

جابجایی ترکیبی نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم در یک محفظه مربعی باز حاوی یک قطعه جامد گرمازا

حجت غلامرضایی^۱، افراسیاب رئیسی^{۲*} و بهزاد قاسمی^۳

دانشکده فنی مهندسی

دانشگاه شهرکرد

(تاریخ دریافت: ۹۵/۰۹/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۴/۲۲)

چکیده

در این تحقیق، انتقال حرارت جابجایی ترکیبی نانو سیال آب- اکسید آلومینیوم در یک محفظه مربعی، حاوی یک جسم جامد گرمازا، به روش عددی بررسی شده است. نانوسیال با دما و سرعت یکنواخت از گوشه پایین و سمت چپ محفظه وارد آن می شود و به صورت توسعه یافته از گوشه بالا و سمت راست محفظه خارج می شود. جسم جامد قرار گرفته در مرکز محفظه به صورت یکنواخت انرژی تولید می کند. تمام دیوارهای محفظه از نظر حرارتی عایق هستند. معادلات دیفرانسیل حاکم با استفاده از روش حجم محدود گسسته شده و با استفاده از الگوریتم سیمپل حل شده اند. در این تحقیق، اثر پارامترهای مختلف از قبیل کسر حجمی نانوذرات، عدد ریچاردسون، عدد رینولدز، نسبت منظری، ضریب هدایت حرارتی منبع گرمازا بر روی میدان جریان و نرخ انتقال حرارت، بررسی شده اند. نتایج نشان می دهد که با افزایش اعداد رینولدز و ریچاردسون، عدد نوسلت و لذا نرخ انتقال حرارت افزایش می یابد. از طرفی، تغییر اندازه ضلع منبع حرارتی باعث تغییر میدان های جریان و دما و افزایش ضریب هدایت حرارتی منبع حرارتی باعث افزایش میزان انتقال حرارت از منبع گرمازا به نانوسیال مجاور آن می شود. همچنین، با افزایش کسر حجمی نانوذرات، میزان انتقال حرارت افزایش می یابد.

واژه های کلیدی: جابجایی ترکیبی، محفظه، نانوسیال، تولید حرارت، بوسیله جسم جامد

Mixed Convection of a Water- Al_2O_3 Nanofluid in an Open Square Cavity, Containing a Solid Body Heat Source

H. Gholamrezaee, A. Raisi, and B. Ghasemi

Mechanical Engineering Department

Shahrekord University

(Received: 2/December/2016; Accepted: 13/July/2017)

ABSTRACT

In this study, mixed convection of a water- Al_2O_3 nanofluid was numerically investigated in an open square cavity. All cavity walls were insulated and a solid body heat source was placed at the center of the cavity. The nanofluid enters the cavity with uniform velocity and temperature and leaves it as a fully developed flow. The governing equations were discretized using finite volume method and using Patankar's SIMPLE algorithm. The effects of relevant parameters, such as Reynolds and Richardson numbers, length ratio (The ratio of the heat source length to the length of the cavity), the source thermal conductivity, and solid volume fraction of the nanoparticles were examined, both from flow field and the heat transfer rate considerations. The results show that the average Nusselt number increases with increase in Reynolds and Richardson numbers. A change in length ratio changes the flow and temperature fields. In addition, Increase of heat source thermal conductivity increases the average Nusselt number. The results also show that thermal performance of cavity is enhanced by increasing solid volume fraction of the nanoparticles.

Keywords: Mixed Convection, Cavity, Nanofluid, Heat Generation, Solid Body

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد: h.gholamrezaei@gmail.com

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): raisi@eng.sku.ac.ir

۳- استاد: ghasemi@eng.sku.ac.ir

max
بیشترین
min
کمترین

۱- مقدمه

انتقال حرارت همواره یکی از جنبه‌های مهم و تأثیرگذار در زندگی انسان بوده است. سال‌هاست که تحقیقات بسیاری در این زمینه صورت می‌گیرد که عمده آن‌ها به قصد بهبود و تسریع انتقال حرارت انجام شده است. در دهه‌های اخیر مقالات و پژوهش‌های فراوانی در خصوص نانوسیال‌ها، محفظه‌های بسته، انتقال حرارت در کنار هیتز گرمايي و غیره انجام گرفته است. از این تحقیقات می‌توان به فعالیت محمودی و قاسمی [۱]، اشاره کرد که اثر حرکت یک بافل را روی انتقال حرارت جابجایی در یک کانال با قطعات گرمازا بررسی کردند و از نتایج مهم آن می‌توان به افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی در اعداد ریچاردسون پایین با اضافه کردن بافل به کانال اشاره کرد. محمودی و همکاران [۲]، در مطالعه عددی خنک‌کاری گرم‌کن افقی در یک محفظه حاوی نانوسیال به روش انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی به این نتیجه رسیدند که طول گرم‌کن در محفظه به شدت روی عدد نوسلت متوسط تأثیرگذار است و با آن رابطه غیرمستقیم دارد. آنها همچنین دریافته‌اند که عدد نوسلت با افزایش کسر حجمی نانو ذرات، زیاد می‌شود. همت اسفه و همکاران [۳]، پس از مطالعه گسترده پیرامون جریان جابه‌جایی ترکیبی در محفظه مربعی پر شده از نانوسیال با دو دیوار متحرک، دریافته‌اند که برای یک عدد ریچاردسون مشخص، با افزایش عدد رینولدز تراکم خطوط جریان افزایش یافته و گرادپان دما روی سطح دیوار نیز افزایش می‌یابد. این پدیده منجر به افزایش انتقال حرارت و عدد نوسلت متوسط می‌شود. کلتی و همکاران [۴]، انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی در یک محفظه پر شده از نانوسیال را به همراه منبع گرم مطالعه کردند. آن‌ها نشان دادند که افزایش عدد ریچاردسون کمک اندکی در افزایش عدد نوسلت می‌کند. همچنین رابطه مستقیم عدد نوسلت و عدد رینولدز اثبات شد. مهم‌تر اینکه افزایش قطر نانو ذرات، برای همه اعداد ریچاردسون سبب کاهش عدد نوسلت متوسط می‌شود. قاسمی و امین‌الساداتی [۵]، با مطالعه عددی انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی در یک محفظه باز واقع در کانال افقی به همراه منبع گرم در دیوار محفظه، دریافته‌اند که در اعداد ریچاردسون پائین خطوط جریان به داخل محفظه

فهرست علائم

a	عرض دهانه ورودی و خروجی محفظه، m^2
A	عرض بی‌بعد دهانه ورودی و خروجی محفظه
AR	نسبت ابعادی
C_p	ظرفیت گرمایی، J/kgK
g	گرانش، m/s^2
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی، W/m^2K
k_f	ضریب انتقال حرارت هدایتی سیال پایه، W/mK
k_s	ضریب انتقال حرارت هدایتی جامد، W/mK
\bar{k}	نسبت ضریب انتقال حرارت هدایتی
l	طول ضلع منبع حرارتی، m
L	طول ضلع محفظه، m
N	تعداد گل‌گره‌ها
Nu_m	عدد نوسلت متوسط
p	فشار، N/m^2
P	فشار بی‌بعد
Pr	عدد پرانتل
Re	عدد رینولدز
Ri	عدد ریچاردسون
T	دما، K
u, v	مؤلفه‌های افقی و عمودی سرعت، m/s
U, V	مؤلفه‌های افقی و عمودی سرعت بی‌بعد
x, y	مختصات کارتزین، m
X, Y	مختصات بدون بعد

علائم یونانی

α	ضریب پخش گرما، m^2/s
β	ضریب انبساط حرارتی، $1/K$
θ	دمای بی‌بعد،
θ_{max}	ماکزیمم دمای بی‌بعد
μ	ویسکوزیته دینامیکی، N/m^2s
ν	ویسکوزیته سینماتیکی، m^2/s
ρ	چگالی، kg/m^3
ϕ	کسر حجمی نانو سیال
ψ_{max}	ماکزیمم تابع جریان

زیر نویس ها

m	مقدار متوسط
nf	نانو سیال
f	سیال پایه
p	نانوذرات
i	ورودی
c	سرد

کردند: با کاهش عدد ریچاردسون و همراه شدن دو جابجایی اجباری و طبیعی، خطوط هم‌دما شروع به چرخش می‌نمایند. هرچه عدد ریچاردسون بیشتر کاهش می‌یابد، میدان‌های جریان و دما بیشتر تحت تأثیر جابجایی اجباری قرار می‌گیرند، در نتیجه عدد نوسلت رو به افزایش می‌رود. پروین و همکاران [۱۱]، جابه‌جایی طبیعی در یک محفظه بسته پر شده از نانوسیال را مطالعه کردند. در این تحقیق دیوارهای افقی محفظه عایق شده بودند و دیوارهای عمودی در یک دمای پایین قرار داشتند. همچنین یک جسم جامد داغ در مرکز محفظه قرار داده شده بود. نتیجه بررسی آنها از این قرار شد که با افزایش عدد پرانتل، قدرت بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین گردابه‌های موجود بین دیوار افقی و جسم داغ خیلی باهم تفاوت ندارند و خطوط هم‌دما بیشتر به حالت افقی کشیده می‌شوند. آنها همچنین به این مهم دست یافتند که با افزایش عدد پرانتل، عدد نوسلت متوسط و در نتیجه نرخ انتقال حرارت زیاد می‌شود. با توجه به بررسی‌های انجام گرفته در رابطه با پژوهش‌های قبلی، دیده می‌شود که انتقال حرارت جابجایی توام نانوسیال درون یک محفظه که حاوی یک منبع گرمازا باشد تا کنون مورد توجه قرار نگرفته است و لازم به ذکر است که در این تحقیق منبع گرمازا هادی حرارت است و به صورت حجمی حرارت تولید می‌کند. بنابراین، معادله انرژی (هدایت حرارت) در داخل منبع گرمازا حل می‌شود. قطعات الکترونیکی نصب شده در داخل محفظه‌ها که عملکرد آنها همراه با تولید حرارت است و همچنین منابع گرمازایی که در داخل ساختمان‌ها قرار دارند و توسط جابجایی توام خنک می‌شوند، نمونه‌هایی از کاربرد این مدل هستند.

