

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۸/۱۳
 تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۵/۰۱/۲۵

امید رهایی^۱، امین رؤسای^۲

بررسی وضعیت دیواره‌های جداکننده در کیفیت تهویه مطبوع و شرایط جریان هوای داخل فضاهای اداری با روش CFD^۳

چکیده

تأمین شرایط آسایش کارکنان در فضاهای اداری امری ضروری است. این پژوهش نشان می‌دهد که معمولاً سامانه‌های تهویه مطبوع عملکرد مناسبی جهت خنک کردن فضاهای داخلی اداری با پلان باز ندارند. لذا تحقیق حاضر با هدف ارائه راهکاری ساده و اجرایی، به صورت مداخله در وضع موجود معماری انجام گرفت. روش انجام این تحقیق با توجه به ماهیت میان‌رشته‌ای آن، یک روش ترکیبی است. ابتدا پس از مشاهدات اولیه و انتخاب نمونه موردی با استفاده از یک روش تجربی متغیرهای مستقل تأثیرگذار شناسایی و متغیرهای وابسته توسط دستگاه‌های دیجیتال در یک نمونه موردی تصادفی (ساختمان اداری پروژه یادآوران) اندازه‌گیری شدند. به منظور تدقیق داده‌ها و تحلیل آنها از روش CFD استفاده شد و با استفاده از نرم‌افزار Fluent جریان هوای داخل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که وضعیت معماری و شیوه قرار گرفتن اجزای آن بر کیفیت جریان هوای داخل و مصرف انرژی دستگاه‌های تهویه مطبوع تأثیر بسیار زیادی دارد. همچنین آزمون‌ها نشان دادند که ارتفاع پارتیشن‌ها در فضاهای اداری، موقعیت دیواره‌های جداکننده و نیز موقعیت نازلهای جریان هوای مطبوع باید بر اساس شرایط هر واحد اداری محاسبه شود و طراحی صحیح آنها موجب ارتقای کیفیت تهویه مطبوع، تأمین شرایط آسایش ساکنان و نیز کاهش مصرف انرژی می‌شود.

کلیدواژه‌ها: تهویه مطبوع، جریان هوا، ساختمان‌های اداری، متغیرهای معماری.

^۱ استادیار دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، دانشکده معماری، استان تهران، شهر تهران (نویسنده مسئول مکاتبات)

E-mail: o.rahaei@srttu.edu

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد معماری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات خوزستان، اهواز، ایران

E-mail: aminroasaei@gmail.com

^۳ این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد معماری امین رؤسای با عنوان «ارتقای وضعیت تهویه مطبوع در فضاهای اداری با اولویت‌بخشی به متغیرهای معماری» است که به راهنمایی دکتر امید رهایی در دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات خوزستان انجام گرفته است.

مقدمه

سامانه‌های تهویه مطبوع در ساختمان‌ها به‌عنوان راهکار و سرآغازی برای بهبود شاخصه‌های رفاهی و کنترل گرما در فضاهای داخلی به‌شمار می‌رود و مفهومی گسترده را دربر می‌گیرد (فرزام شاد، ۱۳۸۸، ۳۴). هدف از استفاده سامانه‌های تهویه مطبوع ارائه سطح قابل قبولی از آسایش برای افراد ساکن و تابع فرآیند، جهت حفظ کیفیت مناسب هوای داخل ساختمان و به حداقل رساندن هزینه‌های سامانه و انرژی مورد نیاز است. در این میان تأمین شرایط آسایش حرارتی در ساختمان‌های اداری عاملی است که بر سلامت، رضایت و بهره‌وری شاغلان تأثیر می‌گذارد و اطمینان حاصل کردن از آسایش و سلامتی کارکنان یکی از اهداف اصلی در عملکرد ساختمان‌های اداری است. همچنین یکی از موارد اساسی در کنترل گرما توجه به شاخص‌هایی است که آسایش انسانی را با پارامترهای فیزیکی محیط داخلی مرتبط می‌سازد (Wu and Sun, 2012). تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد مشکلات کیفیت جریان هوا و کنترل درجه حرارت محیط داخلی ساختمان‌های اداری در دهه‌های اخیر به‌واسطه مشکلات طراحی معماری تشدید شده و موج صرفه‌جویی در مصرف انرژی را به ما عرضه داشته است (فرزام شاد، ۱۳۸۸: ۳۵). از معمول‌ترین علت‌های شناخته شده و تأثیرگذار بر کیفیت وضعیت هوای داخل که مستقیماً با طراحی و عملکرد ساختمان مرتبط است، می‌توان به تهویه نامناسب اشاره کرد. همچنین مصالح ساختمانی، فعالیت ساکنین و تجهیزات اداری می‌توانند کیفیت هوای داخل را پایین بیاورند. به همین منظور، استاندارد انجمن مهندسين گرمایی، برودتی و تهویه هوای آمریکا برای دستیابی به هوای داخلی با کیفیت، دو فرآیند را توصیه می‌کند: (۱) فرآیند رتبه‌بندی تهویه که کیفیت و کمیت هوا را برای یک فضا تعیین می‌سازد؛ و (۲) فرآیند کیفیت هوای داخلی که نیازمند کنترل تمامی آلاینده‌های شناخته شده و برخی سطوح مشخص قابل قبول در فضای داخلی است (Shaw, 1997). یکی از موارد مهم در هنگام طراحی سامانه‌های تهویه مطبوع توجه به معیارهایی است که رعایت آن موجب تأمین سلامت و آسایش افراد در بخش‌های مختلف ساختمان می‌شود: دما، رطوبت نسبی محیط، سرعت جریان هوا و کیفیت آن در فضاهای داخلی ساختمان از جمله این معیارها هستند. همچنین دستیابی به شرایط رضایت‌بخش در فضاهای داخلی ساختمان به عوامل پیچیده و متغیرهای مختلفی وابسته است که شیوه طراحی معماری، ساختار و کاربری ساختمان در کنار مواردی مانند نحوه طراحی، ساخت و بهره‌برداری از سامانه‌های تهویه مطبوع، همگی بر میزان رضایت‌مندی افراد حاضر در ساختمان از شرایط مؤثر هستند (ASHRAE, 2007). بنابراین با توجه به اینکه تأمین شرایط آسایش در محیط‌های کاری همواره باید مورد توجه قرار گیرد، این مقاله ارتقای کیفیت تهویه مطبوع در ساختمان‌های اداری را مورد مطالعه قرار داده است. برای انجام تحقیق از یک ساختمان اداری به‌عنوان نمونه مورد مطالعه استفاده شده و با استفاده از روش تجربی متغیرهای مستقل شناسایی گردیده و به اندازه‌گیری داده‌های مربوط به متغیرهای وابسته پرداخته است. در نهایت اطلاعات گردآوری شده مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج حاصل از آن ارائه شده است.

