۵۰۲	۰/۶
10^{-4}	۲/۶۱۵	۲/۷۵۲	۵/۲
10^{-3}	۳/۲۰۴	۳/۳۵	۴/۵۶
10^{-2}	۳/۷۴۰	۳/۹۰	۴/۲۷
10^{-1}	۳/۹۱	۴/۰۷	۴/۱

۵- نتایج

همان‌طور که گفته شد، مشخصات لایه متخلخل از جمله عدد داری، ضریب تخلخل، موقعیت و ضخامت آن می‌تواند تاثیر زیادی بر الگوی جریان و میزان حرارت منتقل شده از محفظه داشته باشد. در این قسمت، قبل از بررسی اثر ضخامت لایه متخلخل عمودی (شکل ۱) بر الگوی جریان و میزان حرارت منتقل شده از محفظه، به بررسی اثر مشخصات لایه متخلخل از جمله عدد داری در رایلی‌های مختلف و همچنین اثر موقعیت لایه متخلخل عمودی بر انتقال حرارت و یا به عبارتی بر مقادیر عدد ناسلت متوسط پرداخته

در جدول ۴ مقادیر عدد ناسلت متوسط در محفظه در غیاب ماده متخلخل با نتایج موجود در مطالعات قبلی [۲۱ و ۲۵] مقایسه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، خطای نسبی کمتر از ۲٪ بوده که حاکی از تطابق مناسب حل عددی حاضر و نتایج موجود در مطالعات قبلی می‌باشد.

جدول ۴: مقایسه مقادیر ناسلت متوسط در غیاب ماده متخلخل

Table 4. Comparison of the average Nusselt numbers in the absence of porous medium

Ra	$Pr=1$		$Pr=0.71$	
	مرجع [۲۵]	حل حاضر	خطا (%)	مرجع [۲۱]
10^3	۱/۱۱۷	۱/۱۳۴	۱/۱۲	۱/۱۲۱
10^4	۲/۲۴۳	۲/۲۸۲	۰/۷	۲/۲۸۶
10^5	۴/۵۷۹	۴/۶۲۸	۰/۰۹	۴/۵۴۶

۴-۲ بررسی انتقال حرارت جابجایی آزاد در حضور دو لایه متخلخل افقی همان‌طور که ذکر شد، یکی از ویژگی‌های روش شبکه بولتزمن مدل‌سازی صحیح رفتار سیال در فصل مشترک بین سیال و لایه متخلخل می‌باشد. به این منظور، نتایج به‌دست‌آمده از کد عددی حاضر با نتایج چن و همکاران [۱۱] در حالتی که دو لایه متخلخل افقی در قسمت بالا و پایین محفظه قرار داشته و ضخامت هریک از لایه‌های متخلخل $0.25L$ می‌باشد، مقایسه شده‌است. در مطالعه چن و همکاران [۱۱] از معادلات ناویر-استوکس تعمیم‌یافته به همراه شرط مرزی پرش تنش در مرز بین لایه متخلخل و سیال استفاده شده است. در این مقاله، نتایج به‌دست‌آمده از کد عددی با نتایج چن و همکاران [۱۱] در حالتیکه ضرایب β_1 و β_2 در رابطه هم‌دما و جریان به‌دست‌آمده از حل عددی حاضر به روش شبکه بولتزمن با نتایج چن و همکاران [۱۱] برای مقادیر $Da=10^{-5}$ ، $Ra=10^5$ و $\epsilon=0.4$ و $Pr=1$ در شکل ۲ نشان داده شده‌است. همان‌طور که خطوط جریان در این شکل نشان می‌دهد به دلیل نفوذ پذیری کم دو لایه متخلخل، سیال در ناحیه بین دو لایه متخلخل افقی که در قسمت بالا و پایین محفظه قرار گرفته‌اند، محبوس شده است.

به منظور مقایسه بیشتر، در جدول ۵ مقادیر عدد ناسلت بر روی دیواره سرد از حل عددی حاضر با نتایج چن و همکاران [۱۱] در مقادیر $\epsilon=0.4$ و $Ra=10^5$ و $Pr=1$ مقادیر اعداد داری مختلف ($10^{-6} \leq Da \leq 10^{-1}$) مقایسه شده‌است. بیشینه خطای نسبی در تحقیق حاضر کمتر از ۶٪ می‌باشد. البته این نکته قابل توجه است که در تحقیق چن و همکاران [۱۱] به دلیل تغییر ضرایب β_1 و β_2 در بازه ۱- تا ۱ عدد ناسلت بر روی دیواره سرد با دقت ۵٪ گزارش شده است که این یکی از علت‌های افزایش خطای نسبی با تحقیق حاضر به شمار می‌رود.

مکانیزم انتقال حرارت جابجایی در حال شدت گرفتن است) اما به دلیل اینکه در این حالت عدد رایلی اصلاح شده از مرتبه می باشد، سیال قدرت نفوذ زیادی در داخل لایه متخلخل نداشته و رژیم غالب در این ناحیه هنوز به صورت هدایت حرارتی می باشد. با افزایش عدد دارسی ($Da=10^{-6}$) و به تبع آن عدد رایلی اصلاح شده، همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود در اعداد رایلی اصلاح شده از مرتبه 10^2 ، نفوذپذیری و سرعت سیال در داخل لایه متخلخل بالا رفته و رژیم غالب انتقال حرارت در لایه متخلخل به رژیم جابجایی تبدیل می شود.

با تغییر ضخامت لایه متخلخل مطابق با شکل ۶ اثرات تغییر عدد دارسی و رایلی قابل مشاهده است. در شکل مذکور، خطوط جریان و همدمای حضور لایه متخلخل عمودی میانی (موقعیت ۲) برای ضخامت ($S/L=4/6$) نشان داده شده اند. همانند حالت قبل در یک رایلی مشخص با افزایش عدد دارسی، مکانیزم های غالب در ناحیه لایه متخلخل از هدایت حرارتی برای دارسی های کوچک ($Da=10^{-6}$) تا جابجایی برای دارسی های بزرگتر ($Da=10^{-4}$) تغییر می کنند. همچنین گردهای ایجاد شده در دو طرف لایه متخلخل، با کاهش عدد دارسی در یک رایلی مشخص از گوشه ها به طرف مرکز حرکت می کنند.