۲- بیان مسئله

در پژوهش حاضر انتقال حرارت ترکیبی در محفظه‌ای باز و دو بعدی مطابق شکل ۱ مورد مطالعه قرار گرفته است. یک منبع گرمازا که به صورت حجمی حرارت یکنواختی را تولید می‌کند در مرکز محفظه قرار گرفته است. تمام دیوارهای محفظه از نظر حرارتی به خوبی عایق شده‌اند. نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم درون محفظه جریان دارد. به طوری که نانوسیال با سرعت و دمای یکنواخت از سمت چپ وارد محفظه می‌شود و از سمت راست در حالت توسعه یافته محفظه را ترک می‌کند.

کشیده نمی‌شوند و برعکس در اعداد ریچاردسون بالا که جریان طبیعی مطرح است، خطوط جریان به داخل محفظه کشیده شده و حاوی گردابه‌هایی هستند. مهم‌تر اینکه با افزایش عدد ریچاردسون عدد نوسلت متوسط به صورت نوسانی کاهش می‌یابد. روی و همکاران [۶]، جابجایی ترکیبی درون یک محفظه‌ی مربعی با حرکت دیوارها به صورت افقی و عمودی را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که افزایش عدد گراشف و به عبارتی افزایش عدد ریچاردسون در رینولدزهای پایین باعث افزایش عدد نوسلت متوسط می‌شود، اما با افزایش رینولدز از شدت این افزایش کاسته می‌شود. همچنین دیده شد که حرکت هر دو صفحه سبب ثابت ماندن نوسلت متوسط با افزایش عدد گراشف در رینولدزهای بالا می‌گردد. حسن حسیب و همکاران [۷]، راجع به انتقال حرارت جابجایی ترکیبی درون یک محفظه دوزنقه‌ای شکل حاوی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم تحقیق کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که در محدوده عدد رینولدز از ۰/۱ تا ۱۰۰، عدد نوسلت متوسط هیچ تغییری نمی‌کند و به نوعی مستقل از عدد رینولدز است. همچنین در محدوده ۰/۰۱ تا ۱,۰۰۰ از عدد گراشف، میزان انتقال حرارت ثابت است. برهان‌الدین و همکاران [۸]، انتقال حرارت جابجایی ترکیبی درون محفظه دوزنقه‌ای که شار حرارتی متغیر به دیوار آن اعمال می‌شد را بررسی کردند. آنها نشان دادند که افزایش عدد نوسلت متوسط منوط به افزایش عدد ریچاردسون است. عدد لوئیس نیز روی این تغییرات بی‌تأثیر نیست و غالباً کاهش نوسلت را به همراه دارد. آنها همچنین دریافتند که عدد نوسلت متوسط در محدوده ریچاردسون ۰/۱ تا ۱ تقریباً مستقل از این عدد است. حاجی علی‌قلی و همکاران [۹]، انتقال حرارت را در یک میکرو کانال حاوی نانوسیال (Al_2O_3 -Water) تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها حاکی از آن است که افزایش میزان انتقال حرارت با زیاد شدن کسر حجمی نانوذرات در اعداد رینولدز بالا مشهودتر است. همچنین، در این تحقیق افزایش عدد نوسلت متوسط به ازای افزایش عدد هارتمن در اعداد رینولدز متفاوت، مشاهده شد. میلانی شیروان و مأموریان [۱۰]، به بررسی عملکرد جابجایی ترکیبی نانوسیال در یک محفظه‌ی مربعی با هندسه متغیر و شرط مرزی شار حرارتی ثابت پرداختند. آنها شواهد خود را این‌گونه بیان

برای بی بعد نمودن معادلات حاکم، از پارامترهای تعریف شده در رابطه (۶) استفاده می شود.

$$X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, U = \frac{u}{u_i}, V = \frac{v}{u_i}, P = \frac{p}{\rho_{nf} u_i^2}, \theta = \frac{T - T_i}{\Delta T},$$

$$\Delta T = \frac{q'' L^2}{k_s}, \bar{k} = \frac{k_s}{k_f}, A = \frac{a}{L}, AR = \frac{l}{L} \quad (6)$$

اعداد بدون بعد گراشپف، رینولدز، پرانتل و ریچاردسون مطابق رابطه (۷) تعریف می شوند.

$$Gr = \frac{g \beta_f \Delta T L^3}{\nu_f^2}, Re = \frac{\rho_f u_i L}{\mu_f}, Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f}, Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (7)$$

با استفاده از متغیرهای بی بعد موجود در رابطه (۶)، معادلات بدون بعد حاکم بر مسئله عبارتند از:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0, \quad (8)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \nu_f} \frac{1}{Re} \nabla^2 U, \quad (9)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \nu_f} \frac{1}{Re} \nabla^2 V$$

$$+ \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} \frac{Gr}{Re^2} \theta, \quad (10)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \frac{1}{Re.Pr} \nabla^2 \theta, \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(\bar{k} \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\bar{k} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) + \bar{k} = 0. \quad (12)$$

با توجه به هندسه مسئله، عرض دهانه ورودی و خروجی مسئله برابر ۰/۱۵ طول محفظه است.

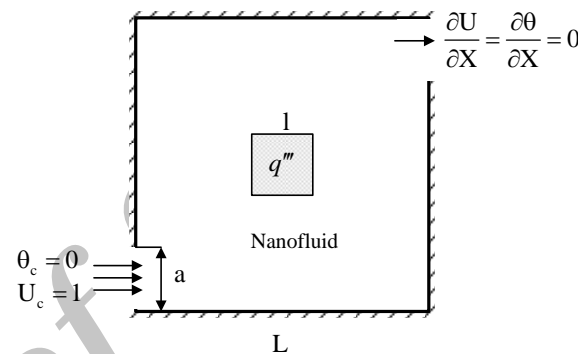
خواص نانوسیال شامل لزجت [۱۲]، ضریب هدایت حرارتی [۱۳]، چگالی، ظرفیت گرمایی، ضریب انبساط حجمی و ضریب پخش با استفاده از روابط (۱۳) تا (۲۰) محاسبه می شوند.

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 - \phi)^{-2.5} \quad (13)$$

$$k_{nf} = \left[\frac{k_p + 2k_f - 2\phi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \phi(k_f - k_p)} \right] k_f$$

$$+ 5 \times 10^4 \beta \phi (\rho C_p)_f \sqrt{\frac{\kappa_b T}{\rho_f d_p}} f(T, \phi) \quad (14)$$

هدف از این بررسی پیش بینی اثر پارامترهایی مانند اعداد ریچاردسون و رینولدز بر میدان جریان و نرخ انتقال حرارت است. لذا در این تحقیق با استفاده از حل عددی به روش حجم کنترل، ابتدا میدان های جریان و دما درون محفظه به دست آمده و به کمک آن عدد نوسلت متوسط، پروفیل های سرعت عمودی و همچنین پروفیل دمای بی بعد در مقاطع خاصی از محفظه محاسبه شده است. لازم به ذکر است که رژیم جریان آرام فرض شده است.



شکل (۱): هندسه مسئله.

۳- معادلات اساسی حاکم بر جریان

معادلات حاکم برای جریان آرام، دوبعدی، با فرض سیال نیوتنی غیرقابل تراکم و با استفاده از تقریب بوزینسکی به صورت روابط (۱) تا (۵) می باشند.

معادله پیوستگی:

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

معادلات مومنتم X و Y :

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

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{\rho_{nf}} \left[-\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + (\rho\beta)_{nf} g (T - T_i) \right] \quad (3)$$

معادله انرژی

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

معادله انرژی درون منبع حرارتی

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q''' = 0 \quad (5)$$

جدول (۱): خواص آب و ذرات آلومینیوم اکسید [۱۴].

