

مدلسازی انتقال حرارت تحت شرایط عدم تعادل حرارتی سیال در یک محفظه با در نظر گرفتن یک پره احاطه شده توسط ساختاری از ماده متخلخل

سینا سازگار^{۱*}، محمد قلمباز^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول
^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول

دریافت: پاییز ۹۶ پذیرش: بهار ۹۷

چکیده

در مطالعه حاضر، انتقال حرارت جابجایی آزاد سیال درون محفظه بسته با در نظر گرفتن محیط متخلخل و پره جامد مورد بررسی قرار گرفت. محفظه به شکل مربعی بوده که به دیواره‌ی سمت چپ یک پره که توسط لایه‌ای از محیط متخلخل احاطه شده، متصل است. شروط مرزی در مسئله به گونه‌ای فرض شده است که دیواره‌ی عمودی سمت راست در دمای سرد و دیواره‌های افقی بالا و پایین به صورت عایق باشد. از طرفی دیواره‌ی عمودی سمت چپ در بخش اتصال میان دیواره و پره، در دمای گرم و مابقی آن نیز به صورت عایق فرض شده است. معادلات حاکم بر بخش‌های سیال، محیط متخلخل (با فرض عدم تعادل حرارتی) و محیط جامد استخراج و به شکل بی‌بعد خود منتقل شدند و مسئله با استفاده از روش المان محدود به صورت عددی حل گردید. در ادامه پارامترهای مهم و اثرگذار بر انتقال حرارت از محفظه مورد بحث و بررسی قرار گرفت و تأثیر هر کدام بر انتقال حرارت سنجیده شد. نتایج به صورت شکل، جداول، منحنی، خطوط جریان ثابت و دمای ثابت ارائه و به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از است که اثرات افزایش پارامترهای نسبت رسانندگی سیال به ماتریس متخلخل، عدد دارسی و ضربیت متخلخل به ترتیب سبب کاهش، افزایش و افزایش در ضربیت انتقال حرارت است. همچنین نسبت ضربیت رسانندگی حرارتی جامد به سیال تاثیر مستقیمی بر انتقال حرارت داشته و افزایش آن بهبود انتقال حرارت را در پی خواهد داشت. از طرفی افزایش عدد رایلی سبب افزایش انتقال حرارت و افزایش حجم بخش متخلخل منجر به کاهش بخش پر شده است سیال خواهد شد. این امر به معنی تضعیف گردش سیال و در نهایت تضعیف انتقال حرارت می‌باشد.

* عهده‌دار مکاتبات: sinasazgar@gmail.com

کلمات کلیدی: انتقال حرارت آزاد در محفظه، محیط متخلخل، محیط جامد، پره

مورد مطالعه قرار دادند. در بررسی فوق، عدد رایلی تا مقدار ۱۰۱۰ افزایش داده شده است. نتایج نشان میدارد که با گذر از عدد رایلی به ۱۰۶ به رژیم آشفته می‌رسیم و عدد ناصلت به طور ناگهانی افزایش می‌یابد. آنالالاکشمی و باساک^۶ [۶] انتقال حرارت جابجایی طبیعی در محفظه لوزی شکل با فرض ضلع پایین دمای ثابت یا غیر دمای ثابت را مورد بررسی قرار دادند. با در نظر گرفتن زوایای ۳۰، ۴۵ و ۷۵ درجه برای محفظه، در حالت فرض دمای ثابت برای ضلع پایین، بیشترین انتقال حرارت از ضلع پایین به ضلع سمت چپ به ترتیب در زوایای ۳۰، ۴۵ و ۷۵ درجه رخ خواهد داد. همچنین کمترین انتقال حرارت برای ضلع سمت راست و به ترتیب در زوایای ۴۵، ۳۰ و ۷۵ رخ خواهد داد.

۱- مقدمه

وهل دیویس^۱ [۱]، توران و همکاران^۲ [۲]، دنگ و تانگ^۳ [۳] و ساتیامورتی و چمخا^۴ [۴]، انتقال حرارت جابجایی طبیعی در محفظه مربعی بسته را مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها دریافتند که با افزایش عدد رایلی، در حضور یک پره رساناً، انتقال حرارت نیز دست‌خوش تغییر معنادار خواهد شد. باراکوس و همکاران^۵ [۵]، انتقال حرارت جابجایی طبیعی در محفظه مربعی با در نظر گرفتن رژیم آرام و همچنین آشفته را

¹ Vahl Davis

² Turan et al

³ Deng and Tang

⁴ Sathiyamoorthy and Chamkha

⁵ Barakos et al.

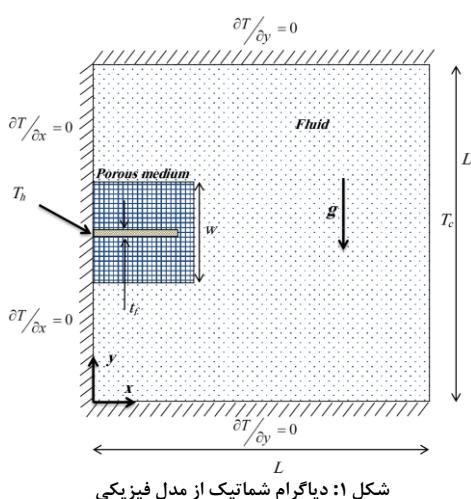
⁶ Anandalakshmi and Basak

انتقال حرارت در سیستم‌های حرارتی با ساختارهای مختلف، رژیم‌های جریان و شرایط مرزی انجام شد. گائو و همکاران^{۱۲} [۱۳] به تحقیقی با عنوان مدل بولتزمن شبکه‌ی اصلاح شده برای انتقال حرارت مزدوج در محیط متخلخل پرداخت. نتایج عددی حاصل از پژوهش [۱۳] در توافق بسیار خوبی با راه حل‌های تحلیلی و عددی که در مطالعات قبلی گزارش شده است، بود. نویسنده‌گان بر این باورند که مدل کنونی می‌تواند به عنوان یک ابزار قابل اجرا برای رفع مشکلات انتقال حرارت آمیخته^{۱۳} در مواد متخلخل مورد استفاده قرار گیرد.

در پژوهش حاضر، محفظه شامل محیط پرشده از سیال، پره جامد و محیط متخلخل است. بنابراین باید بتوان سه محیط فوق را به یکدیگر در نظر گرفته و اثرات آنها را بر یکدیگر سنجید.

۲- بیان مسئله

انتقال حرارت جابجایی آزاد درون محفظه با در نظر گرفتن سه محیط پرشده از سیال؛ محیط متخلخل و پره جامد به صورت پایا مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱ شماتیکی از محفظه مورد نظر را به تصویر کشیده است. با توجه به شکل ذیل، محفظه به صورت مربعی و دو بعدی راست است. با توجه به شکل ذیل، محفظه به صورت مربعی و دو بعدی در نظر گرفته شده است که طول ضلع آن L است. دیواره‌ی عمودی راست در دمای سرد T_c و پایه‌ی پره متصل به دیواره‌ی عمودی چپ، در دمای گرم T_h لحظ شده‌اند که دمای T_h بزرگ‌تر از دمای T_c می‌باشد. ضمن اینکه دیواره‌های افقی بالا و پایین محفظه، و دیواره‌ی عمودی چپ (جز پایه‌ی پره) عایق فرض شده‌اند. از طرفی پره جامد با ضخامت r_p و طول آن در محدوده $l \leq x \leq 0$ و بخش متخلخل با ابعاد $d \leq x \leq L$ و $w \leq y \leq 0$ در نظر گرفته شده که اطراف پره را پر کرده است. همچنین شتاب گرانش به مقدار g در خلاف جهت محور عمودی (y) فرض خواهد شد.



شکل ۱: دیاگرام شماتیک از مدل فیزیکی

¹² Gao et al.

