تأثیر حضور نانوسیال هیبریدی بر میزان انتقال حرارت جابجایی طبیعی همبسته درون یک محفظه متخلخل اشباع در شرایط عدم تعادل حرارتی

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: بهار ۹۷

چکیده

در پژوهش حاضر، انتقال حرارت جابجایی طبیعی همبسته درون یک محفظه متخلخل اشباع و در حضور نانوسیال هیبریدی در شرایط عدم تعادل حرارتی موضعی 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، به کمک کدنویسی در نرم افزار متلب و توابع کمکی تعریف شده در نرم‌افزار کامسول حل شدند. به منظور اطمینان از کد دینامیک سیالات محاسباتی، نتایج پژوهش حاضر با نتایج پژوهش‌های معتبر پیشین مورد اعتبارسنجی قرار گرفتند. تأثیر پارامترهای کسر حجمی نانوذرات، عدد رایلی و دمای کارکرد در محدوده‌های پیش فرض بر میزان انتقال حرارت درون محفظه بسته بررسی گردید. بدین منظور، نتایج برای عدد ناسلت فاز سیال و ماتریس جامد متخلخل به صورت موضعی و متوسط ارائه گردیده‌اند. همچنین خطوط دماثابت و خطوط جریان با هدف درک بهتر نتایج، به نمایش درآمده‌اند.

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

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

۱- مقدمه

بررسی پدیده انتقال حرارت و جریان سیال در محیط متخلخل جایگاه ویژه‌ای در فناوری و صنعت دارد. این مهم باعث شده که در سال‌های اخیر، محققان توجهی ویژه به بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر انتقال حرارت در محیط‌های متخلخل داشته باشند. از سوی دیگر انتقال حرارت جابجایی طبیعی در محفظه‌های بسته نیز، به سبب کاربردهای متنوع آن در علوم و مهندسی، از سال‌ها پیش مورد توجه فراوان پژوهشگران قرار گرفته است. مبدل‌های زیرزمینی برای ذخیره انرژی، بازیابی و کنترل دمای رآکتورها، خنک‌کاری قطعات الکترونیکی، ساخت عایق‌های حرارتی برای صرفه‌جویی در انرژی، فرآیند فیلتراسیون و کلکتورهای خورشیدی، مثالهایی از صنایع وابسته به محیط متخلخل هستند [۳-۱]. به دلیل کاربرد گسترده این موضوع در بسیاری از زمینه‌های مهندسی، مدل‌های مختلفی جهت مدل‌سازی جریان و انتقال حرارت در محیط متخلخل گزارش شده که از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل دارسی در سال ۱۸۵۶ اشاره کرد. سپس این مدل در سال‌های ۱۹۰۱ و ۱۹۴۷ توسط فورچیمر و برینکمن کامل‌تر شده و مدل‌های دارسی- برینکمن و دارسی- فورچیمر در مطالعات عددی استفاده شده‌اند. سرانجام مدل ناویر- استوکس تعمیم یافته به عنوان مدلی کامل که اثرات تمام نیروهای وارد بر سیال در حضور ماده متخلخل را در برمی‌گرفت، معرفی شد. پرسد و کولاکی[1] [۴]، به صورت عددی انتقال حرارت جابجایی طبیعی درون محفظه متخلخل مستطیلی را در حالت پایا بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش نسبت ابعاد، نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. میالی و میرکین[2] [۵]، به بررسی تولید حرارت وابسته به دمای موضعی در محفظه متخلخل پرداختند. نتایج آن‌ها 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 می‌شوند. طهماسبی و همکاران [۶]، به بررسی محفظه پرشده از ماده متخلخل با تولید حرارت پرداختند. دیواره‌های عمودی به صورت دما ثابت، با دماهای مختلف و دیواره‌های افقی به صورت عایق درنظر گرفته شد. افزایش تولید حرارت داخلی و عدد

[1]- Prasad and Kulacki
[2]- Mealey and Merkin

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.1.6.9]

رایلی سبب تقویت نرخ انتقال حرارت شده است. بکرمن[1] و همکاران [۷]، 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 خواهد گرفت. همچنین، نفوذ سیال به درون ماده متخلخل به شدت به حاصل ضرب اعداد رایلی و دارسی بستگی دارد. صبور و قلم‌باز [۸]، به بررسی عدم تعادل حرارتی انتقال حرارت جابجایی طبیعی و انتقال جرم نانوسیال در یک محفظه مثلثی پر شده با یک محیط متخلخل پرداختند. آن‌ها 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. افزایش پارامتر نسبت شناوری سبب افزایش عدد ناسلت سیال و کاهش عدد ناسلت ماتریس جامد می‌شود.

