

کاهش مصرف انرژی در ساختمان در پرتو ارتقاء عملکرد حرارتی پنجره‌های هوا گذر

Energy Consumption Reduction in Building in the Light of Thermal Performance Improvement in Airflow Windows

مهدی یزدیان^۱، مهجبین رادایی^۲، احمد زکی زاده^۳

چکیده

مقارن با بحران انرژی در جهان، تلاش‌ها در جهت کاهش مصرف انرژی در حوزه ساخت‌وساز و بهبود عملکرد انرژی در ساختمان بسیار مورد توجه قرار گرفته است. طراحی و ساخت مناسب عناصر و اجزاء ساختمان می‌تواند باعث کاهش مصرف انرژی، کاهش تأثیرات منفی بر محیط‌زیست و صرفه‌جویی اقتصادی در طول چرخه حیات ساختمان شود. پنجره و سطوح شیشه‌ای معمولاً عنصر نما، با کمترین مقاومت حرارتی و کم ضخامت‌ترین عنصر سازنده، همراه با بالاترین رسانایی گرمایی در ساختمان است. در شرایط استاندارد، پنجره و تهویه دو سامانه جدا از هم هستند که فقدان سیستم مدیریت صحیح می‌تواند مصرف انرژی در ساختمان را افزایش دهد. در این مطالعه، استفاده از پنجره هوا گذر به‌عنوان راه‌حلی مناسب و روشی غیرفعال در کاهش مصرف انرژی ساختمان معرفی شده و عوامل ترکیبی همچون استفاده از لایه‌های پوشش کم گسیل و مواد تغییر فاز دهنده در بهبود عملکرد حرارتی این نوع پنجره‌ها و کاهش بار سرمایشی و گرمایشی ساختمان مورد واکاوی قرار گرفته است. روش پژوهش، توصیفی-تحلیلی با مطالعه‌ی کیفی و ابزار جمع‌آوری اطلاعات، بررسی منابع مکتوب، اسناد، مدارک، مطالعات پیشین و روش تحلیل داده‌ها، تحلیل محتوا بوده است. نتایج مطالعه نشان داد که استفاده از پنجره‌های هوا گذر در ترکیب با مواد تغییر فاز دهنده و سایه‌بان‌های داخلی جاذب یا انعکاسی با قابلیت تغییر وضعیت در فصول سرد و گرم سال، می‌تواند با ایجاد عملکردی پویا در فصول مختلف، تأثیر قابل توجهی در کاهش بار گرمایشی و سرمایشی و کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها داشته باشد.

کلیدواژگان: پنجره هوا گذر، انرژی، عملکرد حرارتی، مواد تغییر فاز دهنده، پوشش محافظ.

۱. **استادیار**، گروه عمران، دانشکده‌ی علوم و مهندسی، دانشگاه علم و هنر، یزد، ایران. پست الکترونیکی: yazdian@sau.ac.ir

۲. **مدرس**، گروه عمران، دانشکده‌ی علوم و مهندسی، دانشگاه علم و هنر، یزد، ایران. (نویسنده‌ی مسئول)، پست الکترونیکی: m.radaei@ut.ac.ir

۳. **دانشجو**، گروه عمران، دانشکده‌ی علوم و مهندسی، دانشگاه علم و هنر، یزد، ایران. پست الکترونیکی: zaahmad409@gmail.com

۱- مقدمه

بر اساس بررسی‌های انجام شده به‌وسیله آژانس محیط زیست اروپا، میانگین دمای جهانی در قرن بیستم ۰٫۷۴ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. پیش‌بینی می‌شود که طی قرن بیست‌ویک، احتمالاً دمای متوسط زمین از ۱٫۵ تا ۵٫۸ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد. رشد جمعیت، توسعه‌ی شهرنشینی و گرمایش جهانی تقاضای انرژی در بخش ساختمان را افزایش داده است. تحقیقات نشان می‌دهد که مصرف انرژی ساختمان ۴۰ درصد از کل انرژی جهانی را به خود اختصاص داده است (Vanaga et al., 2018). در چند دهه‌ی گذشته و مقارن با شروع بحران انرژی در جهان، تلاش‌ها در جهت کاهش مصرف انرژی در حوزه‌ی ساخت‌وساز، و بهبود عملکرد انرژی در ساختمان بسیار مورد توجه قرار گرفته است. بدیهی است که طراحی و ساخت مناسب عناصر و اجزاء ساختمان می‌تواند باعث کاهش مصرف انرژی، کاهش تأثیرات منفی بر محیط زیست و صرفه‌جویی اقتصادی در طول چرخه حیات ساختمان شود (Britannica, 2007; Huang et al., 2014; Huang & Niu, 2016; Synnefa et al., 2017; Kim et al., 2017; Yang et al., 2017) و گامی مؤثر در دستیابی به ساختمان‌های سبز و پایدار باشد.

یکی از راه‌های اتلاف حرارت در ساختمان، تبادل حرارتی، خروج هوای گرم و نفوذ هوای سرد به داخل ساختمان است. از این رو خواص حرارتی جداره‌ی ساختمان تأثیر قابل توجهی بر عملکرد انرژی ساختمان دارد (Mangan & Oral, 2016). وجود نورگیرها، سقف‌های بلند، باز بودن دودکش شومینه‌ها (افزایش فشار) و سرعت باد، در کنار درزبندی ضعیف پنجره‌ها باعث خروج هوای داخل ساختمان و جایگزینی هوای بیرون می‌شود (میرهاشمی، ۱۳۸۹). پنجره و سطوح شیشه‌ای پنجره از عناصر اصلی و جدایی‌ناپذیر پوسته ساختمان است، که برخورداری از نور روز، تهویه طبیعی و دریافت تابش را فراهم می‌آورد. پنجره معمولاً عنصر نما با کمترین مقاومت حرارتی و کم ضخامت‌ترین عنصر سازنده‌ی همراه با بالاترین رسانایی گرمایی در ساختمان است (Carlos, 2017). نظر به اینکه انتقال حرارت از طریق پنجره‌ها پنج برابر بیشتر از سایر اجزای جداره ساختمان است و انرژی ازدست رفته در این راه تا ۴۰ درصد از کل انرژی مصرفی ساختمان است، همچنین افزایش گرمای خورشیدی می‌تواند تقاضای سرمایش داخلی را در مناطق غیر سرد افزایش دهد و به کاهش تقاضای گرمایش در مناطق سرد کمک کند (Ihm et al., 2012)، از این رو می‌تواند بزرگ‌ترین چالش‌های مصرف انرژی را ایجاد کند: ۱- انتقال حرارت، اتلاف انرژی تولید شده در داخل ساختمان و مهم‌تر از آن، دریافت بیش از نیاز انرژی گرمایی و در نتیجه افزایش بار سرمایشی به‌خصوص در مناطق گرم و خشک ۲- تحمیل بار مصرفی اضافی به ساختمان به‌واسطه‌ی باز گذاشتن پنجره برای تأمین نیازمندی‌های تهویه. چراکه هوابندی کامل عناصر مختلف ساختمانی به بهانه‌ی کاهش انتقال حرارت، منجر به کاهش کیفیت هوای داخلی ساختمان می‌شود.

نتایج بسیاری از مطالعات که در قالب پیشینه‌ی پژوهش ارائه خواهد شد، نشان می‌دهد که اندازه‌ی پنجره هنگام بهینه‌سازی هم‌زمان برای مصرف انرژی کم (اندازه‌های کوچک پنجره) و آسایش بصری (اندازه‌های بزرگ پنجره)، تهویه‌ی طبیعی (افزایش نسبت سطح پنجره به دیوار)، نورگیری پایین محیط داخلی که با افزایش مصرف انرژی برای تأمین نور مصنوعی همراه است، می‌تواند تضادهایی را به‌وجود آورد. بر این اساس پرسش پژوهش این است که چگونه می‌توان از قابلیت‌های مختلف و متنوع پنجره در جهت کاهش انرژی مصرفی در فرآیندهای سرمایش، گرمایش و تهویه در ساختمان استفاده نمود؟ با این توضیح، هدف مطالعه‌ی حاضر واکاوی کاربست پنجره‌های هوا گذر به‌عنوان راه‌حلی مناسب و روشی غیرفعال در کاهش مصرف انرژی ساختمان است که با عواملی همچون استفاده از لایه‌های پوششی کم‌گسیل و مواد تغییر فاز دهنده به‌منظور بهبود عملکرد حرارتی این نوع پنجره‌ها و کاهش بار سرمایشی، گرمایشی و تهویه ساختمان ترکیب شده است.

۱-۱- پیشینه‌ی پژوهش

مطالعات بسیاری توسط دمیریلیک^۱ و همکاران (۲۰۰۳)، غیسی و تینکر^۲ (۲۰۰۵)، لی^۳ و همکاران (۲۰۰۵)، زموری و شیلر^۴ (۲۰۰۵)، صبوری و مهدزین^۵ (۲۰۱۱) در زمینه‌ی نسبت بهینه‌ی سطح پنجره به جداره^۶ در شرایط آب‌وهوایی مختلف انجام شده است. نتایج حاکی از آن است که نسبت بهینه سطح پنجره به جداره با توجه به شرایط اقلیمی و آب‌وهوایی متفاوت است. یانگ^۷ و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه‌ی خود بر این مهم تأکید دارند که مصرف کل انرژی با افزایش نسبت سطح پنجره به جداره، افزایش می‌یابد، زیرا نیمی از انرژی در یک ساختمان از طریق پنجره از بین می‌رود (Shaeri et al., 2019).



