مدلسازی عددی تاثیر پارامترهای رایلی و دارسی در انتقال حرارت همبسته جابجایی طبیعی در محیط متخلخل با تولید حرارت در ماتریس جامد

محمد قلمباز[۱]، محسن سرلک[۲*]

۱ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی،دزفول، ایران

دریافت: پاییز۹۶ پذیرش: زمستان ۹۶

چکیده

در مطالعه حاضر، به بررسی انتقال حرارت جابجایی طبیعی در محفظه بسته حاوی مواد متخلخل با ابعاد L*L و دو دیواره عمود با ضخامت d در طرفین می‌پردازیم که دیواره بالا و پایین عایق و قسمتی از هر دو دیواره سمت چپ و راست در دمای ثابت T_hو T_c ثابت نگه داشته می‌شود. مطابق با هندسه مساله در دیواره جامد انتقال حرارت هدایت و در محفظه محیط متخلخل هم انتقال حرارت هدایت و هم انتقال حرارت جابجایی وجو خواهد داشت. در این پژوهش سیال تراکم ناپذیر، نیوتنی و جریان پایا در نطر گرفته شده است. با توجه به پایا بودن انتقال حرارت شرط عدم تعادل حرارتی بین سیال و ماتریس جامد محیط متخلخل برقرار است. تمامی خواص ترموفیزیکی به جز چگالی ثابت فرض شده است. سیال درون محفظه را تراکم‌ناپذیر، نیوتنی و همگن فرض کرده و به دلیل اختلاف کم دما از فرض بوزینسک استفاده شده است. جریان سیال را همچنین دوبعدی، پایا و آرام فرض می‌کنیم. فازهای سیال و جامد در ناحیه متخلخل بدون تعادل حرارتی بوده و به همین دلیل از یک مدل دو دمایی برای بررسی رفتار انتقال حرارت در محیط متخلخل استفاده می‌شود. در ناحیه متخلخل از مدل گسترش یافته بریکمن-دارسی برای حل استفاده شده است. خطوط جریان، خطوط دما و ناسلت برای مقادیر مختلف عدد رایلی، عدد دارسی، مورد بررسی قرار گرفته است. با درنظر گرفتن مدل عدم تعادل حرارتی، در هر المان محیط متخلخل تفاوت دما میان فاز جامد محیط متخلخل و سیال درون آن وجود خواهد داشت. در این صورت، معادلات حاکم کمکی برای تفکیک رفتار فازهای جامد ماتریس متخلخل و سیال درون آن نیاز خواهد بود. در کابردهای با تولید حرارت داخلی در فاز جامد، از آنجا که حرارت در فاز جامد تولید شده و سپس به سیال منتقل می‌شود مدلسازی با درنظر گرفتن اثرات عدم تعادل حرارتی امری ضروری است. با توجه به کاربردهای مهم مدلسازی انتقال حرارت جابجایی طبیعی در محیط متخلخل در حالت عدم تعادل حرارت، هدف پژوهش حاضر، مدلسازی انتقال حرارت جابجایی طبیعی همبسته در یک ماتریس متخلخل با تولید حرارت داخلی و اشباع شده با یک سیال می‌باشد.

* Email :**Mohsenready@gmail.com**

کلمات کلیدی: انتقال حرارت جابجایی طبیعی همبسته، محیط متخلخل، تولید حرارت، مدل عدم تعادل حرارتی

۱- مقدمه

بررسی انتقال حرارت جابجایی آزاد در محیط‌های متخلخل در خیلی از رشته‌ها مانند اقیانوس‌شناسی، ستاره‌شناسی، زیست‌شناسی، زمین‌شناسی، علوم مهندسی، پزشکی، مسائل هسته‌ای و نظامی به دلیل کاربردهای فراوان در ده‌های اخیر مورد توجه گسترده قرار گرفته است. در پدیده انتقال حرارت در صورتی که هر دو مکانیزم انتقال حرارت جابجایی طبیعی و هدایت وجود داشته باشد انتقال حرارت همبسته رخ می دهد. 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 محیط های حرارت در یکی از فازهای جامد یا سیال تولید می‌شود, امکان‌پذیر نیست.

یکی از کاربردهای مهم انتقال حرارت در محیط متخلخل با تولید حرارت داخلی، در صنعت تکنولوژی هسته ای می‌باشد. میله‌های سوخت پس از آنکه در راکتور حرارت نیروگاه را تامین نمودند، توان حرارتی خود را از دست داده و به میله‌های سوخت کم‌توان تبدیل می‌شوند. میله‌های سوخت به دلیل کنترل پذیری و ایمنی راکتور در تعداد زیاد و حجم کم کم تولید می‌شوند. میله‌های مصرف شده در قلب راکتور هسته‌ای با وجود آنکه توان اولیه را ندارند ولیکن تولید حرارت در اثر واکنش هسته ای در آنها به اندازه‌ای است که توانایی پیش گرم نمودن آب در نیروگاه را دارند. میله‌های سوخت استفاده شده در راکتور، در یک مخزن آب سنگین نگهداری شده و عمل پیش گرم آب را انجام خواهند داد. میله‌های سوخت در مخزن آب راکتور هسته ای تشکیل یک ماتریس جامد متخلخل با تولید حرارت داخلی را می‌دهند. آب سنگین نیز سیال درون محیط متخلخل را تشکیل می‌دهد. نگهدارنده‌های دسته میله‌های سوخت نیز محدوده همبسته حرارت را تشکیل می‌دهند. از آنجا که میله‌های

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.3.5]

سوخت به لحاظ مواد رادیواکتیو فعال هستند، طراحان نیروگاه، به دلایل زیست محیطی و ایمنی ترجیح میدهند تا حد امکان در سیستم‌های انتقال حرارت اطراف میله‌های سوخت از وسایل فعال مانند پمپ استفاده نکنند. بنابراین، طراحی حرارتی سیستم‌های هسته‌ای با استفاده از جریان جابجایی طبیعی یک اولویت طراحی به شمار می‌رود. با درنظر گرفتن مدل عدم تعادل حرارتی، در هر المان محیط متخلخل تفاوت دما میان فاز جامد محیط متخلخل و سیال درون آن وجود خواهد داشت. در این صورت، معادلات حاکم کمکی برای تفکیک رفتار فازهای جامد ماتریس متخلخل و سیال درون آن نیاز خواهد بود. در کابردهای با تولید حرارت داخلی در فاز جامد، از آنجا که حرارت در فاز جامد تولید شده و سپس به سیال منتقل می‌شود مدلسازی با درنظر گرفتن اثرات عدم تعادل حرارتی امری ضروری است. با توجه به کاربردهای مهم مدلسازی انتقال حرارت جابجایی طبیعی در محیط متخلخل در حالت عدم تعادل حرارت، هدف پژوهش حاضر، مدلسازی انتقال حرارت جابجایی طبیعی همبسته در یک ماتریس متخلخل با تولید حرارت داخلی و اشباع شده با یک سیال می‌باشد.