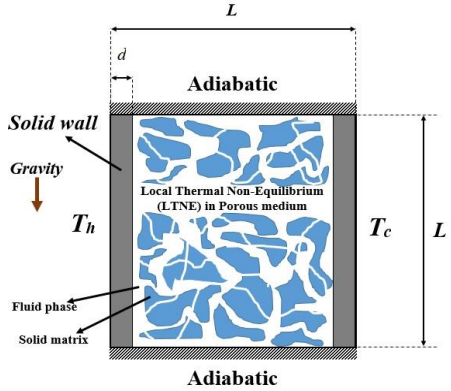
در سال‌های اخیر نانوسیالات هیبریدی به منظور افزایش نرخ انتقال حرارت مورد توجه قرار گرفته‌اند. نانوسیال هیبریدی یکی از انواع جدید نانوسیال‌ها است که در ساخت آن از بیش از یک نوع نانوذره استفاده می‌شود. اشگرف[2] و همکاران [۹]، در مطالعه‌ای آزمایشگاهی اثر دما و کسر حجمی نانوذرات را بر لزجت نانوسیال هیبریدی 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 [۱۰]، لزجت نانوسیال هیبریدی اتیلن‌گلایکول- اکسیدمنیزیم- نانولوله‌کربنی چند جداره در کسرهای حجمی ۰ تا ۱ درصد از نانوذرات و دماهای ۳۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس را به صورت تجربی اندازه‌گیری کردند. براساس نتایج آن‌ها نانوسیال هیبریدی مورد مطالعه رفتاری نیوتنی دارد. قلم‌باز و همکاران [۱۱]، به تجزیه و تحلیل انتقال حرارت جابجایی میان نانوسیال و یک محفظه متخلخل در حالت 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.

برهم‌کنش انتقال حرارت جابجایی در یک سیال و انتقال حرارت رسانشی در یک ماده جامد که باهم در تماس هستند، در اصطلاح انتقال حرارت همبسته نامیده می‌شود. چمخا[3] و اسماعیل [۱۲]، به صورت عددی، انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال درون یک حفره مربعی متخلخل که به وسیله یک دیوار جامد مثلثی گرم شده است را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنان نشان می‌دهد که وقتی ضخامت دیوار از یک مقدار بحرانی بیشتر شود، نرخ انتقال حرارت بهبود می‌یابد و این مقدار بحرانی با افزایش عدد رایلی بیشتر می‌شود. طهماسبی و همکاران [۱۳]، اثرات رسانش حرارتی دیواره‌های ضخیم یک محفظه پر شده از ماده متخلخل بر انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی در حالت عدم تعادل حرارتی را ارزیابی کردند. در این پژوهش از مدل دارسی- بریکمن توسعه یافته برای شبیه‌سازی جریان در محیط متخلخل استفاده شده است. تأثیر پارامترهای مهم شامل اعداد رایلی، پرانتل و دارسی، نسبت ضریب رسانش حرارتی سیال به محیط متخلخل، نسبت ضریب رسانش حرارتی دیواره ضخیم به سیال، نسبت ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین سیال و محیط متخلخل بر میزان انتقال حرارت درون محفظه بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که به غیر از عدد پرانتل، تمامی پارامترهای یادشده تأثیر قابل توجهی بر عدد ناسلت متوسط دارند. همچنین مشاهده گردید که در مقادیر بالا برای نسبت ضریب رسانش حرارتی سیال به محیط متخلخل و برای نسبت ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین آن‌ها، مقادیر عدد ناسلت متوسط اندازه‌گیری شده توسط دو مدل تعادل حرارتی و عدم تعادل حرارتی، برابر بوده و فرض تعادل حرارتی بین فازها معتبر می‌باشد.

با مطالعه پژوهش های 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 انتقال حرارت همبسته نانوسیال هیبریدی اتیلن گلایکول- نانولوله‌های‌کربنی چندلایه- اکسید منیزیم در یک لایه فوم فلزی آلومینیومی در حالت 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 جابه‌جایی طبیعی بوده و از نانوسیال هیبریدی اتیلن گلایکول- نانولوله‌های‌کربنی چندلایه- اکسید منیزیم درون آن بهره برده شده است. شرط عدم تعادل حرارتی بین فوم‌آلومینیومی 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 d نشان داده شده است.



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

[1]- Beckermann
[2]- Eshgarf
[3]- Chamkha

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.1.6.9]

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:

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

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

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

$$\frac{1}{\varepsilon}\left(\bar{u}_{hnf}\ \frac{\partial T_{hnf}}{\partial \bar{x}} + \bar{v}_{hnf}\ \frac{\partial \bar{u}_{hnf}}{\partial \bar{y}}\right) = \alpha_{hnf}\left(\frac{\partial^2 T_{hnf}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 T_{hnf}}{\partial \bar{y}^2}\right) + \frac{h_{hnf-s}}{\varepsilon\left(\rho c_p\right)_{hnf}}\left(T_s - T_{hnf}\right) \qquad (۴)$$

$$0 = \alpha_s\left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial \bar{y}^2}\right) + \frac{h_{hnf-s}}{(1-\varepsilon)\left(\rho c_p\right)_s}\left(T_{hnf} - T_s\right) \qquad (۵)$$

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

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:

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

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

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

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

$$T_{hnf} = T_s = T_w\ , \bar{u} = \bar{v} = 0 \quad \begin{cases} \bar{x} = d\ , \bar{x} = L-d \\ 0 \le \bar{y} \le L \end{cases} \qquad (۸)$$

