



## انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال در محفظه L شکل بافلدار

نصراله علوی<sup>۱</sup>، طاهر ارمغانی<sup>۲\*</sup> و احسان ایزدپناه<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، بوشهر، واحد بوشهر، دانشجو کارشناسی ارشد مکانیک، بوشهر، ایران

<sup>۲</sup> دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مهدیشهر، استادیار گروه مکانیک، مهدیشهر، ایران

<sup>۳</sup> دانشگاه خلیج فارس، دانشکده مهندسی، استادیار گروه مکانیک، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۲۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۵/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۲۴

### چکیده

در این مقاله، انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال آب-آلومینا در محفظه L شکل بافلدار، بصورت عددی بررسی شده است. معادلات حاکم به روش حجم محدود و با بکارگیری الگوریتم سیمپل حل شده است. دیواره‌های عمودی سمت چپ و پایینی محفظه گرم و دیواره میانی افقی و بافل سرد و سایر دیوارها عایق است. اثر پارامترهای مختلف مانند، عدد رایلی، کسر حجمی ذرات، نسبت ابعاد محفظه و طول بافل بر میزان انتقال حرارت، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند، حضور بافل بر افزایش میزان انتقال حرارت تاثیرگذار است. با افزایش عدد رایلی، کسر حجمی و نسبت ابعادی میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد؛ همچنین با افزایش نسبت ابعادی، نانوسیال تاثیر بیشتری بر افزایش عدد ناسلت دارد.

**کلمات کلیدی:** نانوسیال آب-آلومینا؛ جابجایی آزاد؛ بافل؛ محفظه L شکل.

## Natural Convection Heat Transfer of a Nanofluid in a Baffle L-Shaped Cavity

N. Alavi<sup>1</sup>, T. Armaghani<sup>2\*</sup>, E. Izadpanah<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Msc Student, Department of Engineering, Islamic Azad University, Bushehr branch, Bushehr, Iran.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Engineering, Islamic Azad University, Mahdeshahr branch, Mahdeshahr, Iran.

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran.

### Abstract

In this article, the free convection heat transfer of water-alumina Nano fluid is investigated in a baffle L-shaped cavity. The governing equations are solved numerically using the finite volume method and the SIMPLE algorithm. The left and bottom vertical walls are warm, the horizontal intermediate wall and the baffle are cold. Other walls are well insulated. The effect of Rayleigh Number, nanofluid volume fraction, aspect ratio of the cavity and the baffle's length on the heat transfer are investigated and discussed. The results show that the presence of the baffle is effective on the heat transfer enhancement and by increasing the Rayleigh Number, nanofluid volume fraction and the aspect ratio of the cavity the heat transfer increases. Also in higher aspect ratio, Nano fluids have more influence on the Nusselt number enhancement.

**Keywords:** Alumina-Water Nanofluid; Free Convection, Baffle; L-Shaped Cavity.

## ۱- مقدمه

انتقال حرارت جابجایی آزاد به دلیل کاربرد وسیع در سیستم‌های مهندسی از قبیل، خنک کاری قطعات الکترونیکی، تهویه اتاق‌ها، ایزوله سازی راکتورها، کلکتورهای خورشیدی، مبدل‌های حرارتی و بسیاری سیستم‌های دیگر، از پدیده‌های مهم محسوب می‌شود [۱-۲]. تاکنون مطالعات عددی و تجربی بسیاری در مورد جنبه‌های مختلف کاربرد انتقال گرمای جابجایی آزاد در محفظه صورت گرفته است.

وو و چینگ [۳]، جابجایی طبیعی در یک محفظه مربعی حاوی هوا با یک مانع روی دیواره بالایی را مورد بررسی قرار دادند. آنها در آزمایشات انجام شده برای حالتی که دیواره بالا عایق باشد، نشان دادند که مانع سبب جداسازی جریان و تشکیل جریان چرخشی در پشت مانع می‌شود که ساختار جریان چرخشی به محل مانع و دمای دیواره بالا بستگی دارد. هم چنین نشان دادند که برای حالت دیواره بالا عایق، دمای محیط خارج از لایه مرزی و عدد ناسلت در نزدیکی منطقه گوشه با موقعیت مانع تغییر می‌کند و با افزایش ارتفاع مانع، منطقه جریان چرخشی گسترش می‌یابد.

یوسل و ازدم [۴] نیز، مطالعات عددی روی جابجایی آزاد در محفظه‌های مربعی شکل با موانع انجام دادند. بدین منظور، محفظه‌ای با دیواره‌های افقی عایق و دیواره‌های جانبی در دو دمای مختلف، با چند مانع روی دیواره پایینی و بالایی را مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که تغییر عدد رایلی و افزایش ارتفاع و تعداد موانع، منجر به تغییرات قابل ملاحظه‌ای در عدد ناسلت متوسط می‌شود. بهلاتوی و همکاران [۵]، انتقال حرارت جابجایی و تشعشع در یک محفظه شامل بافل که دیوار پایین آن تحت شار حرارتی است، بصورت عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها از هوا به عنوان سیال برای خنک سازی محفظه استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که برای یک ضریب صدور ثابت با افزایش عدد رینولدز در فاصله  $5000 < Re < 2000$  انتقال حرارت به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند؛ همچنین در این مقاله نشان داده شد که با افزایش ضریب صدور به ازای عدد رینولدز یکسان، انتقال حرارت افزایش می‌یابد. کانداسوامی و همکارانش [۶]، بطور عددی انتقال حرارت جابجایی آزاد را در یک محفظه مربعی با دو بافل مورد بررسی قرار داده‌اند که بصورت عمود بر هم قرار دارند. آنها به این نتیجه رسیدند که

با افزایش طول بافل عمودی، انتقال حرارت افزایش می‌یابد؛ همچنین افزایش طول بافل افقی، زمانی سبب افزایش انتقال حرارت می‌شود که پایین تر از مرکز محفظه قرار گیرد. اوتیزن و پاول [۷]، محفظه‌هایی را مطالعه نموده‌اند که دیواره‌های آن در شرایط متفاوت دمایی قرار دارند و به بررسی اثر الحاق یک صفحه افقی به مرکز دیواره عمودی سرد پرداخته‌اند و چند نسبت ظاهری را بررسی کردند و به این نتیجه رسیده‌اند که نرخ انتقال حرارت محلی در قسمت بالایی دیواره گرم افزایش می‌یابد، اما در نزدیک مرکز کاهش می‌یابد. فردریک [۸]، جابجایی آزاد در یک محفظه مربعی مورب شامل یک بافل روی دیواره سرد را به طور عددی بررسی کرد. وی نشان داد که بافل، مانع جابجایی آزاد می‌شود و انتقال حرارت در محفظه بافل دار نسبت به محفظه ساده در یک عدد ریلی ثابت، به میزان ۴۷٪ کاهش می‌یابد. بیلگن [۹]، انتقال حرارت را در محفظه با فین نازکی که روی دیواره گرم قرار دارد را به طور عددی مورد بررسی قرار داد و اثر موقعیت و اندازه فین را روی نرخ انتقال حرارت پیش‌بینی کرد. او دریافت که عدد ناسلت با افزایش طول فین کاهش می‌یابد.

