



## طراحی معکوس محفظه‌های تابشی با توزیع چشمه داخلی و سطح طراحی پخشی - غیر خاکستری

شهرزاد میرزایی<sup>1</sup>، سیدمسعود حسینی سروری<sup>2\*</sup>

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان

\* sarvari@uk.ac.ir, 76175-133 صندوق پستی کرمان

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 11 اردیبهشت 1395

پذیرش: 10 مرداد 1395

ارائه در سایت: 02 مهر 1395

کلید واژگان:

طراحی معکوس

سطح طراحی پخشی

غیرخاکستری

محیط جذب کننده - صادر کننده

روش چشمه‌های مجزا

### چکیده

در این مقاله طراحی معکوس با استفاده از یک روش بهینه‌سازی برای تعیین توزیع چشمه حرارتی نامعلوم در یک محفظه تابشی دوبعدی، به منظور تولید توان صدور و شار حرارتی مطلوب روی سطح طراحی پخشی - غیرخاکستری مورد مطالعه قرار می‌گیرد. محیط محفظه، جذب کننده - صادرکننده بوده و ضریب صدور سطح طراحی نسبت به طول موج متغیر فرض می‌شود. ضریب صدور در هر فاصله کوچک طول موج ثابت فرض می‌شود و مسئله مستقیم با استفاده از روش جهت‌های مجزا، روی هر فاصله طول موج حل می‌شود. شار حرارتی کلی در هر امان سطح، از حاصل جمع شارهای حرارتی بر تمامی طول موج‌ها به دست می‌آید. از روش بهینه‌سازی گرادینان مزدوج، برای حل مسئله معکوس و کمینه کردن یک تابع هدف مناسب استفاده می‌شود. تابع هدف به صورت مجموع مربعات تفاضل شار حرارتی مطلوب و شار حرارتی محاسبه شده بر سطح طراحی تعریف می‌شود و ماتریس حساسیت با مشتق‌گیری از معادله انتقال تابش نسبت به متغیرهای مجهول محاسبه می‌شود. نتایج حاصل از حل برای دو مسئله نمونه در دو حالت سطح طراحی خاکستری و غیرخاکستری با یکدیگر مقایسه می‌شوند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که توزیع چشمه حرارتی با توجه به شار حرارتی مطلوب تعیین شده بر سطح طراحی به خوبی و در بازه مناسبی از دقت بازیابی می‌شود.

## Inverse Design of Radiant Enclosures with Internal Source Distribution and Diffuse-Nongray Design Surface

Shahrzad Mirzaie, Seyed Masoud Hoseini Sarvari\*

Department of Mechanical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

\* P.O.B. 76175-133 Kerman, Iran, sarvari@uk.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 30 April 2016  
Accepted 31 July 2016  
Available Online 23 September 2016

#### Keywords:

Inverse design  
Diffuse-nongray design surface  
Emitting-absorbing medium  
Discrete ordinates method

### ABSTRACT

In this paper, inverse design to determine unknown heat source distribution in a radiant enclosure using an optimization method is investigated to produce desired emissive power and heat flux profiles on a diffuse-nongray design surface of a two-dimensional radiant enclosure. The medium of enclosure is emitting-absorbing, and the design surface emissivity is assumed to be varied with respect to wavelength. Regarding diffuse-nongray design surface, the variation of emissivity with respect to the wavelength is approximated by considering a set of nongray bands with constant emissivity and then the radiative transfer equation is solved by the discrete ordinates method for each band. The total heat flux on each surface element of the design surface is approximated by a summation over the contribution of nongray bands. The conjugate gradient method is used to minimize an objective function, expressed by the sum of square residuals between estimated and desired heat fluxes over the design surface. The sensitivity problem is approximated by differentiation of the radiative transfer equation with respect to the unknown variables. The performance of the present method is evaluated by comparing the results with those obtained by considering a diffuse-gray design surface. The results show that the heat source distribution is well recovered over the heat flux specified design surface in an appropriate range of accuracy.

### 1-مقدمه

پیش‌بینی‌شده رضایت‌بخش بود، مجموعه طراحی قابل قبول است. در غیراین صورت برخی مقادیر در مجموعه طراحی تغییر کرده و پیشگویی تکرار می‌شود. سپس فرایند تکرار تا دستیابی به یک مجموعه طراحی مناسب ادامه می‌یابد تا به گونه‌ای رضایت‌بخش اهداف طراحی را برآورده سازد. آشکار است که این فرایند مبتنی بر سعی و خطا نیازمند صرف وقت زیادی است، و اگرچه ممکن است حل نهایی قابل قبول باشد به ندرت بهینه خواهد بود.

طراحی متداول سیستم‌های حرارتی شامل انتقال حرارت تابشی، دارای پیچیدگی‌های فراوانی است. در این روش طراحی که طراحی مستقیم نامیده می‌شود، شرایط مرزی و خواص تابشی روی هر یک از اجزاء مرزی سیستم از پیش معلوم است. این مجموعه طراحی سپس در غالب معادلات حاکم برای پیشگویی رفتار حرارتی سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. چنانچه رفتار

تابشی با سطح طراحی غیرخاکستری درحضور یک محیط شفاف را با استفاده از بهینه‌سازی توان گرمکن‌ها روی سطح مرزی مورد بررسی قرار داده‌اند. با توجه به اطلاعات نویسندگان مقاله، تا به حال طراحی معکوس با هدف تولید توزیع چشمه حرارتی مناسب در محیط جذب‌کننده-صادرکننده و با در نظر گرفتن سطح طراحی غیرخاکستری مورد بررسی قرار نگرفته است. در پژوهش پیش‌رو علاوه بر غیرخاکستری بودن سطح طراحی، محیط محفظه جذب‌کننده-صادرکننده در نظر گرفته شده است و هدف از حل مسئله محاسبه توزیع چشمه حرارتی در داخل میدان است.

در مطالعه حاضر، ضریب صدور برای هر فاصله کوچک طول موج ثابت فرض می‌شود و با توجه به محیط جذب‌کننده-صادرکننده در محفظه تابشی، از روش جهت‌های مجزا برای حل معادله انتقال تابش در هر فاصله طول موج استفاده می‌شود. حل معکوس مبتنی بر روش گرادیان مزدوج جهت کمینه کردن یک تابع هدف که به صورت حاصل جمع مربعات اختلاف شار حرارتی مطلوب با محاسبه شده تعریف می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از حل معکوس برای دو حالت سطح طراحی خاکستری و غیرخاکستری مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

## 2- تعریف مسئله معکوس

شکل 1 یک محفظه تابشی را نشان می‌دهد. محیط محفظه خاکستری و جذب‌کننده-صادرکننده با ضریب جذب یکنواخت است. سطح طراحی (سطحی که در آن دما و شار حرارتی هر دو معلوم است) سطحی پخشی-غیرخاکستری است، به گونه‌ای که ضرایب صدور، جذب و انعکاس مستقل از جهت بوده اما به طول موج و دما وابسته است. سایر دیواره‌های محفظه پخشی و خاکستری است. دما روی همه دیواره‌های اتاقک مشخص است. هدف از حل این مسئله به دست آوردن توزیع چشمه حرارتی در ناحیه چشمه حرارتی (ناحیه مربعی چشمه حرارتی در وسط محفظه) است به گونه‌ای که توزیع شار حرارتی یکنواخت مطلوب روی سطح طراحی حاصل شود.

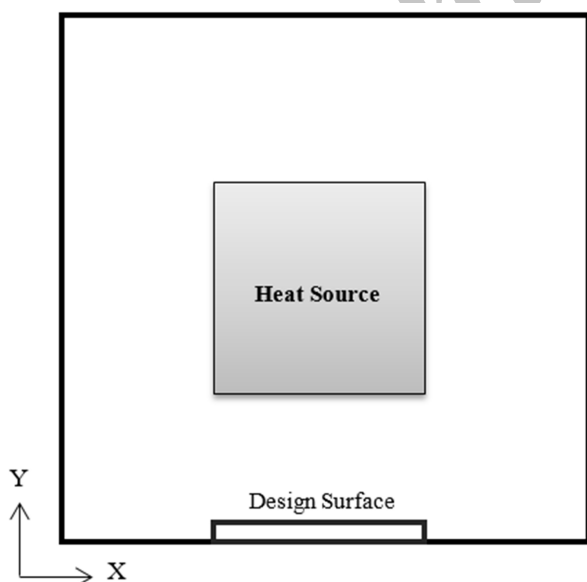


Fig. 1 The geometry of the square radiant enclosure containing an absorbing-emitting medium with a heat source generation

شکل 1 محفظه تابشی مربعی شامل محیط جذب‌کننده-صادرکننده با وجود چشمه حرارتی

طراح در طراحی معکوس تمایل دارد هر دو شرط مرزی را به گونه‌ای ایجاد کند که شرایط عملکرد مطلوب ارضاء شود؛ بنابراین در حالی که در مسئله مستقیم علت داده شده و معلول محاسبه می‌شود، در مسئله معکوس علت با استفاده از اطلاعات معلول ارزیابی می‌شود. فرآیند تکراری غیرقابل کنترل در طراحی مستقیم را می‌توان با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی بهبود بخشید. روش‌های بهینه‌سازی برخلاف روش‌های مستقیم مبتنی بر سعی و خطا، روش‌های هوشمندی هستند که فرآیند تکراری را به سوی ایجاد شرایط مطلوب طراحی هدایت می‌کنند. به عبارت دیگر طراحی معکوس مرزی به طراحی یک سیستم گفته می‌شود که برای آن هدف طراحی، هندسه و خواص مواد مشخص است و شرایط مورد نیاز برای ارضاء شرایط حرارتی مطلوب باید ارزیابی شوند.

