ارزیابی اثرات ضخامت دیواره و تخلخل بر میزان انتقال حرارت جابجایی طبیعی همبسته نانوسیال هیبریدی درون محفظه بسته چهارضلعی

سیدحمزه دهقانی[1*] و محمد قلم‌باز[2]

[1] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده برق و کامپیوتر، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران
[2] استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

دریافت: بهار ۹۷ پذیرش: پاییز ۹۷

چکیده

در پژوهش حاضر، اثرات ضخامت دیواره و تخلخل بر میزان انتقال حرارت جابجایی طبیعی همبسته نانوسیال هیبریدی درون محفظه بسته چهارضلعی مورد ارزیابی قرار گرفته است. معادلات پیوستگی، مومنتوم و حرارت برای فاز سیال و ماتریس جامد متخلخل، معادلات حاکم بر مسئله هستند. معادلات یادشده و شرایط مرزی مرتبط با آن‌ها، به شکل بی‌بعد خود انتقال یافته؛ با بهره‌گیری از روش المان محدود، کدنویسی در نرم افزار متلب و توابع کمکی تعریف شده در نرم‌افزار کامسول حل شدند. نتایج حاصل از کد دینامیک سیالات محاسباتی محاسباتی، با نتایج پژوهش‌های معتبر پیشین مورد اعتبارسنجی قرار گرفتند. تأثیر اعداد بی‌بعد رایلی، دارسی و پارامترهایی نظیر ضخامت دیواره رابط، نسبت ضریب رسانش حرارتی دیواره ضخیم به سیال و ضریب انتقال حرارت رابط بین دو فاز نانوسیال هیبریدی و ماتریس جامد محیط متخلخل در محدوده‌های پیش‌فرض بر میزان انتقال حرارت درون محفظه بسته بررسی گردید. از این رو، نتایج در دو بخش مجزا برای بررسی اثرات انتقال حرارت جابجایی طبیعی همبسته و محیط متخلخل در شرایط عدم تعادل حرارتی موضعی ارائه شده اند. نتایج بیان‌گر آن است که افزایش ضخامت دیواره و عدد دارسی سبب بهبود میزان انتقال حرارت نانوسیال هیبریدی می‌شوند؛ حال آن‌که ازدیاد پارامتر ضریب انتقال حرارت رابط بین دو فاز نانوسیال هیبریدی و ماتریس جامد متخلخل، کاهش انتقال حرارت نانوسیال هیبریدی را در پی دارد. همچنین میان پارامترهای یاد شده، پارامتر نسبت ضریب رسانش حرارتی دیواره ضخیم به سیال می تواند نرخ انتقال حرارت ماتریس جامد متخلخل را تغییر دهد.

[*] **عهده‌دار مکاتبات: h67.dehghani@yahoo.com**

کلمات کلیدی: انتقال حرارت جابجایی طبیعی همبسته، نانوسیال هیبریدی، محیط متخلخل، شرایط عدم تعادل حرارتی موضعی.

۱- مقدمه

انتقال حرارت جابجایی طبیعی همبسته در محیط متخلخل با در نظر گرفتن شرایط عدم تعادل حرارتی از اهمیت بالایی در کاربردهای انتقال حرارت با توان بالا برخوردار است. این نوع از انتقال حرارت کاربردهای متفاوتی در بحث خنک‌کاری میکروالکترونیک‌ها و طراحی حرارتی ساختمان‌ها داشته و مورد توجه محققان قرارگرفته است. بر همین اساس، به دلیل کاربرد گسترده این موضوع در بسیاری از زمینه‌های مهندسی، تحقیقات و مدل‌های مختلفی با استفاده از روش‌های گوناگون، مورد مطالعه قرار گرفته است. برهم‌کنش انتقال حرارت جابجایی در یک سیال و انتقال حرارت رسانشی در یک ماده جامد که باهم در تماس هستند، در اصطلاح انتقال حرارت جابجایی همبسته نامیده می‌شود. چمخا[1] و اسماعیل [۱]، به صورت عددی، انتقال حرارت جابجایی طبیعی همبسته نانوسیال درون یک حفره مربعی متخلخل را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنان نشان می‌دهد که وقتی ضخامت دیواره از یک مقدار بحرانی بیشتر شود، نرخ انتقال حرارت بهبود می‌یابد و این مقدار بحرانی با افزایش عدد رایلی بیشتر می‌شود. در پژوهش طهماسبی و همکاران [۲] از مدل دارسی- بریکمن توسعه یافته برای شبیه‌سازی جریان سیال در محیط متخلخل تحت تأثیر انتقال حرارت جابجایی طبیعی همبسته در شرایط عدم تعادل حرارتی موضعی استفاده شده است. تأثیر پارامترهای مهم شامل اعداد رایلی، پرانتل و دارسی، نسبت ضریب رسانش حرارتی دیواره ضخیم به سیال و نسبت ضریب انتقال حرارت جابجایی بین سیال و محیط متخلخل بر میزان انتقال حرارت

[1]- Chamkha

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.3.5.2]

درون محفظه بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که به غیر از عدد پرانتل، تمامی پارامترهای یادشده تأثیر قابل توجهی بر عدد ناسلت متوسط دارند. رضایی و همکاران [۳]، به بررسی عددی انتقال حرارت جابجایی طبیعی آرام در محفظه بسته مربعی متخلخل با دو دیواره جامد به روش شبکه بولتزمن پرداختند. در این تحلیل، محیط متخلخل در مقیاس ماکروسکوپیک مدل‌سازی شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، افزایش عدد دارسی، رایلی، ضریب تخلخل و نسبت ضریب نفوذ حرارتی با توجه به تغییر رژیم غالب انتقال حرارت از هدایت به جابه‌جایی، سبب بهبود انتقال حرارت می‌شود. ضمن اینکه افزایش ضخامت دیواره به دلیل کاهش بخش محیط متخلخل سبب تضعیف انتقال حرارت می‌شود. قلم‌باز و همکاران [۴]، به تجزیه و تحلیل انتقال حرارت جابجایی طبیعی میان نانوسیال و یک محفظه متخلخل در شرایط عدم تعادل حرارتی پرداختند. آن‌ها از مدل بونجیورنو برای تحلیل رفتار نانوسیال استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش پارامتر نسبت شناوری عدد ناسلت برای سیال پایه کاهش می‌یابد.

ژوا و ژائو[۲] [۵]، به مدل‌سازی جریان سیال در ماده متخلخل به روش شبکه بولتزمن براساس معادلات ناویر – استوکس تعمیم‌یافته در مقیاس متوسط حجمی پرداخته و معادلات تعمیم‌یافته بولتزمن را ارائه کردند. آن‌ها [۵] در قسمتی از مطالعه خود، جریان سیال در داخل یک کانال نیمه پر از ماده متخلخل با دیواره بالایی متحرک را مدل‌سازی نمودند. مقایسه حل بدست آمده از این مدل با حل تحلیلی موجود برای مسئله یادشده، نشان می‌دهد که مدل ژوا و ژائو [۵] بدون وارد کردن شرایط مرزی پیوستگی تنش در سطح سیال و لایه متخلخل، قادر است که این شرط مرزی را به صورت خود به خودی محاسبه و ناپیوستگی گرادیان سرعت در این مرز را کنترل کند. سان و پوپ[۳] [۶]، به مطالعه انتقال حرارت جابجایی درون محفظه متخلخل پر شده با نانوسیال پرداخته‌اند. آنها [۶] محفظه مثلثی قائم‌الزاویه شکلی را درنظر گرفتند که منبع حرارتی دما ثابت بر روی دیواره عمودی و افقی آن قرار گرفته و کل وتر آن به صورت منبع دما پایین انتخاب شده است. سان و پوپ [۶] نتیجه گرفتند بیشترین مقدار عدد ناسلت زمانی حاصل می‌شود که از بیشترین مقدار عدد رایلی و یا بزرگترین اندازه منبع حرارتی استفاده شود. همچنین، کوچک کردن نسبت‌های هندسی و یا پائین آوردن منبع حرارتی گرم بر روی دیواره، سبب بهبود انتقال حرارت می‌شود. نیلد و کوزنتسوف[۴] [۷]، به طور تحلیلی، انتقال حرارت جابجایی طبیعی در یک لایه افقی محیط متخلخل پر شده از نانوسیال را بررسی کردند. اثرات ترموفورسیس و حرکت براونی بر انتقال حرارت بررسی گردید. نتایج آنان نشان می‌دهد که بسته به میزان توزیع نانوذرات درون سیال پایه، مقدار عدد رایلی به شکل قابل توجهی کاهش یا افزایش می‌یابد. چمخا و همکاران [۸]، به صورت عددی، حل غیرتشابهی انتقال حرارت جابجایی طبیعی برای جریان لایه مرزی روی کره هم‌دمای تعبیه شده در محیط متخلخل و پر شده با یک نانوسیال را بررسی کردند. تأثیر حرکت براونی، پارامتر نسبت شناوری، عدد لوئیس و پراکندگی ترموفورسیس بر روی نرخ انتقال حرارت، انتقال جرم و ضریب اصطکاک بررسی شد. آن‌ها مشاهده کردند که ضریب اصطکاک با تقویت آثار پراکندگی ترموفورسیس و نسبت شناوری افزایش‌یافته، در حالی‌که نرخ انتقال حرارت و انتقال جرم کاهش می‌یابد. همچنین میزان انتقال جرم و ضریب اصطکاک با افزایش حرکت براونی بهبود می‌یابد؛ گرچه نرخ انتقال حرارت کاهش یافته است. اوماسی و موهایت[۵] [۹]، به صورت عددی تحلیل پایداری خطی و غیرخطی لایه افقی محیط متخلخل اشباع شده با نانوسیال را مورد بررسی قرار دادند. اثر پارامترهای مختلف بر ثبات و نوسان انتقال حرارت جابجایی بررسی شد. آن‌ها همچنین چگونگی اثرگذاری پارامتر زمان بر عدد ناسلت و عدد شروود را بررسی کردند و متوجه شدند که این اعداد در زمان‌های کوچک رفتار نوسانی دارند؛ از طرف دیگر، برای زمان‌های بزرگ این اعداد رفتاری پایا خواهند داشت.

