



تحلیل عملکرد تابشگرهای حرارتی از لحاظ شرایط حرارتی، مصرف انرژی و توزیع آلاینده تحت میدان جریان نامتقارن در یک محیط صنعتی

مهتاب امین‌زاده¹، علی صفوی‌نژاد²، سیدعلیرضا ذوالفقاری^{2*}

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

* بیرجند، صندوق پستی 97175-376، zolfaghari@birjand.ac.ir

چکیده

در تحقیق حاضر، عملکرد سه چیدمان از تابشگرهای دمابالا (تک تابشگر، جفت تابشگر با توان برابر و جفت تابشگر با توان نابرابر) در حضور میدان جریان نامتقارن مورد بررسی قرار گرفته است تا تأثیر آن‌ها بر ایجاد شرایط حرارتی یکنواخت، مصرف انرژی و توزیع آلاینده مشخص شود. برای این منظور یک فضای صنعتی نمونه با یک دریچه ورودی و یک دریچه خروجی هوا در نظر گرفته شده است. برای شرایط مذکور، معادلات پیوستگی، بقای تکانه خطی، انرژی و انتقال تابش و معادله غلظت گونه به کمک حلگر عددی این فوم حل شده است. همچنین میزان مصرف انرژی نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داد، استفاده از تک تابشگر 13 درصد مصرف انرژی را کاهش می‌دهد و دارای کمترین غلظت آلاینده می‌باشد اما بیشترین انحراف از میانگین دمای کف مطلوب را دارد. همچنین نتایج حاکی از آن بود که بهترین چیدمان، استفاده از جفت تابشگر با توان نابرابر می‌باشد، زیرا افت دمای ناشی از عدم تقارن میدان جریان را جبران کرده و کمترین اختلاف از میانگین مطلوب دمای کف را دارد. علاوه بر این، از لحاظ مصرف انرژی و میانگین غلظت آلاینده با حالت استفاده از جفت تابشگر با توان برابر مشابه می‌باشد.

کلید واژگان: تابشگر دمابالا، محیط صنعتی، توزیع آلاینده، شرایط حرارتی یکنواخت

Performance analysis of radiant heaters in terms of thermal conditions, energy consumption and contaminant distribution under asymmetric flow field in an industrial environment

Mahtab Aminzadeh, Ali Safavinejad, Alireza Zolfaghari*

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

* P.O.B. 97175-376, Birjand, Iran, zolfaghari@birjand.ac.ir

ABSTRACT

In the present study, the performance of three arrangements of high temperature radiant heaters (single radiant heater, couple radiant heaters with the same powers and couple radiant heaters with the different powers) in presence of asymmetric flow field has been investigated. The aim is to evaluate their performance in providing uniform thermal conditions, energy consumption and contaminant distribution. For this reason, a sample industrial environment with one inlet and outlet opening has been considered. For the mentioned conditions, continuity equation, momentum equations, energy equation, radiative transfer equations and species concentration equation have been solved by OpenFoam numerical solver. Also, energy consumption has been evaluated. The results show 13% decrease in energy consumption and minimum amount of contaminant concentration while using single radiant heater. However, maximum floor temperature distribution deviation is noticed in this case. Furthermore, results indicate that the best arrangement is utilizing couple radiant heaters with different powers, since the temperature drop (due of asymmetric flow field) compensates and it has the minimum floor temperature distribution deviation. Moreover, In terms of energy consumption and average of contaminant concentration, it is similar to couple radiant heaters with the same powers.

Keywords: Radiant heater, Industrial environment, Contaminant distribution, Uniform thermal conditions

دمای هوا¹ کاهش یابد [1].

از عیوب سیستم‌های گرمایش دمابالا می‌توان به ایجاد میدان تابشی غیریکنواخت اشاره کرد. در سال 2009، دادکویچ و جزویکی [2] در یک محیط صنعتی دارای تابشگر دمابالا، رابطه‌ای را برای محاسبه دمای تابشی به صورت تجربی به دست آوردند. ایشان به این نتیجه رسیدند که تابشگرهای گازسوز، میدان حرارتی غیریکنواخت ایجاد می‌کنند. دادکویچ و جزویکی [3] در سال 2011، در یک کار تجربی به بررسی اثر زاویه نصب، فاصله طولی و عرضی یک تابشگر گازسوز بر دمای تابشی در یک فضای صنعتی پرداختند و

1- مقدمه

انتخاب و طراحی سیستم تهویه مطبوع مناسب برای تمام ساختمان‌ها از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. این انتخاب براساس نوع کاربری ساختمان، وسعت فضای موردنظر، تأمین پارامترهای موردنیاز آسایش حرارتی افراد، میزان مصرف انرژی سیستم تهویه مطبوع صورت می‌گیرد. از این میان، برای گرمایش ساختمان‌های صنعتی به دلیل ارتفاع زیاد میان کف تا سقف، عدم وجود درزبندی مناسب و حجم زیاد فضا نسبت به تعداد افراد حاضر در آن از سیستم گرمایش تابشی دمابالا استفاده می‌شود، تا بدن افراد و سطوح را بدون واسطه قرار دادن هوا گرم کند و در نتیجه مصرف انرژی و اختلاف عمودی

