

## مطالعه عددی جابجایی ترکیبی و تولید آنتروپی در حفره لوزوی پر شده با نانوسیال آب-مس با جذب / تولید گرما

سید عبدالله منصوری مهریان      دانشجوی دکترا، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران

محمد رضا صفاریان      استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

ظفر نمازیان\*      مربی، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران

فرشاد مرادی کشکولی      دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

### چکیده

این پژوهش انتقال گرمای جابجایی ترکیبی و تولید آنتروپی در یک محفظه لوزوی پر شده با نانوسیال مس-آب در حضور جذب یا تولید گرما را بررسی می‌کند. دیواره پایین گرم، دیواره بالا سرد و دیواره‌های مورب، عایق‌اند. دیواره بالایی با سرعت  $U_0$  از چپ به راست حرکت می‌کند. شبکه محاسباتی حفره لوزوی با نگاشت به یک دامنه مربعی تبدیل می‌شود. معادلات حاکم به صورت روابط تابع جریان، گردابه و انرژی، فرمول‌بندی و با روش عددی اختلاف محدود حل شده‌اند. تأثیرات زاویه لوزی، ضریب تولید یا جذب گرما، کسر حجمی نانوذرات و عدد ریچاردسون بر روی مشخصه‌های انتقال گرما و جریان بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که افزایش کسر حجمی نانوذرات، سبب افزایش ناسلت متوسط، آنتروپی کل و عدد بیجن می‌شود. برای عدد ریچاردسون  $Ri=0.1$  و کسرهای حجمی مختلف، بیشینه و کمینه ناسلت متوسط، به ترتیب، در زاویه  $120^\circ$  و  $30^\circ$  درجه اتفاق می‌افتد. برای کسرهای حجمی مختلف و همه زوایا، غیر از زاویه  $60^\circ$  درجه، کاهش عدد ریچاردسون سبب افزایش ناسلت متوسط، آنتروپی کل و عدد بیجن می‌شود. برای  $Ri=0.01$ ، جذب و تولید گرما، ناسلت متوسط را به ترتیب افزایش و کاهش می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** جابجایی ترکیبی، نانوسیال، تولید آنتروپی، جذب / تولید گرما، محفظه لوزوی.

## Numerical Study of the Mixed Convection and the Entropy Generation in a Rhombic Enclosure Filled with the Cu-Water Nanofluid with the Heat Absorption/ Generation

S. A. M. Mehryan

Young Researchers and Elite Club, Yasooj Branch, Islamic Azad University, Yasooj, Iran

M. R. Saffarian

Department of Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Z. Namazian

Young Researchers and Elite Club, Yasooj Branch, Islamic Azad University, Yasooj, Iran

F. Moradi Kashkooli

Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

### Abstract

The mixed convection heat transfer and the entropy generation in a rhombic enclosure filled with the Cu-water nanofluid in presence of heat absorption or generation is investigated. The bottom wall is hot, the top wall is cold and the skewed walls are insulated. The top wall is moving from left to right at constant speed of  $U_0$ . The computational grid is generated with the mapping of the geometry into a square domain. The governing equations are formulated in terms of the dimensionless stream function, the vorticity, and the energy and have been numerically solved using the finite difference scheme. The rhombic angle, the Richardson number, the volume fraction nanoparticles, and the heat generation or absorption coefficients effects on the heat transfer and fluid flow characteristics are examined. The results show that the increase of the nanoparticles volume fraction leads to the increase of the average nusselt number, the total entropy, and Bejan number. When the Richardson number is 0.1 and for all the nanoparticles volume fraction, the Nusselt number has maximum and minimum values at the angles of  $120^\circ$  and  $30^\circ$ , respectively. In addition, for all the volume fractions of nanoparticles and skew angles except the angle of  $60^\circ$  degree, the Nusselt number, the total entropy and Bejan number increase with the decreasing of the Richardson number. When  $Ri=0.01$ , Nusselt number is increased and decreased by the heat absorption and generation, respectively.

**Keywords:** Mixed convection, Nanofluid, Entropy generation, Absorption/generation heat, Rhombic enclosure.

### ۱- مقدمه

گلیکول رسانایی گرمایی نسبتاً پایینی دارند. از این رو نانوسیال‌ها (سوسپانسیون‌های همگن نانوذرات در یک سیال پایه) به علت رسانایی گرمایی بالای نانوذرات و در نتیجه توانایی بالقوه در افزایش انتقال گرما، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته‌اند. مطالعات بسیار گسترده‌ای در زمینه انتقال گرمای جابجایی در حفره‌های با هندسه‌های مختلف و پر شده با نانوسیال صورت گرفته است [۱-۶]. قاسمی و امین‌السعداتی

انتقال گرمای جابجایی در حفره‌ها به دلیل کاربردهای فراوان، موضوع طیف وسیعی از مطالعات تجربی و نظری می‌باشد. از جمله این کاربردها می‌توان خنک‌سازی قطعات الکترونیکی، کوره‌ها، راکتورهای هسته‌ای، فرآیندهای مرتبط با صنایع شیشه‌سازی و فرایند روغن‌کاری را نام برد. سیالات استفاده شده برای کاربردهای انتقال گرما مانند آب و اتیلن

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: z.namazian@gmail.com

[۷] حرکت براونی نانوذرات، تحت تأثیر جابجایی طبیعی در یک حفره مثلی پر شده با نانوسیال با یک چشمه گرمایی روی دیواره قائم حفره را بررسی کردند. آناندالاکشمی و باساک [۸] به بررسی خطوط گرما و جریان سیال جابجایی طبیعی درون یک حفره لوزی پرداختند. مطالعه عددی مشخصه‌های انتقال گرمای جابجایی طبیعی در یک محفظه با دیواره‌های جانبی موجی شکل و پر شده با نانوسیال توسط چو و همکاران [۵] انجام شد. نتایج عددی نشان داد که با افزایش فرکانس موج دیواره، آهنگ انتقال گرم افزایش می‌یابد. ابونادا و چمخه [۹] تأثیر مدل‌های گوناگون رسانایی گرمایی و لزجت را بر مشخصه‌های انتقال گرمای جابجایی طبیعی در یک محفظه پر شده با نانوسیال آب-اتیلن-گلیکول-اکسید مس بررسی کردند. سانترا و همکاران [۱۰] مشخصه‌های انتقال گرمای نانوسیال مس-آب را با فرض غیرنیوتنی بودن نانوسیال در یک حفره مربعی بررسی کردند.

لین و ویولی [۱۱] نشان دادند که با کاهش اندازه نانوذرات آلومینیا در جریان جابجایی طبیعی با سیال پایه آب از 250 nm تا 5 nm آهنگ انتقال گرما افزایش می‌یابد. چنگ و لیو [۱۲] جابجایی ترکیبی درون یک حفره مربعی را به منظور بررسی تأثیرات زاویه کج‌شدگی حفره، عدد ریچاردسون و نسبت منظری روی الگوی جریان و انتقال گرما، شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که اگر رژیم غالب بر جریان، اجباری باشد زاویه کج‌شدگی بر ساختار جریان و انتقال گرما تأثیری ندارد. خانافر [۱۳] به بررسی جریان جابجایی اجباری و انتقال گرمای درون یک محفظه مربعی با سطح پایینی گرم انعطاف‌پذیر پرداخت. این بررسی نشان داد که در عدد گراشف  $10^4$  و برای اعداد رینولدز کمتر از ۴۰۰، دیواره انعطاف‌پذیر در مقایسه با دیواره مسطح، آهنگ انتقال گرما را به مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهد. باساک و همکاران [۱۴] نشان دادند که در جابجایی طبیعی درون یک محفظه دوزنقه‌ای ناسلت متوسط در حالت شار غیریکنواخت کمتر از حالت شار یکنواخت می‌باشد.

مطالعه تولید آنتروپی به عنوان معیاری از نابودی قابلیت کاردهی، برای دستیابی به یک طراحی بهینه در سیستم‌های انرژی، یک موضوع بسیار مهم است. پایه علم تولید آنتروپی به مطالعات کلوی و کلازیوس روی جنبه‌های بازگشت‌ناپذیر قانون دوم ترمودینامیک باز می‌گردد. بعد از مطالعات کلوی و کلازیوس، تئوری‌هایی بر اساس اصول مقدماتی مطرح شده توسط آن‌ها، توسعه یافت. با این حال، بررسی تولید آنتروپی ناشی از اختلاف دما توسط ترمودینامیک کلاسیک ناآزموده باقی ماند که این امر انگیزه بسیاری از محققان را برای تجزیه و تحلیل مسائل مهندسی کاربردی بر اساس قانون دوم ترمودینامیک فراهم کرد. از منابع مختلف تولید آنتروپی می‌توان انتقال گرمای ناشی از اختلاف محدود دما، لزجت سیال و انتقال جرم را نام برد [۱۵].