بنابراین، تعیین بهینه نسبت سطح پنجره به جداره برای نمای ساختمان‌های مختلف برای کاهش چنین تلفاتی از اهمیت زیادی برخوردار است (Chiesa et al., 2019; Troup et al., 2019) گویا^{۱۶} (۲۰۱۶) در مطالعات خود متذکر می‌شود که نسبت سطح پنجره به جداره در بدترین حالت تا بهینه‌ترین حالت می‌تواند ۲۵٪ تا ۵٪ کل مصرف انرژی در یک ساختمان در شرایط آب‌وهوایی متنوع اروپا را تغییر دهد. در کنار عامل نسبت سطح پنجره به جداره، نوع شیشه پنجره سهم قابل توجهی در نیازهای گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها دارد. بار اصلی انرژی انتقال حرارت از طریق شیشه پنجره است (Ihm et al., 2012). عواملی نظیر ضریب تبادل حرارتی یو. ولیو^{۱۷}، ضریب اکتساب حرارتی اس.اچ.جی.سی.^{۱۸}، پوشش‌های شیشه پنجره، سایه‌بان‌ها، رنگ شیشه پنجره‌ها، نسبت شفافیت تأثیر زیادی بر نیازهای گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها دارد (Kontoleon, 2002; Bektas & Teoman, 2008; European Union, 2010; Ahn et al., 2016) شیشه‌ی پنجره با کارایی بالاتر، وسیله‌ی مهمی برای صرفه‌جویی در انرژی است (Haglund, 2010). در نتیجه، بسیاری از انتشارات اخیر مربوط به استفاده از پنجره‌های انرژی‌زا برای بهبود عملکرد ساختمان هستند. به دلیل ضریب تبادل حرارتی بالا، پنجره‌ها با بیشترین تلفات انرژی (حدود ۶۰ درصد در ساختمان‌های مسکونی) همراه هستند. بنابراین، ضریب تبادل حرارتی پایین، و همچنین ضریب اکتساب حرارت خورشیدی مناسب به منظور تأمین آسایش حرارتی کاربران و استفاده بهینه‌ی انرژی در شرایط آب‌وهوایی متنوع، باید با طراحی پنجره ادغام شود تا به کاهش مصرف انرژی ساختمان‌ها کمک کند. همچنین نتایج مطالعه آلاوادی^{۱۹} و همکاران (۲۰۱۲) که به بررسی تأثیر پوشش‌های محافظ پنجره^{۲۰}، جزییات ساختاری آن‌ها و میزان تأثیری بر مصرف انرژی و عملکرد حرارتی پرداختند، نشان داد که پوشش‌های محافظ پنجره غلطکی ساخته شده با مواد تغییر فاز دهنده پی.سی.ام.^{۲۱} بهترین عملکرد حرارتی را دارند و دریافت حرارت خورشیدی را به میزان ۲۳،۲۹ درصد کاهش می‌دهند. در پروژه‌ای که در مرکز تحقیقات مسکن پنسیلوانیا (Ariosto, 2013) انجام گرفته، طبقه‌های مقاوم‌سازی پنجره‌های مسکونی برای بهره‌وری انرژی بررسی شده است. در این پژوهش به بررسی تأثیر پوشش‌های محافظ بر تغییر ضریب انتقال حرارت پنجره پرداخته شده است. این مطالعه با بررسی ضریب انتقال حرارت سیستم‌های متفاوت سایه‌انداز توسط برنامه‌های شبیه‌سازی انرژی و بررسی عوامل مختلف مثل آسایش حرارتی، میزان نفوذ هوا، هزینه‌ی ساخت، امنیت، روشنایی طبیعی و... به این نتیجه رسیده که راهکارهایی که سبب کم شدن ضریب انتقال حرارت پنجره می‌شوند و همچنین دریافت حرارت خورشیدی را کنترل کرده و کاهش می‌دهند، در بهره‌وری انرژی در ساختمان مسکونی بسیار موثر هستند. در ایران مطالعه‌ای توسط فیاض (۱۳۹۲) برای سنجش سطح بهینه‌ی پنجره در ساختمان مسکونی در شهر تهران انجام گرفت و سطح بهینه پنجره را ۱۵ تا ۲۰ درصد سطح اتاق پیشنهاد داده است. محمدی و حیدری (۱۳۹۴) به مطالعه پنجره‌های هوا گذر پرداخته‌اند که نتایج پژوهش نشان‌دهنده‌ی توانایی بالای این پنجره در راستای افزایش بهره‌وری سطوح شیشه‌ای (کاهش مصرف انرژی در هر دو بخش انتقال حرارت و تهویه) در مقایسه با پنجره‌های چند جداره معمولی است. وهابی و مهدوی‌نیا (۱۳۹۵) به بررسی تأثیر ویژگی‌های کالبدی پوشش‌های محافظ پنجره بر عملکرد حرارتی ساختمان‌های مسکونی شهر تهران پرداختند و نتایج مطالعه نشان می‌دهد که پوشش محافظ پنجره‌ی چوبی همراه با کرکره‌های متحرک که به صورت هوشمند کنترل شده و در جداره‌ی خارجی پنجره نصب شده‌اند، در مقایسه با شرایط بدون سایه‌بان، کاهش بیشتری در بار سرمایشی و گرمایشی فضا ایجاد کرده‌اند.

مرور بر مطالعات حاکی از آن است که از یک‌سو عملکرد حرارتی پنجره‌ها در شرایط مختلف آب‌وهوایی و تغییر در عوامل بسیاری مانند سرعت جریان هوا، پوشش لایه کم‌گسیل، ضخامت شیشه‌ها، ارتفاع پنجره و عمق فضای تهویه شونده، نسبت سطح پنجره به جداره، جهت، شدت و زمان تابش خورشید بر سطح پنجره، پوشش‌های محافظ پنجره و... متفاوت است و از سوی دیگر سیستم‌های تهویه مکانیکی با مصرف مقدار زیادی انرژی بر کل مصرف انرژی می‌افزاید (Cao et al., 2016; Li et al., 2017). از این‌رو طراحی سیستم‌های تهویه طبیعی می‌تواند در کاهش میزان مصرف انرژی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و دستیابی به اهداف توسعه پایدار مؤثر باشد. تهویه طبیعی نوعی فناوری غیرفعال در ساختمان‌های سبز است که با استفاده از فشار حرارتی ناشی از اختلاف چگالی هوای داخل و خارج ساختمان یا فشار باد ناشی از حرکت جوی فضای باز، هوای تازه فضای باز را به فضای داخلی ساختمان انتشار می‌دهد (Gautam et al., 2019; Moey et al., 2021). بنابراین به‌عنوان یک روش سازگار با محیط زیست و صرفه‌جویی در مصرف انرژی، تهویه طبیعی در حال تبدیل شدن به یک گزینه مطلوب برای بهبود بالقوه کیفیت هوای داخلی است (Bayoumi, 2021).

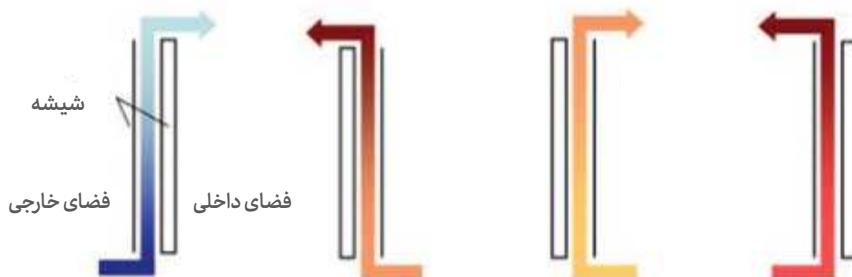
۲- مبانی نظری

تهویه طبیعی می‌تواند تحت تأثیر شکل، اندازه، جهت و موقعیت پنجره باشد. همچنین نوسانات آبی در جهت باد و سرعت باد نیز بر میزان تهویه طبیعی تأثیرگذار است (Je et al., 2011; Shetabivash, 2015; Park & lee, 2020). به عبارتی کنترل میزان تهویه طبیعی کافی محیط داخلی ساختمان، به دلیل بسیاری از عوامل نامشخص، از جمله فشار، سرعت، جهت باد متغیر، وجود بازشوهای داخلی و خارجی، محل بازشوها، اندازه‌ی آن‌ها و تغییرات دمای بیرون ساختمان بسیار چالش‌برانگیز است و بیشتر استراتژی‌های کنترل تهویه طبیعی به صورت نظری تحلیل شده‌اند و کاربرد عملی نتایج این تحلیل‌ها محدود است. بنابراین در مطالعه‌ی حاضر به بررسی پنجره‌های تهویه شونده یا هوا گذر به عنوان یک راهکار در کاهش انرژی مصرفی گرمایشی، سرمایشی و تهویه در ساختمان پرداخته می‌شود.

۲-۱- پنجره‌های تهویه شونده یا هواگذر

پنجره‌ی هواگذر اغلب برای توصیف یک پنجره چندلایه استفاده می‌شود، که در آن یک یا چند حفره تهویه هوا، تعبیه می‌شود. پژوهش‌ها نشان داده است که می‌توان از پنجره‌های هواگذر یا پنجره‌های دولایه‌ی تهویه شونده برای بهبود تعادل انرژی پنجره‌ها در هر دو شرایط گرما و سرما استفاده کرد. بیان شده که مقدار یو. ویو یا ضریب انتقال حرارتی با استفاده از این پنجره‌ها می‌تواند ۳۰-۴۰ درصد کاهش یابد (Raffnsøe, 2007). پنجره‌های هوا گذر در ظاهر مانند یک پنجره دو یا سه جداره است که هوا در یک یا بیشتر از یکی از فضاهای میانی شیشه‌ها، به جای محبوس شدن به جریان در می‌آید. مبدأ و مقصد جریان هوا در این ساختار، همانند حالات مختلفی که برای نماهای دو پوسته وجود دارد، متفاوت است و به تبع آن، کارکردها نیز متفاوت خواهد بود. در این پنجره‌ها به جای بازشوهای بزرگ از منافذ کوچکی در پایین و بالای شیشه‌های داخلی و خارجی برای عبور جریان هوا استفاده می‌شود. ضریب انتقال حرارت شیشه‌های دوجداره نصف شیشه‌های یک جداره است و افزودن لایه‌های بعدی به پنجره تأثیر کمتری (در حدود ۱۲ درصد) نسبت به لایه دوم خواهد داشت (دقیق، ۱۳۸۲، ۹۵۵). مفهوم اساسی پنجره‌ی تهویه شونده یا پنجره‌ی هوا گذر، کنترل جریان هوای فضای باز بیرون است که از حفره‌ی پنجره دوتایی عبور می‌کند. هدف این پنجره‌ها کاهش حرارت خورشیدی دریافتی در تابستان و به حداقل رساندن بار گرمایش داخل ساختمان و بهبود آسایش حرارتی با استفاده از تابش خورشید برای گرم شدن هوای پنجره در زمستان است (Liu et al., 2017). مطالعات متعدد در زمینه‌ی بررسی پنجره‌های هوا گذر حاکی از آن است که می‌توانند در تأمین نیازهای گرمایشی و سرمایشی، کاهش مصرف انرژی و تأمین آسایش حرارتی کاربران مؤثر واقع شوند (Chow et al., 2009; Wei et al., 2010; Appelfeld & Svendsen, 2011; Carlos & Carlos, 2017; Corvacho, 2015). اگرچه که در ایده‌آل‌ترین حالت دمای هوای تهویه هیچ‌گاه با دمای داخل ساختمان برابر نمی‌شود (Carlos et al., 2010)، به‌طور کلی، استراتژی‌های مختلف برای تهویه در چنین پنجره‌هایی عبارت هستند از:

- تأمین کننده‌ی هوا^{۱۵}: تهویه فضای میانی به وسیله هوای بیرون تأمین شده و سپس وارد ساختمان می‌شود؛
- تخلیه کننده‌ی هوا^{۱۶}: هوای داخل ساختمان، به فضای میانی کشیده شده و از آن خارج می‌شود؛
- پرده هوایی خارجی^{۱۷}: هوایی که وارد فضای تهویه شونده می‌شود، از بیرون تأمین شده و دوباره به فضای خارج برگردانده می‌شود. بنابراین، تهویه یک پرده از هوا در خارج ساختمان ایجاد می‌کند؛
- پرده هوایی داخلی^{۱۸}: هوای داخل ساختمان به فضای میانی وارد شده و هنگام خروج از این فضا دوباره به داخل ساختمان و یا به سیستم تهویه ساختمان هدایت می‌شود. به عبارتی، فضای میانی در نقش یک پرده هوایی، ساختمان را از داخل پوشش می‌دهد.



تصویر ۱- حالت‌های مختلف پنجره هواگذر، از راست به چپ: پنجره با پرده هوایی خارجی، پنجره با پرده هوایی داخلی، پنجره تخلیه کننده‌ی هوا، پنجره‌ی تأمین کننده‌ی هوا



گرمای حاصل از تابش، در فضای خالی بین دو شیشه به دام می‌افتد و بسته به مسیر جریان هوا، به داخل یا خارج هدایت می‌شود. به این ترتیب از انرژی خورشیدی دریافت شده در جهت پیش‌گرمایش هوای بیرون و حالت تأمین‌کننده‌ی هوا و گرمایش دوباره‌ی هوای داخل در حالت پرده‌ی هوایی داخلی در طول دوره‌ی گرمایش بهره‌برده می‌شود. از جریان هوا در حالت خارج‌کننده‌ی هوا و پرده‌ی هوایی خارجی در جهت انتقال گرمای دریافت‌شده اضافی ناشی از تابش به فضای بیرون، در طول دوره‌ی سرمایش استفاده می‌شود. با وجود اینکه پرده‌ی هوایی نمی‌تواند در جهت ارتقای کیفیت هوای داخلی یا نیازمندی‌های تهویه مؤثر باشد. این قابلیت مزایایی در ارتباط با کاهش مصرف انرژی و افزایش آسایش حرارتی را به دنبال دارد.

