

بررسی عددی جریان و انتقال حرارت جابجایی ترکیبی نانوسیال نیوتنی و غیرنیوتنی در محفظه مربعی باز حاوی چشمه حرارتی

در تحقیق حاضر انتقال حرارت جابجایی ترکیبی نانوسیال نیوتنی و غیر نیوتنی در یک محفظه در حال تهویه با حضور مانع داخلی به صورت دوفازی مورد بررسی قرار گرفته است و نانو سیالات آب- اکسید آلومینیوم و آب- اکسید مس به عنوان سیال عامل در نظر گرفته شده است. معادلات حاکم با استفاده از روش عددی حجم محدود گسسته سازی و با استفاده از روش دوفازی اوپلری- اوپلری حل شده اند. در این پژوهش چشمه حرارتی دارای شارحرارتی ثابت و تمام دیواره های محفظه از نظر حرارتی نیز عایق می باشند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می دهند که در رینولدز ۱۰۰ و گراشف ۱۰^۵، ناسلت متوسط با حضور نانو ذره اکسید مس، ۲۴/۶۱ درصد نسبت به آب خالص افزایش و همچنین با افزایش کسر حجمی نانوذرات از ۲/۰۲ به ۰/۰۵ ناسلت متوسط ۲/۱۱ درصد افزایش می یابد.

محسن مزیدی^۱

استادیار

سیدامیرعباس علومی^۲

استادیار

سیدعلی آقا

میر جلیلی^۳

استادیار

واژه های راهنما: مدل دوفازی، عدد گراشف، چشمه حرارتی داخلی، نانوسیالات نیوتنی و غیرنیوتنی.

۱- مقدمه

افزایش نرخ انتقال حرارت در صنایع مختلفی که دارای تجهیزاتی مانند قطعات الکترونیکی، مبدل های حرارتی، کلکتور های خورشیدی و غیره می باشند، بسیار مورد توجه دانشمندان و محققان قرار گرفته است؛ یکی از روش های جدید افزایش انتقال حرارت در این صنایع، استفاده از نانوسیالات می باشد که در سال های اخیر مطالعات فراوانی به صورت تجربی و ریاضی بروی آن ها صورت گرفته است. از آنجایی که مطالعات تجربی بروی نانوسیالات از هزینه بالایی برخوردار می باشد؛ لذا روش های عددی نیز مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است [۱]، به همین منظور مطالعات بسیار زیادی به صورت تجربی و عددی بروی خواص فیزیکی نانوسیالات مانند ضریب رسانندگی گرمایی [۲-۴]، انتقال حرارت جابه جایی [۵-۸] و خواص رئولوژیکی [۹-۱۰] آن ها نیز انجام شده است. انتقال حرارت جابجایی ترکیبی، از ترکیب جابجایی اجباری و طبیعی حاصل می شود که در صنایع مختلفی نظیر صنایع غذایی، صنایع تولید شیشه، صنایع الکترونیکی (خنک کاری قطعات الکترونیکی) و

^۱ نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد بافق، دانشگاه آزاد اسلامی، بافق، یزد mazidi@bafgh-iau.ac.ir

^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد amiroloomi@iauyazd.ac.ir

^۳ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد saa_mirjalily@iauyazd.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۳/۲۲، تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۲۲

غیره نیز کاربرد گسترده ای دارد [۱۴-۱۱]. اولین مطالعات عددی توسط خانافر^۱ و همکارانش [۱۵] صورت گرفت، که نتایج آن‌ها نشان می‌دهد در یک گراف معین نرخ انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی نانوذرات نیز افزایش می‌یابد. ککاک^۲ و همکارش [۱۶] به بررسی پتانسیل نانوسیال، جهت بهبود انتقال حرارت جابه جایی پرداخته اند و نتایج آن‌ها نشان داد که سرعت لغزشی نانوذرات در سیال پایه، تاثیر بسیار زیادی بر روی انتقال حرارت سیال دارد. محمودی و همکارانش [۱۷]، به شبیه سازی عددی انتقال حرارت جابجایی طبیعی در محفظه های دو بعدی پرداخته اند و همچنین برای تخمین لزجت نانو سیال از مدل برینکمن استفاده کردند که نتایج آن‌ها نشان داد در صورت به کارگیری نانوسیال، افزایش انتقال حرارت جابجایی طبیعی حاصل می‌شود. رحمتی و عباس زاده [۱۸] انتقال حرارت جابه جایی ترکیبی نانوسیال آب- اکسید مس در یک محفظه با دو دیوار متحرک را مورد مطالعه قرار دادند که در این مطالعه معادلات بقا از روش حجم محدود حل و جهت تعیین لزجت و ضریب هدایت حرارتی نانوسیال به ترتیب از مدل های برینکمن [۱۹] و پاتل [۲۰] نیز استفاده شده است.

در یک مطالعه عددی هو و همکارانش [۲۱]، اثرات لزجت دینامیکی و ضریب هدایت حرارتی نانوسیال را بر انتقال حرارت آن در درون محفظه مربعی بررسی و دریافتند که در یک رایلی مشخص، با افزایش درصد غلظت نانوسیال، جریان ناشی از نیروی شناوری نیز کاهش می یابد. در بررسی دیگر پاکروان و یعقوبی [۲۲] تأثیر حرکت نانوذرات را بر جابجایی طبیعی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم مورد بررسی قرار دادند؛ که بر اساس نتایج آن‌ها مشاهده شد سرعت لغزشی بین نانوذرات باعث توزیع ناهمگون نانوذرات می شود. در بررسی دیگری شیخ زاده و همکاران [۲۳] تأثیر مکانیزم های انتقال نانوذرات را بر جابجایی طبیعی نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم در یک محفظه مربعی مورد بررسی قرار دادند که بر اساس نتایج آن‌ها اثر دوفور بر انتقال حرارت قابل صرف نظر کردن می باشد؛ و همچنین، آن‌ها از دو مدل همگن و انتقالی برای ارزیابی خواص نانوسیال استفاده نمودند که نتایج آن‌ها بیان گر کاهش میزان انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی نانوذرات در هر دو مدل می باشد، ولی مدل انتقالی، کاهش بیشتری را نسبت به مدل همگن خواهد داشت. هو^۳ و همکاران [۲۴] در سال (۲۰۱۴) به مطالعه عددی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آب-آلومینیوم در محفظه ای با در نظر گرفتن ته نشینی، حرکت بروانی و ترموفیزیسی نیز پرداخته اند که براساس یافته های آن‌ها در نظر گرفتن نانوسیال به صورت تک فاز فرض دقیقی نمی باشد و رفتار نانوسیال متفاوت از سیال پایه می باشد؛ و همچنین آن‌ها کاهش عدد ناسلت را با افزایش کسر حجمی نانوذرات گزارش کردند. گروسی^۴ و همکاران [۲۵] انتقال حرارت جابه جایی طبیعی و ترکیبی نانوسیال آب-آلومینیوم اکسید را در یک محفظه مربعی با استفاده از مدل بونجیورنو بررسی نمودند که نتایج آن‌ها نشان می دهد برای هر عدد رایلی یک کسر حجمی بهینه وجود دارد که میزان انتقال حرارت در آن بیشینه است و همچنین مشاهده نمودند که در اعداد رایلی کم، توزیع نانوذرات ناهمگن، و در اعداد رایلی بالا، این توزیع به طور تقریبی همگن می باشد.

¹ Khanafer

² Kakac

³ Ho

⁴ Garoosi

اسلامیان و همکاران [۲۶] اثر ترموفرسیس بر جابه جایی طبیعی در یک محفظه مربعی پر شده از نانوسیال را به روش شبکه بولتزمن بررسی نمودند؛ نتایج آنها نشان می دهد که عدد ناسلت با افزایش عدد رایلی و کسر حجمی نانوذرات افزایش می یابد. این افزایش در عدد رایلی 10^6 برای کسر حجمی ۱۰ درصد، کمتر از ۲۰ درصد می باشد و همچنین با در نظر گرفتن پدیده ترموفرسیس عدد ناسلت حدود ۱۰ درصد افزایش می یابد. سلیم افندیگور^۱ و همکارانش [۲۷] در سال (۲۰۱۷) به بررسی انتقال حرارت جابه جایی ترکیبی نانو سیال در یک محفظه مثلثی همراه با چشمه حرارتی پرداختند و نتایج آنها نشان داد که با افزایش عدد ریچاردسون و رایلی، انتقال حرارت محلی و متوسط نیز کاهش می یابد. باندراکو^۲ و همکاران [۲۸] در سال (۲۰۱۹) به بررسی انتقال حرارت جابه جایی آزاد نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در محفظه دارای هیتر پرداختند و مشاهده کردند که افزودن نانوذره می تواند عملیات خنک سازی را بهبود بخشد.

میناکو^۳ و همکاران [۲۹] به بررسی تجربی رفتار رئولوژیکی نانوسیال با سیال پایه اتیلن گلیکول پرداخته و به این نتیجه رسیدند که در اغلب حالت ها نانوسیال رفتار سیال غیرنیوتنی بینگهام از خود نشان می دهند. با توجه به اینکه انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در محفظه ها، کاربردهایی نظیر تهویه مکان های مختلف، خنک کاری تجهیزات الکترونیکی، کلکتورهای خورشیدی و غیره می باشد بنابراین در پژوهش حاضر، به بررسی عددی جریان و انتقال حرارت جابجایی ترکیبی نانوسیال پرداخته شده است که در این مقاله به بررسی جابجایی مخلوط برای نانوسیال آب-آلومینیوم اکسید و مس اکسید درون یک محفظه مربعی دارای تهویه با وجود منبع حرارتی و با استفاده از مدل دو فازی پرداخته شده است و که جهت افزایش سطح چشمه ی حرارتی، در هندسه مورد مطالعه از تعدادی فین استفاده شده است. با توجه به اینکه قطر نانوذرات بروی خواص نانوسیال از جمله ویسکوزیته، موثر می باشد و در تحقیق تجربی آقای میناکو این اثر بررسی و رفتار سیال غیر نیوتنی مشاهده شده است لذا در این تحقیق سیال غیر نیوتنی در نظر گرفته شده و اثرات انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته شده است. همچنین به بررسی نانوسیال با در نظر گرفتن سیال پایه اتیلن گلیکول که رفتار سیال غیرنیوتنی بینگهام را از خود نشان می دهد نیز پرداخته شده که در مطالعات قبلی نیز مشاهده نشده است؛ و در نهایت اثر عدد گرافش، کسر حجمی نانوذرات، عدد رینولدز، نوع نانوسیال و موقعیت های مختلف چشمه مورد بررسی قرار گرفته شده است. از آنجایی که جریان های دوفازی را به دو روش کلی اویلری-لاگرانژی و اویلری-اویلری میتوان مطالعه نمود و با توجه به اینکه در مدلسازی اویلری - لاگرانژی حرکت هر ذره در سیال مورد توجه قرار می گیرد و معادله حرکت برای هر ذره به صورت جداگانه نوشته می شود [۲۲] لذا در مورد نانوسیالات، با توجه به اینکه تعداد ذرات بسیار زیاد می باشد، استفاده از مدل اویلری - لاگرانژی بسیار پرهزینه و با امکانات محاسباتی فعلی غیر ممکن می باشد، ولی در دیدگاه اویلری-اویلری، هر دو فاز به عنوان محیط پیوسته در هم نفوذ کننده، در نظر گرفته می شوند و به دلیل اینکه حجم یک فاز نمی تواند توسط فاز دیگر اشغال شود، مفهوم کسر حجمی فازی وارد معادلات می شود که کسر حجمی فازها به صورت تابعی پیوسته از فضا و مکان تعریف می شوند و همچنین معادلات بقا به منظور به دست آوردن مجموع معادلات حاکم که دارای