¹³ Conjugate

محیط متخلخل به یک محیط جامد دارای تخلخل گفته می‌شود. بسته به این که محیط متخلخل تحت اثر نیروهای بیرونی بتواند شارها را از خود عبور دهد یا نه، به آن محیط متخلخل تراوا یا محیط متخلخل ناتراوا می‌گویند. بیشتر مطالعات انجام شده در زمینه محیط‌های متخلخل بر پایه قانون دارسی و تعادل حرارتی بین فازهای جامد و سیال می‌باشد. این فرض برای محیط‌های با خلل و فرج کوچک مثل مخازن زمین گرمایی و عایق‌های حرارتی صادق می‌باشد. فرض تعادل حرارتی برای محیط‌های متخلخل با جنس ماتریس متخلخل فلزی یا محیط‌های حرارت دیگر نیست. در زمینه محیط‌های متخلخل بیتانس و همکارانش^۷ [۷]، موفق شدند جابجایی آزاد در محفظه‌ی متخلخل را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دهند. در این مقاله تمرکز بر روی نقش ضریب هدایت حرارتی دیواره‌های افقی بر روی انتقال حرارت و جریان سیال بود. نتایج به دست آمده توسط بیتانس و همکاران نشان می‌داد که با افزایش ضریب هدایت حرارتی، دمای سطح مشترک سیال و دیواره افقی کاهش می‌یابد. قلم باز و همکاران [۸] انتقال حرارت طبیعی و انتقال جرم نانو سیال روی یک صفحه عمودی جا داده شده در یک محیط متخلخل دارسی که در معرض سطح گرم و شار نانو ذرات بود بررسی کردند. نتایج پژوهش قلم باز و همکاران حاکی از آن بود که عدد ناسلت بر روی دیواره‌ی سرد و گرم، به جهت اثر اتفاق چسبندگی برابر نبودند. همچنین افزایش عدد اکرت^۸ موجب کاهش و افزایش عدد ناسلت به ترتیب بر روی دیواره‌ی گرم و دیواره‌ی سرد شد. بیتانس و همکاران [۹] به کمک روش حجم کنترل، انتقال حرارت جابجایی آزاد در یک محفظه معمولی که سیال آن دارای تولید حرارت است را بررسی کردند. آنها [۹] دریافتند که افزایش مقدار گام در سطح مشترک، تاثیر قابل توجهی بر میدان جریان، گرما و انتقال جرم از سمت چپ دیواره به سمت راست را دارد. همچنین در حالت‌های خاص، نتایج به دست آمده توسط آن‌ها با نتایج حاصل از پژوهشگران دیگر هم خوانی خیلی خوبی داشت. وی و همکاران^۹ [۱۰]، به تحقیقی با عنوان تغییر فاز جدید و مایع با انتقال حرارت در محیط متخلخل با مدل جدید شبکه بولتزمن پرداختند. نتایج نشان می‌داد که شرایط پیوستگی دما و شار حرارت در رابط بین فازهای مختلف خواص ترموفیزیکی اساسا برای مدل فعلی رضایت بخش است. چن^{۱۱} [۱۱]، به تحقیقی با عنوان مدل شبکه‌ی بولتزمن برای انتقال حرارت در محیط متخلخل پرداخت. هدف از این مطالعه ارائه روش حل عددی جدیدی بود که ایرادات روش‌های قدیمی را برطرف سازد. به منظور اطمینان از روش حل جدید، نتایج مطالعات پیشین اعتبارسنجی شد و تطابق خوبی میان نتایج برقرار بود. کاسائیا^{۱۲} [۱۲] به پژوهشی با عنوان جریان نانوسیال و انتقال حرارت در محیط متخلخل پرداخت. در این پژوهش، یک برسی جامع در مورد کاربرد همزمان نانوفیلدها و مواد متخلخل برای اهدافی همچون تقویت

⁷ Baytas et al.

⁸ Eckert number

⁹ Wei et al.

¹⁰ Chen et al.

¹¹ Kasaeia

$$\frac{\rho}{\varepsilon^2} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} \\ + \frac{\mu}{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\mu}{K} v + \rho g \quad (7)$$

$$\frac{1}{\varepsilon} \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \\ \frac{k}{(\rho c_p)} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{h(T_s - T)}{\varepsilon (\rho c)} \quad (8)$$

$$0 = \frac{k_s}{(\rho c)_s} \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} \right) \\ + \frac{h}{(1-\varepsilon)(\rho c)_s} (T - T_s) \quad (9)$$

همچنین تابع جریان نیز به صورت زیر قابل تعریف خواهد بود:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \nabla^2 \psi \quad (10)$$

که در روابط فوق، T_s دمای محیط جامد در محیط متخلخل و ε ضریب تخلخل می‌باشد.

۳-۳- معادلات حاکم بر پره جامد

همانطور که قبل اشاره شد، دیواره گرم دارای ضخامت بوده و به صورت محیط جامد در نظر گرفته خواهد شد. به این منظور محیط فوق تنها شامل یک معادله انرژی خواهد بود. به این ترتیب داریم:

$$\left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (11)$$

که در آن T_s دما در محیط جامد، x و y به ترتیب مؤلفه افقی و عمودی مکان می‌باشند.

۴-۳- شرایط مرزی

از جمله شرایط مرزی حاکم بر مسئله می‌توان به دمای T_h در دیواره چپ و دمای T_c در دیواره راست اشاره نمود. از طرفی دو دیواره بالا و پایین محفظه و دیواره عمودی چپ (جز پایه پره) عایق می‌باشند. همچنین شروط عدم نفوذ و عدم لغزش شروط مرزی برای سرعت هستند. به این ترتیب داریم:

$$T(0, y)|_{L/2-t_f \leq y \leq L/2+t_f} = T_h, \quad T(L, y) = T_c,$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{(x, 0)} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{(x, L)} = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{(0, 0 \leq y \leq L/2-t_f)} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{(0, L/2+t_f \leq y \leq L)} = 0$$

$$u(0, y) = 0, \quad v(0, y) = 0$$

$$u(L, y) = 0, \quad v(L, y) = 0$$

$$u(x \leq 1, L/2-t_f) = 0, \quad v(x \leq 1, L/2-t_f) = 0$$

۳-۳- معادلات حاکم

۱-۱- معادلات حاکم بر سیال

معادلات حاکم بر فاز سیال شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم در جهت افقی، مومنتوم در جهت عمودی و انرژی می‌باشد. همچنین تابع جریان نیز بر این روابط اضافه خواهد شد. بدین ترتیب برای سیال خواهیم داشت:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} \\ + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} \\ + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g \quad (3)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{k}{(\rho c_p)} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

همچنین تابع جریان نیز به صورت زیر قابل تعریف خواهد بود:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \nabla^2 \psi \quad (4)$$

که در روابط فوق u مؤلفه افقی سرعت سیال، v مؤلفه عمودی سرعت، x و y به ترتیب مؤلفه افقی و عمودی مکان، ∇^2 تابع جریان سیال، ρ چگالی سیال، g شتاب گرانش و p فشار می‌باشد. ضمن این که T دمای سیال، μ لزجت دینامیکی، k رسانندگی حرارتی سیال، c ظرفیت حرارتی سیال هستند.

۲-۳- معادلات حاکم بر محیط متخلخل

با توجه به بیان مسئله، محفظه شامل یک بخش از محیط متخلخل می‌باشد. همین امر باعث الزام تعریف معادلات مربوط به محیط متخلخل می‌باشد. به همین منظور در ادامه معادلات پیوستگی، مومنتوم در جهت افقی، مومنتوم در جهت عمودی، انرژی سیال و انرژی جامد در محیط متخلخل است. به این ترتیب خواهیم داشت:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\rho}{\varepsilon^2} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} \\ + \frac{\mu}{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\mu}{K} u \quad (6)$$

که در روابط فوق $\theta = P \cdot \Psi \cdot V \cdot U \cdot W \cdot D \cdot Y \cdot X$ به ترتیب بیان
بی بعدی از موقعیت افقی مکان، موقعیت عمودی مکان، عرض بی بعد
محیط جامد، عرض بی بعد محیط متخلخل، مؤلفه افقی سرعت، مؤلفه
 $Pr \cdot Da$ عمودی سرعت،تابع جریان، فشار و دما می باشند. ضمن اینکه
 Ra نیز اعداد بی بعد دارسی، پرانتل و رایلی هستند. همچنین $k_r \cdot H$ و
 R_k نیز به ترتیب ضریب نفوذپذیری محیط متخلخل، ضریب انتقال
حرارت ماده متخلخل و نسبت انتقال حرارت دیوار به سیال می باشند. از
طرفی ΔT اختلاف دمای میان دیواره گرم و سرد بوده که به صورت
 $\Delta T = T_h - T_c$ تعریف می شود.

