



## تحلیل حرارتی-سیالاتی یک گلخانه با در نظر گرفتن تابش خورشیدی

زهرا طهماسبی آبدار<sup>1</sup>، خسرو لاری<sup>2\*</sup>، مرتضی عبدالزاده<sup>2</sup>

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

\* کرمان، صندوق پستی 7631133131، k.lari@kgut.ac.ir

### چکیده

کشت‌های گلخانه ای تولید محصول بیشتری نسبت به تولید سنتی ارائه می‌دهد. تهویه مطبوع یکی از ابزارهای مهم برای کنترل آب و هوای داخل گلخانه است. در این مطالعه، تهویه مطبوع در یک گلخانه از طریق تحلیل حرارتی و سیالاتی یک محفظه بسته محتوی هوا در شرایط گلخانه، با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده است. در این محفظه انتقال حرارت ترکیبی همرفتی طبیعی و تشعشع رخ می‌دهد. محیط داخل محفظه به صورت محیط دخیل در تشعشع خاکستری و بدون اثر پخش تشعشعی در نظر گرفته می‌شود. دیواره بالایی محفظه نیمه شفاف است و تحت تاثیر تشعشع مستقیم و دیفیوز خورشیدی قرار دارد. جهت تحلیل جریان در حالت پایا و دویعدی، معادلات مومنوم با در نظر گرفتن مقدار ثابت ویسکوزیته بررسی شده است. گسسته‌سازی معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود انجام می‌شود و تحلیل تشعشعی محیط با استفاده از مدل راستاهای مجزا برای حل معادله انتقال تشعشعی انجام می‌شود. نتایج به صورت کانتور دما، کانتور خطوط جریان، نمودار سرعت در خطوط مرکزی محفظه و مقادیر عدد ناسلت مربوط به دیواره‌ها ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد رابلی، میزان افزایش انتقال حرارت تشعشعی بیشتر از همرفتی می‌باشد.

کلید واژگان: دینامیک سیالات محاسباتی، محیط دخیل در تشعشع، روش راستاهای مجزا، تابش خورشیدی

## Thermo-fluid analysis of a greenhouse by considering solar irradiation

Zahra Tahmasbi Abdar, Khosro Lari\*, Morteza Abdolzadeh

Department of Mechanical Engineering, Graduate University of Advance Technology, Kerman, Iran

\* P.O.B. 7631133131, Kerman, Iran, k.lari@kgut.ac.ir

### ABSTRACT

Greenhouse cultivation offers more product than traditional manufacturing. Air conditioning is one of the most important tools for climate control inside the greenhouse. In this study, HVAC in a greenhouse through the thermal and fluid flow analysis of a cavity containing air under greenhouse conditions have been carried out using computational fluid dynamics techniques. In this cavity, coupled natural convection and radiation heat transfer occurs. The medium inside the cavity is considered as a gray participating medium without scattering. The upper wall of the cavity is semi-transparent that is affected by direct and diffuse solar radiation. To analyze the two-dimensional and steady state flow, Navier-Stokes equations are used by taking constant viscosity. Discretization of governing equations is done using finite volume method and the discrete ordinates method is used to model the radiative transfer equation. Results for temperature and streamline distributions, the velocity at the centerlines and the Nusselt numbers at the walls are provided. The results show that with increasing Rayleigh number, the increase in radiation heat transfer is more significant than convection.