هاول و همکاران [1] از روش حل معکوس برای تعیین یک طراحی اولیه تقریبی به منظور استفاده در تجهیزات حرارتی استفاده کرده‌اند. اوگاما و هاو [2] یک روش معکوس بر مبنای روش مونت کارلو برای دسته‌ای از مسائل انتقال تابش معکوس ارائه کرده‌اند. کاربرد روش‌های تنظیمی برای حل مسئله معکوس تبادل تابش درون اتاقک‌های شامل دیواره‌های پخشی و خاکستری توسط هاروتانیان و همکاران [3] تشریح شده است. ماتسومورا و همکاران [4] روشی برای طراحی مرزی بهینه کوره‌ها با استفاده از روش‌های حل معکوس توسعه داده‌اند. مورالز و همکاران [5] یک فرآیند طراحی مرزی معکوس برای اتاقک‌های حاوی یک محیط نیمه‌شفاف و دما ثابت ارائه کرده‌اند. فرانکا و همکاران [6] روش معکوس را برای تعیین توزیع چشمه حرارتی درون یک اتاقک چهارگوش دوبعدی که در آن هر دو توزیع دما و شار حرارتی روی چهار دیواره اتاقک برآورده می‌شود، به کار برده‌اند. روش یادشده برای ارزیابی توزیع دمای گاز در یک اتاقک چهارگوش برای برآورده ساختن هر دو شرط مرزی روی سطح طراحی به گونه‌ای موفقیت‌آمیز توسط فرانکا و همکاران [7,8] مورد استفاده قرار گرفته است. فرانکا و همکاران [9,10] همچنین فرآیند حل را برای حالت انتقال حرارت مرکب هدایتی-تابشی و جابه‌جایی-تابشی توسعه داده‌اند. روش معکوس نیازمند روش‌های تنظیمی برای مقابله با طبیعت بدرفتار معادلات حاکم بر سیستم فیزیکی مورد تحلیل است.

به تازگی روش‌های بهینه‌سازی به طور گسترده‌ای برای حل مسائل انتقال حرارت معکوس، به کار گرفته شده‌اند. ایده اصلی روش‌های بهینه‌سازی به حداقل رساندن یک تابع هدف است. این تابع هدف به گونه‌ای تعریف می‌شود که مقدار حداقل آن مربوط به شرایط ایده‌آل باشد. در زمینه طراحی حرارتی معکوس مرزی کوره‌های تابشی مطالعات زیادی صورت گرفته است. حسینی سروری و همکاران [11-16] حل مسئله طراحی معکوس محفظه‌های تابشی در محیط‌های جذب‌کننده-صادرکننده با هندسه نامنظم را با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مورد مطالعه قرار داده‌اند. مهربان و همکاران [17] حل مسئله معکوس مرزی در یک کوره تابشی با سطح متحرک را مورد مطالعه قرار داده‌اند.

در این مقاله طراحی معکوس برای ایجاد توزیع مناسب چشمه حرارتی در داخل یک محفظه تابشی جذب‌کننده-صادرکننده، به منظور ایجاد شرایط مرزی یکنواخت روی یک سطح طراحی پخشی-غیرخاکستری مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مقاله پیشین حسینی سروری و همکاران [15]، بهینه‌سازی توزیع چشمه حرارتی برای ایجاد توزیع یکنواخت دما و شار حرارتی روی یک سطح طراحی خاکستری در یک محیط جذب‌کننده-صادرکننده مورد مطالعه قرار گرفته است، همچنین بیات و همکاران [18] طراحی بهینه یک کوره

## 3- مسئله مستقیم

معادله انتقال تابش در محیط خاکستری جذب‌کننده-صادرکننده در راستای یک پرتو و شرط مرزی آن در روابط (2,1) نشان داده شده است:

$$\frac{dI_\lambda}{ds} = \hat{s} \cdot \nabla I_\lambda(r, \hat{s}) = \kappa(r)[I_{b\lambda}(r) - I_\lambda(r, \hat{s})] \quad (1)$$

$$I_\lambda(r_\omega, \hat{s}) = \varepsilon_\lambda(r_\omega) I_{b\lambda}(r_\omega) + \frac{1 - \varepsilon_\lambda(r_\omega)}{\pi} \int_{\hat{n} \cdot \hat{s} < 0} I_\lambda(r_\omega, \hat{s}') |\hat{n} \cdot \hat{s}'| d\Omega' \quad (2)$$

در مسئله مستقیم، رابطه (1) با استفاده از روش جهت‌های مجزا حل می‌شود. در این روش محفظه به حجم کنترل‌هایی کوچک تقسیم می‌شود و شدت تابش در هر جهت مجزا و هر باند طول موج از رابطه (3) محاسبه می‌شود.

$$I_{p,i,m} = \frac{\kappa V S_{p,i,m} + |\xi_i| A_x \left(\frac{I_{x,i,m}}{\gamma_x}\right) + |\eta_i| A_y \left(\frac{I_{y,i,m}}{\gamma_y}\right)}{\kappa V + |\xi_i| \left(\frac{A_{xe}}{\gamma_x}\right) + |\eta_i| \left(\frac{A_{ye}}{\gamma_y}\right)} \quad (3)$$

به این ترتیب تابش رسیده در هر باند طول موج از رابطه (4) به دست می‌آید.

$$G_m = \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \omega_i I_{p,i,m}(r) \quad (4)$$

روابط (4-1) با اقتباس از مرجع [19] و با لحاظ کردن تغییرات مربوط به وابسته بودن معادلات به طول موج مورد استفاده قرار گرفته‌اند. معادله پایستگی انرژی تابشی برای محیط خاکستری با وجود چشمه حرارتی به صورت رابطه (5) بیان می‌شود [19].

$$\nabla \cdot q = \kappa(4\pi I_b - G) = S_g \quad (5)$$

که برای هر باند طول موج به صورت رابطه (6) نوشته می‌شود.

$$\nabla \cdot q_m = \kappa(4\pi I_{b,m} - G_m) = S_{g,m} \quad (6)$$

رابطه (6) کسری از  $\nabla \cdot q$  کل در یک باند طول موج را بیان می‌کند. برای به دست آوردن مقدار کلی باید این کسرها با یکدیگر جمع شوند که منجر به رابطه (7) می‌شود.

$$\nabla \cdot q = \kappa(4\pi I_b - G) = S_g \quad (7)$$

به این ترتیب شدت تابش جسم سیاه در هر حجم کنترل،  $I_b$ ، و به تبع آن میدان دما با استفاده از رابطه (8) محاسبه می‌شود.

$$I_b = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{S_g}{\kappa} + G \right) \quad (8)$$

حال می‌توان کسری از تابع چشمه حرارتی در هر حجم کنترل و کسری از شدت انرژی تابشی در دیواره‌های محفظه در هر باند طول موج را با استفاده از معادلات (9,10) به دست آورده و آن‌ها را برای محاسبه  $I_{p,i,m}$  جدید به کار برد [19].

$$S_m = F_{\text{int}, \lambda_{m-1} \rightarrow \lambda_m} I_b \quad (9)$$

$$I_m(r_\omega, \hat{s}) = \varepsilon_m(r_\omega) [F I_b(r_\omega)] + \frac{1 - \varepsilon_m(r_\omega)}{\pi} \int_{\hat{n} \cdot \hat{s} < 0} I_m(r_\omega, \hat{s}') |\hat{n} \cdot \hat{s}'| d\Omega' \quad (10)$$

در معادلات (9,10)  $F$  و  $F_{\text{int}}$  نشان‌دهنده کسری از انرژی کل گسیل‌شده در یک باند طول موج است و به ترتیب بر المان‌های دیواره‌های مرزی و حجم کنترل‌های محیط محفظه تعریف می‌شوند. کسری از انرژی کل گسیل‌شده در یک باند طول موج توسط رابطه (11) بیان می‌شود [20].

$$F_{\lambda_{m-1} \rightarrow \lambda_m} = \frac{\int_{\lambda_{m-1}}^{\lambda_m} e_{\lambda b}(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty e_{\lambda b}(\lambda) d\lambda} = F_{0 \rightarrow \lambda_m} - F_{0 \rightarrow \lambda_{m-1}} \quad (11)$$

که در آن رابطه (12) را به صورت زیر داریم.

$$F_{\lambda_{m-1} \rightarrow \lambda_m} = F_{\lambda_{m-1} T \rightarrow \lambda_m T} = F_{0 \rightarrow \lambda_m T} - F_{0 \rightarrow \lambda_{m-1} T} \quad (12)$$

در حالی که  $F_{0 \rightarrow \lambda T}$  از رابطه (13) به دست می‌آید.

$$F_{0 \rightarrow \lambda T} = \frac{15}{\pi^4} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{e^{-n\chi}}{n} \left( \chi^3 + \frac{3\chi^2}{n} + \frac{6\chi}{n^2} + \frac{6}{n^3} \right) \right] \quad (13)$$

در آن  $C_2 = 14387.752 \mu\text{m} \cdot \text{K}$  و  $\chi = C_2/\lambda T$  است [20].