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

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

$$\theta_{hnf} = \frac{T_{hnf} - T_c}{T_h - T_c},\ \theta_s = \frac{T_s - T_c}{T_h - T_c},\ \theta_w = \frac{T_w - T_c}{T_h - T_c} \qquad (۹)$$

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

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

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

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

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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.1.6.9]

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

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

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

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:

$$Pr=\frac{\upsilon}{\alpha},\mathrm{Ra}=\frac{\beta g\,\Delta TL^3}{\alpha\upsilon}$$
$$Da=\frac{\kappa}{L^2},H=\frac{h_{hnf-s}L^2}{\varepsilon k_{hnf}},kr=\frac{\varepsilon k_{hnf}}{\left(1-\varepsilon\right)k_s} \quad (۱۶)$$

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 [۱۴ و ۱۵]:

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

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

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

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

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

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

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

$$\theta_{hnf}=\theta_s=\theta_w,u=v=0 \quad \text{در} \quad \begin{cases}x=0.1,x=0.9\\ 0\le y\le 1\end{cases} \quad (۱۹)$$

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:

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

$$Nu_{s,x}=-\left.\frac{\partial\theta_s}{\partial x}\right|_{x=d} \quad (۲۰)$$

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

$$Nu_{bf}=\int_{y=0}^{y=1}Nu_{bf,x}dy,Nu_{hnf}=\int_{y=0}^{y=1}Nu_{hnf,x}dy$$
$$Nu_s=\int_{y=0}^{y=1}Nu_{s,x}dy \quad (۲۱)$$

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 [۱۶ و ۱۷].

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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.1.6.9]

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.

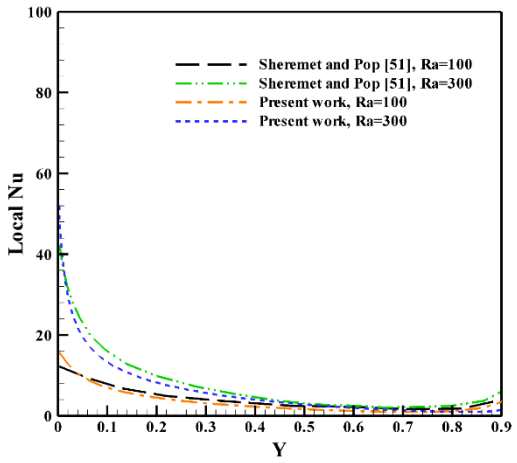
جدول(۱): آزمون استقلال شبکه در اعداد رایلی مختلف در

$Ra = ۱۰^{۴}$و$۱۰^{۵}$و$۱۰^{۶}$, $Da = ۱۰^{-۳}$, $Pr = ۱۵/۴۲$, $R_k = ۵۰۰$, $D = ۰/۱$, $H = ۱۰$, $C = ۰/۶$, $\varepsilon = ۰/۵$.

اندازه شبکه		۶۰×۶۰	۷۰×۷۰		۱۰۰×۱۰۰
۳/۳۹۲۱	$Ra = ۱۰^{۴}$	۳/۳۹۲۱	۳/۳۹۲۱	۳/۳۹۲۱	۳/۳۹۲۰
۴/۴۷۲۸	$Ra = ۱۰^{۵}$	۴/۴۷۳۳	۴/۴۷۳۰	۴/۴۷۲۹	۴/۴۷۲۷
۱۱/۴۵۳	$Ra = ۱۰^{۶}$	۱۱/۴۵۸	۱۱/۴۵۶	۱۱/۴۵۴	۱۱/۴۵۳
۹۰×۹۰				۸۰×۸۰	
	$Ra = ۱۰^{۴}$	۱/۲۴۸۰	۱/۲۴۸۰	Nu_{hnf}	۱/۲۴۸۰
۱/۲۴۷۶	$Ra = ۱۰^{۵}$	۱/۲۴۷۶	۱/۲۴۷۶	۱/۲۴۷۶	۱/۲۴۷۶
۱/۲۴۴۸	$Ra = ۱۰^{۶}$	۱/۲۴۴۸	۱/۲۴۴۸	۱/۲۴۴۸	۱/۲۴۴۸

۵- اعتبارسنجی نتایج

به منظور اطمینان از صحت نتایج حاصل شده در پژوهش حاضر، مقایساتی 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 پژوهش حاضر، رفتار نانوسیال هیبریدی در محیط متخلخل مورد تحلیل قرار می‌گیرد، لذا، سعی بر آن شده که یکی از مرتبط‌ترین مطالعات پیشین مورد مقایسه قرار گیرد. در شکل (۲) مقایسه‌ای بین عدد ناسلت موضعی در کار حاضر و عدد ناسلت موضعی گزارش شده توسط شرمت و پوپ[1] [۱۸]، در دو عدد رایلی ۱۰۰ و ۳۰۰ آورده شده است. شرمت و پوپ [۱۸]، انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانوسیال در یک حفره مثلثی پر شده با محیط متخلخل را مورد مطالعه و بررسی قرار داده‌اند. دیواره عمودی در دمای بالاتر در نظر گرفته شده و عدد ناسلت موضعی بر روی این دیواره ارزیابی گردید. آن‌ها [۱۸]، اثرات ترموفورسیس و حرکت براونی را برای نانوسیال لحاظ نمودند. همچنین، شرایط تعادل حرارتی بین فازها در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، نتایج پژوهش حاضر با نتایج حاصل شده از کار شرمت و پوپ [۱۸]، دارای تطابق مناسبی می‌باشند.



