DOI: 10.22034/ats.2026.2090253.1031

فصلنامه
پژوهش‌های معماری نوین
دوره ۵، شماره ٤، شماره پیاپی ۱۸
زمستان ١٤٠٤
صفحات ۳۳-۱۹

Architectural Technologies
Studies Journal
Vol. 5, Issue. 4, No. 18
Winter 2026
Pages 19-33

مقاله پژوهشی

نقش مواد تغییر فاز دهنده در بهینه‌سازی بازشوهای دو و سه جداره نمونه موردی: فضای نشیمن یک ساختمان مسکونی در تبریز

ماهرخ قلی‌زاده[۱]، محمدمهدی مولایی[۲*]

۱-دانشجو کارشناسی ارشد، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.
mahrokhgh97@gmail.com
۲- استادیار، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. (نویسنده مسئول)
m.moulaii@basu.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱٤۰٤/۱۰/۱۰] تاریخ پذیرش: [۱٤۰٤/۱۱/۳۰]

چکیده

در حوزه ساختمان، تلاش برای به حداقل رساندن تقاضای انرژی و بهبود مدیریت مصرف، موجب شده است که در سال‌های اخیر فناوری‌های نوین کاهش انرژی، به‌ویژه در بخش بازشوها، مورد توجه فراوان قرار گیرند. در این پژوهش یک پنجره در فضای نشیمن یک ساختمان مسکونی در نظر گرفته شده و عملکرد چندین تیپ از شیشه‌های دوجداره و سه‌جداره با گازهای میان‌جداره مختلف، از نظر مدیریت انرژی حرارتی داخلی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مواد تغییر فاز دهنده مبتنی بر پلیمر (PCM) که در سال‌های اخیر به دلیل پایداری بالا و قابلیت انتقال فاز جامد به جامد برای کاربردهای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی (TES) اهمیت یافته‌اند، در این مطالعه مدنظر قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، یک فضای نشیمن در اقلیم سرد تبریز شبیه‌سازی شده و با استفاده از یکی از پلاگین‌های انرژی، تحلیل‌های حرارتی برای تعیین بهترین حالت شیشه‌ها از نظر نوع و تعداد جداره‌ها و تأثیر آن‌ها بر میزان مصرف انرژی در شرایط اقلیمی سرد انجام شده است. در این مدل‌سازی، نسبت سطح شیشه به دیوار (WWR) برابر با ۰/٦ در نظر گرفته شده و نوع مصالح انتخابی برای سقف، دیوار و کف فضا نیز به‌صورت یکسان تعریف شده‌اند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که افزایش تعداد جداره‌ها در پنجره‌ها لزوماً منجر به افزایش مقاومت حرارتی نمی‌شود و در برخی موارد، شیشه‌هایی با تعداد لایه کمتر اما دارای لعاب کارآمدتر، می‌توانند صرفه‌جویی انرژی بیشتری ایجاد کنند.

واژگان کلیدی: بازشوها، بهینه‌سازی، مواد تغییر فاز دهنده، شیشه چندجداره.

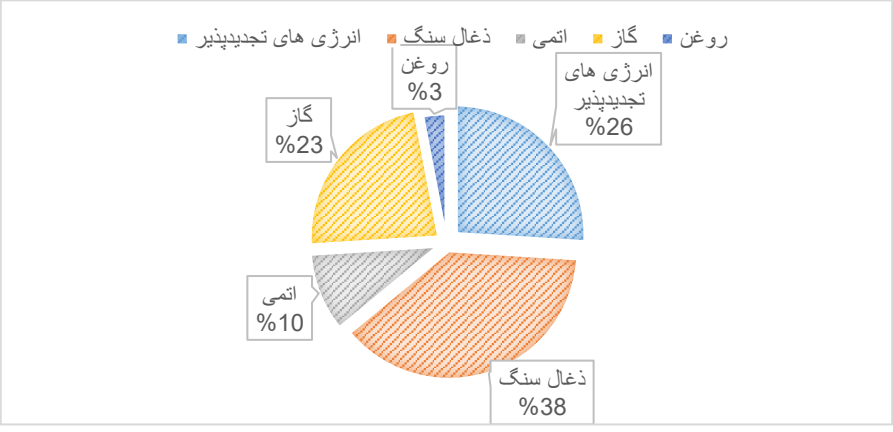
۱-مقدمه

رسیدن به اهداف کلانی همچون توسعه ساختمان‌های کم‌کربن و ارتقای بهره‌وری انرژی در بخش ساختمان، مستلزم کاهش چشمگیر تقاضای انرژی به‌ویژه در سامانه‌های گرمایش و سرمایش است؛ چراکه این سامانه‌ها سهم قابل‌توجهی در انتشار دی‌اکسیدکربن ناشی از عملکرد سیستم‌های تهویه مطبوع (HVAC) دارند (Bellia et al., 2020). در این راستا، توسعه فناوری‌های نوآورانه در پوسته حرارتی ساختمان، به‌ویژه در اجزای شفاف، توجه روزافزون محققان را به خود جلب کرده است. این اجزا به تنهایی قادرند تا حدود ۶۰ درصد از پاسخ‌دهی ساختمان به مؤلفه اتلاف حرارت را تحت تأثیر قرار دهند و به همین دلیل نقش تعیین‌کننده‌ای در مدیریت انرژی ساختمان ایفا می‌کنند (Yuekuan Zhou, 2022).

هم‌زمان با تلاش جهانی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تمرکز پژوهش‌ها به‌سوی فناوری‌هایی معطوف شده است که توان بالقوه در کاهش این آلاینده‌ها دارند (Berardi et al., 2020). از آنجا که ساختمان‌ها و بخش ساخت‌وساز از طریق مصرف انرژی یکی از عوامل اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای محسوب می‌شوند، کاهش تقاضای انرژی آن‌ها موضوعی بنیادین در راستای کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و به‌تبع آن کاهش انتشار CO_2 است (Yuxin Ma, 2022). این ضرورت موجب شده است که توسعه فناوری‌های نوین مرتبط با بهبود عملکرد حرارتی و افزایش بازده انرژی در ساختمان‌ها به‌عنوان یکی از محورهای اصلی پژوهش‌های اخیر مطرح گردد.

بهبود کارایی عایق‌کاری یکی از راهکارهای مؤثر و نویدبخش برای ارتقای مقاومت حرارتی اجزای شفاف ساختمان است. در این راستا، مجموعه‌ای از فناوری‌های پیشرفته مطرح شده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به: تزریق گازهای بی‌اثر در لایه میانی شیشه‌های دوجداره، توسعه شیشه‌های هیدروژل، استفاده از سیستم‌های چندلایه لعاب برای بهبود کنترل خورشیدی، بهره‌گیری از پوشش‌های کم‌گسیل (Low-E) و پوشش‌های بازتابنده و نیز پیاده‌سازی سامانه‌های شیشه‌ای هوشمند شامل فناوری‌های الکتروکرومیک، فتوکرومیک و ترموکرومیک اشاره کرد (Wang S., 2021). این فناوری‌ها با هدف کنترل میزان جذب، عبور و بازتاب انرژی خورشیدی، نقش اساسی در کاهش بار حرارتی ساختمان ایفا می‌کنند.

در کنار فناوری‌های مرتبط با کنترل تابش و بهبود عایق‌کاری، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی (TES) مبتنی بر مواد تغییر فاز (PCM) نیز طی دهه‌های اخیر به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این سامانه‌ها، انرژی حرارتی در طی فرایند انتقال فاز به شکل گرمای نهان ذخیره یا آزاد می‌شود و همین ویژگی، قابلیت این مواد را برای کاربرد در اجزای ساختمانی و عناصر شفاف افزایش داده است (Piyachai Khomein, 2021).