همچنین هر دیواره با توجه به دمای خود، نسبت انرژی در هر باند طول موج،  $F_{\lambda_{m-1} \rightarrow \lambda_m}$ ، مختص به خود را داراست.

پس از انجام محاسبات در تمام جهت‌های تعریف شده و همچنین در تمام حجم کنترل‌ها و باندهای طول موج، حدس‌های اولیه به روزرسانی می‌شوند و این فرآیند تا رسیدن به همگرایی براساس معیار همگرایی مطلوب تکرار خواهد شد. به این ترتیب مقدار شار حرارتی روی سطح طراحی محاسبه شده و در حلقه معکوس مورد استفاده قرار می‌گیرند.

## 4- مسئله معکوس

در این مقاله برای ارزیابی معکوس توزیع چشمه حرارتی از روش گرادیان مزدوج استفاده شده است. روش گرادیان مزدوج یک تکنیک مبتنی بر تکرار ساده و توانمند برای حل مسائل معکوس خطی و غیرخطی ارزیابی پارامتر است. در این مسئله پارامتر مجهول همان توزیع چشمه حرارتی است. مسئله معکوس با کمینه‌سازی یک تابع هدف،  $f$ ، با استفاده از تکنیک‌های پایدارسازی حل می‌شود. تابع هدف مقدار حداقل مربعات (جمع مربع باقی‌مانده‌ها) است که به صورت معادله (14) تعریف می‌شود.

$$f = [\vec{q}_d - \vec{q}_e]^T [\vec{q}_d - \vec{q}_e] \quad (14)$$

که در آن  $\vec{q}_d$  و  $\vec{q}_e$  به ترتیب بردار شار حرارتی مطلوب و بردار شار حرارتی تخمین زده شده بر سطح طراحی است. در فرآیند تکراری روش گرادیان مزدوج برای کمینه‌کردن تابع هدف در هر تکرار یک اندازه گام مناسب در امتداد یک جهت کاهش به دست می‌آید. جهت کاهش به صورت یک ترکیب خطی از جهت گرادیان منفی در تکرار جاری با جهت کاهش در تکرار پیش از خود به دست می‌آید. ترکیب خطی به گونه‌ای است که همواره زاویه بین جهت کاهش و جهت گرادیان منفی کمتر از 90 درجه است و بنابراین همواره می‌توان اطمینان داشت که تابع هدف به سوی کمینه‌شدن پیش می‌رود. فرآیند تکراری روش گرادیان مزدوج برای کمینه‌کردن تابع هدف به صورت رابطه (15) است.

$$\vec{S}_g^{k+1} = \vec{S}_g^k - \beta_s^k \vec{d}^k \quad (15)$$

در آن  $\beta_s^k$  یک اندازه گام جستجو است.  $\vec{d}^k$  جهت کاهش و بالانویس  $k$  شماره تکرار است. جهت کاهش با استفاده از مزدوج جهت گرادیان،  $\nabla f^k$ ، و جهت کاهش در تکرار پیشین،  $\vec{d}^{k-1}$ ، به صورت رابطه (16) به دست می‌آید.

$$\vec{d}^k = \nabla f^k + \alpha^k \vec{d}^{k-1} \quad (16)$$

روابط متفاوتی برای ضریب مزدوج  $\alpha^k$  ارائه شده است. رابطه فلچر-ریوز [21] به صورت رابطه (17) است.

$$\alpha^k = \frac{[\nabla f^k][\nabla f^k]^T}{[\nabla f^{k-1}][\nabla f^{k-1}]^T} \quad \text{و} \quad \alpha^0 = 0 \quad (17)$$

رابطه جهت گرادیان با مشتق‌گیری از رابطه (14) نسبت به پارامترهای مجهول  $\vec{S}_g$  به صورت رابطه (18) به دست می‌آید.

$$\nabla f^k = -2(J^k)^T [\vec{q}_d - \vec{q}_e] \quad (18)$$

در آن  $J^k$  ماتریس حساسیت است و به صورت رابطه (19) تعریف می‌شود.

## 6- نتایج و بحث

## 1-6- مسئله نمونه 1

به عنوان یک مسئله طراحی نمونه، کاربرد روش معکوس برای محاسبه توزیع چشمه حرارتی، در یک محفظه دوعبده با محیط جذب‌کننده-صادرکننده و دیواره‌های پخشی-خاکستری، با سطح طراحی پخشی-غیرخاکستری را در نظر بگیرید. نمودار تغییرات ضریب صدور نسبت به طول موج روی سطح طراحی در شکل 2 نشان داده شده است.

در این مسئله تمام دیواره‌های محفظه تابشی دارای دمای  $T = 64.8K$  است. از طرفی شار حرارتی مطلوب سطح طراحی  $q_d = -1 W/m^2$  بوده و شرط همگرایی، رسیدن تابع هدف به مقدار  $10^{-5}$  است.

معیار اندازه‌گیری خطا بین مقدار مطلوب و محاسبه شده بر پایه دو روش خطای نسبی و خطای میانگین مربع ریشه‌هاست که به ترتیب به صورت روابط (24,23) تعریف می‌شوند [18].

$$Err_{rel} = \frac{(q_d - q_e)}{q_d} \times 100 \quad (23)$$

$$Err_{rms} = \left\{ \frac{1}{N_d} \sum_{n_d=1}^{N_d} \left[ \frac{(q_{n_d}^d - q_{n_d}^e)}{q_{n_d}^d} \times 100 \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (24)$$

خطای نسبی اختلاف بین مقدار شار حرارتی مطلوب و محاسبه شده روی هر نقطه سطح طراحی است، در حالی که خطای میانگین مربع ریشه‌ها، اختلاف بین مقادیر شار حرارتی مطلوب و محاسبه شده روی کل محدوده سطح طراحی را نشان می‌دهد.

در این مقاله تغییرات توزیع خطای نسبی در سطح طراحی برای مطالعه تأثیر تغییرات ضریب صدور دیواره‌های خاکستری و عمق اپتیکی محیط محفظه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده در شکل‌های 3 و 4 نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود شار حرارتی مطلوب بر سطح طراحی با استفاده از روش معکوس به خوبی بازیابی شده و نتایج از دقت قابل قبولی برخوردار است. خطای میانگین مربع ریشه‌ها در جدول 1 برای مقادیر مختلف ضریب صدور دیواره‌ها (غیر از سطح طراحی) و در جدول 2 برای مقادیر مختلف عمق اپتیکی محیط محفظه نشان داده شده است.

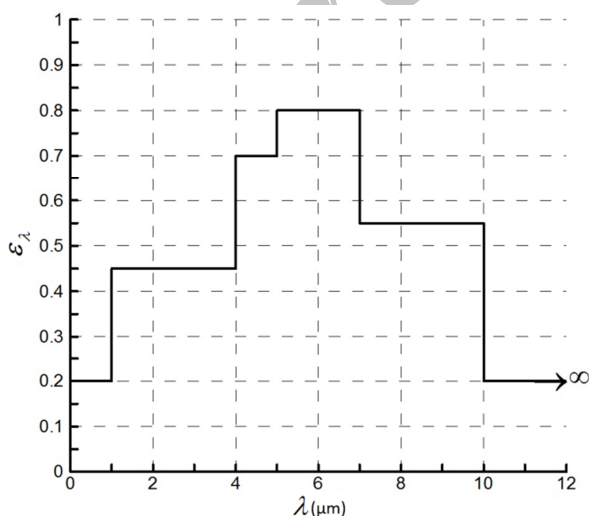


Fig. 2 Variations of the hemispherical nongray emissivity vs. wavelength [18]

شکل 2 نمودار تغییرات ضریب صدور نسبت به طول موج [18]

$$J(\vec{S}_g) = \left[ \frac{\partial \vec{q}_e^T}{\partial \vec{S}_g} \right]^T \quad (19)$$

اندازه گام جستجوی مناسب،  $\beta_s^k$ ، به منظور اصلاح حدس اولیه جهت کمینه‌سازی تابع هدف به صورت رابطه (20) بیان می‌شود.

$$\beta_s^k = \frac{[J^k \vec{d}^k]^T [\vec{q}_e(\vec{S}_g^k) - \vec{q}_d]}{[J^k \vec{d}^k]^T [J^k \vec{d}^k]} \quad (20)$$

روابط (14-20) با اقتباس از مرجع [21] و با توجه به پارامترهای در نظر گرفته شده در مسئله مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پس از محاسبه ماتریس حساسیت  $J^k$ ، جهت گرادینان  $\nabla f$ ، ضریب مزدوج  $a^k$  و اندازه گام جستجو  $\beta_s^k$ ، فرایند تکراری داده شده در رابطه (15) اجرا می‌شود و تا زمانی که تابع هدف از یک مقدار کوچک از پیش تعیین شده بیشتر باشد ادامه می‌یابد.

