

## Multi-Objective Optimization of Internal and External Insulation of Residential Building Walls in Cold Climates (Tabriz City)\*

### Abstract

The continuous growth of energy demand in Iran's residential sector has made excessive building energy consumption one of the most serious national challenges, drawing attention to the urgent need for improving the thermal efficiency of building envelopes. This study conducts a comprehensive comparative analysis of internal and external wall insulation systems in residential buildings located in the cold and dry climate of Tabriz. The main purpose is to identify the most effective insulation configuration that minimizes heating and cooling energy consumption while achieving a balance between thermal comfort, environmental sustainability, and cost efficiency. Five insulation materials rock wool, mineral wool, wood fiber, expanded polystyrene (EPS), and sisal fiber were analyzed in combination with five commonly used façade materials, namely clay brick, fire brick, cement plaster, travertine, and granite. Energy performance simulations were performed using DesignBuilder software coupled with the EnergyPlus simulation engine to evaluate several critical indicators, including total energy demand, heating and cooling energy consumption, embodied carbon emissions, material and construction costs, and the number of annual thermal discomfort hours experienced by occupants. The analysis aimed to determine how both the insulation material and its position within the wall structure influence overall building performance under real climatic conditions. To identify the optimal configuration, a multi-objective optimization framework was employed, combining the Pareto Front algorithm and the TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) method. The Pareto approach was used to generate non-dominated solution sets that represent the best trade-offs between conflicting objectives, while TOPSIS was applied to rank each alternative based on its proximity to the ideal solution. In total, seventy-five wall configurations were modeled, covering various insulation types, positions (internal or external), and façade combinations. The results showed that the configuration employing external expanded polystyrene insulation with a clay brick façade provided the highest overall performance among all tested cases. This system reduced heating energy consumption by approximately 6.8%, decreased total annual energy demand by 17%, and improved

Received: 10 Nov 2025

Received in revised form: 12 Jan 2026

Accepted: 19 Apr 2026

**Zahra Rahmany Khorram**<sup>1</sup> [iD](#)

Master of Architecture and Energy, Department of Architectural Technology, Faculty of Architecture and Urban Planning, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran.

E-mail: za.rahmany@tabriziau.ac.ir

**Aida Maleki**<sup>2</sup> [iD](#) (Corresponding Author)

Associate Professor, Department of Architectural Technology, Faculty of Architecture and Urban Planning, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran. E-mail: a.maleki@tabriziau.ac.ir

<https://doi.org/10.22059/jfaup.2026.405458.673137>

thermal comfort by 18% compared to the non-insulated baseline model. In contrast, internal insulation systems exhibited weaker performance due to thermal bridging and reduced use of the wall's thermal mass. Additionally, while materials such as mineral wool and sisal fiber had lower embodied carbon emissions, their overall insulation effectiveness under Tabriz's climatic conditions was moderate. The findings highlight the importance of selecting insulation materials and placements that are compatible with local climate conditions and construction practices. Integrating energy simulation with multi-criteria decision-making provides a robust and repeatable framework for optimizing building energy performance. This approach can guide architects, engineers, and policymakers in designing sustainable, energy-efficient, and environmentally responsible residential buildings. In conclusion, adopting external insulation systems combined with high thermal inertia façade materials represents an effective and sustainable strategy for reducing operational energy use, lowering carbon emissions, and enhancing indoor thermal comfort in cold-climate regions. The proposed methodology supports the development of resilient, energy-conscious building envelopes aligned with long-term national goals for energy efficiency and environmental sustainability.

*Keywords:* building envelope, energy consumption, Pareto optimization, Tabriz city, thermal insulation

**Citation:** Rahmany Khorram, Zahra, & Maleki, Aida. (2026). Multi-objective optimization of internal and external insulation of residential building walls in cold climates (Tabriz city). *Journal of Fine Arts: Architecture and Urban Planning*, 31(1), 107-121. (in Persian)



© Authors retain the copyright and the full publishing.

Publisher: University of Tehran Press.

\*This article is derived from the first author's master thesis, entitled "Feasibility study and comparative analysis of thermal insulation of existing building envelopes from the interior or exterior", under the supervision of the second author at the Tabriz Islamic Art University.

## بهینه‌سازی چند هدفه عایق کاری داخلی و خارجی دیوارهای ساختمان‌های مسکونی در اقلیم سرد (شهر تبریز)\*

### چکیده

در سال‌های اخیر، مصرف بالای انرژی در ساختمان‌های مسکونی ایران به یکی از چالش‌های اساسی در بخش انرژی کشور تبدیل شده است. این پژوهش با هدف ارزیابی اثر نوع و موقعیت عایق حرارتی بر عملکرد انرژی ساختمان‌های مسکونی در اقلیم سرد تبریز انجام شد. بدین منظور، پنج نوع مصالح عایق شامل پشم سنگ، پشم معدنی، یاف چوب، پلی‌استایرن و یاف سیسال، در ترکیب با پنج نوع نمای

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹  
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۲۲  
تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۵/۰۱/۳۰  
زهرا رحمانی خرم<sup>۱</sup>: کارشناس ارشد معماری و انرژی، گروه فناوری معماری، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران.

E-mail: za.rahmany@tabriziau.ac.ir

آی‌دا ملکی<sup>۲</sup> (نویسنده مسئول): دانشیار گروه فناوری معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران.

E-mail: a.maleki@tabriziau.ac.ir

<https://doi.org/10.22059/jfaup.2026.405458.673137>

متداول (آجر رسی، آجر نسوز، سیمان، سنگ تراورتن و سنگ گرانیت) مورد بررسی قرار گرفتند. شبیه‌سازی‌های انرژی با استفاده از نرم‌افزار *DesignBuilder* و موتور *EnergyPlus* انجام شد و تأثیر عایق کاری بر شاخص‌هایی نظیر مصرف انرژی گرمایشی و سرمایشی، هزینه، انتشار کربن و نارضایتی حرارتی ساکنان ارزیابی گردید. تحلیل‌های چندهدفه با استفاده از الگوریتم جبهه پارتو (*Pareto Front*) و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس (*TOPSIS*) برای شناسایی سناریوی بهینه انجام گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از عایق پلی‌استایرن در موقعیت خارجی دیوار با نمای آجری، بهترین عملکرد حرارتی را داشته و منجر به کاهش حدود ۶/۸ درصدی مصرف انرژی گرمایشی، ۷۱ درصدی مصرف کل انرژی و بهبود ۸۱ درصدی آسایش حرارتی گردید. یافته‌ها نشان می‌دهند که انتخاب نوع و محل قرارگیری عایق، متناسب با اقلیم و مصالح بومی، می‌تواند نقش مؤثری در بهبود کارایی انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی ساختمان‌ها ایفا کند.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی پارتو، پوسته خارجی ساختمان، تبریز، عایق کاری حرارتی، مصرف انرژی

استناد: رحمانی خرم، زهرا و ملکی، آیدا. (۱۴۰۵). بهینه‌سازی چند هدفه عایق کاری داخلی و خارجی دیوارهای ساختمان‌های مسکونی در اقلیم سرد (شهر تبریز). نشریه هنرهای زیبا: معماری و شهرسازی، ۳۱(۱)، ۱۰۷-۱۲۱.

