



The University of Tehran Press

Energy Optimization in a Residential Building in Isfahan with an Emphasis on Building Materials

Zahra Setayesh Khah¹ | Ghanbar Ali Sheikhzadeh² | Javad Divandari^{3*}

1. M.Sc. in Architecture and Energy, Research Institute for Energy, Water and Environment, University of Kashan, Kashan, Iran. Email: z.setayeshkhah@grad.kashanu.ac.ir

2. Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran. Email: sheikhz@kashanu.ac.ir

3. Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Architecture, University of Kashan, Kashan, Iran. Email: j.divandari@kashanu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:

Received: 09 February 2026

Revised: 06 March 2026

Accepted: 12 May 2026

Published Online: 23 September 2026

Keywords:

Hot and Dry Climate,
Building Energy Simulation,
Building Materials,
Energy Consumption Optimization.

ABSTRACT

Managing and reducing energy consumption in residential buildings located in hot-dry climates is a fundamental requirement for sustainable urban development. This study aims to evaluate and optimize the energy performance of the building envelope by modifying its materials and physical components. A typical residential building in District 4 of Isfahan was selected as a representative case of prevailing construction practices. Thermal modeling and building energy simulations were conducted using specialized simulation software. To accurately assess the energy-saving potential, reductions in energy consumption were classified into two categories: methodological reductions and reductions resulting from physical envelope interventions. The results indicated that refining the model's thermal zoning by realistically representing common and occupied spaces reduced the calculated annual energy use intensity from 137.45 to 104.50 kWh/m²·year, corresponding to a 23.97% methodological reduction. Subsequently, the implementation of envelope optimization scenarios—including intermediate insulation of external walls, the application of a reflective cool roof, lightweight internal walls, and triple-glazed windows—further reduced annual energy use intensity to 96.64 kWh/m²·year, representing an actual reduction of 7.52% relative to the revised baseline model. Moreover, integrating the optimized envelope with active solar systems—namely, photovoltaic panels installed at an optimal tilt angle of 38° and a solar water-heating system—reduced the final annual energy use intensity to 90.80 and 85.10 kWh/m²·year, respectively. Ultimately, the optimized model achieved Energy Class B in accordance with the requirements of Part 19 of the Iranian National Building Regulations. The findings provide prioritized passive envelope design strategies and active solar solutions for developing low-energy residential building models in hot-dry climates.

Cite this article: Setayesh Khah, Z.; Sheikhzadeh, Gh. A. & Divandari, J. (2026). Energy Optimization in a Residential Building in Isfahan with an Emphasis on Building Materials. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 5 (4), 809-831. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2026.413177.1231>



© Authors retain the copyright and full publishing rights.
DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2026.413177.1231>

Publisher: University of Tehran Press.

Introduction

Energy management in residential buildings is a key requirement for improving energy efficiency and supporting sustainable development, particularly in hot and dry climates where high solar radiation, low humidity, and large diurnal temperature swings intensify annual cooling and heating demands. In such conditions, the building envelope plays a dominant role in controlling conductive heat transfer through opaque components and solar heat gains through glazing. Therefore, the selection and

configuration of building materials—especially for external walls, roofs, floors, and windows—can substantially influence annual energy consumption. In Isfahan, a major city located in Iran’s hot and dry climatic zone, a large share of the existing residential stock follows common construction practices that are not always optimized for climate-responsive performance. This study aims to quantify, in a step-by-step and comparable manner, the role of envelope material selection and passive envelope design strategies in optimizing annual energy consumption for a typical residential building in District 4 of Isfahan, and to assess the resulting performance against the classification criteria of Iran’s National Building Regulations, Topic 19.

Materials and Methods

A typical residential building representing prevailing design patterns and common plot dimensions in District 4 of Isfahan was selected to provide a reliable baseline for scenario comparison. The building was defined on a 10×20 m plot with 60% site coverage. A baseline energy model was developed in DesignBuilder using the EnergyPlus simulation engine to calculate annual energy use intensity ($\text{kWh/m}^2\cdot\text{year}$). Climatic conditions of Isfahan were considered through standard weather data to support climate-responsive decisions for envelope strategies. To ensure reliability of the simulation environment and workflow, model validation was performed following ASHRAE Standard 140 (Case 600), and key outputs (annual heating and cooling loads and peak demands) were checked against reference values. After establishing the baseline, a sequential parametric analysis was conducted. In each step, one parameter was modified while other conditions were kept constant to isolate the net effect of that measure. The evaluated measures included internal zoning refinement, window/opening definition, external wall insulation configurations (including alternative insulation placements), roof assemblies with different surface finishes (including a reflective option), floor construction with thermal insulation, internal wall alternatives, shading design based on solar geometry, and window component upgrades (frame and glazing types). In addition, two renewable-energy options (solar domestic hot water and rooftop photovoltaic panels) were assessed as complementary measures. The baseline and each scenario were compared using annual energy consumption per unit floor area as the main indicator.

Results

The baseline model showed an annual energy consumption of $137.45 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{year}$. Stepwise improvements in envelope materials and passive design measures produced measurable reductions, and the final optimized configuration reduced annual energy consumption to $96.21 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{year}$, corresponding to an approximate 30% reduction relative to the baseline. Among the opaque envelope measures, external wall improvement was one of the most influential interventions. In particular, placing thermal insulation within the mid-layer of the external wall assembly resulted in the best performance among the tested wall options, indicating that insulation location (not only thickness or material) affects dynamic heat transfer and the effective use of thermal mass. Roof optimization also had a strong impact in the hot and dry context. A roof configuration with a higher-reflectance exterior finish outperformed a conventional ceramic-finished roof by lowering solar heat absorption and reducing cooling demand during warm periods, which improved the annual energy balance. Floor insulation contributed additional savings by reducing heat transfer between indoor spaces and the ground/contact surfaces.

Transparent elements and solar control strategies further improved performance. The inclusion of shading devices designed according to critical solar angles for south-facing openings reduced direct solar gains during peak radiation periods and helped lower cooling loads without compromising basic daylight access. Upgrading window systems—through improved frame selection and high-performance glazing—decreased both unwanted summer heat gains and winter heat losses, supporting year-round efficiency. Internal wall alternatives exhibited a smaller but still noticeable effect, mainly through changes in heat storage and intra-building heat transfer. Finally, renewable-energy scenarios showed that the solar domestic hot water system produced a direct reduction in energy demand associated with hot water preparation, while photovoltaic panels provided additional reduction through on-site electricity generation; in the studied configuration, solar water heating yielded a more pronounced impact on total annual energy use than photovoltaics alone.

Discussion and Conclusion

The results confirm that energy optimization in Isfahan's hot and dry climate is primarily driven by envelope-based decisions and material selection, implemented within a climate-responsive design logic. The observed reduction from 137.45 to 96.21 kWh/m²·year demonstrates that substantial savings can be achieved through a coordinated set of passive and material-focused measures rather than relying exclusively on active mechanical upgrades. The superiority of mid-layer wall insulation highlights an important design implication: the placement of insulation can enhance the interaction between thermal mass and indoor temperature stability, improving performance beyond what is expected from nominal resistance alone. Similarly, reflective roof finishes are highly effective in climates with intense solar radiation, making them a practical strategy for reducing cooling loads. Improvements in glazing and shading are essential complements, because uncontrolled solar gains through windows can offset gains achieved in opaque elements. Based on Iran's National Building Regulations (Topic 19), the optimized design achieves energy class B, indicating that compliance-oriented envelope optimization can deliver meaningful performance improvements in typical residential buildings. Overall, the findings provide a quantitative basis for designers and decision-makers to prioritize envelope material strategies for similar residential projects in hot and dry regions, and they support the combined use of passive measures and selected renewable-energy systems to further improve building energy performance.



انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

بهینه‌سازی مصرف انرژی در یک ساختمان مسکونی در اصفهان با تأکید بر مصالح ساختمانی

زهره ستایش‌خواه^۱ | قنبرعلی شیخ‌زاده^۲ | جواد دیواندری^{۳*}

۱. کارشناسی ارشد معماری و انرژی، پژوهشکده انرژی، آب و محیط زیست، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران. رایانامه: z.setayeshkhah@grad.kashanu.ac.ir

۲. استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، رایانامه: sheikhz@kashanu.ac.ir

۳. نویسنده مسئول، استادیار دانشکده معماری و هنر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، رایانامه: j.divandari@kashanu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

کلیدواژه:

اقلیم گرم و خشک،
بهینه‌سازی مصرف انرژی،
شبیه‌سازی انرژی ساختمان،
مصالح ساختمانی.

مدیریت و کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی اقلیم گرم و خشک، از الزامات اساسی توسعه پایدار شهری است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و بهینه‌سازی عملکرد انرژی پوسته ساختمان بر اساس اصلاح مصالح و اجزای فیزیکی، یک ساختمان مسکونی تیپ در منطقه ۴ اصفهان را به عنوان نمونه نماینده ساخت‌وسازهای رایج مورد بررسی قرار می‌دهد. مدل‌سازی حرارتی و شبیه‌سازی مصرف انرژی ساختمان در نرم‌افزار تخصصی انجام گرفت. به منظور تحلیل دقیق پتانسیل‌های صرفه‌جویی، نرخ کاهش مصرف انرژی به دو بخش «متدولوژیک^۱» و «فیزیکی پوسته» تفکیک شد. نتایج نشان داد تصحیح زون‌بندی حرارتی مدل (واقعی‌سازی مشاعات و فضاها)، مصرف محاسباتی را از ۱۳۷/۴۵ به ۱۰۴/۵۰ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال (۲۳/۹۷ درصد کاهش متدولوژیک) کاهش می‌دهد. در گام بعد، اعمال سناریوهای بهینه‌سازی پوسته شامل عایق کاری میانی دیوارهای خارجی، استفاده از بام بازتابی سرد، سبک‌سازی دیوارهای داخلی و به کارگیری شیشه‌های سه‌جلداره، مصرف انرژی را به ۹۶/۶۴ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال (۷/۵۲ درصد کاهش واقعی نسبت به پایه اصلاح‌شده) رساند. همچنین، تلفیق پوسته بهینه با سامانه‌های فعال خورشیدی (پنل فتوولتائیک با زاویه بهینه ۳۸ درجه و آب‌گرم‌کن خورشیدی) مصرف انرژی نهایی را به ترتیب به ۹۰/۸۰ و ۸۵/۱۰ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال کاهش داد. در نهایت، مدل بهینه‌سازی شده موفق به کسب رده انرژی «ب» مطابق با الزامات مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان شد. یافته‌های این پژوهش، راهبردهای اولویت‌دار طراحی پوسته غیرفعال و فعال را برای توسعه الگوهای کم‌مصرف در اقلیم گرم و خشک ارائه می‌دهد.

استناد: ستایش‌خواه، زهره؛ شیخ‌زاده، قنبرعلی و دیواندری، جواد (۱۴۰۵). بهینه‌سازی مصرف انرژی در یک ساختمان مسکونی در اصفهان با تأکید بر مصالح ساختمانی. فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۵ (۴) ۸۰۹-۸۳۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2026.413177.1231>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2026.413177.1231>



۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، افزایش مصرف انرژی در بخش ساختمان به یکی از چالش‌های اصلی توسعه پایدار تبدیل شده است؛ به گونه‌ای که در مقیاس جهانی، ساختمان‌ها حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد از مصرف نهایی انرژی و انتشار پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از آن را به خود اختصاص می‌دهند. از این‌رو، بهینه‌سازی عملکرد انرژی ساختمان‌ها از مؤثرترین راهبردها برای بهبود شاخص‌های زیست‌محیطی است [۱]. بخش قابل توجهی از مصرف انرژی ساختمان‌ها به الگوی طراحی پوسته و میزان انطباق آن با شرایط اقلیمی وابسته است و طراحی اقلیم‌محور می‌تواند مصرف انرژی را به طور معناداری کاهش دهد [۲]. اصفهان به دلیل قرارگیری در پهنه اقلیمی گرم و خشک با تابستان‌های گرم، زمستان‌های سرد و نوسان دمایی بالا شناخته می‌شود که این ویژگی‌ها بارهای حرارتی و برودتی چشمگیری را به ساختمان‌های مسکونی تحمیل می‌کنند. در این میان، پوسته ساختمان شامل دیوارهای خارجی، بام، کف و بازشوها به عنوان مرز میان محیط داخلی و خارجی، نقش مستقیمی در کنترل تبادلات حرارتی دارد [۳]. بهبود ویژگی‌های حرارتی مصالح پوسته مانند موقعیت قرارگیری عایق در لایه میانی یا سمت داخلی/خارجی، رفتار حرارتی دیوار و تأخیر زمانی انتقال حرارت را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد [۴].

