

# استفاده‌ی مؤثر از شناور حرارتی وسایل گرمایشی احتراقی به منظور کنترل کیفیت هوای داخل

چهران نوروزی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مهدی معرفت\* (دانشیار)

سیدعلیرضا ذوالفقاری (دانشجوی دکتری)

بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

در این تحقیق، هدف ارائه‌ی پیشنهادهای کاربردی مناسب با ارزیابی تأثیر جانمایی وسیله‌ی احتراقی و دریچه‌ی خروجی بر کیفیت هوا در فضاها دارای وسایل گرمایشی احتراقی، با دودکش و بدون آن است. بدین منظور، از شناور حرارتی ایجاد شده توسط وسیله‌ی احتراقی به عنوان روشی مؤثر در کنترل غلظت آلاینده‌ها استفاده می‌شود. برای حل مسئله از شبیه‌سازی و حل عددی استفاده شده است. طبق نتایج حاصله، نصب بخاری در کنار دیوار خارجی، روبه‌روی دریچه‌ی خروجی و در گوشه‌های اتاق و نصب دریچه‌ی خروجی در مرکز دیوار خارجی، به عنوان انتخاب بهینه پیشنهاد می‌شوند. مقایسه‌ی بهترین و بدترین وضعیت اتاق از نظر تأثیر هم‌زمان جانمایی بخاری و دریچه‌ی خروجی در کیفیت هوا نشان می‌دهد که غلظت CO<sub>2</sub> در ناحیه‌ی تنفس اتاق در مدل بهینه، ۹٪ کم‌تر از بدترین وضعیت است.

مهندسی مکانیک شریف  
دوره ۳-۱۳۹۳، شماره ۱، ص. ۱۰۳-۱۱۱، (پادداست شریف)

chamran.nouroozi@gmail.com  
maerefat@modares.ac.ir  
alireza.zolfaghari@yahoo.com

واژگان کلیدی: کیفیت هوای داخل، شناور حرارتی، وسایل احتراقی.

## مقدمه

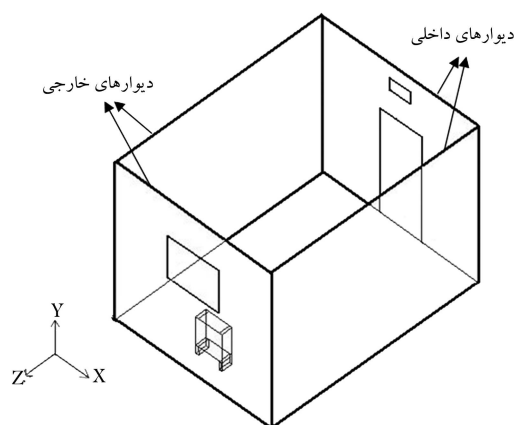
از نکات مهم مرگ‌آور نیز هستند. بخاری‌ها ضمن تولید گرما ممکن است باعث ورود مقدار زیادی گازهای مضر مانند گازهای CO و NO<sub>x</sub> به فضای اتاق شوند. اما در صورت طراحی مناسب سیستم تهویه‌ی اتاق و همچنین جانمایی مناسب تجهیزات احتراقی در اتاق می‌توان از شناور حرارتی<sup>۱</sup> ایجاد شده توسط بخاری برای بیرون راندن آلاینده‌های موجود در اتاق و بهبود کیفیت هوای داخل استفاده کرد. استفاده از شناور حرارتی به عنوان یکی از راهکارهای اصلی کنترل کیفیت هوای داخل و بررسی اثر جانمایی مجراهای ورود و خروج هوا، در تحقیقات زیادی مورد بررسی قرار گرفته است. در سال ۱۹۹۸، محققین با استفاده از CFD<sup>۲</sup> و در نظر گرفتن گاز CO<sub>2</sub> به عنوان معیار ارزیابی کیفیت هوا، کم‌ترین نرخ هوای تازه برای خروج آلاینده‌های تولید شده توسط افراد با کمک اثرات شناور حرارتی را تعیین کردند.<sup>۳</sup> در مطالعات این پژوهش‌گران، رابطه‌ی بین نرخ هوای تازه و قدرت شناور منبع حرارتی مورد بحث قرار گرفته است. در تحقیقی دیگر، به منظور حل میدان جریان هوای ایجاد شده در ساختمان توسط منابع حرارتی، مدل‌های عددی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است.<sup>۴</sup> در این تحقیق، مطالب جامعی در مورد شناور حرارتی و تهویه‌ی جابه‌جایی<sup>۵</sup> از جمله معادلات حاکم برای دو بعد و سه بعد و همچنین عملکرد انواع منابع حرارتی ارائه شده است. عملکرد سیستم‌های تهویه‌ی جابه‌جایی مبتنی بر شناور ایجاد شده توسط منابع حرارتی است. پژوهش‌گران با توجه به این موضوع، کارایی سیستم تهویه‌ی جابه‌جایی را با تحلیل تأثیر نرخ هوای ورودی و مکان مجرای ورودی هوا مورد ارزیابی قرار داده‌اند.<sup>۶</sup> علاوه بر تحلیل الگوی جریان، شکل‌گیری دم حرارتی در اطراف بدن شخص و اثر آن بر توزیع آلاینده‌ها به عنوان مقوله‌ی مهم در کیفیت هوای داخل معرفی

نگرانی‌های ایجاد شده در مورد تأثیرات هوای داخل ساختمان بر سلامت افراد، حدوداً به صد سال قبل بازمی‌گردد. این مسئله به‌ویژه در اوایل دهه‌ی ۱۹۷۰ و هم‌زمان با بحران انرژی شدت بیشتری گرفت. استفاده از عایق‌های حرارتی با کارایی بالا و افزایش کیفیت درزبندی ساختمان‌ها، اگرچه موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی و بهبود شرایط آسایش حرارتی می‌شود،<sup>۷</sup> به دلیل کاهش نرخ هوای تازه باعث ایجاد اختلال در تهویه‌ی هوای داخل نیز خواهد شد.<sup>۸</sup> علت افزایش توجه متخصصان به این مسئله، نارضایتی‌های مشهود در بسیاری از مناطق نسبت به وضعیت هوای داخل بود که بعضاً منجر به بروز علائم فیزیکی ناخوشایند و بروز بیماری در بین افراد می‌شد.<sup>۹</sup> به دنبال ارائه‌ی گزارش‌ها مبنی بر وجود بیماری‌های یا علائم آن‌ها، و حتی مرگ و میر در محیط‌های بسته، در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در خصوص کیفیت هوای داخل و روش‌های بهبود آن صورت پذیرفته است. کیفیت هوای داخل بیانی از پتانسیل و توانایی هوا برای فراهم آوردن شرایط آسایش حرارتی، تنظیم میزان مناسب گازهای تنفسی مثل اکسیژن و دی‌اکسیدکربن (CO<sub>2</sub>) و غلظت مجاز برای آلاینده‌های موجود است.<sup>۱۰</sup>

در فصل سرما برای گرمایش ساختمان از وسایل و روش‌های مختلفی نظیر بخاری‌های گازسوز و نفت‌سوز استفاده می‌شود. واقعیت این است که این بخاری‌ها و وسایل گرم‌ساز، اگرچه تأمین‌کننده‌ی شرایط آسایش‌اند، در صورت بی‌توجهی به برخی

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۸۹/۹/۲، اصلاحیه ۱۳۹۰/۲/۳۱، پذیرش ۱۳۹۰/۴/۱۳



شکل ۱. نمایی از فضای نمونه و مختصات مورد استفاده.

