

ارزیابی تأثیر تهویه طبیعی بر آسایش حرارتی نمازگزاران در مساجد منطقه گرم و خشک ایران

نجمه تواضع

گروه معماری، واحد بم، دانشگاه آزاد اسلامی، بم، ایران

منصور نیک‌پور^۱

گروه معماری، واحد بم، دانشگاه آزاد اسلامی، بم، ایران

محسن قاسمی

گروه معماری، واحد بم، دانشگاه آزاد اسلامی، بم، ایران

هادی فرزاد

گروه مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی، بم، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۴

چکیده

با توجه به قرارگیری بخش زیادی از کشور ایران در اقلیم گرم و خشک و میزان جذب تابش خورشید، سیستم‌های داخلی تأمین‌کننده آسایش دمایی، سهم عمده‌ای از مصرف انرژی در بخش‌های مختلف ساختمان را به خود اختصاص می‌دهند. تهویه طبیعی یکی از اساسی‌ترین عامل تعیین‌کننده آسایش حرارتی در محیط داخلی به شمار می‌رود. در این مقاله، تحقیقات تجربی و عددی برای ارزیابی تأثیرات تهویه طبیعی بر آسایش حرارتی در داخل مساجد انجام شده است و مسجد شیخ لطف الله به دلیل تشابه فرمی و عملکردی با مساجد معاصر و قرارگیری آن در اقلیم گرم و خشک به عنوان نمونه موردی این پژوهش انتخاب شد و با کمک نرم‌افزار شبیه‌ساز انرژی دیزاین بیلدر مدل‌سازی گردید. در ادامه جهت ارزیابی عملکرد حرارتی از نحوه توزیع دمایی به روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) انجام شد و در نهایت اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی صورت پذیرفت. پارامترهای مورد بررسی در این مطالعه سرعت هوا، رطوبت نسبی و دمای هوای خشک بودند. نتایج پژوهش نشان داد در صورت عدم وجود تمهیدات لازم جهت تهویه طبیعی منجر به محدودیت گردش هوا، شرایط نامطلوب گرمایی برای نمازگزاران می‌شود و در پی آن، باعث نارضایتی نمازگزاران شده است. براین اساس، نیاز به تهویه پنجره‌های گریو مسجد برای بهبود آسایش حرارتی مورد تحلیل قرار گرفت و بهره‌گیری از تهویه طبیعی منتج به کاهش دمای هوا به میزان ۲/۶ درجه سانتی‌گراد و افزایش سرعت هوای داخلی به میزان ۰/۷۷ متر بر ثانیه شد و شاخص آسایش حرارتی را به بازه استاندارد اشری ۵۵ و ایزو ۷۳۰ نزدیک‌تر نمود.

کلیدواژه‌گان: مسجد، اقلیم گرم و خشک، بهینه‌سازی انرژی، دیزاین بیلدر، شاخص آسایش حرارتی.

مقدمه

در فرهنگ و تمدن ایرانی-اسلامی، مسجد به عنوان مهم‌ترین بنای ماندگار اسلام در شهرها و اقلیم‌های مختلف ساخته شده است و هویت شهرهای اسلامی با مساجد درهم آمیخته است (نصر، ۱۳۸۳). مسجد، به عنوان یک فضای چند منظوره برای جامعه، یک ساختمان مهم برای مسلمانان و نمازخانه اصلی آن محلی برای عبادت، تبلیغ و سایر فعالیت‌های مذهبی است (Hussin et al, 2014). از این‌رو باید فضای داخلی مساجد تا حد ممکن راحت باشد و آسایش حرارتی در ساختمان‌های عمومی، به ویژه در مساجد و در اوقاتی که افراد حضور بیشتری دارند، تأمین شده باشد. مساجد در مناطق گرمسیری که مشتمل بر وسیع‌ترین گستره اقلیمی در کشور ایران می‌باشد. تحقیق و بهینه‌یابی شروط آسایش در ساختمان مساجد در این اقلیم شایان توجه است. با توجه به گرم بودن اکثر ماه‌های سال و سرد بودن زمستان‌ها در اقلیم گرم و خشک، مسئله تهویه طبیعی و آسایش حرارتی در این اقلیم از اهمیت بسزایی برخوردار است ولی در مساجد معاصر مشاهده می‌شود که برای حل مسئله تهویه، از سیستم تهویه الکتریکی برای تأمین تمامی نیازها استفاده می‌شود و یکی از مواردی که موجب برهم خوردن تعادل زیست بومی می‌شود در واقع ایجاد شرایط آسایشی بوسیله مصرف انرژی‌های فسیلی است.

با توجه به تاثیر آشکار انرژی در توسعه اقتصاد هر کشور و افزایش مصرف آن با توجه به رشد جوامع بشری و با در نظر گرفتن محدود بودن این منابع و جلوگیری از مواجهه با بحران انرژی، دقت و الزام برای صرفه‌جویی انرژی به وسیله راهکارهای مدیریت مصرف انرژی امری ضروری به نظر می‌رسد به خصوص میزان بالای مصرف انرژی در ساختمان‌ها از بزرگترین مشکلات کشورهای در حال توسعه و پیشرفت می‌باشد و همچنین موجب اثرات اقتصادی و زیست محیطی قابل توجهی می‌گردد. ساختمان‌ها در واقع در حدود یک سوم از کل میزان مصرف انرژی کلی جهان را به خود اختصاص می‌دهند. در راستای دستیابی به هدف فوق، سوالاتی نیز وجود دارد که پژوهش حاضر در روند خود به آن‌ها پاسخ می‌دهد که سوالات تحقیق به شرح زیر می‌باشند:

- میزان کارایی پنجره‌های گریو مسجد در کاهش بار سرمایشی و گرمایشی به چه شرایطی وابسته است؟

- آیا می‌توان با طراحی پنجره‌های مساجد مناطق گرمسیری، آسایش حرارتی افراد را تأمین کرد؟

در پژوهش حاضر با بهره‌گیری از شبیه‌سازی رایانه‌ای، مدلی بهینه برای محل استقرار پنجره‌های گریو گنبد پیشنهاد می‌شود تا ضمن تأمین دمای مطلوب هوا، میزان نور خورشید وارد شده از طریق پنجره‌ها را نیز کنترل نماید و مهار این دو موضوع، تأثیرگذاری قابل توجهی بر آسایش حرارتی ساختمان می‌گذارد و با اعمال استراتژی‌های خاص اقلیمی شاهد طراحی ساختمان‌های پایدارتری خواهیم شد، تا بدون به‌کارگیری سیستم تهویه الکتریکی، توان تأمین آسایش حرارتی را برای ساکنان فراهم آوریم.

از آنجا که حل معادلات انتقال حرارت در سقف‌های گنبدی شکل به دلیل ناپایداری تابش خورشید و دمای محیط، تقریباً غیرممکن است که با روش‌های تحلیلی حل شود، از نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی^(۵) (CFD) به عنوان مناسب‌ترین شیوه‌های مدل‌سازی جریان هوا استفاده شده است. این نرم افزار توان تجزیه و تحلیل وضعیت جریان هوا و نحوه انتقال گرما به داخل ساختمان‌ها را دارد (Zhai, 2006) و به طور گسترده برای سنجش میزان آسایش حرارتی مورد استفاده و پذیرش قرار می‌گیرد (Lin & Deng, 2008).

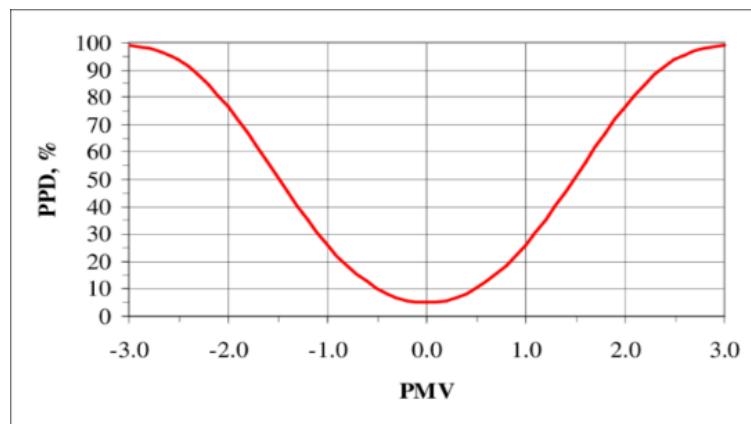
با نگاهی به اهداف تحقیق در تأمین تهویه طبیعی در ساختمان‌های گنبدی مساجد و به منظور درک بهتر از نحوه عملکرد دهانه‌های پنجره، شبیه‌سازی‌های مختلفی برای خلق کارآمدترین شرایط تهویه انجام شد، که در این پژوهش از نرم‌افزار شبیه‌ساز رایانه‌ای دیزاین‌بیلدر^(۶) برای تحلیل محاسبات CFD کمک گرفته شد. همچنین برای حل مدل توربولانسی (آشفستگی) از الگوریتم پیش‌بینی جریان آشفته سیال (k-e) استفاده می‌شود که عملکرد بهتری برای پیش‌بینی جریان آشفته در فضای داخلی را ارائه می‌دهد. این نرم‌افزار توانایی ارائه محاسبات را برای شرایط داخلی و خارجی مدل ساختمانی در هر فصل و هر ساعت خاصی از سال امکان‌پذیر می‌کند. در تحقیق حاضر نیز محاسباتی برای تعیین میزان فشار مبنای باد، سرعت و جهت هوا و دمای حاکم بر فضا به خصوص در فاصله نیم متری از سطح کف داخل مسجد (فاصله‌ای که افراد در آن حدود فعالیت‌های خود را انجام می‌دهند) انجام شد. این شبیه‌سازی‌ها برای شرایط طراحی تابستان در ساعت ۱۲ الی ۱۴ ظهر انجام گرفته و به پارامترهای مختلف کیفیت هوای داخلی برای تعیین شرایط مرزی داخل مسجد توجه شده است تا ارزیابی تهویه طبیعی در ساختمان موردی صورت گیرد.