شکل ۱: تولید برق جهانی از همه منابع انرژی در سال ۲۰۱۸ (Duraković, 2020)

۲-مرور مبانی نظری و پیشینه

۲-۱-مبانی نظری

پژوهش‌های بسیار زیادی در راستای بهبود عملکرد پنجره‌ها و همچنین استفاده از مواد تغییرفازدهنده در آن‌ها انجام شده است. هدف اصلی استفاده از این مواد یا طرح‌های نوآورانه، افزایش عملکرد حرارتی پنجره‌ها با کاهش یا به تأخیر انداختن انتقال حرارت از طریق آن‌ها است (Betulbektas, 2007). به‌کارگیری این فناوری‌ها با تنظیم جریان انرژی بین محیط داخلی و خارجی و کنترل تابش خورشیدی ورودی به ساختمان از طریق پنجره‌ها، منجر به کاهش مصرف انرژی می‌شود. بررسی‌های گسترده‌ای وجود دارد که طرح‌های پوشش با بهره‌وری انرژی بالا را برای ساختمان‌های کم‌مصرف ارائه می‌دهند (Forughian et al., 2017). در پژوهشی که تحت عنوان صرفه‌جویی در مصرف انرژی به جهت استفاده از مواد تغییرفازدهنده در ساختمان‌ها در منطقه آب و هوایی گرم و سرد انجام شده است مشخص شد که اگر این مواد به درستی انتخاب نشود، می‌تواند تقاضای انرژی ساختمان را افزایش دهد. ضخامت این مواد اثرات مثبت یا منفی بر مصرف انرژی ساختمان را تشدید می‌کند، یعنی اگر این مواد تبادل گرما را کاهش دهد (اثر مثبت)، با افزایش ضخامت آن، این اثر تشدید می‌شود. در پژوهش‌های مورد بررسی درباره انواع شیشه‌ها تحت عنوان شیشه‌های کم گسیل (low-e) که در بازشوها استفاده شده نشان می‌دهد که پوشش‌های خنک‌کننده تابشی اثرات صرفه‌جویی در انرژی قابل‌توجهی را برای اکثر مکان‌ها، ازجمله مکان‌هایی که تقاضای گرمایش بیشتری نسبت به تقاضای سرمایش دارند، فراهم می‌کنند (Kokogiannakis, et al. 2014). برای ساختمان‌هایی با عایق‌بندی ضعیف، پوشش‌های کم‌گسیل در بیش از ۷٤٪ از مکان‌های مورد مطالعه، صرفه‌جویی قابل توجهی در انرژی سالانه ایجاد می‌کنند. در این میان نسبت سطح بازشو پنجره بر دیوار در جهت‌های مختلف ساختمانی نیز دارای اهمیت بسیار زیادی است آن‌چنان که در پژوهشی تحت عنوان بهینه‌سازی نسبت پنجره به دیوار برای افزایش بهره‌وری انرژی ساختمان که در آب‌وهوای گرم مدیترانه‌ای انجام شده است مقادیری را برای بازشوهای جهت‌های مختلف در این اقلیم پیشنهاد می‌دهد این محدوده‌های صرفه‌جویی در انرژی، هوشمندی ساختمان را از نظر مصرف انرژی بهبود می‌بخشند (Milbrandt, 2014). علاوه بر این، میزان بازشوندگی پنجره نسبت به جداره توصیه شده برای دیوارهای جنوبی و شرقی ٦٥٪ و برای دیوارهای شمالی و غربی ۹۵٪ و ۳۰٪ است. همچنین در پژوهشی انجام شده، به بررسی ادغام سیلیکا ایروژل و مواد تغییرفازدهنده در بازشوهای شفاف در اقلیم سرد چین پرداخته است و نتایج نشان می‌دهد که خواص ماده تغییر فاز دهنده مانند دمای ذوب، گرمای نهان، ضریب جذب و ضریب شکست، ارتباط قابل توجهی با عملکرد انرژی ساختمان‌ها در شرایط تغییرات ۱۰ درصدی خواص دارند. در مقایسه با پنجره تک جداره ٤ میلی‌متری نصب شده، حداکثر صرفه‌جویی در مصرف انرژی ساختمان حاوی پنجره نوآورانه می‌تواند تا ۱۸/۲۲ درصد در محدوده واقع‌بینانه خواص ماده تغییر فاز دهنده محقق شود (Van Den Bossche, et al. 2015).

۲-۲-شیشه

شیشه ترموکرومیک پتانسیل زیادی برای کاهش تقاضای انرژی و ایجاد آسایش داخلی در ساختمان‌ها دارد. نقاط تغییر دمای اتمیزاسیون مناسب تأثیر زیادی بر کاربرد شیشه ترموکرومیک دارد. در مقایسه با شیشه Low-E می‌تواند دمای اتاق نور خورشید را تا ۵ درجه سانتی‌گراد در تابستان کاهش دهد و در زمستان اثر عایق حرارتی خاصی را نشان دهد. پنجره‌های ترموکرومیک نوع جدیدی از فنستراسیون هستند که به‌طور خودکار انتقال خورشیدی را توسط یک لایه نازک مخصوص که بین دو صفحه شیشه‌ای لمینت شده تغییر می‌دهد (Rastegari, et al. 2020). این فیلم ویژه می‌تواند تاریک شود و تاریکی آن تحت تأثیر تابش مستقیم خورشیدی است که بر روی شیشه و دمای بینابینی بین شیشه‌ها تأثیر می‌گذارد. صور می‌شود که افزایش تابش خورشیدی یک اتاق را می‌توان به‌طور هوشمند از طریق استفاده از پنجره‌های ترموکرومیک تنظیم کرد و در نتیجه مصرف انرژی کمتری نسبت به پنجره‌های استاندارد دارد. پنجره‌های ترموکرومیک با تنظیم طیف با توجه به دمای محیط، با نیازهای سوئیچینگ در هوای سرد و گرم مطابقت دارند، بنابراین پتانسیل زیادی در صرفه‌جویی در انرژی ارائه می‌دهند (Fathi, et al 2021).

۲-۲-۱-شیشه‌های Low-e (کنترل‌کننده میزان انرژی ورودی)

شیشه‌های کنترل‌کننده انرژی یا low-emissivity که به معنای شیشه‌هایی هستند که انتقال حرارتی کمتری نسبت به شیشه‌های معمولی دارند و مانند یک عایق حرارتی عمل می‌کنند. این نوع از شیشه‌ها اجازه عبور بخش مرئی طیف نور خورشید را می‌دهند اما طیف حرارتی را فیلتر می‌کنند (Gorantla, 2021).

۲-۲-۲-شیشه solexia

یک نوع شیشه رنگی ملایم است که در ضخامت‌های مختلف دارای انواع خصوصیات مانند ضریب افزایش گرمای خورشیدی خوب (SHGC) و نسبت نور عالی به بهره خورشیدی (LSG) است. شیشه سولکسیا و سونگیت ۵۰۰ Low-E (واحد I.G، 6 میلی‌متر) ترکیب سولکسیا با شیشه‌های low-e Sungate 500 عملکرد عالی را با هزینه‌ای بسیار رقابتی ارائه می‌دهد (Gohari, 2019).

۲-۳-بررسی استفاده از pcm برای بهینه‌ترین نوع بازشو و تحلیل حرارتی در آن

الف) ذخیره‌سازی انرژی حرارتی: انرژی حرارتی را می‌توان به‌صورت گرمای محسوس، گرمای نهان یا انرژی مواد شیمیایی ذخیره کرد. ب) ذخیره‌سازی حرارت محسوس: ذخیره گرمای محسوس بر اساس ظرفیت حرارتی خاص جامدات و مایعات مانند سنگ‌ها، بتن، تخته گچ، ماسه، آب و نمک‌های مذاب است (Ye, 2014). فرآیند ذخیره‌سازی گرما بر اساس تغییر دمای محیط ذخیره‌سازی است. گرمای حساس رایج‌ترین و قدیمی‌ترین روش ذخیره‌سازی انرژی است که در قرن‌های اخیر در ساختمان‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (Tawfeeq, 2024). این جرم به‌عنوان جرم حرارتی ساختمان شناخته می‌شود که اینرسی حرارتی ساختمان‌ها را افزایش می‌دهد که به کاهش تغییرات دما و بهبود آسایش حرارتی کمک می‌کند؛ بنابراین ظرفیت ذخیره‌سازی پوشش ساختمان به متریال مورد استفاده و ترکیب دیوار بستگی دارد. در این حالت، پوشش ساختمان عملکرد ذخیره حرارتی بهتری از عایق خواهد داشت (Tafakkori, 2021). جدول زیر خلاصه‌ای از خواص مصالح ساختمانی رایج برای ذخیره‌سازی حرارت معقول را نشان می‌دهد.

