



## بهینه‌یابی موقعیت منابع حرارتی در جابجایی طبیعی توأم با تابش سطحی در یک محفظه دو بعدی به کمک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

محمد امین دشتی<sup>۱</sup> و علی صفوی نژاد<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۱۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۲/۳۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۰۳

### چکیده

در این مقاله، تحلیل عددی انتقال حرارت جابجایی طبیعی توأم با تابش سطحی در یک محفظه دو بعدی، به منظور یافتن موقعیت بهینه منابع حرارتی شار ثابت مرزی برای مینیمم‌سازی دمای سطح منابع حرارتی به کمک الگوریتم ازدحام ذرات انجام می‌شود. هوا به عنوان یک سیال تراکم ناپذیر و محیط درون محفظه شفاف و جریان سیال آرام و پایا در نظر گرفته می‌شود. سطوح محفظه نیز کدر، پخشی و خاکستری فرض می‌شود. معادلات حاکم با فرمول‌بندی تابع جریان و ورتیسسته با روش اختلاف محدود حل می‌شود. دمای ماکزیمم سطح منابع حرارتی و موقعیت منابع حرارتی به ترتیب، به عنوان تابع هدف و متغیرهای طراحی انتخاب می‌شود. نتایج نشان می‌دهد، مقدار مینیمم دمای بی‌بعد ماکزیمم سطح منبع حرارتی با افزایش ضریب صدور یا عدد رایلی، کاهش می‌یابد. با افزایش عدد رایلی نیز، موقعیت بهینه منابع حرارتی برای چیدمان با یک منبع حرارتی و دو منبع حرارتی به سمت کف نزدیک می‌شود. با افزایش ضریب صدور در هر عدد رایلی نیز، موقعیت بهینه مرکز سطح منابع حرارتی به سمت مرکز نزدیک می‌شود و در چیدمان با دو و سه منبع حرارتی به یکدیگر نزدیک است.

**کلمات کلیدی:** جابجایی طبیعی؛ تابش سطحی؛ منبع حرارتی شار ثابت؛ بهینه‌یابی؛ الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات.

## Optimal Search of Heat Sources Location in Conjugate Natural Convection with Surface Radiation in a Two-Dimensional Enclosure Utilizing Particle Swarm Optimization Algorithm

M. A. Dashti<sup>1</sup>, A. Safavinejad<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> MSc. Alumnus, Mech. Eng., Univ. of Birjand, Birjand, Iran.

<sup>2</sup> Assist. Prof., Mech. Eng., Univ. of Birjand, Birjand, Iran.

### Abstract

In this paper, the numerical analysis of the conjugate natural convection with surface radiation in a two-dimensional enclosure is carried out in order to search the optimum location of the boundary constant flux heat sources to minimize the temperature of the heat sources surface using the particle swarm algorithm. The air is considered as an incompressible fluid and a transparent media inside the enclosure with a steady and laminar flow regime. The surfaces of the enclosure are also considered to be opaque, diffuse and gray. The governing equations are solved using the stream function and vorticity formulation with the finite difference method. The maximum temperature and the location of heat sources are selected as the objective function and design variables, respectively. The results show that the minimum value of the maximum dimensionless temperature of the heat source decreases with the increase of emissivity or Rayleigh number. By increasing the Rayleigh number, the optimal location of heat sources shifts to the bottom for configurations with one or two heat sources. By increasing the emissivity in each Rayleigh number, the optimal value of the heat sources center location approaches to the center and in the configurations with two and three heat sources is close to each other.

**Keywords:** Natural Convection; Surface Radiation; Constant Flux Heat Source; Optimal Search; Particle Swarm Optimization Algorithm.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۵۶۳۲۲۰۲۰۴۹؛ فکس: ۰۵۶۳۲۲۰۲۵۱۷

آدرس پست الکترونیک: [asafavi@birjand.ac.ir](mailto:asafavi@birjand.ac.ir)

## ۱- مقدمه

استفاده از ابزارهای جدید مثل، الگوریتم‌های ابتکاری، منطق فازی و شبکه‌های مصنوعی عصبی نیز، در بهینه‌سازی در زمینه‌های مختلف مثل سیستم‌های انرژی، الکترونیک و موتورهای احتراق داخلی، مورد توجه زیادی قرار گرفته است [۷]. کادیالا و چاتوپادیای [۸]، جانمایی بهینه سه منبع حرارتی در دیواره یک محفظه مربعی را به کمک الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی بدون در نظر گرفتن تابش به انجام رساندند. پایان و عظیمی فر [۹]، میزان انتقال حرارت ناشی پره‌های نازک عایق در محفظه‌های مستطیلی با جابجایی آزاد در نسبت‌های منطقی مختلف را به کمک الگوریتم بهینه‌سازی کوچ پرندگان کمینه کردند.

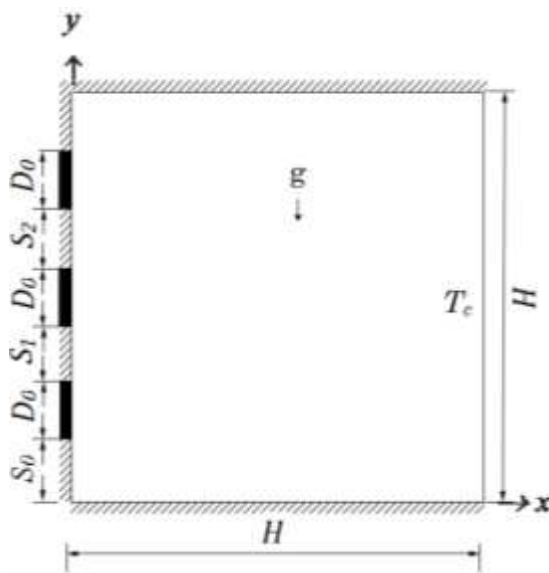
بایری و همکاران [۱۰] جابجایی طبیعی در یک محفظه متوازی‌الاضلاع حاوی باندهای الکترونیک شارژت را در زوایای مختلف به صورت عددی و آزمایشگاهی تحلیل کردند. تحلیلی آزمایشگاهی این تحقیق بر اندازه‌گیری دمای سطح دیواره متمرکز بود و تحلیل عددی به صورت جریان دوبعدی انجام شد. سلیمانی و همکاران [۱۱]، موقعیت بهینه یک جفت منبع حرارتی در یک محفظه بسته مربعی با جابجایی طبیعی را به کمک الگوریتم ازدحام ذرات و برای اندازه‌های مختلف دو منبع مطالعه کردند. سوانت و راثو [۱۲] جابجایی ترکیبی توأم با تابش سطحی حاصل از یک برد الکترونیک عمودی با چند منبع حرارتی را به صورت عددی حل کردند. در این مطالعه، موقعیت منابع حرارتی و چیدمان، ثابت در نظر گرفته شد و اثر تابش بر دمای سطح برد الکترونیک تحلیل شد. احمد و بالاجی [۱۳] در یک مطالعه عددی و آزمایشگاهی، جابجایی ترکیبی معکوس توأم با تابش سطحی در یک محفظه عمودی با منابع حرارتی برجسته در دیواره عمودی را تحلیل کردند. تحلیل دینامیک سیالاتی این مطالعه، به کمک نرم افزار فلونت<sup>۳</sup> ۶.۳ و طراحی معکوس برای محاسبه توزیع دما به کمک شبکه مصنوعی عصبی نرم افزار متلب<sup>۴</sup> انجام شد. در یک مطالعه آزمایشگاهی، هاتا و همکاران [۱۴] اثر تابش سطحی را بر توزیع بهینه منابع حرارتی تحت جابجایی طبیعی بررسی کردند. در این مطالعه ۹ چیدمان متفاوت از منابع حرارتی برای یافتن کمترین دمای ماکزیمم منابع حرارتی انتخاب شد.

رویکرد کمینه‌سازی دمای منابع حرارتی از طریق انتقال حرارت و جریان سیال در طراحی بهینه سیستم‌های انرژی و الکترونیک اخیراً مورد توجه زیادی قرار گرفته است؛ تا جایی که بخشی از نرم‌افزارهای چندمنظوره انسیس<sup>۱</sup> به محصول آیسپک جهت تحلیل، مدیریت گرمایی و خنک‌سازی محفظه‌های الکترونیک تعلق گرفته است. با این وجود، هنوز تحلیل عددی مسائلی با هندسه‌های ساده جهت طراحی بهینه چیدمانی از منابع حرارتی به کمک روش‌های عددی ابتکاری، در طراحی نهایی محفظه‌های الکترونیک پیچیده کمک زیادی خواهد کرد.

