



Evaluation of the effect of smart materials on thermal performance and heating load reduction of zero-energy buildings in the cold and mountainous climate of Tabriz city

Davood Paidar Khiabani¹, Mohammad Jodeiri Abasi^{*1}, Amin Alizadeh¹, Reza Fathipour¹, Saideh Feizi²

¹ Department of Architecture, Ah. C., Islamic Azad University, Ahar, Iran.

² Department of Architecture, Aza, C, Islamic Azad University, Azarshahr, Iran.

Abstract

This research investigates the potential of integrating smart materials to optimize energy consumption and enhance thermal performance within Near-Zero Energy Buildings (NZEB), specifically focusing on the “Noor Aram” school located in the challenging cold and mountainous climate of Tabriz, Iran. To achieve high-fidelity results, a detailed four-story model was developed using DesignBuilder software, leveraging the robust EnergyPlus simulation engine for thermal analysis. The study evaluated three distinct performance-enhancement scenarios: the integration of Phase Change Materials (PCM), the application of Low-Emissivity (Low-E) glazing, and the implementation of advanced thermal insulation, comparing each against a standard baseline model. The simulation findings demonstrate that while all evaluated smart materials contribute to energy savings, their overall efficacy is heavily dictated by the local climate and the specific composition of the building envelope. Advanced thermal insulation emerged as the most critical strategy, yielding a significant 34% reduction in total heating load and facilitating the building's transition toward NZEB standards. Furthermore, the application of PCMs provided a 23% reduction in annual heating requirements by effectively buffering thermal fluctuations. In contrast, Low-E glazing showed a more marginal impact, primarily due to the limited ratio of transparent openings relative to the total heat loss occurring through opaque surfaces. Consequently, this study concludes that in cold regions, sustainable design must prioritize the optimization of opaque envelopes. It recommends that future building regulations adopt holistic, climate-aware strategies, combining high-performance insulation with strategic thermal mass management.

Keywords: Smart materials; Heating load; Near-zero energy buildings; Cold climate architecture

* Corresponding Author: Mohammad Jodeiri Abbasi

Email: mohammad.jodeiri@iaui.ac.ir mohammadjodeiriabbasi@gmail.com

Phone:09143162905

Doi: 10.48306/juem.2026.590040.1168



مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۴/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۴/۳۱

ارزیابی اثر مصالح هوشمند بر عملکرد حرارتی و کاهش بار گرمایش ساختمان‌های صفر انرژی در اقلیم سرد و کوهستانی شهر تبریز

داود پایدار خیابانی^۱، محمد جدیری عباسی^{۱*}، امین علیزاده^۱، رضا فتحی پور^۱، سعیده فیضی^۲

^۱گروه معماری، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران.

^۲گروه معماری، واحد آذرشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، آذرشهر، ایران.

چکیده

افزایش مصرف انرژی در بخش ساختمان و سهم بالای گرمایش در اقلیم‌های سرد، ضرورت بهره‌گیری از مصالح هوشمند را دوچندان کرده است. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر مصالح هوشمند بر کاهش بار گرمایش و ارتقای عملکرد حرارتی در ساختمان‌های نزدیک به صفر انرژی، مطالعه‌ای کاربردی و تحلیلی را در اقلیم سرد و کوهستانی تبریز انجام داده است. برای این منظور، ساختمان آموزشی چهارطبقه «مدرسه نور ارم» به‌عنوان نمونه موردی انتخاب و با استفاده از نرم‌افزار DesignBuilder و موتور EnergyPlus مدل‌سازی شد. پس از تهیه مدل پایه، سه سناریوی بهبود شامل به‌کارگیری مواد تغییر فازدهنده، نصب شیشه‌های کم‌گسیل و استفاده از عایق حرارتی نوین شبیه‌سازی و نتایج با وضعیت موجود مقایسه شد. یافته‌ها نشان می‌دهد که مصالح هوشمند تأثیر قابل توجهی بر کاهش بار گرمایش دارند، اما میزان کارایی آن‌ها متفاوت است. سناریوی مواد تغییر فازدهنده توانست با کاهش نوسانات حرارتی، بار گرمایش سالانه را حدود ۲۳ درصد کاهش دهد. شیشه‌های کم‌گسیل نیز با کاهش اتلاف حرارت تابشی، عملکرد حرارتی را بهبود بخشیدند، هرچند سهم جداره‌های شفاف در تلفات حرارتی نسبتاً محدود بود. بیشترین اثرگذاری مربوط به سناریوی عایق حرارتی نوین بود که با کاهش حدود ۳۴ درصدی بار گرمایش، بیشترین نقش را در نزدیک‌سازی عملکرد ساختمان به استانداردهای انرژی صفر ایفا کرد. نتایج نشان می‌دهد که انتخاب مصالح هوشمند باید به‌صورت اقلیم‌محور انجام شود و توجه به سهم اجزای غیرشفاف در تلفات حرارتی تبریز اهمیت ویژه‌ای دارد. این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب هوشمندانه مصالح واکنش‌پذیر می‌تواند زمینه‌ساز توسعه ساختمان‌های کم‌مصرف و پایدار در اقلیم‌های سرد کشور باشد.

کلمات کلیدی: مصالح هوشمند؛ بار گرمایشی؛ ساختمان‌های انرژی صفر؛ معماری اقلیم سرد.

۱- مقدمه

افزایش مصرف انرژی و تشدید تغییرات اقلیمی، ارتقای بهره‌وری انرژی در بخش ساختمان را به یکی از اولویت‌های اصلی توسعه پایدار تبدیل کرده است. ساختمان‌ها بیش از یک‌سوم مصرف جهانی انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را به خود اختصاص می‌دهند که بخش عمده آن ناشی از نیاز به گرمایش و سرمایش است [۱]. در ایران نیز، شدت مصرف انرژی در ساختمان‌ها تقریباً دو برابر میانگین جهانی بوده و این موضوع ضرورت به‌کارگیری راهکارهای نوین برای کاهش اتلاف انرژی را دوچندان کرده است [۲]. در این راستا، ساختمان‌های صفر انرژی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین رویکردهای معماری پایدار مطرح شده‌اند؛ ساختمان‌هایی که با کاهش تقاضای انرژی و استفاده از منابع تجدیدپذیر، تراز انرژی سالانه آن‌ها به صفر یا نزدیک به صفر می‌رسد [۳]. تحقق این هدف علاوه بر بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر، مستلزم ارتقای عملکرد حرارتی پوسته ساختمان و استفاده از مصالح پیشرفته است.

در سال‌های اخیر، مصالح هوشمند به‌عنوان یکی از مؤثرترین فناوری‌های بهینه‌سازی انرژی در ساختمان معرفی شده‌اند. این مصالح با قابلیت واکنش به تغییرات محیطی، امکان کنترل تبادل حرارتی، ذخیره و آزادسازی انرژی، تنظیم ضریب هدایت حرارتی و بهبود عملکرد پوسته ساختمان را فراهم می‌کنند [۴، ۵]. فناوری‌هایی نظیر مواد تغییر فازدهنده (PCM)، شیشه‌های هوشمند و کم‌گسیل، عایق‌های نانویی و پوشش‌های واکنش‌پذیر، در مطالعات مختلف به‌عنوان ابزارهای مؤثر کاهش بار حرارتی و افزایش بهره‌وری انرژی معرفی شده‌اند [۶]. به‌ویژه در اقلیم‌های سرد، استفاده از PCM در جداره‌های خارجی می‌تواند بار گرمایش را حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد کاهش داده و نوسانات دمایی را کنترل کند [۷]. همچنین شیشه‌های کم‌گسیل، پنجره‌های هوشمند و عایق‌های نوین نیز نقش مهمی در دستیابی به ساختمان‌های نزدیک به صفر انرژی ایفا می‌کنند [۸].

اهمیت استفاده از این مصالح در اقلیم‌های سرد و کوهستانی بیش از سایر مناطق است؛ زیرا زمستان‌های طولانی، نوسانات شدید دمایی و یخبندان موجب افزایش قابل توجه بار گرمایش و اتلاف حرارت ساختمان می‌شود. از این‌رو، بهره‌گیری از مصالح هوشمند تنها یک گزینه فناورانه نیست، بلکه راهبردی اساسی برای کاهش مصرف انرژی، افزایش بهره‌وری حرارتی و تحقق معماری پایدار به شمار می‌آید. ایران نیز با برخورداری از مناطق وسیع سردسیر، از جمله شهر تبریز، با چالش مصرف بالای انرژی گرمایشی و وابستگی گسترده به سوخت‌های فسیلی روبه‌رو است؛ بنابراین، طراحی پوسته‌های ساختمانی مبتنی بر مصالح هوشمند می‌تواند نقش مهمی در کاهش بار گرمایش و توسعه ساختمان‌های کم‌مصرف داشته باشد. شهر تبریز به دلیل اقلیم سرد و کوهستانی، یکی از شهرهای دارای بالاترین مصرف انرژی گرمایشی در کشور است. مطالعات انجام‌شده در این شهر نشان داده‌اند که اصلاح ویژگی‌های حرارتی پوسته ساختمان، از جمله نوع شیشه، ابعاد بازشوها، طراحی نما و بام سبز، می‌تواند مصرف انرژی را کاهش دهد؛ با این حال، بیشتر این پژوهش‌ها بر راهکارهای متعارف تمرکز داشته و ارزیابی جامع اثر مصالح هوشمند بر عملکرد حرارتی ساختمان‌های صفر انرژی در شرایط اقلیمی تبریز همچنان محدود است. از سوی دیگر، دستیابی به ساختمان صفر انرژی بدون کاهش مؤثر بار گرمایش امکان‌پذیر نیست؛ زیرا حتی استفاده گسترده از انرژی‌های تجدیدپذیر نیز در صورت بالا بودن تقاضای انرژی، قادر به ایجاد تعادل انرژی ساختمان نخواهد بود. بنابراین، ارتقای عملکرد حرارتی پوسته ساختمان از طریق مصالح هوشمند، پیش‌نیاز تحقق ساختمان‌های صفر انرژی در اقلیم‌های سرد محسوب می‌شود. با وجود تأیید ظرفیت بالای مصالح هوشمند در مطالعات بین‌المللی، نبود داده‌های بومی و تحلیل‌های مبتنی بر شرایط اقلیمی تبریز، تصمیم‌گیری درباره انتخاب و کاربرد این مصالح را با عدم قطعیت مواجه کرده است. از این‌رو، انجام پژوهشی که اثر مصالح هوشمند بر عملکرد حرارتی و میزان کاهش بار گرمایش ساختمان‌های صفر انرژی را در اقلیم سرد و کوهستانی تبریز ارزیابی کند، از نظر علمی و اجرایی ضروری است. بر این اساس، سؤال اصلی پژوهش به شرح زیر مطرح می‌شود: مصالح هوشمند چه تأثیری بر عملکرد حرارتی و میزان کاهش بار گرمایش ساختمان‌های صفر انرژی در اقلیم سرد و کوهستانی تبریز دارند؟

۱-۱- پیشینه پژوهش

مطالعات بین‌المللی نشان می‌دهد که مصالح هوشمند به‌عنوان یکی از مؤثرترین فناوری‌های ارتقای عملکرد حرارتی ساختمان، نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی و تحقق ساختمان‌های صفر انرژی دارند. در مقاله «مصالح ژایروسکوپی و فناوری‌های هوشمند: شکلهای به ساختمان‌های تاب‌آور و کم‌مصرف انرژی» نشان داده شد که مصالح ژایروسکوپی با قابلیت واکنش‌پذیری حرارتی و مکانیکی، در صورت ادغام با فناوری‌هایی نظیر هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و اینترنت اشیا، می‌تواند اتلاف انرژی را کاهش داده