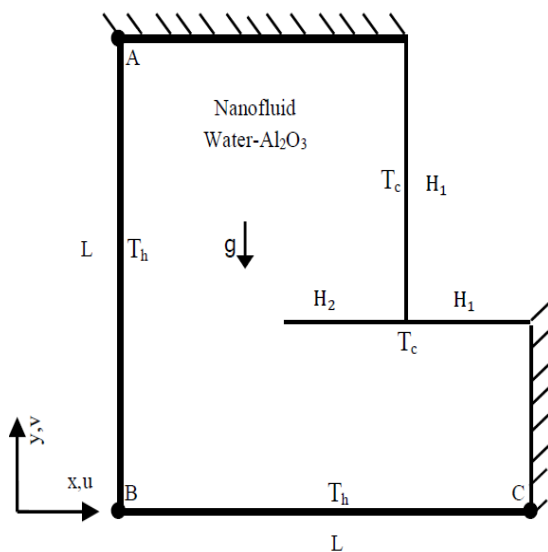
مقالاتی که تاکنون به آن اشاره شد، انتقال حرارت جابجایی آزاد داخل محفظه برای سیال نیوتنی را مورد مطالعه قرار دادند، ولی اخیراً با توجه به اهمیت بکارگیری نانوسیالات این موضوع برای این سیالات نیز، مورد بررسی قرار گرفته است. محققان زیادی بیان کرده‌اند که با افزودن نانو ذرات با کسر حجمی کم (۱٪ تا ۵٪)، می‌توان ضریب هدایت گرمایی نانو سیال را تا حدود ۲۰٪ افزایش داد [۱۰-۱۲]. جو و تی زنگ [۱۳]، مطالعات عددی روی انتقال حرارت نانو سیالات در محفظه دو بعدی انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که افزایش کسر حجمی نانوذرات، باعث افزایش نرخ متوسط انتقال حرارت می‌شود. خانافر و همکارانش [۱۴]، در یک مطالعه عددی نقش نانو ذرات را بر جابجایی آزاد در یک محفظه دو بعدی بررسی کردند که از نانو سیال آب و مس پر شده است. نتایج آن‌ها نشان داد، در هر عدد گراشفی میزان انتقال حرارت با افزایش درصد ذرات مس پراکنده در آب افزایش می‌یابد. شیخ زاده و همکارانش [۱۵]، جابجایی طبیعی نانوسیال آب- اکسید مس را در محفظه مربعی با وجود منبع گرم و سرد روی دیواره‌های

همچنین اخیراً انتقال حرارت جابجایی آزاد نانو سیال در محفظه مربعی [۲۱-۲۲]، دوزنقه‌ای [۲۳]، T شکل مورب [۲۴] و کانال سینوسی [۲۵]، توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است.

با توجه به مطالعات انجام شده می‌توان گفت، علی‌رغم بررسی انتقال حرارت جابجایی آزاد با سیال هوا در محفظه‌های بافل دار، انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال در محفظه L شکل بافل دار تاکنون بررسی نشده است. نتایج حاصله از این مطالعه می‌تواند در طراحی تجهیزات الکترونیکی، کلکتورهای خورشیدی و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، مورد استفاده قرار گیرد؛ لذا در این مقاله، بصورت عددی این موضوع برای نانوسیال آب-آلومینا مورد مطالعه قرار گرفت و اثر پارامترهایی همچون عدد رایلی، نسبت ابعادی محفظه، درصد حجمی نانوذرات و همچنین طول بافل بر نرخ انتقال حرارت جابجایی آزاد بررسی شد.

## ۲- هندسه مورد بررسی

هندسه مورد بررسی، مطابق شکل ۱ است که محفظه بسته L شکلی با بافل بوده، حاوی نانوسیال آب-آلومینا است. دیواره‌های AB و BC در دمای ثابت  $T_h$  (گرم) و دیواره‌های میانی افقی و بافل در دمای ثابت  $T_c$  (سرد) قرار دارد و سایر دیواره‌ها عایق می‌باشند. نسبت ابعادی، به صورت  $AR=H_1/L$  و طول بافل، به صورت  $B_f=H_2/L$  در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- محفظه L شکل همراه با بافل

عمودی به صورت عددی بررسی کردند و گزارش کردند که انتقال گرما با افزایش کسر حجمی نانو ذرات و افزایش عدد رایلی افزایش می‌یابد. سانترا و همکارانش [۱۶]، مسئله جابجایی آزاد در یک حفره حاوی نانوسیال را با فرض رفتار غیر نیوتنی نانوسیال به روش عددی، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که در برخی اعداد رایلی خاص با افزایش کسر حجمی نانو ذرات نرخ انتقال گرما کاهش می‌یابد و در محدوده دیگری از اعداد رایلی با افزایش کسر حجمی نانو ذرات نرخ انتقال گرما افزایش می‌یابد. ابونادا و اوزتوپ [۱۷]، به صورت عددی به تجزیه و تحلیل تاثیرات زاویه انحراف در جابجایی و انتقال گرما در یک محفظه مورب که از نانوسیال آب و مس پر شده است پرداختند و عملکرد نانوسیال را با در نظر گرفتن پراکندگی ذرات جامد داخل محفظه مورد آزمایش قرار دادند. در این مقاله، به این نتیجه رسیدند که تاثیر زاویه شیب محفظه بر میزان افزایش انتقال گرما در اعداد رایلی کوچک ناچیز است؛ هم چنین نتیجه گرفتند که زاویه انحراف یک عامل کنترلی خوب برای هر دو محفظه (هم محفظه پر از ماده خالص و هم محفظه پر از نانوسیال) است. قاسمی و امین الساداتی [۱۸]، جابجایی طبیعی در یک محفظه مثلثی شکل که یک منبع گرمایی در دیواره عمودی-اش قرار دارد و حاوی نانوسیال آب مس است را به روش عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که برای همه مقادیر کسر حجمی ذرات جامد، افزایش عدد رایلی منجر به افزایش میزان انتقال بیشتر می‌شود که ناشی از افزایش نیروی شناوری است. در اعداد رایلی پایین هنگامی که منبع گرمایی به سمت بالا در دیواره عمودی محفظه حرکت می‌کند، میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد. نایاک و همکاران [۱۹]، بصورت عددی انتقال حرارت ترکیبی در حفره برای نانوسیال آب و مس برای زاویه چرخش و انحراف، عدد رینولدز، عدد ریچاردسون و کسر حجمی نانو ذرات متفاوت مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند افزایش زاویه چرخش، کسر حجمی ذرات و عدد ریچاردسون، سبب افزایش انتقال حرارت می‌شود. کریم و همکاران [۲۰]، انتقال حرارت ترکیبی در دوزنقه برای چهار نانوسیال مختلف مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد با افزایش کسر حجمی، کاهش قطر نانوذرات، کاهش زاویه چرخش و با افزایش نسبت منظر، عدد تاسلت افزایش می‌یابد.