رویکرد نظری

باتوجه به محوریت مساجد در راستای آموزش اجتماعی، نقش مهمی را در بیان ضرورت توجه به موضوع انرژی و حفاظت از آن برعهده دارد و در طراحی ساختمان مساجد در عین ارتقاء کیفیت طراحی خود، حداکثر صرفه‌جویی انرژی نیز لحاظ می‌گردد. هنگام نماز (جمعه) و نماز تراویح در ماه رمضان، و همچنین در سایر موارد خاص، مانند سخنرانی و فعالیت‌های سمیناری که مردم در آنجا جمع می‌شوند و تمایل به اقامت طولانی‌تر در مساجد دارند و اغلب به‌طور کامل فضاها را پوشش می‌دهند (Ocak et al, 2012). علی‌رغم اهمیت آسایش حرارتی، مطالعات کمی برای ارزیابی آن در ساختمان‌های مسجد انجام شده است. بنابراین، از اهداف این مطالعه تعیین رابطه پارامترهای آسایش حرارتی (دمای هوا، رطوبت نسبی و سرعت هوا) در سطح و ارتفاعات و ایجاد رابطه بین روش تهویه و مقدار متوسط پیش‌بینی شده (PMV) و درصد نارضایتی (PPD) است. که با توجه به انطباق آنها با استانداردهای اشری در مناطق مسطح و مرتفع پیش‌بینی می‌گردد.

آسایش حرارتی را می‌توان به عنوان شرایط ذهنی گرمایی تعریف نمود تا میزان رضایت خود را از محیط ابراز کند (ASHRAE standard 55, ISO 7730). آسایش حرارتی را به روش‌های مختلف از جمله؛ استفاده از شاخص میانگین پیش‌بینی شده (PMV) و درصد پیش‌بینی شده افراد ناراضی (PPD) نمایش می‌دهند، که این شاخص آسایش حرارتی توسط فنگر در سال ۱۹۷۰ مطرح شد و در استانداردهای ایزو ۷۷۳۰ و اشری ۵۵ از این شاخص حرارتی به عنوان مهم‌ترین شاخص فیزیولوژی دما معرفی گردید. (Fanger, 1970) (Olesen, 1982). مدل فنگر مبتنی بر تجزیه و تحلیل انرژی است که تمام حالت‌های از دست دادن انرژی از بدن را در نظر می‌گیرد و فرض می‌کند که فرد از نظر حرارتی با محیط خود در حالت پایدار است. تصویر ۱، نمودار شاخص آسایش حرارتی و ارتباط PPD و PMV را نشان می‌دهد. هفت رده احساس حرارتی PMV وجود دارد که از (-۳) به عنوان سردترین تا (+۳) به عنوان گرم‌ترین حالت احساسی دما را شامل می‌شود. که از این شاخص حرارتی برای آسایش حرارتی در ساختمان‌های مسجد استفاده شده است.

شکل ۱. نمودار شاخص آسایش حرارتی و ارتباط PMV و PPD



منبع: نگارندگان مقاله

جدول ۱. محدوده احساس آسایش حرارتی فنجر

| شاخص (FANGER) | احساس |
|---------------|----------|
| -۳ | سرد |
| -۲ | خنک |
| -۱ | کمی خنک |
| ۰ | خنثی |
| ۱ | کمی گرم |
| ۲ | گرم |
| ۳ | خیلی گرم |

منبع: نگارندگان مقاله

با تغییر PMV در جهت مثبت یا منفی از صفر، معیار PPD نیز افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که برای آسایش عمومی، طبق استاندارد اشری ۵۵، دامنه قابل قبول را در شاخص PMV در بازه (-۰/۵ تا +۰/۵) و برای شاخص PPD نیز بازه صفر تا ۱۰ مورد پذیرش می‌باشد. محاسبه PPD می‌تواند به شدت تحت تأثیر پارامترهای فیزیکی ساعتی متوسط (درجه حرارت هوا، سرعت هوا و رطوبت) ثبت شده در مساجد قرار گیرد (American Society of Heating, 2010). جدول ۱ شاخص آسایش حرارتی PMV را نشان می‌دهد.

در خصوص پیشینه موضوع می‌توان موارد زیر را برشمرد:

در خصوص سقف‌های گنبدی در مناطق گرمسیری، پژوهشگرانی مانند فتحی ۱۹۷۳، مین استون^(۱) ۱۹۸۳، باون^(۲) ۱۹۸۱ و کیتا^(۳) ۱۹۸۱، پژوهش‌هایی در خصوص تأثیر تابش بر ساختمان‌های گنبدی شکل انجام دادند و به نقش سقف گنبدی در کاهش دمای هوا در فصل تابستان اشاره کردند. تحقیقات سرپوشان و یعقوبی (۱۳۸۱) در خصوص سقف‌های گنبدی در شیراز و تحقیق دیگری در گنبد بقعه چهل دختران کاشان توسط فولادی و همکاران (۱۳۹۵) انجام شد که در آن، برتری سقف‌های گنبدی را از نظر خصوصیات اقلیمی به سایر سقف‌ها اثبات کردند. گومز (۲۰۰۳)، میزان تشعشع دریافتی را در یک واحد سطح مساحت سقف نیمکره در مکزیک را ۳۵ درصد کمتر از سقف مسطح با همان مساحت بیان کرده است. احمدی (۱۳۸۴) و مهران و همکاران (۱۳۸۷)، هم در تحقیقات خود به عملکرد حرارتی سقف‌ها از نظر شدت تابش جذب و مصرف انرژی پرداختند و در نتایج خود نشان دادند که سقف

گنبدی عملکرد بهتری در مناطق گرم و خشک دارد. سعید راس (۱۹۹۶) تحقیقاتی را در منطقه بیابانی گرم و خشک در شهر ریاض کشور عربستان سعودی انجام داد و آسایش حرارتی را در زمان اقامه نماز جمعه در یک مسجد اندازه‌گیری کرد. نتایج نشان داد که توافق آسایش محیطی نسبتاً خوبی بین شرایط واقعی با مدل فن‌گر وجود دارد. در تحقیقی دیگر توسط العجمی (۲۰۱۰)، در راستای تعیین شرایط حرارتی داخل ساختمان مساجد کشور کویت تحقیقاتی انجام داد و شش ساختمان از مساجد نمونه سراسر کشور کویت را انتخاب و با تهیه پرسشنامه از احساس آسایش حرارتی در هنگام نماز ظهر، اطلاع یافت. در ادامه رابطه بین شاخص فن‌گر با نظرات استخراج شده را با هم مقایسه کردند و دمای آسایش حرارتی را کمتر از میانگین نظرات واقعی تخمین زده شد. نور بیتول و همکاران (۲۰۱۹)، تحقیقی در ارتباط با آسایش حرارتی^(۴) و ارتباط آن با رویکرد تهویه تعدادی از ساختمان‌های مسجد در مناطق بیابانی و کوهستانی انجام داده و تحقیقات خود را محدود به بازه زمانی نماز ظهر روز جمعه تنظیم کرده است و برای تعیین میزان انطباق پارامترهای آسایش حرارتی و ایجاد روابط بین سیستم‌های تهویه از شاخص PMV و PPD استفاده نموده است. نتایج تحقیق، بیانگر شرایط آسایش حرارتی بهتر در مناطق کوهستانی نسبت به مناطق بیابانی است.