خواص فیزیکی	ذرات آلومینیوم اکسید	آب خالص
$\rho (\text{kgm}^{-3})$	۳۹۷۰	۹۹۷/۱
$C_p (\text{Jkg}^{-1})$	۷۶۵	۴۱۷۹
$K (\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1})$	۴۰	۰/۶۱۳
$\beta \times 10^{+5} (\text{K}^{-1})$	۰/۸۵	۲۱
Pr	-	۷/۱
$\mu (\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1})$	-	۰/۰۰۱۰۰۳

۴- شرایط مرزی

برای به دست آوردن جواب یگانه یک معادله دیفرانسیل پاره‌ای به مجموعه‌ای از شرایط مکمل نیاز است تا توابع اختیاری حاصل از انتگرال‌گیری معادله دیفرانسیل پاره‌ای را معین کرد.

شرایط مرزی روی دیوارهای محفظه مطابق رابطه (۲۴) می‌باشند.

$$\begin{aligned}
 X=0, \quad 0 \leq Y \leq A & \quad U = \theta = 1, \quad V = 0 \\
 X=0, \quad A < Y \leq 1 & \quad U = V = \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0 \\
 Y=0, 1, \quad 0 \leq X \leq 1 & \quad U = V = \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \\
 X=1, \quad 0 \leq Y < 1-A & \quad U = V = \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0 \\
 X=1, \quad 1-A \leq Y \leq 1 & \quad \frac{\partial U}{\partial X} = \frac{\partial \theta}{\partial X} = V = 0 \quad (24)
 \end{aligned}$$

شرایط مرزی روی سطوح منبع حرارتی مطابق رابطه (۲۵) می‌باشند.

$$\begin{aligned}
 U = V = 0 \\
 \theta_{nf} = \theta_s \\
 k_{nf} \left(\frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_{nf} = k_s \left(\frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_s \quad (25)
 \end{aligned}$$

۵- روش عددی

معادلات بدون بعد (۸) تا (۱۲) به همراه شرایط مرزی ارائه شده در روابط (۲۴) و (۲۵) به روش اختلاف محدود مبتنی بر حجم کنترل جبری شدند. معادلات مومنتم روی شبکه جایجا شده حل می‌شوند. در روش شبکه جایجا شده علاوه بر راحتی محاسبه دبی‌ها روی وجوه حجم کنترل به علت معلوم بودن

در رابطه (۱۴)، تابع $f(T, \phi)$ و پارامتر β به ترتیب از روابط (۱۵) و (۱۶) حساب می‌شوند.

$$f(T, \phi) = \left(2.82 \times 10^{-2} \phi + 3.92 \times 10^{-3} \right) \frac{T}{T_0} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 & + \left(-3.06 \times 10^{-2} \phi - 3.91 \times 10^{-3} \right) \\
 & \beta = 8.44 (100\phi)^{-1.073} \quad (16)
 \end{aligned}$$

در رابطه (۱۴)، ثابت بولتزمن است که مقدار آن برابر $1.3807 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ است.

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (17)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p \quad (18)$$

$$(\rho\beta)_{nf} = (1-\phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_p \quad (19)$$

$$\alpha_{nf} = k_{nf} / (\rho C_p)_{nf} \quad (20)$$

در روابط (۱۳) تا (۲۰) زیر نویس nf، f و p به ترتیب اشاره به خواص نانوسیال، آب و نانوذرات اکسید آلومینیوم دارد. خواص آب و نانوذرات اکسید آلومینیوم در جدول ۱ آورده شده است.

میزان انتقال حرارت در قالب عدد نوسلت قابل بیان است. با استفاده از پارامترهای بی‌بعد، نوسلت موضعی روی سطوح افقی و عمودی منبع حرارتی به ترتیب با استفاده از روابط (۲۱) و (۲۲) حساب می‌شود.

$$Nu = - \left(\frac{k_{nf}}{k_f} \right) \frac{1}{\theta_s} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \quad (21)$$

$$Nu = - \left(\frac{k_{nf}}{k_f} \right) \frac{1}{\theta_s} \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (22)$$

می‌توان با انتگرال‌گیری از روابط (۲۱) و (۲۲) روی سطوح منبع حرارتی، نوسلت متوسط روی هر سطح منبع حرارتی را به دست آورد. رابطه (۲۳) عدد نوسلت متوسط روی سطح پایینی منبع حرارتی را بیان می‌کند.

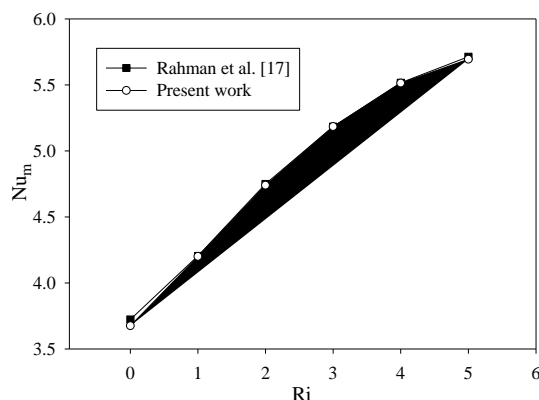
$$Nu_{m,B} = \frac{1}{AR} \int_0^{AR} - \left(\frac{k_{nf}}{k_f} \right) \frac{1}{\theta_s} \frac{\partial \theta}{\partial Y} dX \quad (23)$$

نوسلت متوسط کلی از میانگین‌گیری نوسلت‌های متوسط روی چهار سطح منبع حرارتی به دست می‌آید.

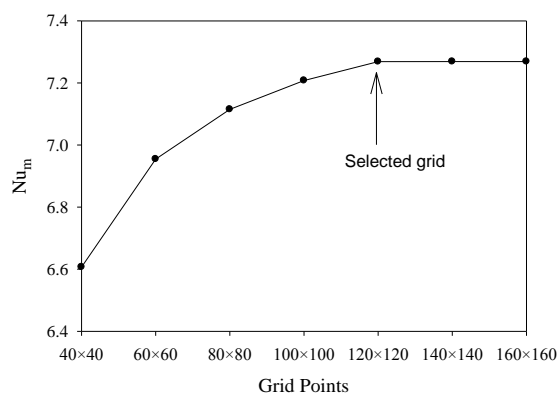
راست آن در دمایی بالا تر از دمای هوای ورودی قرار گرفته است. شکل ۲ مقایسه نتایج مرجع [۱۷] و نتایج گرفته شده از برنامه کامپیوتری حاضر را نشان می‌دهد. در این نمودار مقدار عدد نوسلت متوسط به‌ازای مقادیر مختلف عدد ریچاردسون روی دیوار گرم سمت راست آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود برای هر دو حالت جابجایی طبیعی و جابجایی ترکیبی برنامه کامپیوتری نتایج قابل قبولی را ارائه می‌کند.

برای انتخاب شبکه مناسب به گونه‌ای که حل عددی مستقل از تعداد نقاط شبکه باشد، مسئله حاضر برای چند شبکه با تعداد نقاط متفاوت حل شد.

در شکل ۳ تغییرات عدد نوسلت متوسط بر حسب تعداد نقاط شبکه برای $AR=0.6$ ، $Re=100$ ، $Ri=1.0$ ، $k=10$ و $\phi=0.03$ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۳ و بررسی‌هایی که بر روی تاثیرپذیری پارامترهای دیگر از تعداد نقاط شبکه صورت گرفت، شبکه یکنواخت با تعداد نقاط 120×120 برای حل مسئله انتخاب شد.



شکل (۲): اعتبارسنجی مطالعه حاضر در مقایسه با مرجع [۱۷]



شکل (۳): تأثیر تعداد نقاط شبکه روی مقادیر نوسلت متوسط

سرعت روی سطوح، مقادیر فشار در نقاط اصلی شبکه مشخص می‌شود. برای حل هم زمان معادلات جبری شده از الگوریتم سیمپل که جزئیات کامل آن در مرجع [۱۵] آمده است، استفاده شده است. معیار همگرایی، باقیمانده سرعت‌ها در نظر گرفته شده است که در هر مرحله کوچکتر از 10^{-6} می‌باشد.

۶- بررسی صحت کد نوشته شده

برای اجرای الگوریتم مورد نظر برنامه‌ای کامپیوتری به زبان فرترن نوشته شد. برای اطمینان از درستی روش عددی و برنامه نوشته شده، نتایج عددی حاصل از آن با کارهای مشابه انجام گرفته توسط دیگران مقایسه شد.

ابتدا مطابق مرجع [۱۶] یک محفظه‌ی مربعی پر شده از هوا در نظر گرفته شد. دیوارهای افقی محفظه از نظر حرارتی عایق در نظر گرفته شدند در حالی که دیوارهای چپ و راست محفظه، دما ثابت و به ترتیب گرم و سرد بودند. بر اثر اختلاف دمای دیوارهای عمودی در درون محفظه جابجایی طبیعی برقرار می‌شود. جدول ۲ نتایج حاصل از اجرای برنامه کامپیوتری حاضر را با نتایج ارائه شده در مرجع [۱۶] مقایسه می‌کند.