## 5- مسئله حساسیت

عناصر ماتریس حساسیت با استفاده از حل یک مسئله مقدار مرزی با مشتق‌گیری از معادلات حاکم و شرایط مرزی مربوطه نسبت به توزیع نامعلوم چشمه حرارتی،  $q_s$ ، به‌دست می‌آیند. با مشتق‌گیری از معادله انتقال تابش به همراه شرایط مرزی آن نسبت به مقدار چشمه حرارتی روی المان  $n$  از ناحیه توزیع چشمه به روابط (22,21) می‌رسیم.

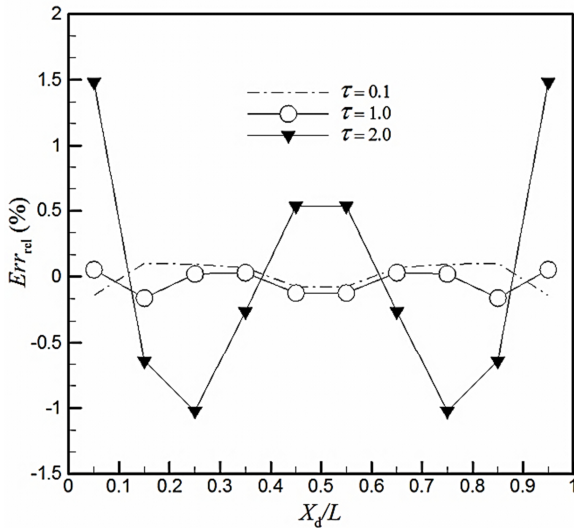
$$\frac{\partial}{\partial s} \left( \frac{\partial I_{\lambda}}{\partial S_{g_n}} \right) = \kappa(r) \left( \frac{\partial I_{b\lambda}(r)}{\partial S_{g_n}} - \frac{\partial I_{\lambda}(r, \hat{s})}{\partial S_{g_n}} \right) \quad (21)$$

با شرط مرزی:

$$\frac{\partial I_{\lambda}(r_{\omega}, \hat{s})}{\partial S_{g_n}} = \varepsilon(r_{\omega}) \frac{\partial I_{b\lambda}(r_{\omega})}{\partial S_{g_n}} + \frac{1 - \varepsilon(r_{\omega})}{\pi} \int_{\hat{n} \cdot \hat{s} < 0} \frac{\partial I_{\lambda}(r_{\omega}, \hat{s}')}{\partial S_{g_n}} |\hat{n} \cdot \hat{s}'| d\Omega \quad (22)$$

برای حل رابطه (21) از روش جهت‌های مجزا با توجه به طیفی بودن قسمتی از دیواره محفظه که در بخش 3 تشریح شده استفاده می‌شود. با این تفاوت که از معادله انتقال تابش و شرط مرزی آن نسبت به پارامتر مجهول که همان المان‌های چشمه حرارتی است مشتق‌گیری می‌شود. به این ترتیب که مشتق‌گیری نسبت به تک‌تک المان‌های پارامتر مجهول باید انجام شود. با مشتق‌گیری از دمای دیواره‌ها نسبت به مقدار چشمه حرارتی روی المان  $n$  مقدار صفر حاصل می‌شود؛ بنابراین برای حل رابطه (21)، دمای دیواره‌ها صفر در نظر گرفته می‌شود. مشتق توان چشمه حرارتی روی هریک از المان‌های حجمی نسبت به توان چشمه روی المان  $n$  مساوی صفر می‌شود، به استثناء المان که در آن مشتق برابر واحد است. جهت محاسبه ضرایب حساسیت، در هر مرحله معادله معادل انتقال تابش، رابطه (21)، در ناحیه مورد نظر با دمای مرزی صفر و چشمه واحد روی المان حجم  $n$  حل می‌شود. سپس مقادیر شار حرارتی سطح طراحی حاصل از حل این مسئله معادل، ستون  $n$  از ماتریس حساسیت را تشکیل می‌دهند. از این‌رو به‌منظور تکمیل ستون‌های ماتریس حساسیت، مسئله معادل باید  $n_s$  مرتبه حل شود.

دمای هر حجم کنترل در حل مستقیم محاسبه شده و به تبع آن کسری از انرژی کل گسیل شده در هر باند طول موج و در هر حجم کنترل،  $F_{int}$ ، به‌دست می‌آید. از آن‌جا که  $F_{int}$  در هر تکرار معکوس به‌روزرسانی می‌شود، مقدار جدید آن باید در محاسبه ماتریس حساسیت لحاظ شود؛ بنابراین در هر بار تصحیح چشمه حرارتی، عناصر ماتریس حساسیت نیز باید تصحیح شوند.



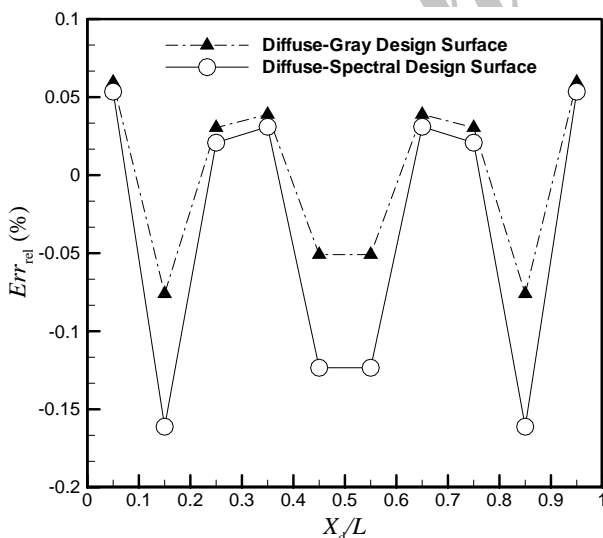
**Fig. 4** The relative errors for estimating the total heat flux over the design surface for three different values of medium optical thickness,  $\varepsilon = 0.5$

شکل 4 نمودار توزیع درصد خطای نسبی شار حرارتی روی سطح طراحی برای سه مقدار متفاوت عمق اپتیکی محیط،  $\varepsilon = 0.5$

جدول 2 خطای میانگین مربع ریشه‌ها برای شار حرارتی روی سطح طراحی برای مقادیر مختلف عمق اپتیکی محیط محفظه

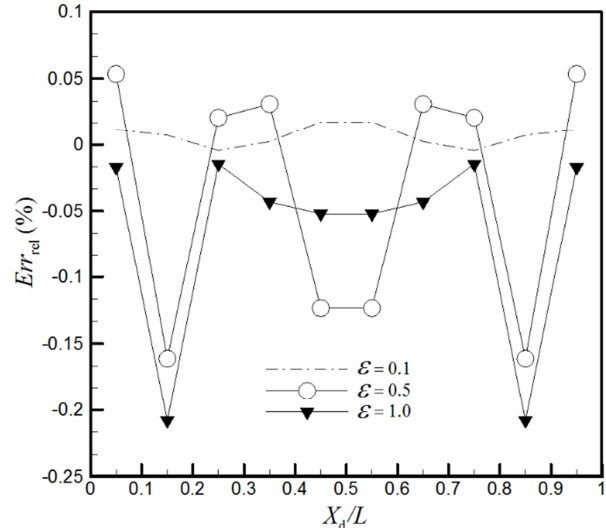
**Table 2** The root mean square errors for different values of medium optical thickness

$E_{rms}$ (%)	$\tau$
0.3032	0.1
0.2465	1.0
2.496	2.0



**Fig. 5** The relative errors for estimating the total heat flux over the design surface, for two cases of diffuse-nongray and diffuse-gray design surface

شکل 5 مقایسه توزیع درصد خطای نسبی شار حرارتی روی سطح طراحی در دو حالت سطح طراحی خاکستری و غیرخاکستری



**Fig. 3** The relative errors for estimating the total heat flux over the design surface for three different values of gray wall emissivity,  $\tau = 1$  شکل 3 نمودار توزیع درصد خطای نسبی شار حرارتی روی سطح طراحی برای سه مقدار مختلف ضریب صدور دیواره‌های خاکستری محفظه،  $\tau = 1$

حال به مقایسه نتایج برای دو حالت سطح طراحی خاکستری و غیرخاکستری می‌پردازیم. ضریب صدور کلی بر سطح طراحی با استفاده از رابطه (25) به‌دست می‌آید [18].

$$\varepsilon_{dg}(T) = \frac{1}{E_b(T)} \int_0^\infty \varepsilon(\lambda, T) e_{\lambda b}(\lambda, T) d\lambda \approx \sum_{m=1}^M \varepsilon_m F_{\lambda_{m-1} \rightarrow \lambda_m}(T) \quad (25)$$

در آن  $F_{\lambda_{m-1} \rightarrow \lambda_m}$  از رابطه (11) محاسبه می‌شود؛ بنابراین طبق شکل 2 مقدار ضریب صدور در حالت خاکستری روی سطح طراحی برابر 0.517 است. شکل 5 توزیع خطای نسبی در سطح طراحی برای دو حالت سطح طراحی خاکستری و غیرخاکستری را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج دارای دقت قابل قبولی بوده و بیشینه خطا کمتر از 0.2% است.