حال با اعمال روابط (۱۵) در روابط (۱) تا (۴)، خواهیم داشت:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (۱۶)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial X} + Pr \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (۱۷)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial Y} + Pr \cdot Ra \cdot \theta \quad (۱۸)$$

$$U \frac{\partial \theta_f}{\partial X} + V \frac{\partial \theta_f}{\partial Y} = \left(\frac{\partial^2 \theta_f}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial Y^2} \right) \quad (۱۹)$$

$$\frac{\partial U}{\partial Y} - \frac{\partial V}{\partial X} = \nabla^2 \Psi \quad (۲۰)$$

همچنین روابط (۵) تا (۱۰) برای محیط متخلخل با جایگذاری روابط
بی بعد (۱۵) به فرم زیر نائل خواهند آمد:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (۲۱)$$

$$\frac{1}{\varepsilon^2} \left(U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{Pr}{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) + \frac{Pr}{Da} U \quad (۲۲)$$

$$\frac{1}{\varepsilon^2} \left(U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{Pr}{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \frac{Pr}{Da} V + Pr \cdot Ra \cdot \theta \quad (۲۳)$$

$$\frac{1}{\varepsilon} \left(U \frac{\partial \theta_f}{\partial X} + V \frac{\partial \theta_f}{\partial Y} \right) = \left(\frac{\partial^2 \theta_f}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial Y^2} \right) + H (\theta_s - \theta_f) \quad (۲۴)$$

$$0 = \left(\frac{\partial^2 \theta_s}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial Y^2} \right) + H (\theta_f - \theta_s) \quad (۲۵)$$

$$u \left(x \leq 1, L/2 + t_f \right) = 0 \quad v \left(x \leq 1, L/2 + t_f \right) = 0 \\ u \left(l, L/2 - t_f \leq y \leq L/2 + t_f \right) = 0, \\ v \left(l, L/2 - t_f \leq y \leq L/2 + t_f \right) = 0 \quad (۱۲)$$

که در روابط فوق، L طول محفظه است. همچنین شروط عدم لغزش برای
دیواره های عمودی و افقی، سطح بالا، پایین و نوک پره نیز لحاظ شده
است.

در مرز مشترک میان محیط متخلخل و سیال خواهیم داشت:

$$u_f = u_{porous}, \quad v_f = v_{porous} \\ \mu_f \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_f = \mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{porous}, \quad \mu_f \frac{\partial v}{\partial y} \Big|_f = \mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y} \Big|_{porous} \\ T \Big|_f = T \Big|_{porous} = T_s \Big|_{porous} \\ k_f \frac{\partial T_f}{\partial y} \Big|_f = k_{eff} \frac{\partial T_f}{\partial y} \Big|_{porous} + k_{eff} \frac{\partial T_s}{\partial y} \Big|_{porous} = q_i'' \quad (۱۳)$$

$$az \text{ طرفی در مرز مشترک میان محیط متخلخل و محیط جامد داریم:} \\ T_w \Big|_{wall} = T_f \Big|_{porous} = T_s \Big|_{porous} \\ k_w \frac{\partial T_w}{\partial x} \Big|_{wall} = k_{eff} \frac{\partial T_f}{\partial x} \Big|_{porous} + k_{eff} \frac{\partial T_s}{\partial x} \Big|_{porous} = q_i'' \quad (۱۴)$$

که در معادلات فوق، k_w رسانندگی حرارتی دیواره و T_w دمای دیواره
است.

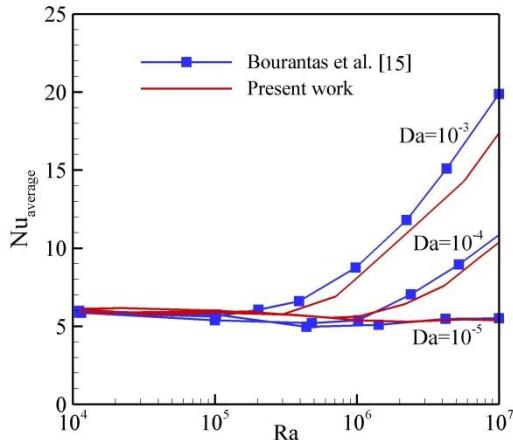
۵-۳- بی بعد سازی معادلات حاکم

در ادامه می بایست با استفاده از پارامترهای بی بعدسازی، معادلات به
شکل بی بعد خود نائل آیند. به این منظور هر بخش از معادلات سیال،
محیط متخلخل و محیط جامد به ترتیب بی بعد خواهند شد. ذکر این
نکته مهم است که روابط بی بعدسازی بر اساس سیال پایه بی بعد شده اند.
بنابراین برای پارامترهای بی بعد خواهیم داشت [۸]:

$$X = \frac{x}{L}, \quad Y = \frac{y}{L}, \quad D = \frac{d}{L}, \quad W = \frac{w}{L}, \quad U = \frac{uL}{\alpha_f}, \\ V = \frac{vL}{\alpha_f}, \quad \Psi = \frac{\psi}{\alpha_f}, \quad P = \frac{PL^2}{\rho_f \alpha_f^2}, \quad Da = \frac{k}{L^2}, \quad Pr = \frac{v_f}{\alpha_f}, \\ Ra = \frac{g \beta \Delta TL^3}{v_f \alpha_f}, \quad \theta_f = \frac{(T_f - T_c)}{\Delta T}, \quad \theta_f = \frac{(T_f - T_c)}{\Delta T}, \\ \theta_s = \frac{(T_s - T_c)}{\Delta T}, \quad \theta_w = \frac{(T_w - T_c)}{\Delta T}, \quad H = \frac{h_f L^2}{k_f}, \\ k_r = \frac{k_f}{(1-\varepsilon)k_s}, \quad R_k = \frac{k_w}{k_f} \quad (۱۵)$$

بندی می‌کند. ضمن اینکه در هر یک از این المان‌های ساده، می‌توان یک حل تقریبی برای معادله دیفرانسیل پاره‌ای، توسعه داد. سپس، حل کلی با بههم پیوستن و یا یکپارچه شدن حل‌های جزئی، بهمنظور اطمینان از پیوستگی در مرزها، تولید می‌شود. بنابراین، معادله دیفرانسیل پاره‌ای در هر یک از مقاطع ارض امی‌گردد [۱۴]. در پژوهش حاضر به منظور حل معادلات حاکم با استفاده از روش عددی المان محدود از ابزار کد نویسی کامسول^{۱۴} تحت نرم افزار متلب استفاده شد. در ادامه به منظور صحبت‌سنگی روش حل عددی، نتایج بدست آمده از پژوهش فوق را با پژوهش‌های مرتبط پیشین مقایسه نموده و از تطابق میان نتایج بتوان بر درست یا غلط بودن روش حل عددی صحه گذاشت.

بورانتاس و همکاران^{۱۵} [۱۵] انتقال حرارت آزاد نانوسیال در محفظه متشکل از محیط متخلف را مورد مطالعه قرار دادند. در پژوهش فوق، یک منبع حرارتی واقع در کف محفظه در نظر گرفته شده است. از طرفی دیگر دیواره‌های محفظه در دمای سرد قرار دارند. به این ترتیب می‌توان اینگونه بیان نمود که در پژوهش بورانتاس و همکاران انتقال حرارت رایلی-بنارد مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین شرط حرارتی شار ثابت برای منبع حرارتی فرض گردیده است. شکل ۲ نتایج ارائه شده در پژوهش [۱۵] در مقایسه با نتایج حاصل از پژوهش حاضر را به تصویر کشیده است که عدد ناسلت متوسط به ازای اعداد دارسی مختلف به عنوان تابعی از عدد رایلی را نشان می‌دهد. شکل بیان می‌دارد که افزایش رایلی منجر به افزایش عدد ناسلت و انتقال حرارت از محفظه می‌شود. از طرفی کاهش عدد دارسی با فرض مقادیر زیاد برای عدد رایلی، سبب کاهش انتقال حرارت می‌شود و این در حالیست که در اعداد رایلی پایین، عدد دارسی بر روی انتقال حرارت بسیار ناچیز است. مقایسه میان نتایج، نشان از تطابق مناسب میان نتایج پژوهش بورانتاس و همکاران و پژوهش حاضر دارد.



