

جابجایی آزاد نانو سیال در یک محفظه مربعی بافل دار

نسیم احمدی^۱، بهزاد قاسمی^{۲*}، افراسیاب رئیسی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۷/۱۸	در این مقاله جابجایی آزاد نانو سیال آب - مس در یک محفظه مربعی بافل دار که دیواره سمت چپ آن در دمای گرم و دیواره سمت راست در دمای سرد قرار دارد و دیگر سطوح عایقند، به طور عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای موقعیت‌ها و طول‌های مختلف دو بافل که به دیواره گرم وصل شده‌اند میدان جریان و دما و نرخ انتقال حرارت پیش‌بینی شده است. مدل عددی که بر اساس الگوریتم سیمپل پایه گذاری شده است برای حل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی استفاده شده است. علاوه بر موقعیت و طول بافلها اثر پارامترهایی چون عدد ریلی ($10^6 \leq Ra \leq 10^3$) و درصد حجمی نانو ذرات ($0 \leq \phi \leq 0.05$) مورد بررسی قرار گرفته است. در بررسی‌ها مشاهده شد که افزایش عدد ریلی و درصد حجمی نانو ذرات باعث افزایش انتقال حرارت و نوسلت متوسط روی هر دو دیواره گرم و سرد می‌شود. همچنین افزایش طول بافل باعث افزایش نوسلت متوسط روی دیواره سرد و کاهش آن روی دیواره گرم می‌شود.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۱۱	
واژگان کلیدی: انتقال حرارت، جابجایی آزاد، بافل، محفظه، نانوسیال.	

۱- مقدمه

در سه دهه اخیر، جابجایی آزاد در محفظه‌ها به طور چشمگیری مورد توجه محققان قرار گرفته است. این توجه به دلیل کاربردهای فراوان جابجایی آزاد در زمینه‌های مختلف مهندسی همچون سیستم‌های انرژی خورشیدی، عایق‌های حرارتی، راکتورهای هسته‌ای، طراحی حرارتی ساختمان‌ها، تهویه هوا در محیط‌های بسته و خنک کاری تجهیزات الکترونیکی است. به عنوان مثال در مورد کارهای عددی انجام شده در زمینه جابجایی آزاد می‌توان به کارهای زیر اشاره کرد.

شی و خدادادی [۱] جابجایی طبیعی در داخل محفظه مربعی با وجود یک پره نازک بر روی دیواره سمت چپ را به طور عددی بررسی کردند. آنها نشان دادند که قراردادن پره بر روی دیوار سمت چپ باعث تغییر چرخش گردابه در جهت عقربه‌های ساعت می‌شود و همچنین برای اعداد ریلی بالا میدان جریان بدون در نظر گرفتن طول پره و موقعیت آن افزایش پیدا می‌کند.

کانداسوامی و همکارانش [۲] انتقال حرارت جابجایی آزاد را در یک محفظه مربعی با دو بافل عمود بر هم مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش طول بافل عمودی انتقال حرارت افزایش می‌یابد و همچنین افزایش طول بافل افقی زمانی باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود که پایین‌تر از مرکز محفظه قرار گیرد. بیلگن [۳] انتقال حرارت در محفظه با فین نازکی که روی دیواره گرم قرار دارد را به طور عددی بررسی کرده است و اثر موقعیت و اندازه فین را بر روی نرخ انتقال حرارت پیش‌بینی کرده است. او دریافته است که عدد نوسلت با افزایش طول فین کاهش می‌یابد.

در اغلب مطالعات جابه‌جایی آزاد، سیال درون محفظه ضریب هدایت پایینی دارد که نرخ انتقال حرارت را محدود می‌کند. به همین دلیل امروزه توجه محققان به استفاده از نانو سیال معطوف شده است. انتظار می‌رود که افزودن نانو ذرات به سیال پایه باعث افزایش ضریب هدایت و به خصوص افزایش انتقال حرارت گردد. در ادامه به بررسی

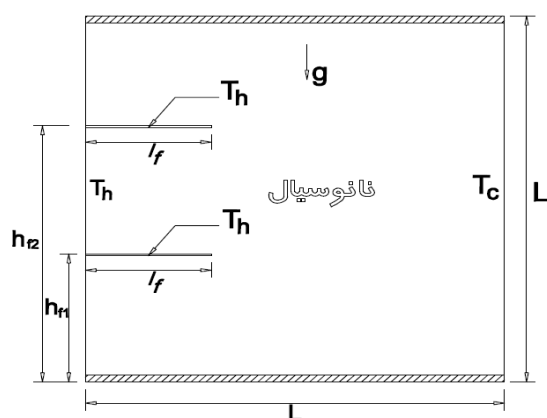
* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ghasemi@eng.sku.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد

۲. استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد

۳. دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد

محفظه‌های دارای بافل انجام گرفته است، به نظر می‌رسد هنوز به دلیل کاربردهای فراوان این پدیده کاستی‌های زیادی وجود دارد. به همین دلیل در کار حاضر محفظه‌ای حاوی نانو سیال با دو بافل، که در مطالعات قبلی به چشم نمی‌خورد، تعریف شده است. این مسئله می‌تواند مدلی برای پیش‌بینی سرمایه‌های قطعات الکترونیکی واقع بر روی دیواره و پایه‌های متصل به دیواره یک محفظه باشد. در این بررسی تأثیر پارامترهایی همچون عدد ریلی، طول و موقعیت بافل‌ها و همچنین اثر افزودن نانو ذره مس با درصدهای حجمی متفاوت و نوع نانو ذرات بر میدان جریان و دما و نرخ انتقال حرارت بررسی شده است.