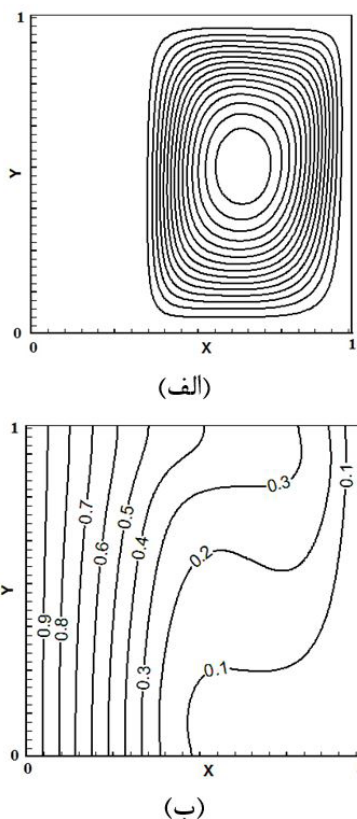


Fig. 3. a) Streamlines and b) isotherm contours for a vertical porous layer near the hot wall (position 1) for $Da=10^{-6}$, $Ra=10^5$, $\epsilon=0.4$, $Pr=1$ and $S/L=1/3$.

شکل ۳: الف) خطوط جریان (ب) همدمای برای لایه متخلخل عمودی در کنار دیواره گرم (موقعیت ۱) برای $Da=10^{-6}$ ، $Pr=1$ ، $Ra=10^5$ ، $\epsilon=0.4$ و $S/L=1/3$

می شود. به این منظور، ابتدا ضخامت لایه متخلخل ثابت و برابر با $S/L=1/3$ در نظر گرفته شده (شکل ۱) و سپس اثرات لایه متخلخل عمودی در این ضخامت ثابت در سه موقعیت در محفظه بررسی می شود. در یک موقعیت لایه متخلخل در کنار دیواره گرم قرار گرفته که در این حالت مطابق شکل ۱، $X/L=0$ می باشد. برای اختصار به این حالت، موقعیت ۱ اطلاق شده است. در حالت دوم لایه متخلخل در وسط محفظه قرار گرفته و در این حالت که به آن موقعیت ۲ اطلاق شده است، مطابق با شکل ۱، $X/L=1/3$ می باشد. در موقعیت سوم لایه متخلخل در کنار دیواره گرم قرار گرفته و $X/L=2/3$ همان طور که انتظار می رود، در این حالت (موقعیت ۳) به دلیل تقارن هندسی مساله، نتایج مشابه با موقعیت ۱ (حالتی که لایه متخلخل در کنار دیواره گرم قرار می گیرد) می باشد. در این نتایج، از شبکه مربعی به ابعاد 132×132 ، 132×192 و 192×192 بترتیب برای اعداد رایلی 10^2 ، 10^4 و 10^5 استفاده شده است. همان طور که ذکر شد، ابتدا به بررسی اثر مشخصات لایه متخلخل مانند عدد دارسی در رایلی های مختلف بر الگوی جریان و انتقال حرارت پرداخته می شود. از جمله عواملی که میزان نفوذپذیری سیال در داخل لایه متخلخل را مشخص می کند، عدد دارسی می باشد. همان طور که انتظار می رود، هرچه عدد دارسی کمتر باشد، لایه متخلخل در مقابل جریان سیال، از خود مقاومت بالاتری نشان داده و در نتیجه میزان نفوذپذیری سیال در داخل لایه متخلخل کمتر می باشد. از جمله دیگر عواملی که میزان نفوذ سیال را در داخل لایه متخلخل مشخص می کنند، عدد رایلی می باشد. همان طور که مشخص است هرچه عدد رایلی بالاتر رود، سرعت و به تبع آن قدرت سیال برای غلبه بر نیروی پسای ناشی از حضور ماده متخلخل بالا می رود. بنابراین دو عدد رایلی و دارسی در کنار یکدیگر می توانند تعیین کننده میزان نفوذپذیری سیال در لایه متخلخل و به تبع آن مکانیزم غالب بر انتقال حرارت باشند. در شکل های ۳ تا ۵ خطوط جریان و همدمای برای $\epsilon=0.4$ ، $Pr=1$ ، $Ra=10^5$ و $S/L=1/3$ برای مقادیر مختلف عدد دارسی نشان داده شده است. با مقایسه شکل های مذکور، می توان روند تغییرات الگوی جریان سیال و انتقال حرارت در لایه متخلخل را در مقادیر مختلف اعداد دارسی و رایلی مشاهده کرد. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می شود، با قرارگیری لایه متخلخل در کنار دیواره گرم در اعداد دارسی بسیار کوچک ($Da=10^{-6}$) که عدد رایلی اصلاح شده از مرتبه 10^{-1} می باشد، نفوذ سیال و به تبع آن سرعت سیال در داخل لایه متخلخل بسیار ناچیز بوده بطوریکه می توان ادعان کرد که سیال تمیز در داخل ناحیه سیال محصور شده و در مرز بین سیال و لایه متخلخل لایه مرزی ایجاد شده است. بنابراین همان طور که در شکل ۳ نیز قابل مشاهده است، خطوط دما در داخل این لایه به صورت خطوط مستقیم (عمودی) هستند که این نشان دهنده هدایت حرارتی در این ناحیه می باشد. بعلاوه همان طور که در شکل ۴ مشاهده می شود، با افزایش عدد دارسی ($Da=10^{-6}$) میزان نفوذپذیری سیال در داخل لایه متخلخل افزایش می یابد. هرچند در این حالت نفوذ سیال در داخل لایه متخلخل افزایش یافته و خطوط همدمای کمی از حالت افقی خارج شده است (به عبارتی