¹ Selimefendigil

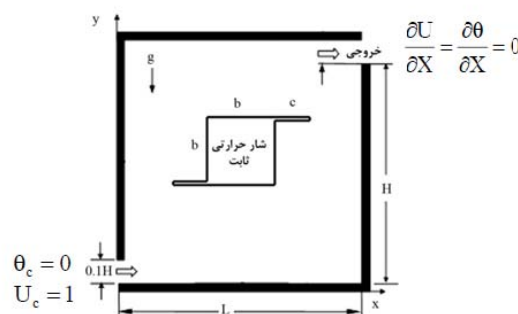
² Bondarenko

³ Minakov

ساختار یکسان برای تمامی فازها هستند، به کار برده می شوند لذا در این مقاله جهت بررسی جریان نانوسیال مدل دوفازی اوپلری - اوپلری (مخلوط) استفاده شده است.

۲- مدل سازی فیزیکی و فرمولاسیون مساله

در هندسه مورد مطالعه، مطابق شکل (۱) ارتفاع دیواره‌ی عمودی حفره H و ارتفاع دیواره‌های افقی آن L در نظر گرفته شده است. اندازه‌ی ورودی و خروجی محفظه معادل 0.1H و همچنین طول فین‌ها C و ضخامت آنها 0.1C فرض شده است. دیواره‌های محفظه آدیاباتیک و چشمة‌ی داخلی دارای شار حرارتی ثابت می‌باشد. خواص ترموفیزیکی آب در دمای ۳۰۰ درجه کلوین و آلومینیوم اکسید و مس اکسید در دمای مرجع در جدول (۱) نشان داده شده است. در مدل مخلوط فرض بر این است که فازها در یکدیگر نفوذ نمی‌کنند و هر فاز میدان سرعتی مخصوص به خود دارد، اما به جای حل معادلات انتقال به صورت جداگانه برای هر یک از فازها، از حل معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی برای ماده مخلوط به همراه یک معادله کسر حجمی استفاده شده است. برای عدد گراشف بین ۱۰۳ و ۱۰۵، و عدد رینولدز بین ۱۰۰ و ۵۰۰ جریان آرام (با توجه به اینکه عدد رینولدز در این بازه در محفظه‌ی تهویه شده و با توجه به مقاله‌های دیگر، آرام می‌باشد) و انتقال حرارت از نوع جابجایی ترکیبی بوده می‌باشد. محفظه مورد استفاده در حقیقت با توجه به اینکه در چکیده هم اشاره شده، تهویه شده می‌باشد.



شکل ۱- هندسه مساله مورد بررسی

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی

خواص ترموفیزیکی	واحد	آب	اتیلن گلیکول	آلومینیوم اکسید	اکسید مس
گرمای ویژه (Cp)	(J/kg.K)	۴۱۷۹	۲۴۱۵	۷۶۵	۵۳۱/۸
چگالی (ρ)	(kg/m ³)	۹۹۷/۱	۱۱۱۴/۴	۳۹۷۰	۶۳۲۰
ضریب هدایت حرارتی (K)	(W/m. K)	۰/۶۱۳	۰/۲۵۲	۴۰	۷۶/۵
لزجت (μ)	(kg/m.s)	۰/۰۰۰۸۹	۰/۰۱۵۷	-	-

خواص مورد استفاده در این معادلات بین خواص سیال (فاز اولیه) و جامد (فاز ثانویه) تشکیل دهنده سوسپانسیون می باشد، بنابراین می توان این معادلات را به صورت زیر نوشت.
معادله پیوستگی مخلوط عبارت است از:

$$\frac{\partial(\rho_m)}{\partial t} + \nabla(\rho_m V_m) = 0 \quad (1)$$

که در آن V_m بردار سرعت متوسط و ρ_m جرمی چگالی مخلوط می باشد.

$$V_m = \frac{\phi \rho_p V_p + (1-\phi) \rho_f V_f}{\rho_m} \quad (2)$$

$$\rho_m = \phi \rho_p + (1 - \phi) \rho_f \quad (3)$$

معادله مومنتوم مخلوط از مجموع معادلات مومنتوم منفرد همه فازها به دست می آید که به صورت زیر بیان می شود [۲۱]:

$$\frac{\partial(\rho_m V_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m V_m V_m) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla V_m + \nabla V_m^T)] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} \quad (4)$$

$$+ \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k V_{dr,k} V_{dr,k} \right)$$

که در آن n تعداد فازها، F نیروی حجمی و μ_m لزجت مخلوط می باشد.

در معادله (۴)، $V_{dr,k}$ سرعت رانشی برای فاز k ام به شکل زیر تعریف می شود:

$$V_{dr,k} = V_{pq} - V_m \quad (5)$$

سرعت نسبی نیز به عنوان اختلاف سرعت فاز ثانویه (p) به سرعت فاز اولیه (q) شناخته می شود؛ که در معادله (۶) بیان شده است:

$$V_{pq} = V_p - V_q \quad (6)$$

رابطه بین سرعت رانشی و سرعت نسبی به شکل زیر می باشد:

$$V_{dr,k} = V_{pq} - \sum_{k=1}^n \frac{\phi_k \rho_k}{\rho_m} V_{qk} \quad (7)$$

در [۱۸] رابطه زیر برای سرعت نسبی ارائه شده است:

$$V_{pq} = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \mu_q f_{drag}} \frac{(\rho_p - \rho_m)}{\rho_p} \vec{a} \quad (8)$$

که در این رابطه قطر ذرات فاز ثانویه p و a شتاب ذرات فاز ثانویه است.

تابع درگ $d_p f_{drag}$ از رابطه چیلرونامن^۱ [۳۰] به صورت زیر بیان شده است:

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 Re^{0.687} & Re \leq 1000 \\ 0.0183 Re & Re > 1000 \end{cases} \quad (9)$$

شتاب a به شکل زیر است:

$$\vec{a} = \vec{g} - (V_m \cdot \nabla) V_m - \frac{\partial V_m}{\partial t} \quad (10)$$

معادله انرژی برای مخلوط سوسپانسیونی به شکل زیر است [۲۷]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\phi_k \vec{V}_k (\rho_k E_k + P)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (11)$$

در معادله (۱۱) E_k برای یک فاز تراکم پذیر برابر است با:

¹ Schiller and Naumann

$$E_k = h_k - \frac{P}{\rho_k} + \frac{V_k^2}{2} \quad (12)$$

برای یک فاز تراکم ناپذیر $E_k = h_k$ است.

برای محاسبه ضریب هدایت گرمایی موثر از مدل پاتل [۲۰] استفاده شده است:

$$\frac{K_{eff}}{K_f} = 1 + \frac{K_p A_p}{K_f A_f} + C k p P e \frac{A_p}{K_f A_f} \quad (13)$$

$$\frac{A_p}{A_f} = \frac{d_f \phi}{d_p (1-\phi)} p e = \frac{u_p d_p}{a_f} \quad u_p = \frac{2 T K B}{\pi \mu_f d_p^2} \quad (14)$$

d_p قطر ذرات جامد که در تحقیق حاضر برابر ۱۵۰ نانومتر در نظر گرفته شده و d_f نشانگر قطر مولکولی سیال پایه است. u_p نشان دهنده سرعت حرکت براونی ذرات و K_B ثابت بولتزمن^۱ می‌باشد. C ضریبی تجربی است.

برای محاسبه لزجت موثر از مدل کورسیون^۲ [۳۱] استفاده شده است:

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_f} = \frac{1}{1 - 34.87(d_p/deq)^{-0.3} \phi^{1.03}} \quad (15)$$

ناسلت موضعی روی یک دیواره عمودی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Nu_s(Y) = - \frac{1}{\theta_s(X)} \frac{\partial \theta_s}{\partial X} \quad (16)$$

برای به دست آوردن ناسلت کلی داریم:

$$Nu_m = \frac{\int Nu_s(Y) dY}{\int dY} \quad (17)$$

برای ضریب انبساط حرارتی موثر داریم [۱۵]:

$$\beta_{eff} = \left(\frac{1}{1 + \frac{\phi \rho_p}{(1-\phi) \rho_f}} + \frac{p \beta}{1 + \frac{(1-\phi) f \beta_f \rho}{\phi \rho_p}} \right) \beta_f \quad (18)$$

در ارتباط با دمای بی‌بعد داریم:

$$\theta = \frac{T - T_c}{\Delta T} \quad (19)$$

با توجه به اینکه در این تحقیق چشمه‌ی حرارتی دارای شار حرارتی سطحی می‌باشد در ارتباط با دما رابطه‌ی زیر استفاده شده است:

$$\Delta T = \frac{\dot{q} L}{K_f} \quad (20)$$

اعداد بدون بعد گراشپف، رینولدز، پرانتل و رایلی طبق رابطه‌ی زیر تعریف می‌شوند:

$$Ra = Gr \cdot Pr, \quad Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f}, \quad Re = \frac{\rho_f u_i L}{\mu_f}, \quad Gr = \frac{g \beta_f \Delta T L^3}{\nu_f^2} \quad \Delta T = \frac{\dot{q} L}{K_f} \quad (21)$$

۳- شرایط مرزی

برای به دست آوردن جواب یگانه یک معادله دیفرانسیل پاره‌ای به مجموعه‌ی از شرایط مکمل نیاز است تا توابع اختیاری حاصل از انتگرال‌گیری معادله دیفرانسیل پاره‌ای را معین کرد؛ شرایط مرزی روی دیوارهای محفظه مطابق رابطه (۲۲) می‌باشد.