پورسیستانی و همکاران در تحقیقی با عنوان ارزیابی عملکرد حرارتی یک دودکش خورشیدی با دو حالت مستقل و تزریق هوا از کف، ارزیابی عملکرد آسایش حرارتی در یک ساختمان دولتی با و بدون ادغام دودکش خورشیدی توسط برنامه شبیه‌سازی دیزاین‌بیلدر مدل‌سازی شده و با استفاده از روش دینامیک سیالات (CFD) به بررسی توزیع دمایی و نحوه جریان هوا پرداخته شد که نتایج نشان داد که ادغام دودکش‌های خورشیدی می‌تواند PMV میانگین رأی پیش‌بینی شده را به میزان ۵۵ درصد نسبت به ساختمان پایه کاهش دهد و مقادیر آن به بازه استاندارد اثری ۵۵ و ایزو ۷۷۳۰ نزدیک گردد. در ادامه تحقیق آزمایش‌هایی بر ایجاد حفره تحتانی دودکش انجام گرفته شد که مکش هوای بیرون به داخل دودکش را به‌عهده دارد و نتایج آن به افزایش عملکرد دودکش‌های خورشیدی و نزدیک کردن به معیار آسایش حرارتی فن‌گر انجامید. بطوریکه معیار آسایش حرارتی PMV از ۴/۶۳ واحد به میزان ۲/۵۶ واحد و میانگین دمای هوای اتاق‌ها در گرم‌ترین ماه سال (جولای) از ۳۶/۲۱ درجه سانتی‌گراد به ۳۳/۶۱ درجه رسید که میانگین دما، مقدار ۲/۶ درجه سانتی‌گراد کاهش پیدا کرده است. به‌طورکلی، سیستم ترکیبی دودکش خورشیدی و با تزریق هوا از کف آن، میزان تهویه بالاتری را در محیط داخلی ایجاد می‌کند و پتانسیل بالاتر آن را به‌عنوان یک سیستم تهویه غیرفعال در اقلیم گرم خودنمایی می‌کند (پورسیستانی و همکاران، ۱۴۰۰).

فریدی و عظیمی نیز در مقاله‌ای با عنوان مقایسه آسایش حرارتی گردشگران در دو شهر آبادان و زنجان با استفاده از شاخص‌های بیوکلیمایی فشار عصبی، ترجونگ و MEMI، نتیجه گرفته‌اند که: رابطه سرد در هیچ یک از ماه‌های سال در آبادان مشاهده نمی‌شود و هوا در اواخر پاییز و در زمستان خنک است. ضرایب آسایش انسانی زنجان در تابستان نشانگر وضعیت آسایش بوده، هشت ماه از سال هوا سرد است و چهار ماه آن هوا خیلی خنک و آسایش است. شاخص Terjung شرایط اقلیم روزانه در آبادان برای ماه‌های آذر، بهمن و اسفند حاکمیت شرایط اقلیمی مطبوع و اقلیم شبانه بیشتر نشان‌دهنده‌ی خنک (ماه فروردین) تا بسیار خنک (ماه‌های آبان، آذر، دی، بهمن و اسفند) است؛ مقایسه‌ی شرایط حرارتی روز و شب زنجان نشان می‌دهد که در پاییز و زمستان شرایط حرارتی بسیار خنک،

سرد، بسیار سرد و فوق‌العاده سرد و در تابستان و بهار بسیار خنک بر منطقه استیلا دارد. شاخص MEMI آبادان در ماه‌های دی و بهمن با برخورداری از تنش سرمایی اندک در ماه‌های اسفند و آذر در شرایط بدون تنش قرار دارد و دارای بالاترین کیفیت آسایش اقلیمی است. با توجه به مدل‌ها مناسب‌ترین زمان برای گردشگر زمستان در آبادان و تابستان در زنجان می‌باشد (فریدی و عظیمی، ۱۳۹۷).

بن شمس و همکاران در مقاله ارزیابی معماری همساز با اقلیم جزیره قشم به روش ترجونگ-ماهانی در عصر گرمایش جهانی، با استفاده از شاخص ترجونگ-ماهانی به بررسی تاثیرات اقلیم بر معماری بومی جزیره قشم پرداخته و راهکارهایی جهت ایجاد آسایش از طریق طراحی ساختمان‌های متناسب و سازگار با اقلیم منطقه و در نتیجه کاهش مصرف انرژی و بهینه‌سازی مصرف آن ارائه کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که ماه‌های ژانویه و فوریه از روزهای مطبوع و شب‌های بسیار خنک و خنک برخوردار است که بهترین ماه‌های سال می‌باشد و بعد از آن ماه‌های مارس و دسامبر مناسب می‌باشند. ماه‌های ژوئن، ژولای، آگوست و سپتامبر نامناسب‌ترین ماه‌های سال به شمار می‌روند و بسیار گرم و طاقت‌فرسا است. براساس بررسی‌های انجام شده به روش ماهانی در ماه‌های ژوئن، ژولای، آگوست و سپتامبر جریان هوا ضروری است چون هوا خیلی گرم بوده و در ماه مارس جریان هوا مطبوع می‌باشد. طبق این روش در جهت نحوه استقرار ساختمانها، باید طول آن در امتداد شرقی-غربی و همچنین دیوارها و سقف‌ها سبک و دارای عایق حرارتی باشد بعلاوه پنجره‌ها بایستی بزرگ در نظر گرفته شده و دیوارها به صورت شمالی و جنوبی بوده و ساختمان از اشعه مستقیم آفتاب حفاظت شود (بن شمس و همکاران، ۱۳۹۸).

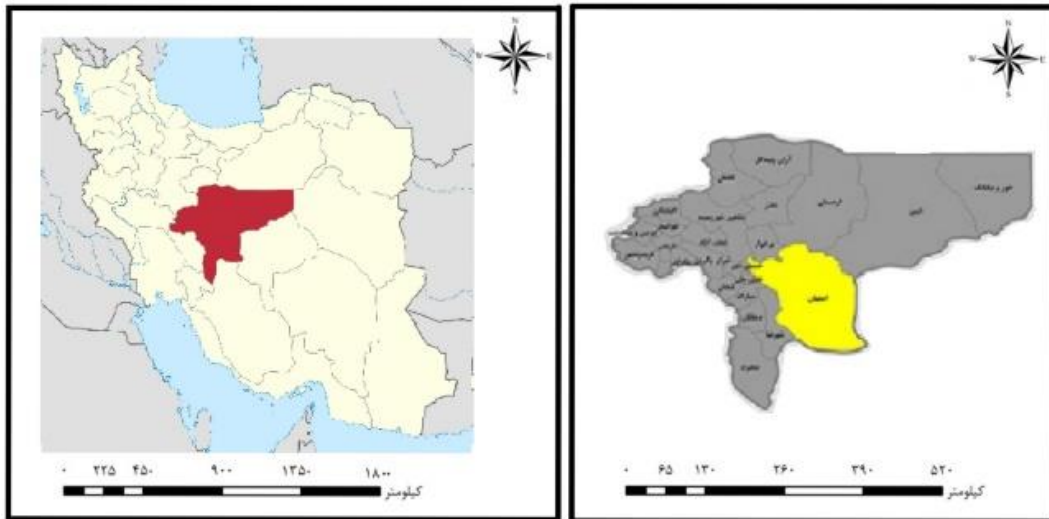
بیشتر پژوهش‌های انجام شده با استفاده از روش‌های عددی و تجربی بررسی شده‌اند. اما در تحقیق حاضر از روش شبیه‌سازی رایانه‌ای برای تحلیل نتایج استفاده شده است و هدف این مقاله بررسی تأثیر تهویه طبیعی حاصل از طریق پنجره‌های زیر سقف گنبدی می‌باشد و برای دستیابی به اهداف مقاله، محاسبه ضریب فشار، جریان هوا و فشار باد در بیرون و درون سقف‌های گنبدی در دستورکار قرار گرفته است.

منطقه مورد مطالعه اصفهان و مسجد مورد پژوهش

اصفهان شهری تاریخی که در مرکز ایران قرار دارد و این شهر، سومین شهر پرجمعیت ایران و یکی از شهرهای گرمسیری کشور ایران به شمار می‌آید. شهر اصفهان دارای طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳۹ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳۸ دقیقه شمالی می‌باشد و از غرب به خمینی شهر، از جنوب به فلاورجان، از سمت شمال به شهر شاهین شهر و از شرق نیز به دشت سجزی منتهی می‌شود و در ارتفاع ۱۵۵۰ متری بالاتر از سطح متوسط دریا واقع شده است (هواشناسی استان اصفهان، ۱۳۹۴). از آنجا که شهر اصفهان در نزدیکی خط استوا واقع شده است، ساختمان‌ها گرمای بیشتری دریافت می‌کنند که باعث افزایش بار حرارتی آنها و ناراحتی ساکنان می‌شود (Abdullah et al, 2016). تصویر ۲ (از راست به چپ)، موقعیت استانی شهر اصفهان و موقعیت کشوری استان اصفهان با استفاده از نرم افزار کلایمیت نشان می‌هد.