شکل ۱: هندسه مسئله

۲- بیان مسئله

در مسئله حاضر، یک محفظه مربعی شکل پر شده از نانو سیال آب و مس مطابق شکل (۱) در نظر گرفته می‌شود. که دیواره سمت راست در دمای سرد T_c و دیواره مقابل در دمای گرم T_h است. سایر دیواره‌های محفظه عایق حرارتی است. همچنین دو بافل نازک بر روی دیواره گرم محفظه وجود دارد که در دمای گرم T_h می‌باشند. شتاب گرانشی g ، در جهت منفی y عمل می‌کند. فرض شده که در دیواره‌ها شرط عدم لغزش برقرار است. هدف بررسی افزایش درصد حجمی نانو ذرات و تغییر طول و موقعیت بافل‌ها می‌باشد.

۳- معادلات حاکم بر مسئله

معادلات بدون بعد حاکم برای جریان آرام و دائم نانو سیال با فرض تقریب بوزینسک و فرض تعادل گرمایی و هیدرودینامیکی بین نانو ذرات و سیال به صورت زیر می‌باشند.

پیوستگی:

چند مقاله در زمینه نانوسیال می‌پردازیم: خانافر و همکاران [۴] در یک مطالعه عددی تأثیر نانو ذرات را بر جایابی آزاد در یک محفظه دو بعدی که حاوی نانو سیال آب - مس است بررسی نمودند آنها به این نتیجه رسیدند که در هر عدد گراشی میزان انتقال حرارت با افزایش درصد حجمی ذرات مس، افزایش می‌یابد. امین‌الساداتی و قاسمی [۵] یک مطالعه عددی روی جابه‌جایی آزاد از یک منبع حرارتی واقع در ته یک محفظه بسته پر از نانو سیال انجام دادند. در این مقاله تأثیر عدد ریلی، محل و هندسه هیتر، نوع نانو ذرات و نسبت حجمی نانو ذرات روی عملکرد سرمایه‌های مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که اضافه کردن نانو ذرات به آب خالص عملکرد سرمایه‌های بهتری را ایجاد می‌کند که در اعداد ریلی کوچک این امر چشمگیرتر می‌باشد. در مقاله‌ای از اوزتوپ و ابونادا [۶]، انتقال حرارت و جریان سیال بر اساس نیروی شناوری در یک محفظه که قسمتی از دیواره سمت چپ آن در دمای گرم و دیواره راست آن در دمای پایین‌تری قرار دارد و بقیه سطوح عایقند مورد بررسی قرار گرفته است. محاسبات برای متغیرهای متنوعی چون اعداد ریلی، طول هیتر و موقعیت آن، نسبت محفظه و نسبت حجمی و نانو ذرات مختلف انجام پذیرفته است. با افزودن نانو ذرات میزان انتقال حرارت در هر عدد ریلی افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش طول هیتر عدد نوسلت افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که اثر نانو ذرات بر افزایش عدد نوسلت در نسبت کسر حجمی پایین‌تر بیشتر است و درصد افزایش انتقال حرارت در اعداد ریلی بزرگتر کاهش می‌یابد. در مقاله‌ای دیگر از امین‌الساداتی و قاسمی [۷] جایابی طبیعی در یک محفظه مثلثی شکل که یک منبع گرمایی در دیواره عمودی‌اش قرار دارد و مملو از نانوسیال آب و مس می‌باشد به روش عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که برای همه مقادیر حجم مواد جامد افزایش عدد ریلی منجر به میزان جایابی گرمایی بیشتر می‌شود که ناشی از شدت نیروی شناوری می‌باشد. همچنین اثر موقعیت منبع گرمایی بر میزان انتقال گرما در اعداد ریلی متفاوت بررسی شده است. مشاهده شده که در اعداد ریلی پایین هنگامی که منبع گرمایی به سمت بالا در دیواره عمودی محفظه حرکت می‌کند میزان جایابی گرمایی بیشتری صورت می‌گیرد. علی‌رغم کارهای زیادی که در زمینه جایابی آزاد حتی در

در روابط فوق منظور از nf نانوسیال، f سیال خالص، p نانو ذرات مس و ϕ در صد حجمی نانو ذرات می‌باشد. عدد پرانتل آب ۶.۲ در نظر گرفته شده و خواص ترموفیزیکی آب و مس در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: خواص ترموفیزیکی آب خالص و نانو ذرات مس [۵]

آب خالص	نانو ذرات مس	
997/1	8933	$\rho(\text{kgm}^{-3})$
4179	385	$C_p(\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1})$
0/613	401	$k(\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1})$
21	1/67	$\beta \times 10^5 (\text{K}^{-1})$

۳-۱- شرایط مرزی

شرایط مرزی برای حل معادلات به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$U=0, V=0, \theta=1 \quad \text{در دیواره سمت چپ}$$

$$U=0, V=0, \theta=0 \quad \text{در دیواره سمت راست}$$

$$U=0, V=0, \frac{\partial \theta}{\partial Y}=0 \quad \text{در دیواره بالا و پایین}$$

$$U=0, V=0, \theta=1 \quad \text{روی بافل‌ها}$$

میزان انتقال حرارت در قالب عدد نوسلت قابل بیان است که عدد نوسلت موضعی روی دیواره گرم یا سرد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Nu_Y = -\frac{k_{nf}}{k_f} \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right)_{x=0,1} \quad (13)$$

نوسلت متوسط روی دیواره‌ی گرم یا سرد از انتگرال‌گیری معادله‌ی بالا به صورت زیر بدست می‌آید:

$$Nu_{m,c} = \int_0^1 Nu_Y(Y) dY = -\frac{k_{nf}}{k_f} \int_0^1 \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right)_{X=0,1} dY \quad (14)$$

۴- کنترل برنامه و نتایج

برای مدل کردن هندسه مورد نظر برنامه‌ای به زبان فرترن نوشته شده و اجراهای برنامه انجام شده است. معادلات حاکم به روش تفاضل محدود مبتنی بر حجم کنترل جبری شده‌اند و به کمک الگوریتم سیمپل به طور همزمان حل شده‌اند. به منظور اطمینان از عدم وابستگی نتایج به شبکه و تعیین شبکه مناسب برای حالت‌های مختلف شبکه بهینه