$$X=0, 0 \leq Y \leq 0.1 H \quad U=\theta=1, V=0 \quad (22)$$

$$X=0, 0.1 H \leq Y \leq 1 \quad U=V=\frac{\partial \theta}{\partial X} = 0$$

¹ Boltzman

² Corcione

$$Y=0, 1, 0 \leq X \leq 1 \quad U=V=\frac{\partial \theta}{\partial Y}=0$$

$$X=1, 0, 0 \leq Y \leq 1-0.1H \quad U=V=\frac{\partial \theta}{\partial X}=0$$

$$X=1, 1-0.1H \leq Y \leq 1 \quad \frac{\partial U}{\partial X} = \frac{\partial \theta}{\partial X} = V = 0$$

شرایط مرزی روی سطوح منبع حرارتی مطابق رابطه (۲۳) می باشد:

$$U=V=0 \quad (23)$$

$$\theta_{nf} = \theta_s$$

$$k_{nf} \left(\frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_{nf} = k_s \left(\frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_s$$

شرایط اولیه مسئله در زمان صفر به صورت رابطه ی زیر قابل بیان است:

$$U=V=0, T=TC \quad (24)$$

۴- روش عددی و اعتبارسنجی نتایج

در تحقیق حاضر، معادلات انرژی، پیوستگی و ممنتوم به همراه شرایط مرزی، بوسیله روش عددی حجم محدود^۱ با سیستم شبکه جابجا شده، به صورت عددی با استفاده از نرم افزار تجاری انسیس فلونت^۲ نیز حل شده اند. برنامه ی کامپیوتری براساس الگوریتم سیمپلکس^۳ به حل همزمان معادلات انفصال می پردازد و همچنین جهت گسسته سازی معادلات مومنتوم و انرژی از روش قانون توان^۴ و برای معادله کسر حجمی از روش کوچک^۵ استفاده شده است. معیار همگرایی در این بررسی به کمتر از 10^{-6} نیز محدود شده است. در این پژوهش دیواره های جسم به همراه درگاه خروجی آدیاباتیک، چشمه ی داخلی دارای شار حرارتی ثابت و سیال ورودی در دمای ۳۰۰ درجه کلوین، نیز فرض شده است و برای شرط هیدرودینامیکی نیز، هر دو فاز با توجه به عدد رینولدز ورودی با سرعت یکسان وارد محفظه می شوند. به منظور دستیابی به شبکه بندی مناسب و مطمئن، و نیز یافتن حل مستقل از شبکه، نتایج مربوط به ناسلت جریان، برای چند نمونه شبکه بندی مختلف با یکدیگر مقایسه شده اند. برای شبکه بندی، هر ناحیه به صورت غیر یکنواخت گره گذاری گردیده است. روش متداول به این صورت است که تعداد گره های شبکه را افزایش داده، و تاثیر آن را بر متغیرهای وابسته ای همچون سرعت، دما و ناسلت جریان نیز بررسی می گردد. میزان تغییرات در این متغیرها، در اثر افزایش تعداد گره ها نیز ناچیز می شود به طوری که می توان بیان کرد که نتایج حل به شبکه بندی وابسته نمی باشد که برای جستجو شبکه ی بهینه و اطمینان از عدم وابستگی نتایج به اندازه شبکه، تغییرات ناسلت متوسط چشمه حرارتی در $Re=100$ ، $Gr=10^5$ - آلومینیوم اکسید و درصد غلظت حجمی ۰/۰۵ بررسی شده است. مطابق با جدول (۲)، با مقایسه نتایج ارائه شده بهترین گزینه برای رسیدن به حل مستقل از شبکه و در عین حال کمترین زمان محاسبات، تراکم 83×80 تشخیص داده شده است که در شکل (۲) نمایی از شبکه حل نشان داده شده است.

¹ Finite Volume

² Ansys Fluent

³ Simplex

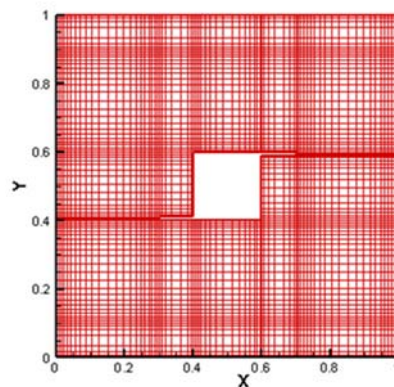
⁴ Power law

⁵ Quick

در این مقاله جهت اطمینان از صحت حل عددی، نتایج حاضر با نتایج تحقیقات گذشته نیز مقایسه شده است. عدد ناسلت متوسط مربوط به کار حاضر با نتایج تجربی هو و همکاران [۲۱] برای آب خالص مقایسه شده است که در جدول (۳) نشان داده شده است و در صحت سنجی دیگر مقادیر عدد ناسلت متوسط کار حاضر با نتایج کار عددی گروسی و همکاران [۲۵] مقایسه شده است که در جدول (۴) نشان داده شده است. با توجه به جداول (۳) و (۴)، اختلاف نتایج مربوط به کار حاضر با نتایج گزارش شده در کارهای قبلی نیز ناچیز است.

جدول ۲- ارزیابی استقلال شبکه

تعداد نقاط	Nu_m
42×48	۱۹/۳۵۵۶۵
63×65	۱۸/۹۶۵۵۶
80×83	۱۸/۸۵۵۵۶
94×98	۱۸/۸۵۱۱۵



شکل ۲- نمایی از شبکه حل

جدول ۳- مقایسه عدد ناسلت متوسط کار حاضر با کار آزمایشگاهی هو و همکاران [۲۱]

در مقادیر مختلف اعداد رایلی برای آب خالص

در صد اختلاف	هو و همکاران	کار حاضر	عدد رایلی
۰/۶۵	۷/۶۹	۷/۷۴	$7/6 \times 10^5$
۰/۲۱	۹/۴۴	۹/۴۶	$1/42 \times 10^6$
۰/۲۹	۱۰/۳۵	۱۰/۳۸	$1/93 \times 10^6$
۰/۹۸	۱۱/۲۸	۱۱/۳۹	$2/67 \times 10^6$

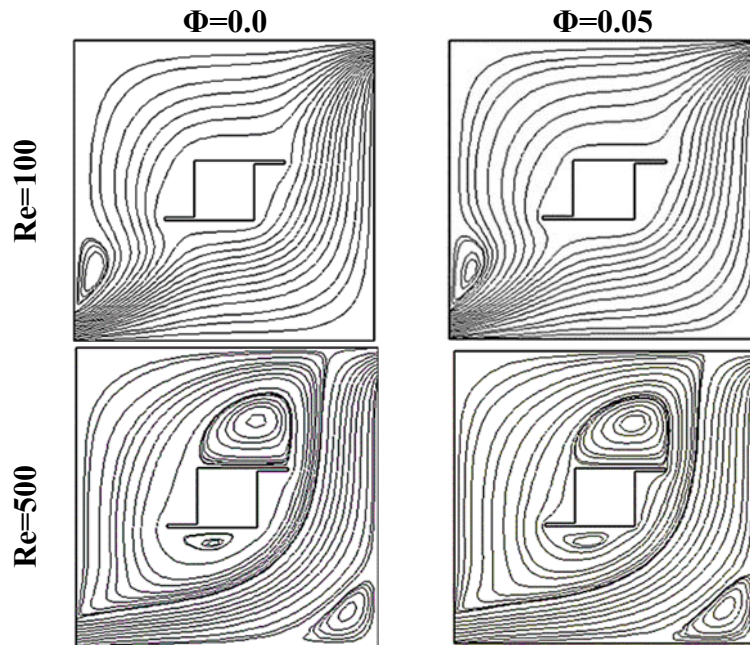
جدول ۴ - مقایسه عدد ناسلت متوسط کار حاضر با کار عددی گروسی و همکاران [۲۵]در رایلی 10^5 برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم

کسر حجمی	کار حاضر	گروسی و همکاران	درصد اختلاف
۰/۰۰	۴/۷۹	۴/۷۶	۰/۶۳
۰/۰۱	۴/۹۴	۴/۹۶	۰/۶
۰/۰۲	۴/۹۹	۵/۰۰	۱/۲

