

تحلیل عددی تأثیر موقعیت دریچه‌های ورودی و خروجی هوای یک اتاق برای کارایی بهتر تهویه با رویکرد انرژی

هادی کارگر شریف‌آباد^۱، طاهر ارمغانی^{۲*}، مقداد باقریه بهبهانی^۳، میلاد حیدری^۴

^۱ استادیار مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

h.kargar@semnaniau.ac.ir

^۲ استادیار گروه مهندسی مکانیک، واحد مهدیشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، مهدیشهر، ایران

armaghani.taher@yahoo.com

^۳ کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

meghdad59324@gmail.com

^۴ استادیار گروه مهندسی مکانیک، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

heidarimd2@gmail.com

چکیده: فرایند تهویه اتاق برای بالا بردن شرایط آسایش حرارتی ساکنان و کاهش مصرف انرژی صورت می‌گیرد؛ هرچند که تاکنون بیشتر به نرخ جریان و دمای بهینه هوای ورودی و نوع سیستم تهویه پرداخته شده است. در این مقاله به کمک نرم‌افزار انسیس فلونت، بیست حالت مختلف قرارگیری دریچه ورودی و خروجی هوا در اتاق شبیه‌سازی شده و مقادیر سرعت و دما در فضای داخل اتاق به دست آمده است. سپس با در نظر گرفتن سه معیار مقایسه شامل کارایی تهویه، دمای متوسط مؤثر و گرادیان عمودی دما، این بیست نمونه مقایسه و حالتی که در آن دریچه ورودی در دیوار روبه‌روی آدمک در وسط دیوار و دریچه خروجی در همان دیوار در پایین آن قرار دارد، به‌عنوان بهترین موقعیت استقرار دریچه ورودی و خروجی مشخص شده است. در این نمونه، دمای میانگین برابر $23/68^{\circ}\text{C}$ ، کارایی تهویه $2/36$ و دمای مؤثر متوسط $1-0/01$ به دست آمده است. همچنین بررسی تغییر مساحت اتاق نمونه ۳ برابر با مقادیر ۱۲، ۱۶ و ۲۰ مترمربع نشان داد که با افزایش مساحت، کارایی تهویه به میزان $11/86\%$ کاهش و با افزایش دبی هوا از $0/045$ تا $0/134$ مترمکعب بر ثانیه، دمای میانگین اتاق $12/54\%$ کاهش پیدا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تهویه مطبوع، شبیه‌سازی عددی، بهینه‌سازی، فلونت، انرژی.

۱. مقدمه

ساختمان‌های مدرن فقط سرپناهی در برابر باد، برف، باران، آفتاب یا سایر اوضاع نامساعد طبیعی به شمار نمی‌روند بلکه با هدف ایجاد محیط‌های بهتر، سازگار و سازنده برای کار و زندگی ساخته می‌شوند. به دلیل تأثیر مستقیم انرژی مصرفی توسط سیستم‌های تهویه مطبوع بر میزان انتشار دی‌اکسید کربن، بهینه‌سازی انرژی مصرفی در سیستم‌های تهویه مطبوع، از جمله مهم‌ترین راهکارهای مقابله با تغییرات اقلیمی نامطلوب به شمار می‌رود. در رتبه‌بندی مصرف‌کننده‌های انرژی، ساختمان‌ها اصلی‌ترین مصرف‌کننده انرژی معرفی شده‌اند [۱ و ۲].

تجهیزات سرمایشی می‌توانند شامل وسایل سردکننده کوچک خانگی تا سردکننده‌های بسیار بزرگ در فرایندهای صنعتی مختلف باشند. با توجه به پیچیدگی تجهیزات یادشده، طراحان تهویه مطبوع باید علاوه بر تنظیم دمای مناسب، موارد دیگری را هم مد نظر داشته باشند. حفظ آسایش حرارتی برای ساکنان ساختمان یکی از اهداف اصلی طراحان تهویه مطبوع است. از آنجایی که تفاوت‌های گوناگونی میان افراد در خصوص رضایت روان‌شناسی و فیزیولوژیکی وجود دارد، پیدا کردن دمای ایدئال برای هر فرد در یک فضای مشخص، کار سختی است. آسایش حرارتی حالتی است که فرد برای تغییر شرایط حرارتی محیط هیچ اقدام رفتاری را انجام ندهد. شش فاکتور اصلی وجود دارد که مستقیماً بر آسایش حرارتی تأثیر می‌گذارد که عبارت‌اند از: میزان فعالیت (نرخ سوخت‌وساز بدن)، سطح پوشش، دمای میانگین تابشی، دما، رطوبت و سرعت هوا [۳]. افضلیان و همکاران [۴] تأثیرات عوامل فردی بر آسایش حرارتی افراد مستقر در یک محیط پرجمعیت را با استفاده از مدل فردی سه‌نقطه‌ای بررسی کردند و نشان دادند زنان در مقایسه با مردان در برابر سرما حساس‌ترند. همچنین، تأثیر شاخص توده بدنی بر احساس حرارتی افراد بسیار قابل ملاحظه است.

با توجه به نحوه توزیع هوای تازه بر شرایط آسایش حرارتی ساکنان، سیستم‌های تهویه برای توزیع هوای تازه را می‌توان به سه صورت به کار گرفت: سیستم تهویه با توزیع هوای اختلاطی، سیستم تهویه با توزیع هوای لایه‌ای و سیستم تهویه با توزیع هوای جابه‌جایی [۵]. برای انتخاب بهینه یک سیستم تهویه مطبوع، طراح باید در مورد انواع سیستم‌های تهویه مطبوع اطلاعات مناسبی داشته باشد [۶]. هفت فرایند مورد نیاز دستیابی به بالاترین بهره‌وری در فرایندهای تهویه مطبوع عبارت‌اند از: ۱. گرمایش؛ ۲. سرمایش؛ ۳. رطوبت‌زنی؛ ۴. رطوبت‌گیری؛ ۵. پاک‌سازی هوا؛ ۶. تهویه؛ ۷. حرکت هوا [۷]. در ویرایش جدید استاندارد اش‌رای ۲۰۱۰-۵۵ [۸] پارامتر سرعت جریان

هوا و ارتباط آن با دمای هوای ورودی بررسی شده است. لین و همکاران [۹ و ۱۰] با شبیه‌سازی عددی و استفاده از یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی^۲ معتبر، به بررسی و مقایسه تهویه جابه‌جایی و تهویه اختلاطی در دفاتر، کلاس‌های درس، مغازه‌های خرده‌فروشی و کارگاه‌های صنعتی تحت شرایط اقلیمی هنگ‌کنگ با شرایط مرزی مختلف پرداختند و نتایج حاصل از شرایط آسایش حرارتی را با بررسی کیفیت هوای داخل ساختمان را گزارش کردند. نتایج نشان داد که در مقایسه با تهویه اختلاطی معمولی، تهویه جابه‌جایی شرایط بهتری را از نظر کیفیت هوای درونی در منطقه مورد مطالعه ارائه می‌دهد. فتح‌الله‌زاده و همکاران [۵] اثر دمای هوای ورودی بر آسایش حرارتی و کیفیت هوای داخل برای اتاقی با سیستم تهویه جابه‌جایی در تابستان را مطالعه کردند و با بررسی پارامترهای مختلف نشان دادند سیستم تهویه جابه‌جایی به‌عنوان سیستم تهویه‌ای مناسب برای کاربردهای تابستانی قابل استفاده است. الاجمی و الامر [۱۱] به بررسی اثربخشی سیستم توزیع هوا از کف در ساختمان‌های تجاری برای انواع مختلفی از کاربردها و در دماهای مختلف هوای ورودی در آب‌وهوای گرم پرداختند. آن‌ها نشان دادند که سیستم توزیع هوا از کف صرفه‌جویی قابل توجهی (۳۰٪) در انرژی را در مقایسه با سیستم توزیع هوا از سقف به‌ویژه در ساختمان‌های با سقف بلند دارد و همچنین شرایط آسایش رضایت‌بخشی را برای ساکنان فراهم می‌کند. چونگ و همکاران [۱۲] تأثیر موقعیت نسبی دریاچه‌های ورودی و خروجی را در یک اتاق نمونه بررسی کردند و نشان دادند دریاچه‌های ورودی و خروجی عمود بر هم نسبت به حالتی که موازی با یکدیگرند، بهتر است. کیم و همکاران [۱۳] در مقاله‌شان به بررسی اثربخشی سیستم توزیع هوا از کف در یک فضای بزرگ با سقف بلندتر برای سرعت‌های مختلف هوای ورودی و مکان دیفیوزر با دماهای ورودی یکسان پرداختند. نتایج نشان داد که سیستم توزیع هوا از کف قادر به ایجاد تغییرات عمودی کوچک‌تر در درجه‌حرارت هوا می‌باشد و محیط راحت‌تری نسبت به سیستم‌های متداول تزریق هوا از بالا را دارد. حیدری‌نژاد و همکاران [۱۴] با محاسبه بار سرمایی کویل در سیستم‌های توزیع هوای زیرسطحی، تأثیر دریاچه‌های برگشت و خروج مجزا و ارتفاع دریاچه برگشت بر مصرف انرژی، شرایط آسایش حرارتی و کیفیت هوای داخل را بررسی کردند. بر اساس نتایج این تحقیق، هنگامی که ارتفاع دریاچه برگشت به‌ترتیب برابر با ۲، ۱/۳، ۰/۶۵ و ۰/۳ متر است، میزان کاهش مصرف انرژی نسبت به حالت بدون دریاچه برگشت برابر با ۱۰/۹، ۱۵/۳، ۱۸/۹ و ۲۵/۷٪ است. معرفت و همکاران [۱۵] احساس حرارتی افرادی را که در

میانگین دمای هوای داخلی با تأمین شرایط آسایش حرارتی در ناحیه استنشاقی افراد است. بر این اساس می‌توان استدلال کرد که این روش توزیع هوا می‌تواند تا حد زیادی دغدغه‌های مربوط به بحث انرژی سیستم‌های تهویه مطبوع و توزیع هوا را در سایه الزامات آشری ۲۰۱۰-۵۵ حل کند.