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

معادلات مومنتم در جهت X و Y:

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \alpha_f} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (2)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \alpha_f} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} Ra.Pr.\theta \quad (3)$$

انرژی:

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (4)$$

متغیرهای بی بعد استفاده شده در معادلات به شرح زیرند:

$$X = \frac{x}{L}, \quad Y = \frac{y}{L}, \quad U = \frac{uL}{\alpha_f}, \quad V = \frac{vL}{\alpha_f}$$

$$\theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, \quad P = \frac{\bar{P}L^2}{\rho_{nf} \alpha_f^2} \quad (5)$$

اعداد بدون بعد ریلی و پرانتل به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f}, \quad Ra = \frac{gL^3 \beta_f (T_h - T_c)}{\alpha_f \nu_f} \quad (6)$$

برای محاسبه خواص نانو سیال شامل چگالی، ضریب انبساط حجمی، ظرفیت حرارتی، ضریب پخش حرارتی به ترتیب از روابط زیر استفاده می‌شود [۸]:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (7)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p \quad (8)$$

$$\alpha_{nf} = k_{nf} / (\rho C_p)_{nf} \quad (9)$$

$$(\rho\beta)_{nf} = (1 - \phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_p \quad (10)$$

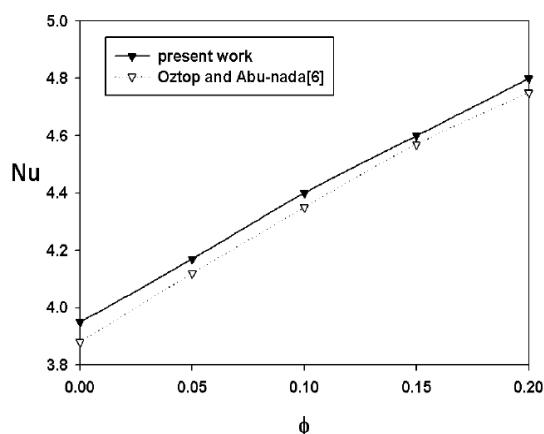
ضریب ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال توسط رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 - \phi)^{-2.5} \quad (11)$$

و ضریب هدایت حرارتی آن توسط رابطه ماکسول [۹] محاسبه می‌گردد.

$$k_{nf} = k_f \left[\frac{(k_p + 2k_f) - 2\phi(k_f - k_p)}{(k_p + 2k_f) + \phi(k_f - k_p)} \right] \quad (12)$$

می‌شود اختلاف ناچیز و در حد قابل قبول است.



شکل ۳: مقایسه نوسلت بدست آمده از مطالعه حاضر در $Re = 10^6$ با مرجع [۶]

۵- بررسی اثر عدد ریلی

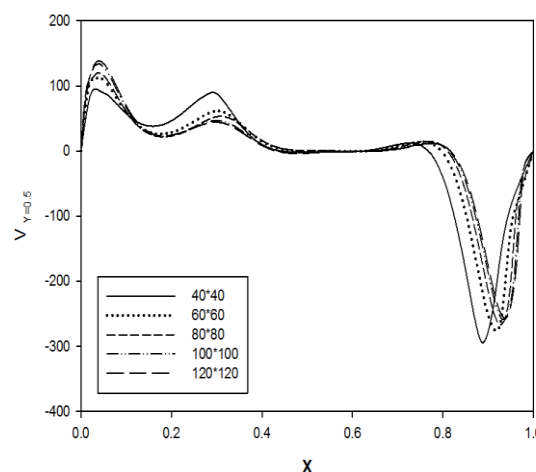
پس از اطمینان از عملکرد برنامه، ابتدا به بررسی عدد ریلی با شرایط حاکم بر مسئله می‌پردازیم. این بررسی‌ها به ازای بافل‌ها به طول $L_f = 0.3$ و ارتفاع از کف آنها به ترتیب $H_{f1} = 0.35$ و $H_{f2} = 0.65$ انجام می‌گیرد. شکل (۴) خطوط جریان و هم‌دما را در اعداد ریلی 10^3 الی 10^6 نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل‌ها دیده می‌شود برای اعداد ریلی کوچک ($Re = 10^3$) میزان جایابی آزاد کم می‌باشد. زیرا نیروی غوطه‌وری نمی‌تواند بر مقاومت ناشی از نیروهای لزج غلبه کند. لذا جریان جایابی در داخل محفظه ناچیز است. کانتورهای دما در محفظه تقریباً عمودی می‌باشند که بیانگر حاکم بودن انتقال حرارت هدایتی در محفظه است. بنابراین انتقال گرما بین سطوح فقط از طریق رسانایی در سیال انجام می‌شود. با افزایش عدد ریلی گرادیان عرضی دما زیاد شده و جایابی آزاد افزایش می‌یابد و گردابه‌های بزرگتری با جهت ساعتگرد و با چرخش سریعتر ایجاد شده و خطوط جریان گردابی بیشتر به ناحیه بین دو بافل نفوذ کرده و باعث افزایش انتقال حرارت روی دیواره گرم می‌شود.

با افزایش عدد ریلی خطوط جریان به صورت کشیده تر در آمده و مقادیر تابع جریان بیشینه همان‌طور که در شکل مشخص است افزایش می‌یابد که نشان از جریان قویتر سیال در داخل محفظه و افزایش جایابی آزاد دارد. برای اعداد ریلی نسبتاً بزرگ چون جایابی آزاد افزایش می‌یابد کانتورهای دما تقریباً افقی شده و این رفتار می‌تواند به افزایش انتقال حرارت از محفظه اشاره داشته باشد.