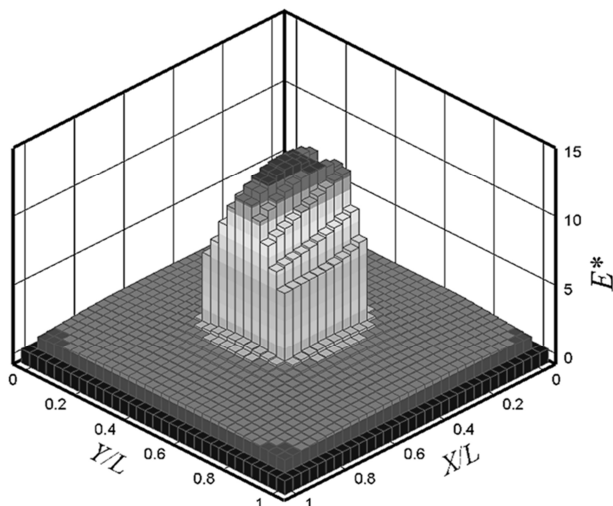
مقدار خطای میانگین مربع ریشه‌های شار حرارتی برای دو سطح طراحی پخشی-خاکستری و پخشی-غیرخاکستری به ترتیب 0.1617% و 0.2465% است.

در شکل‌های 6 و 7 توزیع چشمه حرارتی بی‌بعد در محفظه تابشی به ترتیب در حالتی که سطح طراحی خاکستری است و در حالت سطح طراحی غیرخاکستری نشان داده شده است. شکل‌های 8 و 9 توزیع توان صدور بی‌بعد در محفظه تابشی را به ترتیب در دو حالت سطح طراحی خاکستری و سطح طراحی غیرخاکستری نشان می‌دهند.

جدول 1 خطای میانگین مربع ضریب صدور دیواره‌های خاکستری محفظه مقادیر مختلف ضریب صدور دیواره‌های خاکستری محفظه

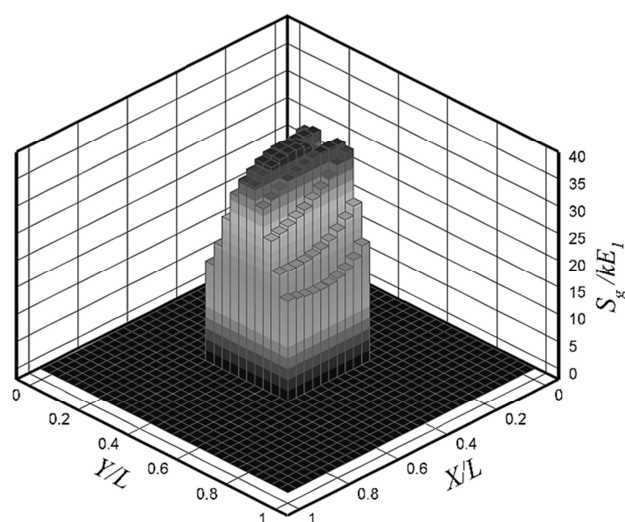
**Table 1** The root mean square error for different values of gray wall emissivity

$E_{rms}$ (%)	$\varepsilon$
0.0273	0.1
0.2465	0.5
0.2118	1.0



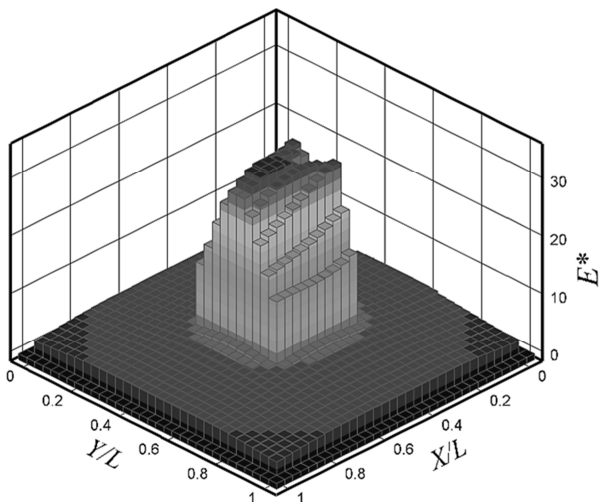
**Fig. 8** Dimensionless emissive power distribution over the entire enclosure medium,  $\varepsilon = 0.5$  and  $\tau = 1$ , with diffuse-gray design surface,  $\varepsilon_{dg} = 0.517$

شکل 8 توزیع توان صدور بی‌بعد در کل محیط محفظه تابشی،  $\varepsilon = 0.5$  و  $\tau = 1$ ، سطح طراحی خاکستری،  $\varepsilon_{dg} = 0.517$



**Fig. 6** Dimensionless heat source distribution over the entire enclosure medium,  $\varepsilon = 0.5$  and  $\tau = 1$ , with diffuse-gray design surface,  $\varepsilon_{dg} = 0.517$

شکل 6 توزیع چشمه حرارتی بی‌بعد در کل محیط محفظه تابشی،  $\varepsilon = 0.5$  و  $\tau = 1$ ، سطح طراحی خاکستری،  $\varepsilon_{dg} = 0.517$

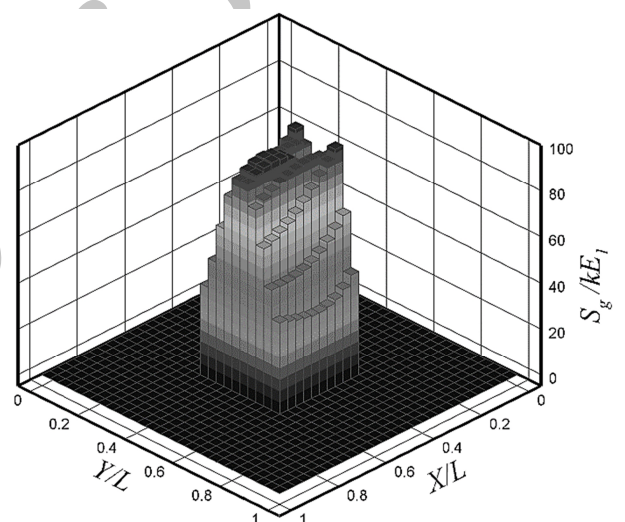


**Fig. 9** Dimensionless emissive power distribution over the entire enclosure medium,  $\varepsilon = 0.5$  and  $\tau = 1$ , with diffuse-nongray design surface

شکل 9 توزیع توان صدور بی‌بعد در کل محیط محفظه تابشی،  $\varepsilon = 0.5$  و  $\tau = 1$ ، سطح طراحی پخشی-غیرخاکستری

در این مسئله تمامی دیواره‌های محفظه تابشی، از جمله سطح طراحی، در دمای اتاق،  $T = 300K$ ، است. هدف از مسئله طراحی، تعیین توزیع چشمه حرارتی در محفظه تابشی،  $S_g$  جهت تولید شار حرارتی یکنواخت  $q_d = -300W/m^2$  بر سطح طراحی است. معیار همگرایی رسیدن تابع هدف به مقدار  $10^{-3}$  است.

حال به بررسی تأثیر ضریب صدور دیواره‌های خاکستری محفظه و عمق اپتیکی محیط محفظه بر توزیع خطای نسبی روی سطح طراحی می‌پردازیم. به این منظور در حالی که متغیر تأثیرگذار دیگر ثابت فرض می‌شود، 3 مقدار مختلف ضریب صدور برای دیواره‌های محفظه و همچنین 3 مقدار مختلف برای عمق اپتیکی محیط محفظه تعیین شده است، به نحوی که نتایج حاصل مورد مقایسه قرار گیرند. توزیع خطای نسبی در سطح طراحی در هر کدام از این حالت‌ها در شکل‌های 11 و 12 نشان داده شده است.