مولایی‌منش [۲۲] برای بررسی پارامترهای منبع آلاینده و موقعیت نسبی دریچه‌های ورودی و خروجی، نُه نمونه اتاق با ویژگی‌های مختلف هندسی را مدل‌سازی کرده است و با مقایسه بازده تهویه و کیفیت هوای استنشاقی، نشان داده است منبع آلاینده و موقعیت نسبی دریچه‌های ورودی و خروجی بر کیفیت هوای درون اتاق و هوای استنشاقی تأثیر دارند. در تحقیقی دیگر، این محقق [۲۳] هفده نمونه اتاق با هندسه یکسان، شامل یک آدمک و تجهیزات اداری را با هدف ارزیابی سیستم تهویه مطبوع لایه‌ای، به صورت عددی مدل‌سازی کرده و نقش محل دریچه خروجی، موقعیت استقرار ساکنان و موقعیت منبع آلاینده را بر آسایش حرارتی و کیفیت هوای استنشاقی بررسی نموده است. البته محققان دیگری نیز با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مانند دیزاین‌بیلدر^۱، فلونت^۲ و ترنسسیس^۳، میزان مصرف انرژی در ساختمان و آسایش حرارتی را در ساختمان بررسی و تأثیر پارامترهای مختلف را ارزیابی کرده‌اند [۲۴-۲۸].

اهمیت و ضرورت خاص انجام این تحقیق، بررسی موقعیت استقرار دریچه‌های ورودی و خروجی بر آسایش حرارتی و همچنین تأثیر دبی هوای ورودی و مساحت اتاق بر آسایش حرارتی است. تاکنون تحقیق‌های انجام‌شده بیشتر بر روی نرخ جریان هوای ورودی بهینه برای اتاق، دمای هوای ورودی بهینه برای اتاق و نوع تهویه مناسب (لایه‌ای، اختلاطی و جابه‌جایی) برای اتاق مورد مطالعه قرار گرفته است، ولی تاکنون تحقیق جامعی بر روی اثر محل استقرار دریچه‌های ورودی و خروجی بر آسایش حرارتی ساکنان با استفاده از سه معیار کارایی تهویه، دمای مؤثر متوسط و تغییرات عمودی دما انجام نشده؛ که در این تحقیق به این موضوع پرداخته شده است.

۲. بیان مسئله

حفظ آسایش حرارتی برای ساکنان ساختمان یکی از اهداف اصلی طراحان تهویه مطبوع است. از آنجایی که تفاوت‌های گوناگونی میان افراد در خصوص رضایت روان‌شناسی و فیزیولوژیکی وجود دارد، پیدا کردن دمای ایدئال برای هر فرد در یک فضای مشخص، کار سختی

اتاق با کف گرم‌شده می‌خواهند، بررسی کردند. نتایج نشان داد که تحت شرایط حرارتی مشابه، احساس حرارتی افرادی که روی تخت‌خواب به سبک شرقی (رختخواب روی زمین) می‌خواهند با افرادی که روی تخت معمولی می‌خواهند، به‌طور مشخص بالاتر است. همچنین در تحقیق دیگری، یک مدل آسایش حرارتی برای ارزیابی احساس حرارتی موضعی بخش‌های مختلف بدن و در نهایت ارزیابی احساس حرارتی کل بدن در محیط‌های غیریکنواخت ارائه دادند که اثرات غیریکنواختی محیط لحاظ شده و دما و فرایندهای فیزیولوژیکی بخش‌های مختلف بدن محاسبه شده و سپس احساس حرارتی موضعی و کل بدن ارزیابی شده است [۱۶]. در تحقیقی دیگر، اثرات نرخ تعویض ساعتی بر کیفیت هوای داخل و مصرف انرژی با رعایت قید آسایش حرارتی در یک سالن اجتماعات بررسی و نتایج آن نشان داد غلظت آلاینده‌ها در ناحیه حضور افراد در حالت‌های نرخ تعویض هوای ساعتی ۱۰ و ۱۵ نسبت به ترتیب ۳۶ و ۴۶٪ کاهش یافته که به معنای بهبود کیفیت هوای داخل است [۱۷].

در کنار دمای هوا، رطوبت نسبی، میانگین دمای تابشی، فعالیت متابولیک و عایق‌بندی لباس، سرعت هوا یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر آسایش حرارتی است. یکی از پیامدهای آشری ۲۰۰۴-۵۵ این بود که جریان هوا نباید توسط افراد احساس شود ($v < 0.35$) که خوشبختانه با معرفی استاندارد آشری ۲۰۱۰-۵۵ و مجوز افزایش سرعت هوا باعث شد تا نیاز به خنک شدن هوا در شرایط گرم جبران شود. این تغییر، فرصت‌های جدیدی را برای مدیریت افزایش دمای اتاق فراهم کرد. به‌منظور بهره‌مندی از افزایش سرعت هوای بالاتر، باید یک معیار تعیین شود تا سیستم‌های توزیع هوای مناسب برای درجه حرارت‌های بالا شناسایی شود. این سیستم‌ها باید با دما و سرعت هوای نسبتاً بالاتر (در محدوده تعریف‌شده توسط آشری ۲۰۱۰-۵۵) عمل کنند. بر این اساس، سیستم توزیع هوای لایه‌ای ابداع شد که با یک جریان هوایی افقی، سر، گردن و قفسه سینه افراد را از جهت‌های جلو یا جانبی تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱۸-۲۰]. این معیار بر اساس مطالعات انجام‌شده استخراج شده و نشان داده است در فعالیت‌های سبک، برای از بین بردن حرارت متابولیکی از مغز، سیستم توزیع هوا باید در ناحیه سر و گردن متمرکز شوند و همچنین وزش هوا از جلو برای افراد خوشایندتر است [۲۱]. از جمله مهم‌ترین تحقیقات صورت‌گرفته در این زمینه، تحقیقات تیان و همکاران [۲۰] بر روی سیستم تهویه لایه‌ای است. آن‌ها با بررسی عمر متوسط موضعی هوا، شاخص میانگین آراء افراد نسبت به شرایط گرمایی و شاخص درصد ناراضایتی افراد نسبت به شرایط گرمایی محیط، نشان دادند که سیستم تهویه لایه‌ای قادر به تأمین ملزومات

دمای هوا در ارتفاع ۱/۱ متر از کف در ناحیه اطراف سر آدمک در نظر گرفته شده است). طبق این شاخص، در صورتی که $EDTS < 1.2$ باشد، آسایش حرارتی رضایت‌بخش و در صورتی که $0.6 < EDTS < 1.2$ باشد، آسایش حرارتی خوبی حاکم است [۳۰]. در این پروژه، برای مقایسه نمونه‌های مختلف از متوسط این شاخص در ناحیه استنشاقی در نزدیک سر آدمک استفاده شده است.

۳.۱.۲. پارامتر نارضایتی حرارتی موضعی هوا

شاخص‌های میانگین آراء افراد نسبت به شرایط گرمایی محیط فقط شرایط آسایش حرارتی عمومی را برای بدن پیش‌بینی می‌کنند. این در حالی است که گاهی احساس سرما یا گرمای موضعی در برخی از نقاط بدن شخص، او را آزار می‌دهد. به این احساس سرما یا گرمای موضعی و ناخواسته، به اصطلاح نارضایتی حرارتی موضعی گفته می‌شود. یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد نارضایتی حرارتی موضعی، گرادیان عمودی دما در فضا است. توزیع دمای هوا در داخل اتاق معمولاً همگن نبوده و به صورت عمودی از کف تا سقف افزایش می‌یابد. این توزیع دمای نامگن معمولاً مهم‌ترین عامل برای عدم رضایت حرارتی موضعی در افراد می‌باشد. سنجش گرادیان دما، بین ارتفاع ۰/۱ متر از کف فضا (میچ پا) و ارتفاع ۱/۱ متر از کف فضا (سر در حالت نشسته) محاسبه و ارزیابی می‌شود. بیشترین اختلاف دمای بین سر و میچ پا باید کمتر از 3°C باشد [۳۱-۳۳].