**Keywords:** Computational fluid dynamics, Participating media, Discrete ordinates method, Solar radiation

### 1- مقدمه

نظر زمان و هزینه نسبت به روش آزمایشگاهی برتری دارد. دو پدیده حرارتی مهم در سیستم‌های گاخانه ای، انتقال حرارت همرفتی و انتقال حرارت تشعشعی می‌باشد. در مسائل انتقال حرارت همرفتی تعیین نرخ انتقال حرارت سطح و یا دمای سطح مهم است. این فاکتورهای مهم وقتی برقرار می‌شوند که توزیع دمای سیال در حال حرکت تعیین شود. بنابراین هدف اصلی در انتقال حرارت همرفتی تعیین توزیع دما در سیال در حال حرکت است [1]. مطالعه انتقال حرارت همرفتی طبیعی داخل یک محفظه، به دلیل کاربرد مهندسی فراوان و تاثیر آن روی جریان و فرآیندهای انتقال حرارت در پنجره‌های دو جداره و کلکتورهای خورشیدی و عایق کاری ساختمان‌ها و کوره‌ها و اتاقک‌ها، یک موضوع قابل توجه بوده است [2]. در زمینه مطالعه انتقال حرارت همرفتی طبیعی در یک محفظه مطالعات زیادی انجام شده است. مطالعه وهل‌داویز [3] راه‌حل عددی معیار برای انتقال حرارت همرفتی در جریان آرام برای یک محفظه هوا با دیواره‌های افقی

گلخانه ساختمانی است با پوشش قابل نفوذ نسبت به تشعشع خورشیدی که با کنترل عوامل اقلیمی و نهاده های موثر بر رشدونمو گیاه امکان تولید مطلوب محصول کشاورزی را فراهم نموده و گیاه را در مقابل خسارات عوامل نامساعد حفظ می‌کند. کشاورزی در محیط باز هیچ کنترلی بر عوامل محیطی همچون نور خورشید، هوا و دما که روی رشد گیاه تاثیر دارد، ندارد. در ساختارهای گلخانه‌ای، تهویه هوا ابزاری مفید برای بهبود رشد است که موجب افزایش بارده و کیفیت در مقایسه با شرایط رشد فضای باز می‌شود. مهم‌ترین فاکتورهایی که بر شرایط آب و هوایی گلخانه تاثیر می‌گذارد، نور، رطوبت، دما، غلظت کربن‌دی‌اکسید، و نرخ تهویه است. بیشتر داده‌ها و اطلاعاتی که از فاکتورهای موثر در آب و هوای گلخانه در دسترس است، مربوط به مطالعات آزمایشگاهی است. آزمایش در یک گلخانه با ابعاد واقعی زمان و هزینه بالایی نیاز دارد. بنابراین روش دینامیک سیالات محاسباتی، از

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \sqrt{\frac{\text{Pr}}{\text{Ra}}} \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( 2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] + \sqrt{\frac{\text{Pr}}{\text{Ra}}} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + (T - T_o) \quad (3)$$

با فرض جریان تراکم ناپذیر که چگالی مقداری ثابت در نظر گرفته می‌شود، برای اعمال اثر بویانسی از مدل بوزینسک استفاده می‌شود. جمله آخر مربوط به تقریب بوزینسک است.

معادله انرژی:

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \rho u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{\sqrt{\text{PrRa}}} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{1}{\sqrt{\text{PrRa}}} \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \frac{\partial T}{\partial y} \right] - \left( \frac{H}{c_p \rho \Delta T \sqrt{\beta g \Delta T H}} \right) \nabla \cdot q_r \quad (4)$$

که در آن‌ها متغیرهای بی‌بعدسازی به صورت زیر هستند:

$$u = \frac{U}{\sqrt{g \beta \Delta T H}}, \quad v = \frac{V}{\sqrt{g \beta \Delta T H}}, \quad \text{Pr} = \frac{\mu}{\rho \alpha} \\ T = \frac{T^* - T_c}{T_H - T_c}, \quad x = \frac{X}{H}, \quad y = \frac{Y}{H}, \quad \text{Ra} = \frac{\rho \beta g \Delta T H^3}{\mu \alpha} \quad (5)$$

جمله آخر در معادله انرژی دیورژانس شار حرارتی تشعشعی است که برای محاسبه آن نیاز به حل معادله انتقال تشعشعی [6] می‌باشد. دیورژانس شار تشعشعی بدین صورت محاسبه می‌شود:

$$\nabla \cdot q_r = \kappa \left( 4\pi I_b(r) - \int_{4\pi} I(\hat{s}) d\Omega \right) \quad (6)$$