شکل ۲. (از راست به چپ) - موقعیت استانی شهر اصفهان و موقعیت کشوری استان اصفهان - نرم افزار

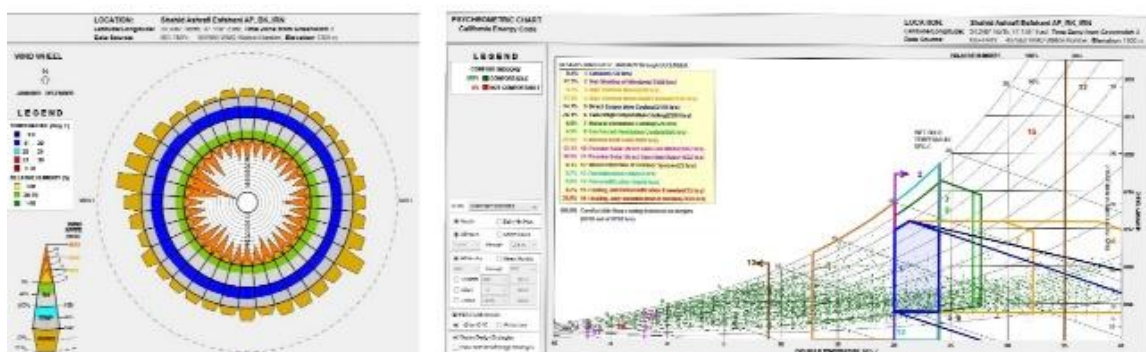
کلایمیت



منبع: گیتاشناسی

طبق ارزیابی‌های آماری بلندمدت سال‌های (۱۹۵۱-۲۰۱۵) در شهر اصفهان، میانگین دما در سردترین ماه سال یعنی دی ماه (ژانویه) ۳ درجه سانتی‌گراد و در گرم‌ترین ماه سال یعنی تیر (جولای) ۲۹/۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و بالاترین دمای هوا در گرم‌ترین روز سال ۴۳ درجه سانتیگراد ثبت شده است. تابستان از ابتدای آوریل آغاز می‌شود و تا اواخر اکتبر ادامه دارد، علاوه بر این، متوسط رطوبت نسبی آن از ۱۴ تا ۴۲ درصد در تابستان و ۴۲ تا ۸۰ درصد در زمستان است و بیشترین میزان ساعت آفتابی در تیرماه ۳۵۰ ساعت و کمترین ساعت آفتابی ۱۹۹ ساعت بوده است و میانگین مجموع سالانه ساعت آفتابی در اصفهان برابر با ۳۲۷۴ ساعت می‌باشد. میانگین سالانه سرعت بادهای غالب حدود ۲/۵ متر بر ثانیه است و جهت غالب وزش باد در ماه‌های تابستان این شهر، شرقی و در فصول دیگر جهت غربی دارد. تصویر ۳، گلباد سالانه اصفهان و نمودار سایکرومتریک شهر اصفهان با استفاده از نرم افزار کلیمیت را نشان می‌دهد.

شکل ۳. (از راست به چپ) نمودار سایکرومتریک شهر اصفهان و گلباد سالانه اصفهان - نرم افزار کلیمیت



منبع: نگارندگان مقاله

با توجه به تشابه طرح‌های معماری مساجد معاصر و تاریخی بنای مسجد شیخ لطف‌الله به دلیل تشابه عملکردی پنجره‌ها، برای ایجاد مدل بهینه الگوی تهویه، در نظر گرفته شد. مسجد شیخ لطف‌الله، از بناهای تاریخی اصفهان، در ضلع شرقی میدان نقش جهان قرار دارد و بر روی خرابه‌های یک مسجد قدیمی بنا شده است (Kermani, 1380: 608). مسجد شیخ لطف‌الله به اندازه 45 درجه انحراف از محور شمالی - جنوبی در جهت قبله قرار گرفته است

(Pope, 1386: 218). معمار این مسجد، محمدرضا اصفهانی بوده و این مسجد، از زیباترین مساجد در ایران است و نقش و نگارهای فراوان آن سبب ایجاد بهجت درون انسان می‌شود. (Zafari Naini, 1393). تصویر ۴، نمای خارجی و داخلی از سقف گنبدی مسجد شیخ لطف‌الله را نشان می‌دهد.

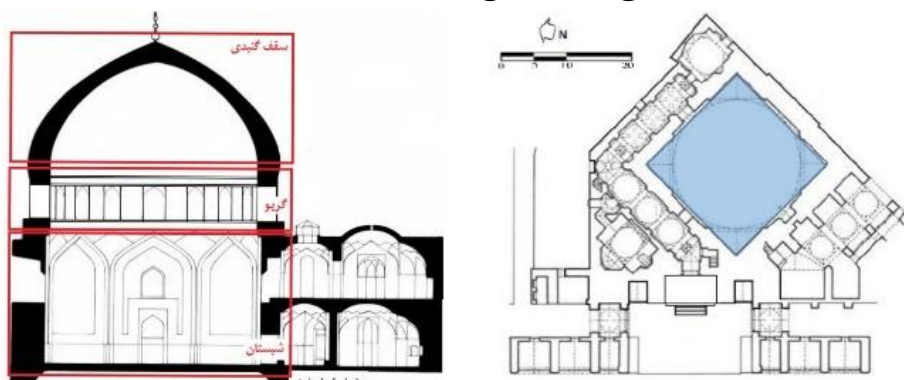
شکل ۴. (از راست به چپ) نمای خارجی و داخلی از سقف گنبدی مسجد شیخ لطف‌الله



منبع: نگارندگان مقاله

مساحت مسجد منتخب در حدود ۴۷۰ مترمربع با ابعاد در حدود ۲۱/۷ متر مربع با ارتفاع ۳۰/۸ متر از کف تا اوج گنبد است و دیوار ۱۲ متر ارتفاع دارد. تصویر ۵، پلان مسجد و مقطع عرضی از وسط شبستان مسجد شیخ لطف‌الله را نمایش می‌دهد. سالن مسجد گنجایش حدود ۵۸۰ نفر را دارد و سقف آن دارای گنبدیست که در وسط و بالای نمازخانه اصلی واقع شده است. همانطور که در تصویر ۴ نشان داده شده است، گریو گنبد دارای ۱۶ پنجره است که ابعاد هر پنجره ۲ متر عرض و ۲/۲۰ سانتی متر ارتفاع دارد. درها و پنجره‌ها تهویه طبیعی فضای نمازخانه اصلی را فراهم می‌کنند. به این ترتیب، این مسجد با توجه به شباهت‌های سبک معماری و نحوه اجرایی آن با مساجد امروزی و معاصر می‌تواند به عنوان یک نمونه معقول از انواع مساجد موجود در کشور ایران، تحت پوشش این تحقیق قرار گیرد.

شکل ۵. پلان مسجد و مقطع عرضی مسجد شیخ لطف‌الله، آرشیو میراث فرهنگی استان فارس



منبع: نگارندگان مقاله

یافته‌های تحقیق

در تمدن‌های باستان، تأمین هوای پاک محیط و لذت بخش از اهمیت بسیاری برخوردار بوده و از سیستم تهویه طبیعی در محیط داخلی استفاده کرده‌اند و عناصر معماری و روش‌های مختلفی مانند گنبدها، بادگیرها و حیاط‌ها

برای اهداف تهویه ابداع کردند و در دهه‌های اخیر نیز، تهویه طبیعی را در بسیاری از ساختمان‌های بلندمرتبه به جای تهویه الکتریکی ترجیح دادند که یک راه حل موثر برای دوره معاصر معرفی می‌شود و کارآمدی سیستم تهویه طبیعی برای کنترل شرایط محیط داخلی اثبات شده است. (James et al, 2010). ذکر این نکته لازم است که تهویه طبیعی یکی از اصول مهم و اساسی در ساختمان‌های پایدار است و از اهداف اصلی آن، تأمین هوای سالم برای تنفس در ساختمان‌ها است (Etheridge & Sandberg, 1996) و می‌تواند مصرف انرژی در ساختمان‌ها را کاهش دهد و توانایی به‌کارگیری در ساختمان‌های بزرگ مانند مساجد را دارد. بر این اساس در پژوهش حاضر، نقش تهویه طبیعی مساجد و بهینه‌سازی الگوی مصرف انرژی در طراحی پنجره‌ها مورد بررسی قرار گرفت تا میزان اثرگذاری در کیفیت و آسایش افراد حاضر در فضای مسجد مشخص گردد.

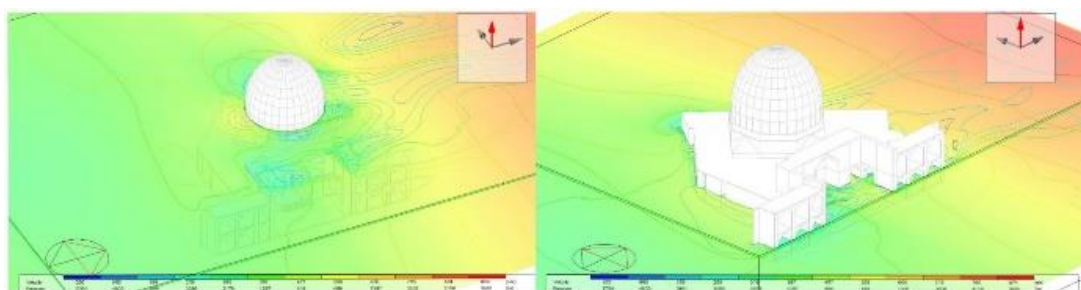
تجزیه و تحلیل CFD خارجی

آنچه در این تحقیق مهم است، میزان اثرگذاری سقف گنبدی مسجد در برابر شرایط اقلیمی محل استقرار خود است. حدود یک سوم گرما از طریق پشت بام وارد خانه می‌شود. بنابراین فرم سقف، نوع مصالح و آب و هوای منطقه از عوامل موثر در ارتقای عملکردهای حرارتی سقف به شمار می‌آید (Shahi, 2008). گنبدی‌های قوسی شکل با ایجاد حرکت آزادانه هوا در سطح و از طریق ارتباط فضای گنبد کروی با فضای پیرامون که به صورت تمام وقت در معرض باد قرار گرفته، می‌تواند انتقال گرمای جذب شده از خورشید را کاهش داده و از طرفی با افزایش ضریب انتقال حرارت همرفتی سبب نفوذ گرمای کمتری به داخل ساختمان شود. از طرف دیگر، گرما در هنگام شب که از سقف پخش می‌شود نیز به سرعت برطرف می‌شود و اثر خنک‌کننده طبیعی برای ساختمان دارد. اولین شیوه برای خنک‌سازی سقف توجه به جهت مناسب سقف، شکل و سایه آن است (Nielsen, 2007). و از لحاظ ماهیت، تعدیل‌کننده مهمی به شمار می‌آید (Alizade, 2006).