۳. تحلیل عددی

در تحقیق حاضر از نسخه ۱۶ نرم‌افزار آنسیس^۲ با موتور حل گر فلوننت [۳۴] برای انجام محاسبات و حل معادلات حاکم استفاده شده است. در این نرم‌افزار برای حل عددی از روش حجم محدود^۳ استفاده می‌شود. برای گسسته‌سازی معادلات (مونتوم و انرژی و...) از روش بالادستی مرتبه دوم^۴ استفاده شده است. با توجه به ثابت بودن مقدار سرعت هوا در ورودی و اینکه عدد ماخ از ۰/۳ کوچک‌تر است، جریان به صورت دائم و تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است. از الگوریتم سیمپل^۵ برای تصحیح همبستگی بین فشار و سرعت استفاده شده است.

با توجه به اینکه رژیم مسئله مورد نظر در این تحقیق آشفته است، لازم است معادلات برای کمیت‌های لحظه‌ای، یعنی کمیت‌های متوسط به علاوه کمیت‌های نوسانی استفاده شود و سپس از طرفین هر معادله، متوسط‌گیری زمانی به عمل آید. البته در این روابط اگر تساوی برای معادلات لحظه‌ای برقرار باشد، این تساوی برای متوسط زمانی آن (برای

است که می‌توان از شاخص‌های مختلفی که در سیستم‌های تهویه مطبوع وجود دارد، استفاده کرد. در این مقاله، تأثیر موقعیت استقرار دریچه‌های ورودی و خروجی سیستم تهویه مطبوع بر روی شاخص‌ها بررسی شده است. برای تحلیل، یک اتاق با یک دریچه ورودی و یک دریچه خروجی در نظر گرفته شده است. روشنایی اتاق به وسیله دو لامپ مهتابی تأمین می‌شود و یک مکعب مستطیل (آدمک) به عنوان مدل انسان و میز و کامپیوتر به شکل مکعب مربع که از خود گرما ساطع می‌کنند، در فضای داخل اتاق دیده شده است.

۱.۲. معیارهای مقایسه

برای اینکه بتوان مقایسه‌ای بین نتایج به دست آمده از نمونه‌های مختلف انجام داد، باید چند معیار برای آن‌ها در نظر گرفت که با مقایسه آن معیارها، مشخص شود کدام نمونه بهترین تهویه را انجام می‌دهد. در اینجا معیارهای در نظر گرفته شده عبارت‌اند از: ۱. کارایی تهویه؛ ۲. دمای مؤثر متوسط جریان هوا؛ ۳. پارامتر نارضایتی حرارتی موضعی هوا (گرادیان عمودی دما).

۱.۱.۲. کارایی تهویه

شاخص کارایی تهویه مبتنی بر مفهوم دفع حرارت از فضای اتاق است که برای تمامی نمونه‌های مورد بررسی از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۲۹].

$$E_t = (t_{out} - t_{in}) / (t_{bz} - t_{in}) \quad (1)$$

که t_{bz} ، t_{out} و t_{in} به ترتیب عبارت‌اند از دمای هوایی ورودی، دمای هوای خروجی و دمای هوا در ناحیه استنشاقی در ناحیه اطراف سر آدمک که در این مقاله ارتفاع ۱/۱ متر از کف در نظر گرفته شده است. هرچه کارایی تهویه بالاتر باشد، یعنی تهویه بهتری انجام شده است. معیار کارایی تهویه بر این اصل استوار است که هر چقدر اختلاف دمای خروجی با دمای ورودی نسبت به اختلاف دمای منطقه مورد محاسبه با دمای ورودی، مقدار بیشتری داشته باشد، شرایط تهویه بهتری برقرار می‌شود.

۲.۱.۲. دمای مؤثر متوسط جریان هوا

با توجه به سادگی و قابلیت اطمینان بالای شاخص متوسط دمای مؤثر جریان هوا، محققان سال‌ها از این شاخص برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های تهویه اختلاطی استفاده می‌کردند. این شاخص به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۳ و ۳۰]:

$$ETDS = (t_x - t_c) - (v_x - 1.1) \quad (2)$$

که t_c دمای میانگین اتاق، t_x و v_x به ترتیب دما و سرعت در نقطه‌ای است که می‌خواهیم شاخص را در آنجا حساب کنیم (در این تحقیق

2. Ansys 16.0
3. Finite Volume
4. Second Order Upwind
5. SIMPLE

1. Mean Effective Draft Temperature (Mean EDTS)

۲.۳. شرایط مرزی مسئله

با توجه به اینکه هدف این تحقیق، بررسی معیارهای مختلف گفته شده در داخل فضای اتاق بوده، فضای داخل اتاق دقیقاً بعد از دریچه ورودی و قبل از دریچه خروجی به عنوان محدوده محاسباتی در نظر گرفته شده است. به عبارتی، برای کاهش هزینه محاسباتی، هندسه داخل دریچه و افت فشار داخلی آن در این تحقیق لحاظ نشده است. با هدف اعتبارسنجی روش شبیه سازی عددی و استفاده از مقادیر واقعی، شرایط مرزی استفاده شده در مقاله مانند شرایط مرزی مطالعه دیگر [۲۰] است. شرط مرزی ورودی در نرم افزار فلونت از نوع سرعت و ورودی^۲ انتخاب شده است. سرعت هوای ورودی برابر با ۱/۱۹ متر بر ثانیه و دبی هوای ورودی برابر با ۰/۰۸۹ مترمکعب بر ثانیه در نظر گرفته شده اند. دمای هوای ورودی در تمامی حالت ها برابر با ۱۸/۹°C بوده است. در دریچه خروجی نیز شرط مرزی فشار خروجی^۳ انتخاب شده که فشار استاتیک متوسط برابر فشار اتمسفریک قرار داده شده است. بر روی دیوارها نیز از شرط عدم لغزش^۴ استفاده شده است. منابع تولید حرارت در اتاق شامل ۲ لامپ مهتابی هریک با قدرت ۷۲ وات، یک آدمک به شکل مکعب مستطیل [۱۳، ۲۰، ۲۲، ۲۳ و ۳۰] با توان ۷۵ وات [۲۰] و یک کامپیوتر با قدرت ۱۲۰ وات است که برای آن در فلونت از شرط مرزی شار حرارتی ثابت استفاده شده است. دیوارهای بالا و پایین اتاق عایق در نظر گرفته شده اند (شار حرارتی صفر) و هیچ گونه دریچه ای در آن ها تعبیه نشده است. دیوارهای اطراف اتاق که محل استقرار دریچه های ورودی و خروجی در آن ها هستند، هریک دارای دمای ۲۷°C هستند و در نرم افزار فلونت با شرط مرزی دمای ثابت در سطح با این مقدار، تنظیم شده است.

۳.۳. تولید شبکه و بررسی استقلال از شبکه

ایجاد شبکه بندی مناسب برای حل معادلات حاکم بر مدل یکی از مهم ترین بخش های مدل سازی است [۳۸]. شبکه تولید شده از حیث ساختار به دو دسته کلی شبکه بندی منظم و شبکه بندی نامنظم تقسیم می شود. برای حل یک مسئله مشخص، میزان حافظه مورد نیاز برای شبکه نامنظم در مقایسه با شبکه منظم بیشتر است؛ زیرا اطلاعات مربوط به نقاط اطراف هر نقطه از شبکه باید ذخیره شوند و بر این اساس سرعت حل نیز کمتر خواهد بود چون در هنگام تصحیح اطلاعات هر نقطه از شبکه باید با روشی اطلاعات نقاط اطراف آن تعیین شود [۳۹]. از طرفی با توجه به اینکه هندسه اتاق، کامپیوتر و... منظم و دارای

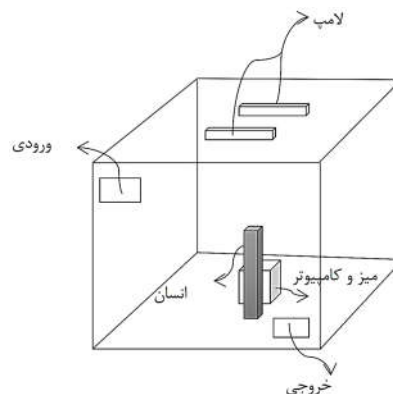
دامنه مشخصی از زمان) نیز برقرار خواهد بود. در نهایت، معادلات ساده سازی می شوند تا جایی که کمیت های متوسط زمانی ظاهر گردند [۳۵]. چن [۷] با مقایسه هشت مدل آشفتگی به این نتیجه رسید که مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG^۱ در میان مدل های آشفتگی مبتنی بر لزجت گردابه ای، از بیشترین دقت برای مدل سازی فضای داخلی یک اتاق برخوردار است. در این پژوهش نیز از همین مدل استفاده شده است. مدل RNG به منظور مدل کردن حرکت در مقیاس های کوچک تر و تأثیرات آن ها به وسیله نرمال سازی مجدد معادلات ناویراستوکس گسترش داده شده است. در مدل استاندارد $k-\epsilon$ لزجت گردابی به وسیله مقیاس طول آشفتگی منفرد تعیین می شود، بنابراین پخش آشفتگی محاسبه شده فقط در مقیاس های مخصوصی اتفاق می افتند. در حالی که در واقعیت، همه مقیاس های حرکت در پخش آشفتگی شرکت دارند. روش $k-\epsilon$ RNG با استفاده از یک روش آماری دقیق به دست آمده و بسیار شبیه به مدل استاندارد $k-\epsilon$ است [۳۶]. از موارد کاربرد آن به عنوان مثال شامل جدایی لایه مرزی، تهویه اتاق، واماندگی در دیفیوزر زاویه باز و... می توان نام برد. در مدل $k-\epsilon$ RNG میدان آشفتنه برحسب دو متغیر بیان می شود [۳۷]:

$$1. \text{ انرژی جنبشی جریان آشفتنه } (K);$$

$$2. \text{ نرخ اتلاف انرژی جنبشی جریان آشفتنه } (\epsilon).$$

۱.۳. هندسه مورد بررسی

هندسه مورد بررسی در این تحقیق اتاقی با طول، عرض و ارتفاع ۳، ۴ و ۲/۶ متر می باشد که توسط دریچه ورودی به ابعاد ۲۵۰ میلی متر در ۳۰۰ میلی متر در نقاط مختلف دیوارهای روبه رو و کنار آدمک و دریچه خروجی به ابعاد ۳۰۰ میلی متر در ۶۰۰ میلی متر در نقاط مختلف دیوارهای دیگر تهویه می شود. در شکل (۱)، طرح واره ای از محل استقرار دریچه های ورودی و خروجی نشان داده شده است.