پیشینه تحقیق

در سال ۱۹۱۴ میلادی ویلسن کریر اولین سامانه تهویه مطبوع تجاری را تولید کرد که مشکلات متعددی در سرمایش و گرمایش هوای داخل داشت (بینگلی، ۱۳۸۸). مروری بر نوشته‌ها و تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که در اواخر دهه ۱۹۳۰ علاقه فراوانی در زمینه مهندسی تهویه به وجود آمد (Burgess, 1995; ACGIH, 1951). سول در سال ۱۹۹۱ دو سیستم موضعی و عمومی تهویه را بررسی کرد (Soule, 1991). بورتون در سال ۱۹۹۷ نشان داد که «... باید تهویه عمومی و موضعی در همه زمینه‌ها ... صورت پذیرد» (Burton, 1997). استانداردهای محیطی برای ساختمان‌های صنعتی در ایالات متحده (Environ-

6-2001) mental Agent Factory Establishment Standards) و مجموعه‌ای از استانداردها (۲۰۰۶) برای اتحادیه اروپا بر کاهش آلاینده‌های محیطی در فضاهای داخلی تأکید داشته‌اند (Curd, ۲۰۰۶). علاوه بر آن معیار COSHH^۱ از مدیریت ایمنی و بهداشت انگلستان (HSE)^۲، معیار REL^۳ از انستیتو ملی بهداشت و ایمنی شغلی آمریکا (NIOSH)^۴ و معیار PEL^۵ از مدیریت بهداشت و ایمنی شغلی آمریکا (OSHA)^۶ استانداردهای جهانی هستند که سالانه ویرایش می‌شوند (کمیته فنی بهداشت حرفه‌ای کشور، ۱۳۸۰، ۶). این موارد ضرورت مطالعه در زمینه تهویه را در فضاهای بسته معماری نشان می‌دهد.

انجمن ASHRAE معیاری را تحت عنوان «محدوده آسایش حرارتی» مطرح کرده است که موضوع آن شرایط مناسب هوای داخل ساختمان است (ASHRAE, 2004). اشری دو نیاز جریان مطبوع هوای داخل و تخلیه هوای آلوده داخلی را برای سامانه‌های تهویه مشخص می‌سازد (ASHRAE, 1992). در سال ۱۳۷۴ در ساختمان اصلی وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی تحقیقی صورت پذیرفت که بر این اساس مشخص گردید ساختمان مذکور به لحاظ متغیرهای معماری احتمالاً یک ساختمان بیمار است و بیش از ۲۰٪ از کارکنان به‌خاطر کیفیت هوای داخل احساس ضعف شدید داشتند (Zamanian, 1996). مؤسسه ملی استاندارد و تکنولوژی آمریکا مطالعه‌ای از تهویه و تکنیک‌های اندازه‌گیری تهویه در ساختمان‌های اداری در ارگان پرتلند انجام داده است. در این پژوهش بخش زیادی از اشکالات سیستم‌های تهویه به متغیرهای معماری مربوط شده است (Dols & Persily, 1995). و و یک ارزیابی سیستماتیک را در مورد انرژی و عملکرد گرمایی برای شاخص احاطه‌کننده افراد ساکن در ساختمان اداری انجام داد. و نتیجه‌گیری کرد که پارامترهای معماری مثل حجم اتاق، سطح و ضرایب انتقال گرمایی دیواره خارجی، پنجره، سقف، ضریب شکل ساختمان به‌شدت بر مصرف انرژی بروودی و حرارتی و نیز آسایش حرارتی ساختمان اثر می‌گذارد (Wu and Sun, 2012). حسین ماری اریاد و همکاران (۱۳۹۳) در مقاله‌ای «ارزیابی کارایی سامانه تهویه مطبوع یک ساختمان اداری در شهر تهران» را مورد بررسی قرار داده‌اند. یافته‌های مورد بررسی در این تحقیق نشان داد بیشتر افراد از جهت جریان هوا و گرما در ساختمان اداری شکایت دارند که مهم‌ترین علت آن نقص در سیستم تهویه مطبوع به دلیل توزیع و جهت نامناسب هوا بوده است (ماری اریاد، ۱۳۹۳، ۵۹). محمد علیایی و همکاران (۱۳۹۱) نیز عوامل مؤثر بر کیفیت هوای داخل در یک ساختمان اداری در شهر تهران را مورد بررسی قرار دادند و مشخص شد ۹۰ درصد کارکنان مورد بررسی، شرایط محیط کار را نامناسب گزارش کردند. بیشترین شکایات آنها به ترتیب مربوط به احساس سنگینی هوا، خستگی و سردرد است. نتایج تحقیق نشان داد، با اینکه اکثر شاخص‌های کیفیت هوای اندازه‌گیری شده در مقایسه با مقادیر مرجع از وضعیت قابل قبولی برخوردار بودند، اما بسیاری از کارکنان از کیفیت هوای داخل ساختمان مورد مطالعه ناراضی بودند و به نظر می‌رسد عوامل دیگری احساس کارکنان در مورد کیفیت هوای داخل ساختمان را تحت تأثیر قرار می‌دهد (علیایی و همکاران، ۱۳۹۱، ۱۳۳۱). مطالب عنوان شده فوق همگی این مطلب را می‌رسانند که تهویه مطبوع در ساختمان‌های اداری دچار مشکلاتی است که بخشی از آن به معماری بنا و خصوصاً معماری داخلی آن باز می‌گردد. به جهت انتخاب روش تحقیق مناسب با روند پژوهش، مطالعات مرتبطی که مربوط به تحلیل جریان هوای داخل هستند نیز ارائه می‌گردد. ذکر این نکته ضروری است که به‌رغم اینکه ممکن است نمونه‌های موردی ادبیات موضوع ساختمان اداری نباشند، با این حال مطالعات مذکور به دلیل مشابهت روش تحقیق و اثبات روایی روش تحقیق پیشنهادی این پژوهش ارائه می‌گردند. آگاهی از جریانات هوای داخلی در محیط‌های بسته به سه دلیل قابل توجه است: آسایش حرارتی، کیفیت هوای داخل و مصرف انرژی ساختمان (عمیدپور، ۱۳۸۸). دو روش برای تحلیل جریان هوا در ساختمان وجود دارد: روش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی (Loomans & Mook, 1995). شبیه‌سازی‌های عددی در مقایسه با روش‌های آزمایشگاهی بسیار ارزان‌تر، دقیق‌تر و سریع‌تر هستند. با این حال در

این روش نمی‌توان تمامی شرایط فیزیکی را در نظر گرفت و همواره نیاز به تقریب وجود دارد. بنابراین ضرورت دارد شبیه‌سازی‌های عددی توسط نتایج آزمایشگاهی اعتباربخشی شوند (عمیدپور، ۱۳۸۸). خوهریر^۲ از یک مدل تلاطم دوبعدی برای پیش‌بینی پراکنش سرعت هوا، دما، انرژی سینتیک متلاطم در یک هوای تهویه شده با استفاده از موقعیت‌های متفاوت ورودی و خروجی دستگاه‌های تهویه مطبوع استفاده کرد (Khudheyer, 2005). یوکی هیرو هاشیموتو^۸ جریان هوا در یک اتاق تجاری را با استفاده از یک سامانه جابجایی تهویه و با بهره‌گیری از یک CFD سه‌بعدی مورد تحقیق قرار داد (Hashimoto, 2005). در سه دهه گذشته مطالعات تجربی متعددی در مورد جریان جابجایی طبیعی انجام شده است. جریان جابجایی طبیعی و آشفته در محفظه اولین بار توسط الدر (Elder, ۱۹۶۵, ۹۹-۱۱۱) و پس از آن توسط گیل و اشمیت (Giel & Schmidt, 1986, 1459-64) بررسی گردید. در این آزمایش‌ها از آب به جای هوا استفاده شد. چیزرایت (Cheesewright, 1968, 1-9) سرعت میانگین، دمای هسته و نوسانات آشفتگی را در یک محفظه حاوی هوا با اختلاف دما در دیوارها بررسی کرد. عدد رایلی جریان محفظه حدود 10^{10} و نسبت ابعاد محفظه ۵ به ۱ بوده است. دافاآلا و بتس (Dafa Alla & Bets, 1996, 165-194) جریان جابجایی طبیعی را در یک محفظه بلند با نسبت منظر ۲۸ به ۰/۲ و عدد رایلی $10^{10} \times 8/3$ به صورت تجربی بررسی کرده‌اند، در این آزمایش از سرعت‌سنجی لیزر برای اندازه‌گیری سرعت و نوسانات آن و نیز از ترموکوپل برای اندازه‌گیری دما و نوسانات آن استفاده شده است.