### ۳- معادلات حاکم

فرم بی بعد معادلات حاکم (پیوستگی، مومنتوم و انرژی) با فرض جریان آرام، دائم و نانوسیال نیوتنی تراکم ناپذیر و صرف‌نظر از لغزش بین سیال پایه (آب) و نانوذرات (آلومینا) در حالت بدون بعد مطابق رابطه (۴-۱) خواهند بود:

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

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

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \nu_f} \left[ \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right] + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} Ra \cdot Pr \cdot \theta \quad (3)$$

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

متغیرهای بی بعد استفاده شده در معادلات به شرح زیرند:

$$X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, V = \frac{vL}{\alpha_f}, U = \frac{uL}{\alpha_f} \quad (5)$$

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

اعداد بدون بعد رابلی، پرانتل نیز بصورت زیر می‌باشند:

$$Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f}, Ra = \frac{gBL^3(T_h - T_c)}{\nu_f \alpha_f} \quad (6)$$

### ۳-۱- روابط مربوط به خواص نانوسیال

با توجه به اینکه در این تحقیق نانوسیال تکفازی فرض شده است؛ بنابراین جهت حل معادلات حاکم احتیاج به خواص ترموفیزیکی نانو سیال است. خواصی نظیر چگالی  $(\rho_{nf})$ ، ضریب انبساط حجمی  $(\rho\beta)_{nf}$ ، ظرفیت حرارتی  $(\rho c_p)_{nf}$ ، ضریب پخش حرارتی  $(\alpha_{nf})$  نانوسیال از روابط (۷-۸) محاسبه می‌شوند [۲۶-۲۷]

$$(\rho\beta)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho\beta)_f + \varphi(\rho\beta)_s \quad (7)$$

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

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_s \quad (8)$$

ویسکوزیته دینامیکی موثر نانوسیال هم به ترتیب توسط رابطه بریکمن [۲۸] به صورت رابطه (۹) است:

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 - \varphi)^{-2.5} \quad (9)$$

$K_{nf}$  ضریب هدایت گرمایی نانوسیال است که پاتل [۲۹] مدلی برای آن پیشنهاد داده است. برای دو جزء مستقل از ذرات کروی سوسپانسیون، این مدل به صورت رابطه (۱۰) است:

$$k_{nf} = k_f \left[ 1 + \frac{k_s A_s}{k_f A_f} + c k_s Pe \frac{A_s}{k_f A_f} \right] \quad (10)$$

که  $k_s$  و  $k_f$  به ترتیب، ضریب هدایتی نانو ذرات آلومینا و سیال خالص می‌باشند.

$$\frac{A_s}{A_f} = \frac{d_f \varphi}{d_s (1 - \varphi)} \quad (11)$$

اندازه مولکولی سیال مینا آب به صورت رابطه (۱۲-۱۳) است:

$$d_f = 2 \text{ \AA} \quad (12)$$

$$Pe = \frac{u_s d_s}{\alpha_f} \quad (13)$$

$u_s$  حرکت براونی سرعت نانو ذرات است:

$$u_s = \frac{2k_b T}{\pi \mu_f d_s^2} \quad (14)$$

$k_b = 1/38.07 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$  ثابت بولتزمن است. زیرنویس‌های  $f, s$  و  $nf$  در روابط فوق بترتیب، اشاره به خواص نانوسیال، آب و نانوذرات آلومینا دارد. عدد پرانتل آب خالص  $6/2$  در نظر گرفته شده است. خواص ترموفیزیکی آب و آلومینا، در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی آب خالص و نانوذرات آلومینا

خواص ترموفیزیکی	نانو ذرات آلومینا	آب خالص
$\rho$ (kgm <sup>-3</sup> )	۳۹۷۰	۹۹۷/۱
$C_p$ (Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	۷۶۵	۴۱۷۹
$k$ (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	۴۰	۰/۶۱۳
$\beta \times 10^5$ (K <sup>-1</sup> )	۰/۸۵	۲۱

### ۳-۲- شرایط مرزی

با توجه به هندسه در نظر گرفته شده شرط مرزی هیدرودینامیکی مساله حاضر، شرط عدم لغزش و شرط عدم نفوذ روی دیواره‌ها،  $U, V = 0$  است. شرط مرزی حرارتی نیز، به این صورت است که برای دیوار گرم  $\Theta = 1$ ، روی دیوار سرد  $\Theta = 0$  و روی دیواره‌های عایق نیز گرادیان دما برابر صفر است. میزان انتقال حرارت در قالب عدد ناسلت قابل بیان است که عدد ناسلت موضعی روی دیواره‌های گرم به صورت رابطه (۱۵) تعریف می‌شود:

$$Nu = -\frac{k_{nf}}{k_f} \left( \frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_{wall} \quad (15)$$

### ۳-۳- روش عددی و اعتبار سنجی

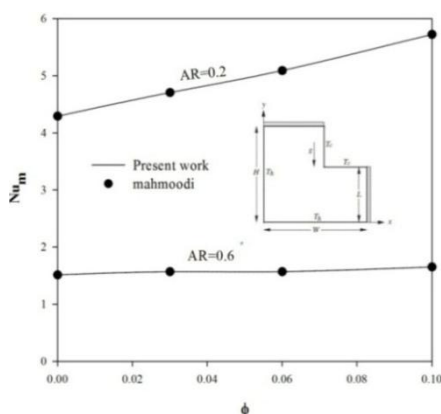
برای مدل کردن هندسه مورد نظر، برنامه‌ای به زبان فرترن نوشته شد. معادلات (۱) تا (۴)، همراه با شرایط مرزی گفته شده به روش اختلاف محدود، مبتنی بر حجم کنترل جبری شده‌اند. میدان حل با روش شبکه جابه‌جاشده شبکه بندی شده است. جهت حل هم زمان معادلات جبری شده، از الگوریتم سیمپل استفاده شده است که جزئیات کامل آن در مرجع [۳۰] آمده است. همچنین از معیار همگرایی زیر استفاده شده است:

$$\sum_j \sum_i \sqrt{\left[ \frac{\delta^{n+1} - \delta^n}{\delta^{n+1}} \right]_{i,j}^2} \leq 10^{-8} \quad (16)$$

که  $n$  تعداد تکرار و  $\delta$  متغیر عمومی  $(U, V, \theta)$  را نشان می‌دهد.