شکل (۱): طرح واره محل استقرار دریچه های ورودی و خروجی اتاق مورد

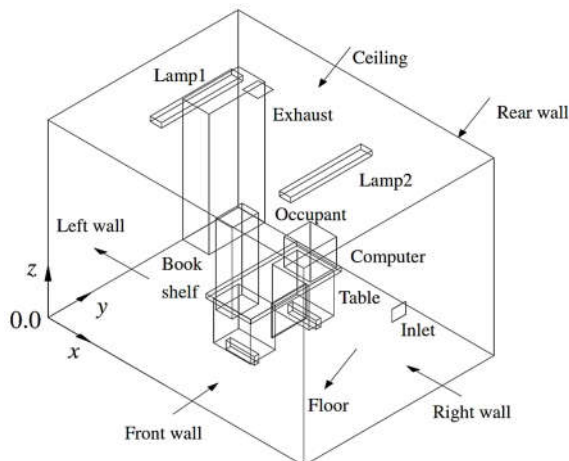
مطالعه

2. Velocity Inlet
3. Pressure Outlet
4. No-slip wall Conditions

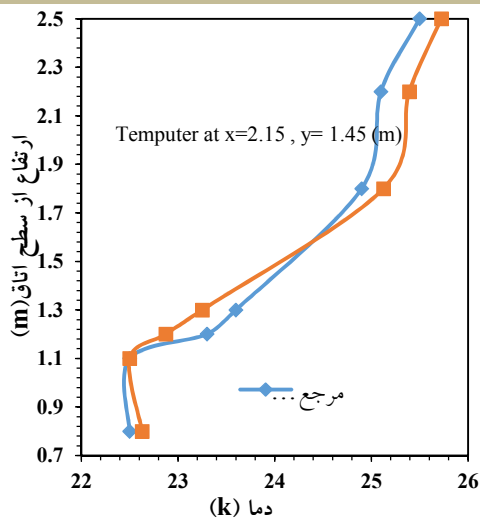
1. Re-Normalization Group

تحلیل عددی تأثیر موقعیت دریچه‌های ورودی و خروجی هوای یک اتاق برای کارایی بهتر تهویه... ۸۱

وسط دیوار سمت راست روبه‌روی آدمک و دریچه خروجی به ابعاد ۶۰۰ میلی‌متر در ۶۰۰ میلی‌متر در وسط سقف اتاق تهویه می‌شود (شکل ۴). این اتاق توسط دو لامپ مهتابی، هریک با قدرتی برابر ۷۲ وات، روشن می‌شود. برای مدل‌سازی کامپیوتر شخصی، از یک مکعب استفاده شده است که با تعبیه ۳ لامپ ۶۰ واتی درون آن گرم می‌شود. همچنین آدمک به صورت مکعب مستطیل که با ۳ لامپ ۲۵ واتی درون خود تولید گرما می‌کند، مدل‌سازی شده است. سرعت و دمای هوای ورودی به ترتیب برابر ۱/۱۹ متر بر ثانیه و $18/9^{\circ}\text{C}$ است. مقایسه دما در ارتفاع‌های مختلف در موقعیت طول ۲/۱۵ متر و عرض ۱/۴۵ متر برای مطالعه حاضر و مرجع [۲۰] در شکل (۵) نشان داده شده است. شکل (۵) نشان می‌دهد به دلیل توافق خوب نتایج مطالعه حاضر با نتایج مرجع [۲۰]، می‌توان با دقت قابل قبول از شبیه‌سازی انجام‌شده برای بررسی تأثیر موقعیت‌های مختلف دریچه ورودی و خروجی در اتاق استفاده کرد.



شکل (۴): هندسه مورد استفاده توسط تیان و همکاران [۲۰]

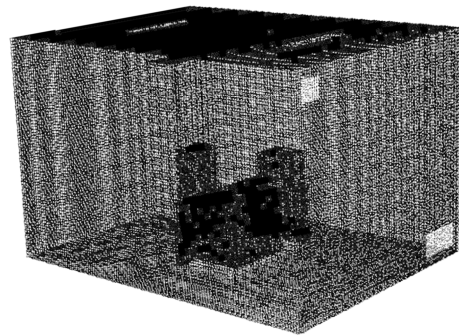


شکل (۵): مقایسه دمای اتاق نمونه در مطالعه حاضر و مرجع [۲۰]

۴. نتایج و بحث

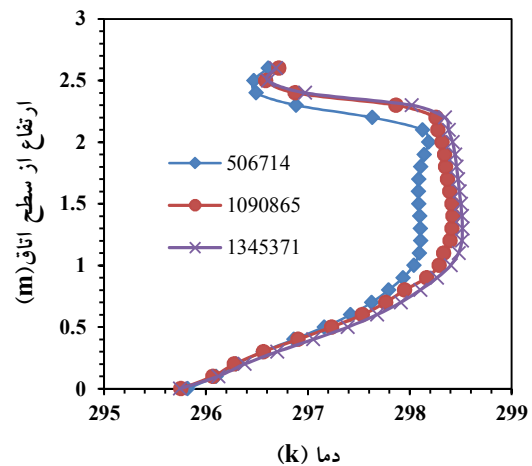
برای بررسی تأثیر موقعیت دریچه‌های ورودی و خروجی هوای یک اتاق

گوشه‌های ۹۰ درجه است (شکل ۱)، مطابق با مطالعات مدل‌سازی دیگر [۴۰]، از شبکه منظم استفاده شده است (شکل ۲).



شکل (۲): شبکه‌بندی مورد استفاده در این تحقیق

برای انتخاب شبکه‌بندی مناسب برای شبیه‌سازی عددی لازم است استقلال از شبکه در حل مورد بررسی قرار گیرد. از این رو مسئله برای تعداد شبکه برابر با ۵۰۶۷۱۴، ۱۰۹۰۸۶۵ و ۱۳۴۵۳۷۱ مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. در شکل (۳) مقدار دمای عمودی مکانی در موقعیت طولی ۱ و عرضی ۰/۵ بررسی شده است. با توجه به شکل، به‌ازای تغییر تعداد شبکه از ۱۰۹۰۸۶۵ به ۱۳۴۵۳۷۱ تغییر چندانی در جواب‌ها حاصل نشده است؛ بنابراین شبکه ۱۰۹۰۸۶۵ به‌عنوان شبکه مناسب برای ادامه محاسبات انتخاب شده است.

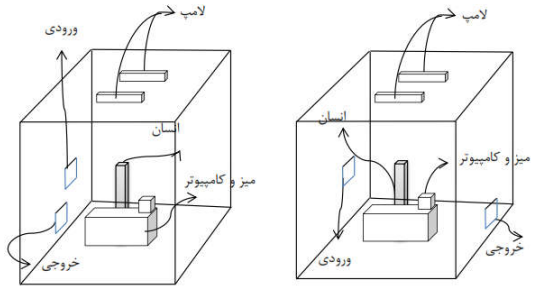


شکل (۳): تغییرات دما با تعداد شبکه

۴.۳. اعتبارسنجی حل عددی

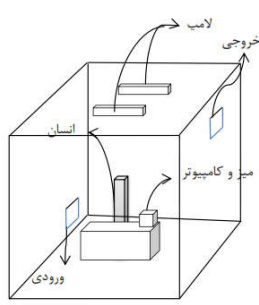
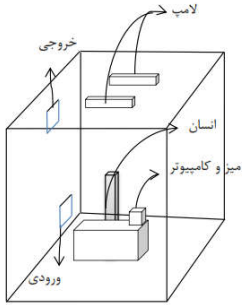
برای اعتبارسنجی حل عددی، نتایج شبیه‌سازی انجام‌شده با نتایج تحقیق آزمایشگاهی تیان و همکاران [۲۰] مقایسه گردیده است. اتاقی که در [۲۰] مدل‌سازی شده، دارای طول، عرض و ارتفاع ۳/۹، ۲/۹ و ۲/۶ متر است که توسط دریچه‌ای به ابعاد ۲۱۰ میلی‌متر در ۱۷۰ میلی‌متر واقع در

برای کارایی بهتر تهویه، دریچه ورودی هوا در نقاط مختلف دیوارهای روبرو و کنار آدمک و دریچه خروجی در نقاط مختلف دیوارهای دیگر، قرار داده شده‌اند که در نهایت، بیست حالت مختلف برای موقعیت‌های مختلف دریچه ورودی و خروجی (شکل ۶) بررسی شده است.