اولسن و دیگران (Olsen, Glicksman & Ferm, 1990, 640-647) در یک اتاقک حاوی هوا و درون یک محفظه مدل کوچک، آزمایشی را در مورد جریان جابجایی طبیعی هوا با عدد رایلی حدود 10^{10} انجام داده‌اند. ابعاد اتاق حدوداً به نسبت ۱ به ۳ بود. در این آزمایش جریان و دمای اندازه‌گیری شده در هسته و لایه مرزی نمایش داده شد. رهایی (۲۰۱۴) اثر متغیرهای معماری را بر کیفیت تهویه مطبوع در یک ساختمان اداری پلان گسترده مورد بررسی قرار داد. وی دریافت که متغیرهای معماری شرایط هوای داخل را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد (Rahaei, 2014).

در سال ۲۰۰۰ پژوهشگران روش شبیه‌سازی دینامیک سیال محاسباتی (CFD) را جهت ارزیابی سرعت و جهت جریان هوا به منظور تهویه بهتر فضای داخلی یک دفتر اداری بسته به منظور کاهش مصرف انرژی برودتی و اصلاح جریان هوای داخل به کار بردند. نتیجه، تغییر دکوراسیون داخلی و اصلاح موقعیت بازشوها بود. در این تحقیق برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار Fluent استفاده گردیده که با آزمایش‌های تجربی اعتباربخشی شده است (Calay, Borresen & Hold, 2000). در تحقیق دیگری، لین و همکاران به مقایسه سیستم تهویه اختلاطی و جایگزینی در فضاهای اداری با پیش‌فرض‌های اولیه کاربر در CFD و نرم‌افزار Fluent جهت ارزیابی سیستم‌های تهویه مذکور پرداختند. پس از مداخله در معماری، یک سیستم ترکیبی پیشنهاد گردید (Lin, Chow, Fong, Tsang & Wang, 2004). در دهه اخیر تحقیقات مشابه بسیاری صورت پذیرفت که همگی با روش CFD و با کمک نرم‌افزار Fluent برای محاسبات عددی انجام شد (Lau & Chen, 2006; Jiang & Chen, 2006; Mirade, & Picgirard, 2006; Chanteloup, & Mirade, 2008; Naghman Khan & Riffat, 2008).

آنچه از بررسی پژوهش‌های مرتبط با موضوع مقاله به دست می‌آید، این است که محققان اشکال مختلف جریان هوا و شرایط تهویه را به صورت جزئی و کلی مورد مطالعه قرار داده‌اند. روش مورد استفاده در غالب پژوهش‌های مذکور، شبیه‌سازی به روش دینامیک سیال محاسباتی (CFD) است که با روش‌های تجربی اعتباربخشی شده است. ضمناً نرم‌افزار Fluent جهت تحلیل‌ها به کار رفته است. در این پژوهش، دیوارهای جداکننده به عنوان یکی از عناصر تأثیرگذار بر جریان هوا در محیط‌های داخلی (مطابق ادبیات موضوع) مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین اولویت تحقیق با ساختمان‌های اداری با پلان باز است که فضاهای داخل آن توسط پارتیشن تفکیک شده است.

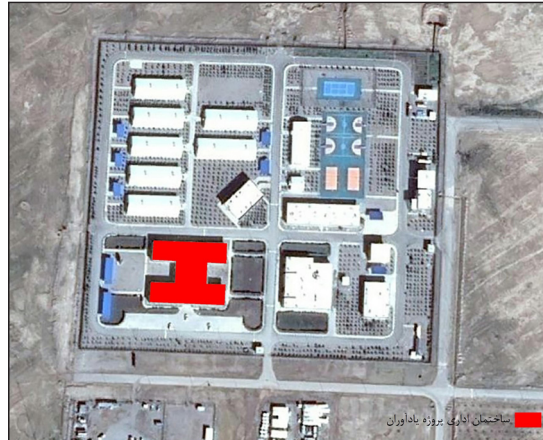
روش تحقیق

تحقیق حاضر با هدف ارتقای کیفیت تهویه مطبوع در فضای داخلی ساختمان‌های اداری و تأمین شرایط آسایش کارکنان انجام شده است که با مداخله در معماری وضع موجود می‌توان آن را تحقق بخشید. از آنجا که «بسیاری از پژوهش‌های معماری بین‌رشته‌ای بوده و نیازمند روش‌های خاص ترکیبی» است (گروت و وانگ، ۱۳۹۲، ۳۷۰)، لذا روش تحقیق این پژوهش به صورت ترکیبی است. جامعه آماری این پژوهش کلیه ساختمان‌های اداری با پلان باز (پارتیشن‌بندی) را شامل می‌شود که سامانه‌های تهویه مطبوع آنها عملکرد مناسبی برای خنک کردن فضاهای داخلی ندارند. لذا بر اساس نوع پژوهش در مرحله اول یک نمونه موردی که تأمین جریان هوا در فضاهای داخلی آن توسط سامانه تهویه مطبوع انجام گرفته است، انتخاب گردید. سپس متغیرهای اصلی مؤثر بر کیفیت جریان هوا شناسایی شد. در این پژوهش ارتفاع سقف، موقعیت و ابعاد پارتیشن‌ها و نیز شکل نازل‌ها به عنوان متغیرهای مستقل و دما و جریان هوا به عنوان متغیرهای وابسته مورد بررسی قرار گرفتند. با استفاده از یک راهبرد تجربی، آزمون‌های تجربی در روزهای گرم تابستان (۱۳۹۳) توسط دستگاه‌های دیجیتال (دماسنج و بادسنج) بر روی نمونه موردی (ساختمان مرکزی یادآوران) انجام گرفت. آزمون‌های اندازه‌گیری در نقاط مشخص بر روی دیوار و در میان فضاهای پارتیشن‌بندی و محل دریچه‌های پخش‌کننده جریان هوا انجام شد. سپس به منظور بررسی دقیق‌تر نظرسنجی‌هایی از کارکنان نسبت به وضعیت تهویه مطبوع موجود انجام شد و داده‌های گردآوری شده مورد تحلیل قرار گرفت. در مرحله دوم به منظور مشاهده تغییر وضعیت جریان هوا در فضای داخلی ساختمان اداری، راهکاری اجرایی با مداخله در وضعیت موجود معماری ارائه گردید. همچنین در این پژوهش از راهبرد شبیه‌سازی با روش CFD (مکانیک سیالات محاسباتی) و توسط برنامه‌های Gambit^{۱۰} و Fluent^{۱۱} (ویرایش ۶/۳) استفاده شد. این نرم‌افزارها طبق نتایج به دست آمده از ادبیات موضوع مورد استفاده قرار گرفتند. در این قسمت حجم معماری محدوده مشخص شده با استفاده از برنامه Gambit شبکه‌بندی شد و به کمک برنامه Fluent با استفاده از روش تحلیلی داده‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در نهایت راهکارهای اجرایی معماری ارائه شد و نتایج حاصل از پژوهش جهت ارتقای کیفیت تهویه مطبوع در ساختمان اداری ارائه گردید.

