

# تأثیر جانمایی دریچه‌های ورود هوا بر عملکرد سیستم تهویه جابجایی بر اساس شرایط آسایش گرمایی، کیفیت هوای داخل و مصرف انرژی در یک مکان پرجمعیت

مهدی افزالیان

دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

سید علیرضا ذوالفقاری\*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

## چکیده

در مکان‌های پرجمعیت تامین شرایط مطلوب به ویژه از نظر کیفیت هوای داخل اهمیت زیادی دارد. از سوی دیگر، در بسیاری از سیستم‌های توزیع هوا، عوامل کارایی تهویه و مصرف انرژی به طور چشمگیری به آرایش قرارگیری دریچه‌های ورود و خروج هوا وابسته است. لذا در این تحقیق اثرات جانمایی محل دریچه‌های ورودی بر کیفیت هوای داخل و مصرف انرژی با رعایت قید آسایش گرمایی در یک سالن اجتماعات مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور یک سالن اجتماعات کوچک با سیستم تهویه جابجایی و با جمعیت ۵۰ نفر با دریچه‌های ورود هوا به شکل نواری در چهار حالت مختلف مدل‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد، سیستم تهویه جابجایی در مجموع حالت‌ها توانسته است وضعیت مطلوبی را ایجاد نماید. با این حال با جانمایی دریچه‌ها می‌توان کیفیت هوای داخل و آسایش ساکنان را تا حدودی بهبود بخشید. به طوری که دریچه‌های ورود هوا به صورت عمودی و مستقر در کف باشد، شاخص اثر بخشی نسبی تهویه ۲۰٪ افزایش و غلظت آلاینده‌ها در حدود ۱۰٪ در مقایسه با سایر حالت‌ها کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: تهویه جابجایی، کیفیت هوای داخل، آسایش گرمایی، مصرف انرژی، مکان پرجمعیت.

## Effects of Inlet Air diffusers' Arrangement on the performance of Displacement ventilation system based on thermal comfort conditions, indoor air quality and Energy consumption in a dense occupancy environment

M. Afzalian

Department of Mechanical Engineering, University of Brigand, Brigand, Iran.

S. A. R. Zolfaghari

Department of Mechanical Engineering, University of Brigand, Brigand, Iran.

## Abstract

In dense occupancy spaces, providing the proper conditions especially as indoor air quality is very important. On the other hand, in most air distribution systems, the ventilation performance and energy saving parameters are greatly influenced by the arrangements of supply diffuser positions. Therefore, in this study, the effects of supply diffuser positions on thermal comfort, indoor air quality and energy consumption in an amphitheater have been investigated. For this issue, a small amphitheater with 50 occupants has been modeled under the conditions that the linear air inlet diffusers located in four situations. The results indicate that the displacement ventilation can provide the proper conditions. However, by changing the location of supply diffuser positions, IAQ and occupants comfort can be improved. For example, for the inlet diffusers are located vertically on the floor, relative ventilation effectiveness is improved about 20% and CO<sub>2</sub> concentration is decreased about 10% in comparison with the other cases.

**Keywords:** Displacement ventilation, Indoor air quality, Thermal comfort, Energy consumption, dense occupancy environment.

## ۱- مقدمه

امروزه با فراگیر شدن سرگرمی‌های فرهنگی و به دنبال آن توسعه سالن‌های تئاتر، سینما و کنسرت، لزوم بحث و پژوهش در مورد تهویه این فضاها انکار ناپذیر است. طراحی سیستم تهویه در این سالن‌ها دشوار و از نظر مهندسی، یک فرآیند نسبتاً پیچیده محسوب می‌شود. انتخاب سیستم تهویه مناسب به عواملی مانند هندسه و مشخصات ساختمان، هزینه، وضعیت جانمایی دریچه‌های ورود و خروج، شرایط آسایش گرمایی، کیفیت هوای داخل، توزیع منابع گرمایی و میزان مصرف انرژی وابسته است [۱]. ولی در حالت کلی هدف نهایی در تهویه، تامین شرایط مطلوب از نظر آسایش گرمایی، کیفیت مطلوب هوای داخل با صرف کمترین میزان مصرف انرژی می‌باشد [۲]. یکی از سیستم‌های تهویه مرسوم برای این فضاها، سیستم تهویه جابجایی می‌باشد [۳]. در این سیستم هوا با سرعت کم و دمای مناسب از دریچه‌های کف یا نزدیک به کف وارد فضا شده و هوای آلوده و مرطوب

از دریچه‌های واقع در سقف خارج می‌شوند [۴]. چون در این سیستم تهویه، هوای تمیز مستقیماً وارد ناحیه حضور افراد شده و بدون اختلاط از فضا خارج می‌شود هوای در محل حضور افراد از کیفیت بسیار مطلوبی برخوردار است [۵].

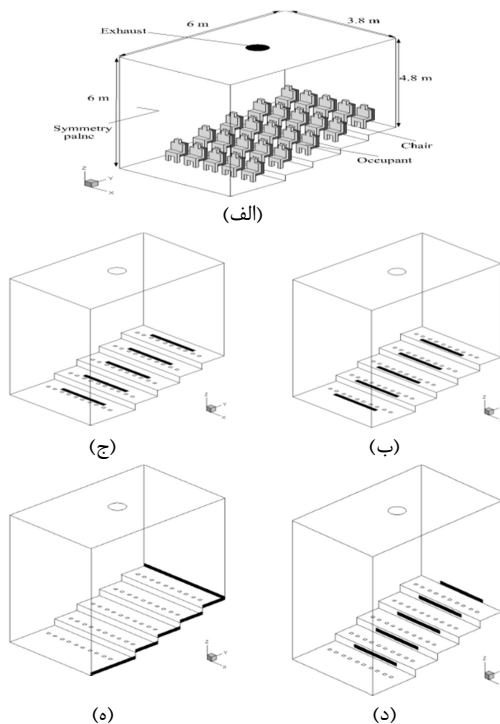
تاکنون مطالعات زیادی در مورد بررسی عملکرد سیستم‌های تهویه جابجایی در مکان‌های پرجمعیت انجام شده است. چئونگ و همکاران [۶] به تحلیل آسایش گرمایی یک تالار اجتماعات در اقلیم گرمسیری پرداختند. در این تحقیق، به دو صورت پیمایش میدانی و تحلیل عددی، شرایط یک تالار اجتماعات از نظر سرعت، دما و رطوبت نسبی بدون در نظر گرفتن عوامل ناراضیاتی حرارتی موضعی و همچنین کیفی هوای داخل مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. کیم و همکاران [۷] به بررسی نقش سرعت هوا و محل دریچه‌های ورودی بر آسایش گرمایی، توزیع سرعت و دما در یک سالن تئاتر پرداختند. در این تحقیق که تنها توزیع سرعت و الگوهای دمایی بدون استفاده از یک

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: zolfaghari@birjand.ac.ir

متر می‌باشد که بر اساس هندسه پلکانی سالن در انتهای ۴/۸ متر می‌رسد. تعداد افراد حاضر در نصف سالن ۲۵ نفر هستند که در ۵ ردیف ۵ نفره قرار گرفته‌اند. هوا مطابق شکل، توسط دریچه نواری با سرعت ۰/۳ متر بر ثانیه وارد سالن شده و توسط یک دریچه مدور به قطر ۰/۶ متر از سقف خارج می‌شود. ابعاد دریچه‌ها در حالت‌هایی که در کف سالن قرار دارند، ۱۴ سانتی متر عرض و ۲ متر طول دارند. برای ثابت ماندن نرخ تعویض هوای ساعتی، ابعاد ۱۴/۲ سانتی متر عرض و ۹/۸ متر طول برای دریچه‌های اطراف سالن در نظر گرفته شده است. برای دریچه خروجی از شرط مرزی گرادین صفر برای دما و سرعت و مقدار صفر برای فشار استفاده شده است.

دریچه‌های ورود نیز در چهار حالت مقابل صندلی (قسمت ب شکل ۱)، زیر صندلی (قسمت ج شکل ۱)، مستقر در کف به صورت عمودی (قسمت د شکل ۱) و بر روی دیوارهای اطراف سالن (قسمت ه شکل ۱) قرار داده شده است.

افراد حاضر در سالن با هندسه‌ای ساده و با دقت مورد نیاز برای تحقیق حاضر مدل‌سازی شده‌اند. برای افراد در سالن، از شرط مرزی شار گرمایی ثابت استفاده شده است. افراد در وضعیت نشسته و در حال یک فعالیت معمول با نرخ متابولیک ۱ met و یا  $58/15 W/m^2$  می‌باشند. رطوبت نسبی فضا ۵۰٪ و مقاومت پوشش لباس افراد بر اساس پوشش رسمی و متداول در این مکان‌ها، مانند کت و شلوار، برابر با  $1 \text{ clod}$  فرض شده است.