پرسد و کولاکی[۶] [۱۰]، به صورت عددی، انتقال حرارت جابجایی طبیعی درون محفظه متخلخل مستطیلی را در حالت پایا بررسی کردند. آن‌ها [۱۰] نشان دادند که با افزایش نسبت ابعاد، نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. میالی و میرکین[۷] [۱۱]، به بررسی تولید حرارت وابسته به دمای موضعی در محفظه متخلخل پرداختند. نتایج آن‌ها [۱۱] نشان می‌دهد که در اعداد رایلی پایین فقط یک گردابه درون محفظه تشکیل می‌شود و با افزایش تدریجی عدد رایلی، گردابه‌ها به سمت وسط دیواره‌های عمودی منحرف خواهند شد. طهماسبی و همکاران [۱۲]، به بررسی محفظه پرشده از ماده متخلخل با تولید حرارت داخلی پرداختند. دیواره‌های عمودی به صورت دما ثابت، با دماهای مختلف و دیواره‌های افقی به صورت عایق درنظر گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش تولید حرارت داخلی و عدد رایلی سبب تقویت نرخ انتقال حرارت شده است. بکرمن[۸] و همکاران [۱۳]، مدلی از محفظه که با لایه‌ای از ماده متخلخل پر شده بود را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که اگر سیال بتواند وارد لایه متخلخل شود، میدان سرعت و حرارت به‌طور کلی تحت تأثیر قرار خواهند گرفت. همچنین، میزان نفوذ سیال به درون ماده متخلخل به شدت به حاصل ضرب اعداد رایلی و دارسی بستگی دارد. صبور و قلم‌باز [۱۴]، به بررسی انتقال حرارت جابجایی طبیعی و انتقال جرم نانوسیال در یک محفظه مثلثی متخلخل در شرایط عدم تعادل حرارتی پرداختند. آن‌ها [۱۴] از مدل بونجیورنو برای تحلیل رفتار نانوذرات بهره گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد رایلی، میزان انتقال حرارت سیال پایه به شدت بهبود می‌یابد. همچنین، افزایش پارامتر نسبت شناوری سبب افزایش عدد ناسلت سیال و کاهش عدد ناسلت ماتریس جامد متخلخل می‌شود.

در سال‌های اخیر نانوسیالات هیبریدی به منظور افزایش نرخ انتقال حرارت مورد توجه قرار گرفته‌اند. نانوسیال هیبریدی یکی از انواع جدید نانوسیال‌ها است که در ساخت آن از بیش از یک نوع نانوذره استفاده

[2]- Guo and Zhao
[3]- Sun and Pop
[4]- Nield and Kuznetsov

[5]- Umavathi and Mohite
[6]- Prasad and Kulacki
[7]- Mealey and Merkin
[8]- Beckermann

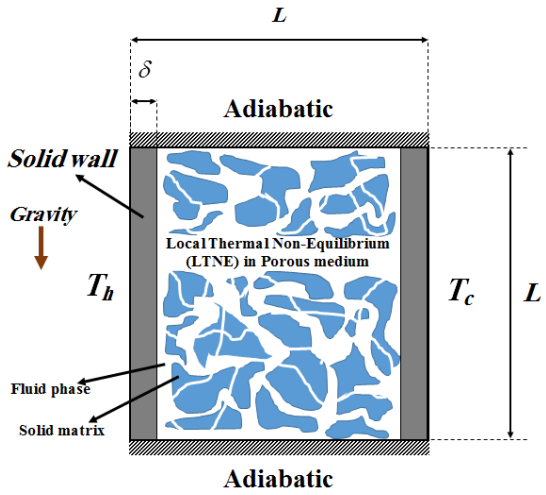
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.3.5.2]

می‌شود. اشگرف[9] و همکاران [۱۵]، در مطالعه‌ای آزمایشگاهی اثرات دما و کسر حجمی نانوذرات را بر لزجت نانوسیال هیبریدی آب – اتیلن‌گلایکول – نانولوله‌کربنی چندجداره- اکسید سلیسیوم بررسی نمودند. نتایج نشان می‌دهد که لزجت دینامیکی با افزایش کسر حجمی نانوذرات و دمای کارکرد، به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. سلطانی و اکبری [۱۶]، لزجت نانوسیال هیبریدی اتیلن‌گلایکول- اکسید منیزیم- نانولوله‌کربنی چند جداره را به صورت تجربی اندازه‌گیری کردند. در کسرهای حجمی ۰ تا ۱ درصد از نانوذرات و دماهای ۳۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس مد نظر آن‌ها [۱۶] قرار گرفت. براساس نتایج آن‌ها نانوسیال هیبریدی مورد مطالعه رفتاری نیوتنی دارد.

با مطالعه پژوهش‌های معتبر پیشین می‌توان دریافت که در هیچ‌یک از آن‌ها، انتقال حرارت همبسته درون یک محفظه متخلخل پرشده با نانوسیال هیبریدی در شرایط عدم تعادل حرارتی بررسی نشده است. هدف از انجام پژوهش حاضر، ارزیابی اثرات ضخامت دیواره و تخلخل بر میزان انتقال حرارت همبسته نانوسیال هیبریدی اتیلن گلایکول- نانولوله‌های‌کربنی چندلایه- اکسید منیزیم در یک لایه فوم فلزی آلومینیومی در شرایط عدم تعادل حرارتی موضعی می‌باشد.

۲- بیان مسئله و فرضیات

شکل (۱)، نشان دهنده مدل شماتیک فیزیکی در پژوهش حاضر می‌باشد. مطابق با این شکل، محفظه مربعی بسته با فوم آلومینیومی اشباع شده، تحت اثر نیروی خارجی گرانش و انتقال حرارت جابجایی طبیعی بوده و از نانوسیال هیبریدی اتیلن گلایکول- نانولوله‌های‌کربنی چندلایه- اکسید منیزیم درون آن بهره برده شده است. شرط عدم تعادل حرارتی بین فوم آلومینیومی و نانوسیال‌هیبریدی یادشده نیز برقرار است. به منظور تحلیل رفتار نانوسیال هیبریدی درون محیط متخلخل، از تقریب دارسی- بوزینسک در مدل‌سازی بهره گرفته شده است. همچنین، سیال تراکم ناپذیر و نیوتنی بوده و به صورت دو بعدی و پایا در محدوده رژیم آرام لحاظ شده؛ همان‌طور که واضح است، محفظه بسته به صورت مربعی و هر ضلع آن به اندازه L می‌باشد. دیواره‌های بالا و پایین در حالت عایق و دیوار سمت چپ، تحت تأثیر دمای گرم ثابت و همچنین دیوار سمت راست، تحت تأثیر دمای سرد ثابت هستند. ضمن اینکه، ضخامت هر دو دیواره ضخیم با δ نشان داده شده است.



شکل (۱) : نمایش شماتیک مدل فیزیکی تحلیل جریان در محفظه بسته مربعی اشباع شده با نانوسیال هیبریدی در محیط متخلخل.

۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر نانوسیال هیبریدی درون محفظه بسته متخلخل در حالت عدم تعادل حرارتی به ترتیب به یک معادله پیوستگی، دو معادله مومنتوم و سه معادله انرژی تخصیص می‌یابند که در ادامه و در شکل با بُعد نمایش داده شده‌اند:

$$\frac{\partial \bar{u}_{hnf}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{v}_{hnf}}{\partial \bar{y}} = 0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\rho_{hnf}}{\varepsilon^2}\left(\bar{u}_{hnf}\frac{\partial \bar{u}_{hnf}}{\partial \bar{x}} + \bar{v}_{hnf}\frac{\partial \bar{u}_{hnf}}{\partial \bar{y}}\right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} + \frac{\mu_{hnf}}{\varepsilon}\left(\frac{\partial^2 \bar{u}_{hnf}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_{hnf}}{\partial \bar{y}^2}\right) - \frac{\mu_{hnf}}{\kappa}\bar{u}_{hnf} \qquad (۲)$$

$$\frac{\rho_{hnf}}{\varepsilon^2}\left(\bar{u}_{hnf}\frac{\partial \bar{v}_{hnf}}{\partial \bar{x}} + \bar{v}_{hnf}\frac{\partial \bar{v}_{hnf}}{\partial \bar{y}}\right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{y}} + \frac{\mu_{hnf}}{\varepsilon}\left(\frac{\partial^2 \bar{v}_{hnf}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}_{hnf}}{\partial \bar{y}^2}\right) - \frac{\mu_{hnf}}{\kappa}\bar{v}_{hnf} + \rho_{hnf}\beta_{hnf}\left(T_f - T_c\right)g \qquad (۳)$$

$$\frac{1}{\varepsilon}\left(\bar{u}_{hnf}\frac{\partial T_{hnf}}{\partial \bar{x}} + \bar{v}_{hnf}\frac{\partial \bar{u}_{hnf}}{\partial \bar{y}}\right) = \alpha_{hnf}\left(\frac{\partial^2 T_{hnf}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 T_{hnf}}{\partial \bar{y}^2}\right) + \frac{h_{hnf-s}}{\varepsilon\left(\rho c_p\right)_{hnf}}\left(T_s - T_{hnf}\right)$$

[9]- Eshgarf

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.3.5.2]

(۴)

$$0=\alpha_s\left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial \bar{x}^2}+\frac{\partial^2 T_s}{\partial \bar{y}^2}\right)+\frac{h_{hnf-s}}{(1-\varepsilon)\left(\rho c_p\right)_s}\left(T_{hnf}-T_s\right)$$

(۵)

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

در رابطه (۶) پارامتر بی‌بعد نسبت ضریب رسانش حرارتی دیواره ضخیم به نانوسیال هیبریدی (R_k) است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R_k=\frac{k_w}{\varepsilon k_{hnf}} \qquad (۷)$$

با توجه به تعریف مسئله، شرایط مرزی برای معادلات (۱) تا (۶) عبارت‌اند از:

$$T_w=T_h \quad \text{در} \quad \bar{x}=0\ ,\ 0\le\bar{y}\le L$$

$$T_w=T_c \quad \text{در} \quad \bar{x}=L\ ,\ 0\le\bar{y}\le L$$

$$\frac{\partial T_{hnf}}{\partial \bar{y}}=\frac{\partial T_s}{\partial \bar{y}}=0,\ \bar{u}=\bar{v}=0 \quad \text{در} \quad \begin{cases} d\le\bar{x}\le L-d \\ \bar{y}=0,\bar{y}=L \end{cases}$$

$$\frac{\partial T_w}{\partial \bar{y}}=0 \quad \text{در} \quad \begin{cases} 0\le\bar{x}\le d\ ,\ L-d\le\bar{x}\le L \\ \bar{y}=0,\bar{y}=L \end{cases}$$

$$T_{hnf}=T_s=T_w\ ,\bar{u}=\bar{v}=0 \quad \text{در} \quad \begin{cases} \bar{x}=d\ ,\bar{x}=L-d \\ 0\le\bar{y}\le L \end{cases}$$

(۸)

حال به منظور بی‌بعدسازی معادلات (۱) تا (۶) و شرایط مرزی مرتبط با آن‌ها از روابط ذیل استفاده می‌گردد:

$$u_{nf}=\frac{\bar{u}_{nf}L}{\alpha_{bf}}\ ,\ v_{nf}=\frac{\bar{v}_{nf}L}{\alpha_{bf}}\ ,$$

$$\theta_{hnf}=\frac{T_{hnf}-T_c}{T_h-T_c},\ \theta_s=\frac{T_s-T_c}{T_h-T_c},\ \theta_w=\frac{T_w-T_c}{T_h-T_c}$$

$$x=\frac{\bar{x}}{L}\ ,\ y=\frac{\bar{y}}{L}\ ,\ d=\frac{\delta}{L},\ p=\frac{\bar{p}L^2}{\rho_{bf}\,\alpha_{bf}^2}$$

(۹)

با بهره‌گیری از روابط (۹) دسته معادلات (۱) تا (۶) به شکل بی‌بعد خود تبدیل شده‌اند:

$$\frac{\partial u_{hnf}}{\partial x}+\frac{\partial v_{hnf}}{\partial y}=0 \qquad (۱۰)$$

$$\frac{1}{\varepsilon^2}\left(u_{hnf}\frac{\partial u_{hnf}}{\partial x}+v_{hnf}\frac{\partial u_{hnf}}{\partial y}\right)=-\frac{\rho_{bf}}{\rho_{hnf}}\frac{\partial p}{\partial x}+\Pr\frac{\mu_{hnf}}{\mu_{bf}}\frac{\rho_{bf}}{\rho_{hnf}}\frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial^2 u_{hnf}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u_{hnf}}{\partial y^2}\right)-\frac{\mu_{hnf}}{\mu_{bf}}\frac{\rho_{bf}}{\rho_{hnf}}\frac{\Pr}{Da}u_{hnf} \qquad (۱۱)$$

$$\frac{1}{\varepsilon^2}\left(u_{hnf}\frac{\partial v_{hnf}}{\partial x}+v_{hnf}\frac{\partial v_{hnf}}{\partial y}\right)=-\frac{\rho_{bf}}{\rho_{hnf}}\frac{\partial p}{\partial y}+\Pr\frac{\mu_{hnf}}{\mu_{bf}}\frac{\rho_{bf}}{\rho_{hnf}}\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)\left(\frac{\partial^2 v_{hnf}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v_{hnf}}{\partial y^2}\right)-\frac{\mu_{hnf}}{\mu_{bf}}\frac{\rho_{bf}}{\rho_{hnf}}\frac{\Pr}{Da}v_{hnf}+\frac{\beta_{hnf}}{\beta_{bf}}Ra\,\Pr\,\theta_{hnf} \qquad (۱۲)$$

$$\frac{1}{\varepsilon}\left(u_{hnf}\frac{\partial \theta_{hnf}}{\partial x}+v_{hnf}\frac{\partial \theta_{hnf}}{\partial y}\right)=\frac{\alpha_{hnf}}{\alpha_{bf}}\left(\frac{\partial^2 \theta_{hnf}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \theta_{hnf}}{\partial y^2}\right)+\frac{\alpha_{hnf}}{\alpha_{bf}}H\left(\theta_s-\theta_{hnf}\right) \qquad (۱۳)$$

$$0=\left(\frac{\partial^2 \theta_s}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \theta_s}{\partial y^2}\right)+Hkr\left(\theta_{hnf}-\theta_s\right) \qquad (۱۴)$$

$$R_k\left(\frac{\partial^2 \theta_w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \theta_w}{\partial y^2}\right)=0 \qquad (۱۵)$$

پارامترهای ظاهر شده در فرآیند بی‌بعدسازی شامل عدد پرانتل، عدد رایلی، عدد دارسی، ضریب انتقال حرارت رابط بین دو فاز نانوسیال هیبریدی و ماتریس جامد محیط متخلخل و نسبت ضریب رسانش حرارتی سیال به جامد محیط متخلخل به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Pr=\frac{\upsilon}{\alpha},\ \mathrm{Ra}=\frac{\beta g\,\Delta T L^3}{\alpha\upsilon}$$

$$Da=\frac{\kappa}{L^2},\ H=\frac{h_{hnf-s}L^2}{\varepsilon k_{hnf}},\ kr=\frac{\varepsilon k_{hnf}}{(1-\varepsilon)k_s} \qquad (۱۶)$$

علاوه بر پارامترهای یادشده، نسبت لزجت دینامیک نانوسیال هیبریدی به سیال پایه و نسبت ضریب رسانش حرارتی نانوسیال هیبریدی به سیال پایه در روابط (۱۱) و (۱۲) به صورت ذیل تعریف می‌شوند [۱۷ و ۱۸]:

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.3.5.2]

$$\frac{\mu_{hnf}}{\mu_{bf}} = \left[0.191\varphi + 0.240(T^{-0.342}\varphi^{-0.473})\right]\exp(1.45T^{0.120}\varphi^{0.158}) \quad (۱۷)$$

$$\frac{k_{hnf}}{k_{bf}} = 0.9787 + \exp(0.3081\varphi^{0.3097} - 0.002T) \quad (۱۸)$$

ضمن این‌که شرایط مرزی بی‌بعد متناسب با روابط (۱۰) تا (۱۵) به شرح ذیل هستند:

$$\theta_w = 1 \quad \text{در} \quad x = 0,\ 0 \le y \le 1$$

$$\theta_w = 0 \quad \text{در} \quad x = 1,\ 0 \le y \le 1$$

$$\frac{\partial\theta_{hnf}}{\partial y} = \frac{\partial\theta_s}{\partial y} = 0,\ u = v = 0 \quad \text{در} \quad \begin{cases} 0.1 \le x \le 0.9 \\ y = 0, y = 1 \end{cases}$$

$$\frac{\partial\theta_w}{\partial y} = 0 \quad \text{در} \quad \begin{cases} 0 \le x \le 0.1, 0.9 \le x \le 1 \\ y = 0, y = 1 \end{cases}$$

$$\theta_{hnf} = \theta_s = \theta_w, u = v = 0 \quad \text{در} \quad \begin{cases} x = 0.1, x = 0.9 \\ 0 \le y \le 1 \end{cases}$$

(۱۹)

علاوه بر اعداد بی‌بعدی که تاکنون در پژوهش حاضر تعریف شده‌اند، عدد بی‌بعد ناسلت نیز در نمایش و درک بهتر نتایج نقش بسزایی دارد. در این‌جا عدد ناسلت به صورت موضعی و متوسط برای سیال پایه، نانوسیال هیبریدی و ماتریس جامد مورد بررسی قرار گرفته است. روابط (۲۰) بیانی از شکل موضعی عدد ناسلت می باشند:

$$Nu_{bf,x} = -\left.\frac{\partial\theta_{bf}}{\partial x}\right|_{x=d}, Nu_{hnf,x} = -\left.\frac{k_{hnf}}{k_{bf}}\frac{\partial\theta_{hnf}}{\partial x}\right|_{x=d},$$

$$Nu_{s,x} = -\left.\frac{\partial\theta_s}{\partial x}\right|_{x=d}$$

(۲۰)

همچنین مقادیر متوسط اعداد ناسلت تعریف شده در رابطه (۲۰) با انتگرال‌گیری بر روی دیواره رابط عمودی به‌صورت ذیل حاصل می‌شود:

$$Nu_{bf} = \int_{y=0}^{y=1} Nu_{bf,x}\,dy,\ Nu_{hnf} = \int_{y=0}^{y=1} Nu_{hnf,x}\,dy$$

$$Nu_s = \int_{y=0}^{y=1} Nu_{s,x}\,dy$$

(۲۱)

۴- روش حل عددی و بررسی استقلال حل از اندازه شبکه محاسباتی

با توجه به اینکه معادلات مربوط به محیط متخلخل و همچنین معادلات مربوط به نانوسیال هیبریدی، هر یک می‌بایست با هم کوپل و به طور هم‌زمان مورد حل قرار گیرند، از کدنویسی در نرم افزار کامسول تحت نرم‌افزار متلب استفاده گردید. بدین منظور از ترکیب زبان متلب و توابع نرم‌افزار کامسول بهره برده شد. در پژوهش حاضر، معادلات دیفرانسیل پاره‌ای یعنی معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی و همچنین شرایط مرزی حاکم بر مسئله، از طریق روش المان محدود حل شده‌اند. می‌توان گفت، استفاده از روش المان محدود، تقریب بسیار بهتری برای سیستم‌هایی با اشکال نامنظم ایجاد می‌نماید. چرا که، مقادیر مجهول را می‌توان به‌جای نقاط جدا افتاده، در میان حوزه و قلمرو درونی حل، قرار داد. این امر به مفهوم آن است که هیچ نقطه‌ای خارج از هندسه (حوزه حل) قرار نمی‌گیرد، در نتیجه نیاز به حل آن نقاط نیز نخواهد بود [۱۹ و ۲۰].

به‌منظور اطمینان از استقلال حل از اندازه شبکه محاسباتی، محاسبات برای چند اندازه شبکه مختلف اجرا شده‌اند. مقادیر عدد ناسلت متوسط سیال و ماتریس جامد برای پنج اندازه شبکه ۶۰×۶۰، ۷۰×۷۰، ۸۰×۸۰، ۹۰×۹۰ و ۱۰۰×۱۰۰ و همچنین در اعداد رایلی 10^4 و 10^5 و 10^6، بدست آمده‌اند. جدول ۵-۱ تأثیر اندازه شبکه بر مقادیر اعداد ناسلت متوسط فاز سیال و ماتریس جامد برای مقادیر ثابتی از پارامترهای بی‌بعد را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است در اندازه شبکه محاسباتی ۹۰×۹۰، مقدار اعداد ناسلت متوسط فاز سیال و ماتریس جامد در هیچ یک از سه عدد بی‌بعد رایلی تغییر محسوسی نیافته، به همین دلیل اندازه شبکه محاسباتی یادشده، به منظور حصول و نمایش نتایج انتخاب گردیده است.

جدول(۱): آزمون استقلال شبکه در اعداد رایلی مختلف در

$Ra = 10^4, 10^5, 10^6$, $Da = 10^{-3}$, $Pr = 15/42$, $R_k = 500$,
$D = 0/1$, $H = 10$, $C = 0/6$, $\varepsilon = 0/5$.

اندازه شبکه	۶۰×۶۰	۷۰×۷۰	۸۰×۸۰	۹۰×۹۰	۱۰۰×۱۰۰
			Nu_{hnf}		
$Ra = 10^4$	۳/۳۹۲۱	۳/۳۹۲۱	۳/۳۹۲۱	۳/۳۹۲۱	۳/۳۹۲۰
$Ra = 10^5$	۴/۴۷۳۳	۴/۴۷۳۰	۴/۴۷۲۹	۴/۴۷۲۸	۴/۴۷۲۷
$Ra = 10^6$	۱۱/۴۵۸	۱۱/۴۵۶	۱۱/۴۵۴	۱۱/۴۵۳	۱۱/۴۵۳
			Nu_s		
$Ra = 10^4$	۱/۲۴۸۰	۱/۲۴۸۰	۱/۲۴۸۰	۱/۲۴۸۰	۱/۲۴۸۰
$Ra = 10^5$	۱/۲۴۷۶	۱/۲۴۷۶	۱/۲۴۷۶	۱/۲۴۷۶	۱/۲۴۷۶
$Ra = 10^6$	۱/۲۴۴۸	۱/۲۴۴۸	۱/۲۴۴۸	۱/۲۴۴۸	۱/۲۴۴۸

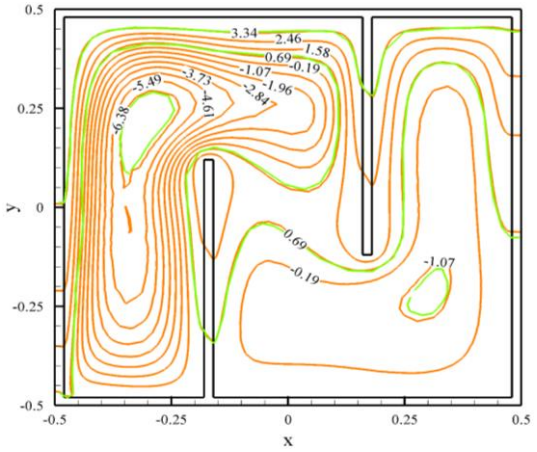
۵- اعتبارسنجی نتایج

به منظور اطمینان از صحت نتایج حاصل شده در پژوهش حاضر، مقایسه ای با نتایج پژوهش‌ها و مطالعات معتبر پیشین صورت پذیرفته است. این امر به نتایج حاصل شده در پژوهش حاضر، اعتبار می‌بخشد. همچنین با توجه به این‌که در انتقال حرارت جابجایی طبیعی همبسته یکی از ارکان اصلی پژوهش حاضر را تشکیل می دهد، لذا، سعی بر آن

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.3.5.2]

شده که یکی از مرتبط‌ترین مطالعات پیشین مورد مقایسه قرار گیرد. شکل (۲) مقایسه‌ای میان خطوط گرما[1] در پژوهش حاضر و خطوط گرمای گزارش شده توسط کاستا[2] [۲۱] برای مقادیر $R_k = ۱۰$ و $Ra = ۱۰^۶$ را نشان می دهد؛ ضمن این‌که دیواره سمت چپ در دمای بالاتر و دیوار سمت راست در دمای پایین تر در نظر گرفته شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۵-۲ مشاهده می‌شود، نتایج مطالعه حاضر نسبت به نتایج پژوهش کاستا [۲۱]، دارای انطباق درخور توجهی می‌باشند.