برای بررسی صحت عملکرد کد نوشته شده، مقایسه‌ای بین نتایج بدست آمده با نتایج مراجع دیگر صورت گرفته است. ابتدا محفظه مربعی با دیواره‌های افقی عایق و دیواره‌های عمودی در دو دمای مختلف TC (سرد) و Th (گرم) برای عدد پراتل  $0.71$  و اعداد رایلی  $10^4$ ،  $10^5$  و  $10^6$  محاسبه و در جدول ۲، عدد ناسلت متوسط با نتایج موجود در مراجع مختلف مقایسه شده است. از مقایسه داده‌ها در جدول ۲ مشاهده می‌شود که نتایج بدست آمده با دقت خوبی قابل قبول است.

دست آمده از برنامه حاضر با نمونه کارهای انجام شده نشان می‌دهد. پس از کنترل عملکرد برنامه لازم است که استقلال جواب‌ها از تعداد نقاط شبکه بررسی شده، شبکه حل مناسب انتخاب شود. بدین منظور، تاثیر تعداد نقاط شبکه بر عدد ناسلت دیواره‌های گرم برای محفظه در اعداد رایلی، نسبت ابعادی، طول بافل و درصد حجمی نانو ذرات مختلف بررسی شد. نمونه‌ای از این بررسی‌ها به ازای عدد رایلی  $10^4$ ،  $AR=0.5$ ،  $Lb=0.2$  و  $\phi=0.04$  در جدول ۳ آورده شده است. در این جدول، عدد ناسلت متوسط دیواره‌های گرم ارائه شده است. با توجه به این جدول، مشخص است که تقریباً برای شبکه‌های ریزتر از  $100 \times 100$  جواب‌ها یکسان مانده است. بدین ترتیب، شبکه یکنواخت  $100 \times 100$  برای اجراهای برنامه انتخاب شده است؛ همچنین در شکل ۳، نحوه شبکه‌بندی محفظه ارائه شده است.



شکل ۲- اعتبار سنجی برنامه حاضر با محفظه L شکل [۳۵]

جدول ۳- تاثیر تعداد نقاط شبکه بر عدد ناسلت متوسط

شبهه	۴۰×۴۰	۶۰×۶۰	۸۰×۸۰	۱۰۰×۱۰۰	۱۲۰×۱۲۰
$Nu_m$	۲/۳۹	۲/۰۵	۱/۹۲	۱/۸۹	۱/۸۸

### ۴- نتایج

پس از اطمینان از صحت کد نوشته شده و انتخاب شبکه مناسب به بررسی نتایج پرداخته می‌شود. در این قسمت، به بررسی پارامترهایی می‌پردازیم که بر نرخ انتقال حرارت در محفظه مورد نظر تاثیر می‌گذارند. از جمله این پارامترها عدد رایلی، نسبت ابعادی محفظه، طول بافل و درصد حجمی نانو ذرات است.

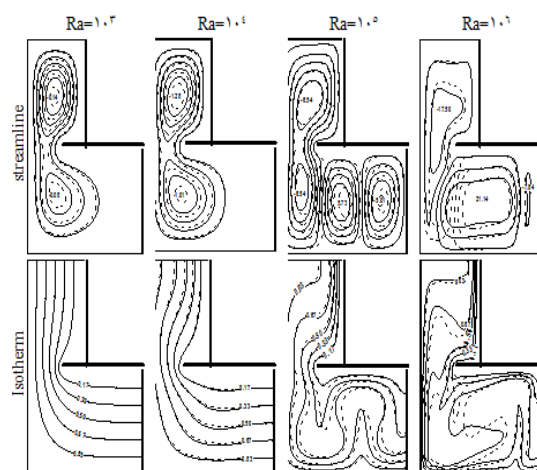
جدول ۲- مقایسه عدد ناسلت متوسط کار حاضر با دیگران

Ra	$10^6$	$10^5$	$10^4$	کار حاضر
خانافر [۳۱]	۲/۲۴۵	۴/۵۲۲	۸/۸۲۹	۲/۲۴۳
باراکوس [۳۲]	۲/۲۴۵	۴/۵۱۰	۸/۸۰۶	۲/۲۴۳
مارکاتوس [۳۳]	۲/۲۰۱	۴/۴۳۰	۸/۷۵۴	۲/۲۰۱
دیویس [۳۴]	۲/۲۴۳	۴/۵۱۹	۸/۷۱۹	۲/۲۴۳

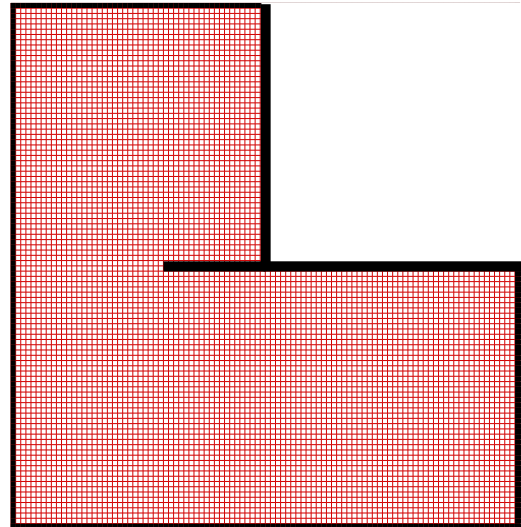
همچنین در شکل ۲، مقایسه‌ای جهت بررسی کد نوشته شده در یک محفظه L شکل نانوسیال صورت گرفته است. در این شکل، عدد ناسلت متوسط در یک محفظه L شکل با دو دیوار عایق و دو دیوار در دمای سرد و گرم [۳۵] رسم شده است. نتایج تطابق بسیار خوبی را برای عدد ناسلت متوسط به

رایلی و تشکیل سلول بنارد، شکل خطوط هم دما نیز تغییر می‌کند. در دیواره عمودی شکل خطوط هم دما نشان دهنده، رشد لایه مرزی حرارتی است که با افزایش عدد رایلی، تغییرات این خطوط شدیدتر می‌شود که نشان دهنده، افزایش گرادیان دما نزدیک سطح و افزایش انتقال حرارت است.

