

شبیه‌سازی عددی سرمایش تبخیری در یک ساختمان مسکونی و بررسی شرایط آسایشی آن

قاسم حیدری‌نژاد^۱، جعفر اسماعیلیان^۲، سجاد غرضی^۳، شهرام دلفانی^۴

^۱ دانشیار، دانشگاه تربیت مدرس؛ Gheidari@modares.ac.ir

^۲ محقق، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن؛ Esmaeleian@BHRC.ac.ir

^۳ محقق، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن؛ Gharazi@BHRC.ac.ir

^۴ استادیار، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن؛ Delfani@BHRC.ac.ir

چکیده

جریان هوا در یک ساختمان مسکونی شبیه‌سازی شده و شرایط آسایش آن مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور ابتدا چندین مدل توربولانس دو معادله‌ای در اعداد ارشمیدس مختلف بررسی شده و نتایج آنها با کارهای انجام شده قبلی مقایسه گردیده و بر اساس آن، مدل توربولانس مناسب انتخاب شده است. پس از آن با استفاده از مدل منتخب، ساختمان مورد نظر همراه با سیستم سرمایش تبخیری شبیه‌سازی شده و با استفاده از شاخص PMV، شرایط آسایشی آن مورد بررسی قرار گرفته است. در بررسی‌ها عواملی همچون مکان دریچه‌ها، ظرفیت سیستم سرمایش و جهت وزش جریان، در نظر گرفته شده است و توصیه‌هایی جهت کارکرد مطلوب سیستم سرمایش ارائه گردیده است.

کلمات کلیدی: حل عددی، جریان آشفته، سرمایش تبخیری، شرایط آسایش

مقدمه

حدود یک سوم کل انرژی اولیه جهان در بخش ساختمان مصرف می‌شود. این انرژی توسط تجهیزات الکتریکی و مکانیکی برای رسیدن به آسایش و ایجاد محیط مناسب برای زندگی و فعالیت ساکنان مصرف می‌شود. در این میان تجهیزات گرمایشی، سرمایشی و سیستم‌های تهویه مطبوع بزرگترین مصرف‌کنندگان انرژی هستند. معمولاً افراد مختلف ۸۰٪ الی ۹۰٪ از وقت خود را در فضاهای داخلی به سر می‌برند. استفاده از سیستم‌های تهویه مطبوع این اجازه را می‌دهد که یک محیط با توزیع دما، سرعت هوا و میزان رطوبت مناسب ایجاد کنیم. با افزایش نگرانی‌ها در مورد بهینه‌سازی انرژی، تلاش‌های زیادی برای کاهش انرژی مصرفی در سیستم‌های تهویه مطبوع انجام شده است، برای مثال، استفاده از عایق‌های حرارتی و درزبندی پوسته ساختمان باعث کاهش بارهای حرارتی و استفاده از سایبان باعث کاهش بارهای برودتی ساختمان می‌شود.

طراحی و استفاده نامناسب از سیستم‌های تهویه مطبوع نه تنها انرژی مصرفی ساختمان را افزایش می‌دهد بلکه باعث کاهش آسایش دمایی و مشکلات عدم کیفیت هوای داخل می‌شود. پیش‌بینی جریان هوا در داخل ساختمان می‌تواند اطلاعات بسیار مفیدی در اختیار مهندسين برای طراحی بهینه سیستم‌های تهویه مطبوع قرار دهد. همچنین

توسعه یک روش قابل اطمینان و مقرون به صرفه برای این پیش‌بینی بسیار ضروری می‌باشد [۱].

در این زمینه تحقیقات متعددی صورت گرفته است. هنکز و همکارانش [۲] از مدل $k - \epsilon$ استاندارد و چندین مدل $k - \epsilon$ رینولدز پایین، برای شبیه‌سازی جریان هوا در یک محفظه مربعی با دیوارهای گرم با عدد رایلی 10^{14} استفاده کرده‌اند. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی حاکی از آن است که مدل‌های رینولدز پایین جواب‌های دقیق‌تری نسبت به مدل استاندارد برای انتقال حرارت از دیوارها ارائه می‌کنند. چن [۳] از مدل‌های مختلف تنش رینولدزی^۱ برای محاسبه جابجایی طبیعی، اجباری و ترکیبی استفاده نمود. نتایج مدل‌سازی‌ها نشان دادند که کارایی روش‌های مختلف تنش رینولدزی در شبیه‌سازی جریان هوای اتاق یکسان است. نتایج مدل‌سازی چن با مقادیر متوسط جریان بدست آمده از اندازه‌گیری‌های تجربی همخوانی داشت، ولی مقادیر توربولانس بخوبی پیش‌بینی نشده بودند. هانجالیک [۴] و همکارانش از مدل‌های سه‌معادله‌ای و چهار معادله‌ای و مدل رینولدز پایین تصحیح‌شده برای محاسبه جریان هوا در اتاق‌های مختلف خالی و با پارتیشن استفاده نمودند. عدد رایلی در مطالعات آنها حدود 10^{10} - 10^{12} بود که با عدد رایلی در فضاهای داخلی واقعی مطابقت دارد. نتایج دما و سرعت متوسط بدست آمده از مدل با مقادیر تجربی همخوانی خوبی داشت. لیپینگ و هین [۵] از نرم افزار فلونت استفاده کردند و عواملی همچون نوع تهویه، مکان پنجره و اندازه پنجره را برای رسیدن به حالت بهینه بررسی کردند. کاوگیك [۶] و همکارانش با استفاده از نرم افزار فلیر^۲ یک سالن تأثر را شبیه‌سازی کردند و نحوه توزیع شاخص PPD و آلاینده‌ها را مطالعه نمودند.