در مقایسه با یک پنجره معمولی، تمام حالت‌های یک پنجره هواگذر، در ارتقای شرایط آسایش حرارتی فضاهای نزدیک به پنجره بسیار سودمند است. به این دلیل که دمای سطح شیشه داخلی نزدیک‌تر به دمای اتاق است. کاهش اختلاف دمایی بین ساکنین و پنجره داخلی در طول دوره گرمایش، انتقال حرارت تابشی را کاهش و آسایش حرارتی را افزایش می‌دهد. این کاهش اختلاف دمایی بین شیشه داخل و خارج نیز، خود دلیلی برای کاهش انتقال حرارت است. از جهت اجرایی می‌توان یک پنجره دمده‌ی هوا را برای تأمین شرایط بهینه‌ی مصرف انرژی برای فصل سرما در ساختمان تعبیه کرده و در فصل گرم با ایجاد تغییر در مسیر جریان هوا، از شیشه‌ی خارجی به‌همراه سایه‌بان، به‌عنوان پرده‌ی هوایی خارجی استفاده کرد.

۲-۲- شیشه‌های هوشمند، لایه‌های پوششی کم‌گسیل^{۱۹}

شیشه‌های کنترل‌کننده‌ی انرژی یا شیشه‌های با پوشش کم‌گسیل، شیشه‌هایی هستند که انتقال حرارت کمتری نسبت به شیشه‌های معمولی دارند و مانند یک عایق حرارتی عمل می‌کنند. شیشه‌های با پوشش کم‌گسیل در زمستان که حرارت داخلی محیط تمایل به انتقال به سمت هوای سرد خارج را دارد، مانع از خروج گرما به خارج شده و گرما را به سمت داخل منعکس می‌کند و در نتیجه با بهره‌گیری از این شیشه‌ها میزان اتلاف انرژی حرارتی در زمستان کاهش می‌یابد، همچنین در تابستان با جلوگیری از ورود تابش مادون قرمز مانع ورود حرارت بیرون به داخل می‌شود. به‌عبارتی این شیشه‌ها انتقال حرارت ناشی از اختلاف دما که ترکیبی از پدیده‌های هدایت، جابجایی و تابش است و در پارامتر یو.وی.وشان داده می‌شود را کاهش و همچنین انتقال حرارت تابشی را تحت کنترل دارند.

مطالعات حاکی از آن است که پنجره‌های با لایه پوشش کم‌گسیل عملکرد انرژی بسیار بهتری نسبت به سایر شیشه‌های عمومی با ضخامت مشابه به‌خصوص در شرایط اقلیمی گرم از خود نشان می‌دهد و می‌توانند اقدامی مؤثر در کاهش مصرف انرژی ساختمان باشند (Lai & Wang, 2011; Chen, 2012). برای کاهش تقاضای بار خنک‌کنندگی در ساختمان در مناطق با شرایط اقلیمی خنک، استفاده از پنجره‌های تک‌جداره با لایه‌های پوششی کم‌گسیل بدون ایجاد تابش خیره‌کننده مانند پوشش‌های بازتابنده، می‌تواند مؤثر باشد (Lai & Wang, 2011). پنجره‌های تک‌جداره با ضخامت شیشه‌های ۶ میلی‌متری همراه با لایه‌های پوششی کم‌گسیل دارای عملکرد انرژی بسیار بهتری نسبت به سایر شیشه‌های معمولی با ضخامت مشابه بوده و از این رو، اقدام مناسبی برای کاهش مصرف انرژی ساختمان در منطقه گرم نیز محسوب می‌شوند (Chen, 2012). پژوهشگران جزئیات ۲۰ نوع پنجره با ویژگی‌های مختلف در سه گروه اصلی - تک‌جداره‌ی ۶ میلی‌متری، ۲- دو‌جداره‌ی ۶ میلی‌متری، با ۶ میلی‌متر لایه پرشده از هوا یا آرگون ۳- دو‌جداره‌ی ۶ میلی‌متری با ۱۳ میلی‌متر لایه پرشده از هوا یا آرگون را شبیه‌سازی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که پنجره‌های تک‌جداره با شیشه‌ی شفاف ۶ میلی‌متری بیشترین ضریب انتقال حرارتی (۵,۷۷۸W/m².k) و جذب حرارتی^{۲۰} (۰,۸۱۹) را دارد. درحالی‌که پنجره‌ها با لایه پوششی کم‌گسیل عملکرد حرارتی بهتری را نشان می‌دهند. زیرا در عوامل ضریب انتقال و جذب حرارتی مقدار کمتری را نشان می‌دهند. برای شیشه دو‌جداره، ضخامت و نوع گاز پر شده بین دو شیشه‌ی عملکرد حرارتی گذار است و پنجره‌های دو‌جداره با ضخامت لایه‌ی ۱۳ میلی‌متری و پرشده با گاز رادون، در مقایسه با ضخامت لایه‌ی ۶ میلی‌متری پرشده از هوا عملکرد حرارتی بهتری را نشان می‌دهد (Cuce et al., 2015; Cuce & Cuce, 2016; He et al., 2019). نتایج مطالعات حاکی از آن است که پنجره‌های سنتی با شیشه‌های معمولی مهم‌ترین عناصری هستند که امکان عبور تابش خورشید به ساختمان را فراهم می‌کنند. میزان دریافت انرژی خورشیدی به نوع شیشه استفاده شده، مساحت پنجره و جهت ساختمان بستگی دارد (Ateeque & Anjum, 2017). انواع مختلفی از سیستم‌های سایه‌بان فعال وجود دارد که قادر به کاهش میزان تابش خورشیدی عبوری از داخل ساختمان هستند. بنابراین، عملکرد حرارتی ساختمان را می‌توان بهبود بخشید (Jelle, 2013). این سیستم‌های سایه‌بان فعال را می‌توان به شیشه‌های هوشمند و سیستم‌های سایه‌بان ثابت یا متحرک طبقه‌بندی کرد (Jalil & Roza, 2019).



شیشه‌های کرومیک هوشمند شامل انواع الکتروکرومیک^{۲۱}، گازوکرومیک^{۲۲}، ترموکرومیک^{۲۳} و فوتوکرومیک^{۲۴} است که انواع ترموکرومیک و فوتوکرومیک نسبت به گرما و تشعشعات خورشیدی واکنش نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که شیشه‌های هوشمند موثرتر از انواع معمولی سنتی است. شیشه‌های الکتروکرومیک بهترین نتایج را در کاهش مصرف انرژی خنک‌کننده در ساختمان به میزان ۳۲٪ نشان دادند (Nageib et al., 2020). پوشش‌های کم‌گسیل^{۲۵} می‌تواند گرما را از طریق پنجره‌ها حداکثر تا ۴۸ درصد کاهش دهند (Liu, 2012). پوشش کم‌گسیل مانع عبور بخش‌های زیادی از اشعه مضر ماوراءبنفش^{۲۶} و امواج گرمای مادون قرمز^{۲۷} از شیشه‌ها می‌شود. این عمل بدون کاهش در عبور امواج قابل رویت و مرئی صورت می‌گیرد. هنگامی که تابش خورشید به سطح شیشه کم‌گسیل برخورد می‌کند، طیف امواج مرئی از آن عبور کرده و امواج گرمای مادون قرمز و ماوراءبنفش بازتابش می‌شوند. علاوه بر این، پنجره‌های با شیشه رنگی می‌توانند انتقال حرارتی را تا بیش از ۲۰٪ کاهش دهند بدون اینکه به سایر خواص مانند عملکرد و قابلیت مشاهده آسیبی وارد شود (Tian et al., 2018; Yu et al., 2020). شیشه‌های رنگی با در نظر گرفتن نور روز می‌تواند ۱۴٫۸٪ کل مصرف انرژی را در مقایسه با آن بدون توجه به نور روز کاهش دهد (Gardiner et al., 2009). در مناطق آب‌وهوایی معتدل، شیشه‌های شفاف دو جداره‌ی صرفه‌جویی در مصرف انرژی گرمایشی بالاتری نسبت به پنجره‌های سه جداره نشان می‌دهند، درحالی‌که شیشه‌های رنگی می‌توانند انرژی خنک‌کننده را با کاهش قابل توجه انتقال خورشید در مقایسه با شیشه‌های شفاف در تابستان کاهش دهند. علاوه بر این، حدود ۵٫۱٪ و ۶٫۴٪ از تقاضای سالانه انرژی خنک‌کننده را می‌توان با پنجره‌های با شیشه رنگی و دو جداره کم‌گسیل ذخیره کرد (Sadrzadehrafiei et al., 2011). در مناطق آب‌وهوای گرم، استفاده از شیشه‌های رنگی، کم‌گسل و دو جداره می‌تواند در مقایسه با شیشه‌های شفاف دو جداره به ترتیب ۹ و ۱۴ درصد از کل تقاضای انرژی خنک‌کننده سالانه را و به ترتیب ۷ و ۱۱ درصد از کل انرژی را کاهش دهد (Gardiner et al., 2009).

۲-۳- مواد تغییر فاز دهنده

مواد تغییر فاز دهنده^{۲۸} یکی از ابزارهای کارآمد برای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی هستند. عملکرد آن‌ها به این صورت است که با افزایش دما، تغییر فاز داده و انرژی حرارتی را در خود ذخیره می‌کنند و با کاهش دما این انرژی را آزاد می‌سازند. انرژی ذخیره شده از طریق گرمای نهان که با تغییر فاز ماده همراه است، به دلیل چگالی بالای ذخیره انرژی گرمایی از اهمیت زیادی برخوردار است (Li & Wub, 2012). مزیت اصلی این مواد این است که در دمای تقریبی ۲۰ درجه سانتی‌گراد، می‌توانند ۳-۴ برابر انرژی بیشتری در واحد حجم نسبت به گرمای محسوس در جامدات و مایعات ذخیره نمایند (Muruganatham, 2010). مواد تغییر فاز طی فرآیند گرم شدن محیط، همراه با محیط گرم می‌شوند تا زمانی که به دمای ذوب خود (دمای تغییر فاز) برسند. پس از رسیدن به این دما علی‌رغم آنکه دمای محیط همچنان افزایش می‌یابد، دمای این مواد و محیط اطراف آن ثابت می‌ماند. ماده تغییر فاز دهنده مقدار زیادی از گرمای محیط را جذب می‌کند، ولی آن را صرف افزایش دمای خود نمی‌کند بلکه این گرما را صرف تغییر فاز خود می‌نماید. دمای عملکرد سیستم جهت گرمایش و سرمایش باید متناسب با دمای تغییر فاز ماده‌ی تغییر فاز دهنده باشد. هر چه گرمای نهان ذوب ماده تغییر فاز بالاتر باشد، موجب کاهش ابعاد سیستم ذخیره‌کننده می‌شود و همچنین ضریب انتقال حرارت بالا به شارژ و تخلیه سیستم کمک می‌کند. هر چه چگالی ماده تغییر فاز دهنده بیشتر باشد می‌توان سیستمی با ابعاد کوچک‌تر طراحی نمود. بسیاری از پژوهشگران و مهندسان از استفاده موفقیت‌آمیز مواد تغییر فاز دهنده در اجزای ساختمان به‌عنوان سیستم‌های ذخیره انرژی نهان حرارتی ال.اچ.تی.ای.اس.^{۲۹} گزارش کرده‌اند (Soares et al., 2013). در مقایسه با سیستم‌های ذخیره حرارتی محسوس که دمای مواد ذخیره‌ساز را تغییر می‌دهند، سیستم‌های ذخیره انرژی نهان حرارتی، برای ذخیره انرژی به حجم بسیار کمتری از مواد نیاز دارند. استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در این سیستم‌ها، به دلیل توانایی بالای ذخیره‌سازی گرما، اخیراً توجه زیادی را در بخش‌های تحقیقاتی به خود اختصاص داده است (Pomianowski et al., 2013). کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در ساختمان را می‌توان به دو بخش فعال و غیرفعال تقسیم‌بندی نمود. سیستم‌های غیرفعال همراه با مواد تغییر فاز دهنده می‌تواند در پشت‌بام (Hu et al., 2020)، سازه‌های بتونی (Pomianowski et al., 2013; Cheng et al., 2014)، شیشه‌ها (Ismail et al., 2008)، سایه‌اندازها (Weinlaeder et al., 2011)، طراحی داخلی ساختمان (Johra & Heiselberg, 2017; Johra et al., 2019) کاربرد داشته باشد. این سیستم‌های غیرفعال، پاسخی کند به نیازهای گرمایشی و سرمایشی دارند. سیستم‌های فعال با مواد تغییر فاز دهنده برای تسریع در فرآیند شارژ حرارتی در بخش‌های

