



تحلیل اثر جانمایی دریچه خروجی هوا در یک محیط صنعتی دارای تابشگرهای دمابالا بر یکنواختی شرایط حرارتی و توزیع آلاینده در حضور میدان جریان نامتقارن

مهتاب امین زاده^۱، علی صفوی نژاد^۲ و سید علیرضا ذوالفقاری^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

^۲ استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۲۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۴/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۳۱

چکیده

در تحقیق حاضر، اثر جانمایی دریچه خروجی هوا بر ایجاد شرایط حرارتی مطلوب و یکنواخت و انتشار گونه دی‌اکسیدکربن تولیدی توسط تابشگرهای دمابالا در یک محیط صنعتی نمونه در حضور میدان جریان غیریکنواخت، مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، یک فضای دو بعدی دارای یک دریچه ورود و یک دریچه خروج هوا در نظر گرفته شده است. دو جانمایی دریچه خروجی هوا نزدیک کف و نزدیک سقف و همچنین، دو حالت چیدمان متفاوت (یک تابشگر و دو تابشگر متقارن) مدنظر قرار گرفت. برای شرایط مذکور معادلات پیوستگی، بقای تکانه خطی، معادله انرژی، معادله انتقال تابش و معادله غلظت گونه به کمک حلگر عددی اپن فوم حل شده است. همچنین، میزان مصرف انرژی در تحقیق حاضر مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که جانمایی دریچه خروجی هوا نزدیک سقف در کاهش غلظت دی‌اکسیدکربن نقش بسزایی دارد. همچنین استفاده از دو تابشگر توزیع دما را یکنواخت‌تر می‌کند. نتایج حاکی از آن است که میزان مصرف انرژی در حضور دو تابشگر برای جانمایی دریچه خروجی هوا نزدیک کف ۳ درصد و در حالت جانمایی دریچه خروجی هوا نزدیک سقف ۱۵ درصد در مقایسه با استفاده از یک تابشگر افزایش پیدا می‌کند.

کلمات کلیدی: تابشگر دمابالا؛ محیط صنعتی؛ توزیع آلاینده.

Analysis the Influence of Air Outlet Opening's Location in an Industrial Environment with High Temperature Radiant Heaters on Uniformity of Thermal Conditions and Distribution of the Contaminant in Presence of Asymmetric Flow Field

M. Aminzadeh¹, A. Safavinejad², A. Zolfaghari^{2,*}

¹ M.Sc. Student, Mech. Eng., University of Birjand, Birjand, Iran.

² Assistant Professor., Mech. Eng., University of Birjand, Birjand, Iran.

Abstract

In the present study, the effect of outlet opening location on providing appropriate and uniform thermal conditions and distribution of carbon dioxide species which is produced by high temperature radiant heaters under nonuniform flow field in an industrial environment have been investigated. For this reason, two dimensional environment with one inlet and one outlet opening have been considered. Two locations of air outlet opening near the floor and near the ceiling and also, two different types of radiant heaters' arrangement have been considered as: single radiant heater, couple radiant heaters. For the mentioned conditions, continuity equation, momentum equations, energy equation, radiative transfer equation and species concentration equation have been solved by OpenFoam numerical solver. Also energy consumption have been evaluated in the present study. The results show that location of air outlet opening near the ceiling effects significantly on decreasing carbon dioxide concentration. As well as, usage of couple radiant heaters makes temperature distribution more uniform. The results indicate that energy consumption increases in presence of couple radiant heaters for outlet opening which is near the floor 3 percent and near the ceiling 15 percent in comparison with single radiant heater.

Keywords: High Temperature Radiant Heaters; Industrial Environment; Distribution of the Contaminant.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۵۶۳۲۲۰۲۰۵۰؛ فکس: ۰۵۶۳۲۲۰۲۳۴۸

آدرس پست الکترونیک: zolfaghari@birjand.ac.ir

۱- مقدمه

کنترل کیفیت هوای داخل به منظور حفظ سلامتی و عدم ایجاد اختلال در کارایی افراد حاضر در ساختمان‌ها از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد [۱]. کیفیت هوای داخل به عواملی مانند میزان غلظت آلاینده‌های موجود در محیط، نرخ تهویه هوا، نحوه الگوی توزیع هوا و نوع سیستم تهویه مطبوع مورد استفاده وابسته است.

به منظور گرمایش فضاهای صنعتی، گرم کردن هوا به دلیل ارتفاع زیاد میان کف تا سقف، عدم وجود درزبندی مناسب و حجم زیاد فضا نسبت به تعداد افراد حاضر در آن چندان مقرون به صرفه نبوده و اغلب از سیستم‌های تابشی به جای سیستم‌های جابه‌جایی برای گرمایش فضاهای صنعتی استفاده می‌شود. شاخص‌ترین مؤلفه سیستم‌های تابشی، این است که بدن افراد و سطوح را بدون واسطه قرار دادن هوا، مستقیماً گرم می‌کنند و این ویژگی موجب کاهش مصرف انرژی و کم شدن اختلاف عمودی دمای هوا^۱ می‌گردد و در نتیجه این عوامل شرایط مطلوب حرارتی را برای افراد حاضر ایجاد می‌کنند [۲]. طبق دست‌نامه تأسیساتی اشرفی [۳]، سیستم‌های گرمایش تابشی به دو نوع دمابالایی و دمابالا تقسیم‌بندی می‌شوند. سیستم‌های تابشی دمابالایی در دمای سطح کمتر از ۱۵۰ درجه سلسیوس کار می‌کنند که می‌توان برای نمونه به سیستم‌های پنلی، گرمایش از کف و قرنیزی اشاره نمود. سیستم‌های تابشی دمابالا، دمای کاری بیش از ۱۵۰ درجه سلسیوس دارند. گرمکن‌های الکتریکی، پلاک‌های سرامیکی، سیستم‌های گرمایش تابشی لوله‌ای و نواری از انواع سیستم‌های تابشی دمابالا به شمار می‌روند [۴]. در فضاهای صنعتی به طور معمول از سیستم گرمایش تابشی نوع نواری و لوله‌ای استفاده می‌شود که این سیستم‌ها گازسوز بوده و آلاینده‌هایی ناشی از احتراق تولید می‌کند و به همین دلیل تأثیر مخربی بر کیفیت هوای داخل دارند.

یکی از مشکلات استفاده از سیستم‌های گرمایش دمابالا، ایجاد میدان تابشی غیریکنواخت می‌باشد. در سال ۲۰۰۹، دادکویچ و جزویکی [۵] در یک محیط صنعتی دارای گرمکن تابشی دمابالا، رابطه‌ای را برای محاسبه دمای تابشی به صورت تجربی به دست آوردند. ایشان به این نتیجه رسیدند

که گرمکن‌های تابشی گازسوز، میدان حرارتی غیریکنواخت ایجاد می‌کنند، همچنین دمای متوسط تابشی^۲ در فضای زیر گرمکن بیشتر از حد مجاز است. دادکویچ و جزویکی [۶] در سال ۲۰۱۱، 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 نیز رابطه‌ای برای محاسبه دمای تابشی با حفظ آسایش حرارتی انسان در یک اتاق ارائه نمودند.