شدت تشعشع در مکان  $r$  و در جهت  $\hat{s}$ ،  $I(r, \hat{s})$  با حل معادله انتقال تشعشعی بدست می‌آید. معادله انتقال تشعشعی در یک محیط خاکستری جذب، صادر و پخش کننده تشعشع به این صورت است:

$$\hat{s} \cdot \nabla I = \kappa I_b - \beta I + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{4\pi} I(\hat{s}_i) \Phi(\hat{s}_i, \hat{s}) d\Omega_i \quad (7)$$

زمانی که تابش ورودی خورشیدی نیز در محیط وجود دارد، شدت تشعشعی داخل محیط به دو قسمت تقسیم می‌شود: باقی‌مانده پرتو موازی خورشیدی که بعد از شکست در محیط جذب و پراکنده می‌شود که  $I_c$  خوانده می‌شود و قسمت شدت تشعشعی دیفیوز که نتیجه‌ی صدور تشعشع از مرزها و محیط و تشعشع پراکنده شده از تشعشع ورودی موازی است. بنابراین:

$$I(r, \hat{s}) = I_c(r, \hat{s}) + I_d(r, \hat{s}) \quad (8)$$

معادله انتقال تشعشعی برای تشعشع دیفیوز در حالت بدون پخش تشعشع به این صورت است:

$$\hat{s} \cdot \nabla I_d = \kappa I_b - \beta I_d + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{4\pi} I_d(\hat{s}_i) \Phi(\hat{s}_i, \hat{s}) d\Omega_i \quad (9)$$

همچنین مقدار تشعشع موازی از فرمول زیر برحسب مقدار تابش  $q_o$  به دست می‌آید:

$$I_c(r, \hat{s}) = [1 - \rho(r_w)] q_o(r_w) \times \delta[\hat{s} - \hat{s}_c(r_w)] e^{-\tau_c} \quad (10)$$

که در آن  $\delta$  تابع دیراک است.

### 3- توضیح مسئله

هندسه مسئله یک مربع دوبعدی است. شرایط مرزی این مساله بدین صورت است: دیواره کف محفظه آدیاباتیک و سیاه، دیواره‌های جانبی کدر با دمای ثابت و دیواره بالایی نیمه شفاف در دمای ثابت و تحت تاثیر پرتو خورشید در نظر گرفته می‌شود. سقف و دیواره‌های جانبی در دمای سرد،  $T_c$  هستند. دمای داغ موجود در معادلات،  $T_H$ ، که جهت محاسبات (محاسبه عدد رایلی

آدیاباتیک و دیواره‌های عمودی دما ثابت ارائه داده است. همچنین واکاشیما و سابتو [4] همین مطالعه را در هندسه سه‌بعدی انجام دادند. مطالعات زیادی در این زمینه در جریان مغشوش نیز انجام شده است. از جمله این مطالعات که در هندسه دوبعدی بیان شده، می‌توان به مطالعه دیکزیت و باهو [5] اشاره کرد.

تمامی مواد به‌طور پیوسته امواج الکترومغناطیس یا فوتون‌ها را با بالا بردن یا پایین آوردن سطح انرژی مولکولی خود، صادر و جذب می‌کنند [6]. مطالعه انتقال حرارت تشعشعی در محیط‌هایی که می‌تواند تشعشع را جذب، صادر و پخش کند، توجه زیادی را در سه دهه اخیر به خود جلب کرده است. دلیل این توجه ظاهر شدن این نوع محیط‌ها در بعضی کاربردهای صنعتی است [7].

تشعشع در بیشتر موارد با پدیده همرفتی همراه است. به دلیل پیچیدگی در مدل‌سازی تشعشع و اثر کم آن در بعضی موارد، در برخی مطالعات از تشعشع صرف‌نظر می‌شود. اثر تشعشع در پدیده جابه‌جایی طبیعی در مقایسه با جابه‌جایی اجباری به دلیل وابستگی ذاتی که بین میدان سرعت و دما وجود دارد، بیشتر است. حل چنین مسئله‌ای نیازمند حل معادلات پیوستگی، مومنوم، انرژی و معادله انتقال تشعشعی است [8]. در مورد محفظه با دیواره‌های کدر، نتایج مربوط به ترکیب تشعشع و همرفتی طبیعی در جریان آرام و مغشوش محیط دخیل در تشعشع در مطالعه فوزگی و فاروک [9] با فرض محیط غیرخاکستری ارائه شده است.