معرفی نمونه مورد مطالعه

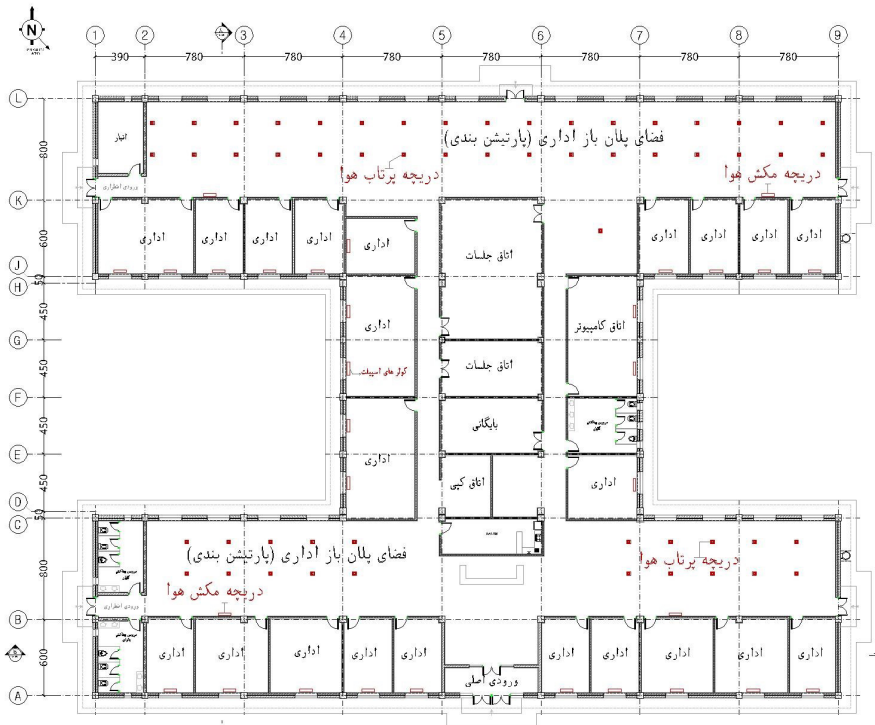
ساختمان اداری که در این پژوهش به عنوان نمونه موردی معرفی شده است، ساختمان اداری یادآوران است که به صورت تصادفی انتخاب شده است. این مجموعه در شمال غربی جاده اهواز به خرمشهر و در سایت اداری پروژه یادآوران قرار گرفته است. فرم ساختمان به شکل H و کشیدگی آن در جهت شرقی و غربی است (شکل ۱). ابعاد ساختمان ۵۸×۴۷ متر و با سامانه پلان باز و بسته طراحی شده است. سالن‌های فضای باز تقسیم شده با پارتیشن با ابعاد ۵۴×۷/۵ متر و ارتفاع ۵ متر هستند که پلان آن مطابق (شکل ۲) نشان داده شده است. سازه ساختمان به صورت اسکلت بتنی با سقف تیرچه بلوک و دیوارهای آجری با ضخامت ۳۵ سانتی‌متر است. پنجره‌های ساختمان فاقد بازشو هستند و فقط جهت تأمین نور بخش‌های داخلی تعبیه شده‌اند (شکل ۳). تأمین جریان هوای فضای داخل این مجموعه از طریق دریچه‌های مربع شکل تعبیه شده در بالای سقف‌های کاذب انجام می‌شود که ابعاد دریچه ۳۰×۳۰ سانتی‌متر و با فاصله ۲/۲۰ متری از یکدیگر و در ارتفاع ۴ متری از کف نصب شده‌اند. بدین ترتیب ۳۵ عدد دریچه پخش‌کننده جریان هوا بر روی سقف کاذب سالن شمالی و ۱۹ عدد بر روی سقف کاذب سالن جنوبی پیش‌بینی شده است و به طور کلی ۵ دریچه مکش هوا با ابعاد ۲۰×۷۰ سانتی‌متر در ساختمان تعبیه شده که ۳ دریچه آن در بخش شمالی و ۲ دریچه در قسمت جنوبی نصب شده است (شکل ۴). همچنین سامانه‌های مورد استفاده جهت تهویه و خنک کردن اتاق‌های اداری از نوع اسپلیت^{۱۲} هستند.

مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که تهویه مطبوع در فضاهای داخلی به صورت یکسان انجام نمی‌شود و مطابق نظرسنجی‌های انجام گرفته کارکنان از شرایط به وجود آمده رضایت کافی ندارند. وجود فضاهای باز میان پارتیشن‌ها و ارتفاع دریچه‌های تهویه نسبت به موقعیت کارکنانی که در حالت نشسته فعالیت کاری دارند، تأثیر زیادی بر شرایط کیفیت جریان هوا و آسایش حرارتی آنها داشته است. بخش عمده‌ای از جریان هوا در فضاهای باز حد فاصل ارتفاع سقف و پارتیشن‌ها از بین می‌رود. همچنین وجود دستگاه‌های الکترونیکی (کامپیوتر و پرینتر) نیز بار حرارتی بیشتری را در محیط تشدید می‌کند و این عامل باعث شده زمان و کارکرد دستگاه‌های تهویه جهت خنک کردن محیط داخلی افزایش یابد.



شکل ۱. موقعیت ساختمان اداری پروژه یادآوران

منبع: earth.google



شکل ۲. پلان وضع موجود ساختمان مرکزی پروژه یادآوران



شکل ۳. نمای شمالی ساختمان مرکزی پروژه یادآوران



شکل ۴. دریچه‌های پخش و مکش جریان هوا در ساختمان اداری

گردآوری داده‌های تجربی

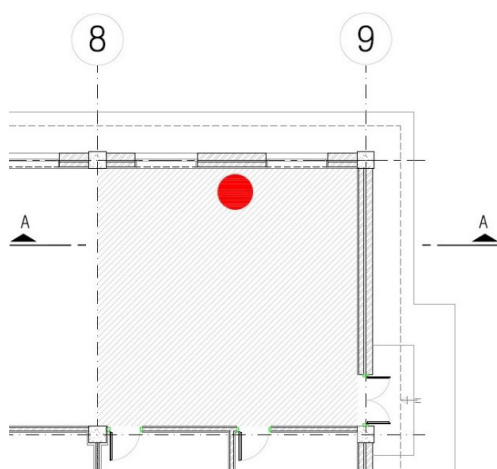
آزمون‌های اندازه‌گیری و متغیرهای معماری

به منظور بررسی مشکلات مربوط به شرایط تهویه مطبوع در نمونه موردی انتخاب شده، استفاده از یک راهبرد تجربی جهت انجام آزمون‌های مربوط به اندازه‌گیری دما در محیط داخلی مدنظر قرار گرفت. ابتدا پس از بررسی نمونه موردی نقاطی جهت برداشت داده‌ها در بخش‌های مختلف ساختمان اداری مشخص گردید (شکل ۵). سپس با استفاده از سه دستگاه دماسنج دیجیتال مدل Extech Humidity RHT20 و یک دستگاه بادسنج مدل Victor 816 B داده‌های مربوط به تغییرات دما و جریان هوا در فضاهای داخلی گردآوری شد. برداشت داده‌های مورد نیاز در تاریخ‌های ۱۰ تیرماه تا ۲۵ شهریورماه ۱۳۹۳ درحالی که درجه حرارت محیط بیرون به ۴۵ تا ۵۰ درجه می‌رسید و در زمان فعالیت کارکنان بین ساعات ۱۰ صبح تا ۴ بعدازظهر انجام شد. نقاط انتخاب شده A، B، و C جهت قرار گرفتن دستگاه‌های دماسنج در میان فضاهای پارتیشن‌بندی بر روی سطح دیوار و در ترازهای ارتفاعی به ترتیب ۲/۷۰ متر (تراز زیر سقف)، ۱/۷۰ متر (کارکنان در حالت ایستاده) و ۱ متری (کارکنان در حالت نشسته) انجام گرفت (شکل‌های ۶ و ۷). سپس اعداد حاصل از تغییرات دما در جداول ۱ و ۲ ثبت گردید. لازم به یادآوری

