

بررسی اثر نانوذرات بر انتقال حرارت جابه‌جایی توأم در کانال افقی دارای منبع گرم

ایمان پیشکار^۱، بهزاد قاسمی^{۲*}

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

۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

* شهرکرد، صندوق پستی ۱۱۵، behzadgh@yahoo.com

چکیده- در این بررسی جریان جابه‌جایی توأم آزاد و اجباری نانوسیال و سیال خالص در یک کانال افقی حاوی یک منبع حرارتی به روش عددی مطالعه شده است. دیواره‌های کانال عایق بوده و منبع حرارتی روی دیواره پایین آن قرار دارد. جریان به صورت یکنواخت در دمای سرد وارد کانال می‌شود و با منبع گرم تبادل حرارت می‌کند. معادلات حاکم به روش حجم کنترل جبری شده و به کمک الگوریتم سیمپل به صورت هم‌زمان حل می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از نانوسیال موجب پخش بهتر حرارت و افزایش دمای میانگین منبع می‌شود. همچنین، افزایش درصد حجمی نانوذرات (ϕ) موجب افزایش انتقال حرارت می‌شود و این افزایش در رینولدزهای بالا بیشتر است. از بررسی‌های انجام‌شده بر روی نسبت طول به عرض منبع (B) در مساحت ثابت آن دیده می‌شود که با افزایش B انتقال حرارت ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.

کلیدواژگان: جابه‌جایی توأم اجباری و آزاد، نانوسیال، کانال، منبع حرارتی

Effect of nanoparticles on mixed convection heat transfer in a horizontal channel with heat source

I. Pishkar¹, B. Ghasemi^{2*}

1-MSc. Student, Mech. Eng., Shahrekord Univ., Shahrekord, Iran

2- Assoc. Prof., Mech. Eng., Shahrekord Univ., Shahrekord, Iran

* P. O. B. 115 Shahrekord, behzadgh@yahoo.com

Abstract- A numerical investigation of mixed convection heat transfer with nanofluid and pure water from a heat source in a horizontal channel is performed. The walls of the channel are adiabatic and the heat source is placed at the bottom wall of the channel. Free flow at cold temperature enters channel and takes heat from heat source. Discretization of the continuity, momentums and energy equations are achieved through a finite volume method and solved with SIMPLE method. The Brownian motion of nanoparticles is simulated to determine the thermal conductivity of the nanofluid. The results show that using the nanofluid caused to heat diffusion and average temperature of source to increase. Also, increase in solid volume fraction causes increase in heat transfer especially at high Reynolds number. It is understand that with increase in ratio of length to height of source in its constant area, heat transfer decreases first and then increases.

Keywords: Mixed Convection, Nanofluid, Channel, Heat Source

۱- مقدمه

مطالعه بر روی جریان جابه‌جایی طبیعی، جابه‌جایی اجباری و جابه‌جایی توأم طبیعی و اجباری در کانال‌ها به دلیل کاربردهای فراوان آن به طور وسیع گسترش یافته است. از جمله این کاربردها استفاده در صنایع انرژی خورشیدی و انرژی هسته‌ای می‌باشد. از نمونه‌های دیگر جریان جابه‌جایی توأم در کانال که کاربرد وسیع‌تری دارد می‌توان به جریان بین دو صفحه موازی همراه با قطعات گرمازا اشاره کرد که چند دهه‌ای است نظر اندیشمندان را به خود معطوف کرده است. از جمله این کاربردها می‌توان به مبدل‌های حرارتی فشرده، خنک‌کن‌های میانی، دودکش‌ها، خنک‌کردن قطعات الکترونیک و سیستم‌های الکترونیکی مدرن اشاره کرد.

از میان کارهای عددی انجام‌شده می‌توان به تحقیقاتی که توسط یونگ و وفایی [۱]، مین یانگ و همکارانش [۲، ۳] و هاجی و آچاریا [۴] انجام شده اشاره کرد. در این تحقیقات عمدتاً عملکرد حرارتی قطعه گرمازای داخل کانال بررسی شده است. همچنین، هموچه و بسی [۵] به مطالعه جریان جابه‌جایی توأم هوا در یک کانال افقی پرداختند. این کانال شامل دو منبع حرارتی بلوکی است که بر روی دیواره پایینی قرار دارند. در این بررسی نشان داده شده است که افزایش فاصله بین بلوک‌ها، ارتفاع و عرض آن‌ها افزایش چشمگیری بر نرخ تبادل حرارت دارد. علاوه بر کارهای عددی ذکرشده، بررسی‌های تجربی زیادی نیز در سرمایش قطعات در کانال‌ها انجام شده است.

شاید اولین کار تجربی انجام‌شده در مورد بررسی اثر موانع عمود بر جریان، مربوط به هان و همکاران [۶] باشد. آن‌ها میدان جریان و انتقال حرارت را در کانالی با سطوح دندانه‌دار بررسی کردند و اثر شکل دندانه‌ها را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که تغییر شکل دندانه‌ها اثر زیادی بر ضریب اصطکاک و اثر کمتری بر ضریب انتقال حرارت دارد. بولر و کلیبورن [۷]، آرویزرو و موفت [۸]، دوپروفسکی و واسیلیف [۹] و منگلیک و برگلس [۱۰] به تحقیقات تجربی و آزمایشگاهی روی انتقال حرارت از قطعات گرمازا در داخل کانال پرداخته‌اند. عمده بررسی آن‌ها روی ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک و اثر پارامترهای مختلف بر این دو بوده است.

با روی کار آمدن کامپیوترهای سرعت بالا، اتلاف حرارت در چیپ‌های آن‌ها یک منبع نگرانی بوده است. دمای بالای

چیپ‌ها روی قابلیت و عملکرد سیستم تاثیر می‌گذارد. بنابراین خروج حرارت مؤثر لازم است تا به سیستم آسیب نرسد. از طرفی با پیشرفت علم و تکنولوژی به سمت صنایع کوچک و سبک لزوم استفاده از نانوسیال مطرح می‌شود. سیالات خالص عموماً ضریب هدایت حرارتی پایینی دارند. در کاربردهایی مانند انتقال حرارت از قطعات الکترونیکی گرمازا یا میکروکانال‌ها که مقدار مشخصی از حرارت قرار است که از سطح کوچکی جابه‌جا شود، سیال عامل باید مشخصه‌های مؤثری داشته باشد. کاربردهای زیادی از نانوسیال در محفظه‌ها در ارتباط با انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد وجود دارد که می‌توان به تحقیقات انجام‌شده توسط امین‌الساداتی و قاسمی [۱۱]، جهانشاهی و همکارانش [۱۲] و اوزتوپ و ابوندا [۱۳] اشاره کرد. همچنین شاهی و همکارانش [۱۴] به مطالعه عددی سرمایش توأم با نانوسیال در یک محفظه مربعی با ورودی و خروجی پرداختند. در این مطالعه تاثیر نسبت حجمی نانوذرات روی مشخصه‌های گرمایی و هیدرودینامیکی بررسی شده است. از طرفی تحقیقات زیادی در رابطه با انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری توسط نانوسیال در میکروکانال‌ها وجود دارد که می‌توان به کارهای انجام‌شده توسط زو و پان [۱۵]، کو و کلینستریر [۱۶]، جانگ و چویی [۱۷] و سانترا و همکاران [۱۸] بر اساس مدل‌های مختلف پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی اشاره کرد. چین و هانگ [۱۹] و عباسی و آقاجفی [۲۰] از روش تجربی استفاده کرده‌اند تا تاثیر پارامترهایی همچون هندسه میکروکانال، عدد رینولدز، پخش حرارت و نسبت حجمی جامد را بر عملکرد حرارتی میکروکانال بررسی کنند.