در چارچوب پایداری شهری، ارتقای عملکرد انرژی ابنیه یکی از مؤلفه‌های کلیدی در کاهش آسیب‌پذیری کالبدی و تقویت ظرفیت مدیریت منابع در شهرها تعریف می‌شود [۵] که ارزش شهرنشینی پایدار را از طریق بهبود کارایی مصرف منابع و کیفیت محیط زندگی ارتقا می‌دهد [۶]. امروزه، توسعه ابزارهای تحلیل و شبیه‌سازی انرژی امکان مدل‌سازی دقیق اثر متغیرهای پوسته و شرایط اقلیمی را فراهم کرده است [۷]؛ اما قابلیت اتکا به خروجی‌ها مستلزم انتخاب آگاهانه نرم‌افزار بر اساس معیارهایی همچون دقت محاسبات و قابلیت مدل‌سازی اجزای پوسته است [۸]. علی‌رغم انجام پژوهش‌های متعدد در زمینه عایق کاری و بازشوها، مطالعات پیشین در شهر اصفهان غالباً بر شاخص‌های نور روز یا کیفیت بصری متمرکز بوده‌اند [۹] و پژوهشی که به بررسی گام‌به‌گام، کمی و کاربردی اثر ارتقای مصالح پوسته روی یک تیپ مسکونی متداول در اصفهان پرداخته باشد، بسیار محدود است. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف رفع این خلأ پژوهشی، به شبیه‌سازی و ارزیابی کمی سناریوهای بهینه‌سازی مصالح پوسته در یک نمونه نماینده مسکونی در اصفهان می‌پردازد.

۲. پیشینه پژوهش

در دهه‌های اخیر، افزایش مصرف انرژی در بخش ساختمان و پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی آن، موضوع بهینه‌سازی عملکرد انرژی ساختمان‌ها را به یکی از محورهای اصلی پژوهش در معماری و مهندسی ساختمان تبدیل کرده است. ساختمان‌ها سهم قابل توجهی از مصرف انرژی نهایی را به خود اختصاص می‌دهند و در بسیاری از اقلیم‌ها، بخش عمده این مصرف به بارهای گرمایشی و سرمایشی مربوط است. بنابراین، هر راهکاری که بتواند انتقال حرارت از پوسته ساختمان را کاهش دهد، به طور مستقیم در کاهش مصرف انرژی و ارتقای آسایش حرارتی مؤثر خواهد بود [۱۰]. در ادبیات پژوهش، تاب‌آوری به توانایی یک سامانه برای جذب اختلال، حفظ عملکرد و بازگشت به وضعیت پایدار اشاره دارد. هالینگ^۱ مفهوم تاب‌آوری اکولوژیکی^۲ را به عنوان توانایی سیستم‌ها برای سازگاری با تغییرات و حفظ عملکرد اصلی معرفی کرده است [۱۱]. در حوزه محیط ساخته‌شده نیز تاب‌آوری و پایداری به عنوان دو رویکرد مکمل برای کاهش آسیب‌پذیری ساختمان‌ها و شهرها در برابر تنش‌های محیطی مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۲]. با این حال، بسیاری از مطالعات پیشین در سطح مفهومی باقی مانده‌اند و کمتر به سنجش کمی اثر اجزای پوسته ساختمان بر مصرف انرژی پرداخته‌اند. در میان اجزای ساختمان، پوسته خارجی نقش اصلی را در کنترل تبادل حرارت میان فضای داخل و خارج ایفا می‌کند. دیوارهای خارجی، بام، بازشوها و مصالح به‌کاررفته در آن‌ها می‌توانند میزان جذب، ذخیره و انتقال حرارت را تغییر دهند. استفاده از مصالح با ضریب هدایت حرارتی پایین، افزایش مقاومت حرارتی جداره‌ها و کنترل نسبت سطح بازو به دیوار از جمله راهکارهای مهم برای کاهش بارهای گرمایشی و سرمایشی است [۱۳]. همچنین، بهبود

1. Holling

2. Ecological Resilience

کیفیت حرارتی بازشوها و استفاده از شیشه‌های مناسب می‌تواند از اتلاف انرژی در دوره سرد و ورود حرارت ناخواسته در دوره گرم جلوگیری کند [۱۴]. مطالعات مربوط به ساختمان‌های کم‌مصرف نشان می‌دهد کاهش معنادار مصرف انرژی معمولاً از طریق یک راهکار منفرد حاصل نمی‌شود، بلکه نتیجه ترکیب چند مداخله هم‌زمان در طراحی و بهره‌برداری ساختمان است. بهبود پوسته، کنترل تابش خورشیدی، استفاده از سامانه‌های کارآمد و توجه به شرایط اقلیمی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در کاهش مصرف انرژی ساختمان محسوب می‌شوند [۱۵]. با این حال، بهینه‌سازی پوسته ساختمان معمولاً نخستین و مؤثرترین گام در کاهش تقاضای انرژی است، زیرا این بخش مستقیم بر بار گرمایشی و سرمایشی اثر می‌گذارد.

کابزا^۱ و همکاران در یک مطالعه تجربی روی راهکارهای ساختمانی مبتنی بر ماده تغییر فازدهنده^۲ در دیوار آجری، نشان دادند این راهکار می‌تواند دمای داخلی را در شرایط اوج بار حرارتی حدود ۱ تا ۳ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد و با افزایش اینرسی حرارتی، نوسان دمایی را نسبت به دیوار مرجع کم کند [۱۶]. این مقدار کاهش دما در پژوهش‌های مرتبط با سرمایش غیرفعال، یک شاخص مهم برای ارزیابی عملکرد پوسته به شمار می‌آید. بنابراین، این منبع نه فقط به عنوان یک مطالعه نظری، بلکه به عنوان شواهدی تجربی بر اثر مستقیم مصالح ساختمانی بر کاهش انتقال حرارت و بهبود عملکرد انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اقلیم‌های گرم و خشک، نقش پوسته ساختمان اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. شدت تابش خورشیدی، اختلاف محسوس دمای شب و روز، رطوبت پایین و نیاز هم‌زمان به کاهش بار سرمایشی در روز و کنترل اتلاف حرارت در شب، شرایطی ایجاد می‌کند که انتخاب مصالح، ضخامت لایه‌ها و نحوه طراحی جدارها بسیار تعیین‌کننده می‌شود. پژوهش‌های مرتبط با طراحی اقلیمی نشان داده‌اند استفاده از جرم حرارتی مناسب می‌تواند نوسانات دمای داخلی را کاهش دهد و در برخی شرایط، دمای داخل را چند درجه پایین‌تر نگه دارد [۱۷]. همچنین، استفاده از عایق حرارتی در جدارهای خارجی می‌تواند انتقال حرارت میان داخل و خارج را کاهش دهد و به بهبود آسایش حرارتی کمک کند [۱۸]. فرم ساختمان نیز از دیگر عوامل مؤثر بر عملکرد انرژی است. نسبت سطح به حجم، جهت‌گیری بنا، نحوه استقرار بازشوها و میزان دریافت تابش خورشیدی می‌توانند مصرف انرژی ساختمان را تحت تأثیر قرار دهند. در اقلیم گرم و خشک، فرم فشرده‌تر و کنترل سطوح آفتاب‌گیر می‌تواند از ورود حرارت ناخواسته به فضای داخلی جلوگیری کند [۱۹]. از این‌رو، بررسی مصرف انرژی ساختمان باید به صورت یکپارچه و در ارتباط با فرم، پوسته، مصالح و شرایط اقلیمی انجام شود.

پیشرفت ابزارهای شبیه‌سازی انرژی، امکان ارزیابی دقیق‌تر اثر هر یک از مؤلفه‌های ساختمان را فراهم کرده است. با استفاده از شبیه‌سازی، می‌توان سهم دیوار خارجی، بام، کف، پنجره و مصالح را در مصرف انرژی سالانه ساختمان به صورت جداگانه بررسی کرد. این رویکرد باعث شده است که پژوهش‌های جدید از توصیف‌های کلی فاصله بگیرند و به سمت تحلیل عددی و مقایسه سناریوهای مختلف طراحی حرکت کنند [۲۰]. کولوکوتسا^۳ و همکاران نشان داده‌اند ترکیب پوسته کارآمد با سامانه‌های کنترلی و فناوری‌های نوین می‌تواند عملکرد انرژی ساختمان را بهبود دهد [۲۱]. این موضوع نشان می‌دهد کاهش مصرف انرژی در ساختمان تنها وابسته به یک عامل نیست، بلکه حاصل هماهنگی میان طراحی کالبدی، کیفیت مصالح، سامانه‌های تأسیساتی و نحوه بهره‌برداری است. با این حال، در ساختمان‌های مسکونی، اصلاح پوسته یکی از راهکارهای مؤثر و در دسترس برای کاهش مصرف انرژی محسوب می‌شود. سانتاموریس و کولوکوتسا در یک مقاله مروری، مجموعه‌ای از روش‌های سرمایش غیرفعال و دفع حرارت را در ساختمان‌ها و سازه‌های مختلف بررسی کرده‌اند [۲۲]. این منبع نشان می‌دهد روش‌هایی مانند سایه‌اندازی، تهویه طبیعی، کنترل تابش، افزایش بازتاب سطوح و بهبود رفتار حرارتی پوسته، در شرایط مناسب می‌توانند دمای هوای داخل را حدود ۱ تا ۵ درجه سانتی‌گراد کاهش دهند و در برخی کاربردها، کاهش بار سرمایشی را حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد ایجاد کنند. در برخی ترکیب‌های پیشرفته‌تر، صرفه‌جویی انرژی حتی به حدود ۲۰ تا ۴۰ درصد نیز می‌رسد [۲۲]. بنابراین، این منبع به عنوان پشتوانه نظری برای راهکارهای سرمایش غیرفعال و بیان اثر کمی آن‌ها بر کاهش مصرف انرژی قابل استفاده است.

1. Cabeza

2. PCM-Phase Change Material

3. Kolokotsa

از سوی دیگر، پژوهش‌های مرتبط با اقلیم‌های خاص نشان می‌دهند نتایج مطالعات انرژی ساختمان را نمی‌توان بدون توجه به شرایط محلی به همه مناطق تعمیم داد. کارایی مصالح، میزان تأثیر عایق‌کاری، عملکرد سایه‌انداز و نقش جرم حرارتی در هر اقلیم متفاوت است [۲۳]. این مسئله در شهر اصفهان اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا این شهر دارای اقلیم گرم و خشک، تابش خورشیدی زیاد و نوسان دمایی قابل توجه است. در چنین شرایطی، پوسته ساختمان نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش بار سرمایشی و گرمایشی دارد. بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد با وجود مطالعات متعدد درباره پایداری، تاب‌آوری، طراحی اقلیمی، عایق‌کاری و کاهش مصرف انرژی، هنوز خلأیی جدی در زمینه تحلیل کمی و بومی اجزای پوسته ساختمان‌های مسکونی در اقلیم گرم و خشک اصفهان وجود دارد. بسیاری از پژوهش‌های پیشین یا در سطح مفهومی باقی مانده‌اند، یا نتایج آن‌ها به شرایط اقلیمی و الگوی ساخت‌وساز اصفهان قابل تعمیم مستقیم نیست. از این‌رو، پژوهش حاضر با تمرکز بر یک نمونه مسکونی متداول در اصفهان، اثر مرحله‌ای اجزای پوسته مانند دیوار خارجی، بام و مصالح مرتبط را بر مصرف انرژی سالانه بررسی می‌کند. هدف این پژوهش ارائه تحلیلی کمی و قابل سنجش از نقش پوسته ساختمان در کاهش مصرف انرژی است تا بتواند مبنایی برای تصمیم‌گیری در طراحی ساختمان‌های مسکونی کم‌مصرف در اقلیم گرم و خشک فراهم کند.