¹ Vertical temperature difference of air

Please cite this article using:

M.Aminzadeh, A.Safavinejad, A.Zolfaghari, Performance analysis of radiant heaters in terms of thermal conditions, energy consumption and contaminant distribution under asymmetric flow field in an industrial environment, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Second International Conference on Air-Conditioning, Heating and Cooling Installations*, Vol. 16, No. 13, pp. 203-208, 2016 (in Persian فارسی)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

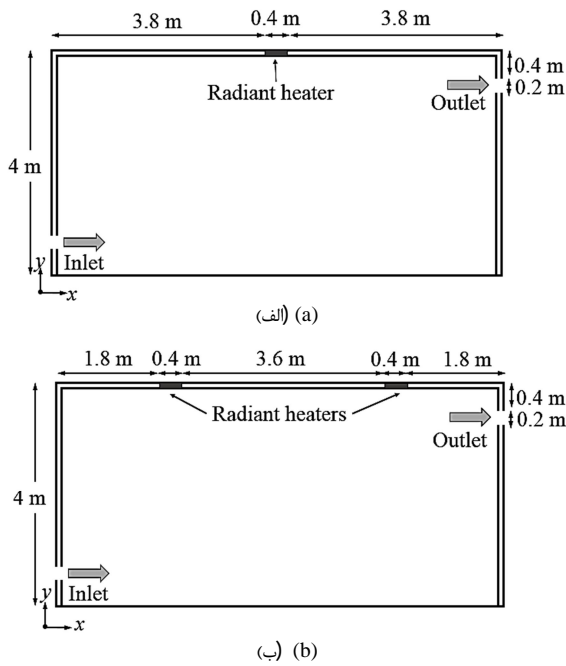


Fig. 1 Schematic of case room with (a) Single radiant heater, (b) Couple radiant heaters.

شکل 1 طرح‌واره فضای نمونه دارای (الف) یک تابشگر و (ب) دو تابشگر متقارن.

معادله بقای تکانه خطی:

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \rho g_i \beta (T - T_0) \quad (2)$$

u_i بیانگر سرعت جریان، ρ چگالی سیال، P فشار، β ضریب انبساط حجمی سیال، g شتاب گرانش و μ_{eff} لزجت مؤثر سیال می‌باشد. جریان هوا در یک محیط صنعتی به دلیل حجم و سرعت بالای هوای ورودی اغلب مغشوش است، از مدل RNG $k-\epsilon$ برای مدل‌سازی جریان مغشوش استفاده شده است. برای شرایط مرزی مربوط به k و ϵ روی دیواره‌ها از تابع دیواره استفاده شده است. معادلات مربوط به انرژی و گونه به صورت روابط (3) و (4) می‌باشند:

$$\left[\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (u_j T)}{\partial x_j} \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) - \frac{1}{\rho c_p} \nabla \cdot \vec{q}_R \quad (3)$$

معادله غلظت گونه:

$$\left[\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (u_j C)}{\partial x_j} \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + Q_c \quad (4)$$

تابش خود را به صورت جمله دیورژانس $\nabla \cdot \vec{q}_R$ در معادله انرژی (3) نشان می‌دهد. برای اطلاع کامل از نحوه و محاسبه معادله انرژی می‌توان به میشر و روی [6] مراجعه کرد. در تحقیق حاضر برای تحلیل تابش از روش راستا‌های مجزای حجم محدود¹ بهره گرفته شده است. ضریب جذب هوا 0.1 در نظر گرفته شده است. همچنین، تمام سطوح کدر، خاکستری و دیفیوز فرض شده است. خصوصیات ترموفیزیکی هوا در جدول 1 ارائه شده‌اند. جهت بررسی غلظت آلاینده دی اکسیدکربن تولیدی ناشی از احتراق تابشگرها، پس از تعیین میدان دما و سرعت، معادله غلظت گونه به کمک کد عددی نوشته شده، حل می‌شود. در رابطه (4)، C جزء جرمی گونه و D ضریب نفوذ گونه می‌باشد. براساس اطلاعات شرکت‌های سازنده تابشگرهای دمابالا، به‌طور

رابطه‌ای برای محاسبه دمای تابشی با حفظ آسایش حرارتی انسان در یک اتاق ارائه نمودند. وانگ و همکاران [4] در سال 2014، به کمک نرم‌افزار فلونت، جریان هوا و تابش سطوح را در یک ساختمان صنعتی به صورت دو بعدی شبیه‌سازی نمودند. آن‌ها اثر عدد گراش و ضریب صدور یک گرمکن دمابالای مستقر روی کف را بر توزیع سرعت، دما و نرخ تهویه تحلیل کردند. منگ و همکاران [5] در سال 2016 به بررسی اثر تابش بر دقت شبیه‌سازی عددی برای شرایط حرارتی در ساختمان صنعتی پرداختند. آن‌ها محفظه‌ای را با یک چشمه حرارتی دمابالا روی کف، در نظر گرفتند و عملکرد آن را به صورت عددی توسط نرم‌افزار فلونت ارزیابی نمودند.