تازه برای رقیق‌سازی آلاینده‌ها را تأمین می‌کند. دمای هوای بیرون ۵ درجه سانتی‌گراد و فشار نسبی آن نسبت به اتاق ۱۰ پاسکال است؛ هوای اتاق به‌وسیله‌ی نفوذ هوا از درزهای پنجره با دمایی برابر دمای هوای بیرون تهویه می‌شود. علاوه بر این، براساس توزیع فشار در اتاق، جریان هوا می‌تواند از طریق درزهای در به اتاق نفوذ کند یا از آن خارج شود. در ورودی اتاق به محیطی با دمای ۲۳°C و فشار نسبی صفر باز می‌شود. اندازه‌ی درزهای در و پنجره در راستای عمودی -- به‌استثناء درز پایشی در اتاق که ۱ cm است -- معادل ۲ mm در نظر گرفته شده است. به‌منظور تکمیل فرایند آلاینده‌زدایی و ورود و تسریع در اعمال تأثیر هوای بیرون، وجود دریچه‌ی برای خارج‌کردن آلاینده‌ها با استفاده از اثرات شناور در قسمت‌های فوقانی اتاق ضروری است. به‌همین منظور، دریچه‌ی با ابعاد  $0.4 \times 0.2$  m<sup>۲</sup> به‌صورت متقارن بالای در اتاق تعبیه شده است. طول، عرض و ارتفاع بخاری به‌ترتیب ۰٫۲ m، ۰٫۲ m و ۰٫۵۴ m است که در فاصله‌ی ۳ cm از دیوار قرار گرفته است. بخاری به‌عنوان منبع حرارت و منبع تولید CO<sub>۲</sub> حاصل از احتراق در نظر گرفته شده است. مسئله‌ی مورد نظر برای حالتی بررسی شده که غلظت CO<sub>۲</sub> در هوای ورودی از درزها برابر ۴۰۰ ppm و غلظت CO<sub>۲</sub> ورودی به اتاق بر اثر جریان هوای بخاری، برابر ۲۰۰۰ ppm است. همچنین دما و دبی هوای ورودی از بخاری به اتاق به‌ترتیب برابر ۵۰°C و ۰٫۰۶ m<sup>۳</sup>/s فرض می‌شود. این مقادیر با شرط ایجاد شرایط آسایش حرارتی در اتاق تنظیم شده‌اند.

### معادلات حاکم

برای بررسی کیفیت هوای داخل، ابتدا باید میدان‌های سرعت، دما و آلاینده‌ها تعیین شود. بدین‌منظور باید معادلات پیوستگی، بقای مومنتوم، بقای انرژی و بقای گونه‌ها حل شوند. شکل کلی معادلات بقا به‌صورت رابطه‌ی (۱) است: [۱۵]

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varphi)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right) + S_\varphi \quad (1)$$

که در آن،  $t$  زمان،  $\rho$  چگالی هوا،  $\varphi$  متغیر وابسته -- مانند سرعت در معادلات بقای مومنتوم ( $\varphi = u_j, j = ۱, ۲, ۳$ )، غلظت در معادله‌ی بقای گونه‌ها ( $\varphi = C$ )، دما در معادله‌ی بقای انرژی ( $\varphi = T$ ) --  $x_i$  مختصات،  $\Gamma_\varphi$  ضریب پخش و  $S_\varphi$  عبارت چشمه است. به‌منظور مدل‌سازی و حل مسئله، با رجوع به مراجع مختلف، محتمل‌ترین حالات برای شرایط مرزی هندسی و جریانی در نظر گرفته شده است که برخی از آن‌ها در بخش قبل ذکر شد. شرط مرزی مشخص شده برای دیوارهای

و بررسی شده است. محققین با استفاده از شبیه‌سازی عددی اثر محل قرارگیری پایه‌های تهویه مطبوع را بر طراحی و عملکرد سیستم‌های تهویه‌ی جابه‌جایی بررسی کردند. [۹] در تحقیق آنان، نتایج برحسب شاخص‌های کیفیت هوای داخل و آسایش حرارتی بیان شده است. در تحقیقی مشابه، اثر بازشوها بر کارایی سیستم‌های تهویه‌ی جابه‌جایی بررسی شده است. [۱۰] در سال ۲۰۰۵، با در نظر گرفتن غلظت گاز CO<sub>۲</sub> و ترکیبات آلی فرار<sup>۴</sup> به‌عنوان معیار ارزیابی، عملکرد سیستم‌های تهویه‌ی جابه‌جایی و تهویه‌ی اختلاطی از نظر کیفیت هوا مورد مقایسه قرار گرفت. [۱۱] نتایج حاصله بیان می‌دارد که سیستم تهویه‌ی جابه‌جایی به‌دلیل انتقال آلاینده‌ها به نواحی بالایی اتاق، کیفیت هوای بهتری را در ناحیه‌ی تنفس تأمین می‌کند. در بررسی دیگری در سال ۲۰۰۵، کوک و همکاران با استفاده از CFD به تحلیل اثر نیروهای شناور ناشی از منبع حرارتی در تهویه‌ی هوای اتاق پرداختند. [۱۲] در سال ۲۰۰۹، ژو و همکاران با در نظر گرفتن افراد و رایانه‌ی موجود در اتاق به‌عنوان منبع حرارتی، تأثیر شناور حرارتی در توزیع سرعت، دما و آلاینده‌ها را تحت عنوان سیستم تهویه‌ی جابه‌جایی افرادی<sup>۵</sup> بررسی کردند. [۱۳] در عین حال، مطالعات محدودی در مورد انتشار آلاینده‌های ناشی از وسایل احتراقی در ساختمان‌ها و انتخاب جانمایی مناسب آن‌ها صورت پذیرفته است. از جمله تحقیقات محدود صورت گرفته در زمینه‌ی انتشار آلاینده‌های ناشی از وسایل احتراقی در ساختمان‌ها می‌توان به تحقیق انجام شده توسط چانگ و چنگ اشاره کرد. [۱۴] آن‌ها با استفاده از دینامیک محاسباتی سیالات (CFD)، چگونگی توزیع گاز منوکسیدکربن تولیدشده توسط آبگرمکن خانگی را در یک اتاق نمونه بررسی کرده، و اثر میزان هوای تازه‌ی ورودی و باز یا بسته‌بودن مجراهای خروجی هوا را در توزیع گاز منوکسیدکربن مورد ارزیابی قرار داده‌اند. به‌دلیل تولید هم‌زمان حرارت و آلاینده توسط وسایل احتراقی، در پژوهش حاضر ایده‌های ارائه‌شده‌ی پیشین در مورد سیستم‌های تهویه‌ی جابه‌جایی، در استفاده از پتانسیل تهویه‌ی بی‌نیروهای شناور و دم حرارتی ناشی از این وسایل به کار گرفته شده است. گزارش‌های متعدد درخصوص حوادث ناشی از گازگرفتگی ساکنین در فضاهای مسکونی دارای وسایل احتراقی، بیان‌گر ضرورت انجام مطالعه و تحقیق به‌منظور ارائه و تدوین راهکارهای مناسب در جهت رفع یا کاهش این وقایع است. در همین راستا، تحقیق حاضر ارائه‌ی پیشنهادی کاربردی و طراحی معماری مناسب با ارزیابی تأثیر پارامترهای مختلف بر کیفیت هوای داخل در فضاهای دارای وسایل گرمایشی احتراقی را هدف گرفته است. برای نیل به این هدف، با تحلیل توزیع جریان هوا و توزیع آلاینده‌های ناشی از احتراق بخاری‌های دودکش‌دار و بدون دودکش در اتاق نمونه -- به‌منظور انتخاب موقعیت مناسب نصب بخاری‌های احتراقی و تعبیه‌ی دریچه‌ی خروجی هوا -- تأثیر جانمایی‌های مختلف آن‌ها در کیفیت هوای داخل ارزیابی شده است.

### فضای نمونه

اتاق نشان داده شده در شکل ۱ به‌عنوان فضای نمونه -- با مساحت  $3 \times 4$  m<sup>۲</sup> و ارتفاع ۳ m -- در نظر گرفته شده است. این اتاق شامل دو دیوار خارجی و دو دیوار داخلی است. همچنین کف و سقف اتاق نیز به‌عنوان جدار داخلی در نظر گرفته شده است. ضخامت دیوار خارجی ۳ cm و مقاومت حرارتی مؤثر آن برابر  $0.1 \text{ m}^2 \text{ K/W}$  است. دری با ابعاد  $2 \times 0.8$  m<sup>۲</sup> روی دیوار داخلی، و پنجره‌ی با ابعاد  $1 \times 0.8$  m<sup>۲</sup> متشکل از شیشه یک جداره‌ی سه میلی‌متری با ضریب هدایت  $0.78 \text{ W/mK}$  روی دیوار خارجی -- به‌صورت متقارن با در نصب شده -- روی دیوار داخلی -- نصب شده است. نفوذ هوا<sup>۶</sup> از درزهای در و پنجره به اتاق، هوای

جدول ۱. مشخصات مربوط به شبکه بندی اتاق.