آب‌وهوای ساختمان کاربرد دارند. این سیستم‌ها زمان پاسخ کوتاه‌تری دارند و با جایگزینی همرفت آزاد و اجباری به ضریب انتقال حرارت بهتر کمک می‌کنند. این سیستم‌ها در سقف (Weinlaeder et al., 2014)، کف (Ansuini et al., 2011; Jin & Zhang, 2011)، نمای دو پوسته (De Gracia et al., 2013)، پنجره با تهویه (Hu & Heiselberg, 2018)، سیستم‌های آب گرم خانگی (Motte et al., 2019) و سیستم‌های تهویه مطبوع ساختمان کاربرد دارند. با توجه به مفاهیم مطرح شده در این مطالعه به واکای سیستم ترکیبی متشکل از پنجره هوا گذر، مواد تغییر فاز دهنده، شیشه‌های هوشمند با لایه پوششی کم‌گسیل و سایه‌بان عایق پرداخته می‌شود.

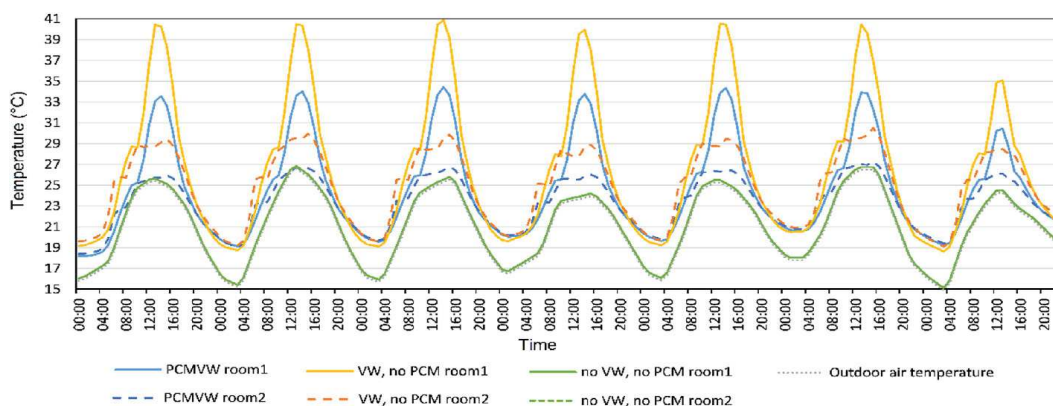
۳- روش پژوهش

روش پژوهش، توصیفی-تحلیلی با مطالعه کیفی است. ابزار جمع‌آوری اطلاعات بررسی منابع مکتوب، اسناد، مدارک و مطالعات پیشین است و روش تحلیل داده‌ها، تحلیل محتوا است. در تحلیل محتوا، پژوهشگر پیام‌های تولید شده را تحلیل کرده و به دنبال یافتن پاسخی برای پرسش‌های تحقیق خود است. با توجه به هدف پژوهش گام‌های زیر انجام می‌پذیرد:

- معرفی پنجره‌های تهویه شونده یا هوا گذر و سازوکار آن در کاهش مصرف انرژی؛
- شناخت اهمیت شیشه‌های هوشمند و لایه‌های پوششی کم‌گسیل در کاهش بار سرمایشی و گرمایشی ساختمان؛
- بررسی اهمیت کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در کاهش بار سرمایشی و گرمایشی ساختمان؛
- تدوین عوامل مؤثر در عملکرد بهینه سیستم‌های پنجره در جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان.

۴- تحلیل داده‌ها

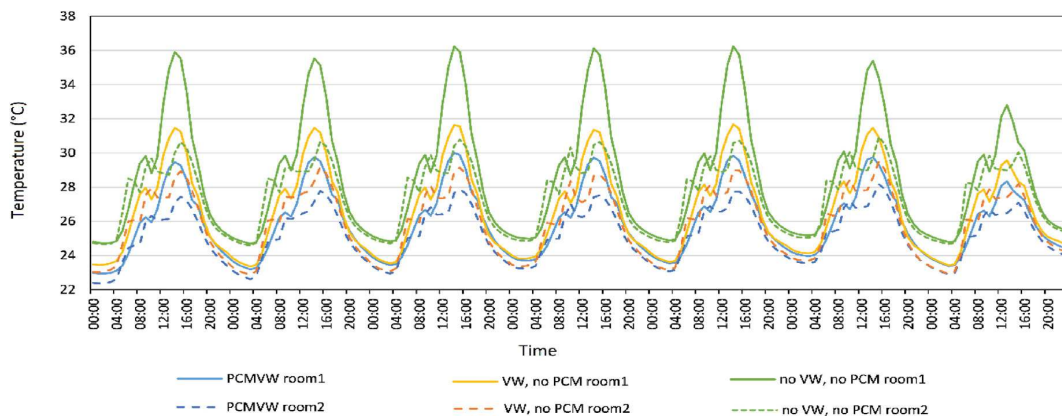
پنجره‌ها بخش عمده‌ای از کل گرمایش و سرمایش ساختمان را صرف نظر از استفاده از پوشش‌ها، شیشه‌های کم‌گسیل و یا هوابندی‌ها، تشکیل می‌دهد (Appelfeld et al., 2010). مفهوم اساسی پنجره‌ی هواگذر، کنترل جریان هوا در فضاهای خالی پنجره است. هدف پنجره هواگذر کاهش حرارت خورشیدی از طریق پنجره در تابستان و به حداقل رساندن بار گرمایش فضای داخلی ساختمان و بهبود آسایش حرارتی با استفاده از تابش خورشید برای پیش گرم شدن هوای تهویه در زمستان است (Liu et al., 2017). نتایج مطالعات مقایسه‌ای پنجره‌های هوا گذر و اهمیت قابلیت آنها در ترکیب با مواد تغییر فاز دهنده در کاهش تقاضای خنک‌کنندگی تابستان و تقاضای انرژی گرمایشی زمستان در قالب تصاویر ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ به تصویر کشده شده است. تصویر ۱ قابلیت خنک‌کنندگی پنجره در شب‌های تابستان را در ۳ نوع از پنجره (پنجره‌های تهویه شونده با مواد تغییر فاز دهنده^۱، پنجره‌های تهویه شونده بدون مواد تغییر فاز دهنده^۲ و همچنین پنجره‌های معمولی بدون مواد تغییر فاز دهنده^۳) را مورد مقایسه قرار می‌دهد. بررسی دمای هوای ورودی تهویه اتاق از ۱ تا ۷ آگوست حاکی از آن است که در اتاق شماره ۱ (پنجره در نمای جنوب غربی)، پنجره‌های معمولی بدون مواد تغییر فاز دهنده، کمترین دمای هوای ورودی را دارد (که نزدیک به دمای هوای بیرون است)، و پنجره‌های تهویه شونده، بدون مواد تغییر فاز دهنده بالاترین دمای هوای ورودی را دارد. برای اتاق ۲ (پنجره در نمای شمال شرقی)، دمای هوای ورودی در سه حالت پنجره، روندهای یکسان و بسیار کمتر از اتاق شماره ۱ با جهت‌گیری جنوب غربی را دارد



تصویر ۲- دمای هوای ورودی تهویه به منظور بررسی قابلیت خنک‌کنندگی پنجره در شب‌های تابستان

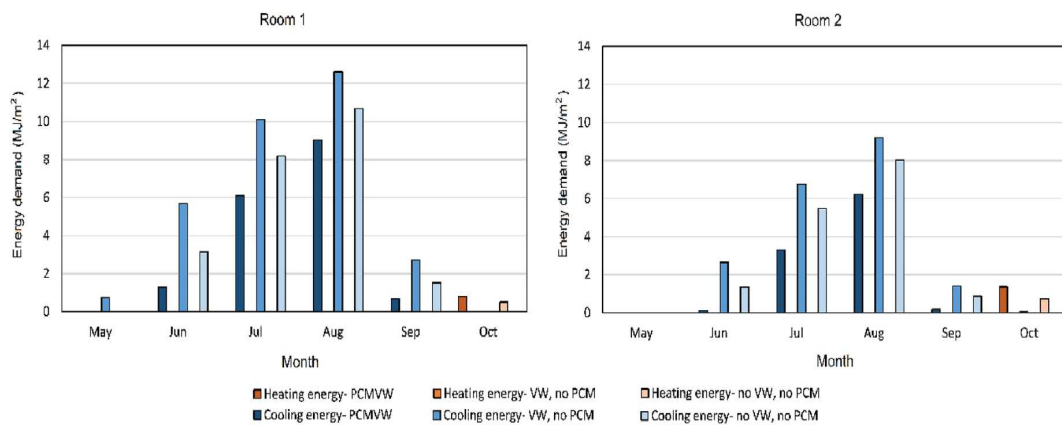


تصویر ۳ دمای سطح شیشه داخلی را در سه حالت پنجره از ۱ آگوست تا ۷ آگوست نشان می‌دهد. هر چه دمای سطح داخلی شیشه بالاتر باشد، میزان گرمای دریافتی اتاق از پنجره بیشتر می‌شود. برای هر دو اتاق، پنجره‌های معمولی و بدون مواد تغییر فازدهنده بالاترین دمای سطح شیشه را دارد و پنجره‌های تهویه شونده همراه با مواد تغییر فاز دهنده کمترین دمای سطح شیشه داخلی را دارد. پنجره‌های معمولی بودن مواد تغییر فاز دهنده، فاقد تهویه در حفره پنجره است، همین امر باعث افزایش دمای سطح شیشه می‌شود. درحالی‌که در پنجره‌های تهویه شونده همراه با مواد تغییر فاز دهنده، ماده تغییر فاز دهنده، هوای تهویه را خنک می‌کند، از این رو هوا با دمای نسبتاً کم، دمای سطح شیشه را به‌طور بالقوه خنک می‌کند. دمای هوای ورودی تهویه و دمای سطح شیشه داخلی روند یکسانی را نشان نمی‌دهند. به‌عبارتی هیچ یک از آنها نمی‌توانند به‌عنوان شاخصی برای مقایسه عملکرد تهویه استفاده شوند.