یکی دیگر از عیوب استفاده از تابشگرهای دمابالا گازسوز، تولید آلاینده ناشی از احتراق در دستگاه می‌باشد. در این گونه فضاها تعبیه لوله دودکش مناسب روی فن تخلیه محصولات احتراق دستگاه الزامی است، اما امکان نشت محصولات احتراق به داخل سالن وجود دارد. اگر این میزان نشت بیش از حد مجاز باشد، سلامت افراد حاضر و میزان کارایی آن‌ها را مختل می‌کند. بنابراین، شبیه‌سازی مقدار و نحوه توزیع این آلاینده‌ها حائز اهمیت می‌باشد. همان‌طور که گفته شد، تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در زمینه شبیه‌سازی عملکرد تابشگرهای دمابالا به دلیل چالش‌های فرارو مانند کاربرد این سیستم‌ها در محیط‌های صنعتی، بزرگ بودن فضای نمونه و نیاز به ایجاد دو شبکه‌بندی مجزا برای حل جریان و حل تابش انجام نشده است.

لذا در تحقیق حاضر، سعی شده است تا با شبیه‌سازی همزمان انتقال حرارت تابشی و جابه‌جایی و سپس مدل‌سازی توزیع آلاینده در یک ساختمان صنعتی دارای تابشگرهای دمابالا، تحلیل مناسبی از تأثیر تعداد تابشگرها و توان آن‌ها بر توزیع دما، سرعت، مصرف انرژی و توزیع آلاینده ارائه گردد. گونه دی‌اکسیدکربن به عنوان نماینده آلاینده‌های ناشی از احتراق گاز طبیعی انتخاب شده است تا نحوه توزیع و غلظت آلاینده‌ها در سالن تحلیل شود.

2- فضای نمونه

در تحقیق حاضر یک سالن صنعتی با ارتفاع 4 متر و عرض 8 متر به عنوان فضای نمونه در نظر گرفته شده که طول آن نسبت به سایر ابعاد زیاد می‌باشد و از اثرات طول بر نتایج طبق تحلیل ابعادی، صرف‌نظر شده است. همچنین، یک دریچه ورود هوا و یک دریچه خروج هوا هر یک به ابعاد 0.2 متر برای تهویه هوای این سالن صنعتی در نظر گرفته شده است. دریچه ورود هوا در ارتفاع 0.4 متری از کف و دریچه خروج هوا در ارتفاع 0.4 از سقف روی دیوارهای جانبی قرار دارند. طبق طرح‌واره ارائه شده در "شکل 1"، دو حالت مختلف (الف) استفاده از یک تابشگر و (ب) استفاده از دو تابشگر مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین، عرض هر یک از تابشگرها 0.4 متر می‌باشد.

3- معادلات حاکم و روش حل

در فضای نمونه برای تحلیل عملکرد تابشگرهای دمابالا باید معادلات پیوستگی، بقای تکانه خطی، انرژی با در نظر گرفتن تابش به‌صورت هم‌زمان حل شوند. معادلات حاکم برای جریان گذرا، مغشوش و تراکم‌ناپذیر با فرض ثابت بودن خواص سیال در دو بعد به صورت روابط (1) و (2) می‌باشند:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

¹ Finite Volume Discrete Ordinate Method

در یک محیط صنعتی می‌باشد. برای این منظور، سه حالت استفاده از یک تابشگر، دو تابشگر با توان برابر و دو تابشگر با توان نابرابر مورد بررسی قرار گرفته است. پیش‌بینی شد که به دلیل ورود هوای سرد از دریچه و به دنبال آن افت دما در این ناحیه، به جای دو تابشگر با توان برابر، از دو تابشگر با توان نابرابر استفاده شود، به صورتی که توان تابشگر شماره 1 که نزدیک دریچه ورود هوا می‌باشد بیشتر باشد تا ضمن ارضای شرط داشتن میانگین دمای کف 27 درجه سلسیوس، افت دما در ناحیه ورود هوا سرد به سالن جبران شود.