جدول ۱: خواص مصالح ساختمانی رایج برای ذخیره‌سازی حرارت

مصالح	ظرفیت گرمایی حجمی (kJ/m3K)	ظرفیت گرمایی ویژه (kJ/kgK)	هدایت حرارتی (W/mK)	چگالی (kg/m3)
گچ (پوشش)	۱۰۰۰	۱	۰/٤	۱۰۰۰
گچ (گچ تخته)	۹۰۰	۱	۰/۲۵	۹۰۰
ملات سیمان	۱۸۰۰	۱	۱	۱۸۰۰
بتن	۲۰۰۰	۱	۱/۳۵	۲۰۰۰
بتن (چگالی بالا)	۲٤۰۰	۱	۲	۲٤۰۰
بتن مسلح (۲٪)	۲٤۰۰	۱	۲/۵	۲٤۰۰
آب (٤۰ درجه سانتی‌گراد)	۹۹۰	٤/۱۹	۰/٦۳	۹۹۰
چوب	۷۰۰-٤۵۰	۱/٦	۰/۱۸-۰/۱۲	۷۰۰-٤۵۰
سنگ	۲۸۰۰-۱۵۰۰	۱	۳/۵-۰/۸۵	۲۸۰۰-۱۵۰۰

۲-٤-ذخیره گرمای نهان

ذخیره گرمای نهان بر اساس آنتالپی جامدات و مایعات است. این مزیت مبتنی بر یک محدوده بسیار باریک یا ثابت تغییر دما در طول ذخیره / آزادسازی انرژی است. در بیشتر موارد، فرآیند تغییر فاز جامد به مایع به دلیل انبساط کم‌حجمی استفاده می‌شود، جایی که از همجوشی برای ذخیره گرما و انجماد برای آزادسازی گرما استفاده می‌شود (Zeng Kai, 2022). پارافین‌ها، اسیدهای چرب،

هیدرات‌های نمک و مخلوط‌های یوتکتیک، نمایندگان رایج PCM برای کاربردهای ساختمانی هستند. جدول زیر تأمین‌کنندگان پیشرو جهانی PCM برای یک برنامه ساختمانی را نشان می‌دهد. محدوده دمایی PCM های تجاری از ۱۰- تا ۱۲۰+ درجه سانتی‌گراد است. آنتالپی PCM ها از ۱۰۰ تا ٤۳۰ MJ/m3 متغیر است (Bahman Soleiman Dehkordi, 2022).

جدول ۲: تأمین‌کننده پیشرو PCM برای ذخیره گرمای نهان

نوع PCM	فرم PCM	موقعیت	تأمین‌کننده
غیرآلی	فله‌ای	هند	TEAP
غیرآلی؛ ارگانیک. آلی	فله‌ای	آلمان	Rubitherm GmbH
ارگانیک. آلی	فله‌ای	آمریکا	PureTemp
غیرآلی؛ ارگانیک. آلی	فله‌ای	انگلستان	PlusICE
غیرآلی	فله‌ای	ژاپن	مواد شیمیایی میتسوبیشی
ارگانیک. آلی	فله‌ای	آلمان	هانیول
غیرآلی	فله‌ای	فرانسه	کریستوپیا
غیرآلی	فله‌ای	سوئد	Climator
نمک هیدراته می‌شود	فله‌ای	هند	انرژی PCM
ارگانیک، دوغاب	فله میکرو کپسوله شده	آلمان	میکرونال
یوتکتیک صفر، هیدرات نمک و مواد آلی	فله S ماکرو کپسوله شده	انگلستان	PCM Products Ltd
آلی و معدنی	فله ماکرو کپسوله شده	آمریکا	savENRG™
پودرهای ماکرو کپسوله شده	فله	آلمان	BASF—Micronal PCM

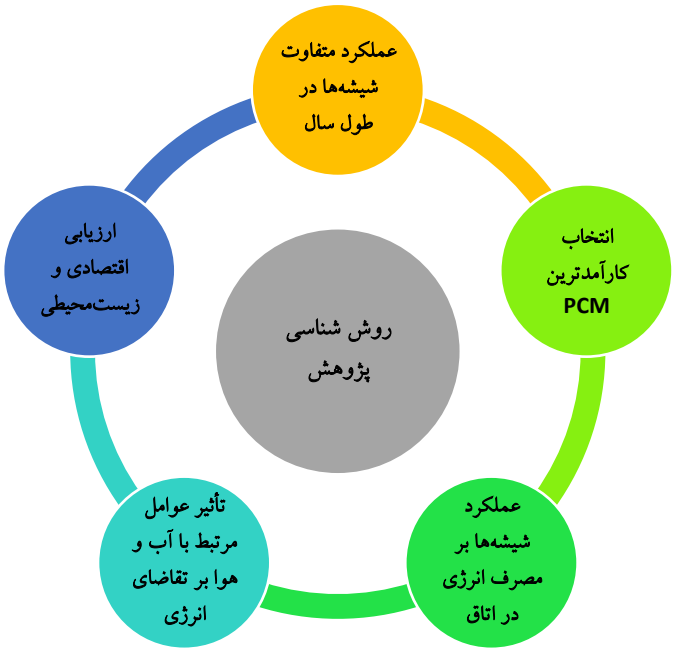
۲-۵-تاریخچه کاربرد PCM در TES

این مواد از گرمای نهان همجوشی برای ذخیره مقادیر نسبتاً زیادی انرژی برای استفاده بعدی، در محدوده دمایی باریک استفاده می‌کنند؛ بنابراین، افزایش جرم حرارتی ساختمان و پتانسیل ذخیره‌سازی حرارتی ساختمان به‌ویژه برای سازه‌های سبک وزن یکی از جنبه‌های مهم طراحی ساختمان است؛ بنابراین، PCM ها ممکن است نقش مهمی در تثبیت نوسانات دمای داخلی داشته باشند (DurakovicB, 2020). کاربرد PCM ها در ساختمان‌ها برای ذخیره‌سازی حرارتی در اواخر دهه ۱۹٤۰ مورد توجه قرار گرفت. پیشگام در این کار، مهندس مکانیک ماریا تاکس، دستیار دپارتمان متالورژی MIT بود. طراحی سیستم گرمایشی مبتنی بر PCM برای خانه خورشید داوور که در حدود ۳۰ کیلومتری غرب بوستون در سال ۱۹٤۸ ساخته شد. ماده تغییر فاز، سدیم سولفات دکاهیدرات (نمک گلابر)، به عنوان PCM استفاده شد. PCM باعث خوردگی در ظروف شد در حالی که ترک‌ها و نشت PCM ظاهر شد. امروزه PCM ها با کاربرد آن در سیستم‌های گرمایش/سرمایش فعال، سازه ساختمان، تخته دیواری، آجر، گچ، بتن، سیستم‌های لعاب، مواد آشنا در طراحی ساختمان هستند (Pasternack, et al. 2018).

۳-روش‌شناسی

تجزیه‌وتحلیل بازشوها در این مقاله به ۲ تقسیم خواهد شد: الف) بررسی بهینه‌ترین تیپولوژی بازشوها از نظر تعداد جداره‌ها، گاز میانی نوع شیشه استفاده شده اعم از شیشه ساده شفاف و یا هوشمند شامل ترموکرومیک و فتوکرومیک در لعاب مورد استفاده برای اقلیم سرد در بازشویی که ٦۰ درصد از سطح دیوار شمالی را در بردارد برای تجزیه‌وتحلیل حرارتی در اتاق نشیمن، بررسی‌ها نشان

می‌دهد که تعداد جداره‌ها و همچنین نوع لعاب مورد استفاده در شیشه مورد استفاده در بازشو در یک فضا می‌تواند نتایج متفاوتی را از نظر حرارتی و همچنین میزان انرژی خورشیدی جذب شده نشان دهد. ب) بررسی استفاده از pcm برای بهینه‌ترین نوع بازشو و تحلیل حرارتی در آن نوع بازشو، پنجره یک عنصر منحصربه‌فرد در ساختمان است، زیرا ویژگی‌های هم‌زمان آن در برابر آب‌وهوای نامناسب و درعین‌حال شفاف برای ناظر است. با این حال، این ویژگی‌های منحصر به فرد پنجره را به عنصری تبدیل می‌کند که می‌تواند بهره‌وری انرژی ساختمان‌ها را کاهش دهد. پتانسیل صرفه‌جویی در انرژی پنجره‌ها عوامل تعیین‌کننده در صرفه‌جویی در مصرف انرژی ساختمان و انتخاب شیشه پنجره یکی از مسائل بسیار مهم در طراحی پنجره است.