در این مقاله چندین مدل توربولانس دو معادله‌ای در اعداد ارشمیدس مختلف بررسی شده و نتایج آن با کارهای انجام شده قبلی مقایسه گردیده و مطابق آن مدل توربولانس مناسب انتخاب شده است. با استفاده از مدل منتخب، یک ساختمان مسکونی همراه با سیستم سرمایش تبخیری، شبیه‌سازی شده و با استفاده از شاخص PMV شرایط آسایشی آن مورد بررسی قرار گرفته است.

برای شبیه‌سازی‌ها از نرم افزار Airpak2.0 [۷] و از کامپیوترهایی با CPU Intel core 2 due 2.66 Ghz و رم با ظرفیت ۴ GB استفاده شده است.

^۱ Reynolds Stress Method (RSM)
^۲ FLAIR

انتخاب مدل توربولانس مناسب

جریان هوا در اتاق را می‌توان بر اساس نوع نیروی محرک به جریان جابجایی اجباری، جابجایی طبیعی و جابجایی ترکیبی تقسیم نمود. در جریان جابجایی اجباری نیروی محرک فشار، در جریان جابجایی طبیعی نیروی شناوری و در جریان ترکیبی هر دو نیروی محرک فشار و شناوری نقش موثر را بر عهده دارند.

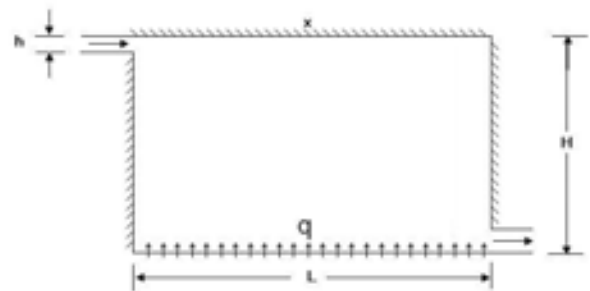
معمولاً در داخل ساختمان گرادیانهای دما در نتیجه انتقال حرارت از طریق دیوارها و پنجره‌ها، تولید گرما توسط افراد یا گرم‌کننده‌ها یا به واسطه یک سیستم هوایی که هوا را با دمای متفاوت از دمای اتاق به فضای داخلی تخلیه می‌کند، به وجود می‌آیند. انتقال انرژی به اتاق بر روی میدان سرعت تاثیر می‌گذارد و نیروهای ارشمیدس غیر یکنواخت به وجود می‌آیند که هم بر سرعت میانگین و هم بر شدت توربولانس تاثیر می‌گذارند. تاثیر نیروی ارشمیدس معمولاً در شبیه‌سازی‌های تهویه مطبوع با یک عدد ارشمیدس کلی بیان می‌شود:

$$Ar = \frac{\beta g h \Delta T_0}{U_0} \quad (1)$$

که در این رابطه β ضریب انبساط حرارتی، ΔT_0 اختلاف دماهای ورودی و خروجی و U_0 سرعت ورودی می‌باشد.

در این مقاله به منظور انتخاب روش مناسب برای تحلیل جریان دما در فضای ساختمان از یک مدل ترکیبی استفاده می‌شود که اثرات سرعت و دما را به صورت همزمان نشان می‌دهد.

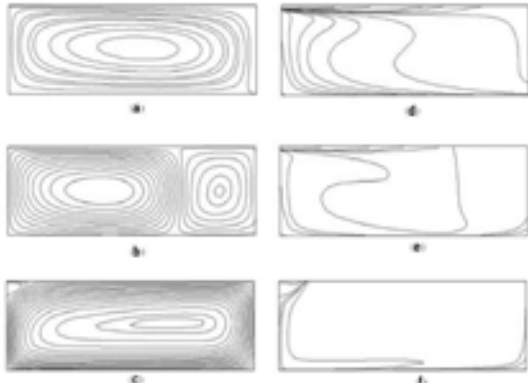
هندسه مساله در شکل ۱ نشان داده شده است. هوا از قسمت بالای دیوار سمت چپ با سرعت یکنواخت وارد می‌شود و از قسمت پایین دیوار سمت راست خارج می‌شود. همه دیوارها به جز دیوار پایینی عایق هستند. به دیوار پایینی شار گرمای یکنواخت وارد می‌شود.



شکل ۱: هندسه و شرایط مرزی مساله

همانطور که دیده می‌شود، فضای در نظر گرفته شده در شکل (۱)، ترکیبی از جریان جابجایی اجباری و طبیعی را شامل می‌شود که با تغییر سرعت جریان ورودی و یا تغییر شار گرمای وارده به دیوار پایینی می‌توان اثرات هر یک را افزایش یا کاهش داد و محدوده وسیعی از جریانهای داخلی را مدل‌سازی نمود. برای نشان دادن اثرات افزایش گرادیان دما بر جریان و انتخاب روش مناسبی که بتواند این اثرات را به درستی شبیه‌سازی کند، از پنج مدل توربولانس شامل $k - \epsilon$ ، $k - \epsilon$ ، $k - \epsilon$ ، $k - \omega$ و $k - \omega$ استفاده شده است.