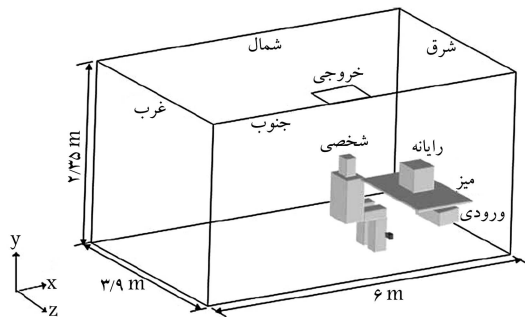
تعداد شبکه	۱۹۷۵۰۰
تعداد نودها (گره‌ها)	۲۰۸۴۵۰
حجم کوچک‌ترین سلول (متر مکعب)	۱/۶۰۰۰۹
حجم بزرگ‌ترین سلول	۰/۰۰۳۱۶

۳L/۴° و ۱۱L/۱۰°، نمودارها به هم نزدیک می‌شوند که این امر نشان‌دهنده استقلال نتایج از اندازه‌ی شبکه است.

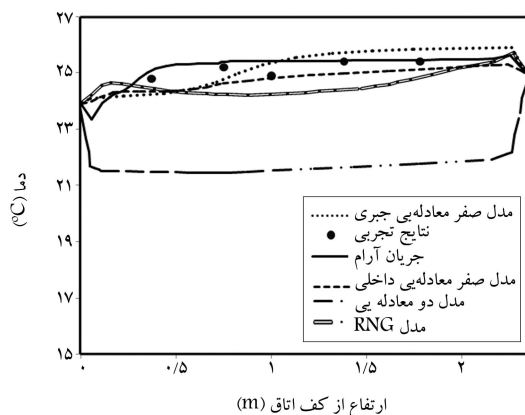
تنظیم شبکه باید مستقیماً تابع تغییر متغیرهای وابسته در حوزه‌ی محاسباتی باشد. بر همین اساس، به منظور حل معادلات در ناحیه‌های با گرادین زیاد (مانند نزدیکی دیوارها، درزها، دریچه‌ی خروجی و وسیله‌ی احتراقی)، اندازه‌ی شبکه در نزدیکی این نواحی ریزتر شده تا اتفاقات این نواحی با دقت بیشتری بررسی شود. سایر مشخصات مربوط به شبکه بندی در جدول ۱ بیان شده است.

### اعتبارسنجی حل عددی

قبل از ارائه‌ی نتایج، صحت‌سنجی نرم‌افزار مورد استفاده ضرورت می‌یابد. بدین منظور از نتایج تجربی ارائه‌شده توسط محققین<sup>[۱۳]</sup> استفاده شده است (شکل ۳). با استفاده از نرم‌افزار Airpak، مسئله توسط چهار مدل توربولانسی صفر معادله‌ی جبری، صفر معادله‌ی داخلی،  $k - \epsilon$  استاندارد و  $k - \epsilon$  RNG و نیز با فرض برقراری جریان آرام در اتاق حل شده است. نتایج حاصل از حل مسئله، و مقایسه‌ی آن با نتایج تجربی در شکل ۴ رسم شده است. از طرفی چون در مدل  $k - \epsilon$  RNG یک عبارت برای در نظر گرفتن اثرات رینولدز پایین در نظر گرفته شده، نسبت به



شکل ۳. مدل مورد استفاده برای صحت‌سنجی نرم‌افزار و روش حل.<sup>[۱۳]</sup>



شکل ۴. مقایسه نتایج عددی نرم‌افزار با نتایج تجربی برای مقطع ۳ m.

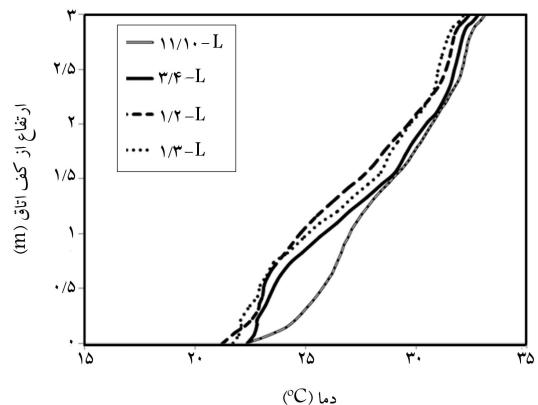
خارجی از نوع دما ثابت (شرط مرزی نوع دیریکله) و برای دیوارها و جدارهای داخلی از نوع آدیاباتیک (شرط مرزی نوع نیومن) است. همچنین، مسئله در حالت شرایط دائم بررسی می‌شود. افزون بر این اگرچه در جریان داخلی ساختمان‌ها عدد رینولدز پایین است، جریان از نوع توربولانس است.<sup>[۱۶]</sup> بنابراین برای حل معادلات حاکم باید از مدل‌سازی توربولانس استفاده کرد. مدل توربولانسی مورد استفاده در این تحقیق یک مدل صفرمعادله‌ی داخلی<sup>۷</sup> است. این مدل به‌طور خاص برای شبیه‌سازی جریان‌های داخلی ساختمان‌ها استخراج شده و در عین سادگی، برای استفاده در مسائل تهویه مطبوع جواب‌های قابل قبولی ارائه می‌دهد. در این مدل از رابطه‌ی ۲ برای تقریب لزجت توربولانسی استفاده می‌شود:

$$\mu_t = 0.03874 \rho \nu l \quad (2)$$

که در آن،  $\nu$  سرعت محلی سیال،  $\varphi$  چگالی سیال،  $l$  فاصله تا نزدیک‌ترین دیوار، و  $0.03874$  یک ثابت تجربی است.<sup>[۱۶]</sup>

### حل عددی مسئله

به منظور حل سه‌بعدی و پایای میدان جریان و غلظت آلاینده‌ها، از نرم‌افزار Airpak استفاده شده است. این نرم‌افزار به‌عنوان ابزاری برای مدل‌سازی، شبکه‌بندی و حل عددی مدل‌های محاسباتی در تحلیل کیفیت هوای داخل، آسایش حرارتی، تهویه مطبوع و کنترل آلاینده‌ها کاربرد دارد. نرم‌افزار Airpak برای حل معادلات حاکم از موتور حل فلونت<sup>۸</sup> (روش حجم کنترلی و الگوریتم سیمپل<sup>۹</sup>) استفاده می‌کند.<sup>[۱۷]</sup> همچنین طرح بالادست مرتبه دوم<sup>۱۰</sup> به منظور دست‌یابی به دقت بالای حل انتخاب شده است. برای ارزیابی همگرایی حل عددی، از معیار  $10^{-4}$  برای سرعت و  $CO_2$ ، از معیار  $10^{-6}$  برای معادله‌ی انرژی استفاده شده است. همچنین برای دست‌یابی به نتایج پایدار و همگرا، از ضریب زیرتخفیف<sup>۱۱</sup> استفاده شده است. به همین منظور از زیرتخفیف<sup>۱۲</sup> ۰/۳ برای فشار، ۰/۵ برای مومنتوم و ۰/۸ برای  $CO_2$  و انرژی استفاده شده است. قبل از حل، ابتدا باید استقلال مسئله از اندازه شبکه مورد بررسی قرارگیرد. بدین منظور پس از حل مسئله با چند شبکه‌ی مختلف، و مقایسه‌ی توزیع دما و  $CO_2$  اتاق در شبکه بندی‌های مختلف، از شبکه‌های شش‌وجهی منظم با ابعاد  $L/2$  در هر جهت استفاده شده است؛  $L$  طول اتاق در آن جهت است.<sup>[۱۷]</sup> نتایج مربوط به توزیع دما در شبکه بندی‌های مختلف در مرکز اتاق در شکل ۲ رسم شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود برای شبکه‌هایی با اندازه‌های  $L/3$ ،  $L/2$ ،



شکل ۲. تغییرات دما برحسب ارتفاع در  $w = 1.5$  m و  $z = 2$  m برای شبکه بندی‌های مختلف.

مدل  $k - \epsilon$  استاندارد جواب‌های بهتری ارائه می‌دهد. نامشخص بودن شرایط مرزی دقیق برای مدل‌های دومعادله‌یی و نیز حساسیت آن‌ها به شبکه‌بندی را می‌توان از دیگر دلایل انحراف نتایج مدل  $k - \epsilon$  استاندارد دانست. به علاوه، مراجع مختلف برتری مدل  $k - \epsilon$  RNG را نسبت به مدل  $k - \epsilon$  استاندارد در پیش‌بینی اثرات شناوری حرارتی گزارش داده‌اند.<sup>[۶]</sup>

مدل‌های صفرمعدله‌یی برای مدل‌کردن جریان‌هایی که هندسه‌ی ساده‌یی دارند و در آن‌ها اعوجاج سریع رخ نمی‌دهد مناسب‌ترند. بالاخص حل عددی با استفاده از مدل‌های صفرمعدله‌یی، با سرعت بالاتری همگرا شده و نتایج همگراشده‌ی بهتری را در تعداد تکرار کم‌تر خواهد داد. جریان مورد نظر در این قسمت نیز دارای چنین وضعیتی است. بنابراین می‌توان انتظار داشت که جواب‌های به دست آمده از این مدل‌ها با نتایج تجربی مطابقت خوبی داشته باشد. البته باید به این نکته نیز توجه داشت که مقایسه‌ی فوق در شبکه‌بندی یکسان برای مدل‌های مختلف صورت پذیرفته است. در تحقیق حاضر نیز با توجه به دقت قابل قبول مدل‌های صفرمعدله‌یی و سرعت همگرایی بالاتر نسبت به مدل‌های دومعدله‌یی، از مدل صفرمعدله‌یی داخلی استفاده شده است.