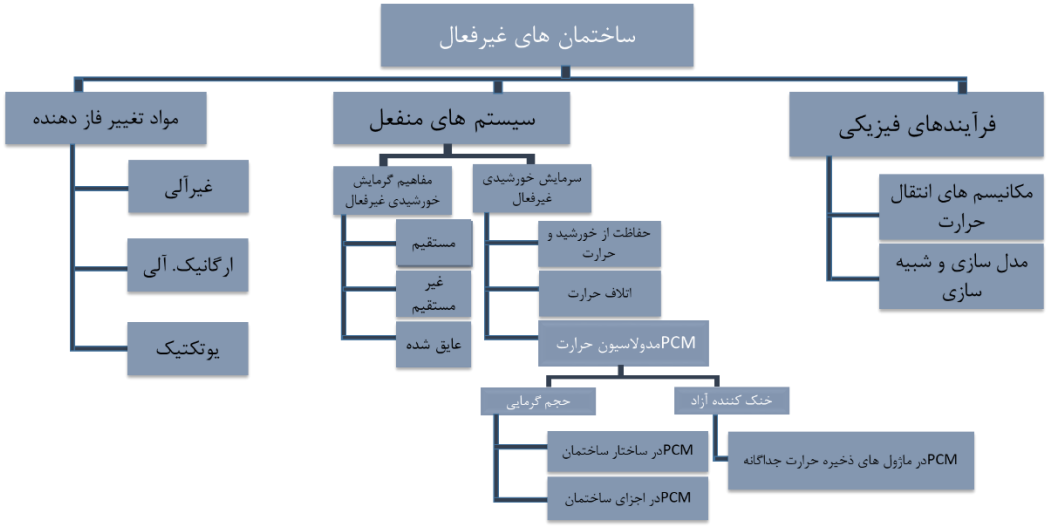


شکل ۲: روش‌شناسی (بررسی عملکرد شیشه‌ها آغاز و به ارزیابی اقتصادی و زیست‌محیطی ختم می‌شود)

۳-۱-شناخت مواد تغییر فاز دهنده و کاربرد آن‌ها در ساختمان

با توجه به مصرف بالای انرژی در ساختمان‌ها در سال‌های اخیر، برای کاهش تقاضای انرژی ساختمان و انتشار کربن, اجرای مفاهیم طراحی‌های نوآورانه همانند استراتژی‌های غیرفعال بسیار ضروری است (Krarti, 2021). ذخیره‌سازی گرما یکی از مهم‌ترین نقش‌ها در کاهش تقاضای انرژی ساختمان است. فناوری‌های نوظهور مبتنی بر کاربرد مواد تغییر فاز (PCM) در پوشش ساختمان، عملکرد حرارتی ساختمان‌ها را افزایش داده و تقاضای انرژی را کاهش می‌دهد. این مواد از گرمای نهان همجوشی برای ذخیره مقادیر نسبتاً زیادی انرژی برای استفاده بعدی، در محدوده دمایی باریک استفاده می‌کنند. در جدول زیر ساختاری از انواع سیستم‌های غیرفعال نشان داده شده است:

- ✓ استراتژی‌های گرمایش/سرمایش غیرفعال با PCM
- ✓ PCM های ادغام شده در ساختار ساختمان (دیوار، سقف و کف) – میکرو کپسوله سازی
- ✓ PCM ها در اجزای ساختمان (به‌عنوان مثال، عنصر نما، سیستم‌های لعاب‌دار) – ماکرو کپسوله / ریزپوشانی
- ✓ استراتژی‌های گرمایش/سرمایش فعال با PCM
- ✓ PCM ها در دستگاه‌های ذخیره‌سازی گرما و سرد جداگانه – ماکرو کپسوله‌سازی/ریزپوشانی



شکل ۳: یک طبقه‌بندی کلی مواد تغییر فاز در کاربرد ساختمان

ترکیب PCM در ساختار و اجزای ساختمان نشان‌دهنده سیستم‌های غیرفعال است که به‌طور خودکار گرمای ذخیره‌شده را هنگامی که دمای داخل یا خارج از نقطه ذوب PCM کاهش می‌یابد، آزاد می‌کند (Yasar, 2012). فقط PCM هایی که دمای انتقال فاز نزدیک به دمای آسایش حرارتی دارند می‌توانند در کاربردهای ساختمانی به‌عنوان یک سیستم غیرفعال استفاده شوند. محدوده دما برای این منظور ۲۱–۲۹ درجه سانتی‌گراد است (Feng, et al. 2020).

۳-۲-مزایا، روندها، مسائل و فرصت‌ها

زمینه‌های اصلی که PCM ها در کاربردهای ساختمان ادغام می‌شوند، کف و سقف، دیوارها، سیستم‌های شیشه‌ای و سیستم خنک‌کننده مبتنی بر هوا/رایگان هستند (Sbar, 2012).

۳-۳-توسعه مدل و شرایط آب و هوایی

برای ارزیابی انرژی حرارتی در ساختمان یک مدل ایجاد شده است که در آن پارامترهای هندسی در شکل ٤ رسم شده است ابعاد مدل ۸ متر × ٦ متر × ۳ متر است (طول × عرض × ارتفاع) و تنها یک پنجره شیشه‌ای در ضلع جنوبی بنا که ۰/٦ از دیوار را اشغال کرده است (WWR) تعبیه شده است لازم به ذکر است که مساحت ساخت مدل ٤۸ متر مربع است و نسبت پنجره به دیوار (WWR) در ۰/۵ ثابت است... علاوه بر این، خواص مصالح پوشش ساختمان انتخاب شده در جدول ۱ خلاصه شده است، به جز پنجره شیشه‌ای که به‌طور مفصل در بخش ۲/۲ توضیح داده شده است. داده‌های استاندارد آب‌وهوای epw، منطقه سردسیر تبریز واقع در ایران، به‌عنوان پارامترهای هواشناسی برای شبیه‌سازی انتخاب شده است. میانگین داده‌های هواشناسی با استفاده از موتور انرژی پلاس پلاگین کلایمت استودیو در گرس‌هاپر انجام شده است.

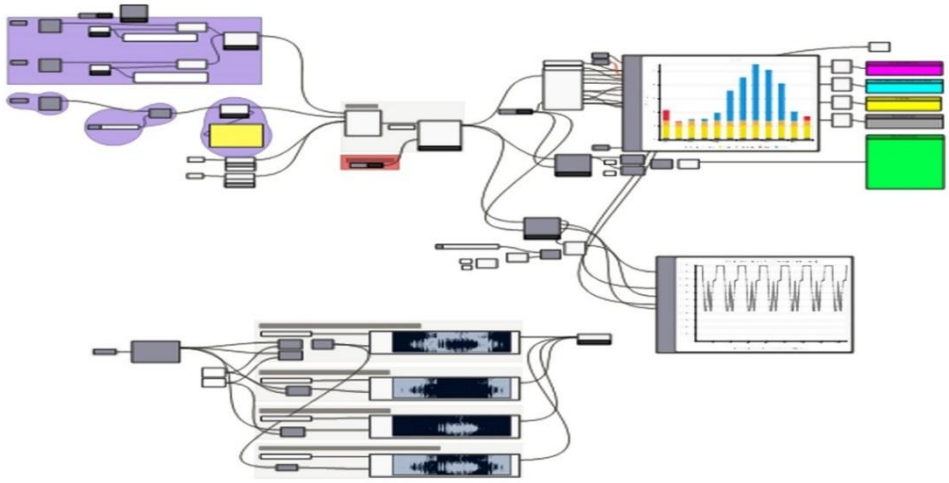
همچنین شکل زیر، این شکل نمایی از روند مدل‌سازی و شبیه‌سازی حرارتی ساختمان در نرم‌افزار Climate Studio را نشان می‌دهد. در این مدل، اجزای مختلف پوسته ساختمان شامل دیوار خارجی، سقف و کف با توجه به مصالح انتخابی و داده‌های جدول شماره ٤ تعریف شده‌اند. همچنین شرایط اقلیمی ماهانه، شامل دما، رطوبت، تابش و ساعات گرم/سرد، به‌صورت داده ورودی در بخش تحلیل اقلیمی نرم‌افزار اعمال شده است.