شکل ۵، تغییرات عدد ناسلت در راستای دو دیوار گرم از نقطه C تا A برای اعداد رایلی مختلف نشان می‌دهد. برای اعداد رایلی ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰ از نقطه C به نقطه B در ابتدا مقدار عدد ناسلت تقریباً ثابت است که نشان‌دهنده حاکم بودن انتقال حرارت هدایتی است، ولی با افزایش عدد رایلی با حاکم شدن انتقال حرارت جابجایی این روند با افزایش همراه است، ولی برای همه حالت‌ها با نزدیک شدن به نقطه B این عدد کاهش می‌یابد؛ زیرا سیال با گرم شدن و تغییر چگالی قبل از رسیدن به این نقطه از سطح افقی جدا شده، به سمت بالا حرکت می‌کند و اندکی سیال در این قسمت محبوس می‌شود و به دلیل کم بودن گرادیان دما عدد ناسلت ناچیز است. از نقطه B به سمت نقطه A در قسمتی از سطح با تماس سیال با دیواره و تبادل حرارت عدد ناسلت مخصوصاً در محل بافل بدلیل کاهش سطح مقطع جریان و افزایش سرعت افزایش می‌یابد؛ ولی با ایجاد لایه مرزی روی این سطح و رشد آن انتقال حرارت کاهش می‌یابد که با افزایش عدد رایلی، این روند شدیدتر می‌شود.



شکل ۴- خطوط جریان و خطوط هم‌دما در اعداد رایلی مختلف برای سیال آب (خط) و نانوسیال با  $\phi = 0.04$  (خط چین)



شکل ۳- شبکه بندی محفظه

#### ۱-۴- بررسی اثر عدد رایلی و کسر حجمی نانوذرات

در این قسمت اثر عدد رایلی بر میدان جریان، دما و عدد ناسلت موضعی و متوسط برای  $Lb=0.2, AR=0.5$  بررسی می‌شود.

در شکل ۴، خطوط جریان و هم‌دما در اعداد رایلی مختلف برای سیال آب و نانوسیال با  $\phi = 0.04$  رسم شده است. در عدد رایلی  $10^2$ ، سیال داخل محفظه در کنار دیوار گرم به سمت بالا حرکت کرده، در کنار دیوار سرد به سمت پایین می‌آید و در نهایت دو گردابه ساعتگرد به هم متصل تشکیل می‌شود که انتقال حرارت در بخش عمودی محفظه بصورت جابجایی آزاد است. سیال در قسمتی از محفظه افقی، تقریباً ساکن است و انتقال حرارت بصورت هدایت است. در عدد رایلی  $10^5$  در قسمت افقی محفظه دو گردابه جدید (سلول‌های بنارد) ایجاد شده که مکانیزم انتقال حرارت در این بخش از محفظه، از هدایت به جابجایی تغییر کرده که سبب افزایش انتقال حرارت می‌شود. در عدد رایلی  $10^6$  به علت افزایش نیروی شناوری یکی از گردابه‌های ایجاد شده کوچکتر و دیگری بزرگتر می‌شود. در اعداد رایلی بالا رفتار سیال آب و تانو سیال متفاوت می‌شود که علت آن، تغییر خواص سیال آب (مانند افزایش ویسکوزیته) با افزودن نانو ذره است. خطوط هم دما در اعداد رایلی  $10^3$  و  $10^4$  در محفظه افقی تقریباً با دیواره‌ها موازی هستند که نشان دهنده، اثر غالب انتقال حرارت هدایتی است و با افزایش عدد

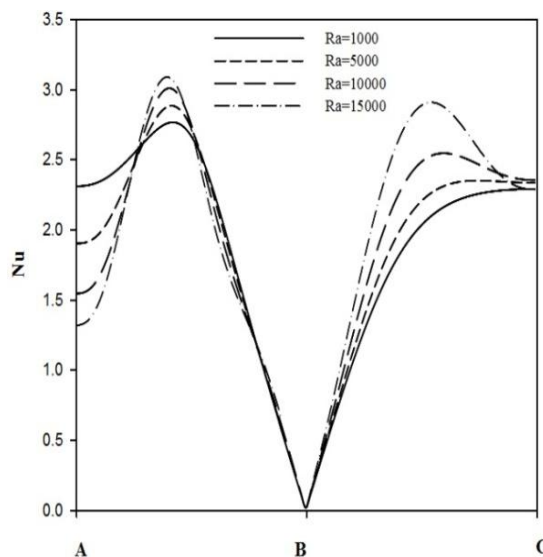
تغییر می‌کند؛ همچنین مطابق رابطه ۱۵ با افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال، عدد ناسلت افزایش می‌یابد؛ همچنین دیده می‌شود با افزایش عدد رایلی، میزان عدد ناسلت متوسط تغییر می‌کند که علت آن تغییر، مکانیزم انتقال حرارت از هدایت به جابجایی است.

#### ۴-۲- بررسی اثر نسبت ابعادی محفظه

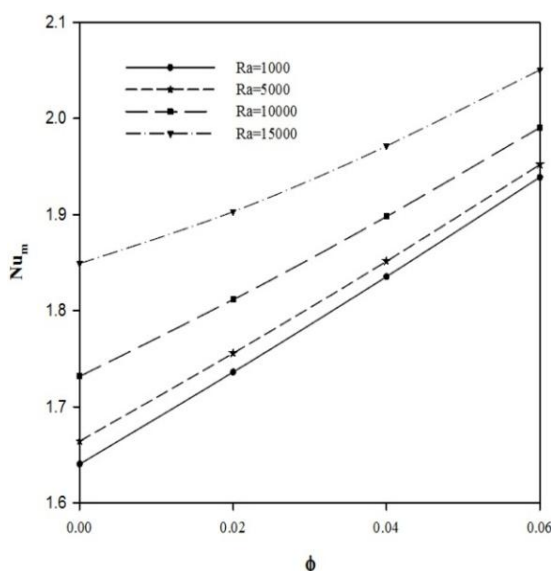
در این قسمت، به بررسی اثر نسبت ابعادی محفظه بر میدان جریان و میدان دما و نرخ انتقال حرارت جابجایی آزاد می‌پردازیم؛ همچنین در این قسمت،  $B_f = 0.2$  و  $Ra = 10^4$  در نظر گرفته شده است.

