

## ارزیابی جریان جابه‌جایی طبیعی حول استوانه داغ قرار گرفته در محفظه مربعی پر شده از نانوسیال با تغییر در شعاع و موقعیت استوانه

عبدالاحسین فریدون<sup>۱</sup>، علی اکبر عباسیان آرانی<sup>۲</sup>، محمد همت اسفه<sup>۳\*</sup> و آراین زارع قادی<sup>۴</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>واژگان کلیدی:</b> محفظة مربعی، نانوسیال، مانع داغ دایره‌ای، جابه‌جایی طبیعی.</p>	<p>در این مطالعه تاثیر تغییرات پارامترهای مختلفی مانند موقعیت قرارگیری مانع داغ، شعاع مانع داغ دایره‌ای بر روی میدان جریان، میدان دما و میزان انتقال حرارت در محفظه با مانع داغ استوانه‌ای شکل مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور بررسی وضعیت‌های مختلف، شعاع مانع داغ دایره‌ای از ۰/۲ تا ۰/۳ طول ضلع، عدد رایلی بین ۱۰<sup>۳</sup> تا ۱۰<sup>۷</sup> و نانوسیال آب-مس (با قطر ذرات ۴۰ نانومتر) با کسر حجمی از صفر تا ۸ درصد مورد مطالعه قرار گرفته است. نحوه اثرگذاری هر یک از پارامترهای فوق و شدت و ضعف آن‌ها در کنترل میزان انتقال حرارت، به منظور ایجاد یک مکانیزم کنترلی بر روی میزان گرمایش و یا سرمایش در محفظه مربعی به همراه مانع داغ، هدف اصلی این تحقیق می‌باشد. نتایج این بررسی نشان می‌دهد در موقعیت‌هایی که مانع داغ دایره‌ای به دیواره پایینی نزدیک می‌شود، خطوط جریان و دما نسبت به سایر موقعیت‌ها، دچار تغییرات محسوس‌تری می‌گردد. از سوی دیگر با افزایش میزان کسر حجمی نانو ذرات، عدد ناسلت و به تبع آن انتقال حرارت افزایش یافته که این افزایش، تاثیر نانوذرات تعلیقی در آب را در بهبود انتقال حرارت محسوس‌تر می‌نماید. با افزایش کسر حجمی، نانوذرات مس در زمینه انتقال حرارت، عملکردی بسیار مطلوب‌تر از سیال پایه از خود نشان داده‌اند. همچنین بیشینه تغییرات عدد بدون بعد ناسلت نانوسیال در رایلی ۱۰<sup>۳</sup> و برای شعاع ۰/۳ طول ضلع به میزان ۷۹/۱۵ درصد افزایش نسبت به مانع به اندازه ۰/۱۵ طول ضلع نشان می‌دهد.</p>

### ۱- مقدمه<sup>۱</sup>

انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی در محفظه‌ها، در بسیاری از کاربردهای صنعتی مانند گرمایش و تهویه مطبوع مکان‌های مسکونی [۱]، سیستم‌های کلکتور حرارتی

خورشیدی [۲]، وسایل خنک‌کننده الکتریکی [۳ و ۴]، دفن زباله‌های رادیواکتیو [۵]، پنجره‌های دو جداره [۶] و خنک‌کاری راکتورهای هسته‌ای [۷] مشاهده می‌شود. از این رو مطالعه و تحقیق در مورد جنبه‌های جدید این مسئله، امری لازم و ضروری به نظر می‌رسد.

تحقیقات انجام شده در زمینه محفظه‌های مربعی را می‌توان به لحاظ نوع و شرایط دیواره‌ها، به سه گونه اصلی و متفاوت طبقه‌بندی نمود. دسته اول مطالعات معطوف به

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.hemmatesfe@gmail.com

۱. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

۲. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

۴. دانشگاه آزاد اسلامی واحد جویبار، گروه مکانیک، جویبار، ایران

هندسی مناسب پره نازک می‌تواند میزان انتقال حرارت را تا ۳۸ درصد افزایش دهد. سزای و همکاران [۱۸] اثرات نصب پره‌هایی با ضریب هدایت حرارتی بسیار پایین را به دیواره‌های گرم عمودی محفظه مورد بررسی قرار دادند. آنها کاهش ۷۵ درصدی در نرخ انتقال حرارت را مشاهده کردند. ازتوپ و بیلگن [۱۹] انتقال حرارت درون یک محفظه مربعی شکل تفکیک شده با تولید حرارت را به‌صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند و نتایج را برحسب پارامترهای هندسی ارتفاع، ضخامت و محل قرارگیری تیغه و برای عدد رایلی در بازه‌ی  $10^3$  تا  $10^6$  ارائه و عدد ناسلت محلی و میانگین را برای صفحات گرم و سرد محاسبه نمودند. آن‌ها دریافتند که میدان جریان با حضور تفکیک کننده‌های جزئی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای تغییر یافته و انتقال حرارت به‌طور کلی کاهش پیدا کرده است. مطالعات فوق الذکر، همگی بر روی اثرات استفاده از پره‌های صاف متمرکز بود، اما تسنیم و کولینز [۲۰] به بررسی مهار انتقال حرارت در محفظه‌ی مربعی دارای صفحات عایق منحنی‌شکل پرداختند. آن‌ها مشاهده نمودند که میدان‌های جریان و دما به‌علت اثرات انسدادی صفحه‌ی منحنی‌شکل، تغییر خواهد کرد و با افزایش طول و زاویه‌ی صفحات منحنی‌شکل عایق، عدد ناسلت کاهش می‌یابد. فارغ از مطالعات صورت گرفته درباره پره‌ها، مطالعاتی نیز معطوف به استفاده از موانع عایق سرد و گرم شده است. بارگا و همکاران [۲۱] تحقیقی را با عنوان بررسی جابه‌جایی طبیعی در محفظه پر شده با میله‌های دایره‌ای و مربعی در سال ۲۰۰۵ به چاپ رساندند. در این مطالعه عددی، انتقال حرارت و میدان‌های دما و جریان با تغییر تعداد میله‌های درون محفظه از ۴ عدد به ۶۴ عدد، مورد بررسی قرار گرفته است.