در این مدل، دیواری که با محیط بیرون در تماس است به‌عنوان دیوار خارجی در نظر گرفته شده و سایر دیوارها به‌صورت داخلی مدل‌سازی شده‌اند. طبقه‌ی همکف ساختمان مبنای تحلیل قرار گرفته و مصالح آن مطابق با ساختار تعیین‌شده در Climate Studio وارد شده‌اند. نمودارهای خروجی در شکل، نتایج مربوط به بارهای حرارتی، رفتار دمایی اتاق، عملکرد بازشوها و شرایط تهویه طبیعی و مکانیکی را نمایش می‌دهند.

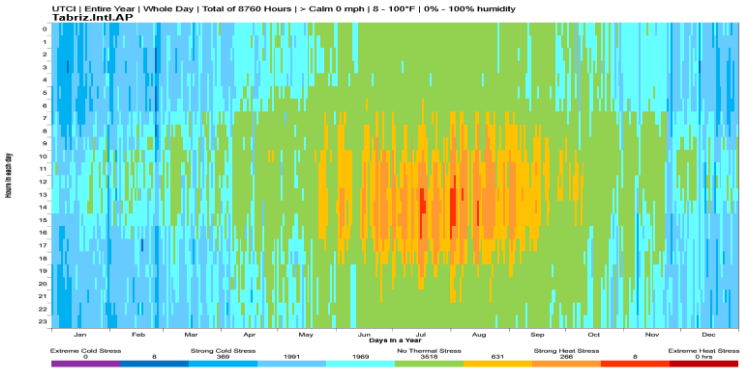
این شبیه‌سازی امکان بررسی موارد زیر را فراهم کرده است:

- ارزیابی رفتار دمایی فضا در طول سال
- تعیین محدوده‌های زمانی مناسب برای تهویه طبیعی
- تشخیص ساعات نیاز به گرمایش و سرمایش
- مقایسه عملکرد بازشوهای مختلف (مانند Clear-Clear و Azuria-Solarban70) از نظر U-value، SHGC و تأثیر بر مصرف انرژی

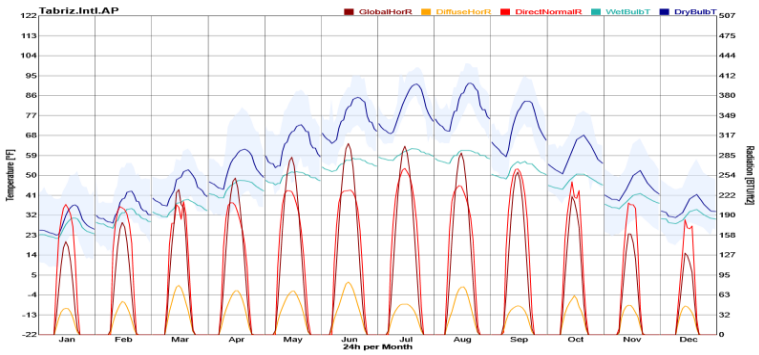
در مجموع، این مدل‌سازی پایه‌ای برای انجام تحلیل‌های حرارتی دقیق در پژوهش است و نشان می‌دهد که انتخاب نوع مصالح و پنجره چه تأثیری بر بار انرژی و آسایش حرارتی ساختمان دارد.



شکل ٤: مدل‌سازی اجزای پوسته ساختمان و شبیه‌سازی حرارتی در نرم‌افزارClimate Studio



شکل ٥: نقشه دمای ساعتی در کلایمت استودیو



شکل ٦: میانگین روزانه دما در محیط کلایمت استودیو

در این نمونه پژوهشی با در نظر گرفتن یک دیوار که با محیط پیرامونی تماس دارد و بقیه دیوارها داخلی در نظر گرفته شده است. در این پژوهش طبقه همکف در نظر گرفته شده است و با توجه به آن مصالح ساختمانی انتخاب شده است. در جدول شماره ۳ خواص مصالح انتخابی در نمونه پژوهشی نشان داده شده است.

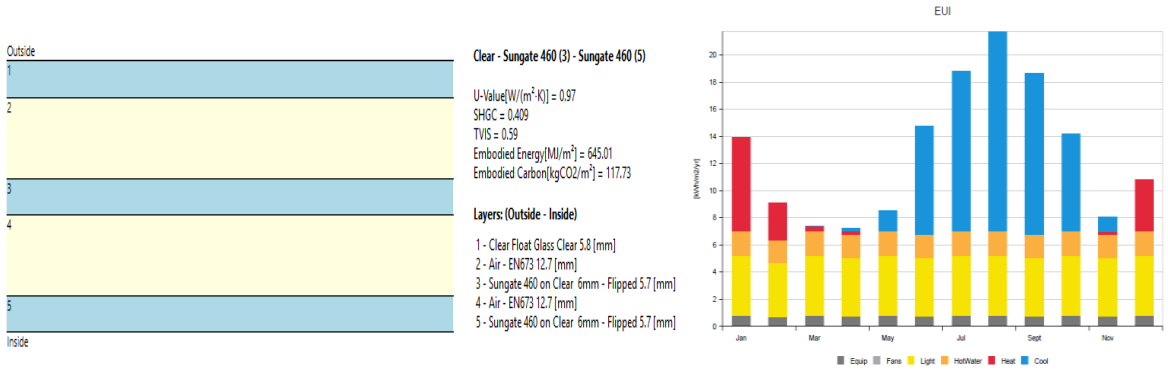
جدول ۳: خواص مصالح انتخابی

thickness[ft]	Uval [BTU]	HC [BTU]	EE [kCal/ft2]	EC [ibCo2/ft2]	عناصر ساختمانی	
۱/۰۵	۰/۰٤٦	۲۲/۵۹۵	۱۷۳۷۷٦	دیوار خارجی	120mm insulation 200mm concrete	دیوار خارجی
۱/۰۵	۰/۰٦۲	٤۱/٤۷	۲۳۸٤۱۳	کف	300mm concrete 80mm insulation 80 mmscreed	کف
۱/۰۵	۰/۰٤٦	۲۲/۵۹۵	۱۷۳۷۷٦	سقف	120mm insulation 200mm concrete	سقف

۴-یافته‌ها

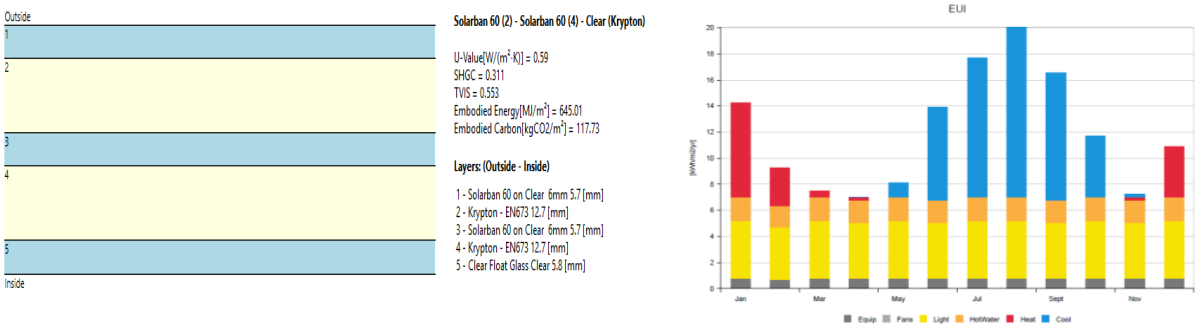
٤-۱- مقایسه انواع شیشه‌های دوجداره با لعاب‌ها و هوای میانی متفاوت

این شکل تأثیر نوع لعاب و گاز میان‌جداره (هوا، آرگون یا گازهای کم‌هدررفت) را بر U-value و میزان جذب انرژی خورشیدی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تغییر نوع لعاب، اثر بسیار بیشتری نسبت به افزایش ضخامت یا تعداد لایه‌ها بر کاهش اتلاف حرارتی دارد.