چو [۱۶] نشان داد که با افزایش اندازه و طول موج دیواره موجی شکل در یک حفره مربعی، ناسلت متوسط و تولید آنتروپی ناشی از جریان جابجایی طبیعی نانوسیال آب-آلومینا افزایش می‌یابد. احمد محمود و همکاران [۱۷] آنالیز تولید آنتروپی ناشی از جابجایی آزاد در یک محفظه مربعی تحت تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت و جذب/تولید گرمای یکنواخت را انجام دادند. بررسی انتقال گرمای طبیعی و تولید آنتروپی مربوط به یک حفره لوزی متخلخل به منظور بهینه‌سازی عملکرد یک سیستم گرمایی توسط آناندالاکشمی و باساک [۱۸] انجام گرفت. آن‌ها نشان دادند که با افزایش ضریب تخلخل، ناسلت متوسط

روی سطح گرم و تولید آنتروپی کل افزایش می‌یابد. بررسی تولید آنتروپی و انتقال گرمای جابجایی اجباری نانوسیال مس-آب و آب خالص در یک حفره مربعی توسط خراسانی زاده و همکاران [۱۹] صورت گرفت. آلیس و همکاران [۲۰] تأثیر نسبت منظری یک حفره مستطیلی را بر تولید آنتروپی مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که برای اعداد رایلی بالا، با افزایش نسبت منظری تولید آنتروپی کل، ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. چاکون و همکاران [۲۱] در مطالعه عددی تولید آنتروپی ناشی از جابجایی اجباری در یک محفظه با گرم‌کن‌های جزئی، نشان دادند که با افزایش عدد ریچاردسون، آنتروپی تولید شده توسط اصطکاک سیال شدت می‌یابد. داگنکین و همکاران [۲۲] به مطالعه تولید آنتروپی و انتقال گرمای جابجایی طبیعی در یک محفظه ال-شکل پرداختند.

مرور مقالات منتشر شده نشان می‌دهد که هیچ مطالعه‌ای روی جریان ترکیبی درون حفره لوزی پر شده با نانوسیال در حضور جذب یا تولید گرما انجام نشده است. بنابراین، در این تحقیق به مطالعه عددی رفتار جابجایی ترکیبی نانوسیال آب-مس و تولید آنتروپی درون یک حفره لوزی تحت تأثیر تولید و جذب گرما پرداخته می‌شود.

## ۲- تعریف مسئله و معادلات حاکم

شکل ۱ طرح‌واره‌ای از حفره لوزی مورد بررسی را نشان می‌دهد. دیواره‌های جانبی عایق می‌باشند و دمای  $T_h$  و  $T_c$  به ترتیب بر دیواره‌های گرم پایین و سرد بالا اعمال شده است. دیواره بالایی با سرعت ثابت  $U_0$  در صفحه خود حرکت می‌کند و دیواره‌های دیگر محفظه بدون حرکت می‌باشند. حفره لوزی در حضور تولید و جذب گرما، با نانوسیال مس-آب پر شده است. فرض تعادل گرمایی بین سیال پایه و نانوذرات کروی مس برقرار است. نانوسیال نیوتنی، غیرقابل تراکم و جریان سیال آرام می‌باشد. خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات مس در جدول ۱ ارائه شده است. خواص ترموفیزیکی نانوسیال در طول فرایند حل، مقدار ثابتی است و تغییرات چگالی به جز در عبارت نیروی شناوری معادله مومنوم که با تقریب بوزینسک بیان می‌شود، نادیده گرفته شده است. با اعمال فرض‌های ذکر شده و با در نظر گرفتن متغیرهای بدون بعد زیر:

$$X = \frac{x}{H}, Y = \frac{y}{H}, U = \frac{u}{u_0}, V = \frac{v}{u_0}, \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f}, \quad (1)$$

$$\Omega = \frac{\omega H}{u_0}, \Psi = \frac{\psi}{Hu_0}, Gr = \frac{g\beta_f \Delta T H^3}{\nu_f \mu_f}, Re = \frac{u_0 H}{\nu_f}, Ri = \frac{Gr}{Re^2}$$

در معادلات فوق  $Pr$ ,  $Gr$ ,  $Re$  و  $Ri$  به ترتیب، اعداد بدون بعد پرانتل، گراشف، رینولدز و ریچاردسون نامیده می‌شوند. معادلات بدون بعد حاکم بر جریان در فرم معادلات بی‌بعد تابع جریان-گردابه و انرژی به صورت زیر بیان می‌شوند [۲، ۱۲، ۲۳]:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = -\Omega \quad (2)$$

$$U \frac{\partial \Omega}{\partial X} + V \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial}{\partial X} \left( \frac{\nu_{eff}}{\alpha_f} \right) \left( \frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Y^2} \right) + Ri \left( \frac{\partial \beta}{\partial T} \right)_{nf} \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) \quad (3)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{RePr} \left( \frac{\alpha_{eff}}{\alpha_f} \right) \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) + \frac{1}{RePr} \left( \frac{\alpha_{eff}}{\alpha_f} \right) \left( \frac{\partial \rho_c}{\partial T} \right)_f q_0 \quad (4)$$

$$U = \frac{\partial \Psi}{\partial Y}, V = -\frac{\partial \Psi}{\partial X} \quad (5)$$

|                   |                                                                                   |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| پخشندگی گرمایی    | $\alpha_{nf} = k_{nf} / (\rho c_p)_{nf} \quad [27, 26]$                           |
| ظرفیت گرمایی      | $(\rho c_p)_{nf} = \phi p_{np} c_{np} + (1 - \phi) \rho_f c_f \quad [26]$         |
| ضریب انبساط دمایی | $(\rho \beta)_{nf} = (1 - \phi)(\rho \beta)_f + \phi(\rho \beta)_{np} \quad [27]$ |
| لزجت دینامیکی     | $\mu_{nf} = \mu_f / (1 - \phi)^{0.25} \quad [27]$                                 |

آهنگ تولید آنتروپی موضعی به دلیل بازگشت‌ناپذیری‌های ناشی از انتقال گرما و اصطکاک با رابطه ۱۰ بیان می‌شود [۲۹-۳۰]:

$$S'_{gen} = \frac{k_{nf}}{k_f} \left[ \left( \frac{\partial \theta}{\partial X} \right)^2 + \left( \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right)^2 \right] + \kappa \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \left[ 2 \left( \frac{\partial U}{\partial X} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial V}{\partial Y} \right)^2 + \left( \frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\partial V}{\partial X} \right)^2 \right] = S'_h + S'_f \quad (10)$$

در این معادله،  $S'_h$  و  $S'_f$  به ترتیب آنتروپی موضعی بی‌بعد ناشی از بازگشت‌ناپذیری انتقال گرما و اصطکاک سیال است. در رابطه ۱۰،  $\kappa$  فاکتور بازگشت‌ناپذیری نامیده می‌شود.

$$\kappa = \frac{\mu_f T_0}{k_f} \left( \frac{U_0^2}{T_h - T_c} \right), \quad T_0 = (T_h + T_f) / 2 \quad (11)$$

تولید حجمی آنتروپی کل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S_i = \frac{\int S'_{gen} dV}{V} \quad (12)$$

پارامتر دیگری که برای توزیع بازگشت‌ناپذیری تعریف می‌شود "عدد بیجن" نامیده می‌شود. عدد بیجن، نسبت تولید آنتروپی بر اثر انتقال گرما به تولید آنتروپی کل (تولید آنتروپی بر اساس انتقال گرما و اصطکاک) است [۲۹].

$$Be = \frac{S_h}{S_i} \quad (13)$$

### ۳- روش عددی، حساسیت شبکه و اعتبارسنجی

شبکه محاسباتی درون حفره لوزوی با نگاشت دامنه فیزیکی صفحه  $x$ - $y$ ، شکل ۲ (الف) به یک دامنه محاسباتی مربعی صفحه  $\eta$ - $\xi$  شکل ۲ (ب) تبدیل شده است. متغیرهای مستقل در دامنه فیزیکی با استفاده از معادلات ۱۴ به متغیرهای مستقل در دامنه محاسباتی تبدیل می‌شوند.

$$\xi = X - Y \cot \gamma \quad (14)$$

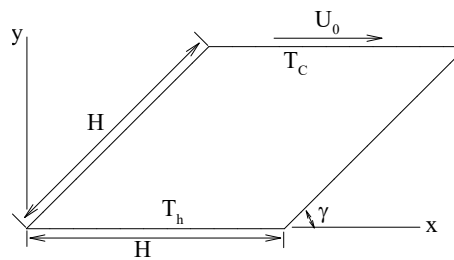
$$\eta = Y / \sin \gamma$$

معادلات حاکم (۲-۵) همراه با شرایط مرزی، با استفاده از روابط ۱۴ به دامنه محاسباتی منتقل شده و پس از حل در این دامنه، نتایج به‌دست آمده به دامنه فیزیکی بازگردانده می‌شوند. روش تفاضل محدود مرتبه دوم برای گسسته‌سازی این معادلات استفاده شده است. دستگاه معادلات جبری حاصل شده از گسسته‌سازی، با استفاده از روش زیرتخفیف متوالی حل شده است. روش زیرتخفیف متوالی به دلیل ماهیت غیرخطی معادلات حاکم خصوصاً معادله گردابه استفاده می‌گردد [۳۱]. برای انجام این محاسبات، کد کامپیوتری به زبان برنامه‌نویسی فرترن نوشته شده است. برای دست‌یابی به یک حل همگرا شده، معیار همگرایی استفاده شده عبارت است از:

$$\frac{\sum_{i=1}^{i=M} \sum_{j=1}^{j=N} |\Gamma^{m+1} - \Gamma^m|}{\sum_{i=1}^{i=M} \sum_{j=1}^{j=N} |\Gamma^{m+1}|} \leq 10^{-6} \quad (15)$$

در این رابطه،  $\Gamma$  می‌تواند هر کدام از متغیرهای  $\Omega$ ،  $\Psi$  و  $T$  باشد. آزمون حساسیت حل به شبکه (جدول ۳) برای محفظه قائم با  $Ri=0.01$ ،  $\phi=5$  و  $\phi=0.04$ ، نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن هر دو معیار دقت مقدار

در رابطه (۴)،  $q=(Q_0 H^2)/(\rho c_p \alpha_f)$  می‌باشد و نظر به اینکه  $Q_0 > 0$  یا  $Q_0 < 0$  باشد به‌ترتیب چشمه یا چاه گرمایی وجود دارد. خواص ترموفیزیکی نانوسیال با استفاده از مدل‌های ارائه شده در جدول ۲ بیان شده است.