شکل(۲): مقایسه خطوط گرما به دست آمده کار انجام شده (خطوط نارنجی) با نتایج پژوهش کاستا(خطوط سبز رنگ) در $R_k = ۱۰$ و $Ra = ۱۰^۶$ [۲۱].

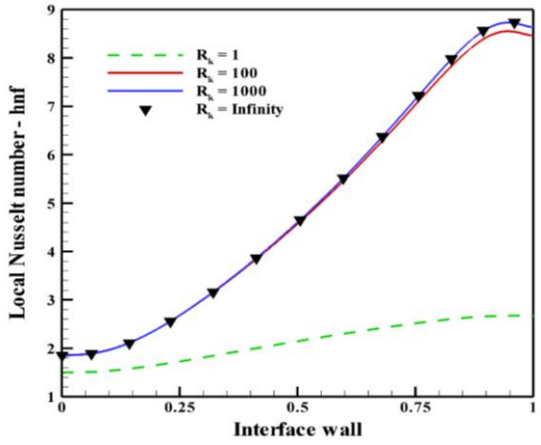
۶- نتایج و بحث

۶-۱ انتقال حرارت همبسته

در این قسمت از مطالعه حاضر به تحلیل چگونگی اثرگذاری پارامترهای مختلف بر میزان انتقال حرارت درون محفظه مربعی متخلخل پر شده با نانوسیال هیبریدی، تحت شرایط عدم تعادل حرارتی پرداخته می‌شود. نتایج به‌دست آمده در قالب نمودارهای تغییرات عدد ناسلت متوسط و موضعی، خطوط دماثابت و خطوط جریان برای فازهای سیال و ماتریس جامد بدست آمده‌اند. مقادیر پارامترهای بی‌بعد در این مسئله شامل عدد رایلی، عدد دارسی، نسبت ضریب رسانش حرارتی دیوار به سیال و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بی‌بعد به ترتیب در محدوده $Ra = ۱۰^۴$-$۱۰^۶$، $Da = ۱۰^{-۱}$-$۱۰^{-۵}$، $R_k = ۱$-∞ و $H = ۰/۰۱$-۵۰ قرار گرفته‌اند، در حالی‌که پارامترهای بی‌بعد پرانتل و ضریب تخلخل محیط متخلخل با توجه به ثابت بودن جنس آن‌ها، به ترتیب برابر ۱۵/۴۲ و ۰/۵ و به صورت ثابت نگه داشته شده‌اند.

شکل (۴)، اثرات پارامتر نسبت ضریب رسانش حرارتی دیواره به سیال بر روی عدد ناسلت موضعی در طول دیواره رابط را نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرات عدد ناسلت فاز سیال در تمام طول دیواره رابط برای مقادیر پایین پارامتر یادشده، محسوس نمی‌باشد. این بدان معناست که، در مقادیر پایین نسبت ضریب رسانش حرارتی دیواره به نانوسیال هیبریدی، اختلاف دمای کمی بین این دیواره و نانوسیال هیبریدی شکل می‌گیرد. درحالی‌که، تغییرات عدد ناسلت فاز سیال در طول دیواره رابط به ازای مقادیر بالای پارامتر نسبت ضریب رسانش حرارتی دیواره به سیال (تا حد بی‌نهایت)، با شیب بسیار زیادی افزایش و در نواحی بالایی دیواره به بیشترین مقدار خود رسیده است. در واقع، با رسیدن نانوسیال هیبریدی به مجاورت پایین دیواره رابط، گرادیان‌های حرارتی تشکیل و در طول دیواره رابط تقویت شده‌اند. اختلاف دمای ایجاد شده تا نواحی بالای دیواره همچنان افزایش می‌یابند و با نزدیک شدن نانوسیال هیبریدی به مجاورت دیواره افقی عایق، کاهش یافته است.



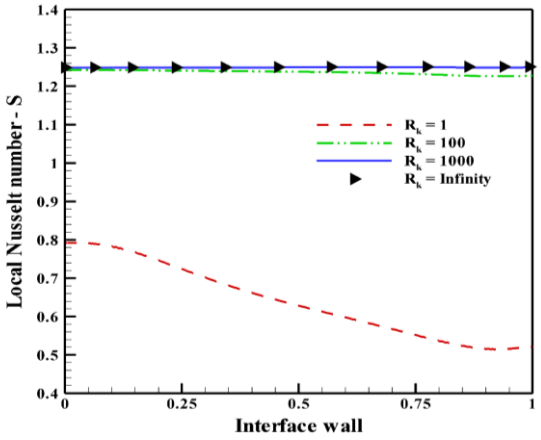
شکل(۴): اثرات فاز سیال بر روی عدد ناسلت موضعی در طول دیواره داخلی عمودی در مقادیر مختلف R_K.

اثرات پارامتر نسبت ضریب رسانش حرارتی دیواره به نانوسیال هیبریدی بر روی عدد ناسلت موضعی ماتریس جامد در شکل (۵) به تصویر کشیده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، در بالاترین مقادیر پارامتر یادشده، مقدار عدد ناسلت در تمام طول دیواره ضخیم، ثابت باقی مانده است. در واقع، اختلاف دمای بین دیواره و ماتریس جامد ثابت باقی مانده و در تمام طول دیواره رابط تغییر نکرده است. از طرفی، در کمترین مقدار برای پارامتر یادشده (یعنی R_k=۱)، با کاهش اختلاف دما در طول دیواره رابط، تضعیف انتقال حرارت رخ داده است. علت ایجاد چنین الگوهایی برای عدد ناسلت ماتریس جامد، عدم تحرک و ثابت بودن ماتریس جامد متخلخل می‌باشد.

[1]- heatlines
[2]- Costa

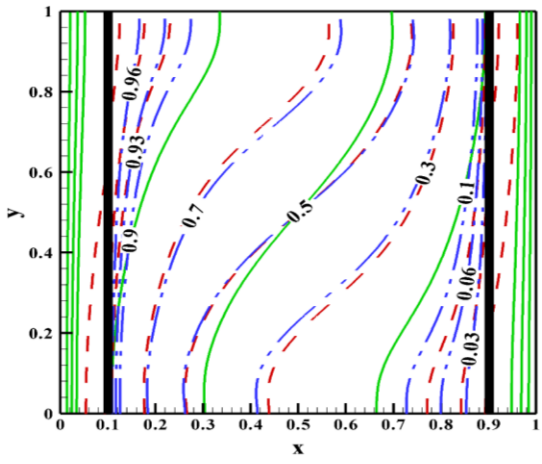
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.3.5.2]

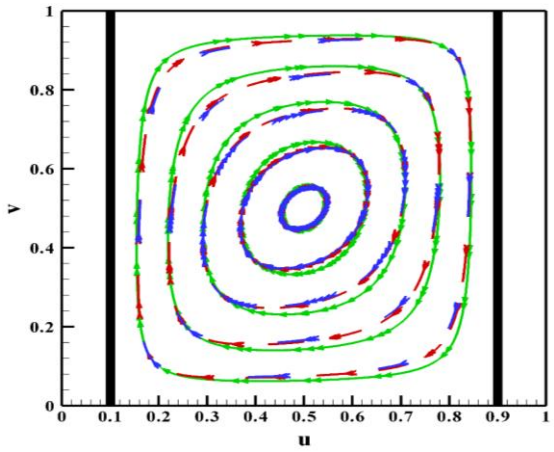


شکل(۵): اثرات فاز ماتریس جامد بر روی عدد ناسلت موضعی در طول دیواره داخلی عمودی در مقادیر مختلف R_K.

شکل‌های (۶-الف) و (۶-ب)، به ترتیب مربوط به مقایسه خطوط دما ثابت و خطوط جریان تحت تأثیر پارامتر نسبت ضریب رسانش حرارتی دیواره به سیال در سه مقدار ۱، ۱۰ و ۱۰۰ می‌باشد. همان‌طور که در شکل‌های (۶- الف) و (۶- ب) مشاهده می‌شود، افزایش پارامتر مد نظر، مستقیماً بر روی گرادیان حرارتی اثر می‌گذارد، در حالی‌که بر روی الگوهای خطوط جریان بی‌تأثیر است. با بررسی دقیق‌تر این دو شکل می‌توان دریافت که افزایش ضریب رسانش حرارتی دیواره سبب انتقال و رسانندگی بیشتر گرادیان‌های حرارتی درون دیواره شده است؛ بطوری‌که در مقادیر بالا برای پارامتر نام‌برده (مقادیر بالای ۱۰۰ =Rk)، خطوط دماثابت بطور کامل به درون محفظه منتقل شده‌اند و در داخل دیواره خطوط دما ثابت مشاهده نمی‌گردند و هرگونه تغییرات نرخ انتقال حرارت در داخل محفظه اتفاق می‌افتد.