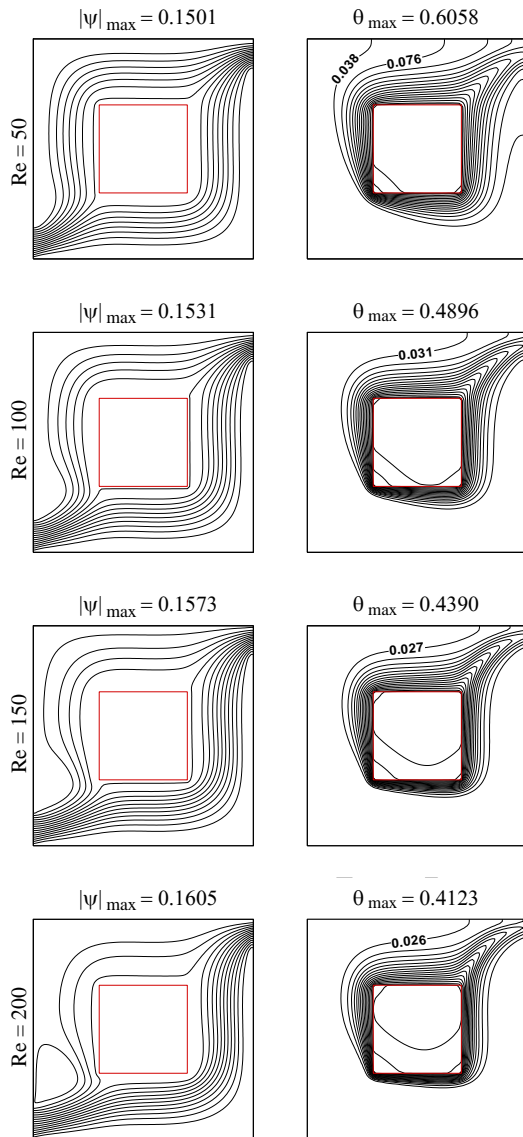
جدول (۲): مقایسه عدد نوسلت متوسط دیوار گرم با نتایج ارائه شده در مرجع [۱۶].

عدد رایلی	Nu_m کار حاضر	Nu_m مرجع [۱۶]
$Ra = 10^3$	۱/۱۱۵	۱/۱۱۸
$Ra = 10^4$	۲/۲۲۵	۲/۲۴۳
$Ra = 10^5$	۴/۵۲۳	۴/۵۱۹
$Ra = 10^6$	۸/۸۱۳	۸/۷۱۹

همچنین، برای بررسی عملکرد برنامه کامپیوتری در مسائل انتقال حرارت جابجایی ترکیبی آزاد و اجباری در محفظه‌ها، مقایسه‌ای در مورد جریان نانوسیال در یک محفظه باز مطابق با مرجع [۱۷] انجام گرفت. در این بررسی یک محفظه مربعی که دارای یک مجرای ورودی در گوشه پایین و سمت چپ و یک مجرای خروجی در گوشه بالایی و سمت راست است، در نظر گرفته شد. هوا با دمای یکنواخت T_i به داخل محفظه جریان می‌یابد و با فرض توسعه یافته از آن خارج می‌شود. یک جسم جامد بدون تولید انرژی در مرکز محفظه قرار دارد. دیوارهای افقی و دیوار سمت چپ محفظه عایق شده‌اند و دیوار سمت

۷- نتایج

با افزایش عدد رینولدز، به دلیل افزایش نیروی شناوری و ایجاد گردابه در سمت چپ منبع حرارتی، سیال کمتری از این قسمت عبور می‌کند و سرعت سیال در ناحیه بالای منبع حرارتی کاهش پیدا می‌کند.



شکل (۴): خطوط جریان (چپ) و خطوط هم دما (راست) به ازای اعداد رینولدز مختلف

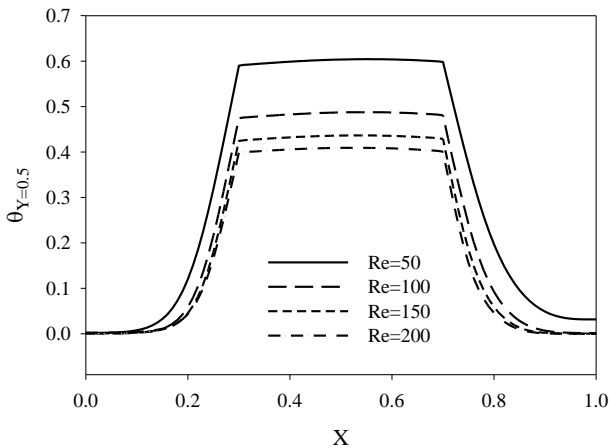
در شکل ۶ پروفیل مؤلفه عمودی سرعت بی‌بعد سیال روی محور افقی در $Y = 0.5$ به ازای اعداد رینولدز متفاوت نشان داده شده است. در $Re = 50$ جریان تقریباً به نسبت یکسان از هر دو طرف منبع حرارتی عبور می‌کند. با افزایش عدد رینولدز، به دلیل افزایش نیروی اینرسی، درصد بیشتری از دبی جریان ورودی از قسمت زیر و سمت راست منبع حرارتی عبور می‌کند.

پس از انتخاب شبکه مناسب و اطمینان از درستی کد نوشته شده، اثر تغییر پارامترهایی چون عدد رینولدز، عدد ریچاردسون، نسبت ابعادی، ضریب هدایت حرارتی و درصد حجمی نانوذرات بر روی میدان‌های جریان و دما و نرخ انتقال حرارت بررسی شده است. تمام نتایج برای حالتی است که منبع حرارتی و محفظه به صورت هم مرکز باشند.

۷-۱- اثر عدد رینولدز

در این بخش $AR = 0.4$ ، $k = 10$ ، $Ri = 0.5$ و $\phi = 0.03$ در نظر گرفته شده‌اند و اثر تغییر عدد رینولدز در بازه‌ی $50 \leq Re \leq 200$ بر روی میدان‌های جریان و دما و نرخ انتقال حرارت بررسی شده است. خطوط جریان و خطوط هم‌دما در این حالت‌ها برای اعداد رینولدز مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به خطوط جریان، دیده می‌شود که در اعداد رینولدز پایین، خطوط جریان به صورت منظم در داخل محفظه گسترش پیدا کرده‌اند. با توجه به این‌که برای ثابت ماندن عدد ریچاردسون، متناسب با Re^2 عدد گراشوف نیز باید افزایش یابد بنابراین در این بخش، با افزایش عدد رینولدز قدرت جایجایی اجباری و طبیعی هر دو افزایش می‌یابند و جریان ورودی که بر اثر افزایش رینولدز دارای اینرسی زیادی است تمایل دارد که از مسیری هموارتر به مقطع خروجی برسد. از این رو درصد بیشتری از جریان ورودی از زیر منبع گرم عبور می‌کند. با افزایش عدد رینولدز، نیروی شناوری نیز افزایش می‌یابد و به دلیل افزایش نیروی شناوری یک گردابه پاد ساعت گرد در فضای بین منبع حرارتی و دیوار سمت چپ محفظه تشکیل می‌شود. با توجه به خطوط هم‌دما، دیده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز، قدرت خنک‌کنندگی جریان نانوسیال بیشتر می‌شود و دمای بیشینه‌ی منبع حرارتی کاهش می‌یابد. هم‌چنین تراکم خطوط هم‌دما در اطراف منبع حرارتی بیشتر می‌شود.

در شکل ۵ پروفیل مؤلفه افقی سرعت بی‌بعد سیال روی محور مرکزی عمودی $X = 0.5$ به ازای اعداد رینولدز متفاوت رسم شده است. با افزایش عدد رینولدز، نیروی اینرسی سیال ورودی افزایش می‌یابد. از این رو جریان برای حرکت به سمت مقطع خروجی راحت‌ترین مسیر را انتخاب می‌کند و درصد زیادی از آن با سرعت بالاتری از زیر منبع حرارتی عبور می‌کند.



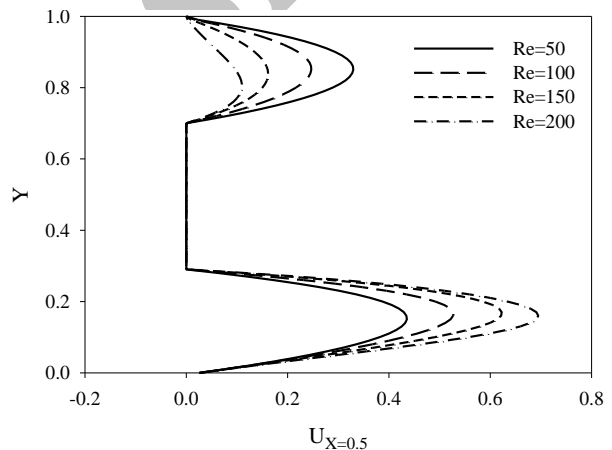
شکل (۷): پروفیل دمای بی‌بعد روی محور افقی مرکزی به‌ازای اعداد رینولدز مختلف.

