



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۵، صفحه ۲۵۷ تا ۲۶۶
Vol. 48, No. 3, Autumn 2016, pp. 257-266



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی مکانیک
AmirKabir Journal of Science & Research
Mechanical Engineering
ASJR-ME

انتقال حرارت جابجایی توأم نانوسیال در یک محفظه باز بافل دار

مجتبی مرادزاده دهکردی^۱، بهزاد قاسمی^{۲*}، افراسیاب رئیسی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد

(دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۱۷ پذیرش: ۱۳۹۳/۸/۵)

چکیده

در این مقاله جریان جابجایی همزمان آزاد و اجباری نانوسیال در یک محفظه باز مستطیلی به روش عددی بررسی شده است. نانو سیال با سرعت یکنواخت در دمای ثابت سرد وارد محفظه باز شده و با کف محفظه که تحت شار حرارتی ثابت قرار دارد، تبادل حرارت می کند. معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی به روش حجم کنترل جبری شده و به کمک الگوریتم سیمپل به صورت همزمان حل شده است. در این مطالعه با ثابت در نظر گرفتن عدد ریلی، اثر عدد ریچاردسون $0.01 \leq Ri \leq 10$ ، تغییر نسبت حجمی نانو ذرات $0 \leq \phi \leq 0.05$ ، فاصله بافل از ورودی $0.25 \leq L_b \leq 1.75$ و نوع نانو ذرات بررسی شده است. نتایج نشان می دهد که افزایش عدد ریچاردسون موجب کاهش و افزایش نسبت حجمی نانو ذرات موجب افزایش عدد نوسلت متوسط می شود. این در حالی است که افزایش فاصله بافل از ورودی محفظه، ابتدا باعث افزایش و سپس موجب کاهش نوسلت متوسط شده و می توان فاصله بهینه ای برای آن پیش بینی کرد.

کلمات کلیدی:

جابجایی توأم اجباری و آزاد، نانوسیال، محفظه باز، بافل.

Please cite this article using:

Moradzade, M., Ghasemi, B., and Raisi, A., 2016. "Nanofluid Mixed-Convection Heat Transfer in a Ventilated Cavity with a Baffle". *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 48(3), pp. 257-266.
URL: http://mej.aut.ac.ir/article_657.html

نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات: Email: behzadgh@yahoo.com



برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

۱- مقدمه

کاربرد وسیع انتقال حرارت در صنایع گوناگون سبب شده است که افزایش راندمان دستگاه‌های حرارتی در اولویت طراحان واحدهای صنعتی قرار گیرد. تلاش‌های زیاد محققان در سال‌های گذشته جهت افزایش انتقال حرارت، به ابداع روش‌های مختلف در این راستا منجر شده است. افزایش راندمان و بهبود عملکرد دستگاه‌های حرارتی از یکسو سبب صرفه‌جویی در انرژی شده و از طرف دیگر می‌تواند کوچک‌شدن ابعاد دستگاه‌ها و در نتیجه کاهش هزینه مواد و ساخت را به دنبال داشته باشد. سیالاتی نظیر آب و روغن‌های معدنی و گلايکول نقش زیادی در انتقال حرارت در فرایندهای صنعتی مانند فرایندهای تولید نیرو، فرایندهای شیمیایی، فرایندهای سرمایش و گرمایش و تجهیزات الکترونیکی بر عهده دارند. خواص ضعیف انتقال حرارت سیالات متداول نظیر سیالات مذکور اولین مانع جدی در فشرده‌سازی و افزایش کارایی مبدل‌های حرارتی است. امروزه انتقال حرارت در محفظه‌ها با توجه به کاربردهای فراوان مهندسی مانند خنک‌کاری اجزای الکترونیکی، مبدل‌های حرارتی فین‌دار و محفظه‌های دریافت‌کننده انرژی خورشیدی، نظر پژوهشگران را به خود معطوف نموده است.

انتقال حرارت از محفظه‌های باز تحت جریان جابجایی طبیعی با سیال خالص به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است که می‌توان به مطالعات انجام‌شده توسط بیل جن و اوزتوپ [۱] و کوکا [۲] اشاره کرد که نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که با افزایش عدد ریلی انتقال حرارت از محفظه افزایش می‌یابد. انتقال حرارت توام در محفظه‌های باز با سیال خالص توسط راجی و حسنائویی [۳] مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه اثر تغییرات عدد رینولدز بر روی انتقال حرارت از محفظه بررسی شده است. نتایج آنها نشان داد که در انتقال حرارت توام افزایش عدد رینولدز باعث افزایش عدد نوسلت متوسط می‌شود. هو و هسو [۴] در مقاله‌ای به بررسی انتقال حرارت جابجایی توام گذرا در یک محفظه بافل‌دار با ورودی و خروجی تحت شار حرارتی ثابت پرداختند. در این مطالعه به بررسی اثر اعداد رینولدز و ریچارسون بر انتقال حرارت گذرا در حالت‌های مختلف بافل هدایت‌کننده پرداخته شده است. نتایج آنها نشان داد که نرخ انتقال حرارت گذرا و مقدار قدرت ناحیه چرخشی به ارتفاع و مکان بافل بستگی دارد. جابجایی از یک منبع حرارتی در داخل یک محفظه افقی توسط بهلائویی [۵] بررسی شده است. این محفظه شامل تابش سطحی است که بر روی دیوار پایینی اعمال می‌شود. آنها از هوا به عنوان سیال برای خنک‌سازی محفظه استفاده نمودند. نتایج نشان می‌دهد که برای یک ضریب تشعشع ثابت، با افزایش عدد رینولدز در بازه $200 \leq Re \leq 5000$ انتقال حرارت به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند. همچنین در این مقاله نشان داده شده است که افزایش ضریب تشعشع به ازای عدد رینولدز ثابت باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود. امین الساداتی و قاسمی [۶] به بررسی عددی انتقال حرارت جابجایی توام از منابع حرارتی در یک محفظه باز پرداخته‌اند. منبع حرارتی در سه حالت

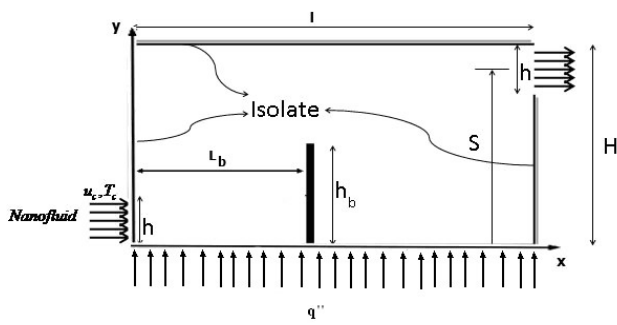
روی دیواره‌ها قرار گرفته‌اند. همچنین نسبت طول به عرض محفظه تغییر داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که اختلاف چشمگیری بین سه مدل قرارگیری منابع حرارتی وجود دارد. هنگامی که منابع روی دیواره طرف راست قرار گرفته‌اند، محفظه با نسبت طول به عرض ۲ بیشترین انتقال حرارت را در مقایسه با دو حالت دیگر دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در عدد ریچارسون ثابت در هر سه مدل قرارگیری منابع، با افزایش نسبت طول به عرض منبع، انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