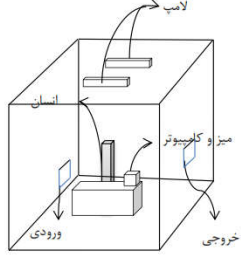
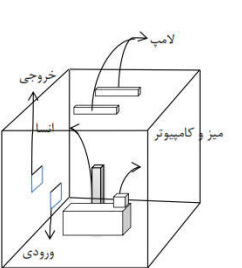
نمونه دوازدهم

نمونه یازدهم



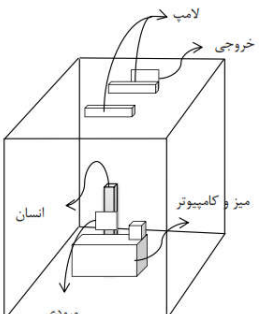
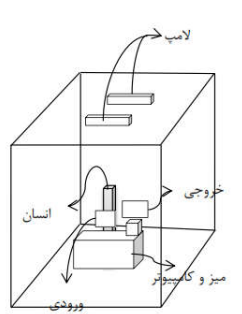
نمونه چهاردهم

نمونه سیزدهم



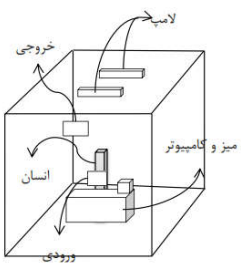
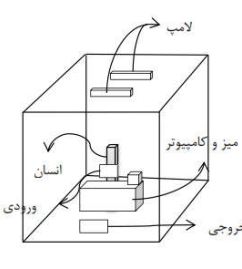
نمونه شانزدهم

نمونه پانزدهم



نمونه هجدهم

نمونه هفدهم

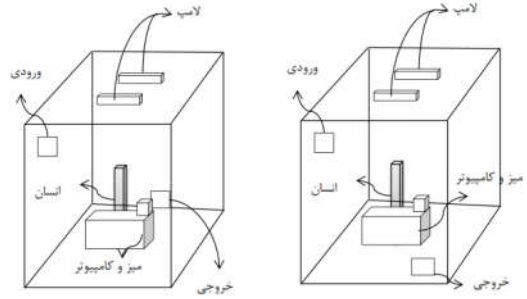


نمونه بیستم

نمونه نوزدهم

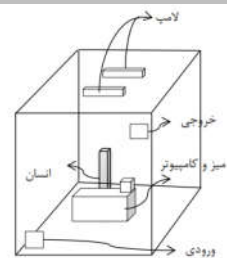
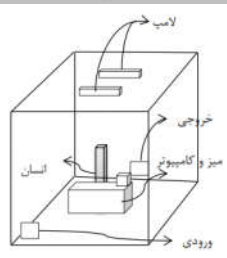
شکل (۶): نمونه‌های مختلف موقعیت قرارگیری دریچه ورودی و خروجی

نسبت به یکدیگر



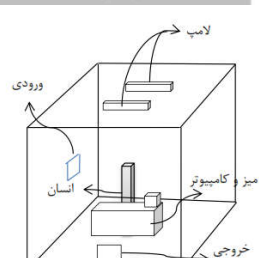
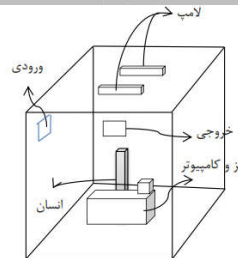
نمونه دوم

نمونه اول



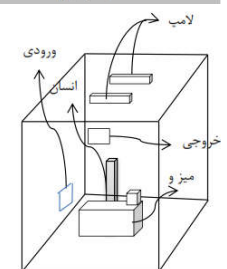
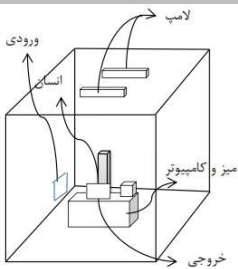
نمونه چهارم

نمونه سوم



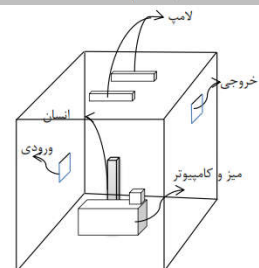
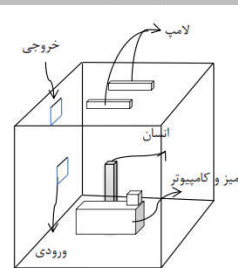
نمونه ششم

نمونه پنجم



نمونه هشتم

نمونه هفتم

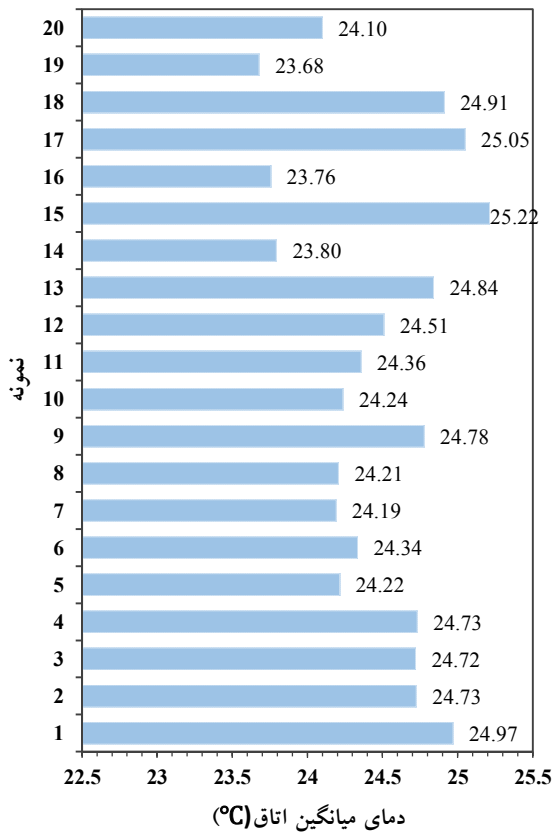


نمونه دهم

نمونه نهم

تحلیل عددی تأثیر موقعیت دریچه‌های ورودی و خروجی هوای یک اتاق برای کارایی بهتر تهویه... ۸۳

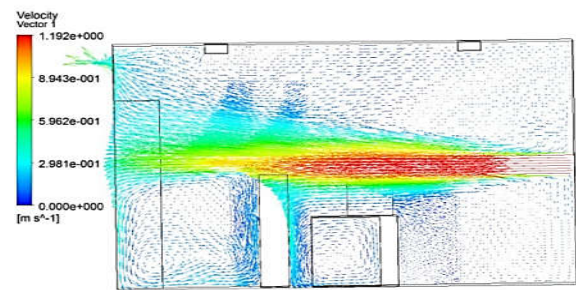
۱۵ که ورودی در دیوار سمت راست آدمک در پایین دیوار، و خروجی در دیوار سمت چپ آدمک روبه‌روی کامپیوتر در وسط قرار دارد، دارای بیشترین دمای میانگین در اتاق است. تغییر موقعیت دریچه‌های ورودی و خروجی نسبت به یکدیگر می‌تواند نزدیک به $1/5^{\circ}\text{C}$ در دمای میانگین اتاق تغییر ایجاد کند.



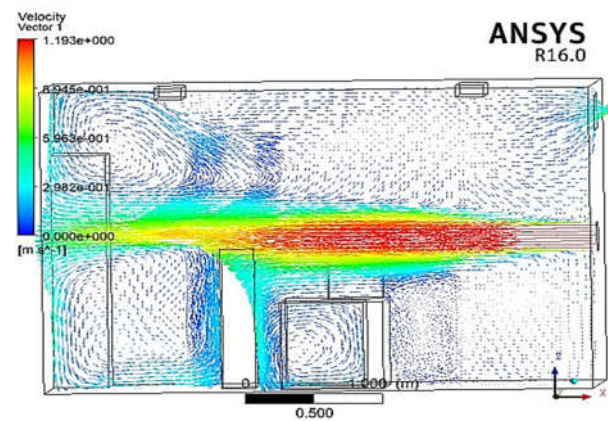
شکل (۹): دمای میانگین اتاق برای نمونه‌های مختلف

همان‌طور که در بخش دوم مقاله بیان شد، علاوه بر دمای میانگین، برای بررسی عملکرد نمونه‌های مختلف لازم است از معیارهای مختلف دیگری نیز استفاده شود. میزان کارایی تهویه برای نمونه‌های مختلف در شکل (۱۰) نشان داده شده است. نمونه ۱۹ همچنان که دارای کمترین دمای میانگین است، بیشترین مقدار کارایی تهویه را دارد. در نمونه ۱۹ (شکل ۶)، گردش جریان هوا در ناحیه کامپیوتر، آدمک و لامپ بالای قفسه کتاب‌ها بیشتر از بقیه قسمت‌ها و گردش جریان هوا در ناحیه لامپ بالای کامپیوتر، کم می‌باشد و مشاهده می‌شود که این قسمت کمتر از بقیه قسمت‌ها تهویه شده است. نمونه ۶ نیز به‌رغم اینکه دمای میانگین $24/34^{\circ}\text{C}$ را در اتاق ایجاد می‌کند، دارای ضریب کارایی $2/28$ است.