شکل ۱- فضای نمونه مورد مطالعه (الف) ابعاد سالن، نحوه چینش صندلی و افراد و دریچه‌های ورود هوا (ب) مقابل صندلی افراد (ج) زیر صندلی افراد (د) عمودی مستقر بر کف (ه) روی دیوارهای اطراف سالن

### ۳- معادلات حاکم بر مساله

معادلات حاکم در این تحقیق، شامل چهار بخش می‌باشد. بخش اول معادلات مربوط به جریان و انرژی (به صورت جفت شده)، بخش

مدل آسایشی مورد تحلیل قرار گرفته بود، نتایج نشان داد که محل استقرار دریچه‌های ورودی هوا نقش مهمی در توزیع دما و سرعت جریان هوا در ناحیه حضور افراد دارد. همچنین، فتح الله زاده و همکاران [۸] در تحقیقی به بررسی ارتفاع دریچه‌های خروجی یک مکان پرجمعیت بر مصرف انرژی، آسایش گرمایی و کیفیت هوای داخل برای دو نوع دریچه ورودی مستقیم و چرخشی پرداختند. بر اساس تحقیقات ایشان، دریچه خروجی نزدیک به کف از لحاظ آسایش گرمایی، مصرف انرژی و کیفیت هوای داخل بدترین حالت هستند. نادا و همکاران [۹] به کمک یک تحلیل عددی به بررسی توزیع دما، توزیع سرعت و آسایش گرمایی بدون در نظر گرفتن عوامل ناراضیاتی گرمایی موضعی و همچنین کیفیت هوای داخل در یک سالن تئاتر پرداختند. در این تحقیق تاثیر عواملی مانند سرعت و دمای هوای ورودی، تعداد دریچه‌های ورودی در کف و ارتفاع ساختمان بر آسایش گرمایی مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین، فتح الله زاده و همکاران [۱۰] در پژوهشی شرایط عملکردی سیستم توزیع هوای زیر سطحی را در یک مکان پرجمعیت با دو نوع دریچه (مقابل صندلی و زیر صندلی) مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق که برای ارزیابی شرایط آسایشی افراد از مدل ساده فنگر استفاده شده است بر اساس نتایج به دست آمده، در شرایط یکسان از نظر دما و سرعت هوای ورودی، برای دریچه‌های زیر صندلی گرادین عمودی دمای بیشتری رخ می‌دهد؛ ولی از نظر کیفیت هوای داخل تفاوت چشمگیری مشاهده نشد. افضلیان و همکاران [۱۱] در تحقیقی اثرات نرخ تعویض هوای ساعتی بر کیفیت هوای داخل و مصرف انرژی سیستم تهویه یک سالن پرجمعیت را بررسی کردند. بر اساس نتایج به دست آمده با افزایش نرخ تعویض هوای ساعتی، کیفیت هوای داخل و نیز مصرف انرژی افزایش می‌یابد. همچنین، افضلیان و همکاران [۱۲] در تحقیق دیگری اثرات عوامل فردی بر آسایش گرمایی افراد مستقر در یک سالن پرجمعیت را با بررسی موردی دو عامل جنسیت و شاخص توده بدنی مورد مطالعه قرار داده و در انتها توصیه‌های کاربردی برای طراحی این فضاها در اختیار مهندسان طراح قرار دادند. نتایج تحقیق نشان داد که خانم‌ها در مقایسه با آقایان نسبت به احساس سرما حساس ترند. همچنین بررسی تاثیر شاخص توده بدنی افراد نشان می‌دهد که حساسیت افراد لاغر نسبت به سرما و افراد چاق نسبت به سرما بیشتر است.

همان طور که گفته شد، از آنجایی که انتخاب و عملکرد سیستم تهویه به عواملی مانند هندسه و مشخصات ساختمان، وضعیت جانمایی دریچه‌های ورود و خروج و ... وابسته است؛ هدف از تحقیق حاضر بررسی اثرات محل دریچه‌های ورود هوای سیستم تهویه جابجایی بر اساس کیفیت هوای داخل و مصرف انرژی با رعایت قید آسایش گرمایی با استفاده از مدل ناپای گرمایی گایج و با بررسی عوامل ناراضیاتی گرمایی موضعی در یک سالن پرجمعیت می‌باشد.

### ۲- فضای نمونه

در این تحقیق، از آنجایی که شرایط گرمایی و هندسی کاملا متقارن است، لذا مطابق شکل ۱، نصف یک سالن پر جمعیت به عنوان فضای حل در نظر گرفته شده است. لذا فضای نمونه دارای یک صفحه تقارن و سه دیوار جانبی می‌باشد. بر این اساس، ابعاد فضای نمونه به ترتیب طول ۶ متر، عرض ۳/۸ متر می‌باشد. همچنین ارتفاع جلوی سالن ۶

اشری [۱۵] برای انسان استاندارد اشری با قد ۱/۷ متر و جرم ۷۰ کیلوگرم، این مقدار ۱/۸ مترمربع درنظر گرفته شده است. همچنین  $Q_{res}$  نشان‌دهنده انتقال حرارت از طریق تنفس،  $Q_{conv} + Q_{rad}$  انتقال گرما محسوس بین بدن و محیط اطراف از طریق جابجایی و تابش و  $Q_{eva}$  انتقال گرما نهان از بدن بر اثر تبخیر می‌باشد و از طریق روابط (۸) تا (۱۰) محاسبه می‌گردد [۱۵].

$$Q_{res} = 0.0014M(34 - T_a) + 0.0173M(5.87 - P_a) \quad (۸)$$

$$Q_{conv} + Q_{rad} = \frac{T_{sk} - T_a}{R_t} \quad (۹)$$

$$Q_{ev} = w \frac{P_{sat,sk} - P_a}{R_{e,t}} \quad (۱۰)$$

در روابط ذکر شده  $P_a$ ،  $P_{sat,sk}$  و  $R_{e,t}$  به ترتیب بیانگر فشار بخار آب در هوای اشباع و در دمای پوست، فشار بخار آب در هوا و مقاومت تبخیری کل بین بدن و محیط اطراف است. همچنین  $w$  معرف میزان رطوبت یا اصطلاحاً تری پوست است.

بر اساس مدل گایج، پاسخ‌های گرمایی بدن به تغییر شرایط فردی و محیطی از طریق سیگنال‌های گرمایی بدن به فعال شدن عوامل فیزیولوژیکی از قبیل انبساط و انقباض عروق، تعرق و لرز منتهی می‌شود. روابط مربوط به این سیگنال‌های گرمایی به صورت روابط (۱۱) تا (۱۵) تعریف شده است [۱۵].

$$WSIG_{cr} = \max\{T_{cr} - T_{cr,n}, 0\} \quad (۱۱)$$

$$WSIG_{sk} = \max\{T_{sk} - T_{sk,n}, 0\} \quad (۱۲)$$

$$CSIG_{cr} = \max\{T_{cr,n} - T_{cr}, 0\} \quad (۱۳)$$

$$CSIG_{sk} = \max\{T_{sk,n} - T_{sk}, 0\} \quad (۱۴)$$

$$WSIG_b = \max\{T_b - T_{b,n}, 0\} \quad (۱۵)$$

در روابط بالا  $WSIG_{cr}$  سیگنال گرم مرکز بدن،  $WSIG_{sk}$  سیگنال گرم پوست،  $CSIG_{sk}$  سیگنال سرد مرکز بدن،  $CSIG_{cr}$  سیگنال سرد پوست و  $WSIG_b$  سیگنال گرم کل بدن می‌باشد. همچنین  $T_{cr,n}$  و  $T_{sk,n}$  به ترتیب بیانگر دمای مرکز و پوست بدن در حالت خنثی هستند که مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر با  $۳۶/۸$  و  $۳۳/۷$  درجه سلیوس می‌باشد.  $T_b$  و  $T_{b,n}$  نیز دمای بدن و دمای حالت خنثی بدن هستند که از روابط (۱۶) و (۱۷) قابل محاسبه هستند [۱۵]:

$$T_b = \alpha T_{sk} + (1 - \alpha) T_{cr} \quad (۱۶)$$

$$T_{b,n} = \alpha T_{sk,n} + (1 - \alpha) T_{cr,n} \quad (۱۷)$$

در روابط بالا  $\alpha$  کسری از جرم بدن است که در لایه پوست متمرکز شده است و از رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$\alpha = 0.042 + \frac{0.745}{3600\dot{m}_{bl} + 0.585} \quad (۱۸)$$

بدن با فعال کردن سازوکارهای اتساع و انقباض عروق، نرخ جریان خون عبوری از رگ‌ها را تغییر داده تا از این طریق دمای بدن را کنترل کند. نرخ جریان خون به کمک رابطه (۱۹) تعریف می‌شود [۱۵]:

$$\dot{m}_{bl} = \frac{6.3 + 200WSIG_{cr}}{3600(1 + CSIG_{sk})} \quad (۱۹)$$

در مدل دو لایه‌ای گایج، انتقال گرما بین دو بخش مرکز و پوست بدن از طریق عوامل هدایت و جریان خون صورت می‌گیرد [۱۵]:

دوم معادلات مربوط به احساس گرمای افراد، بخش سوم شامل معادلات مربوط به ارزیابی عوامل نارضایتی گرمایی موضعی و بخش چهارم مربوط به معادله توزیع گونه دی‌اکسید کربن ناشی از تنفس افراد در فضای نمونه می‌باشد.