۳. روش تحقیق

این پژوهش با بهره‌گیری از روش شبیه‌سازی انرژی ساختمان و با هدف ارزیابی و بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی شهر اصفهان انجام شده است. به منظور دستیابی به دقت مناسب در مدل‌سازی، ابتدا اطلاعات مربوط به پلان‌ها، نماها، ابعاد فضاها، موقعیت و اندازه بازشوها و همچنین مشخصات مصالح ساختمانی بر اساس الگوهای متداول ساخت‌وساز در این شهر گردآوری شد. بر همین اساس، یک الگوی ساختمانی مسکونی در زمینی با ابعاد 20×10 متر طراحی شد که طرح آن مطابق با ضوابط رایج معماری مسکونی و متناسب با شرایط اقلیمی منطقه تنظیم شده است. داده‌های اقلیمی مورد نیاز در قالب فایل استاندارد ای‌پی‌دبلیو^۱ از پایگاه داده‌های اقلیمی دریافت و در نرم‌افزار کلایمت کانسولنت^۲ برای تحلیل شرایط زیست‌اقلیمی شهر اصفهان مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل نمودارهای بیوکلیماتیک شامل بررسی شرایط آسایش حرارتی، میزان تابش خورشیدی، دمای هوا، رطوبت نسبی و الگوهای تهویه طبیعی بوده که مبنای تعیین راهبردهای طراحی اقلیمی و تعریف پارامترهای حرارتی در مدل انرژی قرار گرفت.

در ادامه، مدل سه‌بعدی ساختمان در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر^۳ ایجاد شد و تحلیل انرژی آن با بهره‌گیری از موتور شبیه‌سازی انرژی پلاس^۴ انجام گرفت. در مرحله نخست، یک مدل پایه با مشخصات متداول ساخت در شهر اصفهان تعریف شد و مصرف انرژی سالانه آن مطابق شرایط موجود، به عنوان مبنای مقایسه تعیین شد. در ادامه، با استناد به الزامات مطرح‌شده در مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان ایران، مجموعه‌ای از سناریوهای مرتبط با بهبود عملکرد حرارتی پوسته ساختمان تدوین شد. این سناریوها شامل ارتقای عایق‌کاری دیوارهای خارجی، انتخاب مصالح و لایه‌بندی مناسب برای بام، بهینه‌سازی ساختار کف، بررسی عملکرد حرارتی دیوارهای داخلی، انتخاب نوع و جنس مناسب قاب پنجره، مقایسه انواع شیشه‌های کم‌گسیل و چندجلداره و بهینه‌سازی ابعاد سایبان‌ها بود. تمامی این موارد مطابق با راهنماها، الزامات حدی و شاخص‌های بهره‌وری انرژی مطرح‌شده در مبحث ۱۹ بوده و به صورت مرحله‌ای مورد تحلیل قرار گرفتند تا تأثیر هر جزء پوسته بر کاهش بار گرمایش و سرمایش ساختمان مشخص شود [۲۳]. در فرایند تحلیل، در هر گام تنها یک پارامتر نسبت به سناریوی مرجع همان مرحله تغییر داده شد تا اثر آن به صورت مجزا قابل ارزیابی باشد. به این ترتیب، بخشی از سناریوها به صورت تراکمی و بخشی دیگر به صورت تک‌متغیره تحلیل شدند. پس از تعیین گزینه‌های بهینه در اجزای مختلف پوسته ساختمان، در مرحله نهایی عملکرد سامانه‌های انرژی خورشیدی شامل آب‌گرم‌کن خورشیدی و صفحات فتوولتاییک تولید برق خورشیدی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. شاخص اصلی

1. EPW
2. Climate Consultant
3. DesignBuilder
4. EnergyPlus

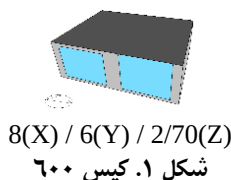
ارزیابی در تمامی مراحل، میزان مصرف سالانه انرژی بر حسب کیلووات‌ساعت بر مترمربع در نظر گرفته شد و نتایج هر سناریو به صورت مقایسه‌ای با مدل پایه تحلیل شد. این فرایند امکان شناسایی مناسب‌ترین ترکیب مصالح و راهکارهای طراحی را برای کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی واقع در اقلیم گرم و خشک شهر اصفهان فراهم ساخت.

۴. اعتبارسنجی نرم‌افزار

به منظور اطمینان از صحت عملکرد نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر، فرایند اعتبارسنجی بر اساس استاندارد ۱۴۰ اشری^۱ و با استفاده از کیس ۶۰۰، مربوط به ساختمان کم‌جرم^۲، انجام شد. انتخاب این کیس فقط برای صحت‌سنجی عملکرد محاسباتی نرم‌افزار است و ارتباطی با مصالح بومی اصفهان ندارد. در این راستا، مشخصات هندسی، لایه‌بندی پوسته و شرایط مرزی شامل سیستم گرمایش و سرمایش ایده‌آل، نرخ نفوذ هوا و فایل آب‌وهوایی مرجع، مطابق الزامات استاندارد تعریف شد و شبیه‌سازی با گام زمانی یک‌ساعته اجرا شد. برای ارزیابی دقت، نتایج شبیه‌سازی شامل بار سالانه و پیک بارهای سرمایش و گرمایش با مقادیر مرجع اشری مقایسه شد (جدول ۱). نتایج این مقایسه نشان داد اختلاف‌ها در بازه مجاز استاندارد قرار دارند؛ بنابراین، مدل‌سازی انجام‌شده از دقت کافی برخوردار است و می‌توان از آن در مراحل بعدی پژوهش استفاده کرد. اعتبارسنجی بر اساس پروتکل استاندارد ANSI/ASHRAE Standard 140 انجام شد. نتایج مدل‌سازی در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر با موتور انرژی‌پلاس، بازه‌های اطمینان ارائه‌شده در این استاندارد مطابقت داشت که نشان‌دهنده قابلیت اطمینان بالای ابزار شبیه‌سازی در تحلیل حرارتی ساختمان است.

جدول ۱. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با مقادیر مرجع ۱۴۰ اشری - کیس ۶۰۰ (نگارندگان)

درصد خطا	اختلاف	مقدار شبیه‌سازی	مقدار مرجع اشری	شاخص
۲/۵٪	۰/۱۲	۴/۹۲	۴/۸۰	بار سالانه گرمایش (مگاوات‌ساعت)
۳٪	۰/۱۳	۶/۴۸	۶/۳۵	بار سالانه سرمایش (مگاوات‌ساعت)
۱/۸٪	۰/۰۶	۳/۳۱	۳/۲۵	پیک گرمایش (کیلووات)
۲/۱٪	۰/۰۷	۳/۳۴	۳/۲۷	پیک سرمایش (کیلووات)



۵. تحلیل شرایط اقلیمی

اقلیم اصفهان از نوع گرم و خشک است و بر اساس داده‌های موجود، میانگین دمای سالانه حدود ۱۶ تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد است. در گرم‌ترین ماه سال، یعنی تیرماه، دما تا حدود ۴۲ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد و در سردترین ماه، یعنی دی‌ماه، دما تا حدود ۱۲- درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. این دامنه دمایی نشان‌دهنده نوسان حرارتی زیاد و ضرورت توجه به راهکارهای پوسته‌محور برای کنترل تبادل حرارت است. رطوبت نسبی در بیشتر ایام سال پایین است و باد غالب از غرب و جنوب‌غرب می‌وزد؛ با میانگین سرعت سالانه حدود ۳/۵ متر بر ثانیه و گاهی تا حدود ۱۵ متر بر ثانیه. همچنین، تابش شدید خورشید در فصل گرم، به‌ویژه در جبهه‌های غربی و جنوبی، اهمیت سایه‌انداز، کنترل بازشوها، استفاده از جرم حرارتی و عایق‌کاری مناسب را افزایش می‌دهد. بر این اساس، طراحی اقلیمی در این پروژه باید بر کاهش دریافت حرارت تابشی، تقویت تهویه طبیعی و بهینه‌سازی پوسته ساختمان متمرکز باشد.

۶. پارامترهای مورد تحلیل در طراحی در شهر اصفهان و مشخصات مصالح پیشنهادی

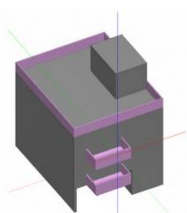
در این پژوهش، به منظور دستیابی به یک الگوی دقیق برای بهینه‌سازی مصرف انرژی، مجموعه‌ای از پارامترهای مؤثر بر عملکرد حرارتی ساختمان به صورت گام به گام در نرم‌افزار شبیه‌سازی ارزیابی شد. شرح مراحل به صورت زیر است:

۶-۱. مدل‌سازی اولیه ساختمان

در نخستین مرحله، فایل اقلیمی مربوط به ایستگاه هواشناسی شهید بهشتی اصفهان در بخش موقعیت مکانی نرم‌افزار وارد شد. سپس مدل پایه بر اساس یک الگوی تیپ و متداول واحد مسکونی در بافت شهری اصفهان انتخاب و ترسیم شد؛ به گونه‌ای که ابعاد کلی، تعداد طبقات، نحوه استقرار فضاها و نسبت بازشوها نماینده الگوی رایج ساخت‌وساز مسکونی در این شهر باشد. مبنای انتخاب این مدل، ایجاد یک نمونه مرجع ثابت و قابل تکرار برای انجام مقایسه مرحله‌ای سناریوهای مختلف پوسته ساختمان، شامل دیوار خارجی، بام، بازشوها و مصالح، بوده است؛ به طوری که در تمام مراحل پژوهش، تنها متغیرهای مورد بررسی تغییر کرده و سایر ویژگی‌های هندسی، کاربری و شرایط بهره‌برداری ثابت نگه داشته شود. فرم کلی ساختمان شکل ۲ به عنوان پایه مدل‌سازی ترسیم شد تا امکان بررسی شرایط واقعی اقلیمی و تطبیق رفتار حرارتی ساختمان با محیط فراهم شود. بر اساس شبیه‌سازی مدل پایه، میزان مصرف انرژی سالانه ساختمان برابر با ۱۳۷/۴۵ کیلووات ساعت بر مترمربع به دست آمده و نتایج کامل در جدول ۲ ارائه شده است. به منظور تعیین دقیق مشخصات مصالح پوسته ساختمان، برای هر یک از اجزای دیوار خارجی، بام و کف از فایل محاسباتی مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان و فایل تعیین رده انرژی مصالح استفاده شد. در این فرایند، مصالح متناظر با رده‌های انرژی EC+ و EC++ استخراج و پس از کنترل مقادیر حرارتی، در نرم‌افزار شبیه‌سازی وارد شدند. برای دیوار خارجی نیز چهار حالت شامل عایق کاری همگن، عایق کاری خارجی، عایق کاری داخلی و عایق کاری میانی به طور جداگانه بررسی شد. به منظور شفافیت بیشتر، خلاصه مشخصات لایه‌ها در تصویر جدول‌های اکسل ارائه شده است.

در خصوص بالکن، با توجه به اینکه در بسیاری از نمونه‌های اجرایی اصفهان بالکن‌ها به صورت مسقف اجرا می‌شوند، لازم است توضیح داده شود که در این پژوهش بالکن بدون سقف به عنوان حالت پایه در نظر گرفته شد تا اثر سایه‌اندازی ناشی از سقف بالکن به عنوان یک عامل مداخله‌گر وارد تحلیل اولیه نشود و ارزیابی عملکرد حرارتی پوسته با دقت بیشتری انجام گیرد. به بیان دیگر، حذف سقف بالکن در مدل پایه با هدف تعریف یک وضعیت ساده، قابل کنترل و محافظه‌کارانه انجام شد تا تأثیر مستقیم اجزای اصلی پوسته ساختمان بر مصرف انرژی به صورت مستقل بررسی شود. بدیهی است که وجود سقف برای بالکن می‌تواند از طریق ایجاد سایه، بخشی از دریافت تابش خورشیدی را کاهش دهد، اما از آنجا که هدف این پژوهش در مرحله پایه، سنجش اثر مستقیم مؤلفه‌های اصلی پوسته بوده است، این عامل از مدل اولیه حذف شد تا امکان مقایسه روشن‌تر میان سناریوهای مختلف فراهم شود.