برای بررسی شبیه‌سازی انجام‌شده برای تمام نمونه‌های مورد نظر خطوط جریان و کانتور میدان سرعت و دما رسم و مقادیر مورد نیاز برای محاسبه معیارهای مد نظر استخراج شده‌اند. در شکل‌های (۷) و (۸) بردارهای میدان سرعت در صفحه XZ برای دو نمونه موقعیت دریچه ورودی و خروجی متفاوت نشان داده شده است. در شکل (۷) که مربوط به نمونه ۱۷ است، دریچه خروجی روبه‌روی دریچه ورودی قرار دارد. با توجه به شکل (۷) گردش جریان هوا در قسمت بالا و پایین نیمه سمت راست اتاق کم است. در شکل (۸)، دریچه‌های ورودی و خروجی در یک جهت قرار دارند و مشخص است که گردش جریان هوا در ناحیه کامپیوتر، آدمک و لامپ بالای سر آدمک بیشتر از بقیه قسمت‌هاست. در این نمونه نیز گردش جریان هوا در ناحیه بالای سمت راست کم است که به تهویه کمتر آن منطقه منجر می‌شود.



شکل (۷): بردار جریان در صفحه XZ مرکزی برای نمونه ۱۷

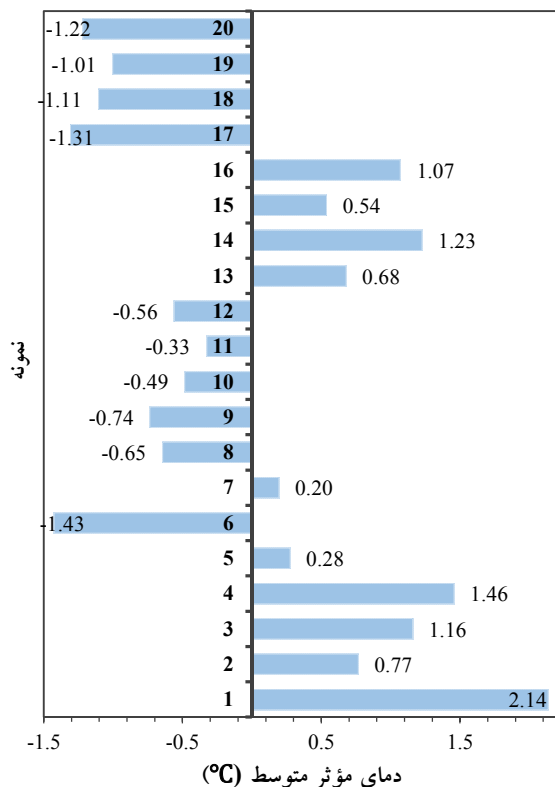


شکل (۸): بردار جریان در صفحه XZ مرکزی برای نمونه ۱۹

با توجه به اینکه یکی از بدیهی‌ترین معیار مقایسه عملکرد سیستم تهویه مطبوع، مقدار دمای میانگین اتاق می‌باشد، ابتدا دمای میانگین اتاق در نمونه‌های مختلف در شکل (۹) مقایسه شده است. شکل (۹) نشان می‌دهد نمونه ۱۹ که ورودی در دیوار روبه‌روی آدمک در وسط دیوار، و خروجی در همان دیوار روبه‌روی آدمک در بالای دیوار قرار دارد، کمترین دمای میانگین را در اتاق ایجاد می‌کند. همچنین نمونه

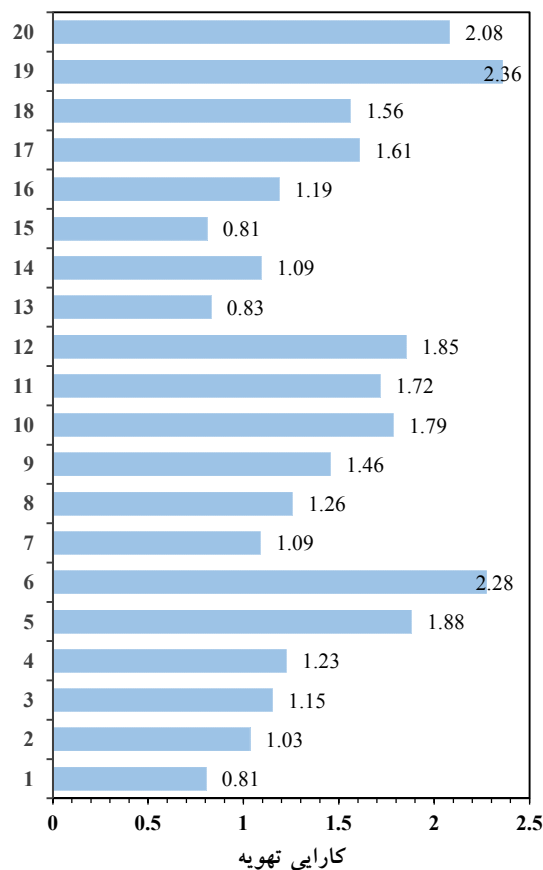
دفع شده است.

با توجه به سادگی و قابلیت اطمینان بالای شاخص دمای مؤثر متوسط جریان هوا، از این شاخص برای بررسی عملکرد نمونه‌های مختلف استفاده شده است (شکل ۱۱). بررسی شاخص دمای مؤثر متوسط نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد نمونه‌های ۱، ۴، ۶، ۱۴، ۱۷ و ۲۰ در هیچ‌یک از محدوده‌های رضایت‌بخش و خوب قرار ندارند. نمونه ۱۹ که در معیارهای دمای میانگین و کارایی تهویه عملکرد خوبی داشته بود، در این معیار نیز در محدوده رضایت‌بخش قرار دارد.



شکل (۱۱): دمای متوسط مؤثر برای نمونه‌های مختلف

از لحاظ معیار گرادیان عمودی دما نباید اختلاف دمای بین مچ پا و سر آدمک در حالت نشسته اختلاف زیادی (کمتر از ۳°C) وجود داشته باشد. بر این اساس، نمونه‌های شماره ۴، ۷، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۷ و ۱۸ خارج از محدوده مجاز هستند. برای بررسی تأثیر تغییر مساحت و تغییر دبی، نمونه ۳ برای مساحت‌های ۱۲، ۱۶ و ۲۰ مترمربع شبیه‌سازی شده است و کارایی تهویه، دمای میانگین و دمای خروجی در مساحت‌های مختلف با هم مقایسه شده‌اند. همچنین تغییر دمای میانگین و دمای خروجی و کارایی تهویه را در نمونه برای دبی‌های ۰/۰۴۵، ۰/۰۸۹ و ۰/۱۳۴ مترمکعب بر ثانیه محاسبه شده است.

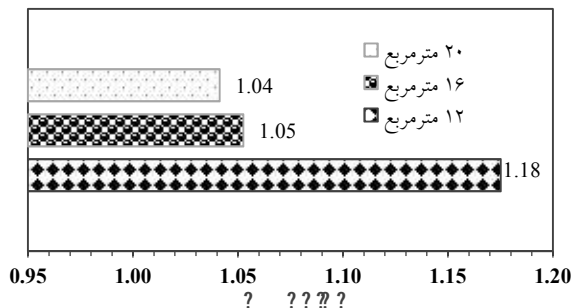


شکل (۱۰): کارایی تهویه برای نمونه‌های مختلف

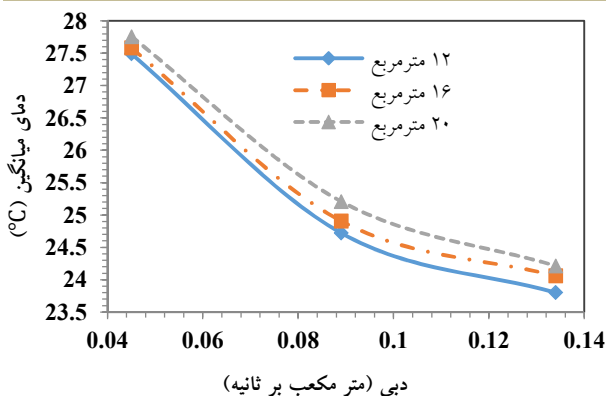
نمونه‌های ۱، ۱۵ و ۱۳ کمترین مقدار کارایی تهویه را دارند. البته در قسمت قبل مشخص شد که نمونه ۱۵، بیشترین مقدار دمای میانگین را نیز داشته است. در نمونه ۱ ورودی در دیوار روبه‌روی آدمک در بالا در گوشه سمت چپ اتاق، و خروجی در همین دیوار در پایین در گوشه سمت راست اتاق قرار دارد. کارایی تهویه در این نمونه ۰/۸ است. علت پایین بودن کارایی تهویه در این نمونه این است که گردش هوا در ناحیه استقرار آدمک نسبت به دیگر نواحی کمتر است. در نمونه ۱۳ ورودی در دیوار سمت راست آدمک در پایین دیوار و خروجی در دیوار سمت چپ آدمک در بالای دیوار قرار دارد. کارایی تهویه در این نمونه ۰/۸۳ است. در این نمونه، گردش جریان هوا در ناحیه آدمک، کامپیوتر و قفسه کتاب‌ها و لامپ بالای آن بیشتر است و در ناحیه لامپ بالای کامپیوتر کمتر است و حرارت ناشی از شار حرارتی این لامپ کمتر از بقیه قسمت‌ها دفع شده است. در نمونه ۱۵ کارایی تهویه ۰/۸۱ است. بررسی خطوط جریان در این نمونه نشان می‌دهد گردش جریان هوا در ناحیه آدمک، کامپیوتر و قفسه کتاب‌ها و لامپ بالای آن بیشتر، و در ناحیه لامپ بالای کامپیوتر کمتر است و حرارت ناشی از شار حرارتی این لامپ کمتر از بقیه قسمت‌ها