مقایسه‌ی نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های صفرمعدله‌یی و نیز استفاده از فرض جریان آرام به شکل قابل قبولی با نتایج تجربی مطابقت دارند، در صورتی که مدل‌های دومعدله‌یی به‌ویژه مدل  $k - \epsilon$  استاندارد انحراف زیادی را نشان می‌دهند. دلیل این موضوع آن است که مدل  $k - \epsilon$  استاندارد، بیشتر برای شبیه‌سازی جریان‌های با اعداد رینولدز و آشفتگی بالا کاربرد دارد. تطابق قابل قبول نتایج جریان آرام و تجربی (شکل ۴) نشان از کم بودن آشفتگی‌ها و اثرات آن در جریان هوای اتاق دارد. از طرف دیگر، جریان در ساختمان‌ها نیز اکثراً جزء جریان‌های رینولدز پایین است و بنابراین انتظار می‌رود که جواب‌های به دست آمده از مدل  $k - \epsilon$  استاندارد نسبت به حالت واقعی انحراف داشته باشد.

## معیار ارزیابی کیفیت هوای داخل

استاندارد ASHRAE-۶۲، گاز  $CO_2$  را به‌عنوان شاخص تعیین میزان هوای تازه مورد نیاز برای بهبود کیفیت هوای داخل معرفی می‌کند.<sup>[۵]</sup> استفاده از گاز  $CO_2$  برای کنترل تهویه ریشه در پاسخ‌های فیزیولوژیکی انسان دارد. از آنجا که گاز  $CO_2$  یکی از محصولات جانبی حاصل از احتراق (۹ تا ۱۳ درصد حجمی) است، در این تحقیق نیز از گاز  $CO_2$  تولیدی توسط وسایل احتراقی به‌عنوان شاخصی برای بررسی چگونگی توزیع آلاینده‌ها و ارزیابی و مقایسه‌ی جانمایی‌های مختلف وسایل احتراقی در اتاق استفاده شده است.<sup>[۵]</sup> تغییر میزان  $CO_2$  موجود در اتاق، همچنین نشان‌دهنده‌ی عملکرد سیستم تهویه در تغییر میزان آلاینده‌های خطرناک‌تر ناشی از فرایند احتراق مانند  $CO$  و  $NO_x$  است.

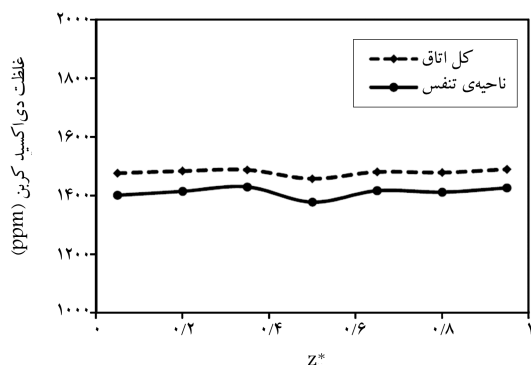
## مقایسه‌ی عملکردی جانمایی‌های مختلف دریچه‌ی خروجی

جریان دم حرارتی که حاوی گرما و آلاینده‌های ایجادشده توسط فرایند احتراق در بخاری است، باید از مجراها و دریچه‌های خروجی موجود در قسمت‌های فوقانی اتاق خارج شود. بنابراین، به‌منظور تکمیل فرایند آلاینده‌زدایی در اتاق، وجود دریچه‌یی برای خارج کردن آلاینده‌ها با استفاده از اثرات شناور ضروری است. در صورت نبودن

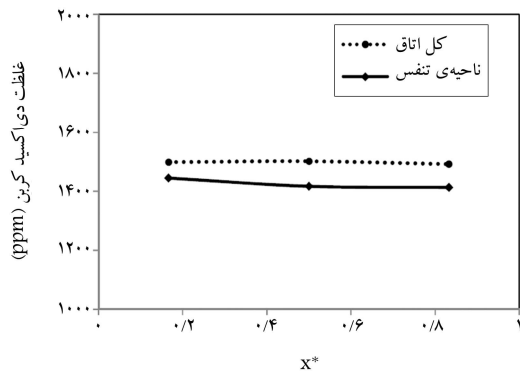
این دریچه، آلاینده‌های موجود در دم حرارتی در نواحی بالایی اتاق محصور شده و به‌تدریج باعث زوال کیفیت هوای داخل می‌شوند. وجود دریچه‌ی خروجی هوا، به ایجاد پروفیل مناسب از نظر توزیع دما و آلاینده‌ها در اتاق و ورود و تسریع در اعمال تأثیر هوای بیرون کمک می‌کند.<sup>[۶]</sup> در ساختمان‌های مسکونی با سیستم تهویه‌ی طبیعی، برای هر اتاق حداقل یکی از این دریچه‌های کوچک پیشنهاد می‌شود.<sup>[۱۸]</sup> محل قرارگیری دریچه روی جداری ساختمان معمولاً توسط معماران و با در نظر گرفتن شرایط معماری بنا تعیین می‌شود؛ هرچند کیفیت هوای داخل، مصرف انرژی و شرایط آسایش حرارتی تا حدی متأثر از محل قرارگیری دریچه‌ی خروجی و پنجره‌ها روی جداری ساختمان خواهد بود. در این بخش سعی بر آن است که تغییرات ایجادشده در کیفیت هوای اتاق نسبت به تغییرات محل قرارگیری دریچه‌ی خروجی مورد بررسی قرار گیرد و در نهایت با مد نظر قراردادن میزان اتلاف انرژی و کیفیت هوای اتاق در جانمایی‌های مختلف دریچه، بهترین مکان برای نصب آن تعیین شود. برای این منظور پارامترهای  $y^*$  و  $z^*$  تعریف شده است.  $x^*$  نشان‌دهنده‌ی محل قرارگیری مرکز دریچه در راستای افقی  $x$ ،  $y^*$  نشان‌دهنده‌ی محل قرارگیری مرکز دریچه در راستای عمودی  $y$  و  $z^*$  نشان‌دهنده‌ی محل قرارگیری مرکز دریچه در راستای افقی  $z$  بر روی دیوارهای داخلی، خارجی و سقف اتاق است و مطابق رابطه‌ی ۳ تعریف می‌شوند:

$$x^* = \frac{x}{L_x}, \quad y^* = \frac{y}{L_y}, \quad z^* = \frac{z}{L_z} \quad (3)$$

که در آن،  $L_x$ ،  $L_y$  و  $L_z$  به‌ترتیب بیان‌گر طول، عرض و ارتفاع اتاق طبق مختصات معرفی‌شده در فضای نمونه‌اند. در شکل ۵ میزان تغییرات غلظت  $CO_2$  به‌واسطه‌ی تغییرات افقی محل دریچه روی دیوار خارجی (راستای  $z$ ) رسم شده است. چنان که مشاهده می‌شود، تغییر محل دریچه در راستای افقی روی دیوار خارجی، تأثیر اندکی بر میزان غلظت  $CO_2$  و در نتیجه کیفیت هوای اتاق دارد. دلیل این تغییرات ناچیز این است که دم حرارتی ایجادشده توسط جریان هوای بخاری، قدرت غالب در ایجاد و توزیع فشار و نیز توزیع غلظت آلاینده‌ها در اتاق است. بنابراین در هر مقطع به‌موازات صفحه‌ی  $xz$ ، توزیع فشار و غلظت -- به‌خصوص در قسمت‌های فوقانی اتاق -- تقریباً یکنواخت صورت می‌گیرد. تقارن موجود در حالت نصب دریچه در مرکز دیواره، به‌دلیل مکش بیشتر جریان هوا باعث کاهش تأثیر دیوار سرد خارجی در ریزش آلاینده‌ها می‌شود. دمای هوای دیوار خارجی، به‌دلیل مجاورت با هوای سرد بیرون، کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، برآثر کاهش دمای هوای آلوده‌ی نزدیک دیوار، زمان ماندگاری آن در قسمت‌های فوقانی اتاق نیز -- به‌دلیل کم شدن قدرت شناور حرارتی -- کاهش خواهد یافت. پروفیل تغییرات غلظت  $CO_2$  در راستای عمودی در



شکل ۵. تغییرات میانگین غلظت  $CO_2$  برحسب تغییرات افقی محل دریچه‌ی خروجی روی دیوار خارجی.