جستجو شده است. به عنوان نمونه در محفظه با دو بافل به طول $L_f = 1_f / L = 0.3$ و ارتفاع از کف آنها به ترتیب $H_{f1} = h_{f1} / L = 0.35$ و $H_{f2} = h_{f2} / L = 0.65$ برای نانو سیال آب و مس با درصد حجمی 0.03 و عدد ریلی 10^6 تغییرات نوسلت متوسط بر روی دیواره سرد و ماکزیمم تابع جریان در محفظه برای شبکه‌های مختلف در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین پروفیل سرعت عمودی در خط افقی مرکزی محفظه برای شبکه‌های مختلف در شکل (۲) نشان داده است. مشاهده می‌شود که از شبکه 100×100 بعد مقادیر نوسلت متوسط و ماکزیمم تابع جریان و پروفیل سرعت در خط مرکزی تقریباً ثابت می‌ماند. بنابراین شبکه یکنواخت با تعداد نقاط 100×100 به عنوان شبکه بهینه انتخاب شده است.

جدول ۲: تأثیر تعداد نقاط شبکه بر عدد نوسلت متوسط و ماکزیمم جریان

$ \Psi _{max}$	Nu_m	Grid
26.434	10.245	40×40
23.281	10.953	60×60
22.412	10.931	80×80
22.055	10.943	100×100
22.055	10.943	120×120

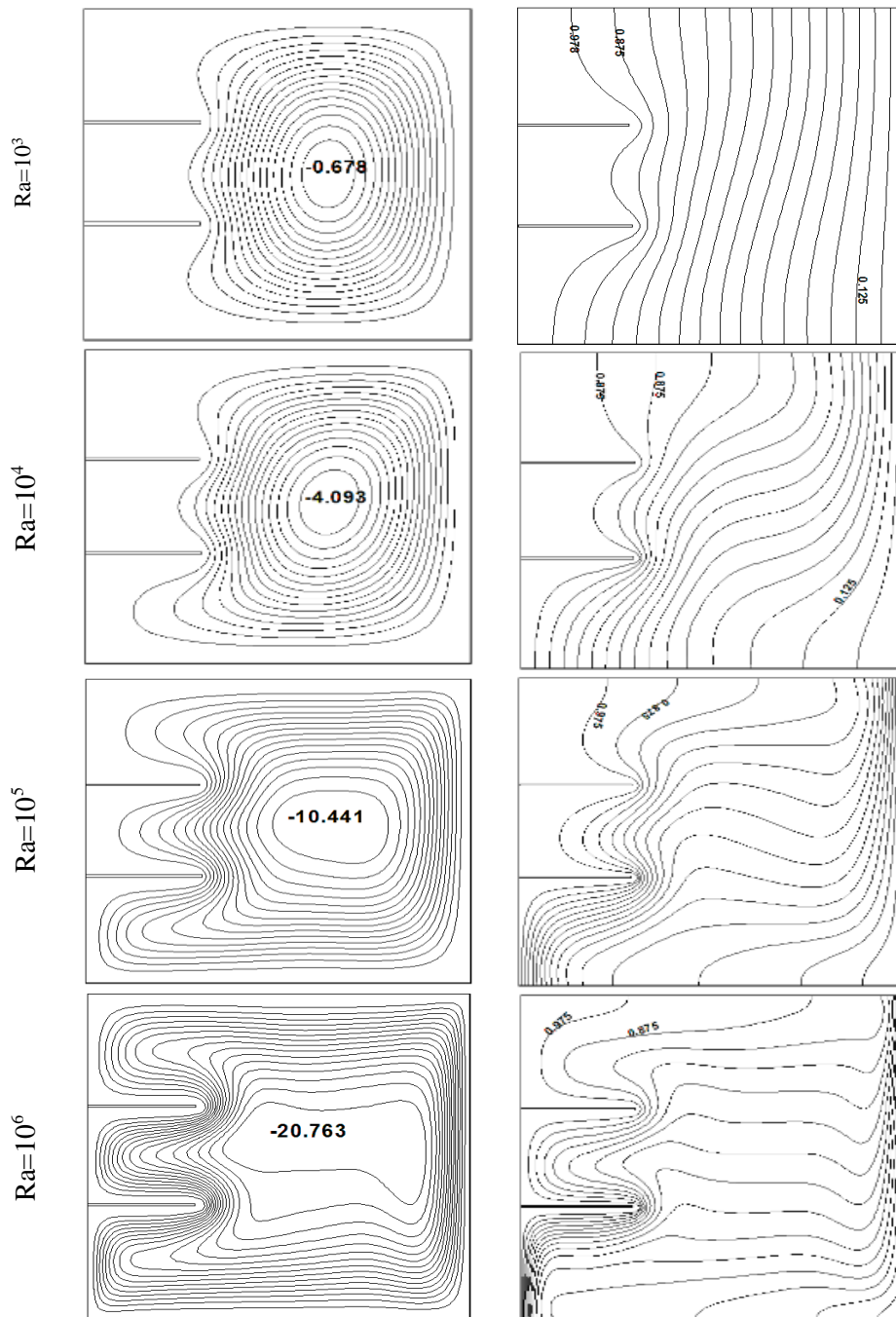


شکل ۲: تأثیر تعداد نقاط شبکه بر پروفیل سرعت عمودی در خط افقی مرکزی محفظه

برای اطمینان از عملکرد برنامه کامپیوتری، کد حاضر با شرایط مقاله [۶] که جایابی آزاد در یک محفظه پر شده از نانو سیال که قسمتی از دیواره چپ آن در دمای گرم قرار دارد، اجرا شد. نتایج حاصل از برنامه حاضر در شکل (۳) با نتایج مقاله فوق مقایسه شده است. همان‌طور که دیده