## مقدمه

انرژی، ملاحظات اقتصادی، اثرات زیست‌محیطی و آسایش حرارتی ساکنان را بهبود بخشند.

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه عایق کاری ساختمان‌ها، یا صرفاً بر بهبود عملکرد انرژی متمرکز بوده‌اند، یا اقلیم‌های غیرسرد را مورد بررسی قرار داده‌اند. علاوه بر این، در اغلب مطالعات، فرآیند انتخاب سناریوی بهینه بدون استفاده از چارچوب‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره یا بدون تمرکز بر ساختمان‌های موجود انجام شده است. بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش، بهینه‌سازی عایق کاری دیوارهای ساختمان‌های مسکونی موجود از طریق به کارگیری یک چارچوب تصمیم‌گیری چندهدفه مبتنی بر شناسایی جبهه پارتو (Pareto Front) و رتبه‌بندی سناریوهای غیرمغلوب با استفاده از روش TOPSIS است. در این چارچوب، سناریوهای مختلف عایق کاری بر اساس مجموعه‌ای از شاخص‌های عملکردی شامل مصرف انرژی گرمایشی و سرمایشی، هزینه‌های مرتبط با عایق کاری، انتشار کربن مصالح و آسایش حرارتی ساکنان مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

نوآوری اصلی این پژوهش در ترکیب روش‌های شبیه‌سازی مبتنی بر *DesignBuilder* با یک چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه و تصمیم‌گیری چندمعیاره، با تمرکز بر ساختمان‌های موجود در اقلیم سرد تبریز نهفته است. این رویکرد، برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین، به جای تمرکز بر یک شاخص منفرد، امکان انتخاب سناریوی بهینه‌ای را فراهم می‌سازد که از نظر اجرایی واقع‌گرایانه بوده و تعادل مناسبی میان معیارهای انرژی، اقتصادی، زیست‌محیطی و آسایش حرارتی برقرار می‌کند.

## روش پژوهش

پژوهش حاضر به عنوان یک پروژه تعریف شده با هدف ارزیابی مصرف انرژی در ساختمان‌های در حال بهره‌برداری از طریق ادغام عایق کاری حرارتی، انجام شده است. برای دستیابی به این هدف، در این تحقیق، استفاده از الیاف سیسال، پلی‌استایرن، پشم معدنی، پشم سنگ و الیاف چوب به عنوان مصالح عایق حرارتی برای ساختمان‌های مسکونی موجود، مورد ارزیابی قرار گرفت.

شهر تبریز به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. پلان معماری نماینده ساختمان‌های مسکونی این شهر با استفاده از نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر (*Design-Builder*) مدل‌سازی شدند. پنج ماده عایق فوق، بر اساس خواص حرارتی و قابلیت کاربرد انتخاب شده و دیگر متغیرهای در نظر گرفته شده در پژوهش در محیط شبیه‌سازی دیزاین‌بیلدر، در کنار سایر اجزای پوسته ساختمان گنجانده شدند تا تأثیر آن‌ها بر پنج شاخص کلیدی عملکردی شامل مصرف انرژی سرمایشی، گرمایشی، انتشار کربن نهفته مصالح، هزینه و ناراضیاتی ساکنین ارزیابی شود. تحلیل‌های بیشتر در نرم‌افزار انرژی پلاس (*Ener-gyPlus*) انجام شد، که در آن ۷۵ ترکیب مختلف از سازه‌های دیوار و مصالح عایق شبیه‌سازی شدند. ترکیبی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (*MCDM*) و الگوریتم‌های بهینه‌سازی جبهه پارتو فرانت برای شناسایی راه‌حل‌های بهینه به کار گرفته شد. روش تاپسیس (*TOPSIS*) برای اختصاص وزن‌دهی و رتبه‌بندی کلیه سناریوها بر اساس امتیازات عملکردی آن‌ها استفاده گردید. در نهایت، ۳۶ سناریوی غیرغلبه شناسایی شدند و یک تحلیل مقایسه‌ای با تمرکز بر صرفه‌جویی انرژی، انتشار کربن، هزینه‌ها و ساعات ناراضیاتی ساکنین انجام گرفت. روش کلی پژوهش در تصویر ۱

مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی ایران به عنوان یک معضل حائز اهمیت در ساختار کلی انرژی کشور تلقی می‌شود. در این راستا، ضرورت وجود داده‌های دقیق و جامع و همچنین محاسبه و برآورد دقیق میزان مصرف انرژی در این ساختمان‌ها اجتناب‌ناپذیر است. استفاده از انرژی در بخش‌های مختلف کشور، نزدیک به ۴۰ درصد کل مصرف انرژی را به خود اختصاص می‌دهد و از این رو، نیازمند اتخاذ تدابیر نوین برای مدیریت این میزان مصرف و هزینه‌های مرتبط بر آن است (*Mehdi Abbasi, 2020*). از میان تمامی روش‌های مطرح شده، به نظر می‌رسد عایق کاری حرارتی مناسب به عنوان کارآمدترین راه‌حل عمل می‌کند. عایق کاری کارآمد، همزمان موجب افزایش عملکرد حرارتی و کاهش قابل توجه تقاضای انرژی می‌گردد (*Amani, 2024*). این نوع ادغام و راهکار، ظاهراً صرفه‌جویی چشمگیری در مصرف انرژی به ارمغان می‌آورد و بخش عمده‌ای از شیوه‌های ساختمانی با بهره‌وری انرژی بالا، حول محور مواد عایق با عملکرد عالی و کاربرد بهینه آن‌ها می‌چرخد (*Atashbar & Noorzai, 2023*). بدین ترتیب، اجرای چنین اقداماتی که به کاهش مصرف انرژی منجر می‌شود، نه تنها در کاهش هزینه‌های عملیاتی مؤثر است، بلکه به پایداری محیط زیست نیز یاری می‌رساند و از این طریق، اهداف گسترده‌تر حفظ انرژی در سطح ملی و جهانی را محقق می‌سازد (*Amani, 2024; Bagheri et al., 2024*).