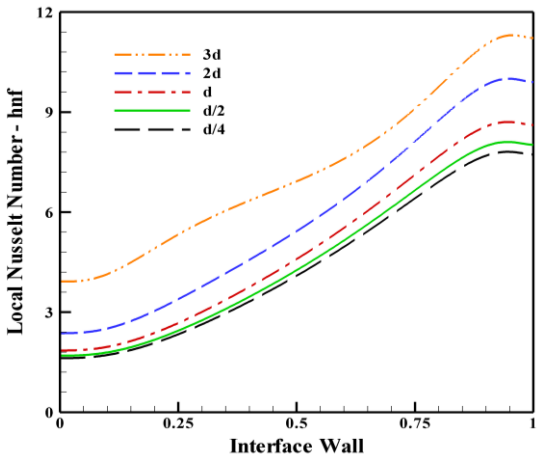


شکل(۶- الف): خطوط سبز رنگ(پیوسته) ۱= Rk، خطوط قرمز رنگ(خط چین) ۱۰= Rk و خطوط آبی رنگ(خط چین- دو نقطه) ۱۰۰= Rk در رایلی 10^5.



شکل(۶- ب): خطوط سبز رنگ (پیوسته) ۱= Rk، خطوط قرمز رنگ (خط چین) ۱۰= Rk و خطوط آبی رنگ (خط چین با فاصله بیشتر نسبت به خط چین قرمز رنگ در ۱۰= Rk) ۱۰۰ = Rk در رایلی 10^5.

شکل (۷)، اثرات پارامتر نسبت ضریب رسانش حرارتی دیواره ضخیم به نانوسیال هیبریدی (R_k) بر روی عدد ناسلت موضعی در طول دیواره رابط را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت دیواره از d/4 تا 3d تغییرات عدد ناسلت فاز سیال در تمام طول دیواره رابط روندی رو به رشد داشته؛ گرچه، الگوی منحنی‌ها تقریبا تغییر نکرده است. از طرفی در مقادیر پایین پارامتر یادشده، گرادیان دمایی کمی بین دیواره ضخیم و نانوسیال هیبریدی شکل می‌گیرد. درحالی‌که، عدد ناسلت فاز سیال در طول دیواره رابط به ازای مقادیر بالای پارامتر نسبت ضریب رسانش حرارتی دیواره ضخیم به نانوسیال هیبریدی (R_k) (مثلا 3d)، بهبود می‌یابد؛ چرا که گرادیان‌های حرارتی شدیدتری به واسطه تقویت مکانیزم رسانش حرارتی بین دیواره ضخیم و نانوسیال هیبریدی شکل گرفته است.



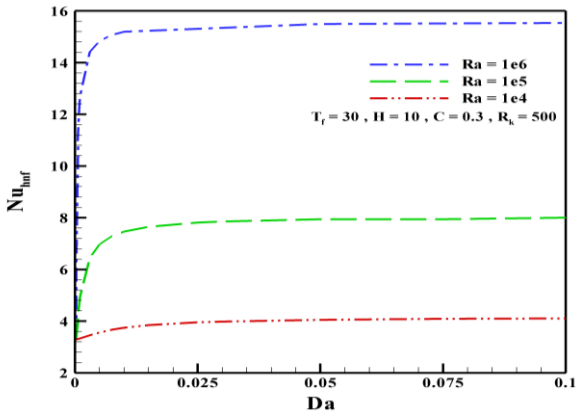
شکل(۷): اثرات پارامتر نسبت ضریب رسانش حرارتی دیواره ضخیم به نانوسیال هیبریدی (R_k) بر روی عدد ناسلت موضعی در طول دیواره رابط در مقادیر مختلف d.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.3.5.2]

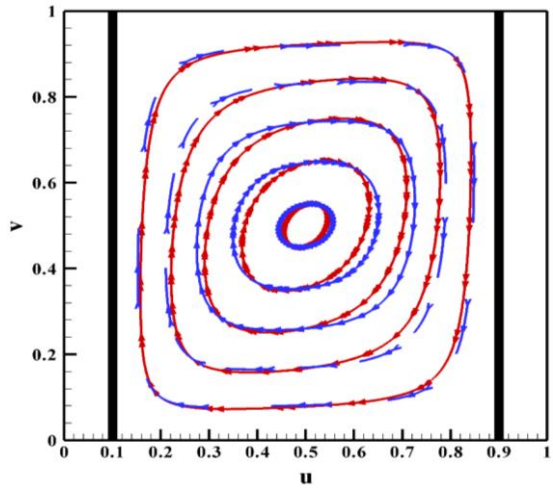
۶-۲ محیط متخلخل

شکل (۸) تغییرات عدد ناسلت متوسط نانوسیال هیبریدی را بر حسب عدد دارسی نشان می‌دهد. بدین منظور، سه عدد رایلی $۱۰^{۴}$، $۱۰^{۵}$ و$۱۰^{۶}$ در نظر گرفته شده که با افزایش آن، میزان انتقال حرارت بهبود یافته است. از سوی دیگر، نتایج بیان‌گر تقویت عدد ناسلت متوسط نانوسیال هیبریدی با افزایش عدد دارسی می‌باشد. از آن‌جا که عدد دارسی معرف نفوذپذیری محیط متخلخل است، ازدیاد آن به معنای نفوذ و حضور بیشتر جریان در محیط متخلخل بوده، فرصت ایجاد گرادیان‌های حرارتی بیشتر شده و به تبع آن عدد ناسلت متوسط نانوسیال هیبریدی افزایش می‌یابد. اما میزان بهبود عدد ناسلت متوسط، در اعداد دارسی کم، نمایان‌تر بوده و افزایش بیش از حد نفوذپذیری، تأثیر چندانی بر نرخ انتقال حرارت نانوسیال هیبریدی ندارد. ضمن این‌که، تغییرات عدد دارسی بر عدد ناسلت متوسط ماتریس جامد اثرگذار نبوده و برابر مقدار ۱/۲۴ می‌باشد.

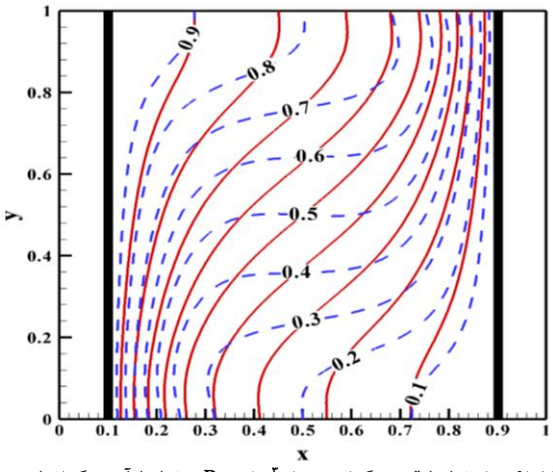


شکل(۸): تغییرات عدد ناسلت متوسط برای فاز سیال با عدد دارسی را برای مقادیر مختلف عدد رایلی.

در شکل‌های (۹- الف) و (۹- ب) به مقایسه خطوط جریان و خطوط دماثابت نانوسیال هیبریدی اتیلن‌گلایکول- اکسید منیزیم – نانولوله‌کربنی تحت تأثیر دو عدد دارسی برابر $۱۰^{-۳}$ و $۱۰^{-۲}$ درون محفظه بسته پرداخته شده است. همان‌طور که در شکل(۹- الف) مشاهده می‌شود، افزایش عدد دارسی، سبب تغییر شکل خطوط جریان بخصوص در مرکز محفظه بسته شده است. در واقع، تقویت عدد دارسی بیانگر افزایش حضور نانوسیال هیبریدی و گردش نامنظم و بیشتر آن درون محفظه بسته می‌باشد. همچنین می‌توان دریافت که با تقویت عدد دارسی، سرعت سیال هم بیشتر می‌شود؛ که این امر سبب بهبود مکانیزم‌های انتقال حرارت جابجایی طبیعی می‌گردد. به عبارت دیگر،چنان‌که در شکل (۹- ب) مشخص است، ازدیاد عدد دارسی، در یک غلظت ثابت از نانوذرات، میزان انحراف و تمایل خطوط دماثابت به سمت دیواره‌های جانبی را بیشتر می‌نماید. بنابراین هم شکل (۹-الف) و هم شکل (۹-ب) در توافق با شکل (۸) هستند.



