

# مطالعه عددی تأثیر جانمایی دریچه‌های خطی اسلات بر توزیع هوای فضاهاى جمعیتی

سعید وحیدی فر<sup>۱\*</sup>، احسان افضل‌نسب<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دپارتمان مهندسی مکانیک، دانشکده محمد منتظری، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان خراسان رضوی، ایران

<sup>۲</sup>کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک)، تهران

\*مسئول مکاتبات: s\_vahidifar@yahoo.com

## چکیده

## واژگان کلیدی

شرایط آسایش حرارتی  
توزیع دما در ساختمان  
توزیع هوا  
جانمایی دریچه‌های خطی

## تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۸/۰۸  
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۵/۲۸

امروزه تنظیم مناسب توزیع دما و سرعت هوا در فضاهاى ساختمانی حائز اهمیت است. جانمایی دریچه‌های ورودی و خروجی هوا تأثیر مستقیمی بر آسایش حرارتی دارد. در بسیاری از فضاهاى جمعیتی به دلیل ملاحظات معماری، بر استفاده از دریچه‌های خطی تأکید می‌شود لذا یک فضای جمعیتی خاص با ابعاد  $5 \times 18/45 \times 24/4$  متر به‌عنوان نمونه مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش دو حالت مختلف جانمایی دریچه‌های ورودی هوا و دو حالت برای جانمایی دریچه‌های خروجی هوا، در نظر گرفته شده است. برای مقایسه میان چهار حالت مختلف از نرم‌افزار فلونت استفاده شده است. با توجه به شرایط هندسی و فیزیکی پروژه و همچنین کارایی این فضا نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که جانمایی دریچه‌ها در حالتی که دریچه‌های خطی در امتداد بردار عمود بر سطح دریچه‌های خروجی قرار داشته باشند، شرایط مناسب‌تری را از نظر آسایش حرارتی، برای افراد فراهم می‌کند.

## ۱ مقدمه

اکثر انسان‌ها برای ایجاد شرایط مناسب کار کردن و امنیت در زندگی، به دلیل پایدار نبودن شرایط محیطی و آب و هوایی، زمان زیادی را در فضاهاى ساختمانی مانند ساختمان‌های مسکونی، اداری و غیره سپری می‌کنند. از این رو ایجاد آسایش حرارتی در داخل فضای ساختمان بسیار مهم است.

برای ایجاد شرایط آسایش حرارتی در داخل ساختمان‌ها، سیستم‌های سرمایش و گرمایش به کار گرفته می‌شوند که شرایط هوای داخل ساختمان را تنظیم می‌کنند. سیستم‌های تهویه مطبوع انواع متفاوتی دارند که به‌صورت کلی می‌توان به سه دسته سیستم تهویه تمام آب، سیستم تهویه تمام هوا و سیستم تهویه هوا-آب تقسیم کرد. هر یک از این سیستم‌ها به تناسب کارایی و ویژگی‌هایی که دارند مورد استفاده قرار می‌گیرند. در فضاهاى جمعیتی<sup>۱</sup> ساختمانی مانند آمفی‌تئاترها، تالارها و یا سالن‌های ورزشی، عموماً از سیستم تهویه مطبوع تمام هوا استفاده می‌شود. عملکرد این سیستم‌های تهویه مطبوع به این‌گونه است که هوا به‌وسیله‌ی دستگاه‌های هواساز<sup>۲</sup> سرد یا گرم شده و به دمای موردنظر می‌رسد سپس توسط کانال‌هایی به فضای موردنظر که نیاز به تهویه دارد منتقل می‌شوند از طرفی دیگر هوای داخل فضا نیز از راه دریچه‌هایی مکیده شده و به خارج از ساختمان منتقل شده یا به سیستم تهویه مطبوع به‌تناسب نیاز برگشت داده می‌شود.

جانمایی دریچه‌های ورودی و خروجی هوا در سیستم تهویه‌ی تمام هوا تأثیر بسزایی در توزیع دما، سرعت و همچنین انتشار آلاینده‌ها در داخل فضا

دارد. سیستم‌های تمام هوا خود از لحاظ نحوه قرارگیری دریچه‌های رفت و

برگشت هوا به فضا به سه دسته تقسیم می‌شوند:

۱. تهویه مطبوع به روش اختلاطی<sup>۳</sup>، در این روش هوای تهویه شده از قسمت بالایی فضای تهویه شده به فضای داخل ساختمان وارد می‌شود و در قسمت پایین از فضا خارج می‌شود.
۲. تهویه به روش لایه‌ای<sup>۴</sup>، در این روش تهویه هوا از قسمت میانی در ارتفاعی که از سرفراد کمی بالاتر است وارد فضای تهویه شده می‌شود و از قسمت بالایی فضا خارج می‌شود.
۳. تهویه جابه‌جایی<sup>۵</sup>، در این سیستم تهویه مطبوع، هوای تهویه شده از قسمت پایین و نزدیک به پای افراد وارد فضا می‌شود و از قسمت بالایی خارج می‌شود [۱].

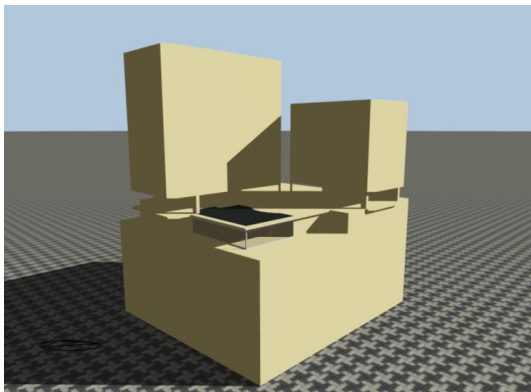
هر یک از این روش‌های تهویه مطبوع مزایا و معایب خاص خود را دارا هستند. در این میان رایج‌ترین سیستم تهویه مطبوع، سیستم تهویه‌ی اختلاطی است که در آن جریان هوا از بالا به پایین است و در میان سیستم‌های تهویه کمترین انتشار آلاینده‌ی را داراست. با توجه به نحوه توزیع مورد نیاز برای فضا، دریچه‌های تهویه مطبوع متفاوتی طراحی شده است که از جمله پرکاربردترین دریچه‌ها می‌توان دریچه‌های ساده، دریچه‌های چهار طرفه و دریچه‌های خطی را نام برد. در این مطالعه با توجه به محدودیت‌های معماری و اجرایی از سیستم تهویه اختلاطی با دریچه‌های خطی<sup>۶</sup> استفاده خواهد شد. مطالعات نشان می‌دهد که تا به حال تحقیق‌های زیادی در مورد بررسی توزیع دما، سرعت