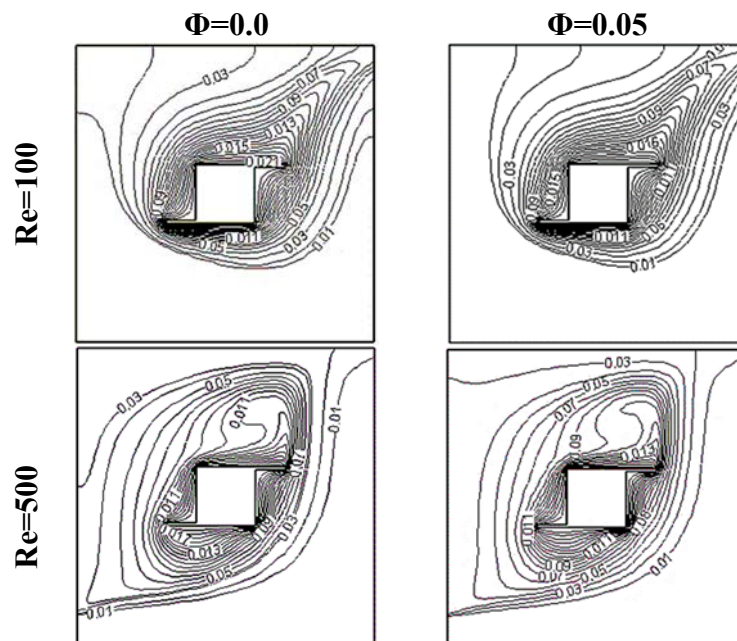
۵- بررسی نتایج

شکل (۳) مربوط به خطوط جریان در رینولدزهای ۱۰۰ و ۵۰۰ می‌باشد؛ همان گونه که در شکل خطوط جریان مربوط به رینولدز ۱۰۰ مشاهده می‌شود خطوط جریان، تا حدی در حالت آب خالص و نانوسیال آب-آلومینیوم اکسید مشابه می‌باشند، ولی در رینولدز ۱۰۰، در حالت نانوسیال به علت نفوذ بهتر در عمق محفظه و تمایل نانوسیال به حرکت خزشی بیشتر نسبت به آب خالص، مانع تشکیل گردابه‌های بزرگ می‌شود، بنابراین گردابه‌های ایجاد شده تا حدی کوچکتر از آب خالص می‌باشد. با توجه به خطوط جریان در رینولدز ۵۰۰ شکل خطوط نسبت به رینولدز ۱۰۰ تغییر کرده است؛ با توجه به شکل در گوشه ی سمت راست گردابه‌هایی تشکیل شده است و همچنین به علت حضور فین در دو طرف چشمه گردابه‌هایی در قسمت بالا و پایین چشمه بوجود آمده است، به طور کلی بین خطوط جریان در حالت نانوسیال و در حالت آب خالص تفاوت چندانی مشاهده نمی‌شود، ولی با توجه به شکل خطوط جریان حول چشمه نیز در حالت نانوسیال نسبت به آب خالص تا حدی دارای انحراف می‌باشد. با توجه به شکل (۴) که خطوط دما ثابت را در رینولدزهای ۱۰۰ و ۵۰۰ و در گراش 10^5 نشان می‌دهد، مقادیر دمایی این خطوط نشان‌گر بهبود انتقال حرارت محفظه در اثر استفاده از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم می‌باشد که در رینولدز ۱۰۰ همانطور که مشاهده می‌شود برخی از خطوط دما ثابتی که چشمه حرارتی را دور زده اند، تا دهانه خروجی کشیده شده‌اند و در رینولدز ۵۰۰ شکل خطوط دما ثابت به طور کامل تغییر کرده به طوری که توزیع آنها پیرامون چشمه حرارتی به صورت دایره‌ای و منظم‌تر می‌باشند. شکل‌های (۵) و (۶) که بیانگر تغییرات ناسلت متوسط در رینولدزهای ۱۰۰ و ۵۰۰ می‌باشند؛ با افزایش کسر حجمی نانو ذرات معلق در سیال پایه ضریب هدایت حرارتی نانوسیال نیز افزایش می‌یابد و پخش بهتری در حرارت صورت می‌گیرد که عدد ناسلت و میزان انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد. در رینولدز ۱۰۰ و در گراش 10^3 در حالت آب خالص، ناسلت متوسط برابر $16/84$ ، و در غلظت $0/05$ ، به عدد $17/96$ می‌رسد که در واقع ناسلت $6/65$ درصد نیز افزایش می‌یابد؛ و در رینولدز ۵۰۰ و گراش 10^4 ، در حالت آب خالص ناسلت برابر $17/39$ و در حالت غلظت $0/05$ ، برابر $18/35$ می‌باشد که $5/52$ درصد افزایش می‌یابد. در رینولدز ۵۰۰ برخلاف رینولدز ۱۰۰، افزایش گراش سبب کاهش ناسلت می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود در گراش 10^5 و در غلظت $0/05$ ، ناسلت برابر $18/25$ و در گراش 10^3 برابر $18/42$ می‌باشد. با توجه به شکل‌های خطوط جریان، در رینولدز ۵۰۰ گردابه‌هایی بزرگ، نسبت به رینولدز ۱۰۰ تشکیل می‌شود؛ که این گردابه‌ها مانع انتقال حرارت از چشمه می‌شوند.

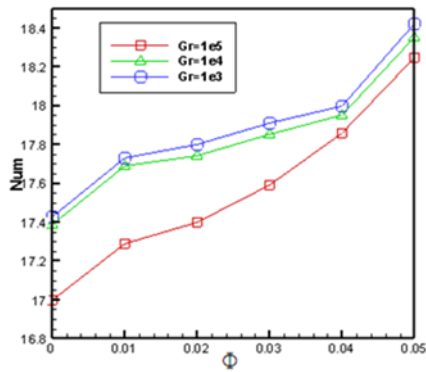
در این تحقیق، می‌توان به حضور فین جهت بهبود انتقال حرارت اشاره نمود؛ که در رینولدز ۱۰۰ و در گراشف 10^4 ، برای آب خالص، ناسلت متوسط در حالت بدون فین برابر با $14/8$ و در حالت حضور فین برابر با $17/01$ می‌باشد که ناسلت $14/93$ درصد نیز افزایش می‌یابد.



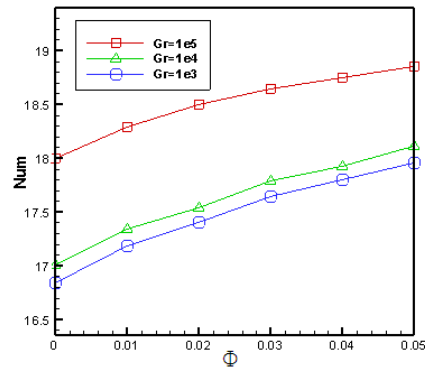
شکل ۳- مقایسه خطوط جریان بین سیال خالص و نانوسیال آب- آلومینیوم اکسید در اعداد رینولدز مختلف



شکل ۴- مقایسه خطوط دما ثابت بین سیال خالص و نانوسیال در اعداد رینولدز مختلف



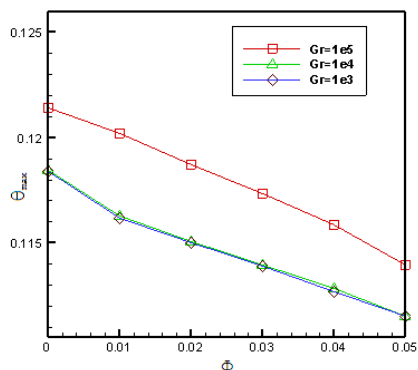
شکل ۶- تغییرات ناسلت متوسط چشمه در رینولدز ۵۰۰



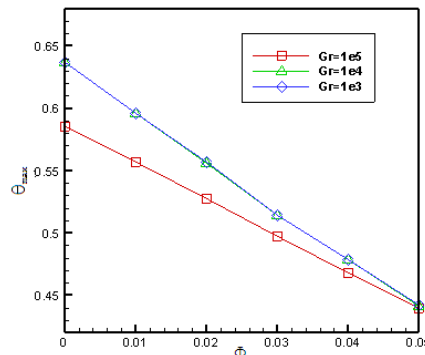
شکل ۵- تغییرات ناسلت متوسط چشمه در رینولدز ۱۰۰

در شکل‌های (۷) و (۸) دمای ماکزیمم محفظه، در رینولدزهای ۱۰۰ و ۵۰۰ و در گراش‌های مختلف نشان داده شده است؛ همان گونه که در قسمت‌های قبل اشاره شد، افزایش غلظت نانوذرات سبب بهبود انتقال حرارت می‌شود، و یا به عبارتی دیگر، براساس شکل‌های زیر با افزایش غلظت نانوذرات دمای ماکزیمم محفظه نیز کاهش می‌یابد. با توجه به شکل (۷) با افزایش گراش، دمای ماکزیمم محفظه نیز کاهش می‌یابد که عامل مناسبی در بهبود انتقال حرارت می‌باشد. این نتیجه در شکل (۶) قابل مشاهده می‌باشد، به گونه‌ای که با افزایش گراش ناسلت متوسط افزایش یافته است.

با توجه به شکل (۸)، با افزایش رینولدز جریان، انتقال حرارت جابجایی اجباری نیز افزایش می‌یابد، که خود عامل مناسبی در کاهش دمای محفظه نسبت به رینولدز پایین‌تر می‌باشد؛ ولی همان گونه که در شکل مشاهده می‌شود برخلاف شکل (۷)، افزایش گراش سبب افزایش دمای محفظه می‌شود و در رینولدزهای بالا افزایش گراش سبب افزایش جابجایی طبیعی در محفظه می‌شود که این افزایش نیز سبب تضعیف جابجایی مخلوط می‌شود. همان طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، افزایش گراش سبب کاهش ناسلت متوسط چشمه‌ی حرارتی می‌شود؛ بنابراین، افزایش گراش در رینولدزهای بالا عامل مناسبی برای بهبود انتقال حرارت در محفظه نمی‌باشد.

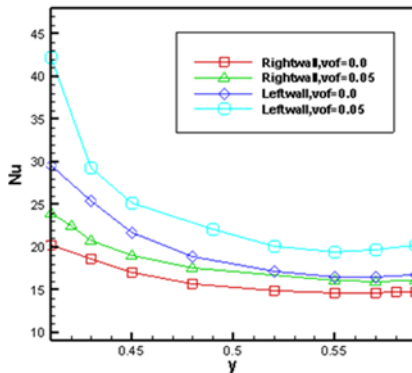


شکل ۸- تغییرات دمای بیشینه‌ی محفظه به ازای غلظت‌های مختلف آب-آلمینیوم اکسید در رینولدز ۵۰۰

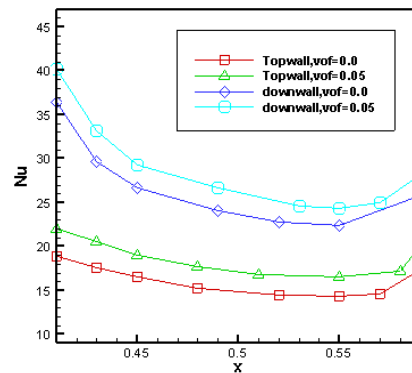


شکل ۷- تغییرات دمای بیشینه‌ی محفظه به ازای غلظت‌های مختلف آب-آلمینیوم اکسید در رینولدز ۱۰۰

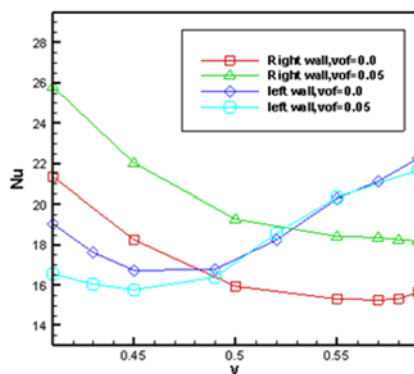
در شکل (۹) به بررسی توزیع ناسلت روی دیواره‌های افقی و در شکل (۱۰) به بررسی توزیع ناسلت روی دیواره‌های عمودی چشمه پرداخته شده است. براساس نمودارها استفاده از نانوسیال موجب افزایش ناسلت بر روی تمام دیواره‌های چشمه‌ی حرارتی می‌شود و براساس شکل‌ها توزیع ناسلت روی دیواره‌های جنوبی و غربی، نسبت به دیواره‌های شمالی و شرقی نیز بیشتر شده است؛ و دیواره‌های غربی و جنوبی در معرض مستقیم جریان قرار داشته که این عاملی مناسب جهت جریان بهتر و آزاد سیال بر روی این دیواره‌ها می‌باشد که خود عامل بسیار تاثیر گذاری بروی ناسلت موضعی این دیواره‌ها می‌باشد. با توجه به اینکه دیواره‌های شرقی و شمالی در معرض مستقیم جریان قرار ندارد، نه تنها ناسلت موضعی این دیواره‌ها کمتر از سایر دیواره‌ها بوده، بلکه دمای سیال هم در این نقاط بالاتر از سایر نقاط بوده است. با مشاهده‌ی خطوط جریان و دما می‌توان بهتر به این موضوع پی برد.