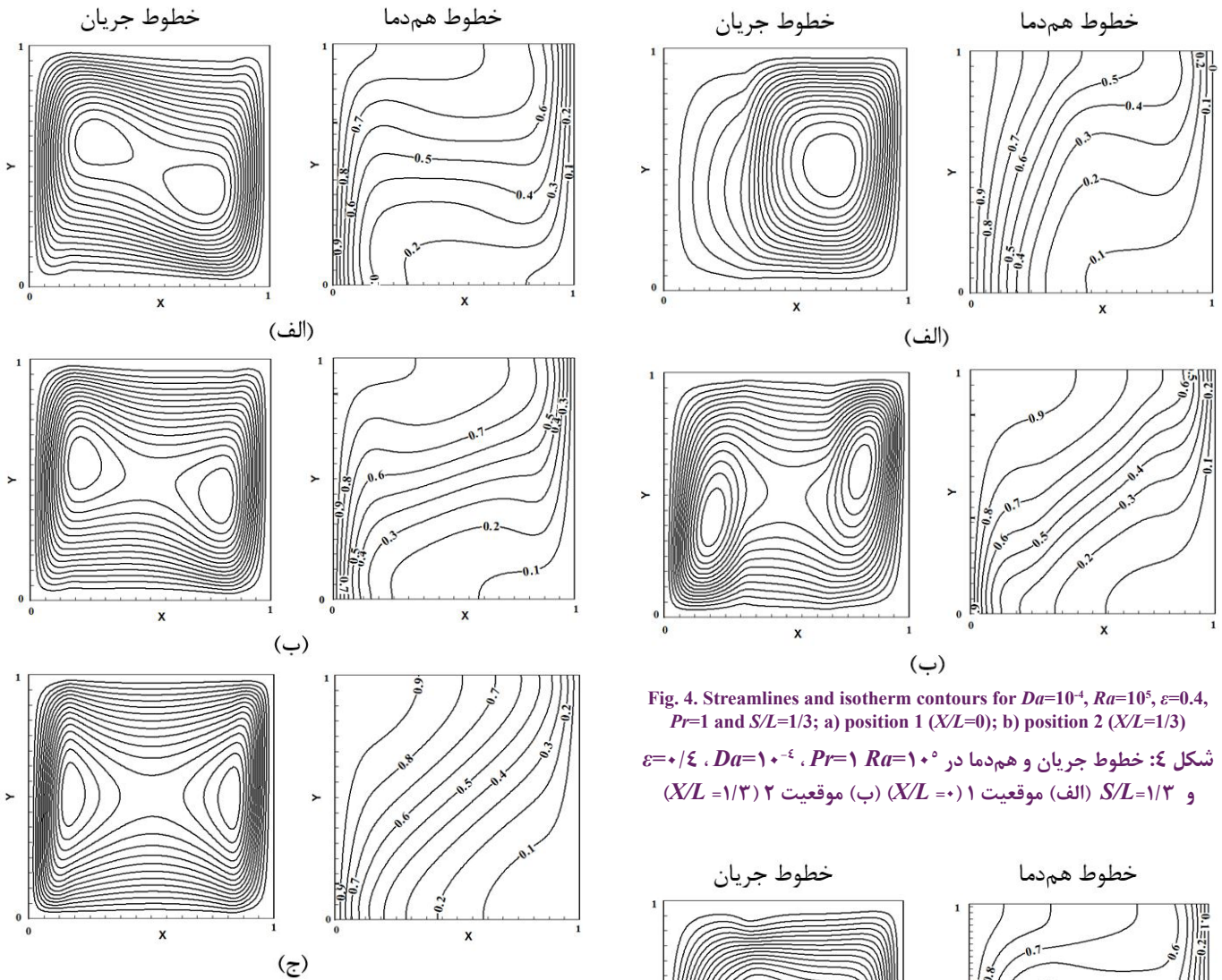


Fig. 6. Streamlines and isotherm contours for position 2 ($X/L=1/6$) in the case of $Ra=10^5$, $S/L=4/6$, $\varepsilon=0.4$, $Pr=1$; a) $Da=10^{-2}$; b) $Da=10^{-3}$; c) $Da=10^{-4}$

شکل ۶: خطوط جریان و هم‌دما برای موقعیت ۲ ($X/L=1/6$) در $\varepsilon=0.4$ ، $Pr=1$ و $Ra=10^5$ و $S/L=4/6$ (الف) $Da=10^{-2}$ (ب) $Da=10^{-3}$ (ج) $Da=10^{-4}$

در ادامه در جدول ۶ برای بررسی اثر موقعیت لایه متخلخل بر میزان حرارت منتقل شده از محفظه، مقادیر عدد ناسلت متوسط در اعداد دارسی و رایلی مختلف برای یک لایه متخلخل با ضخامت ثابت ($S/L=1/3$) در موقعیت‌های ۱ و ۲ گزارش شده است. طبق این جدول، در یک مقدار مشخص عدد رایلی و دارسی، همواره مقدار عدد ناسلت متوسط در حالتی که لایه متخلخل عمودی در وسط محفظه قرار دارد (موقعیت ۲) بیشتر از حالتی است که لایه متخلخل در کنار دیواره گرم قرار گرفته است (موقعیت ۱). زیرا سیالی که در مجاورت دیواره گرم محفظه قرار می‌گیرد، دارای سرعت بالا بوده و قدرت انتقال حرارت جابجایی آزاد در این ناحیه بالا می‌باشد. بنابراین هنگامی که لایه متخلخل در کنار دیواره گرم قرار می‌گیرد، با ایجاد مقاومت در برابر حرکت سیال در امتداد دیواره گرم باعث کاهش سرعت سیال و در

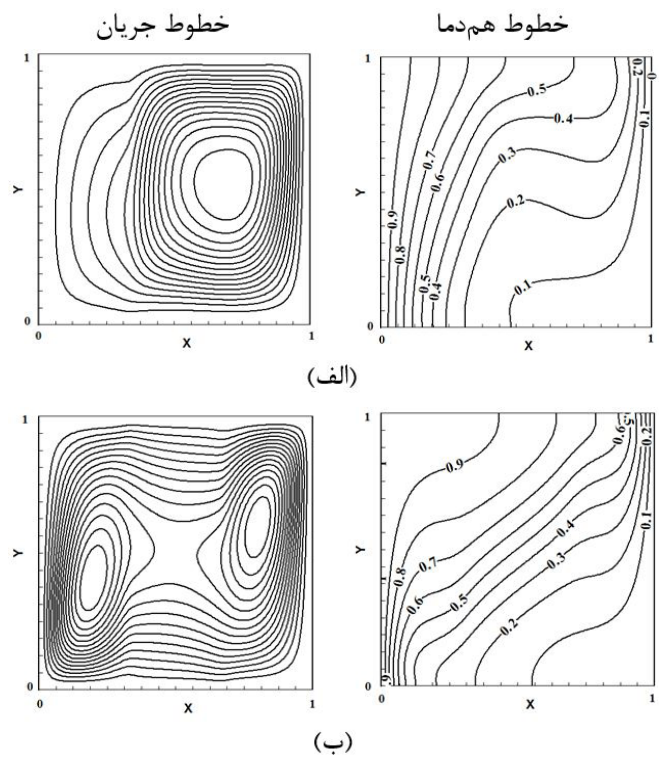


Fig. 4. Streamlines and isotherm contours for $Da=10^{-4}$, $Ra=10^5$, $\varepsilon=0.4$, $Pr=1$ and $S/L=1/3$; a) position 1 ($X/L=0$); b) position 2 ($X/L=1/3$)