<sup>1</sup>Occupied Zone <sup>2</sup>Air Handling Unit <sup>3</sup>Mixing Ventilation <sup>4</sup>Stratum Ventilation <sup>5</sup>Displacement Ventilation <sup>6</sup>Linear Diffuser

سرد تأثیر چشم‌گیری بر نارضایتی افراد ساکن در فضا دارد. کوانگ و همکاران [۹] در مطالعه خود به شبیه‌سازی تهویه‌ی یک سالن کنفرانس با در نظر گرفتن سیستم تهویه‌ی زیرسطحی علاقه نشان دادند و نتایج را با نتایج اندازه‌گیری شده، مقایسه کردند. نتایج مطالعات آن‌ها به این صورت گزارش شد که با استفاده از این سیستم تهویه در برخی نواحی عدم آسایش حرارتی وجود دارد که برای رفع این مشکل راهکار تغییر دمای هوای ورودی و تغییر مکان نشستن افراد را پیشنهاد دادند. ذوالفقاری و همکاران [۱۰] در مطالعه‌ی دیگر به بررسی شرایط آسایش حرارتی در یک اتوبوس پرداختند، آن‌ها دو سیستم رایج تهویه اختلاطی و تهویه‌ی جابه‌جایی را شبیه‌سازی کردند و نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از سیستم تهویه‌ی جابه‌جایی به دلیل اختلاف دمای زیاد بین قسمت پاها و سر، نارضایتی بیشتری را به همراه خواهد داشت. همان‌طور که در مطالعات پیشین مشاهده می‌شود فضاهای بسیاری از نظر آسایش حرارتی و انرژی مصرفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند اما در هیچ‌یک از این پژوهش‌ها به شبیه‌سازی و بررسی آسایش حرارتی در داخل یک تالار با استفاده از دریچه‌های خطی اسلات<sup>۱</sup> و بررسی تغییرات جانمایی دریچه‌های رفت و برگشت تهویه مطبوع پرداخته نشده است. در این پژوهش به مطالعه‌ی موردی تالار مراسم یک برج مسکونی پرداخته شده است.

## ۲ معرفی مسئله

فضایی که برای بررسی و شبیه‌سازی موردی در این پژوهش در نظر گرفته شده، یک تالار است که در طبقه ششم یک مجموعه‌ی مسکونی و تجاری به نام برج مهر مشهد واقع شده است (شکل ۱). این تالار دارای ظرفیت ۱۷۲ نفر مهمان است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده این فضا دارای ابعاد ۱۸/۴۵ متر عرض، ۲۴/۴ متر طول و ۵ متر ارتفاع است.



شکل ۱: جهت و محل قرارگیری تالار در ساختمان.

سیستم تهویه‌ای که برای این فضا در نظر گرفته شده، سیستم تهویه‌ی تمام هوا است که در آن هوا به وسیله‌ی ۶۱ دریچه‌ی خطی (۲ خطه) از سقف تالار به داخل فضا وارد می‌شود، ابعاد هر یک از شیارهای این دریچه‌ها ۲ سانتی‌متر عرض در ۷۵ سانتی‌متر طول است که در هر دریچه ۲ شیار وجود دارد. بخشی از هوای وارد شده به فضا از درب‌های تالار خارج شده و بخشی دیگر از ۲ دریچه‌ای که به‌عنوان دریچه‌های هوای برگشت، با ابعاد ۷۰ سانتی‌متر ارتفاع

و آسایش حرارتی افراد در فضاهای بزرگ ساختمانی انجام شده است که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته شده است.

لین و همکاران [۲] با شبیه‌سازی جریان هوا برای چند فضای مختلف از جمله کلاس آموزشی، اداری، فروشگاه و چند فضای دیگر، به مقایسه و مطالعه‌ی شرایط آسایش حرارتی در استفاده از دو سیستم تهویه مطبوع جابه‌جایی و تهویه مطبوع اختلاطی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از سیستم تهویه مطبوع جابه‌جایی در این فضاها از نظر آسایش حرارتی بهتر بوده و نارضایتی کمتری وجود دارد. در مطالعه‌ی دیگر لین و همکاران [۳] در پژوهش خود با استفاده از شبیه‌سازی عددی به بررسی اثر جانمایی دریچه‌های سیستم تهویه مطبوع جابه‌جایی پرداختند. آن‌ها بررسی خود را برای یک دفتر اداری انجام دادند و نشان دادند که برای رسیدن به دمای یکنواخت‌تر و آسایش بیشتر، باید دریچه‌ی ورودی هوا را در نزدیک مرکز اتاق جانمایی کنند. همچنین در بررسی جانمایی دریچه‌های برگشت، نتایج آن‌ها مشخص کرد که تغییر مکان این دریچه‌ها تأثیر قابل توجهی در یکنواختی دما و آسایش حرارتی ندارد. لم و چان [۴] در پژوهشی با استفاده از شبیه‌سازی عددی به بررسی توزیع دما و حرکت هوا در داخلی یک سالن ورزشی پرداختند. آن‌ها این شبیه‌سازی را برای چهار حالت مختلف جانمایی دریچه خروجی هوا انجام دادند. بر اساس تحقیقات آن‌ها مشخص شد که با در نظر گرفتن بهترین جانمایی دریچه برگشت، در صورتی که لایه‌بندی دمایی هوا و توزیع دما در نظر گرفته نشود، در مقایسه با در نظر گرفتن اثر لایه‌بندی دمایی هوا، تخمین انرژی مصرفی سالانه برای سرمایش سالن حدود ۴۵/۵ درصد بیشتر محاسبه می‌شود. نادا و همکاران [۵] با بررسی تأثیر دمای هوای ورودی، سرعت هوای ورودی، در یک فضای تئاتر با سقف بلند و بررسی تأثیر تعداد دریچه‌های هوای ورودی، عملکرد سیستم تهویه مطبوع را مورد ارزیابی قرار دادند. با استفاده از نتایج حاصل، به این نتیجه رسیدند که با استفاده از سیستم‌های تهویه جابه‌جایی، می‌توان به گرادیان عمودی کمتر، محیط راحت‌تر و مصرف انرژی کمتری نسبت به سیستم تهویه اختلاطی، دست پیدا کرد همچنین بر مبنای گزارش آن‌ها میزان کاهش در مصرف انرژی در سیستم تهویه مطبوع با افزایش ارتفاع، بیشتر و چشمگیرتر است. رحمتی و همکاران [۶] برای یک اتاق تهویه‌ی جابه‌جایی در نظر گرفتند و با انتخاب حالت‌های مختلف برای جانمایی دریچه‌های ورودی هوا و خروجی هوا به این نتیجه رسیدند که مکان‌های مختلف قرارگیری دریچه‌ی هوا تأثیر قابل توجهی بر پروفیل دمایی عمودی دارد. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که دریچه‌های خروجی هوا باید به اندازه‌ی کافی از دریچه‌های ورودی فاصله داشته باشد تا بتوان توزیع دما و آسایش حرارتی مناسبی در اتاق ایجاد کرد. شان و همکاران [۷] در مطالعه‌ی تجربی برای بررسی شرایط آسایش حرارتی در یک اتاق با استفاده از سیستم تهویه اختلاطی و تهویه جابه‌جایی اقدام کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که در سیستم تهویه اختلاطی به دلیل سرعت بالای هوای ورودی نسبت به سیستم تهویه‌ی جابه‌جایی خطرکوران بالاتر است. ذوالفقاری و سخاوت‌مند [۸] در تحقیق خود به بررسی سیستم گرمایش فریزی پرداختند و آسایش حرارتی افراد حاضر را با استفاده از این سیستم بررسی کردند آن‌ها نفوذ هوای سرد از خارج به داخل را نیز شبیه‌سازی کردند و متوجه شدند که نفوذ هوای