شکل(۲): مقایسه عدد ناسلت محلی به دست آمده کار انجام شده با نتایج تحقیق شرمت و پوپ در دو عدد رایلی مختلف [۱۸].

۶- نتایج و بحث

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 $Ra = ۱۰^{۴}$-$۱۰^{۶}$، $Da = ۱۰^{-۳}$-$۱۰^{-۵}$، $R_k = ۱$-∞ 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.

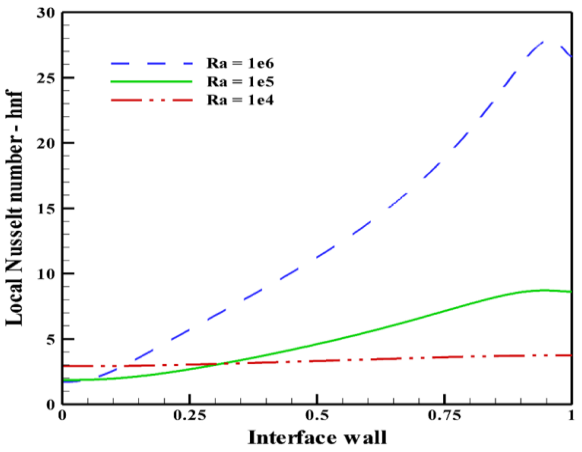
شکل ۳، الگوهای عدد ناسلت موضعی نانوسیال هیبریدی برای سه عدد رایلی برابر با $۱۰^{۴}$، $۱۰^{۵}$ و $۱۰^{۶}$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، گرادیان حرارتی شکل گرفته در پایین دیواره رابط تحت شرایط عدد رایلی برابر $۱۰^{۴}$ بیشتر از شرایط اعداد رایلی برابر $۱۰^{۵}$ و $۱۰^{۶}$ است. به عبارت دیگر، اختلاف دمای ایجاد شده بین نانوسیال هیبریدی و پایین دیواره رابط در عدد رایلی کمتر، بیشتر از اعداد رایلی بالاتر می‌باشد. اما با توجه به ضعیف بودن ساز و کار انتقال حرارت در عدد رایلی پایین، گرادیان‌های حرارتی ایجاد شده در دیگر نواحی دیواره رابط دارای تغییرات جزئی بوده، از این رو، عدد ناسلت موضعی با شیب بسیار ملایم افزایش یافته است. از سوی دیگر، در شرایطی که عدد رایلی برابر $۱۰^{۵}$ و $۱۰^{۶}$ در نظر گرفته شده، گرادیان حرارتی تقریبا یکسانی در پایین دیواره رابط ایجاد شده است. همچنین، شیب منحنی مربوط به عدد رایلی برابر $۱۰^{۶}$ بیشتر از منحنی مربوط به عدد رایلی برابر $۱۰^{۵}$ می‌باشد. علت این امر تقویت نیروهای شناوری و به تبع آن قدرتمندتر شدن ساز و کار انتقال حرارت است. ضمن این‌که شیب فزاینده هر دو منحنی در بالای دیواره رابط متوقف و پس کاهش یافته است. از یک سو، هم دما شدن نانوسیال هیبریدی با دیواره رابط و از سوی دیگر، مجاورت هر دو آن‌ها با

[1] - Sheremet and Pop

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

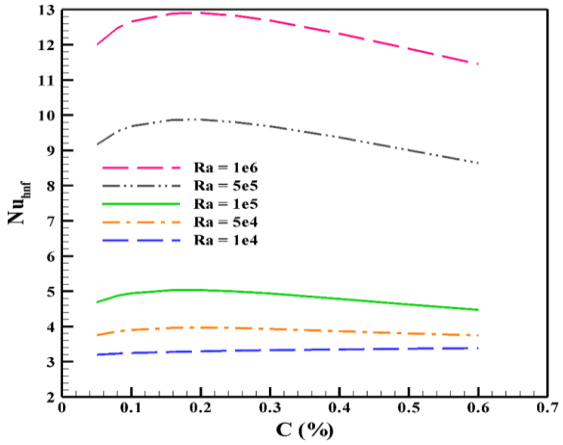
[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.1.6.9]

دیواره افقی عایق، سبب کاهش انتقال حرارت نانوسیال هیبریدی در نواحی بالای دیواره رابط شده است. با مشاهده کلی الگوهای شکل گرفته برای عدد ناسلت موضعی در سه عدد رایلی یاد شده، می‌توان دریافت که بیشترین میزان بهبود انتقال حرارت در تمام طول دیواره رابط به ترتیب در اعداد رایلی 10^6، 10^5 و 10^4 حاصل می‌شود. در واقع با افزایش عدد رایلی، امکان ایجاد گرادیان‌های حرارتی بیشتری بین فاز سیال با دیواره رابط فراهم شده و به تبع آن، نرخ انتقال حرارت برای فاز سیال، بیشتر شده است.