جدول 1 مشخصات ترموفیزیکی هوا [9]

پارامتر	مقدار
لزجت سینماتیکی آرام (m^2s^{-1})	0.000013
ضریب انبساط حجمی (K^{-1})	0.0038
عدد پرانتل	0.717
چگالی (kgm^{-3})	1.334

Table 1 Thermophysical properties of air [9]

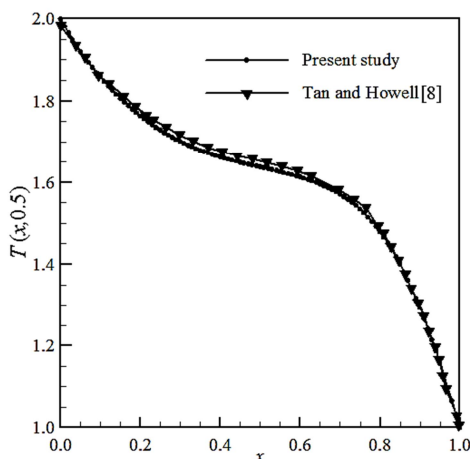


Fig. 2 Comparison between the results of present study and Tan and Howell [8] for temperature distribution in considered chamber

شکل 2 مقایسه نتایج حلگر تحقیق حاضر در خصوص توزیع دما در محفظه با نتایج تان و هاوول [8]

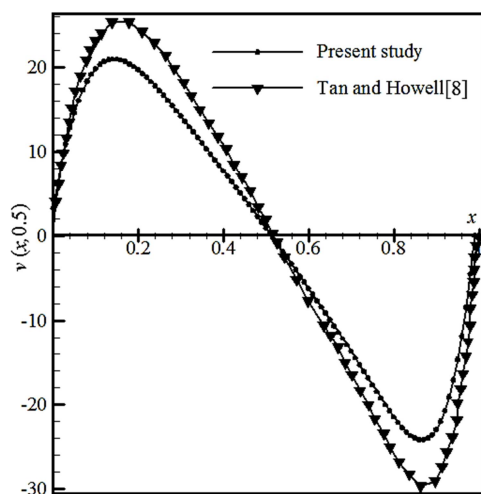


Fig. 3 Comparison between the results of present study and Tan and Howell [8] for nondimensional velocity profile in considered chamber

شکل 3 مقایسه نتایج حلگر تحقیق حاضر در خصوص پروفیل سرعت بی‌بعد در محفظه با نتایج تان و هاوول [8]

متوسط به ازای هر کیلووات توان تابشگر، حدود 0.1 مترمکعب بر ساعت گاز طبیعی (متان) مصرف می‌شود. حجم گاز دی‌اکسیدکربن تولید شده، حدوداً معادل حجم گاز متان مصرفی می‌باشد. با این فرض که 10 درصد از گاز دی‌اکسیدکربن تولیدی به داخل ساختمان نشت کند، میزان تولید آلاینده از تابشگرها محاسبه می‌شود.

دمای تابشگرها طوری تنظیم شده که دمای کف به میانگین مناسب 27 درجه سلسیوس برسد که این کار با یک سری مراحل پیش‌بینی-اصلاح، انجام شده است. طبق استانداردهای تهویه مطبوع، برای ساختمان‌های صنعتی با توجه به نوع کاربری، حداقل تعداد تعویض هوا¹ 4 بار در ساعت می‌باشد [7] و تابشگرها به دلیل انجام عمل احتراق نیاز به هوای تازه بیشتری دارند، به همین دلیل برای تحقیق حاضر، 5 بار تعویض هوا در ساعت انتخاب شده است. به کمک تعداد تعویض هوا، حجم سالن و مساحت دریچه ورود هوا میزان سرعت هوای ورودی تعیین می‌شود. برای دما و سرعت دریچه خروجی هوا شرط مرزی گرادیان صفر و برای تمام سطوح شرط مرزی عدم لغزش اعمال شده است. دمای هوای ورودی و دیوارهای جانبی سالن طبق شرایط اقلیمی بسیار سرد زمستانی برابر 10- درجه سلسیوس فرض شده است. شرط مرزی آدیاباتیک برای سقف و کف سالن برقرار است. برای حل معادله غلظت، تمام دیوارها و دریچه خروجی هوا دارای شرط گرادیان صفر می‌باشند. غلظت دی‌اکسیدکربن هوای ورودی 500 ppm فرض شده است.

به منظور شبیه‌سازی این مسأله از کد عددی اپن‌فوم و بسته حل بویانت بوزینسک پیمپل فوم² استفاده شده است. این حلگر قابلیت حل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی با احتساب انتقال حرارت تابشی برای جریان گذرا، به روش حجم محدود را دارد. مسأله پیش رو ماهیتی پایا دارد، به همین دلیل زمان حل تا جایی ادامه می‌یابد تا تفاوت بین دو گام زمانی پی در پی کمتر از یک مقدار تعیین شده بسیار کوچک باشد. لازم به ذکر است، در این حلگر معادله گونه تعریف نشده است. به منظور مدل‌سازی تولید گونه، یک جمله چشمه، در حلگر ساخته شده برای حل گونه، در نظر گرفته شده است. استقلال حل از شبکه محاسباتی به دقت مورد بررسی قرار گرفته و شبکه‌ای با حدود 26000 سلول مناسب تشخیص داده شده است. اندازه شبکه نزدیک دیوارها طوری انتخاب شده اند که مقدار y^+ برای تمامی حالات‌ها کمتر از 5 باشند.