شکل ۱- هندسه مورد مطالعه

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی نانوسیال [۲۳]

| خواص ترموفیزیکی                              | مس                    | آب                   |
|----------------------------------------------|-----------------------|----------------------|
| $\rho \text{ (kgm}^{-3}\text{)}$             | ۸۹۵۴                  | ۹۹۷/۱                |
| $c_p \text{ (Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}\text{)}$ | ۳۸۳                   | ۴۱۷۹                 |
| $k \text{ (wm}^{-1}\text{K}^{-1}\text{)}$    | ۴۰۰                   | ۰/۶                  |
| $\beta \text{ (K}^{-1}\text{)}$              | $1/67 \times 10^{-5}$ | $2/1 \times 10^{-4}$ |

رسانایی گرمایی موثر نانوسیال ( $k_{nf}$ ) با نانوذرات کروی نیز با استفاده از مدل اصلاح شده ماکسول بیان می‌شود [۳].

$$k_{nf} = k_f \left[ \frac{(k_{eq} + 2k_f) + 2(k_{eq} - k_f)(1 + \lambda)^3 \phi}{(k_{eq} + 2k_f) - (k_{eq} - k_f)(1 + \lambda)^3 \phi} \right] \quad (6)$$

که  $\lambda$  نسبت ضخامت لایه نانو به شعاع نانوذرات و  $k_{eq}$  ضریب رسانایی گرمایی معادل نانوذرات و لایه‌های شکل‌گرفته اطرافشان است [۳].

$$k_{eq} = k_{np} \left[ \frac{\sigma \frac{2(1 - \sigma) + (1 + \lambda)^3 (1 + 2\sigma)}{(\sigma - 1) + (1 + \lambda)^3 (1 + 2\sigma)}}{\sigma} \right] \quad (7)$$

در این رابطه  $\sigma = k_{nf}/k_{np}$  می‌باشد. شرایط مرزی استفاده شده برای حل معادلات حاکم عبارتند از:

$$\theta=0, \Psi=0, V=0, U=1 \quad \text{۱- دیواره بالایی (متحرک):}$$

$$\theta=1, \Psi=0, V=0, U=1 \quad \text{۲- دیواره پایینی:}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial n}=0, \Psi=0, V=0, U=0 \quad \text{۳- دیواره‌های مورب:}$$

عمود بر دیواره‌های جانبی حفره می‌باشد.

شرط مرزی برای گردابه در دیواره‌ها با معادله ماتریسی (۸) محاسبه می‌شود [۲۸].

$$\frac{1}{3\Delta h^2} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -4 & \frac{1}{2} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \Psi + \frac{1}{9} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 2 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{4} & 1 & \frac{1}{4} \end{bmatrix} \Omega = -\frac{U_0}{\Delta h} \quad (8)$$

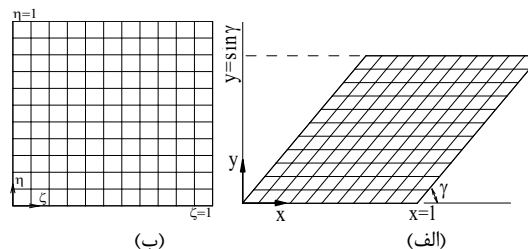
در این معادله،  $\Delta h$  گام مکانی برای گسسته‌سازی دامنه حل می‌باشد. به منظور تعیین آهنگ انتقال گرما، ناسلت متوسط روی دیوار گرم با انتگرال‌گیری از ناسلت موضعی در امتداد دیواره به دست می‌آید:

$$Nu_{av} = -\int_0^1 \frac{k_{nf}}{k_f} \left( \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) dX \quad (9)$$

جدول ۲- مدل‌های استفاده شده برای محاسبه خواص نانوسیال

| خواص نانوسیال | مدل استفاده شده                                             |
|---------------|-------------------------------------------------------------|
| چگالی         | $\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_f + \phi \rho_{np} \quad [25]$ |

عددی و زمان محاسباتی، شبکه  $121 \times 121$  برای گسسته‌سازی دامنه حل مناسب است.



شکل ۲- (الف) دامنه فیزیکی، (ب) دامنه محاسباتی

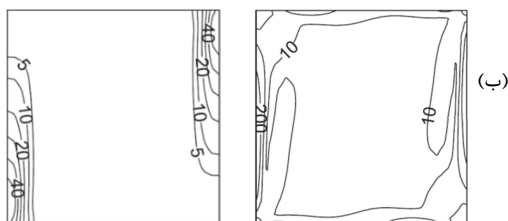
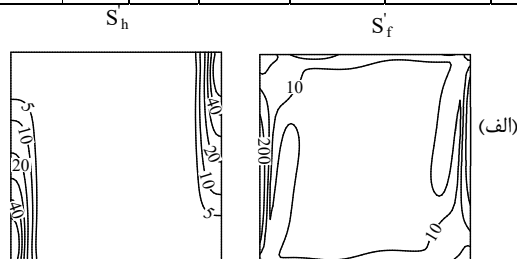
جدول ۳- ناسلت متوسط برای شبکه‌های مختلف

| تعداد نقاط شبکه  | ناسلت متوسط | خطا (%) |
|------------------|-------------|---------|
| $61 \times 61$   | ۱۹/۷۷۴۹۲    | -       |
| $71 \times 71$   | ۲۰/۱۰۵۶۳    | ۱/۶۵    |
| $81 \times 81$   | ۲۰/۳۵۵۰۲    | ۱/۲۴    |
| $91 \times 91$   | ۲۰/۵۴۸۶۰    | ۰/۹۵    |
| $101 \times 101$ | ۲۰/۶۹۷۰۳    | ۰/۷۲    |
| $111 \times 111$ | ۲۰/۸۱۰۶۲    | ۰/۵۴    |
| $121 \times 121$ | ۲۰/۹۰۲۳۶    | ۰/۴۴    |
| $131 \times 131$ | ۲۰/۹۷۴۴۱    | ۰/۳۵    |
| $141 \times 141$ | ۲۰/۰۳۲۵۴    | ۰/۲۸    |

برای اعتبارسنجی مطالعه حاضر، نتایج به دست آمده از برنامه کامپیوتری با نتایج گزارش شده در مراجع [۳۲-۳۶ و ۲۰] مقایسه شده است. جدول ۴ و شکل ۳ این مقایسه را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده از دقت بالایی برخوردار هستند از این رو می‌توان گفت که کد نوشته شده از صحت و دقت بسیار بالایی برخوردار است.

جدول ۴- عدد ناسلت مطالعه حاضر و مراجع [۳۶-۳۲] در  $Gr=100$

| Re   | مطالعه حاضر | وحید [۳۲] | عبدالخالق [۳۳] | خان فر [۳۴] | شریف [۳۵] | ایوانسو [۳۶] |
|------|-------------|-----------|----------------|-------------|-----------|--------------|
| ۱    | ۱/۰۰۰۳۲     | ۱/۰۰۰۳۳   | -              | -           | -         | -            |
| ۱۰۰  | ۲/۰۴۰۸۸     | ۲/۰۳۱۱۶   | ۱/۹۸۵۰         | ۲/۰۲        | -         | ۱/۹۴         |
| ۴۰۰  | ۴/۰۶۲۹۷     | ۴/۰۲۴۶۲   | ۳/۸۷۸۵         | ۴/۰۱        | ۴/۰۵      | ۳/۸۴         |
| ۱۰۰۰ | ۶/۵۲۷۵۵     | ۶/۴۸۴۲۳   | ۶/۳۴۵۰         | ۶/۴۲        | ۶/۵۵      | ۶/۳۳         |



شکل ۳- تولید آنتروپی موضعی ناشی از انتقال گرما ( $S'_h$ ) و لزجت سیال ( $S'_f$ ) (الف) مطالعه حاضر و (ب) گزارش مرجع [۲۰]

#### ۴- بحث و نتایج

در این پژوهش نتایج مطالعه عددی جابجایی ترکیبی نانوسیال مس-آب درون حفره لوزی با زاویه متغیر  $\gamma$  ارائه شده است. عدد پرانتل دارای مقدار ثابت  $Pr=6.2$  می‌باشد و تأثیرات تغییر عدد ریچاردسون در محدوده  $(0.01 \leq Ri \leq 1.0)$ ، زاویه لوزی در محدوده  $(30 \leq \gamma \leq 150)$ ، کسر حجمی نانوذرات در محدوده  $(0.0 \leq \phi \leq 0.06)$  و شدت تولید و جذب گرما در محدوده  $(-10 \leq q \leq 10)$  روی مشخصه‌هایی چون میدان‌های جریان و دما، خطوط آنتروپی ثابت، ناسلت متوسط، آنتروپی کل تولید شده و عدد بیجن بررسی شده است. برای همه حالت‌ها، عدد گراشف دارای مقدار ثابت  $10^{-4}$  است و عدد ریچاردسون با تغییر عدد رینولدز تغییر می‌کند.