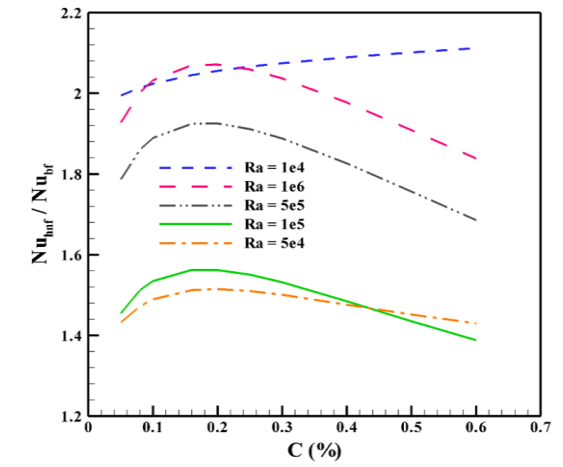


شکل(۳): تغییرات عدد ناسلت موضعی نانوسیال هیبریدی در سه عدد رایلی برابر 10^4، 10^5 و 10^6 در کسر حجمی ۰/۳

عدد ناسلت متوسط نانوسیال هیبریدی به‌عنوان تابعی از کسر حجمی نانوذرات برای مقادیر مختلف عدد رایلی در شکل (۴) به نمایش درآمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود از منحنی مربوط به عدد رایلی برابر 10^4 تا منحنی مربوط به عدد رایلی برابر 10^6، الگوی عدد ناسلت متوسط تغییر یافته است. در عدد رایلی برابر 10^4 روند بهبود انتقال حرارت در تمام بازه کسر حجمی دارای شیبی کاملا ملایم می‌باشد. در حالی‌که در عدد رایلی برابر 5×10^4، اثر تغییرات کسر حجمی بر روی میزان نرخ انتقال حرارت ابتدا به طور نامحسوسی افزایش و سپس تقریباً ثابت شده است. از طرف دیگر می‌توان بیان کرد که کسر حجمی ۰/۲ درصد در اعداد رایلی بالاتر نقش حیاتی در افزایش و یا کاهش انتقال حرارت ایفا می‌نماید. در اعداد رایلی برابر 5×10^4 و بزرگتر، منحنی عدد ناسلت متوسط نانوسیال هیبریدی به دو ناحیه افزایش انتقال‌حرارت (۰/۰۵ تا ۰/۲ درصد) و کاهش انتقال حرارت (۰/۲ تا ۰/۶ درصد) تقسیم شده است. علت ایجاد چنین الگوهایی به استفاده از روابط تجربی ۱۷ و ۱۸ برای نسبت ضریب رسانش حرارتی و نسبت ضریب لزجت دینامیک برمی‌گردد. به هر روی، با توجه به وجود نقاط بیشنه و کمینه به خصوص در اعداد رایلی بالا، می‌بایست به تعیین میزان بهبود و یا تضعیف انتقال حرارت در حضور نانوذرات هیبریدی و محیط متخلخل نسبت به عدم حضور آن‌ها (یعنی فقط سیال خالص) پرداخته شود. شکل (۵) نشان دهنده میزان بهبود و یا تضعیف انتقال حرارت در بازه کسر حجمی مورد نظر است. از آن‌جایی که محور عمودی بیانگر نسبت ناسلت نانوسیال هیبریدی به ناسلت سیال خالص (اتیلن گلایکول) در محیط متخلخل می‌باشد، لذا مقادیر بزرگتر از عدد ۱، بهبود و مقادیر پایین‌تر از عدد ۱ بیان‌گر تضعیف انتقال حرارت توسط نانوسیال هیبریدی اتیلن گلایکول - اکسید منیزیم – نانولوله‌کربنی در محیط متخلخل خواهد بود. همان‌طور که شکل (۵) نشان می‌دهد، مقدار تمام منحنی‌ها بزرگتر از ۱ بوده و همگی موجب تقویت انتقال حرارت می‌شوند. از طرفی، با افزایش عدد رایلی میزان بهبود عدد ناسلت هم بیشتر شده است. البته در مورد منحنی مربوط به عدد رایلی برابر 10^4 با توجه به الگوی متفاوت آن از سایر منحنی‌ها، نتیجه متفاوتی هم رقم خورده است. بنابراین، الزاماً افزایش عدد رایلی بیشترین بهبود انتقال حرارت را در پی ندارد. میزان بهبود انتقال حرارت در عدد رایلی برابر 10^4 بیشتر از سایر اعداد رایلی بوده؛ از این رو می‌توان نتیجه گرفت که حضور نانوذرات هیبریدی درون محیط متخلخل در اعداد رایلی پایین به مراتب مؤثرتر از اعداد رایلی بالاتر می‌باشد. در کل، به منظور دستیابی به بیشترین میزان انتقال حرارت برای نانوسیال هیبریدی اتیلن گلایکول - اکسید منیزیم – نانولوله‌کربنی در محیط متخلخل و برای هر عدد رایلی دلخواه می‌توان از منحنی‌های حاصل شده در شکل (۵) بهره گرفت. در بیانی دقیق‌تر، می‌توان در یک عدد رایلی مشخص، میزان دقیق کسر حجمی نانوذرات را طوری انتخاب نمود که میزان تقویت انتقال حرارت بیشینه شود.