4- اعتبارسنجی

روش حل عددی تحقیق حاضر با نتایج تحقیق تان و هاوول [8] اعتبارسنجی شده است. در این تحقیق انتقال حرارت تابشی و جابه‌جایی طبیعی در یک محفظه مربعی دارای محیط فعال تابشی با ضریب جذب 1 که دو دیوار دما ثابت و دو دیوار عایق دارد، مورد تحلیل قرار گرفته است. تمام سطوح جسم سیاه و شرط عدم لغزش برای آن‌ها فرض شده است. توزیع دمای بی‌بعد و نمودار سرعت عمودی بی‌بعد روی خط افقی گذرنده از مرکز محفظه به ترتیب در "شکل‌های 2 و 3" نشان داده شده است. میانگین خطا در "شکل 3" کمتر از 10 درصد می‌باشد. همخوانی نسبتاً مناسب میان نتایج تحقیق حاضر با نتایج تان و هاوول [8] بیانگر صحت مدل‌سازی حاضر است.

5- نتایج و بحث

همان‌طور که گفته شد، هدف اصلی از تحقیق حاضر بررسی اثر تعداد و توان تابشگرها بر یکنواختی شرایط حرارتی، میزان مصرف انرژی و توزیع آلاینده

¹ Air Change per Hour

² buoyantBoussinesqPimpleFoam

در "شکل 6" ملاحظه می‌شود که غلظت دی اکسید کربن در تمام مناطق به جز در نزدیکی تابشگرها کمتر از 1000 ppm می‌باشد و این میزان نشت آلاینده هیچ خطری برای افراد حاضر در سالن ایجاد نمی‌کند. همان‌طور که در "شکل 6" مشخص است، استفاده از دو تابشگر به جای یک تابشگر به دلیل مصرف بیشتر سوخت باعث افزایش غلظت گونه دی‌اکسید کربن می‌شود. از "شکل 6" نیز استنباط می‌شود که در حالت استفاده از دو تابشگر با توان نابرابر به جای استفاده از دو تابشگر با توان برابر، غلظت گونه دی‌اکسید کربن در نواحی نزدیک درجه ورود هوا کاهش یافته است. یکی از معیارهای مدنظر تحقیق حاضر جهت تأمین شرایط حرارتی یکنواخت داشتن توزیع هر چه یکنواخت‌تر دمای کف سالن می‌باشد. در "شکل 7" توزیع دمای کف سالن نشان داده است. در ابتدای نمودار افت دمای دیده می‌شود که ناشی از ورود حجم هوای سرد به سالن می‌باشد. در "شکل 7" مشخص است در حالت وجود یک تابشگر بین دمای کمینه و بیشینه کف اختلاف زیادی وجود دارد که این عدم یکنواختی توزیع دما مطلوب نیست. اما با وجود دو ردیف تابشگر با توان برابر اختلاف بین دمای بیشینه و کمینه کف کاهش می‌یابد و در نواحی بیشتری از سالن شرایط مطلوب حرارتی ایجاد شود. با این حال باز هم یکنواختی کامل صورت نگرفت. به همین دلیل پیشنهاد می‌شود از دو ردیف تابشگر با توان نابرابر استفاده شود ضمن برقراری یکنواختی در کف، اثر نامتقارن بودن جریان را کم کند.

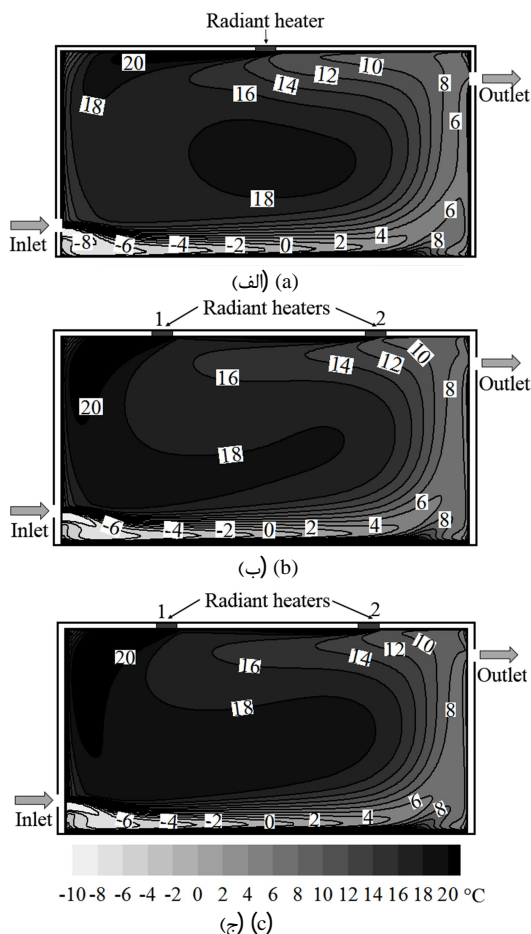


Fig. 5 Temperature contours in chamber with (a) single radiant heater (b) couple radiant heaters with the same power (c) couple radiant heaters with the different power