شکل ۲: مقایسه عدد ناسلت متوسط گزارش شده در پژوهش بورانتاس و همکاران^{۱۵} و نتایج حاصله از پایان‌نامه حاضر

مهریان و همکاران [۱۶] انتقال حرارت آزاد نانوسیال هیبریدی درون محفظه پر شده از ماده متخلف را مورد بررسی قرار دادند. محفوظه فرض

$$\frac{\partial U}{\partial Y} - \frac{\partial V}{\partial X} = \nabla^2 \Psi \quad (26)$$

در محیط جامد نیز خواهیم داشت:

$$\frac{\partial^2 \theta_s}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial Y^2} = 0 \quad (27)$$

علاوه بر اعداد بی‌بعد ارائه شده در بخش معادلات حاکم، بدون شک یکی از مهم‌ترین و تعیین کننده‌ترین پارامترها در مسائل مربوط به انتقال حرارت، عدد بی‌بعد ناسلت است. تعریف عمومی عدد ناسلت به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (28)$$

که در رابطه بالا, h , ضریب انتقال حرارت جابجایی, L , طول محفظه بسته و k ضریب رسانش حرارتی است. عدد ناسلت انتقال حرارت بی‌بعد در دیواره گرم را نشان می‌دهد. حال با استفاده از روابط بی‌بعد سازی (۱۵) و جایگذاری در رابطه (۲۸) و پس از ساده‌سازی، رابطه بی‌بعد عدد ناسلت حاصل خواهد شد:

$$Nu = -\frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (29)$$

اکنون به منظور محاسبه عدد ناسلت در محفظه، با توجه به شکل شماتیک ۱، از رابطه (۲۹) بر روی دیواره گرم انتگرال‌گیری می‌شود. بنابراین خواهیم داشت:

$$Nu = -\frac{1}{t_f} \int_{\frac{L}{2}-t_f}^{\frac{L}{2}+t_f} \frac{\partial \theta}{\partial X} dY \quad (30)$$

در رابطه (۳۰)، t_f ضخامت پره است.

۴- روش حل و اعتبارسنجی

ساختار اصلی معادلات حاکم در پایان‌نامه حاضر برای سیال و محیط متخلف از سه معادله پیوستگی، مومنتوم و انرژی و برای محیط جامد از یک معادله انرژی تشکیل شده که این معادلات به صورت دیفرانسیل پاره‌ای، نمایش داده شده‌اند. بهمنظور حل چنین معادلاتی از روش‌های محاسباتی و در بیانی دقیق‌تر از روش‌های معتبر در دینامیک سیالات محاسباتی، استفاده می‌شود. امروزه بهمنظور حل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای از روش‌های محاسباتی و تقریبی مختلفی استفاده می‌شود؛ که روش‌های تفاضل محدود و المان محدود از رایج‌ترین و معتبرترین این روش‌ها، به شمار می‌آیند. در روش تفاضل محدود، قلمرو و دامنه حل به صورت شبکه‌ای از نقاط گسسته و یا به صورت گره‌هایی، تقسیم‌بندی می‌شود. سپس معادلات دیفرانسیل پاره‌ای برای هر گره نوشته شده و مشتقش توسط تفاضلات طبقه‌بندی شده محدود، جایگزین می‌گردد. علی‌رغم اینکه، تقریب نقطه به نقطه در این روش دارای درک ساده‌ای می‌باشد، اما این روش کمبودهایی نیز دارد. همچنین این کمبودها در سیستم‌هایی با هندسه غیرمنظم، شرایط مرزی غیرمعمول و یا ترکیبات ناهمگون، بیشتر خود نمایی می‌کنند [۱۴]. روش المان محدود یک جایگزین مناسب برای روش تفاضل محدود در تحلیل چنین سیستم‌هایی محسوب می‌شود. در مقابل تکنیک‌های تفاضل محدود، روش المان محدود، دامنه حل را به نواحی از المان‌ها و یا شکل‌های ساده تقسیم

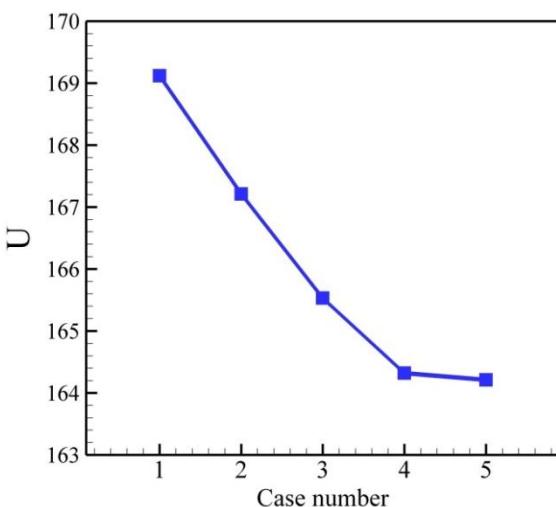
¹⁴ Comsol

¹⁵ Bourantas

نتایج حاصل برای بیشینه مقدار جریان درون محفظه در نمونه‌های مختلفی از شبکه محاسباتی این امکان فراهم خواهد آمد که میزان خطا در هر یک از نمونه‌ی شبکه‌ها به دست آید. شکل ۴ مقدار تابع جریان درون محفظه را در نمونه‌های مختلفی از اندازه شبکه محاسباتی (مطابق با جدول ۱) را به تصویر کشیده است. نتایج حاصل از تصویر فوق نشان می‌دهد با افزایش معیار شبکه بنده، مقدار جریان در محفظه کاهش پیدا نموده، این امر با افزایش مجدد معیار شبکه، به مقدار مشخص نزدیک شده است و با افزایش بیشتر معیار شبکه، تابع جریان دیگر دچار تغییر نشده و این نشان از رسیدن به اندازه مناسبی از شبکه محاسباتی است که در آن نتایج دچار تغییرات نخواهند شد. با توجه به اینکه اولویت بر کمترین میزان از معیار شبکه است چراکه بتوان حجم محاسبات را کاهش داد، در نهایت شبکه نمونه ۴ به عنوان شبکه محاسباتی مناسب انتخاب شده است. شکل ۵ تصویری از محفظه شبکه‌بنده شده با معیار شبکه نمونه ۴ را به تصویر کشیده است. شبکه به صورت مثلثی است و در نزدیکی مرزها تراکم بیشتری را به خود گرفته است. دلیل آن اهمیت رفتار مواد در مرزها است که خصوصاً رفتار سیال در مجاورت مرزها این اهمیت را چند برابر می‌نماید.

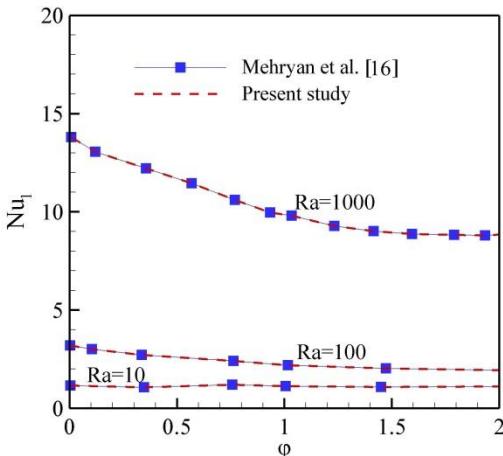
جدول ۱: جزئیات مرتبط با هر نمونه شبکه محاسباتی

نمونه	تعداد گره دامنه‌ای	تعداد گره مرزی
۱	۱۰۲۱	۱۱۸
۲	۲۳۴۹	۱۸۷
۳	۹۱۵۲	۴۴۲
۴	۲۳۵۰۲	۸۳۱
۵	۳۱۸۵۹	۸۲۹



شکل ۴: تغییرات مقدار جریان درون محفظه به ازای اندازه‌های مختلفی از شبکه محاسباتی

شده در پژوهش فوق به صورت مربعی بوده که دیواره چپ و راست به ترتیب در دمای گرم و سرد در نظر گرفته شده‌اند. دیواره‌های افقی نیز به صورت عایق فرض شده‌اند. نانوسیال هببریدی مورد استفاده مس-اکسید آلمینیوم محلول در سیال پایه آب است. قابل ذکر است که به منظور تحلیل رفتار نانوسیال از معادله دارسی بهره برده شده و نانوسیال نیز به صورت همگن فرض شده است. شکل ۳ نتایج گزارش شده توسط مهربان و همکاران [۱۶] را در مقایسه با نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر را به تصویر کشیده است. شکل فوق تاثیر تغییر کسر حجمی نانوذرات بر روی عدد ناسلت به عنوان تابعی از اعداد رایلی $Ra=10$ و $Ra=100$ ، با افزایش نتایج نشان می‌دهد در اعداد رایلی کم ($Ra=10$)، با افزایش کسر حجمی نانوذرات انتقال حرارت تضعیف شده است. هر چند مقدار تضعیف عدد ناسلت به مقدار ناچیزی صورت می‌پذیرد. حال اینکه در اعداد رایلی بالا ($Ra=100$ ، با افزایش کسر حجمی نانوذرات، کاهش انتقال حرارت به مقدار بسیار چشم‌گیری رخ می‌دهد. در شکل ۳ میان نتایج گزارش شده در پژوهش مهربان و همکاران و نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر تطابق خوبی برقرار است.