پیشینه

قلم باز و همکاران [۱] جابجایی طبیعی جریان لایه مرزی روی صفحه افقی جاسازی شده در محیط متخلخل پرشده با نانوسیال را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش عدد بی بعد لویس کسری از نانو ذرات در ورق افزایش چشمگیری پیدا می‌کند. از طرف دیگر تغییر عدد لویس اثر قابل توجهی در لایه مرزی حرارتی و هیدرودینامیکی دارد.
بیتاس و همکارانش [۲] موفق شدند جابجایی آزاد در محفظه‌ی متخلخل را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دهند. محفظه شامل دو دیواره‌ی افقی با ضخامت محدود بوده و دیواره‌های عمودی آن در دمای یکنواخت ولی متفاوت قرار دارند. 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 بیتاس و همکاران نشان می‌داد که با افزایش ضریب هدایت حرارتی، دمای سطح مشترک سیال و دیواره افقی کاهش می‌یابد.
قلم باز و همکاران [۳] 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. آیدین و یانگ [۴] در یک محفظه متقارن مستطیلی که از هوا پر شده و از زیر توسط یک منبع حرارتی گرم و از اطراف خنک می‌شود، اثر انتقال حرارت را به صورت عددی مدل‌سازی کردند. محل منبع حرارتی در مرکز دیواره پایینی قرار داشته و برای آن چهار حالت طول مختلف در نظر گرفته‌اند. اثر پارامترهای مختلف بر انتقال حرارت، جریان سیال، ناسلت‌های متوسط و محلی نیز مطالعه شده است. لیاقت و بیتاس [۵] به کمک روش حجم کنترل، انتقال حرارت جابجایی آزاد در یک محفظه معمولی که سیال آن دارای تولید حرارت است را بررسی کردند. این محفظه از اطراف توسط دیواره‌هایی با ضخامت محدود اشغال شده‌اند. و همه‌ی دیواره‌های بیرونی در دمای یکنواخت قرار دارند. در حالت‌های خاص، نتایج به دست آمده توسط آن‌ها با نتایج حاصل از پژوهشگران دیگر هم‌خوانی خیلی خوبی داشت. نقره ابادی و همکاران [۶] تأثیرات متغیر ویسکوزیته و هدایت گرمایی روی جابجایی طبیعی نانو سیال روی صفحه عمودی در محیط متخلخل بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که کاهش عدد ناسلت میتواند باعث افزایش یا کاهش پارامتر ویسکوزیته و همچنین میتواند باعث افزایش یا کاهش هدایت گرمایی شود. سعید[1] [۷] انتقال حرارت همبسته با درنظر گرفتن عدم تعادل حرارتی را در یک محفظه بسته مطالعه نمود. سعید از مدل دارسی برای مطالعه رفتار هیدرولیکی سیال و از مدل بوزینسک برای مطالعه نیروهای شناوری استفاده نمود. بکرمن[2] و همکارانش [۸] به صورت عددی و تجربی انتقال حرارت و جریان سیال را در محفظه‌ای با دو محیط متخلخل و سیال بررسی کردند. آن‌ها سیال و محیط متخلخل را در سه حالت مختلف قرار دادند و بر روی این سه حالت اثر پارامترهای مختلف مثل عدد رایلی، عدد دارسی، ضریب تخلخل و .... را آزمایش کردند. نتایج به دست آمده توسط حل عددی با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی همخوانی و صحت خوبی را نشان می‌داد. گوبین[3] و همکاران [۹] در یک محفظه دو لایه‌ای سیال- محیط متخلخل که دیواره‌های افقی آن عایق و دیواره‌های عمودی آن در دمای ثابت و مختلف قرار دارد، به بررسی جابجایی آزاد پرداختند. آن‌ها در این مقاله اثر ضخامت لایه متخلخل و نفوذپذیری را بر ساختار جریان، انتقال حرارت و انتقال جرم نشان دادند. نتایج به دست آمده توسط آن‌ها با نتایج حاصل از حل تحلیلی در حالت ساده مورد تایید قرار گرفته است. از فرمولاسیون اجزا محدود بر پایه روش گالرکین استفاده شد. خطوط جریان، خطوط دما ثابت، عدد ناسلت و ... برای مقادیر مختلف از اعداد بدون بعد رسم شده و مورد بررسی قرار گرفته است. عبدالله الامیری[4] و همکارانش [۱۰] به بررسی اثر هدایت حرارتی دیواره بر روی انتقال حرارت جابجایی درون محفظه دو بعدی که با محیط متخلخل پر شده، پرداختند. محفظه مورد بررسی آن‌ها دارای دیواره‌های افقی عایق و دو دیواره‌ی عمودی با دمای ثابت و متفاوت می‌باشند. یکی از دیواره‌های افقی دارای ضخامت محدود است. معادلات مومنتوم مدل شده دارای ترم‌های فورچهمیر، دارسی و بریکمن بوده و شرایط تعادل حرارتی بین فازهای جامد و سیال برقرار می‌باشد. برای حل از فرمولاسیون اجزا محدود بر پایه روش گالرکین استفاده شد. خطوط جریان، خطوط دما ثابت، عدد ناسلت و ... برای مقادیر مختلف از اعداد بدون بعد رسم شده و مورد بررسی قرار گرفته است.

معادلات حاکم

شکل پایین شماتیکی از مدل فیزیکی مسئله را نشان می دهد. محفظه ای به شکل مربع به طول L که در سمت چپ و راست آن دیواره ای با ضخامت اندک d محیط خالی این محفظه دارای ماده متخلخل است و در تمام نقاط دیواره بجز در دو قسمت T_h وT_c عایق می باشد. در تحقیق حاضر، انتقال حرارت جابجایی طبیعی درون این محفظه اشباع شده با محیط متخلخل با تولید حرارت داخلی در فاز جامد در حالت عدم تعادل حرارتی در دو بعد بررسی می شود. معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی حاکم بر مسئله مورد نظر بدین صورت می باشد:

[1] -Nawaf H.Saeid
[2] -Beckermann
[3] -Gobin
[4] -Abdullah Ahmiri

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.3.5]

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \quad (۱)$$

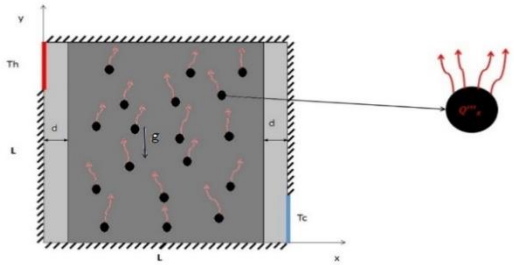
$$\frac{\rho_f}{\varepsilon^2}\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)=-\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\mu_f}{\varepsilon}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)-\frac{\mu_f}{k}u \quad (۲)$$

$$\frac{\rho_f}{\varepsilon^2}\left(u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)=-\frac{\partial P}{\partial y}+\frac{\mu_f}{\varepsilon}\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)-\frac{\mu_f}{k}v+\rho_{f.o}\beta\left(T_f-T_c\right) \quad (۳)$$

$$\frac{1}{\varepsilon}\left(u\frac{\partial T_f}{\partial x}+v\frac{\partial T_f}{\partial y}\right)=\alpha_f\left(\frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2}\right)+\frac{h_{fs}}{\varepsilon(pc)_f}\left(T_s-T_f\right) \quad (۴)$$

$$0=\alpha_s\left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2}\right)+\frac{h_{fs}}{(1-\varepsilon)(\rho c)_s}(T_f-T_s) \quad (۵)$$

$$\left(\frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_w}{\partial y^2}\right)=0 \quad (۶)$$