عایق کاری حرارتی در حفظ محیط داخلی آسوده و مطلوب در طول سال در ساختمان‌های مسکونی ایران، نقشی اساسی ایفا می‌کند. عایق‌بندی حرارتی مؤثر، باعث می‌شود ساختمان‌ها در زمستان گرم‌تر و در تابستان خنک‌تر بمانند، صرف‌نظر از اینکه سیستم‌های تهویه مطبوع در حال استفاده باشند یا خیر، و در نتیجه منجر به صرفه‌جویی چشمگیر در انرژی و کاهش هزینه‌ها می‌شود (*Bouchark, 2024*). ادغام عایق‌بندی با عملکرد بالا در پوسته ساختمان، یک سد حرارتی قوی ایجاد می‌کند که تأثیر نوسانات دمایی خارجی را کاهش داده و در نتیجه عملکرد حرارتی سازه را بهبود می‌بخشد (*Chen et al., 2020*). در حال حاضر، عایق کاری به عنوان یک فناوری مطمئن برای حفظ انرژی در نظر گرفته می‌شود که نه تنها به کاهش هزینه‌های سالانه انرژی کمک می‌کند، بلکه هزینه‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف بالای انرژی را نیز می‌کاهد (*Ulutaş et al., 2023*). تغییرات در ضخامت عایق کاری یک پارامتر حیاتی در تحلیل عملکرد انرژی ساختمان‌های مسکونی ایران محسوب می‌شود. با توجه به تنوع شرایط اقلیمی در ایران و گوناگونی مصالح ساختمانی در دسترس، ضخامت عایق می‌تواند نقشی بسیار تعیین‌کننده ایفا کند. بر اساس عواملی مشخص، از جمله اقلیم محلی، مصالح ساختمانی، و منابع انرژی، یک ترکیب بهینه از منابع انرژی برای به حداقل رساندن مصرف انرژی جهت گرمایش و یا سرمایش وجود دارد (*Sharston & Murray, 2020*). پژوهش حاضر با تمرکز ویژه بر چالش‌های مرتبط با عایق کاری ساختمان‌های مسکونی موجود (در حال بهره‌برداری) در اقلیم سرد، به دنبال ارائه یک چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه برای انتخاب کارآمدترین سناریوی عایق کاری است. با توجه به شرایط اقلیمی خاص شهر تبریز و سهم بالای ساختمان‌های موجود در مصرف انرژی شهری، نیاز به راهکارهایی وجود دارد که ضمن قابلیت اجرا، بتوانند همزمان عملکرد

نمایش داده شده است.

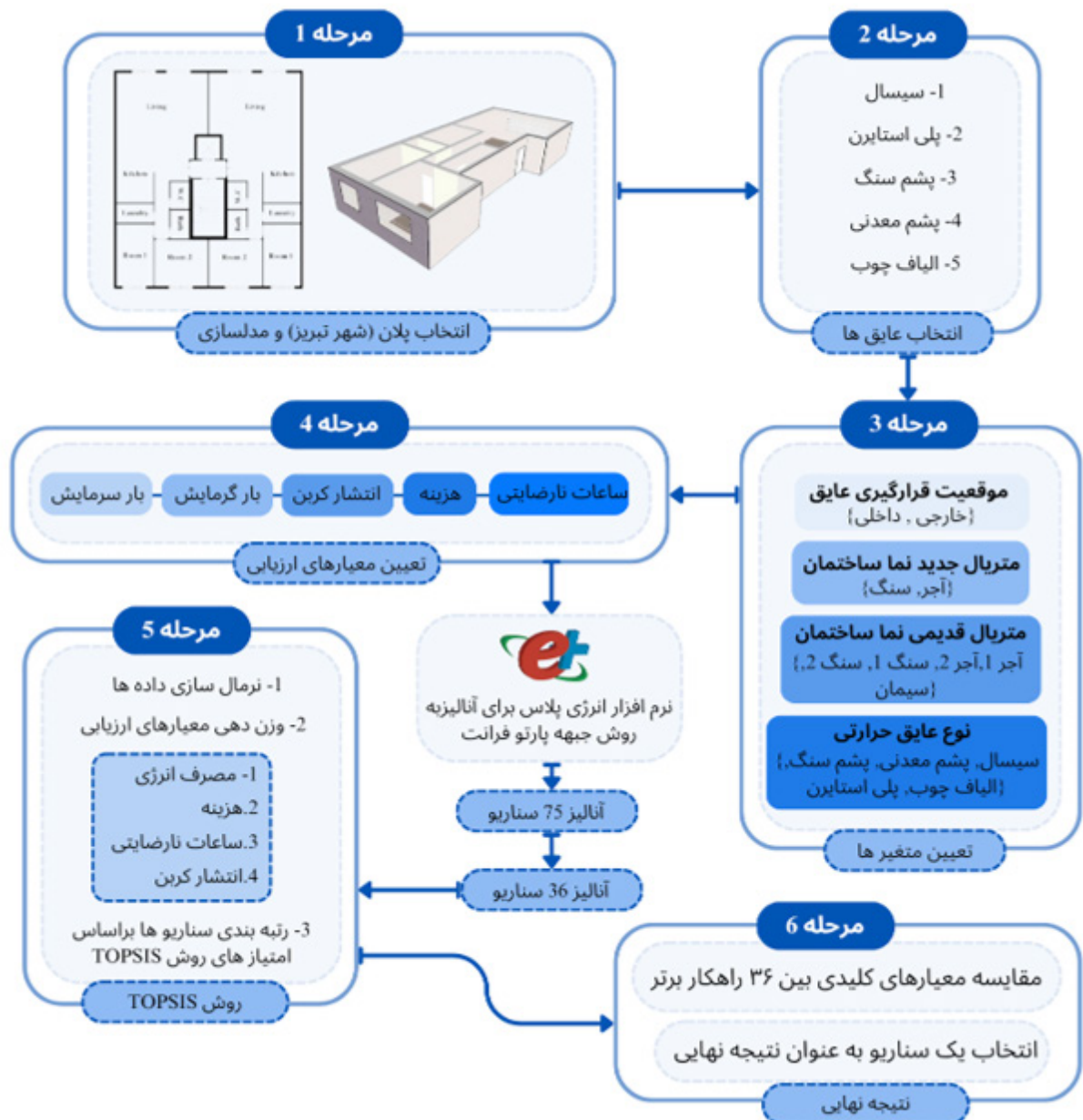
### پیشینه پژوهش

پژوهش‌ها نشان می‌دهند که افزایش ضخامت عایق کاری عموماً منجر به کاهش مصرف انرژی و به حداقل رساندن تلفات حرارتی می‌شود؛ با این حال، دامنه این مزایا می‌تواند بسته به شرایط و ویژگی‌های خاص هر ساختمان متفاوت باشد (Luo et al., 2024; Muhieldeen et al., 2020). ضخامت عایق، عامل اصلی تعیین‌کننده میزان صرفه‌جویی در انرژی است و مقادیر بهینه آن تابعی از منطقه اقلیمی و نوع سوخت مصرفی هستند. یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار مهم، موقعیت قرارگیری عایق کاری است. در این زمینه، عایق کاری خارجی عملکرد بهتری نسبت به بیکربندی‌های عایق کاری داخلی یا میانی دارد و در اقلیم‌های سرد می‌تواند تا ۲۰ درصد بهبود در مقاومت حرارتی ایجاد کند (Veit et al., 2023). در مناطق سرد،

استفاده از دیوارهای پیش‌ساخته با عایق خارجی می‌تواند تا ۴۹/۳۸ درصد صرفه‌جویی انرژی به همراه داشته باشد. همچنین، بازسازی‌های داخلی ساختمان‌های تاریخی به دلیل محدودیت‌های زیبایی‌شناختی، نیازمند استفاده از مصالح گران‌قیمت مانند پانل‌های چوب پنبه یا فوم پلی‌اورتان هستند (Sharston & Murray, 2020).