### ۳-۱- معادلات حاکم بر جریان و انرژی

معادلات حاکم بر جریان پایا و غیر قابل تراکم و با فرض ثابت بودن خواص سیال و با درنظر گرفتن اثرات شناوری شامل معادلات زیر است.

معادله پیوستگی:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (۱)$$

معادله بقای تکانه خطی:

$$\rho(\vec{V} \cdot \nabla \vec{V}) = -\nabla P + \mu_{eff} \nabla^2 \vec{V} + \vec{S} \quad (۲)$$

معادله انرژی:

$$\vec{V} \cdot \nabla T = \alpha_{eff} \nabla^2 T + S_T \quad (۳)$$

همچنین  $\vec{S}$  بیانگر نیروهای حجمی (شناوری) وارد بر سیال است و به کمک تقریب بوزینسک محاسبه می‌شود.

$$\vec{S} = \rho \vec{g} [1 - \beta(T - T_{ref})] \quad (۴)$$

که  $\beta$  ضریب انبساط حجمی و  $\vec{g}$  بردار شتاب گرانش زمین است. ضمناً  $\mu_{eff}$  ضریب لزجت موثر سیال است که شامل لزجت سیال و لزجت اغتشاشی سیال می‌باشد و داریم:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (۵)$$

که لزجت اغتشاشی سیال به کمک مدل دو معادله‌ای  $k-\epsilon$  استاندارد محاسبه می‌گردد.

### ۳-۲- معادلات مدل آسایشی گایج

تاریخچه ارائه مدل‌های آسایش گرمایی، به تحقیقات فنر [۱۳] در سال ۱۹۷۰ بازمی‌گردد. مدل فنر یک مدل پایا است که در آن، بدن به صورت یک نقطه فرض می‌شود. در این روش، سازوکارهای فیزیولوژیکی مثل تعریق، لرز، انبساط و انقباض عروق مدل‌سازی نشده است. پس از مدل فنر، مدل دیگری که بیشتر مورد توجه قرار گرفته، مدل دو نقطه‌ای گایج [۱۴] است که در سال ۱۹۸۶ ارائه شده است. مدل گایج یک مدل گذرا و بر مبنای تعادل حرارتی بین بدن و محیط می‌باشد و برخی از پاسخ‌های فیزیولوژیکی و تطبیقی بدن مانند لرز هنگام سرما و یا انبساط و انقباض عروق با تغییر شرایط حرارتی محیط اطراف و همچنین تعرق و تبخیر از سطح بدن در آن لحاظ شده است. در این مدل، بدن به صورت دو استوانه هم‌مرکز که استوانه داخلی شامل مرکز بدن (چربی، ماهیچه‌ها و اعضای داخلی) و استوانه خارجی شامل پوست می‌باشد، مدل شده است. معادلات موازنه انرژی برای مرکز و پوست بدن در این مدل به صورت روابط زیر ارائه می‌شوند [۱۵]:

$$\frac{(1 - \alpha)m_b c_{p,b} dT_{cr}}{A_D dt} = M - W - Q_{res} - Q_{cr-sk} \quad (۶)$$

$$\frac{\alpha m_b c_{p,b} dT_{sk}}{A_D dt} = Q_{cr-sk} - (Q_{eva} + Q_{conv} + Q_{rad}) \quad (۷)$$

که در این روابط  $T_{cr}$  و  $T_{sk}$  به ترتیب دمای مرکز بدن و سطح پوست برحسب درجه سلیوس می‌باشند.  $A_D$  مساحت دویوز نامیده می‌شود و معرف سطح بدن در شرایط بدون لباس است که طبق دست‌نامه

تنه‌اشراط آسایش حرارتی عمومی را برای بدن پیش‌بینی می‌کنند؛ در حالی که ممکن است فرد در بخش‌هایی از بدن سرما و یا گرما را به صورت موضعی احساس کند. به عبارت دیگر، ممکن است فرد از لحاظ گرمای احساس مطلوب و خنثی داشته باشد ولی همچنان احساس ناراضی در بخش‌هایی از بدن رخ دهد [۱۵]. از آنجایی که این عوامل تعادل گرمایی بر روی کل بدن را بر هم نهد و فقط به صورت موضعی بخش‌هایی از بدن را تحت تأثیر قرار می‌دهند، عوامل ناراضی موضعی نامیده شده‌اند. عوامل ناراضی موضعی به چهار دسته تقسیم می‌شوند: تابش نامتقارن، کوران، گرادبان عمودی دما و کف سرد یا گرم. در نتیجه، قرار گرفتن شاخص‌های آسایش گرمایی در محدوده‌های مجاز، شرط لازم و نه کافی برای قابل قبول بودن شرایط آسایش گرمایی از سوی افرادی باشد. بنابراین باید در کنار شاخص آسایش، این چهار عامل ناراضی موضعی نیز بررسی شود. در سیستم توزیع هوای زیر سطحی، تنها احتمال ایجاد کوران و گرادبان عمودی دما وجود دارد. در نتیجه در ادامه تنها به معرفی این دو عامل و نحوه محاسبه آن‌ها اشاره شده است.

#### ۴-۳-۱- کوران

سرمایش موضعی ناخواسته بر روی بدن که بر اثر جابجایی هوا رخ می‌دهد، یکی از انواع ناراضی گرمایی موضعی بوده که کوران نامیده می‌شود. برای محاسبه درصد افرادی را که از کوران احساس ناراضی دارند از رابطه زیر استفاده می‌شود [۱۵]:

$$DR = (34 - t_a)(\bar{V} - 0.05)^{0.62}(0.37\bar{V}T_u + 3.14) \quad (30)$$

که  $DR$  درصد ناراضی ناشی از کوران،  $\bar{V}$  سرعت جریان هوا،  $t_a$  دمای هوا و  $T_u$  شدت اغتشاشات جریان می‌باشد. براساس استاندارد ۵۵ اشری، مقدار این شاخص نباید بیشتر از ۲۰٪ باشد [۱۶].

#### ۴-۳-۲- گرادبان عمودی دما

یکی دیگر از عوامل ایجاد ناراضی گرمایی موضعی، گرادبان عمودی دما در فضا است. این نوع ناراضی می‌تواند در اثر نحوه توزیع طبیعی دما در اتاق ایجاد گردد. دمای هوای داخل اتاق عمودی از کف تا سقف افزایش می‌یابد [۱۵]. این موضوع باعث ایجاد احساس گرما در ناحیه سر و احساس سرما در پا می‌شود در چنین شرایطی، فرد به صورت موضعی احساس ناراضی خواهد داشت. گرادبان عمودی دما برابر با اختلاف دمای هوا در ناحیه مچ پا (۰/۱m) و سر (۱/۱m) می‌باشد. برای فضاهای پرجمعیت پیشنهاد می‌شود گرادبان عمودی دما طبق استاندارد ایزو ۷۷۳۰ سه درجه سیلیوس است [۱۷].

#### ۴-۳-۳- معادلات بقای گونه

کیفیت هوای داخل به عواملی مانند میزان غلظت آلاینده‌های موجود در محیط، نرخ تهویه هوا، نحوه الگوی توزیع هوا و نوع سیستم تهویه مورد استفاده بسته است. غلظت دی‌اکسید کربن در محل حضور افراد معمولاً شاخص سنجش کیفیت هوا می‌باشد. لذا گونه دی‌اکسید کربن به عنوان نماینده آلاینده‌ها انتخاب شده است تا نحوه توزیع و غلظت آلاینده‌ها در سالن تحلیل شود. بیشترین میزان مجاز گاز دی‌اکسید کربن برای فضایی که افراد برای ۸ ساعت در آن حضور دارند، نهایتاً  $500 \text{ pap}$  است. البته مطلوب این است که غلظت دی‌اکسید کربن از  $1000 \text{ pap}$  بیشتر نشود [۱۵].

$$Q_{cr-sk} = (K + C_{p,bl}\dot{m}_{bl})(T_{cr} - T_{sk}) \quad (20)$$

که در این رابطه  $K$  میزان موثر ضریب انتقال گرما رسانش بدن و  $C_{p,bl}$  گرمای ویژه خون است.