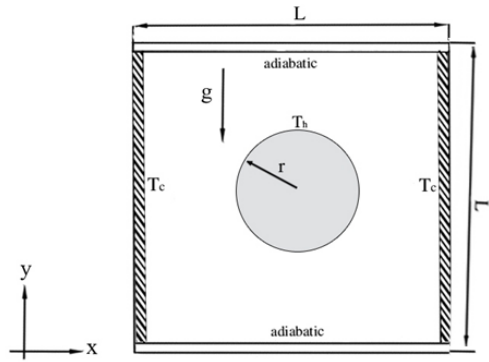
اکثر قریب به اتفاق تحقیقات انجام شده در زمینه ایجاد موانع و پره‌ها برای کنترل انتقال حرارت با استفاده از سیال‌هایی مانند آب و هوا بوده است و خلاء تحقیقاتی با سایر سیالات، به‌خصوص نانوسیالات با کسرهای حجمی

محفظه‌هایی هستند که تمامی دیواره‌ها ثابت بوده و هیچ‌گونه جابه‌جایی مکانی روی سطح دیواره‌ها وجود ندارد [۸]. در این نوع از محفظه‌ها هیچ‌گونه شیء اضافی به‌منظور افزایش و یا کاهش انتقال حرارت در درون محفظه قرار نمی‌گیرد و سیال در کل محفظه جریان دارد. دسته دوم از بررسی‌های صورت‌گرفته به محفظه‌هایی می‌پردازد که یک یا چند دیواره متحرک بوده و دارای سرعت ثابت و یا متغیر هستند [۹-۱۱]. دسته سوم از پژوهش‌ها، مرتبط به حالتی از مسائل محفظه‌هاست که در ضمن ثابت بودن کلیه دیواره‌ها، در داخل محفظه پره، تیغه و موانع عایق جهت گرمایش و یا خنک‌کاری وجود دارد [۱۲-۱۵]. این زمینه تحقیق به نوع کاربردی‌ترین و عملیاتی‌ترین گونه تحقیق در میان دسته‌بندی‌های مطالعاتی است که مطالعه حاضر نیز در این دسته بندی قرار می‌گیرد.

در سالیان اخیر باتوجه به ضرورت استفاده از نانوسیالات به‌خصوص در زمینه بهبود انتقال حرارت، استفاده از نانوسیالات درون محفظه‌ها نیز رایج گردیده و تاثیرات درصد‌های حجمی نانوسیال در میزان انتقال حرارت و تغییر در خطوط جریان و دما، به‌عنوان یکی از پارامترهای مهم مورد مطالعه قرار گرفته است.

کوچووویچ و همکاران [۱۶] در سال ۱۹۹۹، تأثیرات تیغه‌ی رسانای گرم را بر روی انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی آرام بررسی کردند. این مسئله با استفاده از مقایسه‌ی عددی و آزمایشگاهی نتایج برای محفظه‌ی مکعبی بدون تیغه و با تیغه انجام پذیرفت. بیلگن [۱۷]، انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد آرام و مغشوش درون یک محفظه با تیغه‌های جزئی را به روش عددی، مورد بررسی قرار داده و معادلات بقای جرم، ممنتوم و انرژی را درحالت دوبعدی و با در نظر گرفتن تقریب بوزینیسک و با استفاده از روش سیمپلر<sup>۱</sup> حل کرد. او دریافت که انتخاب پارامترهای

<sup>1</sup>SIMPLER



شکل ۱- طرحواره مسئله مورد مطالعه

سیال و نانوسیال‌های مورد استفاده در مسئله، غیرقابل تراکم و نیوتنی بوده و در تمامی نقاط محفظه جریان پایا و آرام برقرار می‌باشد. به جز چگالی که تغییرات آن از تقریب بوزینسک پیروی می‌کند، سایر خواص ترموفیزیکی آب و نیز نانوسیال ثابت در نظر گرفته شده است. خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات مس

خواص ترموفیزیکی	فاز مایع (آب)	فاز جامد (مس)
$C_p(\text{J/kg K})$	4179	385
$\rho(\text{kg/m}^3)$	997.1	8933
$K(\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1})$	0.613	400
$\alpha \times 10^{-5}$	1.47	1163.1
$\beta \times 10^{-5} (1/\text{K})$	21.	1.67
$d_p(\text{nanometers})$	---	40

در مورد نانوسیال باید به این نکته اشاره نمود که نانو ذرات مس و سیال پایه در حالت تعادل حرارتی بوده و لغزشی هم بین آن‌ها رخ نمی‌دهد. در این تحقیق همچنین، ذرات نانو دارای شکل کروی و اندازه ۴۰ نانومتر بوده و از انتقال حرارت تابشی بین وجوه صرف نظر شده است.

معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی برای جریان جابه‌جایی ترکیبی آرام و پایا در محفظه‌ی مربعی دوبعدی برای نانوسیال را، می‌توان به شکل زیر بیان نمود [۲۳]:

مختلف در این زمینه، به شدت احساس می‌شود. تحقیقی توسط محمودی و همکاران [۲۲]، با موضوع جابه‌جایی طبیعی پیرامون منبع حرارتی تعبیه شده در محفظه مربعی صورت گرفته است که وجه تمایز آن با سایر تحقیقات استفاده از نانوسیال به‌عنوان سیال کاربردی می‌باشد.

در مطالعه حاضر، رفتار جریان و مشخصه‌های انتقال حرارت نانوسیال در پیرامون مانع دایره‌ای مستقر در محفظه مربعی بررسی می‌شود. تاثیر پارامترهای مختلفی مانند موقعیت قرارگرفتن مانع داغ، نوع نانوسیال، شعاع مانع داغ، عدد رایلی و کسر حجمی بر الگوی جریان و عملکرد حرارتی نانوسیال، مورد بحث و تحلیل قرار خواهد گرفت.

باتوجه به عدم وجود تحقیقی جامع در زمینه انتقال حرارت نانوسیالات در محفظه‌ها به‌همراه مانع داغ دایره‌ای، و نیز باتوجه به کاربردهای این هندسه خاص در کاربردهای مهندسی، هدف تحقیق حاضر بررسی این هندسه با در نظر گرفتن عوامل مختلف و موثر مانند قطر مانع استوانه‌ای شکل، محل استقرار مانع در محفظه، نوع ذرات معلق و کسر حجمی نانوذرات می‌باشد.