شکل ۱: محفظه حاوی مواد متخلخل با تولید حرارت در ماتریس جامد

در معادلات بالا u و v به ترتیب بیان‌گر مؤلفه‌های سرعت در راستاهای افقی (x) و عمودی (y) هستند. همچنین ε ضریب تخلخل، μ لزجت دینامیکی، k قابلیت نفوذپذیری محیط متخلخل، β ضریب انبساط حجمی، g نیروی گرانش، p فشار سیال، h_{fs} ضریب انتقال حرارت واسطه‌ای میان فاز سیال و ماتریس جامد در محیط متخلخل، (ρc) ظرفیت حرارتی مؤثر، ρ دانسیته، T_cدمای دیواره سرد، T_f دمای فاز سیال، T_s دمای فاز جامد و α ضریب پخش حرارتی مؤثر می باشد. در آن $\mu_{eff}=\frac{\mu_f}{\varepsilon}$ ضریب ویسکوزیته دینامیکی ماده متخلخل و اندیس های s و f به ترتیب مربوط به فازهای جامد و سیال می باشند.

شرایط مرزی به صورت زیر می‌باشند:

$$At\ \ 0\le x\le d, y=0 \Rightarrow\ T_w=T_w=1\ \ at\ \ x=0,\ \ ypl-al/2\le y\le ypl+al/2 \quad (۷)$$

$$T_w=0\ \ at\ \ x=L,\ \ ypr-ar/2\le y\le ypr+ar/2 \quad (۸)$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial y}=\frac{\partial T_s}{\partial y}=0,\ \ u=v=0\ \ at\ \ d\le x\le L-d,\ \ y=0,\ \ y=L \quad (۹)$$

$$\frac{\partial T_w}{\partial y}=0\ \ at\ \ 0\le x\le d,\ \ L-d\le x\le L,\ \ y=0,\ \ y=L \quad (۱۰)$$

$$\frac{\partial T_w}{\partial y}=0\ \ at\ \begin{cases} x=0, & 0\le y\le ypl-al/2,\ \ ypl \\ x=L, & 0\le y\le ypr-ar/2,\ \ ypr \end{cases} \quad (۱۱)$$

$$T_f=T_s=T_w,\ \ u=v=0\ \ at\ \ x=d,\ \ x=L-d,\ \ 0\le y\le L \quad (۱۲)$$

$$k_w\frac{\partial T_w}{\partial x}=\varepsilon k_f\frac{\partial T_f}{\partial x}+(1-\varepsilon)k_s\frac{\partial T_s}{\partial x}\ \ at\ x=d, x=L-d, 0\le y\le L \quad (۱۳)$$

با استفاده از پارامترهای بی‌بعد سازی زیر معادلات به شکل بی‌بعد تبدیل می شوند:

$$X=\frac{x}{L}\ .\ Y=\frac{y}{L}\ .\ D=\frac{d}{L}.\ P=\frac{PL^2}{\rho_f\alpha_f^2}$$

$$\theta_f=\frac{(T_f-T_c)}{\Delta T}\ .\ \theta_s=\frac{(T_s-T_c)}{\Delta T}\ .\ \theta_w=\frac{(T_w-T_c)}{\Delta T}.\qquad pr=\frac{v_f}{\alpha_f}\ .\ U=\frac{uL}{\alpha_f}\ .\ V=\frac{vL}{\alpha_f}$$

$$\lambda=\frac{Q'''_sL^2}{(1-\varepsilon)k_s\Delta T}.a=\frac{k}{L^2}\ .\ Ra=\frac{g\beta\Delta TL^3}{v_f\alpha_f}\ .\ H=\frac{h_{fs}L^2}{\varepsilon k_f}\ .\ k_r=\frac{\varepsilon k_f}{(1-\varepsilon)_{k_s}}\ .\ \Delta T=T_h-T_c\qquad \mathrm{R_k=k_w/\varepsilon k_f}$$

شرایط مرزی در حالت بدون بعد:

$$\theta_w=1\ \ at\ \ X=0,\ \ Ypl-Al/2\le Y\le Ypl+Al/2 \quad (۱۴)$$

$$\theta_w=0\ \ at\ \ X=1,\ \ Ypr-Ar/2\le Y\le Ypr+Ar/2 \quad (۱۵)$$

$$\frac{\partial\theta_f}{\partial Y}=\frac{\partial\theta_s}{\partial Y}=0\ \ \mathrm{at}\ \ D\le X\le 1-D,\ \ Y=0,\ \ Y=1 \quad (۱۶)$$

$$\frac{\partial\theta_w}{\partial Y}=0\ \ \mathrm{at}\ \ 0\le X\le D,\ \ 1-D\le X\le 1,\ \ Y=0,\ \ Y=1 \quad (۱۷)$$

$$\frac{\partial\theta_w}{\partial Y}=0\qquad \mathrm{at}\ \begin{cases} X=0, & 0\le Y\le Ypl-Al/2,\ \ Ypl+Al/2\le Y\le 1 \\ X=1, & 0\le Y\le Ypr-Ar/2,\ \ Ypr+Ar/2\le Y\le 1 \end{cases} \quad (۱۸)$$

$$\theta_f=\theta_s=\theta_w\ \ \mathrm{at}\ \ X=D,\ \ X=1-D,\ \ 0\le Y\le 1 \quad (۱۹)$$

$$\frac{\partial\theta_f}{\partial X}=R_k\frac{\partial\theta_w}{\partial X}-K_r^{-1}\frac{\partial\theta_f}{\partial X}\ \ \mathrm{at}\ \ X=D,\ \ X=1-D,\ \ 0\le Y\le 1 \quad (۲۰)$$

$$Q_w=R_k^{-1}Nu_f+R_k^{-1}K_r^{-1}Nu_s \quad (۲۱)$$

$$Nu_t=\frac{q_t''L}{\Delta T\left[\varepsilon k_f+(1-\varepsilon)k_s\right]}=\frac{-1}{(K_r+1)}\int_0^1\left[K_r\left(\frac{\partial\theta_f}{\partial X}\right)_{X=D}+\left(\frac{\partial\theta_s}{\partial X}\right)_{X=D}\right]dY \quad (۲۲)$$

تعریف تابع جریان برابر است با: $U=\frac{\partial\psi}{\partial X},\ V=-\frac{\partial\psi}{\partial Y}$