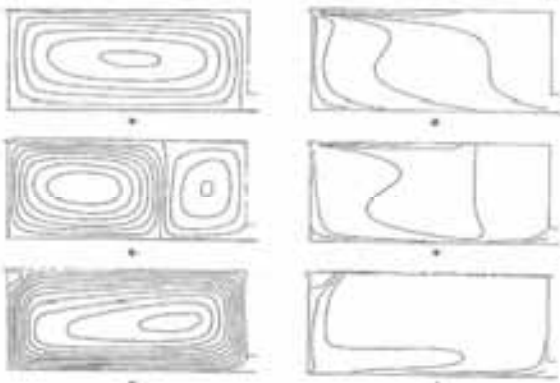
نتایج حاصل از روشهای فوق با کارهای تجربی و عددی انجام شده در گذشته مقایسه گردید که بر طبق نتایج این مقایسه روش $k - \epsilon$ و $k - \epsilon$ Realizable با در نظر گرفتن کامل نیروهای ارشمیدسی بهترین جوابها را ارائه نمودند. برای حل‌ها از روش حجم محدود و از فرضیه بوزینسک استفاده شده است. در ادامه، نتایج حاصل از روش $k - \epsilon$ ارائه شده است. آرایش خطوط جریان و خطوط همدمای همدمای برای مقادیر $L/H=3.0$ ، $h/H=0.017$ و $Re=7350$ و مقادیر مختلف عدد ارشمیدس در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: آرایش خطوط جریان (a-c) و خطوط همدمای همدمای (d-f) برای مقادیر $L/H=3.0$ ، $h/H=0.017$ و $Re=7350$ و مقادیر مختلف عدد ارشمیدس: (a) 8×10^{-3} ، (b) 2×10^{-2} ، (c) 8×10^{-2}

همانطوری که در شکل ۲ دیده می‌شود، افزایش در عدد ارشمیدس موجب افزایش در قدرت گردابه اصلی می‌شود تا زمانی که نیروهای ارشمیدسی موجب به وجود آمدن یک گردابه در جهت مخالف گردابه اصلی می‌شوند. با افزایش عدد ارشمیدس این گردابه رشد می‌کند تا اینکه به طور کلی یک گردابه در جهت مخالف گردابه اولیه، کل فضا را اشغال می‌کند.

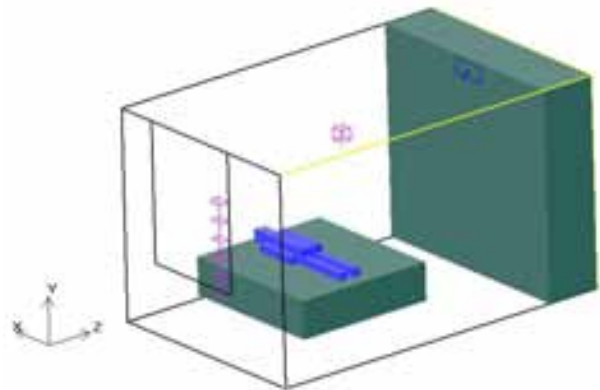
نتایج به دست آمده توسط نیلسن [۸] در شکل ۳ آورده شده است. همانطوری که مشاهده می‌شود، جوابهای بدست آمده تطابق بسیار خوبی دارد و فرایند تغییر جریان با افزایش عدد ارشمیدس کاملاً در دو حل یکسان است.



شکل ۳: آرایش خطوط جریان (a-c) و خطوط همدمای همدمای (d-f) برای مقادیر $L/H=3.0$ ، $h/H=0.017$ و $Re=7350$ و مقادیر مختلف عدد ارشمیدس: (a) 8×10^{-3} ، (b) 2×10^{-2} ، (c) 8×10^{-2} بدست آمده توسط حل نیلسن [۸]

نتایج حاصل از مدل‌سازی

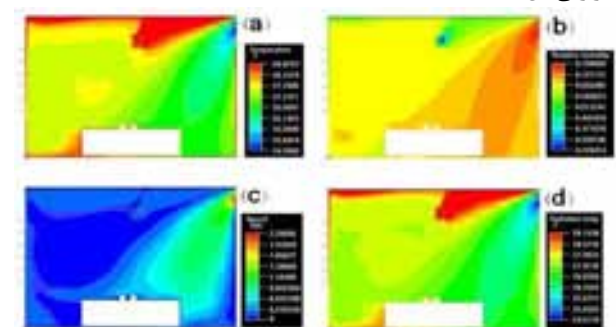
به منظور شبیه‌سازی، ساختمان مورد نظر توسط نرم‌افزار HAP-4.1 [۹] مورد تحلیل قرار گرفت و بار سرمایشی آن محاسبه گردید. بر اساس بارهای محاسبه شده طراحی سیستم سرمایشی ساختمان انجام شد. با توجه به روند طراحی و روش شبیه‌سازی انتخابی در قسمتهای قبل، ابتدا فضاهای مسکونی ساختمان به طور جداگانه و سپس، کل ساختمان شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از آن، ارزیابی می‌شود. شکل ۴ مدل یکی از دو اتاق خواب را نشان می‌دهد.