شکل 5 کانتور دما در محفظه‌ای با (الف) یک تابشگر (ب) دو تابشگر با توان برابر، (ج) دو تابشگر با توان نابرابر

کانتور اندازه سرعت و خطوط جریان و نیز کانتور دما برای هر سه حالت به ترتیب در "شکل‌های 4 و 5" نمایش داده شده است. در "شکل 4" مشاهده می‌شود توزیع و الگوی جریان سرعت در (الف)، (ب) و (ج) تقریباً مشابه است و در نتیجه تعداد و توان تابشگر در نحوه توزیع جریان و سرعت اثر چندانی ندارد و تنها در نزدیکی تابشگرها به دلیل گرم شدن هوا سرعت کمی افزایش می‌یابد. با توجه به "شکل 5" نتایج نشان می‌دهد که استفاده از دو تابشگر دمابالا به جای یک تابشگر، دمای فضای داخلی سالن را به طور میانگین حدود 1 درجه سلسیوس افزایش می‌دهد. همچنین از مقایسه کانتور دما در حالت دو تابشگر با توان برابر با حالت دو تابشگر با توان نابرابر مشخص می‌شود که در نزدیکی تابشگر شماره 1 که دارای توان بیشتر می‌باشد، دمای هوا افزایش یافته است اما در ناحیه سمت راست سالن تفاوت خاصی دیده نمی‌شود و نیز دمای میانگین هوا حدود 0.5 درجه سلسیوس نسبت به حالت استفاده از دو تابشگر با توان برابر افزایش یافته است. "شکل 6" نحوه توزیع غلظت آلاینده دی‌اکسیدکربن را نشان می‌دهد. غلظت دی‌اکسیدکربن به‌عنوان شاخصی از آلاینده‌های ناشی از احتراق می‌باشد. و در محل حضور افراد و محل تنفس آن‌ها معمولاً نشانگر کیفیت هوا می‌باشد. هنگامی که غلظت دی‌اکسیدکربن در هوا به 800-1000 ppm می‌رسد، نارضایتی رخ می‌دهد [10].

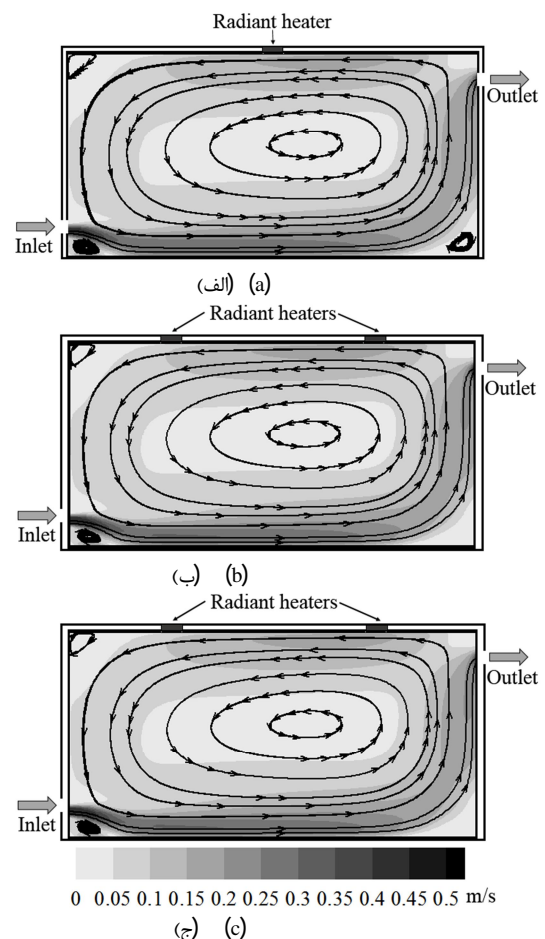


Fig. 4 Velocity contours and streamlines in chamber with (a) single radiant heater (b) couple radiant heaters with the same power (c) couple radiant heaters with the different power

شکل 4 کانتور اندازه سرعت و خطوط جریان در محفظه‌ای با (الف) یک تابشگر (ب) دو تابشگر با توان برابر، (ج) دو تابشگر با توان نابرابر