مسائل جابجایی طبیعی در محفظه‌ها، توسط محققان زیادی به صورت عددی و آزمایشگاهی مطالعه شده است [۱]. برخی از نویسندگان به مطالعه اثر موقعیت و اندازه گرمکن و سردکن بر جابجایی طبیعی در محفظه‌ها پرداختند. شیخ و همکاران [۲]، اثر شرایط مرزی حرارتی را بر جابجایی طبیعی در یک محفظه مربعی را بررسی کردند که در بخشی از کف گرم می‌شود. چو و همکاران [۳] اثر اندازه و موقعیت گرمکن هم‌دما، نسبت طول به عرض، شرایط مرزی در جابجایی طبیعی آرام را در کانال‌های مستطیلی به منظور یافتن ماکزیمم نرخ انتقال حرارت مطالعه کردند. تورکوگلو و یوسل [۴]، اثر موقعیت منابع حرارتی دما ثابت را بر جابجایی طبیعی در محفظه‌های مربعی بررسی کردند. نگو و بیون [۵] اثر موقعیت و اندازه گرمکن دما ثابت را بر جابجایی طبیعی در یک محفظه مربعی، با استفاده از رویکرد اجزا محدود به کمک نرم افزار کامسول<sup>۲</sup> تحلیل کردند. از نتایج این تحقیق، می‌توان به اثر اندازه گرمکن و موقعیت گرمکن بر نرخ انتقال حرارت، میدان جریان و میدان دما اشاره کرد. داسیلوا و همکاران [۶]، بهینه‌یابی موقعیت منابع حرارتی شارژت در جابجایی طبیعی در یک محفظه را به منظور کمینه‌سازی ماکزیمم دما بررسی کردند. در مطالعه آن‌ها، موقعیت بهینه منابع حرارتی با یک، دو و سه منبع حرارتی در سه چیدمان مجزا و در رژیم‌های مختلف، به کمک جستجوی گام به گام حاصل شد.

<sup>۳</sup> Fluent 6.3<sup>۴</sup> MatLab<sup>۱</sup> Ansys Icepak<sup>۲</sup> COMSOL

چیدمان با سه منبع حرارتی به عنوان متغیرهای طراحی به کمک الگوریتم ازدحام ذرات جستجو می‌شود.



شکل ۱- هندسه و شرایط مرزی چیدمان مسئله

۲-۲- معادلات حاکم

جریان سیال در محفظه دو بعدی، آرام و پایا فرض می‌شود. هوا به عنوان یک سیال تراکم ناپذیر با تقریب بوزینسک<sup>۱</sup> و شفاف درون محفظه در نظر گرفته می‌شود. به بیان ساده‌تر چگالی در کلیه نقاط محفظه به جز در عبارت نیروی حجمی معادله ممنتوم  $y$ ، ثابت در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب معادلات حاکم بر جریان شامل، پیوستگی، مومنتم در جهت  $x$  و  $y$  و انرژی چنین عرضه می‌شود:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{۱}$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \tag{۲}$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g\beta(T - T_c) \tag{۳}$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \left( \frac{k_f}{\rho c_p} \right) \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \tag{۴}$$

<sup>۱</sup> Boussinesq

با توجه به تحقیقات انجام شده توسط نویسندگان، اگرچه در برخی از تحقیقات فوق به اثر تابش بر تغییر پارامترهای سیال از جمله دمای سطح منابع حرارتی اشاره شده است، با این حال هنوز اثر تابش بر تغییرات موقعیت بهینه چیدمان منابع حرارتی، به عنوان یک تابع هدف مهم و به کمک روش‌های ابتکاری بررسی نشده است.

در تحقیق حاضر اثر موقعیت یک منبع حرارتی مرزی شارثابت بر جابجایی طبیعی با در نظر گرفتن تابش سطحی ارزیابی می‌شود و نتایج حاصل، با جابجایی خالص مقایسه می‌شود. سپس موقعیت بهینه منابع حرارتی (۲ و ۳ منبع) برای کمینه‌سازی ماکزیمم دمای سطح منابع حرارتی با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات دنبال می‌شود.

۲- مدل ریاضی

۲-۱- تعریف مسئله

هندسه مورد بررسی در شکل ۱ نشان داده شده است. در شکل ۱،  $D_0$  و  $S_1$  به ترتیب اندازه نوار منبع حرارتی و فاصله میان منابع حرارتی را نشان می‌دهد. چیدمان مسئله می‌تواند یک، دو یا سه منبع حرارتی داشته باشد و نتایج برای سه چیدمان مجزا بررسی می‌شود. در چیدمان مورد بررسی در این تحقیق، دیواره مقابل منبع حرارتی به عنوان چاه حرارتی یا دفع حرارت به کار گرفته می‌شود که در دمای ثابت  $T_c$  قرار دارد. دو دیواره بالا و پایین و فواصل میانی منابع حرارتی محفظه، عایق در نظر گرفته می‌شود. سیال محفظه هوا و خواص آن ثابت فرض می‌شود. شار  $q_0''$ ، ثابت فرض می‌شود. از مهم‌ترین اهداف این مطالعه، تحلیل حرارتی و بررسی ماکزیمم دمای منابع حرارتی است. به این منظور، دمای بی‌بعد ماکزیمم سطح منبع حرارتی و موقعیت منابع حرارتی به ترتیب، به عنوان تابع هدف و متغیرهای طراحی انتخاب شده و بهینه‌سازی به کمک الگوریتم ازدحام ذرات با در نظر گرفتن تابش سطحی انجام می‌شود و نتایج با جابجایی خالص مقایسه می‌شود. در همه چیدمان‌ها،  $\frac{D_0}{H} = 0.1$  در نظر گرفته می‌شود و نتایج در دو بخش شامل، چیدمان با دو منبع حرارتی و چیدمان با سه منبع حرارتی بررسی می‌شود. پارامترهای بی‌بعد موقعیت  $S_{0,h} = \frac{S_0}{H}$  و  $S_{1,h} = \frac{S_1}{H}$  در چیدمان با دو منبع حرارتی و  $S_{0,h}$ ،  $S_{1,h}$  و  $S_{2,h} = \frac{S_2}{H}$  در

مقاطع هاتل محاسبه می‌شود [۱۷]. برای محاسبه  $q_{o,j}$  در یک محفظه بسته با  $N$  المان دما معلوم نیز، رابطه (۱۰) به صورت یک دستگاه معادله حل می‌شود:

$$\sum_{j=1}^N [\delta_{kj} - (1 - \varepsilon_k) F_{kj}] q_{o,j} = \varepsilon_k \sigma T_k^4 \quad 1 \leq k \leq N \quad (10)$$

با تقسیم روابط (۹) و

(۱۰) بر  $\sigma T_c^4$  معادلات تابش سطحی بی‌بعد با استفاده از رابطه (۵) و تعریف پارامتر نسبت دمای بی‌بعد  $\theta_0$  به صورت روابط (۱۱-۱۲) حاصل می‌شود:

$$\sum_{j=1}^N (\delta_{kj} - F_{kj}) Q_{o,j} = Q_{r,k} \quad 1 \leq k \leq N \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^N [\delta_{kj} - (1 - \varepsilon_k) F_{kj}] Q_{o,j} = \varepsilon_k \left( \frac{\theta}{\theta_0} + 1 \right)^4 \quad 1 \leq k \leq N \quad (12)$$

#### ۲-۴-۲- شرایط مرزی

##### ۲-۴-۲-۱- شرایط مرزی تابع جریان و ورتیسیتته

با توجه به شرط عدم لغزش بر سطح مشترک داخلی محفظه و سیال نتیجه می‌شود:  $\frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0$ . وجود نقطه مشترک دیواره‌های داخلی محفظه با یکدیگر منجر به تساوی  $\psi$  به مقدار ثابت و عدم ورود یا خروج جریان به داخل محفظه، به  $\psi = 0$  در تمام نقاط سطح داخلی محفظه منتج می‌شود. در مجموع شرایط مرزی بی‌بعد تابع جریان و ورتیسیتته برای کلیه سطوح مطابق روابط (۱۳-۱۴) است:

$$Y = 0 \text{ و } Y = 1 \quad \psi = 0, \quad \Omega = -\frac{\partial^2 \psi}{\partial Y^2} \quad (13)$$

$$X = 0 \text{ و } X = 1 \quad \psi = 0, \quad \Omega = -\frac{\partial^2 \psi}{\partial X^2} \quad (14)$$

##### ۲-۴-۲-۲- شرایط مرزی حرارتی

با موازنه انرژی روی هر سطح، شرایط مرزی حرارتی حاصل می‌شود. برای چیدمان با یک منبع حرارتی: سطح دیواره منبع حرارتی:

$$x = 0 : \quad S_0 < y < S_0 + D_0 : \quad q_c + q_r = q_0'' \rightarrow -k_f \frac{\partial T}{\partial x} + q_r = q_0'' \quad (15)$$

با توجه به تحلیل حرارتی در مسئله حاضر و عدم بررسی فشار و سرعت، با مشتق‌گیری از معادله (۲) نسبت به  $y$  و مشتق‌گیری از معادله (۳) نسبت به  $x$  و سپس تفریق معادلات مشتق گرفته شده (۲) از (۳) و استفاده از تعاریف  $\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$  و  $v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$ ,  $u = \frac{\partial \psi}{\partial y}$  و متغیرهای جریان به تابع جریان، ورتیسیتته و دما تغییر می‌یابد. با استفاده از روند بی‌بعدسازی در مراجع [۱۵، ۱۶]، متغیرهای مورد استفاده در معادلات جریان و اعداد بی‌بعد رایلی، پرناتل و عدد تابش-رسانش تعریف می‌شود:

$$X = \frac{x}{H}, \quad Y = \frac{y}{H}, \quad \Psi = \frac{\psi \text{Pr}}{\nu}, \quad \Omega = \frac{\omega H^2 \text{Pr}}{\nu}$$

$$U = \frac{\partial \Psi}{\partial Y}, \quad V = -\frac{\partial \Psi}{\partial X}, \quad \theta = \frac{(T - T_c)}{q_0'' \frac{H}{k_f}}, \quad \theta_0 = \frac{T_c}{q_0'' \frac{H}{k_f}}$$

$$Q_r = \frac{q_r}{\sigma T_c^4}, \quad Q_{o,j} = \frac{q_{o,j}}{\sigma T_c^4}, \quad Q_{i,j} = \frac{q_{i,j}}{\sigma T_c^4}$$

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha}, \quad \text{Ra} = \frac{g \beta q_0'' H^4}{\alpha \nu k_f}, \quad \text{Nr}_c = \frac{\sigma T_c^4}{q_0''} \quad (5)$$

با استفاده از عبارات بی‌بعدسازی روابط (۵)، معادلات بی‌بعد حاکم بر جریان با فرمول‌بندی تابع جریان و ورتیسیتته به صورت روابط (۶-۸) حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = -\Omega \quad (6)$$

$$U \frac{\partial \Omega}{\partial X} + V \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = \text{Pr} \left( \frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Y^2} \right) - \text{Ra} \cdot \text{Pr} \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (7)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \quad (8)$$

##### ۲-۳-۳- معادلات تابش سطحی

سطوح محفظه کدر، پخشی و خاکستری فرض می‌شود و محیط نیز شفاف فرض می‌شود. شار تابشی از سطح  $q_r$  با استفاده از روش تابش خالص [۱۷] و به کمک رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$\sum_{j=1}^N (\delta_{kj} - F_{kj}) q_{o,j} = q_{r,k} \quad 1 \leq k \leq N \quad (9)$$

در رابطه (۹)،  $N$  تعداد کل المان‌های سطحی محفظه است.  $q_{o,j}$  شار تابشی خروجی از المان  $j$  ام،  $\delta_{kj}$  بیانگر دلتای کروئکر و  $F_{kj}$  ضریب دید سطح المان  $k$  ام نسبت به المان  $j$  ام است. ضریب دید  $F_{kj}$  به کمک روش تارهای

جریان در هر تکرار حل کلی معادلات استفاده شد. نتایج حل عددی نشان داده که ذات معادله بیضوی پواسون برای محاسبه تابع جریان، معادله‌ای خوش‌رفتار است که با وجود مقادیر حدسی و اشتباه ورتیسسته همگرا می‌شود؛ لذا پیشنهاد می‌شود که میزان خطای دو تکرار داخلی متوالی در حل این معادله نسبت به دو معادله دیگر که طبیعت گذرا دارند، بیشتر کاهش یابد. شایان ذکر است که در این مطالعه مشاهده شد که تسریع در همگرایی حل معادله انتقال ورتیسسته اعم از استفاده از ضرائب فوق تخفیف و یا حلگر خط به خط نه تنها باعث تسریع در روند همگرایی نمی‌شود، بلکه به شدت حل را واگرا می‌کند.

در انتقال حرارت ترکیبی جابجایی طبیعی توأم با تابش سطحی، ابتدا دمای مجهول کلیه المان‌های سطوح محفظه (سطوح عایق و یا منبع حرارتی) حدس زده می‌شود. سپس در روش تابش خالص دمای کلیه المان‌های سطوح از حل معادلات جابجایی دریافت می‌شود و پس از حل دستگاه معادله

(۱۰)، شار تابشی خالص هر المان  $q_{r,k}$  به کمک رابطه (۹) محاسبه می‌شود. با استفاده از شار تابشی خالص هر المان ( $q_{r,k}$ )، شرایط مرزی، دمای سطوح را به‌نگام کرده و معادله انرژی با دمای اصلاح شده سطوح حل خواهد شد. این روند تا رسیدن به همگرایی با شرط توقف ادامه می‌یابد.

### ۳- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات که به الگوریتم پرندگان نیز معروف است، با الهام از پرواز دسته جمعی پرندگان برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط کندی و ابرهات ابداع شد [۱۸، ۱۹]. این الگوریتم با انتخاب جمعیتی از ذرات در فضای  $m$  بعدی (فضای پارامترهای مسئله بهینه‌سازی) آغاز می‌شود. برخلاف سایر الگوریتم‌های گرادیان-مینا که نیازمند محاسبه گرادیان تابع هدف هستند، این الگوریتم تنها نیاز به مقدار تابع هدف در نقطه مورد بررسی است و مستقل از اطلاعاتی از گرادیان تابع هدف یا تابع خطا است [۲۰]. در فضای جستجو به هر ذره  $i$  که حامل  $m$  متغیر طراحی است، مکان  $X_i$  و سرعت  $V_i$  تعلق می‌گیرد. مکان ذرات در گام زمانی بعد، با توجه به بهترین مکان یافت شده توسط تمام ذرات و بهترین

$$0 < y < S_0 \quad \& \quad S_0 + D_0 < y < H : \\ q_c + q_r = 0 \rightarrow -k_f \frac{\partial T}{\partial x} + q_r = 0 \quad (16)$$

سطح دیواره‌های عایق:

$$y = 0 : q_c + q_r = 0 \rightarrow -k_f \frac{\partial T}{\partial y} + q_r = 0 \quad (17)$$

$$y = H : k_f \frac{\partial T}{\partial y} + q_r = 0 \quad (18)$$

سطح دیواره سمت راست:

$$x = H : T = T_c \quad (19)$$

در مجموع شرایط مرزی بی‌بعد دما برای کل محفظه چنین استخراج می‌شود:

$$X = 0 \\ \frac{S_0}{H} < Y < \frac{S_0 + D_0}{H} : -\frac{\partial \theta}{\partial X} + N_{rc} Q_r = 1 \quad (20)$$

$$0 < Y < \frac{S_0}{H}, \quad \frac{S_0 + D_0}{H} < Y < 1 \\ : -\frac{\partial \theta}{\partial X} + N_{rc} Q_r = 0 \quad (21)$$

$$Y = 0 : -\frac{\partial \theta}{\partial Y} + N_{rc} Q_r = 0 \quad (22)$$

$$Y = 1 : \frac{\partial \theta}{\partial Y} + N_{rc} Q_r = 0 \quad (23)$$

$$X = 1 : \theta = 0 \quad (24)$$

### ۲-۵- روش حل

معادلات با فرمول بندی تابع جریان و ورتیسسته در یک شبکه مستطیلی یکنواخت با روش اختلاف محدود منفصل شد. برای انفصال عبارات نفوذ، از طرح تفاضل مرکزی مرتبه دوم و برای انفصال عبارات جابجایی نیز، از طرح تفاضل مرکزی استفاده شد. برای انفصال مشتقات مرتبه اول موجود در شرایط مرزی نیز، از تفاضل پیشرو یا پسرو (بسته به قرارگیری در ابتدا یا انتهای شمارش شبکه) مرتبه دوم استفاده شد. معادله پواسون تابع جریان و معادله انرژی با روش ضمنی جهت متناوب و یا اصطلاحاً خط به خط حل شد؛ در حالی که نتایج محاسبات نشان داد، استفاده از روش گوس نقطه به نقطه نسبت به روش خط به خط برای حل معادله انتقال ورتیسسته، سرعت همگرایی را تا چندین برابر افزایش می‌دهد. به منظور از بین بردن رفتار غیرخطی و اغتشاشات جریان از افزایش تکرار داخلی (۵ تا ۱۰ تکرار بسته به ابعاد شبکه و شرایط مرزی) برای معادله پواسون تابع

اختلاف محدود استفاده شد. مطابق جدول ۱ استقلال از شبکه برای محاسبه عدد ناسلت متوسط کل و حداکثر دما در  $Ra = 10^6$ ،  $\varepsilon = 0.8$  و  $\frac{D_0}{H} = 0.5$  که تغییرات شدیدتری نسبت به سایر اعداد رایلی و ضرائب صدور وجود دارد، در ۴ شبکه به ابعاد  $31 \times 31$ ،  $51 \times 51$ ،  $71 \times 71$  و  $91 \times 91$  مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی استقلال از شبکه نشان داد، که خطای نسبی عدد ناسلت متوسط کل و دمای ماکزیمم برای شبکه  $71 \times 71$  نسبت به شبکه  $91 \times 91$  کمتر از  $0.3\%$  حاصل شد؛ در نتیجه شبکه  $71 \times 71$  به عنوان یک شبکه مناسب از نظر دقت عملکرد و زمان محاسبه در تمامی حل‌ها انتخاب شد. شرایط همگرایی برای رسیدن به همگرایی برای معادلات حاکم به صورت رابطه (۳۲) تعریف می‌شود که  $\varphi$  می‌تواند نماد هر یک از متغیرهای جدید جریان مثل  $\theta$ ،  $\Psi$  یا  $\Omega$  باشد.

$$\sum \left| \frac{\varphi^{\text{new}} - \varphi^{\text{old}}}{\varphi^{\text{new}}} \right| < 10^{-5} \quad (32)$$

جدول ۱- نتایج دمای بی‌بعد ماکزیمم با تغییرات شبکه

ابعاد شبکه	$\theta_{\max}$	زمان محاسبه (s)
$31 \times 31$	۰/۱۴۷۶۰	۱۶/۶
$51 \times 51$	۰/۱۴۳۰۹	۱۰۶/۴
$71 \times 71$	۰/۱۴۲۱۶	۳۸۷/۷
$91 \times 91$	۰/۱۴۱۸۳	۱۰۳۶/۵

#### ۴- اعتبارسنجی

##### ۴-۱- اعتبارسنجی کد حل دینامیک سیالات محاسباتی

دقت روش عددی مطالعه حاضر با چندین مطالعه اعتبارسنجی شده است. ابتدا مقایسه‌ای میان نتایج حاصل از مطالعه دیویس [۲۳]، برای حل جابجایی طبیعی خالص در یک محفظه هوا صورت گرفت و تطابق نتایج حاصل شد. برای بررسی اثر منابع حرارتی مرزی بر میدان جریان و دما در جابجایی طبیعی خالص، اعتبارسنجی با مطالعه شریف و محمد [۲۴] نیز انجام شد. اعتبارسنجی تحقیق حاضر برای مقادیر عدد ناسلت متوسط، دمای ماکزیمم در نسبت طول به عرض ۱، زاویه انحراف ۰ درجه و نسبت طول منبع حرارتی به کف  $0.8$  مطابق با هندسه و شرایط مطالعه [۲۴] در جدول ۲

مکان یافت شده توسط خود ذره تعیین می‌شود، به عبارت دیگر، سرعت هر ذره حاصل جمع برداری ناشی از بهترین مکان یافته شده توسط تمام ذرات و بهترین مکان یافت شده توسط ذره مورد نظر است. در سال ۱۹۹۸ شای و ابرهات [۲۱] این الگوریتم را تصحیح کردند و با اضافه کردن ضریب اینرسی  $\omega$  در بهنگام‌سازی معادله سرعت، نسخه اصلاح شده این الگوریتم منتشر شد [۲۱]. این ضریب، اثر سرعت ذره در لحظه قبلی را بر سرعت ذره در لحظه کنونی اضافه می‌کند که کاهش مقدار این پارامتر باعث افزایش سرعت همگرایی می‌شود، ولی احتمال همگرایی به مینیمم‌های محلی را افزایش می‌دهد. ذرات مانند پرندگان واقعی در جهتی حرکت می‌نمایند که ناشی از تعامل بهترین مکان قبلی خود و بهترین مکان ذرات دیگر است. رابطه بهنگام‌سازی سرعت و مکان ذره  $i$  و حامل  $m$  متغیر (بعد) با شمارشگر  $j$  در گام زمانی جدید  $t + 1$  به صورت زیر ارائه می‌شود [۲۲، ۲۱]:

$$X_i(t) = [x_{i1}(t), x_{i2}(t), \dots, x_{im}(t)] \quad (25)$$

$$V_i(t) = [v_{i1}(t), v_{i2}(t), \dots, v_{im}(t)] \quad (26)$$

$$P_i(t) = [p_{i1}(t), p_{i2}(t), \dots, p_{im}(t)] \quad (27)$$

$$P_g(t) = [p_{g1}(t), p_{g2}(t), \dots, p_{gm}(t)] \quad (28)$$

$$v_{ij}(t+1) = \omega(t)v_{ij}(t) + C_1 r_{1,j} (P_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + C_2 r_{2,j} (P_{gj}(t) - x_{ij}(t)) \quad (29)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (30)$$

در روابط فوق  $C_1$  و  $C_2$  ثابت‌های مثبتی به عنوان ضرائب شتاب و  $r_{1,j}$  و  $r_{2,j}$  مقادیر تصادفی در بازه  $[0,1]$  است. همچنین اندیس  $g$  به عنوان موقعیت بهترین ذره  $P_g(t)$  بین جمعیت ذرات از زمان شروع الگوریتم و  $P_i(t)$  به عنوان اندیس بهترین موقعیت ذره  $i$  از ابتدای شروع الگوریتم تاکنون و  $t$ ، نشان‌دهنده شمارنده تکرار است. دمای بی‌بعد ماکزیمم سطح منابع حرارتی به عنوان تابع هدف عبارت است از:

$$\theta_{\max} = \frac{(T_{\max} - T_c)}{q_0'' \frac{H}{k_f}} \quad (31)$$

##### ۳-۱- استقلال از شبکه و همگرایی

در حل جابجایی طبیعی خالص و جابجایی طبیعی توأم با تابش سطحی، از یک شبکه مستطیلی یکنواخت با رویکرد

نشان داده است، اما همانند بسیاری از تکنیک‌های جستجوی تصادفی ممکن است، گرفتار همگرایی زودرس شود [۲۶]. این مشکل به ویژه در مسائل چندنمایی آشکار می‌شود. مشکل همگرایی زودرس در موارد بسیاری به پاسخ‌های بهینه محلی برای مسئله منجر می‌شود. برای حل این مشکل، رویکردهای متنوعی وجود دارد که در بعضی موارد تنظیمات مناسب الگوریتم توسط کاربر منجر به همگرایی به پاسخ بهینه می‌شود. در جدول ۳ توابع محکی که الگوریتم ازدحام ذرات با آن صحت‌سنجی شده معرفی شده است [۲۶]. صحت‌سنجی الگوریتم ازدحام ذرات با توابع محک مذکور انجام شده است. مشاهده می‌شود که کد عددی نوشته شده برای پیاده‌سازی الگوریتم ازدحام ذرات به خوبی توانسته مقدار بهینه تحلیلی را رهگیری کند.

مقایسه شده است. مطابق جدول ۲ در کلیه مقادیر، دمای ماکزیمم و عدد ناسلت میزان خطای نسبی کمتر از 0.2 % است. اعتبارسنجی جابجایی طبیعی توأم با تابش سطحی نیز، با مطالعه ونگ و همکاران [۲۵] انجام شد. شکل ۲ پروفیل دمای صفحه  $X=0.5$  را در تحقیق حاضر و مطالعه ونگ و همکاران [۲۵] در  $Ra = 10^6$  و  $\varepsilon = 0.2$  نشان می‌دهد. تطابق میدان دما و جریان تحقیق حاضر و مطالعه مذکور مشاهده می‌شود.

#### ۳-۴- اعتبارسنجی الگوریتم بهینه‌سازی

برای سنجش الگوریتم مورد بررسی، تعدادی از توابع محک، مورد استفاده قرار گرفته است. اگرچه الگوریتم ازدحام ذرات کارایی بسیار خوبی را از خود در حل مسائل بهینه‌سازی

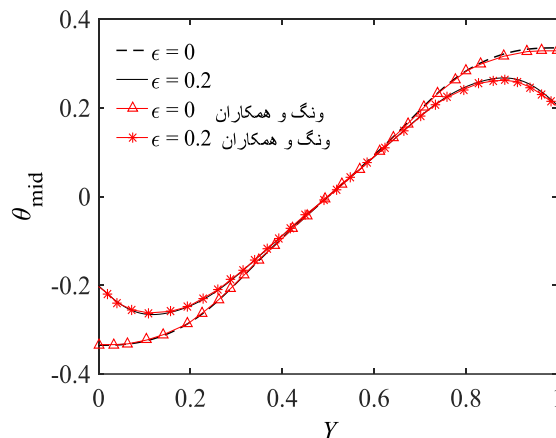
جدول ۲- اعتبارسنجی تحقیق حاضر با نتایج شریف و محمد [۲۴] در عدد ناسلت (سطر اول)، دمای ماکزیمم (سطر دوم) در نسبت طول به عرض ۱، زاویه انحراف ۰ درجه و نسبت طول منبع حرارتی به کف ۰/۸

Gr	مطالعه حاضر	مطالعه شریف و محمد [۲۴]
۱۰ <sup>۳</sup>	۳/۵۷۴۵۸ ۰/۳۶۵۳۶	۳/۵۵۶۱۸ ۰/۳۶۳۷۳
۱۰ <sup>۴</sup>	۳/۷۰۸۷۴ ۰/۳۶۹۲۶	۳/۶۹۱۹۱۶ ۰/۳۶۷۴
۱۰ <sup>۵</sup>	۵/۸۸۷۱۲ ۰/۲۶۵۸۶	۵/۸۶۴۴۳۶ ۰/۲۶۵۱۴
۱۰ <sup>۶</sup>	۹/۳۰۷۳۲ ۰/۱۸۰۱۱	۹/۲۸۷۹۷۲ ۰/۱۷۹۲۵

#### جدول ۳- جزئیات توابع محک [۲۶]

معادله تابع	بازه مورد بررسی	مقدار مینیمم	مقدار بهینه الگوریتم PSO
$f_1(x) = \sum_{i=1}^n (x_i^2)$	$[-5/12, 5/12]$	۰	$1/4390 \times 10^{-14}$
$f_2(x) = (x_2 + x_1^2 - 11)^2 + (x_1 + x_2^2 - 7)^2 + x_1$	$[-5, 5]$	-۳/۷۸۳۹۶	-۳/۷۸۳۸
$f_3(x) = \sum_{j=1}^5 (j \cos((j+1)x_1 + j)) \sum_{j=1}^5 (j \cos((j+1)x_2 + j))$	$[-10, 10]$	-۱۸۶/۷۳۰۹	-۱۸۶/۷۳۰۸
$f_4(x) = -\sum_{j=1}^n x_j \sin(\sqrt{ x_j })$	$[-500, 500]$	-۸۳۷/۹۶۵۸	-۸۳۷/۹۶۵۸
$f_5(x) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10)$	$[-5/12, 5/12]$	۰	$7/35588 \times 10^{-5}$

الگوریتم، ماکزیمم تکرار با اعداد ۱۰، ۲۰ و تعداد ذرات با اعداد ۱۰، ۲۰ و ۴۰، بهینه‌یابی موقعیت منابع حرارتی در چیدمان با سه منبع حرارتی در  $Ra=10^6$  برای جابجایی خالص امتحان گشت و از ضمانت همگرایی با ماکزیمم تکرار ۱۰ و تعداد ذرات ۲۰ با خطای نسبی کمتر از ۰/۱٪ اطمینان حاصل شد. در شکل ۳ برخی از آزمون‌های انجام شده جهت اطمینان از روند همگرایی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که الگوریتم با ۱۰ تکرار و ۲۰ ذره توانسته به مقدار همگرایی با ۱۰ تکرار و ۴۰ ذره با دقت خوبی همگرا شود. شاید به نظر رسد که ۱۰ تکرار، تعداد مناسبی برای رسیدن به همگرایی به مقدار بهینه مطلق نباشد، اما با توجه به کوچک بودن بازه جستجوی موقعیت منابع حرارتی و همچنین ابعاد شبکه  $71 \times 71$ ، این تعداد تکرار با ۲۰ ذره کافی است و این موضوع برای برخی از رژیم‌های دیگر جریان و ضرائب صدور نیز ثابت شد. افزایش تعداد تکرار و تعداد ذرات، نه تنها منجر به هزینه سنگین زمان اجرای برنامه می‌شود، بلکه دیگر اجرای الگوریتم را در برابر جستجوی گام به گام، منطقی و موجه نمی‌سازد.



شکل ۱- اعتبارسنجی با مطالعه ونگ و همکاران [۲۵]

#### ۴-۴- تنظیمات الگوریتم بهینه‌سازی

با توجه به زمان‌بر بودن حل مسئله در محاسبه تابع هدف، تعداد ذرات و تعداد تکرار باید کمترین مقدار ممکن را بگیرد و در عین حال همگرایی به مقادیر بهینه متغیرهای طراحی را تضمین دهد. در جدول ۴ پارامترهای تنظیم در الگوریتم ازدحام ذرات شرح داده شده است؛ همچنین برای اطمینان از همگرایی

جدول ۴- پارامترهای تنظیم در الگوریتم ازدحام ذرات

مقدار	توصیف پارامتر	پارامتر
۲ یا ۳	ابعاد مسئله یا متغیرهای طراحی	$m$
$[0, 0/8]$ در چیدمان با دو منبع حرارتی $[0, 0/7]$ در چیدمان با سه منبع حرارتی	بازه متغیرهای طراحی	$S_{0,h}$ و $S_{1,h}$ در چیدمان با ۲ منبع حرارتی $S_{2,h}$ و $S_{1,h}$ در چیدمان با ۳ منبع حرارتی
۰/۷۲۹۸	ضریب اینرسی	$\omega(t)$
۲	ضرائب شتاب	$C_1, C_2$
$\pm 0/1$	ماکزیمم و مینیمم سرعت	$V_{max}, V_{min}$
۱۰	ماکزیمم تکرار	$t_{max}$
۲۰	تعداد ذرات	$i_{max}$



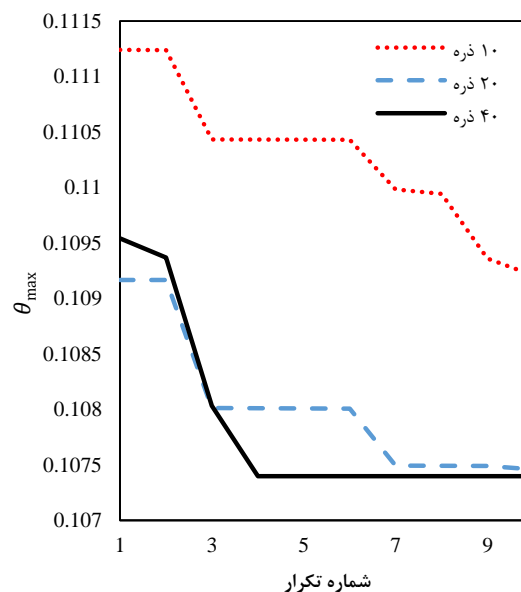
می‌یابد. برای  $Ra = 10^5$  نیز، موقعیت مینیمم دمای بی‌بعد ماکزیمم سطح و مقدار آن با افزایش ضریب صدور از ۰ تا ۰/۸ به ترتیب از ۰/۱۱۲۳ به ۰/۰۹۳۰ (۱۷٪ کاهش) و ۰/۳ به ۰/۳۷ تغییر می‌کند. به همین ترتیب برای  $Ra = 10^6$  نیز با افزایش ضریب صدور از ۰ تا ۰/۸، مینیمم دمای بی‌بعد ماکزیمم سطح و موقعیت آن به ترتیب از ۰/۰۷۵۲ به ۰/۰۶۸۰ (۹٪ کاهش) و ۰/۲۶ به ۰/۳۳ تغییر می‌یابد. در مطالعه هاتا و همکاران [۱۴] نیز مشاهده شد که با تغییر رنگ سطح از صیقلی به سیاه (افزایش ضریب صدور)، دمای ماکزیمم ۱۰٪ کاهش می‌یابد و با افزایش پارامتر فاصله هندسی بی‌بعد، دمای ماکزیمم سطح منبع حرارتی کاهش می‌یابد.

#### ۵-۲- چیدمان با دو منبع حرارتی

در شکل ۵ بهینه‌یابی موقعیت منابع حرارتی برای مینیمم‌سازی دمای بی‌بعد ماکزیمم در چیدمان با ۲ منبع حرارتی با در نظر گرفتن تابش سطحی انجام شده است. مشاهده می‌شود که در هر عدد رایلی با افزایش ضریب صدور، موقعیت بهینه هر دو منبع حرارتی از کف فاصله می‌گیرد؛ همچنین با افزایش عدد رایلی، مینیمم دمای بی‌بعد ماکزیمم سطوح منابع حرارتی کاهش می‌یابد. با افزایش ضریب صدور در هر عدد رایلی نیز مشاهده می‌شود که مینیمم دمای بی‌بعد ماکزیمم سطوح منابع حرارتی کاهش می‌یابد. به علاوه بازه تغییرات مینیمم دمای بی‌بعد ماکزیمم سطوح منابع حرارتی با تغییرات ضریب صدور، با افزایش عدد رایلی کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش عدد رایلی، انتقال حرارت غالب از رسانش به جابجایی تغییر می‌یابد و اثرات تابش سطح در تغییرات دما کاهش می‌یابد.

#### ۵-۳- چیدمان با سه منبع حرارتی

شکل ۵ شکل ۶ به ترتیب موقعیت بهینه منابع حرارتی برای مینیمم‌سازی دمای بی‌بعد ماکزیمم و دمای بی‌بعد ماکزیمم سطوح منابع حرارتی در چیدمان با سه منبع حرارتی را با در نظر گرفتن تابش سطحی نشان می‌دهد. برخلاف چیدمان با دو منبع حرارتی که موقعیت بهینه منابع حرارتی در هر ضریب صدور با افزایش عدد رایلی روند تقریباً کاهشی داشت، موقعیت بهینه منابع حرارتی  $S_{0,h}$  و  $S_{2,h}$  در هر ضریب صدور

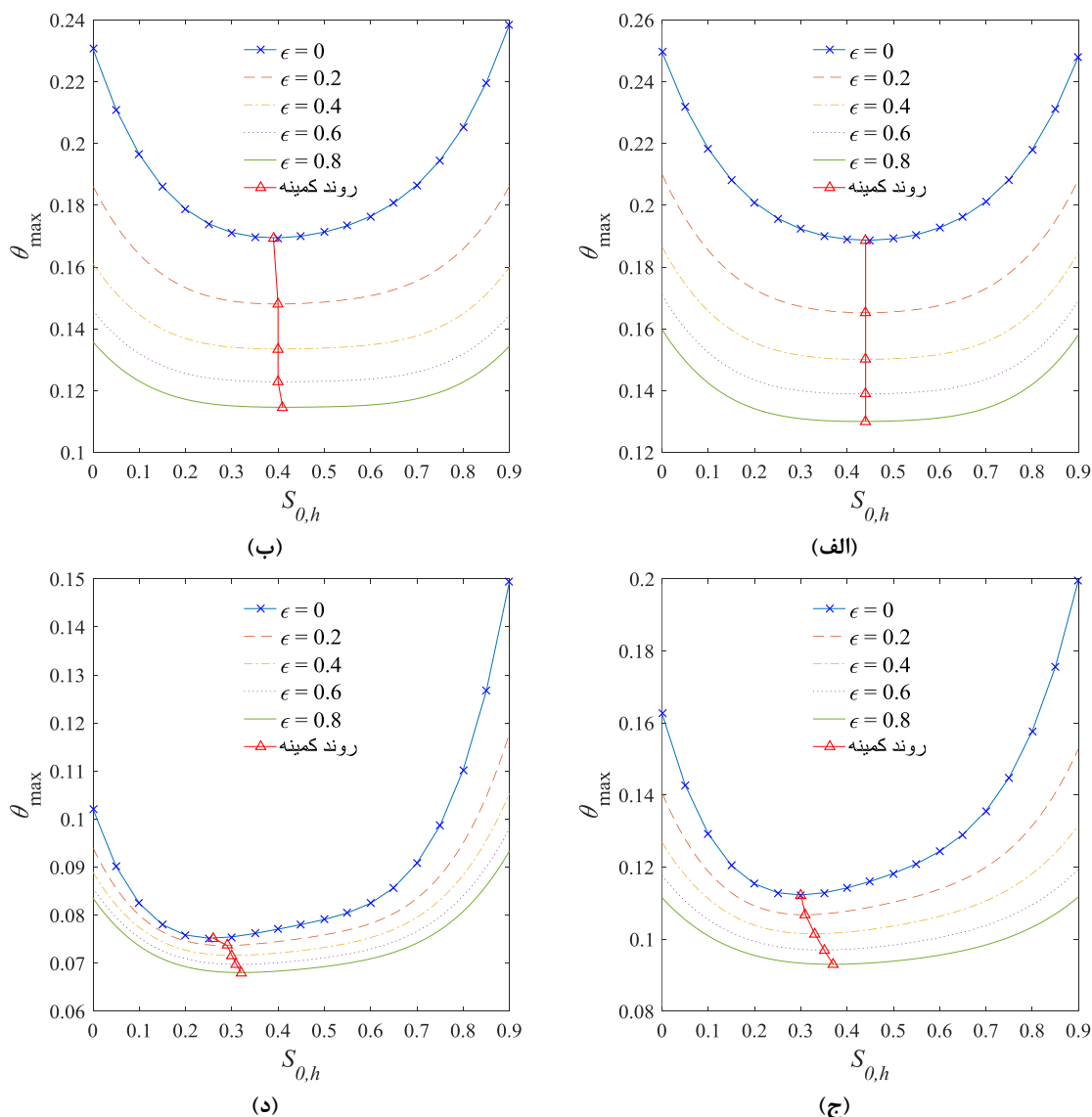


شکل ۲- روند همگرایی تابع هدف در چیدمان با ۳ منبع حرارتی در  $Ra=10^6$  برای جابجایی خالص با ۱۰ تکرار

#### ۵- نتایج

##### ۵-۱- چیدمان با یک منبع حرارتی

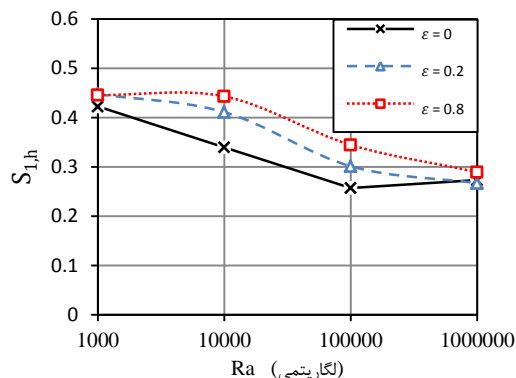
اثر تابش سطحی بر دمای بی‌بعد ماکزیمم سطح منبع حرارتی در موقعیت‌های مختلف منبع حرارتی، در شکل ۴ مشاهده می‌شود. به طور کلی مشاهده می‌شود که مینیمم دمای بی‌بعد ماکزیمم سطح با افزایش ضریب صدور کاهش می‌یابد. سوانت و راثو [۱۲] نیز نشان دادند که با افزایش ضریب صدور، دمای ماکزیمم سطح برد الکترونیکی کاهش می‌یابد. با افزایش عدد رایلی، دمای بی‌بعد ماکزیمم در ضریب صدور یکسان، برای هر موقعیت منبع حرارتی کاهش می‌یابد؛ همچنین با افزایش عدد رایلی، با تغییر انتقال حرارت غالب از نفوذ به جابجایی، تقارن تغییرات دما از بین می‌رود و موقعیت بهینه از مرکز به سمت کف نزدیک می‌شود. در مطالعه سلیمانی و همکاران [۱۱] نیز نشان داده شد که چیدمان بهینه تابعی از عدد رایلی و اندازه منبع حرارتی است. برای  $Ra = 10^4$  و  $Ra = 10^6$  موقعیت بهینه دمای بی‌بعد ماکزیمم با تغییر ضریب صدور از ۰ تا ۰/۸، کمتر از ۰/۰۲ تغییر می‌کند و در  $S_{0,h} = 0.45$  تقریباً باقی می‌ماند؛ هرچند که مقدار دمای بی‌بعد ماکزیمم به ترتیب از ۰/۱۸۸۷ به ۰/۱۳ (۳۱٪ کاهش) و از ۰/۱۶۹۴ به ۰/۱۱۴۶ (۳۲٪ کاهش)



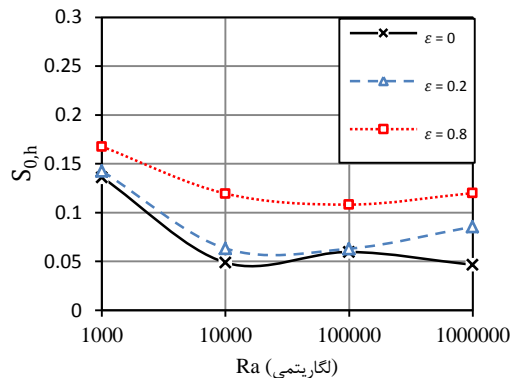
شکل ۳- اثر تابش بر تغییرات ماکزیمم دمای بی‌بعد سطح منبع حرارتی در موقعیت‌های مختلف منابع حرارتی در اعداد رایلی مختلف (الف)  $Ra = 10^2$ ، (ب)  $Ra = 10^4$ ، (ج)  $Ra = 10^5$  و (د)  $Ra = 10^6$

موقعیت بهینه منابع حرارتی برای مینیمم‌سازی دمای سطوح منابع حرارتی را پیچیده می‌کند و از این حیث به کارگیری یک الگوریتم بهینه‌ساز را موجه می‌سازد. در چیدمان با سه منبع حرارتی مطابق شکل ۶ نیز مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رایلی، مینیمم دمای بی‌بعد ماکزیمم سطوح منابع حرارتی کاهش می‌یابد و با افزایش ضریب صدور در هر عدد رایلی نیز مشاهده می‌شود که مینیمم دمای بی‌بعد ماکزیمم سطوح منابع حرارتی کاهش می‌یابد.

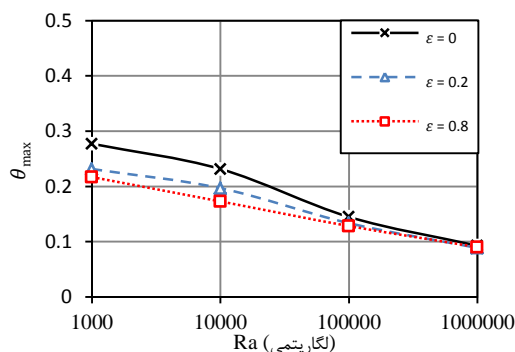
با افزایش عدد رایلی روند منظمی ندارد. این موضوع این فرضیه را به وجود آورد که شاید موقعیت بهینه یافت شده صحیح یا بهینه مطلق نباشد، با این حال با افزایش تعداد تکرارها و تعداد ذرات، مجدد نتیجه قبل گرفته شد. بر مبنای تئوری ساختاری بیژن [۲۷]، روند تغییرات چیدمان بهینه، تابع عوامل مختلفی همچون تعداد منابع، اندازه نوار، عدد رایلی و حتی تغییرات ضخامت لایه مرزی است؛ همچنین با ورود تابش سطحی و افزایش تعداد منابع حرارتی، یافتن



(ب)



(الف)



(ج)

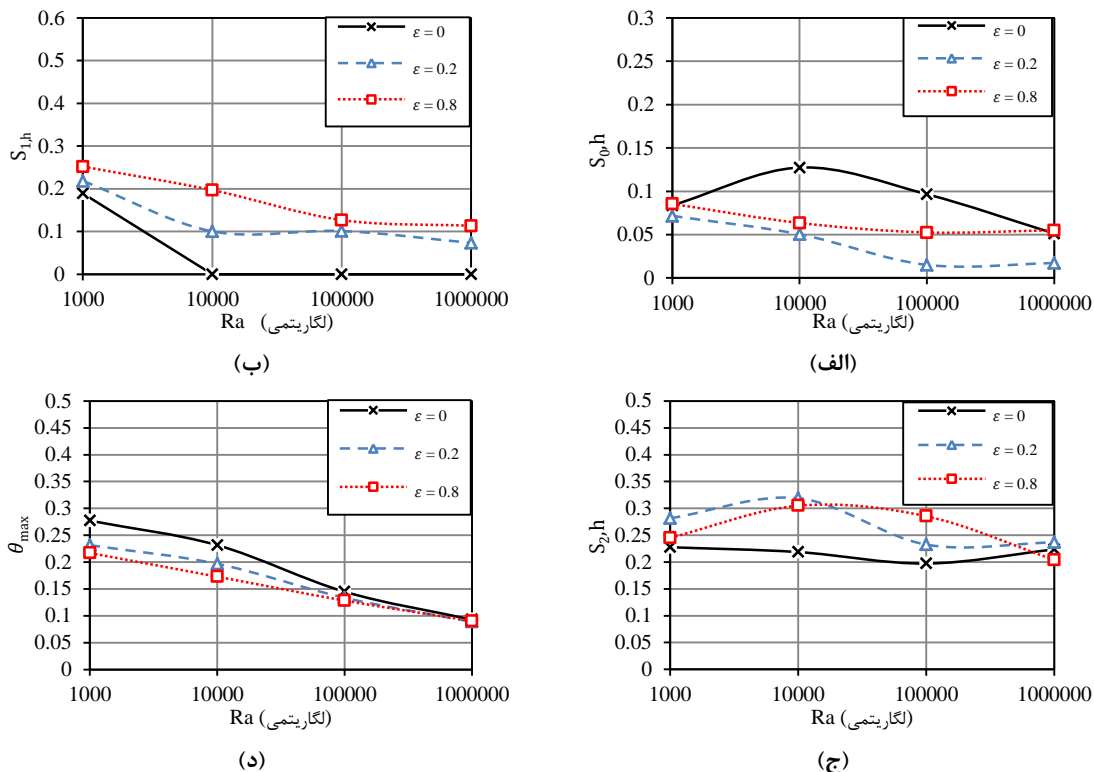
شکل ۴- اثر تابش بر موقعیت بهینه منابع حرارتی (الف-ب) و دمای بی بعد ماکزیمم (ج) در چیدمان با دو منبع حرارتی در اعداد رایلی مختلف

#### ۴-۵- مقایسه نتایج چیدمان‌ها

برای قیاس میان موقعیت بهینه منابع حرارتی در چیدمان‌های مختلف، موقعیت بهینه مرکز سطح منابع حرارتی در هر چیدمان می‌تواند پارامتر مناسبی باشد که در جدول ۵ برای چیدمان با دو منبع و سه منبع حرارتی نشان داده شده است. اگرچه مشاهده شد که در چیدمان با سه منبع حرارتی، موقعیت بهینه هر منبع روند نامنظمی را در پیش می‌گیرد، با این وجود ارتباط معناداری میان موقعیت بهینه مرکز سطح منابع حرارتی برای هر چیدمان وجود دارد که نتایج را موجه می‌سازد:

مشاهده شد که با افزایش ضریب صدور، منابع حرارتی به گونه‌ای فاصله خود را از هم تنظیم می‌کنند تا موقعیت مرکز سطح منابع حرارتی، به خط مرکز تقارن شرایط مرزی حرارتی ( $Y=0/50$ ) نزدیک شود. این موضوع در هر ۳ چیدمان صادق است.

- مشاهده شد که برخلاف روند نامنظم موقعیت بهینه منابع حرارتی در چیدمان با سه منبع حرارتی، موقعیت بهینه مرکز سطح منابع حرارتی در این چیدمان و چیدمان با دو منبع حرارتی، به یکدیگر نزدیک است. برای مثال مطابق جدول ۵، در  $Ra=10^6$  در تمامی ضرایب صدور، اختلاف نسبی میان موقعیت بهینه مرکز سطح منابع حرارتی کمتر از ۱۰٪ است.
- موقعیت بهینه مرکز سطح منابع حرارتی برای هر ۳ چیدمان و در هر ضریب صدور با افزایش عدد رایلی به سمت کف نزدیک شد که خود موید تغییر انتقال حرارت غالب جریان از نفوذ به جابجایی است. با افزایش عدد رایلی، گردش جریان به گونه‌ای است که مرکز برخورد توده پر سرعت سیال به پایین‌تر از وسط محفظه انتقال می‌یابد؛ لذا منابع حرارتی جهت تبادل حرارت بیشتر و کاهش دمای سطح، فاصله مرکز سطح خود را به کف می‌رسانند.



شکل ۵- اثر تابش بر موقعیت بهینه منابع حرارتی (الف-ب-ج) و دمای بی‌بعد ماکزیمم (د) در چیدمان با دو منبع حرارتی در اعداد رایلی مختلف

ازدحام ذرات به ترتیب به عنوان متغیرهای طراحی، تابع هدف و الگوریتم بهینه‌یاب انتخاب شد. به طور کلی نتایج نشان داد، با افزایش عدد رایلی، موقعیت بهینه مرکز سطح منابع حرارتی برای هر ۳ چیدمان به سمت کف نزدیک می‌شود. علی‌رغم وجود روند نامنظم موقعیت بهینه منابع حرارتی در چیدمان با سه منبع حرارتی، موقعیت بهینه مرکز سطح منابع حرارتی در این چیدمان و چیدمان با دو منبع حرارتی با یکدیگر مطابقت نسبی دارد. با افزایش ضریب صدور در هر عدد رایلی نیز، موقعیت بهینه مرکز سطح منابع حرارتی در هر ۳ چیدمان به سمت مرکز نزدیک می‌شود. در هر سه چیدمان، با افزایش عدد رایلی، مینیمم دمای بی‌بعد ماکزیمم سطوح منابع حرارتی کاهش می‌یابد. با افزایش ضریب صدور در هر عدد رایلی نیز، مینیمم دمای بی‌بعد ماکزیمم سطوح منابع حرارتی کاهش می‌یابد. به طور کلی در این مطالعه مشاهده شد که روند تغییرات چیدمان بهینه، تابع عوامل مختلفی همچون تعداد

جدول ۵- موقعیت بهینه مرکز سطح منابع حرارتی

Ra	چیدمان با دو منبع			چیدمان با سه منبع		
	ε	ε	ε	ε	ε	ε
۱۰ <sup>۳</sup>	۰	۰/۲	۰/۸	۰	۰/۲	۰/۸
۱۰ <sup>۴</sup>	۰/۴۵	۰/۴۷	۰/۴۹	۰/۴۴	۰/۴۶	۰/۴۹
۱۰ <sup>۵</sup>	۰/۳۲	۰/۳۷	۰/۴۴	۰/۳۵	۰/۳۷	۰/۴۵
۱۰ <sup>۶</sup>	۰/۲۸	۰/۳۲	۰/۳۶	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۳۵

### ۶- نتیجه‌گیری

انتقال حرارت جابجایی طبیعی توأم با تابش سطحی در یک محفظه دو بعدی به همراه منابع حرارتی واقع در دیواره عمودی تحلیل شد. موقعیت منابع حرارتی شار ثابت مرزی، مینیمم دمای ماکزیمم سطح منابع حرارتی و الگوریتم

مقدار تصادفی در PSO	$r_{1,j}$	منابع، عدد رایلی و تابش سطحی است که مطالعات بیشتری را جهت رسیدن به یک ساختار بهینه می‌طلبد.
مقدار تصادفی در PSO	$r_{2,j}$	
فاصله میان منابع حرارتی (m)	$S_i$	<b>۷- فهرست علائم</b>
فاصله بی‌بعد میان منابع حرارتی	$S_{i,h} \left(\frac{S_i}{H}\right)$	ظرفیت گرمایی ویژه هوا (J/kgK)
دما (K)	$T$	ضرائب شتاب در PSO
دمای دیواره سرد (K)	$T_c$	اندازه نوار منبع حرارتی (m)
شمارنده تکرار	$t$	ضریب دید سطح المان $k$ ام نسبت به المان $j$ ام
مولفه افقی سرعت (m/s)	$u$	شتاب گرانشی ( $m/s^2$ )
مولفه بی‌بعد افقی سرعت	$U$	طول و عرض محفظه (m)
مولفه عمودی سرعت (m/s)	$v$	هدایت گرمایی سیال (W/mK)
مولفه بی‌بعد عمودی سرعت	$V$	تعداد کل المان‌های سطوح دیواره‌ای داخلی محفظه
سرعت ذره $i$ در PSO	$V_i(t)$	عدد تابش-رسانش
مختصات کارتیزین (m)	$x, y$	فشار ( $N/m^2$ )
مختصات بی‌بعد کارتیزین	$X, Y$	موقعیت بهترین ذره بین جمعیت ذرات از زمان شروع الگوریتم
موقعیت ذره $i$ در PSO	$X_i(t)$	اندیس بهترین موقعیت ذره $i$ از ابتدای شروع الگوریتم تاکنون
	<b>علائم یونانی</b>	
ضریب انبساط حرارتی (1/K)	$\beta$	عدد پرانتل
دلتای کرونکر	$\delta$	شار حرارتی ( $W/m^2$ )
ضریب صدور دیواره‌های محفظه	$\varepsilon$	شار منبع حرارتی ( $W/m^2$ )
دمای بی‌بعد	$\theta$	شار خالص تابشی سطح ( $W/m^2$ )
لزجت دینامیکی (kg/ms)	$\mu$	شار بی‌بعد خالص تابشی سطح
لزجت سینماتیکی ( $m^2/s$ )	$\nu$	شار ورودی به المان سطح $j$ ام ( $W/m^2$ )
چگالی سیال ( $kg/m^3$ )	$\rho$	شار بی‌بعد ورودی به المان سطح $j$ ام
ثابت استفان بولتزمن ( $W/m^2K^4$ )	$\sigma$	شار خروجی از المان سطح $j$ ام ( $W/m^2$ )
تابع جریان ( $m^2/s$ )	$\psi$	شار بی‌بعد خروجی از المان سطح $j$ ام
تابع جریان بی‌بعد	$\Psi$	عدد رایلی
ورتیسیتیته (1/s) یا ضریب اینرسی در PSO	$\omega$	

- Mass Transf 38: 620-624.
- [۹] پایان س. عظیمی فر آ (۲۰۱۷) کمیته‌سازی میزان انتقال حرارت از محفظه‌های مستطیلی با جابجایی آزاد در نسبت-های منظری مختلف با یافتن مشخصات آرایه‌ای از پره‌های نازک عایق به وسیله الگوریتم کوچ پرندگان. نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر.
- [10] Baïri A, de María JMG, Baïri I, et al (2012) 2D transient natural convection in diode cavities containing an electronic equipment with discrete active bands under constant heat flux. *Int J Heat Mass Transf* 55: 4970-4980.
- [11] Soleimani S, Ganji DD, Gorji M, et al (2011) Optimal location of a pair heat source-sink in an enclosed square cavity with natural convection through PSO algorithm. *Int Commun Heat Mass Transf* 38: 652-658.
- [12] Sawant SM, Rao CG (2008) Conjugate mixed convection with surface radiation from a vertical electronic board with multiple discrete heat sources. *Heat Mass Transf* 44: 1485.
- [13] Ahamad SI, Balaji C (2016) Inverse conjugate mixed convection in a vertical substrate with protruding heat sources: a combined experimental and numerical study. *Heat Mass Transf* 52: 1243-1254.
- [14] Hotta TK, Muvvala P, Venkateshan SP (2013) Effect of surface radiation heat transfer on the optimal distribution of discrete heat sources under natural convection. *Heat Mass Transf* 49: 207-217.
- [15] Raji A, Hasnaoui M (2001) Combined mixed convection and radiation in ventilated cavities. *Eng Comput* 18: 922-949.
- [16] Ridouane EH, Hasnaoui M, Amahmid A, Raji A (2004) Interaction between natural convection and radiation in a square cavity heated from below. *Numer Heat Transf Part A Appl* 45: 289-311.
- [17] Howell JR, Menguc MP, Siegel R (2010) Thermal radiation heat transfer. CRC press.
- [18] Kennedy J, Eberhart R (1995) Proceedings of IEEE international conference on neural networks. Perth, Aust.
- [19] Eberhart R, Kennedy J (1995) A new optimizer using particle swarm theory. In: *Micro Machine and Human Science, 1995. MHS'95., Proceedings of the Sixth International Symposium on IEEE* 39-43
- [20] Zarakı A, Othman MF Bin (2009) Implementing particle swarm optimization to solve economic load dispatch problem. In: *Soft Computing and Pattern Recognition, 2009. SOCPAR'09. International Conference of IEEE* 60-65.
- [21] Shi Y, Eberhart R (1998) A modified particle
- ور تیسسته بی‌بعد  $\Omega$
- مقدار متوسط avg
- جابجایی c
- ماکزیمم max
- تابشی r
- بالانویس‌ها
- مرحله‌ی بعد new
- مرحله‌ی قبل old
- ۸- مراجع
- [1] de Vahl Davis G, Jones IP (1983) Natural convection in a square cavity: a comparison exercise. *Int J Numer methods fluids* 3: 227-248.
- [2] Cheikh N Ben, Beya B Ben, Lili T (2007) Influence of thermal boundary conditions on natural convection in a square enclosure partially heated from below. *Int Commun heat mass Transf* 34: 369-379.
- [3] Chu H-S, Churchill SW, Patterson CVS (1976) The effect of heater size, location, aspect ratio, and boundary conditions on two-dimensional, laminar, natural convection in rectangular channels. *J Heat Transfer* 98: 194-201.
- [4] Türkoglu H, Yücel N (1995) Effect of heater and cooler locations on natural convection in square cavities. *Numer Heat Transf Part A Appl* 27: 351-358.
- [5] Ngo I-L, Byon C (2015) Effects of heater location and heater size on the natural convection heat transfer in a square cavity using finite element method. *J Mech Sci Technol* 29: 2995-3003.
- [6] Da Silva AK, Lorente S, Bejan A (2004) Optimal distribution of discrete heat sources on a wall with natural convection. *Int J Heat Mass Transf* 47: 203-214.
- [7] Rahimi-Gorji M, Ghajar M, Kakaee A-H, Ganji DD (2017) Modeling of the air conditions effects on the power and fuel consumption of the SI engine using neural networks and regression. *J Brazilian Soc Mech Sci Eng* 39: 375-384.
- [8] Kadiyala PK, Chattopadhyay H (2011) Optimal location of three heat sources on the wall of a square cavity using genetic algorithms integrated with artificial neural networks. *Int Commun Heat*

- the bottom wall and isothermal cooling from the sidewalls. *Int J Therm Sci* 44: 865-878.
- [25] Wang H, Xin S, Le Quéré P (2006) Étude numérique du couplage de la convection naturelle avec le rayonnement de surfaces en cavité carrée remplie d'air. *Comptes Rendus Mécanique* 334: 48-57.
- [26] Pant M, Thangaraj R, Abraham A (2009) Particle swarm optimization: performance tuning and empirical analysis. *Found Comput Intell* 3: 101-128.
- [27] Bejan A, Lorente S (2008) Design with constructal theory.
- swarm optimizer. In: *Evolutionary Computation Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence., The 1998 IEEE International Conference on IEEE* 69-73.
- [22] Ding P (2012) Solution of inverse convection heat transfer problem using an enhanced particle swarm optimization algorithm. *J Heat Transfer* 134: 11702.
- [23] de Vahl Davis G (1983) Natural convection of air in a square cavity: a bench mark numerical solution. *Int J Numer methods fluids* 3: 249-264.
- [24] Sharif MAR, Mohammad TR (2005) Natural convection in cavities with constant flux heating at