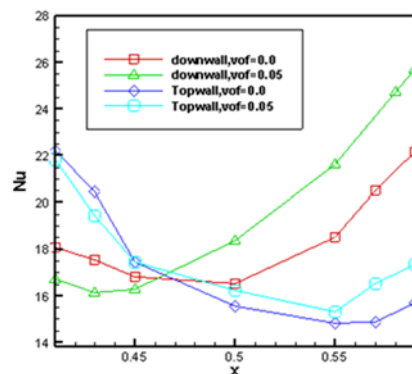
شکل ۱۰- توزیع ناسلت روی دیواره-های عمودی چشمه‌ی حرارتی در رینولدز ۱۰۰ و گراشف ۱۰^۵



شکل ۹- توزیع ناسلت روی دیواره‌های افقی چشمه‌ی حرارتی در رینولدز ۱۰۰ و گراشف ۱۰^۵



شکل ۱۲- توزیع ناسلت روی دیواره-های عمودی چشمه‌ی حرارتی در رینولدز ۵۰۰ و گراشف ۱۰^۵



شکل ۱۱- توزیع ناسلت روی دیواره-های افقی چشمه‌ی حرارتی در رینولدز ۵۰۰ و گراشف ۱۰^۵

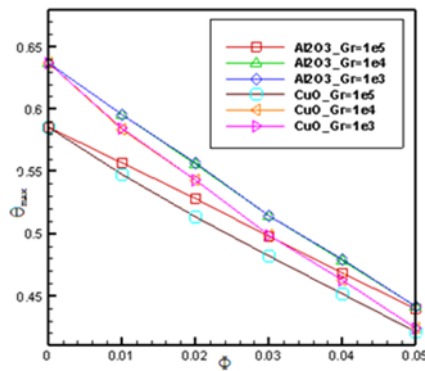
در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به بررسی ناسلت موضعی بروی دیواره‌های افقی و عمودی، برای آب و نانوسیال آب-آلومینیوم اکسید، در رینولدز ۵۰۰ و گراشف 10^5 پرداخته شده است. با توجه به شکل (۱۰)، توزیع ناسلت در نقاط ابتدایی دیواره‌های بالایی و پایینی چشمه، در حالت نانوسیال از آب خالص نیز کمتر می‌باشد؛ ولی در نهایت ناسلت این دیواره‌ها در حالت نانوسیال، بیشتر از حالت آب خالص می‌باشد. با توجه به شکل توزیع ناسلت (با صرف نظر از قسمت ابتدایی)، در دیواره‌ی پایینی از دیواره بالایی بیشتر می‌باشد؛ که با توجه به مطالب ذکر شده، دیواره‌ی پایینی در تماس مستقیم جریان سیال قرار دارد که همین، عامل اساسی در بهبود ناسلت در این دیواره می‌باشد. نانوسیال نیز سبب افزایش جابجایی طبیعی می‌شود؛ با توجه به شکل خطوط جریان در رینولدز ۵۰۰، گردابه‌هایی بزرگ در اطراف چشمه به وجود آمده و به طور کلی الگوی جریان نسبت به رینولدز پایین تغییر کرده است. در قسمت‌هایی از دیواره، که جابجایی طبیعی با جابجایی اجباری هم جهت می‌باشد، نانوسیال دارای عملکرد بهتری نسبت به سیال خالص را می‌باشد ولی در غیر این صورت عملکرد سیال خالص نیز بهتر می‌باشد.

با توجه به شکل (۱۲)، توزیع ناسلت در دیواره‌ی سمت راست، در حالت نانوسیال دارای مقادیر بالاتری نسبت به آب خالص می‌باشد؛ ولی در دیواره‌ی سمت چپ توزیع ناسلت در بیشتر نقاط در حالت آب خالص نسبت به نانوسیال بیشتر می‌باشد. با توجه به موارد اشاره شده در فوق به دلیل هم جهت بودن جریان جابجایی طبیعی با جابجایی اجباری در دیواره‌ی سمت راست، عملکرد نانو سیال نسبت به سیال خالص بهتر می‌باشد؛ ولی در اکثر نقاط دیواره‌ی سمت چپ، به دلیل هم جهت نبودن جابجایی طبیعی و جابجایی اجباری، عملکرد سیال خالص از نانوسیال بهتر می‌باشد.

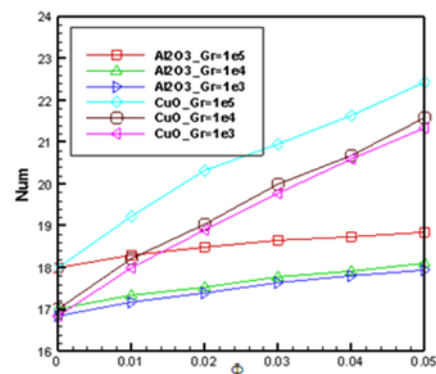
۵-۱- تاثیرات نوع نانوسیال

در این قسمت به بررسی تاثیر نوع نانو ذره بروی انتقال حرارت نانوسیال می‌پردازیم. با توجه به اینکه افزودن نانوذرات به سیال پایه باعث افزایش در انتقال حرارت آن می‌شود اما نانوذرات، از نظر میزان افزایش انتقال حرارت تفاوت‌های قابل توجهی با یکدیگر دارند. در شکل (۱۳) ناسلت متوسط برای چشمه‌ی حرارتی برای دو نانو سیال آب - اکسید مس و آب - آلومینیوم اکسید در رینولدز ۱۰۰ و گراشف‌های 10^4 ، 10^3 و 10^5 نشان داده شده است؛ همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر ناسلت متوسط نانوسیال آب - اکسید مس، نسبت به آب-آلومینیوم اکسید نیز بیشتر می‌باشند.

ناسلت متوسط آب خالص در گراشف 10^5 برابر ۱۸ و در صورت افزودن نانوذره اکسید مس با غلظت ۰/۰۵ برابر ۲۲/۴۳ می‌شود که ناسلت، معادل ۲۴/۶۱ درصد افزایش می‌یابد؛ در حالی که برای نانوسیال آب - آلومینیوم اکسید در غلظت ۰/۰۵ برابر ۱۸/۸۵ که معادل ۴/۷۲ درصد ناسلت افزایش می‌یابد که این میزان افزایش به طور عمومی برای بقیه‌ی مقادیر گراشف و رینولدز دیده می‌شود که نشان دهنده‌ی تاثیر نوع نانوذره در نحوه‌ی انتقال حرارت می‌باشد. با توجه به خواص ارائه شده در جدول (۱)، ضریب هدایت حرارتی اکسید مس تقریباً ۱/۹ برابر اکسید آلومینیوم می‌باشد. با توجه به اینکه بالا بودن ضریب هدایت حرارتی نانوذرات باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی مخلوط نانوسیال می‌شود، بنابراین نانو ذره‌ی مس اکسید به دلیل داشتن ضریب هدایت حرارتی بالا، انتقال حرارت بیشتری نسبت به آلومینیوم اکسید دارد.



شکل ۱۴- مقایسه‌ی دمای بیشینه‌ی محفظه برای نانو سیالات آب-آلومینیوم اکسید و آب-اکسید مس در رینولدز ۱۰۰



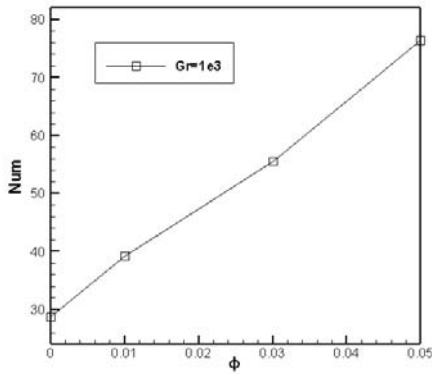
شکل ۱۳- مقایسه‌ی ناسلت متوسط چشمه حرارتی برای نانوسیالات آب-آلومینیوم اکسید و آب-اکسید مس در رینولدز ۱۰۰

شکل (۱۴) دمای بیشینه‌ی محفظه را به ازای غلظت‌های مختلف نانوسیال در رینولدز ۱۰۰ نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود دمای بیشینه‌ی محفظه، در اثر به کار گیری نانوذرات مس اکسید نیز نسبت به آلومینیوم اکسید کاهش بیشتری دارد. در اثر استفاده‌ی مس اکسید، انتقال حرارت و یا به عبارتی ناسلت، نسبت به آلومینیوم اکسید افزایش می‌یابد. بنابراین نانو ذرات مس اکسید کارایی بهتر در انتقال حرارت و کاهش دمای ماکزیمم محفظه نسبت به آلومینیوم اکسید دارند.

۵-۲- بررسی نانوسیال با سیال پایه اتیلن گلیکول

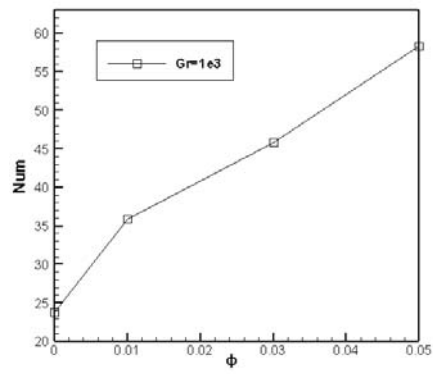
در این بخش به بررسی نانوسیال با در نظر گرفتن سیال پایه اتیلن گلیکول، که رفتار سیال غیرنیوتنی بینگهام را از خود نشان می‌دهد نیز پرداخته شده است. که در این حالت نانوسیال با قطر نانوذرات ۱۵۰ نانومتر و تنش اولیه ۰/۳۸ پاسکال در نظر گرفته شده است. شکل‌های (۱۵) و (۱۶) که بیانگر تغییرات ناسلت متوسط در رینولدزهای ۱۰۰ و ۵۰۰ می‌باشند؛ نشان می‌دهند که با افزایش کسر حجمی نانو ذرات معلق در سیال پایه ضریب هدایت حرارتی نانوسیال افزایش می‌یابد و پخش بهتری در حرارت صورت می‌گیرد بنابراین ناسلت و میزان انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد؛ با توجه به شکل‌ها، در رینولدز ۱۰۰ و در گراش ۱۰^۳ در حالت اتیلن گلیکول خالص، ناسلت متوسط برابر ۲۳/۷۵، و در غلظت ۰/۰۵، به عدد ۵۸/۳۶ می‌رسد که در واقع ناسلت ۵۹/۳ درصد نیز افزایش می‌یابد؛ و در رینولدز ۵۰۰ و گراش ۱۰^۳، در حالت اتیلن گلیکول خالص ناسلت برابر ۲۸/۷۴ و در حالت غلظت ۰/۰۵، برابر ۷۶/۳۴ می‌باشد که ۶۲/۳۵ درصد افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج ارائه شده در این حالت نسبت به سیال پایه آب خالص انتقال حرارت بهتری نیز صورت گرفته است.

در این قسمت در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) به بررسی خطوط ورتیسیته در رینولدز ۱۰۰ و ۵۰۰ و گراش ۱۰^۵ پرداخته شده است. در رینولدز ۵۰۰ تراکم خطوط ورتیسیته در اطراف چشمه حرارتی نسبت به رینولدز ۱۰۰ بیشتر می‌باشد. طول خطوط ورتیسیته در قسمت ورودی در رینولدز ۵۰۰ نسبت به رینولدز ۱۰۰ بیشتر می‌باشد. در رینولدز ۱۰۰ خطوط ورتیسیته در اطراف چشمه حرارتی به نحوی که برخی در قسمت بالای چشمه و برخی در قسمت پایین قرار گرفته است.