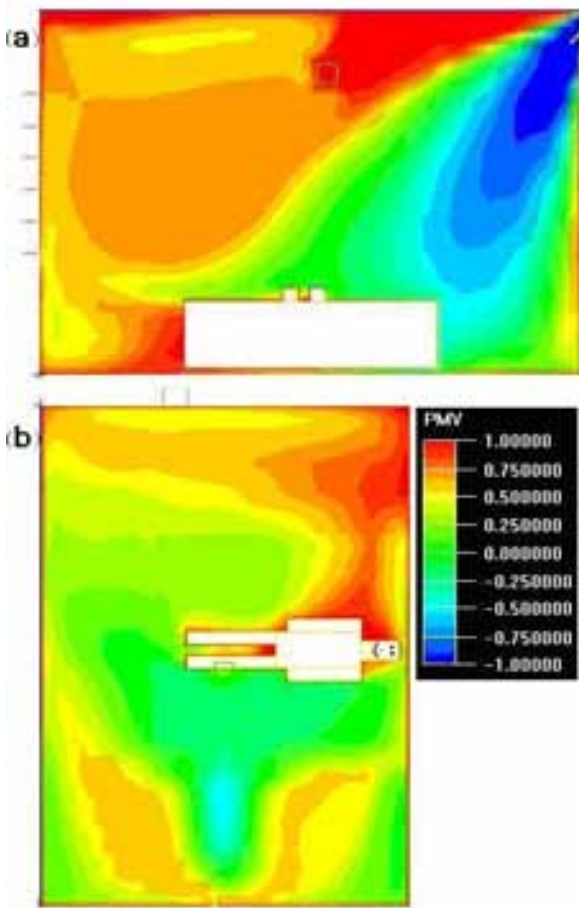
شکل ۴: مدل اتاق خواب شماره (۱)

این اتاق با ابعاد $2/75m \times 4/84m \times 3m$ درجه کانالی با مساحت $0/46m \times 2/05m$ داشته و لامپی به عنوان منبع روشنایی در آن بکار می‌رود. همچنین، پنجره‌ای به ابعاد $1/45m \times 1/83m$ ضلع شمالی اتاق وجود دارد.

دمای خشک و تر منطقه‌ای که واحد مسکونی در آن واقع است، به ترتیب $34^{\circ}C$ و $22/2^{\circ}C$ بوده و کولری با CFM ۴۲۰ و راندمان ۸۰٪، دمای خروجی دریچه را به $24/5^{\circ}C$ و رطوبت نسبی ۸۰٪ می‌رساند. شکل ۵ تغییر شاخصهای محیطی شامل دما، رطوبت نسبی، سرعت و دمای تشعشعی را در صفحه $x = 1/5$ نشان می‌دهد. در این حالت، زاویه وزش هوای خروجی از دریچه کولر 45° ، شخص در حال سکون و پوشش وی به گونه‌ای در نظر گرفته شده که مقاومت حرارتی آن $0/55 clo$ است.



شکل ۵: پروفیل تغییر پارامترهای محیطی در صفحه $x = 1/5$ شامل (a) دما، (b) رطوبت، (c) سرعت هوا و (d) دمای تشعشعی

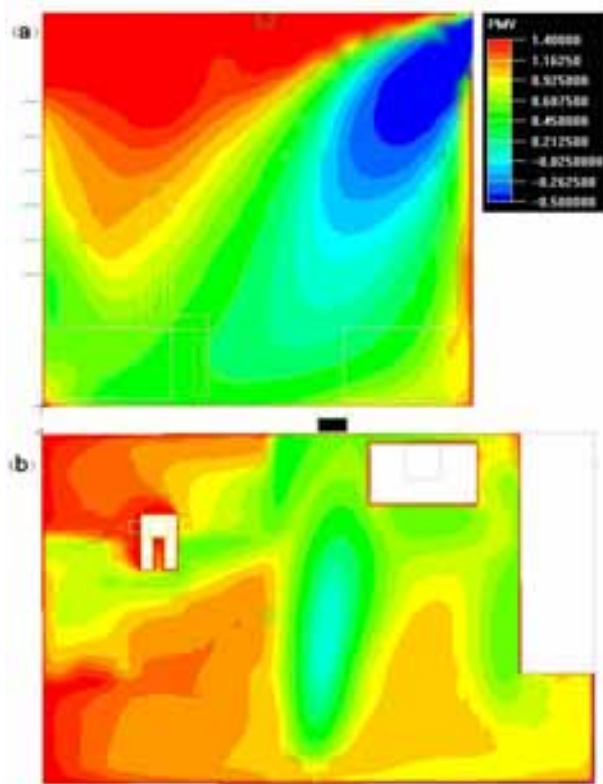


شکل ۶: پروفیل تغییر شاخص PMV برای زاویه وزش 45° در صفحه (a) $x = 1/5$ و (b) $y = 0/6$

بر اساس شاخصهای محیطی نشان داده شده در شکل ۵ و میزان فعالیت و پوشش شخص، توزیع شاخص PMV به دست آمده و در شکل ۶ بازه تغییرات آن در $x = 1/5$ و $y = 0/6$ نشان داده شده است. این شکل معلوم می‌کند که تقریباً در نیمی از اتاق شرایط موردنظر از آسایش وجود ندارد.