در شکل ۷، خطوط جریان و هم‌دما در نسبت ابعادهای مختلف برای سیال آب و نانوسیال ( $\phi = 0.04$ ) رسم شده است. نتایج نشان می‌دهد، در نسبت ابعادی  $0.1$ ، یک گردابه ناشی از انتقال حرارت جابجایی آزاد در کل محفظه ایجاد می‌شود و با افزایش نسبت ابعادی محفظه در  $AR = 0.5$ ، به علت باریک شدن مسیر عبور سیال از محفظه پایین به محفظه بالا دو گردابه ایجاد شده که در  $AR = 0.7$ ، این دو کاملا از یکدیگر مجزا می‌شوند. همانطور که از خطوط هم‌دما قابل مشاهده است، با افزایش نسبت ابعادی و کوچکتر شدن مسیر عبور سیال خطوط هم‌دما به موازات دیوار سرد و گرم است که نشان می‌دهد، مکانیزم انتقال حرارت در بخشی از محفظه به هدایت نزدیک می‌شود. در شکل ۸، اثر نسبت ابعادی مختلف محفظه بر عدد ناسلت موضعی رسم شده است. نتایج نشان داده است، در روی دیوار گرم افقی برای بخشی از طول بین C تا B در  $AR = 0.7$  تقریبا عدد ناسلت ثابت است که علت آن موازی بودن خطوط هم‌دما با سطح گرم و حاکم بودن انتقال حرارت هدایتی است، ولی در نزدیک B به علت جدا شدن سیال از سطح قبل از رسیدن به این نقطه و حبس شدن سیال در نزدیکی نقطه B و کاهش گرادیان دما، عدد ناسلت ناچیز است. روی دیوار گرم عمودی در محل بافل (گلوگاه) به علت کاهش سطح عبور جریان و افزایش سرعت سیال در این نقطه، عدد ناسلت افزایش و پس از آن با رشد لایه مرزی حرارتی کاهش می‌یابد. این روند با کاهش نسبت ابعادی و تغییر محل بافل تغییر و فاصله آن تا دیوار گرم عمودی تغییر می‌کند و به نظر می‌رسد، تاثیرگذاری بافل بر افزایش انتقال حرارت کم می‌شود.

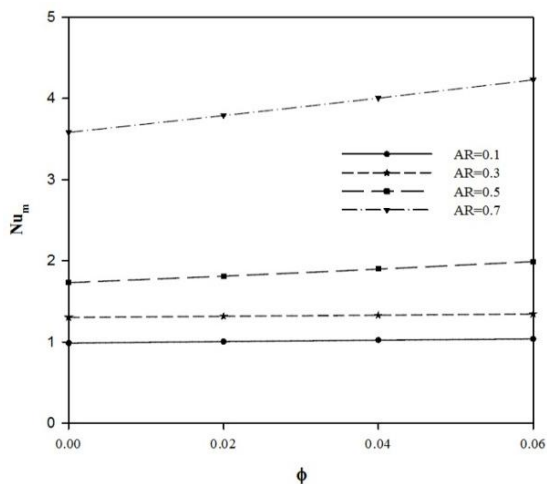
شکل ۶، تغییرات عدد ناسلت متوسط روی دیوارهای گرم بر حسب کسر حجمی نانو ذرات برای اعداد رایلی مختلف را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود، میزان عدد ناسلت متوسط با افزایش کسر حجمی نانو ذرات برای تمامی اعداد رایلی افزایش می‌یابد؛ زیرا با افزایش کسر حجمی نانو ذرات مطابق روابط ۸-۱۰ خواص سیال تغییر کرده، میدان سرعت و دما



شکل ۵- اثر اعداد رایلی مختلف بر عدد ناسلت موضعی برای  $\phi = 0.04$



شکل ۶- اثر عدد رایلی و کسر حجمی نانو ذرات بر عدد ناسلت متوسط



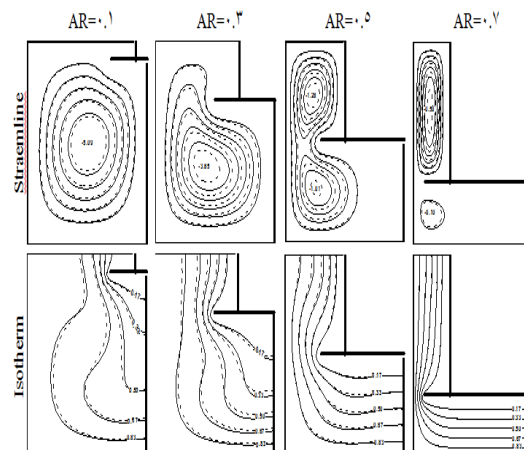
شکل ۹- اثر نسبت ابعادی مختلف در درصد حجمی نانوذرات مختلف بر عدد ناسلت متوسط

### ۴-۳- بررسی اثر طول بافل

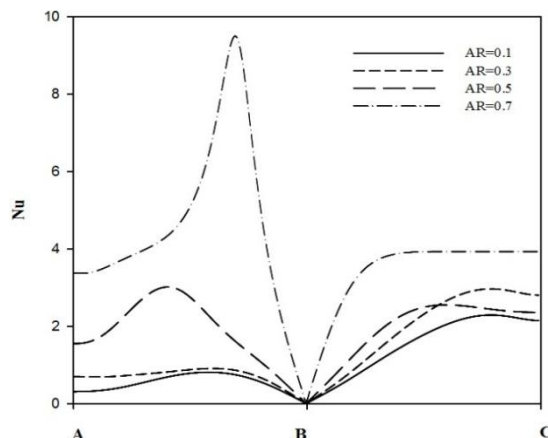
در این قسمت، به بررسی اثر طول بافل بر میدان جریان و میدان دما و نرخ انتقال حرارت جابجایی آزاد برای  $Ra = 10^4$  و  $AR = 0/5$  پرداخته شده است.

در شکل ۱۰، خطوط جریان و خطوط همدمما در طول بافل‌های مختلف برای سیال پایه و نانوسیال ( $\phi = 0/04$ ) رسم شده است. نتایج نشان می‌دهد، هنگامی که بافل وجود ندارد، یک گردابه در محفظه وجود دارد که با افزایش طول بافل، فضا برای عبور جریان نانوسیال کاهش یافته، در نتیجه دو گردابه کوچکتر در محفظه‌های بالا و پایین تشکیل می‌شود؛ همچنین در محل بافل خطوط هم دما به یکدیگر و به دیوار گرم نزدیکتر می‌شود که موجب تاثیر بر میزان انتقال حرارت می‌شود.

شکل ۱۱، اثر طول بافل بر عدد ناسلت موضعی نشان می‌دهد. در فاصله بین C تا B بعلت عدم تغییر هندسه محفظه افقی و خواص سیال، تقریباً تغییرات عدد ناسلت برای حالت‌های مختلف یکسان است، ولی برای فاصله بین B تا A متفاوت است، زیرا با افزایش طول بافل، سطح مقطع عبور جریان کاهش یافته، سرعت سیال افزایش می‌یابد و ضخامت لایه مرزی تغییر می‌کند که سبب افزایش عدد ناسلت می‌شود. شکل ۱۲، تغییرات عدد ناسلت متوسط روی دیوارهای گرم برحسب طول بافل برای نسبت ابعادی مختلف نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد، برای تمامی طول بافل‌ها افزایش نسبت