در شکل ۸ مقدار نرخ انتقال حرارت بر واحد سطح در قالب عدد نوسلت متوسط روی سطوح منبع حرارتی، به‌ازای تغییر عدد رینولدز در نسبت‌های ابعادی متفاوت، آورده شده است. با افزایش عدد رینولدز و همچنین افزایش نسبت ابعادی، سرعت جریان سیال در اطراف منبع حرارتی بیشتر می‌شود و قدرت خنک‌کنندگی جریان نانوسیال افزایش می‌یابد. بنابراین، افزایش عدد رینولدز میزان انتقال حرارت را زیاد می‌کند.

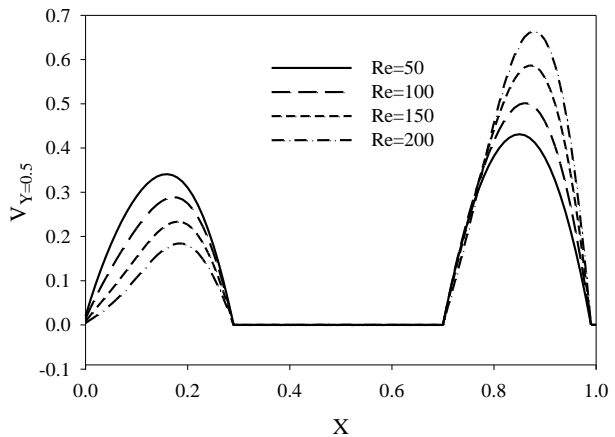
در $AR = 0.2$ ، با توجه به این‌که اندازه منبع حرارتی کوچک است در اعداد رینولدز پائین نانوسیال از اطراف آن عبور می‌کند و با افزایش عدد رینولدز ابتدا به‌دلیل افزایش سرعت جریان در مجاورت هر چهار سطح منبع حرارتی، عدد نوسلت متوسط افزایش می‌یابد. در این حالت وقتی عدد رینولدز از یک مقداری (تقریباً $Re=150$) بیشتر شود، به‌دلیل افزایش اینرسی، جریان تمایل دارد که از زیر منبع حرارتی عبور کند و سهم سطوح سمت چپ و بالای منبع حرارتی در انتقال حرارت کمتر می‌شود و از اینجا به بعد با افزایش عدد رینولدز، عدد نوسلت متوسط کاهش می‌یابد. برای $AR=0.4, 0.6$ به‌دلیل بزرگتر شدن اندازه منبع حرارتی در اعداد رینولدز پائین نیز غالب جریان از زیر منبع حرارتی عبور می‌کند، بنابراین، با افزایش عدد رینولدز و در نتیجه افزایش سرعت جریان، عدد نوسلت متوسط کاملاً یک روند افزایشی دارد.

بنابراین، سرعت جریان در سمت چپ منبع حرارتی کاهش و در سمت راست منبع حرارتی افزایش می‌یابد. همچنین در رینولدزهای بالا، به دلیل تشکیل گردابه، گرادیان سرعت در ناحیه سمت چپ منبع حرارتی در همسایگی دیوار محفظه کم می‌شود.

در شکل ۷ پروفیل دمای بی‌بعد روی محور افقی مرکزی در $Y = 0.5$ نشان داده شده است. با افزایش عدد رینولدز و به تبع آن افزایش عدد گراشهف، قدرت خنک‌کنندگی جریان افزایش می‌یابد و بنابراین، دمای منبع حرارتی کاهش می‌یابد. با توجه به این‌که ضریب هدایت حرارتی منبع حرارتی نسبتاً خیلی بزرگتر از ضریب هدایت حرارتی نانوسیال است، توزیع دما در عرض منبع حرارتی تقریباً یکنواخت است.



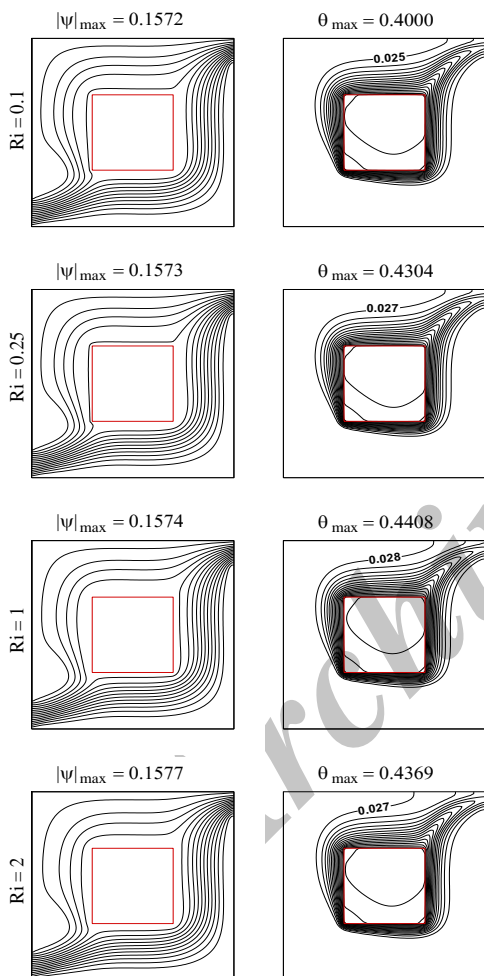
شکل (۵): تغییرات مؤلفه افقی سرعت بی‌بعد روی محور عمودی مرکزی به‌ازای اعداد رینولدز متفاوت.



شکل (۶): تغییرات مؤلفه عمودی سرعت بی‌بعد روی محور افقی مرکزی به‌ازای اعداد رینولدز متفاوت.

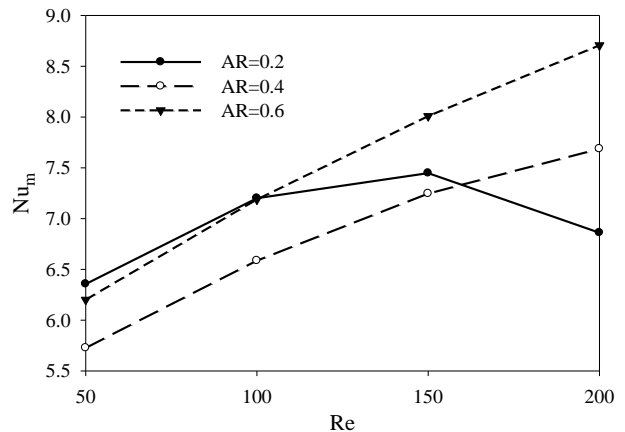
که ابتدا با افزایش عدد ریچاردسون ماکزیمم دمای منبع حرارتی افزایش یابد و سپس شروع به کاهش نماید.

در شکل ۱۰ پروفیل مؤلفه افقی سرعت بی‌بعد سیال روی محور مرکزی در $X = 0.5$ به‌ازای اعداد ریچاردسون مختلف رسم شده است. با توجه به توضیحات ارائه‌شده برای خطوط جریان (شکل ۹)، با افزایش عدد ریچاردسون سرعت جریان در زیر منبع حرارتی افزایش و در بالای منبع حرارتی کاهش یافته است.



شکل (۹): خطوط هم‌دما (راست) و خطوط جریان (چپ) به‌ازای اعداد ریچاردسون مختلف

در شکل ۱۱، پروفیل مؤلفه عمودی سرعت در $Y = 0.5$ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۱ اختلاف سرعت در سمت چپ و راست منبع حرارتی دیده می‌شود. با توجه به تقویت نیروی شناوری و تشکیل گردابه در سمت چپ منبع حرارتی در اعداد ریچاردسون بالا، کاهش مؤلفه عمودی سرعت



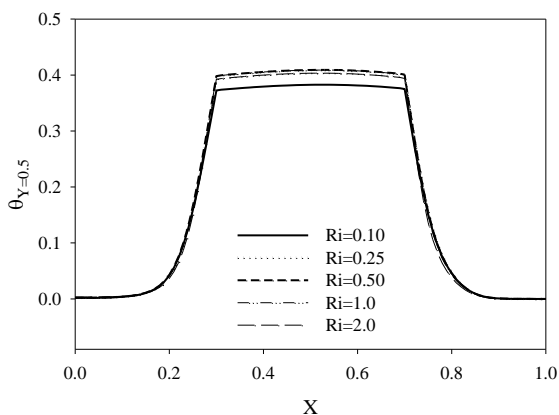
شکل (۸): تأثیر عدد رینولدز بر روی عدد نوسلت متوسط در نسبت‌های ابعادی مختلف

۷-۲- اثر عدد ریچاردسون

در این بخش با ثابت گرفتن عدد رینولدز، نسبت ابعادی، نسبت ضریب هدایت حرارتی و درصد حجمی نانوذرات ($Ri = 150, \bar{k} = 10, AR = 0.4$ و $\phi = 0.03$) اثر عدد ریچاردسون بر روی میدان‌های جریان و دما و نرخ انتقال حرارت بررسی می‌شود.