شکل ۳: مقایسه عدد ناسلت متوسط گزارش شده در پژوهش بورانتاس و همکاران [۱۶] و نتایج حاصله از پژوهش حاضر

در ادامه، به بررسی استقلال نتایج از شبکه حل پرداخته می‌شود. هدف از انجام این بررسی، نائل آمدن به اندازه شبکه‌ای است که در آن بتوان از صحت نتایج به دست آمده اطمینان حاصل کرد. همانطور که در بخش روش حل به تفصیل گفته شد، معادلات با استفاده از روش المان محدود حل می‌شوند و شبکه حل باید به گونه‌ای باشد که بتواند تمام تغییرات مسئله را رصد نماید. روشن است که هر چه شبکه ریزتر باشد، بهتر می‌تواند محیط مسئله را پوشش دهد. بنابراین با افزایش دقت شبکه و رصد پارامترهای مسئله در نهایت انتخاب اندازه شبکه باید به گونه‌ای بسیار ناچیز باشد. بدین ترتیب می‌توان با اطمینان نتایج را استخراج نمود. این بررسی در ادامه صورت می‌پذیرد.

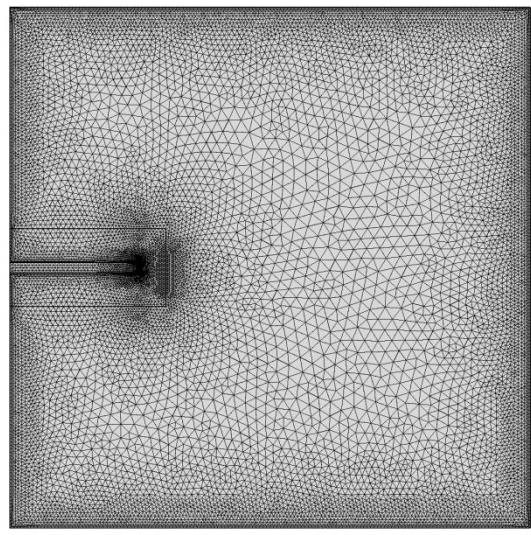
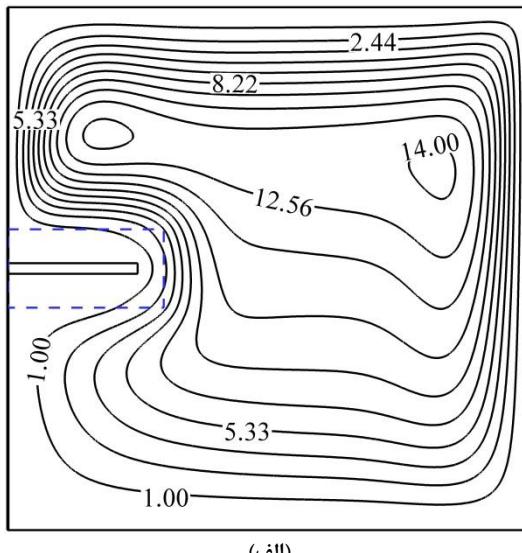
در ادامه به منظور اعتبار سنجی شبکه، محاسبات در چند شبکه مختلف صورت گرفته است. جزئیات مربوط به هر نمونه شبکه حل در جدول ۱ گزارش شده است. سپس برای بررسی کیفیت هر شبکه بیشینه مقدار جریان سیال درون محفظه رصد و گزارش شده است. با مقایسه میان

فاصله گرفتن از دیواره‌ها به سبب کاهش نفوذ حرارت در سیال، کاهش یافته و از همین رو سرعت سیال نیز رو به کاهش خواهد گذاشت. می‌توان نتیجه گرفت سرعت در بخش‌های میانی دارای کمترین سرعت است. در شکل ۶ (الف) خطوط جریان ثابت در مجاورت دیواره‌ها دارای بیشترین تراکم است و با فاصله گرفتن از دیواره‌ها، از تراکم خطوط کم می‌شود. این امر به جهت توضیحات ارائه شده در توزیع سرعت، به طور مشابه رخداده است و در مجاورت دیواره‌ها بیشترین مقدار خطوط جریان ثابت و در بخش میانی محفظه، کمترین میزان میزان جریان مشاهده می‌شود.

همچنین خطوط جریان ثابت در بخش محیط متخلخل دارای تراکم کمتری نسبت به بخش پرشده از سیال است. علت آن حضور محیط متخلخل و کاهش نفوذپذیری سیال در این محیط است.

شکل ۶ (ب) خطوط دماتابت در محفظه را به تصویر کشیده است. این شکل، توضیحات ارائه شده را تایید نموده و در مجاورت دیواره‌ها به جهت مقدار بالای گرادیان دما، تراکم بیشتری از خطوط دماتابت مشاهده می‌شود. تراکم خطوط دماتابت در بخش میانی محفظه کاهش یافته و مقدار کم گرادیان دما را گزارش می‌نماید. قابل ذکر است که به جهت فرض رساندنگی بالای پرهی جامد، خطوط دماتابت این بخش را قطع نکرده است و نشان از آن دارد که پرهی جامد در حالت پایا به طور کامل به دمای گرم رسیده است.

همچنین خطوط دماتابت در محیط متخلخل از تراکم بیشتری نسبت به محیط پر شده از سیال آزاد برخوردار هستند که علت کاهش سرعت سیال در این محیط و حضور ماتریس متخلخل است که سبب افزایش گرادیان دما در این ناحیه شده است.



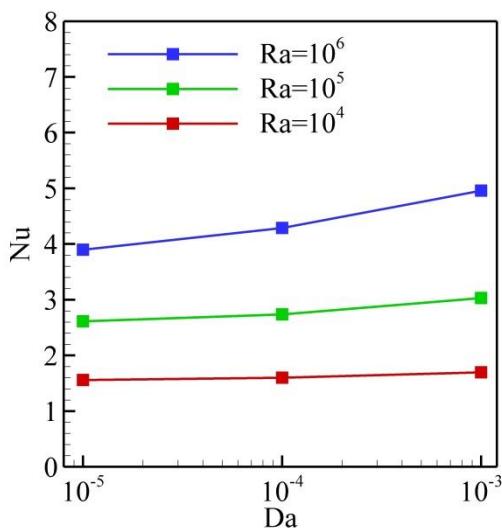
شکل ۵: شماتی از شبکه‌ی برگزیده (مطابق با نمونه ۴)

۵- نتایج

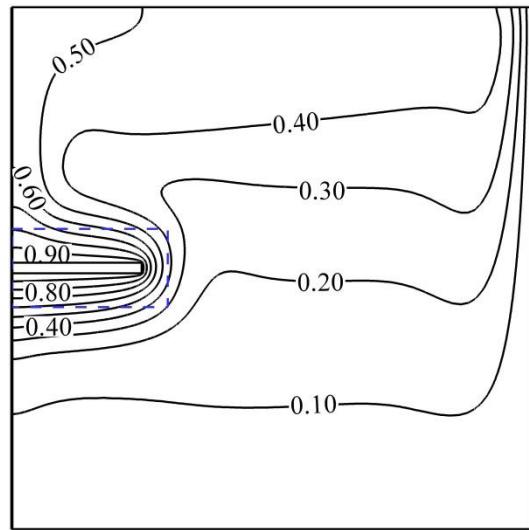
در بخش حاضر، ماحصل کار که نتایج بدست آمده از حل عددی معادلات حاکم است، ارائه خواهد شد و به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت. روند ارائه نتایج به این گونه خواهد بود که اثر هر یک از پارامترهای تاثیرگذار به طور جداگانه بررسی شده و نتایج مهم با توجه به تغییرات آن پارامتر ارائه می‌شود. همانطور که در فصل سوم مشاهده شد، مسئله شامل اعداد بی‌بعد بسیاری است که هر کدام دارای مقداری خاص است. این مقادیر به طور پیش‌فرض اعدادی را به خود اختصاص داده‌اند. اعداد فوق به شرح زیر بوده و در صورت تغییر مقدار آن گزارش خواهد شد.
 $D=0/۳$, $R_k=10$, $H=10$, $Da=10^{-۵}$, $Pr=5$, $Ra=10^6$, $L=0/۲۵$, $J=0/۰۲$, $\epsilon=0/۰۲$