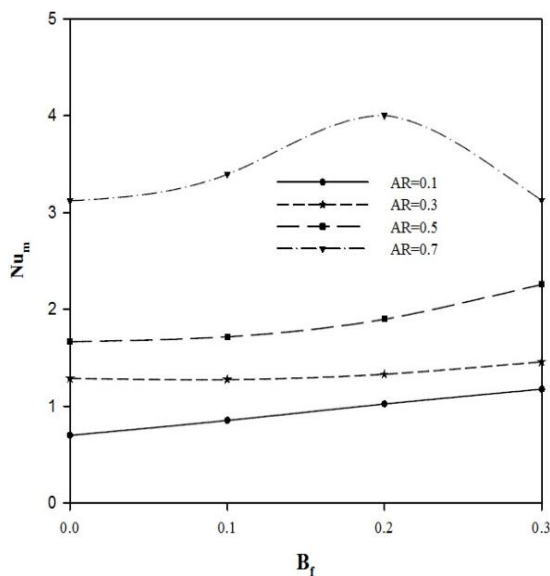
شکل ۷- خطوط جریان، همدمما در نسبت ابعادی های مختلف برای سیال آب (خط) و نانوسیال با  $\phi = 0/04$  (خط چین)



شکل ۸- اثر نسبت ابعادی مختلف محفظه بر عدد ناسلت موضعی برای نانوسیال با  $\phi = 0/04$

شکل ۹، تغییرات عدد ناسلت متوسط روی دیوارهای گرم برحسب کسر حجمی نانو ذرات برای اعداد رایلی مختلف را نشان می‌دهد. برای نسبت ابعادی پایین مانند ۰/۱ و ۰/۳ تغییر کسر حجمی نانو ذرات تاثیر زیادی روی عدد ناسلت متوسط نمی‌گذارد، زیرا با وجود اینکه ضریب هدایت حرارتی نانو سیال با کسر حجمی نانو ذره زیاد می‌شود، ولی گرادیان دما این روند را ندارد و علت آن هندسه محفظه و تغییر ضخامت لایه مرزی حرارتی با تغییر خواص نانو سیال است. با افزایش نسبت ابعادی، عدد ناسلت افزایش یافته و افزایش کسر حجمی نانو ذرات، نانوسیال تاثیر بیشتری بر افزایش انتقال حرارت دارد.





شکل ۱۲- اثر طول بافل و نسبت ابعادی محفظه در نانوسیال بر عدد ناسلت متوسط ( $\phi = 0.04$ )

### ۵- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر بصورت عددی انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال آب-آلومینا در محفظه L شکل بافلدار مورد بررسی قرار گرفت. اثر پارامترهای حاکم در جریان جابجایی آزاد بر میزان انتقال حرارت بررسی شد. در نهایت نتایج زیر بدست آمد:

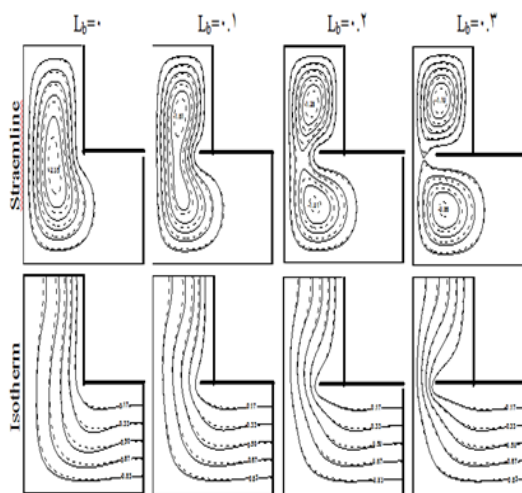
- هرچه به سمت بالای دیوار گرم پیش می‌رویم، انتقال حرارت کاهش می‌یابد.
- با افزایش عدد رایلی، انتقال حرارت افزایش یافته است.
- افزایش AR سبب افزایش انتقال حرارت شده است.
- افزایش طول بافل سبب افزایش انتقال حرارت شده است.
- با افزایش طول بافل، نانوسیال تاثیر کمتری بر خنک کاری محفظه گذاشته است

### ۶- علایم و نشانه‌ها

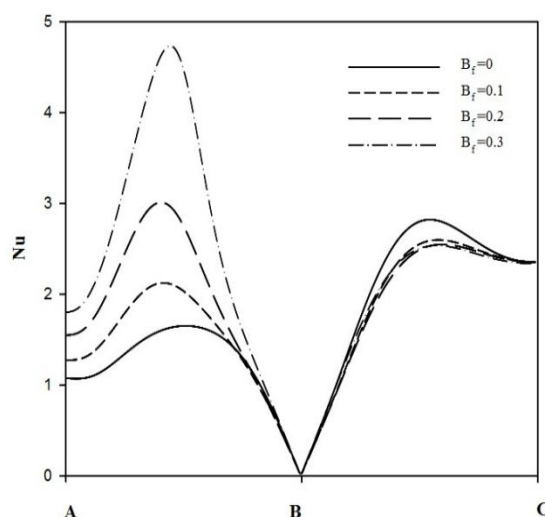
ظرفیت حرارتی،  $J.kg.K^{-1}$   
 شتاب گرانش،  $m.s^{-2}$   
 هدایت حرارتی،  $Wm^{-1}K^{-1}$

$C_p$   
 $g$   
 $k$

ابعادی، منجر به افزایش عدد ناسلت می‌شود؛ همچنین افزایش طول بافل برای بیشتر حالات، باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود؛ زیرا تغییر در مسیر حرکت سیال، باعث تغییر در رشد لایه مرزی می‌شود که منجر به افزایش انتقال حرارت می‌شود؛ در حالتی که  $AR=0.7$  و  $B_f=0.3$  است، به دلیل تقسیم شدن محفظه به دو محفظه جدا از هم، انتقال حرارت کاهش یافته است.



شکل ۱۰- خطوط جریان، همدمها در طول بافل‌های مختلف برای سیال آب (خط) و نانوسیال با  $\phi = 0.04$  (خط چین)



شکل ۱۱- اثر طول بافل مختلف بر عدد ناسلت موضعی در  $AR = 0.5$  برای نانوسیال با  $\phi = 0.04$