جنس مواد عایق نیز نقشی حیاتی در میزان اثربخشی مقادیر مختلف مقاومت حرارتی ایفا می‌کند (Veit et al., 2023). در یک تحقیق تطبیقی بر روی مواد فوم پلی‌اورتان با ضرایب انتقال حرارت متفاوت، مشخص شد که ضخامت عایق ساختمان برای عملکرد حرارتی بسیار حیاتی است. همچنین، فوم پلی‌اورتانی که حاوی PMS (یک افزودنی خاص) بود، نسبت به محصولات تجاری، ۳/۸۶ درصد صرفه‌جویی انرژی بیشتری به دست آورد (Ustaoglu et al., 2018). به دنبال آن، مجموعه‌ای از مطالعات انجام

تصویر ۱. روند کلی روش پژوهش



استفاده شد که به‌طور گسترده در مطالعات علمی معتبر به کار گرفته شده است. یکی از مطالعات اخیر نشان داده است که مدل‌سازی با *Design-Builder*، به‌ویژه در شبیه‌سازی فرآیندهای مرتبط با پوسته ساختمان و نشت هوا، در صورت استفاده از داده‌های دقیق اقلیمی، می‌تواند دقت پیش‌بینی مصرف انرژی را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. در این مطالعه، ترکیب مدل‌های مختلف شبیه‌سازی نشت هوا و داده‌های متفاوت باد مورد آزمون قرار گرفت و نتایج آن با استفاده از استاندارد *ASTM 5157* صحت‌سنجی شد (Bastos Porsani & Fernández Bandera, 2023).

در پژوهش حاضر نیز، مدل‌سازی ساختمان بر اساس همین چارچوب معتبر انجام شده و داده‌های اقلیمی و پارامترهای شبیه‌سازی به‌صورت یکسان در تمامی سناریوها اعمال گردید تا امکان مقایسه منصفانه نتایج فراهم شود. همچنین، کلیه مشخصات حرارتی مصالح بر اساس استانداردهای *ASHRAE* و مقررات ملی ساختمان ایران تعریف گردید. این رویکرد، در کنار استفاده از موتور محاسباتی معتبر *EnergyPlus*، اعتبار و قابلیت اتکای نتایج شبیه‌سازی را تضمین می‌نماید.

### چارچوب شبیه‌سازی

در این پژوهش، جهت دستیابی به نتایجی واقع‌بینانه و قابل مقایسه، ویژگی‌های ترموفیزیکی مصالح بر اساس استانداردهای *ASHRAE* (2014) انتخاب شده، بدین منظور، پنج نوع متریال برای نمای ساختمان موجود در نظر گرفته شد؛ آجر نسوز، آجر رسی، سنگ تراورتن، سنگ گرانیت، و سیمان و عایق‌های انتخابی شامل پنج نوع عایق که عبارت‌اند از عایق حرارتی سیسال، الیاف چوب، پشم سنگ، پشم معدنی، پلی استایرن است که جزئیات آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده‌است.

یکی از متغیرهای کلیدی در بهینه‌سازی پوسته ساختمان، ضخامت لایه عایق است. با توجه به رویکرد پارامتریک مورد تأکید در مطالعات اخیر، در مرحله پیش‌ارزیابی این پژوهش، تحلیل حساسیتی بر روی ضخامت

شده در زمینه عایق‌کاری حرارتی به منظور کاهش مصرف انرژی، به همراه مصالح به کار رفته در هر مطالعه، در جدول ۱ ارائه و تشریح شده‌اند.

### مبانی نظری پژوهش

#### شرایط آب و هوای تبریز

تبریز، واقع در شمال غربی ایران، با اقلیم سرد و خشک مشخص می‌شود که دارای نوسانات قابل توجه فصلی در دما و بارش است. زمستان‌ها عموماً بسیار سرد هستند، در حالی که تابستان‌ها می‌توانند گرم و خشک باشند و روزهای کمتری دارای پوشش ابر یا بارندگی هستند (Heydari & Movaghari, 2025). رطوبت نسبی در تبریز تقریباً در تمام طول سال ثابت و پایین باقی می‌ماند، که این امر طبقه‌بندی اقلیمی منطقه را به عنوان سرد و خشک تقویت می‌کند. این خشکی به ویژه در طول ماه‌های تابستان برجسته می‌شود، زمانی که میزان بارش کاهش یافته و سطح رطوبت بیشتر افت می‌کند (Kakhki & Sepehri, 2011). فراوانی تابش خورشید، همراه با میزان کم بارش و رطوبت، به این معنی است که روزهای صاف و آفتابی برای بخش اعظم سال، ویژگی بارز اقلیم تبریز محسوب می‌شوند (Ryder, 2009).

### مدلسازی ساختمان مسکونی

نقشه‌های معماری منتخب، که از سازمان نظام مهندسی شهر تبریز تهیه شدند، بر اساس رایج‌ترین پیکربندی فضایی برای یک ساختمان مسکونی دو خوابه با مساحت تقریبی ۱۰۰ متر مربع انتخاب گردیدند. این انتخاب، مطابق با پارامترهای تعریف‌شده در پروژه بود. طرح معماری انتخاب‌شده در تصویر ۲ نمایش داده شده‌اند.