در بسیاری از مطالعاتی که در زمینه انتقال حرارت ترکیبی تشعشع و جابه‌جایی طبیعی انجام گرفته است، دیواره‌های محفظه به‌صورت کدر مدل شده‌اند. در این مطالعه، تحلیل حرارتی و سیالاتی یک محفظه دوبعدی با فرض محیط دخیل در تشعشع و خاکستری، با در نظر گرفتن دیواره نیمه‌شفاف و تاثیر تابش خورشیدی مورد بررسی قرار گیرد. این مدل می‌تواند در مسایل کاربردی مختلفی همانند انتقال حرارت در گلخانه‌ها دیده شود. هندسه مورد بررسی یک مربع بسته است. جهت تحلیل تشعشعی مسئله از روش راستهای مجزا و جهت بررسی سایر معادلات حاکم از روش حجم محدود استفاده می‌شود. در این مساله انتقال حرارت مرکب تابشی-همرفتی طبیعی با رژیم جریان آرام در اعداد رایلی متفاوت  $10^4$ ،  $10^5$  و  $10^6$  بررسی شده است.

## 2- معادلات حاکم

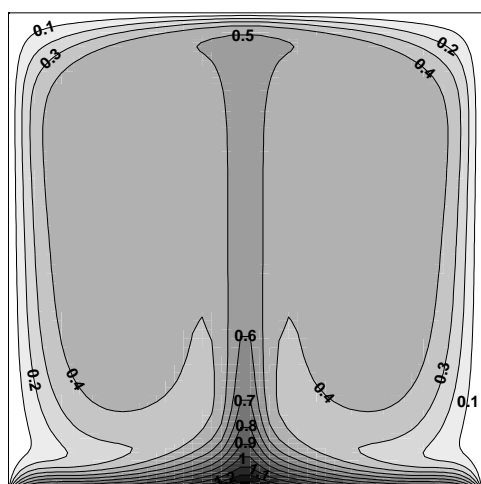
برای بدست آوردن میدان جریان نیاز به حل معادلات پیوستگی و مومنوم در دو راستای افقی و عمودی و برای بدست آوردن توزیع دما در مسئله انتقال حرارت ترکیبی تشعشع و همرفتی، نیاز به حل معادلات انرژی و معادله انتقال تشعشعی در دوبعد می‌باشد. این معادلات در حالت بدون بعد به‌صورت زیر در می‌آیند [9].

معادله پیوستگی:

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

معادلات مومنوم:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \sqrt{\frac{\text{Pr}}{\text{Ra}}} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] + \sqrt{\frac{\text{Pr}}{\text{Ra}}} \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (2)$$



(ج) (c)

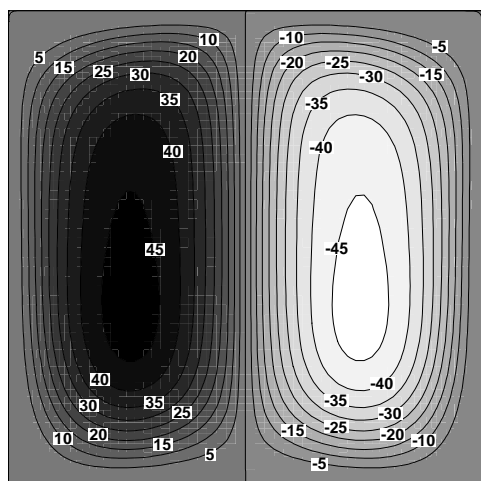
**Fig. 1** Temperature distribution for (a)  $10^4$ , (b)  $10^5$ , (c)  $10^6$  Rayleigh numbers