<sup>1</sup>Slot Linear Diffusers

دینامیک سیالات محاسباتی از نسخه ۱۷/۲ نرم‌افزار آنسیس فلونت<sup>۱</sup> استفاده شده است. روابط مورد استفاده به صورت زیر معرفی می‌شوند:

معادله‌ی بقای جرم (پیوستگی):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

معادله‌ی بقای تکانه:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla P + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho g \quad (2)$$

معادله‌ی بقای انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho H u) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

عبارت  $\bar{\tau}$  تنش برشی المان سیال است که از رابطه‌ی (۴) محاسبه می‌شود.

$$\bar{\tau} = \mu \left[ (\nabla u + \nabla u^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot u I \right] \quad (4)$$

در رابطه (۴)، عبارت دوم سمت راست ناشی از تأثیرات تأخیر حجمی است که در این مسئله صفر خواهد بود. همچنین عبارت  $\rho g$  در معادله‌ی بقای تکانه، ناشی از نیروهای حجمی وارد بر المان سیال است. در این مطالعه با توجه به در نظر گرفتن جابه‌جایی طبیعی در داخل تالار، مقادیر آن صفر نخواهد بود. از آنجایی که تغییرات دما به طور مستقیم بر چگالی و رفتار سیال تأثیر می‌گذارد در حل میدان جریان می‌بایست این پدیده در نظر گرفته شود. در این پژوهش از معادله‌ی گاز ایده‌آل تراکم ناپذیر برای مدل‌سازی تأثیر تغییرات چگالی و دما استفاده شده که جزئیات آن در معادله‌ی (۵) نمایش داده شده است.

$$\rho = \frac{P_{operating}}{\frac{R}{M_w} T} \quad (5)$$

در رابطه‌ی فوق فشار کاری سیال است که در این مسئله می‌توان آن را همان فشار متوسط هوا متناسب با ارتفاع از سطح دریا در نظر گرفت.

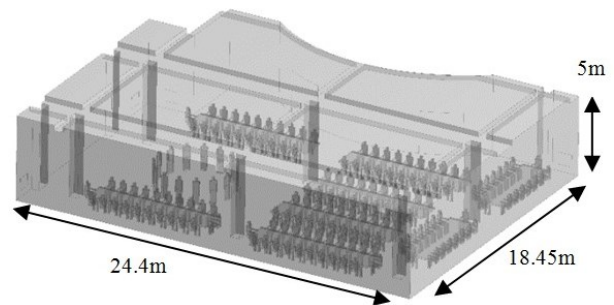
با توجه به سرعت هوا در دریچه‌های ورودی هوا می‌توان گفت که رفتار سیال از حالت لایه‌ای و آرام خارج شده و نیاز است تا از معادلاتی که برای مدل‌سازی آشفستگی لحاظ شده برای شبیه‌سازی استفاده شود. به‌عنوان مثال معادله‌ی تنش برشی سیال به شکل رابطه‌ی (۶) ظاهر می‌شود.

$$\bar{\tau} = (\mu + \mu_{turb}) \left[ (\nabla u + \nabla u^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot u I \right] \quad (6)$$

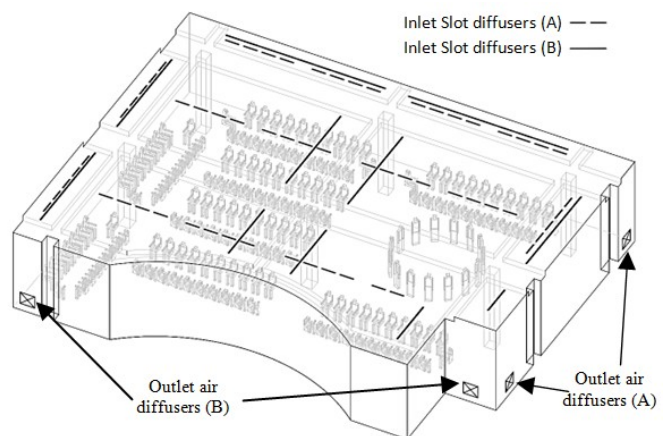
در میان روش‌های متفاوتی که برای مدل‌سازی  $\mu_{turb}$  وجود دارد با توجه به نوع مسئله، هزینه محاسباتی، ابزارهای موجود و همچنین دقت معادلات، یکی از روش‌های RANS، با عنوان روش  $k - \epsilon$  تحقق‌پذیر<sup>۲</sup> استفاده شده است. دیگر متغیری که از اهمیت بالایی برخوردار است معیار سنجش آسایش حرارتی است. برای این منظور مدل‌های متفاوتی تاکنون مطرح شده است. مدل آسایش حرارتی فنگر<sup>۳</sup> به‌عنوان پرکاربردترین مدل تحلیلی آسایش حرارتی مطرح است. این مدل حرارتی بر اساس معادله‌ی بالانس انرژی برای بدن در شرایط پایا شکل گرفته است. شاخص حرارتی میانگین آرای پیش‌بینی شده (PMV)<sup>۴</sup> شاخصی است که مقادیر کمی را به احساس حرارتی افراد نسبت می‌دهد، مقدار این شاخص عددی بین -۳ تا +۳ است که حس دمایی

۸۰ سانتی‌متر عرض، تعبیه شده‌اند از فضای تالار خارج می‌شود. با توجه به طرح سقف در نظر گرفته شده برای این فضا پیشنهادهایی برای جانمایی‌های مختلف دریچه‌ها ارائه شده است. همچنین برای دریچه‌ی خروجی هوا از دو پیشنهاد استفاده شده که در شکل ۳ این جانمایی‌های مختلف نمایش داده شده است.