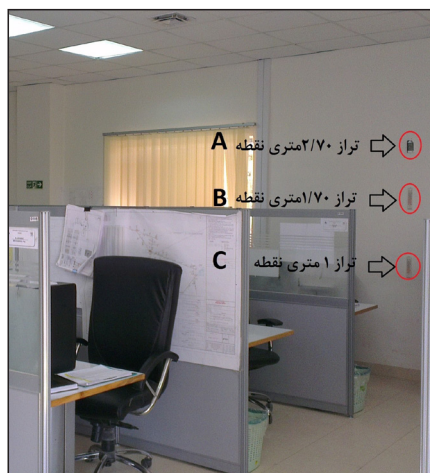
است. آزمون‌های مربوط به اندازه‌گیری دما به صورت سه مرحله‌ای در بازه‌های زمانی متفاوت قبل و بعد از تغییرات معماری همان‌طور که در جداول ۱ تا ۲ نشان داده شده، انجام گرفته است. همچنین میانگین کلی اعداد ثبت شده در آزمون‌های دماسنجی در شکل‌های ۹ و ۱۰ نیز ارائه شده است. همان‌طور که در جداول و شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود، اعداد ثبت شده نشان از اختلاف دما در نقاط انتخاب شده دارد و این تغییرات دمایی در نقطه C (ارتفاع ۱ متری) در محدوده‌ای که کارکنان به صورت نشسته مشغول فعالیت هستند بیشتر از نقاط A و B است. پس از انجام آزمون‌های اندازه‌گیری به منظور مشاهده بهبود وضعیت جریان هوای داخل راهکارهایی به صورت عملی با استفاده از مداخله معماری در عناصر کالبدی وضع موجود ساختمان انجام شد. با توجه به وجود محدودیت‌های اجرایی جهت مداخله از مصالح سبک (کارتن مقوایی) در اطراف دریچه‌های تهویه بر روی سقف کاذب استفاده شد. کارتن‌های نصب شده با فاصله ۳۰ سانتی متری از دریچه‌های پخش‌کننده جریان هوا قرار گرفته است و ارتفاع آنها ۱ متر است (شکل ۸). ارائه این راهکار به منظور مشاهده تغییر وضعیت تهویه مطبوع صورت گرفته است. همچنین به منظور مشاهده تغییر وضعیت دما آزمون‌های اندازه‌گیری مجدداً تکرار شد. بررسی‌ها نشان داد، مداخلات معماری انجام شده بر جریان هوا و شرایط آسایش کارکنان مؤثر بوده است. همان‌طور که در نتایج حاصل از نظرسنجی‌های صورت گرفته از کارکنان قبل و بعد از تغییرات معماری در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان می‌دهد کارکنان از وضعیت جدید رضایت کافی داشته‌اند و این تغییرات موجب شده انتقال جریان هوا و شرایط آسایش در سطوح پایین نسبت به قبل از تغییرات معماری بهتر شود.



شکل ۵. فضای هاشورخورده و نقطه انتخاب شده جهت انجام آزمون‌های اندازه‌گیری تجربی



شکل ۷. پلان بزرگ‌نمایی محدوده انجام آزمون اندازه‌گیری در فضای پارتیشن‌بندی مطابق شکل ۴



شکل ۶. نقاط محل نصب دماسنج بر روی دیوار مطابق تصویر جهت انجام آزمون



شکل ۸. ایجاد تغییرات اطراف دریچه‌های تهویه مطبوع با استفاده از مصالح سبک (کارتن مقوایی)

جدول ۱. داده‌های مربوط به آزمون‌های تجربی اندازه‌گیری دما در فضای پارتیشن‌بندی ساختمان اداری قبل از مداخله در معماری داخلی

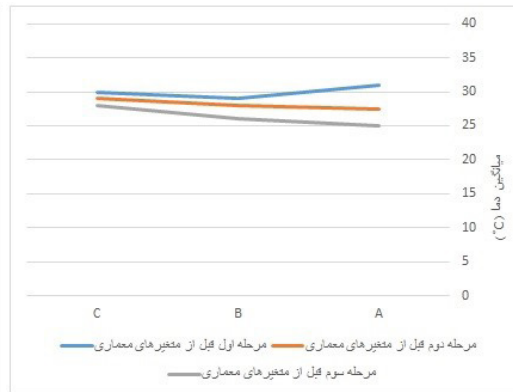
دمای متوسط نقاط قبل از مداخله در معماری داخلی														
دوره انجام آزمون‌های اندازه‌گیری													نقاط انجام آزمون	زمان و مراحل انجام آزمون‌های اندازه‌گیری دما
۲۵ شهریور	۱۸ شهریور	۱۲ شهریور	۶ شهریور	۲۹ مرداد	۱۸ مرداد	۸ مرداد	۲ مرداد	۲۷ تیر	۲۰ تیر	۱۶ تیر	۱۰ تیر			
۲۷	۲۸	۳۱	۲۸	۲۷/۵	۲۷	۲۸	۲۸/۶	۲۹	۳۱	۳۲	۳۱	A	مرحله اول بین ساعت ۱۰ تا ۱۱	
۲۸	۳۱	۲۹/۵	۲۸	۲۹	۲۹	۲۸	۲۹/۵	۲۸	۲۹	۳۱	۳۱/۵	B		
۳۰	۳۱	۳۰/۵	۲۹/۵	۲۸	۲۸	۳۰	۳۰/۵	۲۹	۳۱	۲۹	۳۲	C		
۲۷	۲۷/۵	۲۶	۲۶/۵	۲۷/۵	۲۸	۲۶	۲۷	۲۸	۲۸	۲۷/۵	۲۷	A	مرحله دوم بین ساعت ۱۲ تا ۱۳	
۲۶	۲۶	۲۷/۵	۲۸	۲۷	۲۶	۲۷	۲۸/۵	۲۶	۲۸	۲۸	۲۸/۵	B		
۳۰/۵	۳۰	۲۹	۳۱	۳۱	۲۸	۲۹/۵	۲۹	۳۰/۵	۳۰	۲۹	۳۱	C		
۲۷	۲۶/۵	۲۷	۲۶	۲۵	۲۵	۲۶	۲۶/۵	۲۷	۲۵/۵	۲۵	۲۶	A	مرحله سوم بین ساعت ۱۴ تا ۱۵	
۲۷	۲۸	۲۸/۵	۲۶	۲۷/۵	۲۸	۲۸	۲۷	۲۶	۲۷/۵	۲۷	۲۸	B		
۲۹	۲۸	۲۹	۳۰/۵	۳۰	۲۹	۲۸/۵	۲۸	۲۹	۳۰	۳۰	۲۹/۵	C		

جدول ۲. داده‌های مربوط به آزمون‌های تجربی اندازه‌گیری دما در فضای پارکینگ بندی ساختمان اداری بعد از مداخله در معماری داخلی