- [4] Yucel N, Ozdem AH (2003) Natural convection in partially divided square enclosures. Heat mass transfer 40(1-2): 167-175.
- [5] Bahlaoui A, Raji A, Hasnaoui M, Naïmi M, Makayssi T, Lamsaadi M (2009) Mixed convection cooling combined with surface radiation in a partitioned rectangular cavity. Energ Convers Manage 50(3): 626-635.
- [6] Kandaswamy P, Lee J, Hakeem AA, Saravanan S (2008) Effect of baffle-cavity ratios on buoyancy convection in a cavity with mutually orthogonal heated baffles. Int J Heat Mass Tran 51(7): 1830-1837.
- [7] Oosthuizen PH, Paul JT (1985) Free convection heat transfer in a cavity fitted with a horizontal plate on the cold wall. Advan Enhan Heat Tran 43: 101-107.
- [8] Frederick RL (1989) Natural convection in an inclined square enclosure with a partition attached to its cold wall. Int J Heat Mass Tran 32(1): 87-94.
- [9] Bilgen E (2005) Natural convection in cavities with a thin fin on the hot wall. Int J Heat Mass Tran 48(17): 3493-3505.
- [10] Ziaei-Rad M, Kasaeipoor A (2015) A Numerical study of similarity solution for mixed-convection copper-water nanofluid boundary layer flow over a horizontal plate. Modares Mech Eng 14(14): 190-198.
- [11] Eastman JA, Choi SUS, Li S, Yu W, Thompson LJ (2001) Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. Appl phys let 78(6): 718-720.
- [12] Chamkha AJ, Ismael M, Kasaeipoor A, Armaghani T (2016) Entropy Generation and Natural Convection of CuO-Water Nanofluid in C-Shaped Cavity under Magnetic Field. Entropy 18(2): 50.
- [13] Jou RY, Tzeng SC (2006) Numerical research of nature convective heat transfer enhancement filled with nanofluids in rectangular enclosures. Int Commun Heat Mass 33(6): 727-736.
- [14] Khanafer K, Vafai K, Lightstone M (2003) Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids. Int J Heat Mass Tran 46(19): 3639-3653.
- [15] Sheikhzadeh GA, Arefmanesh A, Kheirkhah MH, Abdollahi R (2011) Natural convection of Cu-water nanofluid in a cavity with partially active side walls. Eur J Mech B-Fluid 30(2): 166-176.
- [16] Santra AK, Sen S, Chakraborty N (2008) Study of heat transfer augmentation in a differentially heated square cavity using copper-water nanofluid. Int J Therm Sci 47(9): 1113-1122.
- طول حفره،  $m$   $L$
- طول بافل،  $m$   $H_2$
- طول بی بعد بافل  $B_f$
- عدد ناسلت  $Nu$
- عدد ناسلت متوسط  $Nu_m$
- فشار،  $Pa$   $P$
- فشار بی بعد  $P$
- عدد پراانتل  $Pr$
- دما،  $K$   $T$
- سرعت،  $m.s^{-1}$   $u, v$
- سرعت بی بعد  $U, V$
- محورهای مختصات،  $m$   $x, y$
- محورهای مختصات بی بعد  $X, Y$
- علایم یونانی
- ضریب انبساط حرارتی،  $K^{-1}$   $\beta$
- کسر حجمی نانوسیال  $\phi$
- دمای بی بعد  $\theta$
- ویسکوزیته دینامیکی،  $N.s.m^{-2}$   $\mu$
- ویسکوزیته سینماتیکی،  $m^2.s^{-1}$   $\nu$
- دانسیته،  $kg.m^{-3}$   $\rho$
- زیر نویس‌ها
- سرد  $c$
- سیال پایه  $f$
- گرم  $h$
- متوسط  $m$
- نانوسیال  $nf$
- نانوذره  $s$
- ۷- مراجع
- [1] Ostrach S (1988) Natural convection in enclosures. J Heat Trans 110(4b): 1175-1190.
- [2] Lee S, Choi SS, Li SA, Eastman JA (1999) Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles. J Heat Trans 121(2): 280-289.
- [3] Wu W, Ching CY (2010) Laminar natural convection in an air-filled square cavity with partitions on the top wall. Int J Heat Mass Tran 53(9): 1759-1772.

- nanofluid in vertical sinusoidal channel with magnetic field. *Modares Mech Eng* 15(9): 87-94.
- [26] Ghasemi B, Aminossadati SM, Raisi A (2011) Magnetic field effect on natural convection in a nanofluid-filled square enclosure. *Int J Therm Sci* 50(9): 1748-56.
- [27] Maxwell JC (1881) *A treatise on electricity and magnetism*. Clarendon press.
- [28] Brinkman HC (1952) The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *J Chem Phys* 20(4): 571-581.
- [29] Patel HE, Anoop KB, Sundararajan T, Das SK (2006) A micro-convection model for thermal conductivity of nanofluids. *International Heat Transfer Conference 13*, Begel House Inc.
- [30] Patankar SV (1980) *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere, New York.
- [31] Khanafer K, Vafai K, Lightstone M (2003) Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids. *Int J Heat Mass Tran* 46(19): 3639-3653.
- [32] Barakos G, Mitsoulis E, Assimacopoulos D (1994) Natural convection flow in a square cavity revisited: laminar and turbulent models with wall functions. *Int J Numer Meth Fl* 18(7): 695-719.
- [33] Markatos NC, Pericleous KA (1984) Laminar and turbulent natural convection in an enclosed cavity. *Int J Heat Mass Tran* 27(5): 755-772.
- [34] de Vahl Davis G (1983) Natural convection of air in a square cavity: a bench mark numerical solution. *Int J Numer Meth Fl* 3(3): 249-264.
- [35] Mahmoodi, M (2011) Numerical simulation of free convection of a nanofluid in L-shaped cavities. *Int J Therm Sci* 50: 1731-1740.
- [17] Abu-Nada E, Oztop HF (2009) Effects of inclination angle on natural convection in enclosures filled with Cu-water nanofluid. *Int J Heat Fluid Fl* 30(4): 669-678.
- [18] Ghasemi B, Aminossadati SM (2010) Brownian motion of nanoparticles in a triangular enclosure with natural convection. *Int J Therm Sci* 49(6): 931-940.
- [19] Nayak RK, Bhattacharyya S, Pop I (2016) Heat transfer and entropy generation in mixed convection of a nanofluid within an inclined skewed cavity. *Int J Heat Mass Tran* 102: 596-609.
- [20] Kareem AK, Mohammed HA, Hussein AK, Gao S (2016) Mixed convection heat transfer in a lid-driven trapezoidal enclosure filled with nanofluids. *Int Commun Heat Mass*, In Press.
- [21] Shirvan KM, Mamourian M (2015) Numerical investigation and optimization of mixed convection and entropy generation in square cavity with lid-driven. *Modares Mech Eng* 15(8): 164-174.
- [22] Shirvan KM, Mamourian M (2015) Numerical investigation of effect and optimization of Square Cavity inclination angle and magnetic field on heat transfer and Entropy Generation. *Modares Mech Eng* 15(8): 93-104.
- [23] Aghaei A, Khorasanizadeh H, Sheikhzadeh GA (2014) Effects of magnetic field on mixed convection heat transfer and entropy generation of Cu-water nanofluid in a trapezoidal enclosure. *Modares Mech Eng* 14(9):183-194.
- [24] Kasaeipoor A, Ghasemi B, Raisi A (2014) Magnetic field effect on nanofluid water-cu natural convection in an inclined T shape cavity. *Modares Mech Eng* 14(12):179-89.
- [25] Aminfar H, Nasiri M, Khezerloo M (2015) Numerical investigation of entropy generation of