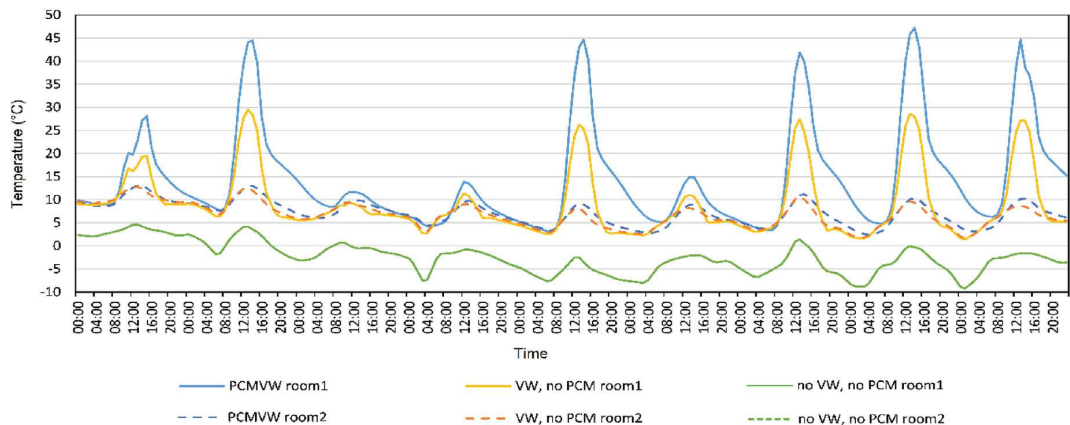
تصویر ۳- دمای سطح شیشه داخلی به منظور بررسی قابلیت خنک‌کنندگی پنجره در شب‌های تابستان

تصویر ۴ نیازهای انرژی ساختمان با سه حالت پنجره را برای کل دوره تابستان محاسبه و نشان می‌دهد. برای هر دو اتاق با جهت‌گیری‌های جنوب غربی و شمال شرقی، پنجره‌های تهویه شونده و بدون مواد تغییر فاز دهنده، بالاترین نیاز انرژی خنک‌کنندگی را برای تمام ماه‌های شبیه‌سازی شده، نشان می‌دهد که نشان از توانایی ضعیف خنک‌کنندگی پنجره‌های تهویه شونده دارد. پنجره‌های تهویه شونده همراه با مواد تغییر فاز دهنده کمترین تقاضای انرژی خنک‌کنندگی را فراهم می‌آورد. نتایج حاکی از آن است که برای اتاق شماره ۱ با جهت‌گیری جنوب غربی، پنجره‌های تهویه شونده همراه با مواد تغییر فاز دهنده کاهش تقاضای انرژی خنک‌کنندگی به میزان ۴۶٪ در مقایسه با پنجره‌های تهویه شونده و بدون مواد تغییر فاز دهنده، و کاهش ۲۷٪ در مقایسه با پنجره‌های معمولی بدون مواد تغییر فاز دهنده را نشان می‌دهد.

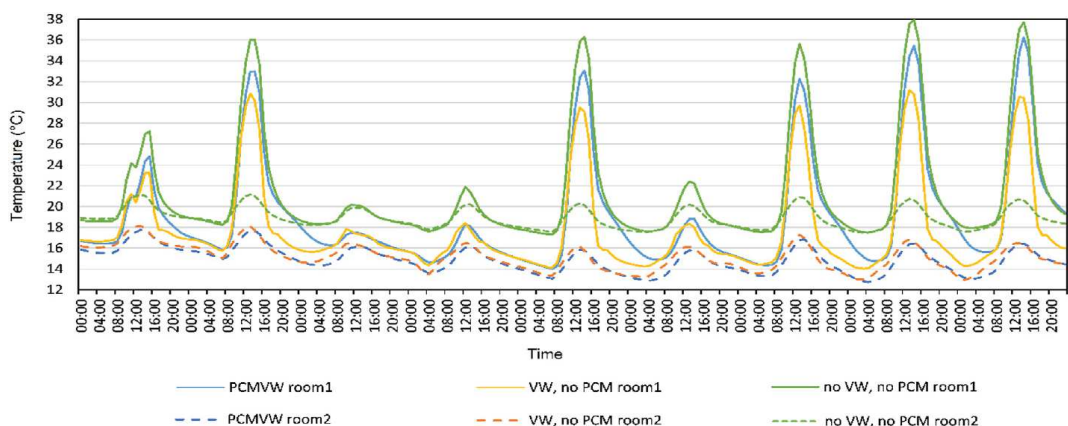


تصویر ۴- تقاضای انرژی ساختمان با سه حالت پنجره برای کل دوره تابستان

تصویر ۵ دمای هوای ورودی تهویه اتاق به منظور بررسی قابلیت ذخیره‌سازی انرژی در فصل زمستان را نشان می‌دهد. بررسی‌ها در دوره ۵ فوریه تا ۲۳ فوریه انجام شده است. برای هر دو اتاق، با پنجره‌های تهویه شونده همراه با مواد تغییر فاز دهنده، بالاترین دمای هوای ورودی را دارد. بر عکس، پنجره‌های معمولی بدون مواد تغییر فاز دهنده، کمترین دمای هوای ورودی را دارد. با سیستم تهویه یکسان، دمای هوای ورودی اتاق شماره ۱ بسیار بالاتر از اتاق شماره ۲ است (به‌جز پنجره‌های معمولی بدون مواد تغییر فاز دهنده که دمای هوای ورودی یکسانی برای اتاق‌های شماره ۱ و ۲ وجود دارد). زیرا پنجره‌های نمای جنوب غربی نسبت به نمای شمال شرقی درجه حرارت خورشیدی بیشتری را دریافت می‌کنند.

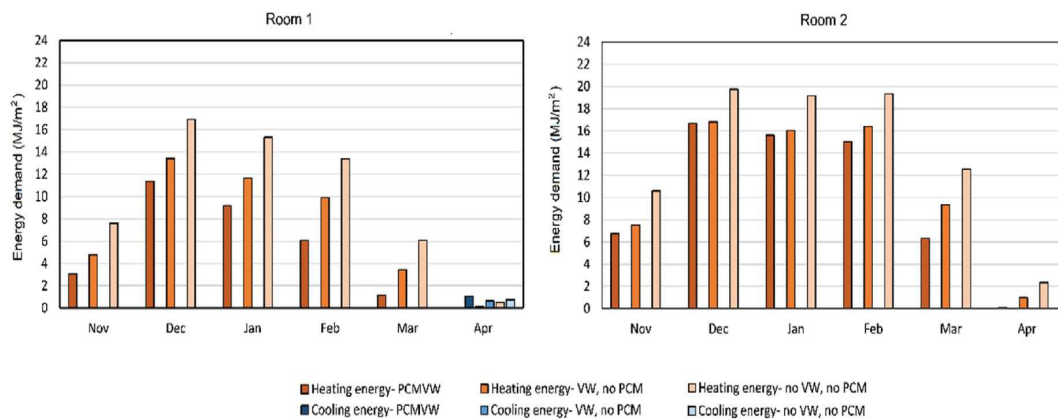


تصویر ۵- دمای هوای ورودی تهویه اتاق به منظور بررسی قابلیت ذخیره‌سازی انرژی در فصل زمستان
 تصویر ۶ دمای سطح شیشه داخلی به منظور بررسی قابلیت ذخیره انرژی خورشیدی در زمستان در دوره ۵ فوریه تا ۱۳ فوریه نشان می‌دهد. برای اتاق شماره ۱ (اتاق جنوب غربی)، پنجره‌های معمولی بدون مواد تغییر فاز دهنده بالاترین دمای سطح شیشه داخلی را دارد و پنجره تهویه شونده بدون مواد تغییر فاز دهنده کمترین دمای سطح شیشه داخلی را دارد. با این حال، برای اتاق شماره ۲ (اتاق شمال شرقی)، پنجره‌های معمولی و بدون مواد تغییر فاز دهنده، بالاترین دمای سطح شیشه داخلی را دارد، در حالی که پنجره‌های تهویه شونده همراه با مواد تغییر فاز دهنده و پنجره‌های معمولی بدون مواد تغییر فاز دهنده دمای سطح شیشه داخلی مشابهی را در بیشتر مواقع دارند. به‌عبارتی مواد تغییر فاز دهنده در جهت‌های شمال شرقی به دلیل دریافت کم تابش خورشیدی، پتانسیل اندکی در گرمایش هوای تهویه برای برخی از روزهای زمستان دارد. با این حال، در ماه‌های از سال که سطح تابش خورشیدی دریافتی در نمای شمال شرقی افزایش می‌یابد، وضعیت تغییر خواهد کرد.



تصویر ۶- دمای سطح شیشه داخلی به منظور بررسی قابلیت ذخیره انرژی خورشیدی در زمستان

تصویر ۷ به بررسی میزان تقاضای انرژی ساختمان با توجه به حالت‌های ۳ گانه پنجره به منظور قابلیت ذخیره انرژی در زمستان می‌پردازد. برای هر دو اتاق با جهت‌گیری‌های جنوب غربی و شمال شرقی، پنجره‌های تهویه شونده همراه با مواد تغییر فاز دهنده کمترین تقاضای انرژی را دارند و پنجره‌های معمولی بدون مواد تغییر فاز دهنده بیشترین تقاضای انرژی ساختمان را ایجاد می‌کنند. در اتاق شماره ۱ پنجره‌های تهویه شونده همراه با مواد تغییر فاز دهنده تقاضای انرژی گرمایشی در زمستان را در مقایسه با پنجره‌های تهویه شونده بدون مواد تغییر فاز دهنده ۴۸٪ و در مقایسه با پنجره‌های معمولی بدون مواد تغییر فاز دهنده ۲۹٪ را کاهش می‌دهند. برای اتاق شماره ۲ با جهت‌گیری شمال شرقی، پنجره‌های تهویه شونده همراه با مواد تغییر فاز دهنده تقاضای انرژی گرمایشی در زمستان را در مقایسه با پنجره‌های تهویه شونده بدون مواد تغییر فاز دهنده ۲۸٪ و در مقایسه با پنجره‌های معمولی بدون مواد تغییر فاز دهنده ۱۰٪ کاهش می‌دهند.