تهویه طبیعی بهتر می‌تواند با داشتن دهانه مناسب و جانمایی و چیدمان صحیح ساختمان، حرکت هوای ورودی را در کل فضاهای داخلی ساختمان تنظیم کند (Wahab et al, 2018).

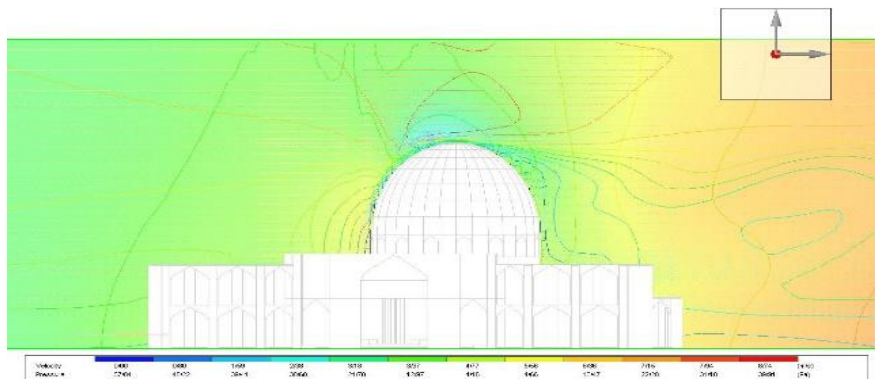
براساس شبیه‌سازی خارجی (CFD) مطابق داده‌های آب و هوایی شهر اصفهان، سرعت باد در اطراف سقف گنبدی مسجد شیخ لطف‌الله، تحلیل و توانایی تهویه طبیعی در فصل تابستان ارزیابی شد. نتایج نشان می‌دهد گردش هوا در اطراف سقف گنبدی باعث فشار مثبت و منفی در هر دو طرف گنبد می‌شود. فشار مثبت در سطح گنبد رو به باد رقم می‌خورد و سطح دیگر آن فشار منفی خواهد داشت. این اختلاف فشار باعث تسریع در جریان باد در اطراف گنبد و زدودن گرما از سطح آن می‌شود. بنابراین سرعت و جهت باد در کاهش گرمای سطح گنبد و فضای اطراف آن مهم است. در تصویر ۶، فشار و سرعت هوا در ارتفاع ۵ متری و ۱۵ متری (تراز پنجره‌های گریو) به وضوح نمایش داده شده است. این موضوع سبب می‌شود تا هوا در مناطق پرفشار از طریق روزنه‌ها به داخل ساختمان ورود کند. برای فضاهایی که تهویه صرفاً از یک جبهه انجام می‌گیرد، مشکلی در پذیرش فشار باد وجود ندارد.

شکل ۶. (از راست به چپ) نمایش جریان هوای خارجی ساختمان موردی در ارتفاع ۵ و ۱۵ متری



منبع: نگارندگان مقاله

شکل ۷. نمایش سرعت جریان هوا و دمای هوای محدوده خارجی ساختمان موردی



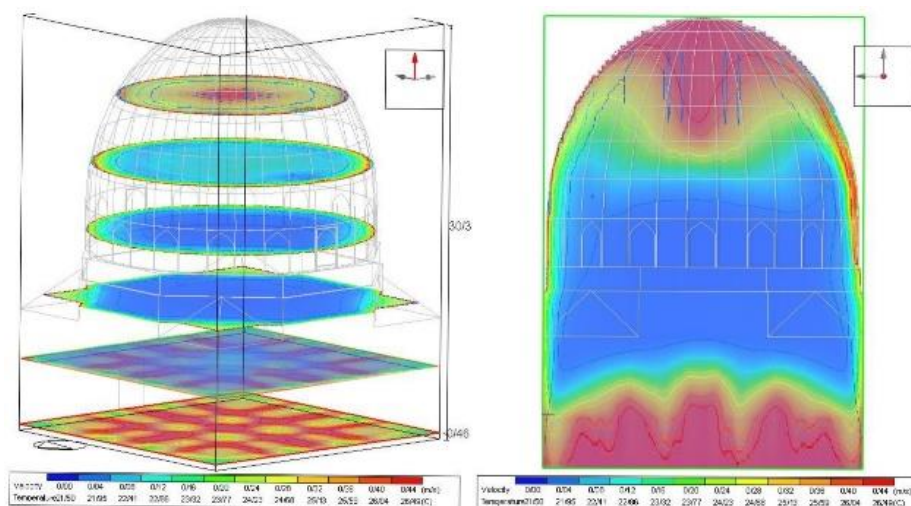
منبع: نگارندگان مقاله

همانطور که مشاهده می‌شود، دو حرکت دورانی در تصویر ۶ ظاهر شده‌اند که این حرکت سیال در پشت ناحیه سقف گنبدی شکل بسیار بیشتر می‌باشد. الگوهای جریان هوا در اطراف ساختمان مسجد موردی در برخی از قسمت‌های سقف گنبد گرداب را به وجود می‌آورد و توزیع سرعت و چگالی جریان به ویژه در بالای سقف گنبدی بیشتر خودنمایی می‌کند. تصویر ۷، نمایش سرعت جریان هوا و دمای هوای محدوده خارجی ساختمان موردی را نمایش می‌دهد؛ با توجه به پایین بودن فشار در بالای سقف گنبدی می‌توان با باز نمودن روزنه‌ای در اوج گنبد باعث تهویه و تخلیه هوای داخلی در مناطق گرمسیری شد.

تجزیه و تحلیل CFD داخلی با پنجره‌های بسته

برای ارزیابی رفتار جریان هوا، شاخص‌های مختلف تهویه داخلی در مدل نمونه لحاظ شد و شبیه سازی داخلی ساختمان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. سرعت باد ورودی در شرایط واقعی توسط سرعت سنج استخراج شد و با توجه به مقیاس ساختمان، به کمتر از (۱ متر بر ثانیه) کاهش می‌یابد که نشان دهنده مقدار واقعی هوای وارد شده از پنجره‌ها است که در تصویر ۸، نمایش داده شده است. در ساعاتی که نورخورشید به اوج تابشی خود می‌رسد، نمازگزاران جهت اقامه نماز ظهر حضور می‌یابند. در تصویر ۸، توزیع دما را هنگامی که پنجره‌های گریو مسجد بسته باشند را نشان می‌دهد. از آنجا که دریچه‌های ورود باد خارجی مسدود می‌باشد آنگاه، هوا با سرعت کمی از طریق درزها و درب‌های مسجد وارد می‌شود و فضای مسجد با توجه به ورود اشعه‌های تابشی از ناحیه خورشید و افزایش سطح متابولیسم افراد در ساعات نماز ظهر باعث افزایش شار حرارتی به میزان زیادی می‌شود. در نتیجه یک جریان محرک دما به صورت آهسته ایجاد می‌نماید.