## ۲- شرایط مرزی و معادلات حاکم

شکل ۱ هندسه مسئله مورد مطالعه و شرایط مرزی آن را نشان می‌دهد. آن‌گونه که در این طرحواره پیداست، دیواره فوقانی محفظه همچون دیواره تحتانی آن عایق بوده و دیواره‌های عمودی نیز در دمای ثابت ( $T_c$ ) قرار دارد. مانع داغ دایره‌ای شکل به شعاع  $r$  و موقعیت استقرار مرکزی  $c(x,y)$  در درون محفظه مربعی شکل قرار گرفته است، درحالی‌که دمای آن در دمای ثابت و بالاتر از دیواره‌ها و برابر با ( $T_h$ ) نگه‌داشته شده است. طول ضلع محفظه برابر با  $L$  فرض شده است.

عدد ناسلت:

$$Nu = \frac{hL}{k_f} \quad (13)$$

که در آن ضریب جابه‌جایی حرارتی  $h$  و ضریب هدایت حرارتی از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$h = \frac{q_w}{T_h - T_c} \quad (14)$$

$$k_{nf} = \frac{-q_w}{\partial T / \partial X} \quad (15)$$

با جای‌گذاری معادلات ۱۴ و ۱۵ در معادله ۱۳، عدد ناسلت برای دیواره مانع داغ دایره‌ای شکل، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$NU = - \left( \frac{k_{nf}}{k_f} \right) \left( \frac{\partial \theta}{\partial n} \right) \quad (16)$$

مقدار عدد ناسلت متوسط هم از معادله ۱۵ حاصل می‌شود:

$$Nu_m = \frac{1}{W} \int_0^W NudS \quad (17)$$

که  $n$  جهت نرمال متناظر با دیواره مانع داغ دایره‌ای و  $W$  سطح دیواره دایره‌ای شکل می‌باشد.

### ۳- حل عددی و معتبر سازی

معادلات ذکر شده به روش حجم محدود و با استفاده از نرم‌افزار فلونت حل می‌شوند؛ درحالی‌که وابستگی بین فشار و سرعت توسط الگوریتم سیمپل<sup>۱</sup> منظور می‌شود. با توجه به نوع هندسه‌ی مسئله یعنی وجود صفحه‌ی منحنی‌شکل در محفظه از شبکه چهار وجهی با تراکم‌های مختلف استفاده شده است. به همین سبب کل ناحیه محاسباتی درون محفظه به چهار قسمت تقسیم گردید و شبکه‌ای غیریکنواخت با تراکم در نواحی مرزی منحنی‌شکل، جهت دقت در محاسبات ایجاد گردید.

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

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_{nf} \nabla^2 u \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu_{nf} \nabla^2 v + (\rho\beta)_{nf} g(T - T_c) \quad (3)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{nf} \nabla^2 T \quad (4)$$

فرم بی‌بعد معادلات حاکم با استفاده از پارامترهای بدون بعد زیر به دست می‌آید [۲۳]:

$$X, Y, R = \frac{x, y, r}{L}; \quad U, V = \frac{(u, v)H}{\alpha_f} \quad (5)$$

$$\theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}; \quad P = \frac{pL^2}{\rho_{nf} \alpha_f^2}$$

$$Ra = \frac{g \beta_f \Delta T L^3}{\nu_f \alpha_f}, \quad Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f} \quad (6)$$

چگالی موثر نانوسیال، ضریب پخش حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه، ضریب انبساط حرارتی و ویسکوزیته دینامیکی از روابط زیر محاسبه می‌شود [۲۳].

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_s \quad (7)$$

$$\alpha_{nf} = k_{nf} / (\rho c_p)_{nf} \quad (8)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_s \quad (9)$$

$$(\rho\beta)_{nf} = (1 - \phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_s \quad (10)$$

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \frac{1}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (11)$$

برای محاسبه‌ی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال از رابطه‌ی ارائه شده توسط ماکسول استفاده می‌شود:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{(k_s + 2k_f) - 2\phi(k_f - k_s)}{(k_f + 2k_s) + \phi(k_f - k_s)} \quad (12)$$

در این رابطه  $k_p$  ضریب هدایت حرارتی نانوذرات و  $k_f$  ضریب هدایت حرارتی سیال پایه می‌باشد.

<sup>1</sup> SIMPLE

برای حل مسئله مورد مطالعه در شکل ۲ آمده است. به منظور اطمینان از نتایج حاصل از این هندسه و شرایط مرزی، نتایج حاصله توسط دی وال دیویس [۲۴]، مارکاتوس [۲۵]، حاجیسو فوکلنو [۲۶]، فوسگی [۲۷]، ها و چانگ [۲۸] و تیواری و داس [۲۹] در جدول ۳ مورد توجه قرار گرفته است. مقایسه نتایج حاصله از کار حاضر با سایر نتایج نشان از صحت مطالعات و تطابق کامل میان نتایج دارد.

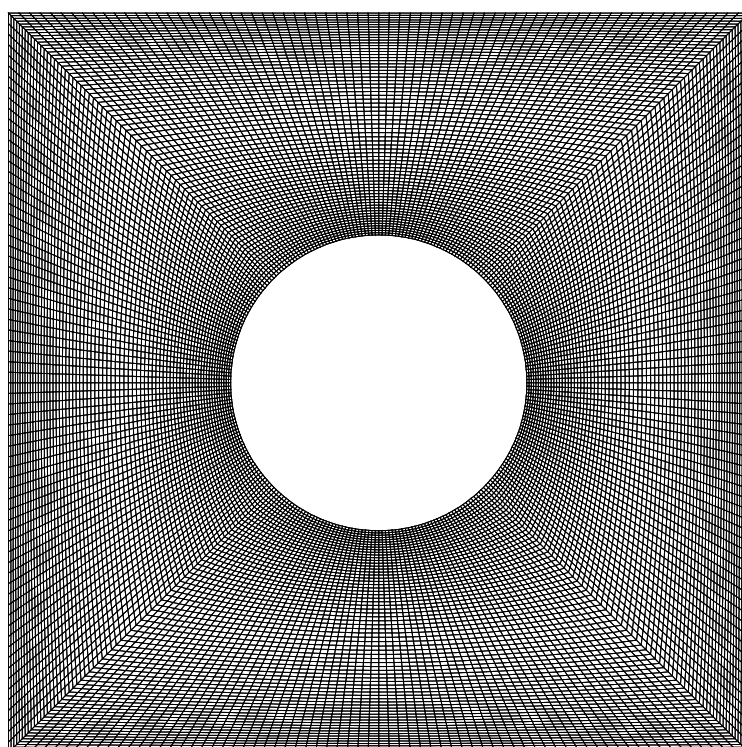
جدول ۲- بررسی استقلال شبکه برحسب عدد ناسلت