تصویر ۷- تقاضای انرژی ساختمان با سه حالت پنجره به منظور بررسی قابلیت ذخیره سازی انرژی در زمستان

۵- یافته‌ها و بحث

عوامل طراحی پنجره‌ها از جمله جهت‌گیری، نسبت پنجره به جداره، رسانایی حرارتی شیشه و فریم، ضریب اکتساب حرارت خورشیدی و همچنین نوع سایه‌بان تأثیر قابل توجهی بر بار انرژی دارند. اما توجه به این نکته حائز اهمیت است که هر یک از این عوامل در شرایط اقلیمی متفاوت، می‌تواند تأثیرات متغیری در کاهش بار انرژی ساختمان داشته باشد. به‌گونه‌ای که بادپچه و بوکامی (۲۰۲۰) در مطالعات خود مطرح می‌نمایند که جهت‌گیری پنجره به‌عنوان مهم‌ترین عامل در طراحی عملکرد پنجره در اقلیم نیمه خشک با میزان تأثیرگذاری ۵۴ درصد در رتبه‌ی اول و اندازه‌ی پنجره با قابلیت ۱۸٪ دومین عامل برجسته است. برعکس، در شرایط اقلیمی مدیترانه‌ای، عوامل مربوط به شیشه نظیر اندازه، ضریب تبادل حرارتی و ضریب اکتساب حرارت خورشیدی با درصد نزدیک در طراحی عملکرد پنجره، مهم‌تر از عامل جهت‌گیری در کاهش بار انرژی ساختمان مؤثر هستند (Badeche & Bouchahm, 2020). همچنین مطالعات متعددی در مورد پنجره‌های هواگذر صورت گرفته و نتایج حاکی از آن است که این پنجره‌ها به میزان قابل توجهی بار گرمایش و سرمایش ساختمان را کاهش می‌دهند (Appelfeld et al., 2011; Carlos & Corvacho, 2015; Carlos, 2017). به‌عبارتی ابداع پنجره‌ی هواگذر در قالب عنصری هوشمند در زمستان وظیفه تأمین هوای پیش گرم شده را با استفاده از انرژی خورشیدی بر عهده دارد. این پنجره امکان جریان هوا بین دو شیشه را برای گرم شدن و ورود به ساختمان تأمین کرده، انتقال حرارت از سطح شیشه را کاهش داده و در نهایت به‌عنوان یک دستگاه بازیافت حرارت، منجر به کاهش ضریب انتقال حرارت پنجره می‌شود. بررسی میزان اثربخشی این پنجره در کاهش مصرف انرژی، نشان دهنده‌ی توانایی بالاتر این نوع پنجره در کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها و آپارتمان‌های کوچک‌تر است، به‌طوری‌که با بهره‌گیری از آن، تا ۴۰٪ صرفه‌جویی نهایی در مصرف انرژی نسبت به پنجره‌های دو جداره‌ی مرسوم حاصل خواهد شد.

همان‌طور که در تصویر ۸، الف مشخص است پنجره‌ی تهویه شونده از یک پنل دو جداره به سمت فضای بیرونی و تک جداره به سمت فضای داخلی تشکیل شده و فضای تهویه شونده بین این دو قرار دارد. پالت‌های تغییر فاز دهنده موازی، مبدل



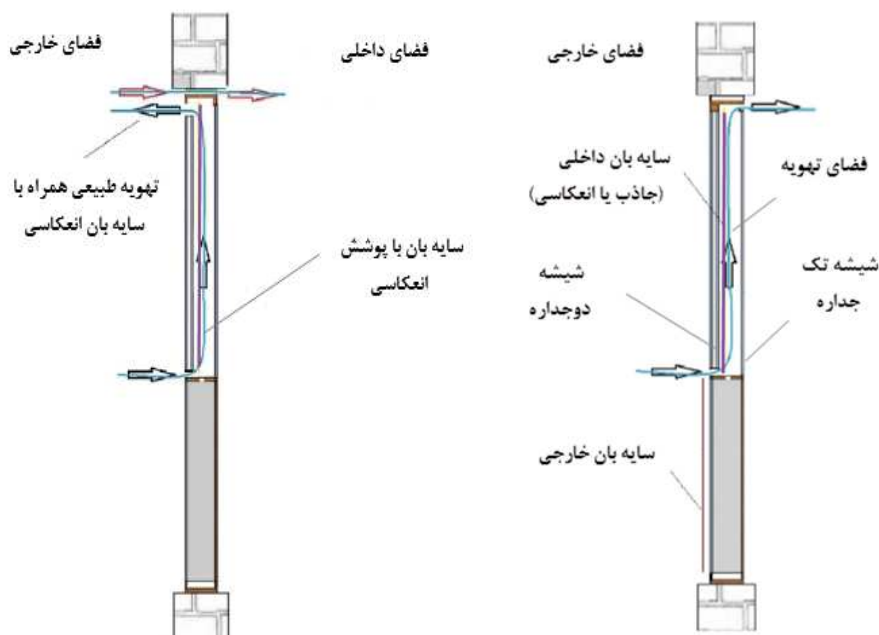
حرارتی تغییر فاز دهنده را می‌سازد. ورودی جریان هوا بخش پایین این پالت قرار گرفته و خروجی هوا با فضای تهویه شونده مرتبط است. این بخش خروجی می‌تواند با فضای داخل ساختمان و یا فضای خارج ساختمان در ارتباط باشد. در شیشه‌های میانی از سایه‌بان داخلی (پوشش‌های جاذب و انعکاسی) استفاده می‌شود. بدین صورت که لایه‌ی پوششی جاذب به سمت فضای خارجی برای جذب انرژی خورشیدی زمستان و پوششی‌های انعکاسی به سمت فضای خارجی در فصول گرم سال برای انعکاس تابشی خورشید و کاهش بار سرمایش و گرمایش ساختمان انجام می‌گیرد (تصویر ۸، ب).

با توجه به مزایای پنجره‌های هواگذر استفاده از عوامل ترکیبی مانند استفاده از شیشه‌های هوشمند، پوشش‌های کم‌گسیل، مواد تغییر فاز دهنده یا سیستم‌های سایه‌بان جاذب و انعکاسی برای ایجاد سیستم فعال، می‌تواند عملکرد این پنجره‌ها را در راستای تأمین آسایش حرارتی کاربران و کاهش مصرف انرژی، ارتقا بخشد. اسکاف و گاسلین^{۳۳} (۲۰۱۴) عملکرد تابستانه پنجره‌های تهویه شونده با شیشه‌های جاذب و هوشمند الکتروکرومیک را بررسی کردند. پژوهشگران نشان دادند که با انتخاب لایه‌های پوششی کم‌گسیل، حرارت جذب شده توسط پنجره‌های تهویه شونده نسبت به پنجره‌های معمولی تا ۵۵ درصد کاهش می‌یابد. رویکرد جلوگیری از ورود بار ناشی از تابش‌های خورشیدی منجر به ارائه‌ی ایده‌های مختلفی در زمینه‌ی طراحی پنجره‌های هوا گذر شده است، که در این میان می‌توان به ایده استفاده از شیشه‌های هوشمند الکتروکرومیک، ترموکرومیک، بازتابنده و لایه‌های پوششی کم‌گسیل اشاره نمود. لازم به توضیح است که شیشه‌های الکتروکرومیک و ترموکرومیک، شیشه‌هایی هستند که تغییر رنگ داده و تیره می‌شوند. بر این اساس، با افزایش دما و یا القای جریان، این شیشه‌ها از حالت شفاف به حالت تیره تغییر وضعیت داده و با جلوگیری از ورود تابش خورشید به ساختمان مانع از افزایش دمای سیستم می‌شوند. در عوض، در فصول سرد سال این شیشه‌ها حالت شفاف خود را حفظ کرده که باعث جذب حداکثری تابش خورشید می‌شود. محمدی و حیدری (۱۳۹۴) مطالعه‌ای را مورد پنجره‌های هوا گذر و اثربخشی آن به همراه لایه‌های پوششی کم‌گسیل در فصل زمستان انجام دادند. در این مطالعه تعدادی از عوامل شامل عمق فضای تهویه شونده، دبی جریان هوای عبوری از پنجره، ضخامت شیشه‌ها و هندسه‌ی پنجره (پنجره‌هایی به عرض ۱ متر و ارتفاع ۱/۵ متر) ثابت فرض شدند. تنها خصوصیت شیشه‌ها، محل کاربرد لایه‌ی پوششی کم‌گسیل در شیشه‌های میانی و داخلی پنجره و تأثیر آن در عملکرد مورد واکاوی قرا گرفت. نتایج مطالعه نشان داد که بار مصرفی نهایی که با توجه به سه عامل (میزان توانایی پنجره در پیش گرمایش اولیه‌ی هوا، قابلیت پنجره در عبور و انتقال حرارت خورشیدی به فضای داخل، قابلیت پنجره در نگهداشت انرژی و جلوگیری از انتقال آن به محیط خارج) محاسبه می‌شد، در پنجره‌هایی که از بیشترین میزان پوشش کم‌گسیل در شیشه‌های میانی یا داخلی استفاده نموده‌اند، کمترین میزان و یا به عبارتی با بهترین عملکرد حاصل شدند و برعکس در پنجره‌های هوا گذر مطالعاتی که از هیچ نوع لایه پوششی کم‌گسیل استفاده نشده بود، از بیشترین بار حرارتی و یا ضعیف‌ترین عملکرد برخوردار بودند. بنابراین، هر چند استفاده از شیشه کم‌گسیل، تفاوت بسیاری را در کاهش مصرف کل انرژی ایجاد می‌کند، اضافه کردن پوشش دوم، تأثیر چشم‌گیری در ارتقای عملکرد حرارتی پنجره ندارد. آنچه مهم است محل قرارگیری این پوشش و جهت آن است. نتایج مطالعات محمدی و حیدری نشان داد استفاده از پوشش کم‌گسیل و غیرشفاف در شیشه‌ی میانی که جهت گسیل به سمت داخل ساختمان باشد، در فصول سرد سال می‌تواند بسیار از میزان بار حرارتی ساختمان بکاهد. همچنین نتایج بررسی نشان داد میانگین دمای ورود به فضای داخل ساختمان در پنجره‌هایی که از لایه پوشش کم‌گسیل استفاده نموده بودند، بسیار به دمای مطلوب داخلی ساختمان نزدیک بود. نکته قابل توجه؛ قابلیت بیشتر پنجره‌های هوا گذر با دو لایه پوششی غیرشفاف در شیشه میانی و داخلی برای گرمایش هوای عبوری در ساعات اوج تابش (۱۰ صبح تا ۴ عصر) علی‌رغم توانایی کمتر در شب است. همچنین نتایج نشان‌دهنده توانایی بالای این نوع پنجره در راستای افزایش بهره‌وری سطوح شیشه‌ای (کاهش انتقال حرارت و افزایش آسایش حرارتی) و کاهش مصرف انرژی در بخش تهویه است، به طوری که با بهره‌گیری از پنجره دمنده‌ی هوا، ۴۶٪ صرفه‌جویی نهایی در مصرف انرژی نسبت به پنجره سه جداره و ۵۰٪ کاهش مصرف انرژی نسبت به پنجره دو جداره‌ی معمولی حاصل خواهد شد.