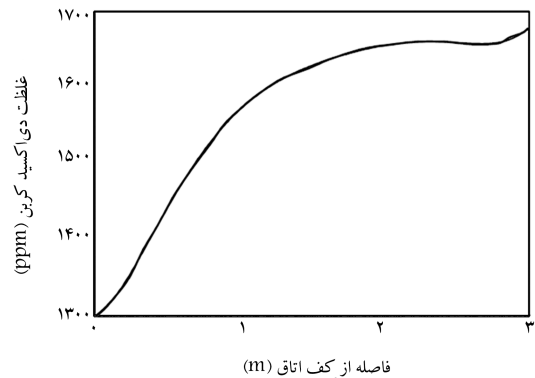
شکل ۹. تغییرات میانگین غلظت CO<sub>2</sub> برحسب تغییر افقی محل دریچه‌ی خروجی روی دیوار داخلی (راستای  $x$ ).

می‌یابد. اما با افزایش فاصله‌ی دریچه از بخاری، تغییر محسوسی ملاحظه نمی‌شود. دلیل این موضوع به راستای حرکت جریان جابه‌جایی طبیعی بخاری برمی‌گردد. در مقادیر  $z^* < 0.3$ ، جریان شناور عمدتاً در راستای عمودی  $y$  حرکت می‌کند و بنابراین قرارگیری دریچه در این ناحیه به خروج مستقیم آلاینده‌ها منجر می‌شود. با افزایش  $z^*$ ، حرکت عمودی جریان شناور بر اثر برخورد به سقف به جریانی افقی تبدیل خواهد شد که در راستای موازی با مقطع دریچه است. لذا، تغییر محل دریچه در این محدوده از  $z^*$ ، تأثیر محسوسی در تغییر غلظت CO<sub>2</sub> اتاق نخواهد داشت. در مدل‌سازی حاضر فرض شده است که از سیستم کانال‌کشی برای خروج آلاینده‌ها از اتاق استفاده شده است؛ در این صورت، دریچه‌ی خروجی به‌عنوان ورودی سیستم کانال‌کشی محسوب می‌شود و قرارگیری آن روی دیوار داخلی، از نقطه‌نظر ورود آلاینده‌ها به اتاق‌های مجاور مشکلی ایجاد نمی‌کند. اثر تغییر محل قرارگیری دریچه روی دیوار داخلی در راستای افقی  $x$  در شکل ۹ نشان داده شده است. با نزدیک شدن دریچه به دیوار خارجی (کاهش  $x^*$ )، به دلیل مکش بیشتر جریان گرم و آلوده به سمت آن و در نتیجه تماس بیشتر این جریان با سطح سرد دیوار خارجی، میانگین غلظت CO<sub>2</sub> افزایش ناچیزی خواهد داشت. با توجه به نتایج این بخش می‌توان گفت که تغییر محل نصب دریچه روی دیوارهای جانبی، تأثیر چندانی بر کیفیت هوای داخل ندارد. دلیل این موضوع آن است که جریان جابه‌جایی طبیعی ایجادشده توسط بخاری، سازوکار غالب در توزیع الگوی جریان است. اما نصب دریچه‌ی خروجی روی سقف، به‌خصوص نزدیک به بخاری، نسبت به بقیه‌ی گزینه‌ها تفاوت قابل توجهی در میانگین غلظت CO<sub>2</sub> ایجاد می‌کند و به‌عنوان بهترین انتخاب از نظر کیفیت هوای داخل پیشنهاد می‌شود. باید توجه داشت که در این حالت مقدار قابل توجهی از هوای گرم ایجادشده توسط بخاری، بدون هرگونه تأثیری در هوای اتاق، از طریق دریچه خارج می‌شود. لذا، انتخاب محل بهینه برای نصب دریچه مستلزم توجه به میزان انرژی اتلافی در کنار کیفیت هواست.

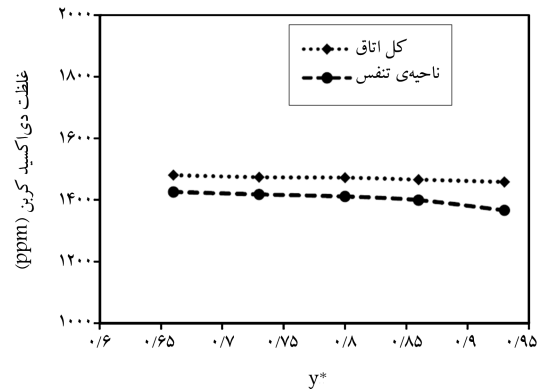
میزان انرژی اتلافی از دریچه به‌صورت آنتالپی هوای خروجی از آن در نظر گرفته شده و از طریق رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود:

$$enthalpy = \dot{m}c_p T_{out} \quad (4)$$

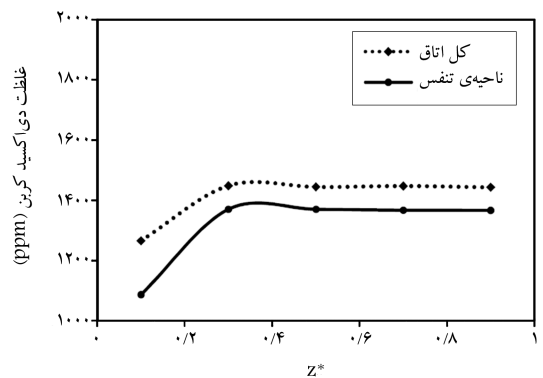
که در آن،  $\dot{m}$  نرخ هوای خروجی از دریچه،  $c_p$  گرمای ویژه‌ی هوا، و  $T_{out}$  دمای هوای خروجی از دریچه است. آنتالپی خروجی و میانگین غلظت CO<sub>2</sub> در ناحیه‌ی تنفس در جانمایی‌های مختلف دریچه در جدول ۲ آورده شده است. چنان که پیداست، کم‌ترین میزان اتلاف انرژی در حالتی است که دریچه‌ی خروجی روی دیوار خارجی نصب شده است. همچنین، کم‌ترین میزان غلظت CO<sub>2</sub> با نصب دریچه



شکل ۶. تغییرات غلظت CO<sub>2</sub> در مرکز اتاق با افزایش فاصله از کف.



شکل ۷. تغییرات میانگین غلظت CO<sub>2</sub> برحسب تغییرات عمودی محل دریچه‌ی خروجی روی دیوار خارجی.

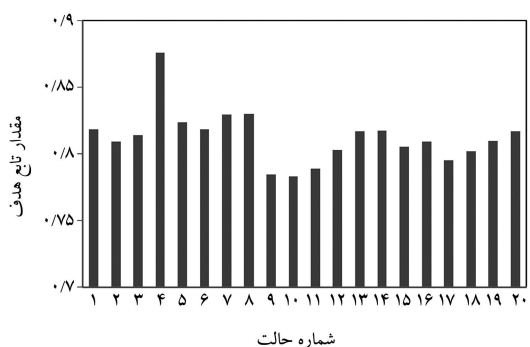


شکل ۸. تغییرات میانگین غلظت CO<sub>2</sub> برحسب تغییرات افقی محل دریچه‌ی خروجی روی سقف (راستای  $z$ ).

شکل ۶ رسم شده است؛ در سایر آزمون‌ها نیز چنین الگویی حاصل می‌شود. چنان که در شکل ۶ مشاهده می‌شود در قسمت‌های فوقانی اتاق ( $y > 2$  m)، میزان تغییرات غلظت CO<sub>2</sub> با افزایش ارتفاع نسبت به قسمت‌های میانی ( $1 < y < 2$  m) ناچیز است. در نتیجه انتظار می‌رود با تغییر محل عمودی دریچه در قسمت‌های فوقانی، تغییر غلظت CO<sub>2</sub> نیز ناچیز باشد. شکل ۷ نشان می‌دهد که این تغییرات در کل اتاق کم‌تر از ۲٪ و در ناحیه‌ی تنفس ( $1.75$  m  $< y < 2$  m) حدود ۳.۷۵٪ است. در شکل ۸، اثر تغییر محل دریچه‌ی خروجی در راستای افقی  $z$  روی سقف بر کیفیت هوای اتاق نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود در موقعیت‌های نزدیک به بخاری ( $z^* < 0.3$ )، میانگین غلظت CO<sub>2</sub> با شیب نسبتاً زیادی افزایش

جدول ۲. آنتالپی هوای خروجی و میانگین غلظت CO<sub>2</sub> در ناحیه‌ی تنفس در جانمایی‌های مختلف در ریچه.