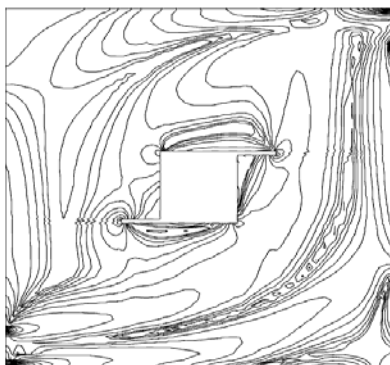
شکل ۱۶- ناسلت متوسط چشمه حرارتی برای

نانوسیالات اتیلن گلیکول-آلومینیوم اکسید در رینولدز ۵۰۰



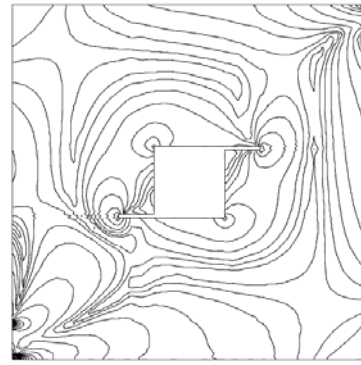
شکل ۱۵- ناسلت متوسط چشمه حرارتی برای

نانوسیالات اتیلن گلیکول-آلومینیوم اکسید در رینولدز ۱۰۰



شکل ۱۸- خطوط ورتیسیتته چشمه حرارتی برای

نانوسیالات اتیلن گلیکول-آلومینیوم اکسید با در صد حجمی ۰,۰۵ در رینولدز ۵۰۰



شکل ۱۷- خطوط ورتیسیتته برای نانوسیالات اتیلن

گلیکول-آلومینیوم اکسید با در صد حجمی ۰,۰۵ در رینولدز ۱۰۰

۵-۳- بررسی موقعیت‌های مختلف چشمه

در این قسمت به بررسی موقعیت مناسب چشمه می‌پردازیم؛ به طوری که موقعیت مناسب موقعیتی است که در آن چشمه دارای کمترین مقدار بیشترین دما نیز می‌باشد. قرار دادن منبع داخلی در موقعیتی که در معرض بیشتر نانوسیال قرار دارد نیز حائز اهمیت می‌باشد؛ زیرا در حالتی که چشمه حرارتی در مرکز محفظه قرار دارد عمده‌ی حجم نانوسیال ورودی بدون تاثیر مستقیم بر چشمه‌ی حرارتی، محفظه را ترک می‌کند.

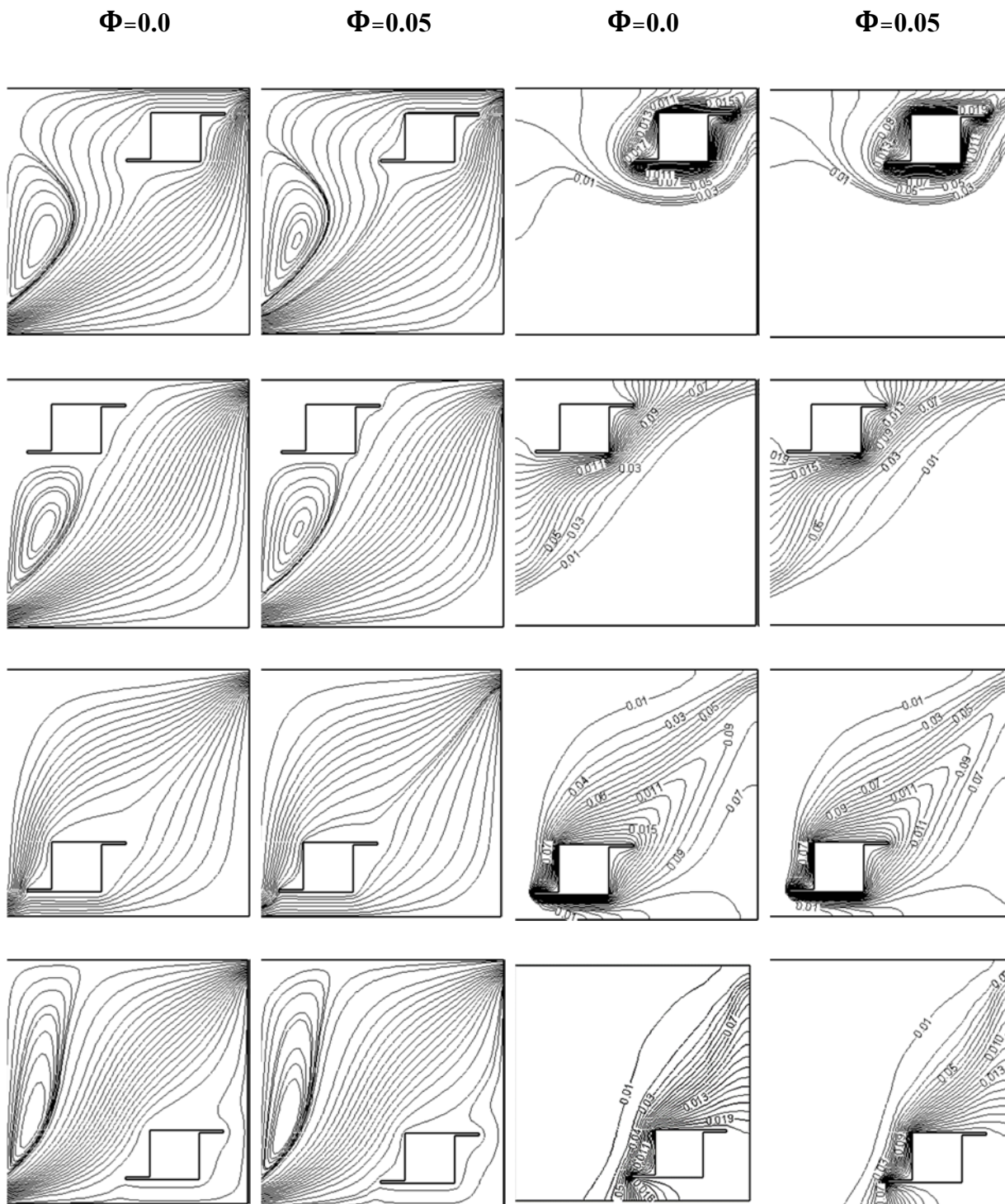
شکل (۱۹) خطوط جریان و دما ثابت سیال خالص و نانوسیال آب-آلومینیوم اکسید در رینولدز ۱۰۰ و گراف ۱۰۵ برای چهار موقعیت چشمه حرارتی را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۱۹-A) چشمه در مسیر جریان قرار داشته که باعث بهبود در انتقال حرارت و کاهش دمای محفظه می‌شود. در این حالت گردابه‌هایی در قسمت چپ محفظه ایجاد می‌شود که این خطوط چشمه را احاطه کرده‌اند. با توجه به شکل (۱۹-B) عمده‌ی خطوط جریان از کنار چشمه و مقدار ناچیزی از سمت چپ آن عبور کرده است و گردابه‌هایی در زیر آن نیز تشکیل شده است. خطوط دمایی آن برخلاف مکان قبلی اطراف چشمه را احاطه نکرده است. در شکل (۱۹-C) نانوسیال در ابتدا ورود به محفظه با چشمه مواجه شده و از قسمت پایین و چپ چشمه عبور می‌کند.

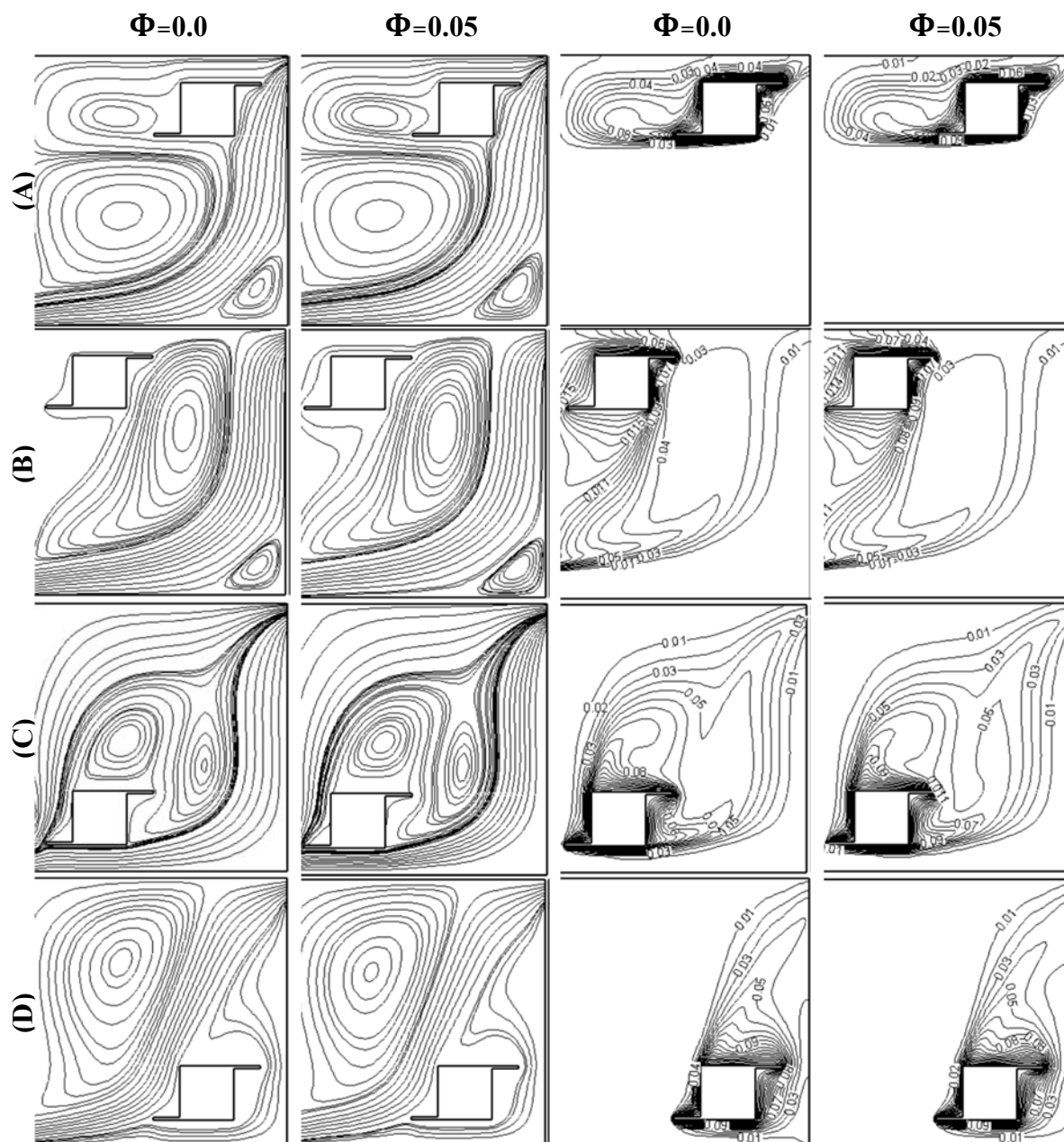
با توجه به شکل خطوط دما ثابت، این خطوط تا خروجی محفظه کشیده شده و با توجه به موقعیت چشمه قسمت پایین و چپ چشمه که در مسیر مستقیم جریان قرار دارد نیز خنک‌تر می‌باشد. شکل (۲۰) خطوط جریان و دما ثابت سیال خالص و نانوسیال آب-آلومینیم اکسید، در رینولدز ۵۰۰ و گراش ۱۰^۵ برای چهار موقعیت چشمه حرارتی نشان داده شده است. در موقعیت (A-۲۰) با توجه به افزایش عدد رینولدز، در درون محفظه گردابه‌هایی تشکیل شده است و با توجه به موقعیت چشمه جریان کل جسم را فرا گرفته و اطراف جسم بوسیله خطوط دمایی نیز احاطه شده است. در موقعیت (B-۲۰) عمده‌ی جریان از قسمت پایین جسم عبور کرده و گردابه‌هایی در اطراف آن ایجاد شده و خطوط دمایی بر خلاف رینولدز ۱۰۰ اطراف جسم را احاطه کرده است. در موقعیت (C-۲۰) با توجه به اینکه جسم در مسیر ورودی جریان قرار دارد عمده‌ی جریان از قسمت پایین و چپ جسم عبور کرده و خطوط دما ثابت اطراف جسم را احاطه کرده و تا خروجی محفظه کشیده شده است. در موقعیت (D-۲۰) قسمت عمده‌ی جریان از بالای جسم عبور کرده است و همچنین خطوط دمایی اطراف جسم را احاطه کرده و تا خروجی نیز ادامه دارد.