میانگین اتقال حرارت متوسط از محیط متخلخل توسط فازهای مایع و جامد در هر واحد از دیوار گرم با فرض مساوی بودن تخلخل در سطح و محیط متخلخل برابر است با:

$$q_t''=\frac{1}{L}\int_0^L q_t''(y)dy=\frac{-1}{L}\int_0^L\left[\varepsilon k_f\left(\frac{\partial T_f}{\partial x}\right)_{x=d}+(1-\varepsilon)k_s\left(\frac{\partial T_s}{\partial x}\right)_{x=d}\right]dy \quad (۲۳)$$

انتقال حرارت از طریق دیوار(Q_{wy})، ناسلت محلی فاز مایع ($Nu_{fy,}$)، ناسلت فاز جامد(Nu_{sy}) و همچنین انتقال حرارت از طریق دیوار و ناسلت متوسط برای هر دو فابصورت زیر تعریف میشود.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.3.5]

$$Q_{wy} = \left(-\frac{\partial\theta_w}{\partial X}\right)_{X=0,1},\ Nu_{fy} = \left(-\frac{\partial\theta_f}{\partial X}\right)_{X=D,1-D},\ Nu_{sy} = \left(-\frac{\partial\theta_s}{\partial X}\right)_{X=D,1-D} \quad (۲۴)$$

$$Q_w = \int_0^1 Q_{wy}\,dY,\ Nu_f = \int_0^1 Nu_{fy}\,dY,\ Nu_s = \int_0^1 Nu_{sy}\,dY \quad (۲۵)$$

بر این اساس عدد ناسلت متوسط کل در محیط متخلخل بر اساس کل انتقال حرارت متوسط که در معادله ۳-۷۰ تعریف شده است و همچنین اثر هدایت گرمایی محیط متخلخل:

$$Nu_t = \frac{q_t^{''}L}{\Delta T\left[\varepsilon k_f + (1-\varepsilon)k_s\right]} = \frac{-1}{(K_r+1)}\int_0^1 \left[K_r\left(\frac{\partial\theta_f}{\partial X}\right)_{X=D} + \left(\frac{\partial\theta_s}{\partial X}\right)_{X=D}\right]dY \quad (۲۶)$$

حال طریقه به دست آوردن معادلات بی بعد را توضیح خواهیم داد. با جایگذاری روابط بالا در معادلات حاکم بدین صورت عمل می کنیم:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (۲۷)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial\left(U\frac{\alpha_f}{L}\right)}{\partial(XL)} + \frac{\partial\left(V\frac{\alpha_f}{L}\right)}{\partial(YL)} = \frac{\alpha_f}{L^2}\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\alpha_f}{L^2}\frac{\partial V}{\partial Y} = \frac{\alpha_f}{L^2}\left(\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y}\right) = 0 \Rightarrow \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (۲۸)$$

معادله مومنتوم فاز متخلخل در راستای X:

$$\frac{\rho_f}{\varepsilon^2}\left(u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu_f}{\varepsilon}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) - \frac{\mu_f}{k}u \quad (۲۹)$$

حال با جایگذاری ترم‌های بی‌بعد سازی داریم:

$$\frac{1}{\varepsilon^2}\left(U\frac{\partial U}{\partial X} + V\frac{\partial V}{\partial Y}\right) = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{Pr}{\varepsilon}\left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2}\right) - \frac{Pr}{Da}U \quad (۳۰)$$

معادله مومنتوم فاز متخلخل در راستای y:

$$\frac{\rho_f}{\varepsilon^2}\left(u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y}\right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu_f}{\varepsilon}\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) - \frac{\mu_f}{k}v + \rho_{f.0}\beta\left(T_f - T_c\right)g \quad (۳۱)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\varepsilon^2}\left(U\frac{\partial V}{\partial X} + V\frac{\partial V}{\partial Y}\right) = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{pr}{\varepsilon}\left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2}\right) - \frac{pr}{Da}V + Ra.pr.\theta_f$$

$$\frac{1}{\varepsilon^2}\left(\mathrm{U}\frac{\partial \mathrm{V}}{\partial \mathrm{X}} + \mathrm{V}\frac{\partial \mathrm{V}}{\partial \mathrm{Y}}\right) = -\frac{\partial \mathrm{P}}{\partial \mathrm{Y}} + \frac{\mathrm{pr}}{\varepsilon}\left(\frac{\partial^2 \mathrm{V}}{\partial \mathrm{X}^2} + \frac{\partial^2 \mathrm{V}}{\partial \mathrm{Y}^2}\right) - \frac{\mathrm{pr}}{\mathrm{Da}}\mathrm{V} + \mathrm{Ra.\,pr.}\,\theta_f \quad (۳۲)$$

معادله حرارت در فاز سیال:

$$\frac{1}{\varepsilon}\left(u\frac{\partial T_f}{\partial x} + v\frac{\partial T_f}{\partial y}\right) = \alpha_f\left(\frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2}\right) + \frac{h_{fs}}{\varepsilon(pc)_f}\left(T_s - T_f\right) \quad (۳۳)$$

جایگذاری:

$$\Rightarrow \frac{1}{\varepsilon}\frac{\alpha_f\Delta T}{L^2}\left(U\frac{\partial\theta_f}{\partial X} + V\frac{\partial\theta_f}{\partial Y}\right) = \alpha_f\frac{\Delta T}{L^2}\left(\frac{\partial^2\theta_f}{\partial X^2} + \frac{\partial^2\theta_f}{\partial Y^2}\right) + \frac{h_{fs}}{\varepsilon(pc)_f}\left(\theta_s\Delta T + T_c - \theta_f\Delta T - T_c\right)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\varepsilon}\frac{\alpha_f\Delta T}{L^2}\left(U\frac{\partial\theta_f}{\partial X} + V\frac{\partial\theta_f}{\partial Y}\right) = \alpha_f\frac{\Delta T}{L^2}\left(\frac{\partial^2\theta_f}{\partial X^2} + \frac{\partial^2\theta_f}{\partial Y^2}\right) + \frac{h_{fs}\Delta T}{\varepsilon(pc)_f}\left(\theta_s - \theta_f\right) \quad (۳۴)$$

طرفین را در $\frac{L^2}{\alpha_f\Delta T}$ ضرب می کنیم:

$$\frac{1}{\varepsilon}\left(U\frac{\partial\theta_f}{\partial X} + V\frac{\partial\theta_f}{\partial Y}\right) = \frac{\partial^2\theta_f}{\partial X^2} + \frac{\partial^2\theta_f}{\partial Y^2} + H\left(\theta_s - \theta_f\right) \quad (۳۵)$$

معادله حرارت در فاز جامد:

$$0 = \alpha_s\left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2}\right) + \frac{h_{fs}}{(1-\varepsilon)(\rho c)_s}\left(T_f - T_s\right) \quad (۳۶)$$

جایگذاری:

$$0 = \alpha_s\frac{\Delta T}{L^2}\left(\frac{\partial^2\theta_s}{\partial X^2} + \frac{\partial^2\theta_s}{\partial Y^2}\right) + \frac{h_{fs}}{(1-\varepsilon)(\rho c)_s}\left(\theta_f\Delta T + T_c - \theta_s\Delta T - T_c\right) + \frac{Q'''}{(1-\varepsilon)(\rho c)_s}$$

$$\Rightarrow 0 = \frac{\partial^2\theta_s}{\partial X^2} + \frac{\partial^2\theta_s}{\partial Y^2} + H.Kr\left(\theta_f - \theta_s\right) + \frac{Q'''_s L^2}{(1-\varepsilon)(\rho c)_s\alpha_s\Delta T} \quad (۳۷)$$

$$\lambda = \frac{Q'''_s L^2}{(1-\varepsilon)k_s\Delta T} \quad (۳۸)$$

که در آن k_s رسانندگی حرارتی ماده متخلخل را نشان می دهد. Q'''_s نیز نرخ تولید حرارت حجمی در فاز جامد محیط متخلخل را نشان می دهد و واحد آن W/m^3 است. λ عدد تولید حرارت داخلی بی بعد در فاز جامد محیط متخلخل را نشان می دهد.