شماره حالت	مختصات محل در ریچه	محل نصب در ریچه	آنتالپی خروجی (kW)	غلظت CO <sub>2</sub> (ppm)
۱	x* = ۰٫۱۶	دیوار داخلی	۸٫۴۹۷	۱۴۴۵
۲	x* = ۰٫۱۵	مدل مبنا	۸٫۵۰۷	۱۴۱۷
۳	x* = ۰٫۸۳	دیوار داخلی	۸٫۶۷۲	۱۴۱۳
۴	z* = ۰٫۱	سقف	۱۳٫۳۴۱	۱۰۸۶
۵	z* = ۰٫۳	سقف	۹٫۳۲۸	۱۳۷۰
۶	z* = ۰٫۵	سقف	۹٫۱۷۷	۱۳۷۰
۷	z* = ۰٫۷	سقف	۹٫۵۰۷	۱۳۶۷
۸	z* = ۰٫۹	سقف	۹٫۵۲۷	۱۳۶۶
۹	y* = ۰٫۶۶	دیوار خارجی	۷٫۷۷۰	۱۴۲۶
۱۰	y* = ۰٫۷۳	دیوار خارجی	۷٫۸۰۴	۱۴۱۸
۱۱	y* = ۰٫۸	دیوار خارجی	۸٫۰۲۱	۱۴۱۱
۱۲	y* = ۰٫۸۶	دیوار خارجی	۸٫۴۹۴	۱۳۷۷
۱۳	y* = ۰٫۹۳	دیوار خارجی	۹٫۱۸۳	۱۳۶۶
۱۴	z* = ۰٫۰۵	دیوار خارجی	۸٫۸۶۹	۱۴۰۱
۱۵	z* = ۰٫۲	دیوار خارجی	۸٫۴۳۰	۱۴۱۴
۱۶	z* = ۰٫۳۵	دیوار خارجی	۸٫۳۹۵	۱۴۲۹
۱۷	z* = ۰٫۵	دیوار خارجی	۸٫۴۹۴	۱۳۷۷
۱۸	z* = ۰٫۶۵	دیوار خارجی	۸٫۳۱۵	۱۴۱۶
۱۹	z* = ۰٫۸	دیوار خارجی	۸٫۵۶۶	۱۴۱۱
۲۰	z* = ۰٫۹۵	دیوار خارجی	۸٫۶۳۱	۱۴۲۶

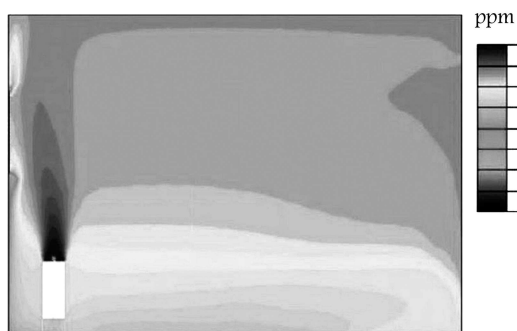


شکل ۱۰. مقدار تابع هدف در جانمایی‌های مختلف در ریچه‌ی خروجی.

### مقایسه‌ی عملکردی جانمایی‌های مختلف بخاری در اتاق

اخیراً استفاده از سیستم‌های تهویه‌ی که اساس کارشان بر شناور ناشی از وجود منابع حرارتی (مانند افراد، رایانه و غیره) استوار است، افزایش یافته است. در این روش که به تهویه‌ی جابه‌جایی<sup>۱۲</sup> معروف است، مجراهای ورود هوای تازه در قسمت‌های پایینی و خروجی‌های هوا نیز در سقف یا قسمت‌های فوقانی اتاق واقع می‌شوند و هوای گرم و آلوده‌ی اتاق را که توسط اثرات شناور به سمت بالا در حرکت است، به بیرون هدایت می‌کنند.<sup>۱۳</sup> در مسئله‌ی مورد نظر در این تحقیق، وسیله احتراقی موجود در اتاق با سازوکار جابه‌جایی طبیعی<sup>۱۳</sup>، باعث پدیدار شدن دم حرارتی<sup>۱۴</sup> می‌شود که هوای اطراف را به سمت خود جذب کرده و به طرف قسمت‌های فوقانی اتاق روانه می‌کند.<sup>۱۹</sup> در این حالت که منبع حرارتی، منبع آلودگی نیز باشد، آلاینده‌های موجود در دم حرارتی و ناحیه‌ی بالای اتاق محصور می‌شوند. جریان هوای به وجود آمده توسط بخاری بر اثر اختلاف دما و نیروهای شناور همانند یک کانال، هوای گرم و آلوده را به سمت بالا هدایت می‌کند. با بالا رفتن دم حرارتی و گرم شدن هوای اتاق با سازوکار جابه‌جایی و سپس مکش آن به دنبال جریان رو به بالا، دبی جریان دم حرارتی افزایش می‌یابد. چنین سازوکاری باعث پیدایش الگوی جریان لایه‌ی<sup>۱۵</sup> در اتاق شده که عمده هوای گرم و آلوده را در قسمت‌های فوقانی اتاق و نزدیک به سقف نگه می‌دارد. توزیع لایه‌ی CO<sub>2</sub> در مقطع میانی اتاق و نفوذ هوا از درزهای پنجره در شکل ۱۱ نشان داده شده است. یکی از پارامترهای مؤثر در عملکرد صحیح سیستم تهویه به‌منظور بیرون راندن هوای آلوده و همچنین چگونگی توزیع آلاینده‌ها در اتاق، انتخاب محل صحیح نصب بخاری بدون دودکش یا بخاری دودکش‌دار همراه با نشت آلاینده به اتاق است.

شکل ۱۲ نشان می‌دهد که با تغییر محل نصب بخاری در اتاق، میانگین غلظت CO<sub>2</sub> در ناحیه‌ی تنفس نسبت به مدل مبنا، بین ۱ تا ۶ درصد کاهش می‌یابد.

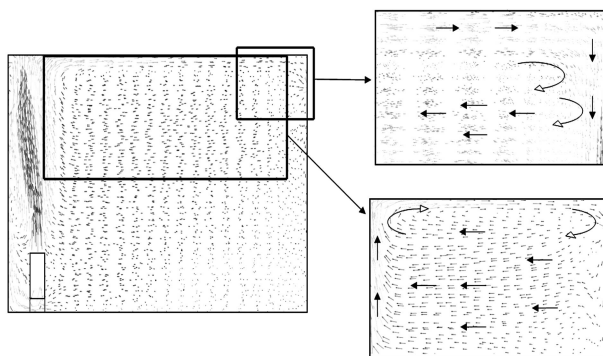


شکل ۱۱. توزیع لایه‌ی غلظت CO<sub>2</sub> در مقطع میانی اتاق.

روی سقف حاصل می‌شود که البته با اتلاف نسبتاً زیاد انرژی نسبت به بقیه‌ی موارد همراه است (موارد ۴ تا ۸). به‌منظور در نظر گرفتن کیفیت هوای اتاق و میزان اتلاف انرژی لازم است با استفاده از روش‌های آماری یا تعریف شاخصی، بهترین مکان نصب در ریچه تعیین شود. بدین منظور، تابع هدف را مطابق رابطه‌ی ۵ تعریف می‌کنیم:

$$BL = w_{IAQ} \frac{C_{CO_2}}{C_{CO_2, \max}} + w_{energy} \frac{enthalpy}{enthalpy_{\max}} \quad (5)$$

که در آن،  $BL$  تابع تعیین بهترین مکان نصب در ریچه،  $w_{IAQ}$  و  $w_{energy}$  به ترتیب توابع وزنی کیفیت هوای داخل و مصرف انرژی،  $C_{CO_2, \max}$  بیشترین مقدار غلظت گاز CO<sub>2</sub> و  $enthalpy_{\max}$  نشان‌گر بیشترین مقدار انرژی اتلافی در جانمایی‌های مختلف در ریچه است. برای انتخاب مکان مناسب نصب در ریچه -- به طوری که هر دو شاخص کیفیت هوا و انرژی را شامل شود -- کمترین مقدار این تابع مد نظر است. انتخاب ضرایب وزنی به تجربه و نظر طراح از جهت ملاحظات اقتصادی و فنی بستگی دارد و از قاعده‌ی خاصی پیروی نمی‌کند. در شکل ۱۰ مقدار این تابع به‌ازای ضرایب وزنی ۰٫۵ برای هر دو شاخص ارائه شده است. چنان که مشاهده می‌شود، کمترین مقدار برای این تابع برای موارد ۹ و ۱۰ حاصل می‌شود. به عبارت دیگر، براساس فرضیات فوق نصب در ریچه‌ی خروجی روی دیوار خارجی که در تماس با هوای بیرون است و در ارتفاع مشخص شده، از نظر کیفیت هوای داخل و جلوگیری از اتلاف بیش از حد انرژی، به‌عنوان بهترین محل نصب پیشنهاد می‌شود.