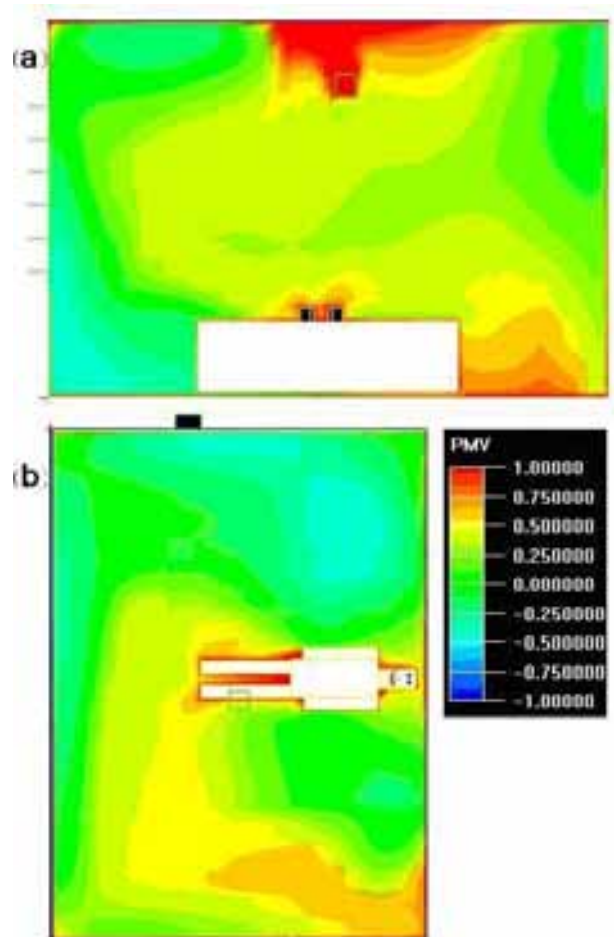
همانطور که دیده شد در حالت قبل، شرایط آسایش به طور مناسب در اتاق فراهم نشد. برای به دست آوردن شرایط بهینه در اتاق، مکان دریچه و زاویه وزش آن برای حالت‌های مختلف تغییر داده شد که بهترین حالت برای قرارگیری دریچه در $x = 2$ و زاویه وزش 60° حاصل شد ولی برای به دست آمدن بهترین شرایط در حالت فوق مقدار CFM خروجی دریچه به میزان ۲۰ درصد افزایش داده شد که نتایج حاصل از آن در شکل ۷ نشان داده شده است. در واقع در فضاهای کوچک، به دلیل اثر دمای تشعشعی دیوارها مقدار CFM طراحی، ناکافی بوده و بایستی درصدی به مقدار طراحی برای غلبه بر این اثر افزوده شود.

شکل ۹ تغییرات شاخص PMV را در $x = 2/3$ و $y = 0/6$ نشان می‌دهد. مجدداً در ناحیه مجاور دریچه و قسمت پایینی اتاق، شاخص، مقدار مناسبی داشته و در ناحیه نزدیک به سقف که سر شاخص نیز در آن قرار گرفته، شاخص در بازه‌ای حدود $1/16$ تا $1/4$ است که از محدوده مناسب برای حصول آسایش حرارتی تجاوز می‌کند.



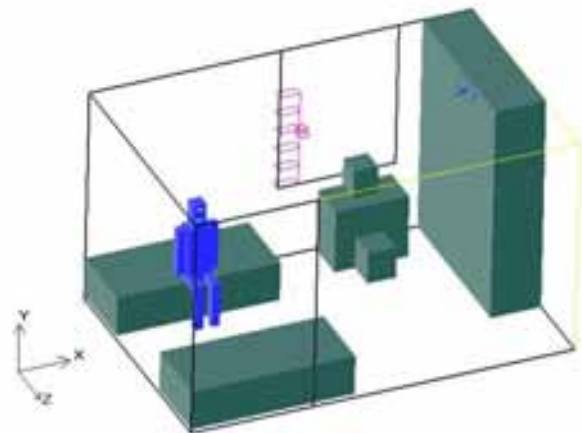
شکل ۹: پروفیل تغییر شاخص PMV برای زاویه وزش 45° در صفحه (a) $x = 2/3$ و (b) $y = 0/6$

همانطور که دیده شد در حالت قبل، شرایط آسایش به طور مناسب در اتاق فراهم نشد. برای به دست آوردن شرایط بهینه در اتاق، مکان دریچه و زاویه وزش آن برای حالت‌های مختلف تغییر داده شد و هیچ وضعیت مناسبی برای حالتی که دریچه در ضلع بزرگتر اتاق نصب شده بود حاصل نگردید. دریچه به ضلع کوچکتر فضا انتقال داده شد و بهترین نتایج برای نصب دریچه در $Z=2/2$ و زاویه وزش 60° با افزایش ۲۰ درصدی CFM به دست آمد که نتایج حاصل از آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



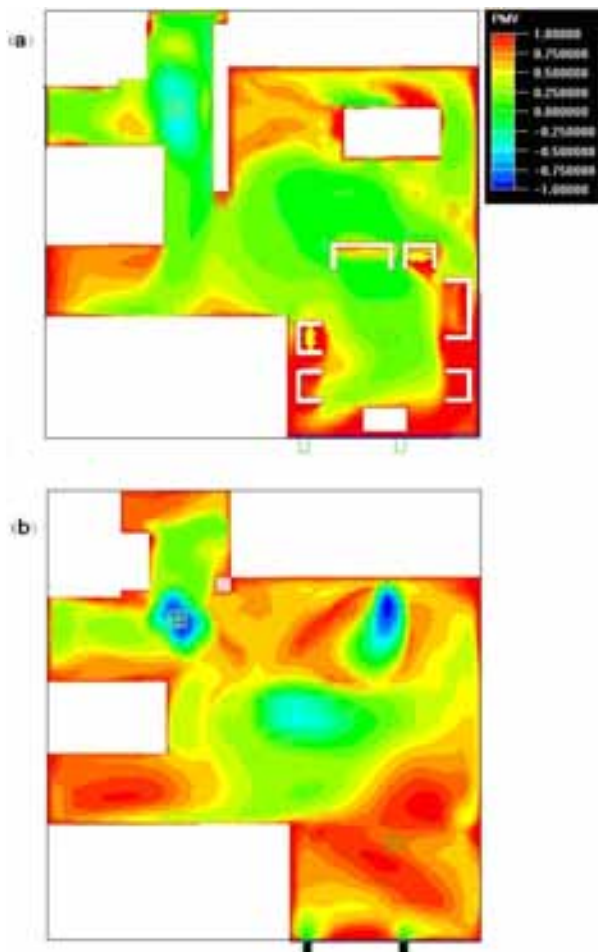
شکل ۷: پروفیل تغییر شاخص PMV برای زاویه وزش 60° در صفحه $x = 2$ در $x = 1/5$ و $y = 0/6$