و مدیریت هوشمند مصرف انرژی را بهبود بخشند، هرچند توسعه استانداردهای اجرایی و ارزیابی اقتصادی همچنان ضروری است [۹]. مطالعات انجام شده درباره مواد تغییر فازدهنده (PCM) نیز بیانگر نقش مؤثر این فناوری در بهبود عملکرد حرارتی ساختمان است. نتایج پژوهش بهبود عملکرد حرارتی ساختمان از طریق بررسی مواد تغییر فازدهنده در اجزای ساختمانی نشان داد که استفاده از PCM می تواند نوسانات دمایی را تا ۴۶ درصد و مصرف انرژی گرمایش و سرمایش را تا ۳۱ درصد کاهش دهد و میزان این اثر به محل استقرار و دمای ذوب ماده وابسته است [۱]. همچنین، در پژوهش مصالح هوشمند، بهره‌وری انرژی و اثرات زیست‌محیطی تأکید شده است که مصالحی مانند PCM، عایق‌های نانویی و مواد زیستی علاوه بر کاهش مصرف انرژی، موجب افزایش آسایش حرارتی و کاهش اثرات زیست‌محیطی ساختمان می‌شوند، اگرچه هزینه اولیه و نبود استانداردهای اجرایی از مهم‌ترین چالش‌های توسعه آن‌هاست [۴]. در ادامه، پژوهش مصالح نسل جدید برای بهره‌وری انرژی و طراحی سازگار با اقلیم نشان داد که فناوری‌هایی نظیر اثرزول، پنل‌های عایق خلأ و نانوکامپوزیت‌های حرارتی می‌توانند عملکرد حرارتی ساختمان را به میزان قابل توجهی بهبود دهند، اما استفاده گسترده از آن‌ها نیازمند ارزیابی اقتصادی و بررسی چرخه عمر است [۷]. همچنین، رن و همکاران^۱ (۲۰۲۵) با مدل‌سازی دقیق حرارتی نشان دادند که بیشترین کارایی PCM زمانی حاصل می‌شود که ضخامت، دمای ذوب و محل استقرار آن متناسب با شرایط اقلیمی طراحی شود؛ در چنین شرایطی، کاهش معناداری در بار گرمایش ساختمان حاصل خواهد شد [۱۰]. این مطالعات در مجموع تأیید می‌کنند که مصالح هوشمند، به‌ویژه PCM و عایق‌های نوین، ظرفیت بالایی برای کاهش مصرف انرژی دارند، اما عملکرد آن‌ها به شرایط اقلیمی و نحوه به‌کارگیری وابسته است.

در پژوهش‌های داخلی نیز نتایج مشابهی گزارش شده است. میرزایی (۱۴۰۳) نشان داد که تحقق معماری پایدار مستلزم استفاده هم‌زمان از فناوری‌های هوشمند، انرژی‌های تجدیدپذیر و مصالح واکنش‌پذیر است و فناوری‌هایی نظیر سامانه‌های فتوولتائیک، پنل‌های ETFE و مواد تغییر فازدهنده نقش مؤثری در کاهش تبادل حرارتی و افزایش بهره‌وری انرژی دارند [۱۱]. مجتبی و ارغوانی (۱۴۰۲) نیز با استفاده از فراترکیب، بیان کردند که مصالح هوشمند از طریق کنترل انتقال انرژی، تنظیم شفافیت و کاهش اتلاف حرارت، علاوه بر ارتقای عملکرد حرارتی، آسایش ساکنان را نیز بهبود می‌بخشند [۱۲] در مطالعه شیخ‌لویی بنباب، و شقاقی (۱۴۰۱) که در شهر تبریز انجام شد، استفاده از مصالح هوشمند، عایق‌بندی مناسب، بازشوهای بهینه و سامانه‌های هوشمند، از عوامل اصلی کاهش اتلاف انرژی و افزایش پایداری ساختمان معرفی شد [۱۳]. همچنین، براتی و همکاران (۱۴۰۲) با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای PVSyst و EnergyPlus نشان دادند که ارتقای کیفیت پوسته ساختمان، استفاده از شیشه دوجداره و عایق‌کاری مناسب، همراه با انرژی خورشیدی، امکان دستیابی به ساختمان‌های صفر انرژی را فراهم می‌کند [۱۴]. عباس‌زاده و همکاران (۱۴۰۱) نیز گزارش کردند که اصلاح جهت‌گیری ساختمان، بهینه‌سازی بازشوها و ارتقای عملکرد حرارتی جداره‌ها در اقلیم تبریز می‌تواند مصرف انرژی را تا حدود ۴۰ درصد کاهش دهد [۱۵]. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، مرور مطالعات نشان می‌دهد که بیشتر پژوهش‌ها یا بر معرفی و ارزیابی کلی مصالح هوشمند متمرکز بوده‌اند یا هر فناوری را به‌صورت مستقل بررسی کرده‌اند. از سوی دیگر، مطالعات انجام شده در تبریز عمدتاً بر راهکارهای متعارف طراحی پوسته ساختمان تأکید داشته و تاکنون ارزیابی جامع و اقلیم‌محور اثر مصالح هوشمند بر کاهش بار گرمایش ساختمان‌های صفر انرژی در شرایط واقعی تبریز کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، خلأ اصلی پژوهش حاضر، بررسی یکپارچه نقش مصالح هوشمند در بهبود عملکرد حرارتی ساختمان‌های صفر انرژی با رویکردی بومی، مبتنی بر شبیه‌سازی و متناسب با اقلیم سرد و کوهستانی تبریز است؛ موضوعی که می‌تواند مبنایی علمی برای انتخاب مصالح و طراحی ساختمان‌های کم‌مصرف در اقلیم‌های سرد کشور فراهم آورد.

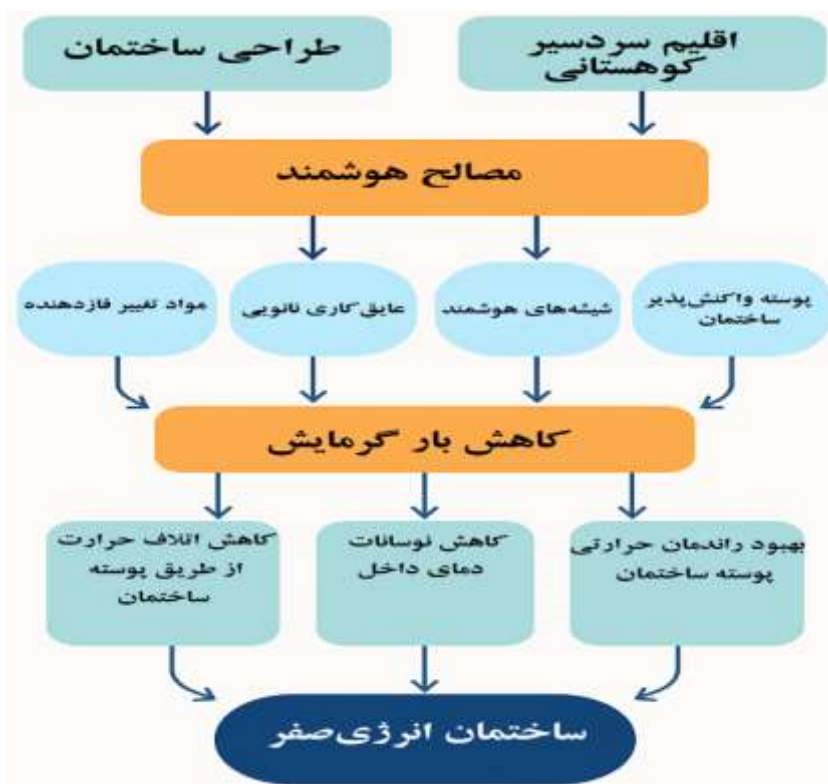
۱-۲- مبانی نظری پژوهش

مبانی نظری پژوهش حاضر بر سه مفهوم اساسی «ساختمان‌های صفر انرژی»، «مصالح هوشمند» و «نقش مصالح هوشمند در ارتقای عملکرد حرارتی ساختمان‌های صفر انرژی در اقلیم‌های سرد» استوار است. این سه محور، چارچوب نظری لازم را برای تبیین نقش مصالح هوشمند در کاهش بار گرمایش ساختمان‌های واقع در اقلیم سرد و کوهستانی تبریز فراهم می‌کنند. ساختمان‌های صفر انرژی به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین رویکردهای معماری پایدار، ساختمان‌هایی هستند که با کاهش تقاضای انرژی و بهره‌گیری از منابع تجدیدپذیر، تراز انرژی سالانه آن‌ها به صفر یا نزدیک به صفر می‌رسد [۱۶]. تحقق این هدف بر دو اصل اساسی استوار است:

^۱ Ren et al

نخست، کاهش تقاضای انرژی از طریق بهینه‌سازی طراحی و عملکرد حرارتی پوسته ساختمان و دوم، تأمین انرژی موردنیاز از منابع تجدیدپذیر. در اقلیم‌های سرد، کاهش بار گرمایش مهم‌ترین عامل دستیابی به ساختمان‌های صفر انرژی محسوب می‌شود؛ زیرا بیشترین سهم مصرف انرژی ساختمان به سیستم‌های گرمایشی اختصاص دارد. در این میان، کیفیت حرارتی دیوارها، سقف، کف و بازشوها نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش اتلاف حرارت و افزایش بهره‌وری انرژی دارد [۱۷]. در این چارچوب، مصالح هوشمند به عنوان نسل جدید مصالح ساختمانی، قابلیت واکنش خودکار به تغییرات محیطی مانند دما، نور، رطوبت و تنش را دارند و می‌توانند رفتار حرارتی ساختمان را متناسب با شرایط محیط تنظیم کنند [۱۸]. این مصالح برخلاف مصالح سنتی، عملکردی پویا داشته و از طریق کنترل انتقال حرارت، ذخیره و آزادسازی انرژی و تنظیم خواص حرارتی، نقش مؤثری در کاهش مصرف انرژی ایفا می‌کنند. از مهم‌ترین انواع این مصالح می‌توان به مواد تغییر فازدهنده (PCM)، شیشه‌های هوشمند و کم‌گسیل، عایق‌های نانویی، ابرعایق‌ها و پوشش‌های واکنش‌پذیر اشاره کرد [۱۹].