شکل ۱۳. بردارهای سرعت در مقطع میانی اتاق.

CO<sub>2</sub> در ناحیه‌ی تنفس نسبت به مدل مینا، بین ۱ تا ۶ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با قرار گرفتن بخاری در کنار دیوار خارجی و متمایل به گوشه‌ی اتاق، به دور از دریچه‌ی خروجی، کم‌ترین غلظت برای CO<sub>2</sub> حاصل شده است. افزون بر این، میزان تغییر غلظت CO<sub>2</sub> در اتاق، با تغییر موقعیت بخاری در کنار دیوار طولی خارجی قابل اغماض است و اثرات آن کم‌تر از ۲٪ است. روال نامنظم تغییرات -- به‌خصوص در جانمایی روی دیوارهای عرضی (راستای  $x$ ) -- از تأثیر پارامترهای مختلف نشأت می‌گیرد.

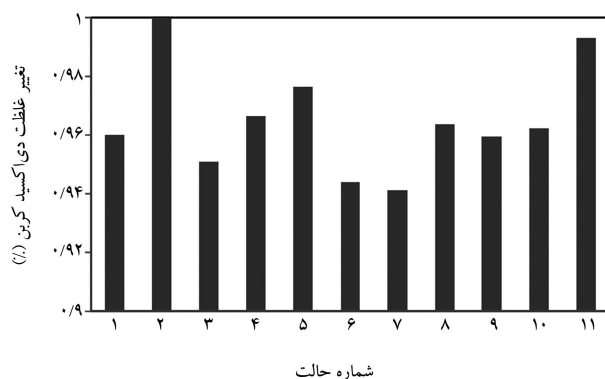
به‌طور عام، تأثیر پارامترهای مختلف در توزیع آلاینده‌ها و اهمیت نسبی هرکدام از آنها، تحلیل نتایج به دست آمده را پیچیده می‌کند. لذا تعیین محل مناسب برای نصب بخاری مستلزم بررسی مستقل هر یک از این پارامترهاست. بدین منظور، در ادامه به تشریح برخی از این پارامترهای تأثیرگذار می‌پردازیم.

۱. دم حرارتی ایجادشده توسط بخاری، پس از مواجهه با سقف به‌صورت افقی و در راستاهای  $x$  و  $z$  به حرکت خود ادامه می‌دهد تا این که با دیوارهای مقابل و مجاور برخورد کند. این برخورد باعث چرخش جریان در قسمت‌های فوقانی اتاق، به‌ویژه در گوشه‌ها می‌شود و جریان گرما و آلاینده‌ها را به سمت پایین می‌راند<sup>[۴]</sup>. شدت چرخش و حرکت رو به پایین جریان هوای گرم و آلوده، به نسبت ابعاد اتاق، موقعیت دریچه‌ی خروجی، عایق‌کاری دیوار خارجی و غیره بستگی دارد.

۲. وجود دیوار در کنار بخاری، نرخ دنباله‌ی هوای ایجادشده به سمت دم حرارتی را نسبت به حالتی که دیوار وجود ندارد، کاهش می‌دهد. کوفوند<sup>۱۶</sup> نشان داده است که در این حالت، دبی جریان دم حرارتی به‌خاطر اعمال اثر کوند<sup>۱۷</sup> (گرایش سیال برای چسبیدن به سطح جامد) به نصف دبی جریان ایجادشده در حالت آزاد (بدون وجود دیوار در اطراف منبع حرارتی) کاهش می‌یابد.<sup>[۴]</sup> با نصب بخاری در گوشه‌ها، نرخ دنباله و جریان هوای گرم به ۰٫۲۵ حالت آزاد تنزل پیدا می‌کند.<sup>[۴]</sup> با کاهش نرخ دنباله‌ی هوای ایجادشده به سمت دم حرارتی، تأثیر سازوکار جابه‌جایی در انتقال آلاینده‌ها به ناحیه‌ی تنفس نیز کاهش می‌یابد.

۳. موقعیت نسبی بخاری، دریچه‌ی خروجی و در و پنجره، در ایجاد الگوی جریان و توزیع فشار هوا در اتاق نقش به‌سزایی دارد. لذا، وجود اثر دودکشی متفاوت در حالت‌های مختلف، نرخ نفوذ هوای تازه از درها و خروج هوای آلوده از دریچه‌ی خروجی یا به‌عبارتی تعداد تعویض هوای اتاق در ساعت<sup>۱۸</sup> را تغییر می‌دهد.

۴. با تماس جریان هوای گرم و آلوده با سطوح سرد (دیوار خارجی)، قدرت



شکل ۱۲. درصد تغییرات میانگین غلظت CO<sub>2</sub> نسبت به حالت ( $x_{ext}^* = 0.05$ ) به واسطه جابه‌جایی مکان بخاری.

جدول ۳. مختصات محل مرکز بخاری در حالات مختلف.

مختصات محل مرکز بخاری	شماره حالت
$x_{ext}^* = 0.166$	۱
$x_{ext}^* = 0.500$	۲
$x_{ext}^* = 0.833$	۳
$x_{int}^* = 0.166$	۴
$x_{int}^* = 0.833$	۵
$z_{ext}^* = 0.250$	۶
$z_{ext}^* = 0.500$	۷
$z_{ext}^* = 0.750$	۸
$z_{int}^* = 0.250$	۹
$z_{int}^* = 0.500$	۱۰
$z_{int}^* = 0.750$	۱۱

همچنین با قرار گرفتن بخاری در کنار دیوار خارجی و متمایل به گوشه‌ی اتاق، به دور از دریچه‌ی خروجی، کم‌ترین غلظت برای CO<sub>2</sub> حاصل شده است. افزون بر این، میزان تغییر غلظت CO<sub>2</sub> در اتاق، با تغییر موقعیت بخاری در کنار دیوار طولی خارجی قابل اغماض است و اثرات آن کم‌تر از ۲٪ است. روال نامنظم تغییرات -- به‌خصوص در جانمایی روی دیوارهای عرضی (راستای  $x$ ) -- از تأثیر پارامترهای مختلف نشأت می‌گیرد. جدول ۳، جانمایی‌های بررسی‌شده‌ی بخاری را نشان می‌دهد.

در جدول ۳، پارامتر بی‌بعد  $x^*$  نشان‌دهنده‌ی موقعیت مرکز بخاری در راستای عرضی  $x$  و نزدیک دیوار داخلی (int، دیوار شامل در) و خارجی (ext، دیوار شامل پنجره) است. بر همین منوال، پارامتری بی‌بعد  $z^*$  نشان‌گر موقعیت مرکز بخاری در راستای طولی  $z$  و نزدیک دیوار داخلی و خارجی است (رابطه‌ی ۳). تأثیر جانمایی‌های مختلف بخاری بر میانگین غلظت CO<sub>2</sub> در شکل ۱۲ نشان داده شده است. محور عمودی این شکل بیان‌گر درصد تغییرات ایجاد شده در میانگین غلظت CO<sub>2</sub> در ناحیه‌ی تنفس نسبت به موقعیت  $x_{ext}^* = 0.05$  مدل تعریف شده در بخش فضای نمونه است.

شکل ۱۲ نشان می‌دهد که با تغییر محل نصب بخاری در اتاق، میانگین غلظت

مقایسه‌ی این دو مدل نشان می‌دهد که غلظت  $CO_2$  در ناحیه‌ی تنفس اتاق در بهترین وضعیت (1345 ppm)، ۹٪ کم‌تر از بدترین وضعیت (1486 ppm) است.