شکل ۸ مدل اتاق خواب شماره (۲) را نشان می‌دهد. این اتاق با ابعاد $2/75m \times 3m \times 4/7m$ ، دریچه کانالی با مساحت $0/46m \times 0/205m$ داشته و لامپی به عنوان منبع روشنایی در آن به کار می‌رود. همچنین، پنجره‌ای به ابعاد $1/83m \times 1/44m$ در ضلع شمالی و یک کمد دیواری نیز در اتاق تعبیه شده است. کامپیوتری نیز به عنوان منبع گرمایی در اتاق وجود دارد.



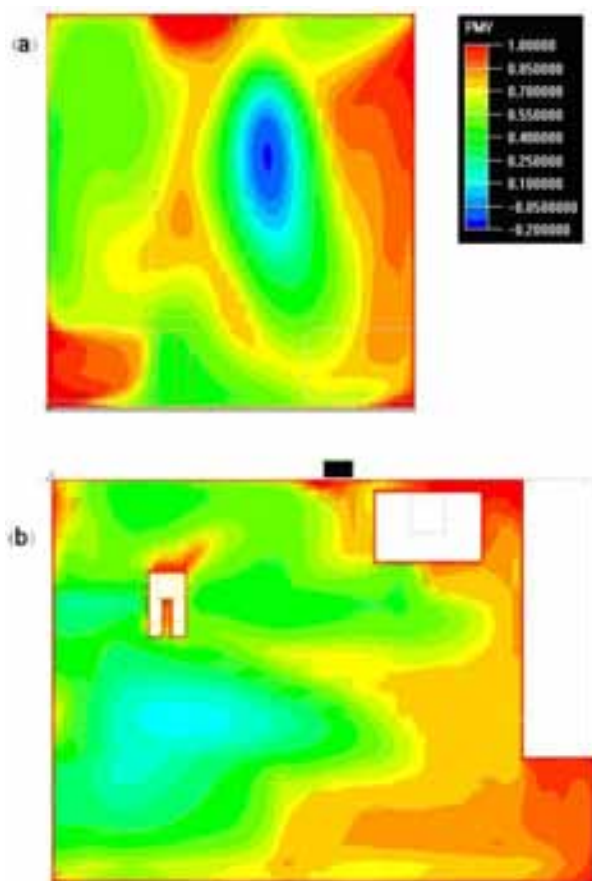
شکل ۸: مدل اتاق خواب شماره (۲)

شکل ۱۲ تغییرات شاخص PMV را در $y = 0/6$ و $y = 1/7$ نمایش می‌دهند. نتایج بدست آمده در $y = 0/6$ حاکی از آن است که آسایش حرارتی در مناطق اطراف مبلمانها، میز نهارخوری و ورودی خانه وجود ندارد؛ این شرایط نامناسب در $y = 1/7$ ، شدت بیشتری دارد.



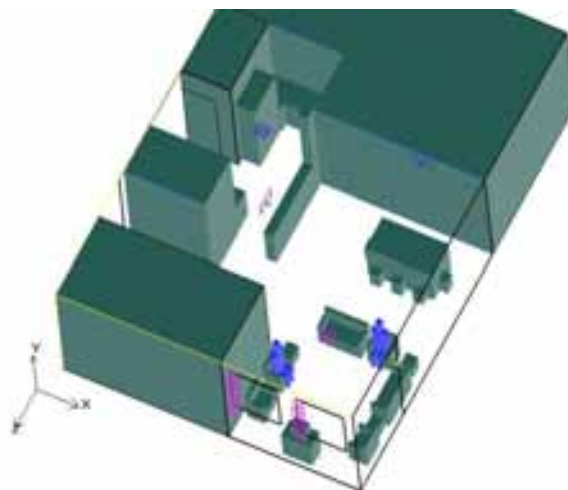
شکل ۱۲: پروفیل تغییر شاخص PMV برای حالت طراحی در آشپزخانه و پذیرایی در $y=0/6$ (a) و $y=1/7$ (b)

برای بهبود شرایط آسایش، زاویه وزش دریچه سقفی آشپزخانه به 60° افزایش داده شد و به منظور گردش هر چه بیشتر فضا پنجره سمت راست ضلع جنوبی فضا بسته شد و پنجره سمت چپ به میزان دوبرابر حالت قبل باز شد. نتایج حاصل از این تغییرات در شکل ۱۳ نشان داده شده است که تاثیر مثبت این تغییرات بر توزیع آسایش را نشان می‌دهد. در این شکل دیده می‌شود که با باز کردن پنجره قرار گرفته در گوشه، امکان گردش هوای مناسب در نقاط کور اتاق حاصل شد و شاخص PMV به مقدار قابل توجهی به شرایط آسایش نزدیک شد.