در مقالات بررسی‌شده سیال عامل یک سیال خالص بود. با توجه به نوع کاربرد این سیستم‌ها به خصوص در صنایع الکترونیکی که در اکثر آنها اندازه‌ها بسیار کوچک است سیال عامل باید از مشخصه‌های حرارتی بالا برخوردار بوده و توانایی انتقال حرارت در سطوح کوچک را داشته باشد. لذا چون سیالات خالص عمدتاً ضریب هدایت حرارتی پایینی دارند، در سطوح کوچک بازده بالایی ندارند. اضافه کردن نانوذرات به سیال خالص می‌تواند پارامترهای حرارتی آنها را تا حد چشمگیری افزایش دهد؛ به چنین ترکیبی نانوسیال گفته می‌شود. مطالعات انجام‌شده در این زمینه نشان می‌دهد که بسته به اندازه و نوع نانوذره جامد، افزودن ۱ تا ۵ درصد حجمی نانوذرات به سیال پایه می‌تواند تا حدود ۴۰ درصد انتقال حرارت را افزایش دهد [۷،۸]. در ادامه به بررسی مطالعاتی می‌پردازیم که در آنها اثر افزودن ذرات نانو به سیال پایه بر انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته است.

اگران و روتزل [۹] پس از بررسی انتقال حرارت توسط نانوسیال به حرکت تصادفی ذرات پی برده و پخش حرارتی را عامل اساسی انتقال حرارت نانوسیال و دیواره عنوان کردند. در مطالعه دیگر داس و همکاران [۱۰] به این نتیجه رسیدند که ضریب هدایت حرارتی نانوسیال با افزایش دما افزایش می‌یابد. همچنین اعلام کردند که حرکت براونی ذرات نیز می‌تواند دلیلی برای افزایش انتقال حرارت توسط نانوسیال باشد. ساتراو همکاران [۱۱] به بررسی افزودن نانوذرات جامد به سیال پایه و اثر آن در افزایش انتقال حرارت جابجایی اجباری پرداخته‌اند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش نسبت حجمی نانوذرات انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

در بحث انتقال حرارت با نانوسیال، محمودی و همکاران [۱۲] به حل عددی جابجایی آزاد در یک محفظه باز با دو منبع حرارت نازک عمودی به وسیله نانو سیال پرداختند. جریان نانوسیال مس و آب از سمت راست محفظه با دما و فشار پایین وارد محفظه می‌شود در حالی که مابقی دیواره‌ها عایق هستند. در این مطالعه دو عامل مکان منبع حرارتی و عدد ریلی بر خطوط هم‌دما و جریان مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی آنها نشان داد که مکان منبع تأثیر زیادی بر انتقال حرارت محفظه دارد و عدد نوسلت تابعی افزایشی از عدد ریلی می‌باشد. همچنین فاصله دو منبع از یکدیگر باعث افزایش عدد نوسلت می‌شود.

شاهی و همکارانش [۱۳] به مطالعه عددی سرمایش توام با نانوسیال در یک محفظه مربعی با ورودی و خروجی پرداختند. کلیه دیواره‌های این محفظه عایق بوده و فقط قسمتی از دیواره پایینی تحت شار حرارتی



شکل ۱: شکل شماتیک محفظه باز بافل دار

۳- معادلات اساسی حاکم بر جریان نانوسیال

در این مطالعه فرض می‌شود جریان لایه مرزی آرام و پایدار است و اتلاف حرارتی لزجت وجود ندارد. تولید انرژی صفر در نظر گرفته شده و نانوسیال به عنوان یک محیط پیوسته با تعادل گرمایی بین سیال پایه و ذرات جامد در نظر گرفته می‌شود. معادلات بدون بعد حاکم برای جریان آرام دوبعدی در داخل محفظه، با فرض سیال نیوتنی غیر قابل تراکم و با استفاده از تقریب بوزینسک عبارتند از:

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

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \nu_f} \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (2)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \nu_f} \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} \frac{Ra}{Pr Re^2} \theta \quad (3)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \frac{1}{Re \cdot Pr} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (4)$$

در مراحل حل، عدد ریلی ثابت و برابر $Re=10^5$ و عدد پرانتل آب نیز ثابت و برابر $Pr=6.2$ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که معادله انرژی در بافل برای حالت دائم به شکل زیر می‌باشد.

$$\frac{\partial^2 \theta_b}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta_b}{\partial Y^2} = 0 \quad (5)$$

متغیرهای بی‌بعد استفاده شده در این معادلات عبارتند از:

$$V = \frac{v}{u_c}, U = \frac{u}{u_c}, Y = \frac{y}{H}, X = \frac{x}{H} \quad (6)$$

$$P = \frac{\bar{p}}{\rho u_c^2}, \theta = \frac{T - T_c}{q'' H / k_f}$$

قرار دارد. این مطالعه برای اعداد رینولدز $200 \leq Re \leq 5000$ و اعداد ریچاردسون $0 \leq Ri \leq 10$ و نسبت حجمی ذرات نانو $0 \leq \phi \leq 0.05$ انجام شده است. نتایج به صورت خطوط جریان، خطوط همدم، عدد نوسلت متوسط و دمای بالک متوسط ارائه شده است. همچنین تاثیر نسبت حجمی ذرات روی مشخصه‌های گرمایی و هیدرودینامیکی بررسی و بحث شده است. نتایج بیان می‌کنند که افزایش نسبت حجمی ذرات موجب افزایش عدد نوسلت متوسط روی سطح منبع حرارتی و کاهش دمای بالک متوسط خواهد شد. همچنین این مطالعه نشان می‌دهد که اثر نانوسیال بر خطوط جریان در اعداد ریچاردسون بالا مشهودتر است و ورتکس‌های چرخشی، ناحیه بیشتری از محفظه را در بر می‌گیرد.

همانگونه که از بررسی پژوهش‌های دیگران مشاهده می‌شود، به‌کارگیری نانوسیالات در انتقال حرارت جابجایی یک زمینه تحقیقاتی جدید است. در بین بررسی‌های انجام شده در این زمینه مسایل جابجایی توأم نانوسیال در محفظه‌های باز نیز به چشم می‌خورد. در اکثر این مطالعات از محفظه ساده برای پیش‌بینی رفتار نانوسیال استفاده شده است. این در حالی است که وجود مانعی مانند یک بافل در محفظه می‌تواند تاثیر بسزایی در میدان جریان و در نتیجه انتقال حرارت داشته باشد. این بافل می‌تواند محل مناسبی برای قرارگیری قطعات الکترونیکی در تجهیزات الکترونیکی باشد. در این راستا مطالعه حاضر جهت پیش‌بینی تاثیر افزایش نانو ذرات بر سرمایش یک محفظه باز دارای بافل به کمک جابجایی توأم آزاد و اجباری تعریف شده است. در این مطالعه به بررسی اثر پارامترهایی چون عدد ریچاردسون، نسبت حجمی و نوع نانوذرات و موقعیت بافل بر میدان جریان و دما و نرخ انتقال حرارت از محفظه پرداخته شده است.