به دلیل حجم بالای هوای ورودی به سالن‌های صنعتی، تحلیل هم‌زمان انتقال حرارت جابه‌جایی و تابشی حائز اهمیت می‌باشد. وانگ و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۴، به کمک نرم افزار فلونت، جریان هوا و تابش سطوح را در یک ساختمان صنعتی به صورت دو بعدی شبیه‌سازی نمودند. آن‌ها اثر عدد گراشف و ضریب صدور یک گرمکن دمابالایی مستقر روی کف را بر توزیع سرعت، دما و نرخ تهویه تحلیل کردند و به این نتیجه رسیدند که عدد ناسلت کلی و نرخ تهویه با افزایش گراشف و ضریب صدور سطح، افزایش می‌یابند. منگ و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۶ به بررسی اثر تابش بر دقت شبیه‌سازی عددی برای شرایط حرارتی در ساختمان صنعتی پرداختند. آن‌ها محفظه‌ای کوچک را که یک چشمه حرارتی استوانه‌ای شکل با دمای بالا روی کف داشته، برای انجام آزمایش انتخاب کردند و نتایج عددی حاصل از نرم افزار فلونت را با آن صحت‌سنجی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند نتایج حاصل از تحلیل ترکیبی تابش و جابه‌جایی نسبت به شبیه‌سازی خالص جابه‌جایی تطابق مناسبی با نتایج آزمایش دارد و نیز عدد گراشف و نرخ تهویه در مدل جابه‌جایی خالص بیشتر از مدل ترکیبی جابه‌جایی و تابش است.

همان‌طور که گفته شد، آن نوع از تابشگرهای دمابالایی که جهت گرمایش در فضاهای صنعتی استفاده می‌شوند، گازسوز می‌باشند. به همین دلیل، تهویه مناسب به منظور تأمین هوای مورد نیاز احتراق دستگاه و خارج نمودن محصولات احتراق حائز اهمیت می‌باشد. در این گونه فضاها تعبیه لوله دودکش مناسب روی فن تخلیه محصولات احتراق دستگاه، الزامی است. با وجود دودکش، امکان نشت محصولات احتراق در داخل سالن وجود دارد و این امر می-

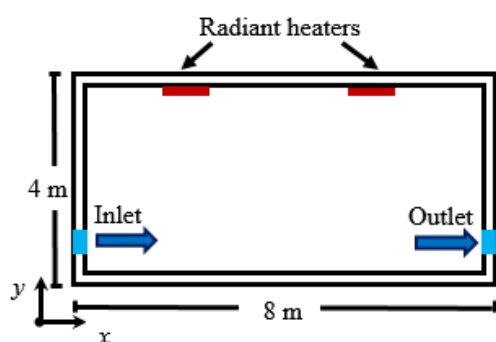
² Mean Radiant Temperature¹ Vertical Temperature Difference of Air

۲- فضای نمونه

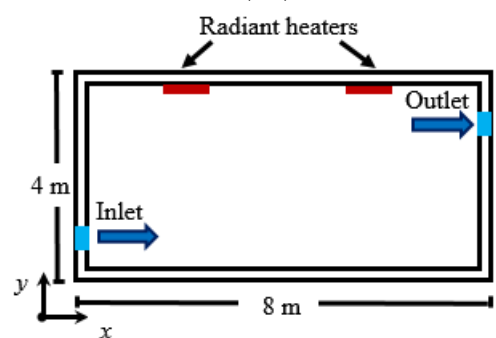
فضای نمونه مورد بررسی در تحقیق حاضر یک سالن صنعتی با ارتفاع ۴ متر و عرض ۸ متر می‌باشد که طول آن در جهت دیگر زیاد است، به همین دلیل اثرات آن بر نتایج چشمگیر نمی‌باشد و بنابراین طبق تحلیل ابعادی از اثرات بعد سوم صرف‌نظر شده است. یک دریچه ورود هوا و یک دریچه خروج هوا هر یک به ابعاد $۵ \times ۰/۲$ مترمربع روی دیوارهای جانبی برای تهویه هوای این سالن صنعتی در نظر گرفته شده است. دریچه ورود هوا در ارتفاع $۰/۴$ متری از کف قرار دارد. به منظور بررسی اثر جانمایی دریچه خروجی هوا، دو حالت (الف) دریچه خروجی هوا در ارتفاع $۰/۴$ متری از کف، (ب) دریچه خروجی هوا در ارتفاع $۰/۴$ متری از سقف در نظر گرفته شده است. همچنین، دو چیدمان مختلف برای تابشگرها مطابق شکل‌های ۱ و ۲ فرض شده است. ضمناً عرض هر تابشگر $۰/۴$ متر می‌باشد.

تواند سلامت افراد حاضر در سالن و میزان کارایی آن‌ها را به خطر بیندازد. بنابراین، شبیه‌سازی مقدار و نحوه توزیع این آلاینده‌ها حائز اهمیت می‌باشد، اما تا کنون این موضوع مورد بررسی قرار نگرفته است. گونه دی‌اکسیدکربن به عنوان نماینده آلاینده‌های ناشی از احتراق گاز طبیعی انتخاب شده است تا نحوه توزیع و غلظت آلاینده‌گی در سالن تحلیل شود. غلظت دی‌اکسید کربن در محل حضور افراد و محل تنفس معمولاً به عنوان شاخص کیفیت هوا معرفی می‌شود که باید در محدوده مجاز $۸۰۰-۱۰۰۰$ ppm باشد [۹].

جانمایی دریچه خروجی هوا بر توزیع آلاینده اثر می‌گذارد. لذا در تحقیق حاضر، سعی شده است تا با شبیه‌سازی همزمان انتقال حرارت تابشی و جابه‌جایی در یک نمونه ساختمان صنعتی دارای تابشگرهای دمابالا، تحلیل مناسبی از اثرات جانمایی دریچه خروجی هوا برای دو حالت چیدمان تابشگرها بر توزیع دما و سرعت و غلظت آلاینده ارائه گردد.