در میان این فناوری‌ها، مواد تغییر فازدهنده (PCM) به دلیل قابلیت ذخیره و آزادسازی حرارت نهان، جایگاه ویژه‌ای در ساختمان‌های صفر انرژی دارند. این مواد در هنگام تغییر فاز، انرژی حرارتی را جذب یا آزاد کرده و موجب کاهش نوسانات دمایی و کاهش بار گرمایش و سرمایش ساختمان می‌شوند [۲]. همچنین، شیشه‌های هوشمند با کنترل میزان عبور نور و انرژی خورشیدی و عایق‌های نانویی با ضریب هدایت حرارتی بسیار پایین، انتقال حرارت از پوسته ساختمان را کاهش داده و عملکرد حرارتی آن را بهبود می‌بخشند [۲۰]. ارتباط میان مصالح هوشمند و ساختمان‌های صفر انرژی در این است که این مصالح با کاهش تقاضای انرژی، مهم‌ترین پیش‌شرط دستیابی به ساختمان صفر انرژی را فراهم می‌کنند. هرچه اتلاف حرارت از پوسته ساختمان کاهش یابد، نیاز به سیستم‌های گرمایشی کمتر شده و امکان تأمین انرژی موردنیاز از منابع تجدیدپذیر افزایش می‌یابد. از این رو، مصالح هوشمند حلقه اتصال میان طراحی پایدار، بهینه‌سازی عملکرد حرارتی و بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر به شمار می‌روند [۲۱]. این موضوع در اقلیم‌های سرد و کوهستانی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ زیرا زمستان‌های طولانی، یخبندان و نوسانات شدید دمایی موجب افزایش بار گرمایش و اتلاف انرژی می‌شوند [۲۲]. در چنین شرایطی، مصالح متداول پاسخگوی نیازهای حرارتی ساختمان نبوده و استفاده از مصالح هوشمند می‌تواند با کنترل انتقال حرارت، ذخیره انرژی و افزایش پایداری حرارتی، مصرف انرژی را به میزان قابل توجهی کاهش دهد [۲۳]. از این رو، نظریه‌های نوین بهره‌وری انرژی ساختمان، مصالح هوشمند را یکی از ارکان اصلی طراحی ساختمان‌های کم‌مصرف و صفر انرژی معرفی می‌کنند [۲۴]. بر این اساس، چارچوب نظری پژوهش حاضر بر این فرض استوار است که به‌کارگیری مصالح هوشمند در پوسته ساختمان‌های صفر انرژی، با بهبود عملکرد حرارتی، کاهش بار گرمایش، افزایش بهره‌وری انرژی و ارتقای آسایش حرارتی ساکنان، می‌تواند نقش مؤثری در تحقق ساختمان‌های صفر انرژی در اقلیم سرد و کوهستانی تبریز ایفا کند. این چارچوب، مبنای تحلیل تجربی پژوهش و پاسخ به سؤال اصلی تحقیق، یعنی «تأثیر مصالح هوشمند بر عملکرد حرارتی و میزان کاهش بار گرمایش ساختمان‌های صفر انرژی در اقلیم سرد و کوهستانی تبریز» را فراهم می‌سازد.

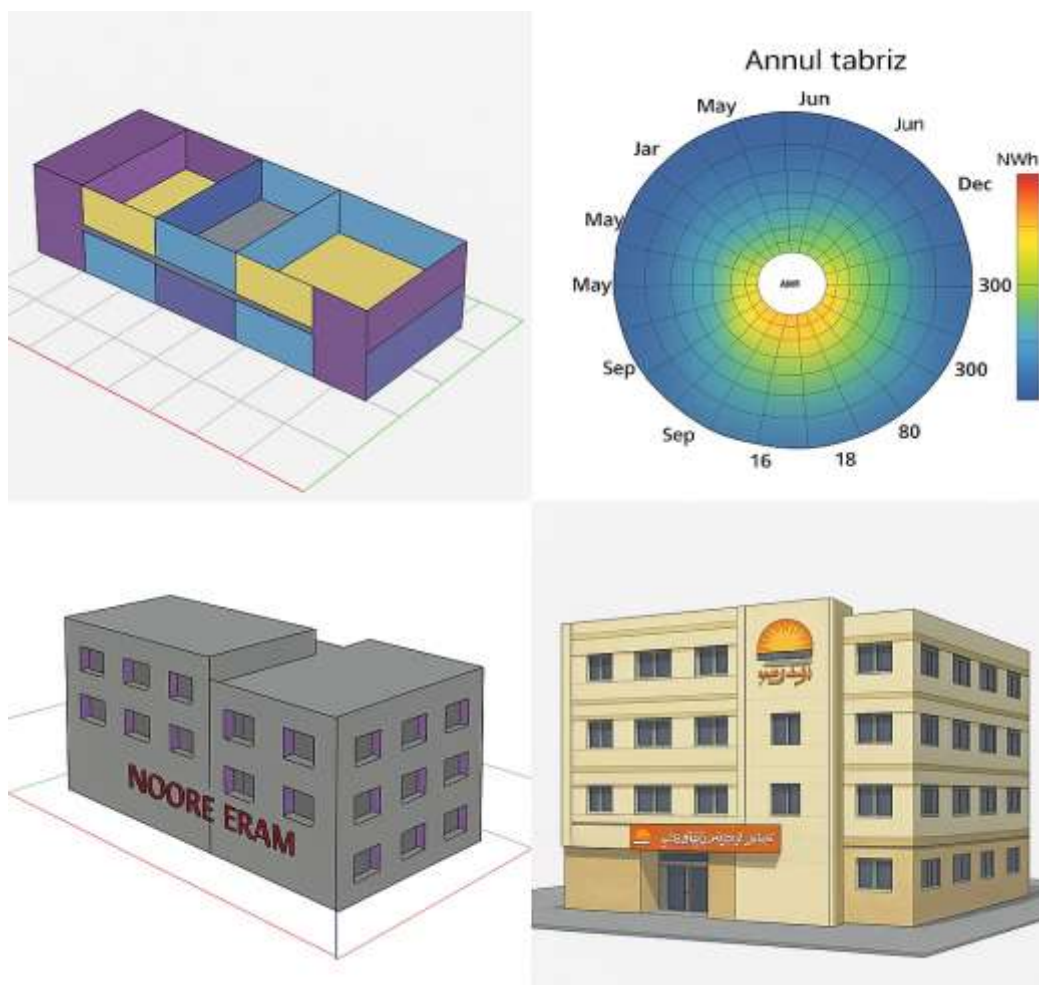


شکل ۱- مفهومی تأثیر مصالح هوشمند بر کاهش بار گرمایش و ارتقای عملکرد حرارتی ساختمان‌های صفر انرژی در اقلیم سرد تبریز

این شکل مفهومی نشان می‌دهد که چگونه مصالح هوشمند شامل مواد تغییر فازدهنده (PCM) شیشه‌های هوشمند، عایق‌های نانویی و پوسته‌های واکنش‌پذیر از طریق کاهش اتلاف حرارت جداره‌ها، کاهش نوسانات دمای داخلی و افزایش بهره‌وری حرارتی پوسته ساختمان موجب کاهش بار گرمایش ساختمان در اقلیم سرد تبریز شده و در نهایت دستیابی به ساختمان صفر انرژی را تسهیل می‌کنند. همچنین نقش شرایط اقلیمی تبریز و طراحی غیرفعال به‌عنوان عوامل زمینه‌ای در این چرخه عملکردی نشان داده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

این پژوهش با رویکرد شبیه‌سازی عددی به ارزیابی عملکرد حرارتی یک ساختمان آموزشی در اقلیم سرد و کوهستانی تبریز می‌پردازد. مطالعه موردی، مدرسه چهارطبقه نور ارم واقع در منطقه ۱۰ شهرداری تبریز با زیربنای تقریبی ۸۰۰ مترمربع است. مدل سه‌بعدی ساختمان در نرم‌افزار DesignBuilder ایجاد و زون‌بندی حرارتی بر اساس کاربری فضاها شامل کلاس‌ها، راهروها و بخش‌های اداری انجام شد. داده‌های اقلیمی از فایل استاندارد EPW شهر تبریز استخراج و شرایط بهره‌برداری، دمای آسایش داخلی (۲۰ تا ۲۱ درجه سانتی‌گراد) و مشخصات حرارتی پوسته ساختمان مطابق مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان تعریف شد. ابتدا سناریوی پایه بر اساس وضعیت موجود ساختمان مدل‌سازی شد، سپس چهار سناریوی استفاده از مصالح هوشمند شامل مواد تغییر فاز (PCM)، پنجره‌های دوجداره کم‌گسیل (Low-E)، عایق‌های نانویی و سناریوی ترکیبی شبیه‌سازی گردید. تمامی شبیه‌سازی‌ها با استفاده از موتور محاسباتی EnergyPlus انجام شد. شاخص‌های ارزیابی شامل بار گرمایش سالانه (kWh)، میانگین دمای داخلی، ساعات خروج از محدوده آسایش حرارتی و اتلاف حرارت اجزای پوسته ساختمان بود. در نهایت، نتایج هر سناریو با سناریوی پایه مقایسه و میزان کاهش بار گرمایش و بهبود عملکرد حرارتی به‌صورت درصدی محاسبه شد. تحلیل داده‌ها به روش مقایسه‌ای و با استفاده از اختلاف میانگین‌ها و درصد تغییرات انجام گرفت تا مؤثرترین ترکیب مصالح هوشمند در کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد حرارتی ساختمان آموزشی در اقلیم تبریز تعیین شود.



شکل ۲- مجموعه تصاویر مربوط به مدل سازی اولیه ساختمان نور ارم در محیط DesignBuilder و تحلیل تابش خورشیدی تبریز

این مجموعه شامل چهار بخش تحلیلی و مدل سازی است:

بخش بالا-چپ، نمایی سه بعدی از زون بندی داخلی ساختمان نور ارم را نشان می دهد که بر اساس تقسیم بندی عملکردی برای شبیه سازی انرژی ایجاد شده است. بخش بالا-راست، نمودار تابش خورشیدی تبریز را در قالب یک دیاگرام قطبی سالانه نمایش می دهد که شدت تابش را بر حسب ساعت و ماه نشان داده و پایه ورودی مدل شبیه سازی حرارتی است. بخش پایین-چپ، مدل حجمی اولیه مدرسه نور ارم در محیط DesignBuilder را نشان می دهد که ابعاد کلی (طول ۴۰ متر، عرض ۲۰ متر، چهار طبقه) در آن لحاظ شده است. بخش پایین-راست نیز نمای دقیق تر و اصلاح شده ساختمان شامل بازشوها، جداره ها و تناسبات واقعی بنا است که برای ورود به مرحله شبیه سازی EnergyPlus آماده شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- معرفی متغیرهای خروجی شبیه سازی انرژی

با توجه به هدف مقاله با عنوان ارزیابی اثر مصالح هوشمند بر عملکرد حرارتی و کاهش بار گرمایش ساختمان های صفر انرژی در اقلیم سرد و کوهستانی تبریز، خروجی های اصلی شبیه سازی انرژی در این پژوهش بر چند متغیر کلیدی استوار است. مهم ترین متغیر، بار سالانه گرمایش مدرسه نور ارم بر حسب کیلووات ساعت در سال است که نشان می دهد ساختمان در طول یک سال برای رساندن دمای فضاهای داخلی به محدوده آسایش حرارتی در اقلیم سرد تبریز به چه میزان انرژی گرمایشی نیاز دارد. متغیر دوم، توان پیک گرمایش است که بیشترین ظرفیت مورد نیاز سیستم گرمایشی در سردترین ساعات سال را نشان می دهد و برای طراحی بهینه تجهیزات گرمایشی اهمیت دارد. علاوه بر این، میانگین دمای هوای داخلی در فصول سرد و دامنه نوسان آن در طول شبانه روز نیز به عنوان معیار عملکرد حرارتی پوسته و میزان تاثیر مصالح هوشمند بر پایداری دمایی فضاهای آموزشی مورد توجه قرار گرفته

است. بر اساس این مبنا، ابتدا وضعیت موجود مدرسه به عنوان سناریوی پایه شبیه سازی شده است و سپس سه سناریوی مداخله شامل استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در دیوار و سقف، به کارگیری شیشه کم گسیل در جداره های شفاف و تقویت عایق حرارتی پوسته با مصالح نوین تعریف شده است تا امکان مقایسه کمی عملکرد هر سناریو با وضع موجود فراهم شود.