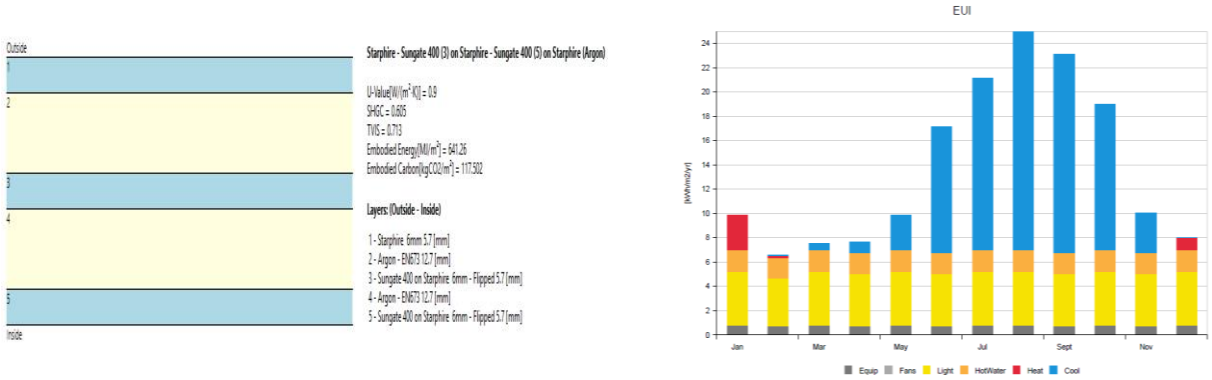
شکل ۷: مقایسه عملکرد حرارتی انواع شیشه‌های دوجداره با لعاب‌ها و گازهای میان‌جداره متفاوت

نتایج نشان می‌دهد که افزایش تعداد جداره‌ها همیشه به بهبود عملکرد حرارتی منجر نمی‌شود. در صورتی که لعاب به‌درستی انتخاب نشده باشد، شیشه سه‌جداره می‌تواند U-value بالاتری نسبت به شیشه دوجداره بهینه داشته باشد؛ بنابراین کیفیت لعاب عامل تعیین‌کننده‌تر از تعداد لایه‌ها است.



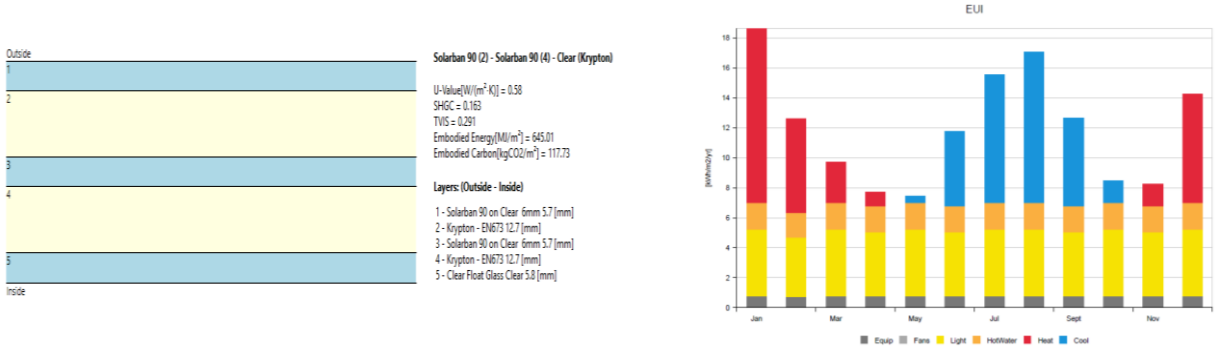
شکل ۸: مقایسه حرارتی شیشه‌های سه‌جداره با لعاب‌ها و گازهای میان‌جداره مختلف

این نمودار نشان می‌دهد که لعاب‌های بازتابنده انرژی (Reflective Coatings) با وجود عملکرد مطلوب در تابستان و کاهش بار سرمایشی، در زمستان موجب کاهش قابل‌توجه دریافت انرژی خورشیدی می‌شوند. این موضوع باعث عملکرد ضعیف آن‌ها در اقلیم سرد تبریز می‌گردد.



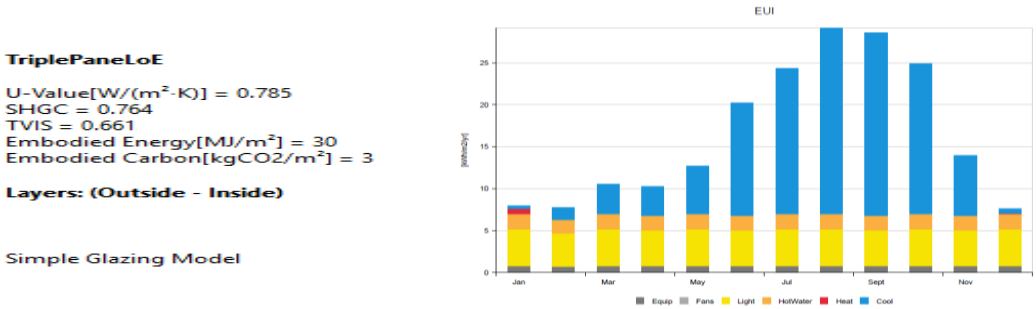
شکل ۹: رفتار شیشه با دو لایه لعاب بازتابنده انرژی در زمستان و تابستان

این شکل تأثیر پوشش Low-e را بر ضریب انتقال حرارتی و درصد دریافت انرژی خورشیدی در انواع پیکربندی‌ها نشان می‌دهد. داده‌ها نشان می‌دهد که شیشه Low-e در اقلیم سرد برای فصول گرم مناسب‌تر است و موجب کنترل بار سرمایشی می‌شود.



شکل ۱۰: مقایسه شیشه‌های Low-e تک‌جداره، دوجداره و سه‌جداره

نتایج نشان می‌دهد که در شیشه Low-e سه‌لایه، میزان دریافت انرژی خورشیدی به شکل چشمگیری کاهش یافته است؛ به‌طوری که این پیکربندی برای اقلیم سرد تبریز مناسب نیست، زیرا میزان گرمایش غیرفعال خورشیدی را بیش از حد کاهش می‌دهد. در مدل سه لایه این نوع شیشه میزان دریافت انرژی خورشیدی بسیار کاهش پیدا کرده است و اصلاً برای این اقلیم مناسب نیست.



شکل ۱۱: کاهش شدید جذب انرژی خورشیدی در شیشه سه‌لایهLow-e

جزئیات بیشتر خواص ترموفیزیکی و نوری در جدول ٤، خلاصه شده است که در آن پارامترهای مربوط بـه شیشـه ثابـت هسـتند در حالی که پارامتر PCM تا حدی متفاوت است، ازجمله گرمای نهان (QL)، دمای ذوب (TP)، ضریب جذب. (a P) و ضریب شکسـت (n P)، دامنه تغییرات خواص ترموفیزیکی به این دلیل انتخاب شده است که PCM به کار رفته در این مقاله S-S PCM مبتنی بـر پلـی اصلاح شده است که توسط خمین و همکارانش توسعه یافته است. که در آن QL حدود ۸۰–۱۲۰ کیلوژول بر کیلـوگرم اسـت و T از ۱۸ °C تا ۳۵°C در محدوده است. خواص نوری برای اجازه دادن به انتقال S-S PCM (τ) برای تغییر از ۳۵ به ٦٥٪ انتخـاب شـده‌اند که می‌تواند با معادله‌ها از قبل محاسبه شود.