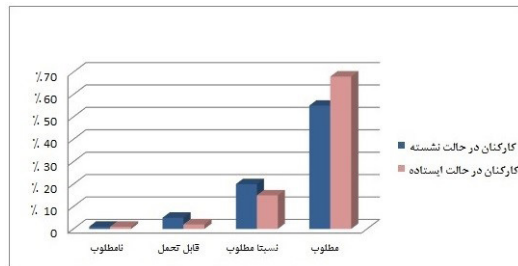
دمای متوسط نقاط بعد از مداخله در معماری داخلی													
دوره انجام آزمون‌های اندازه‌گیری											نقاط انجام آزمون	مراحل انجام آزمون‌های اندازه‌گیری دما	
۲۵ شهریور	۱۸ شهریور	۱۲ شهریور	۶ شهریور	۲۹ مرداد	۱۸ مرداد	۸ مرداد	۲ مرداد	۲۷ تیر	۲۰ تیر	۱۵ تیر			۱۰ تیر
۲۴	۲۳	۲۴/۵	۲۳	۲۳/۵	۲۵	۲۴	۲۳/۵	۲۳	۲۴	۲۵/۵	۲۵	A	مرحله اول بین ساعت ۱۱ تا ۱۲
۲۲	۲۳	۲۴	۲۴/۵	۲۳	۲۲	۲۳	۲۳	۲۴	۲۲/۵	۲۳	۲۲	B	
۲۴/۵	۲۶/۵	۲۷	۲۵	۲۴	۲۶/۵	۲۴	۲۵	۲۵	۲۶	۲۷/۵	۲۶	C	
۲۶	۲۶	۲۵	۲۵/۵	۲۳	۲۴	۲۵	۲۵	۲۶	۲۴/۵	۲۳/۵	۲۳	A	مرحله دوم بین ساعت ۱۳ تا ۱۴
۲۲	۲۱	۱۹	۱۹	۲۱	۱۹/۵	۲۲/۵	۲۲	۲۱	۱۹	۲۳	۲۲	B	
۲۱/۵	۲۰	۲۰	۲۱	۲۲/۵	۲۱	۲۰	۲۰	۲۱/۵	۲۲	۲۱	۲۰	C	
۲۶	۲۶/۵	۲۷	۲۶	۲۵	۲۷	۲۶/۵	۲۵	۲۵/۵	۲۴	۲۶	۲۷	A	مرحله سوم بین ساعت ۱۵ تا ۱۶
۲۳	۲۲	۲۳/۵	۲۴	۲۴/۵	۲۳	۲۲	۲۳/۵	۲۱	۲۲/۵	۲۴	۲۳	B	
۲۰	۲۱/۵	۲۱	۲۰	۲۰	۱۹/۵	۱۸	۱۹	۲۰/۵	۱۹	۲۱	۲۰	C	



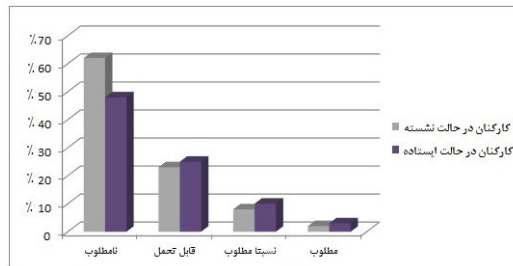
شکل ۱۰. وضعیت دمای هوا در نقاط آزمون بعد از مداخله



شکل ۹. وضعیت دمای هوا در نقاط آزمون قبل از مداخله



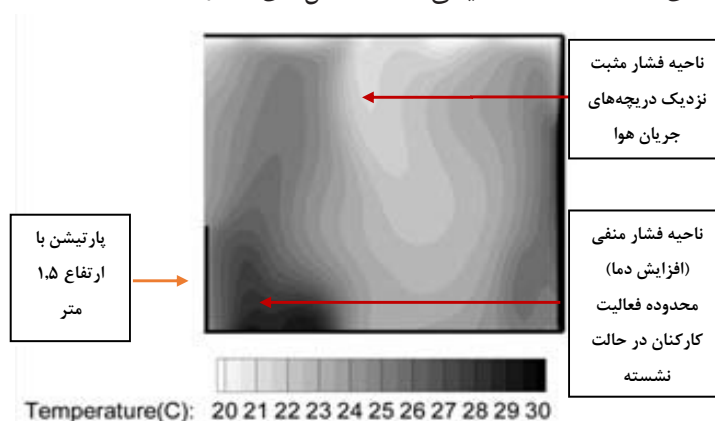
شکل ۱۲. نظرسنجی از کارکنان نسبت به وضعیت تهویه مطبوع بعد از تغییرات در معماری داخلی ساختمان اداری



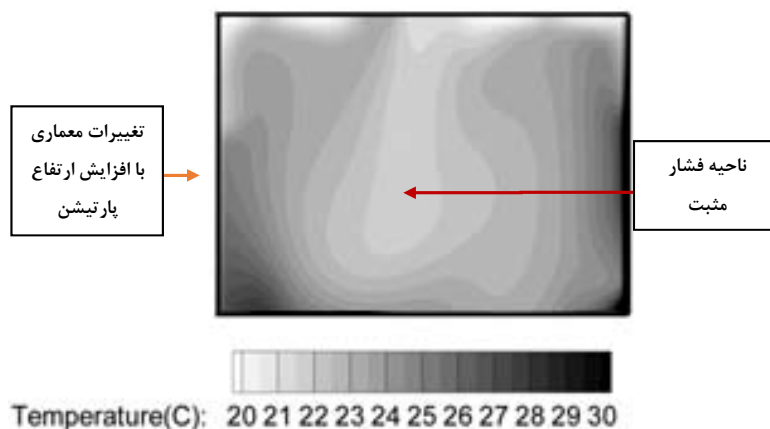
شکل ۱۱. نظرسنجی از کارکنان نسبت به وضعیت تهویه مطبوع قبل از تغییرات در معماری داخلی ساختمان اداری

تحلیل داده‌ها با روش CFD

به منظور ارزیابی دقیق داده‌های تجربی حاصل از اندازه‌گیری‌ها و تغییرات در حوزه معماری داخلی، شبیه‌سازی بر روی نمونه موردی صورت گرفت. شبیه‌سازی این پژوهش با استفاده از روش CFD (مکانیک سیالات محاسباتی) انجام شده است. هدف از شبیه‌سازی در این پژوهش تأیید و تحلیل نتایج تجربی سرعت‌سنجی جریان هوا در محل با استفاده از شبیه‌سازی است. محدوده انتخاب شده جهت شبیه‌سازی سالن بخش شمالی ساختمان اداری است که در شکل ۵ با هاشور مشخص شده است. ابتدا جهت مدل‌سازی هندسی و شبکه‌بندی پلان محدوده مشخص شده که آزمون‌های تجربی در آن انجام شده است، از نرم‌افزار Gambit استفاده شد و شرایط مرزی آن تعیین گردید (دریچه‌های ورود و خروج جریان هوا، موقعیت و ارتفاع پارتیشن‌ها بر روی شبکه‌های سه‌بعدی پیاده شدند). سپس مدل شبکه‌بندی شده جهت محاسبات عددی و شبیه‌سازی‌های مربوط به دما و جریان هوا با استفاده از نرم‌افزار Fluent و توسط داده‌های به‌دست آمده از آزمون‌های تجربی در جداول ۱ و ۲ تحلیل شدند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد شرایط وضع موجود با نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی اندازه‌گیری دما در محل منطبق بوده است و مشخص می‌شود شبیه‌سازی این پژوهش از اعتبار لازم برخوردار است. بر این اساس شبیه‌سازی‌ها به صورت کانتورهای اختلاف فشار استاتیکی دما در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ ارائه شده است.