بنابراین، معادله حرارت در فاز جامد محیط متخلخل را به صورت بی بعد زیر می‌توان نوشت:

$$0 = \frac{\partial^2\theta_s}{\partial X^2} + \frac{\partial^2\theta_s}{\partial Y^2} + H.Kr\left(\theta_f - \theta_s\right) + \lambda \quad (۳۹)$$

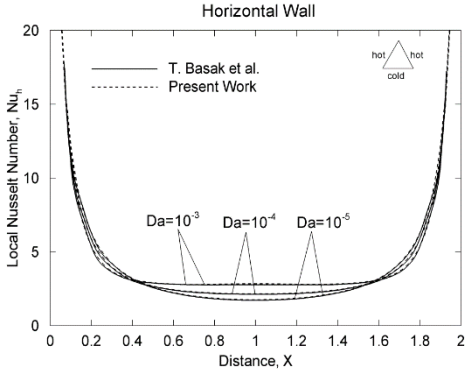
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.3.5]

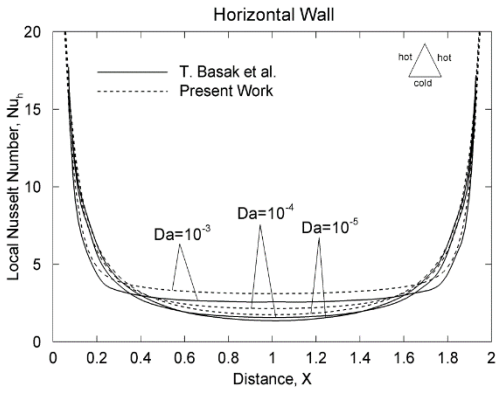
اعتبار سنجی

محفظه پر شده با محیط متخلخل با تعادل حرارتی

در سال ۲۰۱۰ باساک و همکاران [۱۱] به تجزیه و تحلیل بازیابی حرارت و انتقال حرارت درون محفظه مثلثی حاوی ماده متخلخل پرداختند. آنها فرض کردند یک مایع اشباع در محیط متخلخل در دو محفظه مثلثی شکل قرار دارد. دیوارهای شیب دار در دمای ثابت گرم و دیوارهای افقی در دمای ثابت سرد در نظر گرفته شدند. همچنین تقریب بوسینسک برای خواص سیال مورد استفاده قرار گرفت. با فرض تغییر چگالی با کوپل توزیع دما و توزیع جریان، علاوه بر این آنها فرض کردند در محیط متخلخل دمای فاز مایع برابر با فاز جامد است. و تعادل گرمایی برقرار است. که در شکل ۳ نشان داده شده است.

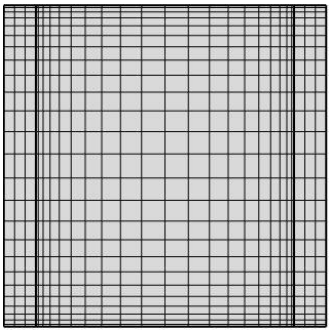


شکل ۲: ناسلت محلی برای پرانتل۰/۰۱۵

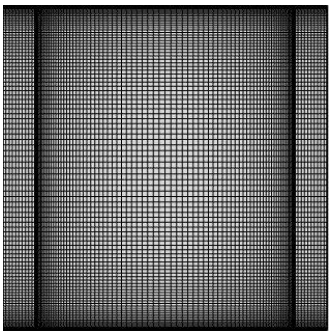


شکل ۳ : ناسلت محلی برای پرانتل ۱۰^۲

شکل های 5 و 6 بیان گر شبکه ایجاد شده در محفظه مربعی است. ابعاد این محفظه ۱×۱ بوده و همانطور که مشاهده می شود، گره های ایجاد شده بیشتر به سمت گوشه های محفظه متمرکز شده اند. و شبکه ایجاد شده بصورت غیر یکنواخت است. علت این کار ارزیابی هر چه بهتره جریان در گوشه ها و مرزهای محفظه است. همچنین تراکم زیاد گره ها در گوشه ها، موجب محاسبه دقیق تر اعداد بدون بعد هم چون عدد ناسلت می شود.



شکل ۴: شبکه بندی محفظه مربعی با اندازه ۲۵×۲۵



شکل ۵: شبکه بندی محفظه مربعی با اندازه ۱۰۰×۱۰۰

- نتایج و بحث

در این بررسی، پارامترهایی مثل اعداد رایلی، دارسی، طول ضخامت شکل شماتیک، و همچنین تمرکز بطور مستقیم بروی پارامترهای ضریب انتقال حرارت بین دو فاز جامد و سیال (H) و نسبت ضریب انتقال حرارت هدایت تصحیح شده در محیط متخلخل می باشد. در این بررسی اثر تغییر پارامترهای بدون بعد بر جریان سیال و ویژگی های انتقال حرارت تحت مدل LTNE برای مکان های حرارتی ثابت در Ypl = 0.8 و Ypr = 0.2تجزیه و تحلیل می شود. نتایج بدست آمده در قالب نمودارهای دما ثابت، خطوط جریان و همچنین نمودارهای میانگین عدد ناسلت برای فازهای جامد و سیال برای محیط متخلخل بدست آمده است. مقادیر پارامترهای بدون بعد، از جمله عدد رایلی، عدد دارسی، در محدوده, , $10^3 \le Ra \le 10^6$, $10^{-5} \le Da \le 10^{-3}$ در نظر گرفته شده اند. در حالی که تخلخل و ارتفاع بی بعد، از عناصر حرارتی ثابت نگه داشته می شوند.