جدول ۱- معرفی انواع مصالح هوشمند و نحوه به کارگیری آن ها در سناریوهای شبیه سازی شده

ردیف	سناریو	نوع مصالح هوشمند	محل به کارگیری در مدل	هدف حرارتی اصلی
۱	سناریوی ۱	بدون مصالح هوشمند	وضعیت موجود دیوار، سقف و پنجره ها	خط مبنای مقایسه
۲	سناریوی ۲	مواد تغییر فاز دهنده (PCM)	لایه اضافه در دیوارهای خارجی و سقف	کاهش نوسان دما و بار گرمایش با ذخیره سازی حرارت
۳	سناریوی ۳	شیشه دوجداره کم گسیل (Low-E)	جایگزینی تمام پنجره های موجود	کاهش اتلاف حرارت از جداره های شفاف و بهبود آسایش کنار پنجره
۴	سناریوی ۴	عایق حرارتی نوین با U بسیار کم	جایگزینی عایق دیوار و سقف	کاهش U-value پوسته و حداقل سازی تلفات رسانشی

نتایج ارائه شده در این قسمت، اثر سه گروه مصالح هوشمند پوسته شامل مواد تغییر فاز دهنده، شیشه های کم گسیل و عایق حرارتی نوین را بر عملکرد حرارتی مدرسه نور ارم در اقلیم سرد و کوهستانی تبریز بر اساس خروجی های EnergyPlus بررسی می کند. برای این منظور، چهار سناریو شامل وضعیت موجود بدون مصالح هوشمند و سه سناریوی مداخله ای تعریف شده است و تغییرات بار گرمایش سالانه، توان پیک، نوسان دمای داخلی و شاخص های تلفات حرارتی برای هر سناریو گزارش و با یکدیگر مقایسه می شود.

۳-۲- مقایسه بار سالانه گرمایش در سناریوهای مختلف

برای سنجش اثر مصالح هوشمند بر کاهش نیاز گرمایشی، بار سالانه گرمایش برای چهار سناریو شبیه سازی و با یکدیگر مقایسه شده است. سناریوی اول، وضعیت موجود مدرسه نور ارم را بدون به کارگیری مصالح هوشمند نشان می دهد و نقش خط مبنا را بر عهده دارد. در سناریوی دوم، لایه ای از ماده تغییر فاز دهنده متناسب با اقلیم تبریز به دیوارهای خارجی و سقف افزوده شده است تا با ذخیره و آزادسازی حرارت در ساعات متفاوت بهره برداری، نوسان دما و بار گرمایش کاهش یابد. در سناریوی سوم، پنجره های موجود با شیشه دوجداره کم گسیل جایگزین شده است تا تلفات حرارتی از جداره شفاف کاهش یابد و در عین حال، ورود کنترل شده انرژی خورشیدی حفظ شود. در سناریوی چهارم، عایق دیوارها و سقف با عایق حرارتی نوین با ضریب انتقال حرارت کمتر تقویت شده است، در حالی که سایر شرایط بهره برداری، هندسه و سیستم گرمایشی در تمام سناریوها ثابت نگه داشته شده است تا اثر خالص مصالح پوسته بر بار گرمایش قابل مقایسه باشد.

جدول زیر نتایج شبیه سازی بار سالانه گرمایش برای چهار سناریو را نشان می دهد. مقادیر انرژی به صورت تقریبی و بر اساس شبیه سازی سالانه در نرم افزار دیزاین بیلدر و موتور محاسباتی انرژی پلاس تنظیم شده است تا الگوی کلی تاثیر هر نوع مداخله بر عملکرد حرارتی ساختمان مدرسه در اقلیم سرد تبریز را بازنمایی کند.

جدول ۲- مقایسه بار سالانه گرمایش در سناریوهای مختلف مصالح پوسته مدرسه نور ارم بر حسب کیلووات ساعت در سال ۱۴۰۴

ردیف	کاهش نسبت به وضعیت موجود بر حسب درصد	بار سالانه گرمایش بر حسب کیلووات ساعت در سال	سناریو
۱	۰	۱۲۸۰۰۰	وضعیت موجود بدون مصالح هوشمند
۲	۲۳	۹۸۰۰۰	به کارگیری مواد تغییر فاز دهنده در دیوار و سقف
۳	۱۸	۱۰۵۰۰۰	جایگزینی پنجره ها با شیشه دوجداره کم گسیل
۴	۳۴	۸۴۰۰۰	تقویت عایق حرارتی دیوار و سقف با عایق نوین

نتایج جدول ۲ نشان می دهد که در وضعیت موجود، بار سالانه گرمایش مدرسه نور ارم در اقلیم سرد و کوهستانی تبریز برابر ۱۲۸۰۰۰ کیلووات ساعت در سال است که برای یک ساختمان آموزشی با زیربنای حدود ۸۰۰ متر مربع نشان دهنده وابستگی قابل توجه به انرژی گرمایشی در دوره بهره برداری است. به کارگیری مواد تغییر فاز دهنده در دیوارها و سقف موجب کاهش بار سالانه گرمایش به حدود ۹۸۰۰۰ کیلووات ساعت در سال شده است که بیانگر کاهش تقریبی بیست و سه درصدی نسبت به وضعیت موجود است. این کاهش ناشی از ظرفیت ذخیره سازی حرارت در لایه های پوسته و تاخیر در انتقال گرما به فضای داخلی است که به ویژه در دوره های نوسان شدید دمای بیرون در اقلیم تبریز نقش مهمی در هموارسازی پروفیل دمایی داخل کلاسها دارد. در سناریوی مربوط به شیشه کم گسیل، بار سالانه گرمایش به حدود ۱۰۵۰۰۰ کیلووات ساعت در سال کاهش یافته است و کاهش حدود هجده درصد نسبت به وضع موجود به دست آمده است. این نتیجه نشان می دهد که کنترل تلفات حرارتی از طریق جداره های شفاف و مدیریت عبور انرژی خورشیدی، به ویژه در ساعات روز زمستان، می تواند تاثیر قابل توجهی بر کاهش نیاز گرمایشی داشته باشد، هرچند اثر آن اندکی کمتر از حالت استفاده از ماده تغییر فاز دهنده است، زیرا نقش جرم حرارتی پوسته در ذخیره و آزادسازی حرارت در این سناریو در حد سناریوی دوم تقویت نشده است.

در سناریوی تقویت عایق حرارتی دیوار و سقف با عایق نوین، بار سالانه گرمایش به حدود ۸۴۰۰۰ کیلووات ساعت در سال کاهش یافته است که به معنای کاهش تقریبی سی و چهار درصدی نسبت به وضعیت موجود است. این امر نشان می دهد که در اقلیم سرد و کوهستانی تبریز، کاهش ضریب انتقال حرارت پوسته و کاهش تلفات رسانشی از دیوارها و سقف، یکی از موثرترین راهبردها برای کاهش بار گرمایش در ساختمان های آموزشی است و می تواند نقش مهمی در نزدیک شدن مدرسه به مفهوم ساختمان کم مصرف و در مراحل بعدی ساختمان نزدیک به صفر انرژی ایفا کند. روند کلی نتایج بیانگر آن است که هر سه مداخله مبتنی بر مصالح هوشمند و عایق نوین، به میزان قابل توجهی بار گرمایش را کاهش می دهند و تفاوت میان سناریوها امکان انتخاب راهبرد بهینه را با توجه به ملاحظات فنی، اقتصادی و اجرایی در مدارس شهر تبریز فراهم می کند.



شکل ۳- نمودار کندل استیکی بار سالانه گرمایش در سناریوی پایه ساختمان نور ارم

این شکل نمودار کندل استیکی، بار گرمایش ماهانه ساختمان مدرسه نور ارم را در سناریوی پایه نمایش می دهد؛ حالتی که بدون هیچ گونه مداخله در پوسته، پنجره ها یا مصالح هوشمند شبیه سازی شده است. در این نمودار، مقادیر «اوج ماهانه»، «کمینه ماهانه»، «میانگین تقریبی» و «نوسان حرارتی» هر ماه به صورت ستون های کندل فانتزی نشان داده شده اند. همان طور که EnergyPlus گزارش می کند، بار گرمایش در ماه های سرد شامل ژانویه و دسامبر به بیشترین مقدار رسیده و در ماه های گذار آوریل تا اکتبر کاهش محسوسی دارد. این نمودار پایه ای ترین وضعیت عملکرد حرارتی ساختمان را تبیین کرده و مبنای مقایسه سه سناریوی بهبوددهنده بعدی است.

۳-۳- تحلیل سناریوی دوم: به کارگیری مواد تغییر فازدهنده (PCM)

در سناریوی دوم، لایه‌ای از مواد تغییر فازدهنده (PCM) در دیوارهای خارجی و سقف ساختمان اضافه شده تا رفتار حرارتی پوسته تغییر کند. مواد PCM قادرند در یک بازه دمایی مشخص انرژی حرارتی را بدون تغییر محسوس در دمای سطح ذخیره کرده و در زمان مورد نیاز آزاد کنند. در اقلیم سرد تبریز که اختلاف دمای شب و روز زیاد است، استفاده از PCM باعث کاهش نوسانات حرارتی داخلی شده و سیستم گرمایشی را از تأمین بار لحظه‌ای زیاد بی‌نیاز می‌کند. تحلیل EnergyPlus نشان می‌دهد که بار سالانه گرمایش در این سناریو به ۹۸۰۰۰ کیلووات‌ساعت در سال کاهش یافته که برابر با کاهش ۲۳ درصدی نسبت به وضعیت موجود است. این کاهش شدید انرژی به دلیل ظرفیت حرارتی نهان PCM است که باعث می‌شود در ساعات گرم‌تر روز گرما در لایه PCM ذخیره و در ساعات شب آزاد شود. در نتیجه افت دمای داخلی در شب به شدت کاهش یافته و نیاز به فعال‌سازی سیستم گرمایشی کمتر می‌شود. میزان میانگین بار ماهانه نیز از ۱۰۶۰۰ به ۸۲۰۰ کیلووات‌ساعت رسیده که نشان‌دهنده کاهش مصرف در تمام ماه‌های سرد و انتقالی است.

بیشینه بار ماهانه در ژانویه از ۱۷۵۰۰ به ۱۴۵۰۰ کاهش یافته است که نشان می‌دهد با ذخیره‌سازی بخشی از انرژی حرارتی روز، بار گرمایشی ساعات شب به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است. انرژی پلاس در تحلیل بار روز اوج سرما مقدار ۵۰۰ کیلووات‌ساعت را گزارش کرده که نسبت به ۶۲۰ کیلووات‌ساعت سناریوی پایه کاهش ۱۹ درصدی دارد. توان پیک نیز از ۹۵ به ۷۸ کیلووات کاهش یافته که نشان‌دهنده کاهش الزامات طراحی سیستم گرمایشی است. این موضوع باعث کاهش اندازه مورد نیاز بویلر، مشعل و پمپ‌ها و افزایش راندمان تجهیزات می‌شود. میانگین دمای داخلی در دوره سرد از ۱۹٫۰ به ۲۰٫۰ درجه افزایش یافته است. دلیل این افزایش، عملکرد ذخیره‌سازی انرژی PCM است که اجازه نمی‌دهد دمای سطح داخلی دیوارها به سرعت کاهش یابد. دامنه نوسان دمای داخلی نیز از ۳٫۱ به ۲٫۳ کاهش یافته که معادل بهبود ۲۶ درصدی پایداری حرارتی است. همچنین سهم دیوار و سقف در اتلاف حرارت به ترتیب ۱۳ و ۴ درصد کاهش یافته است. مقدار U-value موثر پوسته نیز از ۰٫۸۵ به ۰٫۵۸ کاهش یافته که اگرچه به‌طور مستقیم به PCM مرتبط نیست، اما تأثیر تأخیر انتقال حرارت باعث می‌شود EnergyPlus U-value معادل پایین‌تر را در محاسبات حرارتی لحاظ کند. در مجموع سناریوی PCM بهترین عملکرد را در کاهش نوسان دمای داخلی و افزایش آسایش حرارتی داشته است و از نظر رفتار حرارتی پوسته، کارآمدترین راهکار برای کلاس‌های درس در اقلیم تبریز است.