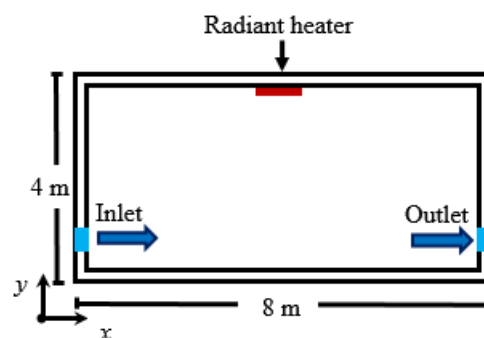


(الف)

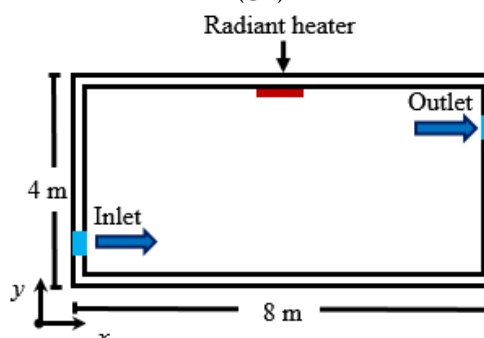


(ب)

شکل ۲- طرح‌واره فضای نمونه دارای دو تابشگر (الف) دریچه خروجی هوا نزدیک کف، (ب) دریچه خروجی هوا نزدیک سقف



(الف)



(ب)

شکل ۱- طرح‌واره فضای نمونه دارای یک تابشگر (الف) دریچه خروجی هوا نزدیک کف، (ب) دریچه خروجی هوا نزدیک سقف

که u و v مقادیر سرعت جریان هستند. همچنین، ρ بیانگر چگالی سیال، P فشار، μ_{eff} لزجت مؤثر سیال و g شتاب گرانشی می‌باشد. T_0 دمای مرجع و β ضریب انبساط گرمایی نام دارد. همچنین با توجه به حجم و سرعت بالای هوای ورودی، جریان هوا در یک محیط صنعتی اغلب مغشوش می‌باشد. لذا برای مدل‌سازی جریان مغشوش در فضای نمونه از مدل $k-\epsilon$ RNG استفاده شده است.

معادله انتقال تابش برای هر جهت \hat{s} که به وسیله زاویه فضایی Ω مشخص می‌شود، حول المان زاویه فضایی $d\Omega$ به صورت رابطه (۵) داده شده است که κ_a ضریب جذب محیط واسط، σ_s ضریب انحراف محیط واسط و Φ تابع فاز انحرافی و I شدت تابش می‌باشد [۱۰]. برای حل معادله انرژی باید ابتدا به محاسبه \vec{q}_R پرداخت. برای این کار از روابط (۵) تا (۹) استفاده می‌شود. به این صورت که با یک حدس اولیه برای دما، رابطه (۵) با داشتن شرط مرزی (رابطه (۶)) حل می‌شود. سپس با داشتن شدت تابش I و رابطه (۷) تابش فرودی G محاسبه شده، با معلوم بودن دمای دیواره یا همان مرز T_b و شدت تابش مرز I_b از رابطه (۹) حساب می‌شود و در انتها تابش \vec{q}_R از رابطه (۸) تعیین می‌شود. سپس با حل معادله انرژی دمای جدیدی برای محیط به دست می‌آید که جایگزین دمای اولیه می‌شود و روند تکرار می‌شود تا به همگرایی بیانجامد. شکل ۳ الگوریتم حل را به صورت یک نمودار فرآیندی نشان می‌دهد. پس از تعیین میدان دما و سرعت، معادله غلظت گونه حل می‌شود. در رابطه (۱۰)، C جزء جرمی گونه و D ضریب نفوذ گونه است.

طبق اطلاعات شرکت‌های سازنده تابشگرهای دمابالا، به طور متوسط به ازای هر کیلو وات توان تابشگر، حدود ۰/۱ مترمکعب بر ساعت گاز طبیعی (متان) مصرف می‌شود. حجم گاز دی‌اکسید کربن تولید شده، حدوداً معادل حجم گاز متان مصرفی می‌باشد. با این فرض که ۱۰ درصد از گاز دی‌اکسید کربن تولیدی به داخل ساختمان نشت کند، میزان تولید گاز دی‌اکسید کربن از تابشگرها محاسبه می‌شود. به منظور مدل‌سازی تولید گونه در سالن بر اثر احتراق داخل تابشگر، یک جمله چشمه، در حلگر ساخته شده برای حل گونه، تعریف شده است. همچنین، غلظت دی‌اکسید کربن در هوای ورودی 500 ppm فرض شده است.

۳- معادلات حاکم و روش حل

به منظور تحلیل عملکرد تابشگرهای دمابالا و یافتن توزیع آلاینده تولیدی از تابشگرها در داخل فضای صنعتی مورد نظر، باید معادلات پیوستگی، بقای تکانه خطی، انرژی، معادله انتقال تابش و معادله غلظت گونه حل شوند. معادلات حاکم بر جریان مغشوش و تراکم ناپذیر با فرض ثابت بودن خواص سیال در دو بعد به صورت زیر است:

معادله پیوستگی:

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

معادلات مومنتم:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu_{eff} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu_{eff} \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + \rho g \beta (T - T_0) \quad (3)$$

معادله انرژی:

$$\left[\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = \alpha_{eff} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho C_p} \nabla \cdot \vec{q}_R \quad (4)$$

معادله انتقال تابش:

$$\frac{dI(\vec{r}, \Omega)}{ds} = \kappa_a \left(\frac{\sigma T^4(\vec{r})}{\pi} \right) - (\kappa_a + \sigma_s) I(\vec{r}, \Omega) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{\Omega=4\pi} I(\vec{r}, \hat{\Omega}) \Phi(\Omega, \hat{\Omega}) \quad (5)$$

شرط مرزی معادله انتقال تابش:

$$I(\vec{r}, \hat{s}) = \varepsilon(r_w) I_b(r_w) + \frac{1 - \varepsilon(r_w)}{\pi} \int_{\hat{n} \cdot \hat{s} < 0} I(r_w, \hat{\Omega}) |\hat{n} \cdot \hat{\Omega}| d\hat{\Omega} \quad (6)$$

$$G(\vec{r}) = \int_{4\pi} I(\vec{r}, \hat{s}) d\Omega \quad (7)$$

$$I(\vec{r}, \hat{s}) = \varepsilon(r_w) I_b(r_w) + \frac{1 - \varepsilon(r_w)}{\pi} \int_{\hat{n} \cdot \hat{s} < 0} I(r_w, \hat{\Omega}) |\hat{n} \cdot \hat{\Omega}| d\hat{\Omega} \quad (8)$$

$$I_b = \frac{\sigma T_b^4}{\pi} \quad (9)$$

معادله غلظت گونه:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + Q_c \quad (10)$$

می‌باشد [۱۱] و از آنجایی که تابشگرها به دلیل گازسوز بودن و انجام عمل احتراق مقدار بیشتری نیاز به هوای تازه دارند و نیز به دلیل نشت آلاینده‌ها به منطقه حضور افراد، برای تحقیق حاضر، ۱۰ بار تعویض هوا در ساعت در نظر گرفته شده است. همچنین، خصوصیات مورد نیاز برای شبیه‌سازی مربوط به جریان و سیال در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

به منظور شبیه‌سازی این مسأله با شرایط ذکر شده از کد عددی این‌فوم و بسته حل بویانت بوزینسک پیمپل فوم^۳ 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 پیش‌رو در حالت پایا می‌باشد، به همین دلیل زمان حل را تا جایی ادامه می‌دهیم تا نتایج بین دو گام زمانی پی در پی، تقریباً تغییر نکند و حل به حالت پایا برسد. فلوجارت الگوریتم حلگر تحقیق حاضر در شکل ۳ نشان داده شده است. پس از استخراج نتایج دما و سرعت از این حلگر، معادله گونه توسط کد نوشته شده حل می‌گردد و نتایج مورد نظر به دست می‌آید.