همچنین مطالعه در کپنهاگ دانمارک در مورد ترکیب پنجره‌های تهویه شونده با مواد تغییر فاز دهنده نشان داد که این پنجره‌ها هوای تهویه را به‌طور متوسط ۶٫۵ درجه سانتی‌گراد خنک کرده و بر اساس آزمایش تهویه‌ی شبانه در تابستان می‌تواند ۳٫۱۹ م.جی. انرژی در روز صرفه‌جویی کند. به عبارتی سیستم‌های ترکیبی پنجره‌های هواگذر همراه با مواد تغییر فاز دهنده با استراتژی‌های عملکردی متفاوت در تابستان و زمستان به کاهش مصرف انرژی و ارتقاء آسایش حرارتی کاربران



می‌پردازند (Motte et al., 2019). همچنین هو^{۳۴} و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه شبیه‌سازی به بررسی عوامل مازاد، مانند شیشه‌های کم‌گسیل و سایه‌بان به‌منظور کاهش بار سرمایشی و گرمایشی ساختمان پرداخته‌اند. در فرآیند خنک‌سازی تابستان در شب هنگام، مواد تغییر فاز دهنده طی تهویه شب، دمای خود را کاهش می‌دهند، و در طول روز موجب خنک‌سازی هوا در فضای تهویه می‌شود. در طی فرآیند ذخیره‌ی انرژی خورشیدی در زمستان، مواد تغییر فاز دهنده در طول روز انرژی خورشیدی را ذخیره نموده و موجب پیش‌گرمایش هوا در فضای تهویه به‌خصوص در شب می‌شوند. نتایج مطالعات مقایسه‌ای پنجره‌های هوا گذر با مواد تغییر فاز دهنده ۵۱-۴۶٪ و پنجره‌های هوا گذر بدون مواد تغییر فاز دهنده ۳۸-۲۷٪ تقاضای انرژی خنک‌کنندگی شب‌های تابستان را با توجه به جهت‌گیری پنجره‌ها در مقایسه با پنجره‌های معمولی کاهش می‌دهند. در فرآیند ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی در زمستان، پنجره‌های هوا گذر با مواد تغییر فاز دهنده ۱۰-۲۹٪ و پنجره‌های هوا گذر بدون مواد تغییر فاز دهنده ۲۸-۴۸٪ تقاضای انرژی گرمایش را با توجه به جهت‌گیری پنجره‌ها در مقایسه با پنجره‌های معمولی کاهش می‌دهند. استفاده از پنجره‌های هوا گذر همراه با سایه‌بان‌های عایق نظیر سایه‌بان چوبی به همراه شیشه‌های کم‌گسیل، بار سرمایشی ساختمان را در فصل تابستان، ۶۲٫۶٪ در پنجره‌های جنوبی و ۵۸٫۲٪ در پنجره‌های شمالی ساختمان کاهش می‌دهد (Hu et al., 2020). بنابراین، برای گرم‌تر و سردتر شدن دمای هوای تأمین‌کننده تهویه، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده گزینه‌ی مناسب برای ذخیره‌سازی حرارت اضافی در پنجره‌های تهویه شونده در جهت تشکیل سیستم فعال با عملکرد بهتر کاربرد می‌یابد. چراکه در شب‌های تابستان مواد تغییر فاز دهنده با تهویه شب خنک می‌شود. این باعث تهویه هوا در طول روز می‌شود و بار خنک‌کننده داخل ساختمان کاهش می‌یابد. درحالی‌که در زمستان، مواد تغییر فاز دهنده انرژی خورشیدی را در روز ذخیره می‌کند و به منظور تأمین تقاضای گرمایشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای برخورداری از کارایی بهینه در فصل تابستان، یک پنجره هواگذر در حالت دمنده‌ی هوا را می‌توان به‌راحتی به یک پنجره هواگذر در حالت پرده‌ی هوایی خارجی تبدیل کرد. برای این کار باید مسیر جریان هوا به‌وسیله‌ی بسته شدن دریچه‌ی پنجره‌ی داخلی و باز شدن دریچه‌ی در بالای پنجره‌ی خارجی به بیرون هدایت شود. بدین ترتیب، هوای موجود بین دو شیشه، دائماً توسط تابش خورشیدی، گرم شده، به طرف بالا حرکت می‌کند و در مسیر خروج از پنجره، حرارت دریافتی اضافی را نیز با خود به بیرون فضای واسط منتقل کرده و از انتقال آن از طریق شیشه داخلی به فضای داخل جلوگیری می‌کند. تعبیه سایه‌بان در فضای واسط نیز از دریافت مستقیم حرارت خورشیدی می‌کاهد (تصویر ۸، ب).



تصویر ۸- ترکیب پنجره‌های هوا گذر با مواد تغییر فاز دهنده (الف) و سایه‌بان داخلی جاذب یا انعکاسی (ب)

۶- نتیجه‌گیری

به‌رغم تمهیدات در زمینه‌ی کاهش سطوح پنجره، استفاده از پوشش‌های کم‌گسیل، پنجره‌های دو جداره، افزایش هوابندی، استفاده از تجهیزات کاهش پل‌های حرارتی، همچنان مصرف انرژی در ساختمان موضوعی چالش برانگیز است. عوامل مؤثر بر طراحی پنجره‌ها از جمله جهت‌گیری، نسبت سطح پنجره به جداره، رسانایی حرارتی شیشه و فریم، ضریب اکتساب حرارت خورشیدی، پنجره‌های دوجداره، شیشه‌های هوشمند، استفاده از لایه‌های پوششی کم‌گسیل، همچنین نوع سایه‌بان اعم از ثابت و متحرک، پنجره‌های تهویه شونده، عمق فضای تهویه و... می‌تواند در کاهش مصرف انرژی و تأمین آسایش حرارتی کاربران مؤثر باشد. از سویی دیگر عوامل محیطی مانند سرعت و جهت جریان باد، فشار هوا، شرایط اقلیمی، شدت و جهت تشعشعات خورشیدی می‌تواند در انتخاب بهینه هریک از عوامل طراحی پنجره مؤثر باشد. در شرایط استاندارد، پنجره و تهویه دو سامانه جدا از هم هستند. برای اینکه پنجره هم امکان ورود هوا را فراهم آورد و هم محدودیت‌هایی جهت ورود هوا با دمای نامطلوب در فضای داخلی ساختمان ایجاد و یا استفاده از سیستم‌های تهویه مصنوع و مصرف انرژی را کمینه‌سازی نماید، استفاده از پنجره‌های هواگذر، پیشنهادی مطلوب تلقی می‌شود. ایده‌ای که به‌صورت همه‌جانبه به چالش‌های انتقال حرارت، تهویه، مصرف انرژی و آسایش حرارتی کاربران می‌پردازد. مطالعه انجام شده ضمن معرفی پنجره‌های تهویه شونده یا هوا گذر، عوامل ترکیبی همچون شیشه‌های هوشمند، استفاده از لایه پوششی کم‌گسیل، سایه‌بان‌های جاذب یا انعکاسی داخلی و مواد تغییر فاز دهنده را به‌منظور ارتقاء عملکرد حرارتی، با مروری جامع بر مطالعات پیشین مورد واکاوی قرار داد. نتایج حاصل از مطالعه حاکی از آن است که استفاده از پنجره‌های هواگذر در ترکیب با مواد تغییر فاز دهنده و سایه‌بان‌های داخلی جاذب یا انعکاسی که قابلیت تغییر وضعیت در فصول سرد و گرم سال را دارند، با ایجاد عملکردی پویا در فصول گرم و سرد سال می‌تواند تأثیر قابل توجهی در کاهش بار گرمایشی و سرمایشی ساختمان داشته باشد و مصرف انرژی در ساختمان را کاهش دهد. همچنین جهت‌گیری پنجره‌ها به‌منظور افزایش دریافت تشعشعات خورشیدی بیشتر در فصول زمستان و کاهش تشعشعات خورشیدی در فصول تابستان، استفاده از سایه‌بان‌های متحرک خارجی از عواملی هستند که بار انرژی سرمایشی و گرمایشی در ساختمان را کاهش می‌دهد. نظر به اینکه چنین پنجره‌هایی می‌توانند تحت تأثیر عوامل متعدد همچون سرعت و شدت جریان باد در فضای آزاد، شرایط اقلیمی و محیطی مختلف، تعداد طبقات ساختمان، فاصله بلوک‌های ساختمانی از هم و... قرار گیرد، طراحی مدل‌های شبیه‌سازی در شرایط پویای آب‌وهوایی در فصول مختلف سال، ارزیابی اقتصادی و پایش طولانی مدت داده‌های حاصله می‌تواند بستری را برای تصمیم‌گیری، طراحی و اجرای سیستم‌های بهینه با جزئیات کامل در کاهش بار سرمایش و گرمایش، میزان مصرف انرژی و تأمین آسایش حرارتی کاربران فراهم آورد.

پی نوشت

- 1- European Environment Agency (EEA)
- 2- Demirbilek
- 3- Ghisi and Tinker
- 4- Li
- 5- Zemmouri & Schiler
- 6- Sabouri & Mohd Zain
- 7- Window to- wall ratio (WWR)
- 8- Yang
- 9- Goia
- 10- U value
- 11- SHGC
- 12- Alawadhi
- 13- Window Shutter
- 14- PCM
- 15- Air supply
- 16- Air exhaust
- 17- Outdoor air curtain
- 18- Indoor air curtain
- 19- Low-Emissivity
- 20- SHGC
- 21- Electro-chromic (EC)

- 22 - Gasochromic (GC)
- 23 - Thermo-chromic (TC)
- 24 - Photo-chromic (PC)
- 25 - Low-E
- 26 - UV
- 27 - IR
- 28 - Phase Change Material (PCM)
- 29 - Latent heat thermal energy storage
- 30 - PCM enhanced ventilated window (PCMVW)
- 31 - Ventilated window without PCM (VW, no PCM)
- 32 - Normal window without both ventilated window and PCM (no VW, no PCM)
- 33 - Skaff & Gosselin
- 34 - Hu

منابع

- دفتیق، روناک، مشتاق، جلیل. (۱۳۸۲). انتخاب بهینه سیستم‌های شیشه و پنجره به منظور صرفه‌جویی در مصرف انرژی، سومین همایش بهینه‌سازی مصرف سوخت در ساختمان، ۹۶۳-۹۵۵.
- فیاض، ریما. (۱۳۹۲). سطح بهینه پنجره ساختمان‌های مسکونی در اردبیل و تهران، دوفصلنامه دانشگاه هنر تهران، سال پنجم، شماره ۱۰، ۱۰۵-۱۲۰.
- محمدی، مریم. حیدری، شاهین. (۱۳۹۴). پنجره هوا جریان، عصر کارآمد در کاهش مصرف انرژی ساختمان در شهر تهران، هنرهای زیبا، دوره ۲۰، شماره ۲، ۲۲-۱۳.
- میرهاشمی، سیدمهدی. شاپوریان، سید محمدهادی. قیابکلو، زهرا. (۱۳۸۹). روشی نوین در بهینه‌سازی پنجره‌های تک جداره، هنرهای زیبا، شماره ۴۳، ۴۸-۴۳.
- وهابی، ویدا. مهدوی‌نیا، مجتبی. (۱۳۹۵). تأثیر ویژگی‌های کالبدی پوشش‌های محافظ پنجره بر عملکرد حرارتی ساختمان‌های مسکونی شهر تهران، معماری و شهرسازی ایران، دوره ۹، شماره ۱۵، ۹۰-۷۵.

- Ahn, B.L. et al. (2016). Window retrofit strategy for energy saving in existing residences with different thermal characteristics and window sizes, *Build. Serv. Eng. Res. Technol*, 37, 18-32.
- Alawadhi, E.M. (2012). Using phase change materials in window shutter to reduce the solar heat gain, *Energy and Building*, 47, 421-429.
- Ansuini, R., Largetti, R., Giretti, A. & Lemma, M. (2011). Radiant floors integrated with PCM for indoor temperature control, *Energy Build*, 43, 3019-3026.
- Appelfeld, D., Hansen, C.S. & Svendsen, S. (2010). Development of a slim window frame made of glass fibre reinforced polyester, *Energy Build*, 42(10), 1918-1925.
- Appelfeld, D. & Svendsen, S. (2011). Experimental analysis of energy performance of a ventilated window for heat recovery under controlled conditions, *Energy Build*. 43, 3200-3207.
- Ariosto, T. & Memari, A.M. (2013). Comparative study of energy efficiency of glazing systems for residential and commercial buildings. Architectural Engineering Conference. Pennsylvania, United States (April 3-5), 409-418.
- Ateeque, A.B. et al. (2017). Impact of solar radiation on building envelope using energy plus software. *Proc SIMEC*, 1(10):24-25.
- Badeche, M. & Bouchahm, Y. (2020). Design optimization criteria for windows providing low energy demand in office buildings in Algeria, *Environmental and Sustainability Indicators*, 6, 100024.
- Bayoumi, M. (2021). Improving indoor air quality in classrooms via wind-induced natural ventilation. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2021. (available on: <https://doi.org/10.1155/2021/6668031>)
- Bektas, E.B. & Teoman, A.U. (2008). Investigation of the Effects of Orientation and Window Usage on External Walls in Terms of Heating and Cooling Energy, *Turkish J. Eng. Env. Sci*, 32, 23-33.
- Britannica, E. (2007). Electronic resource (Available on: <http://global.britannica.com/EBchecked/topic/289766/human-intelligence>) date access: 12.04. 2014.
- Cao, X. D., Dai, X. L., Liu, J. J. (2016). Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. *Energy And Buildings*, 128, 198-213. (available on: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.089>.)
- Carlos, J.S. & Corvacho, H. (2015). Evaluation of the performance indices of a ventilated double window through experimental and analytical procedures: SHGC values. *Energy Build*, 86: 886-897. (available on: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.002>.)