M مقادیر پیش‌فرض هستند. به عنوان اولین شکل از بخش نتایج، خطوط جریان ثابت و دماتابت در محفظه در شکل ۶ (الف) و (ب) به تصویر کشیده شده است. با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش بیان مسئله، دیواره راست در دمای سرد و پایه‌ی پره متصل به دیواره چپ در دمای گرم در نظر گرفته شده است. حرارت از پایه‌ی پره بوسیله انتقال حرارت هدایت از پرهی جامد شار می‌یابد. سپس با توجه به حضور محیط متخلخل اشباع شده از سیال در اطراف پره، حرارت از پره به محیط متخلخل و سپس به محیط پر شده از سیال آزاد انتقال می‌یابد. حرارت منتقل شده به بخش پرشده از سیال، سبب افزایش دمای سیال در مجاورت دیواره‌ها می‌شود. بنابراین به جهت حضور نیروی حجمی، سیال گرم شده با کاهش چگالی در جهت خلاف نیروی حجمی به حرکت خواهد افتاد. از طرفی سیالی که در مجاورت دیواره سرد (دیواره سمت راست) قرار دارد، سرد شده و با افزایش چگالی در جهت نیروی حجمی (رو به پایین) به حرکت خواهد افتاد. با ادامه این روند سیال درون محفظه در جهت عقربه‌های ساعت به گردش درخواهد آمد. این پدیده به عنوان همرفت آزاد شناخته می‌شود.

شکل ۶ (الف) خطوط جریان ثابت درون محفظه را به تصویر کشیده است. با توجه به توضیحات ارائه شده، گردش سیال موجب ایجاد خطوطی بسته با عنوان خطوط جریان ثابت می‌شود. شایان ذکر است که سرعت سیال در مجاورت دیواره‌های سرد و گرم دارای بیشترین سرعت هستند. علت آن وجود بیشترین اختلاف دما میان سیال و دیواره است. این اختلاف دما با



شکل ۷: تغییرات عدد ناصلت در اعداد دارسی مختلف به عنوان تابعی از عدد رایلی



(ب)

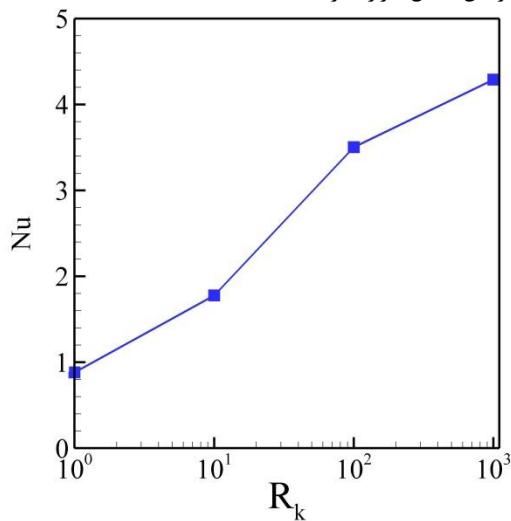
شکل ۸: تغییرات مقدار جریان درون محفظه به ازای اندازه‌های مختلفی از شبکه محسوباتی

شکل ۸ تأثیر ضریب تخلخل بر انتقال حرارت از محفظه به عنوان تابعی از عدد رایلی را به تصویر کشیده است. در شکل فوق اعداد رایلی از مقدار $Ra=10^4$ تا مقدار $Ra=10^6$ متغیر است. با فرض اعداد رایلی در مقدار کم، گردش سیال در محفظه ضعیف است حال با افزایش عدد رایلی، گردش سیال در محفظه تقویت خواهد شد. از طرفی محدوده ضریب تخلخل از مقدار 10^{-1} تا 10^{-3} که به معنی ضریب تخلخل کم تا 10^{-3} ، که به معنی ضریب تخلخل زیاد برای محیط متخلخل است. به این ترتیب با فرض مقدار ضریب تخلخل کم، نفوذ و حرکت سیال درون ماتریس متخلخل با محدودیت موافق شده و این امر سبب کاهش سرعت و محدوده حرکت سیال درون ماتریس متخلخل و کاهش قدرت جذب حرارت سیال از دیواره گرم شده است. در حالیکه با افزایش عدد دارسی و افزایش میزان نفوذپذیری تا مقدار 10^{-4} ، جریان در ناحیه متخلخل تقویت شده که افزایش گردش جریان در ناحیه متخلخل سبب افزایش قدرت جذب حرارت از دیواره گرم و به تبع آن افزایش انتقال حرارت از محفظه شده است. است. نتایج حاصل از شکل ۸ حاکی از آن است که در اعداد رایلی مختلف (کم یا زیاد)، تأثیر ضریب تخلخل چندان زیاد نیست و حتی با فرض عدد رایلی $Ra=10^5$ نیز تأثیر ضریب تخلخل بسیار ناچیز است. با افزایش عدد رایلی به مقدار زیاد $Ra=10^6$ اثر ضریب تخلخل به مقدار ناچیزی مشاهده می‌شود اما همچنان می‌تواند اذعان داشت که نتایج مستقل از تغییرات ضریب تخلخل است.

شکل ۷ تأثیر عدد دارسی بر انتقال حرارت از محفظه به عنوان تابعی از عدد رایلی را به تصویر کشیده است. در شکل فوق اعداد رایلی از مقدار کم $Ra=10^4$ تا مقدار $Ra=10^6$ متغیر است. با فرض اعداد رایلی در مقدار کم، گردش سیال در محفظه بسیار ضعیف بوده و همین ضعف در گردش سیال به گونه‌ای است که تغییرات عدد دارسی را تقریباً بی تأثیر گذاشته است. اما با افزایش عدد رایلی، نتایج دستخوش تغییرات بسیاری شده است. شکل بیان می‌دارد در اعداد رایلی بالا، عدد دارسی تأثیر بسیاری در انتقال حرارت از محفظه دارد. محدوده عدد دارسی از مقدار $Da=10^{-5}$ که به معنی ضریب نفوذپذیری کم تا 10^{-3} نفوذپذیری زیاد برای محیط متخلخل است. به این ترتیب با فرض مقدار نفوذ پذیری کم، نفوذ و حرکت سیال درون ماتریس متخلخل با محدودیت موافق شده و این امر سبب کاهش سرعت و محدوده حرکت سیال درون ماتریس متخلخل و کاهش قدرت جذب حرارت سیال از دیواره گرم شده است. در حالیکه با افزایش عدد دارسی و افزایش میزان نفوذپذیری تا مقدار $Da=10^{-4}$ ، جریان در ناحیه متخلخل تقویت شده که افزایش گردش جریان در ناحیه متخلخل سبب افزایش قدرت جذب حرارت از دیواره گرم و به تبع آن افزایش انتقال حرارت از محفظه شده است. در ادامه با افزایش عدد دارسی به مقدار $Da=10^{-3}$ جریان در ناحیه متخلخل به طور چشم‌گیری تقویت شده که این به معنی تقویت افزایش چشم‌گیری عدد ناصلت است. به طور کلی می‌توان گفت که افزایش عدد دارسی به منزله افزایش نفوذپذیری و به تبع آن تقویت جریان درون محفوظه است. که همین امر سبب افزایش انتقال حرارت از محفوظه است.