### نتیجه‌گیری

به‌منظور ارزیابی کیفیت هوا در فضاها‌ی دارای وسایل احتراقی (از جمله بخاری‌های گازسوز و نفت‌سوز)، اتاقی سه‌بعدی شبیه‌سازی شده است. وسیله‌ی احتراقی موجود در این اتاق، منبع تولید حرارت و آلاینده به‌شمار می‌رود. در این تحقیق سعی شد تا با مورد توجه قرار دادن شناور حرارتی تولیدی توسط وسیله‌ی احتراقی، از آن به‌عنوان راهکار اصلی کنترل و کاهش غلظت آلاینده‌ها در اتاق استفاده شود. بررسی‌ها نشان داد که شناور حرارتی، در جانمایی‌های مختلف دریچه‌ی خروجی هوا و وسیله‌ی احتراقی، تأثیرات متفاوتی بر جای می‌گذارد. با در نظر گرفتن این موضوع و نیز میزان اتلاف انرژی از دریچه‌ی خروجی، مشخص شد که بهترین محل نصب دریچه، مرکز دیوار سرد خارجی است. با این انتخاب، هر دو مقوله‌ی کیفیت هوا و مصرف انرژی لحاظ شده است. علاوه بر این، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مکان بخاری در اتاق، تأثیر چشمگیری بر میانگین و نحوه‌ی توزیع آلاینده‌ها دارد. با قرار دادن بخاری در نزدیکی دیوار خارجی، روبه‌روی دریچه‌ی خروجی هوا و در گوشه‌های اتاق، کاهش ۶٪ غلظت گاز  $CO_2$  در ناحیه‌ی تنفس نسبت به مدل مبنا را به دنبال داشت. موقعیت بخاری نسبت به دیوار سرد خارجی، دریچه‌ی خروجی هوا و در و پنجره از عوامل تأثیرگذار در ایجاد چنین تغییری هستند. علاوه بر این، مقایسه‌ی بهترین و بدترین وضعیت اتاق از نظر تأثیر همزمان جانمایی بخاری و دریچه‌ی خروجی در کیفیت هوا نشان می‌دهد که غلظت  $CO_2$  ناحیه‌ی تنفس اتاق در مدل بهینه ۹٪ کم‌تر از بدترین وضعیت است.

شناور آن کاهش یافته و آلاینده‌های بیشتری به ناحیه‌ی تنفس رسوخ می‌کنند. نصب بخاری در راستای دیوار روبه‌روی دیوار خارجی، به‌دلیل تأثیر همزمان چرخش و برخورد جریان با سطح سرد دیوار خارجی در حرکت رو به پایین و کاهش قدرت شناور جریان، غلظت آلاینده‌ها در ناحیه‌ی تنفس را افزایش می‌دهد.

۵. نصب دریچه‌ی خروجی هوا به‌صورت عمود بر راستای حرکت جریان هوای گرم و آلوده در قسمت‌های فوقانی اتاق، باعث تسهیل در خروج آلاینده‌ها از اتاق می‌شود. به‌عنوان مثال، نصب دریچه‌ی خروجی روی سقف و بالای بخاری، غلظت آلاینده‌ها را به میزان قابل توجه ۲۳٪ کاهش می‌دهد. البته این امر موجب بالارفتن مصرف انرژی نیز خواهد شد.

بنابراین با توجه به مطالب مذکور، به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی برای تدوین روش‌های بهینه‌ی معماری پایدار با هدف بهبود کیفیت هوای داخل، نصب بخاری در نزدیکی دیوار خارجی، روبه‌روی دریچه‌ی خروجی هوا و در گوشه‌های اتاق پیشنهاد می‌شود. در این حالت، غلظت آلاینده‌ها در ناحیه‌ی تنفس نسبت به مدل مبنا (بدترین وضعیت)، حدود ۶٪ کاهش داشته است.

در ادامه‌ی تحقیق و با توجه به نتایج فوق، بهترین و بدترین وضعیت کیفیت هوای اتاق از نظر تأثیر همزمان تغییر جانمایی بخاری و دریچه‌ی خروجی مورد مقایسه قرار گرفته است. کم‌ترین غلظت برای آلاینده‌های موجود در اتاق یا بهترین وضعیت چیدمان در حالتی به دست آمد که بخاری در کنار دیوار خارجی طولی و متمایل به گوشه‌ی اتاق و دریچه نیز در گوشه‌ی دیگر همین دیوار قرار می‌گیرند. بیشترین غلظت برای آلاینده‌های موجود در اتاق یا بدترین وضعیت چیدمان در حالتی به دست آمد که بخاری در مجاورت مرکز دیوار داخلی طولی واقع شده است و دریچه نیز در گوشه‌ی سمت راست دیوار عرضی داخلی قرار می‌گیرد.

### پانویس‌ها

1. thermal Buoyancy
2. computational fluid dynamics (CFD)
3. displacement ventilation
4. volatile organic compounds
5. personal displacement ventilation
6. air infiltration
7. indoor zero equation
8. Fluent
9. semi-implicit method for pressure-linked equation
10. second order upwind scheme
11. under relaxation factor
12. displacement ventilation
13. natural convection
14. thermal plume
15. stratified flow
16. Kofoed
17. Coanda effect
18. air change per hour

### منابع (References)

1. Elkilani, A. and Bouhamra, W. "Estimation of optimum requirements for indoor air quality and energy consumption in some residences in Kuwait", *Environment International*, **27**(6), pp. 443-447 (2001).
2. Helmis, C.G, Tzoutzas, J. and Flocas, H.A. "Indoor air quality in a dentistry clinic", *Science of the Total Environment*, **377**, pp. 349-365 (2007).
3. Park, J., Jang, Y., Ahn, Y., Cheong, S. and Lee, J. "Estimation of appropriate capacity of ventilation system based on the air infiltration rate in Korean classrooms", *J. of Mechanical Science and Technology*, **22**, pp. 788-797 (2008).
4. Awbi, H.B. "Ventilation of buildings", Spon Press, Taylor and Francis Group, Second Edition, London (2002).
5. ASHRAE, *Ventilation for acceptable indoor air quality, ANSI/ASHRAE Standard 62-2004*, American Society of



- Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Atlanta (2004).
6. Chao, N.T., Wang, W.A. and Chiang, C.M. "A study of a control strategy utilizing outdoor air to reduce the wintertime carbon dioxide levels in a typical Taiwanese bedroom", *Energy and Buildings*, **29**(1), pp. 93-105 (1998).
  7. Cook, M. "An evaluation of computational fluid dynamics for modelling buoyancy driven displacement ventilation", PhD Thesis, Montfort University (1998).
  8. Xing, H., Hatton, A., and Awbi, H.B. "A study of the air quality in the breathing zone in a room with displacement ventilation", *Building and Environment*, **36**(7), pp. 809-820 (2001).
  9. Lin, Z., Chow, T.T., Tsang, C.F., Fong, K.F. and Chan, L.S. "CFD study on effect of the air supply location on the performance of the displacement ventilation system", *Building and Environment*, **40**, pp. 1051-1067 (2005).
  10. Lin, Z., Chow, T.T., and Tsang, C.F. "Effect of door opening on the performance of displacement ventilation in a typical office building", *Building and Environment*, **42**(3), pp. 1335-1347 (2007).
  11. Lin, Z., Chow, T.T., Fong, K.F., Tsang, C.F. and Wang, Q. "Comparison of performances of displacement and mixing ventilations. Part II: indoor air quality", *I. J. of Refrigeration*, **28**, pp. 288-305 (2005).
  12. Cook, M., Ji, Y. and Hunt, G. "CFD modeling of buoyancy driven natural ventilation opposed by wind", *Ninth I. IBPSA Conference*, Montréal, pp. 207-213 (2005).
  13. Xu, Y., Yang, X., Yang, C. and Srebric, J. "Contaminant dispersion with personal displacement ventilation, Part I: Base case study", *Building and Environment*, **44**(10), pp. 2121-2128 (2009).
  14. Chang, W.R. and Cheng, C.L. "Carbon monoxide transport in an enclosed room with sources from a water heater in the adjacent balcony", *Building and Environment*, **43**(5), pp. 861-870 (2008).
  15. Patankar, S.V. "Numerical heat transfer and fluid flow: Computational methods in mechanics and thermal science", Hemisphere Publishing Corporation, London (1980).
  16. Chen, Q. and Xu, W. "A zero-equation turbulence model for indoor airflow simulation", *Energy and Buildings*, **28**(2), pp. 137-144 (1998).
  17. Airpak, *Manual of Airpak software*, Fluent Inc (2002).
  18. Spengler, J.D., Samet, J.M. and Mccatthy, J.F., *Indoor Air Quality Handbook*, United State of America, McGraw Hill (2001).
  19. Goodfellow, H. and Tahti, E. "Industrial Ventilation", Design Guidebook, Academic Press, New York (2001).