 شکل 1 کانتور دما در اعداد رایلی (الف)  $10^4$ ، (ب)  $10^5$ ، (ج)  $10^6$ 

همان‌طور که از کانتورهای دما در "شکل 1" دیده می‌شود، برخورد تابش خورشیدی به دیواره سیاه پایین محفظه، موجب جذب تشعشع توسط این دیواره و بالا رفتن دمای آن می‌شود. بدلیل اختلاف دمای ایجاد شده بین این دیواره و دیگر دیواره‌های محفظه که در دمای سردتری قرار دارند، جریان حرارتی جابجایی طبیعی در محفظه رخ می‌دهد. سیال گرم از نزدیکی دیواره پایین در اثر نیروهای بویانسی در راستای خط مرکز عمودی وسط ناحیه به سمت بالا حرکت کرده و در عوض هوای سرد در راستای دیواره‌های جانبی به سمت پایین جایگزین آن می‌شود.

در اعداد رایلی کوچک، خطوط دما ثابت در محیط دارای توزیع گسترده‌تری می‌باشد. اما با افزایش عدد رایلی محیط و افزایش سرعت جریان جابجایی طبیعی، دمای محیط شکل یکنواخت‌تری به خود می‌گیرد و توزیع دمای شبه همگنی به‌دست می‌آید.

در "شکل 2" خطوط جریان برای عدد رایلی  $10^6$  نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، دو جریان چرخشی در داخل محیط در اثر جابجایی طبیعی ایجاد می‌شود که جهت چرخش آن‌ها عکس یکدیگر است. قدرت هر دو جریان یکسان است که با توجه به اعداد گزارش شده در

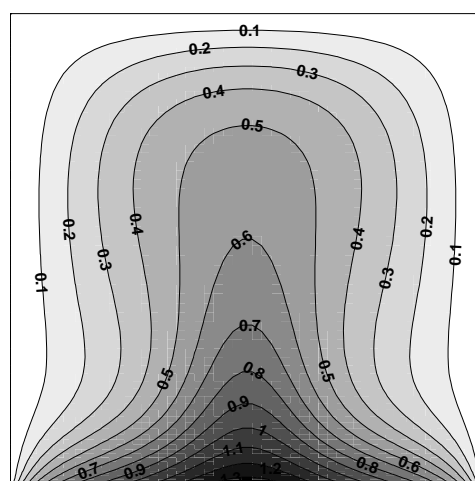

**Fig. 2** Streamline for  $10^6$  Rayleigh number

 شکل 2 کانتور خطوط جریان در عدد رایلی  $10^6$ 

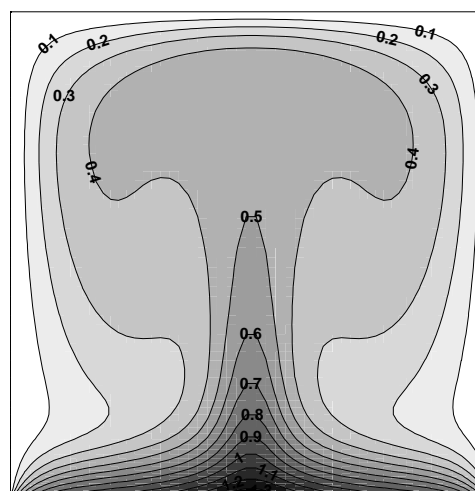
و متغیرهای بدون بعد) مورد نیاز است، با استفاده از روش سعی و خطا برابر با دمای میانگین دیواره پایینی محفظه در نظر گرفته می‌شود. سیال داخل محیط، هوا با عدد پرانتل ثابت 0.7173 [3] است. همچنین در تحلیل تشعشعی از پخش تشعشع صرف نظر شده است و محیط جذب کننده و صادر کننده تشعشع با ضریب جذب تشعشعی ثابت 2 مربوط به هوای مرطوب است. تشعشع خورشیدی شامل تشعشع مستقیم و دیفیوز می‌شود. مقدار تشعشع خورشیدی در نظر گرفته شده در این مطالعه برای منطقه کرمان در سردترین ماه سال در ساعت 12 ظهر می‌باشد. مقدار ضریب صدور در نظر گرفته شده برای سطوح کدر برابر با 0.9 می‌باشد [2].