شایان یادآوری است سناریوهای بهینه‌سازی در این پژوهش به دو صورت اعمال شده‌اند: برخی سناریوها (نظیر عایق کاری دیوار، بام، کف و بازشوها) به صورت تراکمی و گام به گام روی یکدیگر اعمال شده‌اند تا مدل بهینه نهایی شکل گیرد؛ در حالی که برخی دیگر از پارامترها (نظیر کرسی‌چینی، انواع سایبان‌ها و نوع قاب پنجره) به صورت تک‌متغیره و مستقل روی مدل زون‌بندی شده ارزیابی شده‌اند تا اثر خالص هر متغیر بدون هم‌پوشانی با سایر عوامل سنجیده شود. علت نوسان برخی اعداد در جداول مراحل نیز ناشی از همین تفکیک ساختاری در فرایند تحلیل است.



شکل ۲. مدل‌سازی اولیه ساختمان

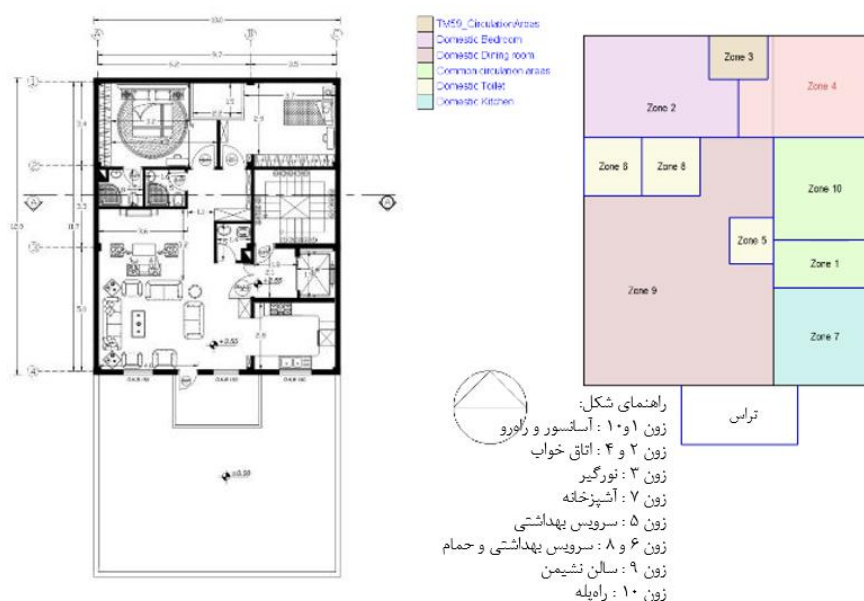
جدول ۲. نتایج شبیه‌سازی دیزاین‌بیلدر - مدل‌سازی اولیه ساختمان

شاخص	مقدار انرژی کل (کیلووات‌ساعت)	انرژی به ازای کل زیربنای ساختمان (کیلووات‌ساعت بر مترمربع)	انرژی به ازای زیربنای فضاهای دارای تهویه (کیلووات‌ساعت بر مترمربع)
انرژی کل سایت	۴۱۳۳۵/۲۵	۱۳۷/۴۵	۱۳۷/۴۵
انرژی خالص سایت	۴۱۳۳۵/۲۵	۱۳۷/۴۵	۱۳۷/۴۵
انرژی کل منبع	۱۰۷۶۷۷/۱۱	۳۵۸/۹۳	۳۵۸/۹۳
انرژی خالص منبع	۱۰۷۶۷۷/۱۱	۳۵۸/۹۳	۳۵۸/۹۳

۶-۲. زون‌بندی فضاهای داخلی

در گام بعد، بر اساس نقشه‌های معماری، فضاهای ساختمان به صورت دقیق زون‌بندی شد. برای هر زون، نوع کاربری شامل آشپزخانه، سرویس‌های بهداشتی، اتاق‌ها، راهروها و سایر بخش‌ها تعیین شد تا توزیع حرارتی و الگوی مصرف انرژی در هر فضا به طور مستقل قابل تحلیل باشد. میزان مصرف انرژی محاسبه شده برابر با ۹۸/۷۸ کیلووات‌ساعت بر مترمربع است. نتایج کامل در جدول ۳ ارائه شده و نمای کلی زون‌بندی در شکل‌های ۳ و ۴ نمایش داده شده است.

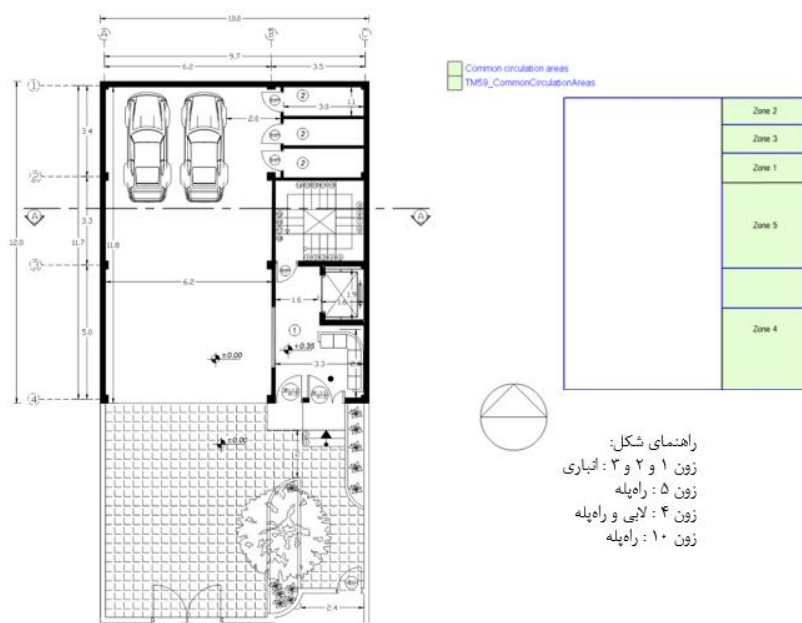
علت کاهش معنادار مصرف انرژی سالانه در این مرحله (رسیدن به ۹۸/۷۸ کیلووات‌ساعت بر مترمربع)، تفکیک فضاهای فرعی و مشاعات بدون تهویه (شامل راه‌پله، آسانسور و پارکینگ همکف) از فضاهای اصلی مسکونی (دارای تهویه مطبوع) است. در مدل پایه اولیه، کل حجم ساختمان به صورت یکپارچه تحت تهویه فرض شده بود، اما با اعمال زون‌بندی واقعی، بارهای حرارتی و برودتی فقط به فضاهای مفید مسکونی تخصیص یافت که این امر انطباق بالایی با واقعیت بهره‌برداری از ساختمان دارد.



شکل ۳. انطباق پلان معماری (تیپ طبقات) با زون‌بندی حرارتی فضاهای مشاع و ارتباطی در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر

جدول ۳. نتایج شبیه‌سازی دیزاین‌بیلدر - زون‌بندی فضاهای داخلی

شاخص	مقدار انرژی کل (کیلووات‌ساعت)	انرژی به ازای کل زیربنای ساختمان (کیلووات‌ساعت بر مترمربع)	انرژی به ازای زیربنای فضاهای دارای تهویه (کیلووات‌ساعت بر مترمربع)
انرژی کل سایت	۲۹۶۳۳/۳۸	۹۸/۷۸	۹۸/۷۸
انرژی خالص سایت	۲۹۶۳۳/۳۸	۹۸/۷۸	۹۸/۷۸
انرژی کل منبع	۸۱۵۵۸/۸۷	۲۷۱/۸۷	۲۷۱/۸۷
انرژی خالص منبع	۸۱۵۵۸/۸۷	۲۷۱/۸۷	۲۷۱/۸۷



شکل ۴. انطباق پلان معماری (همکف - پارکینگ) با زون‌بندی حرارتی فضاهای مشاع و ارتباطی در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر

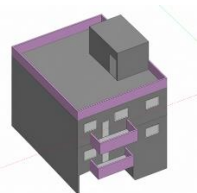
۶-۳. اعمال بازشوها

در این مرحله، بازشوهای ساختمان مطابق الگوی معماری مدل پایه در شبیه‌سازی اعمال شد. پنجره‌ها به صورت بازشوهای عمودی در نما در نظر گرفته شدند و برای جبهه جنوبی، پنجره‌ای با عرض ۱/۵ متر و ارتفاع ۱ متر (مساحت ۱/۵ مترمربع) مبنای مدل‌سازی قرار گرفت (قسمت شرقی و غربی با فرض همسایگی با ساختمان کناری بازشو تعریف نشده است). با توجه به نقش مستقیم بازشوهای جنوبی در دریافت تابش و افزایش بار سرمایشی در اقلیم گرم و خشک، تحلیل عملکرد بازشوها هم‌زمان با طراحی سایبان‌های افقی خارجی (به فرم صفحه تخت متصل به نمای ساختمان) انجام شد (شکل ۵).

بر اساس محاسبات پروفیل زاویه تابش خورشید در شرایط بحرانی (ظهر تابستان در اقلیم اصفهان)، زاویه تابش معادل ۶۳ درجه نسبت به خط افق در نظر گرفته شد. در این وضعیت، عمق بهینه برای سایبان افقی خارجی ۵۳ سانتی‌متر تعیین شد. مطابق با روابط هندسی سایه‌اندازی، ارتفاع سایه ایجادشده بر سطح پنجره (H) از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$H = L \times \tan(63^\circ) = 0.53 \times 1.96 \approx 1.04 \text{ m} \quad (1)$$

با توجه به اینکه ارتفاع سایه محاسبه‌شده (۱/۰۴ متر) از ارتفاع کل پنجره (۱ متر) بیشتر است، سایبان افقی طراحی‌شده قادر است در ساعت‌های اوج تابش، سطح بازشو را به‌طور کامل در سایه قرار دهد. این امر به محدود شدن بخش عمده‌ای از تابش مستقیم خورشیدی، کاهش دریافت حرارت از طریق شیشه‌ها و در نهایت تقلیل بار سرمایشی ساختمان منجر می‌شود. از این‌رو، در این پژوهش بازشوها نه به صورت عنصری مستقل، بلکه به عنوان بخشی از سامانه یکپارچه پوسته و در تعامل با عناصر سایه‌انداز تحلیل شدند تا اثر آن‌ها بر عملکرد حرارتی و مصرف انرژی سالانه با دقت بیشتری ارزیابی شود (جدول ۴).



شکل ۵. اعمال بازشوها ساختمان

جدول ۴. نتایج شبیه‌سازی دیزاین‌بیلدر - اعمال بازشوها

انرژی به ازای زیربنای فضاهای دارای تهویه (کیلووات ساعت بر مترمربع)	انرژی به ازای کل زیربنای ساختمان (کیلووات ساعت بر مترمربع)	مقدار انرژی کل (کیلووات ساعت)	شاخص
۱۰۲/۶۴	۱۰۲/۶۴	۳۰۷۹۲/۱۳	انرژی کل سایت
۱۰۲/۶۴	۱۰۲/۶۴	۳۰۷۹۲/۱۳	انرژی خالص سایت
۲۷۸/۷۶	۲۷۸/۷۶	۸۳۶۲۵/۳۳	انرژی کل منبع
۲۷۸/۷۶	۲۷۸/۷۶	۸۳۶۲۵/۳۳	انرژی خالص منبع

۴-۶. بررسی حداقل مقاومت حرارتی دیوارهای خارجی

در این مرحله از پژوهش، به منظور دستیابی به بهینه‌ترین وضعیت در کاهش تبادل حرارتی پوسته ساختمان، چهار الگوی متفاوت عایق کاری برای دیوارهای خارجی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. هدف از این تحلیل، تعیین ساختاری بود که ضمن تأمین حداقل مقاومت حرارتی مورد نیاز بر اساس الزامات استانداردهای ملی، کمترین میزان مصرف انرژی سالانه را فراهم آورد.