شکل ۹: تغییرات عدد ناسلت به عنوان تابعی از ضخامت محیط متخلف

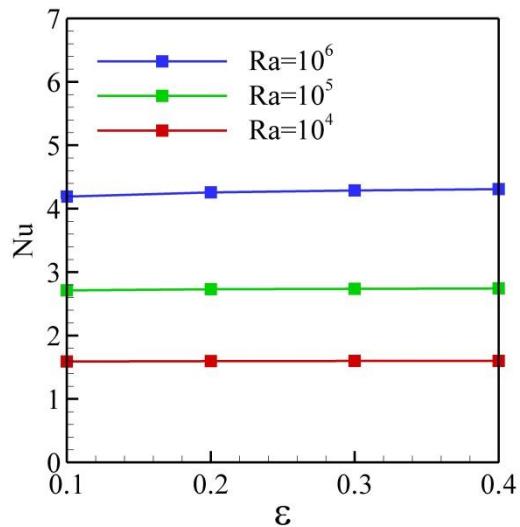
شکل ۱۰ عدد ناسلت به ازای مقادیر مختلفی از رسانندگی حرارتی محیط جامد را به تصویر کشیده است. باید توجه نمود که حرارت از پایه پره به محفظه تزریق می‌شود و افزایش و کاهش انتقال حرارت از محفظه می‌تواند رابطه‌ی مستقیمی با مقدار ضربی رسانندگی پره داشته باشد. قبل از بررسی نتایج نشان داده شده در شکل ۱۰، باید توجه داشت که هر چه میزان پارامتر R_k کم شود (به عنوان مثال $R_k=1$)، به معنی رسانندگی حرارتی کم در پره‌ی جامد و هر چه میزان پارامتر R_k زیاد شود شود (به عنوان مثال $R_k=1000$)، به معنی رسانندگی حرارتی بالا در پره‌ی جامد است. با روشن بودن این موضوع، شکل ۱۰ بیان می‌دارد که کاهش و افزایش پارامتر نسبت رسانندگی جامد به سیال (R_k) به ترتیب سبب کاهش و افزایش انتقال حرارت از محفظه است.



شکل ۱۰: تغییرات عدد ناسلت به عنوان تابعی از رسانندگی حرارتی پره‌ی جامد

شکل ۱۱ عدد ناسلت موضعی در طول دیواره سرد به ازای مقادیر مختلف عدد دارسی را به تصویر کشیده است. با توجه به توضیحات ارائه شده برای شکل ۷، افزایش عدد دارسی موجب افزایش انتقال حرارت می‌شود. این امر در مورد ناسلت موضعی نیز صدق می‌نماید.

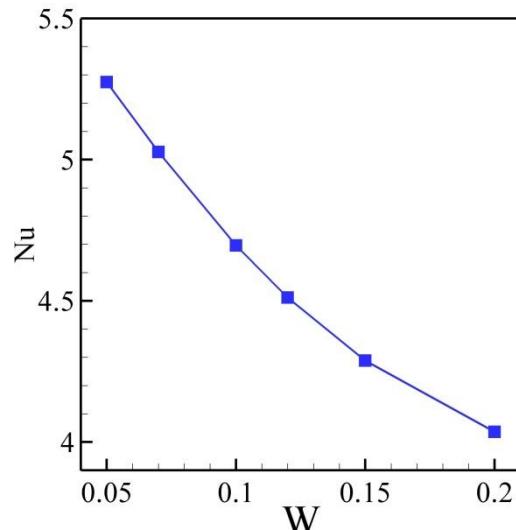
در ادامه الگوی ناسلت موضعی بر روی دیواره سرد در ادامه بررسی خواهد شد. با توجه به جهت جریان درون محفظه (ساعتگرد) واضح است که سیال سرد شده در مجاورت دیواره سرد در ابتدا به پایین‌ترین بخش دیواره سمت چپ می‌رسد. از طرفی سیال گرم شده توسط پره، با توجه به جهت جریان درون محفوظه در ابتدا به بالاترین بخش دیواره سمت راست (دیواره سرد) خواهد رسید. همین امر سبب کاهش شدید بیشترین میزان اختلاف دما میان سیال و دیواره‌ها در این نقطه باشد. بدین ترتیب با توجه به شکل ۱۱، از آنجاییکه سیال گرم شده در ابتدا به بالاترین بخش دیواره سرد ($Y=1$) برخورد می‌کند، واضح است که بیشترین انتقال حرارت در این محدوده رخ دهد (در $Y=0.95$). باید در نظر داشت که گوشش‌های محفوظه به علت فرم قائمه اضلاع محفوظه جریان سیال قدری تعییف خواهد شد. به همین علت یک نقطه ماکزیمم موضعی در نمودار مشاهده می‌شود.

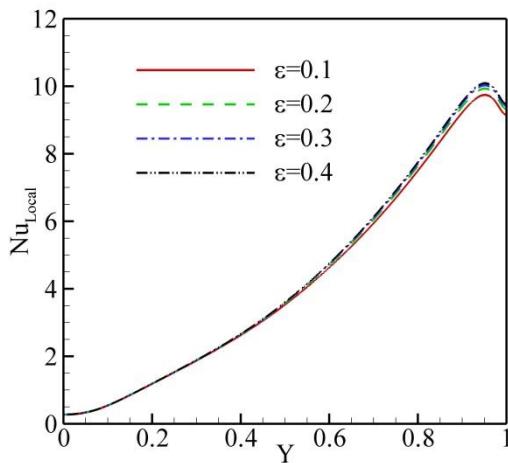


شکل ۸: تغییرات عدد ناسلت در مقادیر ضربی تخلخل مختلف به عنوان تابعی از عدد رایلی

شکل ۹ عدد ناسلت به ازای مقادیر مختلفی از ضخامت محیط متخلف را به تصویر کشیده است. قابل ذکر است در شکل ۹ عرض محیط جامد از مقادیر $W=0/2$ تا $W=0/05$ متغیر است. همانطور که گفته شد، محیط متخلف، پره را احاطه کرده است و افزایش و کاهش حجم این محیط در اطراف پره که تنها مسیر انتقال حرارت به محفظه است در این تصویر مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل ۹ نشان می‌دهد که افزایش ضخامت محیط متخلف، کاهش عدد ناسلت را در پی دارد. این کاهش برای حداقل و حداقلتر محدوده پارامتر W به مقدار ۲۴٪ است. به منظور روشن‌سازی علت این امر، ابتدا باید خاطر نشان نمود که حرارتی که از پره شار پیدا می‌نماید، به محیط متخلف و سپس به سیال آزاد منتقل می‌شود. همچنین باید توجه داشت که محیط متخلف به جهت حضور ماتریس متخلف، گردش سیال را با توجه به میزان پارامترهای نفوذپذیری و تخلخل سخت می‌نماید. به همین سبب افزایش در میزان ضخامت محیط متخلف، سبب کاهش محیط پرشده از سیال شده که موجب کاهش قدرت گردش سیال در محیط است.





شکل ۱۲: عدد ناسلت موضعی در طول دیواره سرد به ازای مقادیر مختلف ضریب تخلخل

۵- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، انتقال حرارت جابجایی آزاد سیال درون محفظه بسته با در نظر گرفتن محیط متخلخل و محیط جامد مورد بررسی قرار گرفته است. محفظه به شکل مربعی بوده که به دیواره سمت چپ یک پره که توسط لایه‌ای از محیط متخلخل احاطه شده، متصل است. معادلات حاکم بر بخش‌های سیال، محیط متخلخل (با فرض عدم تعادل حرارتی) و محیط جامد استخراج و به شکل بی‌بعد خود منتقل شده‌اند و مسئله با استفاده از روش المان محدود به صورت عددی حل شد. در ادامه پارامترهای مهم و اثرگذار بر انتقال حرارت از محفظه مورد بحث و بررسی قرار گرفت و تأثیر هر کدام بر انتقال حرارت سنجیده شد. نتایج به صورت شکل، جدول، منحنی، خطوط جریان ثابت و دماتابت ارائه شد و به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار گرفت. برخی نتایج مهم در زیر آورده شده است:

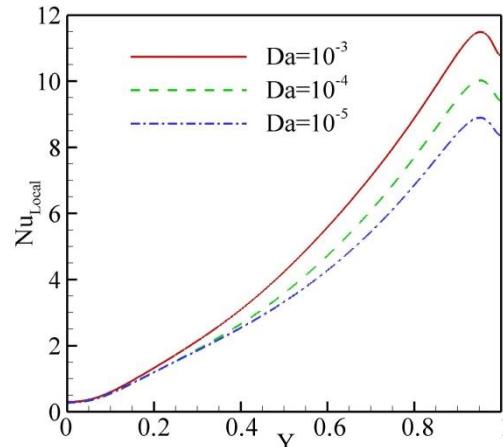
۱. افزایش عدد رایلی موجب تقویت گردش سیال درون محفظه شده و همین امر سبب افزایش انتقال حرارت از محفظه می‌شود.

۲. افزایش عدد دارسی (ضریب نفوذپذیری) موجب افزایش نفوذپذیری سیال درون ماتریس متخلخل شده که این امر سبب تقویت گردش سیال در ماتریس متخلخل و به تبع آن در کل محفظه است. از طرفی تقویت گردش سیال سبب تقویت سازوکار همرفت شده که افزایش انتقال حرارت را در پی خواهد داشت.