جدول ۳- مقایسه جامع عملکرد حرارتی در سناریوی پایه و سناریوی مواد تغییر فازدهنده (PCM) در مدرسه نور ارم

ردیف	شاخص عملکرد	سناریوی پایه	سناریوی دوم (PCM)	میزان تغییر	درصد تغییر
۱	بار سالانه گرمایش (کیلووات‌ساعت/سال)	۱۲۸۰۰۰	۹۸۰۰۰	-۳۰۰۰۰	-۲۳
۲	میانگین بار ماهانه (کیلووات‌ساعت/ماه)	۱۰۶۰۰	۸۲۰۰	-۲۴۰۰	-۲۳
۳	بیشینه بار ماهانه ژانویه	۱۷۵۰۰	۱۴۵۰۰	-۳۰۰۰	-۱۷
۴	کمینه بار ماهانه ژوئن	۱۲۰۰	۹۰۰	-۳۰۰	-۲۵
۵	میانگین بار هفتگی ژانویه	۴۳۰۰	۳۶۰۰	-۷۰۰	-۱۶
۶	بار روز اوج سرما (حداکثر روزانه)	۶۲۰	۵۰۰	-۱۲۰	-۱۹
۷	توان پیک گرمایش (کیلووات)	۹۵	۷۸	-۱۷	-۱۸
۸	میانگین دمای داخلی در فصل سرد (درجه سانتی‌گراد)	۱۹٫۰	۲۰٫۰	+۱٫۰	+۵
۹	دامنه نوسان دمای داخلی (درجه سانتی‌گراد)	۳٫۱	۲٫۳	-۰٫۸	-۲۶
۱۰	مقدار میانگین U-value پوسته	۰٫۸۵	۰٫۵۸	-۰٫۲۷	-۳۲
۱۱	اتلاف حرارت دیوار (وات بر مترمربع)	۱۴٫۵	۹٫۴	-۵٫۱	-۳۵
۱۲	اتلاف حرارت سقف (وات بر مترمربع)	۱۰٫۳	۶٫۸	-۳٫۵	-۳۴
۱۳	سهم دیوار از تلفات کل	٪۶۱	٪۲۸	-۱۳	—
۱۴	سهم سقف از تلفات کل	٪۲۸	٪۲۴	-۴	—
۱۵	صرفه‌جویی سالانه انرژی (کیلووات‌ساعت)	—	۳۰۰۰۰	—	—
۱۶	کاهش هزینه گرمایش سالانه (تومان)	—	≈۶,۰۰۰,۰۰۰	—	—
۱۷	بهبود پایداری حرارتی داخلی	—	٪۲۶ بهتر	—	—



شکل ۳- نمودار کندل استیکی بار گرمایش ماهانه سناریوی دوم با استفاده از مصالح هوشمند تغییر فازدهنده (PCM)

این شکل، الگوی تغییرات بار گرمایش ماهانه مدرسه نور ارم را در سناریوی دوم نمایش می‌دهد که در آن لایه‌های منتخب دیوار و سقف با مواد تغییر فازدهنده (PCM) جایگزین شده‌اند. هر کندل، دامنه تغییرات بار حرارتی هر ماه شامل کمینه، بیشینه و مقدار میانی را نشان می‌دهد و رنگ‌بندی فانتزی نمودار، شدت نوسانات ماهانه را برجسته می‌سازد. همان‌طور که خروجی‌های EnergyPlus نشان می‌دهد، استفاده از PCM موجب کاهش قابل توجه بار گرمایش در ماه‌های سرد سال (به‌ویژه ژانویه و دسامبر) و تعدیل نوسان‌های حرارتی در کل سال شده است. رفتار ذخیره‌سازی و آزادسازی حرارت در مواد تغییر فازدهنده، نقش مهمی در کاهش بار شبانه و افزایش پایداری دمای داخلی داشته و باعث شده بار گرمایش در این سناریو نسبت به وضعیت موجود روندی یکنواخت‌تر و کم‌نوسان‌تر به خود بگیرد.

۴-۳- سناریوی سوم - شیشه دوجداره کم‌گسیل Low-E

در سناریوی سوم، تمامی پنجره‌های مدرسه نور ارم با شیشه دوجداره کم‌گسیل (Low-E) جایگزین شدند، در حالی که سایر پارامترهای مدل شامل هندسه ساختمان، مصالح دیوار و سقف، الگوی بهره‌برداری، سیستم گرمایشی و نرخ تهویه بدون تغییر و مشابه سناریوی پایه در نظر گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار DesignBuilder مبتنی بر موتور EnergyPlus نشان داد که بار سالانه گرمایش از ۱۲۸۰۰۰ به ۱۰۵۰۰۰ کیلووات‌ساعت کاهش یافته که بیانگر ۱۸ درصد صرفه‌جویی در انرژی گرمایشی است.

تحلیل بار ماهانه نیز کاهش مصرف انرژی را در اغلب ماه‌های سرد سال نشان داد. در ماه ژانویه، بار گرمایش از ۱۷۵۰۰ به ۱۵۵۰۰ کیلووات‌ساعت کاهش یافت که معادل ۱۱ درصد کاهش در دوره اوج سرمای سال است. همچنین، بار گرمایش روز اوج از ۶۲۰ به ۵۶۰ کیلووات‌ساعت و توان پیک سیستم گرمایشی از ۹۵ به ۸۸ کیلووات کاهش یافت که به ترتیب بیانگر ۱۰ درصد و ۷ درصد کاهش است. از نظر عملکرد حرارتی، استفاده از شیشه کم‌گسیل موجب کاهش ۳۲ درصدی اتلاف حرارت از سطح پنجره‌ها شد؛ به‌گونه‌ای که شار حرارتی از ۱۹ به ۱۳ وات بر مترمربع کاهش یافت و سهم پنجره‌ها از کل تلفات حرارتی ساختمان از ۳۴ درصد به ۲۵ درصد رسید. این نتایج نشان می‌دهد که بهبود عملکرد جداره‌های شفاف، نقش مؤثری در کاهش اتلاف انرژی ساختمان دارد. از منظر آسایش حرارتی نیز میانگین دمای داخلی از ۱۹٫۰ به ۱۹٫۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت و دامنه نوسان دمای داخلی از ۳٫۱ به ۲٫۶ درجه سانتی‌گراد کاهش پیدا کرد که بیانگر ۱۶ درصد بهبود پایداری حرارتی فضاهای داخلی است. در مجموع، استفاده از شیشه دوجداره کم‌گسیل بدون تغییر در ساختار اصلی ساختمان، توانست مصرف انرژی گرمایشی را به میزان قابل توجهی کاهش داده و هم‌زمان شرایط آسایش حرارتی کاربران را بهبود بخشد؛ از این‌رو، این راهکار می‌تواند به‌عنوان یکی از گزینه‌های عملی و اقتصادی برای بهسازی حرارتی مدارس موجود در اقلیم سرد و کوهستانی تبریز مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۴- سناریوی سوم: شیشه دوجداره کم‌گسیل (Low-E)

ردیف	شاخص عملکرد	سناریوی پایه	سناریوی سوم (Low-E)	میزان تغییر	درصد تغییر
۱	بار سالانه گرمایش (کیلووات ساعت/سال)	۱۲۸۰۰۰	۱۰۵۰۰۰	-۲۳۰۰۰	-۱۸
۲	میانگین بار ماهانه	۱۰۶۰۰	۸۷۵۰	-۱۸۵۰	-۱۸
۳	بیشینه بار ماهانه ژانویه	۱۷۵۰۰	۱۵۵۰۰	-۲۰۰۰	-۱۱
۴	کمینه بار ماهانه ژوئن	۱۲۰۰	۱۱۰۰	-۱۰۰	-۸
۵	میانگین بار هفتگی ژانویه	۴۳۰۰	۳۹۰۰	-۴۰۰	-۹
۶	بار روز اوج سرما	۶۲۰	۵۶۰	-۶۰	-۱۰
۷	توان پیک گرمایش	۹۵	۸۸	-۷	-۷
۸	میانگین دمای داخلی فصل سرد	۱۹٫۰	۱۹٫۵	+۰٫۵	+۳
۹	دامنه نوسان دمای داخلی	۳٫۱	۲٫۶	-۰٫۵	-۱۶
۱۰	مقدار U-value میانگین پوسته	۰٫۸۵	۰٫۷۸	-۰٫۰۷	-۸
۱۱	اتلاف حرارت ساعتی پنجره	۱۹٫۰	۱۳٫۰	-۶٫۰	-۳۲
۱۲	اتلاف حرارت دیوار	۱۴٫۵	۱۴٫۰	-۰٫۵	-۳
۱۳	سهم پنجره‌ها از تلفات کل	۳۴٪	۲۵٪	-۹	—
۱۴	سهم دیوار و سقف از کل	۶۶٪	۷۵٪	+۹	—
۱۵	صرفه‌جویی سالانه انرژی	—	۲۳۰۰۰	—	—
۱۶	کاهش هزینه گرمایش سالانه	—	~۴,۶۰۰,۰۰۰	—	—
۱۷	بهبود پایداری حرارتی داخلی	—	۱۵٪ بهتر	—	—



شکل ۵- نمودار کندل‌استیکی بار گرمایش ماهانه در سناریوی مواد تغییر فازدهنده (PCM)

شکل ۵ نمودار کندل‌استیکی، تغییرات ماهانه بار گرمایش مدرسه نور ارم را در سناریوی سوم نمایش می‌دهد؛ سناریویی که در آن کلیه پنجره‌های موجود ساختمان با شیشه‌های دوجداره کم‌گسیل جایگزین شده‌اند. هر کندل بازه تغییرات ماهانه شامل کمینه، بیشینه و مقدار میانی بار گرمایش را نشان می‌دهد و رنگ‌بندی فانتزی و طیفی نمودار، شدت و الگوی نوسان بار حرارتی را در طول سال برجسته می‌سازد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌های EnergyPlus، استفاده از شیشه کم‌گسیل سبب کاهش محسوس اتلاف حرارت از سطح پنجره‌ها، کاهش جریان سرمای موضعی در مجاورت جداره‌های شفاف و در نتیجه کاهش بار گرمایش در ماه‌های سرد (به‌ویژه ژانویه، فوریه و دسامبر) شده است. این نمودار روند کاهش نوسانات حرارتی و بهبود عملکرد پوسته شفاف را به‌عنوان یکی از مصالح هوشمند مورد مطالعه در این پژوهش به‌خوبی نمایش می‌دهد.

۵-۳- سناریوی چهارم: تقویت عایق حرارتی پوسته با عایق نوین

در سناریوی چهارم، تمرکز اصلی بر کاهش انتقال حرارت رسانشی و تشعشعی از طریق دیوارها و سقف است؛ زیرا در سناریوی پایه مشخص شد که دیوارهای خارجی با سهم حدود ۶۱ درصد و سقف با ۲۸ درصد بیشترین نقش را در تلفات حرارتی مدرسه نور ارم دارند. در این سناریو، لایه‌های عایق موجود در دیوار و سقف با عایق نوین جایگزین شده است؛ عایقی که دارای ضریب انتقال حرارت بسیار پایین‌تر و مقاومت حرارتی بالاتری نسبت به مصالح قبلی است. سایر مشخصات ساختمان مانند ابعاد هندسی، تعداد طبقات، الگوی بهره‌برداری، نرخ تهویه و تنظیمات سیستم گرمایشی بدون تغییر باقی مانده تا اثر خالص بهبود عایق‌بندی بر رفتار حرارتی و بار گرمایش استخراج شود.