یکی دیگر از سازوکارهای کنترل دمای بدن، سرمایش تعریقی است. بالا رفتن دمای بدن منجر به افزایش میزان ترشح غدد تعریقی و در نتیجه مرطوب شدن سطح پوست می‌شود. تبخیر این رطوبت از سطح پوست، نهایتاً به دفع گرما از بدن و کاهش دمای آن منجر می‌شود. مقدار گرمای منتقل شده توسط سرمایش تبخیری از رابطه (۲۱) قابل محاسبه است [۱۵]:

$$Q_{rsw} = \dot{m}_{rsw} h_{fg} \quad (21)$$

که  $\dot{m}_{rsw}$  نرخ تولید عرق بر واحد سطح پوست است و از رابطه (۲۲) به دست می‌آید [۱۵]:

$$\dot{m}_{rsw} = 4.72 \times 10^{-5} WSIG_b \exp(WSIG_{sk}/10.7) \quad (22)$$

در نتیجه مقدار تری پوست از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$w = 0.06 + 0.94 \left( \frac{Q_{rsw}}{Q_{evap,max}} \right) \quad (23)$$

که

$$Q_{evap,max} = \frac{P_{sat,sk} - P_a}{R_{e,t}} \quad (24)$$

دیگر سازوکار موجود در مدل گایج، سازوکار ایجاد لرز در بدن تحت تأثیر سیگنال‌های سرد دریافت شده از بخش مرکزی و پوست بدن است. بر این اساس، بدن با دریافت سیگنال‌های سرد، ماهیچه‌های خود را به ارتعاش و لرزش وادار کرده تا از این طریق نرخ متابولیک افزایش یابد. تولید متابولیک ناشی از لرز از طریق رابطه (۲۵) محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$M_{shiv} = 19.4 CSIG_{sk} CSIG_{cr} \quad (25)$$

در نتیجه متابولیک کلی افراد برابر با مجموع متابولیک ناشی از فعالیت بدنی ( $M_{act}$ ) و متابولیک ناشی از لرز ( $M_{shiv}$ ) می‌باشد [۱۵]:

$$M = M_{act} + M_{shiv} \quad (26)$$

در نهایت مدل دو نقطه‌ای گایج برای بیان احساس گرمای افراد یک شاخص بدون بعد به نام TSENS ارائه می‌کند. این شاخص دامنه احساس گرمای را بین ۵+ تا ۵- در نظر گرفته است. بر این اساس، ۵- بیانگر سرمای غیر قابل تحمل، ۴- خیلی سرد، ۳- سرد، ۲- خنک، ۱- کمی خنک، ۰ خنثی، ۱+ کمی گرم، ۲+ گرم، ۳+ داغ، ۴+ خیلی داغ و ۵+ نیز بیانگر گرمای غیر قابل تحمل است. محدوده مطلوب آسایش نیز در این معیار بین ۰/۵+ تا ۰/۵- می‌باشد. مقدار این شاخص آسایشی از رابطه (۲۷) محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$TSENS = \begin{cases} 0.4685(T_b - T_{b,c}) \\ 4.7\eta_{ev}(T_b - T_{b,c}) / (T_{b,h} - T_{b,c}) \\ 4.7\eta_{ev} + 0.4685(T_b - T_{b,h}) \end{cases} \quad (27)$$

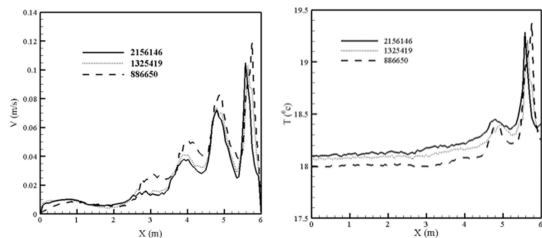
که در این رابطه  $\eta_{ev}$  بازدهی تبخیری است. همچنین مقادیر  $T_{b,h}$  و  $T_{b,c}$  روابط (۲۸) و (۲۹) محاسبه می‌شوند [۱۵]:

$$T_{b,c} = 0.0033(M - W) + 36.301 \quad (28)$$

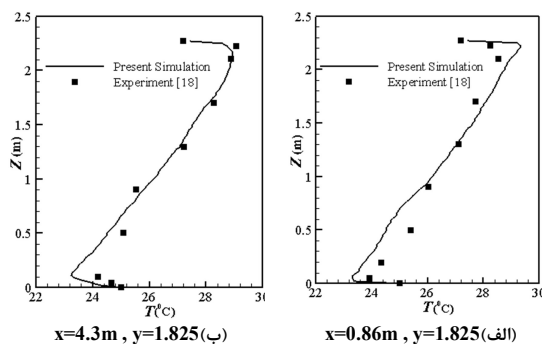
$$T_{b,h} = 0.0060(M - W) + 36.669 \quad (29)$$

#### ۳-۳- عوامل ناراضی حرارتی موضعی

از آنجایی که اکثر مدل‌های مورد استفاده در آسایش گرمایی مانند گایج بر اساس موازنه انرژی برای کل بدن تعریف شده‌اند،



شکل ۲- بررسی استقلال از شبکه در راستای طول سالن  
(الف) توزیع دما (ب) توزیع سرعت



شکل ۳- اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی باداده‌های تجربی [۱۸] در نواحی مختلف با استفاده از نمودار توزیع دما  
جدول ۱- مقایسه نتایج کد نوشته شده در تحقیق حاضر با نتایج تاکادا و همکاران [۱۹]

نتایج مدل گایج تحقیق حاضر (°C)	نتایج تاکادا و همکاران (°C)	مدت زمان آزمایش (min)	متابولیک (Met) و پوشش بدن (clo)	دما (°C) و رطوبت هوا (%)
۳۶/۵	۳۶/۷	۴۰	۱/۰ ۰/۰۶	۳۸/۸ ۶۸/۱
۳۴/۰	۳۳/۶	۶۰	۰/۸ ۰/۱	۲۹/۲ ۶۰/۰
۲۹/۸	۲۹/۸	۹۰	۱/۰ ۰/۶	۱۶/۱ ۵۰/۰
۳۱/۴	۳۱/۴	۱۲۰	۰/۷ ۰/۱	۲۵/۰ ۵۰/۰
۳۳/۱	۳۲/۸	۱۲۰	۰/۷ ۰/۱	۲۸/۰ ۵۰/۰

### ۵- نتایج و بحث

همان طور که گفته شد، هدف از تحقیق حاضر بررسی اثرات محل قرارگیری دریچه‌های ورود هوا بر کیفیت هوای داخل و مصرف انرژی با رعایت قید آسایش گرمایی در یک سالن پرجمعیت با سیستم تهویه جابجایی است. همچنین، نتایج حالت‌های مختلف قرارگیری دریچه‌ها، در شرایط یکسان آسایشی مورد مقایسه قرار گرفته است. به همین علت برای رسیدن به شرایط آسایش گرمایی یکسان، دمای هوا ورودی از دریچه‌های نواری به نحوی انتخاب شده است که میانگین شاخص آسایش حرارتی (TSENS) در ناحیه حضور افراد بر اساس مدل ناپایای گایج برابر با صفر گردد. به این ترتیب همانگونه که در جدول ۲ نشان داده شده است، دمای مطلوب برای هوای ورودی از دریچه‌ها برای چهار حالت به دست آمده است. ضمن اینکه، به علت هندسه خاص این سالن

یافتن نحوه انتشار آلاینده در فضای مورد بررسی مستلزم حل معادله گونه می‌باشد. برای این منظور، از رابطه زیر استفاده شده است:

$$\vec{V} \cdot \nabla C = D_{\text{eff}(c/a)} \nabla^2 C + Q_c \quad (31)$$

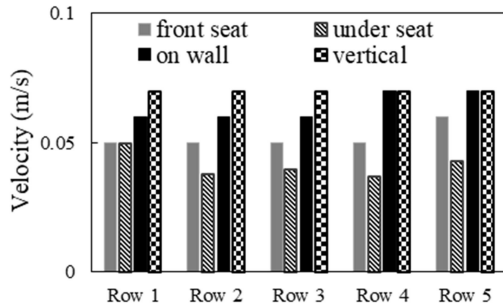
که در آن  $D_{\text{eff}(c/a)}$  ضریب پخش موثر گونه در هوا و  $Q_c$  جزء جرمی گونه و  $Q_c$  جمله چشمه می‌باشد. ضریب پخش موثر گونه از حاصل جمع ضریب پخش لایه‌ای و توربولانسی به دست می‌آید. به منظور حل معادلات گونه نیاز به ساخت حلگری است که بتواند به کمک نتایج استخراج شده از حلگر شناور بوزینسک SIMPLE FOAM پس از همگرایی، معادلات گونه را به صورت مستقل حل نماید.