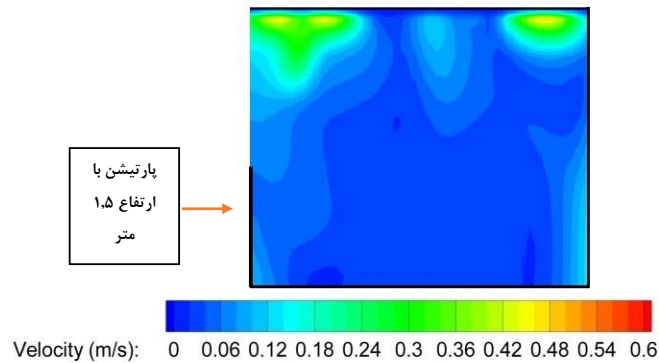


شکل ۱۳. کانتور اختلاف فشار مثبت و منفی قبل از تغییرات در معماری داخلی

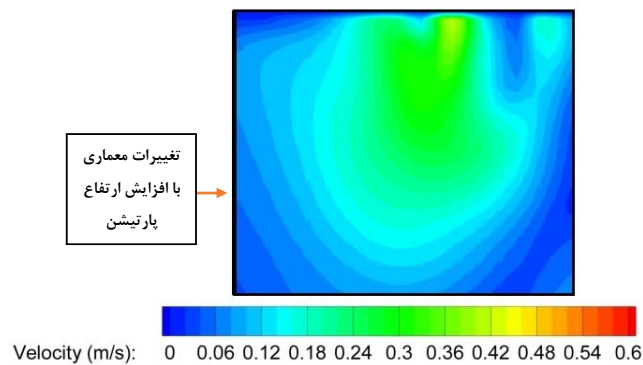


شکل ۱۴. کانتور اختلاف فشار مثبت و منفی بعد از تغییرات در معماری داخلی

همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، وضعیت دما در قسمت میانی بالا در ناحیه فشار مثبت (بخش کم‌رنگ) از شرایط مطلوب‌تری نسبت به سطح پایین در ناحیه کم‌فشار (بخش پررنگ) محدوده‌ای که کارکنان در حالت نشسته در فضای پارتیشن‌ها مشغول فعالیت هستند برخوردار است. این اختلاف فشار مثبت و منفی نشان می‌دهد که جریان هوای مطبوع در میان پارتیشن‌ها به‌خصوص سطح پایین به‌صورت یکسان انجام نگرفته است و شرایط آسایش حرارتی کارکنان در سطوح پایین وضعیت مطلوبی ندارد. این شرایط در حالتی به‌وجود آمده است که پارتیشن‌ها با ارتفاع ۱/۵ متری اجرا شده‌اند و فضای بالای پارتیشن تا زیر سقف کاذب به‌صورت باز است. این عامل موجب شده بخش عمده‌ای از جریان هوای خارج شده از دریچه‌های پخش‌کننده هوا از فضای باز حدفاصل پارتیشن تا سقف خارج شود و به سطوح پایین انتقال پیدا نکند که این امر موجب افزایش دما در سطح پایین شده است. همچنین جهت مشاهده تغییرات وضعیت دما بعد از مداخله در معماری داخلی نمودار اختلاف فشار استاتیکی ارائه گردید (شکل ۱۴). این نمودار بیانگر آن است که شرایط دما در سطح پایین (ناحیه فشار مثبت) کاهش یافته است. همچنین تغییر در ارتفاع دیواره‌های جداکننده (پارتیشن‌ها) از ۱/۵ متر به ۳ متر باعث شد بخش عمده‌ای از جریان هوا که قبل از تغییرات در معماری داخلی از فضای باز حدفاصل بالای پارتیشن و سقف کاذب به فضاهای دیگر انتقال پیدا می‌کرد کنترل شود و به موجب آن جریان هوا در میان فضای پارتیشن‌ها و محدوده فعالیت کارکنان به‌صورت یکسان برقرار شود (شکل ۱۵ و ۱۶). به‌منظور تأیید نتایج حاصل از این پژوهش از کارکنان ساختمان اداری نظرسنجی (به‌صورت مصاحبه) انجام گرفت که بسیاری از کارکنان از تغییرات صورت گرفته رضایت داشتند و گفته شد این روش می‌تواند به‌عنوان راهکاری اجرایی جهت رفع مشکلات مربوط به تهویه مدنظر قرار گیرد.



شکل ۱۵. کانتور جریان هوا قبل از مداخله



شکل ۱۶. کانتور جریان هوا بعد از مداخله

نتیجه گیری

تأمین جریان هوای مناسب در فضاهای داخلی با استفاده از سامانه‌های تهویه مطبوع به عوامل مختلفی چون موقعیت دریاچه‌های پخش کننده جریان هوا، ابعاد و اندازه فضاها و شکل و جانمایی عناصر کالبدی بستگی دارد. استفاده از سامانه‌های تهویه مطبوع با عملکرد بهینه اثر قابل توجهی بر کاهش دمای محیط داخلی ساختمان‌ها به خصوص در مناطق با شرایط آب و هوایی گرم دارد. با توجه به اینکه تأثیر عملکرد مطلوب سامانه‌های تهویه مطبوع بر سلامت و بهبود شرایط آسایش حرارتی کارکنان و صرفه جویی در مصرف انرژی نقش مهمی ایفا می‌کند، این پژوهش کیفیت تهویه مطبوع در فضاهای اداری را با استفاده از مداخلات معماری مورد بررسی قرار داده است و به منظور رسیدن به نتایج دقیق‌تر با استفاده از روش CFD پس از اعتبارسنجی آن با یافته‌های تجربی، وضعیت جریان هوای داخل را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده است. نتایج حاصل از تحقیق بر روی نمونه موردی این پژوهش نشان داد عدم توزیع یکنواخت جریان هوا در ساختمان اداری و عدم کارایی سامانه‌های تهویه مطبوع جهت خنک‌کنندگی فضاهای تقسیم شده با پارتیشن‌ها به خصوص در سطوح پایین (محدوده فعالیت کارکنان در حالت نشسته) باعث به وجود آمدن اختلاف گرادیان عمودی دما (تغییر دما از کف تا زیر سقف به صورت عمودی) و برهم زدن شرایط آسایش حرارتی محیط و نارضایتی کارکنان شده است. تحلیل شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که الگوی طراحی و اجرا شده دیوارهای جداکننده (پارتیشن‌ها) و دریاچه‌های پخش کننده جریان هوا از نظر ارتفاع یکی از عوامل تأثیرگذار بر جریان هوا در فضای داخلی ساختمان اداری است. ارتفاع ۱/۵ متری پارتیشن‌ها و به وجود آمدن یک فضای باز تا زیر سقف کاذب باعث شده توزیع جریان هوا در میان محدوده پارتیشن بندی که کارکنان فعالیت دارند، به خصوص سطوح پایین به صورت پراکنده و نامطلوب انجام شود. بر اساس تغییرات معماری که در آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی در میان پارتیشن‌ها و اطراف دریاچه‌های پخش کننده جریان هوا صورت گرفت این نتایج به دست آمد که با ایجاد تغییر در ارتفاع صفحات پارتیشن به صورتی که در شبیه‌سازی‌ها نشان داده شده است، اگر ارتفاع دیواره پارتیشن‌ها از ۱/۵ متر به ۳ متر افزایش یابد، توزیع جریان هوا در تراز ۱ متری از سطح زمین تأمین می‌گردد. ضمن اینکه این تغییرات باعث می‌شود گرادیان عمودی دما با استفاده از جریان هوای تأمین شده در ناحیه‌ای که کارکنان فعالیت دارند کنترل گردد. این کار موجب می‌شود شرایط آسایش حرارتی آنها فراهم شود و انرژی مصرفی که به خاطر کارکرد بیشتر دستگاه‌های تهویه مطبوع جهت خنک کردن فضاهای داخلی افزایش یافته بود کاهش یابد. ضمن اینکه این روش باعث صرفه جویی در مصرف انرژی می‌شود که از نظر اقتصادی حائز اهمیت است. با این حال علاوه بر در نظر گرفتن راهکار اجرایی که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت، می‌توان با مطالعه دقیق‌تر بر روی دیگر عناصر کالبدی شکل دهنده فضاها و توجه به ابعاد و جانمایی آنها در طراحی، شرایط کیفیت تهویه مطبوع را در فضاهای داخلی ساختمان‌ها به صورت قابل توجهی ارتقا بخشید.