- Carlos, J.S. (2017). Optimizing the ventilated double window for solar collection. *Sol. Energy*, 150: 454-462. (available on: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.04.063>.)
- Carlos, J.S., Corvacho, H., Silva, P.D., Castro-Gomes, J.P. (2010). Real climate experimental study of two double window systems with preheating of ventilation air. *Energy Build.* 42, 928-934. (available on: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.01.003>.)
- Chen, L. (2012). Energy Saving Applicability Research of Low-E Glass Windows in Residential Buildings in the Subtropical Region. (Master's Thesis). Guangdong University of Technology, Guangzhou.
- Cheng, R. et al. (2013). A new method to determine thermo-physical properties of PCM-concrete brick. *Appl. Energy*, 112, 988-998.
- Chiesa, G. et al. (2019). Parametric optimization of window-to-wall ratio for passive buildings adopting a scripting methodology to dynamic-energy simulation. *Sustainability*, 11, 3078.
- Chow, T.t. et al. (2009). Thermal performance of natural airflow window in subtropical and temperate climate zones—A comparative study. *Energy Conversion and Management*, 50(8), 1884-1890
- Cuce, E. & Cuce, P.M. (2016). Vacuum glazing for highly insulating windows: Recent developments and future prospects. *Renew. Sustain. Energy Rev*, 54, 1345–1357.
- Cuce, E., Young, C.H., Ri_at, S.B. (2015). Thermal performance investigation of heat insulation solar glass: A comparative experimental study. *Energy Build*, 86, 595–600.
- De Gracia, A. et al. (2013). Numerical study on the thermal performance of a ventilated facade with PCM. *Appl. Therm. Eng*, 61, 372-380.
- Demirbilek, F.N. et al. (2003). Analysis of the thermal performance of a building design located at 2465 m: Antalya-Saklikent National Observatory guesthouse. *Building and Environment*, 38(1), 177-184.
- European Union. (2010). Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings (recast). *Official Journal of the European Union*, 95(1).
- Gardiner, D.J., Morris, S.M., Coles, H.J. (2009). High-efficiency multistable switchable glazing using smectic A liquid crystals. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 93, 301–306.
- Gautam, K. R., Rong, L., Zhang, G. Q., Abkar, M. (2019). Comparison of analysis methods for wind-driven cross ventilation through large openings. *Building and Environment*, 154, 375–388. (available on: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.009>)
- Ghisi, E. & Tinker, J. A. (2005). "An Ideal Window Area concept for energy efficient integration of daylight and artificial light in buildings. *Building and Environment*, 40(1), 51-61.
- Haglund, K.L. (2010). Decision-making methodology & selection tools for high-performance window systems in U.S. climates. In *Proceedings of the 2nd Building Enclosure Science & Technology Conference*. Portland, OR, USA (12–14 April), 1–13.
- He, Q., Ng, S. T., Hossain, M., Skitmore, M. (2019). Energy-efficient window retrofit for high-rise residential buildings in different climatic zones of China. *Sustainability*, 11(22), 6473.
- Hu, Y., Guo, R. Heiselberg, P.K. (2020). Performance and control strategy development of a PCM enhanced ventilated window system by a combined experimental and numerical study. *Renewable Energy*, 155, 134-152.
- Hu, Y. & Heiselberg, P. (2018). A new ventilated window with PCM heat exchanger performance analysis and design optimization. *Energy Build*, 169, 185-194.
- Huang, J. et al. (2014). Thermal properties optimization of envelope in energy-saving renovation of existing public buildings. *Energy Build*, 75, 504–510.
- Huang, Y., Niu, J.L. (2016). Optimal building envelope design based on simulated performance: History, current status and new potentials. *Energy Build*, 117, 387–398.
- Ihm, P., Park, L., Krarti, M., Seo, D. (2012). Impact of window selection on the energy performance of residential buildings in South Korea. *Energy Policy*, 44, 1–9.
- Ismail, K.A.R., Salinas, C.T. Henriquez, J.R. (2008). Comparison between PCM filled glass windows and absorbing gas filled windows. *Energy Build*. 40, 710-719.
- Jalil, S. & Roza, V. (2019). Evaluation the effect of smart glasses on solar heat gain and cooling loads in office building in hot and humid climate of Bushehr. *Mech Eng Trans ISME*, 20(4), 97–117.
- Jelle, B.P. (2013). Solar radiation glazing factors for window panes, glass structures and electrochromic windows in buildings - Measurement and calculation. *Solar Energy Mater Solar Cells*. 116, 291–323.
- Ji, L. et al. (2011). Wind tunnel investigation on influence of fluctuating wind direction on cross natural ventilation. *Build. Environ*, 46, 2490–2499.

- Jin, X. & Zhang, X. (2011). Thermal analysis of a double layer phase change material floor. *Appl. Therm. Eng.* 31, 1576-1581. (available on: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.01.023>.)
- Johra, H. Heiselberg, P. Le Dr_eau, J. (2019). Influence of envelope, structural thermal mass and indoor content on the building heating energy flexibility. *Energy Build.* 183: 325-339. (available on: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.012>.)
- Johra, H. & Heiselberg, P. (2017). Influence of internal thermal mass on the indoor thermal dynamics and integration of phase change materials in furniture for building energy storage: a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 69:19-32. (Available on: <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.11.145>.)
- Kim, J., Son, D. & Jeong, B. (2017). Two-stage integer programming model for building retrofit planning for energy saving in South Korea. *Sustainability*, 9, 2087.
- Kontoleon, K. J. (2002). Dynamic thermal circuit modelling with distribution of internal solar radiation on varying façade orientations. *Energy and Buildings*, 47,139-150.
- Lai, C.M. & Wang, Y.H. (2011). Energy-saving potential of building envelope designs in residential houses in Taiwan. *Energies*. 4, 2061–2076.
- Li, X. T. Shen, C. Yu, C. W. F. (2017). Building energy efficiency: Passive technology or active technology?. *Indoor and Built Environment*, 26(6), 729–732. (available on: <https://doi.org/10.1177/1420326x17719157>)
- Li, M. & Wub, Z. (2012). A review of intercalation composite phase change material: Preparation, structure and properties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2094-2101.
- Li, D.H.W., Lam, J., Wong, S. (2005). Daylighting and its effects on peak load determination. *Energy*, 30, 1817-1831.
- Liu, M. et al. (2017). Investigation of different configurations of a ventilated window to optimize both energy efficiency and thermal comfort. *Energy Procedia*, 132, 478-483. (Available on : <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.660>.)
- Liu, H. (2012). The Development of Novel Window Systems towards Low Carbon Buildings. (Ph.D. Thesis). The University of Nottingham, Nottingham, UK.
- Lyons, P. R., Arasteh, D. & Huizenga, C. (2000). Window performance for human thermal comfort. Transactions-American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Presented at the 2000 ASHRAE Winter Meeting, Dallas, TX, February,106(1), 594-604
- Mangan, S.D. & Oral, G.K. (2016). Assessment of residential building performances for the different climate zones of Turkey in terms of life cycle energy and cost efficiency. *Energy Build*, 110, 362–376.
- Moey, L. K. et al. (2021). Investigation on the effect of opening position across an isolated building for wind-driven cross ventilation. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 15(2), 8141–8152.
- Motte, F. et al. (2019). Numerical study of PCM integration impact on overall performances of a highly building integrated solar collector. *Renew. Energy*, 137, 10-19.
- Muruganatham, K. (2010). Application of Phase Change Material in Buildings: Field Data vs. Energy Plus Simulation, (Master Thesis Approved by the Graduate Supervisory Committee: Phelan P, Lee T, Reddy A). Arizona State University.
- Ochoa, M.C.E., Aries, M.B.C., Loenen, E.J.V. & Hensen, J.L.M. (2012). Considerations on design optimization criteria for windows providing low energy consumption and high visual comfort. *Applied energy*, 95, 238-245.
- Pomianowski, M. et al. (2014). A new experimental method to determine specific heat capacity of inhomogeneous concrete material with incorporated microencapsulated-PCM. *Cement Concr. Res.* 55: 22-34.(available on: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.09.012>.)
- Pomianowski, M., Heiselberg, P. & Zhang, Y. (2013). Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings. *Energy Build*, 67, 56-69.
- Raffnsøe, L. M. (2007). Thermal Performance of Air Flow Windows,)Master Thesis(Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Denmark.
- Sadrzadehrafiei, S., Sopian, K.S.M. & Lim, C. (2011). Application of advanced glazing to midrise office buildings in Malaysia. In *Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Environment, Ecosystems and Development (EED'11)*. Montreal, QC, Canada, 197–201.
- Shaeri, J., Habibi, A., Yaghoubi, M. & Chokhachian, A. (2019). The optimum window-to-wall ratio in once buildings for hot-humid, hot-dry, and cold climates in Iran. *Environments*, 6, 45.
- Shetabivash, H. (2015). Investigation of opening position and shape on the natural cross



ventilation. *Energy Build*, 93, 1–15.

- Skaff, M. C., Gosselin, L. (2014). Summer performance of ventilated windows with absorbing or smart glazings. *Solar Energy*, 105, 2-13.
- Soares, N., Costa, J.J., Gaspar, A.R., Santos, P. (2013). Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. *Energy and buildings*, 59, 82-103.
- Synnefa, A. et al. (2017). Transformation through renovation: An energy efficient retrofit of an apartment building in Athens. *Procedia Eng*, 180,1003–1014.
- Tian, Z. et al. (2018). Towards adoption of building energy simulation and optimization for passive building design: A survey and a review. *Energy Build*, 158, 1306–1316.
- Troup, L., Phillips, R., Eckelman, M.J., Fannon, D. (2019). Effect of window-to-wall ratio on measured energy consumption in US office buildings. *Energy Build*, 203, 109434.
- Vanaga, R. et al. (2018). Solar facade module for nearly zero energy building. *Energy*, 157, 1025-34.
- Wei, J., Zhao, J., Chen, Q. (2010). Optimal design for a dual-airflow window for different climate regions in China. *Energy Build*. 42, 2200-2205. (available on: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.07.016>.)
- Weinlaeder, H., Koerner, W., Heidenfelder, M. (2011). Monitoring results of an interior sun protection system with integrated latent heat storage. *Energy Build*, 43,2468-2475. (available on: <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2011.06.007>.)
- Yang, H. et al. (2017). Tailored domestic retrofit decision making towards integrated performance targets in Tianjin, China. *Energy Build*, 140, 480–500.
- Yu, J. et al. (2020). Thermal performance evaluation and optimal design of building roof with outer-layer shape-stabilized PCM. *Renew Energy*, 145, 2538-2549. (available on: <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.08.026>.)
- Zemmouri, N. & Schiler, M.E. (2005). Modelling energy efficient windows in hot arid zones. *PLEA, The 22nd Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Beirut, Lebanon, (13-16 November) .