در جدول (۵) به بررسی دمای ماکزیمم محفظه در موقعیت‌های ذکر شده پرداخته که بر اساس آن موقعیت مناسب چشمه شناسایی شده است. با توجه به جدول بهترین موقعیت گوشه سمت راست در بالای محفظه (A) می‌باشد که در این حالت سیال خالص دمای ماکزیمم برابر با ۰/۰۳۶۸۶ و در حالت استفاده از نانوسیال به ۰/۰۲۳۵۴ کاهش می‌یابد. در موقعیت (B) دمای محفظه داراب بیشترین مقدار است که این در حالت سیال خالص دمای ماکزیمم برابر ۰/۸۳۷۰۱ بوده که نسبت به موقعیت‌های مختلف دارای بیشترین مقدار دما است. در جدول (۶) مشابه مورد قبل هدف تعیین موقعیت مناسب در رینولدز ۵۰۰ می‌باشد. در رینولدز ۵۰۰ هم بهترین موقعیت گوشه سمت راست و بالا می‌باشد که در حالت سیال خالص دمای ماکزیمم برابر ۰/۰۱۱۲۹ و در حالت نانوسیال برابر ۰/۰۰۶۲۷ می‌باشد. در موقعیت (B) دمای محفظه دارای بیشترین مقدار می‌باشد. با توجه به شکل‌های ارائه شده، در موقعیت (B) یا به عبارتی گوشه سمت چپ و بالا، جریان سیال تماس کمتری با چشمه داشته که این عامل اصلی در نامناسب بودن این موقعیت در هر دو رینولدز می‌باشد.

با قرار دادن منبع حرارتی در گوشه‌ی سمت راست و بالای محفظه، الگوی توزیع دما اطراف چشمه‌ی حرارتی بسیار منظم شده و چشمه‌ی حرارتی به صورت یکنواخت خنک می‌شود. دمای ماکزیمم محفظه در اثر افزایش رینولدز جریان کاهش می‌یابد که افزایش شدت جریان و در هم چنن افزایش انتقال حرارت جابجایی اجباری صورت می‌گیرد. دمای ماکزیمم محفظه در حالتی که چشمه‌ی حرارتی در گوشه‌ی سمت راست و بالا می‌باشد و در حالت رینولدز ۱۰۰ و در حالت استفاده از نانوسیال برابر ۰/۰۲۳۵۴ و در حالت سیال خالص برابر ۰/۰۳۶۸۶ می‌باشد که این مقادیر در رینولدز ۵۰۰ و در حالت استفاده از نانوسیال برابر ۰/۰۰۶۲۷ و در حالت سیال خالص برابر ۰/۰۱۱۲۹ می‌باشد. این مقادیر نشان از کاهش دمای ماکزیمم محفظه در رینولدز بالا تر بوده که هرچه رینولدز بالاتر باشد به علت افزایش انتقال حرارت اجباری دمای ماکزیمم محفظه کاهش بیشتری دارد.



شکل ۱۹- مقایسه خطوط دما ثابت و جریان سیال خالص و نانوسیال آب- آلومینیوم اکسید در رینولدز ۱۰۰ و گراش ۱۰^۵ برای موقعیت‌های مختلف چشمه حرارتی



شکل ۲۰- مقایسه خطوط دما ثابت و جریان سیال خالص و نانوسیال آب- آلومینیوم اکسید در رینولدز ۵۰۰ و گراش ۱۰^۵ برای موقعیت‌های مختلف چشمه حرارتی

جدول ۵- مقایسه‌ی داده‌های مربوط به دمای ماکزیمم محفظه در رینولدز ۱۰۰

$\theta_{\max} (\phi=0/0)$	$\theta_{\max} (\phi=0/0.5)$	موقعیت چشمه
۰.۳۶۸۶/۰	۰.۲۳۵۴/۰	A
۸۳۷۰/۱۰	۸۳۶۴۱/۰	B
۳۴۳۸۴/۰	۲۸۹۴۶/۰	C
۶۸۲۵۹/۰	۶۶۹۵۶/۰	D

جدول ۶- مقایسه‌ی داده‌های مربوط به دمای ماکزیمم محفظه در رینولدز ۵۰۰

موقعیت چشمه	$\theta_{max} (\varnothing=0/0.5)$	$\theta_{max} (\varnothing=0/0)$
A	۰۰۶۲۷/۰	۰۱۱۲۹/۰
B	۵۶۴۶۴/۰	۶۳۳۱۸/۰
C	۰۱۹۳۲/۰	۰۲۳۰۵/۰
D	۱۲۴۱۷/۰	۱۴۳۵۳/۰

۶- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر انتقال حرارت جابجایی مخلوط در محفظه در حال تهویه با حضور مانع داخلی به صورت مدل دو فازی مخلوط بررسی شده است که موارد زیر به عنوان نتایج این تحقیق بیان می‌شود:

۱- افزایش غلظت نانوذرات منجر به کاهش دمای ماکزیمم محفظه می‌شود که با افزایش کسرحجمی به میزان ۰/۰۵ در رینولدز ۱۰۰ ناسلت حدود ۶ درصد افزایش و در رینولدز ۵۰۰ حدود ۵ درصد نیز افزایش می‌یابد.

۲- در رینولدز پایین با افزایش گرافش دمای ماکزیمم محفظه کاهش می‌یابد که این عامل مناسبی در بهبود انتقال حرارت می‌باشد.

۳- افزایش رینولدز جریان که باعث افزایش انتقال حرارت جابجایی اجباری می‌گردد، عامل مناسبی در کاهش دمای محفظه نسبت به رینولدز پایین‌تر می‌باشد؛ در رینولدز پایین، افزایش گرافش سبب افزایش دمای محفظه شده است، ولی در رینولدزهای بالا افزایش گرافش سبب افزایش جابجایی طبیعی در محفظه شده که این افزایش سبب تضعیف جابجایی مخلوط گردیده و مقدار آن را روی چشمه‌ی حرارتی کاهش می‌دهد. بر همین اساس به ازای افزایش گرافش در رینولدز بالا ناسلت متوسط کاهش می‌یابد.

۴- الگوی جریان ایجاد شده در محفظه تاثیر قابل توجهی در خنک کاری منبع حرارتی دارد. بنابراین دو عامل رینولدز و موقعیت منبع حرارتی دارای اهمیت هستند. همان گونه که اشاره شد، موقعیتی که در آن دمای ماکزیمم محفظه کمترین مقدار را دارا باشد، مناسب می‌باشد.

۵- نوع نانو ذرات به کار گیری شده در نانو سیال از جمله عوامل مهم در انتقال حرارت درون محفظه محسوب می‌شود. در این تحقیق نشان داده شد که استفاده از نانو سیال آب - مس اکسید نتایج بهتری نسبت به نانوسیال آب - آلومینیوم اکسید نیز به همراه داشته و مقادیر ناسلت متوسط برای نانوسیال آب - اکسید مس بیشتر از آب-آلومینیوم اکسید می‌باشد.

۶- همان گونه که در فوق اشاره شده است، موقعیتی که در آن دمای ماکزیمم محفظه دارای کمترین مقدار می‌باشد، مناسب می‌باشد. با توجه به بررسی موقعیت‌های مختلف چشمه بهترین موقعیت در هر دو رینولدز ۱۰۰ و ۵۰۰ گوشه‌ی سمت راست و بالا می‌باشد. در این موقعیت دمای ماکزیمم محفظه کمترین مقدار را دارا می‌باشد.

۷- با در نظر گرفتن نانو ذره اکسید آلومینیوم با سیال پایه اتیلن گلیکول، تبدیل به سیال غیرنیوتنی بینگهام شده که در این حالت قطر نانوذرات ۱۵۰ نانومتر و تنش اولیه ۰/۳۸ پاسکال در نظر گرفته شده است. در رینولدز ۱۰۰ و در گرافش 10^3 در حالت اتیلن گلیکول خالص، ناسلت متوسط برابر ۲۳/۷۵، و در غلظت ۰/۰۵، به عدد

۵۸/۳۶ می‌رسد که در واقع ناسلت ۵۹/۳ درصد نیز افزایش می‌یابد؛ و در رینولدز ۵۰۰ و گراشف 10^3 ، در حالت اتیلن گلیکول خالص ناسلت برابر ۲۸/۷۴ و در حالت غلظت ۰/۰۵، برابر ۷۶/۳۴ می‌باشد که ۶۲/۳۵ درصد افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج ارائه شده بهبود انتقال در این حالت نسبت به سیال پایه آب خالص بهتر شده است.