شکل ۴: خطوط جریان و هم‌دما در $\varepsilon=0.4$ ، $Pr=1$ و $Ra=10^5$ و $Da=10^{-4}$ و $S/L=1/3$ (الف) موقعیت ۱ ($X/L=0$) (ب) موقعیت ۲ ($X/L=1/3$)

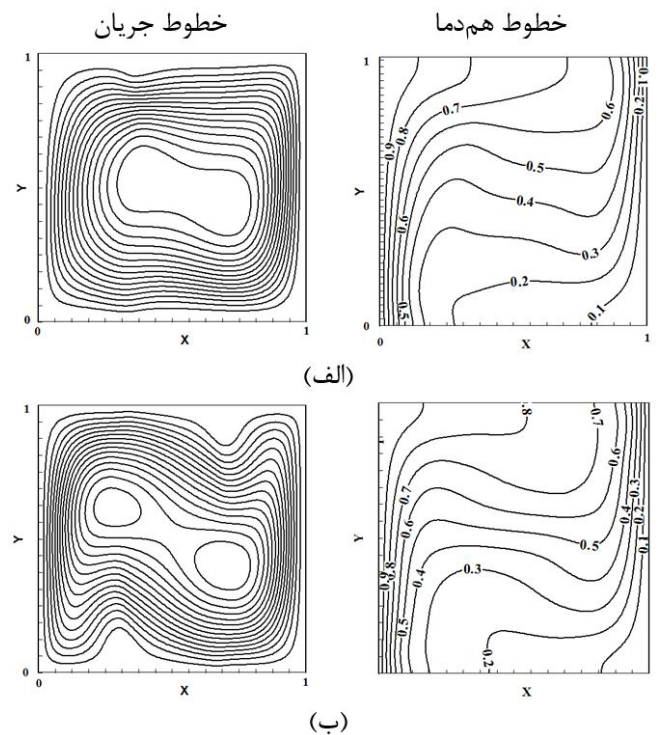
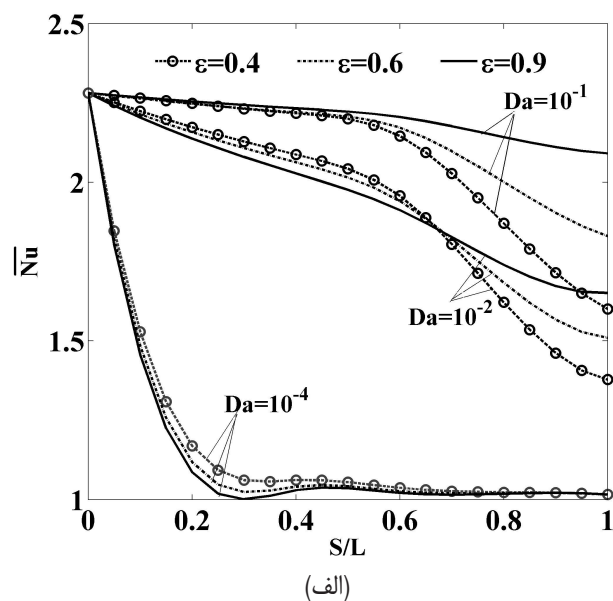


Fig. 5. Streamlines and isotherm contours for $Da=10^{-2}$, $Ra=10^5$, $\varepsilon=0.4$, $Pr=1$ and $S/L=1/3$; a) position 1 ($X/L=0$); b) position 2 ($X/L=1/3$)

شکل ۵: خطوط جریان و هم‌دما در $\varepsilon=0.4$ ، $Pr=1$ و $Ra=10^5$ و $Da=10^{-2}$ و $S/L=1/3$ (الف) موقعیت ۱ ($X/L=0$) (ب) موقعیت ۲ ($X/L=1/3$)

رایلی اصلاح شده بسیار پایین از مرتبه ۱ ($Ra=10^4$ و $Da=10^{-4}$) با افزایش ضخامت لایه متخلخل، مقاومت لایه متخلخل در مقابل حرکت سیال که دارای سرعت کمی می‌باشد، بالا رفته و افت شدیدی در مقدار عدد ناسلت متوسط ایجاد می‌شود. بعلاوه به دلیل سرعت پایین سیال و نفوذپذیری کم لایه متخلخل رژیم انتقال حرارت در این حالت به صورت هدایت حرارتی بوده و با افزایش بیشتر ضخامت لایه متخلخل تغییر چندانی در مقادیر عدد ناسلت مشاهده نمی‌شود. با افزایش عدد رایلی اصلاح شده مکانیزم انتقال حرارت جابجایی شدت می‌گیرد. در رایلی اصلاح شده از مرتبه 10^5 ($Ra=10^5$) و $Da=10^{-4}$ ، هرچند مکانیزم جابجایی در حال شدت گرفتن است ولی مکانیزم غالب انتقال حرارت هنوز به صورت هدایت حرارتی می‌باشد. در این حالت نیز به دلیل سرعت کم سیال، با افزایش ضخامت لایه متخلخل مقاومت در برابر حرکت سیال با سرعت کم افزایش یافته و عدد ناسلت متوسط به صورت تقریباً خطی سیر نزولی را از خود نشان می‌دهد. با افزایش عدد رایلی اصلاح شده از مرتبه 10^2 و 10^3 سرعت سیال بالا رفته و انتقال حرارت جابجایی آزاد شدت می‌گیرد. بنابراین در ضخامت کم لایه متخلخل به دلیل کم اثر بودن مقاومت لایه متخلخل در مقابل حرکت سیال، عدد ناسلت متوسط با شیب کمی کاهش می‌یابد. ولی با افزایش ضخامت لایه متخلخل و مقاومت ایجاد شده در مقابل جریان سیال به دلیل حضور لایه متخلخل، عدد ناسلت متوسط به شدت سیر کاهشی از خود نشان می‌دهد.