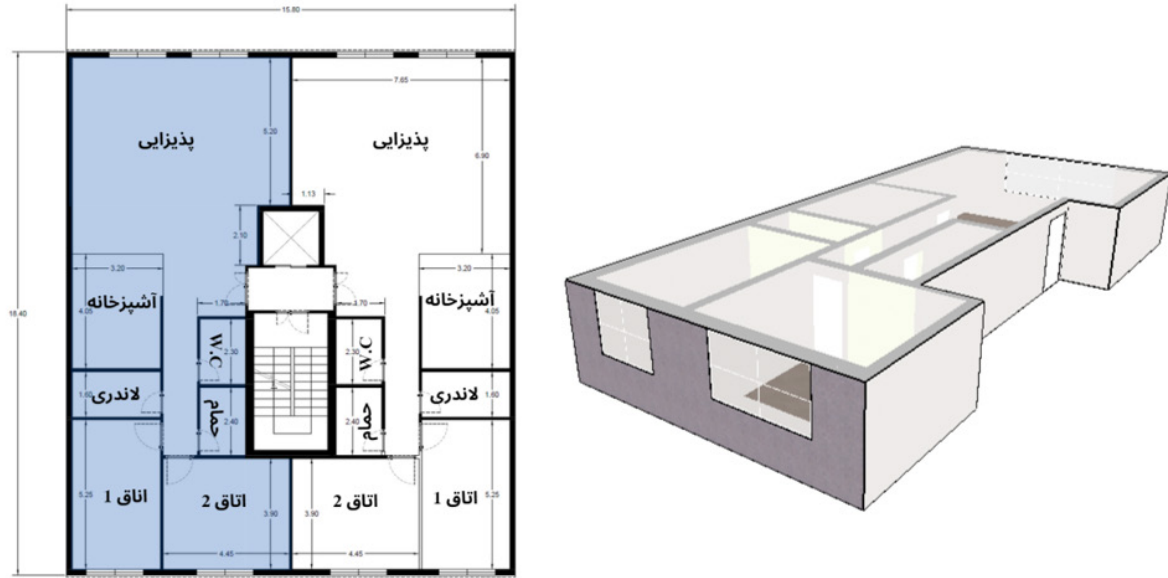
### اعتبارسنجی نرم‌افزار شبیه‌سازی

به‌منظور اطمینان از اعتبار و قابلیت اتکای نتایج شبیه‌سازی، در این پژوهش از نرم‌افزار *DesignBuilder* با موتور محاسباتی *EnergyPlus*

جدول ۱. بررسی مقالات در زمینه بهینه‌سازی عایق‌های حرارتی و تأثیر آن‌ها بر مصرف انرژی (یافته‌های پژوهش)

نویسندگان	عنوان	نوع عایق	یافته
(Özel et al., 2015)	تعیین ضخامت بهینه عایق با استفاده از تحلیل‌های زیست محیطی و هزینه چرخه عمر	پشم شیشه و پشم سنگ	برای پشم شیشه ضخامت بهینه ۰/۱۵ متر و برای پشم سنگ ۰/۰۶۴ متر بود که کاهش قابل توجهی در انتشار CO <sub>2</sub> داشت.
(Kallioğlu et al., 2020)	مدلسازی تجربی بین درجه روز و ضخامت بهینه عایق برای دیوار خارجی	پلی استایرن (منبسط و اکستروژ شده)،	مدل‌های ارائه‌شده توانستند ضخامت بهینه عایق را با دقت بالا تعیین کنند و مقادیر R2 نزدیک به ۰/۹۹ بودند.
(Dombayci et al., 2020)	تعیین ضخامت عایق بهینه برای ساختمان دیوارهای خارجی با مواد عایق مختلف با استفاده از ارزیابی اثرات زیست محیطی	پشم شیشه و پشم سنگ	پشم شیشه با ضخامت بهینه ۰/۴۰ متر توانست اتلاف انرژی را تا ۷۵٪ کاهش دهد، در حالی که برای پشم سنگ کاهش ۳۵٪ ثبت شد.
(Ouhaibi et al., 2022)	عایق حرارتی مبتنی بر الیاف سیسال برای استفاده در ساختمان‌ها	الیاف سیسال	عایق حرارتی سیسال باعث کاهش ۷۸٪ در نیاز سرمایشی و ۷۶٪ در نیاز گرمایشی شد. این عایق همچنین هزینه‌های اقتصادی پایینی دارد و در مقایسه با عایق‌های طبیعی دیگر، اثرات زیست‌محیطی بهتری دارد.
(Aktemur et al., 2024)	بهینه‌سازی ضخامت عایق حرارتی بر اساس جهت‌گیری‌های دیوار و تابش خورشیدی با استفاده از روش ساعت-درجه گرمایشی	پلی استایرن (منبسط و اکستروژ شده)، پلی‌اورتان، الیاف چوب، الیاف کف، الیاف کتان، پشم شیشه، پشم گوسفند	کمترین هزینه کلی گرمایش، مربوط به ترکیب بلوک سفالی توخالی و پشم شیشه (جهت جنوب) با هزینه ۱۴/۱۹ €/m <sup>2</sup> بود. بیشترین صرفه‌جویی انرژی مربوط به بلوک سفالی و پشم شیشه (جهت جنوب) با ۷۲/۷۶ €/m <sup>2</sup> و کوتاه‌ترین دوره بازگشت سرمایه مربوط به بلوک سفالی و الیاف کتان با ۱/۶۰ سال بود.
(Alyami, 2024)	تأثیر ترکیب و موقعیت‌یابی عایق حرارتی در پوسته ساختمان، بر مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی کم‌ارتفاع در مناطق با اقلیم گرم	پلی استایرن (منبسط و اکستروژ شده)، پلی‌اورتان، الیاف چوب، پشم شیشه، پشم معدنی، فوم شیشه	بهبود عایق‌کاری دیوارها و سقف با بهترین طرح‌بندی، عملکرد حرارتی را بهبود بخشید و مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا ۴۲/۵٪ کاهش داد و صرفه‌جویی هزینه‌ای ۳۳٪ (در ۳۰ سال) با دوره بازگشت سرمایه تقریباً ۷/۹۸ سال به همراه داشت.

تصویر ۲. پلان ساختمان مسکونی شهر تبریز



هستند که مستقیماً بر عملکرد حرارتی کلی پوسته ساختمان تأثیر می‌گذارد. در جدول ۴، ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی پنج نوع عایق مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها، شامل الیاف سیسال، پلی‌استایرن، پشم معدنی، پشم سنگ و الیاف چوب، ارائه شده است. تفاوت عمده این مصالح در هدایت حرارتی پایین آن‌ها و همچنین دامنه گسترده چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه مشاهده می‌شود که در تحلیل‌های پویا حائز اهمیت هستند.

در مجموع، با در نظر رفتن مصالح نمای جدید و قدیمی، همچنین پنج نوع عایق و موقعیت قرارگیری عایق حرارتی در جداره، ۷۵ سناریوی مجزا برای شهر تبریز تعریف شده است که تمامی این متغیرها در جدول ۵ جمع‌آوری شده است.