تعداد شبکه روی دیواره جانبی	عدد ناسلت
۲۱	۷/۰۵۸
۳۱	۸/۳۱
۴۱	۹/۴۴۸
۵۱	۹/۹۵۲
۶۱	۱۰/۲۲۵
۷۱	۱۰/۴۳۵
۸۱	۱۰/۴۸۶
۹۱	۱۰/۴۸۶

#### ۴- بحث و بررسی نتایج

در این بخش به تحلیل و بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در محفظه مربعی با مانع دایره‌ای شکل، در حالت‌های مختلف پرداخته شده است.

جدول ۲ میزان ناسلت متوسط متناظر با انتخاب هر یک از این شبکه‌ها را برای نانو ذرات مس با کسر حجمی ۰/۰۸ در موقعیت (0.5,0.5) نمایش می‌دهد. باتوجه به جدول ۲ تعداد ۸۱ مش روی هر یک از دیواره‌های عمودی و افقی محفظه در نظر گرفته می‌شود. نمونه‌ای از شبکه تولید شده



شکل ۲- شبکه تولید شده برای محفظه مربعی با مانع داغ استوانه‌ای

مستقل بررسی شده و تغییرات حاصله در کانتورهای دما و جریان همچنین مقدار عدد ناسلت مورد بحث قرار خواهد

به منظور درک دقیق‌تر تغییرات ناشی از تاثیر عوامل مختلف در مساله، پارامترهای تاثیرگذار، هر یک به صورت

مانند موقعیت استقرار مانع در درون محفظه، اندازه شعاع و کسر حجمی نانوذرات بر کانتورهای دما و جریان و نیز دیاگرام‌های عدد ناسلت مورد بررسی قرار گرفته است.

گرفت. در بررسی برخی پارامترهای تاثیرگذار در مسئله، کانتورهای جریان و دما برای نانوسیال، و در برخی قسمت‌ها به جهت قیاس، برای سیال پایه (آب)، ارائه گردیده است. در ادامه، تاثیر عوامل مختلف در مسئله

جدول ۳- مقایسه نتایج تحقیق حاضر با سایر تحقیقات

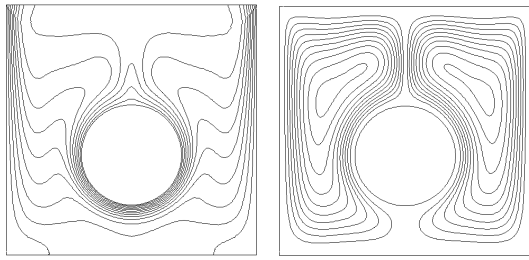
		مطالعه حاضر	Ref.[10]	Ref.[11]	Ref.[12]	Ref.[13]	Ref.[14]	Ref.[15] 5]
Ra=10 <sup>3</sup>	Nu	۱/۱۱۶۵	۱/۱۱۸	۱/۱۰۸	۱/۱۴۱	۱/۰۸۷۱	۱/۰۸۵	۱/۰۷۲
	Nu <sub>max</sub>	۱/۵۷۴۵	۱/۵۰۵	۱/۴۹۶	۱/۵۴۰	۱/۵۰۸		
	Nu <sub>min</sub>	۰/۷۰۸۴	۰/۶۹۲	۰/۷۲۰	۰/۷۲۷	۰/۶۹۰۱		
Ra=10 <sup>4</sup>	Nu	۲/۱۷۴۲	۲/۲۴۳	۲/۲۰۱	۲/۲۹	۲/۱۹۵	۲/۱	۲/۰۷۰
	Nu <sub>max</sub>	۳/۵۰۵۵	۳/۵۲۸	۳/۴۸۲	۳/۸۴	۳/۵۵۸۵		
	Nu <sub>min</sub>	۰/۵۵۳۵	۰/۵۸۶	۰/۶۴۳	۰/۶۷۰	۰/۵۸۰۹		
Ra=10 <sup>5</sup>	Nu	۴/۴۷۹۲	۴/۵۱۹	۴/۴۳۰	۴/۹۶۴	۴/۴۵۰	۴/۳۶۱	۴/۴۶۴
	Nu <sub>max</sub>	۷/۸۵۹۷	۷/۱۱۷	۷/۶۲۶	۸/۹۳	۷/۹۳۷۱		
	Nu <sub>min</sub>	۰/۸۴۸۷	۰/۷۲۹	۰/۸۲۴	۱/۰۱	۰/۷۱۷۳		
Ra=10 <sup>6</sup>	Nu	۸/۷۸۴	۸/۷۹۹	۸/۷۵۴	۱۰/۳۹	۸/۸۰۳		
	Nu <sub>max</sub>	۱۶/۹۶۴	۱۷/۹۲۵	۱۷/۸۷۲	۲۱/۴۱	۱۹/۲۶۷۵		
	Nu <sub>min</sub>	۱/۲۵۹	۰/۹۸۹	۱/۲۳۲	۱/۵۸	۰/۹۴۲		

(0.4,0.5) و (0.5,0.35) مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و خطوط دما و جریان به صورت مستقل برای هر یک از این حالات رسم شده است. در این بخش، کانتورهای دما و جریان برای مقادیر رایلی Ra=10<sup>6</sup> آورده شده است.