شکل ۸. نمایش سرعت جریان هوا و دمای هوا در ساختمان موردی بدون اعمال تهویه طبیعی



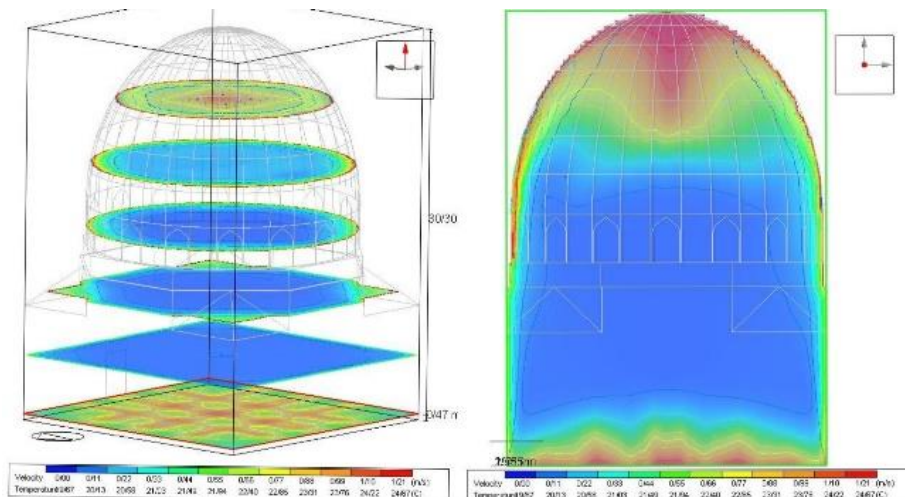
منبع: نگارندگان مقاله

نتایج حاصل از شبیه سازی دینامیک سیالات (CFD) نشان داد که میزان جذب نورخورشید در فضای شبستان بیش از نیاز است و به واسطه آن در ماه های گرم سال و به خصوص در میانه روز دمای فضای داخلی مسجد افزایش پیدا می کند و دلیل آن نبود تعادل بین تهویه و حجم شبستان است و جریان هوا نمی تواند دمای فضای اتاق را کاهش دهد و مناطقی که به رنگ متمایل به قرمز خودنمایی می کنند هوای گرم در آن قسمت از فضا حاکم است. با توجه به توزیع دمایی تصویر ۸، در صورتی که پنجره های گریو مسجد بسته باشد، آنگاه دما در فاصله نیم متری از سطح کف مسجد حدود ۲۶ درجه خواهد بود؛ که در این ساختمان به دلیل فاصله عمودی زیاد بین پنجره ها با کف مسجد و تناسب حجم کلی مسجد با درصد جداره نورگذر و همچنین عملکرد بهتر سقف گنبدی نسبت به سقف مسطح، باعث شده است که فضای داخلی گرمای کمتری دریافت کرده و دمای واحدهای فاقد تهویه در بسیاری از تحقیقات مشابه به بالای ۳۰ درجه نیز برسد. در فصل زمستان، با توجه به زاویه مایل تابش خورشید و کوتاه تر بودن طول روز، آفتاب مدت کوتاه تری امکان ورود به ساختمان دارد و لذا در زمستان نیازی به خنک نمودن فضای داخلی شبستان مسجد نیست.

تجزیه و تحلیل CFD داخلی با بهره گیری از تهویه طبیعی

شکل ۹، نتایج توزیع فشار و جریان هوا را در ساعت ۱۲ تا ۱۴ روز اول جولای (تیرماه)، هنگام باز شدن همه پنجره ها بیان می کند و نتایج حاکی از آن است که وقتی پنجره ها در تابستان باز شوند، هوای تازه با هوای محبوس داخل مبادله می شود و به خاطر تجمع هوای گرم در بالای سقف، هوای این قسمت در اولویت خروج قرار می گیرند و هوای بیرون جایگزین آن می شود. با خروج هوای گرم، فشار منفی در ارتفاع های پایین ساختمان ایجاد می شود و هوای بخش پایینی مسجد را به طرف بالا هدایت می نماید و این حرکت همرفتی هوا باعث تغییر در درجه حرارت هوای جریان یافته شده، و مسیر خود را در فضای داخل مسجد به سمت دهانه کم فشار طی می نماید تا افرادی که در مسجد حضور دارند این جریان هوا را احساس کنند. وجود فیلپوش ها نیز در گوشه های مسجد، به تسریع روند حرکتی جریان هوا کمک می نماید. با ترکیب هوای بیرون با هوای داخل مسجد، جریان هوا در خلاف جهت باد به حرکت درمی آید و این روش بهینه برای تازه کردن هوای داخل مفید است. دما طبق خروجی های نرم افزاری در ارتفاع نیم متری از سطح کف به ۲۳/۶ درجه سانتی گراد رسیده و این دما در رده «کمی گرم» قرار می گیرد.

شکل ۹. نمایش سرعت جریان هوا و دمای هوا در ساختمان موردی با اعمال تهویه طبیعی



منبع: نگارندگان مقاله

در صورتی که در ساعات شب هیچ فرآیندی در مسجد انجام نشود، آنگاه باز بودن پنجره‌ها باعث ایجاد فشار منفی در داخل و ایجاد تهویه شبانه می‌شود و در ساعت اولیه روز بعد، هوای داخل مسجد با سرعت کمتری افزایش دما خواهد داشت و همین موضوع باعث کاهش یک درجه ای دما در هنگام ظهر می‌شود.

شاخص آسایش حرارتی و تحلیل نرم‌افزاری

نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر با بهره‌گیری از موتور شبیه‌سازی انرژی پلاس به عنوان یک ابزار پیشرفته تجزیه و تحلیل حرارتی ساختمان معرفی شده است (Design Builder Website, 2020). این نرم‌افزار قابلیت امکان محاسبه آسایش دمایی را براساس شاخص‌های آسایش فنگر در دو قالب درصد افراد ناراضی (PPD) و میانگین نظرات احساس دمایی (PMV) را می‌دهد. این نرم‌افزار با انجام محاسبات ریاضی، روابط بین شش پارامتر شامل: فعالیت (MET) (متابولیسم بدن) یا W (فعالیت) شخص یا Btu (واحد انرژی) ساعت، لباس (Clo)، دمای هوا (C° یا F°)، دمای تابشی متوسط (C° یا F°)، سرعت هوا (m/s یا ft/min) و رطوبت (درصد) را حساب می‌کند. معادلات زیر بیانگر روابط محاسباتی بین پارامترهای شاخص حرارتی را بیان می‌کند (Handbook, 2009).

رابطه (۱)

$$pmv = (0.303e^{-0.036M} + 0.028)[(M - W) - H - E_c - C_{rec} - E_{rec}]$$

رابطه (۲)

$$E = 3.05 \times 10^{-3} (256_{tsk} - 3373 - P_a) + E_{sw}$$

رابطه (۳)

$$EC = 3.05 \times 10^{-3} [5733 - 6.99 \times (M - W) - P_a] + 0.42(M - W - 58.15)$$

رابطه (۴)

$$C_{rec} = 0.0014M(34 - Ta)$$

رابطه (۵)

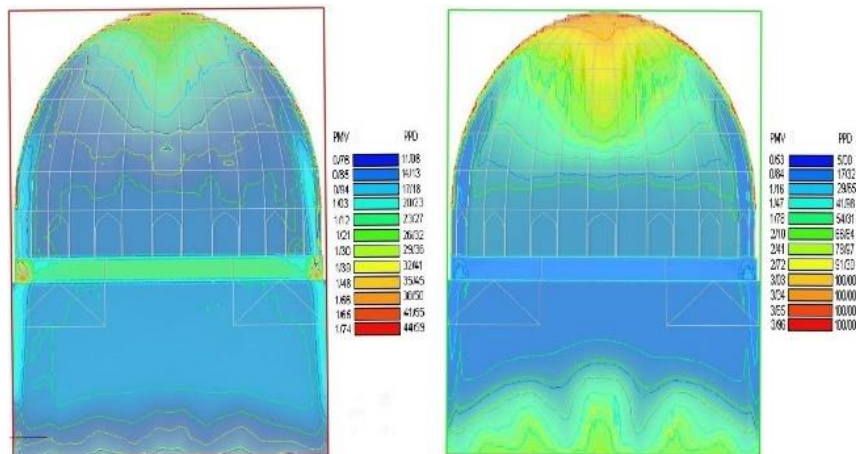
$$H = K_{cl} = t_{sk} - t_{cl} / I_{cl}$$

رابطه (۶)

$$PPD = 100 - 95_e - (0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2)$$

که در معادلات فوق C_{rec} تبادل حرارت همرفتی تعرق (W/m^2) ؛ E_{rec} تبادل حرارت تبخیری تعریق (W/m^2) ؛ E_c تبادل حرارتی تبخیری در سطح پوست موقعی که در حالت حرارتی خنثی قرار دارد (W/m^2) ؛ I_{cl} تابش لباس به طور متوسط برای تمام بدن (W/m^2) ؛ M نرخ سوخت و ساز بدن (W/m^2) ؛ t_{cl} دمای سطح لباس (درجه سانتی گراد)؛ t_{sk} دمای متوسط پوست (درجه سانتی گراد)؛ W نیروی مکانیکی موثر (W/m^2) ؛ e تبادل حرارت تبخیری در سطح پوست (W/m^2) ؛ H تلفات حرارت خشک به صورت همرفت، هدایت و تابش (W/m^2) ؛ P_a فشار بخار جزئی هوا (پاسکال)؛ T_a دمای هوا (درجه سانتی گراد) می باشد (بهادری نژاد و یعقوبی، ۱۳۸۵). از طریق بررسی افراد در وقت نماز، هنگامی که در مسجد عبادت می کنند و حرکاتی مانند ایستادن، تعظیم، سجده و نشستن را با روند بسیار آرام انجام می دهند، مقدار سطح فعالیت پایه و پوشش لباس نمازگزاران بر اساس استاندارد ایزو ۷۷۳۰ تعیین شد. میزان متابولیک مورد استفاده برای نمازگزاران ۱/۲ برآورد شده و میانگین مقادیر کلی پوشش لباس استفاده شده در این تحقیق ۰/۷۰ و میزان رطوبت نسبی نیز ۵۰ درصد در نظر گرفته شده است.