با توجه به مطالعات انجام‌شده، دیده می‌شود که کارهای کمتری روی انتقال حرارت جابه‌جایی توأم در کانال همراه با نانوسیال صورت گرفته است، خصوصاً جریان نانوسیال در کانال شامل قطعات گرمازا توسط نویسندگان مشاهده نشده است. به همین دلیل، مطالعه حاضر به بررسی عملکرد حرارتی منبع گرم چسبیده به دیواره پایینی یک کانال دوبعدی با نانوسیال پرداخته است. این مسئله می‌تواند مدل ساده‌ای از سرمایش یک قطعه الکترونیک در یک دستگاه باشد. به‌کارگیری نانو سیال به جای سیال خالص می‌تواند باعث دفع بهتر حرارت از قطعه الکترونیک شود. بدیهی است در این صورت می‌توان، در حجم کمتری از دستگاه، تبادل حرارت مناسب‌تری داشت. در

۳- معادلات اساسی حاکم بر جریان نانوسیال

در این مطالعه فرض می‌کنیم جریان لایه مرزی آرام و پایدار است و اتلاف حرارتی لزجت وجود ندارد. تولید انرژی صفر در نظر گرفته می‌شود. همچنین نانوسیال را به عنوان یک محیط پیوسته با تعادل گرمایی بین سیال پایه و ذرات جامد در نظر می‌گیریم. معادلات حاکم برای جریان آرام دوبعدی و داخل کانال، با فرض سیال نیوتنی غیرقابل تراکم و با استفاده از تقریب بوزینسک، عبارت‌اند از:

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

مومنوم X

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

مومنوم Y

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

انرژی

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

معادله انرژی در منبع حرارتی به شکل زیر تبدیل می‌شود:

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

متغیرهای بی‌بعد استفاده‌شده در این معادلات عبارت‌اند از:

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

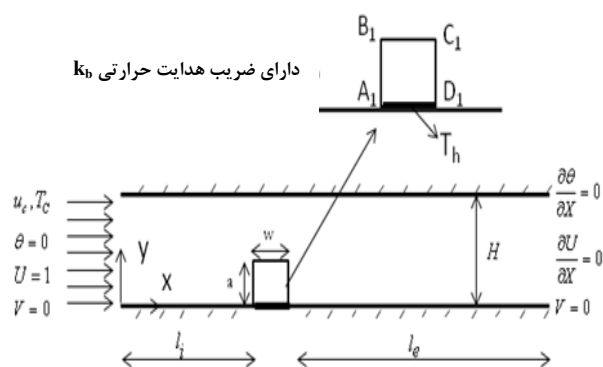
$$P = \frac{\bar{p}}{\rho u_c^2}, \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}$$

در این روابط H طول مشخصه (عرض کانال) و u_c سرعت مرجع (سرعت ورودی) است. تعریف اعداد بدون بعد نیز در ادامه آمده است:

این راستا اثر پارامترهایی همچون اعداد رینولدز و ریچاردسون، ضریب هدایت حرارتی قطعه، نسبت طول به ارتفاع قطعه و درصد حجمی نانو ذرات بر میدان جریان و دما و نرخ انتقال حرارت بررسی شده است.

۲- بیان مسئله

هندسه مورد نظر، مطابق شکل ۱، کانالی دوبعدی با یک منبع گرمازا واقع در دیواره پایینی آن می‌باشد. 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 کانال می‌شود و از سمت راست کانال خارج می‌شود. شتاب گرانشی g در جهت منفی y عمل می‌کند. منبع گرمازا با ضخامت ناچیز با دمای T_h روی دیواره پایینی قرار دارد. قطعه‌ای با ضریب هدایت حرارتی k_b بر روی این منبع گرم قرار دارد و نقش فین را انجام می‌دهد. دیواره بالایی و دیواره پایینی کانال به جز قسمتی که منبع قرار دارد به خوبی عایق شده است. فرض شده که در تمام دیواره‌ها شرط عدم لغزش برقرار است. طول خروجی کانال (l_e) به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شده تا شرط توسعه‌یافتگی سرعت و دما در خروجی فرض صحیحی باشد. در ادامه به منبع گرمازا همراه فین، برای خلاصه‌شدن، منبع گرم گفته می‌شود.



شکل ۱ کانال همراه با یک منبع گرم

هدف این است که به مقایسه انتقال حرارت نانوسیال و سیال خالص بپردازیم و اثر پارامترهایی همچون اعداد رینولدز و ریچاردسون، نسبت حجمی نانوذرات، ضریب هدایت حرارتی منبع و نسبت طول به ارتفاع منبع را بر انتقال حرارت از آن بررسی کنیم.

متوسط (Nu_m) را به صورت زیر بیان کرد که در این رابطه A و W به ترتیب ارتفاع و طول بی‌بعد منبع می‌باشد.

$$Nu_m = \frac{1}{A+W+A} \int \left(-\frac{k_{nf}}{k_f} \frac{1}{\theta_w} \frac{\partial \theta}{\partial N} \Big|_{g(x,y)=0} \right) dN \quad (12)$$

۵- روابط مربوط به خواص نانوسیال

همان‌گونه که از معادلات حاکم بر مسئله 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 [۲۱].

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_s \quad (13)$$

$$(\rho\beta)_{nf} = (1-\phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_s \quad (14)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho c_p)_f + (\rho c_p)_s \quad (15)$$

$$\alpha_{nf} = k_{nf} / (\rho c_p)_{nf} \quad (16)$$

در خصوص ویسکوزیته نانوسیال روابط مختلفی در مراجع ارائه شده است که رابطه بریکمن [۲۱] بیشتر از سایر روابط مورد توجه محققان است.

$$\mu_{nf} = \mu_f / (1-\phi)^{2.5} \quad (17)$$

فرمول‌های متعددی برای هدایت حرارتی نانوسیال ارائه شده است که در اینجا از فرمول ارائه‌شده توسط پاتل و همکاران [۲۲] استفاده شده است.

$$k_{eff} = k_f \left[1 + \frac{k_s A_s}{k_f A_f} + c k_s Pe \frac{A_s}{k_f A_f} \right] \quad (18)$$

در این رابطه $k_s = 401 \text{ w/mK}$ ضریب هدایت حرارتی برای ذرات مس و $k_f = 0.613 \text{ w/mK}$ ضریب هدایت حرارتی برای آب می‌باشد. این خواص به همراه دیگر خواص مورد نیاز برای آب و نانوذرات مس در جدول ۱ آورده شده است. c یک ثابت تجربی بوده و برای نانوسیال آب و مس برابر 36000 توسط سانترا و همکاران گزارش شده است [۱۸]. در این رابطه نسبت A_s / A_f به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\frac{A_s}{A_f} = \frac{d_f}{d_s} \frac{\phi}{1-\phi} \quad (19)$$

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

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2}, Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f} \quad (7)$$

۴- شرایط اولیه و شرایط مرزی

شرایط مرزی هیدرودینامیکی معادلات فوق شامل شرط عدم لغزش روی دیواره‌ها ($U, V = 0$)، سرعت ورودی یکنواخت ($U = 1, V = 0$) و شرط توسعه‌یافتگی سرعت در خروجی ($V = 0, \partial U / \partial X = 0$) است. شرط مرزی حرارتی نیز، با توجه به اینکه دیواره‌های بالا و پایین به جز قسمتی که قطعه گرمازا دارد عایق می‌باشد، به صورت $\partial \theta / \partial Y = 0$ ، قطعه گرمازا $\theta = 1$ و در خروجی نیز به صورت توسعه‌یافته یعنی $\partial \theta / \partial X = 0$ است. شرایط مرزی هیدرودینامیکی و حرارتی منبع به این صورت است:

$$U \Big|_{g(x,y)=0} = V \Big|_{g(x,y)=0} = 0 \quad (8)$$

$$\theta_{nf} \Big|_{g(x,y)=0} = \theta_b \Big|_{g(x,y)=0} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \theta_{nf}}{\partial N} \Big|_{g(x,y)=0} = k^* \frac{\partial \theta_b}{\partial N} \Big|_{g(x,y)=0} \quad (10)$$

که در این روابط $g(x, y) = 0$ منحنی‌ای است که سطح یا همان محیط منبع حرارتی را تعریف می‌کند. N نیز مولفه عمود بر سطح منبع گرم است که می‌تواند X یا Y باشد.

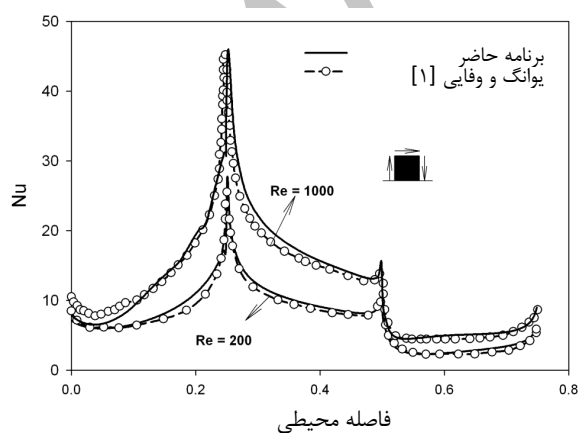
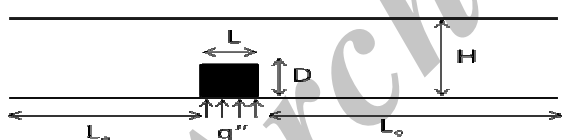
شایان ذکر است که طول خروجی در چند حالت مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت مشخص شد که طول خروجی، $L_e = 13H$ ، شرایط توسعه‌یافتگی در خروجی کانال را کاملاً ارضا می‌کند.