شکل(۴): عدد ناسلت متوسط نانوسیال هیبریدی به‌عنوان تابعی از کسر حجمی نانوذرات برای مقادیر مختلف عدد رایلی.

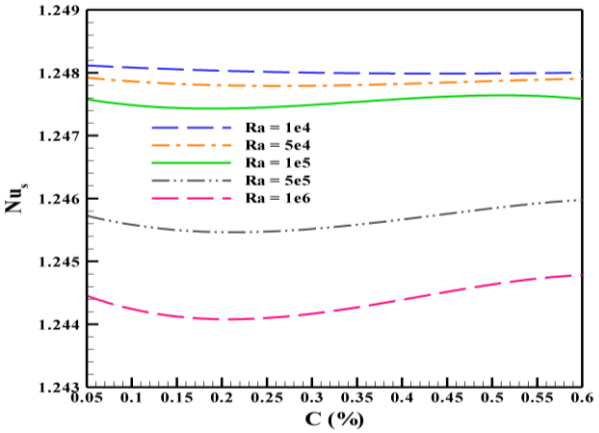


شکل(۵): نسبت بهبود انتقال حرارت به‌عنوان تابعی از کسر حجمی نانوذرات برای مقادیر مختلف عدد رایلی.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

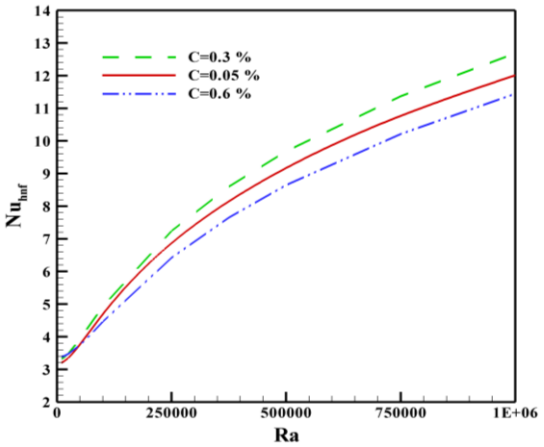
[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.1.6.9]

عدد ناسلت متوسط ماتریس جامد به عنوان تابعی از کسر حجمی نانوذرات برای مقادیر مختلف عدد رایلی در شکل (۶) به نمایش درآمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود الگوهای عدد ناسلت متوسط در شکل (۶)، عکس الگوهای عدد ناست متوسط در شکل (۴) می‌باشند. در عدد رایلی برابر $۱۰^۴$ روند تضعیف انتقال حرارت در تمام بازه کسر حجمی دارای شیبی کاملا ملایم می‌باشد. در حالیکه در عدد رایلی برابر $۵×۱۰^۴$، اثر تغییرات کسر حجمی بر روی میزان نرخ انتقال حرارت ابتدا به طور نامحسوسی کاهش و سپس با شیبی کاملا ملایم در حال افزایش است. از طرف دیگر می‌توان بیان کرد که کسر حجمی ۰/۲ درصد در اعداد رایلی بالاتر نقش حیاتی در افزایش و یا کاهش انتقال حرارت ایفا می‌نماید. در اعداد رایلی برابر $۵×۱۰^۴$ و بزرگتر، منحنی عدد ناسلت متوسط نانوسیال هیبریدی به دو ناحیه کاهش انتقال‌حرارت (۰/۰۵ تا ۰/۲ درصد) و افزایش انتقال حرارت (۰/۲ تا ۰/۶ درصد) تقسیم شده است. در این‌جا نیز روابط ۱۷ و ۱۸، عامل اصلی شکل‌گیری چنین الگوهایی هستند؛ هر چند که تغییرات عدد رایلی بر روی عدد ناسلت متوسط ماتریس جامد چندان اثرگذار نیست.



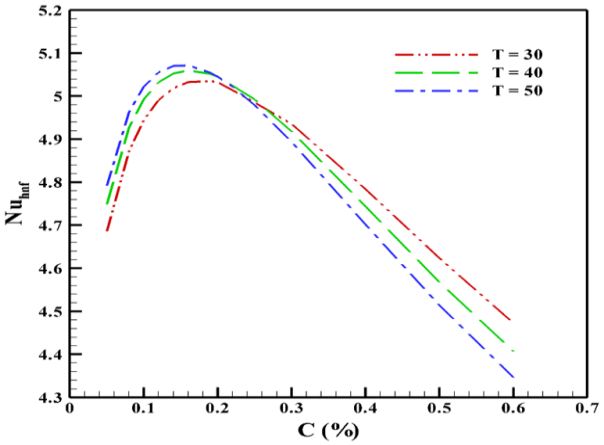
شکل(۶): عدد ناسلت متوسط نانوسیال هیبریدی به‌عنوان تابعی از کسر حجمی نانوذرات برای مقادیر مختلف عدد رایلی.