نکته قابل توجه اثر ضریب تخلخل و ضخامت لایه متخلخل بر میزان حرارت منتقل شده و عدد ناسلت متوسط می‌باشد. در اعداد رایلی اصلاح شده پایین (از مرتبه 10^{-1} و 10^1) با توجه به اینکه رژیم غالب بر انتقال حرارت در لایه متخلخل شبیه به هدایت حرارتی می‌باشد، با افزایش ضریب تخلخل تنها سطح انتقال حرارت بین سیال و ماده متخلخل کم شده و همین امر باعث کاهش میزان حرارت منتقل شده می‌شود. بنابراین همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود با افزایش ضریب تخلخل مقدار عدد ناسلت متوسط



نتیجه کاهش میزان انتقال حرارت از محفظه و به تبع آن عدد ناسلت متوسط می‌شود.

جدول ۶: بررسی اثر موقعیت لایه متخلخل عمودی بر روی عدد ناسلت متوسط ($S/L=1/3$)
Table 6. The effects of vertical porous layer position on the average Nusselt number for $S/L=1/3$

Da	10^2	10^3	10^4	10^5
موقعیت ۱	۱/۹۱۳	۱/۰۶۶	۳/۹۴۰	۴/۲۶۶
موقعیت ۲	۲/۱۱۵	۱/۰۸۵	۲/۱۷۷	-
موقعیت ۱	-	۲/۱۷۷	-	-
موقعیت ۲	-	۲/۹۲۸	-	-

پس از بررسی اثر موقعیت لایه متخلخل، در ادامه به بررسی اثر ضخامت لایه متخلخل در حالتی که لایه متخلخل عمودی در وسط محفظه قرار دارد (موقعیت ۲) پرداخته می‌شود تا میزان حرارت منتقل شده از محفظه در این حالت بحرانی بررسی شود.

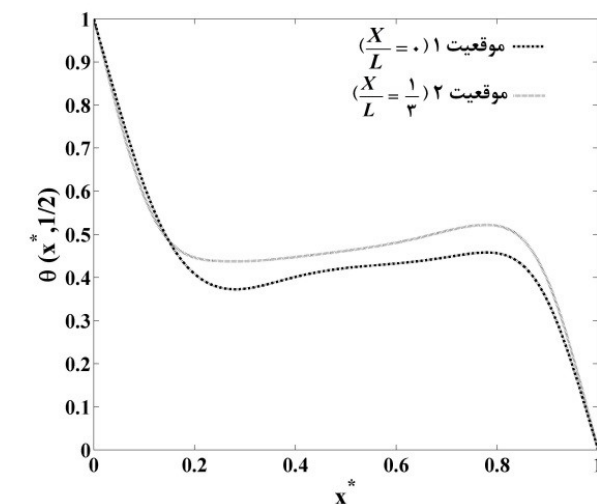


Fig. 7. Non-dimensional temperature profile in the midsection of cavity along the x-axis for $Da=10^{-2}$, $Ra=10^5$, $\varepsilon=0.4$, $Pr=1$ and $S/L=1/3$

شکل ۷: نمودار دمای بی بعد در مقطع میانی محفظه در راستای محور x ها در $S/L=1/3$ و $\varepsilon=0.4$ ، $Da=10^{-2}$ ، $Pr=1$ ، $Ra=10^5$

در شکل ۸ و همچنین جدول ۷، مقادیر عدد ناسلت متوسط بر حسب ضخامت لایه متخلخل میانی (موقعیت ۲) برای مقادیر مختلف عدد رایلی، داری و ضریب تخلخل رسم شده است. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که در ضخامت مشخصی از لایه متخلخل و در یک عدد رایلی و ضریب تخلخل مشخص، عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد داری به دلیل افزایش سرعت سیال در لایه متخلخل افزایش می‌یابد. به علاوه مطابق با شکل ۸، در یک عدد رایلی، داری و ضریب تخلخل مشخص، مقدار عدد ناسلت متوسط با افزایش ضخامت لایه متخلخل، کاهش می‌یابد. این روند کاهشی با تغییر عدد داری و رایلی رفتار گوناگونی از خود نشان می‌دهد. در عدد

جدول ۷: اثر موقعیت لایه متخلخل بر عدد ناسلت متوسط در $Ra=10^5$

Table 7. The effects of porous layer position on the average Nusselt number for $Ra=10^5$

$Da=10^{-4}$	$Da=10^{-3}$	$Da=10^{-2}$	ε	S/L
۴/۶۲۸	۴/۶۲۸	۴/۶۲۸	-	۰
۳/۶۱۳	۴/۴	۴/۴۴۱	۰/۴	۱/۶
۳/۳۰۸	۴/۴۰۳	۴/۵۲۷	۰/۶	
۲/۹۵۱	۴/۳۵۲	۴/۵۸۴	۰/۹	۲/۶
۲/۹۲۸	۴/۱۷۸	۴/۲۶۶	۰/۴	
۲/۵۳۸	۴/۱۷۸	۴/۴۲۷	۰/۶	۳/۶
۲/۱۴۴	۴/۰۸	۴/۵۳۸	۰/۹	
۲/۳۸۱	۳/۹۸۴	۴/۲۲۷	۰/۴	۴/۶
۱/۹۸۸	۳/۹۴۷	۴/۳۷	۰/۶	
۱/۶۳۹	۳/۸۰۴	۴/۴۸۸	۰/۹	۵/۶
۱/۹۷۹	۳/۸۲۷	۴/۲۸۵	۰/۴	
۱/۶۵۱	۳/۷۲۷	۴/۳۷۳	۰/۶	۱
۱/۳۹	۳/۵۳۸	۴/۴۴۸	۰/۹	
۱/۴۵	۳/۱۳	۳/۹۹۵	۰/۴	۱
۱/۳۲۵	۳/۰۶۲	۴/۱۴۲	۰/۶	
۱/۲۲۳	۲/۹۵۳	۴/۲۶۸	۰/۹	۱
۱/۰۷۴	۲/۰۴۶	۳/۰۱۴	۰/۴	
۱/۰۷۷	۲/۲۰۲	۳/۴۶۳	۰/۶	۱
۱/۰۷۹	۲/۳۴۳	۳/۹۴۶	۰/۹	

افزایش یافته و در ضخامت‌های کمتر از آن رفتاری عکس آن مشاهده می‌شود. همچنین در اعداد رایلی اصلاح‌شده بالا از مرتبه (10^3) مکانیزم انتقال حرارت جابجایی در لایه متخلخل و به تبع آن در کل محفظه شدت گرفته و با افزایش تخلخل در لایه متخلخل سرعت سیال افزایش یافته که همین امر باعث افزایش عدد ناسلت متوسط می‌شود.