میزان انتقال حرارت در قالب عدد نوسلت قابل بیان است. با توجه به مقادیر بدون بعد، نوسلت موضعی پیرامون منبع حرارتی عبارت است از:

$$Nu_x = -\frac{k_{nf}}{k_f} \frac{1}{\theta_w} \frac{\partial \theta}{\partial N} \Big|_{g(x,y)=0} \quad (11)$$

که در این رابطه θ_w دمای بی‌بعد سطح قطعه است. می‌توان، با انتگرال‌گیری از رابطه فوق روی سطح قطعه گرم، نوسلت

و برای اطمینان از درستی کد نوشته‌شده، نتایج عددی حاصل از آن با کارهای مشابه انجام‌گرفته توسط دیگران مقایسه شد. برای این منظور، ابتدا ابعاد کانال و مانع و همچنین شرایط مرزی جریان مطابق مرجع [۱] انتخاب گردید. این تحقیق یک مطالعه عددی روی سرمایه‌ش جابه‌جایی اجباری از مانع تحت شار حرارتی ثابت در یک کانال افقی است. دیواره بالایی و پایینی کانال عایق بوده و مانع دارای ضریب هدایت حرارتی محدود می‌باشد. این اعتبارسنجی در حالتی انجام شده است که ارتفاع و عرض مانع برابر $L=D=0.25H$ (ارتفاع کانال) می‌باشد. نتایج به صورت عدد نوسلت موضعی اطراف مانع بررسی و مقایسه شد. نتایج حاصل از این بررسی به ازای دو مقدار عدد رینولدز در شکل ۲ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که اختلاف نتایج حاصل از دو بررسی قابل قبول است. به منظور بررسی عملکرد برنامه کامپیوتری تهیه‌شده در مسائل انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال، مقایسه‌ای نیز در مورد جریان نانوسیال در یک کانال افقی انجام گرفت. در این بررسی، دو صفحه موازی به طول $L=100H$ و دمای ثابت $T_h=1$ در نظر گرفتیم که جریان نانوسیال موجب خنک‌کاری آن‌ها می‌شود. در این اعتبارسنجی به بررسی عدد نوسلت متوسط صفحات مطابق مرجع [۱۸] با افزایش نسبت حجمی نانوذرات در اعداد رینولدز متفاوت پرداخته شد.



شکل ۲ مقایسه نوسلت موضعی مطالعه حاضر با مرجع [۱] ($L=0.25H, D=0.25H, k_s/k_f=10$)

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)، عبارت است از:

$$Pe = \frac{u_s d_s}{\alpha_f} \quad (20)$$

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

$$u_s = \frac{2k_b T}{\pi \mu_f d_s^2} \quad (21)$$

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

جدول ۱ خواص ترموفیزیکی آب خالص و نانوذرات مس [۱۸]

نانوذرات مس	آب خالص	
۸۹۳۳	۹۹۷/۱	$\rho(\text{kgm}^{-3})$
۳۸۵	۴۱۷۹	$c_p(\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1})$
۴۰۱	۰/۶۱۳	$k(\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1})$
۱/۶۷	۲۱	$\beta \times 10^{-5}(\text{K}^{-1})$

۶- روش عددی

معادلات (۱) تا (۴) همراه با شرایط مرزی گفته‌شده به روش اختلاف محدود مبتنی بر حجم کنترل جبری شده‌اند. میدان حل با روش شبکه جابه‌جاشده شبکه‌بندی شده است. در روش شبکه جابه‌جاشده، علاوه بر راحتی محاسبه دبی‌ها روی وجوه حجم کنترل، به علت معلوم‌بودن سرعت روی سطوح، مقادیر فشار در نقاط اصلی شبکه مشخص می‌شود. جهت حل هم‌زمان معادلات جبری‌شده، از الگوریتم سیمپل، که جزئیات کامل آن در مرجع [۱۸] آمده است، استفاده شده است. همچنین از معیار همگرایی زیر استفاده شده است:

$$\sum_j \sum_i \left| \left(\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\phi^{n+1}} \right)_{i,j} \right|^2 \leq 10^{-7} \quad (22)$$

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

۷- نتایج

برای اجرای الگوریتم مورد نظر برنامه‌ای کامپیوتری به زبان فرترن نوشته شد. جهت اثبات کارایی روش و برنامه نوشته‌شده

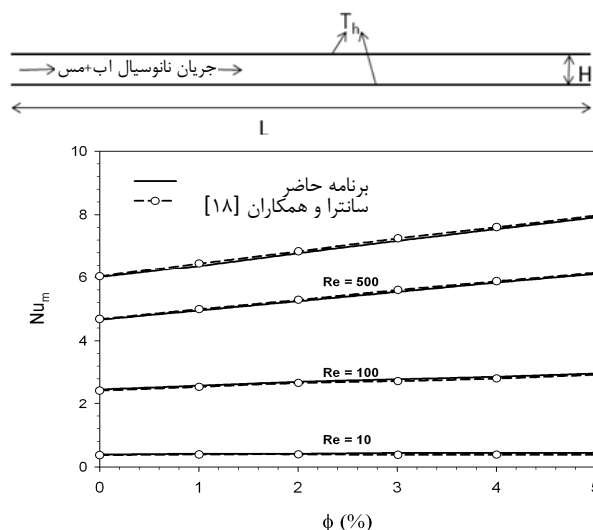
بدین ترتیب شبکه‌بندی غیریکنواخت 450×90 برای اجرای برنامه انتخاب شد. همچنین ذکر این نکته ضروری است که در ادامه بررسی‌ها با تغییر ابعاد قطعه به ناچار تعداد نقاط تغییر داده شد، اما تراکم شبکه تا پایان بررسی به همین ترتیب باقی مانده است.

۷-۱- بررسی اثر اعداد رینولدز و ریچاردسون

در ابتدا کانال همراه با منبع گرم با نسبت پهنا به ارتفاع $B = w/a = 5.33$ را در نظر می‌گیریم. فرض می‌کنیم که ضریب هدایت حرارتی بی‌بعد خیلی بزرگ باشد ($k^* \rightarrow \infty$) به طوری که دمای منبع گرم به یک میل کند ($T_{source} \rightarrow T_h$). برای نتیجه‌گیری بهتر، در این مرحله عدد ریچاردسون را ثابت در نظر گرفته و با تغییر رینولدز در محدوده ۵ تا ۳۰۰ اثر حرکت‌های جابه‌جایی اجباری در میدان جریان و انتقال حرارت را بررسی می‌کنیم. تغییر در عدد رینولدز همانند تغییر در سرعت ورودی جریان می‌باشد. میدان جریان و دما به ازای عدد ریچاردسون $Ri = 10$ و در اعداد رینولدز مختلف در شکل ۴، برای نانوسیال و سیال خالص، ارائه شده است. در این شکل‌ها، برای بهتر نشان‌دادن میدان جریان و دما، قسمتی از کانال که منبع گرم قرار دارد نمایش داده شده است. در بررسی انتقال حرارت در کانال، با توجه به اینکه سرعت ورودی جریان داریم، یعنی انرژی جریان ورودی توسط عامل خارجی مانند پمپ تامین می‌شود، نقش انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری که توسط حرکت توده سیال انجام می‌شود پررنگ است، ولی در پشت موانع، جایی که سرعت جریان کمتر است، انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد نیز اهمیت زیادی پیدا می‌کند. بنابراین، با افزایش رینولدز، وابسته به افزایش سرعت جریان ورودی، افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری چشمگیر است و افزایش عدد نوسلت را داریم.

همان‌طور که از شکل ۴ مشاهده می‌شود، با برخورد جریان به منبع گرم گردابه‌ای در پشت آن تشکیل می‌شود که با افزایش عدد رینولدز قدرت گردابه افزایش پیدا می‌کند. این افزایش قدرت موجب افزایش انتقال حرارت از سطح پشت جسم (C_1D_1) می‌شود. با مقایسه خطوط جریان نانوسیال با سیال خالص، دیده می‌شود که تفاوت چندانی در خطوط جریان مشاهده نمی‌شود، ولی نانوسیال گردابه‌های بزرگ‌تری را در پشت منبع گرم پیش‌بینی کرده است که ناشی از افزایش ویسکوزیته نانوسیال نسبت به سیال خالص است.

همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد اختلاف بسیار ناچیزی بین نتایج مرجع [۱۸] و مطالعه حاضر وجود دارد. پس از اطمینان از درستی کد کامپیوتری تهیه‌شده، به بررسی مراحل مختلف پرداخته شد.