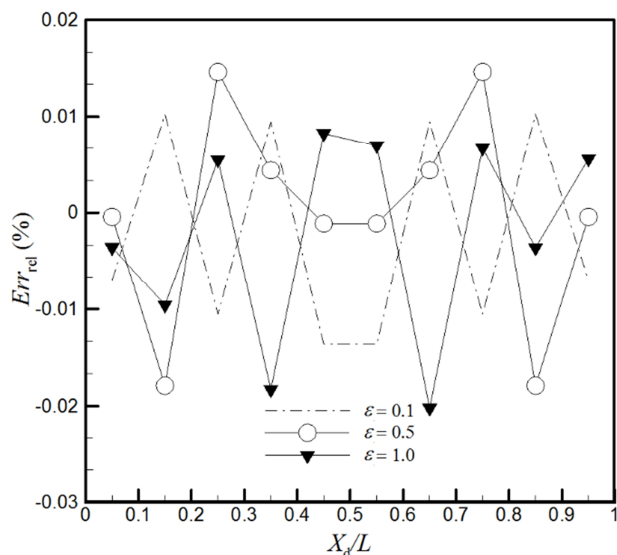
**Fig. 7** Dimensionless heat source distribution over the entire enclosure medium,  $\varepsilon = 0.5$  and  $\tau = 1$ , with diffuse-nongray design surface

شکل 7 توزیع چشمه حرارتی بی‌بعد در کل محیط محفظه تابشی،  $\varepsilon = 0.5$  و  $\tau = 1$ ، سطح طراحی غیرخاکستری

در شکل‌های 6-9 پارامتر  $E_1$  توان صدور مرجع که برای مسئله نمونه 1 مقدار آن  $1W/m^2$  است.  $E^* = E/E_1$  توان صدور بی‌بعد است.

## 2-6- مسئله نمونه 2

به‌عنوان یک مثال عملی، مسئله را با سطح طراحی از جنس سیلیکون نیمه‌رسانا مورد مطالعه قرار می‌دهیم. شکل 10 نمودار تغییرات ضریب صدور سیلیکون نیمه‌رسانا نسبت به طول موج را در دمای اتاق نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل 10 مشاهده می‌شود منحنی ضریب صدور وابسته به طول موج را می‌توان به 18 باند طول موج با ضریب صدور ثابت تقسیم کرد. ضریب صدور در هر باند طول موج،  $\varepsilon_m$ ، و مقدار  $F_{\lambda_{m-1} \rightarrow \lambda_m}$  متناظر با آن در جدول 3 آورده شده است.



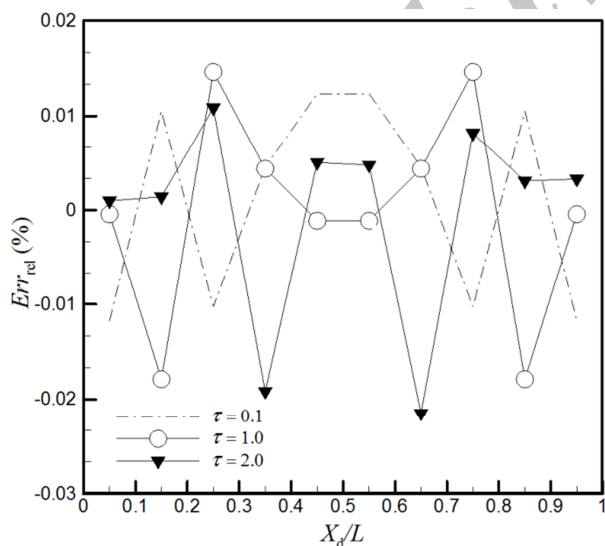
**Fig. 11** The relative errors for estimating the total heat flux over the design surface for three different values of gray wall emissivity,  $\tau = 1$

شکل 11 نمودار توزیع درصد خطای نسبی شار حرارتی روی سطح طراحی برای سه مقدار متفاوت ضریب صدور دیواره‌های خاکستری محفظه،  $\tau = 1$

جدول 4 خطای میانگین مربع ریشه‌ها برای شار حرارتی روی سطح طراحی برای مقادیر مختلف ضریب صدور دیواره‌های خاکستری محفظه

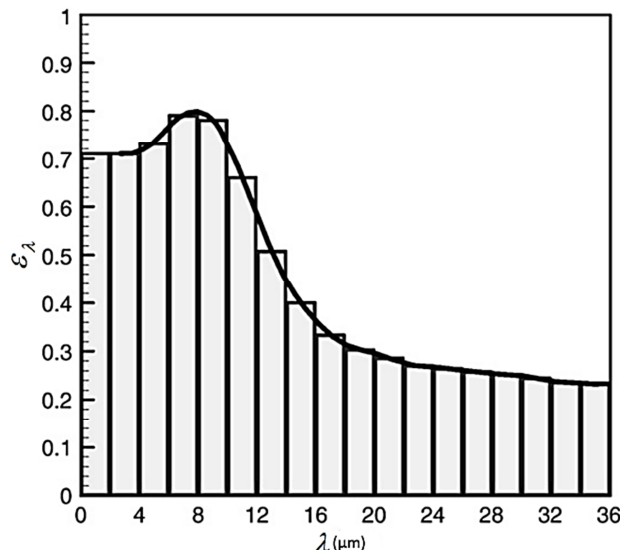
**Table 4** The root mean square error for different values of gray wall emissivity

$E_{rms}(\%)$	$\epsilon$
0.0322	0.1
0.0243	0.5
0.0279	1.0



**Fig. 12** The relative errors for estimating the total heat flux over the design surface for three different values of medium optical thickness,  $\epsilon = 0.5$

شکل 12 نمودار توزیع درصد خطای نسبی شار حرارتی روی سطح طراحی برای سه مقدار متفاوت عمق اپتیکی محیط،  $\epsilon = 0.5$



**Fig. 10** Normal nongray emissivity of a highly doped silicon semiconductor at room temperature [18]

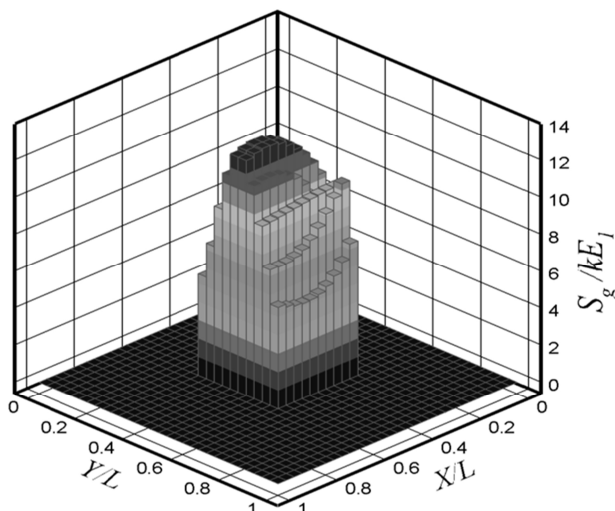
شکل 10 نمودار تغییرات ضریب صدور سیلیکون نیمه‌رسانا نسبت به طول موج در دمای اتاق [18]

جدول 3 ضریب صدور در هر بازه طول موج،  $\epsilon_m$ ، و مقدار  $F_{\lambda_{m-1} \rightarrow \lambda_m}$  متناظر با آن برای سیلیکون نیمه‌رسانا در دمای اتاق [18]

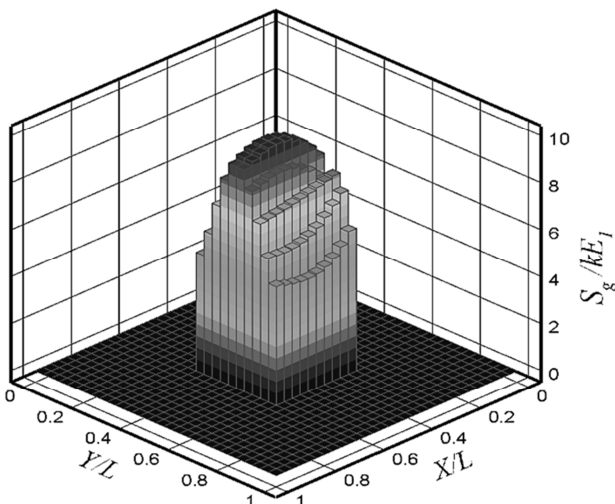
**Table 3** The band emissivity,  $\epsilon_m$ , and the corresponding values of  $F_{\lambda_{m-1} \rightarrow \lambda_m}$  for silicon semiconductor [18]

$F_{\lambda_{m-1} \rightarrow \lambda_m}$	$\epsilon_m$	$\lambda_{m-1} \rightarrow \lambda_m$	$m$
9.2936E-8	0.710	0-2	1
2.1341E-3	0.710	2-4	2
3.7208E-2	0.730	4-6	3
1.0091E-1	0.790	6-8	4
1.3297E-1	0.780	8-10	5
1.3039E-1	0.660	10-12	6
1.1240E-1	0.508	12-14	7
9.1540E-2	0.400	14-16	8
7.2795E-2	0.333	16-18	9
5.7454E-2	0.303	18-20	10
4.5377E-2	0.285	20-22	11
3.6015E-2	0.270	22-24	12
2.8785E-2	0.264	24-26	13
2.3188E-2	0.257	26-28	14
1.8833E-2	0.252	28-30	15
1.5420E-2	0.244	30-32	16
1.2726 E-2	0.236	32-34	17
8.1863E-2	0.233	34-∞	18

همان‌طور که مشاهده می‌شود شار حرارتی یکنواخت مطلوب روی سطح طراحی توسط روش معکوس به خوبی بازیابی شده و بیشینه خطای نسبی در دو حالت حدود 0.02% است. خطای میانگین مربع ریشه‌ها برای تغییرات ضریب صدور دیواره‌ها و تغییرات عمق اپتیکی محیط محفظه از نظر مهندسی از دقت مناسبی برخوردار بوده و به ترتیب در جدول‌های 4 و 5 نشان داده شده است.