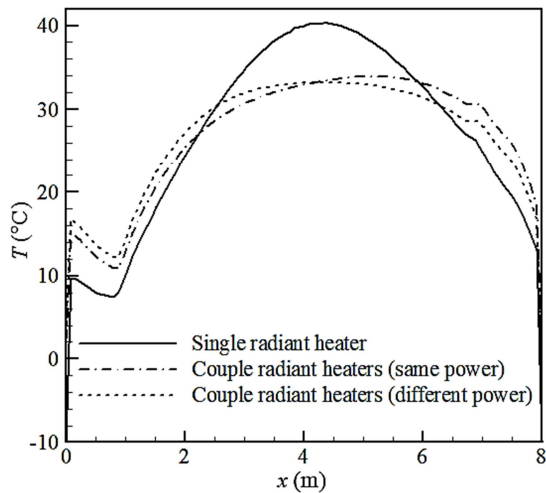


Fig. 7 Temperature distribution of floor of hall

شکل 7 توزیع دمای کف سالن

جدول 2 میانگین غلظت دی‌اکسیدکربن، مجذور میانگین مربعات دما و میزان مصرف انرژی کل تابشگرها به ازای واحد طول تابشگر

Table 2 Average of dioxide carbon concentration, root mean square of temperature and rate of energy consumption per unit length of radiant heater

مصرف انرژی (Wm ⁻¹)	RMS (°C)	میانگین غلظت دی-اکسیدکربن (ppm)	تعداد تابشگر
671	11.7	647	یک تابشگر
758	7.9	690	دو تابشگر با توان برابر
753	7.3	684	دو تابشگر با توان نابرابر

6- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، برای گرمایش یک سالن صنعتی که هوای بسیار سرد زمستان به طور نامتقارن در آن جریان دارد، سه حالت استفاده از یک ردیف تابشگر، دو ردیف تابشگر با توان برابر و دو ردیف تابشگر با توان نابرابر در نظر گرفته شد تا تأثیر عملکرد آن‌ها بر یکنواختی شرایط حرارتی، میزان مصرف انرژی و توزیع آلاینده مورد تحلیل قرار گیرد. نتایج نشان داد، استفاده از یک ردیف تابشگر به دلیل داشتن بیشترین میزان انحراف از دمای میانگین مطلوب کف سالن (27 درجه سلسیوس) نامطلوب‌ترین چیدمان بین حالات مورد بررسی می‌باشد، حال آن که 13 درصد مصرف انرژی را کم و به دنبال آن آلاینده کمتری تولید می‌کند. همچنین نتایج حاکی از آن بود که بهترین حالت از بین سه حالت مورد بررسی، استفاده از دو ردیف تابشگر با توان نابرابر می‌باشد، زیرا که توانست افت دمای ناشی از عدم تقارن میدان جریان را جبران نماید و کمترین اختلاف را از میانگین مطلوب دمای کف داشته باشد. در صورتی که از لحاظ مصرف انرژی و تولید آلاینده‌گی تقریباً مشابه حالت استفاده از دو ردیف تابشگر با توان برابر می‌باشد.

7- فهرست علائم

C	غلظت گونه (ppm)
C_p	ظرفیت گرمایی فشار ثابت (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)
D	ضریب پخش گونه (m ² s ⁻¹)
g	شتاب گرانش (m s ⁻²)
G	تابش فرودی (W m ⁻²)

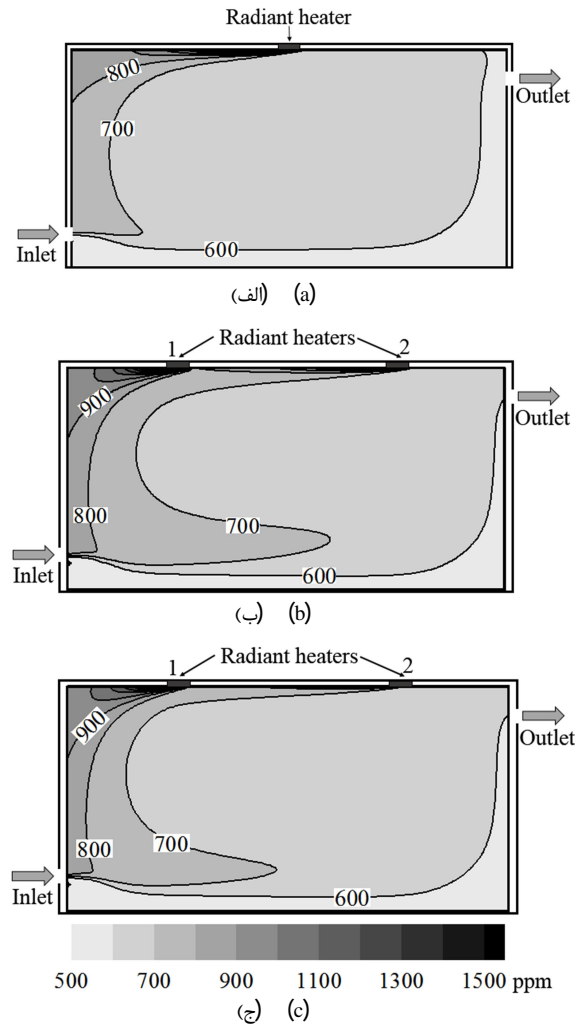


Fig. 6 Carbon dioxide concentration contours in chamber with (a) single radiant heater (b) couple radiant heaters with the same power (c) couple radiant heaters with the different power