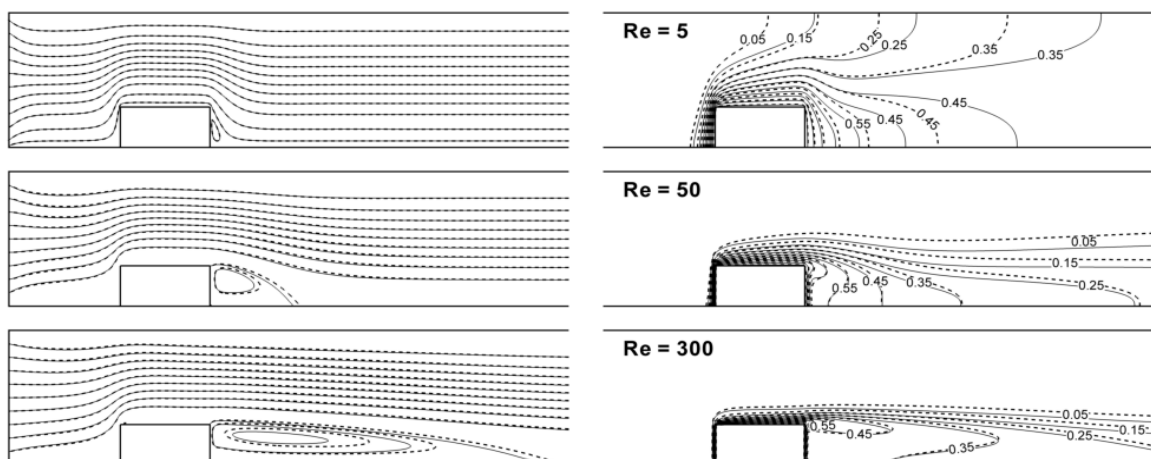


شکل ۳ مقایسه نوسلت متوسط مطالعه حاضر با مرجع [۱۸]

برای انتخاب شبکه حل مناسب، ابتدا بررسی روی تعداد نقاط شبکه انجام گرفت. بدین منظور اثر تعداد نقاط شبکه بر عدد نوسلت متوسط منبع گرم و دمای مرکز مقطع خروجی، بررسی شد. بررسی‌ها برای انتخاب تعداد نقاط شبکه به ازای مقادیر مختلف Ri, Re در چند حالت مختلف B انجام گرفت. نمونه‌ای از این بررسی‌ها برای کانال با یک منبع گرم و به ازای $\phi = 0.03$ ، $B = 5.33$ ، $Pr = 6.2$ ، $Ri = 10$ ، $Re = 300$ در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به این جدول، مشخص است که تقریباً برای شبکه‌های ریزتر از 450×90 جواب‌ها یکسان مانده است.

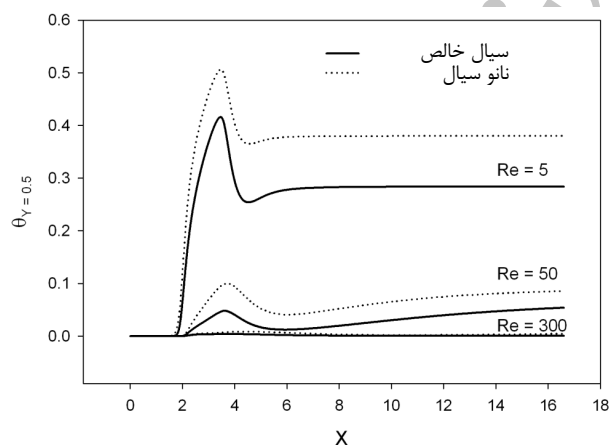
جدول ۲ تاثیر تعداد نقاط شبکه بر نوسلت متوسط و دمای مرکز مقطع خروجی در $Pr = 6.2$ ، $Ri = 10$ ، $Re = 300$

$\phi = 0.03$ ، $B = 5.33$		
$\theta_{out}(Y=0.5)$	Nu_m	تعداد نقاط
۰/۰۰۱۳۱۳	۱۱/۱۰۲	60×300
۰/۰۰۱۲۸۰	۱۱/۷۰۵	70×350
۰/۰۰۱۲۵۰	۱۱/۸۰۱	80×400
۰/۰۰۱۲۳۹	۱۱/۹۰۱	90×450
۰/۰۰۱۲۴۰	۱۱/۹۰۱	100×500
۰/۰۰۱۲۴۰	۱۱/۹۰۱	110×550



شکل ۴ میدان جریان (سمت چپ) و خطوط هم‌دما (سمت راست) برای نانو سیال آب+مس با $\phi = 0.05$ (---) و آب خالص (—) در اعداد رینولدز مختلف و $B = 5.33$ ، $Ri = 10$ و $k^* = \infty$

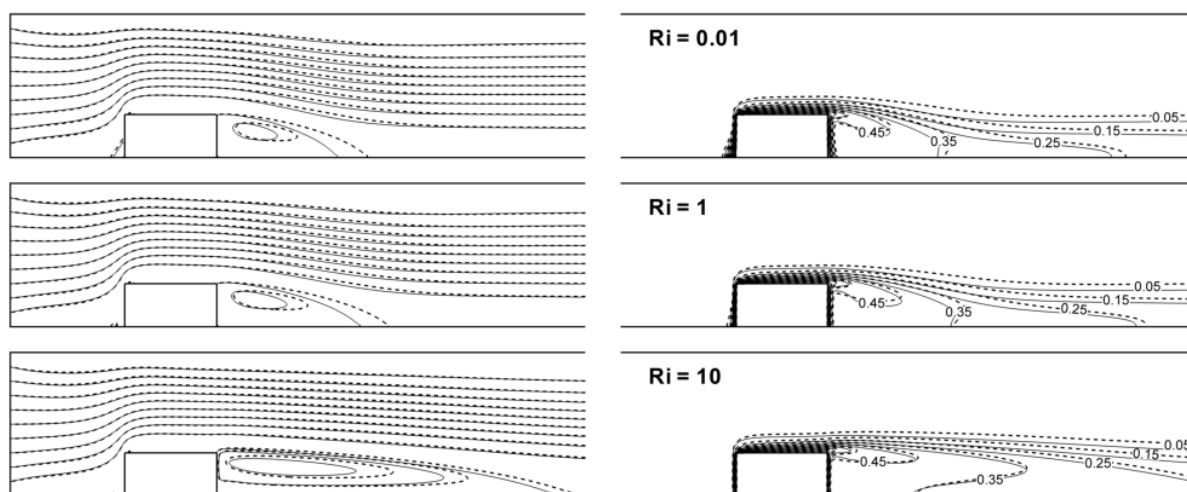
بزرگی گردابه به واسطه افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد از سطح پشتی منبع (C_1D_1) با افزایش ریچاردسون می‌باشد. از طرفی، با توجه به بالاتر بودن ضریب هدایت حرارتی در نانو سیال و پخش بهتر حرارت، گردابه‌های کشیده‌تر و قوی‌تری در نانو سیال ایجاد می‌شود.



شکل ۵ تغییرات دمای بدون بعد خط مرکزی در طول کانال برای سیال خالص و نانو سیال در اعداد رینولدز مختلف $k^* = \infty$ و $B = 5.33$ ، $Ri = 10$

از بررسی خطوط هم‌دما در شکل ۶، درمی‌یابیم که با افزایش ریچاردسون خطوط هم‌دما به پیرامون منبع نزدیک‌تر می‌شوند؛ به عبارت دیگر، با افزایش ریچاردسون گرادیان دما افزایش پیدا کرده و موجب افزایش انتقال حرارت می‌شود.

