

بررسی عددی جریان سیال، انتقال حرارت و تولید انرژی در جابه‌جایی توام نانوسیال با خواص متغیر در محفظه‌ای با دو منبع گرم دایره‌ای

حسین خراسانی‌زاده^۱، علیرضا آقایی^{۲*}، حمیدرضا احترام^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۳/۱۵	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۸/۱۵	
واژگان کلیدی:	
نانوسیال، تولید انرژی، منبع گرم دایره‌ای، خواص متغیر، جابه‌جایی توام.	در این مقاله، جریان سیال، انتقال حرارت و تولید انرژی در جابه‌جایی توام نانوسیال آب-اکسید آلومینیم با خواص متغیر در محفظه‌ای با دو منبع گرم دایره‌ای به صورت عددی بررسی می‌شود. دیواره‌های عمودی محفظه و دیواره‌ی بالایی که متحرک است در دمای T_c و منابع گرم در دمای T_h ($T_h > T_c$) و دیواره‌ی پایینی عایق است. برای تحلیل جابه‌جایی توام از یک برنامه کامپیوتری به زبان فرترن بر اساس روش حجم محدود و الگوریتم سیمپلر استفاده شده است. مطالعه برای کسر حجمی نانوذرات بین صفر تا ۰/۰۴، اعداد ریچاردسون ۰/۱، ۱، ۱۰ و ۱۰۰ و عدد گراشف ۱۰ ^۴ انجام شده است. در تمامی اعداد ریچاردسون، عدد ناسلت متوسط با افزایش کسر حجمی افزایش می‌یابد. همچنین در تمامی اعداد ریچاردسون، انرژی کل با افزایش کسر حجمی افزایش می‌یابد.

۱- مقدمه

ناشی از جابه‌جایی توام نانوسیال آب-اکسید آلومینیم را در یک محفظه مربعی که دیواره بالایی آن متحرک، دیواره‌های افقی عایق و دیواره‌های قائم آن دارای دمای ثابت سرد و گرم به ترتیب در طرف راست و چپ بودند، به صورت عددی و با روش حجم محدود بررسی کردند. بر اساس نتایج آن‌ها در نظر گرفتن خواص متغیر برای ضریب هدایت حرارتی و لزجت سیال، عدد ناسلت متوسط متفاوتی نسبت به خواص ثابت را نتیجه داد. پیشکار و قاسمی [۳] انتقال حرارت و جریان سیال ناشی از جابه‌جایی توام را در یک کانال افقی به همراه پره برای نانوسیال آب-مس به صورت عددی بررسی کردند. بر اساس نتایج آن‌ها با افزایش کسر حجمی و عدد رینولدز، انتقال حرارت افزایش می‌یابد. این افزایش در یک کسر حجمی ثابت برای اعداد رینولدز بالاتر بیشتر می‌باشد. عباسیان و همکاران [۴] انتقال حرارت و جریان سیال

جابه‌جایی توام در صنعت الکترونیک، روغن کاری صنعتی، راکتورهای هسته‌ای و دیگر موارد مشابه کاربردهای زیادی دارد. از آنجایی که نانوسیال‌ها نسبت به سیال‌های عادی ضریب هدایت حرارتی بالاتری دارند در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه بوده‌اند. محمودی [۱] به صورت عددی، جابه‌جایی توام نانو سیال آب-اکسید آلومینیم را در محفظه‌ای مستطیلی با دیواره پایینی متحرک گرم و دیواره‌های بالایی و جانبی سرد بررسی کرد. بر اساس یافته‌های او، در محدوده اعداد ریچاردسون مورد بررسی به دلیل حضور نانو ذرات انتقال حرارت زیاد می‌شود. شیخ‌زاده و همکاران [۲] انتقال حرارت و جریان سیال

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: AlirezaAghaei21@gmail.com

۱. دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

۲. دانشجوی دکترا مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

جابه‌جایی توام نانوسیال آب-مس را در یک محفظه مربعی که دیواره‌های افقی آن عایق و دیواره‌های جانبی آن دارای تغییرات دمایی سینوسی بودند، بررسی کردند. بر اساس نتایج آن‌ها با افزایش اختلاف فاز، در عدد ریچاردسون و کسر حجمی ثابت عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد.

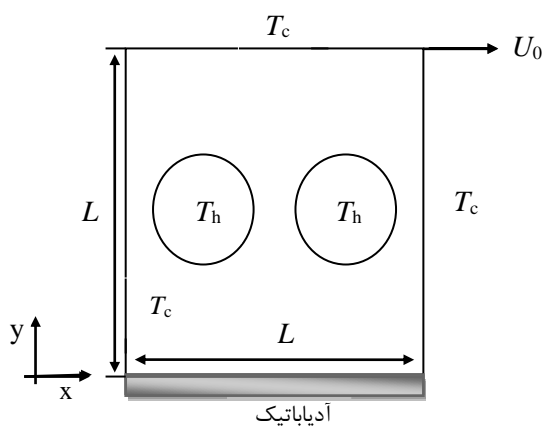
با مطالعه در زمینه تولید انرژی، محققان قادر خواهند بود سیستم‌هایی با کمترین اتلاف انرژی را طراحی کرده و بازده حرارتی را افزایش دهند. دگتکین و همکاران [۵] تولید انرژی جریان جابه‌جایی طبیعی سیال را در محفظه Γ شکل که دیواره بالایی و پایینی آن عایق، دیواره‌های جانبی آن سرد و دو دیواره دیگر آن گرم بودند، به صورت عددی بررسی کردند. بر اساس نتایج آن‌ها در اعداد رایلی کوچکتر از 10^5 به دلیل کمبود انتقال حرارت جابه‌جایی و در نتیجه کمبود سرعت جریان بخش بزرگی از انرژی کل را انرژی ناشی از انتقال حرارت تشکیل می‌دهد. در اعداد رایلی بزرگتر از 10^5 با افزایش سرعت جریان، انرژی ناشی از اصطکاک سهم بیشتری از انرژی کل را به خود اختصاص می‌دهد. وارل و همکاران [۶] تولید انرژی در جریان جابه‌جایی طبیعی سیال در یک محفظه با دیواره‌های افقی عایق و دیواره‌های جانبی سرد و گرم ضخیم و دارای ضریب هدایت حرارتی را به صورت عددی بررسی کردند. بر اساس نتایج آن‌ها با افزایش نسبت رسانایی، که به صورت نسبت رسانایی جامد (در جداره‌های کناری) به رسانایی سیال تعریف شده بود، انرژی کل افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش عدد رایلی، عدد بیژن که نسبت انرژی تولیدی ناشی از انتقال حرارت به انرژی کل می‌باشد، کاهش می‌یابد. تغییر ضخامت جداره نزدیک به مرز سرد اثر افزایشی محسوس‌تری در تولید انرژی به خصوص در اعداد رایلی بالا نسبت به تغییر ضخامت جداره نزدیک به مرز گرم دارد. فاموری و هومن [۷] تولید انرژی را در جریان جابه‌جایی طبیعی سیال در یک محفظه مستطیلی که دیواره‌های جانبی آن سرد، دیواره‌های افقی عایق بوده و داخل محفظه یک صفحه گرم وجود داشت، به صورت