تحلیل عددی تأثیر موقعیت دریچه‌های ورودی و خروجی هوای یک اتاق برای کارایی بهتر تهویه... ۸۵

اختلاف بیشتری پیدا می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که نمودار از دبی ۰/۰۴۵ تا ۰/۰۸۹ مترمکعب بر ثانیه، شیب تندتری دارد ولی از دبی ۰/۰۸۹ تا ۰/۱۳۳ شیب نمودار ملایم‌تر شده یعنی با افزایش دبی، کاهش دمای میانگین با شدت کمتری صورت می‌گیرد.



شکل (۱۲): تغییرات کارایی تهویه با مساحت برای نمونه ۳



شکل (۱۳): تغییرات دمای میانگین با دبی برای مساحت‌های مختلف نمونه ۳

۴. نتیجه‌گیری

امروزه فرایند تهویه اتاق یکی از دغدغه‌های اساسی مهندسان تهویه مطبوع برای بالا بردن شرایط آسایش حرارتی برای ساکنان و همچنین کاهش مصرف انرژی است.

با معرفی اشرفی [۸] ۲۰۱۰-۵۵ و مجوز افزایش سرعت هوا، به منظور بهره‌مندی از افزایش سرعت هوای بالاتر، باید یک معیار تعیین شود تا سیستم‌های توزیع هوای مناسب برای درجه‌حرارت‌های بالا شناسایی شود.

با توجه به تأثیر زیاد موقعیت دریچه ورودی و خروجی تهویه بر شرایط آسایش حرارتی ساکنان، در این مقاله به کمک نرم‌افزار آنسیس فلونت و شبیه‌سازی جریان هوای داخل اتاق، سعی شده است بهترین موقعیت استقرار دریچه ورودی و خروجی مشخص شود. در این راستا ۲۰ نمونه اتاق بررسی شده که محل استقرار دریچه ورودی و خروجی آن‌ها با یکدیگر متفاوت است. ۳ معیار مقایسه کارایی تهویه، دمای متوسط مؤثر و گرادیان عمودی دما را در نظر گرفتیم که در

جدول (۱): مقدار تغییر دما از مج پ با دمای سر در حالت نشسته برای

نمونه	نمونه‌های مختلف			نتیجه
	دمای سر در حالت نشسته (k)	دمای مج پ (k)	اختلاف دما	
۱	۲۹۷/۵۸	۳۰۰/۴۶۴	۲/۸۸۴	✓
۲	۲۹۸/۴۷۶	۲۹۷/۷۵۳	۰/۷۲۳	✓
۳	۲۹۹/۱۲۱	۳۰۰/۰۰۶	-۱/۵۸۵	✓
۴	۲۹۸/۹۶۱	۳۰۲/۳۵۱	-۳/۳۹	✗
۵	۲۹۵/۰۹۹	۲۹۶/۷۲۹	۱/۶۳	✓
۶	۲۹۴/۵۱۵	۲۹۶/۹۱۴	۲/۳۹۹	✓
۷	۲۹۷/۰۹۴	۲۹۴/۱۵۸	-۲/۹۳۶	✓
۸	۲۹۷/۸۰۹	۲۹۴/۰۴۶	-۳/۷۶۳	✗
۹	۲۹۵/۴۰۹	۲۹۸/۳۶۴	۲/۹۵۵	✓
۱۰	۲۹۴/۸۹۱	۲۹۶/۵۱۶	۱/۶۲۵	✓
۱۱	۲۹۵/۱۵	۲۹۷/۴۰۷	۲/۲۵۷	✓
۱۲	۲۹۴/۷۲۲	۲۹۶/۴۲۶	۱/۷۰۴	✓
۱۳	۲۹۸/۱۲۸	۲۹۴/۹۸۱	-۳/۱۴۷	✗
۱۴	۲۹۳/۸۷۶	۲۹۷/۱۷۵	۳/۲۹۹	✗
۱۵	۲۹۸/۲۷۴	۲۹۴/۰۱	-۴/۲۶۴	✗
۱۶	۲۹۶/۳۵۲	۲۹۴/۷	-۱/۶۵۲	✓
۱۷	۲۹۴/۳۶۶	۲۹۷/۸۳۲	۳/۴۶۶	✗
۱۸	۲۹۴/۴۱۶	۲۹۷/۵۱۳	۳/۰۹۷	✗
۱۹	۲۹۳/۸۰۴	۲۹۶/۲۹۲	۲/۴۸۸	✓
۲۰	۲۹۳/۸۲۸	۲۹۶/۳۴۷	۲/۵۱۹	✓

با توجه به شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که با افزایش مساحت کارایی تهویه کاهش پیدا می‌کند. این کاهش کارایی برای مساحت ۱۲ مترمربع تا ۱۶ مترمربع نسبت به ۱۶ مترمربع تا ۲۰ مترمربع اختلاف بیشتری دارد. با توجه به شکل (۱۳) در دبی ۰/۰۴۵ مترمکعب بر ثانیه نمودار دمای میانگین برای اتاق با مساحت‌های ۱۲، ۱۶ و ۲۰ مترمکعب بر ثانیه اختلاف کمی با هم دارند ولی با افزایش دبی به ۰/۰۸۹ و ۰/۱۳۳ مترمکعب بر ثانیه، نمودار از هم فاصله گرفته و

فهرست علائم

EDTS	دمای متوسط مؤثر جریان هوا
E_t	کارایی تهویه
t	دما، °C یا K
v	سرعت، m/s
زیر نویس	
bz	ناحیه استنشاقی
c	مقدار میانگین
in	ناحیه ورودی
out	ناحیه خروجی
x	محلی که شاخص در آنجا حساب می شود.

نهایت مدل شماره ۱۹ که در آن دریچه ورودی در دیوار روبه روی آدمک در وسط دیوار و دریچه خروجی در همان دیوار در بالای آن قرار دارد، مورد تأیید قرار گرفته است. در این نمونه معیار کارایی تهویه آن بالاتر و دمای میانگین آن پایین تر از بقیه نمونه هاست. بر این اساس می توان استدلال کرد که این روش توزیع هوا می تواند تا حد زیادی دغدغه های مربوط به بحث انرژی سیستم های تهویه مطبوع و توزیع هوا را در سایه الزامات انرژی ۲۰۱۰-۵۵ حل کند. در ادامه به بررسی اثر مساحت اتاق بر انتقال حرارت پرداختیم که نمونه ۳ با مساحت های ۱۲، ۱۶ و ۲۰ مترمربع بررسی شده است و مشخص شد با افزایش مساحت، کارایی تهویه کاهش پیدا می کند و دمای میانگین اتاق افزایش پیدا می کند. همچنین با افزایش دبی هوا، دمای میانگین اتاق کاهش پیدا می کند.