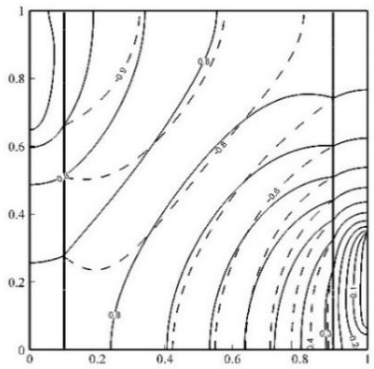
شکل‌های شماره 6 تا ۸ اثرات اعداد رایلی روی انتقال حرارت و خصوصیات جریان سیال از نمودارهای دما ثابت برای هر دو محیط متخلخل و دیوار(فازهای سیال و جامد) و خطوط جریان تحت شرایط LTNE داریم: $Da=10^{-3}$ ، $Ra=10^{6}$، $Pr=7.2$، $H=1$، $D=0.1$، $\lambda=0.1$ ، $K_r=1$ ، $R_k=1$

همانطور که در شکل ها مشاهده می شود با افزایش عدد رایلی، نیروی گردش جریان، به علت افزایش نیروی شناوری افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر جریان با افزایش رایلی افزایش می‌یابد. همانطورکه در اشکال ۹ تا ۱۱ مشاهده می‌شود برای اعداد رایلی در محدوده 10^{3} -10^{5} تنها یک سلول چرخشی تشکیل شده است. تسلط جابجایی همرفت از ویژگی های شکل ۱۱ است. در رایلی‌های کوچک، بدلیل کوچک بودن سرعت‌ها در

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

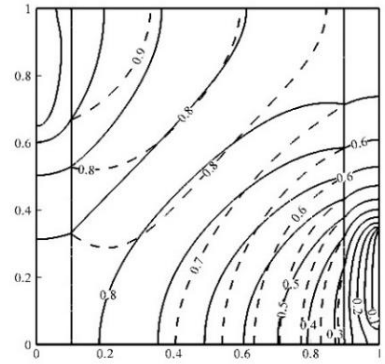
[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.3.5]

محیط متخلخل مهمترین نیرو دربرابر حرکت سیال نیروی درگ ویسکوز ناشی از ماتریس جامد محیط متخلخل است و انتقال حرارت غالب از نوع رسانش است. با افزایش این عدد، سرعتها در این محیط افزایش یافته، بطوری که هر دو مکانیزم انتقال حرارت رسانش و جابجایی هم‌مرتبه می‌شوند. در شکل‌های ۶ تا ۸ توزیع دما در هندسه در رایلی‌های مختلف قابل مشاهده است. با افزایش رایلی شاهد کوچک شدن لایه مرزی حرارتی خواهیم بود. همانطور که در شکل‌های ۶ تا ۸ مشخص است خطوط هم‌تراز دما بین دودیواره در اعداد رایلی کوچک برای فاز سیال تقریبا عمدی می‌باشد و مقادیر ناسلت فاز سیال افزایشی هستند. اما با افزایش رایلی در این اشکال شاهد کوچکتر شدن ناسلت فاز جامد خواهیم بود. جایی که نمودار ایزوترم فاز سیال از لایه محیط متخلخل، تمایل دارند افقی باشند. این نشان می‌دهد که انتقال حرارت طبیعی با رایلی افزایش پیدا می‌کند. همچنین در این اشکال مقادیر میانگین عدد ناسلت برای فازهای سیال و جامد محیط متخلخل و میانگین انتقال حرارات از میان دیواره ها و حداکثر عملکرد تابع جریان را نشان می‌دهند. مقادیر میانگین عدد ناسلت در شکل ها افزایش برای فاز سیال و کاهش برای فاز جامد محیط متخلخل را نشان می‌دهد. علاوه بر این، میانگین انتقال گرما از طریق دیوار با افزایش رایلی، افزایش می‌یابد. نتایج شکل‌های ۶ تا ۸ نشان از اجرای صحیح شرایط مرزی در سطح مشترک دیوار و لایه محیط متخلخل می‌دهد. ضمنا همانطور که در شکل‌ها مشخص است مقادیر ناسلت برای فاز جامد منفی شده است که نشان می‌دهد تولید حرارت به اندازه‌ای است که باعث دفع حرارت از سمت دیواره گرم می‌شود. نتایج در اشکال نشان از اجرای صحیح شرایط مرزی در رابطه با مرز مشترک میان فاز سیال و فاز جامد طبق رابطه 21 می‌دهد. به همین ترتیب، اثر عدد دارسی بروی نمودارهای دما ثابت و جریان برای $Da=10^{-3}$، $Ra=10^{6}$، $Pr=7.2$، $H=1$، $D=0.1$، $R_k=1$ ، $K_r=1$ ، مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج در شکل‌های۱۲ تا ۱۴ نشان داده شده‌اند. با توجه به این اشکال، یک سلول چرخشی جریان در محیط متخلخل برای دارسی های کم قابل مشاهده است. در حالی که با افزایش عدد دارسی یک ساختار چرخشی دو سلولی تشکیل می شود که در شکل 17 نشان داده شده است. علاوه بر این، قدرت گردش جریان با افزایش دارسی، افزایش می‌یابد. این را می‌توان از مقادیر حداکثریه تابع جریان دید. در واقع عدد دارسی گذر دهی محیط متخلخل را نشان می‌دهد. بنابراین، با افزایش عدد دارسی، جریان سیال در محیط متخلخل تشدید می شود. در اعداد دارسی بالا نمودارهای دما ثابت تقریبا بصورت موازی با مرزهای افقی توزیع شده اند. بنابراین با افزایش دارسی ناسلت فاز مایع افزایش و ناسلت فاز جامد کاهش پیدا می‌کند.



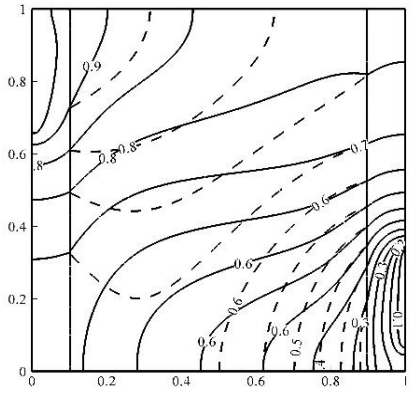
شکل۶ :کانتورهای دما برای فاز سیال و فاز جامد برای رایلی 10^{3}

$Nu_f=0.36$, $Nu_s=-0.004$, $Q_w=0.356$



شکل ۷ :کانتورهای دما برای فاز سیال و فاز جامد برای رایلی 10^{4}

$Nu_f=0.378$, $Nu_s=-0.019$, $Q_w=0.358$

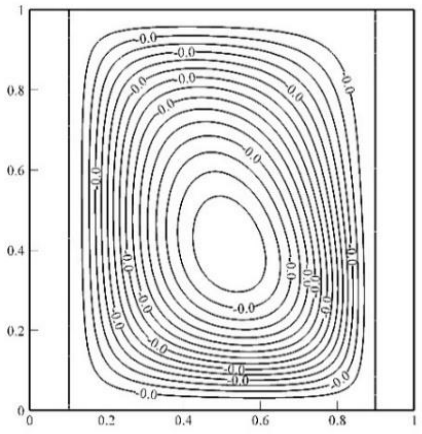


شکل ۸ :کانتورهای دما برای فاز سیال و فاز جامد برای رایلی 10^{5}

$Nu_f=0.517$, $Nu_s=-0.102$, $Q_w=0.415$

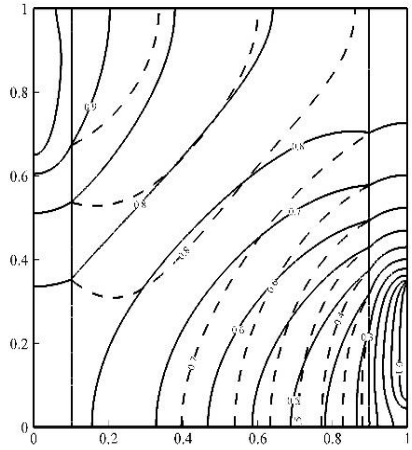
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.3.5]