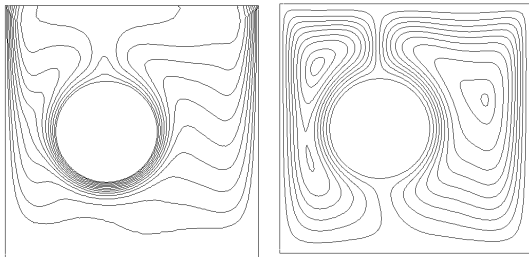
در شکل ۳-الف میزان تراکم خطوط در قسمت فوقانی دیواره‌های عمودی نسبت به تمامی حالات در بالاترین سطح خود قرار گرفته و این نشان‌دهنده گرادیان دمای بسیار بالا در این محدوده مشخص است. قرار گرفتن مانع

#### ۴-۱- تاثیر موقعیت استقرار مانع داغ روی خطوط دما و جریان

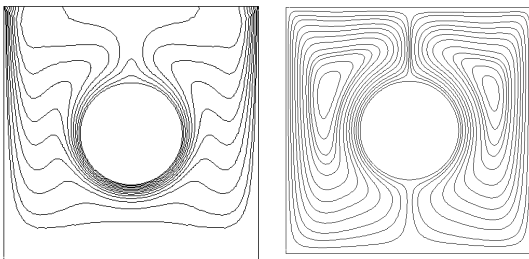
جهت بررسی تاثیر محل استقرار مانع دایره‌ای شکل، کانتورهای دما و جریان حاصله از شبیه‌سازی عددی مانع داغ در شعاعی برابر با ۰/۲ طول اضلاع محفظه، برای نانوسیال با کسر حجمی ۸ درصد ارائه می‌شود. مانع دایره‌ای داخل محفظه در شش نقطه مختلف استقرار (0.5,0.5)، (0.5,0.6)، (0.6,0.5)، (0.5,0.4)،



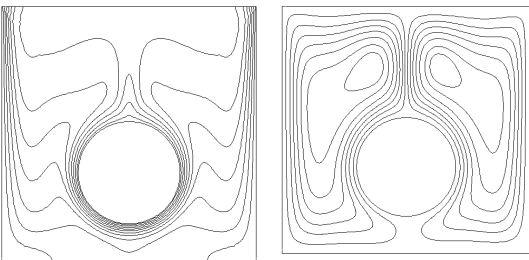
ب)  $C(x,y)=(0.5,0.4) \psi_{max}=53.19$



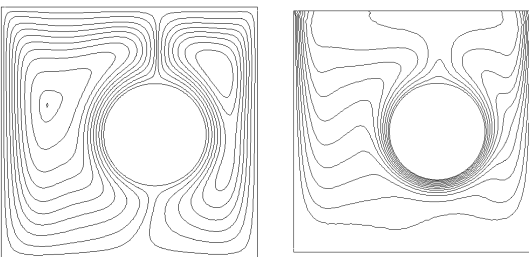
پ)  $C(x,y)=(0.4,0.5) \psi_{max}=44.41$



ت)  $C(x,y)=(0.5,0.5) \psi_{max}=46.06$



ث)  $C(x,y)=(0.5,0.35) \psi_{max}=56.71$



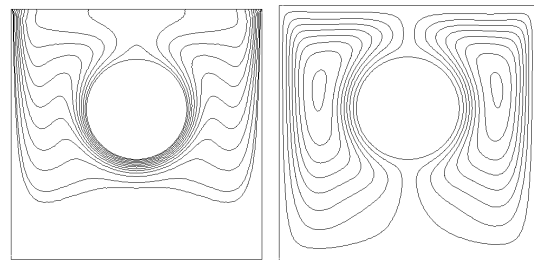
ج)  $C(x,y)=(0.6,0.5) \psi_{max}=44.41$

شکل ۳- کانتورهای جریان و دما در موقعیت‌های مختلف قرارگیری مانع در محفظه

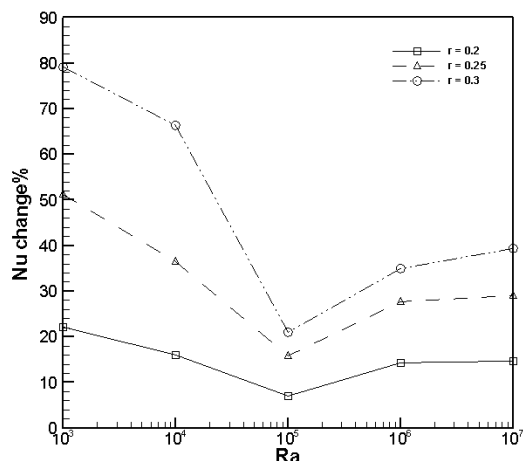
در موقعیت  $C(x,y) = (0.5,0.4)$ ، باعث از بین رفتن تقارن موجود در کانتورهای دما و جریان شده و اشکالی متفاوت را ایجاد کرده است. خطوط دما در قسمت فوقانی محفظه در نزدیکی دیواره‌ها متراکم هستند که با پایین آمدن، از این تراکم کاسته می‌شود. هنگامی که مانع در مرکز محفظه قرار دارد (شکل ۳-ت)، خطوط دما در نیمه فوقانی دیواره‌های عمودی بسیار متراکم هستند، در حالی که در این حالت تراکم این خطوط به نیمه تحتانی هم کشیده شده است و گرادیان دما در نیمه تحتانی دیواره‌های عمودی بیشتر شده است.

در یک نگاه کلی به تمامی کانتورهای دما و جریان، همچنین میزان  $\psi_{max}$  در هر یک از آن‌ها، می‌توان به نکات جالبی پی‌برد. در حالت‌هایی که مانع داغ دایره‌ای شکل در امتداد محور عمودی جابه‌جا می‌شود، میزان بیشینه خطوط جریان بسیار بیشتر است از حالتی که مانع در امتداد خط افقی حرکت می‌کند. این در حالی است که با نزدیک شدن مانع به دیواره تحتانی، این اندازه به شدت زیاد می‌شود و با دور شدن آن، از این مقدار کاسته می‌گردد. دلیل این مسئله، کم شدن فضای جاری شدن سیال در نقاط زیرین مانع داغ می‌باشد.

در این قسمت‌ها سیال جاری در تماس با سطح داغ به شدت دچار افزایش دما شده و باتوجه به تغییر چگالی متناسب با این تغییر دما، تمایل به بالارفتن پیدا می‌کند. فضای زیر مانع، همواره محل تبادل گرما میان جسم و سیال و نهایتاً حرکت سیال می‌باشد و مسلماً محدود شدن این فضا باعث بالارفتن میزان بیشینه خط جریان نسبت به سایر حالات می‌گردد.