۴-۶-۱. عایق کاری همگن

در این الگو، دیوار با ترکیب متداول شامل لایه‌های آجر سوراخ‌دار، ملات ماسه‌سیمان و بلوک سیمانی سبک، بدون استفاده از لایه عایق حرارتی مجزا مدل‌سازی شد شکل ۶ و جدول ۵ نتایج شبیه‌سازی بیانگر آن است که به دلیل ناکافی بودن مقاومت حرارتی، این روش ضعیف‌ترین عملکرد را در کاهش تبادل حرارتی داشته و میزان مصرف انرژی سالانه آن برابر با ۱۶۸/۲۳ کیلووات ساعت بر مترمربع برآورد شده است.



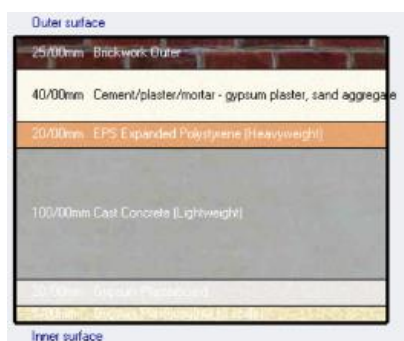
شکل ۶. عایق کاری همگن

جدول ۵. فایل محاسباتی مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان - عایق کاری همگن

شخصیات	مقاومت	شخصیات	ضریب	مشخصات فنی	زیرگروه	گروه اصلی	شروع پروژه جدید
متناسب	حرارتی	ضخامت	هدایت				لایه
(mm)	مبحث ۱۹ محاسبه	(mm)	حرارت				لایه
۰/۱۱۰	۰/۱۱۰						خارج
۰/۴۲۰	۰/۴۲۰	۳۰۰	۰/۹۰۰	چگالی ۱۴۰۰	سه ردیف آجر	لایه ۱-۳. آجر سوراخ‌دار (دیوار)	1
۰/۰۳۱	۰/۰۳۱	۴۰۰	۰/۸۰۰	چگالی ۱۵۰۰	آهکی یا سیمانی	لایه ۲-۱. اندود و ملات آهکی یا سیمانی	2
۰/۱۹۰	۰/۱۹۰	۳۰۰	۰/۲۵۰	چگالی ۱۱۰۰	دوردریغ خمره	لایه ۳-۲. بلوک سیمانی (دیوار)	3
۰/۱۸۲	۰/۱۸۲	۲۰۰	۱/۱۰۰	چگالی ۱۵۰۰	گچ و خاک	لایه ۴-۵. گچ	4
۰/۰۸۸	۰/۰۸۸	۵۰	۰/۵۲۰	چگالی ۱۲۰۰	گچ سخت یا حداقل میزان آب لازم	لایه ۵-۱۵. گچ	5
						لایه ۶	6
						لایه ۷	7
						لایه ۸	8
مقادیر هدف	۰/۱۱۰	۰/۱۱۰				داخل	
۰/۸	۰/۹۱۱ [m ² .KW]	R	۲	۲	گروه ساختمان	حالت منطبق با ستون ۵ روش تجویزی	نوع جدار: دیوار
۱/۰۲	۱/۱۳۱ [m ² .KW]	Rt					
۰/۹۸	۰/۸۸۴ [W/m ² .K]	U					
	۰/۸۰۰ [m ² .KW]	R ref					
	۰/۹۸۰ [W/m ² .K]	U ref					

ابتدا دکمه «شروع پروژه جدید» را فعال کنید. سپس نوع جدار، حالت (شماره ستون) عایق کاری مورد نظر طبق جداول روش تجویزی، گروه ساختمان، رتبه انرژی و نیاز غالب ساختمان را مشخص کنید. پس از انتخاب لایه همگن در پهنه MatSelec، یا لایه غیرهمگن در پهنه ProdSelect، دکمه با شماره سیاه یا آبی لایه مورد نظر را فشار دهید. در صورت انتخاب لایه همگن مشخصات را به میلی‌متر وارد کنید.

در این الگو، لایه عایق حرارتی از نوع پلی‌استایرن منبسط‌شده روی سطح خارجی دیوار نصب شد. شکل ۷ و جدول ۶ استقرار عایق در بخش بیرونی پوسته، به افزایش ظرفیت حرارتی مؤثر دیوار و کاهش محسوس اتلاف انرژی منجر شد. با وجود بهبود قابل توجه عملکرد نسبت به حالت همگن، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد این روش در مقایسه با سایر الگوهای عایق‌کاری مورد بررسی، در جایگاه سوم قرار گرفته است. میزان مصرف انرژی سالانه این الگو برابر با ۱۱۷/۱۷ کیلووات‌ساعت بر مترمربع محاسبه شد.



شکل ۷. عایق کاری خارجی

[illegible]

در این الگو، لایه عایق حرارتی در سطح داخلی دیوار و در مجاورت فضای کنترل شده قرار داده شد. شکل ۸ و جدول ۷ قرارگیری عایق در این موقعیت موجب کاهش سرعت تبادل حرارت میان محیط داخلی و پوسته ساختمان می شود و در نتیجه عملکرد حرارتی مناسبی را فراهم می کند. نتایج شبیه سازی نشان می دهد این روش از نظر کاهش مصرف انرژی در رتبه دوم الگوهای مورد بررسی قرار دارد. میزان مصرف انرژی سالانه در این حالت برابر با $105/30$ کیلووات ساعت بر مترمربع محاسبه شد.



شکل ۸. عایق کاری داخلی

جدول ۷. فایل محاسباتی مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان - عایق کاری داخلی

مقاومت حرارتی	ضخامت (mm)	ضرب هدایت حرارت	مشخصات فنی	زیرگروه	گروه اصلی	شروع پروژه جدید	شروع پروژه جدید	
							لایه	لایه
۰/۱۱۰	۰/۱۱۰					خارج	همگن	همگن
۰/۴۲۰	۰/۴۲۰	۳۵۰	۰/۹۰۰	چگالی ۱۴۰۰	سه ردیف آجر	لایه ۱	1	1
۰/۰۳۱	۰/۰۳۱	۲۵	۰/۸۰۰	چگالی ۱۵۰۰	آهکی یا سیمانی	لایه ۲	2	2
۰/۰۹۰	۰/۰۹۰	۱۰۵	۰/۲۰۰	چگالی ۷۰۰	یک ردیف حفره	لایه ۳	3	3
۰/۷۱۴	۰/۷۱۴	۳۰۰	۰/۰۲۸	صفحات ممهت منبسط شده یا گ	اسفنج پلی‌یورتان یا پلی‌ایزوسیانورات	لایه ۴	4	4
۰/۱۸۲	۰/۱۸۲	۲۰۰	۱/۱۰۰	چگالی ۱۵۰۰	گچ و خاک	لایه ۵	5	5
۰/۲۵۱	۰/۲۵۱	۲۰۰	۰/۵۷۰	چگالی ۱۲۰۰	گچ سخت یا حداقل میزان آب لازم	لایه ۶	6	6
						لایه ۷	7	7
						لایه ۸	8	8
۰/۱۱۰	۰/۱۱۰					داخل		
۱/۷۸۸	[m ² .K/W]	R	EC++	رشته انرژی: ++	حالت منطبق با ستون ۵ روش تجویزی	نوع جدار: دیوار	KARI Behrouz	
۲/۰۰۸	[m ² .K/W]	Rt		گروه ساختمان: ۲				
۰/۴۹۸	[W/m ² .K]	U		نیاز غالب: ۱	جدار در تماس با فضای کنترل نشده			
۱/۶۰۰	[m ² .K/W]	R ref		گرماپی				
۰/۵۴۹	[W/m ² .K]	U ref						

ابتدا دکمه «شروع پروژه جدید» را فعال کنید. سپس نوع جدار حالت (شماره ستون) عایق کاری مورد نظر طبق جدول روش تجویزی، گروه ساختمان، رتبه انرژی و نیاز غالب ساختمان را مشخص کنید. پس از انتخاب لایه همگن در پوشه MatSelect، یا لایه غیرهمگن در پوشه ProdSelect، دکمه با شماره سیاه یا آبی لایه مورد نظر را فشار دهید. در صورت انتخاب لایه همگن ضخامت را به میلی‌متر وارد کنید.

۶-۴-۴. عایق کاری میانی (گزینه برتر)

در این الگو، لایه عایق حرارتی در بخش میانی دیوار و میان دو لایه سازه‌ای (بین لایه آجری و بلوک سیمانی) قرار گرفت شکل‌های ۹ و ۱۰ و جدول ۸ نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد استقرار عایق در این موقعیت، ضمن بهره‌گیری مطلوب از جرم حرارتی لایه‌های داخلی و محافظت کامل عایق توسط پوسته‌های طرفین، کارآمدترین عملکرد حرارتی را ایجاد می‌کند. این ساختار با کاهش قابل توجه تبادل حرارتی ناخواسته، به عنوان بهینه‌ترین الگوی عایق کاری دیوارهای خارجی شناسایی شد. میزان مصرف انرژی سالانه در این حالت برابر با ۹۷/۷۱ کیلووات‌ساعت بر مترمربع به دست آمد.



شکل ۹. عایق کاری میانی

جدول ۸. فایل محاسباتی مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان - عایق‌کاری میانی

شروع پروژه جدید	گروه اصلی	زیرگروه	مشخصات فنی	ضریب هدایت حرارت	ضخامت (mm)	مقاومت حرارتی	مبحث ۱۹ محاسبه
لایه	لایه	خارج	خارج	خارج	خارج	خارج	خارج
1	1	لایه ۱: آجر سوراخ‌دار (دیوار)	سه ردیف آجر	چگالی ۱۴۰۰	۳۰۰	۰/۴۲۰	۰/۱۱۰
2	2	لایه ۲: آندود و ملات آهکی یا سیمانی	آهکی یا سیمانی	چگالی ۱۵۰۰	۴۰۰	۰/۴۲۰	۰/۰۳۱
3	3	لایه ۳: بلوک سیمانی (دیوار)	یک ردیف حفره	چگالی ۹۵۰	۸۰۰	۰/۶۲۰	۰/۰۳۱
4	4	لایه ۴: عایق‌های حرارتی پلیمری	پلی‌استایرن منبسط (اصطلاحاً یونولیت یا پلاستوفوم)	برش خورده در بلوک‌های قالبی	۳۲۶	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶
5	5	لایه ۵: بلوک سیمانی (دیوار)	یک ردیف حفره	چگالی ۹۵۰	۱۱۳۰	۰/۰۹۰	۰/۰۹۰
6	6	لایه ۶: گچ و خاک	گچ و خاک	چگالی ۱۵۰۰	۲۰۰	۰/۱۸۲	۰/۱۸۲
7	7	لایه ۷: گچ	گچ سخت یا حداقل میزان آب لازم	چگالی ۱۲۰۰	۵۰	۰/۰۸۸	۰/۰۸۸
8	8	لایه ۸: داخل	داخل				
خارج	خارج	خارج	خارج	خارج	خارج	خارج	خارج
1	1	نوع جدار: دیوار	حالت منطبق با ستون ۵-۲ روش تجویزی	گروه ساختمان: ۲-۲	رتبه انرژی: EC+	R	۱/۴۲۷ [m².K/W]
KARI	Behrouz	جدار در تماس با فضای کنترل‌نشده	نیاز غالب: تأیید			Rt	۱/۶۶۷ [m².K/W]
						U	۰/۶۰۰ [W/m².K]
						R ref	۱/۱۰۰ [m².K/W]
						U ref	۰/۷۳۴ [W/m².K]