شکل ۱۰. نمایش شاخص آسایش حرارتی در دو قالب (PMV) و (PPD) در ساختمان موردی با اعمال تهویه طبیعی



منبع: نگارندگان مقاله

مطابق شکل ۱۰، محاسبه PMV و PPD با استفاده از ابزار محاسبات دینامیک سیالات انجام شد و در شرایطی که ساختمان مسجد به دلیل بسته بودن پنجره امکان تهویه داخلی در آن فراهم نباشد آنگاه هوای گرم در محدوده نزدیک به کف مسجد حاکم می شود و هوای گرم، نارضایتی افراد را در پی خواهد داشت. میزان پیش بینی این نارضایتی برابر با حدود ۷۵ درصد افراد می باشد و میانگین آرای پیش بینی برابر با ۲/۳ واحد می باشد و در این صورت، بخش های مختلف شبستان به دلیل قرار نگرفتن در محدوده شاخص PMV (۰/۵+ و ۰/۵-) از نظر حرارتی مناسب نیستند.

در ادامه کار، مسجد موردی با اعمال تهویه طبیعی سنجیده شد و با نگاهی به خروجی های تحلیل دینامیک سیالات، مشخص گردید که پنجره های گریو مسجد به دلیل موقعیت قرارگیری آنها نقش مهمی را ایفا می کند که کاهش دمای هوا را دارد و تهویه مناسب را در ساختمان مسجد تضمین می کند و طبق تصویر ۱۰، میانگین آرای پیش بینی برابر با ۱/۰۳ واحد و میزان پیش بینی درصد نارضایتی حدود ۲۰ درصد افراد می باشد، اگرچه مقادیر PMV در

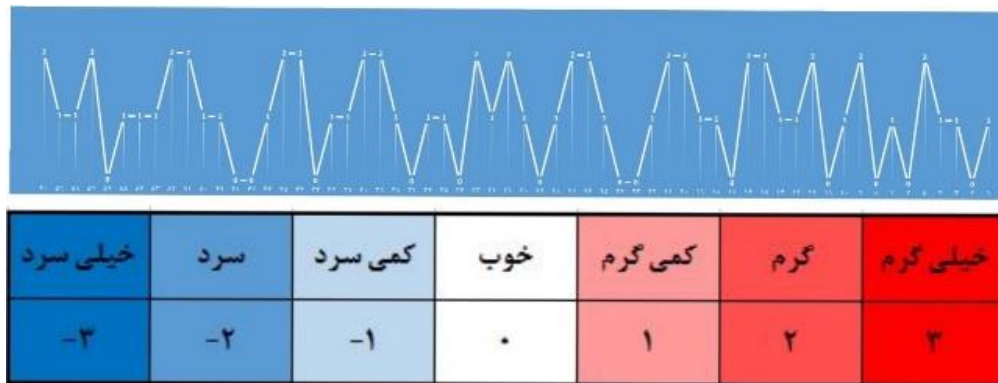
تابستان به محدوده مطلوب دمایی شاخص $(+0/5$ و $-0/5)$ نزدیکتر می‌شود و فضا را برای حداکثر نمازگزاران قابل تحمل می‌کند اما با این شرایط هنوز آسایش حرارتی کاملی وصول نشده است.

نتایج حاصل نشان داد که تعداد افراد نمازگزار نیز در افزایش دمای مسجد تأثیرگذار است و به گونه‌ای که در ساعت ۱۲:۰۰ تا ۱۴:۰۰ که زمان برگزاری نماز ظهر می‌باشد، دما افزایش یافته است زیرا بدن انسان از طریق سوخت و ساز، انرژی لازم برای گرم نگه داشتن خود تولید می‌کند و لذا سیستم های تهویه با توان بیشتری باید کار کند تا گرمای اضافی را دفع نماید. با توجه به اطلاعات دمایی استخراج شده، در اثر گرمای تولید شده از بدن نمازگزاران به خصوص در ساعات ظهر، رطوبت نسبی هوا به دلیل کاهش چگالی آن کاسته می‌شود. همچنین از سوی دیگر رطوبت نسبی با کاهش دما و افزایش سرعت هوای مسجد در زمان نماز، بیشتر کاهش می‌یابد.

اعتبارسنجی تحقیق

اندازه گیری میدانی این پژوهش در یکم تیرماه ۱۳۹۹ از ساعت ۱۲ تا ۱۴ ظهر با استفاده از داده‌های ثبت کننده دمای هوا و رطوبت نسبی دیتالاگر (ثبت کننده اطلاعات) انجام شد و این اندازه‌گیری میدانی جهت تأیید خروجی‌های نرم افزار بعد از اعمال تهویه انجام شده است. برای مرحله آزمایش میدانی، دمای هوا و رطوبت نسبی به عنوان متغیرهای اصلی برای شناسایی محیط گرمایی مسجد انتخاب شدند و به این ترتیب مقایسه‌ای بین نتایج خروجی‌های محاسبات دینامیک سیالات (CFD) با داده‌های ثبت شده میدانی انجام گرفت؛ همچنین با ارائه پرسشنامه به ۶۰ نفر از افراد حاضر در مسجد شیخ لطف الله که در بازه زمانی ۱۲ تا ۱۴ ظهر حضور داشتند، احساس راحتی افراد مشخص گردید و با تطبیق نتایج نرم افزاری با پاسخ‌های سوال شوندگان و نمایش رابطه خطی بین آنان، بر واقعیت داده‌های بدست آمده از شبیه سازی تاکید می‌کند که در تصویر ۱۱ و جدول ۲ نمایش داده شده است.

شکل ۱۱. تطبیق پاسخ‌های سوال شوندگان و نمایش رابطه خطی بین آنان، بر واقعیت داده‌ها



منبع: نگارندگان مقاله

جدول ۲. مقایسه حالت های مختلف پژوهش و اعتبارسنجی

| نتایج شبیه سازی نرم افزار در ارتباط با نرخ تعویض هوا (درجه سانتی گراد) | مقادیر بدست آمده -دیتالاگر (درجه سانتی گراد) | نتایج شبیه سازی نرم افزار در ارتباط با نرخ آسایش حرارتی (واحد شاخص فنگر) | مقادیر بدست آمده از دستگاه ثبت داده (واحد شاخص فنگر) |
|--|--|--|--|
| ۲۶/۰۴ | ۲۷/۲۹ | ۲/۳ | ۲/۳ |
| ۲۳/۷۶ | ۲۴/۴۸ | ۱/۰۳ | ۱/۰۳ |
| ۲/۲۸ | ۲/۸۱ | از ۷۵ درصد به ۲۰ درصد رسیده است. | |

منبع: نگارندگان مقاله

نتیجه گیری و دستاورد علمی پژوهشی

تجزیه و تحلیل نمودارها بیانگر آن بود که حدود نیمی از شرایط آب و هوای محیط در تابستان می‌تواند با بهره‌گیری از تکنیک‌های غیرفعال تأمین گردد و تهویه طبیعی تأثیر قابل توجهی در بهبود فرآیند آسایش حرارتی در ساختمان‌ها دارد. با طی نمودن فرآیند حل آسایش حرارتی بین مسجد در قبل و بعد از بهره‌مندی از تکنیک‌های منفعل تهویه طبیعی، منجر به کاهش ۲/۲۸ درجه سانتی‌گراد دمای هوا در فاصله نیم متر از سطح کف مسجد و افزایش سرعت هوا در محدوده داخلی مسجد به میزان ۳ برابر، می‌تواند نتایج شبیه سازی سرعت و فشار فوق را تأیید نماید، که سرعت و اختلاف فشار بالاتر باعث افزایش خنکی در سقف گنبدی می‌شود و ضریب انتقال حرارت به شدت به سرعت هوا بستگی دارد.

مسجد یکی از اقسام ساختمان‌های با فضا سازی بزرگ است که توسط مسلمانان جهت اقامه نماز جماعت و سایر فعالیت‌های مذهبی مشترک مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین آسایش گرمایی داخل مسجد یکی از نیازهای مهم برای کسب اطمینان از راحتی کافی برای نمازگزاران و مراجعین هنگام انجام فعالیت هایشان است. در تحقیق حاضر برای افزایش آسایش حرارتی در فصل تابستان، استفاده از تهویه طبیعی از طریق پنجره‌های گریو مسجد در ماه‌های گرم تابستان پیشنهاد گردید. این مقاله مطالعه یافته‌های آسایش حرارتی را در چارچوب ارزیابی مقادیر PMV و PPD تحت سیستم تهویه مسجد شیخ لطف‌الله ارائه می‌دهد. دمای هوا، سرعت جریان هوا، میانگین دمای تابشی و رطوبت نسبی هوا در ماه جولای (تیر به عنوان گرمترین ماه) از ساعت ۱۲ تا ۱۴ ظهر اندازه‌گیری نموده و سپس از روش دینامیک سیال محاسباتی (CFD) برای پیش‌بینی توزیع سرعت جریان هوا و دمای هوا در داخل مسجد بهره گرفته شده است و یک مطالعه پارامتریک برای شناسایی موثرترین اصلاحات در سیستم تهویه که باعث بهبود حرارت داخل مسجد می‌شود، انجام شد.