شکل(۹ –الف): خطوط قرمز رنگ (پیوسته) $Da = ۱۰^{-۲}$ و خطوط آبی رنگ (خط چین) $Da = ۱۰^{-۲}$ در رایلی $۱۰^{۵}$.



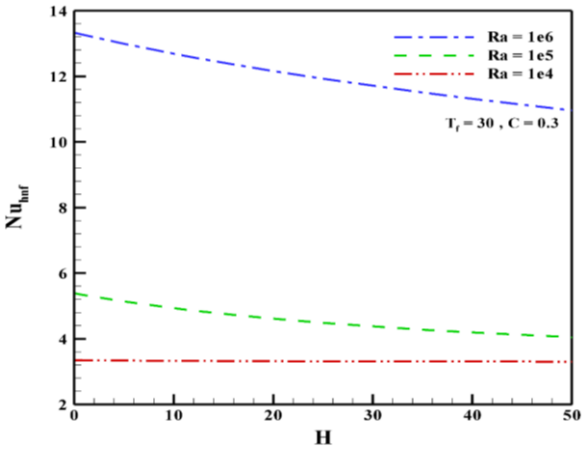
شکل(۹–ب): خطوط قرمزرنگ(پیوسته) $Da = ۱۰^{-۲}$ و خطوط آبی رنگ(خط چین) $Da = ۱۰^{-۲}$ در رایلی $۱۰^{۵}$.

تغییرات عدد ناسلت متوسط فاز سیال بر حسب پارامتر ضریب انتقال حرارت رابط بین نانوسیال هیبریدی و ماتریس جامد برای مقادیر مختلف عدد رایلی در شکل (۱۰) مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش عدد رایلی، میزان انتقال حرارت بهبود یافته است، اما حساسیت نرخ انتقال حرارت در اعداد رایلی بالاتر به پارامتر یادشده، بیشتر شده است. در واقع، در عدد رایلی برابر $۱۰^{۴}$، با افزایش مقدار پارامتر ضریب انتقال حرارت رابط بین نانوسیال هیبریدی و ماتریس جامد، میزان انتقال حرارت بدون تغییر باقی مانده، ولی در اعداد رایلی بالاتر (مثلا $۱۰^{۵}$ و یا $۱۰^{۶}$) با افزایش مقدار پارامتر نام‌برده، میزان انتقال حرارت کاهش یافته است. از الگوهای بدست آمده می‌توان دریافت که در اعداد رایلی پایین، ساز و کار انتقال حرارت ضعیف بوده، به همین دلیل افزایش برهم‌کنش میان نانوسیال هیبریدی و ماتریس جامد، چندان بر ایجاد گرادیان‌های حرارتی تأثیر نمی‌گذارد؛ در عوض، در اعداد رایلی بالاتر، ساز و کار انتقال حرارت نیز تقویت می‌شود و افزایش برهم‌کنش میان نانوسیال هیبریدی و ماتریس جامد، نمود بیشتری پیدا می‌کند، نانوسیال هیبریدی و ماتریس جامد را به سمت تعادل حرارتی می‌کشاند؛

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-24]

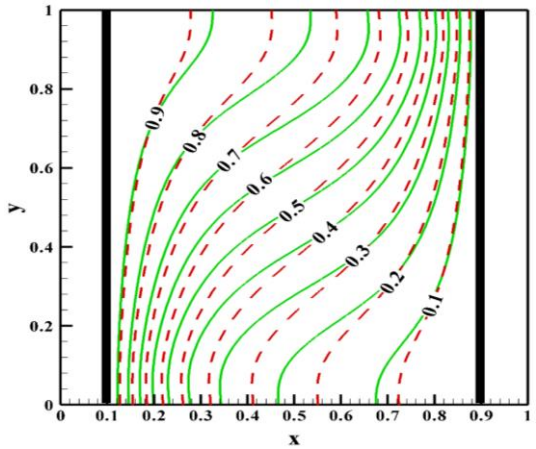
[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.3.5.2]

در نتیجه سبب کاهش عدد ناسلت متوسط نانوسیال هیبریدی می‌شود. علاوه بر این، تغییرات پارامتر ضریب انتقال حرارت رابط بین دو فاز نانوسیال هیبریدی و ماتریس جامد محیط متخلخل بر روی عدد ناسلت متوسط ماتریس جامد در طول دیواره رابط بی‌تأثیر بوده، مقدار آن تقریباً ثابت و معادل ۱/۲۴ است. از این رو، می‌توان دریافت، هرگونه ایجاد تغییر در میزان انتقال حرارت فاز جامد مستقل از تغییرات پارامتر ضریب انتقال حرارت رابط بین دو فاز نانوسیال هیبریدی و ماتریس جامد محیط متخلخل می‌باشد.

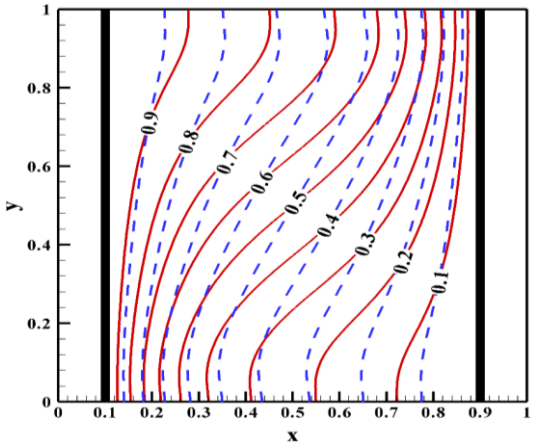


شکل(۱۰): تغییرات عدد ناسلت متوسط فازهای سیال با ضریب انتقال حرارت رابط بین فاز سیال و فاز جامد محیط متخلخل (H) در مقادیر مختلف عدد رایلی.

شکل‌های (۱۱- الف) و (۱۱- ب) به ترتیب به مقایسه خطوط دما ثابت تحت تأثیر مقادیر ۰/۰۱، ۱۰ و ۵۰ از پارامتر ضریب انتقال حرارت رابط بین فاز سیال و فاز جامد محیط متخلخل اختصاص یافته‌اند. همان‌طور که در (۱۱- الف) مشخص است، با افزایش پارامتر نام‌برده در یک غلظت ثابت از نانوذرات، میزان انحنای خطوط به خصوص در مرکز محفظه کم‌تر شده است، بطوری‌که این خطوط تمایل کم‌تری به دیواره‌های جانبی پیدا کرده‌اند. با دور شدن خطوط دماثابت از دیواره‌های جانبی، گرادیان‌های حرارتی کمتری در مجاورت دیواره‌های عمودی ایجاد می‌شود. از سوی دیگر، در شکل (۱۱- ب)، با افزایش پارامتر مد نظر از ۱۰ به ۵۰، میزان اعوجاج خطوط دماثابت همچنان در حال کمتر شدن می باشد و به تبع آن، گرادیان حرارتی کمتری ایجاد می‌شود؛ از این‌رو، می‌توان دریافت با افزایش برهم‌کنش میان دو فاز نانوسیال هیبریدی و ماتریس جامد، خطوط دما ثابت از دیواره‌های ضخیم عمودی فاصله می‌گیرند و در نتیجه انتقال حرارت کاهش می‌یابد. بنابراین، شکل‌های (۱۱- الف) و (۱۱- ب) در توافق با شکل (۱۰) می‌باشند. ذکر این نکته حائز اهمیت است که با افزایش و یا کاهش پارامتر یاد شده، سرعت سیال تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. از این‌رو، پارامتر ضریب انتقال حرارت رابط بین فاز سیال و فاز جامد محیط متخلخل مستقیماً با گرادیان‌های حرارتی سر و کار دارد و از طریق تغییراتی که بر روی گرادیان حرارتی (نه جریان سیال) می‌گذارد، سبب تضعیف و یا تقویت انتقال حرارت می‌شود.



شکل(۱۱- الف): خطوط سبز رنگ (پیوسته) H= ۰/۰۱ و خطوط قرمز رنگ (خط چین) H= ۱۰ در رایلی 10^5.



شکل(۱۱- ب): خطوط قرمز رنگ(پیوسته) H= ۱۰ و خطوط آبی رنگ(خط چین) H= ۵۰ در رایلی 10^5.