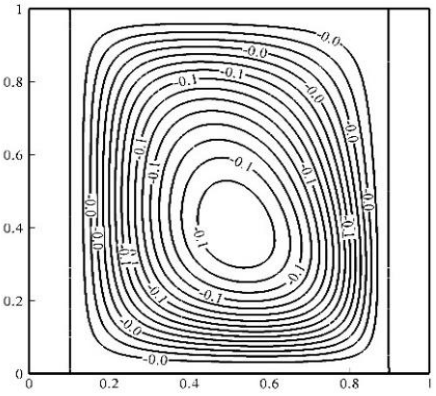
شکل ۹ :کانتورهای جریان برای فاز سیال و فاز جامد برای رایلی 10^3

Ψ_{max}=۰.۰۱۶



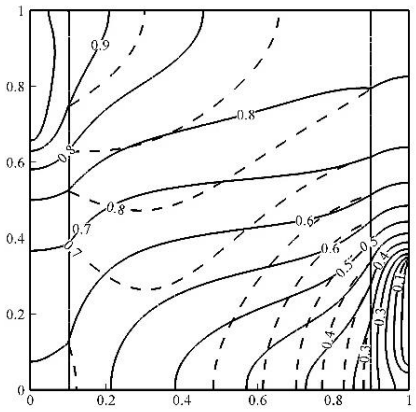
شکل ۱۲: کانتورهای دما برای فاز سیال و فاز جامد برای دارسی 10^{-5}

Nu_f=۰.۳۸۷ , Nu_s=-۰.۰۲۶ , Q_w=۰.۳۶۱



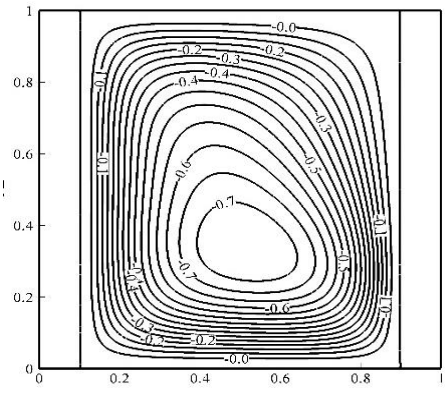
شکل ۱۰: کانتورهای جریان برای فاز سیال و فاز جامد برای رایلی 10^4

Ψ_{max}=۰.۱۵۵



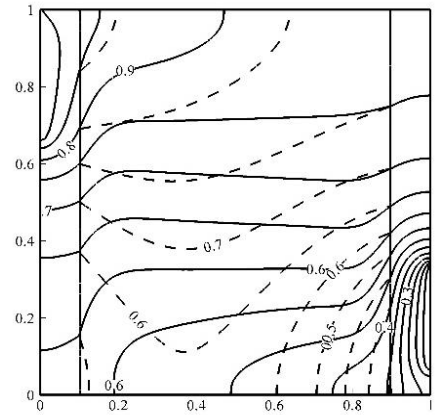
شکل ۱۳ :کانتورهای دما برای فاز سیال و فاز جامد برای دارسی 10^{-4}

Nu_f=۰.۵۶۴, Nu_s=-۰.۱۲۷, Q_w=۰.۴۳



شکل ۱۱ :کانتورهای جریان برای فاز سیال و فاز جامد برای رایلی 10^5

Ψ_{max}=۰.۷۴۹

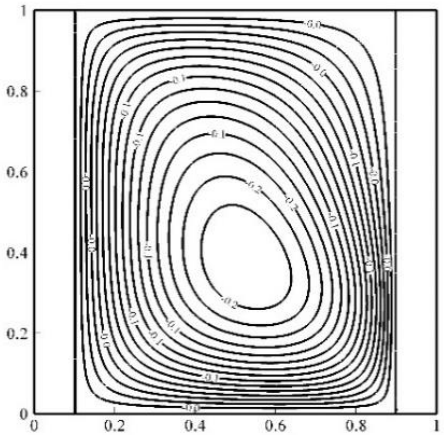


شکل ۱۴ :کانتورهای دما برای فاز سیال و فاز جامد برای دارسی 10^{-3}

Nu_f=۰.۷۵۳, Nu_s=-۰.۲۱, Q_w=۰.۵۴۲

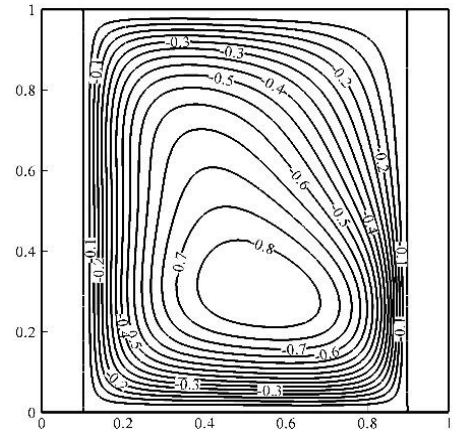
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.3.5]



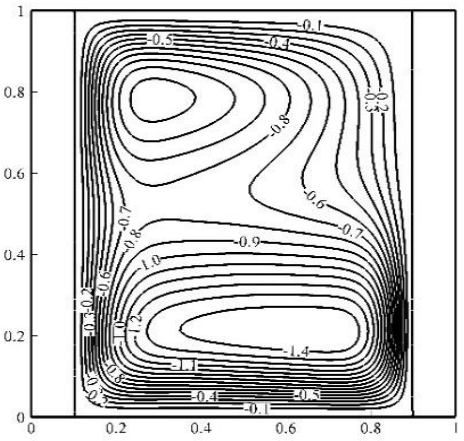
شکل ۱۵ :کانتورهای جریان برای فاز سیال و فاز جامد برای دارسی 10^{-5}