به دلیل بزرگ بودن فضای نمونه، حل همزمان تابش و جابه‌جایی و فرایند پیش‌بینی-اصلاح دمای تابشگرها به منظور رسیدن به میانگین دمای کف مطلوب (۲۷ درجه سلسیوس) زمان اجرای کد بسیار طولانی می‌باشد. به این صورت که با یک سیستم محاسباتی با رم ۱۲۸ گیگابایت و ۲۰ هسته محاسباتی ۲/۱ گیگا هرتز، جهت همگرایی حل بیش از ۴ روز زمان نیاز است. همچنین استقلال حل از شبکه محاسباتی به دقت مورد بررسی قرار گرفته و شبکه‌ای با حدود ۲۶۰۰۰ سلول مناسب تشخیص داده شده است.

جدول ۱- مشخصات هوا

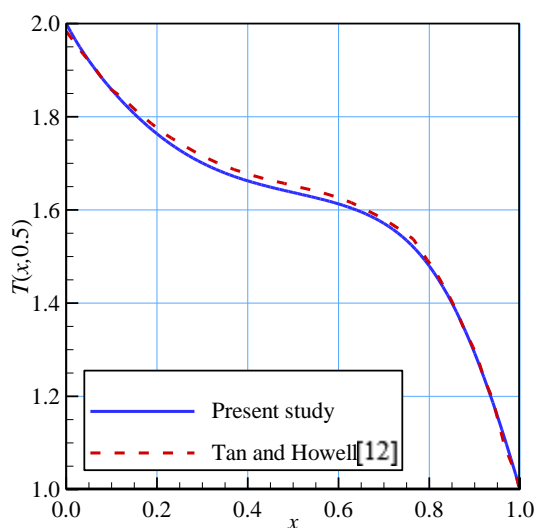
پارامتر	مقدار
لزجت سینماتیکی (m^2s^{-1})	$12/6 \times 10^{-6}$
ضریب انبساط حجمی (K^{-1})	$3/8 \times 10^{-3}$
عدد پرانتل	۰/۷۱۷
چگالی (kgm^{-3})	۱/۳۳۴
ظرفیت حرارتی در فشار ثابت ($Jkg^{-1}K^{-1}$)	۱۰۰۶
ضریب هدایت حرارتی ($W m^{-1} K^{-1}$)	23×10^{-3}

یکی از چالش‌های فراروی تحقیق، با توجه به شرایط مسأله انتخاب روش مناسب برای حل تابش می‌باشد. بنابراین، روش راستاهای مجزای حجم محدود^۱ انتخاب شده است. این روش یکی از روش‌های کارآمد برای حل انتقال حرارت تابشی و محاسبه جمله $\nabla \cdot \bar{q}_R$ می‌باشد و نیز با روش حجم محدود تطابق و سازگاری مناسبی دارد [۱۰]. روش راستاهای مجزای حجم محدود اثرات تابش سطوح و محیط واسط را بررسی می‌کند. لذا ضریب جذب هوا ۰/۱ در نظر گرفته شده است. همچنین، تمام سطوح به صورت کدر، خاکستری و دیفیوز فرض شده است. ضریب صدور تابشگرهای دمابالا و دیوارهای سالن به ترتیب ۱ و ۰/۹ انتخاب شده‌اند. هوای سالن به وسیله ورود هوا از دریچه، با دمایی برابر دمای هوای بیرون (۱۰- درجه سلسیوس) تهویه می‌شود. همچنین دمای دیوارهای جانبی سالن، برابر با دمای هوای بیرون فرض شده است. اگر چه ممکن است این فرض کاملاً منطبق با واقعیت نباشد، ولی با توجه به عایقکاری ضعیف ساختمانهای صنعتی می‌تواند تخمینی مناسب و البته رو به بالا برای بار ساختمان در زمستان ارائه کند. لازم به ذکر است که بررسی عملکرد تابشگرها در این شرایط بحرانی سرد و با تخمین مقدار بیشتری برای بار حرارتی، می‌تواند معیار مناسبی برای ارزیابی عملکرد تابشگرها در شرایط اوج بار باشد. بدیهی است که در حالت‌های دیگر و شرایط آب و هوایی گرم‌تر، از دمای تابشگرها کاسته می‌شود و در نتیجه یکنواختی حرارتی محیط بیشتر شده و از تولید آلاینده‌ها نیز کاسته خواهد شد. لذا با این فرض، در مقاله حاضر به بررسی یکی از بحرانی‌ترین شرایط طراحی تابشگرهای دمابالا پرداخته شده است.

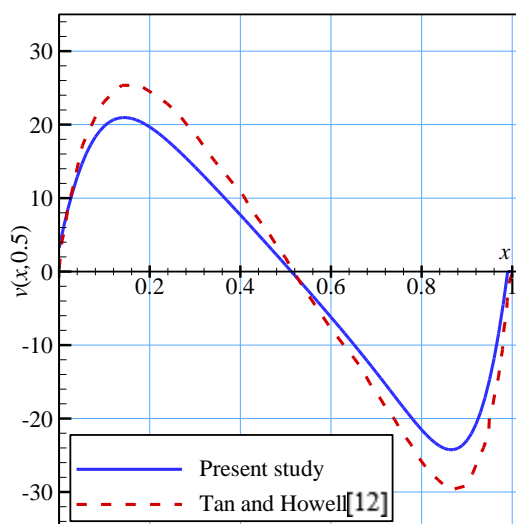
دمای تابشگرها طی یک سری مراحل پیش‌بینی-اصلاح، طوری تنظیم می‌شود که میانگین دمای کف به دمای مناسب ۲۷ درجه سلسیوس برسد. ضمن اینکه شرط مرزی جریان ورودی، بر اساس تعداد ۱۰ بار تعویض هوا در هر ساعت (ACH) برای سالن صنعتی اعمال شده است. طبق استانداردهای تهویه مطبوع، برای محیط‌های صنعتی با توجه به نوع کاربری آن، حداقل تعداد تعویض هوا ۴ بار در ساعت

^۱ Finite Volume Discrete Ordinate Method^۲ Air Changes per Hour^۳ Buoyant Boussinesq Pimple Foam