#### ۴-۱- تأثیر زاویه لوزی و کسر حجمی نانوذرات

شکل ۴ تأثیر زاویه محفظه لوزی را روی خطوط جریان و خطوط دما ثابت در ریچاردسون  $0.1$ ، ضریب جذب  $q=-5$  و کسرهای حجمی  $\phi=0$  و  $\phi=0.06$  نشان می‌دهد. در این شکل، خطوط پیوسته و ناپیوسته به ترتیب، معرف کسر حجمی  $\phi=0$  و  $\phi=0.06$  می‌باشد. با افزودن نانوذرات به سیال پایه، مرکز گردابه‌های اولیه ساعتگرد (گردابه‌های تشکیل شده در مجاورت صفحه متحرک) به سمت مرکز حفره جابجا می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که الگوی خطوط جریان در زاویه  $\gamma=60^\circ$ ، برای سیال خالص و نانوسیال بسیار متفاوت است درحالی‌که نانوسیال تغییر قابل ملاحظه‌ای در شکل خطوط جریان مربوط به حفره‌های با زاویه  $90^\circ$  و  $120^\circ$  ایجاد نخواهد کرد. لازم به ذکر است که قدرت گردابه‌های ایجاد شده با حضور نانوذرات کاهش می‌یابد.

افزایش کسر حجمی نانوذرات تأثیرات نیروی شناوری و جمله نفوذ در معادله مومنتم را کاهش می‌دهد. توجه به ضرایب جمله شناوری و نفوذ که به ترتیب توسط روابط (۱۶) و (۱۷) بیان شده‌اند این گفته را تأیید می‌کند.

$$\frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf}\beta_f} = \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \left( 1 - \phi + \phi \frac{\rho_p\beta_p}{\rho_f\beta_f} \right) \quad (16)$$

$$\frac{v_{nf}}{v_f} = \left[ (1 - \phi) + \phi \frac{\rho_p}{\rho_f} \right]^{-1} \times (1 - \phi)^{-2.5} \quad (17)$$

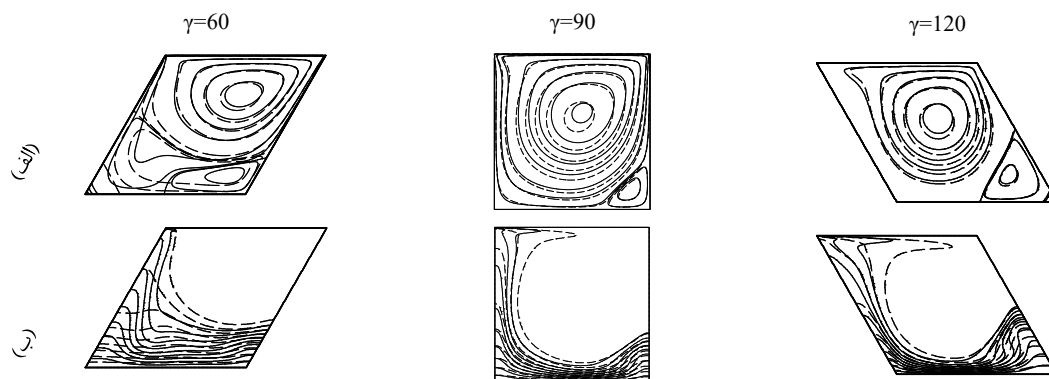
بنابراین می‌توان گفت که افزایش کسر حجمی نانوذرات، تأثیرات جابجایی اجباری را برجسته می‌کند. تشکیل گردابه ثانویه بزرگتر در حفره با زاویه  $60^\circ$  و کسر حجمی  $0.06$  نیز به دلیل کاهش تأثیرات نیروی شناوری بر اثر افزایش کسر حجمی نانوذرات می‌باشد. از طرف دیگر، برای تمام شرایط انحراف از زاویه  $90^\circ$ ، بیشینه مقدار تابع جریان گردابه اولیه را کم می‌کند. در صورتی که با این انحراف، اندازه گردابه ثانویه و بیشینه مقدار تابع جریان این گردابه‌ها افزایش می‌یابد.

بالای تنش برشی در این ناحیه است، اما در حقیقت بیشینه بودن آنتروپی موضعی کل به دلیل گرادیان شدید دما در این ناحیه است. آنچنان که مشخص است امتداد خطوط دما ثابت در گوشه بالایی سمت چپ بر صفحه دما ثابت سرد، تقریباً مماس می‌شوند که نشان از گرادیان فوق‌العاده شدید دما در این ناحیه دارد. از طرفی، آنتروپی موضعی ناشی از لغزش لایه‌های سیال در گوشه‌های سمت چپ و راست صفحه متحرک نسبت به دیگر نقاط درون حفره بیشینه است زیرا تأثیرات تنش برشی ایجاد شده به واسطه حرکت صفحه بالایی در این نواحی بسیار زیاد است.

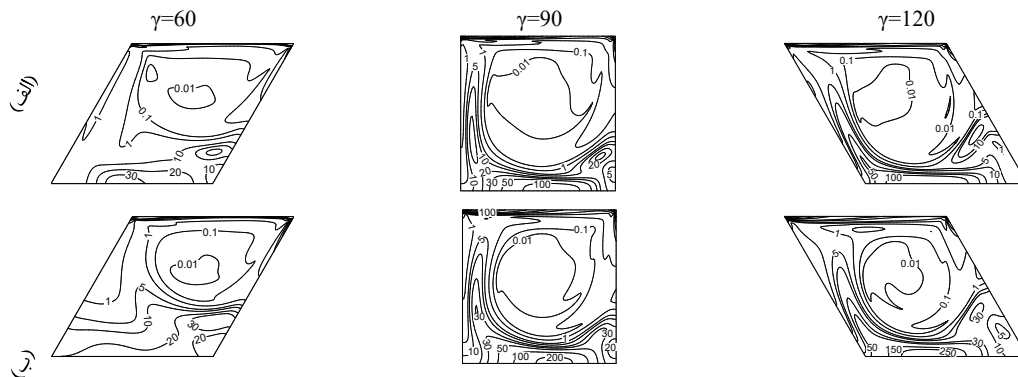
بررسی خطوط آنتروپی ثابت نشان می‌دهد که در نواحی با گرادیان‌های شدید دما، تولید آنتروپی موضعی کل زیاد می‌باشد. برعکس، در نواحی که اختلاط سیال به خوبی صورت گرفته است تولید آنتروپی موضعی ناچیز است. شکل ۵ هم‌چنین نشان می‌دهد که حضور نانوذرات مس درون سیال پایه، الگوی خطوط آنتروپی ثابت را تغییر می‌دهد. با افزایش کسر حجمی نانوذرات، تولید آنتروپی موضعی افزایش می‌یابد. از طرفی با افزایش زاویه  $\gamma$ ، خطوط دما ثابت به دیواره گرم نزدیکتر می‌شوند. بنابراین می‌توان گفت که با افزایش زاویه لوزی، تولید آنتروپی موضعی در مجاورت دیواره گرم افزایش می‌یابد.

انحنای کم خطوط دما ثابت در نزدیکی دیواره گرم نشان می‌دهد که انتقال گرما در نزدیکی دیواره ناشی از رسانش است. با افزایش زاویه لوزی از مقاومت دیواره‌های جانبی در مقابل حرکت سیال کاسته می‌شود از این رو جایجایی در حفره افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت با افزایش زاویه لوزی، انحنای خطوط دما ثابت در نواحی مرکزی حفره زیاد می‌شود. از طرف دیگر، افزایش کسر حجمی نانوذرات، گرادیان دما را در نزدیکی دیواره گرم، زیاد می‌کند زیرا افزایش نانوذرات به دلیل افزایش رسانایی گرمایی سبب نفوذ عمیق‌تر گرما به نانوسیال می‌شود.