۷- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، تاثیر ضخامت دیواره و تخلخل بر میزان انتقال حرارت جابجایی طبیعی همبسته در حضور نانوسیال هیبریدی نانولوله‌های کربنی چندلایه- اکسید منیزیم در سیال پایه اتیلن‌گلایکول درون یک لایه فوم فلزی آلومینیومی در شرایط عدم تعادل حرارتی مورد ارزیابی قرار گرفت. دیواره‌های افقی عایق و دیواره‌های عمودی در دو دمای متفاوت در نظر گرفته شدند. معادلات حاکم پس از بی‌بعدسازی با بهره‌گیری از روش المان محدود به‌صورت عددی حل و تأثیر ضخامت دیواره و تخلخل بر میزان انتقال حرارت درون محفظه بسته ارزیابی گردید؛ مهم‌ترین نتایج به صورت خلاصه و به شرح ذیل هستند:

۱- افزایش عدد رایلی فقط انتقال حرارت نانوسیال هیبریدی را تقویت می کند و اثر چندانی بر میزان انتقال حرارت ماتریس جامد متخلخل ندارد.

۲- با افزایش مقدار پارامتر نسبت ضریب رسانش حرارتی دیواره ضخیم به سیال، هم نرخ انتقال حرارت نانوسیال هیبریدی و هم نرخ انتقال حرارت ماتریس جامد در طول دیواره رابط تقویت می‌شود.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.3.5.2]

۳- با افزایش ضخامت دیواره نرخ انتقال حرارت نانوسیال هیبریدی بر روی دیواره رابط بهبود و میزان انتقال حرارت ماتریس جامد متخلخل تغییر نمی‌یابد.

۴- افزایش عدد دارسی سبب گردش بیشتر جریان سیال درون محفظه بسته چهارضلعی شده، بروز بیش از پیش گرادیان های حرارتی نانوسیال هیبریدی را در پی دارد. از سوی دیگر، عدد ناسلت متوسط ماتریس جامد متخلخل دست خوش تغییر نمی‌شود.

۵- پارامتر ضریب انتقال حرارت رابط بین نانوسیال هیبریدی در عدد رایلی بالا، سبب کاهش میزان انتقال حرارت نانوسیال هیبریدی می شود؛ در حالی که بر میزان انتقال حرارت ماتریس جامد اثرگذار نیست.

فهرست علامت‌ها

علائم انگلیسی

ضخامت بی‌بعد دیوار، m	d
عدد دارسی	Da
شتاب جاذبه، $m.s^{-2}$	g
ضریب انتقال حرارت حجمی بین فازهای سیال و ماتریس جامد، $W.m^{-3}.K^{-1}$	h_{hnf-s}
ضریب انتقال حرارت رابط بین دو فاز نانوسیال هیبریدی و ماتریس جامد محیط متخلخل	H
ضریب هدایت حرارت، $W.m^{-1}.K^{-1}$	k
ضریب نفوذپذیری محیط متخلخل، m^2	κ
نسبت ضریب هدایت حرارتی سیال به فاز جامد محیط متخلخل	K_r
نسبت ضریب هدایت حرارتی دیوار به سیال	R_k
طول محفظه مربعی، m	L
نسبت کسر حجمی نانوذرات	C
عدد ناسلت متوسط	Nu_x
عدد ناسلت محلی	Nu
فشار، pa	$\bar{p}$
فشار بی‌بعد	P
عدد پرانتل	Pr
عدد رایلی	Ra
دما، K	T
مولفه‌های سرعت در راستای x و y، $m.s^{-1}$	$\bar{u}$,$\bar{v}$
مولفه‌های سرعت بی‌بعد درراستای x و y	u , v
مختصات کارتزین، m	$\bar{x}$, $\bar{y}$
مختصات بی‌بعد کارتزین	x , y

علائم یونانی

ضریب نفوذ حرارتی، $m^2.s^{-1}$	α
ضریب انبساط حرارتی سیال، K^{-1}	β
اختلاف مقدار	Δ
ضریب تخلخل محیط متخلخل	ε
ضخامت با بعد دیوار	δ
دمای بی‌بعد	θ
لزجت دینامیکی، $kg.m^{-1}.s^{-1}$	μ
لزجت سینماتیک، $m^2.s^{-1}$	N
چگالی، $kg\,m^{-3}$	P
ظرفیت گرمایی مؤثر، $J\,K^{-1}\,m^{-3}$	(ρc)

زیرنویس

سرد	C
گرم	H
نانوسیال هیبریدی	hnf
سیال پایه	bf
جامد	s
دیوار	w

مراجع

[1] A. J. Chamkha, M. A. Ismael, “Conjugate heat transfer in a porous cavity filled with nanofluids and heated by a triangular thick wall”, Int J Therm Sci,Vol 67,(2013) 135–51.

[2] A. Tahmasebi, A. Noghrehabadi A. Azimi, “Local thermal non-equilibrium conjugate natural convection in a cavity filled with a porous medium and partially heated from the side walls”. Int J Therm Sci,Vol 2(2) (2015) 7– 15.

[3] M. R. Rezaie, M. J. Maghrebi, “Numerical Investigation of Conjugate Natural Convection Heat Transfer in Porous Enclosure with Lattice Boltzmann Method”, Journal of Solid and Fluid Mechanics, (2014) 205– 219.

[4] Pop, I. Ghalambaz, M. Sheremet, M. “Free convection in a square porous cavity filled with a nanofluid using thermal non equilibrium and Buongiorno models”, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid FlowVol. 26 No. 3/4, (2016) 671-693.

[5] Z. Guo, T.S. Zhao, Lattice Boltzmann Model for Incompressible Flows through Porous Media”, Phys. Rev. E., Vol. 66. No. 3, (2002) 298-304.

[6] Q. Sun, I. Pop, Free convection in a triangle cavity filled with a porous medium saturated with nanofluids with flush mounted heater on the wall, *Int. J. Therm. Sci*, Vol. 50, (2011) 2141-2153.

[7] D. Nield, A. Kuznetsov, “thermal instability in a porous medium layer saturated by a nanofluid”. Int J Heat Mass Transfer, Vol. 52, (2009) 796 – 801.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.3.5.2]

[8] A. Chamkha, R. Gorla, K. Ghodeswar, "Non– similar solution for natural convective boundary layer flow over a sphere embedded in a porous medium saturated with a nanofluid". Transp porous media, Vol. 86, (2011) 13 – 22,

[9] J. C. Umavathi, M. B. Mohite, "The onset of convection in a nanofluid saturated porous layer using Darcy model with cross diffusion". Meccanica, Vol. 49, (2014) 1159 – 1175.

[10] V. Prasad, F. A. Kulacki, Convective heat transfer in a rectangular porous cavity–effect of aspect ratio on flow structure and heat transfer. J. Heat Transfer, Vol. 106, (1984) 158-165.

[11] L. R. Mealey, J .H. Merkin, Steady finite Rayleigh number convective flows in a porous medium with internal heat generation. International Journal of Thermal Sciences, Vol.48, (2009) 1068-1080.

[12] M. Tahmasebi Kohyani, B. Ghasemi, Pasandideh Fard, A Heat generation effects on natural convection in porous cavity with different walls temperature, Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT), Vol. 3, (2012) 274-287.

[13] C. Beckermann, S. Ramadhyani, R. Viskanta, Natural convection Flow and heat transfer between a fluid layer and a. porous layer inside a rectangular enclosure, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 109, (1987) 363-370.

[14] M. Sabor, M. Ghalambaz, "Natural convection in a triangular cavity filled with a Nanofluid -saturated porous medium using three heat equation model". J. Thermophys. Heat Transfer, Vol. 94, (2016) 605 – 615.

[15] H. Eshgarf, M. Afrand, M. Hemmat Esfe, Experimental investigation of the effects of temperature and nanoparticles volume fraction on the viscosity of non-Newtonian hybrid nanofluid, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 3, (2016) 98-104.

[16] O. Soltan, M. Akbari, Effects of temperature and part icles concentration on the dynamic viscosity of MgO MWCNT/ethyleneglycol hybrid nanofluid: Experimental study, Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, Vol. 84, No. 3, (2016) 564-570.

[17] O. Soltani M. Akbari, Effects of temperature and particles concentration on the dynamic viscosity of MgO-MWCNT/ethylene glycol hybrid nanofluid, 84 (2016) 564–570.

[18] M. Vafaei, M. Afrand, N .Sina, R. Kalbasi, F. Sourani, H. Teimouri, Evaluation of thermal conductivity of MgOMWCNTs/EG hybrid nanofluids based on experimental data by selecting optimal artificial neural networks, Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, PHYSE12553, (2016).

[19] T. Basak, S. Roy, A.R. Balakrishnan, Effects of thermal boundary conditions on natural convetion flows within a square cavity. International Journal of Heat and Mass Transfer, 49 (2006) 4525-4535.

[20] J.N. Reddy, An introduction to the finite element method, McGraw-Hill, New York, (1993).

[21] V.A.F. Costa, Homsy, Natural convection in partially divided square enclosures: Effects of thermal boundary conditions and thermal conductivity of the partition, International Journal of Heat and Mass Transfer, (1978).

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.3.5.2]