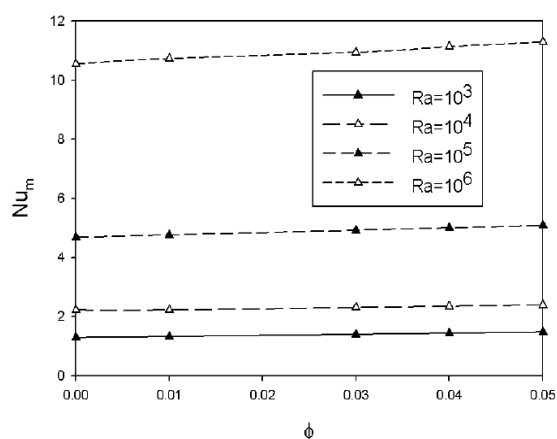
گرم است. زیرا بافل‌ها بخشی از سیال را از دیواره گرم دور می‌کنند به همین دلیل سطح تماس سیال با دیواره گرم کمتر از دیواره سرد می‌باشد همچنین مقداری حرارت از طرف دو بافل به سیال اضافه می‌شود که این باعث کاهش اختلاف دما بین سیال و دیواره گرم و افزایش اختلاف دما بین سیال و دیواره سرد می‌شود. این امر باعث بیشتر بودن انتقال حرارت از دیواره سرد نسبت به دیواره گرم در هر ریلی می‌شود.

شکل (۵) افزایش نوسلت متوسط روی دیواره گرم و سرد را با افزایش عدد ریلی نشان می‌دهد. همان‌طور که از خطوط همدمای شکل (۴) مشاهده می‌شود با افزایش عدد ریلی تراکم خطوط همدمای در نزدیکی دیواره‌های گرم و سرد افزایش پیدا کرده است. در نتیجه این امر افزایش انتقال حرارت روی دیواره گرم و سرد با افزایش عدد ریلی مشاهده می‌شود. همان‌طور که از شکل (۵) مشاهده می‌شود در هر عدد ریلی ثابت نوسلت متوسط دیواره سرد بیشتر از دیواره



شکل ۴: خطوط جریان (سمت چپ) و خطوط همدمای (سمت راست) در اعداد ریلی متفاوت و $\phi = 0.03$

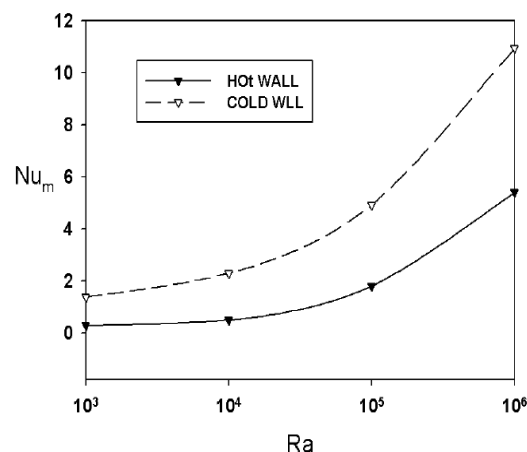
می‌دهد. با افزایش عدد ریلی عدد نوسلت موضعی روی هر دو دیواره گرم و سرد افزایش می‌یابد و جریان گردشی شدیدتر شده و جایابی افزایش یافته و انتقال حرارت و در نتیجه عدد نوسلت افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود مقدار نوسلت موضعی در ابتدای دیواره گرم در هر ریلی بیشترین مقدار که این مقدار برای هر ریلی متفاوت است و در انتهای دیواره در تمام ریلی‌ها یک مقدار ناچیز است. وقتی سیال سرد به گوشه پایینی سمت چپ می‌رسد اختلاف دما بین سیال و دیواره گرم زیاد است و این موجب نوسلت بالا در این نقطه می‌باشد که این نوسلت بالا در ریلی‌های مختلف متفاوت است. ولی همچنان که سیال حرکت کرده و به گوشه بالایی سمت چپ می‌رسد اختلاف دمای بین سیال و دیواره ناچیز می‌شود و عملاً انتقال حرارت ناچیزی مشاهده می‌شود. (شکل (۷)). یعنی وقتی سیال با دمای بالا به گوشه بالا سمت راست می‌رسد چون اختلاف دما بین سیال و دیواره سرد زیاد است بیشترین انتقال حرارت را داریم که در ریلی‌های مختلف متفاوت است. با حرکت سیال به گوشه پایین سمت راست اختلاف دمای سیال و دیواره سرد کاهش یافته و عملاً انتقال حرارت ناچیزی مشاهده می‌شود.



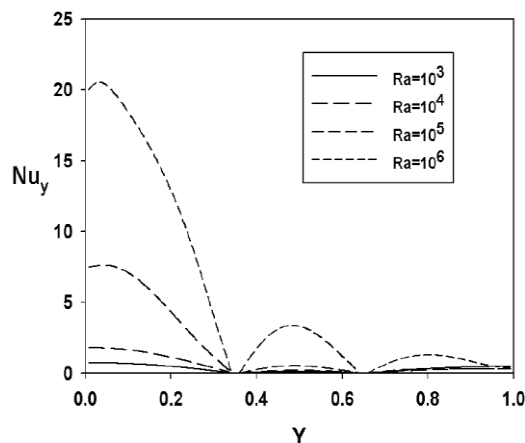
شکل ۸: نوسلت متوسط روی دیواره سرد بر حسب افزایش درصد حجمی نانو ذرات در اعداد ریلی متفاوت

۶- بررسی اثر درصد حجمی نانو ذرات

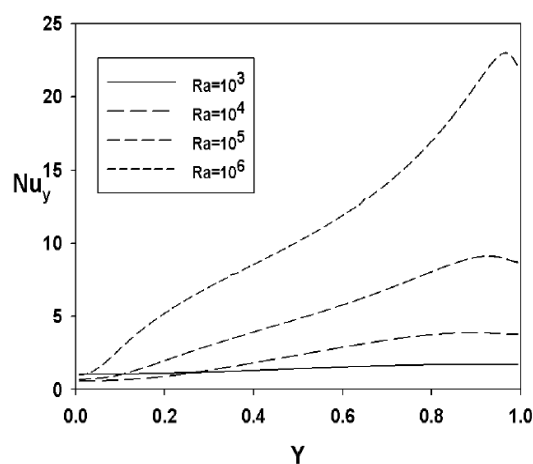
اکنون به بررسی اثر افزایش درصد حجمی نانو ذرات می‌پردازیم. بدین منظور با در نظر گرفتن مشخصات هندسی محفظه در قسمت قبل، برای اعداد ریلی در محدوده $10^3 \leq Ra \leq 10^6$ درصد حجمی نانو ذرات را افزایش می‌دهیم و به بررسی تأثیر آن بر انتقال حرارت می‌پردازیم.



شکل ۵: تأثیر عدد ریلی بر عدد نوسلت متوسط روی دیواره گرم و سرد در $\phi = 0.03$



شکل ۶: تأثیر عدد ریلی بر نوسلت موضعی روی دیواره گرم با دمای T_h



شکل ۷: تأثیر عدد ریلی بر نوسلت موضعی روی دیواره سرد با دمای T_c

شکل‌های (۶) و (۷) تغییرات نوسلت موضعی روی دیواره‌های سرد و گرم در اعداد ریلی مختلف را نشان

است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ϕ در تمام اعداد ریلی Δ نیز افزایش می‌یابد که نتیجه‌ای قابل انتظار است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود مقدار Δ در عدد ریلی 10^5 به ازای تمام مقادیر ϕ دارای مینیمم است. می‌توان گفت عدد ریلی 10^5 نقطه گذار از مکانیزم انتقال گرمای هدایتی به مکانیزم جابجایی است و چون در شرایط گذار اثر هدایت کم می‌شود و جابجایی هنوز قدرت زیادی ندارد تأثیر افزودن به سیال پایه به اندازه تأثیری که در سایر اعداد ریلی مشاهده می‌شود نخواهد بود. این در حالی است که حضور ذرات نانو در اعداد ریلی پایین که هدایت حاکم است تأثیر بیشتری بر نوسلت متوسط دارد.

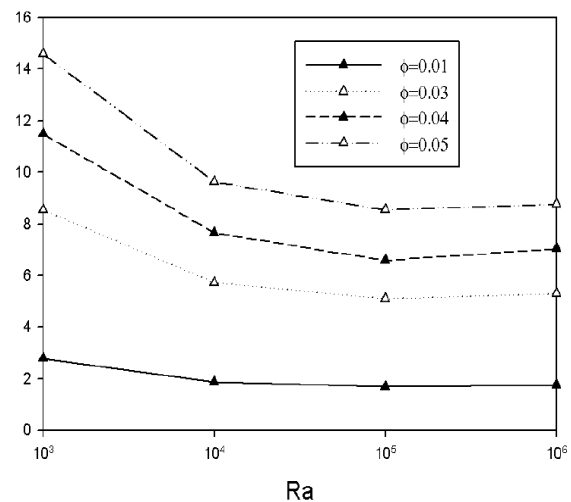
۷- بررسی اثر طول و موقعیت بافل‌ها

پس از مشاهده کردن اثر عدد ریلی و افزایش درصد حجمی نانو ذرات، اکنون به ازای $10^6 \leq Ra$ و $\phi = 0.05$ با تغییر طول و موقعیت بافل‌ها، تأثیر آن را بر پارامترهای انتقال حرارت و جریان بررسی می‌کنیم. از خطوط جریان در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که با افزایش طول بافل خطوط جریان گردابی کمتر به ناحیه بین دو بافل کشیده می‌شوند. همچنین تماس سیال با دیواره گرم کمتر می‌شود. در نتیجه انتقال حرارت با افزایش طول بافل روی دیواره گرم کاهش می‌یابد. به طور کلی افزایش طول مانع و فشرده شدن جریان منجر به سرعت چرخشی کمتر جریان شده و انتظار می‌رود، انتقال حرارت از دیواره گرم کاهش یابد. که این نتیجه را می‌توان در کاهش عدد نوسلت متوسط دیواره گرم مشاهده کرد. همچنین با افزایش طول بافل تراکم خطوط جریان در نزدیکی دیواره سرد بیشتر شده و انتقال حرارت از دیواره سرد بیشتر می‌شود. که نتیجه را می‌توان در افزایش عدد نوسلت متوسط دیواره سرد مشاهده کرد.

همان‌طور که از خطوط همدمما در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود با افزایش طول بافل تراکم خطوط حرارتی به خارج از ناحیه دو بافل کشیده می‌شود و این کاهش تراکم خطوط بین دو بافل نشانه کاهش انتقال حرارت از دیواره گرم است و بالعکس مشاهده می‌شود با افزایش طول بافل تراکم خطوط همدممای نزدیک دیواره سرد بیشتر شده و انتظار می‌رود انتقال حرارت از این دیواره بیشتر شود.

شکل های (۱۲) و (۱۳) نشان می‌دهند که در ریلی 10^6 با افزایش طول بافل همان‌طور که قبلاً گفته شد انتقال حرارت روی دیواره گرم کاهش و روی دیواره سرد افزایش می‌یابد.

شکل (۸) تغییرات نوسلت متوسط روی سرد را بر حسب افزایش درصد حجمی نانو ذره مس برای اعداد ریلی مختلف نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در یک عدد ریلی ثابت عدد نوسلت متوسط با افزایش درصد حجمی نانو ذره افزایش می‌یابد. چون هر چه درصد حجمی نانو ذره بیشتر باشد تأثیر نانو ذره بر ضریب هدایت حرارتی مشهودتر است و به تبع باعث افزایش بیشتر عدد نوسلت می‌گردد. همچنین با افزایش عدد ریلی گرادین عرضی دما زیاد شده و جابجایی آزاد افزایش می‌یابد و نوسلت متوسط و انتقال حرارت افزایش می‌یابد.