شکل ۱۰. دیتیل انرژی دیوار خارجی با عایق میانی - مجاور فضای کنترل

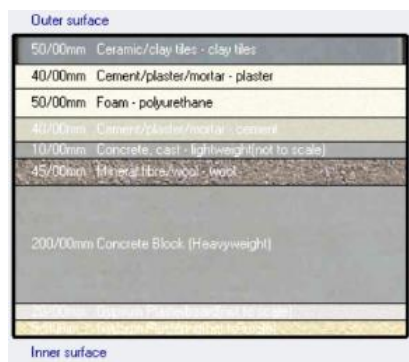
۵-۶. بررسی حداقل مقاومت حرارتی بام

در این بخش، دو نوع ساختار بام شامل بام با پوشش سرامیکی و بام با پوشش منعکس‌کننده مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. منظور از پوشش بازتابنده در این پژوهش، لایه نهایی بام با رنگ روشن و ضریب بازتاب بالاتر در برابر تابش خورشیدی است که با کاهش جذب گرما، از افزایش دمای سطح بام جلوگیری می‌کند. این نوع پوشش در مطالعات مربوط به بهینه‌سازی حرارتی پوسته، به عنوان یکی از راهکارهای مؤثر در کاهش انتقال حرارت از بام به فضای داخلی شناخته می‌شود. در هر دو الگو، لایه‌های عایق حرارتی و رطوبتی به صورت یکسان در نظر گرفته شد تا تأثیر نوع پوشش نهایی بام بر عملکرد حرارتی ساختمان به طور دقیق ارزیابی شود. به این ترتیب، تفاوت مشاهده‌شده در نتایج فقط ناشی از اختلاف در ویژگی بازتابش سطح خارجی بام بوده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد بام با پوشش منعکس‌کننده، به دلیل ضریب بازتاب بیشتر و جذب کمتر تابش خورشیدی، عملکرد مناسب‌تری در کاهش دمای سطح بام و در نتیجه، کاهش بار سرمایشی ساختمان داشته و از این رو به عنوان گزینه بهینه انتخاب شد.

۶-۵-۱. بام با پوشش نهایی سرامیکی

در این الگو، لایه رویه و نهایی بام از پوشش سرامیکی مقاوم به ضخامت ۵۰ میلی‌متر تشکیل شده است که به عنوان لایه محافظ روی ساختار چندلایه بام قرار دارد (شکل ۱۱ و جدول ۹). جزئیات این لایه‌بندی بر اساس الزامات رده انرژی EC++ در فایل محاسباتی مبحث ۱۹ تنظیم شده است. سرامیک به دلیل جرم حرارتی نسبتاً بالا و ظرفیت ذخیره انرژی، در تعدیل نوسانات دمایی

شبهانه عملکرد مناسب و قابل قبولی از خود نشان می‌دهد؛ هرچند طی روز و در ساعت‌های اوج تابش خورشید دمای سطحی آن افزایش می‌یابد، اما وجود لایه‌های عایق حرارتی کارآمد در زیرساز آن، مانع انتقال این بار حرارتی به فضاهای داخلی ساختمان می‌شود. نتایج شبیه‌سازی بیانگر آن است که این الگو با وجود پایداری نسبی در برابر نوسانات دمایی، از نظر کنترل بار سرمایشی در رتبه دوم قرار می‌گیرد. میزان مصرف انرژی سالانه در این حالت برابر با $97/73$ کیلووات‌ساعت بر مترمربع محاسبه شد.



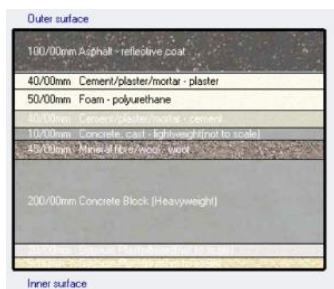
شکل ۱۱. بام با پوشش سرامیکی

جدول ۹. فایل محاسباتی مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان - بام با پوشش سرامیکی

نوع جدار، بام	حالت منطبق با ستون	روشی تجویزی	گروه ساختمان	رتبه انرژی: EC++	مشخصات فنی	ضخامت ضخامت (mm)	مقاومت حرارتی مبحث ۱۹ محاسبه (mm)	مقاومت مناسب (mm)	نشانده انرژی
خارج	خارج	خارج	خارج	خارج	خارج	خارج	خارج	خارج	خارج
1	1	1	1	1	چگالی نسبی: ۱۶۰۰	۱۶۰۰	۰/۰۹۰	۰/۰۸۳	۱
2	2	2	2	2	چگالی نسبی: ۱۶۰۰ تا ۱۳۵۰	۱۶۰۰	۰/۰۸۳	۰/۰۸۳	2
3	3	3	3	3	چگالی کمتر از ۲۱۰۰	۲۱۰۰	۰/۲۲۰	۰/۲۱۷	3
4	4	4	4	4	چگالی نسبی: ۱۶۰۰ تا ۱۳۵۰	۱۶۰۰	۰/۰۸۳	۰/۰۸۳	4
5	5	5	5	5	با یونک طبیعی یا سرباره منبسط	۱۰۰	۰/۲۴۰	۰/۲۳۷	5
6	6	6	6	6	چگالی ۱۷۵۰ تا ۲۰۰	۲۰۰	۰/۲۴۰	۰/۲۳۷	6
7	7	7	7	7	ارتقاچ بلوک: ۲۵۰ میلی‌متر	۲۵۰	۰/۲۴۰	۰/۲۳۷	7
8	8	8	8	8	کج و خاک	۲۵۰	۰/۲۴۰	۰/۲۳۷	8
داخل	داخل	داخل	داخل	داخل	داخل	داخل	داخل	داخل	داخل
نوع جدار، بام	حالت منطبق با ستون	روشی تجویزی	گروه ساختمان	رتبه انرژی: EC++	مشخصات فنی	ضخامت ضخامت (mm)	مقاومت حرارتی مبحث ۱۹ محاسبه (mm)	مقاومت مناسب (mm)	نشانده انرژی
1	1	1	1	1	چگالی نسبی: ۱۶۰۰	۱۶۰۰	۰/۰۹۰	۰/۰۸۳	1
2	2	2	2	2	چگالی نسبی: ۱۶۰۰ تا ۱۳۵۰	۱۶۰۰	۰/۰۸۳	۰/۰۸۳	2
3	3	3	3	3	چگالی کمتر از ۲۱۰۰	۲۱۰۰	۰/۲۲۰	۰/۲۱۷	3
4	4	4	4	4	چگالی نسبی: ۱۶۰۰ تا ۱۳۵۰	۱۶۰۰	۰/۰۸۳	۰/۰۸۳	4
5	5	5	5	5	با یونک طبیعی یا سرباره منبسط	۱۰۰	۰/۲۴۰	۰/۲۳۷	5
6	6	6	6	6	چگالی ۱۷۵۰ تا ۲۰۰	۲۰۰	۰/۲۴۰	۰/۲۳۷	6
7	7	7	7	7	ارتقاچ بلوک: ۲۵۰ میلی‌متر	۲۵۰	۰/۲۴۰	۰/۲۳۷	7
8	8	8	8	8	کج و خاک	۲۵۰	۰/۲۴۰	۰/۲۳۷	8
داخل	داخل	داخل	داخل	داخل	داخل	داخل	داخل	داخل	داخل
نوع جدار، بام	حالت منطبق با ستون	روشی تجویزی	گروه ساختمان	رتبه انرژی: EC++	مشخصات فنی	ضخامت ضخامت (mm)	مقاومت حرارتی مبحث ۱۹ محاسبه (mm)	مقاومت مناسب (mm)	نشانده انرژی
1	1	1	1	1	چگالی نسبی: ۱۶۰۰	۱۶۰۰	۰/۰۹۰	۰/۰۸۳	1
2	2	2	2	2	چگالی نسبی: ۱۶۰۰ تا ۱۳۵۰	۱۶۰۰	۰/۰۸۳	۰/۰۸۳	2
3	3	3	3	3	چگالی کمتر از ۲۱۰۰	۲۱۰۰	۰/۲۲۰	۰/۲۱۷	3
4	4	4	4	4	چگالی نسبی: ۱۶۰۰ تا ۱۳۵۰	۱۶۰۰	۰/۰۸۳	۰/۰۸۳	4
5	5	5	5	5	با یونک طبیعی یا سرباره منبسط	۱۰۰	۰/۲۴۰	۰/۲۳۷	5
6	6	6	6	6	چگالی ۱۷۵۰ تا ۲۰۰	۲۰۰	۰/۲۴۰	۰/۲۳۷	6
7	7	7	7	7	ارتقاچ بلوک: ۲۵۰ میلی‌متر	۲۵۰	۰/۲۴۰	۰/۲۳۷	7
8	8	8	8	8	کج و خاک	۲۵۰	۰/۲۴۰	۰/۲۳۷	8
داخل	داخل	داخل	داخل	داخل	داخل	داخل	داخل	داخل	داخل

۶-۵-۲. بام با پوشش منعکس‌کننده^۱

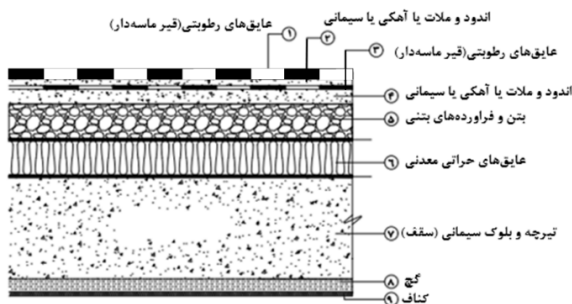
در این الگو، سیستم بام شامل یک لایه عایق رطوبتی پایه (مانند قیرگونی یا ایزوگام) است که مشخصات آن مطابق با فایل محاسباتی مبحث ۱۹ (جدول ۱۰) لحاظ شده و روی آن یک پوشش منعکس‌کننده با ضریب بازتاب بالا اجرا شده است. هدف از انتخاب این پوشش، افزایش ضریب بازتاب سطحی بام و کاهش جذب حرارت خورشیدی در ساعت‌های اوج تابش است. این راهکار فنی، بدون تغییر در ساختار اصلی بام، دمای سطحی را به طور مؤثری کنترل کرده و مانع از انتقال حرارت به لایه‌های زیرین می‌شود (شکل‌های ۱۲ و ۱۳). نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد این الگو با ارتقای عملکرد حرارتی پوسته بام، بهینه‌ترین گزینه در مقایسه با سایر پوشش‌ها بوده و میزان مصرف انرژی سالانه در این حالت به $97/23$ کیلووات‌ساعت بر مترمربع رسیده است. استفاده از این پوشش‌ها در اقلیم گرم و خشک، یک راهکار استاندارد و کاربردی برای کاهش بار سرمایشی ساختمان محسوب می‌شود.



شکل ۱۲. بام با پوشش منعکس کننده

جدول ۱۰. فایل محاسباتی مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان - بام با پوشش منعکس کننده

شماره	شرح پروژه	گروه اصلی	زیرگروه	مشخصات فنی	ضخامت (mm)	ضخامت (mm)	نسبت	مقاومت حرارتی	مقاومت حرارتی	مقاومت حرارتی
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28
29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39
40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43
44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46
47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47
48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49
50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52
53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53
54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54
55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56
57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57
58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59
60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61
62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62
63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64
65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65
66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66
67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67
68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68
69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69
70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71
72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
73	73	73	73	73	73	73	73	73	73	73
74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74
75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76
77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77
78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78
79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79
80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
81	81	81	81	81	81	81	81	81	81	81
82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82
83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83
84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84
85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86
87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87
88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88
89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89
90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91
92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92
93	93	93	93	93	93	93	93	93	93	93
94	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94
95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96
97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97
98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98
99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100



شکل ۱۳. دی‌تیل انرژی بام - بام با پوشش منعکس کننده

۶-۶. بررسی عملکرد حرارتی کف مجاور فضای کنترل نشده

در این بخش، ساختار کف اولین طبقه مسکونی که در مجاورت فضای کنترل نشده (مانند پیلوت یا پارکینگ) قرار دارد، شامل چهار لایه سرامیک، اندود ملات سیمان، عایق حرارتی پلی‌استایرن اکستروژده و بتن مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۱۴). شایان یادآوری است بر اساس ضوابط مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، این عایق کاری حرارتی فقط برای جداره‌های مرزی ساختمان در تماس با فضاهای بدون تهویه الزامی بوده و طبقات میانی ساختمان به دلیل قرارگیری بین دو فضای مسکونی با دمای یکسان، فاقد لایه عایق حرارتی مدل‌سازی شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد حضور لایه عایق حرارتی پلیمری با ضخامت ۳۰ میلی‌متر، نقش قابل توجهی در کاهش اتلاف حرارت از بخش پایینی ساختمان دارد و با افزایش مقاومت حرارتی مجموعه، میزان مصرف انرژی سالانه ساختمان را به ۹۷/۰۵ کیلووات‌ساعت بر مترمربع می‌رساند (جدول ۱۱).