در شکل ۹، خطوط جریان و خطوط هم‌دما برای مقادیر مختلف عدد ریچاردسون نشان داده شده است. به‌ازای یک مقدار ثابت برای عدد رینولدز، افزایش عدد ریچاردسون ناشی از افزایش قدرت جابجایی طبیعی و نیروی شناوری است. با توجه به اینکه در این حالت به دلیل بالا بودن عدد رینولدز درصد کمتری از دبی جریان ورودی به محفظه از سمت چپ منبع حرارتی عبور می‌کند، با افزایش عدد ریچاردسون، شرایط تشکیل گردابه پاد ساعت‌گرد در سمت چپ منبع حرارتی مهیا می‌شود. تشکیل گردابه در سمت چپ منبع حرارتی نیز سبب می‌شود که دبی خالص کمتری از سمت چپ منبع حرارتی عبور کند. با توجه به شکل ۹ دیده می‌شود که با افزایش عدد ریچاردسون، ماکزیمم تابع جریان اندکی افزایش می‌یابد. با توجه به این‌که در این حالت افزایش عدد ریچاردسون تنها به دلیل افزایش عدد گراش‌هف است و افزایش عدد گراش‌هف نیز به دلیل افزایش نرخ تولید حرارت در منبع گرمازا رخ می‌دهد، بنابراین، با افزایش عدد ریچاردسون از یک طرف دمای منبع حرارتی افزایش می‌یابد و از طرف دیگر به دلیل افزایش قدرت جابجایی طبیعی، نرخ انتقال حرارت به نانوسیال اطراف منبع حرارتی نیز افزایش می‌یابد. وقوع این دو پدیده سبب می‌شود

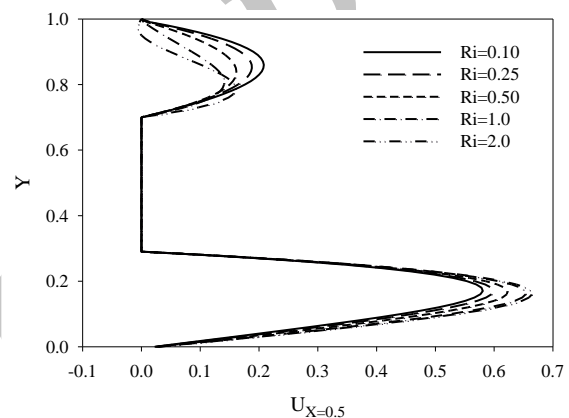
نانوسیال ثابت فرض شده‌اند، افزایش عدد گراشهف ناشی از افزایش نرخ تولید حرارت در منبع حرارتی است. بنابراین با افزایش عدد ریچاردسون، اولاً به دلیل افزایش نیروی شناوری قدرت جابجایی افزایش می‌یابد ولی در عین حال به دلیل افزایش نرخ تولید انرژی بر واحد حجم منبع حرارتی، دمای منبع حرارتی نیز اندکی افزایش می‌یابد. البته با افزایش عدد ریچاردسون شرایط برای تشکیل گردابه در سمت چپ منبع حرارتی نیز مهیاتر می‌شود که این خود نیز باعث کاهش انتقال حرارت از سطوح بالای و سمت چپ منبع حرارتی می‌شود.



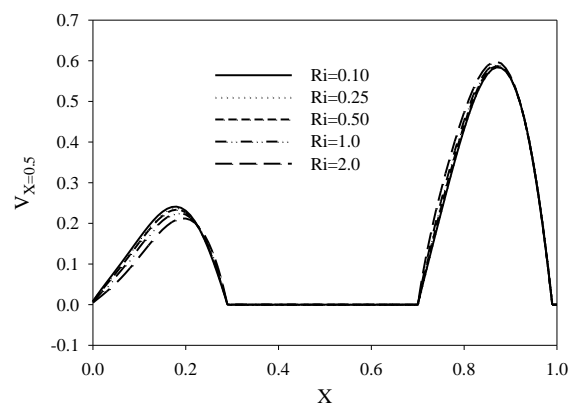
شکل (۱۲): پروفیل دمای بی‌بعد روی محور افقی مرکزی به‌ازای اعداد ریچاردسون مختلف

در شکل ۱۳ تغییرات عدد نوسلت متوسط به‌ازای تغییرات عدد ریچاردسون در اعداد رینولدز مختلف نشان داده شده‌است. در یک مقدار ثابت برای عدد ریچاردسون، افزایش عدد رینولدز همراه با افزایش عدد گراشهف می‌باشد. به عبارت دیگر چنانچه عدد ریچاردسون ثابت نگه‌داشته شود و عدد رینولدز افزایش داده شود، به‌طور هم‌زمان جابجایی اجباری و طبیعی تقویت می‌شوند. بنابراین، با افزایش عدد رینولدز در یک عدد ریچاردسون ثابت، عدد نوسلت متوسط به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، افزایش عدد ریچاردسون در یک عدد رینولدز ثابت، تنها ناشی از افزایش عدد گراشهف است. با توجه به ثابت بودن خواص ترموفیزیکی نانوسیال، افزایش عدد گراشهف به دلیل افزایش نرخ تولید انرژی در منبع حرارتی است. بنابراین، با افزایش عدد گراشهف از یک طرف دمای منبع حرارتی افزایش می‌یابد که این باعث کاهش عدد نوسلت متوسط می‌شود، از طرف دیگر نیروی شناوری افزایش می‌یابد که این باعث افزایش نرخ انتقال حرارت و عدد نوسلت متوسط می‌شود. بنابراین، با افزایش عدد ریچاردسون به دلیل وقوع دو

در نزدیکی دیوار سمت راست محفظه مشاهده می‌شود. با مقایسه شکل‌های ۱۰ و ۱۱، دیده می‌شود که با افزایش عدد ریچاردسون، پروفیل مولفه افقی سرعت در بالای منبع حرارتی نسبت به پروفیل مولفه عمودی سرعت در سمت چپ منبع حرارتی، بیشتر تحت تاثیر قرار می‌گیرد. این موضوع به آن دلیل است که با افزایش عدد ریچاردسون و تشکیل گردابه در سمت چپ منبع حرارتی، این گردابه سبب می‌شود که جریان کمتری از بالای منبع حرارتی عبور کند و بنابراین، پروفیل سرعت در بالای منبع حرارتی به‌طور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر افزایش عدد ریچاردسون قرار می‌گیرد.



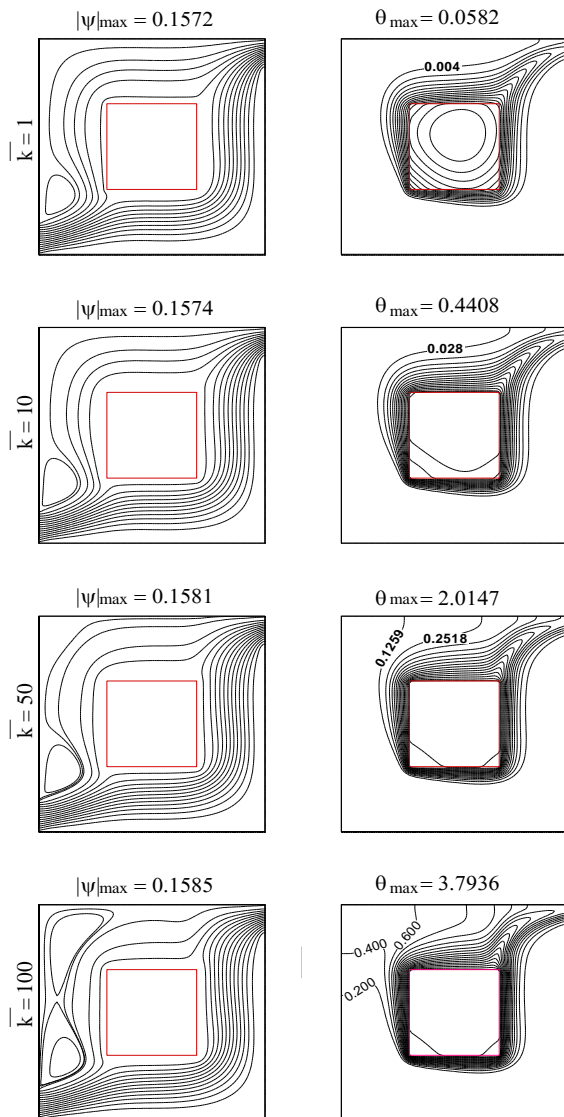
شکل (۱۰): تغییرات مؤلفه افقی سرعت بی‌بعد سیال روی محور عمودی مرکزی به‌ازای اعداد ریچاردسون مختلف



شکل (۱۱): تغییرات مؤلفه عمودی سرعت بی‌بعد سیال روی محور افقی مرکزی به‌ازای اعداد ریچاردسون مختلف.