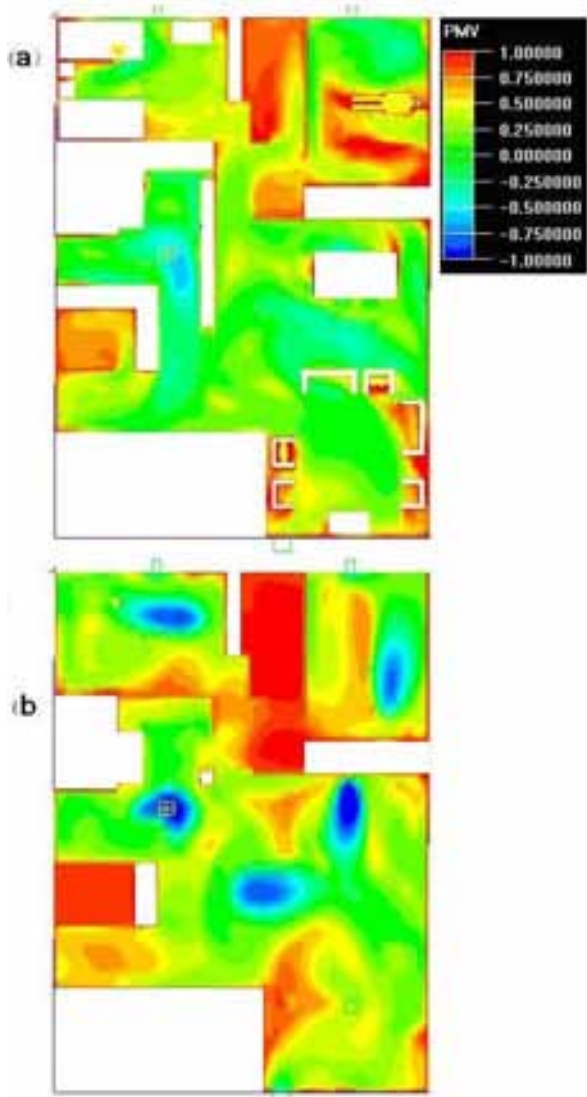


شکل ۱۰ پروفیل تغییر شاخص PMV برای زاویه وزش 60° در صفحه $z=2/2$ (a) و $y=0/6$ (b)

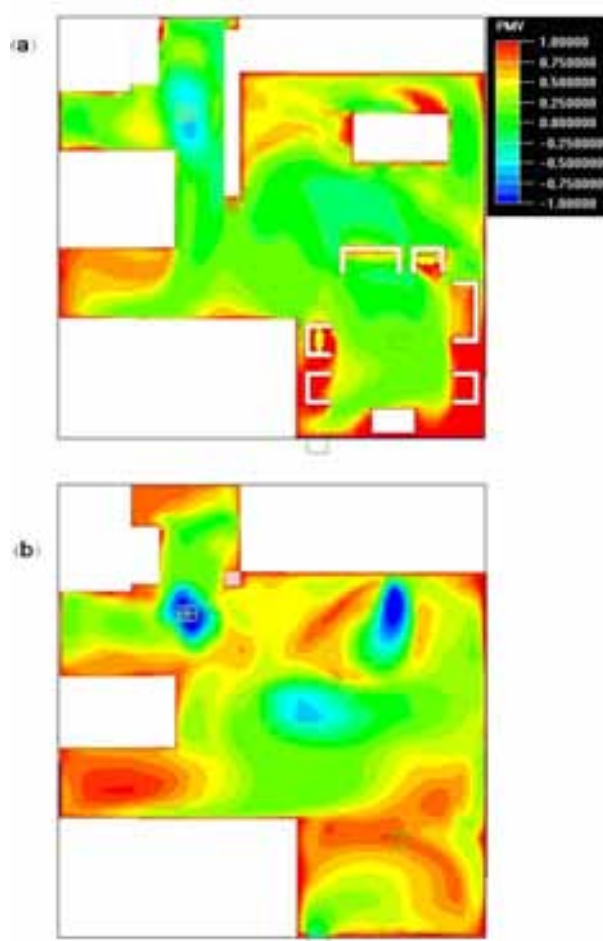
شکل ۱۱ مدل پذیرایی واحد مسکونی را نشان می‌دهد؛ از آنجا که آشپزخانه باز بوده و به فضای پذیرایی وصل می‌شود، کل مجموعه پذیرایی و آشپزخانه با هم مدل شده است.



شکل ۱۱: مدل آشپزخانه و پذیرایی (۲)

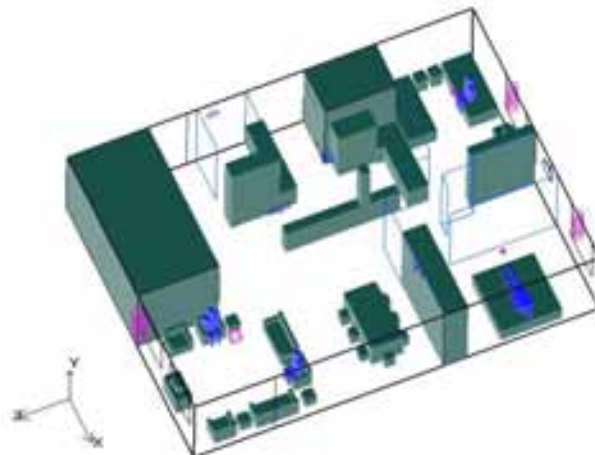


شکل ۱۳: پروفیل تغییر شاخص PMV برای حالت بهینه در کل ساختمان در $y=0.16$ (a) و $y=0.17$ (b)