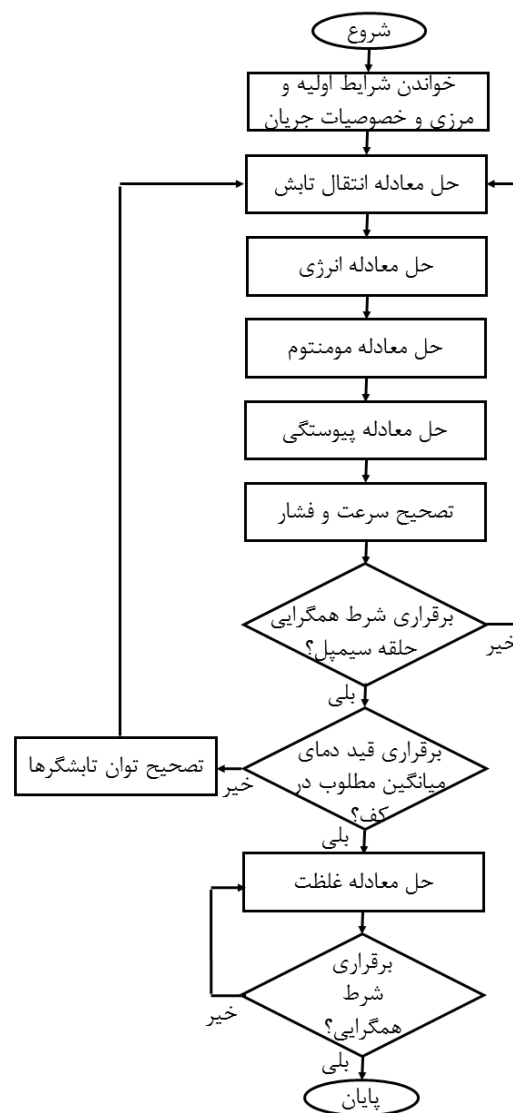
پارامتر تابش-هدایت برابر ۱، توزیع دمای بی بعد و نمودار سرعت عمودی بی بعد روی خط افقی گذرنده از مرکز محفظه به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همخوانی نسبتاً مناسبی میان نتایج تحقیق حاضر با نتایج تان و هاول [۱۲] به چشم می‌خورد و همین امر نشان دهنده صحت و اعتبار قابل قبول مدل‌سازی حاضر است.



شکل ۴- مقایسه توزیع دمای بی بعد خط مرکزی با نتیجه تان و هاول [۱۲]



شکل ۵- مقایسه توزیع سرعت بی بعد خط مرکزی با نتیجه تان و هاول [۱۲]



شکل ۳- فلوچارت حلگر محاسباتی

۴- اعتبار سنجی

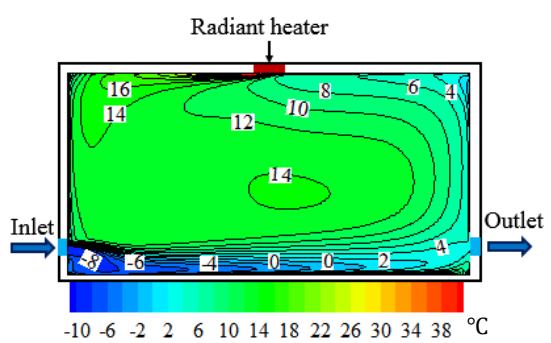
حلگر بویانت بوزینسک پیمپل فوم و روش حل عددی با نتایج ارائه شده توسط تان و هاول [۱۲] اعتبارسنجی شده است. در این تحقیق انتقال حرارت تابشی و جابه‌جایی طبیعی در یک محفظه مربعی دارای محیط واسط با ضریب جذب ۱ که دو دیوار دما ثابت و دو دیوار عایق دارد، مورد تحلیل قرار گرفته است. ضمن این که شرط عدم لغزش برای تمام سطوح برقرار می‌باشد. همچنین تمام سطوح جسم سیاه با ضریب صدور ۱ فرض شده‌اند. برای عدد پرانتل ۰/۷۱، عدد رایلی 10^4 و

۵- نتایج و بحث

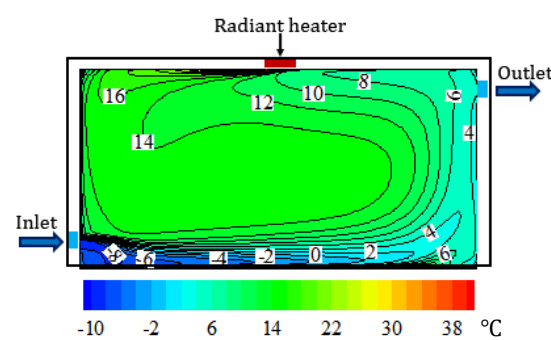
همان‌طور که گفته شد، هدف اصلی از تحقیق حاضر بررسی اثر چیدمان تابشگرها و دریچه خروجی هوا بر یکنواختی شرایط حرارتی، پخش آلاینده دی‌اکسید کربن و میزان مصرف انرژی می‌باشد. برای این منظور، دو جانمایی مختلف برای دریچه خروجی هوا و دو چیدمان یک تابشگر و دو تابشگر با توان برابر مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، برای این که امکان مقایسه بهتری بین نتایج فراهم باشد، دمای تابشگرها طوری تنظیم شده‌اند که میانگین توزیع دمای کف سالن صنعتی، برابر ۲۷ درجه سلسیوس باشد.

۵-۱- بررسی عملکرد یک تابشگر دمابالا

نمودار توزیع اندازه سرعت و خطوط جریان در شکل ۶ و نمودار توزیع دما در شکل ۷ برای هر دو جانمایی دریچه خروجی هوا نشان داده شده‌اند. همچنین، توزیع غلظت گونه دی‌اکسید کربن در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

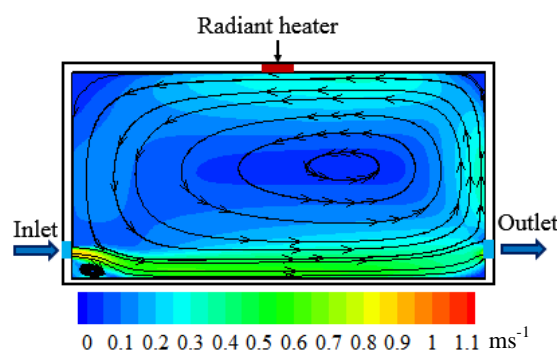


(الف)

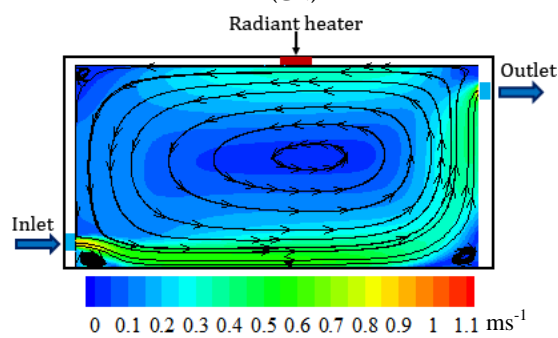


(ب)

شکل ۷- نمودار توزیع دما در فضای نمونه دارای یک تابشگر در حالت الف) دریچه خروجی نزدیک کف و ب) دریچه خروجی هوا نزدیک سقف

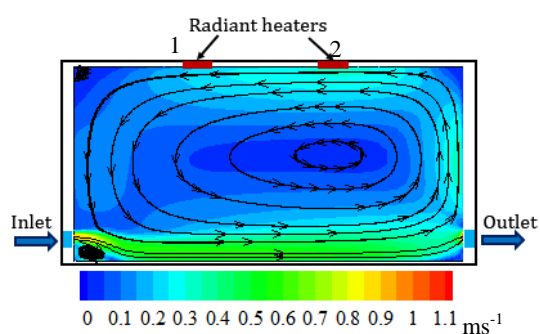


(الف)