شکل ۹: مقایسه پارامتر درصد افزایش عدد نوسلت متوسط روی دیواره سرد مربوط به نانو سیال نسبت به سیال پایه

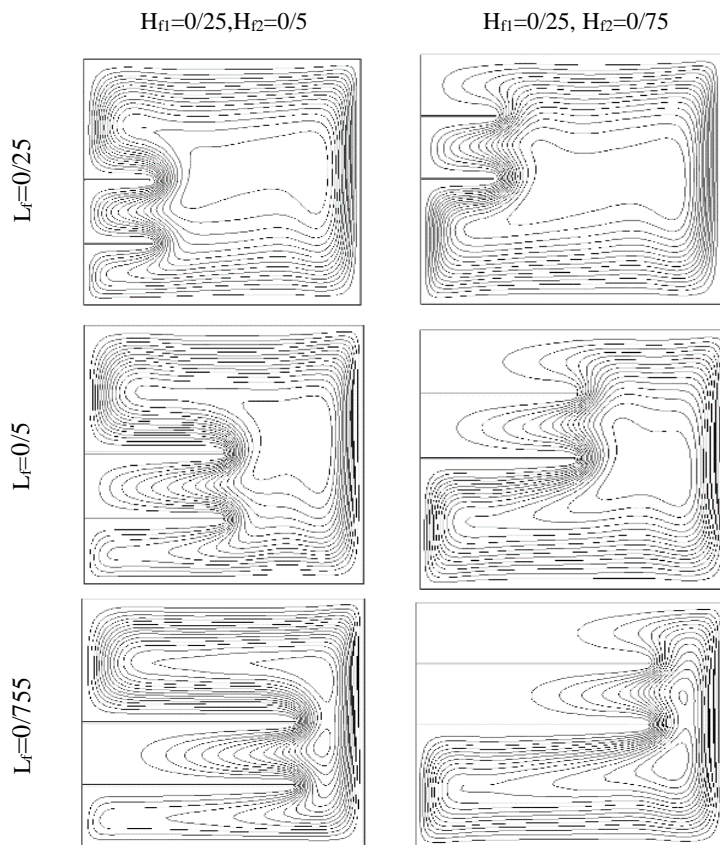
با استفاده از برازش منحنی های شکل (۸) می‌توان رابطه‌ای برای عدد نوسلت متوسط بر حسب عدد ریلی ($10^3 \leq Ra \leq 10^6$) و کسر حجمی نانو ذرات ($0 \leq \phi \leq 0.05$) به صورت زیر استخراج کرد:

$$Nu_m = f(\phi) Ra^{g(\phi)} \quad (15)$$

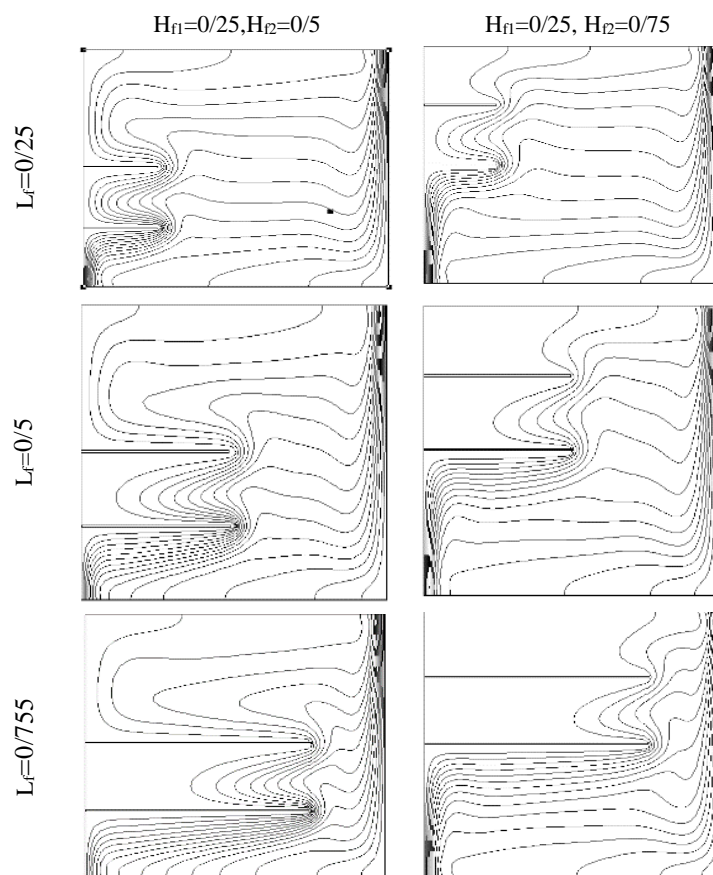
که در این رابطه:

$$\begin{aligned} f(\phi) &= 0.6292\phi + 0.1437 \\ g(\phi) &= 1.1759\phi^2 - 0.2638\phi + 0.3072 \end{aligned} \quad (16)$$

پارامتر دیگری که برای درک بهتر اثر اضافه شدن نانو ذرات به سیال پایه مورد بررسی قرار می‌گیرد درصد افزایش عدد نوسلت متوسط نانو سیال نسبت به سیال پایه () $\Delta = \frac{Nu_{nf} - Nu_f}{Nu_f} \times 100$ است. نتایج مربوط به درصد افزایش عدد نوسلت در شکل (۹) برای دیواره سرد ارائه شده



شکل ۱۰: خطوط جریان محفظه با بافل ها با طول و وضعیت های مختلف در $Ra = 10^6$ و $\phi = 0.05$



شکل ۱۱: خطوط همدم محفظه با بافل ها با طول و موقعیت های مختلف در $Ra = 10^6$ و $\phi = 0.05$

شده و در کل انتقال حرارت از دیواره گرم افزایش می‌یابد.