بنابراین همانطور که در شکل ۸ قابل مشاهده است در یک عدد رایلی و داری مشخص، بیشترین میزان حرارت منتقل شده از محفظه مربوط به حالتی است که کمترین مقدار ماده متخلخل و به تبع آن کمترین مقدار مقاومت در مقابل حرکت سیال وجود دارد. به علاوه در حالتی که ماده متخلخل در محفظه موجود نمی‌باشد و یا به عبارتی زمانی که ضخامت لایه متخلخل برابر با صفر باشد، میزان انتقال حرارت به بیشترین مقدار خود می‌رسد. در شکل ۸ (ج) درصد افزایش عدد ناسلت در حالت وجود ماده متخلخل لایه‌ای (در مقایسه با حالتی که محفظه پر از ماده متخلخل است یعنی $S/L=1$)، بر حسب اعداد مختلف S/L ترسیم شده است. سه نسبت تخلخل مختلف نیز در شکل قابل مشاهده است. همان گونه که مشاهده می‌شود و در شکل‌های ۸ (الف) و ۸ (ب) نیز قابل رویت است، در یک ضخامت مشخص، روند نمودار تغییر کرده و یک حالت بهینه در حوالی این نقطه دیده می‌شود که مربوط به

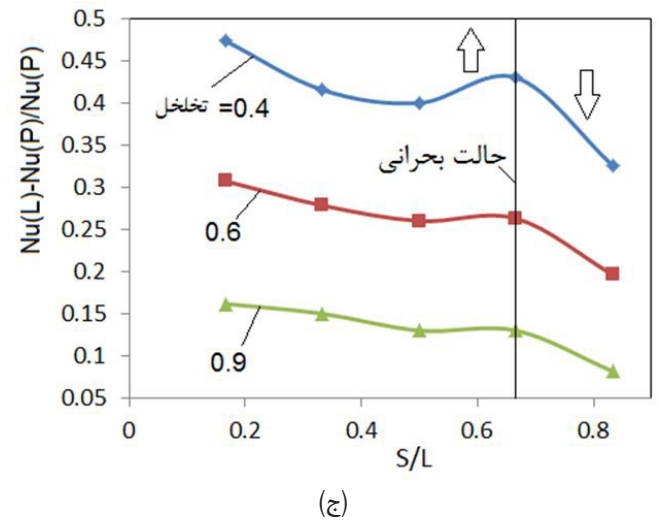
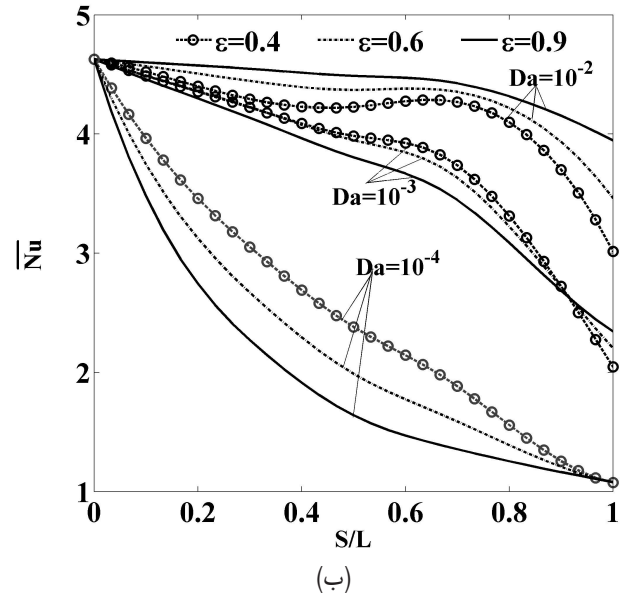


Fig. 8. The effects of porous layer in position 2 on the average Nusselt number for different porosities and $Pr=1$; a) $Ra=10^4$; b) $Ra=10^5$ and c) heat transfer enhancement in the case of $Ra=10^5$ and $Da=0.01$

شکل ۸: تاثیر ضخامت لایه متخلخل در موقعیت ۲ ($X/L=1/3$) بر مقادیر عدد ناسلت متوسط در سه تخلخل مختلف و $Pr=1$ ، (الف) $Ra=10^4$ ، (ب) $Ra=10^5$ و (ج) درصد بهبود انتقال حرارت در $Da=0.01$ و $Ra=10^5$

کاهش می‌یابد. در اعداد رایلی اصلاح‌شده متوسط از مرتبه (10^3) می‌توان اظهار داشت که سهم انتقال حرارت جابجایی و هدایت در ماده متخلخل با یکدیگر برابر می‌باشد. با توجه به اینکه در قسمت سیال، انتقال حرارت به صورت جابجایی آزاد می‌باشد، با افزایش ضخامت لایه متخلخل سهم انتقال حرارت هدایتی در محفظه افزایش می‌یابد. با توجه به این نکته، در حالتی که لایه متخلخل دارای ضریب تخلخل کمتری می‌باشد، سهم انتقال حرارت هدایتی نسبت به محفظه‌ای که دارای لایه متخلخل با ضریب تخلخل بالاتر می‌باشد، بیشتر بوده و عدد ناسلت متوسط با شیب بیشتری کاهش یافته است. به همین دلیل با توجه به شکل ۸، نقطه $(S/L)_{crit}$ دیده می‌شود که در آن با افزایش ضخامت لایه متخلخل، انتقال حرارت با افزایش ضریب تخلخل