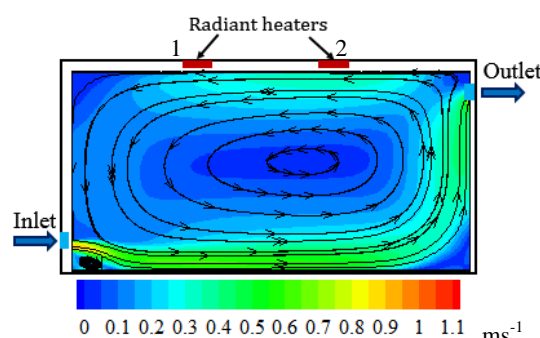


(ب)

شکل ۶- نمودار اندازه سرعت و خطوط جریان در فضای نمونه دارای یک تابشگر در حالت الف) دریچه خروجی نزدیک کف و ب) دریچه خروجی هوا نزدیک سقف

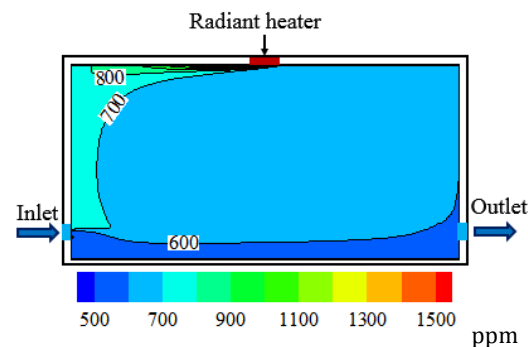


(الف)

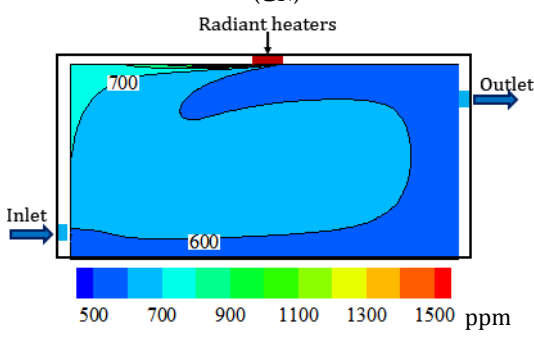


(ب)

شکل ۹- نمودار اندازه سرعت و خطوط جریان در فضای نمونه دارای دو تابشگر در حالت الف) دریچه خروجی نزدیک کف و ب) دریچه خروجی هوا نزدیک سقف



(الف)



(ب)

شکل ۸- نمودار توزیع غلظت آلاینده دی اکسید کربن در فضای نمونه دارای یک تابشگر برای حالت الف) دریچه خروجی نزدیک کف و ب) دریچه خروجی هوا نزدیک سقف

جدول ۲- نرخ انتقال حرارت تابشی، جابه‌جایی و کل به ازای واحد طول تابشگر برای دو جانمایی دریچه خروجی هوا

کل (Wm ⁻¹)	جابه‌جایی (Wm ⁻¹)	تابش (Wm ⁻¹)	جانمایی دریچه خروجی هوا
۹۹۵	۱۵۰	۸۴۵	نزدیک کف
۹۹۱	۱۶۳	۸۲۸	نزدیک سقف

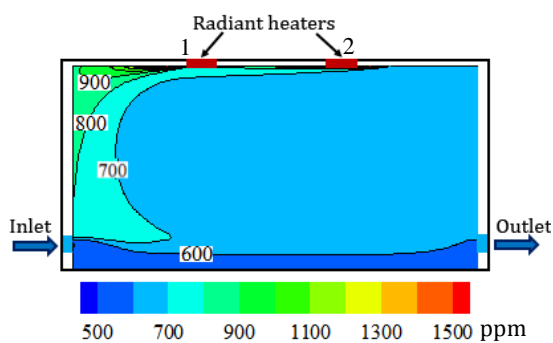
۵-۲- بررسی عملکرد دو تابشگر دمابالا

نمودار توزیع اندازه سرعت و خطوط جریان در شکل ۹ و نمودار توزیع دما در شکل ۱۰ برای هر دو جانمایی دریچه خروجی هوا در حالت داشتن دو تابشگر دمابالا نشان داده شده‌اند. همچنین توزیع غلظت گونه دی اکسید کربن در شکل ۱۱ ارائه شده است.

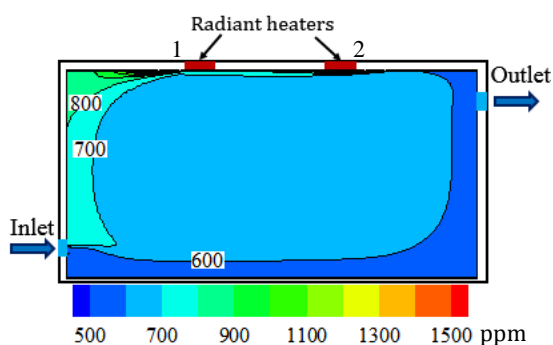
سرعت هوا در نزدیکی تابشگر شماره ۲ بیشتر بوده و در نتیجه دمای اطراف آن مقادیر کمتری دارد، درحالی که نزدیک تابشگر شماره ۱ سرعت هوا کم‌تر و تابشگر موجب افزایش دما در این محدوده شده است.

غلظت دی‌اکسید کربن در محل حضور افراد و محل تنفس آن‌ها معمولاً نشانگر کیفیت هوا می‌باشد. هنگامی که غلظت دی‌اکسید کربن در هوا به ۸۰۰-۱۰۰۰ ppm می‌رسد، نارضایتی رخ می‌دهد [۹]. نزدیک کف که منطقه حضور افراد می‌باشد و غلظت گاز دی‌اکسید کربن در این منطقه به منظور حفظ سلامت افراد، از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد، کمترین مقدار ممکن را داراست. همان‌طور که در شکل ۸ ملاحظه می‌شود، در حالتی که دریچه خروجی هوا در نزدیک سقف قرار دارد، غلظت آلاینده دی اکسید کربن به طور چشمگیری کاهش می‌یابد.

در جدول ۲ مقادیر نرخ انتقال حرارت تابشی و جابه‌جایی بر واحد طول تابشگر به تفکیک گزارش شده است. طبق مقادیر جدول ۲، تابش بیشترین نقش را در انتقال حرارت دارد و بالغ بر ۸۵ درصد انتقال حرارت صورت گرفته برای تابشگرها مبتنی بر تابش می‌باشد.