الف)  $C(x,y)=(0.5,0.6) \psi_{max}=40.372$



شکل ۴- نمودار درصد تغییرات ناسلت بر حسب رایلی در شعاع های مختلف مانع برای نانوسیال با غلظت ۸ درصد

از سوی دیگر، چنان‌که در نمودار نیز مشخص است میزان تغییرات در رایلی های پایین، نسبت به رایلی های بالاتر بیشتر است و شیب این تغییرات نیز با افزایش میزان شعاع مانع داغ دایره‌ای شکل، بیشتر می‌شود.

جدول ۴ نیز درصدهای افزایش میزان عدد ناسلت با تغییر شعاع مانع داغ و موقعیت قرارگرفتن آن را نشان می‌دهد. با عنایت به موارد فوق می‌توان دریافت یکی از فاکتورهای بسیار تاثیرگذار در میزان انتقال حرارت محفظه‌ها با مانع دایره‌ای، تغییر در شعاع مانع است که به واسطه آن می‌توان میزان انتقال حرارت را تا دو برابر کاهش و یا افزایش داد.

البته این میزان فقط در محدوده مطالعاتی این نوشتار حاصل شده و ممکن است در صورت گسترده‌تر شدن دامنه تغییرات شعاع در مقادیر بالاتر، این میزان افزایش در انتقال حرارت باز هم افزایش یابد.

#### ۴-۳- بررسی میزان تغییرات انتقال حرارت براساس

##### کسر حجمی نانوسیال

یکی از مهم‌ترین وجوه تفاوت مطالعه حاضر با سایر پژوهش‌های مرتبط با محفظه‌ها به‌همراه مانع دایره‌ای، استفاده از نانوسیال با کسرهای حجمی متفاوت به‌منظور بهبود میزان انتقال حرارت در محفظه‌هاست. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، تغییرات عدد ناسلت میانگین

#### ۴-۲- تغییرات میزان انتقال حرارت با تغییرات

##### شعاع مانع داغ دایره‌ای شکل

همان‌گونه که انتظار می‌رود، عدد ناسلت و انتقال حرارت با افزایش شعاع مانع داغ دایره‌ای شکل، افزایش می‌یابد. باتوجه به این‌که یکی از اهداف اصلی انجام مطالعه کنونی، پی‌بردن به میزان تاثیرگذاری پارامترهای مختلف بر میدان جریان و انتقال حرارت و نحوه تغییر آن‌ها به‌منظور کنترل میزان انتقال حرارت در حالت‌ها و موقعیت‌های گوناگون است، لذا یافتن درصد تغییرات انتقال حرارت برحسب تغییر پارامترهای موثر و یافتن بیشینه و کمینه تغییرات، از مواردی است که می‌تواند زمینه شفاف‌تری برای بررسی و مطالعه پیرامون این موضوع به‌وجود آورد. بر این مبنا میزان تغییرات در حالت‌های گوناگون برحسب یک مبنای مشترک، درصدگیری می‌گردد و نتایج مربوطه ارائه خواهد شد.

اگر در این بخش شعاع مانع دایره‌ای برابر با ۰/۱۵ طول محفظه، به‌عنوان حالت مبنا فرض شود، درصد افزایش میزان عدد ناسلت برای سیال پایه در رایلی ۱۰<sup>۳</sup> برای شعاع بدون بعد ۰/۲ نسبت به حالت مبنا، برابر با ۲۲/۵ درصد، برای  $\phi = 0.25$  برابر با ۵۰/۲ درصد و برای شعاع ۰/۳ برابر با ۸۲/۵ درصد می‌باشد.

به‌منظور درک بهتر تغییرات عدد ناسلت با تغییر شعاع مانع دایره‌ای شکل، درصد تغییرات عدد ناسلت برای نانوسیال آب-مس با کسر حجمی ۸ درصد در شکل ۴ ارائه شده است. این نمودار نشان می‌دهد بیشینه تغییرات عدد بدون بعد ناسلت نانوسیال در رایلی ۱۰<sup>۳</sup> و برای شعاع ۰/۳ به میزان ۷۹/۱۵ درصد رخ می‌دهد، که این میزان نسبت به حالت مشابه در سیال پایه رشد کمتری را نشان می‌دهد. کمینه تغییرات نیز در شعاع ۰/۲ در رایلی ۱۰<sup>۵</sup> می‌باشد که این میزان تغییر برای سیال پایه، برابر ۷ درصد و برای نانوسیال برابر ۸/۵ درصد می‌باشد.



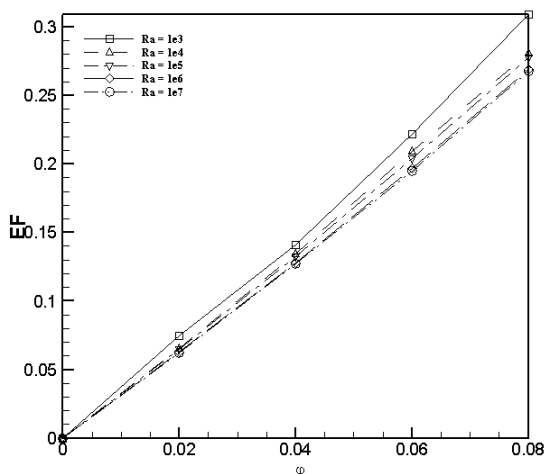
در هر کسر حجمى مشخص، با افزایش میزان عدد رایلی و نیروی شناوری، افزایش می‌یابد. به دلیل آن‌که نانوسیالات مورد مطالعه در این تحقیق، از تعلیق نانو ذرات متالیک در سیال پایه آب، با درصدهای حجمی مختلف حاصل می‌شوند، لذا میزان ضریب هدایت حرارتی آن‌ها از سیال پایه به مراتب بیشتر می‌باشد که این باعث افزایش میزان انتقال حرارت در نانوسیالات نسبت به سیالات خالص می‌گردد. این مطلب حتی در کسرهای حجمی بسیار پایین نیز صادق است.