شکل ۱۴. مقاومت حرارتی کف

جدول ۱۱. فایل محاسباتی مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان - مقاومت حرارتی کف

نوع پروژه ساختمانی	گروه اصلی	ویژگی‌ها	مشخصات فنی	ضخامت هدایت حرارتی (mm)	مقاومت حرارتی محاسبه	ضخامت مناسب (mm)
لايه ۱	۱	۷. مصالح کاشی	چگالی: ۱۸۰۰	۱۰۰	۰.۱۷۰	۱۲۰
لايه ۲	۲	۱. آهک یا سیمانی	چگالی: ۱۸۰۰ تا ۱۶۰۰	۴۰۰	۰.۱۰۰	۱۰۰
لايه ۳	۳	۱۱. خاکی‌های خردالی پلیمری	با جرم‌های پر از هوا یا گاز کرد	۳۰۰	۰.۰۴۱	۷۰۰۰
لايه ۴	۴	۲. بتن و فرآورده‌های بتنی	بتن با سگدانه سبک‌وزن کوره آهن‌گدازی درازم	۱۰۰۰	۰.۱۴۰	۳۵۷
لايه ۵	۵					
لايه ۶	۶					
لايه ۷	۷					
لايه ۸	۸					
داخل						
نوع جدار: کف	حالت منطبق یا ستون	روش تجویزی	گروه ساختمان: ۲	رتبه انرژی: EC++	R: ۷/۵۶۷ [m².K/W] Rt: ۷/۹۰۷ [m².K/W] U: ۰/۱۱۲۶ [W/m².K]	مقادیر هدف: ۱/۳۹۹ ۱/۷۳۶ ۰/۵۷۵
پوشه: ProSelect	جدار در تماس با فضای کنترل‌نشده	نیاز غالب‌ها			R ref: ۱/۴۰۰ [m².K/W] U ref: ۰/۵۷۵ [W/m².K]	

ابتدا دکمه شروع پروژه جدید را فعال کنید. سپس نوع جدار، حالت (شماره ستون) عایق‌کاری مورد نظر طبق جدول روش تجویزی، گروه ساختمان، رتبه انرژی و نیاز غالب ساختمان را مشخص کنید. پس از انتخاب لایه ممکن در پوشه ProSelect یا لایه غیرممکن در پوشه ProSelect دکمه با شماره سیاه یا آبی لایه مورد نظر را فشار دهید. در صورت انتخاب لایه ممکن، ضخامت را به میلی‌متر وارد کنید.

۶-۷. بررسی عملکرد حرارتی دیوارهای داخلی

در این مرحله، دو نوع ساختار متفاوت شکل‌های ۱۵ و ۱۶ برای دیوارهای داخلی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت:

۶-۷-۱. دیوار با لایه‌های گچ، پشم معدنی، آجر و گچ



شکل ۱۵. دیوار با لایه‌های گچ، پشم معدنی، آجر و گچ

۶-۷-۲. دیوار با لایه‌های گچ، بلوک سبک هوادار^۱

هدف از این مقایسه، بررسی تأثیر نوع مصالح میانی بر مقاومت حرارتی و میزان اتلاف انرژی از طریق جداکننده‌های داخلی بود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد ساختار دوم، به دلیل استفاده از بلوک‌های سبک هوادار با ضریب هدایت حرارتی پایین‌تر و ویژگی‌های عایق مناسب‌تر، از مقاومت حرارتی بیشتری برخوردار است و اتلاف انرژی کمتری را ایجاد می‌کند. از این‌رو، این الگو به عنوان

1. AAC

گزینه بهینه‌تر انتخاب شد. میزان مصرف انرژی سالانه در این حالت برابر با ۹۶/۷۵ کیلووات‌ساعت بر مترمربع محاسبه شد (شکل‌های ۱۵ و ۱۶).



شکل ۱۶. دیوار با لایه‌های گچ، بلوک سبک هوادار

۸-۶. اعمال کرسی‌چینی ورودی

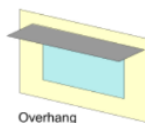
در این بخش، اثر افزایش ارتفاع کرسی‌چینی ورودی به میزان ۳۵ سانتی‌متر بر رفتار حرارتی پایه ساختمان مورد بررسی قرار گرفت. این تغییر در تراز کف ورودی، علاوه بر بهبود شرایط عایق‌کاری لایه‌های زیرین، موجب کاهش تماس مستقیم کف با هوای سرد و افزایش پایداری دمای داخلی در ترازهای پایین ساختمان شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد جدول ۱۲ که اعمال این اصلاح، سبب تعدیل نوسانات حرارتی و افزایش یکنواختی دمای فضاهای همکف شده است. میزان مصرف انرژی سالانه در این حالت برابر با ۱۰۲/۹۷ کیلووات‌ساعت بر مترمربع محاسبه شد. درخور یادآوری است این سناریو به صورت مستقل و غیرترکمی ارزیابی شده؛ از این‌رو مقدار مصرف انرژی آن فقط برای سنجش اثر منفرد کرسی‌چینی ورودی قابل تفسیر است.

جدول ۱۲. نتایج شبیه‌سازی دیزاین‌بیلدر - اعمال کرسی‌چینی ورودی

شاخص	مقدار انرژی کل (کیلووات‌ساعت)	انرژی به ازای کل زیربنای ساختمان (کیلووات‌ساعت بر مترمربع)	انرژی به ازای زیربنای فضاهای دارای تهویه (کیلووات‌ساعت بر مترمربع)
انرژی کل سایت	۳۰۸۸۹/۱۰	۱۰۲/۹۷	۱۰۲/۹۷
انرژی خالص سایت	۳۰۸۸۹/۱۰	۱۰۲/۹۷	۱۰۲/۹۷
انرژی کل منبع	۸۴۳۵۱/۹۵	۲۸۱/۱۸	۲۸۱/۱۸
انرژی خالص منبع	۸۴۳۵۱/۹۵	۲۸۱/۱۸	۲۸۱/۱۸

۹-۶. تحلیل ابعاد و گونه‌های سایبان

در این مرحله، سه الگوی سایه‌اندازی شامل سایبان‌های افقی، کرکره‌ای و ترکیبی در جبهه جنوبی ساختمان مورد بررسی قرار گرفت تا میزان اثربخشی آن‌ها در کنترل تابش مستقیم خورشید و کاهش بار سرمایشی تعیین شود. بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده و محاسبات زاویه تابش خورشید در شرایط بحرانی (زاویه ۶۳ درجه نسبت به افق)، عمق بهینه سایبان افقی برابر با ۵۳ سانتی‌متر به دست آمد. این سایبان به صورت یک صفحه افقی صلب (شکل ۱۷) طراحی شد تا بتواند در ساعت‌های اوج تابش، کل ارتفاع پنجره جنوبی را در سایه قرار دهد و با کاهش نفوذ مستقیم تابش خورشید، نوسانات حرارتی و بار سرمایشی ساختمان را به طور مؤثری محدود کند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد اعمال این ابعاد برای سایبان، موجب بهبود عملکرد حرارتی پوسته و کاهش مصرف انرژی سالانه شده است. میزان مصرف انرژی در این حالت برابر با ۱۰۳/۱۳ کیلووات‌ساعت بر مترمربع محاسبه شد.



شکل ۱۷. سایبان افقی خارجی (صفحه پیش‌آمده بالای بازشو)

۶-۱۰. بررسی جنس قاب پنجره

در این بخش، چهار نوع قاب پنجره شامل قاب چوبی رنگ‌شده، آلومینیومی ساده، آلومینیومی مجهز به لایه حرارت‌بند و قاب‌های پلیمری^۱ مورد ارزیابی قرار گرفت تا تحت تأثیر ویژگی‌های حرارتی و نحوه درزگیری آن‌ها بر میزان تبادل حرارتی ناخواسته بررسی شود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد قاب‌های پلیمری، به دلیل برخورداری از ضریب انتقال حرارت بسیار پایین‌تر، کاهش پل‌های حرارتی، و عملکرد مطلوب در درزگیری، بهترین عملکرد را در بین گزینه‌های مورد بررسی دارند. این ویژگی‌ها به کاهش اتلاف انرژی و بهبود شرایط آسایش حرارتی فضاهای داخلی منجر می‌شود. میزان مصرف انرژی سالانه در این حالت برابر با ۱۰۳/۶۵ کیلووات‌ساعت بر مترمربع محاسبه شد.

۶-۱۱. تحلیل گونه‌های مختلف شیشه

در این مرحله، مجموعه‌ای از شیشه‌های تک‌جداره، دوجداره و سه‌جداره با ویژگی‌های فیزیکی متفاوت - شامل شیشه‌های رنگی، حرارتی و با پوشش گسیلندگی پایین^۲ مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. هدف از این تحلیل، ارزیابی نقش نوع و ساختار شیشه در کاهش انتقال حرارت، کنترل تابش خورشید و بهبود عملکرد حرارتی پوسته ساختمان بود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر نشان داد استفاده از شیشه‌های سه‌جداره با پوشش گسیلندگی پایین و پرشده با گاز آرگون، به دلیل کاهش مؤثر تبادل حرارتی و کنترل جریان تابش ورودی، بیشترین تأثیر را در بهینه‌سازی مصرف انرژی داشته است. این نوع شیشه موجب تثبیت شرایط حرارتی فضای داخلی و کاهش محسوس بار سرمایشی در فصل‌های گرم شد. میزان مصرف انرژی سالانه در این حالت برابر با ۹۶/۶۴ کیلووات‌ساعت بر مترمربع محاسبه شد.

۶-۱۲. ارزیابی عملکرد آب‌گرم‌کن خورشیدی

به منظور بهره‌گیری از ظرفیت انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش وابستگی ساختمان به منابع انرژی فسیلی، کارایی یک سامانه آب‌گرم‌کن خورشیدی با ابعاد ۴×۸ متر که روی بام ساختمان نصب شده است، مورد شبیه‌سازی و ارزیابی قرار گرفت. این تحلیل با هدف بررسی میزان تأثیر سامانه خورشیدی بر کاهش بار حرارتی مرتبط با تولید آب گرم مصرفی انجام شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد جدول ۱۳ که استفاده از این سامانه نقش قابل توجهی در کاهش انرژی مورد نیاز برای تأمین آب گرم دارد و به بهبود راندمان کلی عملکرد ساختمان کمک می‌کند. به واسطه کاهش بار حرارتی سیستم‌های تأمین آب گرم، کاهش محسوسی در مصرف انرژی سالانه حاصل شده است. میزان مصرف انرژی در این حالت برابر با ۹۶/۲۱ کیلووات‌ساعت بر مترمربع محاسبه شد.