پی‌نوشت‌ها

1. The Control of Substances Hazardous to Health
2. Health and Safety Executive
3. Recommended Exposure Level
4. National Institute for Occupational Safety and Health
5. Permissible Exposure Limit
6. Occupational Safety and Health Administration
7. Khudheyer

8. Yukihiro Hashimoto

9. Partition

۱۰. Gambit یک پیش پردازشگر برای مدل سازی هندسه و ایجاد شبکه است. روش کار در این برنامه به این صورت است که ابتدا نقاط اصلی و گوشه های حجمی که نیازمند تحلیل است به برنامه داده می شود، سپس گوشه ها به یکدیگر وصل می شود و پس از ایجاد سطوح (هندسه دوبعدی)، از ترکیب آنها حجم مورد نظر (هندسه سه بعدی) ساخته می شود.

۱۱. Fluent یک نرم افزار کامپیوتری دینامیک سیالات محاسباتی چندمنظوره برای شبیه سازی عددی جریان سیال، انتقال حرارت و واکنش شیمیایی است. با توجه به محیط مناسب نرم افزار جهت تعریف مسئله و شرایط پیچیده، تعریف شرایط مرزی گوناگون و حل مسائل پیچیده از جمله تأثیر پدیده های مختلف به کمک این نرم افزار قابل حل است. این نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی با زبان برنامه نویسی C نوشته شده است.

12. Split

فهرست منابع

- بینگلی، کورکی (۱۳۸۸). تهویه مطبوع برای معماران، ترجمه رامین تابان، چاپ اول، انتشارات یزدا، تهران.
- فرزاد، شاد (۱۳۸۸). مبانی برنامه ریزی و طراحی مراکز اداری، چاپ اول. انتشارات جهان جام جم، تهران.
- گروت، ل. و وانگ، د. (۱۳۹۲). روش های تحقیق در معماری، ترجمه علیرضا عینی فر، چاپ دوم. انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- ماری ارپاد، ح. و همکاران (۱۳۹۳). «ارزیابی کارایی سیستم تهویه مطبوع یک ساختمان اداری در شهر تهران»، فصلنامه بهداشت و ایمنی کار، ۴(۳)، ۵۹-۶۰.
- علیایی، م. و همکاران (۱۳۹۱). «بررسی عوامل مؤثر بر کیفیت هوای داخل در یک ساختمان اداری در شهر تهران»، مجله تحقیقات نظام سلامت، ۸(۷)، ۱۳۳۱-۱۳۳۲.
- عمیدپور، م. (۱۳۸۸). بررسی اثرات استفاده از بخاریهای بدون دودکش بر روی کیفیت هوای داخل، پروژه تحقیقاتی، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مکانیک، کارفرما: شرکت بهینه سازی مصرف سوخت ایران.
- کمیته فنی بهداشت حرفه ای کشور (۱۳۸۰). حدود تماس شغلی عوامل بیماری زا، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات درمانی، تهران.
- ACGIH (1951). *The Industrial Ventilation Manual*, USA: the American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). Ltd.
- ASHRAE (1992). *ASHRE Handbook – Fundamentals*, Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers Inc.
- ASHRAE (2007). *HVAC Applications*, Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers Inc.
- ASHRAE (2004). *Standard 62: Ventilation for Acceptable Air Quality*, American Society of Heating, Refrigerating & Air-Conditioning Engineers.
- Burton, D. F. (1997). *Industrial Ventilation Work Book*, Salt Lake City: DJBA Inc.
- Burgess, W. A. (1995). *Recognition of Health Hazards in Industry*, New York: Wiley Ltd.
- Calay, R. K., Borresen, B. A., & Hold, A. E. (2000). “Selective ventilation in large enclosures”, *Energy and Buildings*, 32 (2000): 281–289, Elsevier Science S.A.
- Chanteloup, V. & Mirade, P.S. (2008). “Computational fluid dynamics (CFD) modelling of local mean age of air distribution in forced-ventilation food plants”, *Journal of Food Engineering*, 90, 90–103, Elsevier Ltd.
- Cheeswright, R. (1968). “Turbulent Natural Convection from a Vertical Plane Surface”, *Heat Transfer*, 90, 1–6.
- Curd, E. (2006). *VENTILATION (legislation & standards)*, UK: The European Commission, Energy

- Per-formance of Buildings Directive and its Ventilation Implications.
- Dafa Alla, A.A., & Bets, P.V. (1996). "Turbulent natural convection in a tall cavity", *Experimental heat transfer*, 9, 165–194.
 - Dols, W. S., and Persily, A. K. (1995). "Study of Ventilation Measurement in an Office Building", *NISTIR 92–4905*, National Institute of Standards and Technology.
 - Elder, J.W. (1965). "Turbulence free convection in a vertical slot", *J. Fluid Mech, report*, 23, 99–111
 - Environmental Agent Factory Establishment Standards, (2001–6). Available from: <http://law.epa.gov.tw/en/laws/671481369.html>
 - Giel, P. W., & Schmidt, F. W. (1986). "All experiment study of high Rayleigh number natural convection". In: *an enclosure proceeding of the 8th International heat transfer conference*, vol. 4, 1459–1464.
 - Hashimoto, Y. (2005). "Numerical Study on Airflow in an Office Room with a Displacement Ventilation System", *Building Simulation, Ninth International IBPSA Conference*, 381–388.
 - Khudheyer, S. (2005). "Numerical Simulation of Turbulent Isothermal Flow in Mechanically Ventilated Room", *JKAU: Eng. Sci.*, 17(2), 103–117.
 - Jiang, Y., and Chen, Q. (2001). "Study of natural ventilation in buildings by large eddy simulation", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89 (2001): 1155–1178, Elsevier Science Ltd.
 - Lau, J., & Chen, Q. (2006). "Energy analysis for workshops with floor-supply displacement ventilation under the U.S. climates", *Energy and Buildings*, 38 (2006), 1212–1219, Elsevier B.V.
 - Lin, Z., Chow, T.T., Fong, K.F., Tsang, C.F., & Wang, Q. (2004). "Comparison of performances of displacement and mixing ventilations, Part II: indoor air quality", *International Journal of Refrigeration*, 28 (2005), 288–305, Elsevier Ltd and IIR.
 - Loomans, M., & Mook, F. van (1995). *Survey on measuring indoor airflows FAGO*, report 95.25.W. Eindhoven University of technology Sweden.
 - Mirade, P.S., & Picgirard, L. (2006). "Improvement of ventilation homogeneity in an industrial batch-type carcass chiller by CFD investigation", *Food Research International*, 39(2006), 871–881, Elsevier Ltd.
 - Naghman Khan, Su, Y., & Riffat, S. B. (2008). "A review on wind driven ventilation techniques", *Ener-gy and Buildings*, 40(2008), 1586–1604, Elsevier B.V.
 - Olsen, D. A., Glicksman, L.R., & Ferm, H. M. (1990). "Steady state natural convection in an empty and partitioned enclosure at high Rayleigh numbers", *J. Heat Transfer*, Trans. ASME 112: 640–647
 - Rahaei, O. (2014). "Effects of Architectural Somatic Variables on Mixed Air Conditioning Systems' Ef-ficiency in Industrial Buildings", *Armanshahr*, 12.
 - Shaw, C.Y. (1997). "Maintaining Acceptable Air Quality in Office Buildings through Ventilation", *National Research Council of Canada*, January ISSN No.3 1206–1220.
 - Soule, R. D. (1991). "Industrial Hygiene Engineering Controls, in G. Clayton and F. E. Clayton, Eds.", *Patty's Industrial Hygiene and Toxicology*, Vol. 1, part B: 24–93.
 - Wu S., & Sun J.Q. (2012). "Building and Environment", *Journal of Vibration and Control*, 57, 88–96.
 - Zamanian, Z. (1996). *Quality of indoor air, Ministry of Health and Medical Education and its relationship with employee comfort*, MSc Thesis Occupational health, Tehran University of Medical Sciences.
 - earth.google.com