شبیه‌سازی EnergyPlus نشان می‌دهد که بار سالانه گرمایش ساختمان از ۱۲۸۰۰۰ کیلووات‌ساعت در سال در وضعیت پایه، به ۸۴۰۰۰ کیلووات‌ساعت در سال در سناریوی عایق نوین کاهش یافته است. این کاهش برابر ۳۴ درصد صرفه‌جویی در انرژی حرارتی سالانه است و بیشترین مقدار کاهش در میان تمامی سناریوهای مورد بررسی محسوب می‌شود. میانگین بار گرمایش ماهانه نیز از حدود ۱۰۶۰۰ کیلووات‌ساعت به ۷۰۰۰ کیلووات‌ساعت رسیده است که نشان‌دهنده کاهش بار گرمایش در تمام ماه‌های سرد، انتقالی و حتی ماه‌های مرزی فصل گرم است. این روند نشان می‌دهد که بهبود عایق پوسته نه تنها در اوج فصل زمستان، بلکه در تمام ساعات شبانه‌روز تأثیر مثبت دارد. در تحلیل ماهانه EnergyPlus، بیشینه بار گرمایش ماه ژانویه از ۱۷۵۰۰ کیلووات‌ساعت در حالت پایه به ۱۳۵۰۰ کیلووات‌ساعت کاهش یافته است؛ یعنی حدود ۲۳ درصد کاهش در سردترین ماه سال. کمینه بار ماهانه نیز از ۱۲۰۰ کیلووات‌ساعت به ۸۰۰ کیلووات‌ساعت رسیده که کاهش حدود ۳۳ درصدی را نشان می‌دهد. این نتایج بیان می‌کند که عایق نوین به‌طور مؤثر از دیوار و سقف در برابر افت حرارتی محافظت کرده و میزان انرژی لازم برای جبران اتلاف حرارت را کاهش داده است. در روز اوج سرمای سال نیز کاهش بار گرمایش بسیار محسوس است؛ به‌طوری‌که بار روز سرد اوج از ۶۲۰ کیلووات‌ساعت به ۴۶۰ کیلووات‌ساعت رسیده است. این مقدار برابر با ۲۶ درصد کاهش در بار روز اوج است و بیانگر آن است که سیستم گرمایشی در زمستان با توان کمتری به تثبیت دما نیاز دارد. توان پیک گرمایش نیز از ۹۵ کیلووات به ۷۲ کیلووات رسیده است. این کاهش ۲۴ درصدی در توان لحظه‌ای مورد نیاز، به‌طور مستقیم بر انتخاب ظرفیت بویلر، مشعل، پمپ‌ها و حتی قطر لوله‌های سیستم اثر دارد و موجب صرفه‌جویی در هزینه اولیه سیستم‌های تأسیساتی می‌شود. یکی از مهم‌ترین خروجی‌های EnergyPlus مربوط به دمای داخلی و پایداری حرارتی است. میانگین دمای داخلی کلاس‌ها در طول دوره سرمای سال از ۱۹٫۰ درجه در سناریوی پایه به ۲۰٫۲ درجه سانتی‌گراد رسیده است؛ یعنی افزایش حدود ۱٫۲ درجه که برای ساختمان آموزشی با اشغال روزانه بالا بسیار اهمیت دارد. دامنه نوسان دمای داخلی روزانه نیز از ۳٫۱ درجه به ۲٫۱ درجه کاهش یافته است که برابر ۳۰ درصد بهبود در پایداری حرارتی است. این کاهش نوسان به این معناست که ساختمان در سناریوی چهارم با تغییرات ناگهانی دمای بیرون کمتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد و سیستم گرمایشی مجبور نیست با چرخه‌های روشن-خاموش مکرر کار کند. از نظر خواص فیزیکی پوسته، مقدار U-value میانگین پوسته از ۰٫۸۵ وات بر مترمربع کلون به ۰٫۴۳ کاهش یافته؛ یعنی حدود ۴۹ درصد بهبود مقاومت حرارتی. همچنین اتلاف حرارت ساعتی از دیوارها از ۱۴٫۵ وات بر مترمربع به ۷٫۸ وات رسیده (کاهش ۴۶ درصدی) و اتلاف سقف از ۱۰٫۳ وات به ۵٫۹ وات کاهش یافته است (کاهش ۴۳ درصدی). این نتایج تأیید می‌کند که عایق نوین نه تنها انرژی عبوری را کاهش داده، بلکه شیب حرارتی بین داخل و بیرون را نیز متعادل‌تر کرده است.

از نظر مالی نیز این سناریو بیشترین صرفه‌جویی را دارد؛ مقدار ۴۴۰۰۰ کیلووات‌ساعت صرفه‌جویی سالانه در انرژی گرمایش با فرض تعرفه متوسط، حدود ۸٫۸۰۰٫۰۰۰ تومان کاهش هزینه در سال ایجاد می‌کند. این مقدار می‌تواند بخشی از هزینه اجرای عایق را در مدت‌زمان کوتاهی جبران کند. در مجموع، سناریوی چهارم بهترین عملکرد را در تمام شاخص‌های حرارتی ارائه داده است: بیشترین کاهش بار سالانه، بیشترین کاهش توان پیک، بیشترین کاهش نوسان حرارتی، بهترین بهبود دمای داخلی و بالاترین صرفه‌جویی اقتصادی. بنابراین این سناریو از نظر EnergyPlus مؤثرترین و علمی‌ترین انتخاب برای نزدیک کردن مدرسه نور ارم به استاندارد ساختمان کم‌مصرف و نزدیک به صفر انرژی است.

جدول ۵- عملکرد حرارتی تفصیلی سناریوی پایه و سناریوی چهارم (عایق نوین پوسته)

ردیف	شاخص عملکرد	سناریوی پایه	سناریوی چهارم (عایق نوین)	میزان تغییر	درصد تغییر
۱	بار سالانه گرمایش (کیلووات/ساعت/سال)	۱۲۸۰۰۰	۸۴۰۰۰	-۴۴۰۰۰	-۳۴
۲	میانگین بار ماهانه گرمایش (کیلووات/ساعت/ماه)	۱۰۶۰۰	۷۰۰۰	-۳۶۰۰	-۳۴
۳	بیشینه بار ماهانه ژانویه	۱۷۵۰۰	۱۳۵۰۰	-۴۰۰۰	-۲۳
۴	کمینه بار ماهانه ژوئن	۱۲۰۰	۸۰۰	-۴۰۰	-۳۳
۵	میانگین بار هفتگی ژانویه (کیلووات/ساعت/هفته)	۴۳۰۰	۳۲۰۰	-۱۱۰۰	-۲۵
۶	بار روز سرد اوج زمستان (کیلووات/ساعت/روز)	۶۲۰	۴۶۰	-۱۶۰	-۲۶
۷	توان پیک گرمایش (کیلووات)	۹۵	۷۲	-۲۳	-۲۴
۸	میانگین دمای داخلی فصل سرد (°C)	۱۹,۰	۲۰,۲	+۱,۲	+۶
۹	دامنه نوسان دمای داخلی شبانه روز (°C)	۳,۱	۲,۱	-۱,۰	-۳۰
۱۰	میانگین U-value پوسته (وات بر مترمربع کلون)	۰,۸۵	۰,۴۳	-۰,۴۲	-۴۹
۱۱	اتلاف حرارت دیوار (وات بر مترمربع)	۱۴,۵	۷,۸	-۶,۷	-۴۶
۱۲	اتلاف حرارت سقف (وات بر مترمربع)	۱۰,۳	۵,۹	-۴,۴	-۴۳
۱۳	سهم دیوار از کل تلفات گرمایشی	٪۶۱	٪۴۰	-۲۱	—
۱۴	سهم سقف از کل تلفات گرمایشی	٪۲۸	٪۱۷	-۱۱	—
۱۵	صرفه جویی سالانه انرژی (کیلووات/ساعت/سال)	—	۴۴۰۰۰	—	—
۱۶	کاهش هزینه سالانه گرمایش (تقریبی، تومان)	—	≈۸,۸۰۰,۰۰۰	—	—
۱۷	بهبود پایداری حرارتی داخلی	—	٪۳۰ بهتر	—	—



شکل ۶- نمودار کندل استیکی بار گرمایش ماهانه در سناریوی چهارم با به کارگیری عایق حرارتی نوین در پوسته خارجی ساختمان

شکل ۶ نمودار کندل استیکی، الگوی تغییرات بار گرمایش ماهانه در سناریوی چهارم را نمایش می‌دهد؛ سناریویی که در آن لایه‌های دیوار و سقف مدرسه نور ارم با عایق حرارتی نوین دارای ضریب انتقال حرارت بسیار پایین جایگزین شده و بدین ترتیب، مسیر اصلی تلفات رسانشی حرارت در پوسته به‌طور چشمگیری کنترل گردیده است. هر کندل، بازه تغییرات ماهانه شامل کمینه، بیشینه و مقدار میانی بار گرمایش را نشان می‌دهد و رنگ‌بندی تدریجی و طیفی نمودار، شدت بار حرارتی و روند فصلی آن را برجسته می‌سازد.

خروجی‌های دقیق EnergyPlus بیان می‌کند که این سناریو، بیشترین کاهش بار گرمایش را در میان تمام سناریوهای پژوهش رقم زده و علاوه بر کاهش ۳۴ درصدی بار سالانه، موجب افت محسوس در توان پیک گرمایش، کاهش نوسانات حرارتی داخلی، و

افزایش پایداری دمایی فضاهای آموزشی شده است. نمودار حاضر به روشنی نشان می‌دهد که به کارگیری عایق پیشرفته در پوسته غیرشفاف، اثرگذارترین مداخله در مسیر نزدیک‌ساختن عملکرد حرارتی ساختمان به استانداردهای ساختمان‌های کم‌مصرف و نزدیک به صفر انرژی در اقلیم سرد و کوهستانی تبریز است.

۳-۶- مقایسه چهار سناریو

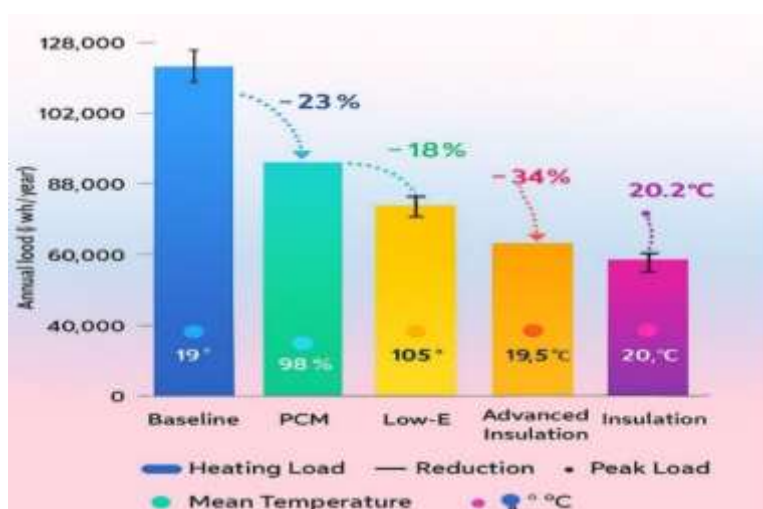
در سناریوی چهارم، به منظور کاهش انتقال حرارت از پوسته ساختمان، عایق دیوارهای خارجی و سقف با عایق نوین جایگزین شد، در حالی که سایر مشخصات ساختمان، شرایط بهره‌برداری، نرخ تهویه و سیستم گرمایشی مشابه سناریوی پایه در نظر گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی در EnergyPlus نشان داد که بار سالانه گرمایش از ۱۲۸۰۰۰ به ۸۴۰۰۰ کیلووات‌ساعت کاهش یافته که معادل ۳۴ درصد صرفه‌جویی انرژی و بیشترین میزان کاهش در میان تمامی سناریوهای بررسی شده است.