طبق فیزیولوژی تنفس، در هر بازدم ۱/۱ لیتر هوا از ریه هر فرد بالغ خارج می‌شود که ۴ درصد آن، گاز دی‌اکسید کربن می‌باشد. انسان به طور متوسط در هر دقیقه ۱۲ بار تنفس می‌کند. به کمک این اطلاعات، میزان تولید گاز دی‌اکسید کربن ناشی از تنفس افراد قابل محاسبه است. به منظور مدل‌سازی تولید گونه در سالن بر اثر تنفس افراد حاضر، یک جمله چشمه در حلگر گونه اضافه شده است. مقدار جمله چشمه با توجه به میزان دی‌اکسید کربن تولید شده توسط هر فرد محاسبه شده و به حجم کوچکی نزدیک به دهان افراد اعمال گردیده است. همچنین، غلظت دی‌اکسید کربن در هوای ورودی ۴۰۰ ppm فرض شده است. برای دریچه خروجی هوا و تمام دیوارها شرط مرزی گرادیان صفر لحاظ شده است.

### ۴- ابزار تحقیق، شبکه بندی و روش حل

در تحقیق حاضر برای رسم هندسه و شبکه‌بندی از نرم‌افزار کمکی سالومه استفاده شده است. لذا برای حل مسئله یک شبکه‌بندی غیرسازمان یافته ایجاد شده است که در نواحی با گرادیان زیاد مانند دریچه‌های ورود و خروج هوا و مجاورت منابع گرمایی و تولید گونه تراکم شبکه محاسباتی افزایش یافته تا اثرات آن‌ها دقیق‌تر وارد میدان حل شود. برای انتخاب شبکه‌ای مناسب برای شبیه‌سازی عددی مسئله لازم است که ابتدا، استقلال از شبکه در حل مورد بررسی قرارگیرد. از این رو، مسئله برای شبکه‌هایی با تعداد ۸۸۶۶۵۰، ۱۳۲۵۴۱۹ و ۲۱۵۶۱۴۶ سلول محاسباتی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. بر اساس نتایج به ازای تغییر تعداد سلول‌های محاسباتی از ۱۳۲۵۴۱۹ به ۲۱۵۶۱۴۶، تغییر چندانی در جواب‌ها حاصل نشده است؛ بنابراین شبکه‌ای با تعداد ۱۳۲۵۴۱۹ سلول محاسباتی به عنوان شبکه مناسب برای انجام محاسبات انتخاب شده است.

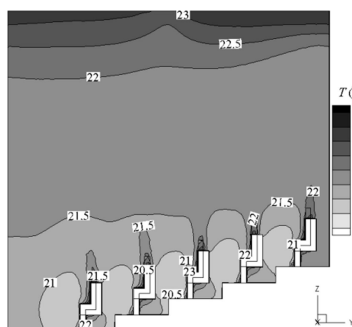
همچنین، برای انجام محاسبات و حل معادلات حاکم از حلگر عددی OPEN FOAM بسته حل شناور بوزینسک SIMPLE FOAM استفاده شده است. حلگر مذکور برای حل عددی از روش حجم محدود استفاده می‌کند. ضمن این‌که در این حلگر از تقریب بوزینسک برای در نظر گرفتن اثرات جابجایی طبیعی در معادله جریان و از الگوریتم سیمپل برای تصحیح جفتشدگی بین فشار و سرعت استفاده شده است. به منظور اعتبارسنجی و بررسی توانایی مدل‌های استفاده شده، اعتبارسنجی نتایج با داده‌های کوبایاشی [۱۸] انجام شده است. در شکل ۳ مقایسه میان نتایج مدل‌سازی حاضر با نتایج آزمایشگاهی کوبایاشی [۱۸] ارائه شده است. همچنین، برای اعتبارسنجی کد نوشته شده از نتایج تاکادا و همکاران [۱۹] استفاده و نتایج در جدول ۱ گزارش شده است.



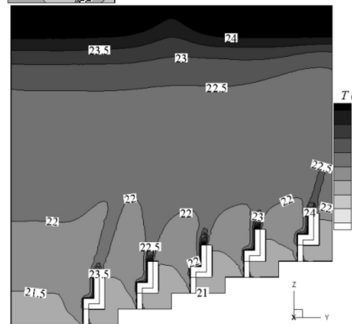
شکل ۶- میانگین سرعت نواحی حضور افراد حالت‌های مورد بررسی

مطابق شکل ۷ جریان هوا در این سیستم تهویه، به صورت لایه‌لایه در آمده است. سیستم‌ها از نظر نفوذ هوا بر طبق دست‌نامه مبانی اشری به چندین دسته تقسیم شده که سیستم‌های تهویه جابجایی در دسته سیستم‌های تهویه کاملاً طبقه بندی قرار می‌گیرند. به این مفهوم که جریان هوا به صورت لایه‌لایه می‌شود و جریان هوای سرد در نزدیکی کف قرار می‌گیرد و با افزایش ارتفاع، هوا گرم‌تر می‌شود. همچنین این لایه‌لایه شدن از اختلاط هوا جلوگیری می‌کند.

همچنین، همان طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، جهت جریان هوا به علت شناوری، به سمت بالا و انتهای سالن می‌باشد. در حالتی که دریاچه‌های ورود هوا در زیر صندلی (حالت B) و به صورت عمودی و در کف (حالت C) قرار داشته باشد، به دلیل اینکه هوای ورودی از دریاچه‌ها دمای بالاتری دارند، در قسمت بالای سالن و نزدیک به دریاچه خروجی نیز دما بالاتر است. در حالت‌هایی که محل دریاچه‌های ورود هوا بر روی دیوارهای اطراف سالن و بر روی کف به صورت عمودی قرار دارند، ناحیه حضور افراد بیشتر تحت تاثیر قرار می‌گیرند.



(الف)



(ب)

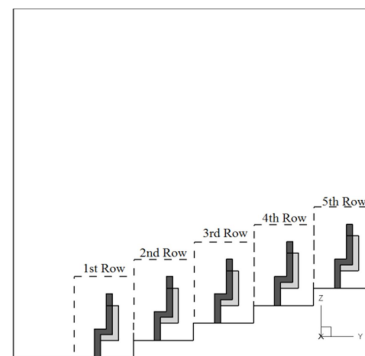
ناحیه حضور افراد مطابق شکل ۴ به پنج ناحیه تقسیم شده است.

### ۵-۱- توزیع دما و سرعت

یکی از اهداف سیستم تهویه در سالن‌های پرجمعیت، تامین شرایط مطلوب به صورت یکنواخت در تمامی ردیف‌ها می‌باشد. به این مفهوم که تفاوت قابل ملاحظه‌ای در احساس گرمایی افراد ردیف‌های ابتدایی و انتهایی سالن وجود نداشته باشد. در شکل ۵ نمودار میانگین دما و در شکل ۶ نمودار میانگین سرعت در نواحی حضور افراد برای حالت‌های مختلف نشان داده شده است.

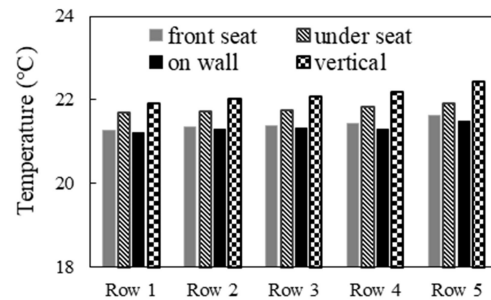
جدول ۲- محل دریاچه‌ها و دمای هوای ورودی حالت‌های مورد بررسی

حالت	محل دریاچه‌های ورود هوا	دمای هوای ورودی (°C)
A	مقابل صندلی افراد	۲۰/۵
B	زیر صندلی افراد	۲۱
C	روی کف به صورت عمودی	۲۱/۵
D	بر روی دیوارهای اطراف سالن	۲۰/۵