جدول ۱۳. نتایج شبیه‌سازی دیزاین‌بیلدر - ارزیابی عملکرد آب‌گرم‌کن خورشیدی

شاخص	مقدار انرژی کل (کیلووات‌ساعت)	انرژی به ازای کل زیربنای ساختمان (کیلووات‌ساعت بر مترمربع)	انرژی به ازای زیربنای فضاهای دارای تهویه (کیلووات‌ساعت بر مترمربع)
انرژی کل سایت	۲۸۸۶۲/۱۴	۹۶/۲۱	۹۶/۲۱
انرژی خالص سایت	۲۸۸۶۲/۱۴	۹۶/۲۱	۹۶/۲۱
انرژی کل منبع	۷۹۵۷۰/۴۸	۲۶۵/۲۴	۲۶۵/۲۴
انرژی خالص منبع	۷۹۵۷۰/۴۸	۲۶۵/۲۴	۲۶۵/۲۴

۶-۱۳. ارزیابی عملکرد صفحات فتوولتائیک

در این بخش، اثر نصب صفحات تولید برق خورشیدی (فتوولتائیک) روی بام ساختمان مورد ارزیابی قرار گرفت. صفحات فتوولتائیک با ابعاد کلی ۴×۸ متر (مساحت کل ۳۲ مترمربع) روی بام جانمایی شدند. جهت‌گیری سامانه به سمت جنوب (جهت بهینه دریافت تابش خورشیدی در نیم‌کره شمالی) تنظیم شد. به منظور بیشینه‌سازی راندمان سالانه دریافت انرژی خورشیدی و

1. UPVC
2. Low-E

اصلاح فرض اولیه (نصب مسطح روی بام)، زاویه شیب پنل‌ها بر اساس فرمول استاندارد بهینه‌سازی فصلی برای اقلیم‌های نیم‌کره شمالی، معادل عرض جغرافیایی اصفهان $32/8$ درجه به علاوه 5 درجه ($32/8+5=38$) در نظر گرفته شد. در شبیه‌سازی عملکرد سیستم، سایر پارامترهای فنی متناسب با راندمان پنل‌های استاندارد سیلیکونی (مونوکریستال با راندمان میانگین 18 تا 20 درصد) در ابزار شبیه‌سازی تعریف شد. هدف از این بخش، مقایسه اثر نسبی افزودن سامانه فتوولتائیک بر مصرف انرژی سالانه در سناریوهای مختلف بوده است. نتایج نشان داد استفاده از این سامانه موجب کاهش مصرف انرژی سالانه ساختمان می‌شود؛ با این حال، مقایسه نتایج جدول ۱۴ بیانگر آن است که در این طرح، بهره‌گیری از انرژی خورشیدی برای تأمین آب گرم مصرفی (آب‌گرم‌کن خورشیدی) نسبت به تولید الکتریسیته، کاهش بیشتری در مصرف کل انرژی سالانه ایجاد می‌کند. میزان مصرف انرژی با لحاظ کردن سهم تولیدی صفحات فتوولتائیک با زاویه شیب بهینه 38 درجه، به $96/24$ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال کاهش یافت. بدیهی است طراحی اجرایی دقیق‌تر سیستم و آنالیز سایه‌اندازی‌های موضعی در نرم‌افزارهای تخصصی خورشیدی نظیر پی‌وی‌سیست^۱ قابل تدقیق خواهد بود.

جدول ۱۴. نتایج شبیه‌سازی دیزاین‌بیلدر - ارزیابی عملکرد صفحات فتوولتائیک

شاخص	انرژی به ازای زیربنای فضاهای دارای تهویه (کیلووات‌ساعت بر مترمربع)	انرژی به ازای کل زیربنای ساختمان (کیلووات‌ساعت بر مترمربع)	مقدار انرژی کل (کیلووات‌ساعت)
انرژی کل سایت	۹۶/۲۴	۹۶/۲۴	۲۸۸۷۱/۱۱
انرژی خالص سایت	۹۶/۲۴	۹۶/۲۴	۲۸۸۷۱/۱۱
انرژی کل منبع	۲۶۵/۳۵	۲۶۵/۳۵	۷۹۶۰۳/۰۶
انرژی خالص منبع	۲۶۵/۳۵	۲۶۵/۳۵	۷۹۶۰۳/۰۶

۷. بحث و نتیجه‌گیری

تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی گام‌به‌گام سناریوهای بهینه‌سازی در اقلیم گرم و خشک اصفهان نشان می‌دهد کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی، فرایندی چندبعدی و وابسته به اصلاح توأمان متدولوژی مدل‌سازی، مشخصات فیزیکی پوسته و بهره‌گیری از سامانه‌های فعال خورشیدی است. در این پژوهش، نرخ کاهش کل انرژی مصرفی با تفکیک ساختارمند میان «اصلاحات متدولوژیک مدل حرارتی» و «اقدامات فیزیکی بهینه‌سازی» مورد تحلیل قرار گرفت تا سهم دقیق هر یک از این عوامل در تراز نهایی انرژی مشخص شود.

در گام نخست، تصحیح زون‌بندی حرارتی ساختمان از حالت تک‌زون به زون‌بندی تفکیکی (جداسازی فضاهای تحت تهویه مسکونی از فضاهای بدون تهویه مانند مشاعات و راه‌پله)، مصرف انرژی محاسباتی را از $137/45$ به $104/50$ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال کاهش داد (کاهش $23/97$ درصدی). این تغییر، پتانسیل واقعی شبیه‌سازی را از طریق افزایش دقت مدل‌سازی و انطباق آن با رفتار واقعی حرارتی ساختمان نشان می‌دهد و اهمیت زون‌بندی صحیح را در برآوردهای اولیه انرژی اثبات می‌کند.

در بخش بهینه‌سازی فیزیکی پوسته (جدول ۱)، اقدامات غیرفعال انجام‌شده روی پوسته خارجی به کاهش مصرف سالانه به $96/64$ کیلووات‌ساعت بر مترمربع منجر شد که نشان‌دهنده کاهش واقعی $7/52$ درصدی نسبت به مدل زون‌بندی‌شده (پایه اصلاح‌شده) است. در میان اجزای پوسته، عایق‌کاری میانی دیوارهای خارجی بیشترین سهم را در کاهش بارهای حرارتی سالانه داشت و مصرف را به $97/71$ کیلووات‌ساعت بر مترمربع رساند. در رتبه‌های بعدی، استفاده از پوشش‌های بام با بازتابش بالا (سرد)، سبک‌سازی و عایق‌کاری دیوارهای داخلی، و ارتقای عملکرد جداره‌های شفاف به پنجره‌های سه‌جداره با انتشار پایین^۲ به‌ترتیب بیشترین میزان اثربخشی را نشان دادند. این نتایج تأیید می‌کند که در اقلیم گرم و خشک اصفهان، اولویت اصلی در طراحی غیرفعال پوسته باید بر کنترل انتقال حرارت هدایتی از دیوارهای پیرامونی و کاهش جذب تابش خورشیدی در بام متمرکز شود.

در حوزه سامانه‌های فعال خورشیدی، ارزیابی‌ها نشان داد استفاده از سیستم‌های حرارتی خورشیدی (آب‌گرم‌کن خورشیدی) نسبت به سیستم‌های الکتریکی (پنل فتوولتائیک با زاویه شیب بهینه ۳۸ درجه) کارایی به‌مراتب بالاتری در کاهش تراز مصرف انرژی نهایی ساختمان دارد. این امر به دلیل راندمان بالای کلکتورهای حرارتی در مقایسه با راندمان پنل‌های الکتریکی و سهم عمده بار آب‌گرم مصرفی در سبد انرژی ساختمان مسکونی است. با این حال، استفاده ترکیبی از هر دو سامانه به عنوان راهکاری جامع برای تأمین بخشی از برق مصرفی و آب‌گرم پیشنهاد می‌شود.

در نهایت، مقایسه مصرف انرژی مدل بهینه‌سازی شده نهایی با الزامات مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان نشان داد پوسته طراحی شده موفق به کسب رده انرژی «ب» (مطابق با استانداردهای رده‌بندی ملی) شده است. تعمیم این بهینه‌سازی از مقیاس یک ساختمان تک‌واحدی به مقیاس‌های کلان شهری، پتانسیل عظیمی را در کاهش پیک‌بار شبکه توزیع و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در کلان‌شهر اصفهان نشان می‌دهد. جهت پژوهش‌های آتی، بررسی تعاملات حرارتی سیستم‌های تهویه طبیعی هوشمند با جرم حرارتی داخلی ساختمان و ارزیابی اقتصادی طول عمر^۱ مصالح نوین توصیه می‌شود.

منابع

- [1] International Energy Agency. Energy Efficiency 2022. Paris: IEA; 2022.
- [2] Givoni B. Climate considerations in building and urban design. New York: John Wiley & Sons; 1998.
- [3] Santamouris M. Cooling the buildings: past, present and future. Energy Build. 2016;128:617-638. doi:10.1016/j.enbuild.2016.07.034.
- [4] Ozel M. Effect of insulation location on dynamic heat transfer characteristics of building external walls. Energy Build. 2011;43(8):2163-2168. doi:10.1016/j.enbuild.2011.04.027.
- [5] Meerow S, Newell J, Stults M. Defining urban resilience: a review. Landsc Urban Plan. 2016;147:38-49. doi:10.1016/j.landurbplan.2015.11.011.
- [6] UN-Habitat. World Cities Report 2020: The value of sustainable urbanization. Nairobi: United Nations; 2020.
- [7] Crawley DB, Hand JW, Kummert M, Griffith BT. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. Build Environ. 2008;43(4):661-673. doi:10.1016/j.buildenv.2006.10.027.
- [8] Attia S, Hensen J, Beltrán L, De Herde A. Selection criteria for building performance simulation tools. Build Environ. 2012;54:25-34. doi:10.1016/j.buildenv.2012.02.006.
- [9] Esfandiari A, Shokri E. Evaluation of the role of spatial layout on visual quality and daylight indicators in residential interior spaces in Isfahan. Karafan Sci Q. 2022;19(4):255-276. [Persian]
- [10] Hu M, Xiao Y, Cao J, et al. The effects of passive design on indoor thermal comfort and energy savings for residential buildings in hot climates: A systematic review. Urban Clim. 2023;49:101466. doi:10.1016/j.uclim.2023.101466.
- [11] Holling CS. Resilience and stability of ecological systems. Annu Rev Ecol Syst. 1973;4:1-23.
- [12] Vale LJ, Campanella TJ. The resilient city: how modern cities recover from disaster. Oxford: Oxford University Press; 2005.
- [13] Kumar D, Alam M, Sanjayan J. Comparative analysis of building insulation material properties and performance. Renewable Sustainable Energy Rev. 2020;131:110038. doi:10.1016/j.rser.2020.110038.
- [14] Alwetaishi M. Impact of glazing to wall ratio on energy consumption of buildings in hot regions. Energies. 2019;12(11):2164. doi:10.3390/en12112164.
- [15] Wang Y, Wang J, Zhang Y. A Comprehensive Review on Technologies for Achieving Zero-Energy Buildings. Sustainability. 2024;16(24):10941. doi:10.3390/su162410941.
- [16] Cabeza LF, Castell A, Barreneche C, de Gracia A, Fernández AI. Materials for using solar energy in buildings: PCM-concrete and PCM-brick walls. Sol Energy. 2011;85(7):1505-1511. doi:10.1016/j.solener.2011.04.015.
- [17] Naghipour A, et al. Adobe versus concrete: Passive energy analysis in residential buildings in the hot and arid climate of Kashan city. Building Engineering. 2026;6(1):be4029. doi:10.59400/be4029.
- [18] Kibert CJ. Sustainable construction: green building design and delivery. Hoboken: John Wiley & Sons; 2016.
- [19] Ismail AM, et al. Enhancement Techniques for the Reduction of Heating and Cooling Loads in Buildings: A Review. J Energy Power Technol. 2023;5(4):031. doi:10.21926/jept.2304031.
- [20] Clarke JA. Energy simulation in building design. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2001.
- [21] Kolokotsa D, Rovas D, Kosmatopoulos E, Kalaitzakis K. A roadmap towards intelligent net zero and positive energy buildings. Sol Energy. 2011;85(12):3067-3084. doi:10.1016/j.solener.2010.09.023.
- [22] Santamouris M, Kolokotsa D. Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures. Energy Build. 2015;94:2-13. doi:10.1016/j.enbuild.2015.02.042.
- [23] Ministry of Roads and Urban Development. National building regulations of Iran: Topic 19 – Energy conservation. 5th ed. Tehran: Office of National Building Regulations; 2020. [Persian]