#### چارچوب بهینه‌سازی و تنظیمات شبیه‌سازی

با توجه به ماهیت چندهدفه و چندمعیاره مسئله مورد بررسی، این پژوهش در زمره مسائل تصمیم‌گیری با اهداف متعارض قرار می‌گیرد که در آن شاخص‌های عملکردی متنوعی از جمله مصرف انرژی، هزینه اقتصادی، اثرات زیست‌محیطی و آسایش حرارتی به صورت هم‌زمان مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. از این رو، انتخاب چارچوب بهینه‌سازی مناسب

جدول ۴. ویژگی فیزیکی و حرارتی عایق‌ها

نوع عایق	هدایت حرارتی (w/m-K)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	ظرفیت گرمایی (J/kg-K)
سیسال (Sisal)	۰/۰۴	۳۰۰	۱۶۵۰
پلی‌استایرن (EPS)	۰/۰۳	۲۵	۱۳۰۰
پشم معدنی (Mineral Wool)	۰/۰۳	۱۱۵	۹۰۰
پشم سنگ (Rock Wool)	۰/۰۲۳	۱۸۰	۱۰۵۰
الیاف چوب (Wood Fiber)	۰/۰۲۸	۱۰۰	۸۲۵

تمامی ۵ نوع عایق انتخابی در بازه ۰/۷۹ تا ۱۱/۳۹ سانتی‌متر (Bazoovarz et al., 2023) انجام یافت. نتایج این تحلیل اولیه نشان داد که در اقلیم سرد و خشک تبریز، به دلیل غلبه قابل توجه نیاز گرمایشی بر سرمایشی، تابع هدف مصرف انرژی با افزایش ضخامت عایق تا مرز بیشینه، رفتاری نزولی دارد. به عبارتی، در تمامی سناریوها، ضخامت حداکثری منجر به بهینه‌ترین حالت در کاهش مصرف سوخت و بهبود آسایش حرارتی گردید. لذا جهت متمرکز نمودن توان محاسباتی بر تحلیل اثر متقابل «نوع مصالح عایق» و «موقعیت قرارگیری آن در پوسته» و همچنین جلوگیری از پیچیدگی بیش از حد در تعداد سناریوهای نهایی، ضخامت ۱۱/۳۹ سانتی‌متر (مطابق با مقاومت حرارتی هدف) به عنوان نقطه بهینه، ثابت برای تمامی عایق‌ها در نظر گرفته شد. این رویکرد اجازه داد تا اثر متغیرهای کیفی و موقعیتی، با دقت بالاتری در الگوریتم تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS مورد واکاوی قرار گیرد.

مشخصات حرارتی و فیزیکی پنج نوع مصالح رایج نما که در شبیه‌سازی‌ها به کار رفته‌اند، در جدول ۳ خلاصه شده است. این مصالح شامل آجر نسوز، آجر رسی، سیمان، سنگ تراورتن و سنگ گرانیت، دارای تفاوت‌های قابل توجهی در ضخامت، هدایت حرارتی و چگالی

جدول ۳. جزئیات متریال نما ساختمان

متریال نما	ضخامت (cm)	هدایت حرارتی (w/m-K)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	ظرفیت گرمایی (J/kg-K)
آجر نسوز	۳/۰	۰/۸۵	۲۰۰۰	۸۷۰
آجر رسی	۲/۵	۰/۷۰	۱۷۵۰	۸۵۰
سیمان	۱/۵	۱/۰۰	۲۲۰۰	۹۰۰
سنگ تراورتن	۱/۵	۱/۹۰	۲۴۰۰	۸۷۵
سنگ گرانیت	۲/۰	۳/۰۰	۲۷۰۰	۷۷۵

جدول ۲. مشخصات مصالح استفاده شده در مدلسازی

ظرفیت گرمایی (J/kg-K)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	هدایت حرارتی (w/m-K)	ضخامت (cm)	مصالح	سطح
(به جدول ۳ مراجعه شود)				نما جدید	دیوار خارجی. با عایق حرارتی (عایق از خارج)
۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰/۵۸	۲	ماسه سیمان	
(به جدول ۴ مراجعه شود)				عایق حرارتی	
(به جدول ۳ مراجعه شود)				نما قدیمی	
۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰/۵۸	۲	ماسه سیمان	
۹۲۵	۱۹۰۰	۰/۶	۲۰	بلوک سفالی	
۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰/۵۸	۲	ماسه سیمان	
۱۰۹۰	۸۰۰	۰/۱۶	۲	گچ	
(به جدول ۳ مراجعه شود)				نما قدیمی	
۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰/۵۸	۲	ماسه سیمان	
۹۲۵	۱۹۰۰	۰/۶	۲۰	بلوک سفالی	
۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰/۵۸	۲	ماسه سیمان	
۱۰۹۰	۸۰۰	۰/۱۶	۲	گچ (قدیمی)	
(به جدول ۴ مراجعه شود)				عایق حرارتی	
۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰/۵۸	۲	ماسه سیمان	
۱۰۹۰	۸۰۰	۰/۱۶	۲	گچ (جدید)	
۱۰۹۰	۸۰۰	۰/۱۶	۲	گچ	
۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰/۵۸	۲	ماسه سیمان	
۹۲۵	۱۹۰۰	۰/۶	۲۰	بلوک سفالی	
۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰/۵۸	۲	ماسه سیمان	
۱۰۹۰	۸۰۰	۰/۱۶	۲	گچ	
۸۵۰	۲۰۰۲	۱/۳	۲	سرامیک	
۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰/۵۸	۲	ماسه سیمان	
۱۲۱۰	۱۰۰۰	۰/۱۵	۱	عایق رطوبتی	
۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰/۵۸	۲	ماسه سیمان	
۹۲۵	۱۹۰۰	۰/۶	۲۰	بلوک سفالی	
۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰/۵۸	۲	ماسه سیمان	
۱۰۹۰	۸۰۰	۰/۱۶	۲	گچ	
۱۰۹۰	۸۰۰	۰/۱۶	۲	گچ	
۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰/۵۸	۲	ماسه سیمان	
۹۲۵	۱۹۰۰	۰/۶	۲۰	بلوک سفالی	
۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰/۵۸	۲	ماسه سیمان	
۱۲۱۰	۱۰۰۰	۰/۱۵	۱	عایق رطوبتی	
۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰/۵۸	۲	ماسه سیمان	
۸۵۰	۲۰۰۲	۱/۳	۲	سرامیک	
۱۰۹۰	۸۰۰	۰/۱۶	۲	گچ	
۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰/۵۸	۲	ماسه سیمان	
۹۰۰	۲۳۰۰	۱/۸	۲۵	بتن مصالح	
۸۴۰	۶۴۰	۰/۱۱	۱۰	پوکه معدنی	
۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰/۵۸	۲	ماسه سیمان	
۸۵۰	۲۰۰۲	۱/۳	۲	سرامیک	

ظرفیت گرمایی (J/kg-K)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	هدایت حرارتی (w/m-K)	ضخامت (cm)	مصالح	سطح
۱۰۹۰	۸۰۰	۰/۱۶	۲	گچ	کف سرویس
۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰/۵۸	۲	ماسه سیمان	
۹۰۰	۲۳۰۰	۱/۸	۲۵	بتن مصالح	
۸۴۰	۶۴۰	۰/۱۱	۱۰	پوکه معدنی	
۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰/۵۸	۲	ماسه سیمان	
۱۲۱۰	۱۰۰۰	۰/۱۵	۱	عایق رطوبتی	
۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰/۵۸	۲	ماسه سیمان	
۸۵۰	۲۰۰۲	۱/۳	۲	سرامیک	
۸۵۰	۲۰۰۲	۱/۳	۲	سرامیک	سقف داخلی (بین طبقات)
۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰/۵۸	۲	ماسه سیمان	
۸۴۰	۶۴۰	۰/۱۱	۱۰	پوکه معدنی	
۹۰۰	۲۳۰۰	۱/۸	۲۵	بتن مصالح	
۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰/۵۸	۲	ماسه سیمان	
۱۰۹۰	۸۰۰	۰/۱۶	۲	گچ	
۸۵۰	۲۰۰۲	۱/۳	۲	سرامیک	
۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰/۵۸	۲	ماسه سیمان	
۸۵۰	۲۰۰۲	۱/۳	۲	سرامیک	سقف سرویس
۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰/۵۸	۲	ماسه سیمان	
۱۲۱۰	۱۰۰۰	۰/۱۵	۱	عایق رطوبتی	
۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰/۵۸	۲	ماسه سیمان	
۸۴۰	۶۴۰	۰/۱۱	۱۰	پوکه معدنی	
۹۰۰	۲۳۰۰	۱/۸	۲۵	بتن مصالح	
۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰/۵۸	۲	ماسه سیمان	
۱۰۹۰	۸۰۰	۰/۱۶	۲	گچ	