جدول ٤: خواص ترموفیزیکی شیشه معمولی و پی سی ام ها (Dong Li, 2022)

متغیر/خواص	n	a	Tp	QL	ΔTp	k	Cp
	(-)	(1/m)	(◦C)	(kJ/kg)	(◦C)	(W/m.◦C)	**(J/ (kg·◦C))**
Glass	1.5	12				1	840
Pcm	1.3	20	25	80	2	0.3	1200

۴-۲-اطلاعات کلی درباره مواد تغییرفاز دهنده مورد استفاده در این پژوهش

مواد تغییر فازدهنده (PCM) مورد استفاده در این پژوهش، بسته به نوع خود، رفتارهای متفاوتی در ذخیره و آزادسازی انرژی حرارتـی دارند. رایج‌ترین PCM ها، مانند موم‌های پارافین و هیدرات‌های نمک، هنگام گرم شدن از جامد به مایع تغییر فاز می‌دهند. ایـن گـروه اگرچه چگالی ذخیره انرژی بالایی دارند (بـا ΔH معمـولاً بـین ۱۵۰ تـا ۲۵۰ J/g)، امـا بـرای جلـوگیری از نشـت فـاز مـایع نیازمنـد کپسوله‌سازی هستند. کپسوله‌سازی علاوه بر کاهش چگالی انرژی مفید، چالش‌هایی مانند نیاز به مقاومـت مکـانیکی بـالا و سـازگاری شیمیایی با PCM را ایجاد می‌کند؛ زیرا کپسول‌ها باید در برابر فشار داخلی ناشی از انبساط هنگام تغییر فاز تحمل کافی داشـته باشـند. به دلیل این محدودیت‌ها، توجه پژوهشگران به سمت مواد تغییر فازدهنده جامد–جامد (SS-PCM) جلب شـده اسـت. در ایـن مـواد، انتقال فاز به‌جای ذوب و انجماد، بین دو حالت کاملاً جامد (کریسـتالی، نیمه‌کریسـتالی یـا آمـورف) رخ می‌دهـد؛ بنـابراین نیـازی بـه کپسوله‌سازی نیست و مشکلات نشت ماده یا کاهش پایداری مکانیکی نیز وجود ندارد. تاکنون انواع مختلفـی از SS-PCM هـا شـامل مواد پلی‌ال، پلیمری، آلی–فلزی و معدنی توسعه یافته‌اند. ویژگی‌های حرارتی این مواد، مانند دمـای انتقـال فـاز (Tt) و تغییـر آنتـالپی (ΔH)، به ترکیب شیمیایی و ساختار مولکولی آن‌ها بستگی دارد. برای مثال، SS-PCM های آلی معمولاً دارای دمای انتقـال فـاز ۲۵ تـا ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و ΔH در محدوده ۱۵ تا ۲۷۰ J/g هستند. در مقابل، SS-PCM های معدنی مبتنی بر آهن، دمای انتقال فاز بسیار بالاتری (٦٨٠ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) و ΔH حدود ۳۰ تا ٦٠ J/g دارند.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

بررسی نتایج مدل‌سازی انرژی در اقلیم سرد شهر تبریز نشان می‌دهد که انتخاب نوع بازشو و ویژگی‌های اپتیکـی و حرارتـی شیشـه‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش بار گرمایشی ساختمان دارد (Zhou, 2022). در این اقلیم، بهره‌گیری از تابش مستقیم خورشید در فصـل زمستان به‌عنوان یک منبع حرارتی غیرفعال اهمیت ویژه‌ای دارد؛ ازاین‌رو استفاده از لعاب‌ها و پوشش‌هایی که موجب کاهش قابل‌توجه ضریب جذب انرژی خورشیدی (Solar Heat Gain) می‌شوند، برای شرایط تبریز مطلوب نیست. در عوض، به‌کارگیری شیشه‌هایی بـا ضریب انتقال حرارتی پایین (U-value) و توانایی جذب حرارت خورشیدی مناسب می‌توانـد عملکـرد حرارتـی سـاختمان را بـه‌طور چشمگیری بهبود دهد.

مطابق نتایج به‌دست‌آمده، بازشوهایی که با لعاب‌های کاراتر و تهویه‌پذیری حرارتی بهینه طراحی شده‌اند، اتلاف حرارتی کمتری را تجربه می‌کنند و در مقایسه با سیستم‌های رایج، عملکرد انرژی بسیار بهتری دارند. به‌عنوان نمونه، یک پنجره دوجداره مجهز به لعاب‌های بهینه با قابلیت جذب حرارت خورشیدی مؤثر، دارای U-value معادل ۰/۵۹ W/m²K بوده است؛ در حالی که نمونه سه‌جداره فاقد چنین ویژگی‌های پیشرفته، U-value حدود ۱/۰۵ W/m²K را نشان داده است. این اختلاف قابل توجه بیانگر افزایش چشمگیر مصرف انرژی در نمونه سه‌جداره غیر بهینه است و لزوم توجه به انتخاب هوشمندانه نوع لعاب را در اقلیم‌های سرد برجسته می‌سازد.

از سوی دیگر، استفاده از مواد تغییر فازدهنده (PCM) در سیستم‌های پنجره‌ای، به‌ویژه به‌صورت میکروکپسوله‌شده میان جداره‌ها، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار نوین جهت ارتقای عملکرد حرارتی بازشوها مطرح شود. این مواد با جذب انرژی حرارتی ناشی از تابش روز و ذخیره آن در فرآیند ذوب و سپس آزادسازی تدریجی در ساعات کاهش دما، موجب کاهش نوسانات حرارتی، بهبود شرایط آسایش و کاهش اتلاف حرارت می‌شوند. با طراحی صحیح PCM و استفاده از آن بدون ایجاد کاهش محسوس در شفافیت (Transparency) شیشه، می‌توان علاوه بر حفظ سطح روشنایی داخلی، میزان مصرف انرژی گرمایشی را نیز به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. به طور کلی، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که ترکیب راهکارهای بهینه‌سازی شیشه (لعاب‌های کم‌اتلاف) با فناوری مواد تغییر فازدهنده می‌تواند سطح قابل‌توجهی از صرفه‌جویی انرژی را در اقلیم سرد تبریز ایجاد کرده و راهکاری پایدار برای ارتقای کارایی انرژی ساختمان‌ها ارائه دهد.

۶-منابع

1- Abardeh, M. B., & H. (2019). Experimental and numerical study of energy loss through double-glazed windows. *Heat and Mass Transfer*. **doi:10.1007/s00231-019-02729-4**
2- Asdrubali, F. (2013). Influence of cavities geometric and emissivity properties on the overall thermal performance of aluminum frames for windows. *Energy and Buildings*, 298–309.
3- Asdrubali, F., F. B., & G. B. (2013). Influence of cavities geometric and emissivity properties on the overall thermal. *Elsevier*, 60, 298–309.
4- Asif, M. (2019). An empirical study on life cycle assessment of double-glazed aluminium-clad timber windows. *International Journal of Building*, 547–564.**doi:10.1108/IJBPA-01-2019-0001**
5- Bagheri, F., et al. (2013). Developing energy performance label for office buildings in Iran. *Energy and Buildings*, 116–124.
6- Bahman Soleiman Dehkordi, M. A. (2022). Energy-saving owing to using PCM into buildings: Considering hot and cold climate regions. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52.
7- Bellia, L., et al. (2020). Impact of daylight saving time on lighting energy consumption and the biological clock for occupants in office buildings. *Elsevier*, 1347–1364.
8- Berardi, U., et al. (2020). Experimental and numerical investigation of the thermal transmittance of PVC window frames with silica aerogel. *Journal Pre-proof*, 31357–7.
9- Betulbektas, U. A. (2007). Investigation of the effects of orientation and window usage on external walls in terms of heating and cooling energy.
10- DA, B. (2016). *A house in the sun: Modern architecture and solar energy in the Cold War*. Oxford University Press.
11- DeFoReSt Team (Pasternack, A., et al.). (2018). Parametric decadal climate forecast recalibration (DeFoReSt 1.0).
12- Duraković, B. (2020). *PCM-Based building envelope systems*. Springer**. doi:10.1007/978-3-030-38335-0**
13- Duraković, B. M. S. (2019). Thermal performances of glazed energy storage systems with various storage materials: An experimental study. *Sustainable Cities and Society*, 45, 422–430.
14- Forughian, S., et al. (2017). Comparative study of single-glazed and double-glazed windows in terms of energy efficiency and economic expenses. *Journal of History Culture and Art Research*, 6(3), 879–893.
15- Fathi, S., et al. (2021). Effect of electrochromic windows on energy consumption of high-rise office buildings in different climate regions of Iran. *Solar Energy*, 132–149.
16- Feng, M., et al. (2020). Review: Smart windows based on photonic crystals. *Springer Science+Business Media*.
17- Gohari, P. (2019). The influence of building material, windows and insulators on energy saving in different climate zones in Iran. *International Journal of Energy and Water Resources*.