شکل ۵ (الف) و (ب) تأثیر زاویه لوزی و هم‌چنین کسر حجمی نانوذرات مس را بر خطوط آنتروپی ثابت نشان می‌دهد. در همه حالت‌های ارایه شده، بیشینه آنتروپی موضعی کل در گوشه بالایی سمت چپ حفره می‌باشد. شاید به نظر برسد که بیشینه بودن آنتروپی موضعی کل در سمت چپ صفحه متحرک به دلیل تأثیرات



شکل ۴- (الف) خطوط جریان، (ب) خطوط هم‌دما برای زوایای مختلف در  $q=-5$ ،  $Ri=0.1$ ،  $\phi=0$  (خطوط پیوسته) و  $\phi=0.06$  (خطوط ناپیوسته)

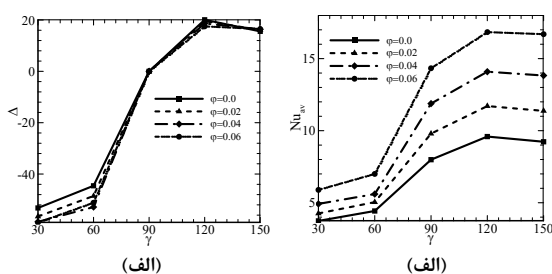


شکل ۵- (الف) خطوط آنتروپی ثابت سیال خالص، (ب) نانوسیال با کسر حجمی  $\phi=0.06$  برای زوایای مختلف در  $q=-5$  و  $Ri=0.1$

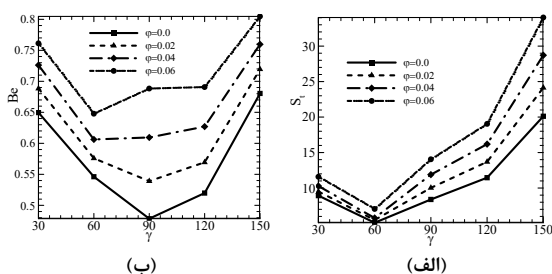
شکل ۶ (الف) نشان می‌دهد که با افزایش کسر حجمی نانوذرات، ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. افزایش کسر حجمی سبب افزایش رسانایی گرمایی شده و در نتیجه انتقال گرما بهبود می‌یابد. این شکل همچنین نشان می‌دهد که برای  $Ri=0.1$  و همه کسرهای حجمی، با تغییر زاویه  $\gamma$  از  $30^\circ$  تا  $120^\circ$ ، ناسلت به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. بعد از آن با افزایش زاویه حفره از  $120^\circ$  به  $150^\circ$ ، ناسلت متوسط به میزان اندکی کم می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که در عدد ریچاردسون  $Ri=0.1$ ، بیشینه آهنگ انتقال گرما در زاویه  $120^\circ$  اتفاق می‌افتد. همان‌گونه که شرح داده شد، با افزایش زاویه لوزی (تا  $120^\circ$ ) جابجایی سیال در حفره افزایش می‌یابد که این افزایش جابجایی سبب افزایش آهنگ انتقال گرما می‌شود.

برای تخمین درصد افزایش یا کاهش آهنگ انتقال گرما بر اثر انحراف از زاویه  $90^\circ$ ، فاکتور درصد افزایش ناسلت به صورت  $\Delta = [(Nu_{av,\gamma} - Nu_{av,90}) / Nu_{av,90}] \times 100$  تعریف شده است. درصد افزایش یا کاهش ناسلت متوسط روی دیواره گرم بر حسب زاویه محفظه لوزی برای  $Ri=0.1$  و  $q=-5$  در شکل ۶ (ب) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که درصد افزایش ناسلت متوسط برای زوایای بزرگتر از  $90^\circ$  تقریباً یکسان است. در مقابل، درصد کاهش آهنگ انتقال گرما برای این رژیم جریان در زوایای حاده، تا حدودی به کسر حجمی نانوذرات وابسته است. با افزایش کسر حجمی از صفر تا  $0.04$ ، پارامتر درصد کاهش ناسلت، افزایش و سپس از  $0.04$  تا  $0.06$  تقریباً ثابت باقی می‌ماند. شکل ۷ (الف) نشان می‌دهد که افزایش کسر حجمی نانوذرات سبب افزایش آنتروپی درون حفره لوزی می‌شود. همچنین، بیشینه و کمینه آنتروپی حجمی کل به ترتیب در  $\gamma=150$  و  $\gamma=60$  خواهد بود.

شکل ۷ (ب) نشان می‌دهد که تنها در  $\gamma=90$  و برای سیال خالص، عدد بیچن کمتر از  $0.5$  است ( $Be=0.478$ ). این امر نشان می‌دهد که در  $Ri=0.1$  به استثنای حفره با زاویه  $\gamma=90$  و  $\phi=0$ ، در همه زوایا و



شکل ۶- (الف) تغییرات ناسلت متوسط (ب) درصد تغییر ناسلت متوسط بر حسب زاویه مورب در کسرهای حجمی مختلف برای  $Ri=0.1$  و  $q=-5$



شکل ۷- تغییرات (الف) آنتروپی حجمی کل (ب) عدد بیچن بر حسب زاویه لوزی در کسرهای حجمی مختلف برای  $Ri=0.1$  و  $q=-5$

کسرهای حجمی، بازگشت‌ناپذیری انتقال گرما بر بازگشت‌ناپذیری اصطکاکی غلبه دارد. به‌علاوه، Be با افزایش کسر حجمی نانوذرات زیاد می‌شود. نانوذرات سبب افزایش رسانایی گرمای موثر خواهند شد و با افزایش کسر حجمی نانوذرات، بازگشت‌ناپذیری‌های ناشی از انتقال گرما، زیاد و از آنجا Be افزایش می‌یابد. آن چنان که شکل ۷ (ب) نشان می‌دهد، بیشینه عدد بیچن در  $\gamma=150$  و کمینه آن با توجه به کسر حجمی  $\phi=0.0, 0.02$  در  $\gamma=90$  یا  $\gamma=60$  ( $\phi=0.04, 0.06$ ) خواهد بود. همچنین، بیشترین افزایش مقدار Be با افزایش کسر حجمی نانوذرات، در  $\gamma=90$  می‌باشد.

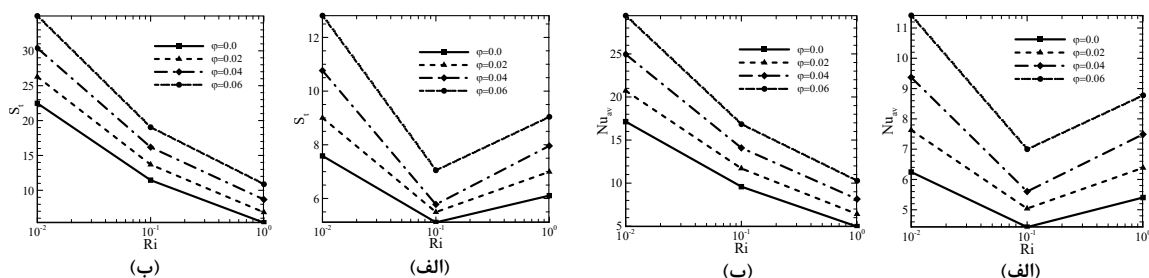
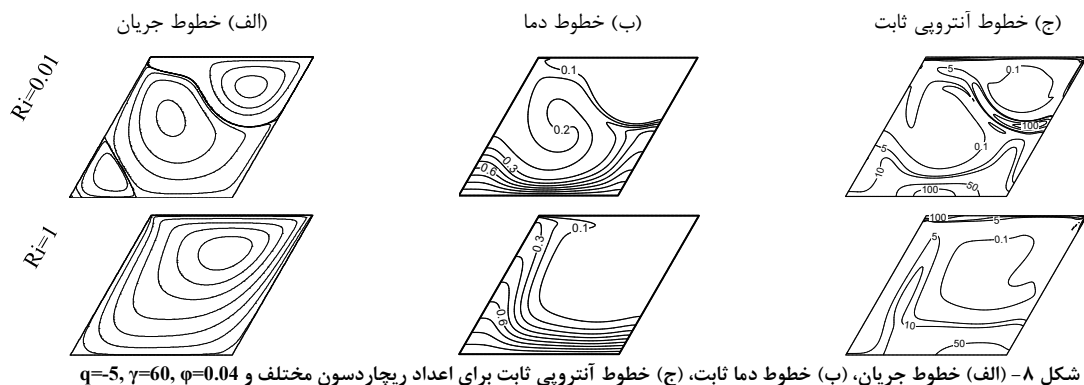
#### ۴-۲- تأثیر عدد ریچاردسون و کسر حجمی نانوذرات

شکل ۸ (الف) نشان می‌دهد که تغییرات عدد ریچاردسون رفتار میدان جریان درون حفره را به‌کلی دگرگون می‌کند. در عدد ریچاردسون ۱ که قدرت جابجایی طبیعی و جابجایی اجباری در کنترل میدان جریان یکسان است، تحت تأثیر هم‌زمان نیروی شناوری و نیروی برشی صفحه بالایی، گردابه‌ای تک‌سلولی و بزرگ اما با قدرت کم تشکیل می‌شود.

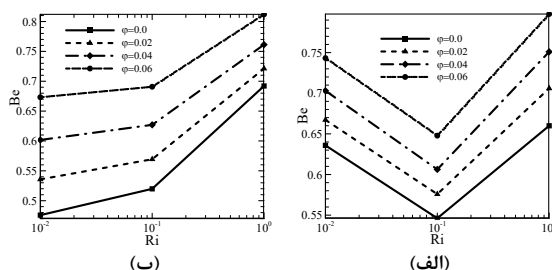
به‌دلیل افزایش جابجایی اجباری و کاهش اثرات نیروی شناوری با کاهش عدد ریچاردسون، تعداد و قدرت گردابه‌ها افزایش اما اندازه‌ی گردابه‌ها کاهش می‌یابد. با کاهش عدد ریچاردسون از ۱ تا  $0.1$ ، قدرت گردابه شکل گرفته در مجاورت صفحه متحرک (گردابه اولیه) افزایش می‌یابد. از طرفی، گردابه ثانویه تشکیل شده در مرکز حفره نیز این قدرت را دارد که بتواند بخش دیگری از سیال را مجبور به حرکتی در جهت عکس حرکت خود نماید. در  $Ri=1$ ، سیال از سطح گرم برخاسته، به سمت دیواره سرد حرکت کرده و دیده می‌شود که سیال پایین حفره به صورت مستقیم در تماس با سطح گرم و سرد قرار دارد.

آرایش خطوط دما ثابت در شکل ۸ (الف) برای  $Ri=0.01$  نشان می‌دهد که اختلاط سیال در دامنه وسیعی از محفظه به خوبی صورت پذیرفته است و گردایان دما در این ناحیه ناچیز است. همان‌گونه که قبلاً گفته شد (شکل ۴ الف برای  $\gamma=60^\circ$ )، در  $Ri=0.1$  مقداری از سیال در نزدیکی دیواره گرم به دام افتاده و شدت جریان در این ناحیه و نزدیکی دیواره گرم کاهش می‌یابد بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که آهنگ انتقال گرما از دیواره گرم کاهش می‌یابد. شکل ۸ (ب) نشان می‌دهد که برای  $Ri=0.01$ ، گردایان دما در مرز میان گردابه اولیه (مجاور با دیواره متحرک) و گردابه ثانویه تشکیل شده در مرکز حفره و همچنین در مجاورت دیوار گرم بالا است، در نتیجه آهنگ انتقال گرما در این ناحیه زیاد است. بالا بودن آهنگ انتقال گرما بیان‌گر تولید آنتروپی موضعی بالا است که در شکل ۸ (ج) نمایان است. در مقایسه بین  $Ri=1$  و  $Ri=0.01$  می‌توان گفت که در  $Ri=0.01$ ، تولید آنتروپی موضعی به‌دلیل وجود گردایان‌های بیشتر دما بالاتر است.

شکل‌های ۹ (الف) و (ب) تغییرات عدد ناسلت متوسط را بر حسب عدد ریچاردسون و کسرهای حجمی نانوذرات برای زوایای  $120^\circ$ ،  $60^\circ$  نشان می‌دهند. با کاهش  $Ri$ ، سرعت جریان سیال افزایش یافته و در نتیجه جابجایی بیشتر می‌شود. تأثیر افزایش قدرت جابجایی در افزایش عدد ناسلت در حفره با زاویه  $\gamma=120^\circ$  در شکل ۹ (ب) به وضوح دیده می‌شود. اما، در  $\gamma=60^\circ$  (شکل ۹ الف)، ناسلت متوسط با افزایش عدد ریچاردسون روند کاهشی-افزایشی را طی می‌نماید به گونه‌ای که در  $Ri=0.01$  بیشینه و در  $Ri=0.1$  کمینه آهنگ انتقال گرما وجود دارد.



شکل ۱۰- تغییرات آنتروپی حجمی کل بر حسب عدد ریچاردسون برای کسره‌های حجمی مختلف در  $q=5$  و زاویه (الف)  $\gamma=60^\circ$ ، (ب)  $\gamma=120^\circ$



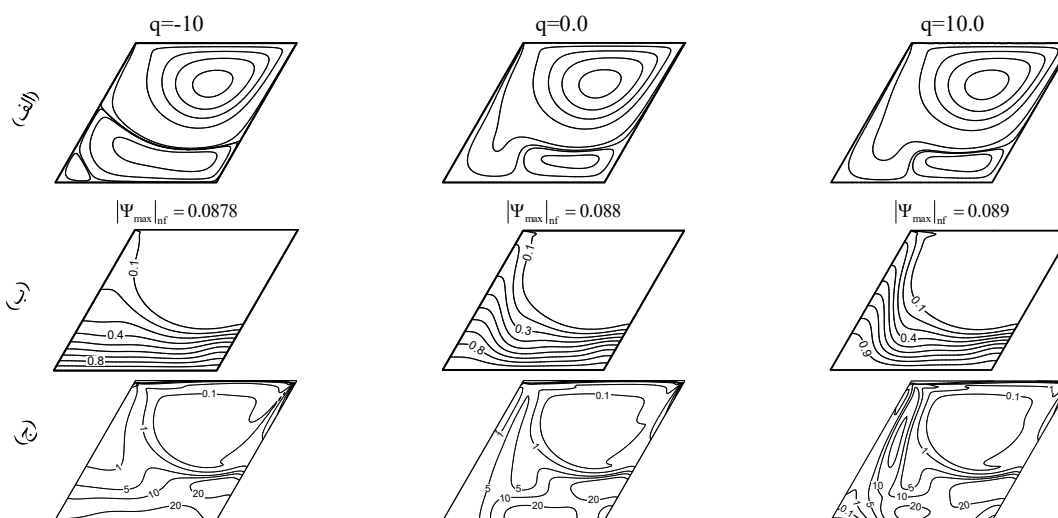
شکل ۱۲- نشان می‌دهد که در محفظه با  $\gamma=60^\circ$ ,  $\phi=0.04$  و  $Ri=0.1$ ، تولید گرما (q=10) الگوی حاکم بر گردابه‌های اولیه و ثانویه را تغییر نمی‌دهد (در مقایسه با  $q=0$ )، حال آن‌که جذب گرما ( $q=-10$ ) رفتار خطوط جریان را به کلی تغییر می‌دهد. تولید گرما بیشینه مقدار تابع جریان را افزایش می‌دهد در صورتی که جذب گرما این مقدار را کاهش می‌دهد. در شرایط جذب گرما ( $q<0$ )، دمای محفظه پایین‌تر از دمای محفظه بدون جذب گرما ( $q=0$ ) است. بنابراین گرادیان دما در نزدیکی دیواره‌های محفظه لوزوی در حالتی که جذب گرما وجود دارد، بیشتر از حالتی است که ضریب جذب صفر است (شکل ۱۲ ب). همان‌گونه که بیان شد بیشتر بودن گرادیان دما در نزدیکی دیواره‌ها به معنی بیشتر بودن آهنگ انتقال گرما است. از طرف دیگر، برای حالتی که  $q>0$  (تولید گرما) افزایش ضریب تولید گرما، دمای نانوسپال را

### ۴-۳- اثر ضریب جذب/تولید گرما و کسر حجمی نانوذرات

شکل ۱۲ (الف) نشان می‌دهد که در محفظه با  $\gamma=60^\circ$ ,  $\phi=0.04$  و  $Ri=0.1$ ، تولید گرما ( $q=10$ ) الگوی حاکم بر گردابه‌های اولیه و ثانویه را تغییر نمی‌دهد (در مقایسه با  $q=0$ )، حال آن‌که جذب گرما ( $q=-10$ ) رفتار خطوط جریان را به کلی تغییر می‌دهد. تولید گرما بیشینه مقدار تابع جریان را افزایش می‌دهد در صورتی که جذب گرما این مقدار را کاهش می‌دهد. در شرایط جذب گرما ( $q<0$ )، دمای محفظه پایین‌تر از دمای محفظه بدون جذب گرما ( $q=0$ ) است. بنابراین گرادیان دما در نزدیکی دیواره‌های محفظه لوزوی در حالتی که جذب گرما وجود دارد، بیشتر از حالتی است که ضریب جذب صفر است (شکل ۱۲ ب). همان‌گونه که بیان شد بیشتر بودن گرادیان دما در نزدیکی دیواره‌ها به معنی بیشتر بودن آهنگ انتقال گرما است. از طرف دیگر، برای حالتی که  $q>0$  (تولید گرما) افزایش ضریب تولید گرما، دمای نانوسپال را

آن‌چنان که بیان گردید در  $\gamma=60^\circ$  و عدد ریچاردسون ۰/۱، گردابه‌های ثانویه با شدت جریان پایین ایجاد شده که از انتقال مستقیم سیال از سطح گرم به سطح سرد جلوگیری می‌کند. بنابراین آهنگ انتقال گرما جابجایی در تقابل با رسانش کاهش می‌یابد در نتیجه عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم با کاهش عدد ریچاردسون از ۱ به ۰/۱ کاهش می‌یابد.

شکل‌های ۱۰ (الف) و (ب) تغییرات آنتروپی کل را بر حسب عدد ریچاردسون برای کسره‌های حجمی مختلف نانوذرات در  $q=5$  و زاویه‌ای  $\gamma=60^\circ$ ,  $120^\circ$  نشان می‌دهند. مجموعه شکل‌های ۹ (ب) و ۱۰ بیان می‌کنند که روند تغییرات ناسلت متوسط و آنتروپی کل یکسان است. می‌توان گفت که تشابه زیاد میان تغییرات آنتروپی کل و انتقال گرما به دلیل وابستگی بسیار زیاد تولید آنتروپی کل به آهنگ انتقال گرما است. مانند ناسلت متوسط روی دیواره گرم، با افزایش کسر حجمی نانوذرات تغییرات آنتروپی کل با تغییرات عدد ریچاردسون بیشتر می‌شود. شکل‌های ۱۱ (الف) و (ب) نشان می‌دهند که تغییرات عدد بیجن بر حسب ریچاردسون برای زاویه  $60^\circ$  رفتار کاهشی-افزایشی و برای  $120^\circ$  رفتاری افزایشی دارد. در  $\gamma=60^\circ$ ، کمینه Be به ازای  $Ri=0.1$  و بیشینه به ازای  $Ri=1$  به دست می‌آید. در صورتی که در  $\gamma=120^\circ$ ، کمینه و بیشینه Be به ترتیب در  $Ri=0.01$  و  $Ri=1$  می‌باشد.

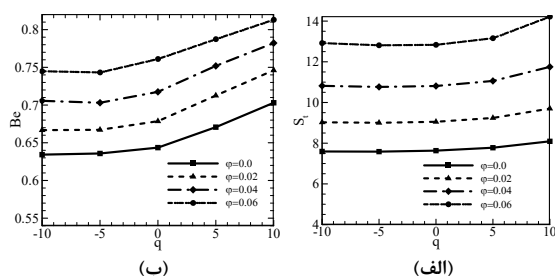


شکل ۱۲- (الف) خطوط جریان، (ب) خطوط دما ثابت و (ج) خطوط آنتروپی ثابت برای ضرایب مختلف جذب / تولید گرما در  $Ri=0.1$ ,  $\gamma=60$ ,  $\phi=0.04$

شکل ۱۴ (الف) نشان می‌دهد که اگر  $Ri=0.01$  باشد، برای  $q < 5$  و کسرهای مختلف حجمی نانوذرات، تولید حجمی آنتروپی کل تقریباً مستقل از ضریب تولید یا جذب گرما است. این شکل همچنین نشان می‌دهد در شرایطی که  $q > 5$  باشد، با افزایش کسر حجمی نانوذرات، تأثیر تولید گرما در افزایش تولید آنتروپی حجمی کل زیاد می‌شود. شکل ۱۴ (ب) بیان می‌کند که برای  $\gamma=60^\circ$ ،  $Ri=0.01$  و برای کسرهای حجمی مختلف نانوذرات، بازگشت‌ناپذیری ناشی از انتقال گرما بر بازگشت‌ناپذیری لزجت سیال غالب است ( $Be > 0.5$ ). از طرفی مشاهده می‌شود که در  $Ri=0.01$ ، تأثیر جذب گرما ( $q < 0$ ) در کاهش عدد بیجن نسبت به تأثیر تولید گرما ( $q > 0$ ) در افزایش عدد بیجن بسیار کمتر است. همچنین در  $Ri=0.01$ ، برای  $q < -5$ ، بازگشت‌ناپذیری ناشی از انتقال گرما به ضریب جذب گرما بستگی ندارد.

## ۵- نتیجه‌گیری

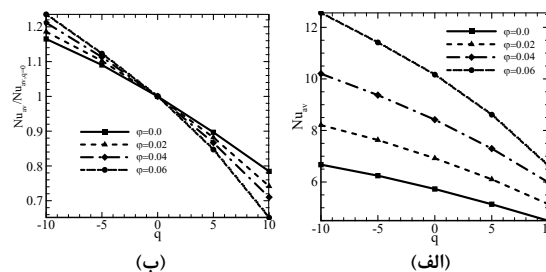
این مطالعه به بررسی عددی جابجایی ترکیبی نانوسیال مس-آب درون یک حفره لوزی در حضور جذب/تولید گرما پرداخته است. معادلات حاکم به‌صورت روابط بی‌بعد تابع جریان-گردابه و دما فرمول‌بندی شدند. برای ایجاد شبکه محاسباتی درون حفره از نگاشت دامنه فیزیکی به یک دامنه محاسباتی مربعی استفاده شده است.



شکل ۱۴- تغییرات (الف) آنتروپی حجمی کل (ب) عدد بیجن بر حسب میزان جذب / تولید گرما برای کسرهای حجمی مختلف در  $\gamma=60$  و  $Ri=0.01$

افزایش می‌دهد. با افزایش دمای نانوسیال، آهنگ انتقال گرما روی دیوار گرم کاهش یافته و سپس این کاهش آهنگ انتقال گرما برای کل میدان و دیوار سرد توسعه می‌یابد. در این حالت نیز بررسی هم‌زمان خطوط دما ثابت و آنتروپی ثابت بیان می‌کند که در نواحی که گرادیان خطوط دما ثابت شدید است، تولید موضعی آنتروپی بیشتر است. شکل ۱۲ (ج) این واقعیت را تأیید می‌کند.

شکل ۱۳ (الف) نشان می‌دهد که با افزایش ضریب تولید گرما ( $q > 0$ )، عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم کاهش می‌یابد. همچنین افزایش ضریب جذب ( $q < 0$ )، سبب افزایش عدد ناسلت می‌شود. شکل ۱۳ (ب) نسبت عدد ناسلت در حضور تولید/جذب گرما به عدد ناسلت بدون حضور تولید/جذب گرما را ارائه می‌دهد. همان‌گونه که گفته شد، اگر شرایط جذب گرما برقرار باشد ( $q < 0$ )، دمای نانوسیال کمتر از دمای سیال بدون جذب گرما است ( $q=0$ ). بنابراین آهنگ انتقال گرما در نزدیکی دیواره‌های گرم محفظه در حضور جذب گرما بیشتر از حالت بدون جذب است. برای حالتی که  $q > 0$ ، دقیقاً شرایط برعکس است. شکل‌های ۱۳ (الف) و (ب) همچنین نشان می‌دهند که تأثیر ضریب شدت جذب/تولید گرما بر افزایش یا کاهش ناسلت متوسط روی دیواره گرم با افزایش کسر حجمی نانوذرات مس افزایش می‌یابد.



شکل ۱۳- (الف) تغییرات ناسلت متوسط و (ب) - نسبت عدد ناسلت متوسط با تولید/جذب گرما به عدد ناسلت متوسط بدون تولید/جذب گرما بر حسب ضریب جذب/تولید گرما برای کسرهای حجمی مختلف در  $Ri=0.01$  و  $\gamma=60^\circ$

## علائم یونانی

|            |                                                         |
|------------|---------------------------------------------------------|
| $\mu$      | لزجت دینامیکی ( $N \cdot s/m^2$ )                       |
| $\Theta$   | دمای بی بعد (-)                                         |
| $\nu$      | لزجت سینماتیکی ( $kg/ms$ )                              |
| $\alpha$   | پخشندگی گرمایی ( $m^2/s$ )                              |
| $\omega$   | گردابه ( $1/s$ )                                        |
| $\Delta h$ | گام مکانی برای گسسته سازی دامنه حل                      |
| $\sigma$   | نسبت رسانایی گرمایی نانولایه ها به رسانایی نانوذرات (-) |
| $\Phi$     | کسر حجمی نانوذرات                                       |
| $\gamma$   | زاویه لوزی ( $^\circ$ )                                 |
| $\lambda$  | نسبت ضخامت لایه نانو به شعاع نانوذرات (-)               |
| $\beta$    | ضریب انبساط گرمایی ( $K$ )                              |
| $\Psi$     | تابع جریان (-)                                          |
| $\Psi$     | تابع جریان بی بعد (-)                                   |
| $\Omega$   | گردابه بی بعد (-)                                       |

## زیر نویس ها

|    |           |
|----|-----------|
| F  | سیال خالص |
| Nf | نانوسیال  |
| Nl | نانولایه  |
| Np | نانوذرات  |

## ۷- مراجع

- [1] Santra A., Sen S., Chakraborty N., Study of heat transfer augmentation in a differentially heated square cavity using copper-water nanofluid, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 47, pp. 1113–1122, 2008.
- [2] Talebi F., Mahmoudi A. H., Shahi M., Numerical study of mixed convection flows in a square lid-driven cavity utilizing nanofluid, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 37, pp. 79–90, 2010.
- [3] Aminossadati S. M., Ghasemi, B., Enhanced natural convection in an isosceles triangular enclosure filled with a nanofluid, Computers and Mathematics with Applications, Vol. 61, pp. 1739–1753, 2011.
- [4] Saleh H., Roslan R., Hashim I., Natural convection heat transfer in a nanofluid-filled trapezoidal enclosure, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 54, pp. 194–201, 2011.
- [5] Cho C., Chen C., Chen C. L., Natural convection heat transfer performance in complex-wavy-wall enclosed cavity filled with nanofluid, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 60 pp. 255–263, 2012.
- [6] Mahmoodi M., Hashemi S. M., Numerical study of natural convection of a nanofluid in C-shaped enclosures, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 55, pp. 76–89, 2012.
- [7] Ghasemi B., Aminossadati S. M., Brownian motion of nanoparticles in a triangular enclosure with natural convection, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 49, pp. 931–940, 2010.
- [8] Anandalakshmi R., Basak, T., Heat flow visualization analysis on natural convection in rhombic enclosures with isothermal hot side or bottom wall, European Journal of Mechanics B/Fluids, Vol. 41, pp. 29–45, 2013.
- [9] Abu-Nada E., Chamkha A.J., Effect of nanofluid variable properties on natural convection in enclosures filled with a CuO-EG-Water nanofluid, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 49, pp. 2339–2352, 2010.
- [10] Santra A. K., Sen S., Chakraborty N., Study of heat transfer characteristics of copper-water nanofluid in a differentially