Ψ_{max}=۰.۱۹



شکل ۱۶ :کانتورهای جریان برای فاز سیال و فاز جامد برای دارسی 10^{-4}

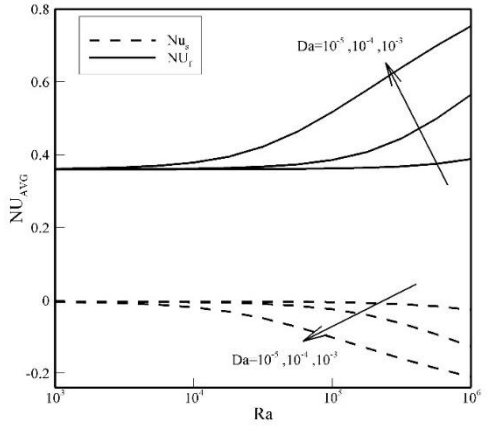
Ψ_{max}=۰.۸



شکل ۱۷ :کانتورهای جریان برای فاز سیال و فاز جامد برای دارسی 10^{-3}

Ψ_{max}=۱.۵۲

در شکل ۱۸ تغییرات عدد ناسلت برای فاز سیال و فاز جامد محیط متخلخل با عدد رایلی و مقادیر مختلف عدد دارسی با مقادیر ثابت R_k=۱، K_r=۱ ، P_r=۷.۲ ، H=۱، λ=۰.۱، ε=۰.۵ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که عدد ناسلت متوسط برای فاز سیال با افزایش همزمان یا جداگانه اعداد رایلی یا دارسی افزایش می‌یابد. تغییرات عدد ناسلت برای هر دو فاز مایع و جامد در مقادیر پایین دارسی تقریبا ثابت است. در حالی که با افزایش عدد دارسی این تغییرات شدید می‌شوند. همچنین این وضعیت برای مقادیر کم رایلی برقرار است چون با افزایش رایلی تغییرات در هر دو ناسلت بیشتر می‌شود و با افزیش عدد رایلی، مقدار ناسلت متوسط برای فاز جامد کاهش و برای فاز سیال مایع افزایش می‌یابد.



شکل ۱۸ ،مقادیر مختلف عدد ناسلت متوسط برای فاز سیال و فاز جامد(خطوط پیوسته فاز سیال و خطوط منقطع فاز جامد) با عدد رایلی برای دارسی‌های مختلف

نتیجه گیری

۱.عدد دارسی نشان دهنده میزان مقاومت محیط متخلخل در برابر حرکت سیال می‌باشد و با کاهش عدد دارسی، میزان مقاومت محیط متخلخل در برابر سیال افزایش می‌یابد تا جایی که سرعت سیال در ناحیه متخلخل به صفر می‌رسد. از آنجایی که مقدار عدد دارسی برای مواد متخلخل طبیعی بسیار پایین می‌باشد، می‌توان گفت محیط‌های متخلخل رفتاری شبیه به جسم جامد داشته و انتقال حرارت در این محیط معمولاً از طریق هدایت می‌باشد، در صورتی‌که برای محیط‌های مصنوعی عدد دارسی می‌تواند بسیار بزرگ باشد. برای محیط متخلخل با عدد دارسی بالاتر سیال با آزادی بیشتری در ناحیه متخلخل حرکت کرده و به همین دلیل انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌یابد.

۲.عدد رایلی نشان دهنده میزان انتقال حرارت جابجایی بوده و با افزایش آن میزان جابجایی افزایش پیدا می‌کند. در رایلی‌های پایین چرخش سیال بسیار ضعیف بوده و انتقال حرارت تقریباً فقط از طریق هدایت صورت می‌گیرد. با افزایش عدد رایلی چرخش درون محفظه افزایش یافته و انتقال حرارت را به سمت جابجایی پیش می‌برد.

مراجع

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.3.5]

[۱]-Ghalambaz,M.,Noghrehabadi,A., argartalebi,H.,” Natural Convection Boundary Layer Flow over a Horizontal Plate Embedded in a Porous Medium Saturated with a Nanofluid: Case of Variable Thermophysical Properties ”, Transp Porous Med (2015) 107:153–170 DOI 10.1007/s11242-014-0430-4

[۲]- Baytas, A. C., Liaqat, A., Grosan, T., Pop, I., ‘‘Conjugate natural convection in a square porous cavity”, J. of Heat and Mass Transfer., Vol. 37, 2001, pp. 467–473.

[۳] – Noghrehabadi, A.,Behseresht, A., Ghalambaz, M., “Natural convection of nanofluid over vertical plate embedded in porous medium: prescribed surface heat flux ”, Applied Mathematics and Mechanics,

[۴]- Aydin, O., Yang, W. J., ‘‘Natural convection in enclosures with localizated heating from below and symmetrical cooling from sides’’, Int. J. of Numerical Methods for Heat and Flow, Vol. 10, 2000, pp. 518–529.

[۵]- Liaqat, A., Baytas, A. C., ‘‘Conjugate natural convection in a square enclosure containing volumetric sources”, J. of Heat and Mass Transfer., Vol. 44, 2001, pp. 3273–3280.

[۶]- Nogrehabadi, A.,Ghalambaz, M.,Ghanbarzade, A.,” Effects variable viscosity and Thermal conductivity on nanofluid Natural-convection of Nanofluid past a vertical plate in porous Media ”, Journal of Mechanics, Vol. 30, No. 3, June 2014

[۷]- Saeid, Nawaf H. "Conjugate natural convection in a porous enclosure sandwiched by finite walls under thermal nonequilibrium conditions." Journal of Porous Media, Vol. 11, 2008, pp. 259-275.

[۸]- Beckermann, C., Viskanta, R., Ramadhyani, S., ‘‘Natural convection in vertical enclosures containing simultaneously fluid and porous layers’’, J. of Fluid Mech., Vol. 186, 1988, pp. 257–284.

[۹]- Gobin, D., Goyeau, B., Songbe, J. P., ‘‘Double diffusive natural convection in a composite fluid-porous layer’’, J. of Heat Transfer, Vol. 120, 1998, pp. 234–242.

[۱۰]- Abdalla Al-Amiri, Khalil Khanafer, Pop, I., ‘‘Steady-state conjugate natural convection in a fluid-saturated porous cavity’’, J. of Heat and Mass Transfer., Vol. 51, 2008, pp. 4260–4275.

[۱۱]- Basak, Tanmay., S, Roy., D, Ramakrishna.,. B, D, Pandey., “Analysis of heat recovery and heat transfer within entrapped porous triangular cavities via heatline approach” International Journal of Heat and Mass Transfer 53 (2010) 3655–3669

[۱۲]- Sathiyamoorthy, M., Basak Tanmay, Roy, S., Pop, I., “Steady natural convection flow in a square cavity filled with a porous medium for linearly heated side wall(s)”, J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, 2007, pp. 1892–1901.

[۱۳]-Noghrehabadi, A. R., Nouri Borujerdi, A., Rees, A., “The effect of local thermal non-equilibrium on impulsive conduction in porous media”, J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, 2007, pp. 3244–3246.

[۱۴] Noghrehabadi, A. R., Nouri Borujerdi, A., Rees, A., “The effect of local thermal non-equilibrium on conduction in porous channels with a uniform heat source”, J. of Transp. Porous Media, Vol. 69, 2007, pp. 281–288.

[۱۵]- Baytas, A. C., Pop, I., “Free Convection in a square porous cavity using a thermal nonequilibrium model”, J. of Thermal Sciences, Vol. 41, 2002, pp. 861-870.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.3.5]