(الف)

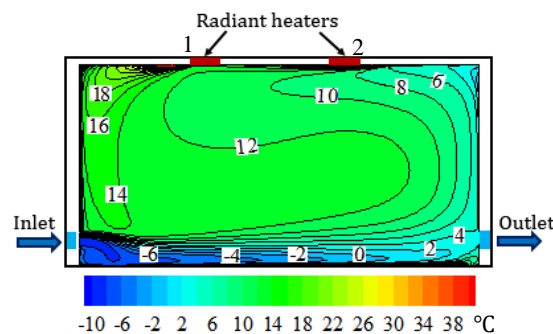


(ب)

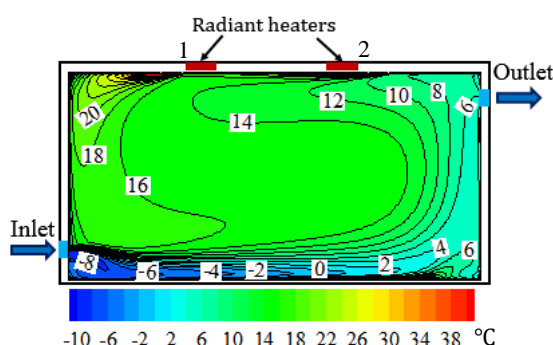
شکل ۱۱- نمودار توزیع غلظت آلاینده دی اکسید کربن در فضای نمونه دارای دو تابشگر در حالت الف) دریچه خروجی نزدیک کف و ب) دریچه خروجی هوا نزدیک سقف

گاز کم‌تر و کاهش تولید گاز دی‌اکسیدکربن، غلظت گونه نسبت به حالت دو تابشگر به طور میانگین ۵٪ کمتر است. نتایج استخراج شده از حلگر برای نرخ انتقال حرارت تابشی و جابه‌جایی تابشگرها، در جدول ۳ به تفکیک تابشگر ارائه شده است. از مقایسه نتایج مشخص می‌شود که مقادیر انتقال حرارت تابشی در حالت دریچه خروجی نزدیک سقف و در حالت نزدیک کف، تفاوت زیادی با هم ندارند و این توجیه دیگری بر غالب بودن انتقال حرارت تابشی بر جابه‌جایی در سیستم گرمایش دمابالا می‌باشد.

تغییر در الگوی حرکت جریان به دلیل تفاوت در جانمایی دریچه خروجی هوا، موجب تغییر در میزان انتقال حرارت جابه‌جایی برای تابشگرها شده است و به طور متوسط ۲۵ درصد، انتقال حرارت جابه‌جایی در حالت دریچه خروجی هوا نزدیک سقف، بیش‌تر از حالت دریچه خروجی هوا نزدیک کف است.



(الف)



(ب)

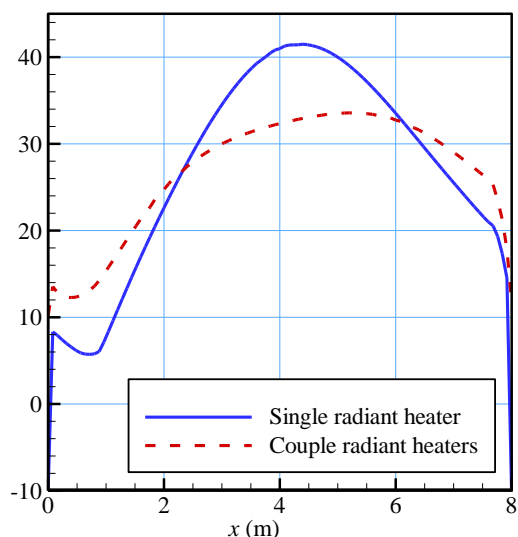
شکل ۱۰- نمودار توزیع دما در فضای نمونه دارای دو تابشگر در حالت الف) دریچه خروجی نزدیک کف و ب) دریچه خروجی هوا نزدیک سقف

با مقایسه شکل‌های ۷ و ۱۰ مشخص می‌شود که استفاده از دو تابشگر دمابالا به جای یک تابشگر، دمای فضای داخلی سالن را به طور متوسط حدود ۳ درجه سلسیوس افزایش می‌دهد. اما در نزدیکی کف سالن به دلیل عبور جریان هوای سرد در این ناحیه، دمای هوا نسبت به حالت استفاده از یک تابشگر چندان تغییر نکرده است. با توجه به شکل ۱۱، در حالت دو تابشگر دمابالا نیز ملاحظه می‌شود که تعبیه دریچه خروجی هوا نزدیک سقف، غلظت آلاینده دی اکسید کربن را در فضای سالن صنعتی کاهش می‌دهد.

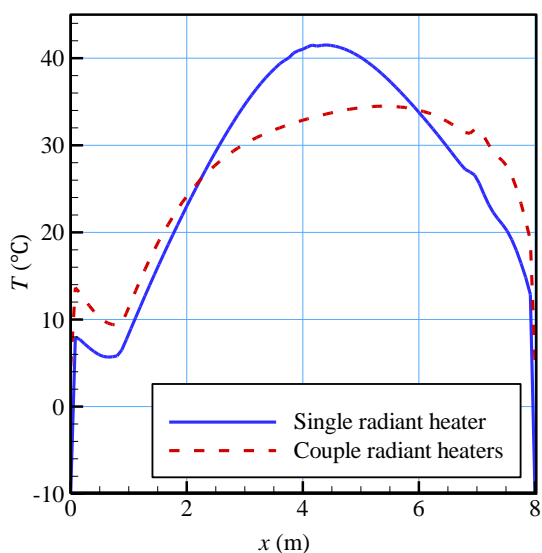
همان‌طور که در شکل‌های ۸ و ۱۱ مشاهده می‌شود، در حالت داشتن دو تابشگر در مقایسه با یک تابشگر، محل تولید گونه از مرکز به کناره متمایل شده است. اما به دلیل جهت حرکت جریان هوا، گونه تولیدی از فضا جمع شده و به گوشه بالایی سالن رانده می‌شوند. حالت یک تابشگر به علت مصرف

جدول ۳- نرخ انتقال حرارت تابشی، جابه‌جایی و کل به ازای واحد طول تابشگر برای دو جانمایی دریچه خروجی هوا

میزان مصرف انرژی (Wm^{-1})	تابشگر ۲			تابشگر ۱			جانمایی دریچه خروجی هوا
	کل (Wm^{-1})	جابه‌جایی (Wm^{-1})	تابش (Wm^{-1})	کل (Wm^{-1})	جابه‌جایی (Wm^{-1})	تابش (Wm^{-1})	
۱۰۲۲	۵۲۲	۱۱۰	۴۱۲	۵۰۰	۸۸	۴۱۲	نزدیک کف
۱۱۴۳	۵۹۰	۱۴۳	۴۴۷	۵۵۳	۱۰۶	۴۴۷	نزدیک سقف



(الف)



(ب)

شکل ۱۲- نمودار توزیع دمای کف سالن برای حالت‌های یک تابشگر و دو تابشگر به ازای الف) دریچه خروجی نزدیک کف و ب) دریچه خروجی هوا نزدیک سقف

هدف هر سیستم تهویه مطبوع، برقراری شرایط حرارتی و آسایشی مطلوب در محیط می‌باشد. معیاری که برای داشتن شرایط حرارتی مطلوب در سالن صنعتی حاضر استفاده شده است، داشتن توزیع دمای مطلوب و یکنواخت در کف می‌باشد. در شکل ۱۲، نمودار توزیع دمای کف سالن برای هر دو جانمایی دریچه خروجی هوا و هر دو چیدمان تابشگر دمابالا در سالن صنعتی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشخص است، جانمایی دریچه خروجی هوا بر الگوی توزیع دمای کف سالن تأثیر کمی دارد. پیشنهاد می‌شود که به جای گرمایش سالن توسط یک ردیف تابشگر، از دو ردیف تابشگر استفاده شود تا اختلاف بین دمای بیشینه و کمینه کف کاهش یابد و در مناطق بیشتری از سالن، آسایش حرارتی احساس شود.