#### 4- نتایج

در این مطالعه، تحلیل حرارتی و سیالاتی در حالت حضور تشعشع و در رژیم جریان آرام، در یک محفظه که از جانب سقف تحت تاثیر پرتو مستقیم و دیفیوز خورشید قرار گرفته است، انجام شده است. پس از انجام استقلال از مش طولی و زاویه‌ای، نتایج برای تعداد  $100 \times 100$  المان هندسی و روش راستاهای مجزا با استفاده از تقریب  $S_4$  به‌دست آمده‌اند. نتایج تحلیل مساله برای اعداد رایلی متفاوت آورده شده است. کانتورهای آورده شده در "شکل 1" (الف) تا (ج) مربوط به دمای بدون بعد محیط در ماه دسامبر (سردترین ماه سال) در اعداد رایلی  $10^4$ ،  $10^5$  و  $10^6$  می‌باشد.



(الف) (a)



(ب) (b)

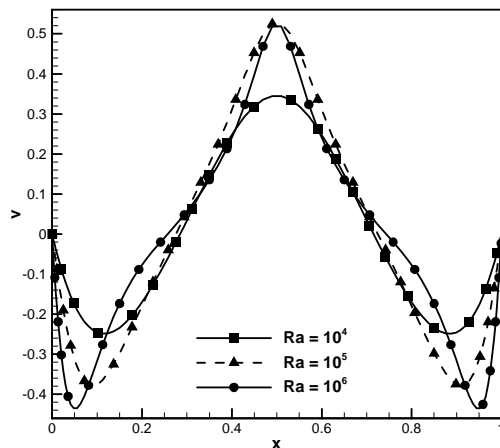


Fig. 4 V-velocity along horizontal centerline

شکل 4 تغییرات مولفه عمودی سرعت در راستای خط مرکزی افقی

است که تشعشع خورشید به سقف شفاف آن می‌تابد. انتقال حرارت ظاهر شده شده در محیط ترکیب انتقال حرارت همرفتی و تشعشع است. تحلیل برای جریان آرام انجام شده است. محیط محفظه به صورت دخیل در تشعشع و با ضریب جذب ثابت و بدون اثر پخش تشعشعی در نظر گرفته شده است. نتایج برای زمستان به صورت کانتور دما و کانتور خطوط جریان ارائه شده است.

کاهش میزان تشعشع خورشید در ماه دسامبر موجب کاهش دمای میانگین کف محفظه می‌شود و در نتیجه گرادیان دما که عامل محرک هوا است، کاهش می‌یابد. عامل اصلی انتقال حرارت از دیواره‌های جانبی، انتقال حرارت همرفتی است. در زمستان میزان انتقال حرارت از دیواره‌ها افزایش می‌یابد. افزایش در انتقال حرارت تشعشعی بیشتر است.

## 6- مراجع

- [1] L. M. Jiji, . *Heat convection*, Second Edition, pp. 305-320, New York: Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [2] J. Xaman, J. Arce, G. Alvarez, Y. Chavez, Laminar and turbulent natural convection combined with surface thermal radiation in a square cavity with a glass wall, *Termal Sciences*, Vol. 160, No. 47, pp. 1630-1638, 2008.
- [3] G. DE. VahlDavis, Natural convection of air in a square cavity. A bench mark numerical solution, *Numerical methods in fluids*, Vol. 3, No. 47, pp. 249-264, 1983.
- [4] S. Wakashima, T. S. Saitoh, Benchmark solutions for natural convection in a cubic cavity using the high-order time-space method, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 160, No. 47, pp. 853-864, 2004.
- [5] H. N. Dixit, V. Babu, Simulation of high Rayleigh number natural convection in a square cavity using the lattice Boltzmann method, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 160, No. 49, pp. 727-739, 2006.
- [6] M. F. Modest, *Radiative heat transfer*, Second Edition, San Diego: Academic Press, 2003.
- [7] R. Siegel, J. R. Howell, *Thermal radiation heat transfer*, Second Edition, New York: Taylor & Francis, 2002.
- [8] S. M. Fakhir Hasani, *Combind natural convection and radiation in a triangular enclosure*, PhD Thesis, Graduate Faculty, University of Akron, 1998.
- [9] T. Fusegi, B. Farouk, Laminar and turbulent natural convection radiation interactions in a square enclosure filled with a nongray gas, *Numerical Heat Transfer*, Vol. 15, No. 47, pp. 303-322, 1989.