مراجع

- [1] Khamporn, Nopparat and Chaiyapinunt, Somsak, "An Investigation on the Human Thermal Comfort from a Glass Window", Engineering Journal, Vol. 18, No. 1, pp. 25-44, 2014.
- [۲] کارگر شریف آباد، هادی، جلیلیان، مسعود، «رده بندی انرژی چند ساختمان مسکونی طبق استاندارد ملی در شهر قم و بررسی اثر چند عامل مؤثر بر آن»، نشریه علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۶، شماره ۱، صفحه ۳۶۱-۳۶۴، ۱۳۹۵.
- [3] Wyon, David P, "The Effects of Indoor Air Quality on Performance and Productivity", Indoor air, Vol. 14, No. 7, pp. 92-101, 2004.
- [۴] افضلیان، مهدی، داودی، فرزین، حسن زاده، حسن، ذوالفقاری، سید علیرضا، معرفت، مهدی، «بررسی تأثیرات عوامل فردی بر آسایش حرارتی افراد مستقر در یک محیط پرجمعیت»، نشریه علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۷، شماره ۲، صفحه ۲۷۵-۲۸۳، ۱۳۹۶.
- [۵] فتح الله زاده، محمدحسن، حیدری نژاد، قاسم، پاسدار شهری، هادی، «بررسی اثر دمای هوای ورودی بر آسایش حرارتی و کیفیت هوای داخلی برای اتاقی با سیستم تهویه جابه جایی در تابستان»، نشریه علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۴، شماره ۹، صفحه ۳۵-۴۴، ۱۳۹۳.
- [6] Alves, Octávio, Monteiro, Eliseu, Brito, Paulo and Romano, Pedro, "Measurement and Classification of Energy Efficiency in HVAC Systems", Energy and Buildings, Vol. 130, pp. 408-419, 2016.
- [7] Chen, Q, "Comparison of Different $k-\epsilon$ Models for Indoor Air Flow Computations", Numerical Heat Transfer, Part B Fundamentals, Vol. 28, No. 3, pp. 353-369, 1995.
- [8] ASHRAE, Standard 55-2010, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2010.
- [9] Lin, Zhang, Chow, T.T., Fong, K.F., Tsang, C.F. and Wang, Qiuwang, "Comparison of Performances of Displacement and Mixing Ventilations. Part II: Indoor Air Quality", International Journal of Refrigeration, Vol. 28, No. 2, pp. 288-305, 2005.
- [10] Lin, Zhang, Chow, T.T., Fong, K.F., Wang, Qiuwang and Li, Ying, "Comparison of Performances of Displacement and Mixing Ventilations. Part I: Thermal Comfort", International journal of refrigeration, Vol. 28, No. 2, pp. 276-287, 2005.
- [11] Alajmi, Ali and El-Amer, Wid, "Saving Energy by Using Underfloor-Air-Distribution (UFAD) System in Commercial Buildings", Energy conversion and management, Vol. 51, No. 8, pp. 1637-1642, 2010.
- [12] Chung, I. Ping and Dunn-Rankin, Derek, "Using Numerical Simulation to Predict Ventilation Efficiency in a Model Room", Energy and Buildings, Vol. 28, No. 1, pp. 43-50, 1998/08/01, 1998.
- [13] Kim, Gon, Schaefer, Laura, Lim, Tae Sub, Kim and Jeong Tai, "Thermal Comfort Prediction of an Underfloor Air Distribution System in a Large Indoor Environment", Energy and Buildings, Vol. 64, pp. 323-331, 2013.
- [۱۴] حیدری نژاد، قاسم، فتح الله زاده، محمدحسن، پاسدار شهری، هادی، «بررسی اثر ارتفاع دریچه برگشت هوا بر مصرف انرژی، آسایش حرارتی و کیفیت هوا در سیستم توزیع هوای زیرسطحی»، نشریه علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۴، شماره ۱۶، صفحه ۱۲۵-۱۳۳، ۱۳۹۳.
- [15] Maerefat, Mehdi, Zolfaghari, Alireza and Omidvar, Amir, "On the Conformity of Floor Heating Systems with Sleeping in the Eastern-Style Beds; Physiological Responses and Thermal Comfort Assessment", Building and Environment, Vol. 47, pp. 322-329, 2012.
- [۱۶] معلمی خیابوی، نگین، معرفت، مهدی، ذوالفقاری، سید علیرضا، «معرفی یک مدل آسایش حرارتی جدید برای ارزیابی احساس حرارتی موضعی و کلی در محیط های غیریکنواخت»، نشریه علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۷، شماره ۸، صفحه ۴۴۴-۴۵۰، ۱۳۹۶.
- [۱۷] افضلیان، مهدی، ذوالفقاری، سید علیرضا، فؤالدینی، علی، «اثرات نرخ تعویض هوا بر آسایش، کیفیت هوا و مصرف انرژی در یک سالن اجتماعات دارای سیستم توزیع هوای زیرسطحی»، نشریه علمی پژوهشی

- مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۷، شماره ۲، صفحه ۲۸۴-۲۹۴، ۱۳۹۶.
- [18] Lin, Zhang, Chow, Tin Tai, Tsang, C.F., Fong, K.F. and Chan, L.S., "Stratum Ventilation—A Potential Solution to Elevated Indoor Temperatures", Building and Environment, Vol. 44, No. 11, pp. 2256-2269, 2009.
- [19] Lin, Zhang, Yao, Ting, Chow, Tin Tai, Fong, K.F. and Chan, L.S., "Performance Evaluation and Design Guidelines for Stratum Ventilation", Building and Environment, Vol. 46, No. 11, pp. 2267-2279, 2011.
- [20] Tian, Lin, Lin, Zhang and Wang, Qiuwang, "Experimental Investigation of Thermal and Ventilation Performances of Stratum Ventilation", Building and Environment, Vol. 46, No. 6, pp. 1309-1320, 2011.
- [21] Lin, Zhang, "Stratum Ventilation-A Solution to Meet Challenges to Contemporary Air Distribution", REHVA, Vol. 4, pp. 40-43, 2014.
- [۲۲] مولایی‌منش، غلامرضا، بررسی نقش پارامترهای هندسی بر کیفیت هوای استنشاقی در یک اتاق با سیستم تهویه مصنوعی شخصی، سومین کنفرانس بین‌المللی گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع، تهران، ۱۳۹۰.
- [۲۳] مولایی‌منش، غلامرضا، «بررسی پارامتری نقش عوامل مؤثر بر آسیایش حرارتی و کیفیت هوای استنشاقی در یک اتاق با تهویه لایه‌ای»، نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۴۷، شماره ۱، صفحه ۶۷-۵۹، ۱۳۹۴.
- [۲۴] مداحی، مهدی و توانایی، فهیمه، «بهینه‌سازی عملکرد حرارتی جداره‌های خارجی یک ساختمان مسکونی میان‌مرتبه در اقلیم سرد و خشک با بهره‌گیری از نرم‌افزار شبیه‌ساز انرژی (نمونه موردی: شهر مشهد)»، نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۹، شماره ۳، صفحه ۱۰۸-۱۲۱، ۱۳۹۸.
- [۲۵] خداکرمی، جمال و قبادی، پریسا، «بهینه‌سازی مصرف انرژی در یک ساختمان اداری مجهز به سیستم مدیریت هوشمند»، نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۶، شماره ۲، صفحه ۱۲-۲۳، ۱۳۹۵.
- [26] Fathalian, Afshin and Kargarsharifabad, Hadi, "Actual Validation of Energy Simulation and Investigation of Energy Management Strategies (Case Study: An Office Building in Semnan, Iran)", Case Studies in Thermal Engineering, Vol. 12, pp. 510-516, 2018.
- [۲۷] احمدزاده، محمد، «بکارگیری پنلهای خورشیدی به منظور بهبود عملکرد انرژی سیستمهای تهویه مطبوع هوا تازه»، نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۶، شماره ۴، صفحه ۴۴-۵۳، ۱۳۹۵.
- [۲۸] فتحعلیان، افشین، کارگر شریف‌آباد، هادی، «بررسی تأثیر راهکارهای مختلف بهینه‌سازی انرژی در رده‌بندی انرژی ساختمان به وسیله نرم‌افزار دیزاین بیلدر؛ مطالعه موردی: ساختمان اداری»، فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست، مقاله پذیرفته‌شده برای انتشار، ۱۳۹۸.
- [29] Karimipناه, Taghi, Awbi, HB, Sandberg, Mats, Blomqvist, Claes, "Investigation of Air Quality, Comfort Parameters and Effectiveness for Two Floor-Level Air Supply Systems in Classrooms", Building and Environment, Vol. 42, No. 2, pp. 647-655, 2007.
- [30] Lin, Zhang, "Effective Draft Temperature for Evaluating the Performance of Stratum Ventilation", Building and Environment, Vol. 46, No. 9, pp. 1843-1850, 2011.
- [31] Hashimoto, Yukihiro, "Numerical Study on Airflow in an Office Room with a Displacement Ventilation System", Building Simulation, Vol. 1, 2005.
- [32] Environments, Moderate Thermal, Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort; ISO7730, International Organisation for Standardisation: Geneva, Switzerland, 1994.
- [33] Standard, ASHRAE, Standard 62.1-2004, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, 2004.
- [34] Manual, ANSYS FLUENT User, release 16.0, ANSYS Inc, 2016.
- [35] Hinze, JO, Turbulence. McGraw-Hill Publishing Co, New York, 1975.
- [36] Choudhury, D, Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling (Technical memorandum TM-107), Fluent Inc, 1993.
- [37] Guide, Fluent User's, Release 6.1, Fluent Inc, 2003.
- [۳۸] کارگر شریف‌آباد، هادی، فلسفی، محمد، «مدل‌سازی عددی انتقال حرارت جابه‌جایی داخلی سیال مغناطیسی تحت میدان مغناطیسی منقطع و فرکانس‌های زمانی متفاوت»، نشریه علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۵، شماره ۶، صفحه ۹۸-۹۱، ۱۳۹۴.
- [۳۹] فرهانی، بیژن، گل‌افشانی، مهدی، اکرامی، سعید، «تحلیل میدان جریان در اطراف دریچه‌های کشویی با استفاده از روش چند بلوکی»، نشریه علمی پژوهشی مواد پیشرفته در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۱، صفحه ۸۵-۱۰۷، ۱۳۷۷.
- [۴۰] ایمانی‌کله‌سر، میثم، شیرزاده‌گرمی، هوشیار، «بررسی عددی رفتار آئروالاستیک ساختمان‌های بلند با لحاظ اندرکنش سازه و باد»، نشریه علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۹، شماره ۳، صفحه ۱۹۷-۱۳۰، ۱۳۹۷.