در شکل ۱۲ تغییرات دمای بی‌بعد روی محور مرکزی افقی (Y = 0/5) نشان داده شده‌است. با توجه به این که در این بخش عدد رینولدز ثابت است، افزایش عدد ریچاردسون به دلیل افزایش عدد گراشهف است. از آنجایی که خواص

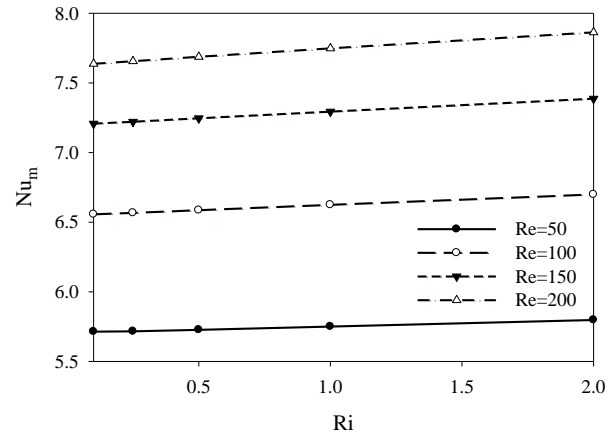
شدن نسبت ضریب هدایت حرارتی نتیجه افزایش دمای منبع حرارتی و انتقال حرارت بهتر به نانوسیال است. همچنین با توجه به شکل ۱۴ دیده می‌شود که برای مقادیر کوچک \bar{k} ، در داخل منبع حرارتی گرادیان دما وجود دارد و با افزایش مقدار \bar{k} گرادیان دما در داخل منبع حرارتی ناچیز می‌شود.



شکل (۱۴): خطوط جریان (چپ) و خطوط دما (راست) به‌ازای ضریب هدایت حرارتی مختلف.

در شکل ۱۵ پروفیل دمای بی‌بعد روی محور افقی مرکزی ($Y = 0.5$) به‌ازای مقادیر مختلف نسبت ضریب هدایت حرارتی نشان داده شده است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد چنانچه اعداد رینولدز و ریچاردسون ثابت باشند، افزایش ضریب هدایت حرارتی منبع حرارتی با افزایش نرخ تولید انرژی در واحد حجم

پدیده که یکی عدد نوسلت متوسط را افزایش و دیگری آن را کاهش می‌دهد، عدد نوسلت متوسط با شیب ملایمی افزایش می‌یابد.



شکل (۱۳): تأثیر عدد ریچاردسون بر عدد نوسلت متوسط در اعداد رینولدز مختلف.

۷-۳- اثر نسبت ضریب هدایت حرارتی

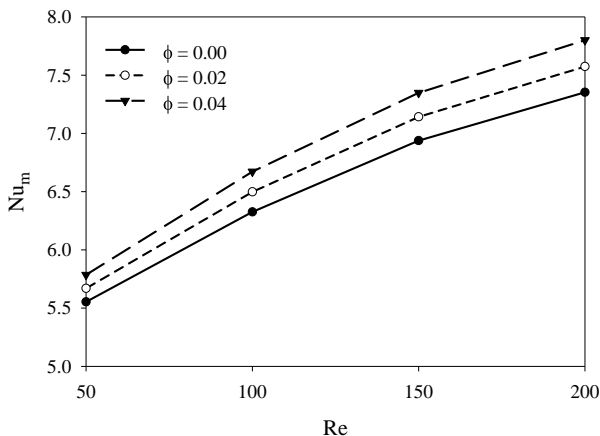
در این بخش اثر تغییر نسبت ضریب هدایت حرارتی در بازه‌ی $(1 \leq \bar{k} \leq 100)$ بر روی خطوط جریان و هم‌دما، توزیع دما و عدد نوسلت متوسط، بررسی شده است. برای این منظور پارامترهای دیگر ثابت فرض شده‌اند به طوری که مقدار آن‌ها برابر با $AR = 0.4$ ، $Re = 150$ ، $Ri = 1.0$ و $\phi = 0.0$ است.

خطوط جریان و خطوط هم‌دما برای مقادیر مختلف نسبت ضریب هدایت حرارتی در شکل ۱۴ نشان داده شده‌است. با توجه به این‌که در این بخش عدد رینولدز نسبتاً بزرگ است و درصد زیادی از دبی ورودی به محفظه، از قسمت زیر منبع حرارتی عبور می‌کند، شرایط برای تشکیل گردابه در سمت چپ منبع حرارتی مهیا است. با دقت در معادله انرژی مربوط به منبع حرارتی و روابطی که عدد گراشلف و پارامترهای بی‌بعد را تعریف می‌کنند، پیداست که چنانچه اعداد رینولدز و ریچاردسون ثابت باشند و ضریب هدایت حرارتی منبع حرارتی افزایش یابد، این افزایش همراه با افزایش نرخ تولید انرژی در واحد حجم منبع حرارتی است. بنابراین با افزایش نسبت ضریب هدایت حرارتی، اولاً نرخ تولید انرژی و به تبع آن دمای منبع حرارتی افزایش می‌یابد و دوماً انتقال حرارت از منبع حرارتی به نانوسیال اطراف آن بهتر صورت می‌گیرد و جایجایی طبیعی بهتر صورت می‌گیرد. افزایش قدرت گردابه تشکیل شده با زیاد

متوسط می‌شود. بنابراین، تغییرات عدد نوسلت متوسط با نسبت ابعادی با این توضیحات قابل توجیه است

۷-۴- اثر درصد حجمی نانو ذرات

در این بخش $AR = 0.4$ ، $Ri = 0.5$ و $\bar{k} = 1.0$ در نظر گرفته شده است و اثر تغییر کسر حجمی در بازه $0 \leq \phi \leq 0.04$ بر روی عملکرد حرارتی محفظه بررسی می‌شود. شکل ۱۷ تغییرات عدد نوسلت متوسط را برحسب عدد رینولدز در کسر حجمی‌های متفاوت نانو ذرات نشان می‌دهد. با افزایش عدد رینولدز، دمای منبع حرارتی کاهش می‌یابد و نرخ انتقال حرارت زیاد می‌شود. همچنین با افزایش درصد حجمی نانو ذرات به دلیل افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال، دمای منبع حرارتی کاهش می‌یابد و بنابراین، عدد نوسلت افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۱۷ دیده می‌شود که افزایش عدد نوسلت ناشی از افزایش درصد حجمی نانو ذرات در اعداد رینولدز بالاتر چشمگیرتر است. این ناشی از آن است که در اعداد رینولدز بالاتر، گرادیان دما در اطراف منبع حرارتی افزایش می‌یابد و با توجه به تعریف عدد نوسلت که به حاصل ضرب گرادیان دما در ضریب هدایت حرارتی وابسته است، بنابراین، افزایش عدد نوسلت ناشی از افزایش کسر حجمی نانو ذرات در اعداد رینولدز بالاتر، بیشتر است.

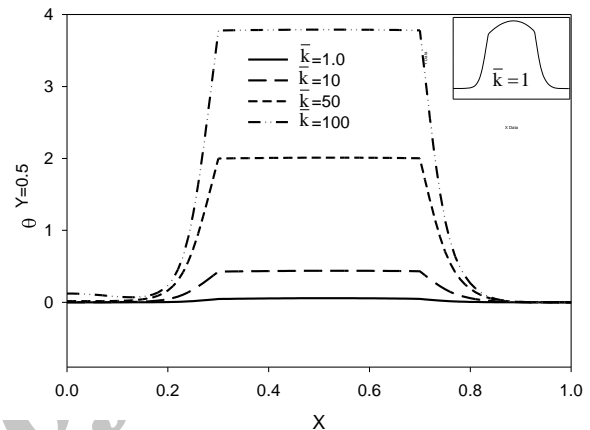


شکل (۱۷): تغییرات عدد نوسلت متوسط برحسب عدد رینولدز به ازای کسرهای حجمی مختلف نانو ذرات.

۸- نتیجه گیری

در این مقاله جریان جابجایی ترکیبی نانوسیال در یک محفظه مربعی به همراه منبع حرارتی در مرکز محفظه، به روش عددی بررسی شد. نتایج حاصل از مطالعات انجام شده به صورت ذیل قابل جمع بندی است:

منبع حرارتی امکان پذیر است. بنابراین، با افزایش نسبت ضریب هدایت حرارتی، از یک طرف دمای منبع حرارتی افزایش می‌یابد و از طرف دیگر پخش حرارت در منبع حرارتی بهتر صورت می‌گیرد و حرارت بیشتری به نانوسیال منتقل می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۵ دیده می‌شود، برای مقادیر کوچک \bar{k} ، در داخل منبع حرارتی گرادیان دما وجود دارد و با افزایش \bar{k} گرادیان دما در داخل منبع حرارتی از بین می‌رود و دما در سرتاسر منبع حرارتی یکنواخت می‌شود.



شکل (۱۵): تغییرات دمای بی‌بعد روی محور افقی مرکزی به ازای ضرایب هدایت حرارتی مختلف.