سقف‌های گنبدی به دلیل قابلیت بازتابندگی بالا، ایجاد اختلاف ضریب فشار در جلو و عقب ساختمان و همچنین ایجاد جریان متلاطم با سرعت بالاتر نسبت به سقف مسطح، امکان تهویه بیشتری را به کمک دهانه‌هایی در طرف مقابل سقف فراهم می‌آورد و در روند تسریع سرمایش غیرفعال در فصل تابستان تأثیرگذار است. این مزیت دمای هوا را از ۲۶/۲ درجه سانتی‌گراد به دمای ۲۳/۶ درجه سانتی‌گراد تقلیل داده است و همین امر باعث افزایش سرعت جریان هوای داخلی از ۰/۴۴ متر بر ثانیه به ۱/۲۱ متر بر ثانیه شده است. در صورت استفاده از تهویه مطبوع از اوایل اردیبهشت تا اواخر شهریور می‌تواند تأثیر زیادی بر میزان انرژی الکتریکی مصرف شده برای کنترل مصرف انرژی محیط داخلی در ساختمان مسجد داشته باشد، که به نوبه خود انتشار دی‌اکسید کربن را کاهش دهد. هر چند تجزیه و تحلیل نتایج فصل تابستان نشان داد تهویه طبیعی به تنهایی برای خنک سازی ساختمان کافی نیست ولی می‌توان برای خنک سازی بیشتر، ایجاد یک برنامه زمان بندی هوشمند برای پنجره‌ها براساس دمای داخلی و خارجی را پیشنهاد کرد. همچنین برای جلوگیری از ورود گرمای بیش از حد خورشید، توصیه می‌گردد به ویژه در تابستان، از یک سیستم سایه‌اندازی در نماهای مختلف و مطابق پیوست ۱۰ مقررات ملی ساختمان ایران اعمال شود و در جهت کاهش ورود گرد و غبار و تأمین رطوبت لازم به راه اندازی کاشت پوشش گیاهی سبز نزدیک پنجره‌های گریو مسجد ترتیب اثر داده شود.

منابع

- الهام فریدی فریده عظیمی (۱۳۹۷)، مقایسه آسایش حرارتی گردشگران در دو شهر آبادان و زنجان با استفاده از شاخص‌های بیوکلیمایی فشار عصبی CI، تراجونگ و MEMI، فصلنامه جغرافیا و برنامه ریزی منطقه ای، دوره ۸، شماره ۲، شماره پیاپی ۳۰، صفحه ۱۶۷-۱۷۷
- آمنه بن شمس، امیر گندمکار، هوشمند عطائی، حمید صابری (۱۳۹۸)، ارزیابی معماری همساز با اقلیم جزیره قشم به روش تراجونگ-ماهانی در عصر گرمایش جهانی، فصلنامه جغرافیا و برنامه ریزی منطقه ای، دوره ۹، شماره ۲، شماره پیاپی ۳۴، صفحه ۶۵-۸۱.
- پوپک پورسیستانی، حسین مدی، مصطفی مافی (۱۴۰۰)، ارزیابی عملکرد حرارتی یک دودکش خورشیدی با دو حالت مستقل و تزریق هوا از کف - نمونه موردی: ساختمان اداری در شهر کرمان، فصلنامه جغرافیا و برنامه ریزی منطقه ای، دوره ۱۱، شماره ۴، شماره پیاپی ۴، صفحه ۷۰۲-۷۲۱
- Abdullah, F. H., Majid, N. H. A. and Othman, R. 2016. Defining issue of thermal comfort control through urban mosque façade design. *Proceedings of Social and Behavioral Sciences*, 234, P416-423.
- Ahmadi, A. 1384. Effects of roof shape and structure on building cooling and energy consumption. Master Thesis in Mechanical Engineering, Tehran: Tarbiat Modares University.
- Alizadeh, A., 2006. *air and climate*. Eighth Edition, University of Mashhad publication.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. 2010. *Thermal environmental conditions for human occupancy*. Atlanta: ASHRAE Standard-55.
- ASHRAE. 2007. *HVAC design manual for hospitals and clinics*. Atlanta, USA, American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc, b.
- Bahadorinejad, M., Yaghoubi, Mahmoud. 1385. "Natural ventilation and cooling in traditional Iranian buildings". Tehran: University Publishing Center.
- Climate Index of Isfahan - General Meteorological Department of Isfahan Province - esfand1394(March 2016).
- Design Builder Website .2020. - *Communications and Software Information* - <https://designbuilder.co.uk/>
- Etheridge D., Sandberg M. 1996. Building ventilation — theory and measurement. Chichester, UK, John Wiley & Sons.
- Farraj F., Al-ajmi. 2010. Thermal comfort in air-conditioned mosques in the dry desert climate, *International Journal Of Building and Environment* 45 .2010. 2407e2413.
- Fooladi, V., Tahabaz, M., Majedi, H. 1395. Two-shell dome from the perspective of thermal performance in the desert climate of Kashan: Quarterly Journal of Islamic Architecture Research, No. 11, Year 4.
- Gomez, V., Porta, M., and C. Heard. 2003. Solar Performance of Hemispherical Vault Roofs. *Building and Environment* (38): 1431-1438.
- Handbook, A.F., .2009. *American society of heating, refrigerating and airconditioning engineers*. Inc: Atlanta, GA, USA .
- Hussin, A., Salleh, E., Chan, H. Y. and Mat, S. 2014. Thermal comfort during daily prayer times in an air-conditioned mosque in Malaysia. *Proceedings of 8th Windsor Conference: Counting the Cost of Comfort*
- International Organisation for Standardisation. 2005. *Moderate thermal environments. Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*. Switzerland: ISO 7730.
- James Atkinson, Yves Chartier, Carmen Lucia Pessoa-Silva. Paul Jensen, Yuguo Li, and Wing-Hong Seto, *Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings*, WHO Publication /Guidelines, WHO Press, ISBN 978 92 4 154785 7 (NLM classification: WX 167).
- Kermani, F. 1380. A pavilion from heaven. The Second International Conference on the Architecture of Ofogh-e Ayandeh Mosques, Tehran: University of Arts, Volume II.

Kok Nielsen, H. 2007. *natural ventilation -design guide in warm climatic-*, translator: Mohammad Ahmadinejad, First Edition, Tehran: soil Publication.

Lin Z, Deng S. 2008. A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics—developing a thermal comfort model for sleeping environments. *Building and Environment*; 43:70-80.

Mehran, S., Rad, Manouchehr, Jafar Kazemi, F. 1387. Training to analyze the intensity of radiation absorbed by domed and oblique roofs and compare it with a flat roof. *Education Technology Quarterly* 2 (4): 258-249

Nasr, S.h. 1383. *Knowledge and the sacred*. Translated by Farhad Haji Mirzaei, Second Edition, Tehran: Farzan Rooz Publishing and Research.

Nur Baitul Izati Rasli, Nor Azam Ramli, Mohd Rodzi Ismail, Nazatul Syadia Zainordin, Syabiha Shith, Amni Umirah Mohamad Nazir. 2019. Thermal Comfort and its Relation to Ventilation Approaches in Non-Air-Conditioned Mosque Buildings, *International Journal Of Integrated Engineering Vol. 11 NO. 2* .2019 012–023.

Ocak, Y., Kılıçvuran, A., Eren, A. B., Sofuoglu, A. and Sofuoglu, S.C. 2012. Exposure to particulate matter in a mosque. *Atmospheric Environment*, 56, 169-176.

Olesen, B. W. 1982. *Thermal comfort*. Technical review, 2, 3-37 .

P.O. Fanger. 1970. *Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering*, McGraw-Hill, New York.

Pope, A. 1386. *Iran's architecture*. Translated by Gholam Hossein Sadri Afshar, seventh edition, Tehran: Akhtaran.

Saeed RAS. 1996. Thermal comfort requirements in hot dry region with special reference to Riyadh: part 1: for Friday prayers. *International Journal of Ambient Energy* 1996;17(1):17e21.

Sarposhan, S., Yaghoubi, M., 1381. Calculation of solar energy on three-dimensional surfaces. Volume 7, Number 12

Shahi, Jalil. 1392. *Building components*. Yazd University Press, 14th edition

Wahab, I. A., Ismail, L. H., Abdullah, A. H., Rahmat, M. H., and Salam, N. N. A. 2018. Natural ventilation design attributes application effect on indoor natural ventilation performance of a double storey single unit residential building. *International Journal of Integrated Engineering*, 10(2), P7-12.

Zafari Naini, S., Zafari Naini, S. 1393. Investigating the empty spaces of Sheikh Lotfollah Mosque. *Scientific Quarterly of Islamic Art Painting*, No. 2 - Summer 2014.

Zhai, Z. 2006. "Application of Computational Fluid Dynamics in Building Design: Aspects and Trends," *Indoor and Built Environment*, 15: 305-313.