از بررسی خطوط هم‌دما، مشاهده می‌شود که در رینولدزهای پایین ($Re = 5$) خطوط هم‌دما به سمت بالای منبع حرارتی و کل مقطع خروجی کشیده می‌شود. با افزایش رینولدز این خطوط خوابیده می‌شوند و دمای سیال بالای منبع گرم و دمای حدود نیمی از خروجی برابر دمای سیال سرد می‌شود که بیانگر افزایش انتقال حرارت است. از مقایسه خطوط هم‌دمای نانو سیال با سیال خالص، مشاهده می‌شود که نفوذ حرارت به بالا و مقطع خروجی در نانو سیال بیشتر از سیال خالص است. این موضوع در رینولدزهای پایین چشمگیرتر است. دلیل این امر این است که در نانو سیال پخش حرارت بهتر صورت می‌گیرد و هر چه سرعت سیال کمتر باشد این پخش حرارت بهتر است. این موضوع از شکل ۵ به وضوح نمایان است. در این شکل، تغییرات دمای بدون بعد خط مرکزی در طول کانال برای سیال خالص و نانو سیال در اعداد رینولدز مختلف آورده شده است. از این شکل در می‌یابیم که با افزایش رینولدز وابسته به افزایش سرعت جریان ورودی سطح دما در خط مرکزی کانال کاهش پیدا کرده است. شکل ۶ بیانگر میدان جریان و خطوط هم‌دما برای نانو سیال و سیال خالص در اعداد ریچاردسون مختلف می‌باشد. در این نمودارها عدد رینولدز ثابت و برابر $Re = 300$ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که خطوط جریان نشان می‌دهند، با افزایش عدد ریچاردسون گردابه تشکیل شده در پشت منبع گرم بزرگ‌تر و قوی‌تر می‌شود. با افزایش عدد ریچاردسون، انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد افزایش پیدا می‌کند. این افزایش قدرت و

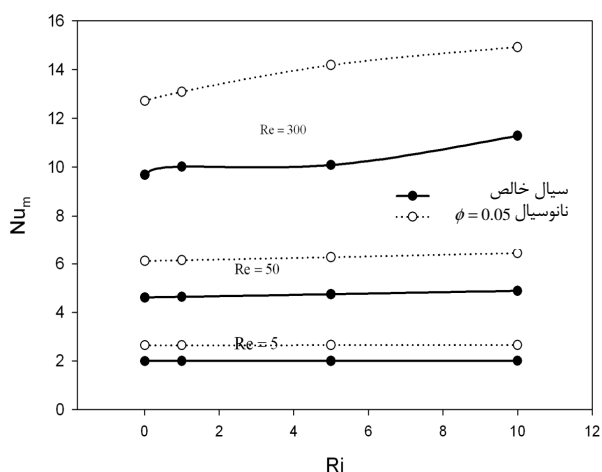


شکل ۶ میدان جریان (سمت چپ) و خطوط هم‌دما (سمت راست) برای نانو سیال آب+مس با $\phi = 0.05$ و آب خالص (—) در اعداد ریچاردسون مختلف و $Re = 300$ ، $B = 5.33$ و $k = \infty$

دلیل این امر کاهش گرادیان دما در نزدیکی نیمه دوم این سطح است. به طور کلی استفاده از نانوسیال موجب افزایش قابل ملاحظه نوسلت موضعی روی سطوح منبع گرم شده است که این افزایش در ریچاردسون‌های بالا برای دو سطح B_1C_1 و C_1D_1 چشمگیر است و دلیل آن پخش بهتر حرارت در ریچاردسون‌های بالا روی این سطوح می‌باشد.

در ادامه، برای بررسی کلی اثر عدد ریچاردسون و رینولدز بر انتقال حرارت از منبع گرم، به مطالعه عدد نوسلت متوسط منبع گرم در دو حالت سیال خالص و نانوسیال پرداخته شده است. شکل ۸ بیانگر عدد نوسلت متوسط منبع گرم بر حسب عدد ریچاردسون در سه عدد رینولدز متفاوت برای سیال خالص و نانوسیال می‌باشد. همان‌طور که دیده می‌شود، در رینولدزهای پایین اضافه‌شدن عدد ریچاردسون تاثیری بسزایی در نوسلت متوسط ندارد که دلیل آن این است که در رینولدزهای پایین حرکت سیال به آرامی و آهسته شکل می‌گیرد و فرصت کافی برای تبادل حرارت وجود دارد. بنابراین، با افزایش ریچاردسون، که وابسته به افزایش اختلاف دمای سیال ورودی و منبع گرم است، اثر قابل ملاحظه‌ای مشاهده نمی‌شود. ولی در رینولدزهای بالاتر نمودار روند صعودی به خود می‌گیرد و افزایش ریچاردسون اثر خود را بهتر نشان می‌دهد. همچنین، دیده می‌شود که مقدار افزایش انتقال حرارت وابسته به نانوسیال در رینولدزهای بالا بیشتر می‌باشد که دلیل آن این است که در رینولدزهای بالا، که وابسته به سرعت بالای جریان سیال می‌باشد، سیال بهتر

همچنین، در نانوسیال، با توجه به افزایش ضریب هدایت حرارتی، سطح دما بالاتر می‌باشد. این موضوع باعث کاهش گرادیان دما در نانوسیال نسبت به سیال خالص می‌شود. اما با توجه به اینکه در محاسبه انتقال حرارت ضریب هدایت حرارتی نیز نقش دارد، افزایش این ضریب در کل می‌تواند موجب افزایش انتقال حرارت شود. اثر عدد ریچاردسون بر عدد نوسلت موضعی پیرامون منبع گرم برای سیال خالص و نانوسیال در شکل ۷ آورده شده است. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش عدد ریچاردسون، که معیاری از نسبت انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد به جابه‌جایی اجباری می‌باشد، تغییر محسوسی در انتقال حرارت از سطح بالایی منبع گرم (B_1C_1) مشاهده نمی‌شود. دلیل این موضوع حاکم بودن جابه‌جایی اجباری توسط جریان آزاد روی این سطح است. همچنین، روی این سطح جهت انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد در تقاطع با جهت انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری است و این موضوع باعث کاهش اثر جابه‌جایی آزاد روی این سطح می‌شود، اما روی دو سطح جلویی (A_1B_1) و عقبی (C_1D_1) جهت انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد تقریباً هم‌جهت با جهت جابه‌جایی اجباری است. به همین دلیل افزایش عدد ریچاردسون موجب افزایش انتقال حرارت روی سطح C_1D_1 شده است. از طرفی برای سطح A_1B_1 مشاهده می‌کنیم که با افزایش ریچاردسون نوسلت موضعی حدود نیمی از آن افزایش چشمگیر داشته است، ولی برای حدود نیمه دوم سطح کاهش ناچیزی را مشاهده می‌کنیم.



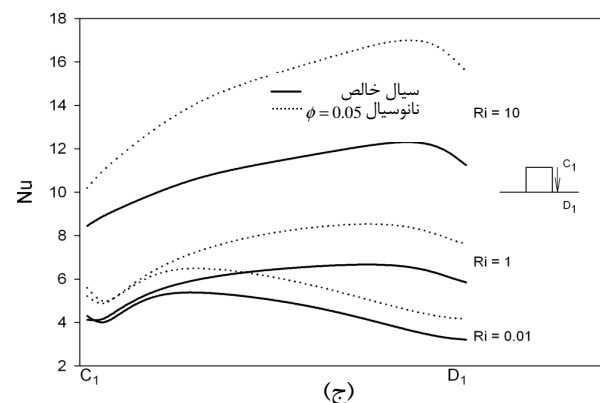
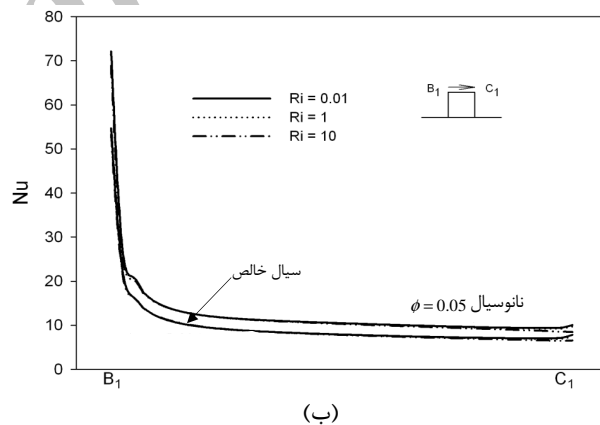
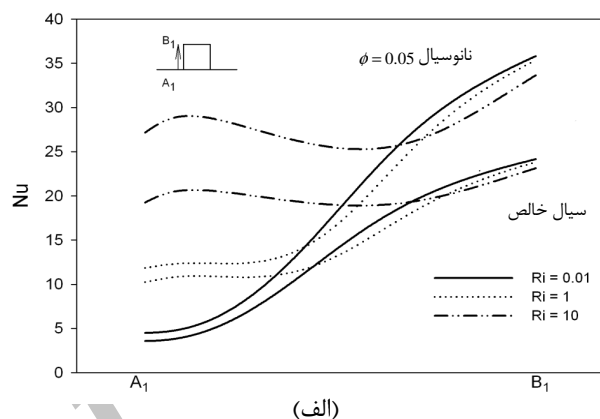
شکل ۸ عدد نوسلت توسط منبع گرم بر حسب عدد ریچاردسون در اعداد رینولدز مختلف و $B = 5.33$ و $k^* = \infty$

۷-۲- بررسی اثر افزایش نسبت حجمی جامد

در این قسمت، اثر نسبت حجمی جامد (ϕ) بر عدد نوسلت متوسط منبع گرم در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌کنیم که شیب خط $Re = 300$ از دو خط $Re = 50$ و $Re = 5$ بیشتر است؛ به عبارتی افزایش ϕ موجب افزایش انتقال حرارت می‌شود و این افزایش در رینولدزهای بالا، بیشتر است. دلیل این موضوع این است که در رینولدزهای بالا حرارت سریع‌تر منتقل می‌شود؛ به عبارت دیگر با افزایش رینولدز توده سیال حرارت را سریع‌تر از منبع گرم گرفته و به خروجی منتقل می‌کند و سیال سرد سریع‌تر جای آن را می‌گیرد. این امر باعث افزایش گرادیان دما در اطراف منبع گرم می‌شود و در نتیجه موجب افزایش عدد نوسلت متوسط می‌شود. ولی در رینولدزهای پایین چون سرعت حرکت سیال پایین است فرصت کافی برای تبادل حرارت وجود دارد و بیشتر پخش حرارت در اطراف منبع صورت می‌گیرد، به طوری که افزایش نسبت حجمی نانوذرات تاثیر کمتری از حالت رینولدز بالا دارد. این موضوع از جدول ۳ نیز مشاهده می‌شود. این جدول نوسلت متوسط نانوسیال و مقدار افزایش آن نسبت به سیال خالص را در مقادیر مختلف ϕ نشان می‌دهد.

از شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که شیب خطوط $Ri = 0.01$ ، $Ri = 1$ و $Ri = 10$ تقریباً یکسان است. این برابری شیب‌ها نشان می‌دهد که میزان افزایش انتقال حرارت از منبع گرم با افزایش ϕ در اعداد ریچاردسون مختلف، تقریباً یکسان است.

می‌تواند حرارت را به بیرون منتقل کند. حال وقتی از نانوسیال استفاده می‌کنیم قابلیت و ظرفیت سیال برای انتقال حرارت افزایش پیدا می‌کند و انتقال حرارت هدایتی بیشتر می‌شود و از طرفی چون سرعت سیال زیاد است، این حرارت جذب‌شده توسط سیال سریعاً به بیرون رانده می‌شود و موجب افزایش بیشتر انتقال حرارت نسبت به حالت رینولدز پایین می‌شود.



شکل ۷ عدد نوسلت موضعی پیرامون منبع گرم در $Re = 300$ و $B = 5.33$ و $k^* = \infty$ (الف) سطح جلویی A_1B_1 و (ب) سطح بالایی C_1B_1 و (ج) سطح عقبی C_1D_1

جدول ۳ مقدار افزایش نوسلت متوسط نانوسیال نسبت به سیال

خالص در $Ri = 10, B = 5.33, k^* = \infty$

ϕ	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۱	
Nu_m	۲/۶۵۵	۲/۴۰۰	۲/۱۲۸	$Re = 5$
مقدار افزایش	۰/۶۵۴	۰/۳۳۹	۰/۱۲۷	
Nu_m	۶/۴۳۲	۵/۸۲۴	۵/۲۰۱	$Re = 50$
مقدار افزایش	۱/۵۵۱	۰/۹۴۳	۰/۳۲۰	
Nu_m	۱۴/۹۱۵	۱۳/۵۲۰	۱۲/۰۵۰	$Re = 300$
مقدار افزایش	۳/۶۳۱	۲/۲۳۶	۰/۷۶۶	

جدول ۴ مقدار افزایش نوسلت متوسط نانوسیال نسبت به سیال

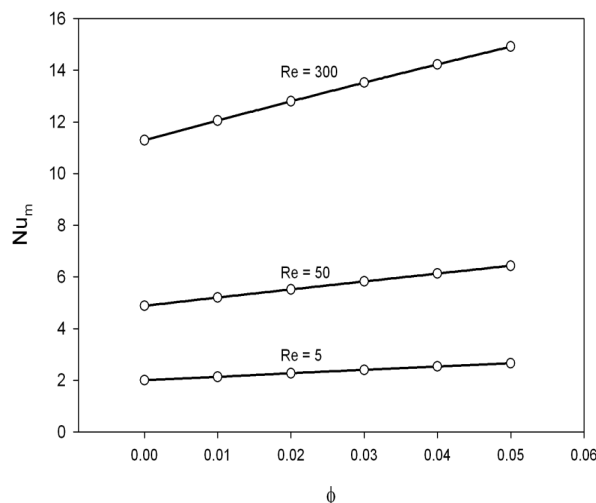
خالص در $Re = 300, B = 5.33, k^* = \infty$

ϕ	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۱	
Nu_m	۱۲/۷۰۷	۱۱/۵۳۱	۱۰/۳۱	$Ri = 0.1$
مقدار افزایش	۳/۰۲۸	۱/۸۵۲	۰/۶۳۱	
Nu_m	۱۳/۰۸۱	۱۱/۸۹۶	۱۰/۶۵۹	$Ri = 1$
مقدار افزایش	۳/۰۶۴	۱/۸۷۹	۰/۶۴۲	
Nu_m	۱۴/۹۱۵	۱۳/۵۲۰	۱۲/۰۵۰	$Ri = 10$
مقدار افزایش	۳/۶۳۱	۲/۲۳۶	۰/۷۶۶	

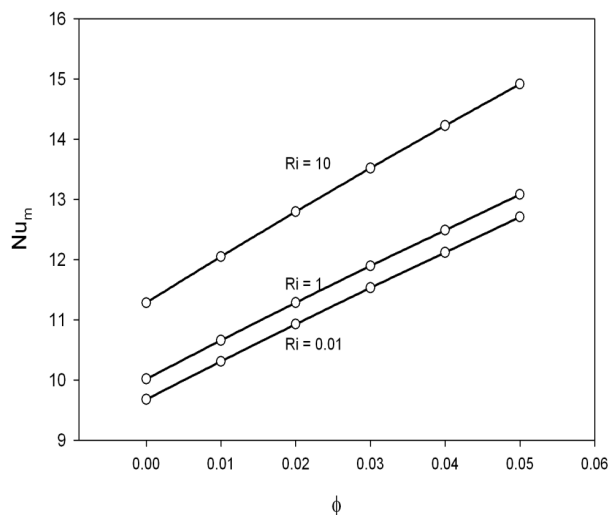
۷-۳- بررسی ضریب هدایت حرارتی منبع گرم

در این قسمت اثر ضریب هدایت حرارتی منبع گرم نسبت به سیال ($k^* = k_b / k_{nf}$) که وابسته به جنس منبع می‌باشد را مورد بررسی قرار می‌دهیم. بالا بودن ضریب هدایت حرارتی منجر به افزایش انتقال حرارت می‌شود. شکل ۱۱ خطوط هم‌دما را برای سه ضریب هدایت متفاوت منبع و در هندسه ثابت منبع ($B = 5.33$) برای سیال خالص و نانوسیال نشان می‌دهد. این نمودارها به ازای $Re = 50$ و $Ri = 10$ رسم شده است. دیده می‌شود که با افزایش ضریب هدایت حرارتی مقاومت حرارتی کاهش پیدا کرده و حرارت بهتر منتقل می‌شود. از طرفی با توجه به برچسب‌های خطوط مشاهده می‌کنیم که افزایش k^* موجب افزایش گرادیان دما در اطراف منبع می‌شود. همچنین با افزایش ضریب هدایت منبع، خطوط هم‌دما به خروجی کشیده می‌شوند که نشان از افزایش انتقال حرارت است. در کنار هر یک از نمودارها مقادیر دمای بی‌بعد متوسط منبع گرم (θ_m) برای سیال خالص و نانوسیال مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش k^* دمای بی‌بعد میانگین منبع گرم به سمت ۱ میل می‌کند ($\theta_m \rightarrow T_h$).

این موضوع از جدول ۴ مشخص است. از این جدول مشاهده می‌شود که با افزایش ریچاردسون مقدار افزایش نوسلت نانوسیال نسبت به سیال خالص به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر نکرده است، در صورتی که این تغییرات در جدول ۳ قابل ملاحظه بود.