با در نظر گرفتن شرایط و جانمایی‌های متفاوت برای این فضا می‌توان ۴ حالت متفاوت را مدنظر گرفت. در جدول ۱ تمامی حالات ممکن معرفی و نام‌گذاری شده است که در ادامه برای هر یک از این حالات شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده و نتایج بررسی شده است.



شکل ۲: نمای سه‌بعدی از تالار شبیه‌سازی شده.



شکل ۳: جانمایی دریچه‌های ورودی و خروجی (برگشت) هوا در حالت‌های مختلف.

جدول ۱: معرفی حالت‌ها مختلف جانمایی دریچه‌های هوا.

وضعیت	دریچه‌ی ورودی هوا	دریچه‌ی خروجی هوا
حالت اول	الف	الف
حالت دوم	الف	ب
حالت سوم	ب	الف
حالت چهارم	ب	ب

### ۳ معادلات حاکم

اساسی‌ترین معادلاتی که در این مطالعه برای استفاده در شبیه‌سازی به کار برده شده‌اند معادلات دینامیک سیالات محاسباتی هستند، برای حل این معادلات، نرم‌افزارهای مختلفی طراحی شده‌اند. در این پژوهش برای شبیه‌سازی

<sup>1</sup>ANSYS FLUENT <sup>2</sup>Realizable k-epsilon <sup>3</sup>Fanger <sup>4</sup>Predicted Mean Vote

و اعمال آن برای حل دینامیک سیالات محاسباتی، صحت یک حل عددی را مشخص می‌کند. در این بین مناسب‌ترین روش برای تعیین شرایط مرزی استفاده از داده‌های تجربی و اندازه‌گیری شده است. با توجه به این‌که در مسائل طراحی امکان اندازه‌گیری پارامترهای مختلف وجود ندارد لذا بایستی با استفاده از روابط فیزیکی مناسب و نزدیک به واقعیت، شرایط مرزی مناسب را محاسبه کرد.

برای تعیین شرایط مرزی صحیح و دقیق در این پروژه از شبیه‌سازی انرژی به‌وسیله‌ی نرم‌افزار دیزاین بیلدر<sup>۲</sup> استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است سعی شده تا شرایطی که برای شبیه‌سازی فضای تالار در نرم‌افزار دیزاین بیلدر در نظر گرفته شده است تا حد امکان مطابق با واقعیت باشد.

این نرم‌افزار با استفاده از اطلاعات دقیق آب و هوایی منطقه، شرایط طرح داخل تالار و مشخصات مصالح به‌کاربرده شده در ساخت دیوارها، معادلات بقای انرژی را برای فضاهای مدل‌سازی شده حل می‌کند و با استفاده از محاسبه‌ی انتقال حرارت سطوح مختلف، مانند دیوارها و پنجره‌ها، میزان انرژی اتلافی از فضا را محاسبه می‌کند [۱۲].

با استفاده از نتایج حل می‌توان مقادیر دمای سطوح مختلف و همچنین دبی هوای تهویه شده که برای خنک کردن تالار لازم است را استخراج کرد. با توجه به داده‌های به‌دست‌آمده برای تالار، شرایط مرزی موردنیاز برای شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی تعیین شده است که در جدول ۲ معرفی شده است.

یکی دیگر از عواملی که به‌عنوان منبع تولید حرارت در داخل فضا شناخته می‌شود، حضور افراد در داخل تالار است. که با توجه به سطح فعالیت افراد حاضر، میزان حرارت تولیدی هر شخص در نظر گرفته شده است.

جدول ۲: شرایط مرزی محاسبه‌شده برای هر سطح

شرط مرزی محاسبه‌شده	وضعیت
۲۸ (°C)	دیوار شمالی
۲۷/۵۴ (°C)	دیوار شرقی
۳۵/۴۵ (°C)	دیوار شیشه‌ای غربی
۳۱/۲۶ (°C)	دیوار شیشه‌ای جنوبی
۲۹/۱۵ (°C)	سقف
۲۷/۱۶ (°C)	کف
۴/۹۸۳۶ (kg/s)	هوای تهویه شده
۱۵ (°C)	ورودی

### ۳.۴ بررسی استقلال حل از شبکه

در شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی نیاز است تا سیال موردنظر شبکه‌بندی شده و معادلات دینامیک سیالات محاسباتی بر روی فضای موردنظر حل شود. برای این‌که نتایج حاصل از شبیه‌سازی صحیح باشد باید شبکه‌ی محاسباتی به‌اندازه‌ی کافی ریز باشد به‌طوری‌که ابعاد و تعداد گره‌های شبکه تولید شده، تأثیری در نتایج حل نداشته باشد. به همین منظور، شبیه‌سازی این هندسه با در نظر گرفتن تعداد گره‌های محاسباتی ۰۸×۱۷۹۷۰، ۲۳۷۶۵۵ و ۳۰۹۷۶۳۷، انجام شده است. همان‌طور که در شکل ۴ نمایش داده شده است.

متناسب با هر عدد صحیح از سرد تا داغ است. این شاخص را می‌توان با استفاده از روابط (۷) تا (۱۰) محاسبه کرد [۱۱].

$$PMV = (0.303e^{-0.166PM} + 0.021) \{ (M - W) - 3.05 \times 10^{-3} [5733 - 699(M - W) - P_a] - 0.42 [(M - W) - 58/15] - 1/7 \times 10^{-5} M (5867 - P_a) - 0.0014M (34 - T_{air}) - 3/96 \times 10^{-8} f_{cl} [(T_{cl} + 273)^4 - (\bar{T}_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (T_{cl} - T_{air}) \} \quad (۷)$$

$$T_{cl} = 35/7 - 0.021(M - W) - 0.155 I_{cl} \{ 3/96 \times 10^{-8} f_{cl} [(T_{cl} + 273)^4 - (\bar{T}_r + 273)^4] + f_{cl} h_c (T_{cl} - T_{air}) \} \quad (۸)$$

$$\begin{cases} \text{if } 2/38 |T_{cl} - T_{air}|^{0.25} > 12/1 \sqrt{v_{air}} \\ \rightarrow h_c = 2/38 |T_{cl} - T_{air}|^{0.25} \\ \text{if } 2/38 |T_{cl} - T_{air}|^{0.25} < 12/1 \sqrt{v_{air}} \\ \rightarrow h_c = 12/1 \sqrt{v_{air}} \end{cases} \quad (۹)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1/0 + 1/29 I_{cl} \leq 0.078 m^2 K/W \\ 1/0.5 + 0.645 I_{cl} > 0.078 m^2 K/W \end{cases} \quad (۱۰)$$

با استفاده از میانگین شاخص حرارتی می‌توان درصد نارضایتی افراد (PPD)<sup>۱</sup> را مطابق با رابطه‌ی (۱۱) محاسبه کرد [۱۱].

$$PPD = 100 - 95 \times \exp(-0.3353 PMV^4 - 0.218 PMV^4) \quad (۱۱)$$

## ۴ روش حل

### ۱.۴ روش حل عددی

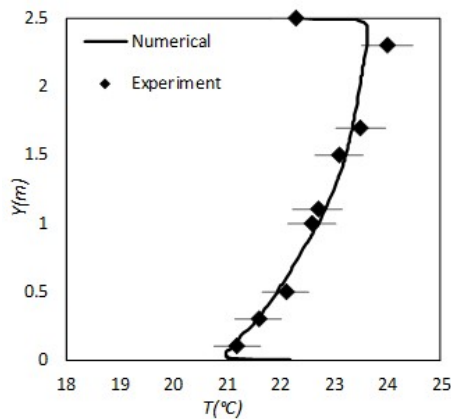
همان‌طور که پیش‌ازین اشاره شد در این مطالعه با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (نرم‌افزار فلوئنت)، حل عددی به روش حجم محدود و از الگوریتم کوپل<sup>۲</sup> استفاده شده است، ترم‌های جابجایی معادلات مومنتوم، انرژی و نیز معادلات آشفستگی به صورت آپویند مرتبه دوم<sup>۳</sup> گسسته سازی شده‌اند. همچنین برای در نظر گرفتن جابه‌جایی طبیعی نیز از روش گاز ایده آل تراکم ناپذیر استفاده شده است.

### ۲.۴ شرایط مرزی

برای حل یک مسئله یکی از مهم‌ترین مواردی که بایستی به‌درستی در نظر گرفته شود، شرایط مرزی مناسب برای مسئله است. نحوه‌ی محاسبه‌ی شرایط مرزی

<sup>1</sup>Predicted Percentage of Dissatisfied <sup>2</sup>Coupled <sup>3</sup>Second Order Upwind <sup>4</sup>Designbuilder

مطابق با شکل ۶، میزان خطای مقادیر محاسبه شده کمتر از ۲ درصد است لذا استفاده از این روش حل دارای اعتبار است.



شکل ۶: قیاس مقادیر شبیه‌سازی شده با داده‌های اندازه‌گیری شده.

## ۵ نتایج و بحث

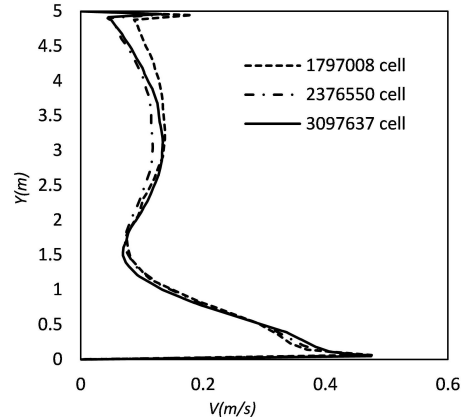
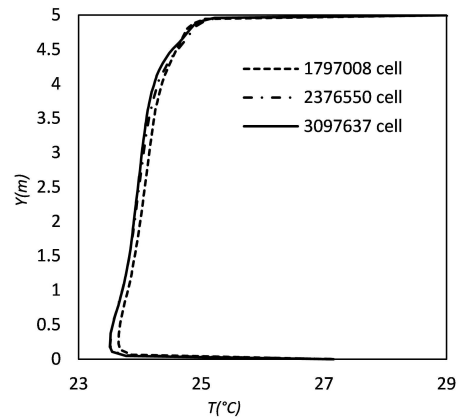
به منظور بررسی و انتخاب حالت بهینه در جانمایی دریچه‌های تهویه مطبوع در فضاهای جمعیتی، یک فضای نمونه انتخاب و شبیه‌سازی شده است. چهار حالت ممکن از جانمایی دریچه‌های تهویه مطبوع مورد مطالعه قرار گرفته است. برای مقایسه‌ی میان حالت‌های متفاوت توزیع دما و سرعت در ناحیه‌ی حضور افراد و همچنین متغیرهای معرف میزان آسایش حرارتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

با توجه به معیارهای ارائه شده در استاندارد ۱۴۳۸۴ سازمان ملی استاندارد ایران [۱۴]، فضاهای ساختمانی از نظر آسایش حرارتی به سه گروه الف، ب و پ دسته‌بندی شده‌اند که در این دسته‌بندی، تالارها و سالن‌های همایش در گروه ب قرار می‌گیرند.

مطابق این استاندارد، برای شاخص حرارتی میانگین آرای پیش‌بینی شده (PMV)، بازه‌ی عددی ۰/۵ تا ۰/۵- به عنوان شرایط مناسب آسایش در نظر گرفته شده است. در این بازه درصد نارضایتی پیش‌بینی شده (PPD) کمتر از ۱۰ است.

یکی دیگر از مواردی که در آسایش حرارتی اهمیت دارد اختلاف دمای عمودی بین پا و سر افراد است که با توجه به گروه حرارتی ب، مقداری اختلاف دمای عمودی بین سر و ناحیه‌ی قوزک پا باید کمتر از ۳ درجه‌ی سانتی‌گراد باشد. حدود دمایی مناسب برای این گروه حرارتی،  $24 \pm 1/5$  درجه‌ی سانتی‌گراد است. به منظور دستیابی به شرایط مناسب آسایش و همچنین استفاده‌ی بهینه از انرژی مصرفی سیستم تهویه مطبوع، حالت‌های مختلف ارائه شده در جدول ۲، از نظر توزیع دما و آسایش حرارتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

در ابتدا نمودارهای توزیع دمای عمودی برای نقطه‌ای به مختصات  $x = 16$ ،  $z = 20$  متر، در فضای اشغال شده مقایسه شده است. با توجه به شکل ۷ می‌توان گفت که گرادین عمودی دما در همه حالت‌های تهویه به صورت یکنواخت و قابل قبول بوده است. با توجه به به کارگیری سیستم تهویه اختلاطی می‌توان مشاهده کرد که در تابستان، در هیچ یک از حالت‌ها،

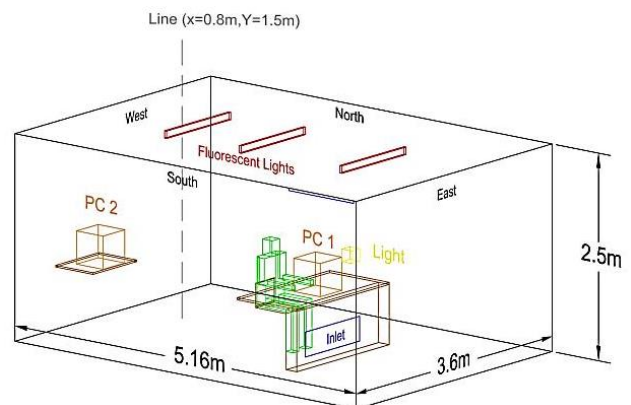


شکل ۴: بررسی استقلال حل از شبکه برای دما و سرعت.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای تعداد شبکه‌های ۲۳۷۶۵۵ و بیشتر از آن تغییر چندانی نداشته لذا می‌توان گفت که ابعاد شبکه در حالت ۲۳۷۶۵۵ گره محاسباتی، به اندازه‌ی کافی کوچک بوده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی مستقل از شبکه خواهد بود.

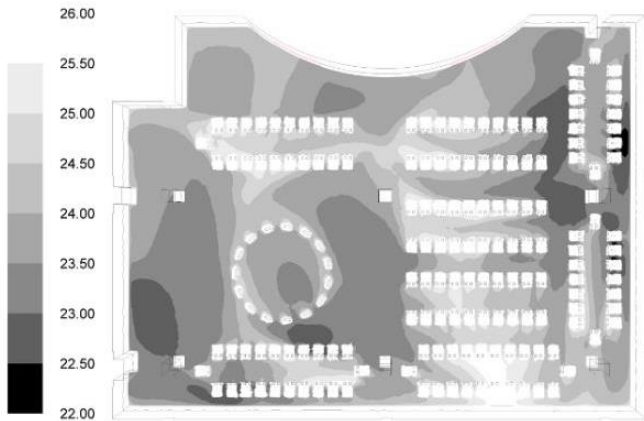
## ۴.۴ اعتبارسنجی روش حل

برای اعتبارسنجی روش حل، از شبیه‌سازی یک اتاق ساده و مقایسه‌ی نتایج حل با نتایج آزمایشگاهی پژوهش لومان [۱۳] استفاده شده است. در شکل ۵ هندسه‌ی اتاق شبیه‌سازی شده نمایش داده شده است. پس از شبیه‌سازی، دمای اندازه‌گیری شده با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شده‌اند که می‌توان با مراجعه به شکل ۶ میزان دقت نتایج حاصل را بررسی کرد.



شکل ۵: اتاق شبیه‌سازی شده برای اعتبارسنجی.

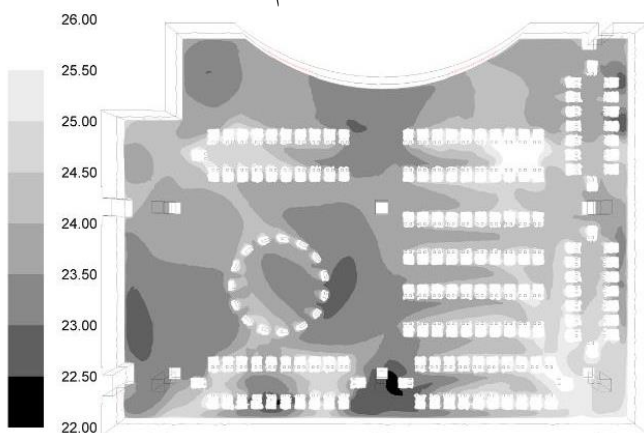
اختلاف دمای عمودی بین ناحیه‌ی قوزک پا و سر، زیاد نبوده و همواره کمتر از ۳ درجه سانتی‌گراد است.



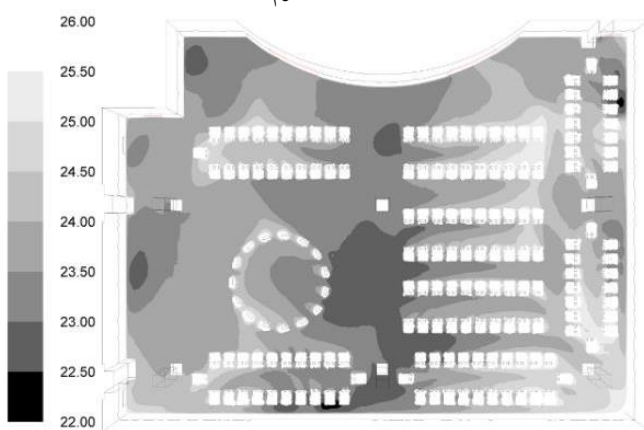
(حالت اول)



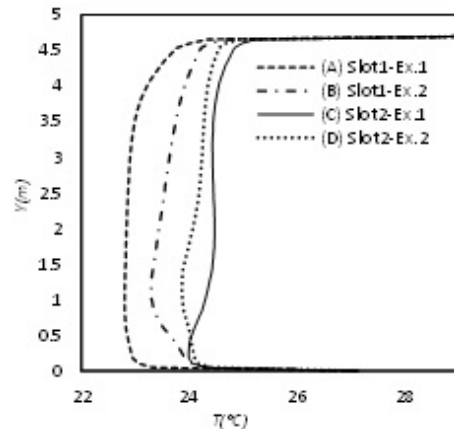
(حالت دوم)



(حالت سوم)



(حالت چهارم)



شکل ۷: توزیع دمای عمودی برای حالت‌های مختلف در  $z = 20$ ،  $x = 16$

همان‌گونه که در شکل ۷ نمایش داده شده است، در ناحیه‌ی مورد بررسی، توزیع دما برای حالت اول یکنواخت‌تر و میانگین دمایی پایین‌تر است. برای بررسی بهتر نیاز است توزیع دما در کل سطح فضای اشغال‌شده نیز گزارش داده شود.

با توجه وضعیت افراد در سالن، توزیع دما در ارتفاع ۶۰ سانتی‌متری از کف زمین (ناحیه‌ی حضور افراد) برای حالت‌های مختلف جانمایی دریچه‌های تهویه مطبوع در شکل ۸ نشان داده شده است.

با بررسی تصاویر، می‌توان نتیجه گرفت که در حالت اول و چهارم شرایط مناسب‌تری نسبت به سایر حالت‌ها حاکم است اما با توجه به پیچیدگی هندسه و توزیع هوا باید از معیار مناسب‌تری استفاده شود، از این رو با استفاده از شاخص حرارتی PMV به بررسی توزیع آسایش حرارتی پرداخته شده است، به منظور محاسبه‌ی توزیع آسایش حرارتی، با استفاده از روابط (۷) تا (۱۱)، کد UDF تهیه شده است. با دقت در شکل ۹ مشاهده می‌شود که در حالت دوم و سوم در ناحیه‌ی حضور افراد، نسبت به حالت اول و چهارم، احساس گرمای بیشتری پیش‌بینی شده لذا آسایش حرارتی در حالت اول و چهارم، دارای شرایط بهتری است.

همان‌طور که پیش‌از این شاخص درصد ناراضیاتی (PPD) معرفی شد، با استفاده از شاخص حرارتی PMV، می‌توان میزان ناراضیاتی افراد را در داخل فضا محاسبه کرد. در حقیقت فضای مورد بررسی یک فضای سه‌بعدی است و نمی‌توان به بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی در یک نقطه یا یک سطح دوبعدی بسنده کرد.

با توجه به این‌که شاخص PPD همواره عددی مثبت است، برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر به بررسی میانگین درصد ناراضیاتی پیش‌بینی شده حجمی در فضای سالن پرداخته شده است. از آنجاکه سالن دارای سقف بلندی بوده و افراد حاضر تنها قسمت پایینی فضا را اشغال کرده‌اند، متوسط درصد ناراضیاتی افراد علاوه بر کل فضای سالن برای فضای پایینی سالن (از کف تا ارتفاع ۲ متری) نیز برای حالت‌های مختلف جانمایی دریچه‌های تهویه مطبوع در جدول ۳ گزارش شده که کمترین مقدار PPD در حالت اول مشاهده شده است.

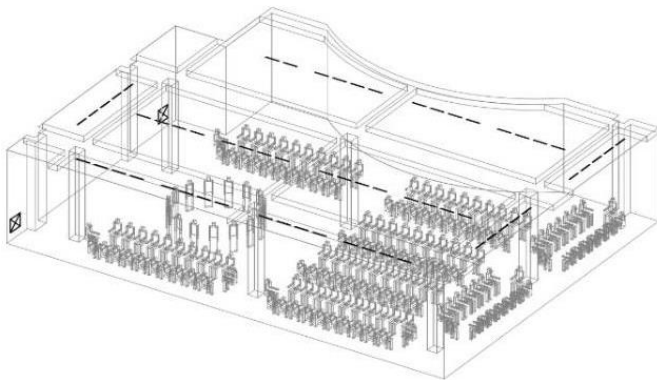
شکل ۸: توزیع دما برحسب درجه سانتی‌گراد در ناحیه‌ی حضور افراد برای حالت‌های مختلف.

**جدول ۳:** میانگین حجمی درصد ناراضایتی پیش‌بینی شده در حالت‌های مختلف.

وضعیت	متوسط در صد ناراضایتی پیش‌بینی شده (PPD) برای ناحیه حضور افراد	متوسط در صد ناراضایتی پیش‌بینی شده (PPD) برای کل فضا
حالت اول	۷/۳٪	۸/۳۵٪
حالت دوم	۷/۳۵٪	۸/۷۳٪
حالت سوم	۸/۴۵٪	۹/۶۶٪
حالت چهارم	۷/۵٪	۹/۰۳٪

## ۶ جمع‌بندی

با بررسی نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی و مقایسه‌ی درصد ناراضایتی پیش‌بینی‌شده، مشاهده شد که در صورت جانمایی دریچه‌های تهویه مطبوع در حالت اول که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، احساس آسایش بیشتری در فضا حاکم خواهد شد.



**شکل ۱۰:** چیدمان دریچه‌ها در حالت اول.

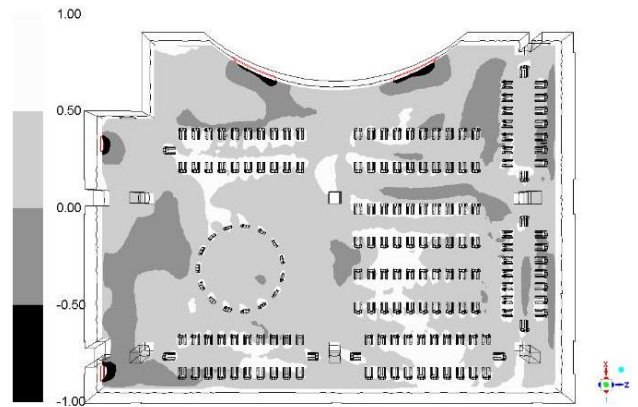
با توجه به چیدمان‌های مختلف ارائه‌شده در این پژوهش و دقت در نحوه‌ی قرارگیری دریچه‌های رفت و برگشت می‌توان گفت که جهت قرارگیری دریچه‌های اسلانی نسبت به دریچه‌های برگشت به‌طور کلی به دو صورت هستند: الف) حالتی که دریچه‌های برگشت در امتداد دریچه‌های اسلانی قرار گرفته‌اند (مانند حالت اول و چهارم)، ب) حالتی که دریچه‌های برگشت در جهت عمود بر امتداد نصب دریچه‌های اسلانی قرار گرفته‌اند (مانند حالت دوم و سوم).

با بررسی نتایج مشاهده می‌شود که، جهت قرارگیری دریچه‌های خطی نسبت به دریچه‌های خروجی بر توزیع دما و آسایش حرارتی تأثیرگذار است. به‌طور کلی با توجه به نتایجی که در جدول ۳ ارائه شده است، همان‌طور که حالت اول مناسب‌تر از حالت دوم بوده و حالت چهارم نیز شرایط بهتری نسبت به حالت سوم دارد، می‌توان گفت در صورتی که دریچه‌های خطی در امتداد بردار عمود بر سطح دریچه‌های خروجی قرار داشته باشند توزیع دما و آسایش حرارتی مناسب‌تری بر فضای موردنظر حاکم خواهد شد.

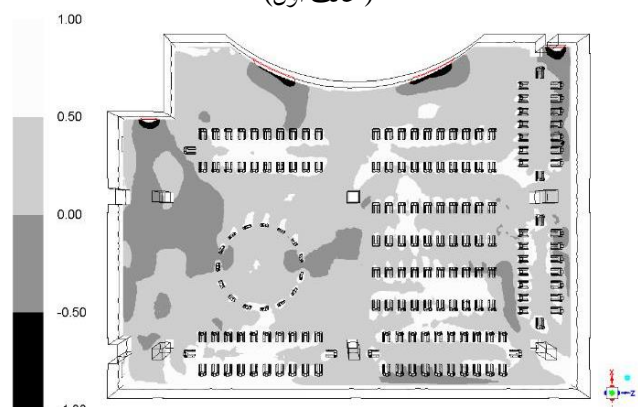
## ۷ علائم و اختصارات

$f_{cl}$ : نسبت پوشش در حالت با لباس به حالت بدون لباس

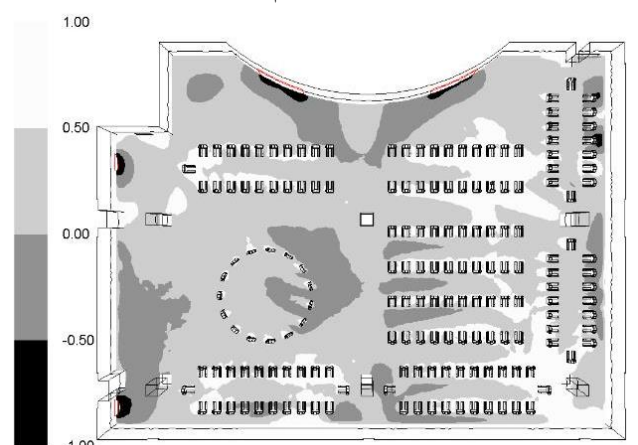
$H$ : آنتالپی کل سیال ( $j kg^{-1}$ )