اثرات عدد رایلی بر روی عدد ناسلت متوسط در سه کسر حجمی برابر ۰/۰۵، ۰/۳ و ۰/۶ در شکل (۷) آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در اعداد رایلی پایین تأثیر کسر حجمی بر روی عدد ناسلت متوسط تقریباً یکسان بوده و منحنی‌ها آن‌چنان قابل تمایز نیستند؛ اما با افزایش عدد رایلی در هر کسر حجمی، میزان نرخ انتقال حرارت افزایش یافته است. نکته قابل تأمل در ارتباط با الگوی منحنی‌های حاصل شده، اثرات نامنظم کسرهای حجمی نانوذرات نسبت به یکدیگر است. منحنی مربوط به کسر حجمی ۰/۳ بالاتر از منحنی مربوط به کسر حجمی ۰/۰۵ و این منحنی بالاتر از منحنی مربوط به کسر حجمی ۰/۶ قرار گرفته که با افزایش عدد رایلی این مهم نمود بیشتری یافته است. با مشاهده مقادیر اتخاذ شده برای منحنی‌های کسر حجمی، می‌توان دریافت که نتایج حاصل شده از شکل (۷) با نتایج بدست آمده از شکل‌های (۴) و (۵)، در تطابق بوده و یکدیگر را تصدیق می‌کنند (به دوبخشی شدن منحنی‌های موجود در شکل‌های (۴) و (۵) توجه شود).



شکل (۷): اثرات کسر حجمی برروی عدد ناسلت متوسط نسبت به تغییرات عدد رایلی.

شکل ۸، عدد ناسلت متوسط نانوسیال هیبریدی را به‌عنوان تابعی از کسر حجمی نانوذرات نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای سه دمای ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد، افزایش کسر حجمی نانوذرات در بازه ۰/۰۵ تا ۰/۲، بهبود انتقال حرارت را به دنبال دارد. در حالی که افزایش کسر حجمی نانوذرات در بازه ۰/۲ تا ۰/۶ درصد، منجر به کاهش انتقال حرارت می شود. ضمن این که در بیشتر طول دیواره رابط، منحنی مربوط به دمای کمتر، دارای مقادیر عدد ناسلت موضعی بالاتری می‌باشد.



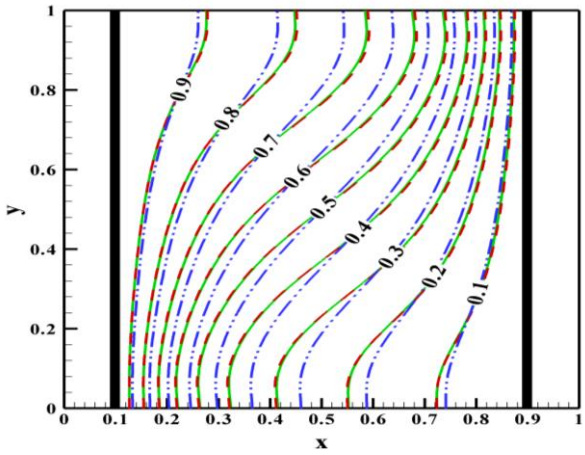
شکل (۸): عدد ناسلت متوسط فاز سیال به‌عنوان تابعی از کسر حجمی نانوذرات برای مقادیر مختلف دمایی در رایلی $۱۰^۵$.

شکل‌های (۹) و (۱۰) به ترتیب مربوط به مقایسه خطوط دما ثابت و خطوط جریان در سه کسر حجمی ۰/۰۵، ۰/۳ و ۰/۶ می‌باشند. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، افزایش کسر حجمی الگوهای متفاوتی از نرخ انتقال حرارت را به همراه دارد، به طوری‌که خطوط دماثابت مربوط به هر کسر حجمی در برخی از نواحی سبب بهبود انتقال حرارت و در برخی نواحی دیگر موجب تضعیف انتقال حرارت شده‌اند. به عنوان مثال، خطوط دماثابت مربوط به کسر حجمی ۰/۶ درصد دارای نوسان حرارتی بیشتری می‌باشد. در نواحی بالای محفظه تقویت گرادیان‌های حرارتی و در نواحی پایین محفظه کاهش گرادیان‌های حرارتی را سبب شده است. این در حالی است که افزایش و یا کاهش کسر حجمی در

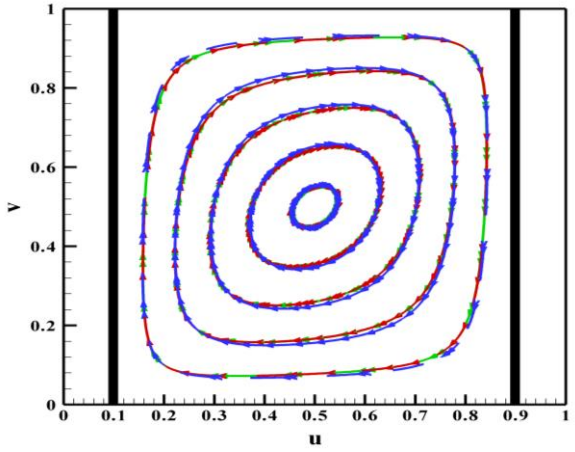
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.1.6.9]

شکل (۱۰)، بر روی خطوط جریان بی‌تأثیر است. در واقع، تغییرات کسر حجمی نانوذرات چندان بر روی وزن و به طور کلی گردش نانوسیال هیبریدی اثرگذار نبوده؛ بنابراین، خطوط جریان دست‌خوش تغییر نشده‌اند. از این رو، می توان نتیجه گرفت که تغییرات کسر حجمی نانوذرات مستقیماً بر گرادیان‌های حرارتی اثرگذار است.