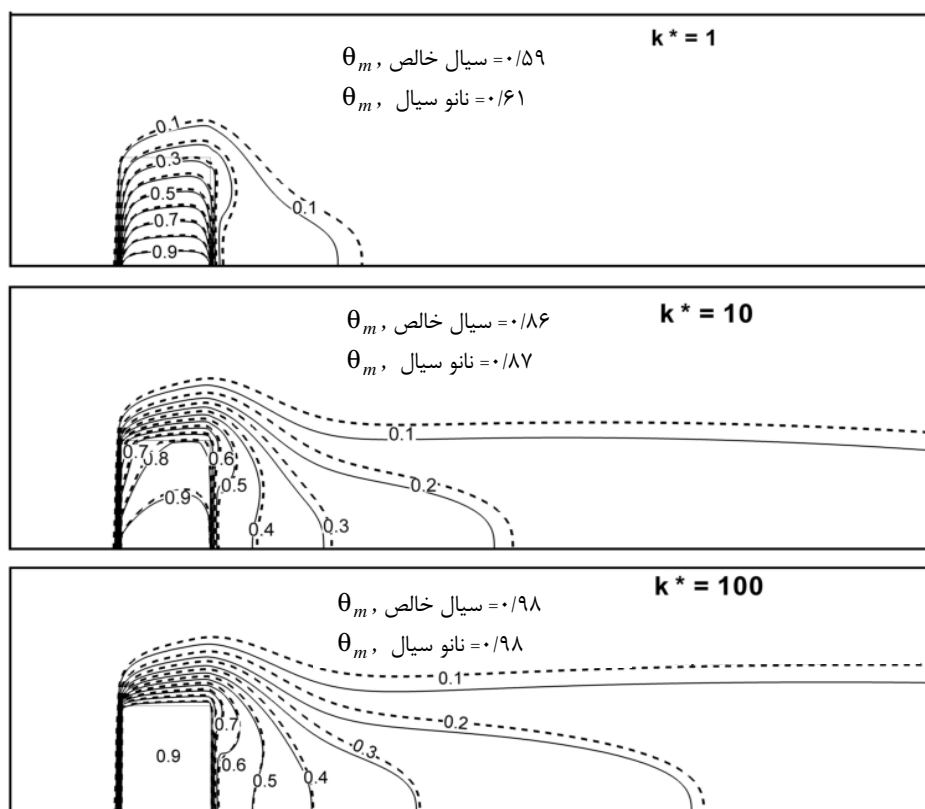


شکل ۹ عدد نوسلت توسط منبع گرم بر حسب نسبت حجمی جامد در اعداد رینولدز مختلف و $B = 5.33, Ri = 10, k^* = \infty$



شکل ۱۰ عدد نوسلت توسط منبع گرم بر حسب نسبت حجمی جامد در اعداد ریچاردسون مختلف و $B = 5.33, Re = 300, k^* = \infty$

حال، با توجه به دو شکل ۹ و ۱۰ و جداول ۳ و ۴، این نتیجه را می‌توان گرفت که میزان افزایش انتقال حرارت با افزایش ϕ به عدد رینولدز وابسته است و به عدد ریچاردسون چندان وابسته نیست.



شکل ۱۱ خطوط هم‌دما برای نانو سیال آب+مس با $\phi = 0.05$ (---) و آب خالص (—) در $Re = 50$ ، $Ri = 10$ ، و $B = 5.33$ و ضریب هدایت حرارتی مختلف از منبع حرارتی

همچنین، در هر حالت دمای میانگین نانوسیال از سیال خالص بیشتر است که دلیل آن پخش بهتر حرارت توسط نانوسیال، به دلیل ضریب هدایت بالای آن، است

۷-۴- بررسی اثر افزایش طول به عرض منبع در مساحت ثابت آن

در این قسمت، به ازای $Re = 50$ و $Ri = 10$ برای قطعه با ضریب هدایت خیلی زیاد، اثر تغییر نسبت طول به عرض منبع گرم را بررسی می‌کنیم. در شکل ۱۲ خطوط جریان و هم‌دما برای سه حالت نسبت طول به عرض منبع $(B = w/a)$ در مساحت ثابت آن $(A^* = W \times A = 0.48)$ نشان داده شده است. دیده می‌شود که با افزایش B از ارتفاع منبع کاسته شده و به طول آن اضافه می‌شود. تغییر هندسه منبع با افزایش B موجب افزایش انتقال حرارت از آن می‌شود (شکل ۱۳). یکی از دلایل افزایش انتقال حرارت افزایش سطح انتقال حرارت می‌باشد. زیرا، با توجه به مساحت ثابت منبع حرارتی، افزایش B موجب افزایش مجموع طول سه ضلع منبع شده و این افزایش طول

اضلاع موجب افزایش سطح انتقال حرارت می‌شود. البته با توجه به شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که در B های کوچک نیز انتقال حرارت چشمگیری داریم ولی مقرون به صرفه نیست چرا که در این حالت افت فشار در حالت ماکزیمم خود قرار دارد. از مقایسه انتقال حرارت توسط نانوسیال با سیال خالص دیده می‌شود که افزایش چشمگیر انتقال حرارت توسط نانوسیال به‌خصوص در رینولدزهای بالا داریم.

۸- نتیجه گیری

در بررسی حاضر جریان جابه‌جایی هم‌زمان آزاد و اجباری آرام در کانال افقی همراه با منبع گرم 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 جابه‌جایی توأم بر میزان انتقال حرارت بررسی شد. به طور کلی نتایج به‌دست آمده را می‌توان به صورت زیر جمع‌بندی کرد.

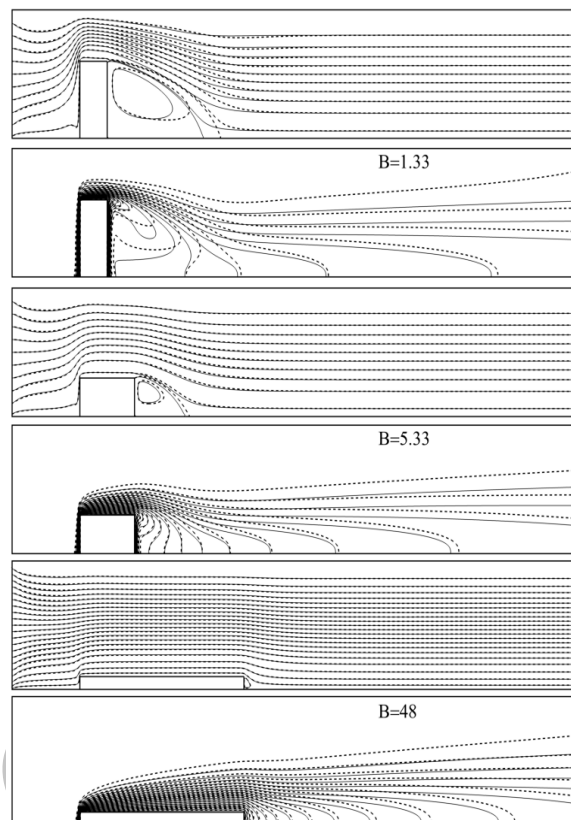
با بررسی خطوط جریان نانوسیال و سیال پایه متوجه شدیم که نانوسیال گردابه‌های کشیده‌تری را پشت منبع پیش‌بینی می‌کند که موجب افزایش انتقال حرارت از سطح پشت منبع گرم می‌شود. همچنین، با مقایسه خطوط هم‌دما، مشاهده می‌شود که استفاده از نانوسیال منجر می‌شود که سطح دما در کانال بالاتر رود و به عبارتی موجب کاهش گرادیان دما شود، ولی افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال این کاهش گرادیان را جبران کرده و در کل موجب افزایش انتقال حرارت از منبع می‌شود. در حالت کلی، با افزایش رینولدز، دمای میانگین منبع حرارتی کاهش پیدا می‌کند که نشان‌دهنده افزایش انتقال حرارت از آن می‌باشد.

افزایش ریچاردسون منجر به افزایش انتقال حرارت از سطح جلویی و عقبی منبع می‌شود، ولی تاثیر چندانی بر انتقال حرارت از سطح بالایی منبع ندارد. دلیل آن نیز این است که افزایش ریچاردسون در مکان‌هایی که سرعت سیال کم است به خوبی خود را نشان می‌دهد و گرنه اثرات جابه‌جایی اجباری بر آن غالب است.

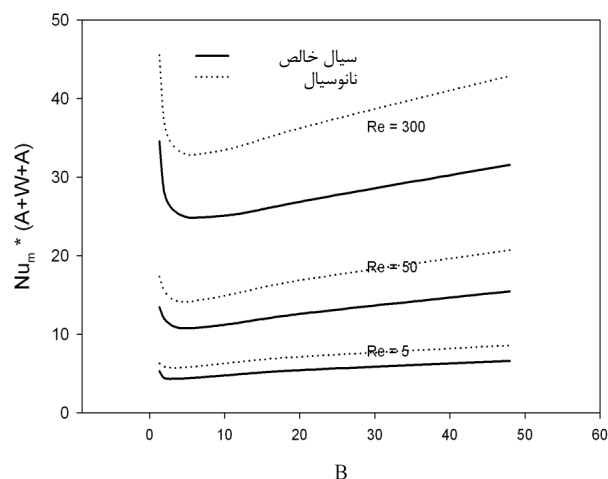
افزایش ϕ موجب افزایش انتقال حرارت می‌شود و این افزایش در رینولدزهای بالا، به دلیل حرکت سریع توده سیال و افزایش گرادیان دما در اطراف منبع، بیشتر است. ولی در رینولدزهای پایین چون سرعت حرکت سیال پایین است فرصت کافی برای تبادل حرارت وجود دارد و بیشتر پخش حرارت در اطراف منبع صورت می‌گیرد، به طوری که افزایش نسبت حجمی نانوذرات تاثیر کمتری از حالت رینولدز بالا دارد. همچنین، میزان افزایش انتقال حرارت با افزایش ϕ به عدد رینولدز وابسته است و به عدد ریچاردسون چندان وابسته نیست.