شکل ۱۴: پروفیل تغییر شاخص PMV برای حالت بهینه در آشپزخانه و پذیرایی در $y=0.16$ (a) و $y=0.17$ (b)

تا اینجا نحوه حصول آسایش حرارتی در قسمت‌های مختلف واحد مسکونی مورد نظر بررسی شد. شکل ۱۴ مدل کلی این واحد مسکونی را برای همه طبقات ساختمان نشان می‌دهد. شرایط اتاق‌ها، پذیرایی و آشپزخانه، مشابه حالت بهینه مدل‌های جداگانه آنهاست. همانطور که تغییرات PMV نشان می‌دهد، شرایط آسایش حرارتی تقریباً در کل واحد به جز حمام و سرویس بهداشتی که تجهیزات تهویه مطبوع ندارند، تامین شده است.



شکل ۱۴: مدل کل ساختمان

جمع‌بندی

در ابتدا روش‌های مختلف مدل‌سازی جریان توربولانس مورد استفاده قرار گرفت و نتایج حاصل از آنها با کارهای قبلی مقایسه گردید که طبق نتایج این مقایسه روش $k - \epsilon$ RNG با در نظر گرفتن کامل نیروهای ارشمیدسی در سه حالت جریان جابجایی اجباری، جابجایی طبیعی و جابجایی ترکیبی بهترین جوابها را ارائه نمود. پس از آن یک ساختمان واقعی با سیستم سرمایش تبخیری مدل شد و عواملی همچون دبی هوای خروجی از کولر، زاویه وزش و مکان دریچه‌ها و مکان خروجی‌های هوا از ساختمان بررسی گردید.

با توجه به اینکه شبیه‌سازی‌ها برای یک ساختمان خاص انجام می‌شد نمی‌توان نتایج حاصل را به طور کلی برای هر ساختمانی صحیح دانست ولی با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده می‌توان به نتایج کلی زیر اشاره نمود:

- بهترین زاویه وزش برای کولرهای آبی مخصوصاً در فضاهای کوچک بین ۶۰ تا ۷۰ درجه نسبت به خط قائم می‌باشد.

Building and Environment, Vol 42, pp. 4006-4015, 2007.

[6] Kavgic, M, Mumovic, D., Stevanovic, Z, Young, A., Analysis of thermal comfort and indoor air quality in a mechanically ventilated theatre, Energy and Buildings, Vol 40 , pp. 1334-1343 ,2008.

[7] Airpak user's guide version 2.0 Fluent Inc.

[8] Nielsen P. V., Restivo A., Whitelaw J. H., , Bounancy Affected flows in ventilated rooms, Numerical heat transfer, Vol 2, pp. 115-127, 1979

[9] HAP user's guide version 4.1 Carrier Inc.

- بهتر است دریچه‌های کولر در ضلع کوچکتر فضا نصب شوند به طوری که با پرتاب خود بتوانند بعد بزرگتر فضا را تحت پوشش قرار دهند.
- استفاده از دریچه‌های سقفی در فضاهایی که امکان داشته باشد، بسیار مناسب بوده و به توزیع سرعت و بهبود شرایط آسایش کمک می‌کنند.
- در فضاهای کوچک اثر دمای تشعشعی دیوارها بر آسایش افراد زیاد است و بهتر است برای این گونه فضاها مقدار CFM کولر تا ۲۰ درصد بیشتر از مقدار حاصل از طراحی در نظر گرفته شود.
- هنگام استفاده از کولرهای آبی بهتر است پنجره‌ها یا پنجره‌هایی در دورترین نقطه ممکن نسبت به دریچه‌ها باز باشند تا هوا بتواند بیشترین مسیر را در طول فضا طی کرده و به حصول شرایط آسایش کمک کند.

فهرست علائم

Ar	عدد ارشمیدس
H	ارتفاع اتاق
h	ارتفاع ورودی
k	ثابت مدل توربولانس
L	طول اتاق
PMV	آرای میانگین پیش‌بینی شده
PPD	درصد نارضایتی پیش‌بینی شده
Re	عدد رینولدز

علائم یونانی

ε	ثابت مدل توربولانس
ω	ثابت مدل توربولانس
β	ضریب انبساط حرارتی

مراجع

[۱] حیدری نژاد، قاسم، دلفانی، شهرام، اسماعیلیان، جعفر، غرضی، سید سجاد و کریمی، مریم، ”شبه‌سازی جریان هوا در یک ساختمان چهار طبقه مسکونی و بررسی شرایط آسایشی آن“، گزارش تحقیقاتی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (در دست چاپ)

[2] Henkes, R., Van Der Vlugt, Natural convection flow in a square cavity calculated with low-Reynolds-number turbulence models, International Journal of Heat and Mass Transfer Vol 34, pp.377-388, 1991

[3] Chen, Q, Prediction of room air motion by Reynolds-Stress models, Building and Environment, Vol 31, pp. 233-244, 1996.

[4] Hanjalic, K., and Vasc, computation of turbulent natural convection in rectangular Enclosure with algebraic flux model, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol 36, pp. 3603-3624, 1993.

[5] Liping W., Hien, W. N., The impacts of ventilation strategies and façade on indoor thermal environment for naturally ventilated residential buildings in Singapore,