۳. تغییرات مقدار ضریب تخلخل محیط متخلخل هر چند سبب افزایش نفوذپذیری سیال در ماتریس متخلخل می‌شود اما تأثیر چشم‌گیری بر انتقال حرارت از خود نشان نمی‌دهد. البته این امر در اعداد رایلی پایین مشاهده می‌شود. خواه اینکه با افزایش اعداد رایلی به مقدار زیاد، سبب تأثیرگذاری بیشتر ضریب تخلخل بر انتقال حرارت است.

۴. افزایش ضخامت محیط متخلخل که پره را احاطه نموده است، سبب کاهش محیط پر شده از سیال است که سبب کاهش میدان عمل سیال و در نتیجه کاهش انتقال حرارت است. از طرفی تغییرات نسبت ضریب رسانندگی جامد به سیال بر انتقال حرارت چشم‌گیر بوده و افزایش آن سبب افزایش انتقال حرارت است. قابل ذکر است این افزایش انتقال حرارت با افزایش نسبت ضریب

با همین دیدگاه می‌توان علت کمترین میزان انتقال حرارت موضعی در پایین ترین بخش دیواره سرد ($Y=0$) را نیز دریافت. سیال در مجاورت دیواره سرد و با توجه به جهت ساعتگرد جریان، از بالا به پایین دیواره سرد حرکت می‌نماید و در طول راه در حال انتقال حرارت با دیواره سرد است. با رسیدن سیال به پایین ترین ناحیه دیواره، سیال تقریباً با دیواره سرد هم‌دما شده و انتقال حرارت میان سیال و دیواره به کمترین میزان خواهد رسید (در $Y=0$). توضیحات ارائه شده در همه اعداد دارسی صدق کرده و برای اعداد دارسی مختلف، الگویی یکسان مشاهده می‌شود.



شکل ۱۱: عدد ناسلت موضعی در طول دیواره سرد به ازای مقادیر مختلف عدد دارسی

شکل ۱۲ عدد ناسلت موضعی در طول دیواره سرد به ازای مقادیر مختلف ضریب تخلخل را به تصویر کشیده است. شکل ۸ گویای این مطلب بود که افزایش ضریب تخلخل اثر چشم‌گیری بر انتقال حرارت ندارد و یا سیال ناچیز است. این امر در مورد ناسلت موضعی نیز صدق می‌کند و ناسلت موضعی بر روی دیواره سرد در ضرایب تخلخل مختلف اختلاف بسیار ناچیزی را یکدیگر دارند. اما مناسب است به منظور بررسی الگوی ناسلت موضعی در شکل ۱۲، از توضیحات ارائه شده در شکل قبل (شکل ۱۱) بهره برده شود. جاییکه کاهش و افزایش عدد ناسلت موضعی، ناشی از مکانیزم جریان درون محفظه و انتقال حرارت میان سیال و دیواره سرد معرفی شد. بدین ترتیب

عدد ناسلت موضعی در مقدار $Y=0$ ، کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است و با افزایش ارتفاع دیواره تا مقدار $Y=1$ ، عدد ناسلت موضعی به بیشترین میزان خود رسیده است. ($Y=0/95$).

- heatline". International Journal of Heat and Mass Transfer,45(11), pp.2373-2385.
- [4] Sathiyamoorthy, M. and J. Chamkha, A., 2014, "Analysis of natural convection in a square cavity with a thin partition for linearly heated side walls". International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow,24(5), pp.1057-1072.
- [5] Barakos, G., Mitsoulis, E. and Assimacopoulos, D., 1994. Natural convection flow in a square cavity revisited: laminar and turbulent models with wall functions. International Journal for Numerical Methods in Fluids,18(7), pp.695-719.
- [6] Baytas, A. C., Liaqat, A., Grosan, T., & Pop, I., (2001). "Conjugate natural convection in a square porous cavity", J. of Heat and Mass Transfer., Vol. 37, pp. 467-473.
- [7] Anandalakshmi, R. and Basak, T., 2012. Heat flow visualization for natural convection in rhombic enclosures due to isothermal and non-isothermal heating at the bottom wall. International Journal of Heat and Mass Transfer,55(4), pp.1325-1342.
- [8] Ghalambaz, M., Sabour, M. and Pop, I., 2016. Free convection in a square cavity filled by a porous medium saturated by a nanofluid: Viscous dissipation and radiation effects. Engineering Science and Technology, An International Journal, 19(3), pp.1244-1253.
- [9] Baytas, A.C., Baytas, A.F., Ingham, D.B. and Pop, I., 2009. Double diffusive natural convection in an enclosure filled with a step type porous layer: Non-Darcy flow. International Journal of Thermal Sciences, 48(4), pp.665-673.
- [10] Wei, w., Zhang, S., & Wang, Sh. (2017). A novel lattice Boltzman model for the solid-liquid phase change with the convection heat transfer in the porous media. International Journal of Heat and Mass Transfer, 104, pp. 675-687.
- [11] Chen, Sh., Yang, Bo., & Zheng, Chu. (2017). A lattice Boltzman Model for heat transfer in porous media. International journal of heat and mass transfer, 111, pp.1019-1022.
- [12] Kasaeia, A., Danesh Azarian, R., Mahian, O., Kolsi, L., Chamkha, A., Wongwises, S., & Pop, L. (2017). Nanofluid flow and heat transfer in porous media: A review of the latest developments. International Journal of Heat and Mass Transfer, 107, pp.778-791.
- [13] Gao, D., Chen, Z., Chen, L., & Zhang, D. L. (2017). A modified lattice Boltzman model for conjugate heat transfer in porous media. International Journal of Heat and Mass Transfer, 105, pp. 673-683.

رسانندگی حرارتی جامد به سیال، تا میزان $R_k=1000$ رخ می دهد
و با افزایش بیشتر آن، انتقال حرارت تغییری نخواهد نمود.

علامه انگلیسی

طول محیط جامد-متخلخل [m]	<i>d</i>
عدد دارسی [-]	<i>Da</i>
شتاب جاذبه [m/s^2]	<i>g</i>
ضریب انتقال حرارت محیط متخلخل [-]	<i>H</i>
ضریب رسانش حرارتی [$W/m.K$]	<i>k</i>
طول محفظه [m]	<i>L</i>
عدد ناسلت [-]	<i>Nu</i>
فشار [atm]	<i>P</i>
عدد پراتل [-]	<i>Pr</i>
عدد رایلی [-]	<i>Ra</i>
دما [K]	<i>T</i>
مؤلفه افقی سرعت [m/s]	<i>u</i>
مؤلفه عمودی سرعت [m/s]	<i>v</i>
ارتفاع محیط جامد-متخلخل [m]	<i>w</i>
مؤلفه افقی مکان	<i>x</i>
مؤلفه عمودی مکان	<i>y</i>
علامه یونانی	
ضریب پراکندگی حرارتی [m^2/s]	<i>α</i>
ضریب پخش حرارتی [$1/K$]	<i>β</i>
دماهی بی بعد [-]	<i>θ</i>
لرجت سینماتیکی [m^2/s]	<i>v</i>
چگالی [kg/m^3]	<i>ρ</i>
تابع جریان	<i>Ψ</i>
زیرنویس	
سرد	<i>c</i>
گرم	<i>h</i>
جامد	<i>s</i>
سیال خالص	<i>f</i>

مراجع

- [1] de Vahl Davis, G., 1983, "Natural convection of air in a square cavity: a bench mark numerical solution". International Journal for numerical methods in fluids,3(3), pp.249-264.
- [2] Turan, O., Poole. J. R., Chakraborty, N., 2012,"Influences of boundary conditions on laminar natural convection in rectangular enclosures with differentially heated side walls". International Journal of Heat and Fluid Flow, 33, pp. 131-146.
- [3] Deng, Q.H. and Tang, G.F., 2012,"Numerical visualization of mass and heat transport for conjugate natural convection/heat conduction by streamline and

convection of hybrid Al₂O₃-Cu water nanofluid in a differentially heated porous cavity. Advanced Powder Technology, 28(9), pp.2295-2305.

- [14] Chapra, S.C., Canale, R.P., 2009, Numerical methods for engineers, sixth edition.
- [15] Bourantas, G.C., Skouras, E.D., Loukopoulos, V.C. and Burganos, V.N., 2014. Heat transfer and natural convection of nanofluids in porous media. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 43, pp.45-56.
- [16] Mehryan, S.A.M., Kashkooli, F.M., Ghalambaz, M. and Chamkha, A.J., 2017. Free