با افزایش ضریب هدایت منبع حرارتی، مقاومت حرارتی آن کاهش پیدا کرده و حرارت بهتر در آن منتقل می‌شود.

افزایش B موجب افزایش انتقال حرارت از منبع حرارتی می‌شود. یکی از دلایل افزایش انتقال حرارت از منبع یک انتقال حرارت می‌باشد. همچنین، با افزایش B منبع به یک قطعه حرارتی با دمای ثابت تبدیل می‌شود. البته در B های کوچک نیز انتقال حرارت چشمگیری داریم، ولی مقرون به صرفه نمی‌باشد چرا که در این حالت افت فشار در حالت ماکزیمم خود قرار دارد.



شکل ۱۲ میدان جریان (سمت بالا) و خطوط هم‌دما (سمت پایین) برای نانو سیال آب+مس با $\phi = 0.05$ و $(- - -)$ و آب خالص $(—)$ در نسبت طول به عرض متفاوت و $k^* = \infty$ و $Re = 50$ ، $Ri = 10$



شکل ۱۳ میزان انتقال حرارت بر حسب نسبت طول به عرض منبع در (B) در اعداد رینولدز مختلف برای سیال خالص و نانوسیال در $Ri = 10, k^* = \infty$

۹- نمادها

علائم یونانی

α	ضریب پخش حرارتی، m^2s^{-1}
β	ضریب انبساط گرمایی
θ	دمای بی‌بعد، $\theta = (T - T_c)/(T_h - T_c)$
μ	لزجت دینامیکی، Pa.s
ν	لزجت سینماتیکی، m^2s^{-1}
ρ	دانسیته، $kg.m^{-3}$
φ	متغیر عمومی
ϕ	نسبت حجمی ذرات جامد

زیرنویس‌ها

b	منبع حرارتی (block)
c	سیال سرد ورودی (cold)
e	خروجی (exit)
f	سیال خالص (fluid)
h	گرم (hot)
i	ورودی (inlet)
m	متوسط (mean)
nf	نانوسیال (nanofluid)
s	نانوذرات (solid)
w	دیوار (wall)

۱۰- مراجع

- [1] Young T., Vafai K., "Convective Cooling of Heated Obstacle in a Channel", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, 1998, pp. 3131-3148.
- [2] Yang M. H., Yeh R. H., Hwang J. J., "Forced Convective Cooling of a Fin in a Channel", *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, 2010, pp. 1277-1286.
- [3] Yang M. H., Yeh R. H., Hwang J. J., "Mixed Convective Cooling of a Fin in a Channel", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, 2010, pp. 760-771.
- [4] Habchi S., Acharya Y., "Laminar Mixed Convection in a Partially Blocked Vertical

علائم لاتین

a	ارتفاع منابع، m
A	ارتفاع بی‌بعد منابع، $A = a/H$
A^*	مساحت بی‌بعد منبع حرارتی، $A^* = w \times a/H^2$
B	نسبت طول به ارتفاع منابع حرارتی، $B = w/a$
g	شتاب جاذبه زمین، ms^{-2}
h	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، $Wm^{-2}K^{-1}$
H	ارتفاع کانال، m
k	ضریب هدایت گرمایی، $Wm^{-1}K^{-1}$
k^*	ضریب هدایت گرمایی بی‌بعد منابع، $k^* = k_b/k_f$
l	طول مشخصه، m
P	فشار، Pa
t	زمان، s
T	دما، K
u	سرعت در جهت x ، ms^{-1}
U	سرعت بی‌بعد در جهت x ، $U = u/u_c$
v	سرعت در جهت y ، ms^{-1}
V	سرعت بی‌بعد 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 پرانتل، $Pr = \nu/\alpha$
Re	عدد رینولدز، $Re = u_c H / \nu$
Ri	عدد ریچاردسون، $Ri = Gr/Re^2$
w	طول منابع، m
W	طول بی‌بعد منابع، $W = w/H$

- [13] Oztop H. F., Abu-Nada E., "Numerical Study of Natural Convection in Partially Heated Rectangular Enclosures Filled with Nanofluids", *Heat Fluid Flow*, Vol. 29, 2008, pp. 1326-1336.
- [14] Shahi M., Mahmoudi A. H., Talebi F., "Numerical Study of Mixed Convection Cooling in a Square Cavity Ventilated and Partially Heated from the Below Utilizing Nanofluid", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, 2010, pp. 201-213.
- [15] Xu D., Pan L., "Numerical Study of Nanofluid Flow and Heat Transfer in Microchannels", *Nanoscience*, Vol. 5, No. 6, 2006, pp. 747-752.
- [16] Koo J., Kleinstreuer C., "Laminar Nanofluid Flow in Microheat-Sinks", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, No. 13, 2005, pp. 2652-2661.
- [17] Jang S. P., Choi S. U. S., "Cooling Performance of a Microchannel Heat Sink with Nanofluids", *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 26, 2006, pp. 2457-2463.
- [18] Santra A. K., Sen S., Chakraborty N., "Study of Heat Transfer Due to Laminar Flow of Copper-Water Nanofluid through Two Isothermally Heated Parallel Plates", *Thermal Sciences*, Vol. 48, No. 2, 2009, pp. 391-400.
- [19] Chein R., Huang G., "Analysis of Microchannel Heat Sink Performance using Nanofluids", *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 25, Nos. 17-18, 2005, pp. 3104-3114.
- [20] Abbassi H., Aghanajafi C., "Evaluation of Heat Transfer Augmentation in a Nanofluid-Cooled Microchannel Heat Sink", *J. Fusion Energy*, Vol. 25, Nos. 3-4, 2006, pp. 187-196.
- [21] Brinkman H. C., "The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solution", *J. Chem. Phys.*, Vol. 20, 1952, pp. 571-581.
- [22] Patel H. E., Pradeep T., Sundarajan T., Dasgupta A., Dasgupta N., Das S. K., "A Micro-Convection Model for Thermal Conductivity of Nanofluid", *Pramana - Journal of Physics*, Vol. 65, No. 5, 2005, pp. 863-869.
- [23] Patankar S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, Washington D. C., 1980.
- Channel", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 29, 1986, pp. 1711-1722.
- [5] Hamouche A., Bessaih R., "Mixed Convection Air Cooling of Protruding Heat Sources Mounted in a Horizontal Channel", *International Communication in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, 2009, pp. 841-849.
- [6] Han J. C., Glicksman L. R., Rohsenow W. M., "An Investigation of Heat Transfer and Friction For Rib-Roughened Surfaces", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 21, 1987, pp. 1134-1156.
- [7] Buller M. L., Kliburn R. F., "Evaluation of Surface Heat Transfer Coefficients for Electronic Module Packages", *Heat Transfer in Electronic Equipment*, ASME HTD, Vol. 20, 1981, pp. 1133-1152.
- [8] Arvizu D. E., Moffat R. J., "The Use of Superposition in Calculating Cooling Requirements for Circuit Board Mounted Electronic Components", *Proceedings of the 32nd Electronic Components Conference*, Sheraton Harbor, USA, IEEE, Vol. 32, 1982, pp. 133-144.
- [9] Dubrovski E. V., Vasiliev V. Y., "Enhancement of Convective Heat Transfer in Rectangular Ducts of Interrupted Surfaces", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 31, 1988, pp. 807-818.
- [10] Manglic R. M., Bergles A. E., "Heat Transfer and Pressure Drop Correlations for the Rectangular Offset Strip Fin Compact Heat Exchangers", *Exp. Thermal and fluid*, Vol. 10, 1995, pp. 171-180.
- [11] Aminossadati S. M., Ghasemi B., "Natural Convection Cooling of a Localized Heat Source at the Bottom of a Nanofluid-Filled Enclosure", *European journal of Mechanics B/fluids*, Vol. 28, 2009, pp. 630-640.
- [12] Jahanshahi M., Hosseinizade S. F., Alipanah A., Dehghani A., Vakilinejad G. R., "Numerical Simulation of Free Convection Based on Experimental Measured Conductivity in a Square Cavity Using Water/Sio₂ Nanofluid", *International Communication in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, 2010, pp. 687-694.