جدول 1 حداکثر تابع جریان در محیط و عدد ناسلت دیواره

Table 1 Maximum stream function and Nusselt numbers

عدد رایلی	$10^4$	$10^5$	$10^6$	$10^5$
ماکزیمم تابع جریان	3.90	17.205	47.32	205
ناسلت تشعشعی	1.715	3.426	7.243	426
ناسلت همرفتی	2.084	3.054	5.746	954

جدول 1 مربوط به حداکثر تابع جریان ظاهر شده در محیط، با افزایش عدد رایلی مقدار ماکزیمم تابع جریان نیز افزایش می‌یابد.

همچنین در جدول 1 عدد ناسلت تشعشعی و همرفتی میانگین در دیواره عمودی نیز آمده است. انتقال حرارت همرفتی در انتقال حرارت از دیواره‌های جانبی کدر تاثیر بیشتری دارد. برای مقدار دمای یکسان در نظر گرفته شده برای دیواره‌های جانبی، با افزایش عدد رایلی انتقال حرارت از دیواره‌ها افزایش می‌یابد. این افزایش در انتقال حرارت تشعشعی قابل توجه‌تر است.

مقادیر مولفه افقی سرعت بی‌بعد در راستای خط مرکز عمودی محفظه در "شکل 3" و نمودار مربوط به مقادیر مولفه عمودی سرعت بی‌بعد در راستای خط مرکزی افقی محفظه در "شکل 4" نمایش داده شده است. همان‌طور که در "شکل 3" دیده می‌شود با افزایش عدد رایلی مقدار سرعت افقی  $u$  به سمت صفر نزدیکتر می‌شود. همچنین در "شکل 4" سرعت عمودی  $v$  توزیع تقریباً یکنواختی در اعداد رایلی مختلف دارد و مقدار ماکزیمم آن در وسط ناحیه رخ می‌دهد.

حداکثر مقدار سرعت عمودی ظاهر شده در راستای خط مرکزی افقی مربوط به وسط محفظه می‌شود که با توجه به حرکت سیال در اثر نیروی بویانسی از کف به سمت بالای محفظه قابل توجه است. نمودار متقارن سرعت عمودی در راستای خط مرکزی افقی با توجه به کانتور خطوط جریان قابل توجه است. تقارن نمودار جهت عکس دو چرخش جریان در محیط را نشان می‌دهد.

## 5- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به تحلیل حرارتی و سیالاتی یک محفظه مربعی پرداخته شده

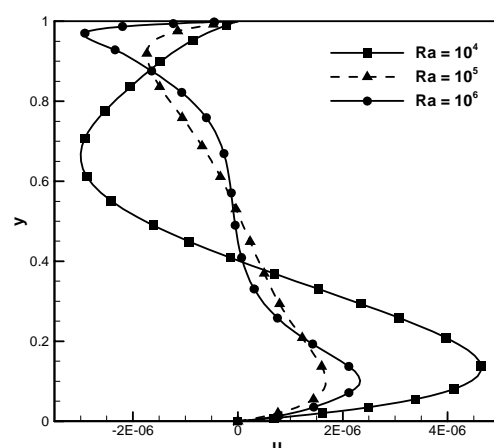


Fig. 3 U-velocity along vertical centerline

شکل 3 تغییرات مولفه افقی سرعت در راستای خط مرکزی عمودی