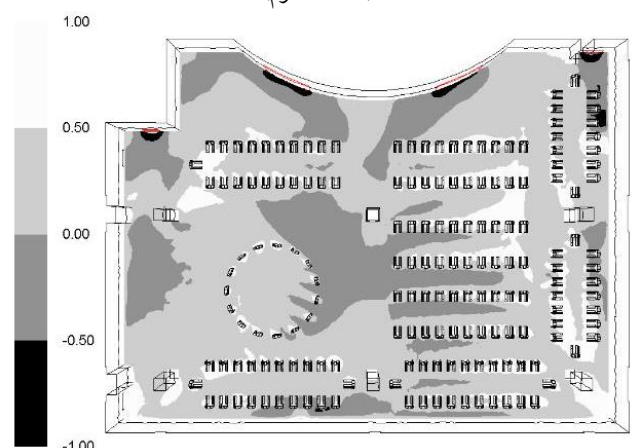
(حالت اول)



(حالت دوم)



(حالت سوم)



(حالت چهارم)

**شکل ۹:** آسایش حرارتی (PMV) در ناحیه‌ی حضور افراد برای حالت‌های مختلف.

- ternational Journal of Refrigeration*, 28(2):288–305, 2005.
- [3] Lin, Zhang, Chow, TT, Tsang, CF, Fong, KF, and Chan, LS. Cfd study on effect of the air supply location on the performance of the displacement ventilation system. *Building and environment*, 40(8):1051–1067, 2005.
- [4] Lam, Joseph C and Chan, Apple LS. Cfd analysis and energy simulation of a gymnasium. *Building and Environment*, 36(3):351–358, 2001.
- [5] Nada, SA, El-Batsh, HM, Elattar, HF, and Ali, NM. Cfd investigation of airflow pattern, temperature distribution and thermal comfort of ufad system for theater buildings applications. *Journal of Building Engineering*, 6:274–300, 2016.
- [6] Rahmati, Bahram, Heidarian, Ali, and Jadidi, Amir Mohammad. Optimizing the location of supply air diffuser relative to location of return diffuser in displacement ventilation system. in *Proceedings of The 25th International Conference on Mechanical Engineering*, pp. 2–4, Tehran, Iran, 2017. Association for Computing Machinery (in Persian).
- [7] Shan, Xin, Zhou, Jin, Chang, Victor W-C, and Yang, En-Hua. Comparing mixing and displacement ventilation in tutorial rooms: Students' thermal comfort, sick building syndromes, and short-term performance. *Building and Environment*, 102:128–137, 2016.
- [8] Zolfaghari, Seyed Alireza and Sekhavatmand, Bahman. The effect of air infiltration from window gaps on the performance of baseboard heating system and occupants' thermal comfort conditions. *Modares Mechanical Engineering*, 14(8):113–120, 2014 (in Persian).
- [9] Kwong, Qi Jie, Chen, Hon Fai, and Razak, Azli Abd. Computational simulation of indoor thermal environment in a tropical educational hall with displacement ventilation. *PERTANIKAJOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 25:77–88, 2017.
- [10] Zolfaghari, Seyed Alireza, Hassanzadeh, Hassan, Raeesi, Mohammad, and Taheri, Morteza. Cooling performance evaluation of overhead mixing and floor displacement ventilation systems inside a bus by using 65-nodes thermal comfort model. *Modares Mechanical Engineering*, 17(2):333–342, 2017 (in Persian).
- [11] Iso, En. 7730: 2005. *Ergonomics of the thermal environment-Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*, 2005.
- [12] EnergyPlus, UD. Energyplus engineering reference: the reference to energyplus calculations, 2010.
- [13] Loomans, MGLC. The measurement and simulation of indoor air flow (phd thesis). *Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands*, 1998.
- [14] Institute of Iran, Standards and Research, Industrial. Determination of thermal comfort pmv and ppd indices and local thermal comfort criteria., 2012 (in Persian).
- $g$ : شتاب گرانشی زمین ( $ms^{-2}$ )
- $h_c$ : ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ( $W m^{-2} K^{-1}$ )
- $I_{cl}$ : مقاومت حرارتی لباس ( $m^2 KW^{-1}$ )
- $k$ : ضریب انتقال حرارت هدایتی ( $W m^{-1} K^{-1}$ )
- $M$ : نرخ متابولیک ( $W m^{-2}$ )
- $M_w$ : جرم مولکولی سیال ( $kg mol^{-1}$ )
- $P$ : فشار ( $Pa$ )
- $P_a$ : فشار نسبی بخار آب ( $Pa$ )
- $PMV$ : شاخص بی‌بعد آسایش حرارتی
- $PPD$ : شاخص درصد نارضایتی حرارتی افراد
- $R$ : ثابت جهانی گازها ( $j K^{-1} mol^{-1}$ )
- $t$ : زمان ( $sec$ )
- $T$ : دما ( $K$ )
- $T_{air}$ : دمای هوا ( $^{\circ}C$ )
- $T_{cl}$ : دمای سطح لباس ( $^{\circ}C$ )
- $\bar{T}_r$ : میانگین دمای متوسط تابشی ( $^{\circ}C$ )
- $u$ : سرعت سیال ( $ms^{-1}$ )
- $v$ : سرعت هوا ( $ms^{-1}$ )
- $W$ : کار خارجی ( $W$ )
- علائم یونانی**
- $\mu$ : لزجت دینامیکی ( $kgm^{-1}s^{-1}$ )
- $\rho$ : چگالی ( $kgm^{-3}$ )
- $\bar{\tau}$ : تنش برشی سیال ( $Pa$ )
- زیرنویس‌ها**
- air: هوا
- operating: عملکرد
- turb: آشفتگی

## ۸. قدردانی

با توجه به اینکه انجام این طرح از محل اعتبارات پژوهشی دانشگاه فنی و حرفه‌ای تامین گردیده است از دانشگاه مذکور بواسطه حمایت از این طرح قدردانی می‌گردد.

## مراجع

- [1] Lin, Zhang, Lee, Chun Kwong, Fong, Square, Chow, Tin Tai, Yao, Ting, and Chan, ALS. Comparison of annual energy performances with different ventilation methods for cooling. *Energy and Buildings*, 43(1):130–136, 2011.
- [2] Lin, Zhang, Chow, TT, Fong, KF, Tsang, CF, and Wang, Qiuwang. Comparison of performances of displacement and mixing ventilations. part ii: indoor air quality. *In-*