#### ۴-۴- تغییرات فاکتور افزایش انتقال حرارت با غلظت نانو ذرات

به منظور مقایسه درصدی و تخمین مطلوب‌تر بهبود و یا کاهش انتقال حرارت در محفظه حاوی نانوسیال نسبت به محفظه پر شده از سیال خالص، فاکتور میزان افزایش (EF) به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$EF = \frac{(Nu_{\text{nano-fluid}} - Nu_{\text{basefluid}})}{Nu_{\text{basefluid}}} \times 100\% \quad (18)$$

شکل ۶ تغییرات فاکتور افزایش را نسبت به کسر حجمی نانوذرات نشان می‌دهد.



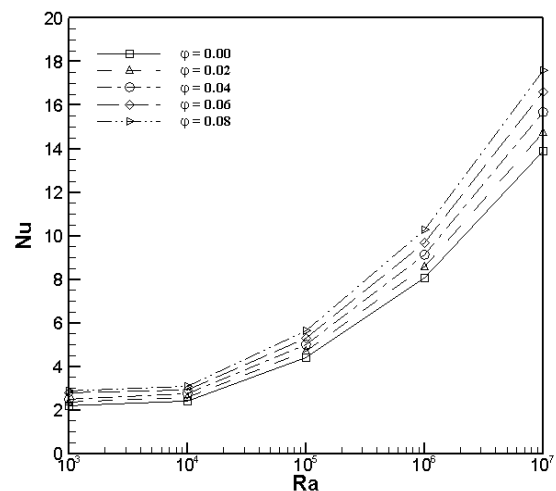
شکل ۶- تغییرات فاکتور افزایش انتقال حرارت نسبت به کسر حجمی نانوذرات مس برای  $c(x,y) = (0.5,0.5)$

باتوجه به شکل ۶، میزان EF با افزایش میزان کسر حجمی نانو ذرات برای نانوسیال آب- مس افزایش می‌یابد

نسبت به عدد رایلی در موقعیت  $(0.5,0.5)$  و در شعاع بدون بعد  $0.5$  برای نانوسیال آب- مس رسم شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در هر رایلی مشخص با افزایش میزان کسر حجمی نانو ذرات، بر میزان عدد بدون بعد ناسلت و در نتیجه میزان انتقال حرارت افزوده می‌شود.

جدول ۴- درصدهای افزایش میزان عدد ناسلت با تغییر شعاع مانع داغ و موقعیت آن

C(x,y)	r	Base fluid (%increase e)	Cu/water 8% (%increase)
(0.4,0.5)	۰/۲	۱۹/۵	۲۲/۴
	۰/۲۵	۴۴/۹	۵۰/۵
	۰/۳	۸۴/۲	۹۴/۴
(0.5,0.4)	۰/۲	۱۵/۶	۱۹
	۰/۲۵	۳۵/۹	۴۳/۶
	۰/۳	۶۲/۶	۷۳/۶
(0.5,0.5)	۰/۲	۱۶	۱۹/۶
	۰/۲۵	۳۸/۶	۴۵/۹
	۰/۳	۶۵/۳	۷۶/۵
(0.5,0.6)	۰/۲	۱۸/۵	۲۰/۴
	۰/۲۵	۴۰	۴۴/۷
	۰/۳	۷۰/۵	۷۶/۶
(0.6,0.5)	۰/۲	۱۹/۵	۲۱/۷
	۰/۲۵	۴۶/۴	۵۲/۴
	۰/۳	۸۴/۹	۹۴/۲



شکل ۵- تغییرات عدد ناسلت میانگین نسبت به عدد رایلی در کسرهای متفاوت حجمی نانوذرات مس

شعاع‌ها در تحقیق حاضر) افزایش می‌یابد. بیشترین میزان افزایش ناشی از افزایش شعاع به میزان ۹۴/۴ درصد به نانوسیال آب- اکسید مس در موقعیت (0.4,0.5) تعلق دارد. همچنین با افزایش اندازه شعاع مانع محدوده تبدلات حرارتی به قسمت‌های زیرین محفظه نیز کشیده می‌شود.

- بیشینه تغییرات عدد بدون بعد ناسلت نسبت به حالت مبنای  $r=0.15$  مربوط به نانوسیال آب- اکسیدمس با کسر حجمی ۸ درصد، در عدد رایلی  $10^3$  و برای شعاع  $0/3$  به میزان  $79/15$  درصد رخ می‌دهد.

- میزان EF با افزایش میزان کسر حجمی نانو ذرات برای نانوسیال آب- مس افزایش می‌یابد که البته شیب این افزایش در کسرهای حجمی بالاتر در نمودار، کمی بیشتر می‌باشد. از سوی دیگر با افزایش مقادیر عدد رایلی در یک کسر حجمی مشخص نانوسیال، میزان EF کاهش می‌یابد.

- تغییر موقعیت استقرار مانع داغ دایره‌ای باعث ایجاد تغییرات محدودی بر میزان ناسلت متوسط و در نتیجه انتقال حرارت کل می‌گردد و لیکن در صورت نزدیک شدن مانع به دیواره‌ها، تغییرات اساسی در میزان ناسلت موضعی و نحوه تبادل گرما در نزدیکی دیواره‌ها رخ می‌دهد.

- در محفظه مربعی در یک شرایط مشخص به لحاظ موقعیت استقرار مانع و اندازه شعاع آن، در یک رایلی ثابت، با افزایش میزان کسر حجمی نانو ذرات، میزان عدد ناسلت افزایش می‌یابد.

که البته شیب این افزایش در کسرهای حجمی بالاتر در نمودار، کمی بیشتر می‌باشد. از سوی دیگر، با افزایش مقادیر عدد رایلی در یک کسر حجمی مشخص نانوسیال، میزان EF کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر در یک میزان معین کسر حجمی، میزان EF در رایلی  $10^3$  بیشتر از تمامی مقادیر سایر رایلی‌ها می‌باشد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تاثیر تغییرات پارامترهای مختلف بر روی میدان جریان، میدان دما و میزان انتقال حرارت در محفظه پر شده از نانوسیال آب-مس (با نانوذرات به قطر ۴۰ نانومتر) با مانع داغ استوانه‌ای شکل مورد بررسی قرارگرفت. به منظور بررسی وضعیت‌های مختلف، شعاع مانع داغ دایره‌ای از  $0/2$  تا  $0/3$  طول ضلع، عدد رایلی بین  $10^3$  تا  $10^7$  و کسر حجمی از صفر تا ۸ درصد مورد مطالعه واقع شد و نتایج زیر از تحلیل‌های خطوط جریان و دما، همچنین نمودارهای حاصله به دست آمد:

- با افزایش اندازه شعاع مانع داغ دایره‌ای شکل، تفاوت در میزان عدد ناسلت سیال پایه و نانوسیال، به شدت افزایش می‌یابد.