شکل 6 کانتور غلظت دی‌اکسیدکربن در محفظه‌ای با (الف) یک تابشگر (ب) دو تابشگر با توان برابر، (ج) دو تابشگر با توان نابرابر

برای تحلیل دقیق‌تر نتایج و تشخیص میزان انحراف توزیع دمای کف از دمای میانگین مطلوب (27 درجه سلسیوس) از پارامتر مجذور میانگین مربعات به کار می‌رود که به صورت رابطه (5) تعریف می‌شود:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2}{N}} \quad (5)$$

که \bar{T} میانگین دمای روی کف است. مقادیر محاسبه شده این پارامتر برای تمام حالات در جدول 2 آمده است. در جدول 2، همچنین میزان مصرف انرژی و مقادیر غلظت آلاینده دی‌اکسیدکربن به طور متوسط گزارش شده است.

از مقایسه مقادیر جدول 2، این نتیجه حاصل می‌شود که وقتی از یک تابشگر استفاده شود توزیع دمای کف حدود 48 درصد، انحراف بیشتری نسبت به حالت استفاده از دو تابشگر، از دمای میانگین مطلوب دارد اما در مقابل مصرف انرژی آن 13 درصد کم‌تر است.

استفاده از دو ردیف تابشگر با توان نابرابر به جای دو ردیف تابشگر با توان برابر حدود 8 درصد انحراف از دمای میانگین مطلوب را کاهش می‌دهد، در حالی که کمتر از 1 درصد در مصرف انرژی و تولید آلاینده اثر می‌گذارد.

[2] E. Dudkiewicz, J. Jeżowiecki, Measured radiant thermal fields in industrial spaces served by high intensity infrared heater, *Energy and Buildings*, Vol. 41, No. 1, pp. 27-35, 2009.

[3] E. Dudkiewicz, J. Jeżowiecki, The influence of orientation of a gas-fired direct radiant heater on radiant temperature distribution at a work station, *Energy and Buildings*, Vol. 43, No. 1, pp. 1222-1230, 2011.

[4] Y. Wang, X. Meng, X. Yang, J. Liu, Influence of convection and radiation on the thermal environment in an industrial building with buoyancy-driven natural ventilation, *Energy and Buildings*, Vol. 75, No. 1, pp. 394-401, 2014.

[5] X. Meng, Y. Wang, T. Liu, X. Xing, Y. Cao, J. Zhao, Influence of radiation on predictive accuracy in numerical simulations of the thermal environment in industrial buildings with buoyancy-driven natural ventilation, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 96, No. 1, pp. 473-480, 2016.

[6] S. C. Mishra, H. K. Roy, Solving transient conduction and radiation heat transfer problems using the lattice Boltzmann method and the finite volume method, *Journal of Computational Physics*, Vol. 223, No. 1, pp. 89-107, 2007.

[7] F. Porges, *HVAC engineer's handbook*, eleventh edition, pp. 163-165, Elsevier, Amsterdam, 2001.

[8] Z. Tan, J. R. Howell, Combined radiation and natural convection in a two-dimensional participating square medium, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 34, No. 1, pp. 785-793, 1991.

[9] F. Incropera and D. DeWitt, "Introduction to heat transfer," 1985.

[10] A. C. o. G. I. H. C. o. I. Ventilation, *Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice*, 23rd ed: Committee on Industrial Ventilation, 1998.

فشار (Nm^{-2})	P
عدد پراتل	Pr
شار انتقال حرارت تابشی (W m^{-2})	\vec{q}_R
مجذور میانگین مربعات	RMS
برداری موقعیت	\vec{r}
زمان (s)	t
دما (K)	T
سرعت (m s^{-1})	u
مختصات کارتیزی (m)	x, y, z

علائم یونانی

ضریب نفوذ گرما (m^2s^{-1})	α
ضریب انبساط حجمی سیال (K^{-1})	β
لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)	μ
چگالی (kgm^{-3})	ρ

زیرنویسها

مؤثر	eff
جهات المانی	i, j

8- مراجع

[1] ASHRAE, Systems and equipment, *American Society of Heating, Refrigeratin and Air Conditioning Engineers*, New York, 2008.