**Fig. 14** Dimensionless heat source distribution over the entire enclosure medium,  $\varepsilon = 0.5$  and  $\tau = 1$ , with diffuse-gray design surface,  $\varepsilon_{dg} = 0.5$   
 شکل 14 توزیع چشمه حرارتی بی‌بعد در کل محیط محفظه تابشی،  $\varepsilon = 0.5$  و  $\tau = 1$ ، سطح طراحی خاکستری،  $\varepsilon_{dg} = 0.5$



**Fig. 15** Dimensionless heat source distribution over the entire enclosure medium,  $\varepsilon = 0.5$  and  $\tau = 1$ , with diffuse-nongray design surface  
 شکل 15 توزیع چشمه حرارتی بی‌بعد در کل محیط محفظه تابشی،  $\varepsilon = 0.5$  و  $\tau = 1$ ، سطح طراحی غیرخاکستری

### 7- نتیجه گیری

در این مقاله کاربرد روش بهینه‌سازی گرادیان مزدوج برای تعیین توزیع چشمه حرارتی نامعلوم در یک محفظه تابشی دوبعدی دارای محیط جذب‌کننده- صادرکننده جهت دست یافتن به توزیع شار حرارتی مطلوب بر سطح طراحی پخشی- غیرخاکستری با دمای معین مورد مطالعه قرار گرفت. در مسئله مستقیم برای حل معادله انتقال تابش روش جهت‌های مجزا در هر باند طیفی به کار گرفته شده و شار حرارتی کلی در هر المان سطح طراحی با جمع بستن شارهای حرارتی حاصل در هر باند به دست آمد، سپس مسئله معکوس به واسطه یک مسئله بهینه‌سازی برای کمینه‌کردن یک تابع هدف که به صورت تفاضل بین شارهای حرارتی مطلوب و محاسبه شده روی سطح طراحی تعریف می‌شود مورد حل قرار گرفت. مسئله حساسیت با مشتق‌گیری از معادله انتقال تابش نسبت به توزیع نامعلوم چشمه حرارتی و

براساس جدول 3 ضریب صدور در حالت خاکستری روی سطح طراحی توسط رابطه (25) محاسبه شده و مقدار  $\varepsilon_{dg} = 0.5$  برای آن حاصل می‌شود. حال مسئله طراحی معکوس برای دو حالت سطح طراحی پخشی-غیرخاکستری با تغییرات ضریب صدور مطابق شکل 10 و سطح طراحی پخشی- خاکستری با مقدار ضریب صدور ثابت  $\varepsilon_{dg} = 0.5$  حل می‌شود.

در شکل 13 توزیع خطای نسبی شار حرارتی محاسبه شده بر سطح طراحی در دو حالت سطح طراحی پخشی- غیرخاکستری و سطح طراحی پخشی- خاکستری نشان داده شده است. بیشینه خطای نسبی در این دو حالت کمتر از 0.02% است.

خطای میانگین مربع ریشه‌های متناظر برای دو حالت سطح طراحی پخشی- غیرخاکستری و سطح طراحی پخشی- خاکستری به ترتیب مقادیر 0.02432% و 0.02897% است.

توزیع چشمه حرارتی بی‌بعد در محفظه تابشی در حالت سطح طراحی پخشی- خاکستری و سطح طراحی پخشی- غیرخاکستری به ترتیب در شکل‌های 14 و 15 نشان داده شده است.

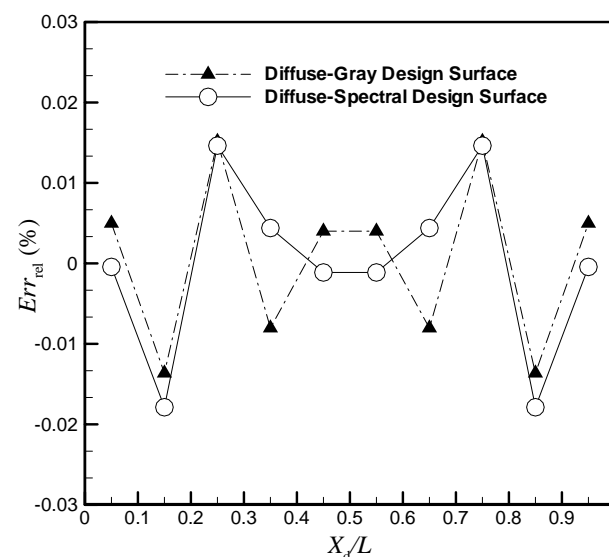
به همین ترتیب توزیع توان صدور بی‌بعد در محفظه تابشی در این دو حالت در شکل‌های 16 و 17 ترسیم شده است.

در شکل‌های 14-17 پارامتر  $E_1$  توان صدور مرجع که برای مسئله نمونه 2 مقدار آن  $1000 \text{ W/m}^2$  است.  $E^*$  توان صدور بی‌بعد است،  $E^* = E/E_1$ .

**جدول 5** خطای میانگین مربع ریشه‌ها برای شار حرارتی روی سطح طراحی برای مقادیر مختلف عمق اپتیکی محیط محفظه

**Table 5** The root mean square error for different values of medium optical thickness

$E_{rms}$ (%)	$\tau$
0.03128	0.1
0.02432	0.5
0.02475	2.0



**Fig. 13** The relative errors for estimating the total heat flux over the design surface, for two cases of diffuse-nongray and diffuse-gray design surface

شکل 13 مقایسه توزیع درصد خطای نسبی شار حرارتی روی سطح طراحی در دو حالت سطح طراحی خاکستری و غیرخاکستری



و روش حل از دقت قابل قبولی برخوردار است، همچنین توزیع چشمه حرارتی بی‌بعد تولیدشده و توزیع توان صدور بی‌بعد در محفظه تابشی برای این دو حالت مورد محاسبه قرار گرفته و توانایی روش یادشده در حل مسئله را نشان داد.

### 8- فهرست علائم

$A$	سطح ( $m^2$ )
$d$	بردار جهت کاهش
$E$	توان صدور ( $Wm^{-2}$ )
$E^*$	توان صدور بی‌بعد
$E_1$	توان صدور مرجع ( $Wm^{-2}$ )
$Err$	خطا
$F$	کسری از انرژی کل گسیل‌شده در یک باند طول موج در دیواره‌ها
$F_{int}$	کسری از انرژی کل گسیل‌شده در یک باند طول موج در محیط محفظه
$f$	تابع هدف
$G$	تابش رسیده
$I$	شدت تابش ( $Wm^{-2}$ )
$J$	ماتریس حساسیت
$\kappa$	ضریب جذب ( $m^{-1}$ )
$n_d$	تعداد المان‌های سطح طراحی
$n_s$	تعداد المان‌ها در چشمه حرارتی
$m$	تعداد باندهای طول موج
$n$	تعداد جهت‌های مجزا
$q$	شار حرارتی ( $Wm^{-2}$ )
$r$	بردار مکان
$s$	طول مسیر هندسی (m)
$\hat{s}$	بردار واحد در یک جهت معین
$S$	تابع سورس حرارتی
$S_g$	چشمه حرارتی ( $Wm^{-3}$ )
$T$	دما (K)
$V$	حجم ( $m^3$ )

### علائم یونانی

$\alpha$	ضریب مزدوج
$\beta_s$	اندازه گام
$\gamma$	ثابت وزنی
$\varepsilon$	ضریب صدور
$\varepsilon_{dg}$	ضریب صدور در حالت پخشی-خاکستری
$\eta$	کسینوس هادی
$\lambda$	طول موج (m $\mu$ )
$\xi$	کسینوس هادی
$\tau$	عمق اپتیکی محیط