۲- بیان مساله

مطابق شکل ۱ محفظه‌ای دوبعدی و باز در نظر گرفته می‌شود. جریان نانوسیال با چگالی ρ_{nf} و لزجت μ_{nf} به طور یکنواخت از ورودی با سرعت u_c و دمای ثابت T_c وارد محفظه می‌شود و از سمت راست محفظه خارج می‌شود. شتاب گرانشی g ، در جهت منفی y عمل می‌کند. کف محفظه تحت شار حرارتی یکنواخت q'' قرار دارد. بقیه دیواره‌های محفظه به‌خوبی عایق شده است. این محفظه دارای طول $l=2H$ می‌باشد. ورودی و خروجی ثابت و برابر $h=H/4$ و ارتفاع بافل از کف محفظه ثابت و برابر $h_b=H/2$ در نظر گرفته شده است. هدف این است که با مقایسه انتقال حرارت نانوسیال و سیال خالص، اثر پارامترهایی همچون اعداد رینولدز و ریچاردسون، نسبت حجمی و نوع نانوذرات و مکان بافل را بر انتقال حرارت بررسی شود.

در خصوص لزجت نانوسیال روابط مختلفی در مراجع ارائه شده است که رابطه بریکمن [۱۴] بیشتر از سایر روابط مورد توجه محققین قرار گرفته است:

$$\mu_{nf} = \mu_f / (1 - \phi)^{2.5} \quad (14)$$

فرمول‌های متعددی برای ضریب هدایت حرارتی نانوسیال ارائه شده است که در این مطالعه از فرمول ارائه شده توسط پاتل و همکاران [۱۵] استفاده شده است:

$$k_{nf} = k_f \left[1 + \frac{k_s A_s}{k_f A_f} + c k_s Pe \frac{A_s}{k_f A_f} \right] \quad (15)$$

در این رابطه k_s ضریب هدایت حرارتی برای نانوذرات و k_f ضریب هدایت حرارتی برای سیال پایه می‌باشد. این خواص به همراه دیگر خواص مورد نیاز این مطالعه در جدول ۱ آورده شده است. c یک ثابت تجربی بوده و برابر ۳۶۰۰۰ در نظر گرفته می‌شود [۱۱ و ۱۳]. در این رابطه نسبت A_s / A_f به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\frac{A_s}{A_f} = \frac{d_f \phi}{d_s (1 - \phi)} \quad (16)$$

قطر نانو ذرات جامد برابر $d_s = 100 \text{ nm}$ و سایز مولکولی آب برابر $d_f = 2^\circ \text{ A}$ در نظر گرفته شده است. همچنین در رابطه (۱۸)، عدد Pe عبارتست از:

$$Pe = \frac{u_s d_s}{\alpha_f} \quad (17)$$

در این رابطه u_s سرعت حرکت براونی نانوذرات می‌باشد که توسط رابطه زیر داده شده است.

$$u_s = \frac{2k_b T}{\pi \mu_f d_s^2} \quad (18)$$

که k_b ثابت بولتزمن و برابر $1.3807 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ است.

جدول ۱: خواص حرارتی آب و نانوذرات [۱۶]

$\beta \times 10^{-3}$	k	C_p	ρ	
۲۱	۰/۶۱۳	۴۱۷۹	۹۹۷/۱	آب
۱/۶۷	۴۰۱	۳۸۵	۸۹۳۳	مس
۱/۸۹	۴۲۹	۲۳۵	۱۰۵۰۰	نقره
۰/۸۵	۴۰	۷۶۵	۳۹۷۰	آلومینیوم
۰/۹	۸/۹۵	۸۶۸/۲	۴۵۲۰	تیتانیوم

در این روابط H طول مشخصه (عرض محفظه) و u_c سرعت مرجع (سرعت ورودی) است. سایر اعداد بدون بعد نیز عبارتند از:

$$Re = \frac{\rho_f u_c H}{\mu_f}, \quad Gr = \frac{g \beta_f (T_h - T_c) H^3}{\nu_f^2} \quad (19)$$

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2}, \quad Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f}, \quad Ra = Gr.Pr$$

۴- شرایط اولیه و شرایط مرزی

عدم لغزش روی دیواره‌ها $U, V=0$ ، سرعت ورودی یکنواخت $V=0$ و توسعه یافتگی سرعت در خروجی $\partial U / \partial X = 0$ و $V=0$ مجموعه شرایط مرزی مورد استفاده در حل معادلات حرکت هستند. شرط مرزی حرارتی نیز، با توجه به اینکه دیواره‌های بالا، چپ و راست عایق می‌باشد، به صورت $\partial \theta / \partial X = 0$ و $\partial \theta / \partial Y = 0$ ، دیواره پایین تحت شار حرارتی ثابت $\partial \theta / \partial X = 0$ و در خروجی نیز شرط توسعه یافتگی حرارتی یعنی $\frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{-k_f}{k_{nf}}$ در نظر گرفته شد [۴، ۵ و ۱۳].

میزان انتقال حرارت در قالب عدد نوسلت قابل بیان است. با توجه به مقادیر بدون بعد، نوسلت موضعی روی هر یک از سطوح تحت شار از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$Nu_x = \left(\frac{1}{\theta} \right)_{Y=0} \quad (20)$$

می‌توان با انتگرال گیری از رابطه فوق روی سطح تحت شار، نوسلت متوسط را به صورت زیر بیان کرد:

$$Nu_m = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_x dX \quad (21)$$

در این رابطه $L = l/h$ ، طول بی بعد صفحه گرم می‌باشد. بافل موجود در محفظه دارای ضریب هدایت حرارتی محدود $k_s = 400 k_f$ است.

۵- روابط مربوط به خواص نانوسیال

همانگونه که از معادلات حاکم بر مساله دیده می‌شود، برای حل معادلات نیاز به خواص ترموفیزیکی نانوسیال است. چگالی، ضریب انبساط حجمی، ظرفیت حرارتی و ضریب پخش حرارتی نانوسیال به کمک خواص سیال و نانوذرات از روابط زیر محاسبه می‌شود [۱۴].

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_f + \phi \rho_s \quad (22)$$

$$(\rho \beta)_{nf} = (1 - \phi) (\rho \beta)_f + \phi (\rho \beta)_s \quad (23)$$

$$(\rho c p)_{nf} = (1 - \phi) (\rho c p)_f + (\rho c p)_s \quad (24)$$

$$\alpha_{nf} = k_{nf} / (\rho c p)_{nf} \quad (25)$$

۶- روش عددی

معادلات (۱ - ۵) همراه با شرایط مرزی گفته شده به روش اختلاف محدود مبتنی بر حجم کنترل جبری شده اند. میدان حل با روش شبکه جابه جا شده شبکه بندی شده است. در روش شبکه ی جابه جا شده علاوه بر راحتی محاسبه دبی ها روی وجوه حجم کنترل، به علت معلوم بودن سرعت روی سطوح، مقادیر فشار در نقاط اصلی شبکه مشخص می شود. جهت حل هم زمان معادلات جبری شده از الگوریتم سیمپل که جزئیات کامل آن در مرجع [۱۷] آمده است، استفاده شده است. همچنین از معیار همگرایی زیر استفاده شده است:

$$\sum_j \sum_i \left| \left(\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\phi^{n+1}} \right)_{i,j} \right|^2 \leq 10^{-7} \quad (19)$$

که n تعداد تکرار و ϕ متغیر عمومی (U, V, θ) را نشان می دهند.

۷- نتایج

قبل از بررسی نتایج در این هندسه لازم است ابتدا شبکه بندی مناسبی جهت حل انتخاب شود. در انتخاب شبکه لزومی به برابری فاصله نقاط شبکه نیست. در این مطالعه نیز با توجه به هندسه مورد نظر از شبکه غیر یکنواخت استفاده شده است. در این شبکه بندی به خاطر وجود گردان های شدیدتر در اطراف بافل و سطح پایینی محفظه، این منطقه به صورت ریزتر شبکه بندی شده است. برای انتخاب شبکه مناسب، بررسی روی اثر تعداد نقاط شبکه بر روی پارامترهای مهم آب خالص و نانوسیال آب و مس انجام شد. نمونه ای از این بررسی ها برای $\phi=0.03$ و $\phi=0.0$ در $L_b=H$ و $R_i=0.1$ در جدول ۲ آورده شده است. در این جدول مقادیر نوسلت متوسط و بیشینه تابع جریان برای شبکه های مختلف آورده شده است. بدیهی است با ریزتر شدن شبکه جواب ها دقیق تر می شوند. از نتایج حاصل مشاهده می شود که از شبکه بندی 121×61 به بعد اعداد نوسلت و تابع جریان تغییر چشمگیری نداشته است. بنابراین از این شبکه بندی تا پایان محاسبات استفاده شده است.

جدول ۲: اثر تعداد نقاط شبکه بر مقادیر ماکزیمم تابع جریان و

نوسلت متوسط سطوح گرم $R_i=0.1$

Grid Size	$\phi=0.1$		$\phi=0.3$	
	Nu_m	ψ_{max}	Nu_m	ψ_{max}
41×21	4/52	0/322	5/85	0/324
61×31	4/91	0/320	6/23	0/321
81×41	5/28	0/318	6/54	0/319
101×51	5/48	0/315	6/78	0/317
121×61	5/56	0/313	6/82	0/315
141×71	5/58	0/312	6/83	0/314
161×81	5/60	0/312	6/83	0/314

۷-۱- کنترل صحت کد کامپیوتری

برای اجرای الگوریتم مورد نظر برنامه ای کامپیوتری به زبان فرترن نوشته شد. برای بررسی صحت کد کامپیوتری نوشته شده، نتایج حاصل از کار حاضر با نتایج حاصل از مطالعه انتقال حرارت جابجایی آزاد در محفظه مربعی بسته حاوی هوا توسط دی ول دیویس [۱۸] مقایسه شده است. دیواره های بالایی و پایینی محفظه عایق و دیواره های سمت چپ و راست در دماهای سرد و گرم قرار دارد. نتایج حاصل از این اعتبارسنجی در جدول ۳ آمده است. این مقایسه نشان دهنده اختلاف ناچیز برنامه حاضر و مرجع فوق است.

جدول ۳: اعتبارسنجی با مطالعه دی ول دیویس [۱۸]

Ra	Nu_m		
	Peresent work	De vahl davis [18]	Error (%)
۱۰ ^۳	۱/۱۱۷	۱/۱۱۸	۰/۰۸
۱۰ ^۴	۲/۲۳۴	۲/۲۳۸	۰/۱
۱۰ ^۵	۴/۴۹۸	۴/۵۰۹	۰/۲
۱۰ ^۶	۸/۸۰۲	۸/۸۱۷	۰/۱

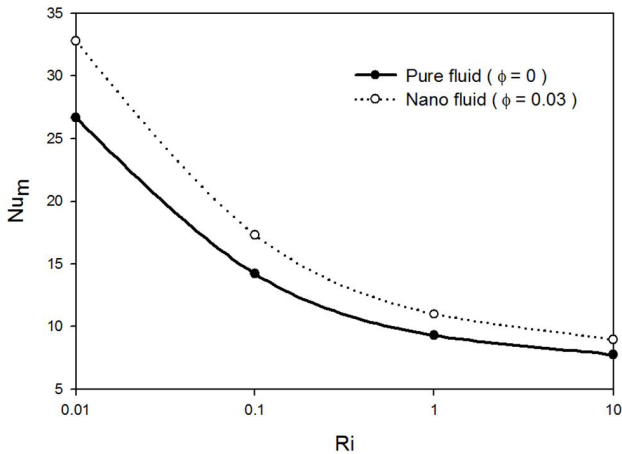
در اعتبارسنجی دیگر انتقال حرارت از دو صفحه موازی گرم بوسیله نانوسیال آب و مس که توسط ساتترا و همکاران [۱۱] انجام شده، مقایسه شده است. اعداد نوسلت متوسط این مقایسه به ازای اعداد رینولدز مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. اختلاف کمتر از ۱/۵ درصد نتایج، نشان دهنده صحت کد کامپیوتری حاضر است.

جدول ۴: مقایسه عدد نوسلت حاصل از کد کامپیوتری در این تحقیق با مطالعه ساتترا و همکاران [۱۱]

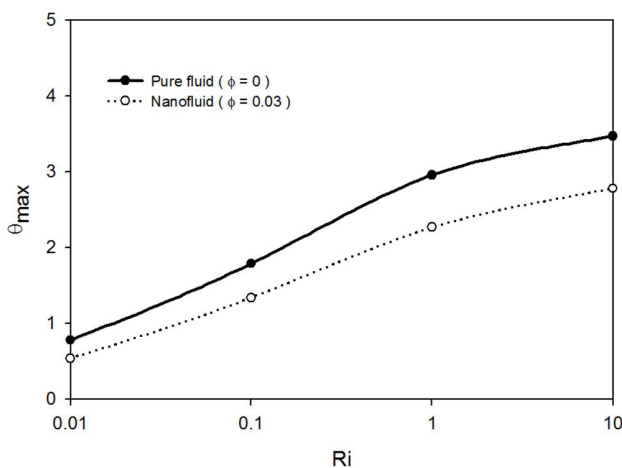
Re	Nu_m		
	Peresent work	Santra et al. [11]	Error (%)
Re= ۱۰۰	۱۸/۸۱	۱۹/۰۲	۱/۱
Re= ۵۰۰	۳۰/۵۶	۳۱/۱۳	۱/۳۸
Re= ۱۰۰۰	۳۱/۲۸	۳۱/۷۵	۱/۴۸

۷-۲- بررسی اثر تغییر عدد ریچاردسون

در ابتدا برای نانوسیال آب و مس و بافل در موقعیت $L_b=H$ به بررسی اثر تغییر عدد ریچاردسون بر میدان جریان و دما پرداخته شده است. در شکل ۲ خطوط جریان و خطوط همدمای به ازای ۴ مقدار متفاوت Ri برای آب خالص و نانوسیال ($\phi=0.03$) آورده شده است. همانطور که از خطوط جریان مشاهده می شود با افزایش عدد ریچاردسون، به دلیل کاهش سرعت ورودی جریان و تنش برشی در محفظه از قدرت گردابه های ایجاد شده کاسته می شود. همچنین از خطوط همدمای مشاهده می شود که با افزایش عدد ریچاردسون خطوط به دیواره گرم نزدیک



شکل ۳: تغییرات نوسلت متوسط با افزایش عدد ریچاردسون برای سیال خالص و نانوسیال آب و مس در $L_b=H$



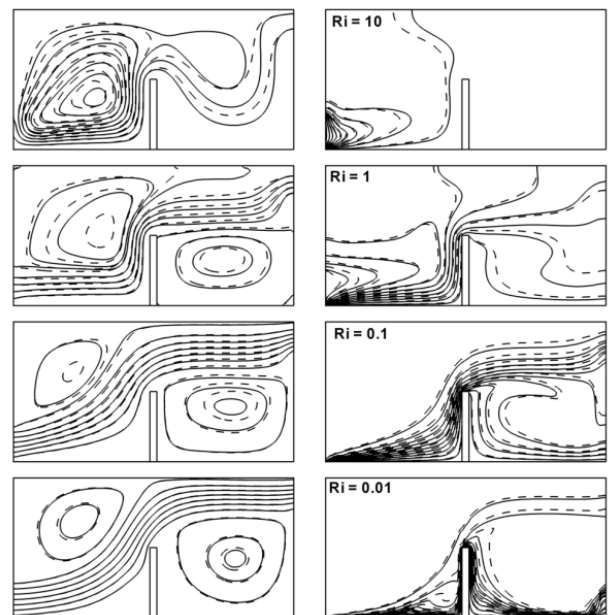
شکل ۴: تغییرات دمای بیشینه با افزایش عدد ریچاردسون برای سیال خالص و نانوسیال آب و مس در $L_b=H$

۷-۳- اثر تغییر مکان بافل

در ادامه برای نانوسیال آب و مس اثر تغییر مکان بافل از ورودی جریان در محدوده $0.25 \leq L_b \leq 1.75$ بررسی می‌شود. در شکل ۵ خطوط جریان و همدمای برای نانوسیال آب و مس ($\phi=0.03$) در عدد ریچاردسون، $Ri=0.1$ ، نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش فاصله بافل از دریچه ورودی، تماس سطح پایینی تحت شار حرارتی ثابت سمت چپ بافل با جریان ورودی افزایش یافته و موجب تشکیل گردابه‌ای در ناحیه بالای این قسمت شده است که نشان‌دهنده افزایش انتقال حرارت از این سطح می‌باشد. همچنین با افزایش پارامتر L_b گردابه پشت بافل کوچک و کوچکتر شده تا در فضای بسیار کوچکی محدود می‌شود.

اثر موقعیت بافل در نوسلت متوسط در اعداد ریچاردسون مختلف در شکل ۶ آورده شده است. با توجه به این شکل با افزایش پارامتر L_b انتقال حرارت از محفظه ابتدا افزایش سپس کاهش می‌یابد. در اعداد ریچاردسون کمتر که سرعت جریان خارجی بیشتر است این تغییرات چشمگیرتر است.

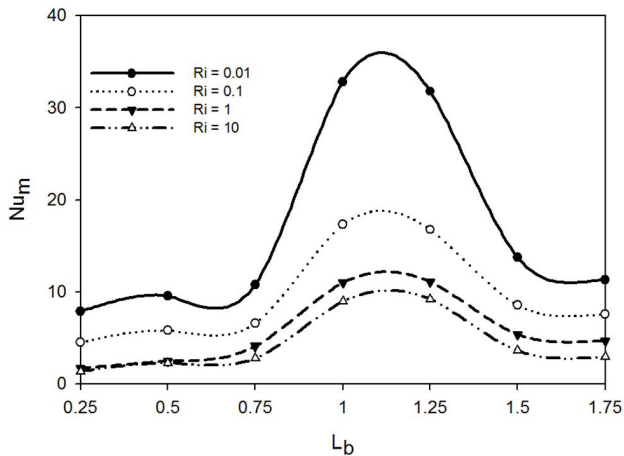
شده‌اند. بنابراین انتظار می‌رود در حالت کلی با افزایش عدد Ri انتقال حرارت کاهش یابد. در اعداد ریچاردسون بالا سرعت جریان تاثیر چندانی بر انتقال حرارت نداشته و حرکت سیال ناشی از نیروی غوطه‌وری اثر بیشتری بر انتقال حرارت دارد. با مقایسه خطوط جریان نانوسیال و سیال اصلی مشاهده می‌شود که تفاوت چندانی بین خطوط وجود ندارد و فقط نانوسیال گردابه‌های بزرگتری را پیش‌بینی کرده است. که دلیل آن افزایش لزجت نانوسیال می‌باشد. همچنین از مقایسه خطوط همدمای سیال خالص و نانوسیال مشاهده می‌شود که خطوط نانوسیال رشد بیشتری داشته‌اند، به عبارتی پخش حرارت در نانوسیال بهتر صورت گرفته است.



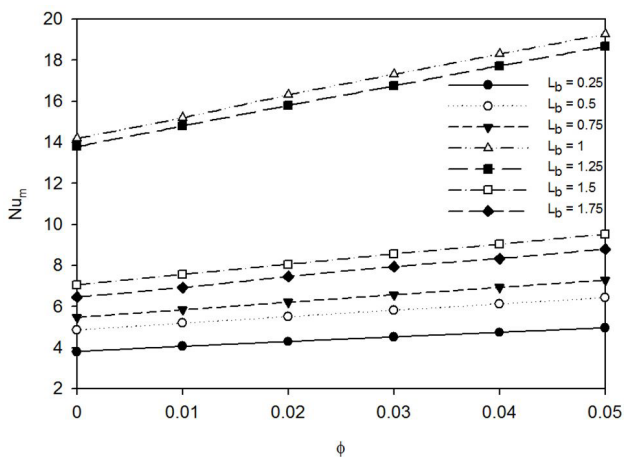
شکل ۵: خطوط جریان (سمت چپ) و همدمای (سمت راست) سیال خالص (خطوط کاملاً پر) و نانو سیال آب و مس ($\phi=0.03$) (خط چین) در $L_b=H$ برای مقادیر مختلف Ri

در شکل ۳ تغییرات نوسلت متوسط با عدد ریچاردسون برای سیال خالص و نانوسیال ($\phi=0.03$) رسم شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش عدد Ri به دلیل کاهش سرعت جریان خارجی نرخ انتقال حرارت محفظه کاهش می‌یابد. در این شکل همچنین افزایش انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال خالص، به دلیل بیشتر بودن ضریب هدایت، قابل توجه است.

در شکل ۴ نمودار تغییرات بیشینه دمای بی‌بعد سطح گرم در اعداد ریچاردسون مختلف در شرایط فوق آورده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش عدد ریچاردسون دمای سطح افزایش می‌یابد. در حقیقت چون عدد ریلی ثابت در نظر گرفته شده است، افزایش ریچاردسون بیانگر کاهش سرعت جریان خارجی بوده و افزایش دمای سطح را به همراه دارد. همچنین دیده می‌شود که استفاده از نانوسیال باعث کاهش دمای بیشینه شده است. این رفتار نیز با توجه به انتقال حرارت بهتر نانوسیال نسبت به سیال خالص قابل توجیه است.



شکل ۶: تغییرات نوسلت متوسط با افزایش فاصله بافل از ورودی برای نانوسیال آب و مس با $\phi=0.03$

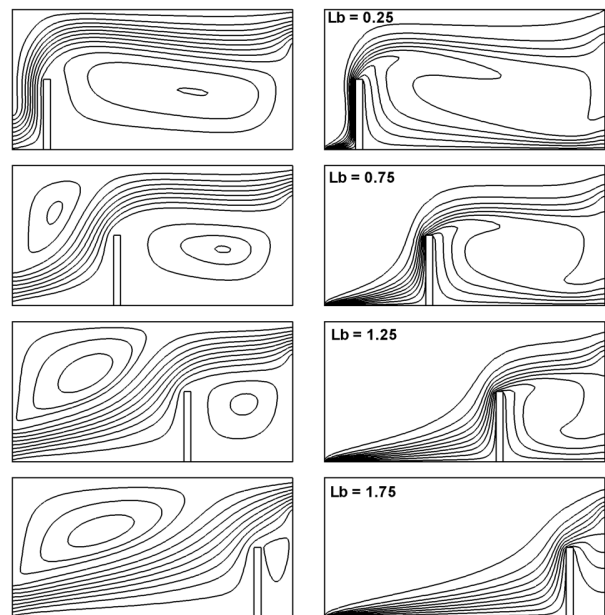


شکل ۷: تغییرات نوسلت متوسط با افزایش نسبت حجمی نانوذرات در مقادیر مختلف L_b برای نانوسیال آب و مس با $\phi=0.03$

حرارت می‌شود. این افزایش در مورد نانوذرات مختلف متفاوت است. چرا که ضریب هدایت حرارتی نانوذرات مختلف با یکدیگر متفاوت است، مثلاً نقره ضریب حرارتی بسیار بزرگتری نسبت به TiO_2 دارد، بنابراین انتظار می‌رود که انتقال حرارتی بهتری را ایجاد کند. در شکل ۸ نمودار تغییرات عدد نوسلت متوسط در $Ri=0.1$ و $L_b=H$ برای چهار نانوذره Ag ، Cu ، Al_2O_3 و TiO_2 در نسبت حجمی $0 \leq \phi \leq 0.05$ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت حجمی نانوذره به دلیل افزایش ضریب هدایت حرارتی نوسلت متوسط افزایش می‌یابد. همچنین شیب نمودار نوسلت بر حسب افزایش ϕ مربوط به دو نانوذره Ag و Cu بسیار بیشتر از TiO_2 و Al_2O_3 می‌باشد که نشان‌دهنده انتقال حرارت بهتر این دو نانوسیال به دلیل ضریب هدایت بالاتر آنها است.

جهت بررسی کامل‌تر اثر افزودن نانوذرات مختلف به آب جداول ۵ الی ۷ ارائه شده است. در این جداول مقادیر نوسلت متوسط به همراه درصد افزایش نوسلت متوسط نانوسیال نسبت به سیال خالص برای سه مقدار مختلف Ri دیده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد با افزودن ۵ درصد

علت این امر این است که همان‌طور که در خطوط جریان شکل ۵ نیز دیده می‌شود، موقعیت بافل تأثیر فراوانی در هدایت حرکت جریان خارجی دارد. در اعداد ریچاردسون بالاتر که حرکت‌های جابجایی آزاد بر مکانیزم انتقال حرارت حاکم‌اند، اثر بافل کمتر است. در هر حال منحنی‌های شکل ۶ نشانگر وجود وضعیت بهینه موقعیت بافل برای کلیه اعداد ریچاردسون در حدود $L_b=1.1$ است. در حقیقت با دور شدن بافل از ورودی تماس نانوسیال خارجی، در نتیجه تبادل حرارت با ناحیه سمت چپ بافل زیاد و با سمت راست آن کم می‌شود، به همین دلیل حالت بهینه‌ای برای بافل حاصل می‌شود.



شکل ۸: خطوط جریان (سمت چپ) و همدمای (سمت راست) نانوسیال آب و مس با $\phi=0.03$ برای مقادیر مختلف L_b در $Ri=0.1$

جهت بررسی اثر موقعیت بافل در درصدهای حجمی مختلف نانوذرات شکل ۷ در نظر گرفته می‌شود. این شکل تغییرات نوسلت متوسط را بر حسب درصد حجمی نانوذرات در فواصل مختلف بافل نشان می‌دهد. در اینجا نیز دیده می‌شود که برای بافل در فواصل ۱ و $1/25$ بیشترین مقادیر نوسلت متوسط در ϕ های مختلف رخ می‌دهد.

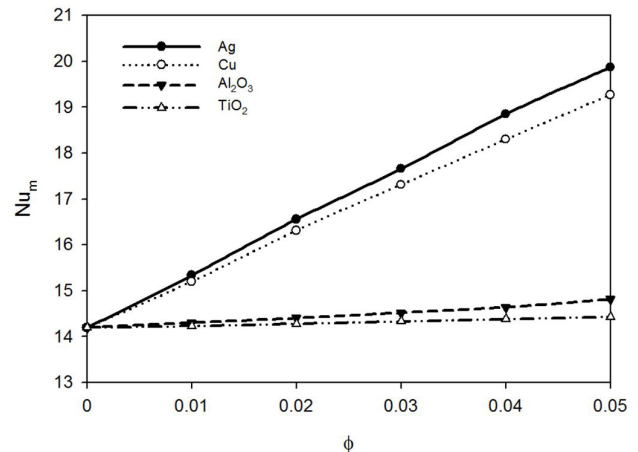
۷-۴- اثر نسبت حجمی و جنس نانوذرات

در این قسمت اثر نسبت حجمی و نوع نانوذرات در اعداد Ri مختلف بر نرخ انتقال حرارت بررسی شده است. افزودن نانوذرات اعم از فلزی، اکسیدهای فلزی یا نانولوله‌های کربنی به یک سیال نظیر آب فقط هدایت حرارتی آن را تحت تأثیر قرار نداده بلکه سایر خواص فیزیکی نظیر لزجت و ظرفیت حرارتی سیال نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. مجموعه تغییرات ایجادشده در خواص ترموفیزیکی سیال سبب می‌شود تا علاوه بر افزایش هدایت حرارتی در انتقال حرارت جابجایی نیز شاهد افزایش چشمگیر ضریب انتقال حرارت باشیم. در حالت کلی افزایش ϕ موجب افزایش انتقال

با بررسی خطوط جریان نانوسیال و سیال پایه مشخص شد که نانوسیال گردابه‌های بزرگتری در محفظه ایجاد می‌کند که موجب افزایش انتقال حرارت از سطح پشت بافل می‌شود. همچنین با مقایسه خطوط هم‌دما مشاهده می‌شود که استفاده از نانوسیال موجب کاهش گرادیان دما شده ولی افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال این کاهش گرادیان را جبران کرده و در کل موجب افزایش انتقال حرارت می‌شود. افزایش عدد ریچاردسون، که در اثر کاهش سرعت سیال خارجی رخ می‌دهد، باعث کاهش نوسلت متوسط و افزایش بیشینه دمای سطح گرم می‌شود.

استفاده از نانوسیال به جای سیال خالص علاوه بر افزایش انتقال حرارت باعث کاهش بیشینه دمای سطح گرم است. با افزایش فاصله بافل از دریچه ورودی به دلیل تماس بیشتر نانوسیال ورودی با سطح تحت شار حرارتی ابتدا انتقال حرارت افزایش می‌یابد. سپس به دلیل کوچک شدن گردابه پشت بافل و کاهش تماس جریان ورودی با سطح پشت بافل انتقال حرارت کاهش می‌ابد. بنابراین برای بافل یک موقعیت بهینه قابل پیش‌بینی است.

افزایش ϕ موجب افزایش انتقال حرارت می‌شود و این افزایش در ریچاردسون‌های پایین، به دلیل حرکت سریع توده سیال و افزایش گرادیان دما در اطراف بافل، بیشتر است. ولی در ریچاردسون‌های بالا چون سرعت حرکت سیال پایین است، فرصت کافی برای تبادل حرارت وجود دارد و بیشتر پخش حرارت در اطراف بافل صورت می‌گیرد، به طوری که افزایش نسبت حجمی نانوذرات تاثیر کمتری از حالت ریچاردسون‌های پایین دارد. نانوسیال حاوی نانوذرات مس و نقره انتقال حرارت بهتری را نسبت به نانوسیالات حاوی نانوذرات اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم پیش‌بینی می‌کنند که دلیل آن بالاتر بودن ضریب هدایت حرارتی این دو نانوذره می‌باشد.



شکل ۸: تغییرات عدد نوسلت متوسط محفظه بر حسب افزایش نسبت حجمی نانوذره برای نانو مواد مختلف در $Ri=0.1$

نانوذره مس و نقره به سیال پایه بدون در نظر گرفتن سرعت جریان ورودی انتقال حرارت حدود ۳۰ الی ۴۰ درصد و با افزودن ۵ درصد نانوذرات اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم به سیال پایه بدون در نظر گرفتن سرعت جریان ورودی انتقال حرارت فقط حدود ۰/۵ الی ۵ درصد افزایش می‌یابد.

۸- نتیجه‌گیری

در بررسی حاضر جریان جابجایی هم‌زمان آزاد و اجباری آرام نانوسیال در محفظه باز همراه با بافل به روش عددی تحلیل شد. معادلات مومنوم و انرژی حاکم به روش اختلاف محدود مبتنی بر حجم کنترل جبری شدند و توسط الگوریتم سیمپل به طور هم‌زمان حل شدند. اثر پارامترهای حاکم در جریان جابجایی توأم بر میزان انتقال حرارت بررسی شد. به طور کلی نتایج به دست آمده را می‌توان به صورت زیر جمع‌بندی کرد.

جدول ۵: میزان افزایش نسبی عدد نوسلت متوسط بر حسب افزایش درصد حجمی نانوذرات مختلف در $Ri=0.1$

$Ri=0.1$		ϕ					
		۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۵
Ag	Nu_m	۱۴/۲۰	۱۵/۳۴	۱۶/۵۶	۱۷/۶۶	۱۸/۸۵	۱۹/۸۷
	درصد ازدیاد نسبی	۰	۸٪	۱۶/۶٪	۲۴/۳٪	۳۲/۷٪	۳۹/۹٪
Cu	Nu_m	۱۴/۲۰	۱۵/۲	۱۶/۳۱	۱۷/۳۱	۱۸/۳	۱۹/۲۷
	درصد ازدیاد نسبی	۰	۷٪	۱۴/۸٪	۲۱/۹٪	۲۸/۸٪	۳۵/۷٪
Al_2O_3	Nu_m	۱۴/۲۰	۱۴/۳	۱۴/۴۱	۱۴/۵۲	۱۴/۶۴	۱۴/۸۱
	درصد ازدیاد نسبی	۰	۰/۷٪	۱/۴٪	۲/۱٪	۳٪	۴/۲٪
TiO_2	Nu_m	۱۴/۲۰	۱۴/۲۳	۱۴/۲۸	۱۴/۳۴	۱۴/۳۹	۱۴/۴۵
	درصد ازدیاد نسبی	۰	۰/۰۶٪	۰/۵٪	۰/۹٪	۱/۳٪	۱/۷٪

جدول ۶: میزان افزایش نسبی عدد نوسلت متوسط بر حسب افزایش درصد حجمی نانوذرات مختلف در $Ri=1$

$Ri=1$		ϕ					
		۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۵
Ag	Nu_m	۸/۲۹	۹/۱۹	۱۰/۷۳	۱۱/۳۱	۱۱/۸	۱۲/۳۸
	درصد ازدیاد نسبی	۰	۱۰٪	۲۹/۴٪	۳۶/۴٪	۴۲/۳٪	۴۹/۳٪
Cu	Nu_m	۸/۲۹	۹/۱	۱۰/۴۴	۱۱	۱۱/۵۴	۱۲/۰۹
	درصد ازدیاد نسبی	۰	۹/۷٪	۲۵/۹٪	۳۲/۶٪	۳۹/۲٪	۴۵/۸٪
Al_2O_3	Nu_m	۸/۲۹	۸/۳۳	۸/۳۷	۸/۴	۸/۴۳	۸/۴۷
	درصد ازدیاد نسبی	۰	۰/۴٪	۰/۹٪	۱/۳٪	۱/۶٪	۲/۱٪
TiO_2	Nu_m	۸/۲۹	۸/۲۹	۸/۳	۸/۳۰۴	۸/۳۱۱	۸/۳۱۹
	درصد ازدیاد نسبی	۰	۰	۰/۰۴٪	۰/۱٪	۱/۴٪	۲٪