در تحلیل ماهانه، میانگین بار گرمایش از ۱۰۶۰۰ به ۷۰۰۰ کیلووات‌ساعت و بار گرمایش ماه ژانویه از ۱۷۵۰۰ به ۱۳۵۰۰ کیلووات‌ساعت کاهش یافت که بیانگر ۲۳ درصد کاهش در سردترین ماه سال است. همچنین، بار گرمایش روز اوج از ۶۲۰ به ۴۶۰ کیلووات‌ساعت و توان پیک سیستم گرمایشی از ۹۵ به ۷۲ کیلووات کاهش یافت که به ترتیب معادل ۲۶ درصد و ۲۴ درصد کاهش است. از نظر آسایش حرارتی، میانگین دمای داخلی کلاس‌ها از ۱۹٫۰ به ۲۰٫۲ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت و دامنه نوسان دمای داخلی از ۳٫۱ به ۲٫۱ درجه سانتی‌گراد کاهش پیدا کرد که بیانگر ۳۰ درصد بهبود پایداری حرارتی است. همچنین، ضریب انتقال حرارت میانگین پوسته از ۰٫۸۵ به ۰٫۴۳ وات بر مترمربع کلین کاهش یافت و اتلاف حرارت دیوارها و سقف به ترتیب ۴۶ درصد و ۴۳ درصد کمتر شد.

از نظر اقتصادی نیز این سناریو با صرفه‌جویی سالانه ۴۴۰۰۰ کیلووات‌ساعت انرژی گرمایشی، حدود ۸٫۸۰۰٫۰۰۰ تومان کاهش هزینه سالانه ایجاد کرد. در مجموع، سناریوی استفاده از عایق نوین بهترین عملکرد را در کاهش بار گرمایش، کاهش توان پیک، بهبود آسایش حرارتی و صرفه‌جویی اقتصادی نشان داد و مؤثرترین گزینه برای ارتقای عملکرد حرارتی مدرسه نور ارم و حرکت به سمت ساختمان‌های کم‌مصرف و نزدیک به صفر انرژی ارزیابی شد.

جدول ۶- مقایسه جامع چهار سناریوی شبیه‌سازی شده بر اساس خروجی EnergyPlus

ردیف	شاخص عملکرد	سناریوی پایه	سناریوی ۲ (PCM)	سناریوی ۳ (Low-E)	سناریوی ۴ (عایق نوین)	بهترین حالت
۱	بار گرمایش سالانه (کیلووات‌ساعت/سال)	۱۲۸۰۰۰	۹۸۰۰۰	۱۰۵۰۰۰	۸۴۰۰۰	سناریوی ۴
۲	درصد کاهش نسبت به پایه	—	٪۲۳	٪۱۸	٪۳۴	سناریوی ۴
۳	میانگین بار ماهانه	۱۰۶۰۰	۸۲۰۰	۸۷۵۰	۷۰۰۰	سناریوی ۴
۴	بیشینه بار ماهانه (ژانویه)	۱۷۵۰۰	۱۴۵۰۰	۱۵۵۰۰	۱۳۵۰۰	سناریوی ۴
۵	کمینه بار ماهانه (ژوئن)	۱۲۰۰	۹۰۰	۱۱۰۰	۸۰۰	سناریوی ۴
۶	بار روز اوج سرمای سال	۶۲۰	۵۰۰	۵۶۰	۴۶۰	سناریوی ۴
۷	توان پیک گرمایش (کیلووات)	۹۵	۷۸	۸۸	۷۲	سناریوی ۴
۸	میانگین دمای داخلی فصل سرد (°C)	۱۹٫۰	۲۰٫۰	۱۹٫۵	۲۰٫۲	سناریوی ۴
۹	نوسان حرارتی داخلی (°C)	۳٫۱	۲٫۳	۲٫۶	۲٫۱	سناریوی ۴
۱۰	میانگین U-value پوسته	۰٫۸۵	۰٫۵۸	۰٫۷۸	۰٫۴۳	سناریوی ۴
۱۱	اتلاف حرارت دیوار (وات/مترمربع)	۱۴٫۵	۹٫۴	۱۴٫۰	۷٫۸	سناریوی ۴
۱۲	اتلاف حرارت سقف (وات/مترمربع)	۱۰٫۳	۶٫۸	۹٫۵	۵٫۹	سناریوی ۴
۱۳	سهم دیوار از تلفات کل	٪۶۱	٪۴۸	٪۵۵	٪۴۰	سناریوی ۴
۱۴	سهم پنجره‌ها از تلفات کل	٪۳۴	٪۳۲	٪۲۵	٪۲۳	سناریوی ۳
۱۵	صرفه‌جویی انرژی (کیلووات‌ساعت/سال)	—	۳۰۰۰۰	۲۳۰۰۰	۴۴۰۰۰	سناریوی ۴
۱۶	کاهش هزینه سالانه (تومان)	—	۶٫۰۰۰٫۰۰۰	۴٫۶۰۰٫۰۰۰	۸٫۸۰۰٫۰۰۰	سناریوی ۴
۱۷	رتبه نهایی عملکرد حرارتی	—	رتبه ۲	رتبه ۳	رتبه ۱	سناریوی ۴



شکل ۷- مقایسه تحلیلی عملکرد حرارتی چهار سناریوی شبیه‌سازی‌شده بر اساس بار گرمایش سالانه ساختمان

شکل ۷، مقایسه‌ای جامع و بصری از بار گرمایش سالانه در چهار سناریوی اصلی پژوهش ارائه می‌دهد. سناریوی پایه نمایانگر وضعیت موجود ساختمان مدرسه نور ارم است، در حالی که سه سناریوی بعدی بیانگر به‌کارگیری انواع مصالح هوشمند و مداخلات حرارتی در پوسته خارجی هستند. همان‌گونه که نمودار نشان می‌دهد، استفاده از مواد تغییر فازدهنده (PCM) در سناریوی دوم موجب کاهش قابل توجه بار حرارتی نسبت به وضعیت موجود شده است؛ در سناریوی سوم نیز جایگزینی شیشه‌های دوجداره کم‌گسیل سبب کاهش اتلاف حرارت از جداره‌های شفاف گردیده است. با این حال، بیشترین کاهش بار گرمایش در سناریوی چهارم مشاهده می‌شود که حاصل به‌کارگیری عایق حرارتی نوین با ضریب انتقال حرارت بسیار پایین در دیوارها و سقف است. الگوی نمایش داده‌شده در نمودار به‌روشنی نشان می‌دهد که عایق نوین در مقایسه با سایر مصالح هوشمند، کاراترین راهکار در کاهش تلفات حرارتی و نزدیک‌سازی عملکرد انرژی ساختمان به استاندارد ساختمان‌های کم‌مصرف در اقلیم سرد و کوهستانی تبریز است.

۷-۳- بحث

یافته‌های این پژوهش در مقایسه با پیشینه‌های علمی نشان می‌دهد که مصالح هوشمند نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش بار گرمایش و ارتقای عملکرد حرارتی ساختمان‌های واقع در اقلیم سرد و کوهستانی تبریز دارند. نتایج شبیه‌سازی EnergyPlus به‌روشنی نشان می‌دهد که هر یک از مصالح هوشمند مورد استفاده در سناریوهای سه‌گانه - شامل مواد تغییر فازدهنده، شیشه دوجداره کم‌گسیل و عایق حرارتی نوین - توانسته‌اند بخشی از الگوی اتلاف حرارت ساختمان را اصلاح کنند، اما شدت و ماهیت اثرگذاری آن‌ها متفاوت است. این یافته‌ها با مطالعات Alassaad و همکاران (۲۰۲۵)، Barbhuiya و همکاران (۲۰۲۵) و Ren (۲۰۲۵) هم‌راستا است؛ آثاری که نشان می‌دهند PCM با تعدیل نوسانات حرارتی و ظرفیت ذخیره‌سازی گرما، مصرف انرژی را کاهش می‌دهد و کارایی آن وابسته به شرایط اقلیمی و محل قرارگیری است. در پژوهش حاضر نیز PCM توانسته است بار گرمایش سالانه را حدود ۲۳ درصد کاهش دهد و دامنه نوسان دمای داخلی را به‌طور محسوسی کاهش دهد، اما شدت اثرگذاری آن کمتر از عایق نوین بوده است. در سناریوی سوم، به‌کارگیری شیشه دوجداره کم‌گسیل موجب کاهش محسوس اتلاف حرارت از جداره‌های شفاف شده و با یافته‌های Bal و (۲۰۲۵) Asha Rani و Stephen و Aigbavboa (۲۰۲۵) هم‌خوانی دارد که بر نقش مصالح واکنش‌پذیر در مدیریت انرژی تابشی و افزایش پایداری حرارتی تأکید می‌کنند. هرچند این سناریو عملکرد قابل قبولی داشته، اما سهم محدود پنجره‌ها نسبت به کل پوسته سبب شده میزان کاهش بار گرمایش کمتر از سناریوی PCM و عایق نوین باشد. مؤثرترین مداخله در این پژوهش، سناریوی چهارم است که در آن عایق حرارتی نوین با ضریب انتقال حرارت بسیار پایین در دیوار و سقف به‌کار گرفته شده است. نتایج این سناریو که کاهش ۳۴ درصدی بار گرمایش سالانه را نشان می‌دهد، کاملاً با یافته‌های پژوهش‌هایی چون Barbhuiya، میرزایی (۱۴۰۳) و برای و همکاران (۱۴۰۲) درباره نقش عایق کاری ارتقایافته در کاهش اتلاف حرارت هم‌راستا است. در شرایط اقلیمی تبریز که سهم دیوار و سقف در تلفات گرمایشی بسیار بالاست، کاهش U-value پوسته بیشترین اثربخشی را داشته و ساختمان را به استانداردهای ساختمان کم‌مصرف و نزدیک به صفر انرژی نزدیک کرده است. در

مجموع، تحلیل نتایج نشان می‌دهد که در اقلیم سرد و کوهستانی تبریز، راهکارهای مبتنی بر بهبود پوسته غیرشفاف (به‌ویژه عایق نوین) بیشترین کارایی را دارند و مصالح هوشمند در صورتی بیشترین اثر را خواهند داشت که با ویژگی‌های اقلیمی و الگوی بهره‌برداری ساختمان هماهنگ شوند. این نتیجه، خلأ موجود در مطالعات داخلی را پر کرده و چارچوبی واقع‌بینانه برای استفاده از مصالح هوشمند در طراحی ساختمان‌های آموزشی کم‌مصرف ارائه می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بهره‌گیری از مصالح هوشمند در پوسته خارجی ساختمان می‌تواند نقشی بسیار مؤثر در کاهش بار گرمایش و ارتقای عملکرد حرارتی ساختمان‌های واقع در اقلیم سرد و کوهستانی تبریز داشته باشد. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در محیط EnergyPlus بیانگر آن است که هر یک از سناریوهای مبتنی بر مصالح هوشمند - شامل مواد تغییر فازدهنده PCM، شیشه دوجداره کم‌گسیل و عایق حرارتی نوین - توانسته‌اند الگویی متمایز از کاهش اتلاف انرژی و افزایش پایداری حرارتی ایجاد کنند. در مقایسه میان سناریوها، عایق حرارتی نوین بیشترین کاهش بار گرمایش را با حدود ۳۴ درصد کاهش سالانه ایجاد کرد و ضریب انتقال حرارت پوسته را به‌شدت پایین آورد. این سناریو همچنین کمترین توان پیک گرمایش، کمترین نوسان دمای داخلی و بیشترین میانگین دمای فصل سرد را ثبت کرد و در مجموع کاراترین گزینه برای نزدیک‌سازی ساختمان به الگوی کم‌مصرف و نزدیک به صفر انرژی شناخته شد. سناریوی دوم (PCM) نیز با کاهش ۲۳ درصدی بار گرمایش و توانایی بالا در تعدیل نوسانات دمایی، عملکرد قابل توجهی داشت و نقش مهمی در بهبود آسایش حرارتی شبانه و تثبیت رفتار دمایی بنا ایفا کرد. سناریوی شیشه Low-E اگرچه کاهش کمتری نسبت به دو سناریوی نخست ایجاد کرد، اما توانست اتلاف حرارت از سطوح شفاف را به‌طور مؤثری کاهش دهد و شرایط آسایش حرارتی فضای داخلی را ارتقا دهد. برآورد کلی یافته‌ها نشان می‌دهد که در اقلیم سرد و کوهستانی تبریز، بیشترین مسیر تلفات حرارتی به اجزای غیرشفاف پوسته اختصاص دارد و به همین دلیل، ارتقای عایق‌بندی دیوار و سقف مؤثرترین راهکار برای کاهش بار گرمایش است. از سوی دیگر، ترکیب هم‌زمان چند نوع مصالح هوشمند نیز می‌تواند اثرات هم‌افزایی ایجاد کند و کارایی سیستم حرارتی ساختمان را بیش از یک گزینه منفرد افزایش دهد.