مستلزم تعریف یک تابع هدف واحد از طریق ترکیب معیارهای ناهمگون و تعیین وزن‌های اولیه الگوریتمی است که می‌تواند منجر به افزایش عدم قطعیت، وابستگی نتایج به تنظیمات الگوریتم و کاهش شفافیت فرآیند تصمیم‌گیری شود؛ به‌ویژه در مطالعاتی که هدف نهایی آن‌ها انتخاب یک سناریوی اجرایی و واقع‌گرایانه برای ساختمان‌های موجود است.

بر این اساس، در این پژوهش به‌جای جستجوی پیوسته فضای طراحی، از یک چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر شناسایی جنبه پارتو (Pare-to Front) و سپس رتبه‌بندی سناریوهای غیرمغلوب با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS استفاده شد. این رویکرد امکان حفظ استقلال شاخص‌ها، کاهش پیچیدگی محاسباتی و تحلیل شفاف روابط میان معیارهای متعارض را فراهم می‌سازد. از آنجا که معیارهای ارزیابی مورد استفاده دارای واحدهای اندازه‌گیری متفاوت و دامنه‌های عددی ناهمگن بوده و در برخی موارد تداخل مفهومی میان آن‌ها وجود داشت، در گام

جدول ۵. متغیرهای مستقل

شهر (اقلیم)	تبریز (اقلیم سرد)
نمای ساختمان (جدید)	سنگ گرانیت، آجر نسوز
نمای ساختمان (قدیمی)	سنگ تراورتن، سنگ گرانیت، آجر نسوز، آجر رسی، سیمانی
نوع عایق	سیسال، پشم معدنی، پشم سنگ، پلی استایرن، الیاف چوبی
موقعیت قرارگیری عایق در جداره	داخلی، خارجی
مجموع سناریوها	۷۵ سناریو

نقش تعیین‌کننده‌ای در اعتبار نتایج دارد. در بسیاری از مطالعات مشابه، از الگوریتم‌های فراابتکاری نظیر الگوریتم ژنتیک برای جستجوی پیوسته فضای طراحی استفاده می‌شود. با این حال، به‌کارگیری این الگوریتم‌ها

### ب) ساختار دیوار با عایق خارجی

به طور مشابه، ساختار دیواری که دارای لایه عایق خارجی است، شامل اتصال عایق و اجزای مرتبط با آن به سطح خارجی سازه اصلی است. در این حالت، پس از اعمال تمهیدات لازم، نمای سنگی یا آجری به عنوان لایه نهایی خارجی ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ج) ساختار دیوار با عایق داخلی

برای ساختار دیواری که دارای لایه عایق داخلی است، عایق و اجزای مرتبط با آن، به سطح داخلی همان سازه اصلی متصل می‌شوند. سپس، یک لایه گچ به عنوان پوشش نهایی داخلی اجرا می‌گردد.

### ساختار لایه‌ای عایق کاری دیوار

اجرای لایه عایق: اجرای یک لایه عایق حرارتی بر روی ساختمان‌های مورد بررسی، مستلزم یک فرآیند لایه‌بندی مشخص است. در ابتدا، یک بستر مناسب، که تحت عنوان عامل چسباننده شناخته می‌شود، برای لایه عایق ایجاد می‌گردد. سپس لایه عایق بر روی این بستر قرار گرفته و توسط مهارکننده‌هایی که در فواصل ۵۰ سانتی متری نصب می‌شوند، محکم می‌گردد (Serino et al., 2006). مصالح عایق انتخاب شده برای این تحقیق، بر اساس مناسب بودن برای روش کاربرد انتخابی و مقاومت حرارتی کافی آن‌ها برگزیده شدند. تمام مشخصات لازم در جدول ۴ ارائه شده است.

لایه تقویت کننده و پوشش پایه: یک گام حیاتی در کاربرد عایق، ایجاد لایه تقویت کننده است که شامل دو لایه پوشش پایه (Base Coat) و یک مش یا توری تقویت کننده می‌باشد. پوشش پایه تقویت شده، وظیفه جذب تنش‌های حرارتی درون ساختار دیوار را بر عهده دارد که ممکن است از نوسانات قابل توجه دما ناشی شوند. این مکانیزم از ترک خوردگی جلوگیری کرده و در نتیجه، سیستم را در برابر نفوذ آب محافظت می‌کند. علاوه بر این، پوشش پایه تقویت شده مقاومت بالایی در برابر ضربه ایجاد می‌نماید. فراتر از این، پوشش پایه، زمینه بسیار خوبی برای مصالح پوششی نهایی فراهم کرده و به عنوان یک لایه تسطیح کننده عمل می‌کند و به طور مؤثری هرگونه ناهماهنگی ناشی از اتصالات پتل‌های عایق یا بست‌ها را هموار می‌سازد (Zhou et al., 2021).

انواع لایه محافظ: در خصوص لایه محافظ دو نوع آلی و معدنی وجود دارد. لایه محافظ آلی از مواد الاستیک بوده و به طور خاص در خنثی‌سازی تنش‌های اعمال شده بر نما مؤثر هستند. این ویژگی، آن‌ها را بسیار بادوام،

نخست مقادیر خام شاخص‌ها با استفاده از روش نرمال‌سازی خطی به بازه بدون بعد  $\{0, 1\}$  تبدیل شدند. این فرآیند ضمن حذف اثر واحدهای مختلف، امکان مقایسه منصفانه و هم‌زمان تمامی معیارها را فراهم نمود و از غالب شدن شاخص‌هایی با مقیاس عددی بزرگ‌تر در فرآیند تصمیم‌گیری جلوگیری کرد. در ادامه، به منظور لحاظ نمودن نیازها و اولویت‌های ساکنین در فرآیند انتخاب سناریوی بهینه، پنج متغیر تصمیم بر اساس اهمیت نسبی آن‌ها از دید بهره‌برداران ساختمان وزن‌دهی شدند. این وزن‌ها نقش هر شاخص را در رتبه‌بندی نهایی سناریوها مشخص کرده و امکان انتخاب گزینه‌ای متوازن میان معیارهای انرژی، اقتصادی، زیست‌محیطی و آسایش حرارتی را فراهم می‌سازند. در نهایت، با به کارگیری روش Topsis، سناریوهای عایق کاری بر اساس میزان نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل و فاصله از راه‌حل ضداپتیده‌آل ارزیابی و رتبه‌بندی شدند. این چارچوب بهینه‌سازی، ضمن پاسخ‌گویی به ماهیت چندبعدی مسئله، امکان انتخاب سناریوی قابل اجرا، واقع‌گرایانه و منطبق با شرایط ساختمان‌های موجود در اقلیم سرد شهر تبریز را فراهم می‌کند.