جدول ۷: میزان افزایش نسبی عدد نوسلت متوسط بر حسب افزایش درصد حجمی نانوذرات مختلف در $Ri=10$

$Ri=1$		ϕ					
		۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۵
Ag	Nu_m	۷/۷۶	۸/۱۶	۸/۸۱	۹/۳۴	۹/۶۷	۱۰/۰۳
	درصد ازدیاد نسبی	۰	۲/۸٪	۱۳/۵٪	۲۰/۳٪	۲۴/۶٪	۲۹/۲٪
Cu	Nu_m	۷/۷۶	۷/۹۸	۸/۵۷	۸/۹۵	۹/۳۱	۹/۶۶
	درصد ازدیاد نسبی	۰	۲/۴٪	۱۰/۴٪	۱۵/۳٪	۱۹/۹٪	۲۴/۴٪
Al_2O_3	Nu_m	۷/۷۶	۷/۷۶	۷/۷۹	۷/۸۴	۷/۹	۷/۹۸
	درصد ازدیاد نسبی	۰	۰	۰/۳٪	۱٪	۱/۸٪	۲/۸٪
TiO_2	Nu_m	۷/۷۶	۷/۷۶	۷/۷۶	۷/۷۶۶	۷/۷۷۱	۷/۷۷۸
	درصد ازدیاد نسبی	۰	۰	۰	۰/۰۷٪	۰/۱٪	۰/۲٪

۹- نمادها

U	سرعت بی بعد در جهت x ، $U = u/u_c$
v	سرعت در جهت y ، ms^{-1}
V	سرعت بی بعد در جهت y ، $V = v/u_c$
x	مختصه افقی، m
X	مختصه افقی بدون بعد، $X = x/H$
y	مختصه عمودی، m
Y	مختصه عمودی بدون بعد، $Y = y/H$
Gr	عدد گراشهف، $Gr = g \beta H^3 \Delta T / \nu^2$
Nu	نوسلت، $Nu = hH/k$
Pr	عدد پرائتل، $Pr = \nu/\alpha$
Re	عدد رینولدز، $Re = u_c H / \nu$
Ri	عدد ریچاردسون، $Ri = Gr / Re^2$

علائم لاتین	
g	شتاب جاذبه زمین، ms^{-2}
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی، $Wm^{-2}k^{-1}$
H	ارتفاع محفظه، m
k	ضریب هدایت گرمایی، $Wm^{-1}k^{-1}$
L	طول محفظه، m
P	فشار، Pa
t	زمان، s
T	دما، K
u	سرعت در جهت x ، ms^{-1}

a discrete heat source in an open cavity” *European Journal of Mechanics B/Fluids* 28, 590–598.

- [7] S. Lee, S.U.S. Choi, S. Li, J.A. Eastman, 1999. “Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles”. *Trans. ASME J. Heat Transfer* 121 280–289.
- [8] Y. Xuan, Q. Li., 2000. “Heat transfer enhancement of nanofluids”. *Int. J. Heat Fluid Flow* 21, 58–64, 2000.
- [9] Y. Xuan, W. Roetzel., “Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids”. *Int. J. Heat Mass Transfer* 43 3701–3707.
- [10] S.K. Das., N. Putra., P. Thiesen., W. Roetzel., 2003. “Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids”. *J. Heat Transfer* 125 , 567–574.
- [11] K. Santra, A., S. Sen, B., and N. Chakraborty, 2009. “Study of Heat Transfer Due to Laminar Flow of Copper-Water Nanofluid through Two Isothermally Heated Parallel Plates”. *Thermal Sciences*, 48, no. 2, pp. 391–400.
- [12] A. H. Mahmoudi , M. Shahi, A. M. Shahedin, and N. Hemati, 2010. “Numerical modeling of natural convection in an open cavity with two vertical thin”. *Int. Communications in Heat and Mass Transfer*, 38, pp. 110–118.
- [13] M. shahi, A. H. Mahmoudi, and F. Talebi, 2009. “N, 1983. umerical study of mixed convection cooling in a square cavity ventilated and partially heated from the below utilizing nanofluid”, *Int. Communications in Heat and mass transfer*, 37, pp. 201–213.
- [14] H. C. Brinkman, 1952. “The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solution”, *Chem. Phys.* 20, pp. 571–581.
- [15] H.E. Patel, T. Pradeep , T. Sundarajan, A. Dasgupta, N. Dasgupta, and S.K. Das, 2005. “A micro-convection model for thermal conductivity of nanofluid”, *Pramana–J. Phys.* 65, PP.863–869.
- [16] E. Abu-Nada, Z. Masoud, B. Hijazi, 2008. “Natural convection heat transfer enhancement in horizontal concentric annuli using nanofluids”. *Heat Mass Transf*, 35, no.5, PP.657–665.
- [17] S.V.Patankar, 1980. “*Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*”, Hemisphere, Washington., D.C.
- [18] De Vahl Davis, 1983. “Natural convection in a square cavity”. A benchmark numerical solution, *Int. J. Numer. Methods Fluids* 3, 249–264.

علائم یونانی	
α	ضریب پخش حرارتی، $m^2 s^{-1}$
β	ضریب انبساط گرمایی
θ	دمای بی بعد، $\theta = T - T_c / (q'' H / k_f)$
μ	لزجت دینامیکی، <i>Pas</i>
ν	لزجت سینماتیکی، $m^2 s^{-1}$
ρ	دانسیته، $kg.m^{-3}$
φ	متغیر عمومی
ϕ	نسبت حجمی ذرات جامد

زیر نویس ها	
c	سیال سرد ورودی
e	خروجی
f	سیال خالص
h	گرم
i	ورودی
m	متوسط
nf	نانوسیال
s	نانوذرات

۱۰- مراجع

- [1] E. Bilgen, A., H. Oztop, B., 2004. “Natural convection heat transfer in partially open inclined square cavities”. *Int. J. Heat and Mass Transfer* , 48, pp. 1470–1479.
- [2] Ahmet Koca A., 2008. “Numerical analysis of conjugate heat transfer in a partially open square cavity with a vertical heat source”. *Int. Communications in Heat and Mass Transfer* , 35 , 1385–1395.
- [3] Raji, A., Hasnaoui M, B., 1998. “Mixed convection heat transfer in a rectangular cavity ventilated and heated from the side. *Numer Heat Transfer*” 33, pp. 533-48.
- [4] Sey-ping How, Tsan-hui Hsu., 1998. “transient mixed in a convection partially divided enclosure” *computers math. applic*, 36, no.8, pp.95-115.
- [5] A. Bahlaoui., A. Raji., M. Hasnaoui., M. Naïmi., T. Makayssi., M. Lamsaad., 2009. “Mixed convection cooling combined with surface radiation in a partitioned rectangular cavity”. *filled Energy Conversion and Management*; 50:626-635.
- [6] S. M Aminossadati., B. Ghasemi., 2009. “A numerical study of mixed convection in a horizontal channel with