عددی بررسی کردند. بر اساس نتایج آن‌ها با افزایش عدد رایلی انرژی تولیدی افزایش می‌یابد. ضمناً با افزایش ارتفاع محل قرارگیری صفحه گرم از دیواره پایینی تا رسیدن به وسط ارتفاع محفظه، انرژی تولیدی افزایش می‌یابد و پس از آن رفتاری کاهشی دارد. موخوپادیای [۸] تولید انرژی را در جریان جابه‌جایی طبیعی سیال در محفظه‌های مربعی که تمام دیواره‌های آن به جز دیواره پایینی عایق بوده و در دیواره پایینی، دو چشمه حرارتی قرار داشته و مابقی فضای دیواره پایینی نیز عایق بوده است را به صورت عددی بررسی کردند. بر اساس نتایج او تولید انرژی ناشی از لزجت سیال سهم بیشتری از انرژی تولیدی کل را دارد. همچنین هرچه محل قرارگیری چشمه‌های حرارتی به میانه ضلع پایینی محفظه نزدیک‌تر باشد انرژی تولیدی بیشتر خواهد بود. شاهی و همکاران [۹] تولید انرژی را در جریان جابه‌جایی طبیعی نانوسیال در یک محفظه مربعی که همه جداره‌های آن به جز جداره سرد بالایی، عایق می‌باشند به صورت عددی بررسی کردند. داخل محفظه یک مانع که شار حرارتی ثابت روی جداره‌های آن اعمال می‌شد، وجود داشت. بر اساس نتایج آن‌ها هنگامی که مانع گرم روی جداره پایینی و در فاصله بدون بعد $0/8$ از جداره سمت چپ قرار داشته باشد، تولید انرژی کمینه می‌باشد. ضمناً وقتی مانع گرم روی جداره بالایی و در فاصله بدون بعد $0/2$ از جداره سمت چپ قرار داشته باشد انرژی تولیدی بیشینه است.

خراسانی‌زاده و همکاران [۱۰] تولید انرژی را در جابه‌جایی طبیعی نانوسیال در یک محفظه مربعی با دیواره‌های جانبی سرد، دیواره پایینی گرم و دیواره بالایی عایق به صورت عددی بررسی کردند. داخل محفظه نیز یک بافل گرم روی ضلع پایینی وجود داشت. بر اساس نتایج آنان با افزایش عدد رایلی در همه کسرهای حجمی نانوذرات، انرژی تولیدی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد بیژن کاهش می‌یابد. محمودی و همکاران [۱۱] تولید انرژی را در جریان جابه‌جایی

۲- معادلات حاکم و شرایط مرزی

نمای شماتیک هندسه‌ی مورد بررسی در شکل ۱ نشان داده شده است. دیواره‌ی بالایی محفظه مربعی، سرد (در دمای T_c) و متحرک در جهت راست ($+U_0$) بوده و دیواره‌های جانبی نیز سرد (در دمای $T_c=300\text{K}$) می‌باشند. منابع دایره‌ای گرم و در دمای T_h می‌باشند. مرکز دایره‌ها در $(0, 1/5L)$ و $(0, 2/5L)$ و شعاع آن‌ها $0, 1/5L$ می‌باشد.



شکل ۱- نمای شماتیک و شرایط مرزی مساله

محفظة با نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم پر شده است. خواص ترموفیزیکی آب به عنوان سیال پایه، و نانوذرات اکسید آلومینیوم، در جدول ۱ ارائه شده است [۱۴].

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات [۱۴]

خواص	آب	اکسید آلومینیوم
ρ (kgm^{-3})	۹۹۷/۱	۳۹۷۰
c_p ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	۴۱۷۹	۷۶۵
k ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	۲۵	۰/۶۱۳
β (K^{-1})	$2/1 \times 10^{-4}$	$0/185 \times 10^{-5}$
d (nm)	۰/۳۸۴	۴۷
Pr	۶/۱	-

طبیعی نانوسیال در یک محفظه ذوزنقه‌ای تحت تاثیر میدان مغناطیسی عمودی به صورت عددی بررسی کردند. دیواره‌های بالایی و پایینی محفظه ذوزنقه‌ای قائم‌الزاویه مورد بررسی، عایق بوده و دیگر جداره‌ها سرد بودند. در جداره پایینی یک منبع گرم نیز تعبیه شده بود. بر اساس نتایج آنها با افزایش قدرت میدان مغناطیسی، انتروپی تولیدی کاهش می‌یابد.

یکی از نکات قابل تأمل در مطالعات مربوط به انتقال حرارت جابه‌جایی، عدم هم‌خوانی بین نتایج تجربی [۱۲ و ۱۳] و کارهای عددی برای نانو سیال‌ها [۱۱-۱] می‌باشد. شاید یکی از دلایل عدم این هم‌خوانی در نظر نگرفتن برخی پدیده‌ها در جریان سیال و انتقال حرارت می‌باشد. از جمله این پدیده‌ها تأثیر حرکت براونی بر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی است. حرکت براونی نانوذرات در نانوسیال‌ها، در واقع حرکت تصادفی و پیوسته‌ی آن‌ها در سیال می‌باشد. مولکول‌های مایع مدام بر نانوذرات ضربه وارد کرده و آن‌ها را در درون سیال پراکنده می‌کنند. در این مطالعه اثر حرکت براونی نیز در نظر گرفته شده است.

یک بررسی نسبتاً جامع نشان داد که تاکنون مطالعات چندانی در زمینه‌ی جابه‌جایی توام و تولید انتروپی نانوسیال در محفظه‌ها با منابع گرم دایره‌ای انجام نشده است. نوآوری این مقاله را می‌توان در هندسه مورد مطالعه، استفاده از خواص متغیر با دما برای نانوسیال در محاسبه انتروپی تولیدی، در نظر گرفتن اثر حرکت براونی نانوذرات در نانوسیال دانست. این هندسه در خنک‌کاری لوله‌های گرم قابل استفاده است. در مطالعه حاضر جریان سیال و انتقال حرارت جابه‌جایی توام و تولید انتروپی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در محفظه‌ای با منابع گرم دایره‌ای، در شرایطی که دیواره‌ی سرد بالایی متحرک است، در اعداد ریچاردسون و کسر حجمی‌های مختلف بررسی شده است.

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{\rho_{nf} \nu_f \text{Re}} \left[\frac{\partial}{\partial X} \left(\mu_{nf} \frac{\partial V}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\mu_{nf} \frac{\partial V}{\partial Y} \right) \right] + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} \text{Ri}\theta \quad (9)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{\text{RePr} \alpha_f (\rho c_p)_{nf}} \left[\frac{\partial}{\partial X} \left(k_{nf} \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(k_{nf} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) \right] \quad (10)$$

$$S_{gen}^m = \frac{k_{nf}}{k_f} \left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial Y} \right)^2 \right] + \chi \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \left[2 \left(\frac{\partial U}{\partial X} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial Y} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\partial V}{\partial X} \right)^2 \right] = S_{gen,h_0}^m + S_{gen,\mu}^m \quad (11)$$

که در آن:

$$\text{Re} = \frac{U_0 L}{\nu_f}, \text{Ri} = \frac{Gr}{\text{Re}^2}, \text{Pr} = \frac{\nu_f}{\alpha_f}$$

$$Gr = \frac{g \beta L^3 (T_h - T_c)}{\nu_f^2}, \text{Be} = \frac{S_{gen,h_0}^m}{S_{gen}^m}$$

$$S_{gen}^m = s_{gen}^m \frac{T_0^2 L^2}{k_f \Delta T^2}, T_0 = \frac{T_h + T_c}{2}$$

$$\chi = \frac{\mu_f T_0}{k_f} \left(\frac{\text{Re} \mathcal{G}_f}{L \Delta T} \right)^2, \Delta T = T_h - T_c \quad (12)$$

تابع جریان بی‌بعد نیز عبارتست از:

$$\Psi(X, Y) = \int U dY \quad (13)$$

با توجه به هندسه مساله، شرایط مرزی بی‌بعد عبارتند از:

$$\begin{aligned} U = V = 0, \theta = 0 & \quad \text{روی دیواره‌های قائم} \\ U = 1, V = 0, \theta = 0 & \quad \text{روی دیواره‌ی بالایی} \\ U = V = 0, \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 & \quad \text{روی دیواره پایینی} \\ U = 0, V = 0, \theta = 1 & \quad (14) \text{ روی منابع گرم} \end{aligned}$$

خواص نانوسیال شامل چگالی، ظرفیت گرمایی، ضریب انبساط حجمی، ضریب پخش، لزجت [۱۶] و ضریب هدایت گرمایی [۱۷] به ترتیب عبارتند از:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_f + \phi \rho_s \quad (15)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \phi) (\rho c_p)_f + \phi (\rho c_p)_s \quad (16)$$

معادلات حاکم شامل بقای جرم، بقای مومنتم در راستای x و y و بقای انرژی برای جریان دو بعدی، دائم و آرام به ترتیب عبارتند از:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho_{nf}} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{nf} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{nf} \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho_{nf}} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{nf} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{nf} \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf}} g (T - T_c) \quad (3)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{(\rho c_p)_{nf}} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{nf} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{nf} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] \quad (4)$$

و تولید انرژی که واحد آن (W/m³.K) می‌باشد [۱۵] عبارتست از:

$$s_{gen}^m = \frac{k_{nf}}{T_0^2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{\mu_{nf}}{T_0} \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (5)$$

برای بی‌بعدسازی معادلات حاکم متغیرهای بی‌بعد زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, S = \frac{s}{L}, V = \frac{v}{U_0}, \\ U = \frac{u}{U_0}, \theta = \frac{T - T_c}{\Delta T}, P = \frac{p}{\rho_{nf} U_0^2} \quad (7) \end{aligned}$$

سپس با استفاده از این متغیرهای بی‌بعد، همه معادلات حاکم از جمله رابطه تولید انرژی به شکل بی‌بعد زیر به دست می‌آیند:

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{\rho_{nf} \nu_f \text{Re}} \left[\frac{\partial}{\partial X} \left(\mu_{nf} \frac{\partial U}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\mu_{nf} \frac{\partial U}{\partial Y} \right) \right] \quad (8)$$

که در آن K مسیر طی شده روی دیواره‌های سرد می‌باشد.

۳- شبیه سازی عددی

معادلات حاکم به کمک روش حجم محدود و الگوریتم سیمپلر به صورت عددی حل می‌شوند. ابتدا شبکه‌ای یکنواخت و مناسب بر میدان حل منطبق می‌شود و سپس حول هر گره، حجم کنترلی ایجاد می‌شود. سپس از معادلات حاکم روی هر حجم کنترلی انتگرال‌گیری انجام شده و معادلات منفصل می‌شوند تا دستگاهی از معادلات جبری به دست می‌آید. برای انفعال جملات پخش و جابجایی از طرح پیوندی (هیبرید) استفاده می‌شود. در این روش برای اعداد پکلت با قدر مطلق کوچکتر از ۲ از طرح تفاضل مرکزی و در اعداد پکلت با قدر مطلق بزرگتر از ۲ از طرح جریان بالادست استفاده می‌شود. برای دستیابی به همگرایی از ضرایب زیرتخفیف ۰/۵ و ۰/۷ به ترتیب برای مولفه‌های سرعت و دما استفاده شده است. معیار همگرایی برای فشار، سرعت و دما از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\text{Error} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \left| \phi_{i,j}^{k+1} - \phi_{i,j}^k \right|}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \left| \phi_{i,j}^{k+1} \right|} \leq 10^{-6} \quad (26)$$

M و N در رابطه (۲۶) به ترتیب تعداد نقاط شبکه در جهت x و y هستند و ζ معرف متغیری است که حل می‌شود. تعداد تکرار و حداکثر میزان خطا 10^{-6} می‌باشد.

شبکه‌بندی استفاده شده یکنواخت بوده که در شکل (۲) نشان داده شده است. برای تولید منابع گرم دایره‌ای معادله دایره به‌عنوان شرط در سابروتین‌های کد کامپیتری نوشته شده، وارد شده و مطابق روش پیشنهادی مرجع [۱۸]، سرعت در ناحیه‌ی دایره‌ای صفر قرار داده شده است. به‌منظور جلوگیری از دندان‌دندان شدن مرز دایره‌ای، شبکه‌بندی استفاده شده تا اندازه مناسبی با افزایش تعداد نقاط ریز شده است.

$$(\rho\beta)_{nf} = (1-\phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_s \quad (17)$$

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}} \quad (18)$$

$$\mu_{Static} = \mu_f (1-\phi)^{-2.5} \quad (19)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 64.7\phi^{0.764} \left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{0.369}$$

$$\left(\frac{k_p}{k_f}\right)^{0.7476} \text{Pr}_T^{0.9955} \text{Re}_T^{1.2321}$$

$$\text{Pr}_T = \frac{\mu_f}{\rho_f \alpha_f}, \text{Re}_T = \frac{\rho_f K_b T}{3\pi \mu_f^2 l_f} \quad (20)$$

K_b ، ثابت بولتزمن، برابر 1.38×10^{-23} و l_f ، مسیر میانگین آزاد مولکول‌های سیال، برابر $0.17(\text{nm})$ می‌باشد. d_f و d_p به ترتیب قطر مولکول‌های آب و ذرات اکسید آلومینیم بوده و برابر 47×10^{-9} و 0.38×10^{-9} می‌باشند. تاثیر حرکت براونی نانوذرات که بیشتر متاثر از دما می‌باشد، در مقدار Re_T در رابطه (۲۰) خود را نشان می‌دهد.

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی عبارت است از:

$$h_{nf} = \frac{q}{T_h - T_c} \quad (21)$$

عدد ناسلت که طول مشخصه‌ی آن اندازه‌ی ضلع محفظه مربعی می‌باشد عبارت است از:

$$\text{Nu} = \frac{h_{nf} L}{k_f} \quad (22)$$

شار حرارتی دیواره‌ها بر واحد سطح عبارت است از:

$$q = -k_{nf} \left. \frac{T_h - T_c}{L} \frac{\partial \theta}{\partial S} \right| \quad (23)$$

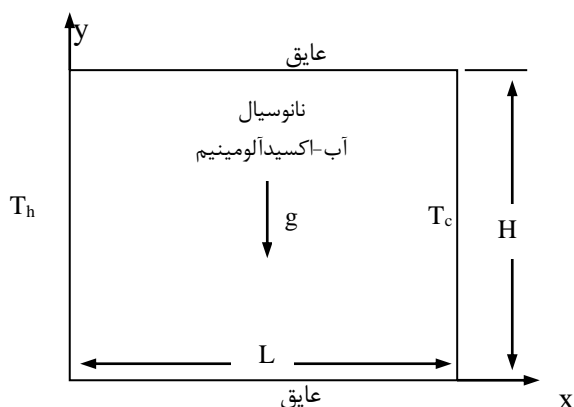
با قرار دادن رابطه‌های (۲۱) و (۲۳) در رابطه‌ی (۲۲) عدد ناسلت عبارت می‌شود از:

$$\text{Nu} = - \left(\frac{k_{nf}}{k_f} \right) \left. \frac{\partial \theta}{\partial S} \right| \quad (24)$$

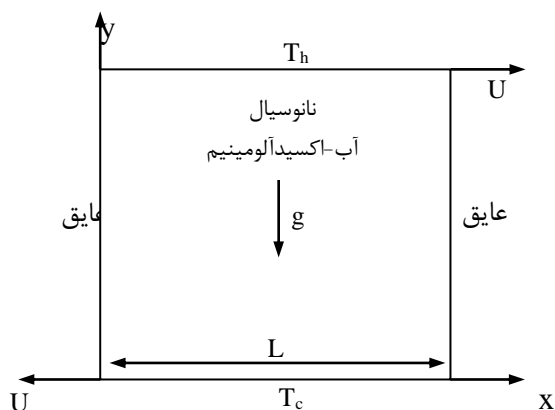
همچنین عدد ناسلت متوسط روی دیواره سرد عبارت است از:

$$\text{Nu} = \frac{1}{3L} \int_{\text{All cold wall}} \text{Nu} dS \quad (25)$$

شبیه‌سازی شده و نتایج مربوط به انرژی کل با نتایج کار ایشان در جدول ۴ مقایسه شده‌اند.

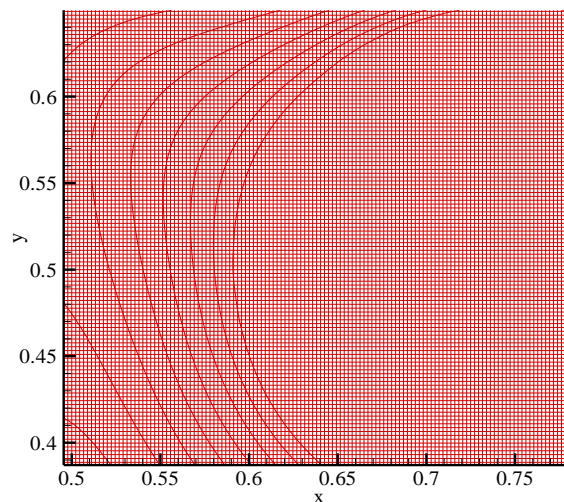


شکل ۳- هندسه مقاله چمخاه و ابونادا [۱۸]



شکل ۴- الیوسکی و همکاران [۱۹]

چنانچه مشاهده می‌شود تفاوت نسبی مقادیر عدد ناسلت متوسط و انرژی کل بدست آمده در شبیه‌سازی‌ها در مقایسه با کارهای قبلی ناچیز می‌باشند و لذا از صحت نتایج مدل‌سازی‌ها اطمینان حاصل می‌شود.



شکل ۲- بخشی از شبکه‌بندی ایجاد شده به صورت بزرگ‌نمایی شده

۳-۱ استقلال نتایج از شبکه

به منظور یافتن شبکه مناسبی که منجر به استقلال نتایج از شبکه شود، عدد ناسلت متوسط برای نانوسیال آب-اکسیدمس برای شبکه با تعداد نقاط مختلف به دست آمده و در جدول ۲ مقایسه شده‌اند. با توجه به مقادیر ناسلت متوسط مشاهده می‌شود که شبکه با تعداد نقاط ۲۵۱×۲۵۱ مناسب است.

جدول ۲- عدد ناسلت متوسط روی دیوارهای سرد برای

نانوسیال آب-اکسیدآلومینیم در $Ri=1$ و $\phi=0.04$

نقاط	۲۱۱×۲۱۱	۲۳۱×۲۳۱	۲۵۱×۲۵۱	۲۷۱×۲۷۱
Nu_{avg}	۵/۷۶	۵/۹۲	۶/۰۰	۶/۰۴

۳-۲ اعتبارسنجی برنامه

برای اعتبارسنجی نتایج برنامه کامپیوتری، هندسه مربوط به جابه‌جایی توام در کار چمخاه و ابونادا [۱۹]، که در شکل ۳ نشان داده شده است، با برنامه کامپیوتری حاضر شبیه‌سازی شده و نتایج مربوط به ناسلت متوسط با نتایج کار ایشان در جدول ۳ مقایسه شده‌اند. همچنین هندسه مربوط به جابه‌جایی طبیعی در کار الیوسکی و همکاران [۲۰]، که در شکل ۴ نشان داده شده است، نیز

است که می‌تواند همهی سیال داخل محفظه را تحت تاثیر قرار داده و در جهت حرکت درپوش حرکت دهد. ولی با افزایش عدد ریچاردسون، بخشی از جریان که کمتر تحت تاثیر سرعت درپوش است، در جابجایی طبیعی شروع به حرکت کرده، گردابه‌ی ثانویه به‌وجود می‌آید. در اعداد ریچاردسون ۰/۱ و ۰/۱ تراکم خطوط دما ثابت، که نشان دهنده‌ی انتقال حرارت بیشتر می‌باشد، در نزدیکی منابع گرم بیشتر است. این تراکم خطوط با افزایش عدد ریچاردسون به کناره‌ی منابع گرم یا دیواره‌های سرد عمودی منتقل می‌شود.

با افزایش عدد ریچاردسون خطوط دما ثابت از سمت راست محفظه به طرف چپ و سپس میانه‌ی آن متمایل می‌شود. این جابجایی متناسب با حرکت گردابه‌ها با افزایش عدد ریچاردسون می‌باشد. در اعداد ریچاردسون کم، که جابه‌جایی اجباری غالب است و گردابه‌ها متمایل به طرف راست هستند، انتظار می‌رود انتقال حرارت مناسب‌تری در سمت راست محفظه انجام شود.

تراکم خطوط دما ثابت در این ناحیه نیز نشان‌دهنده‌ی همین مطلب است. با افزایش عدد ریچاردسون که نشان‌دهنده‌ی نقش بیشتر جابه‌جایی طبیعی در انتقال حرارت می‌باشد، گردابه‌های جریان ضعیف‌تر شده، مرکز آن‌ها به وسط محفظه منتقل و خطوط دما ثابت نیز به میانه‌ی محفظه منتقل می‌شوند.

خطوط انتروپی کل در اعداد ریچاردسون کم در فضای بالایی محفظه و در مجاورت منابع گرم تراکم بیشتری دارند. با توجه به سرعت بیشتر درپوش در اعداد ریچاردسون کم که باعث تولید انتروپی اصطکاکی بیشتری می‌شود و همچنین انتقال حرارت بیشتر ناشی از قدرت گردابه‌ها و در نتیجه تولید انتروپی حرارتی بیشتر تراکم این خطوط در این ناحیه مورد انتظار می‌باشد.

با افزایش عدد ریچاردسون که نشان دهنده‌ی کاهش سرعت درپوش می‌باشد، سهم انتروپی تولیدی اصطکاکی در انتروپی کل کاهش می‌یابد و تراکم خطوط انتروپی کل در کناره‌ی درپوش محفظه کم می‌شود. همچنین خطوط

جدول ۳- مقایسه عدد ناسلت متوسط در جابه‌جایی توام با کار

چمخه و ابونادا [۱۹]

Ri	ϕ	کار حاضر چمخه و ابونادا [۱۹]	درصد اختلاف
۰/۰۰۱	۰/۰۲	۳۳/۲۲	۰/۲۴
	۰/۰۶	۳۵/۰۵	۰/۸۳
۱	۰/۰۲	۴/۷۰	۰/۸۵
	۰/۰۶	۴/۷۴	۰/۲۱
۱۰	۰/۰۲	۱/۶۸	۲/۳۲
	۰/۰۶	۱/۷۷	۱/۱۲

جدول ۴- مقایسه انتروپی کل در جابه‌جایی طبیعی با کار

الیوسکی و همکاران [۲۰]

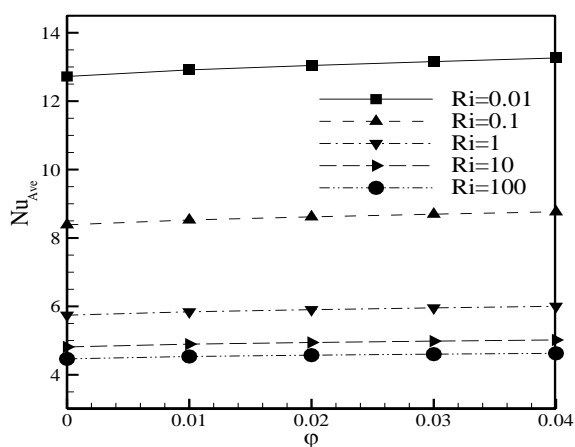
Ra	χ	کار حاضر الیوسکی و همکاران [۲۰]	درصد اختلاف
۱۰ ^{-۲}	۴/۵۸	۴/۷۲	۲/۹۷
۱۰ ^{-۳}	۱/۱۵	۱/۱۶	۰/۸۶
۱۰ ^{-۴}	۱۹۱۴/۰۷	۱۹۰۴	۰/۵۳
۱۰ ^{-۵}	۲۳/۶۵	۲۳/۸۷	۰/۹۲

۴- نتایج و بحث

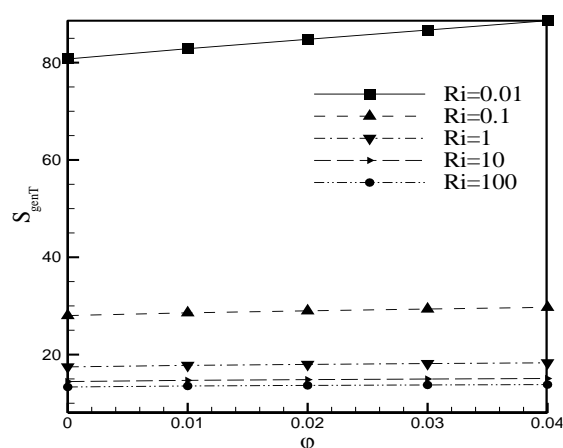
در شکل ۵ خطوط هم‌دما، خطوط جریان و خطوط انتروپی کل برای آب و نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در $Gr=10^4$, $\phi=0.04$ برای اعداد ریچاردسون مختلف ارائه شده است.

با کاهش عدد ریچاردسون که به معنای افزایش سرعت درپوش می‌باشد، گردابه به سمت راست محفظه کشیده می‌شود و تراکم خطوط جریان در نزدیکی درپوش محفظه بیشتر می‌شود. با کاهش عدد ریچاردسون جابه‌جایی اجباری بر جابه‌جایی طبیعی اتفاق می‌افتد و تأثیر پذیری میدان جریان از سرعت درپوش بیشتر می‌شود. ولی با افزایش عدد ریچاردسون گردابه‌ها به طرف مرکز محفظه کشیده شده و حجیم‌تر نیز می‌شوند. در اعداد ریچاردسون ۱۰ و ۱۰۰ گردابه‌ی ثانویه نیز به‌وجود می‌آید. به واقع در اعداد ریچاردسون کم سرعت درپوش به اندازه‌ای زیاد

نانوسیال بوده و در نتیجه تولید انترویی بی‌بعد ناشی از اصطکاک و حرارت افزایش می‌یابد.



شکل ۶- تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب کسر حجمی در اعداد ریچاردسون مختلف

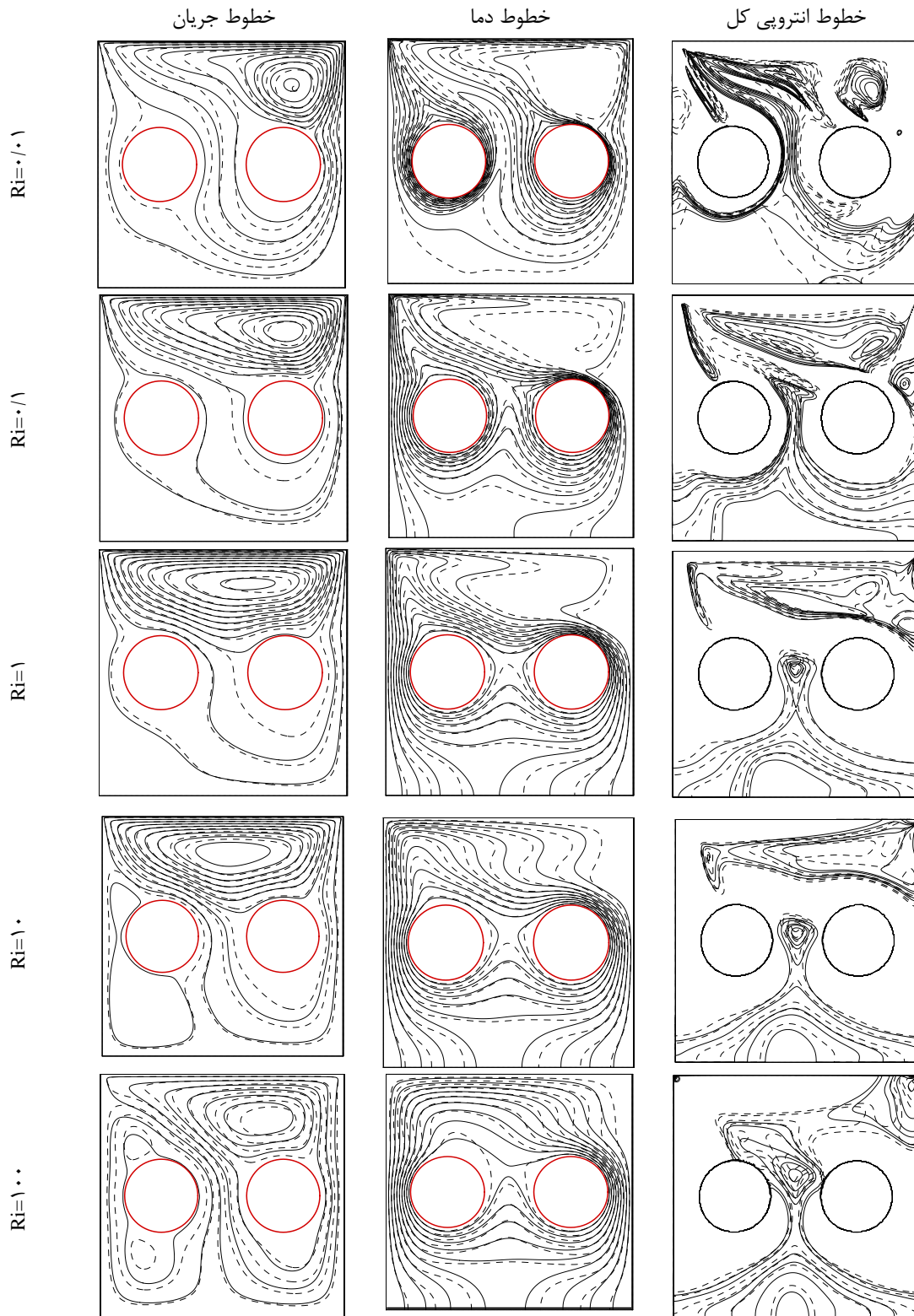


شکل ۷- تغییرات انترویی کل بی‌بعد بر حسب کسر حجمی در اعداد ریچاردسون مختلف

انترویی کل از فضای بالایی محفظه به فضای میانی دو منبع گرم و قسمت پایینی محفظه یعنی نواحی دارای انتقال حرارت بیشتر در اعداد ریچاردسون بالا منتقل می‌شوند.

در شکل ۶ تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب کسر حجمی در اعداد ریچاردسون مختلف نشان داده شده است. در تمامی اعداد ریچاردسون با افزایش کسر حجمی عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. با افزایش کسر حجمی نانوذرات ضریب هدایت حرارتی نانوسیال افزایش یافته و در نتیجه تبادل حرارتی بهتر انجام شده و عدد ناسلت متوسط زیاد می‌شود. همچنین در یک کسر حجمی ثابت با کاهش عدد ریچاردسون عدد ناسلت متوسط زیاد می‌شود. کاهش عدد ریچاردسون به معنای غلبه جابه‌جایی اجباری بر جابه‌جایی طبیعی است، در نتیجه حرکت نانوسیال بیشتر شده و انتظار می‌رود عدد ناسلت متوسط افزایش یابد.

در شکل ۷ تغییرات انترویی تولیدی کل بی‌بعد بر حسب کسر حجمی در اعداد ریچاردسون مختلف نشان داده شده است. با توجه به اینکه انترویی تولیدی ناشی از حرارت سهم بیشتری در انترویی تولیدی کل دارد، انتظار می‌رود روند تغییرات انترویی کل بر حسب کسر حجمی شبیه به رفتار عدد ناسلت باشد. شکل ۴ نشان می‌دهد که در تمامی اعداد ریچاردسون با افزایش کسر حجمی انترویی کل افزایش می‌یابد. همچنین در یک کسر حجمی ثابت، مشابه تغییرات عدد ناسلت متوسط، با کاهش عدد ریچاردسون انترویی تولیدی کل بی‌بعد زیاد می‌شود. کاهش عدد ریچاردسون نشان دهنده‌ی جابه‌جایی بیشتر



شکل ۵- خطوط جریان، خطوط دما و خطوط انتروپی کل، برای سیال (---) و نانوسیال (—) در $\phi=0/04$ در اعداد ریچاردسون مختلف

بیشترین سهم انرژی اصطکاکی بی‌بعد از انرژی کل در همه‌ی اعداد ریچاردسون و کسرهای حجمی برابر ۶۶/۱۷ درصد است که به ازای $Ri=0.1$ و $\varphi=0.04$ رخ می‌دهد. همچنین کمترین سهم انرژی اصطکاکی بی‌بعد از انرژی کل ۰/۰۸ درصد بوده که به ازای $Ri=100$ و $\varphi=0.04$ روی می‌دهد.

در جدول ۷ مقادیر انرژی حرارتی بی‌بعد در اعداد ریچاردسون و کسرهای حجمی مختلف برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم آورده شده است. افزایش عدد ریچاردسون جابه‌جایی بیشتر نانوسیال را به همراه دارد که باعث تبادل حرارتی بهتر به وسیله نانوسیال می‌شود. افزایش گرادیان‌هایی دما با کاهش عدد ریچاردسون، افزایش سهم انرژی تولیدی ناشی از حرارت را به همراه دارد.

جدول ۷- مقادیر انرژی حرارتی بی‌بعد در اعداد ریچاردسون مختلف و $\varphi=0$ و $\varphi=0.04$ برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم

$\varphi=0.04$	$\varphi=0$	Ri
۲۹/۹۸	۵۲/۸۵	۰/۰۱
۲۴/۹۷	۲۳/۷۵	۰/۱
۱۷/۸۸	۱۷/۰۸	۱
۱۵/۰۳	۱۴/۴۱	۱۰
۱۳/۸۲	۱۳/۳۳	۱۰۰

در جدول ۸ مقادیر عدد بیژن، که معرف نسبت انرژی تولیدی ناشی از حرارت به انرژی تولیدی کل می‌باشد،

جدول ۸- مقادیر عدد بیژن در اعداد ریچاردسون مختلف و $\varphi=0.04$ و $\varphi=0$ برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم

$\varphi=0.04$	$\varphi=0$	Ri
۰/۳۳۸۳	۰/۳۴۵۵	۰/۰۱
۰/۸۴۰۶	۰/۸۴۷۶	۰/۱
۰/۹۷۶۵	۰/۹۷۷۷	۱
۰/۹۹۶۹	۰/۹۹۷۰	۱۰
۰/۹۹۹۲	۰/۹۹۹۱	۱۰۰

در جدول ۵ ماکزیمم مقادیر تابع جریان، $|\Psi|_{max}$ ، به عنوان معیاری از قدرت جریان، در اعداد ریچاردسون و کسر حجمی‌های مختلف برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم آورده شده است. بیشترین مقدار $|\Psi|_{max}$ ۰/۱۴ و کمترین آن ۰/۰۵۳۵ بوده که به ترتیب مربوط به $\varphi=0.04, Ri=0.1$ و $\varphi=0.04, Ri=100$ می‌شوند.

جدول ۵- مقادیر $|\Psi|_{max}$ در اعداد ریچاردسون مختلف برای $\varphi=0.04$ و $\varphi=0$

$\varphi=0.04$	$\varphi=0$	Ri
5.35×10^{-2}	5.36×10^{-2}	۰/۰۱
6.50×10^{-2}	6.51×10^{-2}	۰/۱
6.28×10^{-2}	6.27×10^{-2}	۱
7.78×10^{-2}	7.61×10^{-2}	۱۰
۰/۱۴	۰/۱۲	۱۰۰

در جدول ۶ مقادیر انرژی تولیدی اصطکاکی بی‌بعد در اعداد ریچاردسون و کسر حجمی‌های مختلف برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم نشان داده شده است.

با افزایش عدد ریچاردسون در کسر حجمی‌های نشان داده شده انرژی تولیدی ناشی از اصطکاک کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه افزایش عدد ریچاردسون کاهش جابه‌جایی و حرکت نانوسیال را نشان می‌دهد، گرادیان‌های سرعت کم شده و انرژی تولیدی ناشی از اصطکاک کاهش می‌یابد.

جدول ۶- مقادیر انرژی تولیدی اصطکاکی بی‌بعد در اعداد ریچاردسون مختلف و $\varphi=0.04$ و $\varphi=0$

$\varphi=0.04$	$\varphi=0$	Ri
۵۸/۶۴	۲۷/۹۰	۰/۰۱
۴/۷۴	۴/۲۷	۰/۱
۰/۴۳	۰/۳۹	۱
۰/۵	۰/۴	۱۰
۰/۰۱	۰/۰۱	۱۰۰

انتروپی کل برابر $13/34$ بوده که به ازای $Ri=100$ ، $\varphi=0$ روی می‌دهد.

- با افزایش عدد ریچاردسون مقدار عدد بیژن به یک نزدیک می‌شود که نشان دهنده‌ی افزایش سهم انتروپی حرارتی از انتروپی کل می‌باشد.

۶- فهرست علائم

عدد بیژن	Be
ظرفیت گرمایی ویژه سیال ($Jkg^{-1}K^{-1}$)	c_p
قطر ذرات (nm)	d
عدد گرافش	Gr
شتاب جاذبه ($m.s^{-2}$)	g
هدایت حرارتی ($Wm^{-1}K^{-1}$)	k
ابعاد محفظه (m)	L
عدد ناسلت	Nu
فشار ($kg\ m^{-1}s^{-2}$)	p
فشار بی‌بعد	P
عدد رایلی	Ra
عدد ریچاردسون	Ri
عدد رینولدز	Re
عدد پرانتل	Pr
مسیر طی شده روی دیواره‌های سرد محفظه	s
S بی‌بعد	S
انتروپی تولیدی کل	S_{gen}
انتروپی تولیدی ناشی از حرارت	S_{gen,h_0}'''
انتروپی تولیدی ناشی از اصطکاک	$S_{gen,\mu}'''$
دما (K)	T
مولفه های سرعت (ms^{-1})	u, v
مولفه های بی بعد سرعت	U, V
سرعت دیواره‌ی بالایی	U_0
مختصات دکارتی (m)	x, y
مختصات بی بعد دکارتی	X, Y

در اعداد ریچاردسون و کسر حجمی‌های مختلف آورده شده است. با افزایش عدد ریچاردسون، عدد بیژن به یک نزدیک می‌شود که نشان دهنده‌ی افزایش سهم انتروپی حرارتی از انتروپی کل می‌باشد.

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه میدان جریان، انتقال حرارت و تولید انتروپی در جابه‌جایی توام نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با خواص متغیر در محفظه‌ی مربعی با دو منبع گرم دایره‌ای به صورت عددی با روش حجم محدود و الگوریتم سیمپلر بررسی شد. مطالعه برای کسر حجمی نانوذرات ۰، ۰/۰۲ و ۰/۰۴، اعداد ریچاردسون ۰/۰۱، ۰/۱، ۱ و ۱۰ و ۱۰۰ و عدد گرافش 10^4 انجام شد. بر اساس نتایج عددی مشاهده شد که:

- با افزایش عدد ریچاردسون گردابه‌های جریان به طرف مرکز محفظه کشیده شده و حجیم‌تر می‌شوند.
- در تمامی اعداد ریچاردسون با افزایش کسر حجمی عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد.
- در تمامی اعداد ریچاردسون با افزایش کسر حجمی انتروپی کل افزایش می‌یابد.
- بیشترین سهم انتروپی اصطکاکی بی‌بعد از انتروپی کل در همه‌ی اعداد ریچاردسون و کسرهای حجمی بررسی شده در هندسه مورد نظر برابر $66/17$ درصد است که به ازای $Ri=0/01$ ، $\varphi=0/04$ رخ می‌دهد. همچنین کمترین سهم انتروپی اصطکاکی بی‌بعد از انتروپی کل $0/08$ درصد است که به ازای $Ri=100$ و $\varphi=0/04$ روی می‌دهد.
- بیشترین انتروپی تولیدی کل بی‌بعد برابر $88/62$ است که به ازای $Ri=0/01$ و $\varphi=0/04$ رخ می‌دهد، همچنین کمترین

c	سرد	۷- علائم یونانی
f	سیال	α ضریب پخش حرارتی (m^2s^{-1})
gen	تولیدی	β ضریب انبساط حرارتی (K^{-1})
h	گرم	μ لزجت ($kgm^{-2}s^{-1}$)
nf	نانوسیال	ν لزجت سینماتیکی (m^2s^{-1})
p	ذره	θ دمای بی بعد

۸- تقدیر و تشکر

نویسندگان مایل‌اند از پژوهشکده انرژی و معاونت پژوهشی دانشگاه کاشان به سبب حمایت مالی از این تحقیق تشکر نمایند.

ρ	چگالی (kgm^{-3})
χ	ضریب بازگشت‌ناپذیری
ϕ	کسر حجمی نانوذرات
ψ	تابع جریان
Ψ	تابع جریان بی‌بعد

پا نویسی‌ها

Avg متوسط

۹- مراجع

- [1] Mahmoodi, M. (2011). "Mixed convection inside nanofluid filled rectangular enclosures with moving bottom wall". *Thermal Science*, Vol. 15, pp. 889–903.
- [2] Sheikhzadeh, G.A., Ebrahim Qomi, M., Hajjaligol, N., Fattahi, A. (2012). "Numerical study of mixed convection flows in a lid-driven enclosure filled With nanofluid using variable properties". *International Results in Physics*, Vol. 2, pp. 5–13
- [3] Pishkar, I., Ghasemi, B. (2012). "Cooling enhancement of two fins in a horizontal channel by nanofluid mixed convection". *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 59, pp. 141-151
- [4] Abbasian Arani, A.A., MazroueiSebdani, S., Mahmoodi b, M., Ardeshiri, A., Aliakbari. M. (2012). "Numerical study of mixed convection flow in a lid-driven cavity with sinusoidal heating on sidewalls using nanofluid" *Superlattices and Microstructures*, Vol. 51, pp. 893–911
- [5] Dagtekin, E., Oztop, H.F., Bahloul, A. (2007). "Entropy generation for natural convection in Γ -shaped enclosures". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 34, pp. 502–510.
- [6] Varol, Y., Oztop, H.F., Koca, A. (2008). "Entropy generation due to conjugate natural convection in enclosures bounded by vertical solid walls with different thicknesses". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, pp. 648–656.
- [7] Famouri, M., Hooman, K. (2008). "Entropy generation for natural convection by heated partitions in a cavity". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, pp. 492–502.
- [8] Mukhopadhyay, A. (2010). "Analysis of entropy generation due to natural convection in square enclosures with multiple discrete heat sources". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 867–872.
- [9] Shahi, M., Mahmoudi, A.H., Honarbaksh Raouf, A. (2011). "Entropy generation due to natural convection cooling of a nanofluid". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 972–983.
- [10] Khorasanizadeh, H., Amani, J., Nikfar, M. (2012). "Numerical investigation of Cu-water nanofluid natural convection and entropy generation within a cavity with an embedded conductive baffle". *Scientia Iranica*, Vol. 19, pp. 1996–2003.
- [11] Mahmoudi, A.H., Pop, I., Shahi, M., Talebi, F. (2013). "MHD natural convection and entropy generation in a trapezoidal enclosure using Cu-water nanofluid". *Computers & Fluids*, Vol. 72, pp. 46–62
- [12] Abbasian Arani, A.A., Amani, J. (2012). "Experimental study on the effect of TiO₂-water nanofluid on heat transfer and pressure drop". *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 42, pp. 107-115.

- [13] Abbasian Arani, A.A., Amani, J. (2013). "Experimental investigation of diameter effect on heat transfer performance and pressure drop of TiO₂-water nanofluid". *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 44, pp. 520-533.
- [14] Abu-Nada E. (2009). "Effects of variable viscosity and thermal conductivity of Al₂O₃-water nanofluid on heat transfer enhancement in natural convection". *Int J Heat Int J Heat Fluid Flow*; Vol. 30, pp. 679-690.
- [15] Bejan, A. (1995). *Entropy Generation Minimization*, CRC Press, New York.
- [16] Brinkman H.C. (1952). The viscosity of concentrated suspensions and solution, *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 20, pp. 571-581.
- [17] Chon, C.H, Kihm, K.D., Lee, S.P., Choi, S.U.S. (2005). "Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al₂O₃) thermal conductivity enhancement". *Applied Physics Letters*, Vol. 87, pp. 107-110.
- [18] S.V. Patankar, (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, McGraw-Hill, Washington DC.
- [19] Chamkha, A.J., Abu-Nada, E. (2012). "Mixed convection flow in single- and double-lid driven square cavities filled with water-Al₂O₃ nanofluid: Effect of viscosity models". *European Journal of Mechanics B/Fluids*, Vol. 36, pp. 82-96.
- [20] Oliveski, R.D.C., Macagnan, M.H. and Copetti, J.B. (2009). "Entropy generation and natural convection in rectangular cavities", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 1417-1425.