18-Goia, F. (2012). Thermo-physical behaviour and energy performance assessment of PCM glazing system configurations: A numerical analysis. *Frontiers of Architectural Research*.
19-Gorantla, K., & S. S. (2021). Sustainable reflective triple glazing design strategies: Spectral characteristics, air-conditioning cost savings, daylight factors, and payback periods. *Journal of Building Engineering*.
20-IEA. (2019). *Global Energy and CO2 Status Report*. International Energy Agency.
21-ISO. (2007). *Building materials and products—Hydrothermal properties.* ISO 10456:2007.
22-Khomein, P., et al. (2021). Random copolymer … for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*.
23-Kokogiannakis, G., et al. (2014). Simulating thermochromic and heat mirror glazing systems in hot and cold climates. *Energy Procedia*, 62, 22–31.
24-Krarti, M. (2021). Design optimization of smart glazing optical properties for office spaces. *Elsevier*, 118411.
25-Li, X., et al. (2016). Thermal performance of a PCM-filled double glazing unit with different optical properties of phase change material. *Energy and Buildings*, 119(1), 143–152.
26-Liu, C., et al. (2017). Experimental investigation of optical and thermal performance of a PCM-glazed unit for building applications. *Energy and Buildings*.
27-Ma, D. L., & Yuxin, M. (2022). Energy and daylighting performance… *Energy Conversion and Management*. **doi:10.1016/j.enconman.2022.116341**
28-Milbrandt, X., & Z. (2014). Demonstration with energy assessments of thermochromic window systems. *ASHRAE Transactions*, 120, 330–339.
29-Oroujia, P., & A. M. (2019). Methodology of standardizing the energy labeling and rating of window fenestration in Iran. *Elsevier*, 33, 24–33.
30-Rastegari, M., et al. (2020). Daylight optimization through architectural aspects in an office building atrium in Tehran. *Journal Pre-proof*. **doi:10.1016/j.jobe.2020.101718**
31-Sbar, N. L. (2012). Electrochromic dynamic windows for office buildings. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 125–139.
32-Sol, C., et al. (2018). Mitigation of hysteresis due to a pseudo-photochromic effect in thermochromic smart window coatings. *Scientific Reports*, 8, 13249.
33-Tafakkori, R., & A. F. (2021). Introducing novel configurations for double-glazed windows with lower energy loss. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 100919.
34-Tawfeeq, H., & A. Q. (2024). Optimising window-to-wall ratio for enhanced energy efficiency… *Sustainability*. **doi:10.3390/su16177342**
35-Tong, S. W. (2021). A review of transparent-reflective switchable glass technologies for building facades. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111615.
36-Van Den Bossche, N., et al. (2015). Thermal optimization of window frames. *6th International Building Physics Conference*.
37-Wang, J., & Z. L. (2024). Global assessment of radiative cooling… *Energy and Buildings*, 317. **doi:10.1016/j.enbuild.2024.114402**
38-Wang, S., et al. (2021). Scalable thermochromic smart windows with passive radiative cooling regulation. *Science*, 374, 1501–1504.
39-Yasar, Y., & S. M. K. (2012). The effects of window alternatives on energy efficiency and building economy. *Energy Conversion and Management*.
40-Ye, L., & H. L. (2014). How to be smart and energy efficient: A general discussion on thermochromic windows. *Scientific Reports*, 4, 6427.
41-Zeng, K., et al. (2022). Modeling, simulation and testing of atomization temperature change point of thermochromic glass for building energy saving. *Frontiers in Materials*.
42-Zheng, Z., et al. (2017). Study on energy consumption ratio for office buildings. *Energy Procedia*, 2317–2322.
43-Zhou, Y. (2022). Multi-stage supervised learning optimisation on an aerogel glazing system with stochastic uncertainty. *Energy*, 258, 124815. **doi:10.1016/j.energy.2022.124815**

Research Paper

The Role of Phase Change Materials in Optimizing Double- and Triple-Glazed Openings: A Case Study of the Living Room of a Residential Building in Tabriz

Mahrokh Gholizadeh[1], Mohammad Mehdi Moulaii*[2]

1-M.Sc. Student, Department of Architecture, Faculty of Art and Architecture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

mahrokhgh97@gmail.com

2-Assistant Professor, Department of Architecture, Faculty of Art and Architecture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. (Corresponding Author)

m.moulaii@basu.ac.ir

Extended Abstract

Aims: Reducing energy demand and improving energy management in buildings have become major concerns in contemporary architectural and environmental research. Since windows constitute one of the most critical components of the building envelope in terms of heat transfer, considerable attention has been directed toward developing advanced glazing technologies to enhance thermal performance and reduce energy consumption. Among these technologies, multi-glazed windows and phase change materials (PCMs) have emerged as promising solutions for improving building energy efficiency. Polymer-based PCMs, in particular, have attracted increasing interest because of their high thermal stability and solid-to-solid phase transition characteristics, making them suitable for thermal energy storage (TES) applications. The aim of this study is to investigate the role of phase change materials in optimizing the thermal performance of double- and triple-glazed window systems and to evaluate their effectiveness in reducing energy consumption under cold climatic conditions. The research focuses on a residential living room located in Tabriz, Iran, and seeks to identify the most efficient glazing configuration in terms of thermal energy management.

Materials & Methods: This study employed a simulation-based approach to assess the thermal performance of various glazing systems. A living room in a residential building located in the cold climate of Tabriz was selected as the case study. Several types of double- and triple-glazed windows with different inter-pane gas fillings were modeled and compared. In addition, polymer-based phase change materials were incorporated into selected glazing configurations to evaluate their contribution to thermal energy storage and indoor temperature regulation. Thermal simulations were conducted using an energy-analysis plugin within a digital building modeling environment. The window-to-wall ratio (WWR) was fixed at 0.6, while the material properties of the roof, walls, and floor were kept constant throughout all simulation scenarios to ensure reliable comparisons. The analyses focused on heat transfer behavior, energy demand, and the thermal efficiency of different glazing arrangements under winter climatic conditions. Comparative evaluations were then performed to determine the most effective combination of glazing layers, gas fillings, and PCM integration for minimizing energy consumption.

Findings: The simulation results indicate that both glazing configuration and material selection significantly influence the thermal performance of residential windows. The incorporation of phase change materials improved thermal energy storage capacity and contributed to more stable indoor thermal conditions. However, the results also revealed that increasing the number of glazing layers does not necessarily lead to a

proportional increase in thermal resistance or energy savings. In several cases, double-glazed systems equipped with more efficient coatings and optimized gas fillings performed better than certain triple-glazed alternatives. The effectiveness of the glazing systems was found to depend not only on the number of panes but also on the overall thermal properties of the window assembly. PCM-enhanced glazing systems demonstrated improved energy management capabilities by reducing heat loss and moderating temperature fluctuations within the interior space. These findings highlight the importance of considering the combined effects of glazing technology, gas type, and thermal storage materials rather than relying solely on the number of glazing layers when designing energy-efficient window systems.

Conclusion: The findings of this research demonstrate that optimizing window performance requires a comprehensive evaluation of glazing characteristics rather than simply increasing the number of panes. Although triple-glazed windows are generally assumed to provide superior thermal insulation, the results show that certain double-glazed systems with advanced coatings and appropriate thermal properties can achieve comparable or even better energy performance. Furthermore, the integration of polymer-based phase change materials enhances the thermal behavior of glazing systems by increasing energy storage capacity and improving indoor thermal stability. Therefore, PCM-based glazing technologies represent a promising strategy for reducing energy consumption and improving thermal comfort in residential buildings located in cold climates. The study underscores the necessity of performance-based design approaches in selecting window systems and highlights the potential of phase change materials as an effective component of sustainable and energy-efficient building envelopes.

Keywords: Openings, Optimization, Phase Change Materials (PCM), Thermal Energy Storage, Double-Glazed Windows, Triple-Glazed Windows, Energy Efficiency, Tabriz Climate.

This Journal is an open access Journal Licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License

(CC BY 4.0)