### بالانویس‌ها

$k$  شماره تکرار

### زیرنویس‌ها

$\lambda$  وابسته به طول موج

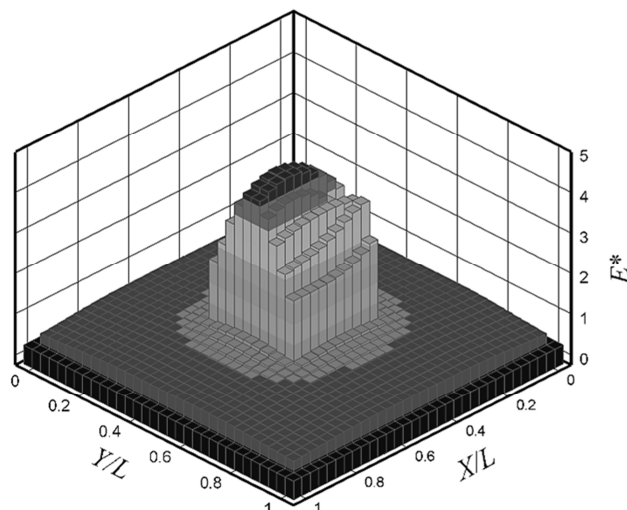


Fig. 16 Dimensionless emissive power distribution over the entire enclosure medium,  $\varepsilon = 0.5$  and  $\tau = 1$ , with diffuse-gray design surface,  $\varepsilon_{dg} = 0.5$

شکل 16 توزیع توان صدور بی‌بعد در کل محیط محفظه تابشی،  $\tau = 1$  و  $\varepsilon = 0.5$ ، سطح طراحی خاکستری  $\varepsilon_{dg} = 0.5$

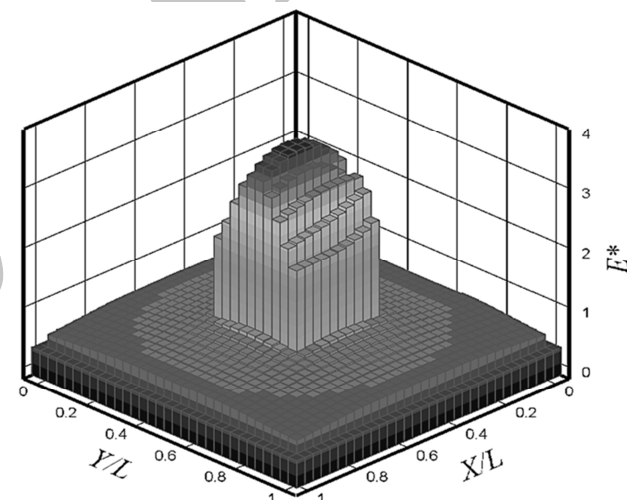


Fig. 17 Dimensionless emissive power distribution over the entire enclosure medium,  $\varepsilon = 0.5$  and  $\tau = 1$ , with diffuse-nongray design surface

شکل 17 توزیع توان صدور بی‌بعد در کل محیط محفظه تابشی،  $\tau = 1$  و  $\varepsilon = 0.5$ ، سطح طراحی پخشی-غیرخاکستری

حل معادله حاصل با استفاده از روش جهت‌های مجزا مشابه با آنچه در حل مسئله مستقیم انجام شد حاصل می‌شود که باید در هر تکرار مسئله به‌روزرسانی شود.

تأثیر ضریب صدور دیواره‌های محفظه (به جز سطح طراحی) و عمق اپتیکی محیط محفظه با مقایسه توزیع خطای نسبی و خطای میانگین مربع ریشه‌ها برای شار حرارتی محاسبه شده روی سطح طراحی مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهده شد که توزیع شار حرارتی به‌دست‌آمده بر سطح طراحی دارای توافق خوبی با مقدار مطلوب تعیین شده بوده و خطا قابل پذیرش است. همچنین توزیع خطای نسبی و مقدار خطای میانگین مربع ریشه‌ها برای شار حرارتی روی سطح طراحی برای دو حالت سطح طراحی پخشی-غیرخاکستری و سطح طراحی پخشی-خاکستری مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهند که توزیع شار حرارتی مطلوب بر سطح طراحی به خوبی بازیابی شده

- ASME, pp 145-151, 1998.
- [9] F. Franca, O. A. Ezekoye, J. R. Howell, Inverse heat source design combining radiation and conduction heat transfer, *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Nashville: ASME, pp 45-52, 1999.
- [10] F. Franca, O. A. Ezekoye, J. R. Howell, Inverse boundary design combining radiation and convection heat transfer, *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 123, No. 5, pp. 884-891, 2001.
- [11] S. M. Hosseini Sarvari, S. H. Mansouri, J. R. Howell, Inverse boundary design radiation problem in absorbing-emitting media with irregular geometry, *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 43, Iss. 6, pp. 565-584, 2003.
- [12] S. M. Hosseini Sarvari, S. H. Mansouri, J. R. Howell, Inverse design of three dimensional enclosures with transparent and absorbing-emitting media using an optimization technique, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, Iss. 2, pp. 149-162, 2003.
- [13] S. M. Hosseini Sarvari, J. R. Howell, S. H. Mansouri, Inverse boundary design conduction-radiation problem in irregular two-dimensional domains, *Numerical Heat Transfer, Part B*, Vol. 44, Iss. 3, pp. 209-224, 2003.
- [14] S. M. Hosseini Sarvari, J. R. Howell, S. H. Mansouri, A general method for estimation of boundary conditions over the surface of shields surrounded by radiating enclosures, *Numerical Heat Transfer, Part B*, Vol. 44, Iss. 1, pp. 25-43, 2003.
- [15] S. M. Hosseini Sarvari, S. H. Mansouri, Inverse design for radiative heat source in an irregular 2-D participating media, *Numerical Heat Transfer, Part B*, Vol. 46, Iss. 3, pp. 283-300, 2004.
- [16] S. M. Hosseini Sarvari, Inverse determination of heat source distribution in conductive-radiative media with irregular geometry, *Journal of Quantative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 93, No. 1, pp. 383-395, 2005.
- [17] S. Mehraban, S. M. Hosseini Sarvari, S. Farahat, A quasi-steady method for inverse design and control of a two-dimensional radiant oven in transient state, *Proceedings of ICHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer*, Morocco, Marrakesh, 2008, pp. 114.
- [18] N. Bayat, S. Mehraban, S. M. Hosseini Sarvari, Inverse boundary design of a radiant furnace with diffuse-spectral design surface, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 1, pp. 103-110, 2010.
- [19] M. F. Modest, *Radiative Heat Transfer*, Second Edition, pp. 498-529, An imprint of Elsevier Science, USA, 2003.
- [20] R. Siegel, J. R. Howell, *Thermal Radiation Heat Transfer*, Fourth Edition, pp. 44-46, Published by Taylor & Francis, New York, USA, 2002.
- [21] M. N. Ozisik, H. R. B. Orlande, *Inverse Heat Transfer*, pp. 58-66, Published by Taylor & Francis, New York, USA, 2000.

b	جسم سیاه
d	مربوط به سطح طراحی
e	مقدار محاسبه شده
$\omega$	دیوار
i	جهت‌های مجزا
m	باند طول موج
p	مقدار متوسط حجمی
rel	نسبی
rms	میانگین مربع ریشه‌ها

## 9- مراجع

- [1] J. R. Howell, O. A. Ezekoye, J. C. Morales, Inverse design model for radiative heat transfer, *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 122, No. 3, pp. 492-502, 2000.
- [2] M. Oguma, J. R. Howell, Solution of two-dimensional blackbody inverse radiation problem by inverse monte carlo method, *proceedings of the ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*, Maui, Hawaii, March 19-24, 1995.
- [3] V. Harutunian, J. C. Morales, J. R. Howell, Radiation exchange within an enclosure of diffuse-gray surfaces: The inverse problem, *Proceedings of ASME/AICHE National Heat Transfer Conference*, Portland, OR, August 5-9, 1995.
- [4] M. Matsumura, J. C. Morales, J. R. Howell, Optimal design of industrial furnaces by using numerical solution of the inverse radiation problem, *Proceedings of the International Gas Research Conference*, San Diego, California, November 8-11, 1998.
- [5] J. C. Morales, V. Harutunian, M. Oguma, J. R. Howell, Inverse design of radiating enclosures with an isothermal participating medium, *Proceedings of First International Symposium on Radiative Heat Transfer*, M. Pinar Menguc, ed., Begell House, New York, pp. 579-593, 1996.
- [6] F. Franca, O. A. Ezekoye, J. R. Howell, Inverse determination of heat source distribution in radiative systems with participating media, *Proceedings of the 33<sup>rd</sup> National Heat Transfer Conference*, Albuquerque, New Mexico, pp. 1-8, 1999.
- [7] F. Franca, J. C. Morales, M. Ogama, J. R. Howell, Inverse radiation heat transfer within enclosures with nonisothermal participating media, *Proceedings of the 11th International Heat Transfer Conference*, Kyongju, Korea, pp. 433-438, 1998.
- [8] F. Franca, M. Ogama, J. R. Howell, Inverse radiation heat transfer within enclosures with nonisothermal, non-gray participating media, *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Anaheim, California: