مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1395، دوره 16، شماره 13، ویژه‌نامه مجموعه مقالات کنفرانس، ص‌ص 78-81

مجموعه مقالات دومین کنفرانس بین‌المللی تهویه‌مطبوع و تاسیسات حرارتی و برودتی
بیرجند، دانشگاه بیرجند، 6 و 7 مهر 1395

مهندسی مکانیک مدرس
mme.modares.ac.ir

بررسی تأثیر مکان قرارگیری دریچه ورودی سیستم توزیع هوای زیرسطحی (UFAD) در فضاهای آموزشی بر آسایش حرارتی ساکنین

حامد مصلحی[1]، حمید نیازمند[2*]، محمد مقیمان[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد
3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد
* مشهد، صندوق پستی 9177948944، niazmand@um.ac.ir

چکیده

سیستم‌های تهویه مطبوع یکی از بزرگترین مصرف کننده‌های انرژی ساختمان می‌باشند. یکی از سیستم‌های تهویه جابه‌جایی، سیستم توزیع هوای زیرسطحی می‌باشد. این سیستم با تقسیم فضای اتاق به دو قسمت ناحیه‌ی حضور افراد و ناحیه‌ی بالای اتاق، اولویت را تأمین آسایش در ناحیه‌ی حضور افراد قرار داده است و به دلیل ورود جریان هوا با دمای پایین از کف و گرم شدن آن در اثر گرمای بدن افراد و تجهیزات، هوا در ارتفاع‌های مختلف دارای دماهای متفاوتی می‌باشد که باعث لایه‌بندی حرارتی هوا می‌شود. با شبیه‌سازی چهار حالت مختلف برای قرارگیری دریچه ورود هوا در فضایی با کاربری آموزشی مشخص شد که در تمامی این مدل‌ها، شاخص آسایش حرارتی براساس مدل فنگر بین 0 تا 0.5- بوده که در بازه مناسبی برای فصل تابستان قرار دارد همچنین شاخص نارضایتی افراد بین 6 تا 10 درصد می‌باشد.

کلید واژگان: تهویه مطبوع، توزیع هوای زیرسطحی، انرژی، آسایش حرارتی

Effect of the inlet location of Under Floor Air Distribution (UFAD) system on thermal comfort of residents in educational space

Hamed moslehi, Hamid niazmand*, Mohammad moghiman

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
* P.O.B. 9177948944, Mashhad, Iran, niazmand@um.ac.ir

ABSTRACT

Air conditioning systems are from the top energy consuming appliances in buildings. Under Floor Air Distribution (UFAD) is a displacement ventilation system that works by dividing the occupied space of a building into two zones: Lower section and the upper section. In UFAD system, low temperature air delivers through underfloor inlets and heated up by existing people and electrical equipment, in which, makes thermal stratification in the zone. In this study, based on Fanger's model, simulation results on air supply inlet locations in four cases indicate that thermal comfort index (TCI) is between -0.5 and 0, which is suitable for summer. Moreover, Predict Percentage of Dissatisfied People (PPD) is predicted within the range of 6-10% in all cases.

Keywords: Air conditioning, Under floor air distribution (UFAD), Energy, Thermal comfort

1- مقدمه

مهم‌ترین اولویت در طراحی ساختمان به حداکثر رساندن فضای دارای شرایط آسایش حرارتی و ایجاد محیطی سالم برای ساکنان با حداقل میزان مصرف انرژی می‌باشد. از زمانی که روند گرم شدن جهان سرعت گرفته، اهمیت کاهش مصرف انرژی نیز در ساختمان به مسئله قابل‌توجهی تبدیل‌شده است. روش توزیع هوا در سیستم‌های تهویه مطبوع برای سرمایش و گرمایش، علاوه بر تأثیر چشمگیر بر کیفیت هوای داخل، اثر بسزایی نیز بر روی هزینه‌ها دارد. توزیع هوا همچنین تأثیر مستقیمی بر ساماندهی فضاها، ارتفاع فضا، چیدمان داخلی و هزینه‌ی مصالح دارد.

سیستم توزیع هوای زیرسطحی یک رهیافت نسبتاً جدید در سیستم‌های تهویه جابه‌جایی با دریچه ورودی مستقر در کف است که اصطلاحاً در این پژوهش، به‌عنوان سیستم توزیع هوای زیرسطحی[1] (UFAD) نامیده می‌شود. این سیستم به‌طور گسترده در ساختمان‌های اداری و تجاری جدید به کار رفته است و جایگزین مناسبی برای سیستم‌های تهویه با توزیع هوای سنتی (سیستم تهویه اختلاطی) است. سیستم‌های تهویه با توزیع هوای زیرسطحی و توزیع هوای اختلاطی دارای واحدهای هواساز یکسانی هستند و اختلاف اصلی بین دو سیستم در مکان انتقال هوا به داخل اتاق است [1]. در سیستم-های تهویه اختلاطی، ورودی هوا در سقف مستقر است که دلیل این امر، تسهیل اختلاط کامل هوای ورودی و هوای اتاق است، اما در سیستم توزیع هوای زیرسطحی، هوا در ناحیه استقرار ساکنان فراهم می‌شود. در واقع در سیستم توزیع هوای زیرسطحی از فضای خالی بین کف فضا و کف کاذب برای انتقال هوای تهویه شده به ورودی‌های مستقر در کف استفاده می‌کنند.

در سیستم توزیع هوای زیرسطحی بر شناوری طبیعی[2] هوا جهت برطرف کردن گرما و آلاینده‌های درون فضا تکیه شده است. برخلاف سیستم توزیع

[1] Under floor air distribution

[2] Natural buoyancy

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:
Please cite this article using:
H.moslehi, H.niazmand, M.moghiman, Effect of the inlet location of Under Floor Air Distribution (UFAD) system on thermal comfort of residents in educational space, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Second International Conference on Air-Conditioning, Heating and Cooling Installations*, Vol. 16, No. 13, pp. 78-81, 2016 (in Persian فارسی)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.13.35.2]

هوای اختلاطی هیچ اتصال کوتاه برای خروج هوای تازه و اتلاف جریان در سیستم UFAD وجود ندارد. به‌طور قابل‌توجهی این سیستم در گرمایش مناسب می‌باشد زیرا انسان را از قسمت پا شروع به گرم کردن می‌کند.

در سیستم توزیع هوای زیرسطحی، توزیع هوای تهویه شده از راه دریچه-های نصب‌شده بر کف کاذب صورت می‌گیرد، همچنین امکان کنترل دما و نرخ تهویه برای هریک از ساکنان، توسط نصب دریچه‌های جداگانه قابل دست‌یابی است. در این سیستم، دمای هوای ورودی در تابستان حدود 3 تا 4درجه سانتی‌گراد بیشتر از سیستم تهویه اختلاطی بوده و سرعت هوای ورودی نسبت به سیستم‌های مشابه (سیستم‌های تهویه جابه‌جایی رایج) بالاتر، ولی نسبت به سیستم‌های تهویه اختلاطی بسیار پایین‌تر است [2].

در صورت استفاده از سیستم‌های توزیع هوای زیر سطحی در برخی از فضاها، امکان انتشار گرد و غبار از کف به هوای داخل وجود دارد به همین دلیل دریچه‌ی ورودی باید در قسمت‌های بدون گرد و غبار کف نصب شود. انتشار گرد و غبار از کف یکی از معایب این سیستم در مکان‌هایی با کاربری آموزشی، درمانی و ... می‌باشد.

2- تحقیقات پیشین

تاکنون تحقیقات متنوعی در زمینه‌ی آسایش حرارتی، کیفیت هوا و مصرف انرژی سیستم‌های توزیع هوای زیر سطحی صورت گرفته است. گورتن [3] با بررسی سیستم توزیع هوای زیرسطحی به این نتیجه رسید که به دلیل این‌که در این سیستم، تنها ناحیه سکونت افراد نیاز به تهویه دارد، این سیستم ذاتاً پتانسیل کاهش مصرف انرژی را دارد. دالی [4] به بررسی مزایای حاصل از سیستم توزیع هوای زیرسطحی پرداخت و سه مزیت اصلی برای این سیستم توزیع هوا برشمرد که عبارت‌اند از: افزایش قابلیت تغییر در دکوراسیون، جلوگیری از کوران و مصرف انرژی کمتر.

بامن و دالی [5] سیستم توزیع هوای زیرسطحی را از نظر پتانسیل عملکردی نسبت به سیستم تهویه اختلاطی، مورد بررسی قرار دادند. العجمی و العامر [6] به بررسی بهینه بودن استفاده از سیستم توزیع هوای زیرسطحی در ساختمان‌های تجاری و برای دماهای ورودی مختلف پرداختند.

کوآو چانگ [7] تأثیرات موقعیت دریچه‌های ورودی و خروجی بر آسایش حرارتی در ناحیه اسکان را مورد بررسی قراردادند. لم و چان [8] توزیع دما و حرکت هوا را در یک سالن ژیمناستیک تهویه شده در هنگ کنگ مورد بررسی قرار دادند، نتایج تحقیق یاد شده حاکی از این بود که مکان دریچه خروجی تأثیر بسیار زیادی بر طبقه‌بندی دمایی در یک سالن ژیمناستیک دارد و از این‌رو به‌طور شاخص بار سرمایی سالیانه سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اختلاف دمای بسیار زیاد در ناحیه اسکان از جمله مسائل اساسی آسایش حرارتی است که سیستم‌های توزیع هوای زیرسطحی با آن مواجه هستند، اگرچه ژانگ و همکاران [9] و فونگ و همکاران [10] نشان دادند که اگر از یک سیستم توزیع هوای زیرسطحی (که به‌درستی طراحی شده باشد) استفاده شود، می‌توان انتظار یک محیط دمایی مناسب داشت.

در تحقیقات انجام شده، تاثیر فاصله دریچه‌ی ورود هوا از افراد، بر آسایش حرارتی ساکنین سنجیده نشده است لذا در این تحقیق سعی شده است تا احساس آسایش حرارتی افراد در مکان‌های مختلف دریچه‌ی ورود هوا مورد بررسی و ارزیابی قرار بگیرد.

3- معادلات حاکم

در این تحقیق، معادلات حاکم شامل دو بخش معادلات مربوط به جریان و انتقال حرارت و معادلات مربوط به احساس حرارتی افراد می‌باشد. معادلات حاکم بر جریان پایا و غیرقابل تراکم با فرض ثابت بودن خواص سیال شامل معادلات زیر است:

معادله پیوستگی

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

معادله بقای تکانه خطی

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

معادله انرژی

$$\vec{V} \cdot \nabla T = \alpha_{\text{eff}} \nabla^2 T + S_T \quad (3)$$

$$\vec{V} = u\hat{\imath} + v\hat{\jmath} + w\hat{k} \quad (4)$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\hat{\imath} + \frac{\partial}{\partial y}\hat{\jmath} + \frac{\partial}{\partial z}\hat{k} \quad (5)$$

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

$$\vec{S} = \rho\vec{g}[1 - \beta(T - T_{\text{reff}})] \quad (6)$$

در معادله (6)، β ضریب انبساط حجمی (K^{-1}) و $\vec{g}$ بردار شتاب گرانش زمین ($m.s^{-2}$) است. همچنین، μ_{eff} ضریب لزجت مؤثر سیال است که شامل لزجت سیال و لزجت اغتشاشی سیال می‌باشد.

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (7)$$

که لزجت اغتشاشی سیال به کمک مدل دو معادله‌ای k-ε استاندارد محاسبه می‌گردد.

همچنین معادله غلظت گونه برای تعیین نحوه توزیع آلاینده‌ها در فضای نمونه به صورت رابطه (8)می‌باشد.

$$\rho\left(\vec{V} \cdot \nabla C\right) = D\nabla^2 C \quad (8)$$

که C جزء جرمی گونه و D ضریب نفوذ گونه ($m^2.s^{-1}$) است.

بخش دوم معادلات مربوط به بدن و شرایط آسایش حرارتی می‌باشد که به منظور ارزیابی احساس حرارتی افراد از مدل فنگر استفاده شده است.

4- اعتبارسنجی

به‌منظور تحلیل سیالاتی و پیش‌بینی نحوه‌ی رفتار سیستم پیش رو از حلگر عددی اپن فوم استفاده شده است. سیستم توزیع هوای زیرسطحی پیش رو با استفاده از مدل توربولانسی k-e RNG مورد تحلیل واقع‌شده است.

فضای نمونه مورد بررسی، اتاقی به ابعاد 5.16 x 3.65 x 2.27 مترمکعب می‌باشد.

یک دریچه خروجی به ابعاد 0.45 x 0.45 مترمربع در سقف و دو دریچه ی توزیع هوای ورودی به ابعاد 0.21 x 0.21 مترمربع در کف مستقر می‌باشند. تجهیزات در نظر گرفته شده در اتاق عبارت‌اند از: دو دریچه ورودی هوا، یک دریچه خروجی هوا، دو کامپیوتر، چهار لامپ، قفسه تجهیزات و دو شخص ساکن.

در شبیه‌سازی فضای نمونه، موارد زیر در نظر گرفته شده است:

شرط مرزی در نظر گرفته شده برای دیوارها از نوع دما ثابت (شرط مرزی نوع دیریکله) است. اندازه دما در مرزها با دمای واقعی سطوح اتاق حاصل از مطالعه تجربی این فضای نمونه توسط کوبایشی [11] برابر می‌باشند.

منابع تولید گرما در اتاق علاوه بر دیوارها و افراد، عبارت‌اند از: لامپ، کامپیوتر.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مدل اغتشاشی k-e، توسط داده‌های تجربی در

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.13.35.2]

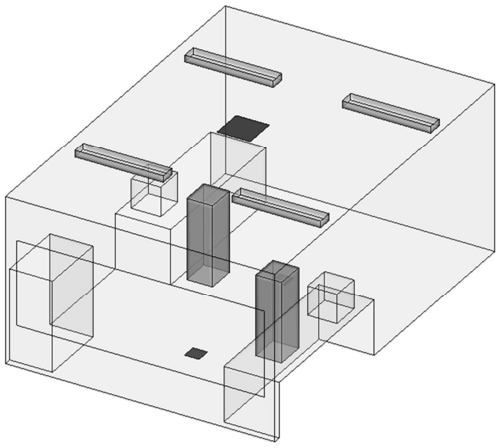

Fig. 1 Validation case

شکل 1 فضای مورد اعتبارسنجی

جدول 1 شرایط مرزی جداره‌های فضا

Table 1 Boundary conditions of space envelope

جدار	تحتانی	فوقانی	شمالی	جنوبی	غربی	شرقی
دما (℃)	25	27.4	26.8	26.8	25.8	28.6

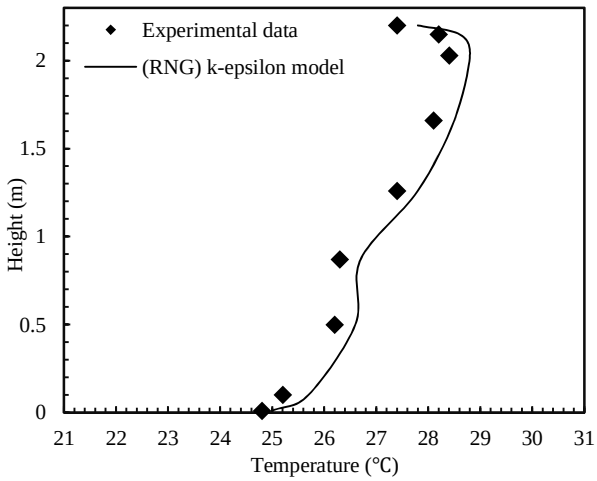

Fig. 2 The comparison of simulation results with experimental data along axis of x=-3.045, z=0.605

شکل 2 مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی در امتداد X=-3.045, Z=0.605

امتداد ارتفاع اتاق مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج فوق حاکی از دقت بالای مدل *k-e* برای مدل‌سازی سیستم توزیع هوای در فضای داخلی ساختمان می‌باشد. درصد اختلاف مقدار تجربی با مقدار پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار زیر ده درصد می‌باشد.

5- شبیه‌سازی فضای نمونه

فضای نمونه مورد بررسی، اتاقی به ابعاد 3.5 × 8 × 5.6 مترمکعب با کاربری آموزشی می‌باشد. تجهیزات در نظر گرفته شده در اتاق عبارت‌اند از: سی عدد دریچه ورودی هوا، شش دریچه خروجی هوا، هشت عدد لامپ، سی شخص ساکن. در شبیه‌سازی فضای نمونه، موارد زیر در نظر گرفته شده است:

شرط مرزی در نظر گرفته شده برای دیوارها، سقف و کف از نوع عایق می‌باشد.

نرخ جریان هوای ورودی برای تمام حالات شبیه‌سازی برابر با 0.218 مترمکعب بر ثانیه برای کل فضا (ACH=5) و دمای هوای ورودی از تمامی دریچه‌ها 18 درجه سانتی‌گراد می‌باشد (از افزایش دمای هوا بین دریچه‌ها صرف نظر شده است).

شار گرمایی هر شخص ساکن در فضای نمونه 104.68 وات و شار گرمایی لامپ 60 وات می‌باشد.

در هر چهار حالت، تمام شرایط مدل از جمله محل دریچه خروج ثابت بوده و تنها محل قرارگیری دریچه ورود هوا با شرط یکسان بودن حجم هوای ورودی به اتاق تغییر می‌کند.

در "شکل 4" تغییرات دما در راستای ارتفاع برای چهار حالت شبیه‌سازی شده ترسیم گردیده است. همان‌طور که مشخص است حالت چهار دارای بیشترین تغییرات دما در راستای ارتفاع اتاق و حالت سه کمترین تغییرات دمایی را در راستای ارتفاع اتاق دارا می‌باشد.

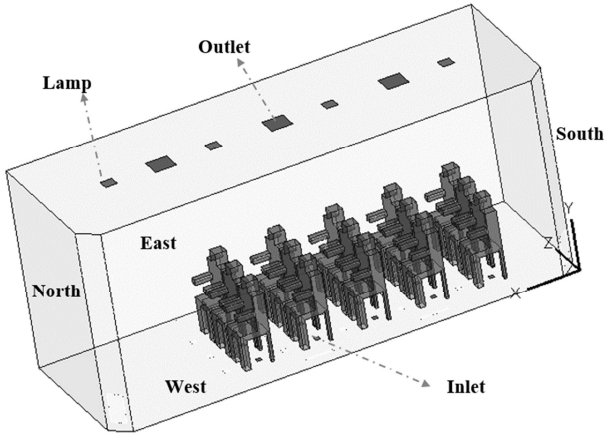

Fig. 3 The axisymmetric case study with educational application

شکل 3 فضای نمونه متقارن مورد بررسی با کاربری آموزشی

جدول 2 حالت‌های مورد بررسی سیستم توزیع هوای زیر سطحی

Table 2 Under Floor Air Distribution system study cases

حالت	تعداد دریچه ورودی	ابعاد دریچه ورودی (cm)	محل قرارگیری دریچه ورودی	سرعت هوای ورودی (m/s)
Model 1	30 عدد	8.5×8.5	زیر صندلی	1
Model 2	30 عدد	8.5×8.5	جلوی پای افراد	1
Model 3	10 عدد	46.6×5	داخل راهرو	0.93
Model 4	4 عدد	26.1×50	روی دیوار	0.42

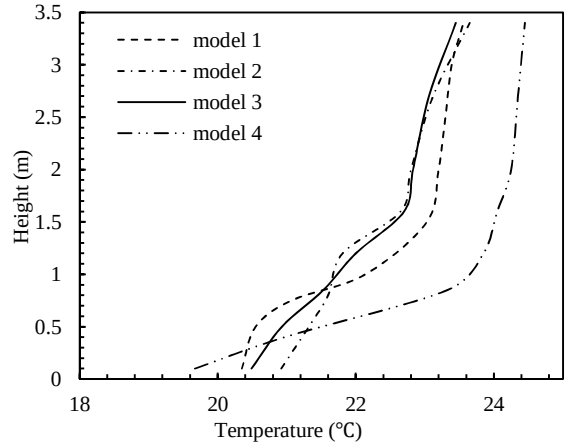

Fig. 4 The measured and simulated temperatures

شکل 4 تغییرات دما در راستای ارتفاع اتاق

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.13.35.2]

شاخص احساس حرارتی افراد (PMV)، بیانگر احساس حرارتی افراد نسبت به محیط است. بر این اساس، این شاخص طبق مقیاس پیشنهاد شده توسط استاندارد ایزو 7730، محدوده PMV بین 0.5- تا 0.5 را شامل می‌شود. مقیاس پیشنهاد شده توسط اشری نیز اعدادی در بازه 3- تا 3+ را مجاز می‌داند و هر عدد صحیح در این بازه بیانگر یک احساس حرارتی تعریف شده است. به طوری که 3+ بیان کننده احساس حرارتی داغ، 2+ گرم، 1+ کمی گرم، 0 خنثی، 1- کمی خنک، 2- خنک و 3- سرد می‌باشد.

مطابق جدول 3، در حالت 2 شاخص آسایش حرارتی 0.16- و همچنین در حالت 4 شاخص آسایش حرارتی 0.35- می باشد.

شاخص PPD برخلاف شاخص میانگین آراء افراد نسبت به شرایط گرمایی محیط، تنها جهت بررسی آراء انفرادی افراد (و نه آراء گروه بزرگ) مورد بررسی قرار می‌گیرد. روابط موجود جهت محاسبه کمی این شاخص به صورت تابعی از شاخص میانگین آراء افراد نسبت به شرایط گرمایی محیط است. این شاخص درصد افرادی را که احساس سرما یا گرما می‌کنند به‌گونه‌ای که احساس راحتی نمی‌کنند را محاسبه می‌نماید. طبق پیشنهاد استاندارد ایزو 7730 مقدار مناسب این شاخص، مقادیر کمتر یا مساوی با 15 درصد می‌باشد.

مطابق جدول زیر بیشترین احساس نارضایتی در محدوده سکونت مربوط به حالت چهار و کمترین احساس نارضایتی مربوط به حالت دو می‌باشد؛ مانند حالت قبل بیشترین انحراف معیار مربوط به حالت اول می‌باشد.

6- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی اثرات محل قرارگیری دریچه‌های ورود بر آسایش حرارتی افراد و مصرف انرژی در یک اتاق با کاربری آموزشی که از سیستم توزیع هوای زیرسطحی استفاده شده، پرداخته شده است. به این منظور دریچه ورودی هوا در چهار حالت مقابل صندلی، زیر صندلی، داخل راهرو و روی دیوار با دبی ورودی یکسان قرار داده شد و تأثیر این مکان بر شاخص آسایش حرارتی و نارضایتی افراد مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج حاکی از آن است که برای حالتی که دریچه زیر صندلی قرار گرفته است دارای دمای 21.7 درجه سانتی‌گراد در محدوده سکونت افراد می‌باشد. در این حالت میانگین شاخص آسایش حرارتی افراد 0.3- می‌باشد که در محدوده مجاز آسایش حرارتی برای فصل تابستان قرار دارد همچنین نارضایتی افراد در محدوده سکونت افراد 9.5 درصد می‌باشد که طبق استاندارد اشره در محدوده مجاز قرار گرفته است.

جدول 3 توزیع PMV در محدوده سکونت

Table 3 PMV distribution at the occupied zone

حالت	میانگین	انحراف معیار
Model 1	-0.3	0.37
Model 2	-0.16	0.23
Model 3	-0.21	0.21
Model 4	-0.35	0.32

جدول 4 توزیع PPD در محدوده سکونت

Table 4 PPD distribution, at the occupied zone

حالت	میانگین	انحراف معیار
Model 1	9.5	9.8
Model 2	6.5	5
Model 3	6.9	2.4
Model 4	9.7	7

7- مراجع

[1] T. S. Lim, L. Schaefer, J. T. Kim, G. Kim, Energy benefit of the underfloor air distribution system for reducing air-conditioning and heating loads in buildings, *Indoor and Built Environment*, Vol. 21, No. 1, pp. 62-70, 2012.

[2] F. Bauman, T. Webster, Outlook for underfloor air distribution, *ASHRAE journal*, Vol. 43, No. 6, pp. 18, 2001.

[3] H. Bagheri, R. Gorton, Verification of stratified air-conditioning design, *ASHRAE Transactions*, Vol. 93, No. 2, pp. 10, 1987.

[4] A. Daly, Underfloor air distribution: lessons learned, *ASHRAE journal*, Vol. 44, No. 5, pp. 21, 2002.

[5] F. S. Bauman, A. Dally, *Underfloor air distribution (UFAD) design guide*: Amer Soc of Electroplated Plastics, 2003.

[6] A. Alajmi, W. El-Amer, Saving energy by using underfloor-air-distribution (UFAD) system in commercial buildings, *Energy conversion and management*, Vol. 51, No. 8, pp. 1637-1642, 2010.

[7] J.-Y. Kuo, K.-C. Chung, The effect of diffuser's location on thermal comfort analysis with different air distribution strategies, *Journal of Building Physics*, Vol. 22, No. 3, pp. 208-229, 1999.

[8] J. C. Lam, A. L. Chan, CFD analysis and energy simulation of a gymnasium, *Building and Environment*, Vol. 36, No. 3, pp. 351-358, 2001.

[9] Z. Lin, T. Chow, K. Fong, Q. Wang, Y. Li, Comparison of performances of displacement and mixing ventilations. Part I: thermal comfort, *International journal of refrigeration*, Vol. 28, No. 2, pp. 276-287, 2005.

[10] M. Fong, Z. Lin, K. Fong, T. T. Chow, T. Yao, Evaluation of thermal comfort conditions in a classroom with three ventilation methods, *Indoor Air*, Vol. 21, No. 3, pp. 231-239, 2011.

[11] N. Kobayashi, Q. Chen, Floor-supply displacement ventilation in a small office, *Indoor and Built Environment*, Vol. 12, No. 4, pp. 281-291, 2003.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.13.35.2]