۸- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

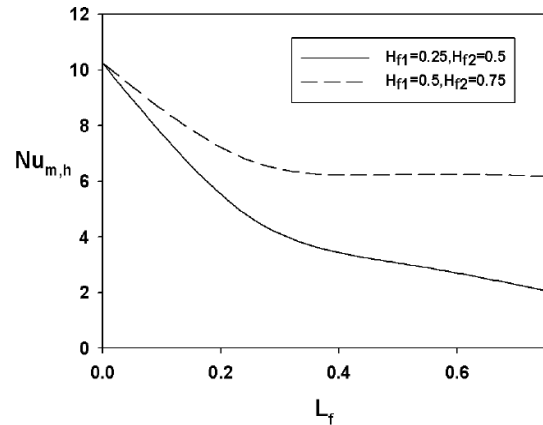
در این تحقیق انتقال حرارت جابجایی آزاد در محفظه مربعی با دو بافل، به روش عددی بررسی شد. از بررسی‌های انجام شده بر طول و موقعیت بافل‌ها و اثر افزودن درصدهای حجمی متفاوت مس در اعداد ریلی مختلف، نتایج زیر قابل جمع‌بندی است.

۱- در کلیه درصدهای حجمی نانو ذرات، افزایش عدد ریلی موجب افزایش نوسلت متوسط روی دیواره گرم و سرد می‌شود.

۲- با افزایش درصد حجمی نانو ذرات مس، نوسلت متوسط روی دیواره سرد و گرم افزایش می‌یابد و این درصد افزایش انتقال حرارت در اعداد ریلی بزرگتر کاهش می‌یابد.

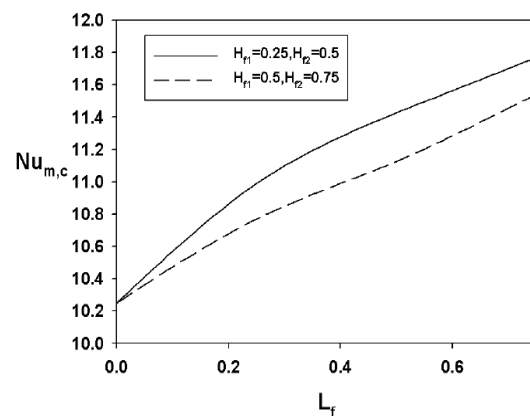
۳- افزایش طول بافل باعث افزایش نوسلت متوسط روی دیواره سرد و کاهش آن بر روی دیواره گرم می‌شود.

۴- با افزایش فاصله بافل‌ها از کف محفظه انتقال حرارت از دیواره گرم بیشتر و از دیواره سرد کمتر می‌شود.



شکل ۱۲: تغییرات نوسلت متوسط بر حسب افزایش طول

بافل‌ها روی دیواره گرم در $Ra = 10^6$



شکل ۱۳: تغییرات نوسلت متوسط بر حسب افزایش طول

بافل‌ها زوی دیواره سرد در $Ra = 10^6$

همچنین مشاهده می‌شود با افزایش فاصله بافل‌ها از کف محفظه انتقال حرارت از دیواره گرم بیشتر و از دیواره سرد کمتر می‌شود. که دلیل آن را با توجه به خطوط هم‌دما می‌توان توجیه کرد. از خطوط جریان در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله بافل‌ها از کف محفظه، طولی از دیواره گرم که در معرض سیال سرد قرار می‌گیرد افزایش می‌یابد. بنابراین قرارگیری سیال سرد در مجاورت دیواره گرم باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود و هر چه این طول بیشتر باشد انتقال حرارت بیشتر خواهد بود.

از طرفی در شکل‌های خطوط هم‌دما مشاهده می‌شود که تراکم خطوط هم‌دما بین دو بافل در موقعیت $(H_{f1}=0.5$ و $H_{f2}=0.75)$ کمتر می‌باشد که نشان دهنده کاهش انتقال حرارت نسبت به موقعیت $(H_{f1}=0.25$ و $H_{f2}=0.5)$ می‌باشد و انتظار می‌رود که انتقال حرارت از این دیواره بینابینی کاهش پیدا کند. ولی اثر افزایش فاصله بر این کاهش انتقال حرارت غالب

۹- مراجع

- [1] X. Shi, J.M. Khodadadi, "Laminar convection heat transfer in a differentially heated square cavity due to a thin fin on the hot wall", *J. Heat Transfer*, Vol. 125, No. 4, 2003, pp. 624–634.
- [2] P. Kandaswamy, L. Jinho, A.K. Abdul Hakeem, S. Saravanan, "Effect of baffle–cavity ratios on buoyancy convection in a cavity with mutually orthogonal heated baffles", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, Issues 7–8, 2008, pp. 1830–1837.
- [3] E. Bilgen, "Natural convection in cavities with a thin fin on the hot wall", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, Issue 17, 2005, pp. 3493–3505.
- [4] K. Khanafer, K. Vafai, M. Lightstone, "Buoyancy –driven heat transfer enhancement in a two -dimensional enclosure utilizing nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, 2003, pp. 3639–3653.
- [5] S.M. Aminossadati, B. Ghasemi, "Natural convection cooling of a localized heat source at the bottom of a nanofluid–filled enclosure" *European journal of mechanics B/fluids*, vol. 28, Issue 5, 2009, pp. 630-640.
- [6] H.F. Oztop, E. Abu-Nada, "Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with nanofluids", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 29, Issue 5, 2008, pp. 1326–1336.
- [7] B. Ghasemi, S.M. Aminossadati, "Brownian motion of nanoparticles in a triangular enclosure with natural convection" *International Journal of Thermal Sciences*, Vol.49, Issue 6, 2010, pp.931-940.
- [8] H.C. Brinkman, "The viscosity of concentrated suspensions and solution", *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 20, 1952, pp. 571–581.
- [9] J. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Oxford University Press, Cambridge, UK, 1904.