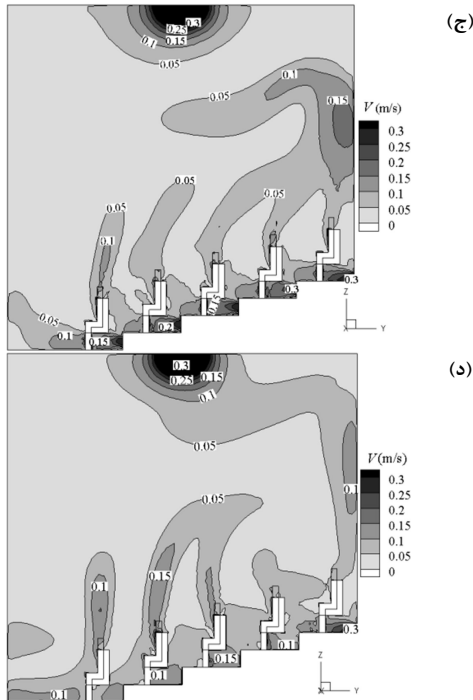
شکل ۴- ناحیه‌های حضور افراد بر اساس ردیف‌های سالن

همان‌گونه که مشاهده می‌شود دریاچه‌های ورود هوای عمودی (حالت C) یکنواخت‌ترین شرایط را از نظر سرعت، بین ردیف‌های سالن به وجود آورده است. همچنین، برای دریاچه‌های مستقر بر کف به شکل عمود و بر روی دیوارهای سالن (حالت C و D) به علت وزش به صورت افقی به ناحیه حضور افراد، میانگین سرعت در این ناحیه بیشتر از دو حالت دیگر می‌باشد. همچنین دریاچه‌های ورود در زیر صندلی (حالت B) به دلیل نبود وزش مستقیم به افراد، کمترین سرعت در ناحیه حضور افراد را در بین حالت‌های دریاچه دارا است. همچنین، ردیف‌های انتهایی سالن به علت جریان رو به بالا، دما و سرعت بالاتری دارند. ضمناً در شکل‌های ۷ و ۸ توزیع دما و توزیع سرعت در چهار حالت و در صفحه وسط سالن نشان داده شده است.

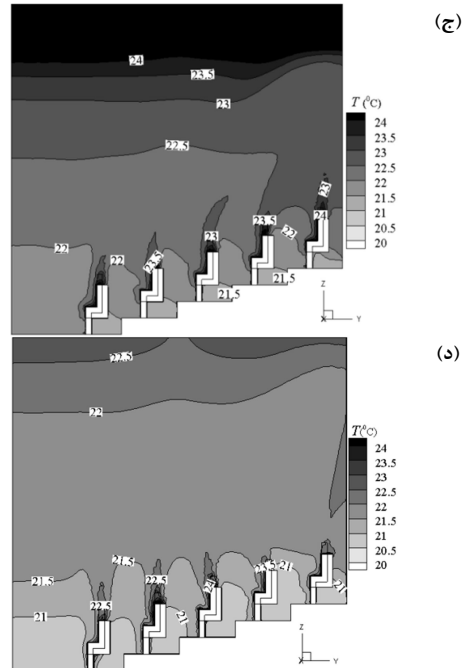


شکل ۵- میانگین دمای نواحی حضور افراد حالت‌های مورد بررسی





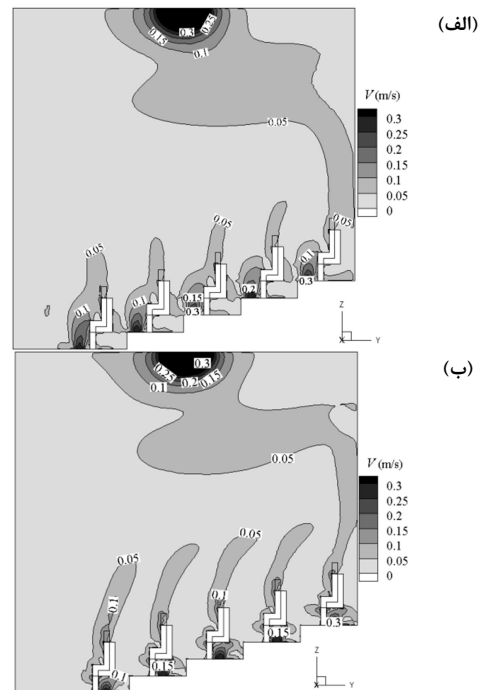
شکل ۸- توزیع سرعت در صفحه  $x=1/9$  m (الف) مقابل صندلی افراد (ب) زیر صندلی افراد (ج) عمودی روی کف (د) روی دیوارهای سالن



شکل ۷- توزیع دما در صفحه  $x=1/9$  m (الف) مقابل صندلی افراد (ب) زیر صندلی افراد (ج) عمودی روی کف (د) روی دیوارهای سالن

### ۵-۲- نارضایتی‌های حرارتی موضعی

حال پس از برقرار کردن شرایط مطلوب آسایشی به طور متوسط در ناحیه حضور افراد، باید نارضایتی‌های گرمایی موضعی کوران و گرادیان عمودی دما برای حالت‌های مختلف دریچه‌های ورود هوا بررسی و مقایسه شود. در شکل ۹ گرادیان عمودی دما برای ردیف‌ها و حالت‌های مختلف نشان داده شده است. هر چه دریچه‌های ورود هوا به افراد نزدیکتر باشد، گرادیان عمودی دما کاهش می‌یابد. به طوری که دریچه‌های جلو صندلی افراد (حالت A) بهترین وضعیت را در این حالت دارد. در این حالت دریچه، هوا از مقابل فرد وارد فضا شده و بر روی بدن افراد تاثیر یکنواخت‌تری دارد. به همین دلیل اختلاف دمای بین بخش‌های مختلف بدن در این حالت کمترین است. در حالتی که دریچه‌های ورود روی دیوارهای اطراف سالن (حالت D) باشد، به دلیل وجود دریچه بزرگ روی دیوار انتهای سالن، این شاخص در ردیف انتهایی به صورت چشمگیری افزایش یافته است. از سوی دیگر، به علت الگوی جریان هوا، این اختلاف دما در ردیف‌های بالای سالن بیشتر می‌شود. البته برای تمامی حالت‌های مورد بررسی این شاخص کمتر از ۳ درجه سیلیوس بوده که نشان‌دهنده عدم وقوع این نارضایتی برای ساکنان است. همچنین، نمودار احساس نارضایتی ناشی از کوران برای حالت‌ها و در ردیف‌های مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد، در حالتی که دریچه‌های ورود هوا روی دیوارهای اطراف سالن (حالت D) و به صورت عمودی (حالت C) باشد، به دلیل اینکه هوا را به صورت افقی و از زیر پای افراد مستقیماً وارد فضا می‌کنند، این نارضایتی محتمل‌تر است. با این حال، میزان نارضایتی ناشی از کوران در تمامی حالت‌ها کمتر از مقدار مجاز (۲۰ درصد) می‌باشد.



### ۳-۵- کیفیت هوای داخل

همان طور که گفته شد، برای سنجش کیفیت هوای داخل غلظت دی‌اکسیدکربن در ناحیه حضور افراد به عنوان شاخص مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۱۱ غلظت آلاینده دی‌اکسید کربن در نواحی حضور افراد و در شکل ۱۲ برای ناحیه حضور کلی افراد، مورد مقایسه قرار گرفته است. بر اساس الگوی جریان هوا که به سمت انتهای سالن است، غلظت آلاینده دی‌اکسید کربن در ردیف‌های انتهای سالن بیشتر می‌شود. برای مجموع نواحی حضور افراد، غلظت آلاینده دی‌اکسید کربن برای حالت دریاچه مقابل صندلی افراد (حالت A) برابر ۷۵۰ pap، حالت دریاچه عمودی (حالت C) برابر ۶۹۸ pap و حالت دریاچه روی دیوارهای اطراف سالن (حالت D) برابر با ۷۴۰ pap می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده، غلظت آلاینده در ناحیه حضور افراد برای همه حالت‌ها کمتر از استاندارد توصیه شده است.

بر اساس شکل ۱۲ که توزیع آلاینده در کل فضا را نشان می‌دهد، در ناحیه حضور افراد تولید آلاینده به علت تنفس باعث افزایش غلظت دی‌اکسید کربن شده است. در حالتی که دریاچه‌های ورود هوا در جلوی صندلی افراد باشد، به علت اینکه ناحیه تنفس ساکنان مستقیماً تحت تاثیر قرار می‌دهد، آلاینده‌ها در ناحیه تنفسی از غلظت کمتری برخوردار است. مطابق شکل ۱۳ قسمت (ج) و (د)، در حالتی که دریاچه‌های ورود هوا در حالت عمودی و بر روی دیوارهای اطراف سالن باشد، فضای بیشتری از ناحیه حضور افراد را تحت تاثیر قرار می‌دهند. همچنین، برای تعیین کارآمدی سیستم تهویه از شاخص اثربخشی نسبی تهویه استفاده شده است. این شاخص توانایی سیستم تهویه در نزدیک کردن غلظت آلاینده‌ها در محدوده حضور افراد به غلظت آلاینده‌ها در هوای ورودی است. هرچه مقدار شاخص اثربخشی نسبی تهویه بیشتر باشد، کارآمدی سیستم تهویه بیشتر است. این شاخص می‌تواند مقداری بیشتر از یک نیز داشته باشد.

$$E_r = \frac{C_{\text{exhaust}} - C_{\text{supply}}}{C_{\text{O}_2} - C_{\text{supply}}} \quad (32)$$

که  $C_{\text{exhaust}}$ ،  $C_{\text{supply}}$  و  $C_{\text{O}_2}$  به ترتیب غلظت آلاینده‌ها در دریاچه‌های خروجی، ورودی و ناحیه حضور افراد می‌باشد. همچنین، شاخص اثر بخشی نسبی تهویه در جدول ۳ نشان داده شده است.

