



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Type of Article (e.g. Research Article)

Numerical investigation of thermal comfort and air quality for a single-sided naturally ventilated office room

PAPER INFO

Paper history:

Received:

Revised:

Accepted:

Keywords:

Single-Sided
Natural Ventilation,
Thermal Comfort,
Air Conditioning,
Energy In The Building.

ABSTRACT

The aim of this research is to investigate the effect of different parameters on thermal comfort of occupants in an office room equipped with single-sided natural ventilation. A three dimensional numerical model was implemented to predict temperature and velocity distribution in the space using Ansys Airpak software. Then, the temperature and velocity distribution obtained from the numerical solution is coupled with the standard thermal comfort indices (PMV, PPD) and local discomfort indices (DR and PD) in order to evaluate the thermal sensation of occupants. The results shows that the outside temperature between 18°C and 20 °C is the best temperature range in establishing comfort conditions for all occupants and the PMV value is between -0.4 and 0.6, which is consistent with the determined criteria by ISO 7730. As the temperature increases, the mean age of air increases, but thermal discomfort due to draught (DR) decreases. By increasing the wind velocity and dimensions of the openings, the values of PMV and PPD decrease and become closer to the permissible range of thermal comfort. The mean age of air decreases with the increase of the wind velocity and the dimensions of the openings and reaches its lowest value at a speed of 7 m/s, but DR remains constant with the change of wind velocity. According to the results, installing two openings has a better performance in establishing thermal comfort conditions than installing a single opening.

DOI: <https://doi.org/>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.
E-mail address:

How to cite this article:

نوع مقاله (به عنوان مثال مقاله پژوهشی)

بررسی عددی آسایش حرارتی و کیفیت هوا در یک اتاق اداری مجهز به تهویه طبیعی یک طرفه

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله:	در این پژوهش هدف بررسی تاثیر پارامترهای مختلف روی آسایش حرارتی افراد در یک اتاق اداری خنک‌شونده با تهویه طبیعی یک طرفه است. برای بررسی پتانسیل تهویه طبیعی یک طرفه در برقراری آسایش حرارتی، یک مدل عددی سه بعدی برای پیش‌بینی توزیع دما و سرعت در فضا با استفاده از نرم‌افزار Ansys Airpak ایجاد شده است. سپس توزیع دما و سرعت بدست آمده از حل عددی با شاخص‌های استاندارد آسایش حرارتی (PPD، PMV) و شاخص‌های ارزیابی نارضایتی حرارتی موضعی (DR و PD) به منظور ارزیابی احساس حرارتی ساکنین کوپل می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که دمای محیط بیرون بین 18°C الی 20°C بهترین بازه دمایی در برقراری شرایط آسایش برای تمامی افراد درون اتاق است و مقدار PMV در این بازه دمایی برای هر سه فرد حاضر در اتاق بین -0.4 و 0.6 است که بر اساس استاندارد ISO 7730 کاملاً در محدوده مجاز آسایش حرارتی قرار دارد. با افزایش دما، میانگین طول عمر هوا افزایش اما مقدار نارضایتی ناشی از کوران (DR) کاهش پیدا می‌کند. با افزایش سرعت باد و افزایش ابعاد بازشوها، شاخص احساس حرارتی میانگین افراد (PMV) و شاخص درصد نارضایتی افراد (PPD) برای هر سه فرد کاهش می‌یابد و به محدوده مجاز آسایش حرارتی نزدیک‌تر می‌شود. میانگین طول عمر هوا با افزایش سرعت باد و ابعاد بازشوها کاهش می‌یابد و در سرعت ۷ متر بر ثانیه به کمترین مقدار خود می‌رسد. طبق نتایج بدست‌آمده برای تعداد بازشوها، نصب دو بازشو عملکرد بهتری در برقراری شرایط آسایش حرارتی نسبت به نصب یک بازشو به صورتی تکی دارد.
بازنگری مقاله:	
پذیرش مقاله:	
واژگان کلیدی:	
تهویه طبیعی یک طرفه،	
آسایش حرارتی،	
تهویه مطبوع،	
انرژی در ساختمان.	

DOI: <https://doi.org/>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱-مقدمه

در ساختمان‌ها به اجرای سیستم‌های HVAC اختصاص می‌یابد [۱]. در سال‌های اخیر، با توجه به چنین میزان مصرف انرژی، مکانیسم‌های کارآمد انرژی مانند راهبردهای گرمایش و سرمایش غیرفعال در ساختمان‌های مسکونی در اولویت قرار گرفته‌اند. تهویه طبیعی یکی از مکانیسم‌های خنک‌کننده غیرفعال با مصرف انرژی بهینه است که می‌تواند به طور موثر هوای تازه و شرایط حرارتی مطلوب داخلی را فراهم کند [۲]. با توجه به هزینه‌های عملیاتی کم،

رضایت حرارتی ساکنان نقش مهمی در بهره‌وری آن‌ها در فضاهای اداری دارد. ارزیابی آسایش حرارتی فرآیندی پیچیده است که تحت تاثیر پارامترهای فیزیکی محیطی و عوامل فیزیولوژیکی و روانی انسان قرار دارد. شرایط آسایش حرارتی از طریق استفاده از سیستم‌های HVAC (گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع) حاصل می‌شود. با این حال، در کشورهای توسعه یافته، بیش از دو سوم انرژی مصرف شده

انرژی و آلودگی‌هایی که برای محیط‌زیست، معایب دیگری نیز می‌توان در نظر گرفت. از جمله اگر در هنگام نصب سیستم تهویه مکانیکی دقت کافی نشود، هزینه‌های تعمیر و نگهداری آن بسیار گران می‌شود و یا بر اثر استهلاک، ممکن است قطعات سیستم نیاز به تعمیر یا تعویض داشته باشند. اما در صورت استفاده از تهویه طبیعی نگرانی‌هایی از این قبیل وجود نخواهد داشت و به همین سبب تاثیر تهویه طبیعی در طراحی ساختمان‌های مدرن، بیش از پیش مورد بحث قرار گرفته است [۴].

تهویه طبیعی با توجه به شرایط قرارگیری بازشوها در ساختمان به چهار دسته تقسیم‌بندی می‌شود: تهویه یک طرفه، تهویه عبوری، تهویه با استفاده از اثر دودکشی، تهویه ترکیبی. تهویه عبوری بازدهی بیشتری نسبت به تهویه یک طرفه دارد اما محدودیت‌هایی برای تهویه عبوری وجود دارد که به راحتی نمی‌توان از آن استفاده کرد. برای مثال مکان و جهت قرارگیری بازشوها در ساختمان، با توجه به قوانین شهرسازی که فقط یک سمت خانه روبه محیط بیرون است، مشکلاتی برای طراحان و مهندسان جهت اجرای تهویه طبیعی عبوری ایجاد می‌کند. از این رو، استفاده از تهویه عبوری اغلب در ساختمان‌های شهری محدود می‌شود. در نتیجه، در ساختمان‌های شهری بدون طراحی‌های داخلی که تهویه عبوری را فعال می‌کنند، تهویه طبیعی یک طرفه به یک انتخاب عملی برای تهویه طبیعی تبدیل می‌شود [۵]. در صورتی که یک یا چندین بازشو فقط در یک سمت از ساختمان وجود داشته باشد، تهویه طبیعی از نوع یک طرفه خواهد بود. در تهویه یک طرفه ورود هوای بیرون به داخل ساختمان و خروج از آن فقط از طریق یک بازشو یا بازشوهایی که فقط در یک دیوار وجود دارند، صورت می‌پذیرد [۶]. در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی به صورت عددی و تجربی در زمینه تهویه طبیعی انجام شده است که اکثر مطالعات مربوط به نرخ تهویه، بررسی دقت مدل‌های تحلیلی ساده، توزیع دما، سرعت هوا و انواع بازشو می‌باشد.

مصرف انرژی پایین، کیفیت هوای داخل ساختمان و تامین آسایش حرارتی ساکنین، تهویه طبیعی به عنوان جایگزینی چشمگیر برای غلبه بر مشکلات مربوط به سیستم های تهویه مکانیکی پیشنهاد شده است.

محدودیت منابع انرژی و تخریب محیط‌زیست ناشی از مصرف بیش از اندازه منابع انرژی دو مشکل اصلی به شمار می‌آیند. آگاهی از این مشکل افراد را به سمت بهینه‌سازی مصرف انرژی و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر همچون باد سوق داده است. هر چند منابع انرژی تجدیدناپذیر کفایت دهه‌های پیش رو را می‌کنند، اما افزایش تقاضا پیامدهای محیطی قابل توجهی در بر خواهد داشت. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و حفظ سلامت محیط‌زیست، وظیفه‌ی همه در قبال نسل آینده است و در صورت رعایت نکردن آن مشکلاتی از قبیل تغییر شرایط آب‌وهوایی، گرم شدن زمین، پارگی لایه اوزون و بارش باران‌های اسیدی مشاهده خواهد شد [۳].

ساختمان‌ها به عنوان عمده‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی شناخته می‌شوند. قسمت اعظم انرژی مصرفی در ساختمان‌ها مربوط به گرمایش و سیستم تهویه مطبوع است. چنین سطوح بالای مصرف انرژی باعث شده است که راهکارهای بهره‌وری انرژی در اولویت اول مقررات ساختمانی قرار داده شوند. لذا بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان و آسایش حرارتی افراد دو مورد مهم هستند که به‌طور همزمان باید مورد توجه قرار گیرند. طراحی مناسب ساختمان و ایجاد محیطی سالم و مطبوع برای زندگی از دیرباز موضوع مهمی برای بشر بوده است. تهویه طبیعی به دلیل مزایای برتری که نسبت به سیستم‌های تهویه مکانیکی از نظر انرژی مصرفی، اقتصادی و زیست محیطی دارد، توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۲]. امروزه هر فرد عادی ساعات بسیاری را در فضای داخلی سپری می‌کند. بنابراین تهویه محیط داخل ساختمان برای داشتن هوای سالم و تازه، امر بسیار مهمی است. تعویض هوا در ساختمان به دو صورت تهویه طبیعی و مکانیکی انجام می‌پذیرد. برای سیستم تهویه مکانیکی علاوه بر مصرف

تهویه طبیعی یک طرفه، حداکثر اختلاف نسبی بین ACH روستایی و حومه‌شهری ساختمان منفرد ۱۵٪ است، در حالی که این اختلاف ممکن است برای ساختمان واقع در یک محله به ۲۰٪ برسد.

لی یو و همکاران [۹] با استفاده از آزمایشات تجربی و دینامیک سیالات محاسباتی (CFD³) بازده تبادل هوا و نرخ تعویض هوا در تهویه طبیعی یک طرفه را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تهویه طبیعی یک طرفه از طریق باز کردن پنجره منجر به تبادل حرارت و جرم بین هوای داخل و خارج شده که باعث تلفات سرمایشی اضافی می‌شود، اما در حذف آلاینده‌های داخلی به طور کلی مؤثر است. بازده تبادل هوا تحت تأثیر عواملی مانند موقعیت قرارگیری پنجره، درصد باز شدن پنجره و حالت باز شدن پنجره قرار دارد. جیانگ و همکاران [۱۰] با استفاده از ترکیبی از آزمایش تونل باد و تحلیل عددی، تأثیر پارتیشن‌های داخلی بر تهویه طبیعی یک طرفه را بررسی کردند. آن‌ها یک اتاق دارای دو بازشو را به‌گونه‌ای توسط پارتیشن داخلی به دو قسمت مساوی تقسیم کردند که در هر قسمت یک بازشو قرار داشته باشد. بازده تهویه در محدوده ۰/۷۴ و ۰/۷۹ بدست آمد که نشان می‌دهد کمتر از ۸۰٪ از نرخ جریان هوا در حذف آلاینده‌ها نقش دارد.

ویساگاول و سرینیواسان [۱۱] با استفاده از روش عددی، سرعت باد را در صورت تغییر ابعاد بازشو برای تهویه عبوری و تهویه یک طرفه، بررسی کردند. آن‌ها با فرض جریان تراکم‌ناپذیر و مدل توربولانسی k-ε سرعت باد در ارتفاعات مختلف را محاسبه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تهویه عبوری روش موثری است اما به دلیل محدودیت‌های شهرسازی در اغلب موارد ناچار به استفاده از تهویه یک طرفه است. در صورتی که تهویه یک طرفه ترجیح داده شود، بیشترین ابعاد مجاز بازشو باید در نظر گرفته شود و همچنین حالتی که بازشو مقابل جریان باد قرار دارد بهتر از

لارسن و هایسلبرگ [۴] آزمایش‌های خود را درون تونل باد با ابعاد واقعی انجام دادند. هدف آن‌ها یافتن پارامترهای تاثیرگذار در تعیین نرخ تهویه در تهویه یک طرفه بود. در حین انجام آزمایش، مشاهده کردند که نیرو غالب در تهویه طبیعی یک طرفه، بین نیروی باد و نیروی شناوری بسته به جهت باد ممکن است تغییر کند. ابعاد ساختمان ۵/۵۶ × ۵/۵۶ متر بود و سرعت باد بین ۱ الی ۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده بود. نتایج آن‌ها نشان داد که نرخ تهویه تابعی از جهت باد است و جهت باد می‌تواند نیروی غالب در تهویه طبیعی یک طرفه را مشخص کند. فن و همکاران [۷] آزمایش‌های خود را برای تهویه طبیعی یک طرفه و عبوری به صورت تجربی در شهر لندن انجام دادند. هدف آن‌ها بررسی دقت مدل‌های تحلیلی ساده و مقایسه نتایج بدست‌آمده برای نرخ تهویه از هر دو روش ذکر شده بود. آن‌ها از تکنیک گاز ردیاب برای بدست‌آوردن نرخ تهویه و از دماسنج‌های مختلف برای تعیین دمای داخل ساختمان استفاده کردند. دمای هوای بیرون، سرعت و جهت باد را نیز از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی استعلام کردند. علاوه بر فضای محاسباتی اصلی، یک تونل باد در مقیاس ۱/۲۰۰ برای محاسبه فشار در بیرون و داخل ساختمان تعبیه شده بود. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل‌های تحلیلی ساده پیش‌بینی بهتری از نرخ تهویه در تهویه عبوری نسبت به تهویه یک طرفه ارائه می‌دهند. میشه و همکاران [۸] با استفاده از روش تجربی تهویه طبیعی ناشی از باد برای یک ساختمان مکعبی شکل را بررسی کردند. هدف آن‌ها تمرکز بر تأثیر ویژگی‌های لایه مرزی اتمسفری (ABL¹)، یعنی شرایط باد روستایی و حومه‌شهری، بر تهویه طبیعی بود که آن را برای یک ساختمان منفرد و یک ساختمان احاطه شده توسط ساختمان‌های دیگر مورد بررسی قرار دادند. پارامتر مورد استفاده برای کمی‌سازی تهویه طبیعی در ساختمان، نرخ تعویض هوا (ACH²) بود. نتایج آن‌ها نشان داد که برای

³ Computational Fluid Dynamics

¹ Atmospheric Boundary Layer

² Air Change per Hour

اداری دارای تهویه طبیعی یک طرفه را بررسی کردند. سرعت و تعداد بازشوهای متفاوتی در نظر گرفته شد. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که کیفیت هوای اتاق و میزان آسایش حرارتی ساکنین با افزایش ارتفاع ساختمان بیشتر می‌شود. با کاهش تعداد بازشوها از سه به یک، مقدار پارامتر ACH از ۴ تا ۱۱ درصد کاهش یافت. ایزدیار و همکاران [۱۶] به روش عددی و با استفاده از شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی سه‌بعدی و حالت پایا با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Fluent اثرات عمق بالکن و مقیاس باز شدن درب را بر عملکرد تهویه طبیعی یک طرفه و آسایش حرارتی اتاق نشیمن متصل به آن بررسی کردند. ۵ دهانه مختلف و ۹ حالت برای عمق به عنوان حالت‌های مختلف برای شبیه‌سازی تعریف کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که اندازه دهانه و عمق بالکن بر توزیع هوای داخلی IAD¹، میانگین سرعت هوای داخلی IAV² و دما تأثیر می‌گذارند، در حالی که این اثرات در حالت‌های تعریف‌شده یکسان نیستند و اندازه دهانه تأثیر قابل توجه‌تری دارد.

در پژوهش حاضر ابتدا مدل مد نظر به روش عددی و سه بعدی در نرم‌افزار انسیس ایرپک³ برای بدست آوردن توزیع دما، سرعت هوا و الگوی جریان هوا در فضای محاسباتی، شبیه‌سازی می‌شود. سپس شاخص‌های آسایش حرارتی موضعی به فاصله ۰/۱ متر از هر فرد و در سه ارتفاع ۰/۱، ۰/۶ و ۱/۱ متری از سطح زمین که به ترتیب ناحیه مچ پا، ناحیه شکم و ناحیه قفسه سینه افراد است، محاسبه می‌شوند. در ادامه تأثیر دما، سرعت باد، ابعاد بازشو و مکان قرارگیری بازشوها بر روی شاخص‌های آسایش حرارتی موضعی مورد بررسی قرار می‌گیرند. همچنین به منظور بررسی کیفیت هوای داخل اتاق، پارامتر میانگین طول عمر هوا در نزدیکی هر فرد و در ارتفاع‌های یاد شده محاسبه می‌شود تا علاوه بر بررسی شرایط آسایش حرارتی، میزان

حالتی است که بازشو در دیوار مقابل جهت باد قرار دارد. وینسنت و همکاران [۱۲] به روش عددی و با استفاده از مدل توربولانسی $k-\epsilon$ RNG، تهویه طبیعی در یک ساختمان را برای بدست آوردن الگوی جریان، کوران و پراکندگی آلاینده‌ها بررسی کردند. آن‌ها سه حالت برای تهویه که به ترتیب تهویه یک طرفه، تهویه عبوری و تهویه یک طرفه با دو بازشو را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد برای کوران، تهویه یک طرفه بهترین عملکرد را داشته و سرعت باد در تهویه عبوری مخصوصاً در ناحیه سر و گردن افراد بیشتر از حد مجاز بدست آمد. برای پراکندگی آلاینده‌ها نیز تهویه عبوری عملکرد بهتری نسبت به تهویه یک طرفه داشته است. شیائو-یوما و همکاران [۱۳] با شبیه‌سازی عددی بر روی یک اتاق ساده به ابعاد $5 \times 4 \times 3$ متر، ویژگی‌های تهویه طبیعی ناشی از نیروی باد را بررسی کردند. در مطالعه آن‌ها، سه روش متفاوت برای تهویه طبیعی در نظر گرفته شد: حالت اول تهویه یک طرفه، وقتی پنجره بر روی دیواری که در مقابل جریان باد است، قرار گرفته باشد. حالت دوم تهویه یک طرفه، وقتی پنجره بر روی دیوار پشتی که جریان باد به آن برخورد نمی‌کند، قرار گرفته باشد. حالت سوم تهویه عبوری. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که تهویه عبوری بهترین عملکرد را بین این سه حالت داشته و همچنین مکان پنجره بر روی دیوار پشتی بهتر از حالتی است که مقابل جریان هوا قرار داشت. آی و مک [۱۴] به صورت عددی میزان نرخ تهویه طبیعی یک طرفه را در یک ساختمان پنج طبقه بررسی کردند. در هر طبقه یک بازشو یا در مقابل جریان باد و یا بر روی دیوار پشتی در نظر گرفته شد. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد بازشوهایی که در مقابل جریان باد قرار دارند، نرخ تهویه در آن‌ها بالاتر از بازشوهایی است که در دیوار مخالف جریان باد قرار دارند. هوران و فین [۱۵] به صورت عددی تأثیر جریان باد و نرخ هوادهی را در یک ساختمان دوطبقه‌ای

³ Ansys Airpak

¹ Indoor Air Distribution

² mean Indoor Air Velocity

تعویض و کیفیت هوا نیز برای افراد درون اتاق مجهز به تهویه طبیعی یک طرفه محاسبه شود.

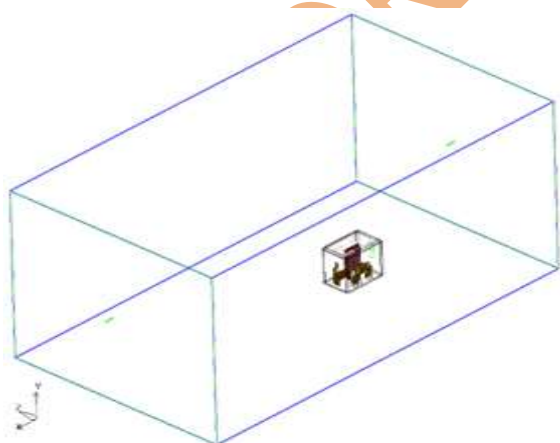
۲- روش تحقیق

۲-۱- هندسه‌ی فضای مورد مطالعه

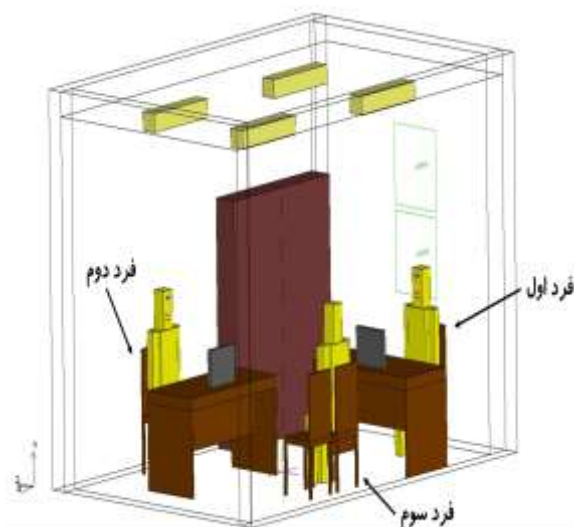
در پژوهش حاضر از نرم‌افزار ایرپک انسیس جهت شبیه‌سازی جریان سیال، انتقال حرارت و تحلیل آسایش حرارتی افراد استفاده شده است. اتاق اساتید دانشگاه محقق اردبیلی که در بیشتر آن‌ها می‌توان از تهویه طبیعی یک طرفه استفاده کرد، به عنوان اتاق اداری در نرم‌افزار ایرپک شبیه‌سازی شده است. ابعاد اتاق $4/5$ متر طول $\times$ 3 متر عرض $\times$ 3 متر ارتفاع است. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود دو بازشو که بر روی یکی از دیوارهای اتاق با ابعاد $0/75$ متر $\times$ $0/65$ متر به صورت عمودی و با فاصله $0/05$ متر از هم در نظر گرفته شده است. در فضای مورد مطالعه سه شخص در حالت نشسته که دو نفر از آن‌ها پشت میز و در حال کار با رایانه هستند، در نظر گرفته شده است. قد و وزن هر یک از افراد به ترتیب 175 سانتی متر و 64 کیلوگرم فرض شده است. میزان متابولیک و عایق لباس هر فرد به ترتیب $1/2$ met و $0/7$ clo در نظر گرفته شده است [۱۷]. چهار لامپ سقفی برای روشنایی اتاق با ابعاد $0/2$ متر $\times$ $0/15$ متر $\times$ 1 متر و توان حرارتی 181 وات برای هر کدام و دو رایانه با توان حرارتی 190 وات و دو قفسه کتاب بدون هیچ بار حرارتی در نظر گرفته شده است.

۲-۲- شرایط مرزی

فضای محاسباتی مورد مطالعه چندین برابر ارتفاع اتاق نمونه در نظر گرفته شده است تا از تاثیر مرزها و دیوارها در حل عددی جلوگیری شود و همچنین گردابه‌ها و جریان‌های چرخشی پشت فضای اتاق نمونه به صورت کامل تشکیل شوند. بدین منظور با توجه به شکل (۲) ابعاد فضای محاسباتی 4 برابر ارتفاع اتاق از طرفین، 5 برابر ارتفاع اتاق از سقف، 4 برابر ارتفاع اتاق در جهت ورودی باد و 10 برابر ارتفاع اتاق از قسمت خروجی جریان باد در نظر گرفته شده است. بر روی دیوارها نیز شرط عدم لغزش فرض شده و سرعت سیال صفر در نظر گرفته شده است. دیوارهای اتاق از جنس آجر و ضخامت 20 سانتی متر و تمامی دیوارها بجز دیواری که بازشوها بر روی آن قرار داشتند، عایق در نظر گرفته شدند. همچنین ضریب هدایت حرارتی دیواری که بازشوها بر روی آن قرار دارند $0/7$ W/(m-K) در نظر گرفته شده است. در قسمت ورودی جریان باد سرعت‌های مختلف بین 1 الی 7 متر بر ثانیه، دماهای مختلف بین 18 الی 26 درجه سلسیوس و رطوبت نسبی 50 درصد در نظر گرفته شده است. برای قسمت خروجی جریان باد نیز فشار ثابت فرض شده است.



شکل ۲- فضای مورد مطالعه



شکل ۱- نمای ایزومتریک از اتاق نمونه

۲-۳- معادلات حاکم

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (۶)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (۷)$$

که در معادلات بالا G_k نشان‌دهنده تولید انرژی جنبشی آشفته ناشی از گرادیان‌های میانگین سرعت و G_b نشان‌دهنده تولید انرژی جنبشی آشفته ناشی از شنواری است. σ_k و σ_ε به ترتیب اعداد پراشتل آشفته برای k و ε هستند. $C_{1\varepsilon}$ ، $C_{2\varepsilon}$ و $C_{3\varepsilon}$ ثابت هستند [۱۸]. ویسکوزیته آشفته μ_t با استفاده از k و ε به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (۸)$$

مقادیر ثابت‌های مدل آشفستگی در جدول ۱ نشان داده شده است [۱۸].

جدول ۱- ثابت‌های مدل آشفستگی [۱۸].	
مقدار	ثابت
$C_{1\varepsilon}$	۱/۴
$C_{2\varepsilon}$	۱/۹۲
C_μ	۰/۰۹
σ_k	۱
σ_ε	۱/۳
$C_{3\varepsilon}$	$\tanh \left \frac{v}{u} \right $

۲-۳-۱- مدل انتقال حرارت تابشی:

معادلات حاکم برای بقای جرم، مومنتوم، انرژی و گونه در مختصات کارتزین به ترتیب در روابط زیر آورده شده است. معادله بقای جرم:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (۱)$$

که u سرعت سیال، ρ چگالی سیال و t زمان است [۱۸]. معادله بقای مومنتوم:

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \mu_t \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + g_i \beta (T - T_0) \quad (۲)$$

که P فشار استاتیکی، μ ویسکوزیته دینامیکی سیال، μ_t ویسکوزیته دینامیکی آشفته سیال، g شتاب سیال و β نشان‌دهنده ضریب انبساط حرارتی است [۱۸]. معادله بقای انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i (\rho E + P)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_h \quad (۳)$$

که در آن E انرژی کل، S_h منبع حرارتی و k_{eff} رسانایی موثر است [۱۸].

$$k_{eff} = k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \quad (۴)$$

که در آن Pr_t عدد پراشتل آشفته برای انرژی و c_p ظرفیت گرمایی است [۱۸]. معادله انتقال گونه:

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j Y_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((D + D_t) \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \right) + S \quad (۵)$$

که Y_i غلظت گونه i ام را نشان داده، D ضریب انتشار باینری، D_t ضریب انتشار باینری آشفته و S ترم منبع گونه شیمیایی است [۱۸].

مدل آشفته دو معادله‌ای ($k - \varepsilon$ RNG):

برای رسیدن به نتایج دقیق در مسائل عددی ایجاد یک مش‌بندی مناسب ضروریست. بدین منظور پس از شبیه‌سازی فضای اتاق در نرم افزار ایرپک، تعداد ۱۷۷۵۴۰۹ گره از نوع شبکه‌بندی شش وجهی و بی‌سازمان در نظر گرفته شده است. معیار همگرایی نیز برای معادلات پیوستگی، مومنتوم (مولفه‌های سرعت در جهت‌های x ، y و z) و همچنین معادله انرژی (دما) مقدار 10^{-6} در نظر گرفته شده است. همچنین به‌منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر اطراف اشیایی که تولید حرارت دارند مانند افراد، لامپ‌ها و رایانه و نیز اطراف بازشوها شبکه‌بندی ریزتری نسبت به سایر نقاط در نظر گرفته شده است. شکل (۳) مش‌بندی را در سه صفحه متفاوت را نشان می‌دهد.

۲-۵- آسایش حرارتی

تأمین و حفظ آسایش حرارتی محیط داخلی که از مهم‌ترین اهداف سیستم‌های تهویه هوا است، برای بهبود سلامت، ایمنی و افزایش کارایی افراد ضروری می‌باشد. مطابق با استاندارد اشری [۱۷] آسایش حرارتی حالتی ذهنی از انسان است که در آن، فرد از شرایط حرارتی محیط ابراز رضایت می‌کند. در این پژوهش برای ارزیابی آسایش حرارتی، از شاخص‌های استاندارد آسایش حرارتی یعنی PMV^2 ، PPD^3 و همچنین شاخص‌های نارضایتی حرارتی موضعی استفاده شده است.

در پژوهش حاضر از مدل تابشی سطح به سطح^۱ استفاده شده است. در این روش، مقدار انرژی وارد شده روی یک سطح از سطوح دیگر تابع مستقیمی از ضریب دید F_{jk} سطح به سطح است. ضریب دید F_{jk} کسری از انرژی خروجی از سطح j است که روی سطح k برخورد می‌کند. شار انرژی دریافت شده از سایر سطوح $q_{in,k}$ را می‌توان برحسب شار انرژی که از تمام سطوح دیگر خارج می‌شود به صورت زیر بیان کرد: [۱۸]

$$A_k q_{in,k} = \sum_{j=1}^N A_j q_{out,j} F_{jk} \quad (9)$$

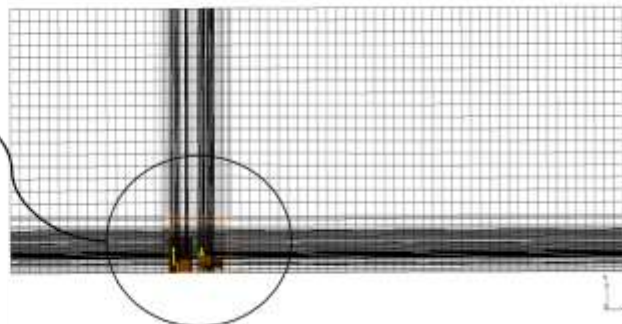
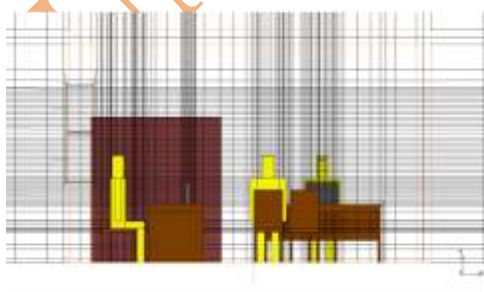
که A_k مساحت سطح k ، F_{jk} ضریب دید بین سطح k و سطح j و N سطح اطراف است.

ضریب دید بین دو سطح محدود از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$F_{jk} = \frac{1}{A_j} \int_{A_j} \int_{A_k} \frac{\cos \theta_j \cos \theta_k}{\pi r^2} \delta_{jk} dA_j dA_k \quad (10)$$

δ_{jk} به وسیله میدان دید dA_k نسبت به dA_j تعیین می‌شود. اگر dA_k برای dA_j قابل مشاهده باشد، در این صورت $\delta_{jk} = 1$ است در غیر این صورت $\delta_{jk} = 0$ در نظر گرفته می‌شود.

۲-۴- تولید شبکه



³ Predicted Percentage of Dissatisfied

¹ Surface To Surface

² Predicted Mean Vote

شکل ۳- مش بندی فضای مورد مطالعه

+۳	خیلی گرم
+۲	گرم
+۱	کمی گرم
۰	خنثی
-۱	کمی سرد
-۲	سرد
-۳	خیلی سرد

شاخص PMV، احساس حرارتی گروه بزرگی از اشخاص را که تحت شرایط محیطی یکسان قرار گرفته‌اند، پیش‌بینی می‌کند. برای پیش‌بینی درصد نارضایتی حرارتی فرد، باید از شاخص PPD استفاده کرد. این شاخص تعداد افرادی را که احساس سرما یا گرمای شدید می‌کنند را محاسبه می‌نماید. لذا این شاخص تعداد افرادی را که در بین گروه بزرگی از اشخاص احساس نارضایتی دارند، تعیین می‌کند. در شرایطی که مقدار PMV برابر با صفر است (احساس حرارتی متوسط افراد خنثی است)، باز هم انتظار می‌رود که حدود ۵٪ از افراد احساس نارضایتی کنند. این موضوع به دلیل تفاوت‌های فردی در ترجیحات حرارتی، متابولیسم و سایر عوامل فیزیولوژیکی است. ارتباط بین PMV و PPD توسط رابطه‌ای زیر بیان شده است [۳].

$$PPD = 100 - 95 \times \exp((-0.03353 \times PMV^4) - (0.2179 \times PMV^2)) \quad (11)$$

گاهی ممکن است در حالت کلی افراد دارای احساس آسایش حرارتی مطلوب باشند ولی در قسمت‌هایی از بدن خود و یا چند عضو بدن احساس سرما یا گرمای ناخواسته داشته باشند. این نارضایتی حرارتی موضعی می‌تواند به صورت‌های کوران حرارتی و اختلاف دمای هوا در جهت عمودی پدیدار شود [۳].

با توجه به غیر یک‌نواخت بودن محیط‌های مجهز به تهویه طبیعی و با توجه به استاندارد ایزو ۷۷۲۶ در این پژوهش برای بررسی شرایط آسایش حرارتی، شاخص‌های ارزیابی آسایش حرارتی و پارامترهای مربوط به نارضایتی حرارتی موضعی در سه ارتفاع ۰/۱، ۰/۶ و ۱/۱ متری از سطح زمین و به فاصله ۰/۱ متری از بدن افراد در حالت نشسته محاسبه شده است [۱۹]. پارامترهای تاثیرگذار در آسایش حرارتی افراد، شش عامل فردی و محیطی را شامل می‌شوند. عوامل فردی نرخ متابولیسم بدن افراد و نوع و میزان پوشش افراد هستند و عوامل محیطی دمای هوا، سرعت جریان هوا، دمای تابشی و رطوبت نسبی می‌باشند [۱۷].

معادله آسایش حاصل از آزمایشات فنگر باعث به وجود آمدن مدل PMV-PPD شد که امروزه به‌طور گسترده‌ای برای طراحی و ارزیابی آسایش حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۰]. در مدل فنگر دو شاخص اصلی تعریف می‌شود، یکی از آن‌ها برآورد میانگین آراء افراد نسبت به شرایط گرمایی محیط (PMV) و دیگری برآورد درصد نارضایتی افراد نسبت به شرایط گرمایی (PPD) می‌باشد [۲۱]. شاخص PMV یک مقدار کمی را به احساس گرمایی عمومی افراد نسبت می‌دهد که با تعیین آن می‌توان نسبت به تحلیل شرایط حرارتی، بهبود و بهینه‌سازی آن اقدام کرد. هدف PMV پیش‌بینی میانگین احساس حرارتی گروه بزرگی از افراد در یک محیط مشخص است. این پیش‌بینی بر اساس یک مدل ریاضی پیچیده صورت می‌گیرد که تعادل حرارتی بدن انسان را در نظر می‌گیرد. این شاخص به جای اینکه فقط بر دمای هوا تمرکز کند، تأثیر ترکیبی عوامل محیطی و فردی را بر احساس گرما یا سرمای افراد ارزیابی می‌کند. شاخص PMV که توسط فنگر بیان شد، بر هفت مقیاس فیزیولوژیکی استوار می‌باشد که در جدول ۲ آمده است [۳].

جدول ۲- مقیاس شاخص آسایش حرارتی PMV [۳]

احساس حرارتی افراد	PMV
--------------------	-----

به طور کلی محدوده مورد قبول برای چهار شاخص ذکر شده یعنی PMV، PPD، DR و PD بر اساس استاندارد اشری ۵۵ و ایزو ۷۷۳۰ مطابق با جدول ۳ است.

جدول ۳- محدوده مورد قبول برای شاخص های آسایش حرارتی کلی و موضعی [۲۳].

شاخص	محدوده مورد قبول
PMV	$ PMV < 0.7$
PPD	$PPD < 1.5\%$
DR	$DR < 30\%$
PD	$PD < 10\%$

۲-۶- کیفیت هوا

یکی از شاخص های بررسی کیفیت هوا، میانگین طول عمر هوا می باشد. در واقع میانگین طول عمر هوا نشان می دهد که هر چند ثانیه هوای اطراف افراد تعویض و جایگزین می شود. این شاخص تاثیر زیادی بر احساس رضایت افراد از محیط اطراف و نقش مهمی در عملکرد افراد دارد [۱۸].

۳- نتایج

در این مقاله هدف بررسی آسایش حرارتی افراد در یک اتاق اداری مجهز به تهویه طبیعی یک طرفه می باشد. برای این منظور در ابتدا برای بدست آوردن الگوی جریان، توزیع دما و سرعت یک شبیه سازی عددی سه بعدی انجام گرفته و سپس نتایج بدست آمده از حل عددی با شاخص های ارزیابی احساس حرارتی کوپل می شوند. در این بخش ابتدا درباره اعتبارسنجی و استقلال از شبکه حل عددی بحث شده سپس در ادامه به بررسی تاثیر دما، سرعت هوا، ابعاد و موقعیت بازو بر پارامترهای آسایش حرارتی و کیفیت هوا پرداخته شده است.

۳-۱- اعتبارسنجی حل عددی

برای اعتبارسنجی و اطمینان از نتایج حاصل از روش عددی، مقادیر بدست آمده با داده های تجربی مقایسه می شوند. به همین منظور، داده های تجربی جی یانگ و

در بحث های آسایش حرارتی، پدیده کوران (DR^1) به صورت سرمایش موضعی ناخواسته در اثر اغتشاشات جریان هوای وزشی تعریف می شود. به بیان ساده تر، سرد شدن قسمتی از بدن فرد به صورت غیر دلخواه که به وسیله جریان باد ایجاد می شود را کوران می نامند. مقدار کوران معمولاً به صورت درصد بیان می شود و نشان می دهد که چه درصدی از افراد در معرض شرایط هوایی مشخص، احتمالاً احساس ناراضی ناشی از کوران خواهند داشت [۲۰]. بر اساس استاندارد ایزو ۷۷۳۰ رابطه ی زیر پیش بینی درصد ناراضی افراد ناشی از کوران را نشان می دهد [۲۲].

$$DR = (34 - T_{a,l})(V_{a,l} - 0.05)^{0.62} (0.37V_{a,l}Tu + 3.14) \quad (12)$$

که $T_{a,l}$ دمای موضعی هوا بین ۲۰ الی ۲۶ درجه سلسیوس می باشد، $V_{a,l}$ سرعت میانگین موضعی هوا که کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته می شود. برای مواردی که $V_{a,l}$ کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه باشد، مقدار $V_{a,l}$ برابر ۰/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته می شود. Tu شدت توربولانس موضعی که مقدار آن بین ۱۰ الی ۶۰ درصد می باشد، در صورتی که مقدار آن نامشخص باشد، ۴۰ درصد در نظر گرفته می شود [۲۲].

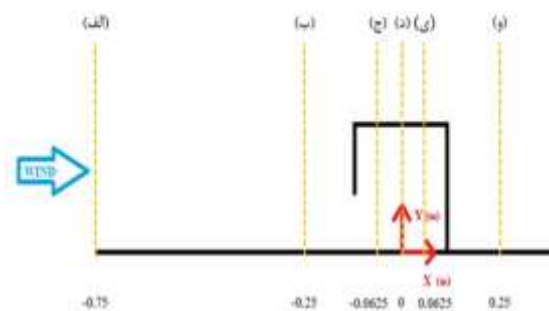
معمولاً دمای هوا در داخل اتاق به صورت عمودی از کف تا سقف افزایش می یابد. این اختلاف عمودی دمای هوا (PD^2)، یکی از عوامل ایجاد ناراضی حرارتی موضعی برای افراد در حالت نشسته یا ایستاده محسوب می شود [۳]. بر اساس استاندارد ایزو ۷۷۳۰، درصد ناراضی ناشی از گرادیان دمای عمودی بصورت رابطه (۱۳) نشان داده شده است [۲۲]:

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(5.76 - 0.85\Delta T_{a,v})} \quad (13)$$

که $\Delta T_{a,v}$ اختلاف دما بین قفسه سینه تا پا فرد بر حسب درجه سلسیوس می باشد [۲۲].

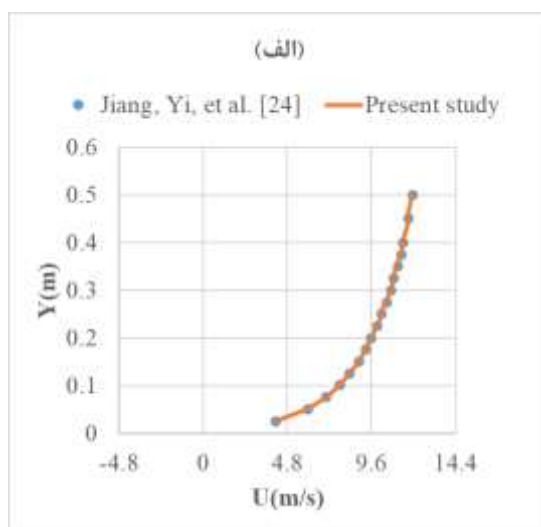
² Percentage of Dissatisfied

¹ Draught Rating

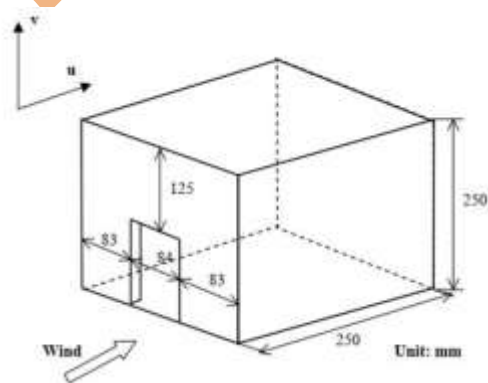


شکل ۵- مقاطع ایجاد شده در فضای محاسباتی [۲۴].

نتایج حاصل از حل عددی مطالعه حاضر با داده‌های تجربی جی‌یانگ و همکاران [۲۴] در شش نقطه مشخص شده از فضای محاسباتی مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل (۶) مشخص است نتایج حاصل از حل عددی تطابق خوبی با روش تجربی دارد.



همکاران [۲۴] برای اعتبارسنجی مطالعه حاضر استفاده شده است. ایشان یک اتاق مکعبی شکل در مقیاس بسیار کوچک را درون تونل باد قرار دادند و توزیع سرعت باد را در داخل و اطراف اتاق برای تهویه طبیعی یک طرفه بررسی کردند. ایشان از بادنچ لیزری تک بعدی^۱ ساخته شده توسط شرکت دانتک^۲ برای اندازه‌گیری توزیع سرعت استفاده کردند. با توجه به شکل (۴) فضای نمونه انتخاب شده در ابعاد $0.25 \times 0.25 \times 0.25$ متر و همچنین دارای یک بازو به ابعاد 0.25×0.084 متر بدون فاصله از سطح زمین در مقابل جریان باد است. تونل باد استفاده شده در دانشگاه کاردیف دارای طول و عرض 2×2 متر و ارتفاع ۱ متر است. جریان بالادست از فاصله ۶ متری، در شرایطی که زبری سطح و موانع برای شبیه‌سازی شرایط مرزی در منطقه شهری رعایت شده است، اعمال شده است. سرعت باد در ابتدای تونل باد نیز ۱۲ متر بر ثانیه به عنوان سرعت مرجع فرض شده است. همچنین دامنه تونل باد برای جریان پایین‌دست و دیوارهای کناری ۱ متر لحاظ شده است.

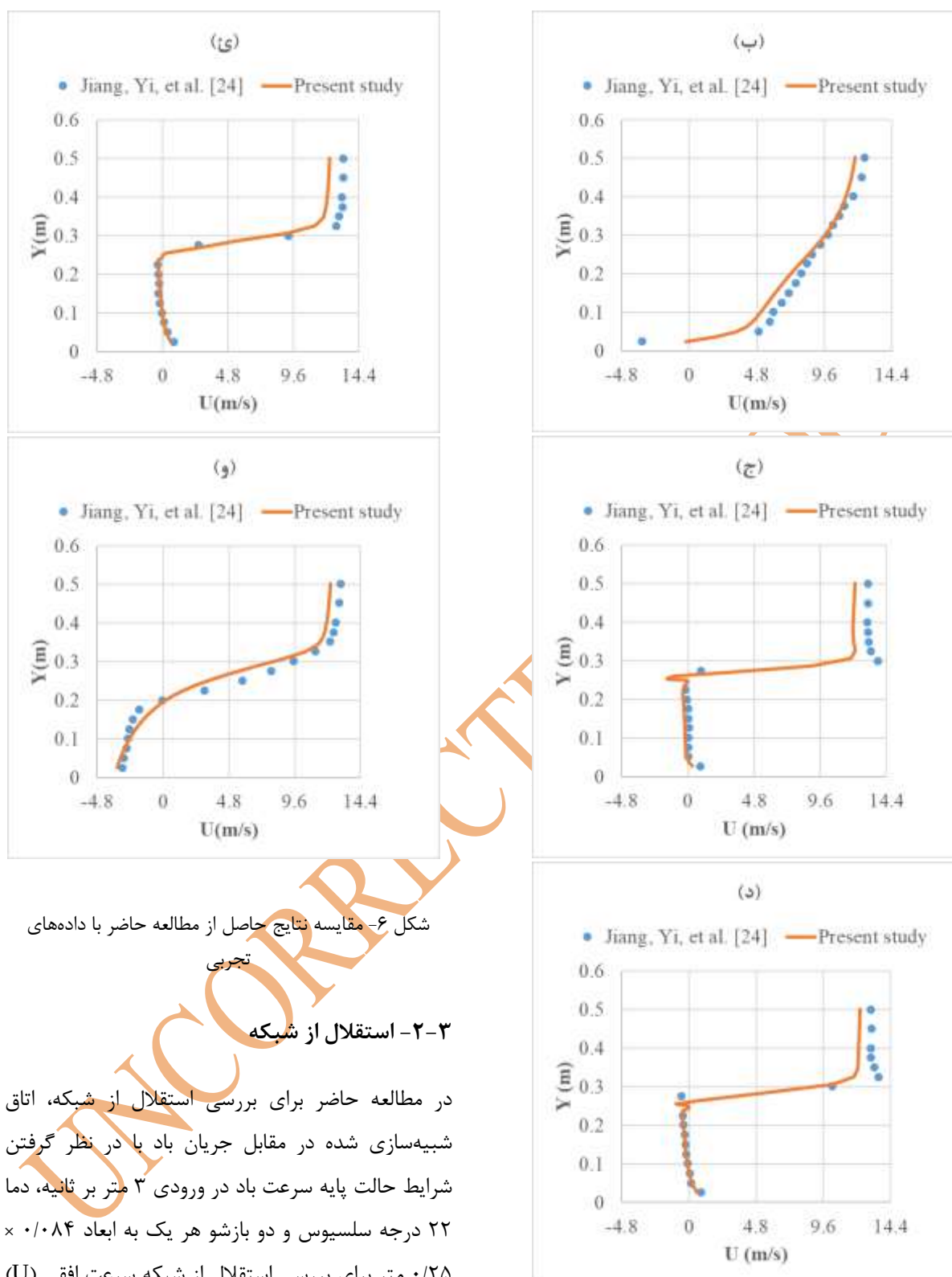


شکل ۴- نمای ایزومتریک از اتاق نمونه در شبیه‌سازی جی‌یانگ و همکاران [۲۴].

برای اعتبارسنجی عددی از توزیع سرعت افقی (U) بر روی یک خط عمودی واقع در شش نقطه از فضای محاسباتی که در شکل (۵) نشان داده شده است، استفاده شده است.

² Dantec

¹ Laser Doppler Anemometry

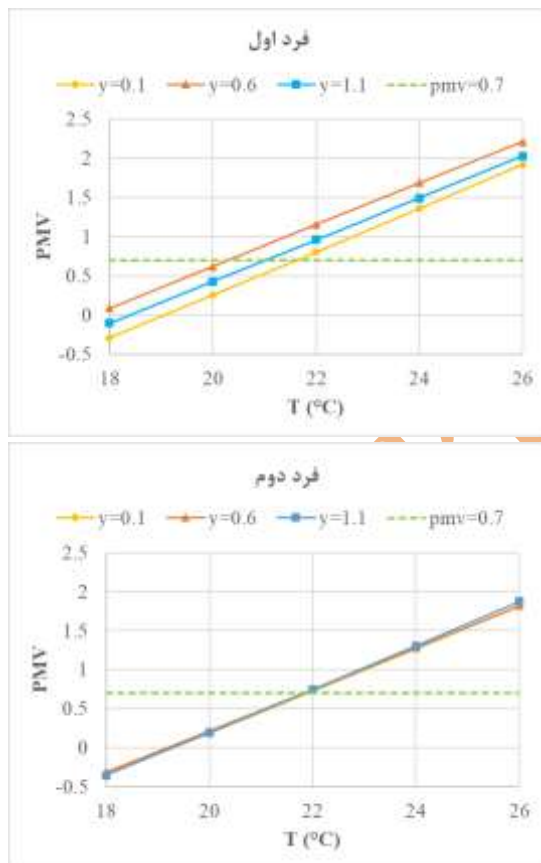


شکل ۶- مقایسه نتایج حاصل از مطالعه حاضر با داده‌های تجربی

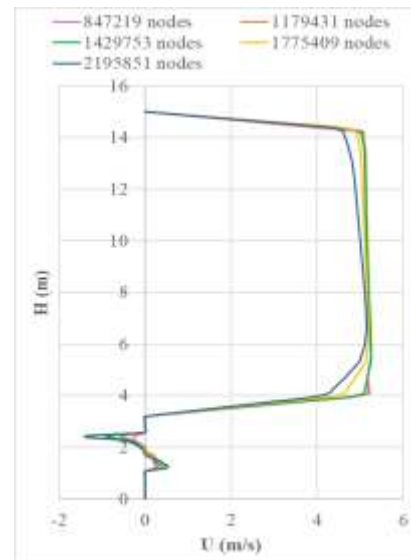
۳-۲- استقلال از شبکه

در مطالعه حاضر برای بررسی استقلال از شبکه، اتاق شبیه‌سازی شده در مقابل جریان باد با در نظر گرفتن شرایط حالت پایه سرعت باد در ورودی ۳ متر بر ثانیه، دما ۲۲ درجه سلسیوس و دو بازشو هر یک به ابعاد 0.84×0.25 متر برای بررسی استقلال از شبکه سرعت افقی (U) بر روی خط عمودی گذرنده از مرکز بازشوها در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل (۷) مشخص است سرعت افقی (U) با در نظر گرفتن شبکه‌بندی‌های مختلف ارزیابی شده و اختلاف پارامتر در نظر گرفته شده با تعداد مش

فرد در آسایش حرارتی قرار دارد. اما برای فرد اول و سوم در دمای محیط بیرون ۲۲ درجه سلسیوس شرایط آسایش حرارتی مناسب نمی‌باشد و بازه‌ی دمای محیط بیرون مناسب برای این افراد را می‌توان بین ۱۸ الی ۲۰ درجه سلسیوس در نظر گرفت. در دماهای بالاتر از ۲۴ درجه سلسیوس، برای هر سه فرد مقدار PMV تقریباً به ۱/۵ و بیشتر می‌رسد که نشان می‌دهد افراد احساس گرما می‌کنند و شرایط آسایش حرارتی برای آن‌ها برقرار نمی‌باشد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که برای فرد دوم شاخص PMV در تمامی ارتفاع‌ها عملکرد مشابه‌ای دارد و برای فرد اول و سوم در ارتفاع ۰/۶ متر، مقدار PMV کمی بیشتر از دو ارتفاع دیگر می‌باشد.



۲۱۹۵۸۵۱ و ۱۷۷۵۴۰۹ ناچیز می‌باشد. بنابراین تعداد ۱۷۷۵۴۰۹ گره برای شبکه‌بندی در نظر گرفته شده است.



شکل ۷- نمودار استقلال از شبکه

۳-۳- بررسی پارامتریک

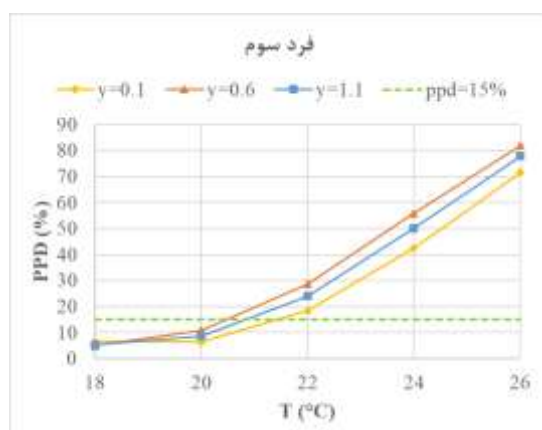
هدف از این بخش بررسی تاثیر شرایط آب و هوای محیط بیرون، تغییر چیدمان داخل اتاق و پارامترهای هندسی روی آسایش حرارتی و کیفیت هوای داخل اتاق نمونه با در نظر گرفتن تهویه طبیعی یک طرفه است. سرعت باد و دمای محیط بیرون به عنوان دو متغیر شرایط محیط بیرون، موقعیت و ابعاد بازشوها به عنوان دو متغیر برای پارامترهای هندسی در نظر گرفته شده است.

با توجه به استاندارد ایزو ۷۷۲۶ برای بررسی شرایط آسایش حرارتی موضعی، شاخص‌های آسایش حرارتی در سه ارتفاع ۰/۱، ۰/۶ و ۱/۱ متری از کف و به فاصله ۰/۱ متری از بدن افراد محاسبه شده است [۱۹].

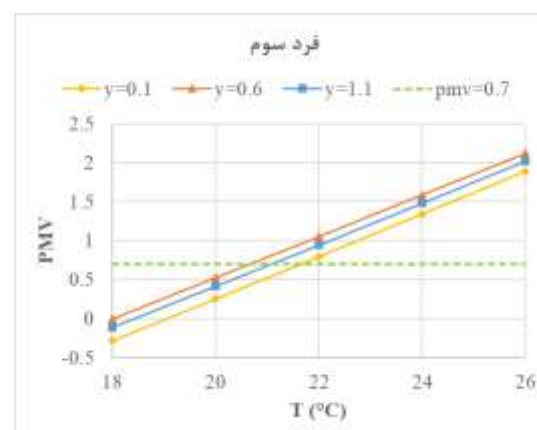
۳-۳-۱- بررسی تاثیر دما

برای بررسی تاثیر دما، دمای متفاوت بین ۱۸ الی ۲۶ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است.

شکل (۸) نمودار تغییرات PMV برحسب دما برای هر فرد را نشان می‌دهد. با توجه به معیار آسایش حرارتی، محدوده مجاز برای PMV بین ۰/۷- و ۰/۷+ می‌باشد. برای فرد دوم در بازه‌ی دمای محیط بیرون ۱۸ الی ۲۲ درجه سلسیوس،

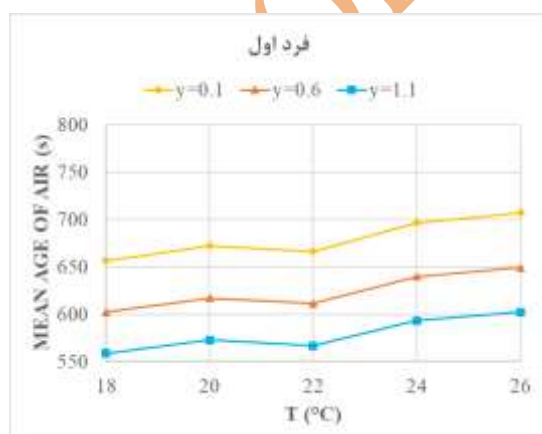


شکل ۹- نمودار تغییرات PPD برحسب تغییرات دما

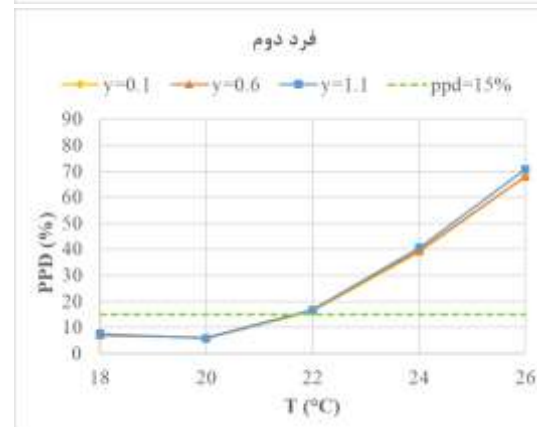
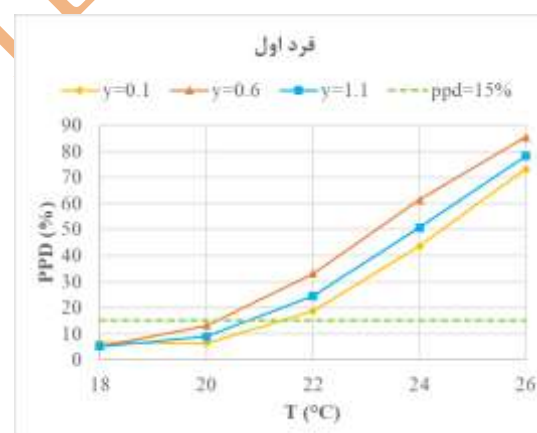


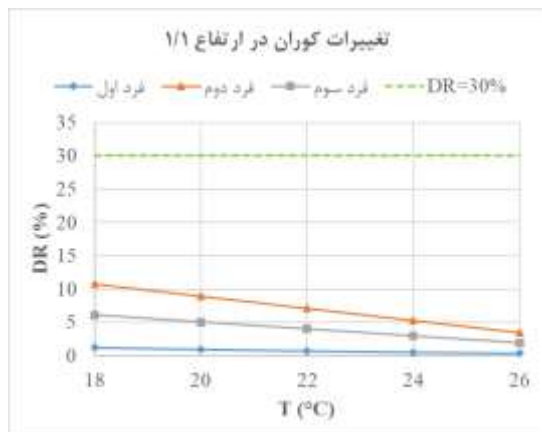
شکل ۸- نمودار تغییرات PMV برحسب تغییرات دما

مقادیر میانگین طول عمر هوا در سه ارتفاع یادشده و به فاصله ۰/۱ متر از افراد محاسبه شده است و این بدان معناست که هر چند ثانیه هوای اطراف افراد تعویض و جایگزین می‌شود. در شکل (۱۰) میانگین طول عمر هوا برحسب تغییرات دما نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای فرد اول به علت نزدیکی به بازو تعویض هوا سریع‌تر از دو فرد دیگر رخ می‌دهد. در کل می‌توان مشاهده کرد که تغییرات دما تاثیر کمی بر روی میانگین طول عمر هوا دارد و با افزایش دما از ۱۸ درجه سلسیوس به ۲۶ درجه سلسیوس، حدود ۵۰ ثانیه میانگین طول عمر هوا افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه دیگر این است که برای هر سه فرد با افزایش ارتفاع، میانگین طول عمر هوا کاهش می‌یابد.



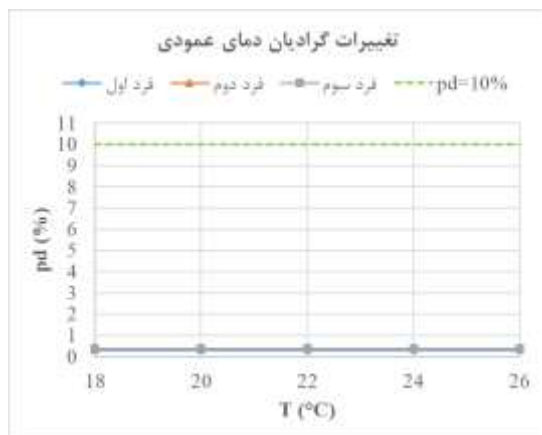
شکل (۹) نمودار تغییرات PPD برحسب دما برای هر فرد را نشان می‌دهد. با توجه به معیار آسایش حرارتی محدودی مجاز برای شاخص PPD کمتر از ۱۵٪ می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود فرد دوم در بازه دمای ۱۸ الی ۲۲ درجه سلسیوس، فرد اول و سوم بازه دمای ۱۸ الی ۲۰ درجه سلسیوس بیشترین رضایت را نسبت به دمای محیط اطراف دارند.





شکل ۱۱- نمودار کوران برحسب تغییرات دما

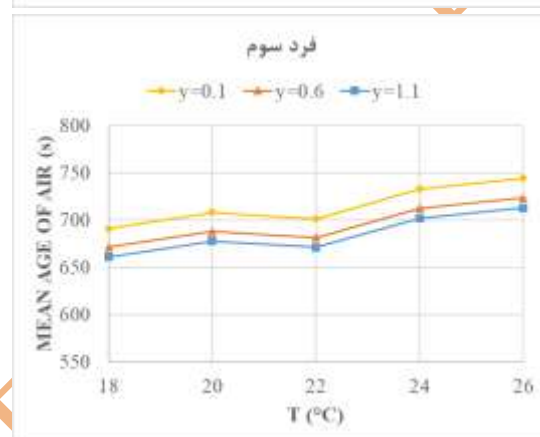
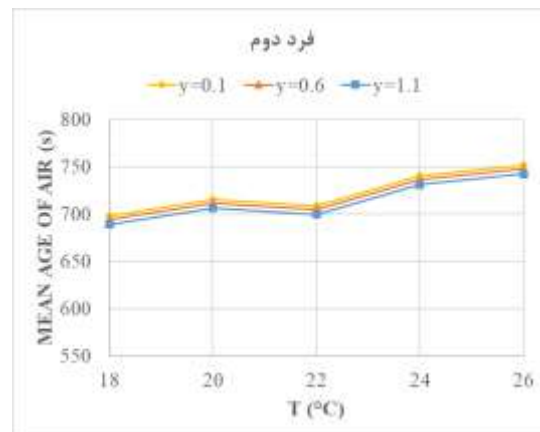
شاخص دیگر در بررسی آسایش حرارتی، گرادیان دمای عمودی می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود مقدار گرادیان دمای عمودی ناچیز می‌باشد و با تغییر دما ثابت می‌ماند. همچنین اختلاف دمای عمودی برای هر سه فرد یکسان می‌باشد. با توجه به این که مقدار گرادیان دمای عمودی ناچیز می‌باشد، در بقیه موارد از بررسی آن صرف نظر شده است.



شکل ۱۲- گرادیان دمای عمودی برحسب تغییرات دما

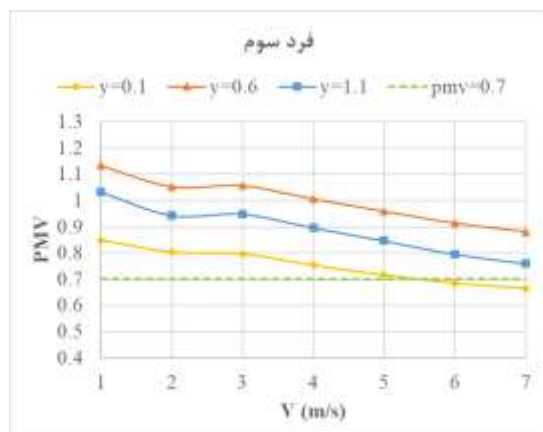
با توجه به نمودارهای بررسی شده برای تاثیر دما، مقادیر PMV، PPD، کوران و گرادیان دمای عمودی در دماهای ۱۸ و ۲۰ درجه سلسیوس برای هر سه فرد در محدوده مجاز آسایش حرارتی قرار دارند. بنابراین بهترین دمای محیط بیرون برای این شرایط دماهای ۱۸ تا ۲۰ درجه سلسیوس می‌باشد.

۳-۲- بررسی تاثیر سرعت



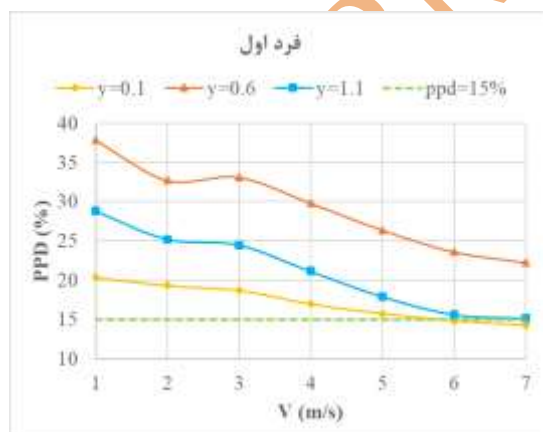
شکل ۱۰- نمودار میانگین تعویض هوا برحسب تغییرات دما

شاخص بعدی در بررسی آسایش حرارتی افراد، کوران می‌باشد. شکل (۱۱) نمودار کوران در ارتفاع ۱/۱ متری از کف اتاق برحسب تغییرات دما برای هر سه فرد را نشان می‌دهد. با توجه به معیار آسایش حرارتی محدوده مجاز برای شاخص DR کمتر از ۳۰٪ می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود مقادیر کوران در تمامی دماها برای هر سه فرد در محدوده مجاز قرار دارد و بهترین حالت برای کوران در دمای ۲۶ درجه سلسیوس رخ می‌دهد. همچنین مقدار کوران با افزایش دما برای فرد دوم و سوم کاهش اما برای فرد اول تقریباً ثابت می‌باشد.



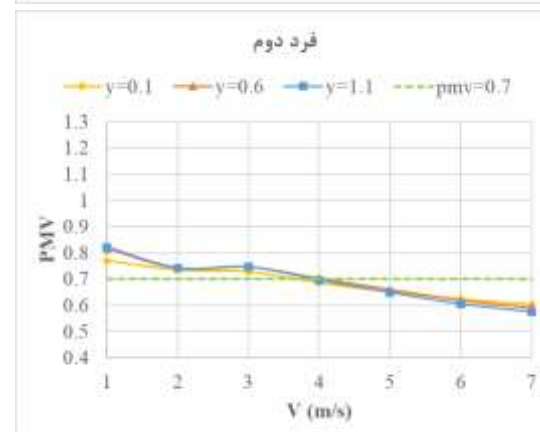
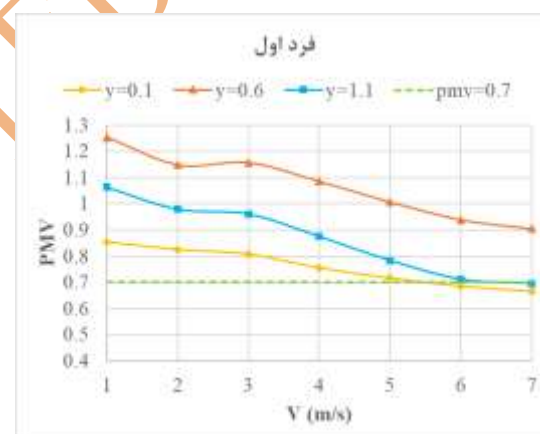
شکل ۱۲- نمودار تغییرات PMV برحسب تغییرات سرعت هوا

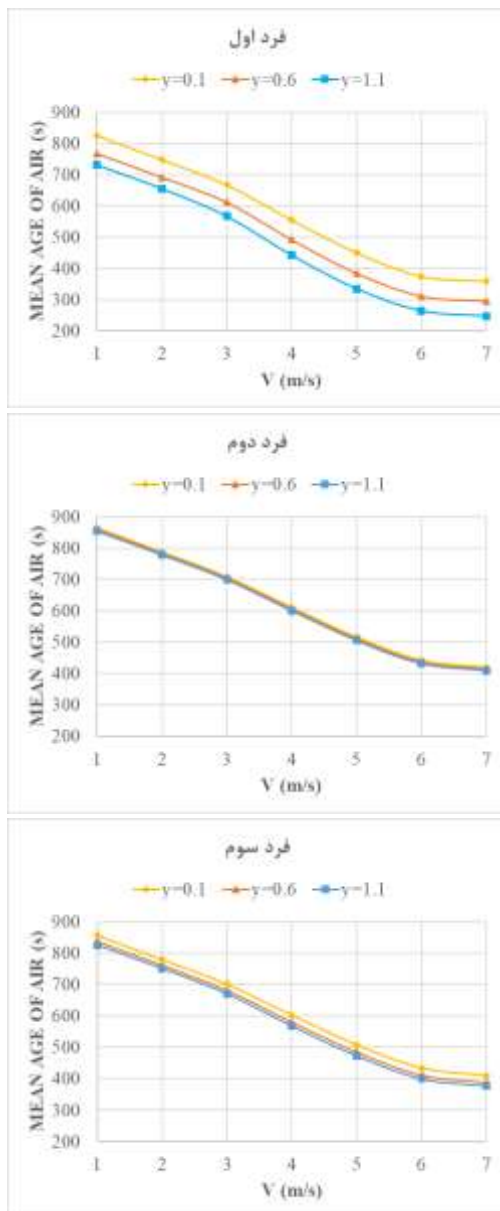
شکل (۱۳) نمودار تغییرات PPD برحسب تغییرات سرعت هوا را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۳) می‌توان گفت نتایج بدست آمده برای PPD مشابه با نتایج PMV می‌باشد. به‌طور کلی با افزایش سرعت هوا، مقادیر PPD کاهش می‌یابد و به محدوده مجاز آسایش حرارتی نزدیک‌تر می‌شود. برای فرد دوم بیشترین رضایت نسبت به شرایط گرمایی بین سرعت ۴ تا ۷ متر بر ثانیه رخ می‌دهد. برای فرد اول بجز ارتفاع ۰/۶ متر، در بقیه ارتفاع‌ها شرایط آسایش حرارتی بین سرعت‌های ۶ تا ۷ متر بر ثانیه مناسب می‌باشد. برای فرد سوم نیز فقط در ارتفاع ۰/۱ و بین سرعت‌های ۶ تا ۷ متر بر ثانیه شرایط آسایش حرارتی برقرار می‌باشد.



برای بررسی تاثیر سرعت، هفت سرعت متفاوت بین ۱ الی ۷ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

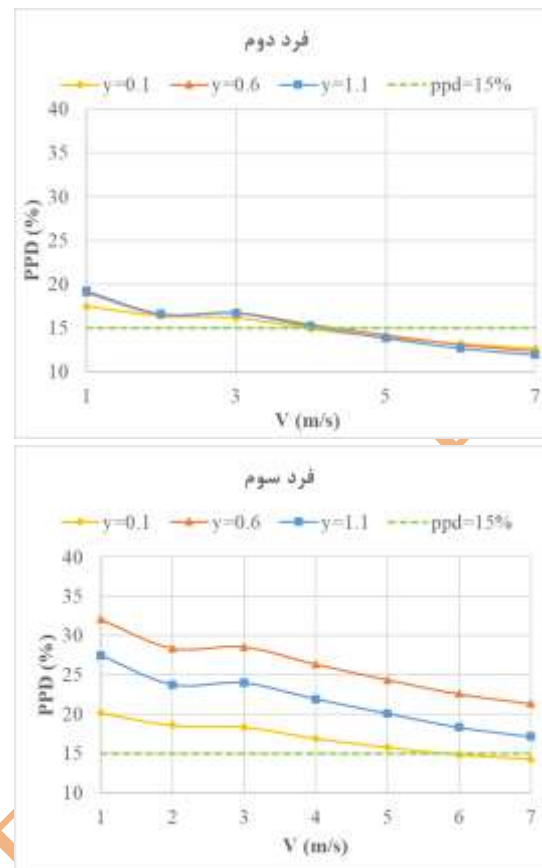
شکل (۱۲) نمودار تغییرات PMV برحسب تغییرات سرعت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است به‌طور کلی با افزایش سرعت هوا، مقادیر PMV کاهش می‌یابد و به محدوده مجاز آسایش حرارتی نزدیک‌تر می‌شود. برای فرد دوم از سرعت ۴ تا ۷ متر بر ثانیه در تمامی ارتفاع‌ها نمودار PMV در محدوده مجاز آسایش حرارتی قرار دارد. برای فرد اول ارتفاع ۰/۶ متر در هیچ‌کدام از سرعت‌ها در محدوده مجاز آسایش حرارتی قرار ندارد و بقیه ارتفاع‌ها از سرعت ۶ تا ۷ متر بر ثانیه در محدوده مجاز آسایش حرارتی قرار دارند. برای فرد سوم بجز ارتفاع ۰/۱ متر که از سرعت ۶ تا ۷ متر بر ثانیه در محدوده آسایش حرارتی قرار دارد، در بقیه ارتفاع‌ها شرایط آسایش حرارتی برای این فرد مهیا نمی‌باشد.





شکل ۱۴- نمودار تغییرات میانگین طول عمر هوا
برحسب تغییرات سرعت هوا

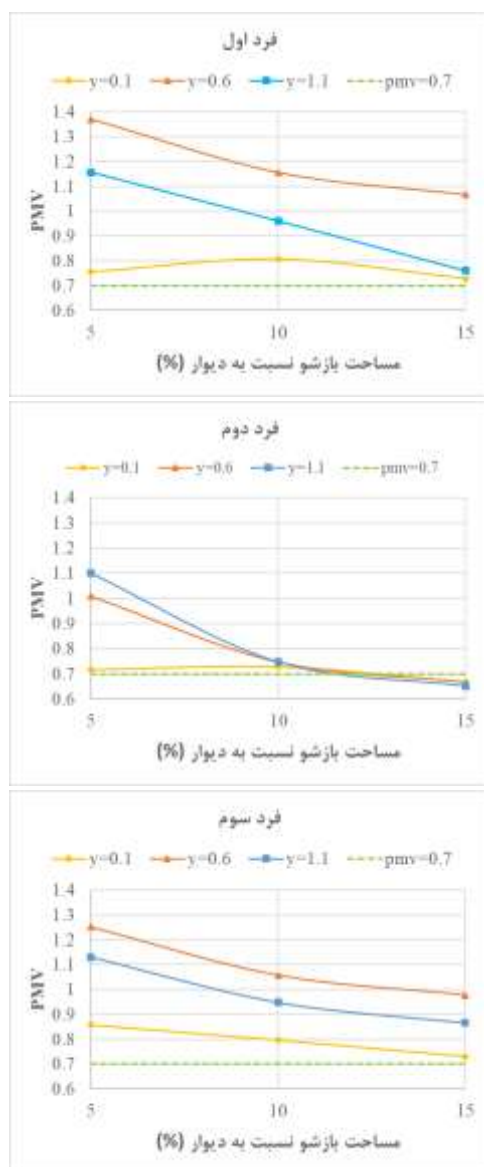
شاخص بعدی تغییرات کوران برحسب تغییرات سرعت هوا می‌باشد. شکل (۱۵) نمودار تغییرات کوران برحسب تغییرات سرعت در ارتفاع ۱/۱ متری از سطح زمین برای هر سه فرد را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۵)، مقدار کوران تقریباً با افزایش سرعت ثابت می‌ماند و این شاخص برای فرد دوم بیشتر از بقیه افراد می‌باشد. به‌طور کلی در همه سرعت‌ها مقدار کوران در محدوده مجاز آسایش حرارتی قرار دارد.



شکل ۱۳- نمودار تغییرات PPD برحسب تغییرات سرعت هوا

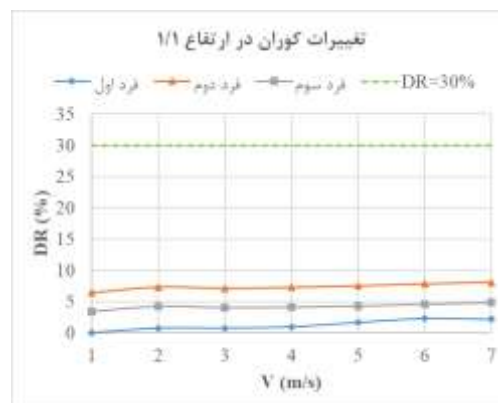
شکل (۱۴) نمودار میانگین طول عمر هوا برحسب تغییرات سرعت هوا برای هر سه فرد را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۴) می‌توان مشاهده کرد که با افزایش سرعت هوا، میانگین طول عمر هوا برای هر سه فرد کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار میانگین طول عمر هوا برای فرد دوم و سوم رخ می‌دهد که در سرعت ۱ متر بر ثانیه مقدار میانگین طول عمر هوا تقریباً ۸۵۰ ثانیه می‌باشد. کمترین مقدار میانگین طول عمر هوا برای فرد اول اتفاق می‌افتد که در سرعت ۷ متر بر ثانیه مقدار آن ۲۵۰ ثانیه می‌باشد. بجز فرد اول برای فرد دوم و سوم، در هر سه ارتفاع و در تمامی سرعت‌ها نمودار میانگین طول عمر هوا تقریباً یکسان می‌باشد.

فرد سوم در هر سه حالت در نظر گرفته شده، مقدار PMV در محدوده مجاز قرار نمی‌گیرد.



شکل ۱۶- نمودار تغییرات PMV برحسب ابعاد متفاوت بازشوها

شکل (۱۷) نمودار PPD برحسب ابعاد مختلف بازشوها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، بیشترین نارضایتی برای بازشو با مساحت ۵٪ می‌باشد. با افزایش ابعاد بازشو مقدار PPD برای هر سه فرد کاهش می‌یابد و به محدوده مجاز نزدیک‌تر می‌شود. برای فرد دوم در بازشو با مساحت ۱۵٪، مقدار PPD در محدوده مجاز آسایش حرارتی قرار دارند. برای فرد اول و فرد سوم هیچ



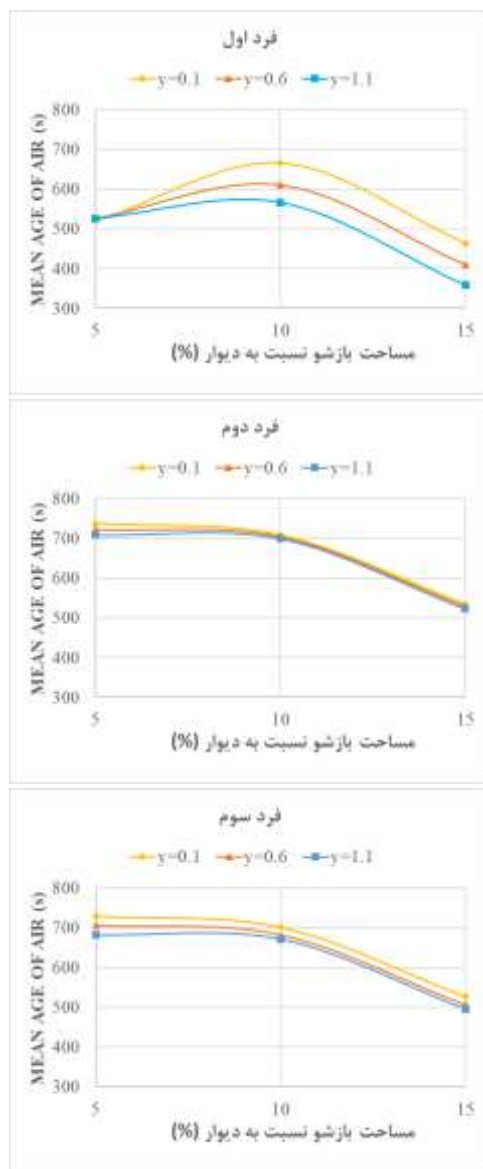
شکل ۱۵- نمودار کوران برحسب تغییرات سرعت

با توجه به نمودارهای PMV، PPD و کوران می‌توان گفت در دمای ۲۲ درجه سلسیوس و با در نظر گرفتن سرعت هوا به عنوان پارامتر متغیر، برای فرد اول سرعت هوا بین ۶ تا ۷ متر بر ثانیه و برای فرد دوم سرعت‌های ۴ تا ۷ متر بر ثانیه مناسب می‌باشد و هر دو فرد در این شرایط احساس آسایش حرارتی مطلوبی دارند. برای فرد سوم در دمای ۲۲ درجه سلسیوس در هیچ یک از سرعت‌ها شرایط آسایش حرارتی مناسب نمی‌باشد.

۳-۳-۳- بررسی تاثیر ابعاد بازشوها

برای بررسی تاثیر ابعاد بازشوها، سه حالت متفاوت در نظر گرفته شده است. حالت اول مساحت بازشوها ۵٪ مساحت دیوار (۳۴۶/۰ متر × ۰/۶۵ متر)، حالت دوم مساحت بازشوها ۱۰٪ مساحت دیوار (۰/۷ متر × ۰/۶۵ متر) و حالت سوم مساحت بازشوها ۱۵٪ مساحت دیوار (۱/۰۳۸ متر × ۰/۶۵ متر) می‌باشد.

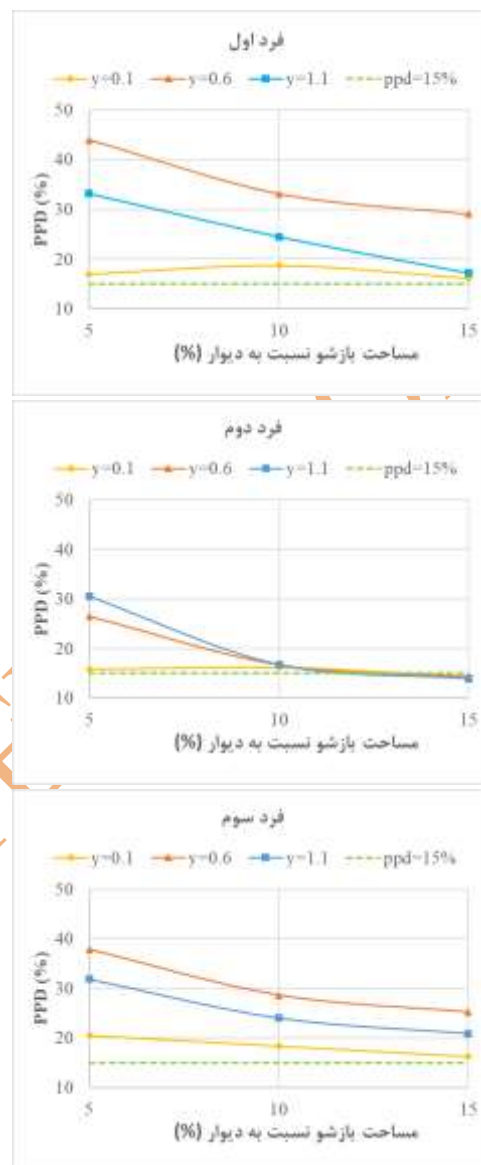
شکل (۱۶) نمودار PMV برحسب ابعاد مختلف بازشوها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۶) مشخص است با افزایش ابعاد بازشوها، مقادیر PMV برای هر سه فرد کاهش می‌یابد. برای فرد دوم زمانی که بازشوها ۱۵٪ مساحت دیوار می‌باشند، مقدار PMV در محدوده مجاز قرار دارد. برای فرد اول و



شکل ۱۸- نمودار میانگین طول عمر هوا برحسب ابعاد متفاوت بازشوها

شکل (۱۹) نمودار کوران برحسب تغییرات ابعاد بازشوها در ارتفاع ۱/۱ متری از سطح زمین را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مقدار کوران برای هر سه فرد در تمامی سه حالت مختلف بازشو در محدوده آسایش حرارتی قرار دارند. همچنین با افزایش ابعاد بازشو، افزایش جزئی در مقدار کوران برای هر سه فرد مشاهده می‌شود. مقدار کوران با تغییر ابعاد بازشوها برای فرد دوم بیشتر از سایر افراد می‌باشد.

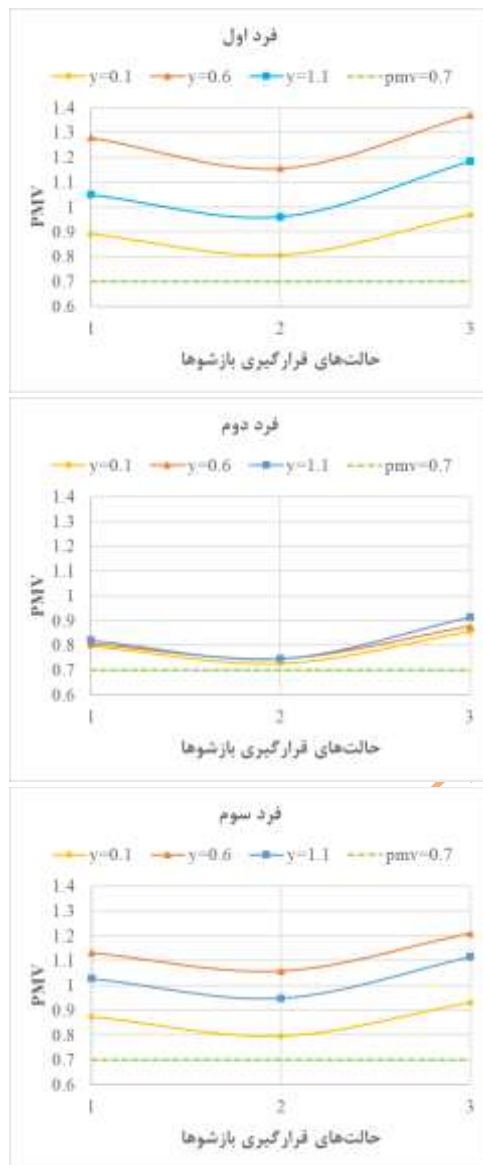
کدام از ارتفاعها با تغییر ابعاد بازشو در محدوده مجاز آسایش حرارتی قرار نمی‌گیرد.



شکل ۱۷- نمودار تغییرات PPD برحسب ابعاد متفاوت بازشوها

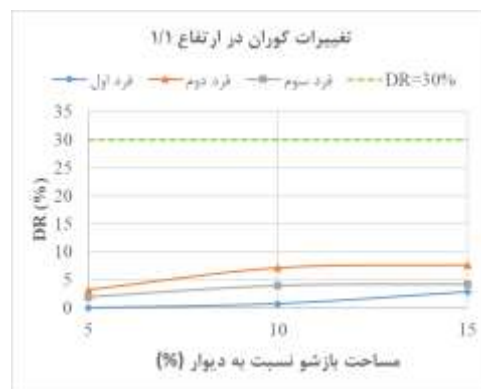
شکل (۱۸) نمودار میانگین طول عمر هوا برحسب تغییرات ابعاد بازشو را نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان مشاهده کرد که با افزایش ابعاد بازشو، میانگین طول عمر هوا برای فرد دوم و سوم کاهش می‌یابد یعنی نیاز به مدت زمان کمتری برای تعویض و جایگزین شدن هوا وجود دارد. برای فرد اول چون نزدیک بازشوها قرار دارد، نمی‌توان الگوی مناسبی برای میانگین طول عمر هوا با تغییرات ابعاد بازشو بدست آورد.

عملکرد بهتری نسبت به وجود یک بازشو در قسمت پایین دارد. به طور کلی برای هر سه حالت در نظر گرفته شده برای هیچ کدام از افراد شرایط آسایش حرارتی مهیا نمی باشد و مقدار PMV در حالت دوم کمتر از بقیه ی حالت ها می باشد.



شکل ۲۰- نمودار PMV برحسب مکان های متفاوت بازشو

شکل (۲۱) نمودار PPD برحسب مکان های مختلف بازشو را نشان می دهد. با توجه به شکل نتایج بدست آمده برای PPD مشابه نتایج PMV می باشد و بیشترین میزان نارضایتی افراد برای حالت سوم رخ می دهد.



شکل ۱۹- نمودار کوران برحسب ابعاد متفاوت بازشوها

با توجه به بررسی نمودارهای PMV، PPD و کوران می توان گفت برای فرد دوم در حالتی که بازشوها ۱۵٪ مساحت دیوار می باشند، تمامی شاخص های آسایش حرارتی در محدوده مجاز قرار دارند. برای فرد اول و سوم نیز در هیچ یک از حالت های در نظر گرفته شده برای ابعاد بازشو، شاخص های PMV و PPD در محدوده مجاز آسایش حرارتی قرار ندارند.

۳-۳-۴- بررسی تاثیر تعداد و موقعیت قرارگیری بازشوها

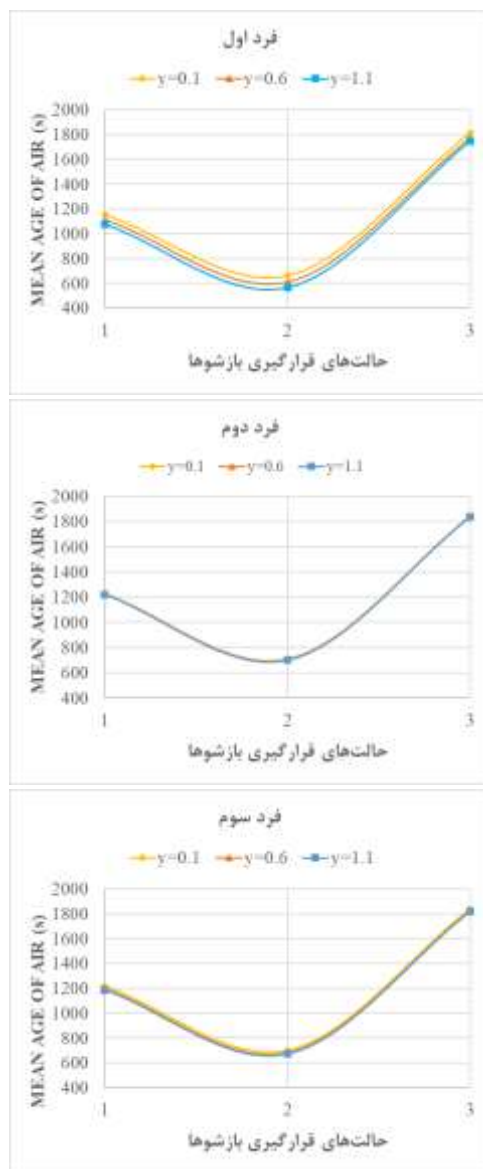
برای بررسی تاثیر تعداد و موقعیت قرارگیری بازشوها سه حالت مختلف در نظر گرفته شده است. بقیه متغیرها به صورت حالت پایه (که سرعت باد ۳ متر بر ثانیه، دما ۲۲ درجه سلسیوس و بازشوها ۱۰٪ مساحت دیوار می باشند) در نظر گرفته شده است. سه حالت مختلف برای تاثیر تعداد بازشوها به شرح زیر است:

(۱) یک بازشو بالایی (فاصله مرکز بازشو از سطح زمین ۲/۱۲۵ متر است)

(۲) دو بازشو

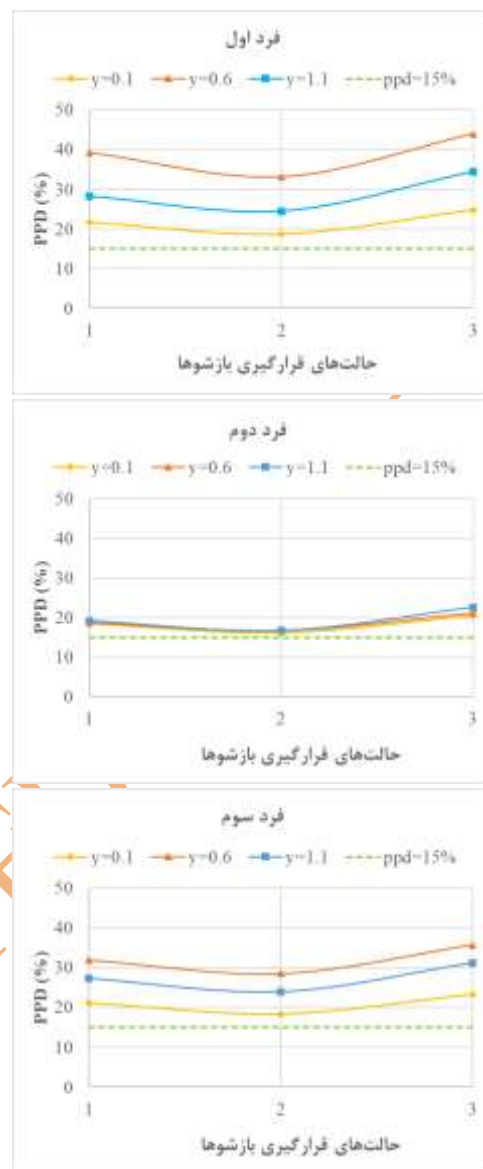
(۳) یک بازشو پایینی (فاصله مرکز بازشو از سطح زمین ۱/۴۲۵ متر است)

شکل (۲۰) نمودار تغییرات PMV برحسب مکان های مختلف بازشوها را نشان می دهد. همان طور که مشخص است، در تمامی ارتفاع ها مقدار PMV در حالت اول کمتر از حالت دوم می باشد. در نتیجه وجود یک بازشو در بالا



شکل ۲۲- نمودار میانگین طول عمر هوا برحسب مکان‌های متفاوت بازشو

شکل (۲۳) نمودار کوران برحسب تغییرات مکان‌های مختلف بازشو در ارتفاع ۱/۱ متری از سطح زمین را نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان مشاهده کرد که مکان‌های مختلف بازشو تاثیری بر روی شاخص کوران ندارد و در هر سه حالت مقدار کوران تقریباً ثابت باقی می‌ماند. به‌طور کلی مقدار کوران برای هر سه فرد در محدوده مجاز قرار دارد و در هر سه حالت برای فرد دوم بیشتر از سایر افراد می‌باشد.



شکل ۲۱- نمودار PPD برحسب مکان‌های متفاوت بازشو

شکل (۲۲) نمودار میانگین طول عمر هوا برحسب مکان‌های مختلف بازشو را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۲۲) برای هر سه فرد مقدار میانگین طول عمر هوا شبیه به هم هستند. بیشترین مقدار میانگین طول عمر هوا در حالت سوم و برای هر سه فرد رخ می‌دهد و مقدار آن ۱۸۰۰ ثانیه می‌باشد. کمترین مقدار میانگین طول عمر هوا در حالت دوم و برای فرد اول رخ می‌دهد و مقدار آن تقریباً ۶۰۰ ثانیه می‌باشد. به‌طور کلی برای هر سه فرد در حالت دوم کمترین مقدار میانگین طول عمر هوا اتفاق می‌افتد.

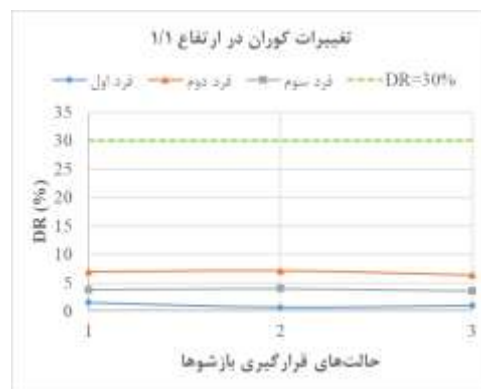
- برای فرد دوم که نسبت به بقیه افراد دورتر از بازشوها قرار دارد با تغییر مقادیر سرعت و دما، نمودار PMV ، PPD و میانگین طول عمر هوا در هر سه ارتفاع در نظر گرفته شده مقادیر یکسانی دارند و می‌توان گفت که تاثیر متغیرهای سرعت و دما بر روی آسایش حرارتی افراد در فواصل دورتر از بازشوها در ارتفاعات مختلف از کف اتاق یکسان است.

- با افزایش دما مقدار میانگین طول عمر هوا برای هر سه فرد افزایش می‌یابد کمترین مقدار ۵۵۰ ثانیه برای فرد اول در ارتفاع ۱/۱ متر و بیشترین مقدار آن ۷۵۰ ثانیه برای فرد دوم رخ می‌دهد اما کوران با افزایش دما برای فرد دوم و سوم کاهش و برای فرد اول ثابت می‌ماند. بیشترین مقدار کوران در دمای ۱۸ درجه سلسیوس و برای فرد دوم رخ می‌دهد.

- با افزایش سرعت باد مقادیر شاخص‌های آسایش حرارتی به محدوده مجاز نزدیک می‌شوند یا به عبارتی افزایش سرعت باد تاثیر مثبتی در برقراری آسایش حرارتی افراد می‌گذارد و با توجه به نمودارهای PMV و PPD ، در دمای ۲۲ درجه سلسیوس، برای افرادی که در نزدیکی بازشوها قرار دارند با افزایش سرعت باد نمی‌توان شرایط آسایش حرارتی مناسبی مهیا کرد و این نشان‌دهنده تاثیر زیاد دما در برقراری شرایط آسایش حرارتی است.

- میانگین طول عمر هوا با افزایش سرعت باد، کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار آن ۸۵۰ ثانیه در سرعت ۱ متر بر ثانیه برای فرد دوم است و کمترین مقدار آن ۲۵۰ ثانیه در سرعت ۷ متر بر ثانیه برای فرد اول رخ می‌دهد. اما کوران با افزایش سرعت باد برای هر سه فرد ثابت و در محدوده مجاز آسایش حرارتی قرار دارد.

- با افزایش ابعاد بازشوها، پارامترهای PMV و PPD به محدوده مجاز آسایش حرارتی نزدیک می‌شوند و به‌طور کلی میانگین طول عمر هوا نیز برای هر سه فرد کاهش پیدا می‌کند و مقدار کوران نیز برای هر سه فرد افزایش جزئی دارد. همچنین برای تعداد بازشوها، زمانی که از دو بازشو استفاده شود، آسایش حرارتی بیشتری برای ساکنین فراهم می‌شود اما در صورت استفاده فقط از یک بازشو، نصب بازشو در ارتفاع بالا پیشنهاد می‌شود. زیرا با توجه به نمودار PMV و PPD ، شرایط آسایش حرارتی برای حالت اول که فقط یک بازشو در ارتفاع بالا وجود دارد بهتر از حالت سوم که فقط یک بازشو در ارتفاع پایین است، می‌باشد. میانگین



شکل ۲۳- نمودار کوران برحسب مکان‌های متفاوت بازشو

با توجه به بررسی نمودارهای PMV ، PPD و کوران می‌توان گفت برای تمامی افراد با تغییر تعداد بازشوها، شاخص‌های آسایش حرارتی در محدوده مجاز قرار نگرفتند اما بطور کلی استفاده از دو بازشو عملکرد بهتری در برقراری شرایط آسایش حرارتی دارد. در صورتی که فقط از یک بازشو استفاده شود، نصب بازشو در ارتفاع بالا بهتر از نصب آن در ارتفاع پایین است.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر یک اتاق اداری مجهز به تهویه طبیعی یک طرفه به عنوان فضای نمونه در نرم‌افزار انسیس ایرپک به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. هدف از این کار محاسبه پارامترهای آسایش حرارتی و تعیین شرایط حرارتی مناسب برای ساکنین می‌باشد. برای بررسی آسایش حرارتی موضعی، شاخص‌های استاندارد آسایش حرارتی در اطراف افراد و در سه ارتفاع ۰/۱، ۰/۶ و ۱/۱ متری از سطح زمین محاسبه شده‌اند. سپس تاثیر دمای محیط بیرون، سرعت باد، ابعاد، تعداد و موقعیت قرارگیری بازشوها بر روی هر یک شاخص‌های آسایش حرارتی و شاخص کیفیت هوا بررسی شده است.

نتایج بدست‌آمده به صورت خلاصه به شرح زیر است:

- در دمای محیط بیرون بین ۱۸ الی ۲۰ درجه سلسیوس بهترین شرایط آسایش حرارتی برای افراد فراهم می‌شود. در این محدوده دمایی برای هر سه فرد درون اتاق نمودارهای PMV و PPD ، به طور کامل در محدوده مجاز آسایش حرارتی قرار می‌گیرد.

- در دمای ۲۲ درجه سلسیوس با تغییر ابعاد و تعداد بازشوها نیز شرایط آسایش حرارتی برای تمامی افراد مهیا نمی‌باشد و باز هم دما را می‌توان اصلی‌ترین عامل در برقراری شرایط آسایش حرارتی افراد داخل اتاق بیان کرد.

طول عمر هوا در حالت دوم که دو بازشو وجود دارد، کمترین مقدار را دارد و این شاخص برای حالت سوم ۱۸۰۰ ثانیه است که در مقایسه با حالت اول ۱۲۰۰ ثانیه، بیشتر می‌باشد. همچنین به‌طور کلی برای هر سه فرد میانگین طول عمر هوا با در نظر گرفتن هر سه حالت الگوی یکسانی دارد. همچنین تعداد بازشوها تاثیری در مقدار کوران ندارد.

مراجع

- [1] Zhao, Yifan, Wei Li, and Changwei Jiang. "Thermal sensation and occupancy-based cooperative control method for multi-zone VAV air-conditioning systems." *Journal of Building Engineering* 66 (2023): 105859.
- [2] Omrani, Sara, Veronica Garcia-Hansen, Bianca R. Capra, and Robin Drogemuller. "Effect of natural ventilation mode on thermal comfort and ventilation performance: Full-scale measurement." *Energy and Buildings* 156 (2017): 1-16.
- [3] Maerefat, Mehdi, and Amir Omidvar. *Thermal Comfort: Calculations and Design Considerations*. Tehran: Yazda Publications, 2013.
- [4] Larsen, Tine S., and Per Heiselberg. "Single-sided natural ventilation driven by wind pressure and temperature difference." *Energy and buildings* 40, no. 6 (2008): 1031-1040.
- [5] Zhong, Huai-Yu, Yang Sun, Jin Shang, Fu-Ping Qian, Fu-Yun Zhao, Hideki Kikumoto, Carlos Jimenez-Bescos, and Xiaochen Liu. "Single-sided natural ventilation in buildings: a critical literature review." *Building and Environment* 212 (2022): 108797.
- [6] Aldawoud, Abdelsalam. "Windows design for maximum cross-ventilation in buildings." *Advances in building energy research* 11, no. 1 (2017): 67-86.
- [7] Fan, S., MS Davies Wykes, W. E. Lin, R. L. Jones, A. G. Robins, and P. F. Linden. "A full-scale field study for evaluation of simple analytical models of cross ventilation and single-sided ventilation." *Building and Environment* 187 (2021): 107386.
- [8] Miše, Dino, Christoph Irrenfried, Walter Meile, Günter Brenn, and Hrvoje Kozmar. "Wind-driven natural ventilation of cubic buildings in rural and suburban areas." *Journal of building engineering* 87 (2024): 108740.
- [9] Liu, Xinyu, Hanqing Wang, Zhengming Li, Jinping Zhao, Chengjun Li, and Dong Xie. "Effectiveness of natural ventilation through single-sided window opening in air-conditioning rooms." *Energy and Buildings* 314 (2024): 114260.
- [10] Jiang, Zitao, Tomohiro Kobayashi, Toshio Yamanaka, Mats Sandberg, Narae Choi, Noriaki Kobayashi, Kayuki Sano, and Kota Toyosawa. "Wind-induced ventilation rate of single-sided ventilation in a building with internal partition." *International Journal of Ventilation* 23, no. 3 (2024): 237-258.
- [11] Visagavel, K., and P. S. S. Srinivasan. "Analysis of single side ventilated and cross ventilated rooms by varying the width of the window opening using CFD." *Solar Energy* 83, no. 1 (2009): 2-5.
- [12] Vincent, Okafor Chinedu, O. UCHENNA, and Ononye Olisa Roy. "CFD Analysis of Wind-Driven Natural Ventilation in Building Models." *International Journal of Engineering Research and Advanced Technology* 7, no. 11 (2021): 01-08.
- [13] Ma, Xiao-Yu, Yue Peng, Fu-Yun Zhao, Cheng-Wei Liu, and Shuo-Jun Mei. "Full numerical investigations on the wind driven natural ventilation: cross ventilation and single-sided ventilation." *Procedia Engineering* 205 (2017): 3797-3803.
- [14] Ai, Z. T., and Cheuk Ming Mak. "Determination of single-sided ventilation rates in multistory buildings: Evaluation of methods." *Energy and buildings* 69 (2014): 292-300.
- [15] Horan, Joseph M., and Donal P. Finn. "Sensitivity of air change rates in a naturally ventilated atrium space subject to variations in external wind speed and direction." *Energy and Buildings* 40, no. 8 (2008): 1577-

- 1585.
- [16] Izadyar, Nima, Wendy Miller, Behzad Rismanchi, and Veronica Garcia-Hansen. "A numerical investigation of balcony geometry impact on single-sided natural ventilation and thermal comfort." *Building and Environment* 177 (2020): 106847.
- [17] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. *ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2017.
- [18] *Airpak 3.0 User's Guide*, Fluent Inc, 2007.
- [19] International Organization for Standardization. *ISO 7726: Ergonomics of the Thermal Environment – Instruments for Measuring Physical Quantities*. Geneva: International Organization for Standardization, 1998.
- [20] Moalemi khiavi, Negin, and Mehdi Maerefat. "Introduction to Thermal Comfort." *Journal of Mechanical Engineering* 23, no. 3 (2014): 31-38.
- [21] Zolfaghari, Alireza, Mehdi Maerefat, and Mahdi Afzalian. *Concepts and Applied Fundamentals of Thermal Comfort*. Birjand: Birjand University, 2022.
- [22] International Organization for Standardization. *ISO 7730: 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*. Geneva: Inter.
- [23] Iranian National Standards Organization. *ISIRI 14384: Determination of Thermal Comfort Indices PMV, PPD, and Local Thermal Comfort Criteria*. Tehran: Iranian National Standards Organization.
- [24] Jiang, Yi, and Qingyan Chen. "Buoyancy-driven single-sided natural ventilation in buildings with large openings." *International Journal of heat and mass transfer* 46, no. 6 (2003): 973-988.