ضخامت بی بعد $S/L=0/65$ است. در این شکل $Nu(L)$ و $Nu(P)$ به ترتیب مربوط به اعداد ناسلت محفظه پر از ماده متخلخل و محفظه با ماده متخلخل لایه‌ای هستند. همچنین با توجه به مقادیر عدد ناسلت متوسط گزارش شده در جدول ۳، در اعداد رایلی اصلاح شده در محدوده $10^3 \leq a \leq 10^5$ ، افزایش ضریب تخلخل تأثیر چندانی بر مقدار عدد ناسلت متوسط ندارد، زیرا در این بازه مکانیزم انتقال حرارت شبیه به هدایت حرارتی می‌باشد و تغییر ضریب تخلخل تأثیر چندانی بر میزان حرارت انتقالی ندارد. همچنین برای اعداد رایلی اصلاح شده در محدوده $Ra_m \geq 10$ ، با افزایش ضریب تخلخل ماده متخلخل، سرعت سیال در داخل لایه متخلخل افزایش یافته و به تبع آن میزان حرارت منتقل شده از محفظه و عدد ناسلت افزایش می‌یابد.

۶- جمع بندی

در این پژوهش، به شبیه‌سازی جریان سیال و انتقال حرارت جابجایی آزاد در یک محفظه دارای لایه متخلخل عمودی به روش شبکه بولتزمن پرداخته شده‌است. در واقع در این مطالعه با استفاده از روش شبکه بولتزمن بر اساس معادلات تعمیم یافته ناویر-استوکس پس از معتبرسازی نتایج به بررسی اثر موقعیت لایه متخلخل و سپس اثر ضخامت لایه متخلخل بر الگوی جریان و میزان حرارت منتقل شده از محفظه پرداخته شده است. از جمله مزایای روش شبکه بولتزمن در این مطالعه می‌توان به خطی بودن معادلات حاکم در این روش، امکان پردازش موازی، تولید شبکه آسان و کم‌هزینه و سرعت همگرایی و پایداری مناسب و نیز مدل‌سازی صحیح در سطح تماس سیال و لایه متخلخل اشاره نمود. با تغییر موقعیت و ضخامت لایه متخلخل عمودی و بررسی اثر اعداد بی بعد حاکم بر مساله به خصوص عدد رایلی، داری و ضریب تخلخل ماده متخلخل نتایج زیر مشاهده شد:

۱. با تغییر عدد رایلی اصلاح شده از مرتبه 10^{-1} تا مرتبه 10^3 میزان نفوذ سیال در داخل لایه متخلخل افزایش یافته و مکانیزم غالب انتقال حرارت از هدایت حرارتی تا جابجایی آزاد تغییر می‌کند.
۲. با مقایسه اعداد ناسلت متوسط به دست آمده در موقعیت‌های مختلف لایه متخلخل عمودی، می‌توان اظهار کرد که بیشترین میزان انتقال حرارت مربوط به حالتی است که لایه متخلخل عمودی در وسط محفظه (موقعیت ۲) قرار دارد.
۳. در اعداد رایلی، داری و ضریب تخلخل ثابت با افزایش ضخامت لایه متخلخل میزان انتقال حرارت و به تبع آن عدد ناسلت عمدتاً روند کاهشی را از خود نشان می‌دهند. بعلاوه روند کاهش عدد ناسلت متوسط با تغییرات عدد رایلی اصلاح شده و به تبع آن سرعت حرکت سیال در داخل لایه متخلخل قابل توجیه است.
۴. در اعداد رایلی اصلاح شده متوسط از مرتبه (10^3) با افزایش ضخامت لایه متخلخل در مقادیر مختلف ضریب تخلخل، ضخامت بحرانی $((S/L)_{crit})$ لایه متخلخل که در آن ضریب تخلخل لایه متخلخل تأثیری بر انتقال حرارت ندارد، مشاهده

می‌شود.

۵. با تغییر ضخامت لایه متخلخل، بیشترین میزان انتقال حرارت مربوط به زمانی است که لایه متخلخل دارای ضخامت صفر و کمترین مربوط به زمانی است که لایه متخلخل ضخامت به ابعاد محفظه داشته و محفظه از ماده متخلخل همگن پر شده است.

فهرست علائم

سرعت در مقیاس شبکه بولتزمن	c
ظرفیت گرمایی ویژه	c_p
سرعت صوت در مقیاس شبکه بولتزمن	c_s
عددی داری	Da
سرعت محلی ذرات در روش شبکه بولتزمن	\vec{e}_i
تابع توزیع سرعت	f_i
نیروی خارجی (N)	\vec{F}
نیرو در روش شبکه بولتزمن	F_i
تابع توزیع دما	g_i
شتاب جاذبه (m/s^2)	\vec{g}
نفوذپذیری ماده متخلخل	K
عدد ناسلت متوسط	\overline{Nu}
فشار (Pa)	P
عدد رایلی	Ra
عدد رایلی اصلاح شده	Ra_m
زمان (s)	t
دما (K)	T
مؤلفه افقی سرعت (m/s)	u
مؤلفه عمودی سرعت (m/s)	v
مؤلفه افقی مکان (m)	x
مؤلفه عمودی مکان (m)	y
ضریب پخش حرارتی (m^2/s)	α
ضریب انبساط حجمی هوا (1/K)	β
گام زمانی در شبکه بولتزمن	δ_t
ضریب تخلخل	ε
دمای بی بعد	θ
جرم حجمی (kg/m^3)	ρ
نسبت ظرفیت گرمایی فاز جامد به فاز سیال در ماده متخلخل	σ

“Natural Convection in a Cavity Filled with Porous Layers on the Top and Bottom Walls”, *Transport in Porous Media* 78 (2009): 259–276.