### ۴-۵- مصرف انرژی

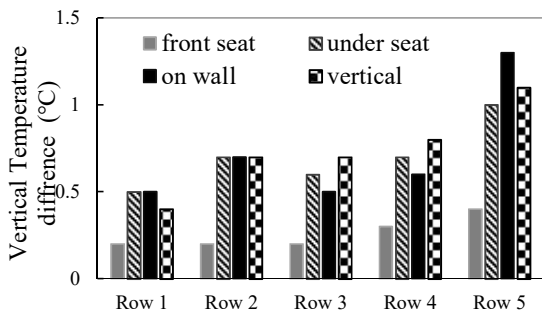
برای مقایسه مصرف انرژی بین حالت‌های مختلف، بیشینه مصرف در دو فصل سرد و گرم سال در حالت تأمین هوا به صورت کاملاً تازه مورد محاسبه و ارزیابی قرار گرفته است. همچنین دمای طرح خارج در فصل سرد ۵- و برای فصل گرم ۳۵ درجه سلسیوس فرض شده است. مقدار بیشینه مصرف انرژی در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

$$Q_{\text{cooling}} = \dot{m} c_p (T_{\text{out, sum}} - T_{\text{in}}) \quad (33)$$

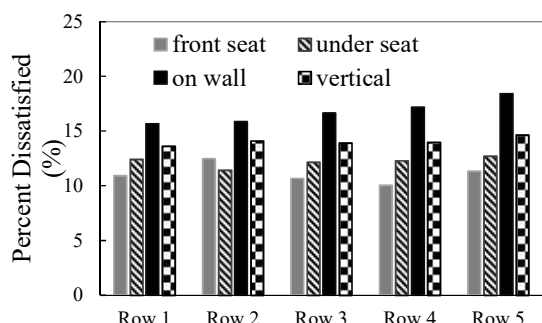
$$Q_{\text{heating}} = \dot{m} c_p (T_{\text{in}} - T_{\text{out, win}}) \quad (34)$$

که  $\dot{m}$  دبی هوای ورودی،  $T_{\text{in}}$  دمای هوای ورودی از دریاچه‌ها،  $T_{\text{out, win}}$  دمای طرح خارج زمستان،  $T_{\text{out, sum}}$  دمای طرح

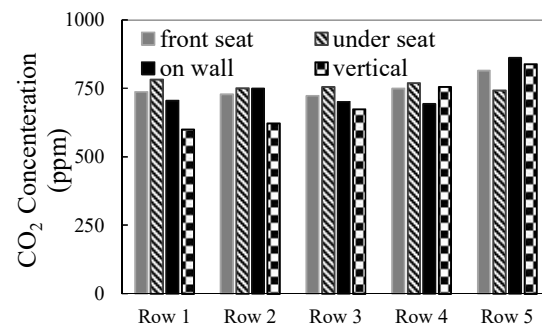
خارج تابستان،  $c_p$  ظرفیت گرمایی هوا و  $Q_{\text{heating}}$ ،  $Q_{\text{cooling}}$  به ترتیب حداکثر بار مصرفی در زمستان و تابستان می‌باشند.



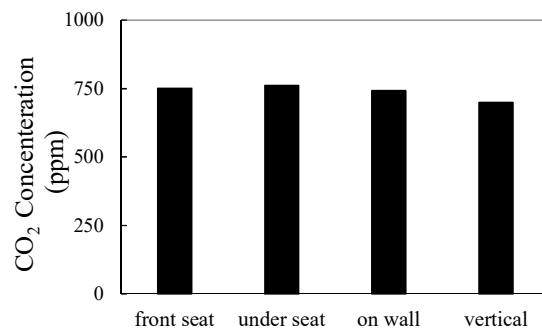
شکل ۹- گرادیان عمودی دما در ناحیه حضور افراد در حالت‌های مختلف



شکل ۱۰- درصد نارضایتی کوران در ناحیه حضور افراد در حالت‌های مختلف

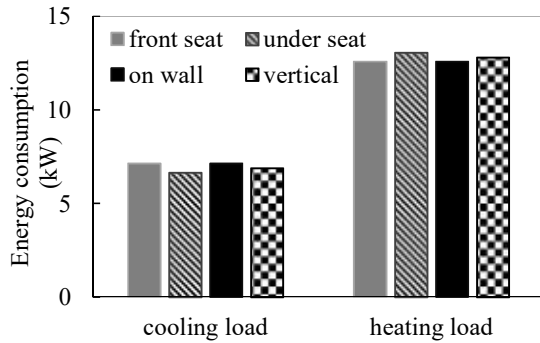


شکل ۱۱- غلظت آلاینده‌ها در ناحیه حضور افراد برای حالت‌های مختلف



شکل ۱۲- غلظت آلاینده‌ها در ناحیه حضور افراد برای حالت‌های مورد بررسی





شکل ۱۴- بار سرمایشی و گرمایشی مصرفی برای حالت‌های مختلف

### ۶- نتیجه‌گیری

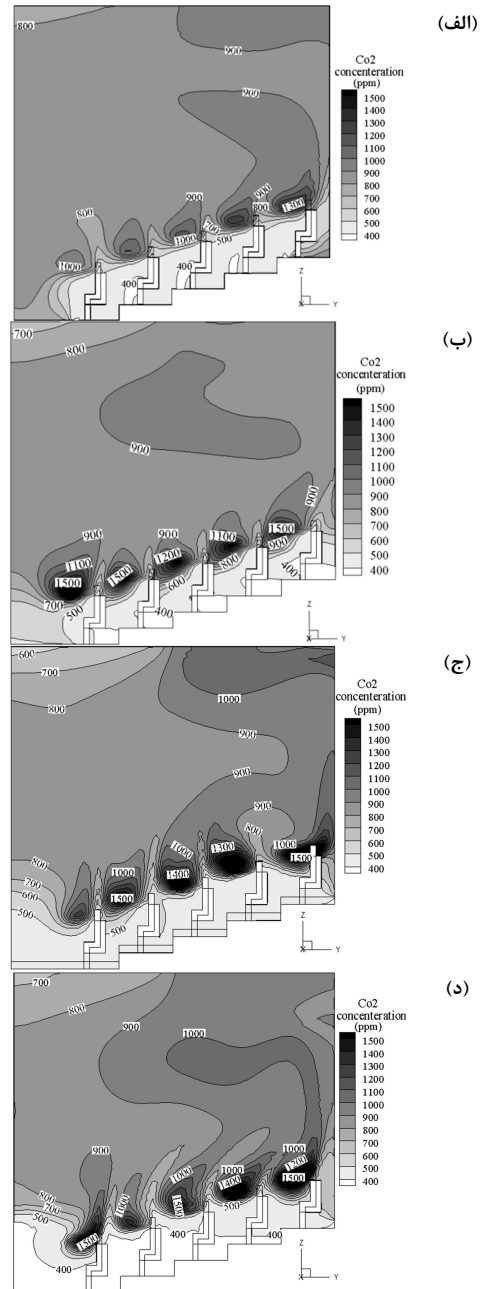
در این تحقیق، اثرات محل دریاچه ورود هوا بر کیفیت هوا و مصرف انرژی با رعایت قید آسایش گرمایی در یک سالن پرجمعیت با سیستم تهویه جابجایی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. لذا دریاچه‌های ورود هوا در چهار حالت قرار داده شده و دمای هوای ورودی به گونه‌ای تعیین شده است تا شاخص آسایش گرمایی در ناحیه حضور افراد برابر صفر (حالت خنثی) شود. خلاصه نتایج به دست آمده در این تحقیق، در جدول ۴ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، هر چهار حالت دریاچه از نظر آسایش گرمایی و کیفیت هوای داخل وضعیت مطلوبی را ایجاد کرده‌اند که نشان دهنده عملکرد مطلوب سیستم تهویه مورد استفاده می‌باشد. همچنین در شرایط یکسان آسایشی، هر چه وزش هوا به سمت افراد بیشتر شود، نارضایتی‌های گرمایی کوران و گرادبان عمودی دما بیشتر می‌شود. به طوری که در حالتی که دریاچه‌ها روی دیوارهای اطراف سالن قرار داشته باشد، این نارضایتی‌ها به حداکثر رسیده و به ترتیب نسبت به حالت مقابل صندلی افراد ۵/۷ درصد و ۰/۴ سیلیوس افزایش می‌یابد. البته این الگوی وزش در ناحیه حضور افراد، باعث بهبود کیفیت هوای داخل می‌شود. به طوری که در حالتی که دریاچه‌های هوا به صورت عمودی در کف مستقر باشد، غلظت آلاینده‌ها در ناحیه حضور افراد نسبت به حالت دریاچه‌های زیر صندلی ۹ درصد کاهش می‌یابد.