در شکل ۱۶ مقدار عدد نوسلت متوسط بر روی اضلاع منبع حرارتی به ازای تغییرات نسبت ابعادی برای مقادیر مختلف نسبت ضریب هدایت حرارتی نشان داده شده است. با افزایش ضریب هدایت حرارتی، به دلیل افزایش نرخ تولید انرژی و انتقال حرارت بهتر از منبع حرارتی به نانوسیال اطراف آن، عدد نوسلت متوسط به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

شکل ۱۶ نشان می‌دهد که عدد نوسلت متوسط خیلی تحت تاثیر تغییرات نسبت ابعادی قرار نمی‌گیرد به طوری که با تغییر نسبت ابعادی از ۰/۲ به ۰/۴ عدد نوسلت متوسط با شیب ملایمی کاهش می‌یابد و سپس با همان شیب کم افزایش می‌یابد. افزایش نسبت ابعادی سبب افزایش تولید انرژی به دلیل افزایش حجم می‌شود. بنابراین با افزایش نسبت ابعادی دمای منبع حرارتی افزایش می‌یابد و طبق تعریف، عدد نوسلت متوسط کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، افزایش نسبت ابعادی باعث می‌شود که جریان با سرعت بیشتری از اطراف منبع حرارتی عبور کند. افزایش سرعت جریان سبب افزایش گرادیان دما در مجاورت سطوح منبع حرارتی و افزایش عدد نوسلت

به‌ازای ($Re = 200$)، افزایش چهار درصدی کسر حجمی نانوذرات سبب ۶٪ افزایش عدد نوسلت متوسط شده است.

۹- مراجع

1. Mahmoudi, Gh. and Ghasemi, B. "Effect of Baffle on Mixed Convection Heat Transfer from an Open Cavity with Heat Sources", *Aerospace Mechanics Journal*, Vol. 8, No. 2, pp. 45-56, 2012 (In Persian).
2. Mahmoudi, A.H., Shahi, M., Honarbakhsh Raouf, A., and Ghasemian, A. "Numerical Study of Natural Convection Cooling of Horizontal Heat Source Mounted in a Square Cavity Filled with Nanofluid", *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, No. 8, pp. 1135-1141, 2010.
3. Hemmat Esfe, M., Ghadak, F., Haghiri, A., and Mir-Talebi S.S. "Numerical Study of Mixed Convection Flows in a Two-sided Inclined Lid-driven Cavity, Utilizing Nano-fluid with Various Inclination Angles and Non-uniform Temperature", *Aerospace Mechanics Journal*, Vol. 8, No. 2, pp. 69-83, 2012 (In Persian).
4. Kalteh, M., Javaherdeh, K., and Azarbarzin, T. "Numerical Solution of NanoFluid Mixed Convection Heat Transfer in a Lid-driven Square Cavity with a Triangular Heat Source", *Powder Tech.*, Vol. 253, No. 1, pp. 780-788, 2014.
5. Ghasemi, B. and Aminossadati, S.M. "A Numerical Study of Mixed Convection in a Horizontal Channel with a Discrete Heat Source in an Open Cavity", *Eur. J. Mech., B-Fluids*, Vol. 28, No. 4, pp. 590-598, 2009.
6. Roy, M., Roy, S., and Basak, T. "Analysis of Entropy Generation on Mixed Convection in Square Enclosures for Various Horizontal or Vertical Moving Wall(s)", *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, Vol. 68, No. 1, pp. 258-266, 2015.
7. Hasib, M.H., Hossein, M.S., and Saha, S. "Effect of Tilt Angle on Pure Mixed Convection Flow in Trapezoidal Cavities Filled with Water-Al₂O₃ Nanofluid", *Procedia Engineering*, Vol. 105, No. 1, pp. 388 - 397, 2015.
8. Uddin, M.B., Rahman, M.M., Khan, M.A.H., Saidur, R., and Ibrahim, T.A. "Hydromagnetic Double-Diffusive Mixed Convection in Trapezoidal Enclosure Due to Uniform and Non-uniform Heating at the Bottom Side: Effect of Lewis Number", *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 55, No. 2, pp. 1165-1176, 2016.
9. Hajjaligol, N., Fattahi, A., Ahmadi, M.H., Qomi, M.E., and Kakoli, E. "MHD Mixed Convection

- در عدد ریچاردسون ثابت، با افزایش عدد رینولدز قدرت جابجایی اجباری و طبیعی هر دو افزایش پیدا می‌کنند و به دلیل افزایش اینرسی، جریان ورودی تمایل دارد از مسیری هموارتر به مقطع خروجی برسد. بنابراین، درصد بیشتری از جریان ورودی از زیر منبع گرم عبور می‌کنند.

- در یک نسبت ابعادی ثابت، با افزایش عدد رینولدز، جابجایی اجباری نقش مهمتری را در فرایند انتقال حرارت ایجاد می‌کند و مقدار عدد نوسلت متوسط افزایش پیدا می‌کند. مقدار این افزایش برای تغییر عدد رینولدز در محدوده $50 \leq Re \leq 200$ حدوداً برابر ۳۴٪ است.

- افزایش عدد ریچاردسون در یک عدد رینولدز ثابت ناشی از افزایش عدد گراشهف است. به دلیل ثابت بودن خواص ترموفیزیکی نانوسیال، افزایش عدد گراشهف نیز ناشی از افزایش نرخ تولید انرژی در منبع حرارتی است. بنابراین، افزایش عدد ریچاردسون در یک عدد رینولدز ثابت دو اثر متقابل بر روی عدد نوسلت دارد. اول این‌که به دلیل افزایش دمای منبع حرارتی عدد نوسلت را کاهش می‌دهد و دوم این‌که با افزایش نیروی شناوری عدد نوسلت را افزایش می‌دهد. نتیجه این دو اثر متقابل در افزایش عدد نوسلت با شیب ملایم در اثر افزایش عدد ریچاردسون خلاصه شده است به طوری که با افزایش عدد ریچاردسون در بازه $0 \leq Ri \leq 2$ در بهترین حالت ($Re = 200$)، افزایش عدد نوسلت متوسط کمتر از ۳٪ است.

- با افزایش ضریب هدایت حرارتی منبع حرارتی، تولید انرژی و دمای منبع حرارتی افزایش پیدا می‌کند و بنابراین، نرخ انتقال حرارت از منبع حرارتی به نانوسیال مجاور آن نیز افزایش می‌یابد. همچنین نیروی شناوری در نانوسیال نیز با افزایش ضریب هدایت حرارتی منبع حرارتی زیاد می‌شود. از این‌رو با افزایش ضریب هدایت حرارتی منبع حرارتی عدد نوسلت متوسط افزایش چشمگیری می‌یابد. به طوری که با افزایش نسبت ضریب انتقال حرارت هدایتی از $\bar{k} = 1$ تا $\bar{k} = 100$ عدد نوسلت متوسط حدود ۱۷۸٪ افزایش می‌یابد.

- بررسی بر روی کسر حجمی نانوذرات نشان داد که افزایش این پارامتر به دلیل افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال، موجب افزایش عدد نوسلت متوسط می‌گردد. در این حالت افزایش عدد نوسلت در اعداد رینولدز بالاتر چشمگیرتر است.

- and Entropy Generation in a 3-D Microchannel, Using Al₂O₃-Water Nanofluid”, J. Taiwan Inst. Chem. Eng., Vol. 46, No. 1, pp. 30-42, 2014.
10. Milani Shirvan, K. and Mamourian, M. “Numerical Investigation and Optimization of Mixed Convection and Entropy Generation in Square Cavity with Lid-Driven”, J. Modarres Mech. Eng., Vol. 15, No. 8 , pp. 164-174. 2015 (In Persian).
 11. Parvin, S., Nasrin, R., and Alim, M. A. “Heat Transfer Performance of Nanofluid in a Complicated Cavity Due to Prandtl Number Variation”, Procedia Engineering, Vol. 90, No. 1, pp. 377-382, 2014.
 12. Brinkman, H.C. “The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solution”, J. Chem Phys., Vol. 20, pp. 571-581, 1952.
 13. Vajjha, R.S. and Das D.K., “Experimental Determination of Thermal Conductivity of Three Nanofluids and Development of New Correlations”, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 52, No’s. 21-22, pp. 4675-4682, 2009.
 14. Sheikhzadeh, G.A. and Ehteram, H. “Numerical Study of Natural Convection in a Nanofluid Filled Enclosure with Central Heat Source and Presenting Correlations for Nusselt Number”, J. Modarres Mech. Eng., Vol. 13, No. 10, pp. 62-74, 2013 (In Persian).
 15. Patankar S.V. “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”, Hemisphere, Taylor and Francis Group, New York, 1980.
 16. de Vahl Davis G., “Natural Convection of Air in a Square Cavity: A Bench Mark Numerical Solution”, Int. J. Numer Meth Fluid, Vol. , pp. 249-264,1983.
 17. Rahman, Md.M., Alim, M.A., Saha, S., and Chowdhury, M.K. “A Numerical Study of Mixed Convection in a Square Cavity with a Haet Conductin Square Cylinder at Different Locations”, J. Mech. Eng., Vol. 39, No. 2, pp. 78-85, 2008