تشکر و قدردانی

این مقاله با حمایت مادی و معنوی دانشگاه آزاد اسلامی واحد بافق انجام پذیرفته است. بدین وسیله نویسندگان مراتب قدردانی خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد بافق و کلیه عزیزانی که موجب انجام این تحقیق شده اند؛ اعلام می‌دارند.

مراجع

- [1] Rudyak, V.Y., and Minakov, A., "Modern of Nanofluid Flows Problems, Methods, Results", International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR), Novosibirsk, Russia, pp. 1-8, (2018).
- [2] Esfe, M.H., Esfandeh, S., Afrand, M., Rejvani, M., and Rostamian, S.H., "Experimental Evaluation, New Correlation Proposing and ANN Modeling of Thermal Properties of EG Based Hybrid Nanofluid Containing ZnO-DWCNT Nanoparticles for Internal Combustion Engines Applications", Applied Thermal Engineering, Vol. 133, pp. 452-463, (2018).
- [3] Esfe, M.H., Esfandeh, S., and Rejvani, M., "Modeling of Thermal Conductivity of MWCNT-SiO₂ (30:70%)/EG Hybrid Nanofluid, Sensitivity Analyzing and Cost Performance for Industrial Applications", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 131, No. 2, pp. 1437-1447, (2018).
- [4] Alirezaie, A., Hajmohammad, M.H., Ahangar, M.R.H., and Esfe, M.H., "Price-performance Evaluation of Thermal Conductivity Enhancement of Nanofluids with Different Particle Sizes", Applied Thermal Engineering, Vol. 128, pp. 373-380, (2018).
- [5] Esfe, M.H., Nadooshan, A.A., Arshi, A., and Alirezaie, A., "Convective Heat Transfer and Pressure Drop of Aqua Based TiO₂ Nanofluids at Different Diameters of Nanoparticles: Data Analysis and Modeling with Artificial Neural Network", Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, Vol. 97, pp. 155-161, (2018).
- [6] Afrand, M., Rostami, S., Akbari, M., Wongwises, S., Esfe, M.H., and Karimipour, A., "Effect of Induced Electric Field on Magneto-natural Convection in a Vertical Cylindrical Annulus Filled with Liquid Potassium", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 90, pp. 418-426, (2015).
- [7] Illbeigi, M., and Solaimany Nazar, A., "Numerical Simulation of Laminar Convective Heat Transfer and Pressure Drop of Water based-Al₂O₃ Nanofluid as a Non Newtonian Fluid by Computational Fluid Dynamic (CFD)", Transp Phenom Nano Micro Scales, Vol. 5, No. 2, pp. 130-138, (2017).

- [8] Abbasian Arani, A., Abbaszadeh, M., and Ardeshiri, A., "Mixed Convection Fluid Flow and Heat Transfer and Optimal Distribution of Discrete Heat Sources Location in a Cavity Filled with Nanofluid", *Transp Phenom Nano Micro Scales*, Vol. 5, No. 1, pp. 30-43, (2016).
- [9] Esfe, M.H., Zabihi, F., Rostamian, H., and Esfandeh, S., "Experimental Investigation and Model Development of the Non-Newtonian Behavior of CuO-MWCNT-10w40 Hybrid Nano-lubricant for Lubrication Purposes", *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 249, pp. 677-687, (2018).
- [10] Esfe, M.H., Rostamian, H., Rejvani, M., and Emami, M.R.S., "Rheological Behavior Characteristics of ZrO₂-MWCNT/10w40 Hybrid Nano-lubricant Affected by Temperature, Concentration, and Shear Rate: An Experimental Study and a Neural Network Simulating", *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, Vol. 102, pp. 160-170, (2018).
- [11] Tian, C., Wang, J., Cao, X., Yan, C., and Ala, A.A., "Experimental Study on Mixed Convection in an Asymmetrically Heated, Inclined, Narrow, Rectangular Channel", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 116, pp. 1074-1084, (2018).
- [12] Szabo, P.S., and Früh, W. G., "The Transition from Natural Convection to Thermomagnetic Convection of a Magnetic Fluid in a Non-uniform Magnetic Field", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 447, pp. 116-123, (2018).
- [13] Miroshnichenko I., and Sheremet, M., "Turbulent Natural Convection Heat Transfer in Rectangular Enclosures using Experimental and Numerical Approaches: A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, pp. 40-59, (2018).
- [14] Bianco, V., Scarpa, F., and Tagliafico, L.A., "Numerical Analysis of the Al₂O₃-water Nanofluid Forced Laminar Convection in an Asymmetric Heated Channel for Application in Flat Plate PV/T Collector", *Renewable Energy*, Vol. 116, pp. 9-21, (2018).
- [15] Khanafer, K., Vafai, K., and Lightstone, M., "Buoyancy-driven Heat Transfer Enhancement in a Two-dimensional Enclosure Utilizing Nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, No. 19, pp. 3639-3653, (2003).
- [16] Kakaç, S., and Pramuanjaroenkij, A., "Review of Convective Heat Transfer Enhancement with Nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 3187-3196, (2009).
- [17] Mahmoudi, A.H., Shahi, M., Raouf, A.H., and Ghasemian, A., "Numerical Study of Natural Convection Cooling of Horizontal Heat Source Mounted in a Square Cavity Filled with Nanofluid", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 8, pp. 1135-1141, (2010).
- [18] Rahmati, A.R., Roknabadi, A.R., and Abbaszadeh, M., "Numerical Simulation of Mixed Convection Heat Transfer of Nanofluid in a Double Lid-driven Cavity using Lattice Boltzmann Method", *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 55, No. 4, pp. 3101-3114, (2016).

- [19] Brinkman, H., "The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions", *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 20, No. 4, pp. 571-578, (1952).
- [20] Patel, H.E., Sundararajan, T., Pradeep, T., Dasgupta, A., Dasgupta, N., and Das, S.K., "A Micro-convection Model for Thermal Conductivity of Nanofluids", *Pramana*, Vol. 65, No. 5, pp. 863-869, (2005).
- [21] Ho, C., Liu, W., Chang, Y., and Lin, C., "Natural Convection Heat Transfer of Alumina-Water Nanofluid in Vertical Square Enclosures: an Experimental Study", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, No. 8, pp. 1345-1353, (2010).
- [22] Pakravan, H.A., and Yaghoubi, M., "Analysis of Nanoparticles Migration on Natural Convective Heat Transfer of Nanofluids", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 68, pp. 79-93, (2013).
- [23] Sheikhzadeh, G.A., Dastmalchi, M., and Khorasanizadeh, H., "Effects of Nanoparticles Transport Mechanisms on Al₂O₃-water Nanofluid Natural Convection in a Square Enclosure", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 66, pp. 51-62, (2013).
- [24] Ho, C., Chen, D.S., Yan, W.M., and Mahian, O., "Rayleigh-Bénard Convection of Al₂O₃/water Nanofluids in a Cavity Considering Sedimentation, Thermophoresis, and Brownian Motion", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 57, pp. 22-26, (2014).
- [25] Garoosi, F., Garoosi, S., and Hooman, K., "Numerical Simulation of Natural Convection and Mixed Convection of the Nanofluid in a Square Cavity using Buongiorno Model", *Powder Technology*, Vol. 268, pp. 279-292, (2014).
- [26] Eslamian, M., Ahmed, M., El-Dosoky, M., and Saghir, M., "Effect of Thermophoresis on Natural Convection in a Rayleigh-Benard Cell Filled with a Nanofluid", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 81, pp. 142-156, (2015).
- [27] Selimefendigil, F., and Öztop, H.F., "Mixed Convection in a Partially Heated Triangular Cavity Filled with Nanofluid Having a Partially Flexible Wall and Internal Heat Generation", *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Vol. 70, pp. 168-178, (2017).
- [28] Bondarenko, D.S., Sheremet, M.A., Oztop, H.F., and Ali, M.E., "Natural Convection of Al₂O₃/H₂O Nanofluid in a Cavity with a Heat-generating Element Heatline Visualization", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 130, pp. 564-574, (2019).
- [29] Minakov, A., Rudyak, V.Y., and Pryazhnikov, M., "Rheological Behavior of Water and Ethylene Glycol Based Nanofluids Containing Oxide Nanoparticles", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 554, pp. 279-285, (2018).
- [30] Schiller, L., and Naumann, A., "A Drag Coefficient Correlation", *Vdi Zeitung*, Vol. 77, pp. 318-320, (1935).

- [31] Corcione, M., "Heat Transfer Features of Buoyancy-driven Nanofluids Inside Rectangular Enclosures Differentially Heated at the Sidewalls", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 49, No. 9, pp. 1536-1546, (2010).

فهرست نمادهای انگلیسی

مساحت (m^2)	A
شتاب (m^2/s)	a
طول چشمه (m)	b
طول فین (m)	C
گرمای ویژه ($J/kg.K$)	c_p
قطر (m)	d
ضریب درگ	f_{drag}
عدد گراشف	Gr
شتاب گرانش (m^2/s)	g
ارتفاع دیواره عمودی (m)	H
ضریب هدایت حرارتی ($W/m.K$)	K
ثابت بولتزمن	K_B
طول افقی حفره (m)	L
عدد ناسلت	Nu
عدد پکلت	Pe
عدد رایلی	Ra
عدد رینولدز	Re
دما (K)	T
سرعت (m/s)	V

نمادهای یونانی

ضریب انبساط حرارتی ($1/K$)	β
لزجت دینامیکی ($kg/m.s$)	μ
دمای بی بعد	θ
چگالی (kg/m^3)	ρ
کسر حجمی ذره	ϕ

زیر نویس ها

رانشی	dr
موثر یا معادل	eff
معادل	eq
سیال	f
ماکزیمم	max
مخلوط و متوسط	m
نانوسیال	nf
ذره و فاز ثانویه	p
فاز اولیه	q

Abstract

In the present study, mixed convection heat transfer of two-phase Newtonian and non-Newtonian nanofluids was examined in a ventilated cavity with internal barrier. Water - Aluminum oxide and water - copper oxide nanofluids are considered as working fluid, and the governing equations are discrete using a finite volume numerical method and solved by the Eulerian-Eulerian two-phase method. In this research, heat source has a constant thermal flux and all cavity walls are also thermally insulated; Finally, the effect of parameters such as Grashof number, volumetric fraction of nanoparticles, Reynolds number, type of nanofluid and different locations of the heat source were considered and Aluminum oxide nanoparticle with an ethylene glycol based fluid, which is converted to Bingham-type non-Newtonian fluid, has also been investigated. The results of this study show that with a Reynolds No. of 100 and Grashof No. of 10^5 , the average Nusselt was 24.61% higher than that of pure water at the presence of copper oxide nanoparticles, and also by increasing the volume fraction of nanoparticles from 0.02 to 0.05, average Nusselt increase by 2.11 percent, indicating that water-copper oxide nanofluid has a better heat transfer than pure water.