جدول ۴- خلاصه نتایج اثرات محل دریاچه‌های ورود هوا

پارامتر مورد بررسی	محل دریاچه ورود هوا			
	جلوی صندلی	زیر صندلی	عمودی روی دیوار	روی دیوار سالن
دمای هوای ورودی (°C)	۲۰/۵	۲۱/۰	۲۱/۵	۲۰/۵
سرعت هوای ورودی (m/s)	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳
متوسط شاخص احساس افراد	۰	۰	۰	۰
نارضایتی ناشی از کوران (%)	۱۱/۱	۱۲/۲	۱۴/۱	۱۶/۸
گرادبان عمودی دما (°C)	۰/۳	۰/۷	۰/۷	۰/۷
غلظت آلاینده CO <sub>2</sub> (ppm)	۷۵۰	۷۶۱	۶۹۸	۷۴۰
بار سرمایشی مصرفی (kW)	۷/۲	۶/۶	۶/۹	۷/۲
بار گرمایشی مصرفی (kW)	۱۲/۵	۱۳/۱	۱۲/۵	۱۲/۸

جدول ۳- بررسی شاخص اثربخشی نسبی تهویه در حالت‌های مختلف

شاخص اثربخشی نسبی تهویه	غلظت آلاینده‌ها در محل (ppm)			محل قرارگیری دریاچه‌های ورود
	دریاچه‌های خروجی	دریاچه‌های ورودی	ناحیه حضور افراد	
۱/۳۵	۸۷۱	۴۰۰	۷۵۰	جلوی صندلی
۱/۲۵	۸۵۲	۴۰۰	۷۶۱	زیر صندلی
۱/۵۶	۸۶۴	۴۰۰	۶۹۸	روی کف (عمودی)
۱/۳۶	۸۶۳	۴۰۰	۷۴۰	روی دیوارهای سالن



شکل ۱۳- توزیع سرعت در صفحه  $x=1/9$  m (الف) مقابل صندلی افراد (ب) زیر صندلی افراد (ج) عمودی روی کف (د) روی دیوارهای سالن

[2] Hao X., Zhang G., Chen Y., Zou S., Moschandreas D. J., A combined system of chilled ceiling, displacement ventilation and desiccant dehumidification, *Building and Environment*, Vol. 42, No. 9, pp. 3298-3308, 2007 .

[3] Cao G., Awbi H., Yao R., Fan Y., Sirén K., Kosonen, J. Zhan R.g, A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings, *Building and Environment*, Vol. 73, pp. 171-186, 2014 .

[4] Leaf-nosed bat, *Encyclopædia Britannica*, Encyclopædia Britannica Online, 2009 .

[5] Chakroun W., Ghali K., Ghaddar N., Air quality in rooms conditioned by chilled ceiling and mixed displacement ventilation for energy saving, *Energy and Buildings*, Vol. 43, No. 10, pp. 2684-2695, 2011 .

[6] Cheong K. W. D., Djunaedy E., Chua Y. L., Tham K. W., Sekhar S. C., Wong N. H., Ullah M. B., Thermal comfort study of an air-conditioned lecture theatre in the tropics, *Building and Environment*, Vol. 38, No. 1, pp. 63-73, 2003 .

[7] Kim G., Schaefer L., Lim J. T., Kim T.S., Thermal comfort prediction of an underfloor air distribution system in a large indoor environment, *Energy and Buildings*, Vol. 64, pp. 323-331, 2013 .

[8] Fathollahzadeh M. H., Heidarinejad G., Pasdarsahar H.i, Prediction of thermalcomfort, IAQ, and energy consumption in a dense occupancy environment with the under floor air distribution system, *Building and Environment*, Vol. 90, pp. 96-104, 2015 .

[9] Nada S. A., El-Batsh H. M., Elattar H. F., Ali N. M., CFD investigation ofairflow pattern, temperature distribution and thermal comfort of UFAD system for theater buildings applications, *Journal of Building Engineering*, Vol. 6, pp. 274-300, 2016 .

[10] Fathollahzadeh M. H., Heidarinejad G., H. Pasdarsahri, Producing a better performance for the under floor air distribution system in a dense occupancy space, *Energy and Buildings*, Vol. 126, pp. 230-238, 2016.

[۱۱] افضلیان م.، ذوالفقاری س.، فوادالدینی ع.، اثرات نرخ تعویض هوا بر آسایش، کیفیت هوا و مصرف انرژی در یک سالن اجتماعات دارای سیستم توزیع هوای زیرسطحی، مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۷، شماره ۲، صفحات ۲۸۴-۲۹۴، ۱۳۹۶.

[۱۲] افضلیان م.، داودی ف.، حسن زاده ح.، ذوالفقاری س.، معرفت م.، بررسی تأثیرات عوامل فردی بر آسایش حرارتی افراد مستقر در یک محیط پرجمعیت، مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۷، شماره ۲، صفحات ۲۷۵-۲۸۳، ۱۳۹۶.

[13] Fanger P. O., *Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering*: Danish Technical Press, 1970 .

[14] Gagge A. P., An effective temperature scale based on a simple model of human physiologicalregulatory response, *Ashrae Trans.*, Vol. 77, pp. 247-262, 1971 .

[15] ASHRAE Handbook : fundamentals, Atlanta, GA.: ASHRAE, 2009.

[16] American Society of Heating R., Engineers A. C., *ANSI/ASHRAE Standard 55-2013: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*: ASHRAE, 2013 .

[17] Awbi H. B., *Ventilation of Buildings*: Spon Press, 2003 .

[18] Kobayashi N., Chen Q., Floor-Supply Displacement Ventilation in a Small Office, *Indoor and Built Environment*, Vol. 12, No. 4, pp. 281-291, 2003.

[19] Takada S., T. Sakiyama, T. Matsushita, Validity of the two-node model for predicting steady-state skin temperature, *Building and Environment*, Vol. 46, No. 3, pp. 597-604, 2011 .

۷- نمادها

$A_D$	سطح تماس بدن ( $m^2$ )
CSIG	سیگنال سرد
$D$	ضریب پخش گونه
$g$	شتاب گرانش ( $ms^{-2}$ )
$M$	نرخ متابولیک ( $Wm^{-2}$ )
$\dot{m}$	نرخ جریان خون ( $kgm^{-2}s^{-1}$ )
$P$	فشار ( $kgm^{-1}s^{-2}$ )
$P_a$	فشار جزئی بخار آب ( $kgm^{-1}s^{-2}$ )
$Q$	تولید یا تبادل حرارت بر واحد سطح ( $Wm^{-2}$ )
$R$	مقاومت ( $kgms^{-2}W^{-1}$ )
RH	رطوبت نسبی (%)
$T$	دما (K)
$T_u$	شدت اغتشاشات جریان (/)
TSENS	شاخص آسایش گرمایی (بی بعد)
$V$	سرعت ( $ms^{-1}$ )
$W$	کار خارجی ماهیچه‌ها ( $Wm^{-2}$ )
$w$	تری پوست (بی بعد)
WSIG	سیگنال گرم

علایم یونانی

$\alpha$	بخشندگی گرمایی ( $m^2s^{-1}$ )
$\beta$	ضریب انبساط حجمی ( $K^{-1}$ )
$\eta$	بازده (بی بعد)
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $kgm^{-1}s^{-1}$ )
$\rho$	چگالی ( $kgm^{-3}$ )

زیر نویس‌ها

a	مربوط به هوا
act	فعالیت بدنی
b	مربوط به بدن
bl	مربوط به خون
cr	مرکز بدن
eff	موثر
e,t	کل
ev	تبخیری
in	ورودی
n	خنثی
rad	تابشی
ref	مرجع
res	تنفسی
shiv	سازوکار لرز
sk	پوست
t	اغتشاشی

۸- مراجع

[1] Ahmed A. Q., Gao S., Kareem A. K., A numerical study on the effects of exhaust locations on energy consumption and thermal environment in an office room served by displacement ventilation, *Energy Conversion and Management*, Vol. 117, pp. 74-85, 2016.