همچنین از شکل ۱۲ می‌توان دریافت که با وجود این که میانگین دمای کف به دمای مطلوب موردنظر (۲۷ درجه سلسیوس) رسیده است، اما تفاوت زیاد بین دمای کمینه و بیشینه کف و عدم یکنواختی توزیع دما در حالت داشتن یک تابشگر مطلوب نیست. به منظور داشتن توزیع یکنواخت دما در داخل سالن از دو تابشگر دمابالا می‌توان استفاده نمود، که این امر انحراف توزیع دمای کف سالن از دمای میانگین مطلوب (۲۷ درجه سلسیوس) نسبت به حالت استفاده از یک تابشگر، حدود ۳۵ درصد کاهش پیدا می‌کند.

جهت روشن شدن میزان اثر جانمایی دریچه و تعداد تابشگر بر میزان پخش آلاینده، میانگین غلظت آلاینده دی-اکسید کربن در فضای نمونه در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- میانگین غلظت دی‌اکسیدکربن (ppm) برای دو جانمایی دریچه خروجی هوا

جانمایی دریچه خروجی هوا	یک تابشگر	دو تابشگر
نزدیک کف	۶۳۷	۶۶۶
نزدیک سقف	۶۰۷	۶۴۱

Nm^{-2} فشار،	P
عدد پراتل	Pr
شار انتقال حرارت تابشی، $W m^{-2}$	\vec{q}_R
بردار موقعیت	\vec{r}
زمان، s	t
دما، K	T
سرعت در راستای x ، $m s^{-1}$	u
سرعت در راستای y ، $m s^{-1}$	v
علائم یونانی	
ضریب نفوذ گرما، $m^2 s^{-1}$	α
ضریب جذب، m^{-1}	κ_a
لزجت دینامیکی، $kgm^{-1}s^{-1}$	μ
چگالی، kgm^{-3}	ρ
ثابت استفان بولتزمن، $W m^{-2} K^{-4}$	σ
ضریب انحراف	σ_s
تابع فاز انحرافی	Φ
البدو انحراف	ω
جهت در المان فضایی	Ω
زیر نویس‌ها	
مؤثر	Eff

۸- مراجع

- [1] Lim E, Ito K, Sandberg M (2014) Performance evaluation of contaminant removal and air quality control for local ventilation systems using the ventilation index Net Escape Velocity. Build Environ 79: 78-89.
- [2] American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2008) ASHRAE Handbook- Systems and Equipment. I-P and SI edn. New York.
- [3] ASHRAE (2007) HVAC applications. American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA.
- [4] McDowall R (2006) Fundamentals of HVAC systems. 1st edn. Academic Press.
- [5] Dudkiewicz E, Jezowiecki J (2009) Measured radiant thermal fields in industrial spaces served by high intensity infrared heater. Energ Buildings 41: 27-35.
- [6] Dudkiewicz E, Jezowiecki J (2011) The influence of orientation of a gas-fired direct radiant heater on radiant temperature distribution at a work station. Energ Buildings 43: 1222-1230.

با توجه به جدول ۴ جانمایی دریچه خروجی نزدیک سقف حدود ۵ درصد از غلظت آلاینده در کل فضا می‌کاهد. همچنین استفاده از دو تابشگر به دلیل مصرف بیشتر گاز طبیعی حدود ۵ تا ۶ درصد تولید آلاینده را افزایش می‌دهد.

۶- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر به بررسی عملکرد تابشگرهای دمابالا در یک محیط صنعتی نمونه، پرداخته شد. یکی از عوامل مورد بررسی در این تحقیق، تعداد و توان تابشگرهای دمابالا بود که دو حالت یک تابشگر و دو تابشگر بررسی شد. استفاده از یک تابشگر، توزیع دمای غیر یکنواخت را ایجاد می‌کند. اما استفاده از دو تابشگر توزیع دمای یکنواخت‌تری بوجود می‌آورد و انحراف توزیع دمای کف سالن از دمای میانگین مطلوب (۲۷ درجه سلسیوس) نسبت به حالت استفاده از یک تابشگر، حدود ۳۵ درصد کاهش پیدا می‌کند. نکته قابل توجه این است که در حین داشتن یکنواختی مطلوب دما در حالت دو تابشگر، میزان مصرف انرژی در حالت جانمایی دریچه خروجی هوا نزدیک کف ۳ درصد و در حالت جانمایی دریچه خروجی هوا نزدیک سقف ۱۵ درصد نسبت به حالت استفاده از یک تابشگر افزایش پیدا می‌کند.

عامل دیگری که مورد مطالعه قرار گرفت، اثر جانمایی دریچه خروجی هوا بر عملکرد تابشگرها و انتشار آلاینده‌گی در محیط بود. دو جانمایی دریچه خروجی نزدیک کف و نزدیک سقف، مدنظر قرار گرفت. اثر این عامل بر توزیع سرعت، دمای داخل سالن، یکنواختی دمای کف و میزان مصرف انرژی بررسی شد. در نتیجه، می‌توان گفت که در حالت تعبیه دریچه خروجی هوا نزدیک سقف، دمای هوای داخل سالن و نیز دمای کف چندان متأثر نمی‌شود. اما جانمایی دریچه خروجی هوا نزدیک سقف در کاهش غلظت آلاینده تولیدی توسط تابشگرهای دمابالای گازسوز نقش بسزایی دارد.

۷- فهرست علائم

ppm غلظت گونه،	C
ظرفیت گرمایی فشار ثابت، $Jkg^{-1}K^{-1}$	C_p
ضریب پخش گونه، m^2s^{-1}	D
تابش فرودی، $W m^{-2}$	G
شدت تابش، $W m^{-2}sr^{-1}$	I

- Practice. 23rd edn. Committee on Industrial Ventilation,.
- [10] Mishra SC, Roy HK (2007) Solving transient conduction and radiation heat transfer problems using the lattice Boltzmann method and the finite volume method. *J Comput Phys* 223: 89-107.
- [11] Porges F (2001) HVAC engineer's handbook. 11th edn. Elsevier.
- [12] Tan Z, Howell JR (1991) Combined radiation and natural convection in a two-dimensional participating square medium. *Int J Heat Mass Tran* 34: 785-79.
- [7] Wang Y, Meng X, Yang X, Liu J (2014) Influence of convection and radiation on the thermal environment in an industrial building with buoyancy-driven natural ventilation. *Energ Buildings* 75: 394-401.
- [8] Meng X, Wang Y, Liu T, Xing X, Cao Y, Zhao J (2016) Influence of radiation on predictive accuracy in numerical simulations of the thermal environment in industrial buildings with buoyancy-driven natural ventilation. *Appl Therm Eng* 96: 473-480.
- [9] A. C. o. G. I. H. C. o. I. Ventilation (1998) *Industrial Ventilation: A Manual of Recommended*