معادلات حاکم بعد از انتقال از دامنه ی فیزیکی به دامنه محاسباتی با استفاده از روش اختلاف محدود مرتبه دوم، گسسته سازی و سپس، مجموعه معادلات جبری با روش متوالی زیرتخفیف حل شدند. تأثیر متغیرهای عدد ریچاردسون، کسر حجمی نانوذرات، زاویه حفره لوزی و ضریب جذب یا تولید گرما بر مشخصه های انتقال گرما، تولید آنتروپی و جریان سیال بررسی شد. نتایج تحقیق به صورت زیر است:

- ۱- افزایش کسر حجمی نانوذرات، سبب افزایش ناسلت متوسط، آنتروپی حجمی کل و عدد بیجن می شود.
- ۲- ناسلت متوسط، آنتروپی کل و عدد بیجن با تغییر زاویه لوزی تغییر می کند. در  $Ri=0.1$  و  $q=-5$ ، بیشنه و کمینه ناسلت متوسط به ترتیب در  $\gamma=120^\circ$  و  $\gamma=30^\circ$  خواهد بود.
- ۳- کمینه و بیشینه تولید آنتروپی برای  $Ri=0.1$  و  $q=-5$ ، مستقل از کسر حجمی نانوذرات، به ترتیب در  $\gamma=60^\circ$  و  $\gamma=150^\circ$  می باشد.
- ۴- برای همه کسرهای حجمی و همه زوایا به جز  $\gamma=60^\circ$ ، کاهش عدد ریچاردسون سبب افزایش ناسلت متوسط، آنتروپی کل و عدد بیجن می شود. در  $\gamma=60^\circ$ ، وقتی ریچاردسون از ۱ تا ۰/۱ کاهش می یابد ناسلت متوسط، آنتروپی کل و عدد بیجن کم می شود.
- ۵- ضریب جذب و تولید گرما به ترتیب سبب افزایش و کاهش آهنگ انتقال گرما می شود. تأثیر ضریب شدت جذب/تولید گرما بر افزایش/کاهش ناسلت متوسط با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می یابد. اگر  $Ri=0.01$  باشد، برای  $q<5$ ، آنتروپی حجمی کل تقریباً مستقل از ضریب تولید/جذب گرما است.

- ۶- اگر  $q<-5$  باشد، عدد بی بعد بیجن به ضریب جذب گرما بستگی ندارد.

## ۶- نمادها

|           |                                                     |
|-----------|-----------------------------------------------------|
| Be        | عدد بیجن (-)                                        |
| $C_p$     | ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت ( $J/(kg \cdot K)$ ) |
| Gr        | عدد گراشف (-)                                       |
| H         | طول ضلع لوزی (m)                                    |
| k         | رسانایی گرمایی ( $W/m \cdot K$ )                    |
| Nu        | عدد ناسلت (-)                                       |
| Pr        | عدد پرانتل (-)                                      |
| q         | شدت تولید/جذب گرما ( $J$ )                          |
| Re        | عدد رینولدز (-)                                     |
| Ri        | عدد ریچاردسون (-)                                   |
| S         | تولید آنتروپی ( $J/K$ )                             |
| $S'_f$    | آنتروپی موضعی ناشی از اصطکاک سیال ( $J/K$ )         |
| $S'_h$    | آنتروپی موضعی ناشی از انتقال گرما ( $J/K$ )         |
| U         | مولفه بی بعد سرعت در راستای مختصات بی بعد X (-)     |
| $U_0$     | سرعت ثابت صفحه بالایی ( $m/s$ )                     |
| u         | مولفه سرعت در راستای x ( $m/s$ )                    |
| V         | مولفه بی بعد سرعت در راستای مختصات بی بعد Y (-)     |
| $\bar{V}$ | حجم کل حفره ( $m^3$ )                               |
| $\nu$     | مولفه سرعت در راستای y ( $m/s$ )                    |
| X         | مختصات بی بعد در جهت x (-)                          |
| Y         | مختصات بی بعد در جهت y (-)                          |

- cavity, *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, Vol.4, pp. 47-59, 1994.
- [29] Mourad M., Hassen A., Nejib H., Ammar B. B., Second law analysis in convective heat and mass transfer, *Entropy*, Vol. 8, pp. 1-17, 2006.
- [30] Magherbi M., Abbassi H., Brahim A. B., Entropy generation at the onset of natural convection, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 3441-3450, 2003.
- [31] Chamkha A. J., Abu-Nada E., Mixed convection flow in single- and double-lid driven square cavities filled with water- $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanofluid: Effect of viscosity models, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, Vol. 36, pp. 82-96, 2012.
- [32] Waheed M. A., Mixed convective heat transfer in rectangular enclosures driven by a continuously moving horizontal plate, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 5055-5063, 2009.
- [33] Abdelkhalek M. M., Mixed convection in a square cavity by a perturbation technique, *Computational Materials Science*, Vol. 42, pp. 212-219, 2008.
- [34] Khanafer K. M., Al-Amiri A. M., Pop, I., Numerical simulation of unsteady mixed convection in a driven cavity, using an externally excited sliding lid, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, Vol. 26, pp. 669-687, 2007.
- [35] Sharif M. A. R., Laminar mixed convection in shallow inclined driven cavities with hot moving lid on top and cooled from bottom, *Applied Thermal engineering*, Vol. 27, pp. 1036-1042, 2007.
- [36] watsu R., Hyun J., Kuwahara K., Mixed convection in a driven cavity with a stable vertical temperature gradient, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 1601-1608, 1993.
- heated square cavity with different viscosity models, *Journal of Enhanced Heat Transfer*, Vol. 15, pp. 273-287, 2008.
- [11] Lin K. C., Violi A., Natural convection heat transfer of nanofluids in a vertical cavity: effects of non-uniform particle diameter and temperature on thermal conductivity, *International Journal of Heat Fluid Flow*, Vol. 31, pp. 236-245, 2010.
- [12] Cheng T. S., Liu W. H., Effects of cavity inclination on mixed convection heat transfer in lid-driven cavity flows, *Computer & Fluids*, Vol. 100, pp. 108-122, 2014.
- [13] Khanafer K., Comparison of flow and heat transfer characteristics in a lid-driven cavity between flexible and modified geometry of a heated bottom wall, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 78, pp. 1032-041, 2014.
- [14] Basak T., Roy S., Pop I., Heat flow analysis for natural convection within trapezoidal enclosures based on heatline concept, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 2471-2483, 2009.
- [15] Noghrehabadi A., Saffarian M.R., Pourrajab R., Ghalambaz M., Entropy analysis for nanofluid flow over a stretching sheet in the presence of heat generation/absorption and partial slip, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 27, pp. 927-937, 2013.
- [16] Cho Ch., Heat transfer and entropy generation of natural convection in nanofluid-filled square cavity with partially-heated wavy surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 77, pp. 818-827, 2014.
- [17] Mahmoudi A., Mejri I., Abbassi M., Omri. A., Analysis of the entropy generation in a nanofluid-filled cavity in the presence of magnetic field and uniform heat generation/absorption, *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 198, pp. 63-77, 2014.
- [18] Anandalakshmi, R., Basak, T., Analysis of natural convection via entropy generation approach in porous rhombic enclosures for various thermal aspect ratios, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 64, pp. 224-244, 2013.
- [19] Khorasanizadeh H., Nikfar M., Amani J., Entropy generation of Cu-water nanofluid mixed convection in a cavity, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, Vol. 37, pp. 143-152, 2013.
- [20] Ilis G. G., Mobedi M., Sunden B., Effect of aspect ratio on entropy generation in a rectangular cavity with differentially heated vertical walls, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, Vol. 35, pp. 696-703, 2008.
- [21] Chacon G. E., Chacon S. L., Avelino J. C., Entropy generation due to mixed convection in an enclosure with heated corners, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp. 695-700, 2012.
- [22] Dagtekin I., Oztop H. F., Bahloul A., Entropy generation for natural convection in C-shaped enclosures, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, pp. 502-510, 2007.
- [23] Tiwari R.K., Das M.K., Heat transfer augmentation in a two-sided lid drivendifferentially heated square cavity utilizing nanofluids, *International Journal of Heat MassTransfer*, Vol. 50, pp. 2002-2018, 2007.
- [24] Xuan Y., Roetzel W., Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 43, 3701-3707, 2000.
- [25] Yu W., Choi S. U. S. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model, *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 5, pp. 167-171, 2003.
- [26] Kakaç S., Pramuanjaroenkij A., Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp.3187-3196, 2009.
- [27] Al-Zamily A. M. J., Effect of magnetic field on natural convection in a nanofluid-filled semi-circular enclosure with heat flux source, *Computers & Fluids*, Vol. 103, pp. 71-85, 2014.
- [28] Stortkuhl T., Zenger C., Zimmer S., An asymptotic solution for the singularity at the angular point of the lid driven