- [12] Tong, T. W. and E. Subramanian, “Natural Convection in Rectangular Enclosures Partially Filled with a Porous Medium.”, *International journal of heat and fluid flow* 7 (1986): 3–10.
- [13] Nishimura, T., T. Takumi, M. Shiraishi, Y. Kawamura and H. Ozoe, “Numerical Analysis of Natural Convection in a Rectangular Enclosure Horizontally Divided into Fluid and Porous Regions”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 29 (1986): 889–898.
- [14] Du, Z. G. and E. Bilgen, “Natural Convection in Vertical Cavities with Partially Filled Heat-generating Porous Media.”, *Numerical Heat Transfer A-Appl.* 18 (1990): 371–386.
- [15] Nakayama, A., R. Jones, D. Naylor and P.H. Oosthuizen, “Free Convection in a Horizontal Enclosure Partly Filled With a Porous Medium”, *Journal of thermophysics and heat transfer*, (1995): 797–800.
- [16] Beckermann, C., R. Viskanta and S. Ramadhyani, “Natural Convection in Vertical Enclosures Containing Simultaneously Fluid and Porous Layers”, *Journal of Fluid Mechanics* 186 (1988): 257-284.
- [17] Chen, S. and G. D. Doolen, “Lattice Boltzmann Method for Fluid Flows”, *Annual review of fluid mechanics* 30 (1998): 329-364.
- [18] Succi, S., “*The lattice Boltzmann equation for fluid dynamics and beyond*”, Oxford University Press, New York, 2001.
- [19] Sukop, M. C. and D. T. Thorne, “*Lattice Boltzmann Modeling*”, Springer, New York, 2006.
- [20] Alexander, F. J., H. Chen, S. Chen and G. D. Doolen, “Lattice Boltzmann Model for Compressible Fluids”, *Physical Review A*, 46 (1992): 1967-1970.
- [21] Dixit, H.N. and V. Babu, “Simulation of High Rayleigh Number Natural Convection in a Square Cavity Using the Lattice Boltzmann Method”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49 (2006): 727-739.
- [22] Guo, Z. and T. S. Zhao, “Lattice Boltzmann Model for Incompressible Flows Through Porous Media”, *Physical Review E*, 66 (2002): 036304.
- [23] Guo, Z. and T. S. Zhao, “A Lattice Boltzmann Model for Convection Heat Transfer in Porous Media”, *Numerical Heat Transfer B-Fund.*, 47 (2005): 157-177.
- [24] Rong, F. M., Z. L. Guo, JH Lu and B.C. Shi, “Numerical

زمان آرامش مربوط به سرعت در روش شبکه بولتزمن τ

زمان آرامش مربوط به دما در روش شبکه بولتزمن τ'

لزجت دینامیکی (kg/m.s) μ

لزجت سینماتیکی (m²/s) ν

منابع

- [1] Cheng, P., “*Heat Transfer in Geothermal Systems*”, *Advances in Heat Transfer*. 14, 1-105, 1978.
- [2] Nield, D.A. and A. Bejan, “*Convection in Porous Media*”, 3rd ed. Springer, New York, 2006.
- [3] Rajamani, R., C. Srinivas, P. Nithiarasu and K. N. Seetharamu, “Natural Convection in Axisymmetric Porous Bodies”, *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow* 5 (1995): 829-837.
- [4] Poulikakos, D. and A. Bejan, “The Departure From Darcy Flow in Natural Convection in a Vertical Porous Layer”, *Physics of Fluids* 28 (1985): 3477-3484.
- [5] Durlofsky, L. and J. F. Brady, “Analysis of The Brinkman Equation as a Model for Flow in Porous Media”, *Physics of Fluids* 30 (1987): 3329-3341.
- [6] Chan, B. K. C., C. M. Ivey and J. M. Barry, “Natural Convection in Enclosed Porous Media with Rectangular Boundaries”, *Journal of Heat transfer-T ASME* 92 (1970): 21-27.
- [7] Vasseur, P., C. H. Wang and M. Sen, “Natural Convection in an Inclined Rectangular Porous Slot: the Brinkman-Extended Darcy Model”, *Journal of Heat transfer-T ASME* 112 (1990): 507-511.
- [8] Tong, T. W. and E. Subramanian, “A Boundary-Layer Analysis for Natural Convection in Vertical Porous Enclosures: use of the Brinkman-Extended Darcy Model”, *Journal of Heat transfer-T ASME* 28 (1985): 563-571.
- [9] Nithiarasu, P., K. N. Seetharamu and T. Sundararajan, “Natural Convective Heat Transfer in a Fluid Saturated Variable Porosity Medium.”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 40 (1997): 3955-3967.
- [10] Bekermann, C., S. Ramadhyani, R. Vishkanta, “Natural Convective Flow and Heat Transfer Between a Fluid Layer and a Porous Layer inside a Rectangular Enclosure”, *Journal of Heat transfer-T ASME* 109 (1987): 363-370.
- [11] Chen, X. B., P. Yu, Y. Sui, S. H. Winoto and H. T. Low,

- [28] Vafai, K., "Convective Flow and Heat Transfer in Variable-Porosity Media", *Journal of Fluid Mechanics*, 147 (1984): 233-259.
- [29] Mohamad, A.A., "Lattice Boltzmann Method: Fundamentals and Engineering Applications with Computers Codes", Springer, New York, 2011.
- [30] De Vahl Davis, G., "Natural Convection of Air in a Square Cavity: a Benchmark Numerical Solution", *International Journal for numerical methods in fluids*, 3 (1983): 249-264.
- [31] Ochoa-Tapia, J.A. and S. Whitaker, "Momentum Jump Condition at the Boundary between a Porous Medium and a Homogeneous Fluid Inertial Effect", *Journal of Porous Media*, 1 (1998): 201-217.
- Simulation of The Flow Around a Porous Covering Square Cylinder in a Channel via Lattice Boltzmann Method", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 65 (2011): 1217-1230.
- [25] Vishnampet, R., A. Narasimhan and V. Babu, "High Rayleigh Number Natural Convection Inside 2D Porous Enclosures Using the Lattice Boltzmann Method", *Journal of Heat Transfer*, 133 (2011): 062501-1.
- [26] Nazari, M., M. H. Kayhani and A. Anaraki Haji Bagheri, "Comparison of heat transfer in a cavity between vertical and horizontal porous layers using LBM", *Modares Mechanical Engineering*, 13.8 (2012): 93-107.
- [27] Ergun, S., "Fluid Flow Through Packed Column", *Chemical engineering progress*, 48 (1952): 89-94.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Nazari, "Critical Thickness of a Porous Layer with Respect to Porosity and Its Effect on Heat Transfer Rate",

Amirkabir J. Mech. Eng., 49(1) (2017) 171-184.

DOI: 10.22060/mej.2016.553