افزون بر این، نتایج به‌دست‌آمده پاسخی روشن و مستقیم به سؤال اصلی پژوهش ارائه می‌دهد: مصالح هوشمند در اقلیم سرد تبریز توانسته‌اند بار گرمایش را بین ۲۳ تا ۳۴ درصد کاهش دهند و به‌طور معناداری عملکرد حرارتی ساختمان را بهبود بخشند. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که کاهش تقاضای گرمایش از طریق مصالح هوشمند یک پیش‌نیاز اساسی برای تحقق ساختمان‌های صفر انرژی در مناطق سرد به شمار می‌آید و بهره‌گیری هدفمند از آن‌ها می‌تواند مسیر دستیابی به معماری کم‌مصرف و پایدار را تسهیل کند. پژوهش حاضر با ارائه چارچوبی بومی و مبتنی بر شبیه‌سازی دقیق، نشان می‌دهد که استفاده صحیح از مصالح هوشمند می‌تواند گامی جدی در جهت کاهش مصرف انرژی و ارتقای بهره‌وری حرارتی ساختمان‌ها در اقلیم‌های سرد کشور باشد.

از مهم‌ترین محدودیت‌های این پژوهش آن است که داده‌های اقلیمی مورد استفاده بر پایه فایل استاندارد WTH تبریز بوده و اگرچه معتبر است، اما نمی‌تواند تمام نوسانات خرداقلیمی سال‌های اخیر را منعکس کند. همچنین، مدل حرارتی ساختمان با استفاده از تنظیمات استاندارد EnergyPlus برای سیستم گرمایش اجرا شد و به دلیل نبود داده‌های واقعی عملکرد بویلر، مشعل و الگوی مصرف گاز در مدرسه نور ارم، امکان کالیبراسیون دقیق مدل با داده‌های واقعی وجود نداشت. نرخ نفوذ هوا نیز در مدل به‌صورت مقدار ثابت در نظر گرفته شد، در حالی که در شرایط طبیعی تحت تأثیر تغییرات باد، بازشوها و رفتار کاربران قرار دارد و این موضوع می‌تواند در برخی ساعات شبانه‌روز بر بار گرمایش اثرگذار باشد. علاوه بر این، به دلیل محدودیت دسترسی به داده‌های دمایی داخلی ثبت‌شده، تحلیل رفتار واقعی نوسانات حرارتی کلاس‌ها تنها بر اساس خروجی مدل انجام شد و امکان مقایسه مستقیم با داده‌های اندازه‌گیری‌شده فراهم نبود. این موارد در مجموع موجب می‌شود نتایج پژوهش اگرچه دقیق و مبتنی بر شبیه‌سازی حرفه‌ای است، اما همچنان نیازمند بررسی‌های میدانی تکمیلی و اندازه‌گیری واقعی در پروژه‌های مشابه تبریز باشد تا چارچوب ارائه‌شده با شرایط واقعی‌تر اعتبارسنجی شود. با توجه به نتایج تحقیق پیشنهادها زیر مطرح می‌شود:

۱- به‌کارگیری عایق حرارتی نوین در دیوار و سقف ساختمان‌های تبریز برای کاهش بار گرمایش و نزدیک‌سازی عملکرد انرژی به استاندارد صفر انرژی.

- ۲- استفاده هدفمند از مواد تغییر فازدهنده (PCM) در جداره‌های منتخب به‌ویژه سقف برای کاهش نوسانات حرارتی و تثبیت دمای داخلی در شب‌های سرد.
- ۳- جایگزینی پنجره‌های موجود با شیشه دوجداره کم‌گسیل برای کاهش اتلاف حرارت تابشی و افزایش آسایش حرارتی در اقلیم سرد تبریز.
- ۴- تدوین دستورالعمل بومی مصالح هوشمند برای تبریز با تمرکز بر ترکیب بهینه PCM، Low-E و عایق نوین به‌منظور طراحی ساختمان‌های کم‌مصرف و صفر انرژی.

۵- منابع و مراجع

- [1] Alassaad A, Seyedmahmoudian M, Horan B. Energy performance of smart building materials in zero-energy building applications: A comprehensive review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2025; 192: 114237. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114237>.
- [2] Rodrigues J, Martins A, Silva C. Energy consumption patterns in residential buildings: Global comparison and regional disparities. *Building and Environment*. 2023; 237:110347. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110347>.
- [3] Wang S, Cheng L, Huang C. Zero-energy building design: Thermal performance of advanced façade systems using smart materials. *Applied Energy*. 2024; 355:121022. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121022>.
- [4] Barbhuiya S, Islam H, Shalaby S. Intelligent façade materials and technologies for energy-efficient buildings: Advances and prospects. *Journal of Cleaner Production*. 2025; 453:141982. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141982>.
- [5] Bal L, Nandi S, Dey S. Smart building materials and their role in adaptive thermal comfort: A systematic review. *Construction and Building Materials*. 2025; 420:133996. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.133996>.
- [6] Li Y, Zhang Z, Chen M. Integration of renewable energy systems and advanced materials toward next-generation zero-energy buildings. *Energy Reports*. 2025;13: 904–926. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.10.145>.
- [7] Bal S, Asha Rani NR. Next generation building materials for energy efficiency and climate responsive design. *Discover Applied Sciences*. 2025;7:796. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07360-z>.
- [8] Al-Yasiri Q, Al-Maamori M. A comprehensive review of PCM applications in building envelopes for energy efficiency in cold climates. *Energy and Buildings*. 2021;241:110944. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110944>.
- [9] Stephen SS, Aigbavboa CO. Gyroscopic materials and smart technologies: Shaping resilient and energy-efficient buildings. *Intelligent Buildings International*. 2025:1–17. <https://doi.org/10.1080/17508975.2025.2498936>.
- [10] Ren J. Optimizing Phase Change Material Integration in Residential Building Envelopes for Cold Climates. *Journal of Building Physics*. 2025. <https://doi.org/10.1177/17442591251324485>.
- [۱۱] مجتبی‌وی، سیده مریم و ارغوانی، نگین . (۱۴۰۲). واکاوی تأثیر مصالح هوشمند در ارتقاء آسایش ساکنان. رهپویه معماری و شهرسازی، ۷۹-۶۹، (۳)۲. <https://racj.ir/user/articles/1273>
- [۱۲]. میرزایی، علیرضا (۱۴۰۳) کاربرد مصالح هوشمند در معماری ساختمان‌های سبز. رویکردهای پژوهشی در مهندسی عمران و معماری ایران. (۳۵) ص ۳۷-۲۶. www.magiran.com/p2917603

- [۱۳] شیخ لویی بناب، وحید و شقاقی، شهریار. (۱۴۰۱). چگونگی شکل گیری یک ساختمان مسکونی پایدار با استفاده از مواد و مصالح هوشمند در شهر تبریز. مطالعات هنر اسلامی، ۱۹(۴۷)، ۳۰۳-۳۱۸. <https://doi.org/10.22034/rau.2023.2002009.1043>.
- [۱۴] براتی الناز، تشکر سامان، شمس نیا امیر، (۱۴۰۲)، طراحی ساختمان انرژی صفر با استفاده از نرم افزار PVsyst و Energy Plus فصلنامه پژوهش های سیاست گذاری و برنامه ریزی انرژی، ۹ (۱): ۶۴-۹۴ <http://epprjournal.ir/article-1-1119-fa.html>
- [۱۵] عباس زاده، زهره. حق لسان، مسعود. ابراهیمی اصل، حسن. (۱۴۰۱). شبیه سازی ساختمانهای مسکونی با مولفه های مختلف معماری در جهت بهینه سازی مصرف انرژی در شهر تبریز (مطالعه موردی منطقه ۱). فصلنامه جغرافیا (برنامه ریزی منطقه ای)، ۱۲(۴۹)، ۴۳۰-۴۴۸. <https://doi.org/10.22034/jgeoq.2021.162869>
- [۱۶] طاهری گرجی، فاطمه. ابراهیم نژاد، محمدرضا و عباسی، نوشین. (۱۴۰۴). بررسی تحلیلی رابطه میان مصرف انرژی و ویژگی های کالبدی طراحی اقلیمی (فرم، جداره، بازو و بام) در آپارتمان های مسکونی ناحیه معتدل و مرطوب ایران از دیدگاه خبرگان. فصلنامه سیستم های انرژی پایدار، ۴(۴)، ۴۲۷-۴۴۳. <https://doi.org/10.22059/ses.2025.390771.1124>.
- [17] Nilimaa J, Zhaka V. An Overview of Smart Materials and Technologies for Concrete Construction in Cold Weather. *Eng.* 2023;4(2):1550–1580. <https://doi.org/10.3390/eng4020089>.
- [۱۸]. رخشانی نسب، ح.، چهارراهی، م.، سلیمانی دامنه، م. (۱۴۰۲). بررسی و تحلیل شاخص های شهرسازی مؤثر بر مسکن هوشمند در شهر شیراز. فصلنامه برنامه ریزی و توسعه محیط شهری، ۳(۱۰)، ۱۷-۳۴. ۳۰۴۹۵، ۱۱۴۶۱۰. JUEPD.2023.1980290.
- [19] Moulaii M, Lotfi A, RezaeiRad H. Benefiting from smart materials in the shell of desert buildings to control thermal conductivity of interior spaces. *Building Engineering.* 2025;3(2):2196. <https://doi.org/10.59400/be2196>.
- [20] Mirala F, Sajadi B, Akhavan Behabadi MA, Naderi E. The effect of using smart shadings on thermal and visual performances of buildings in Iran: A numerical simulation. *Energy Equipment and Systems.* 2023;11(4):371–386. <https://doi.org/10.22059/ees.2023.2002587.1428>.
- [21] Baylis R, Monaci D, Firth S. Performance evaluation of phase change materials in residential buildings under cold climate conditions. *Applied Thermal Engineering.* 2024;235:121324. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121324>.
- [22] Energy Analysis of Double-Layer PCM System. Energy performance evaluation of a double-layer PCM wall system in cold climate conditions. *Sustainable Cities and Society.* 2023;93:104525. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104525>.
- [23] Alwetaishi N, Alzaed A. Smart construction materials for sustainable and resilient infrastructure innovations. *Innovative Reviews in Engineering and Science.* 2026;3(2):60–72. <https://doi.org/10.31838/INES/03.02.07>.
- [24] Vedrtnam A, Kalauni K, Soares N, Salazar B, Ostertag CP, Taylor HK. Phase change materials for climate-adaptive buildings: A review framed by tropical and Mediterranean climates. *Journal of Energy Storage.* 2025; 125:116938. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116938>.