شکل(۹): خطوط سبز رنگ (پیوسته) C =۰/۰۵، خطوط قرمز رنگ (خط چین) C =۰/۳ و خطوط آبی رنگ (خط چین- دو نقطه) C =۰/۶ در رایلی 10^5.



شکل(۱۰): خطوط سبز رنگ(پیوسته) C =۰/۰۵، خطوط قرمز رنگ(خط چین) C =۰/۳ و خطوط آبی رنگ(خط چین- دو نقطه) C =۰/۶ در رایلی 10^5.

۵- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، تأثیر حضور نانولوله‌های کربنی چندلایه- اکسید منیزیم در سیال پایه اتیلن‌گلایکول بر میزان انتقال حرارت جابجایی طبیعی همبسته درون یک لایه فوم فلزی آلومینیومی در شرایط عدم تعادل حرارتی موضعی 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 تغییرات کسر حجمی بر میزان انتقال حرارت درون محفظه بسته ارزیابی گردید؛ مهم‌ترین نتایج به صورت خلاصه و به شرح ذیل هستند:

۱- با افزایش عدد رایلی در یک کسر حجمی ثابت، همواره نرخ انتقال حرارت نانوسیال هیبریدی بهبود می‌یابد.

۲- وجود نانوذرات نسبت به سیال خالص همواره سبب بهبود انتقال حرارت نانوسیال هیبریدی می‌شود. عدد ناسلت در هر عدد رایلی و در بازه تعیین شده برای کسر حجمی نانوذرات، دارای یک الگوی منحصر به فرد می‌باشد.

۳- در یک عدد رایلی پایین در فاز ماتریس جامد، بیشترین کسر حجمی نانوذرات کمترین میزان انتقال حرارت را در پی دارد. ولی در اعداد رایلی بالاتر، لزوماً افزایش کسر حجمی نانوذرات سبب ایجاد کمینه میزان انتقال حرارت نمی‌شود. در واقع، در اعداد رایلی بالاتر حداکثر و حداقل میزان انتقال حرارت در یک مقدار معین از کسر حجمی نانوذرات رخ می‌دهد.

۴- میزان فراز و نشیب منحنی های مربوط به عدد ناسلت متوسط نانوسیال هیبریدی با افزایش دما، بیشتر می شود. ضمن اینکه در کسر حجمی برابر ۰/۲۵ درصد، مقدار عدد ناسلت متوسط نانوسیال هیبریدی به ازای هر سه دمای۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی گراد، یکسان خواهد بود.

۵- خطوط دماثابت با افزایش کسر حجمی نانوذرات نوسان بیشتری در نواحی بالا و پایین محفظه پیدا می‌کنند. حال آن‌که خطوط جریان نانوسیال هیبریدی تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. از این‌رو، تغییرات کسر حجمی مستقیماً با گرادیان‌های حرارتی سر و کار داشته و از طریق تغییراتی که بر روی گرادیان حرارتی (نه جریان سیال) می‌گذارد سبب بهبود و تضعیف انتقال حرارت می‌شود.

فهرست علامت‌ها

علائم انگلیسی

ضخامت دیوار، m	d
عدد دارسی	Da
شتاب جاذبه، $m.s^{-2}$	g
ضریب انتقال حرارت حجمی بین فازهای سیال و ماتریس جامد، $W.m^{-3}.K^{-1}$	$h_{hnf\text{-}s}$
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	K
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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.1.6.9]

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
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] Ingham D.B. Emerging technologies and techniques in porous media. Springer, London, (2004).

[2] D.B. Ingham, I. Pop, Transport phenomena in porous media III. Elsevier, (2005).

[3] K. Vafai, Handbook of porous media. Crc Press, (2010).

[4] 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, 106 (1984) 158-165.

[5] 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, 48 (2009) 1068-1080.

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

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

[8] 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, 94 (2016) 605 – 615.

[9] 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, 16(3) (2016) 98-104.

[10] 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, 84(3) (2016) 564-570.

[11] I. Pop, M. Ghalambaz, M. Sheremet, Free convection in a square porous cavity filled with a nanofluid using thermal non equilibrium and Buongiorno models, nternational Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 26(3/4) (2016) 671-693.

[12] 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, 67 (2013) 135– 151.

[13] 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, 2(2) 2015 7– 15.

[14] 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.

[15] 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).

[16] 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.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.1.6.9]

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

[18] M. A. Sheremet, I. Pop, Free convection in a triangular cavity filled with a porous medium saturated by a nanofluid Buongiorno's mathematical model, 25(5) (2015) 1138 - 1161.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.1.6.9]