- با افزودن بر اندازه شعاع مانع داغ دایره‌ای، میزان انتقال حرارت کل تا نزدیک دو برابر (در محدوده مورد مطالعه

## ۶- مراجع

- [1] Ostrach, S. (1988). "Natural convection in enclosures". ASME J. Heat Transfer, Vol. 110, pp. 1175-1190.
- [2] Ideriah, F.J.K. (1980). "Prediction of turbulent cavity flow driven by buoyancy and shear". J. Mech. Eng. Sci. Vol. 22, pp. 287-295.
- [3] Abbasian Arani, A.A., Mazrouei Sebdani, S., Mahmoodi, 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.
- [4] Sun, C., Yu, B., Oztop, F., Wang, Y., Wei, J. (2011). "Control of mixed convection in lid-driven enclosures using conductive triangular fins". International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 54, pp. 894-909.

- [5] Bilgen, E. (2005). "Natural convection in cavities with a thin fin on the hot wall". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 48, pp. 3493–3505.
- [6] Pilkington, L.A.B., (1969). "Review lecture: the float glass process". *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 314, No. 1516, pp. 1-25.
- [7] Bilgen, E. (2002). "Natural convection in enclosures with partial partitions". *Renewable Energy*, Vol. 26, pp. 257-270.
- [8] Mahmoudi, A.H., Shahie, M., Talebi, F. (2010). "Effect of inlet and outlet location on the mixed convective cooling inside the ventilated cavity subjected to an external nanofluid". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 8, pp. 1158-1173.
- [9] Fereidoon, A., Saedodin, S., Hemmat Esfe, M., Noroozi, M.J. (2013). "Evaluation of mixed convection in inclined square lid driven cavity filled with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid". *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 7, pp. 55–65.
- [10] Saedodin, S., Hemmat Esfe, M., Noroozi, M.J. (2011). "Numerical simulation of mixed convection of fluid flow and heat transfer within car radiator with an inside obstacle filled with nanofluid". *Journal of Modeling in Engineering*, Vol. 9, No. 25, pp. 33-46.
- [11] Hemat Esfe, M., Ghadak, F., Haghiri, A., Mirtalebi, S. (2012). "Numerical study of mixed convection flows in a two-sided inclined lid-driven cavity utilizing nano-fluid with various inclination angles and ununiformed temperature". *Aerospace Mechanics Journal*, Vol. 8, No. 2, pp. 69-83.
- [12] Oztop, H., Bilgen, E. (2006). "Natural convection in differentially heated and partially divided square cavities with internal heat generation". *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 27, pp. 466–475.
- [13] Mezrhab, A., Bouali, H., Amaoui, H., Bouzidi, M. (2006). "Computation of combined natural-convection and radiation heat-transfer in a cavity having a square body at its center". *App. Energy*, Vol. 83, pp. 1004–1023.
- [14] Oztop, H.F., Zhao, Z., Yub, B. (2009). "Fluid flow due to combined convection in lid-driven enclosure having a circular body". *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 30, pp. 886–901.
- [4] Sun, C., Yu, B., Oztop, F., Wang, Y., Wei, J. (2011). "Control of mixed convection in lid-driven enclosures using conductive triangular fins". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 894-909.
- [16] Cuckovic-Dzodzo, D.M., Dzodzo, M.B., Pavlovic, M.D. (1999). "Laminar natural convection in a fully partitioned enclosure containing fluid with nonlinear thermophysical properties". *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 20, pp. 614-623.
- [17] Bilgen, E. (2005). "Natural convection in cavities with a thin fin on the hot wall". *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 3493–3505.
- [18] Sezai, I., Mohamad, A.A., (1999). "Suppressing free convection from a flat plate with poor conductor ribs". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, No. 11, pp. 2041-2051.
- [19] Oztop, H., Bilgen, E. (2006). "Natural convection in differentially heated and partially divided squarecavities with internal heat generation". *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 27, pp. 466–475.
- [20] Tasnim, S.H., Collins, M.R. (2005). "Suppressing natural convection in a differentially heated square cavity with an arc shaped baffle". *International Communication in Heat and Mass Transfer*, Vol. 32, pp. 94–106.
- [21] Braga, E.J., de Lemos, M.J.S. (2005). "Laminar natural convection in cavities filled with circular and square rods". *International Communication in Heat and Mass Transfer*, Vol. 32, pp. 1289–1297.
- [22] Mahmoudi, A.H., Shahi, M., Honarbakhsh Raouf, A., Ghasemian, A. (2010). "Numerical study of natural convection cooling of horizontal heat source mounted in a square cavity filled with nanofluid". *International Communication in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 1135–1141.

- [23] Mahmoodi, M. (2011). "Numerical simulation of free convection of a nanofluid in L-shaped cavities". *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, pp. 1731-1740.
- [24] de Vahl Davis, G. (1983). "Natural convection of air in a square cavity: a benchmark solution". *International Journal of Numerical Methods Fluids*, Vol. 3, No. 3, pp. 249-264.
- [25] Markatos, N.C., Pericleous, K.A. (1984). "Laminar and turbulent natural convection in an enclosed cavity". *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 27, pp. 755-772.
- [26] Hadjisophocleous, G.V., Sousa, A.C.M., Venart, J.E.S. (1998). "Predicting the transient natural convection in enclosures of arbitrary geometry using a nonorthogonal numerical model". *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 13, pp. 373-392.
- [27] Fusegi, T., Kuwahara, K., Farouk, B. (1991). "A numerical study of three dimensional natural convection in a differentially heated cubic enclosure". *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 34, pp. 1543-1557.
- [28] Ha, M.Y., Jung, M.J. (2000). "A numerical study of three-dimensional conjugate heat transfer of natural convection and conduction in a differentially heated cubic enclosure with a heat-generating cubic conducting body". *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 4229-4248.
- [29] Tiwari, R.K., Das, M.K. (2007). "Heat transfer augmentation in a two-sided lid-driven differentially heated square cavity utilizing nanofluids". *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 2002-2018.