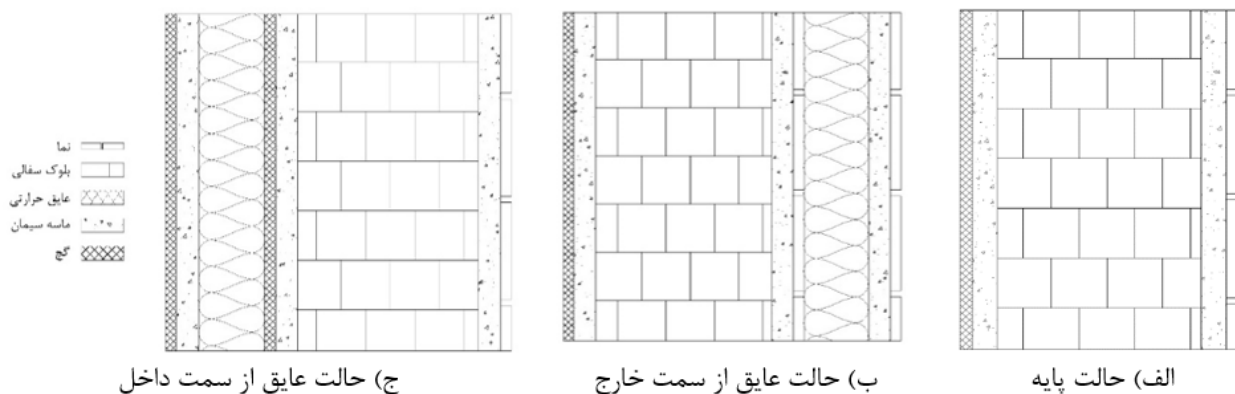
### تحلیل سناریوهای عایق کاری حرارتی

با توجه به اینکه پژوهش حاضر بر ارزیابی تأثیر عایق کاری حرارتی بر دیوارهای خارجی متمرکز است، سه سناریوی اصلی مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا، یک «حالت پایه» به عنوان «بدترین سناریو» تعریف شد که در آن، دیوار خارجی فاقد هرگونه عایق حرارتی بود. در دو سناریوی بعدی، لایه عایق حرارتی به ساختار دیوار اضافه شد. از آنجایی که این تحقیق یک ساختمان مسکونی موجود و در حال بهره‌برداری را بررسی می‌کند، اجرای لایه عایق در فضای میانی دیوار امکان‌پذیر نبود. در نتیجه، دو پیکربندی جایگزین مورد تحلیل قرار گرفتند حالت اول اعمال یک لایه عایق بر سطح داخلی دیوار و دومین حالت اعمال یک لایه عایق بر سطح خارجی دیوار، که جزئیات آن در تصویر ۳ نمایش داده شده است.

### الف) ساختار دیوار بدون عایق (حالت پایه)

ساختار کلی و لایه‌بندی دیوار بدون عایق شامل یک سازه اصلی متشکل از بلوک‌های سفالی به ضخامت ۲۰ سانتی متر است. لایه داخلی این ساختار، گچ بوده، در حالی که لایه خارجی می‌تواند یکی از پنج مصالح نما ذکر شده در جدول ۳ باشد. این مشخصات، برگرفته از مقررات ملی ساختمان ایران (Ministry of Roads and Urban Development, 2020) هستند.

تصویر ۳. لایه‌بندی اجرا عایق حرارتی از داخل و خارج (یافته‌های پژوهش)



ج) حالت عایق از سمت داخل

ب) حالت عایق از سمت خارج

الف) حالت پایه

۴. میزان انتشارات کربن مربوط به مصالح عالی؛

۵. مدت زمان نارضایتی ساکنین از شرایط محیطی.

### پیش فرض‌ها و خروجی‌های تحلیل‌های عملکردی

به منظور افزایش شفافیت روش‌شناسی و تبیین دقیق نقش هر یک از شاخص‌های ارزیابی در فرآیند تصمیم‌گیری، پیش فرض‌ها و خروجی‌های مربوط به تحلیل‌های انرژی، اقتصادی، زیست‌محیطی و آسایش حرارتی به صورت مجزا تعریف و تشریح شدند. در تمامی تحلیل‌ها، شرایط بهره‌برداری ساختمان، الگوی سکونت، برنامه‌های زمانی و مشخصات هندسی ثابت در نظر گرفته شد و تنها پارامترهای مرتبط با عایق‌کاری مورد بررسی قرار گرفتند.

در تحلیل انرژی، مصرف سالانه انرژی گرمایشی و سرمایشی ساختمان به عنوان خروجی اصلی شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. این شاخص بر اساس نتایج شبیه‌سازی دینامیکی و با فرض شرایط اقلیمی یکسان برای تمامی سناریوها استخراج گردید و به عنوان یکی از معیارهای اصلی ارزیابی عملکرد انرژی مورد استفاده قرار گرفت.

در تحلیل اقتصادی، تمرکز پژوهش بر هزینه‌های اولیه مرتبط با اجرای عایق حرارتی بوده است. در این بخش، هزینه تأمین و نصب مصالح عایق برای هر سناریو محاسبه و به عنوان شاخص اقتصادی در فرآیند تصمیم‌گیری چندمعیاره لحاظ شد. سایر هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری به منظور حفظ تمرکز مطالعه بر مقایسه مستقیم سناریوهای عایق‌کاری ثابت فرض گردید.

در تحلیل زیست‌محیطی، میزان انتشار کربن نهفته مصالح عایق به عنوان شاخص ارزیابی اثرات محیط‌زیستی در نظر گرفته شد. این شاخص بیانگر میزان دی‌اکسید کربن منتشر شده در فرآیند تولید مصالح عایق بوده و مستقل از مصرف انرژی بهره‌برداری ساختمان محاسبه گردید.

در نهایت، در تحلیل آسایش حرارتی، ساعات نارضایتی حرارتی ساکنان

مقاوم در برابر ترک خوردگی و مقاوم در برابر ضربه می‌سازد. در نتیجه، لایه محافظ آلی، بستر برجسته‌ای را برای نماهای گچی با ماندگاری طولانی فراهم می‌آورد. در مورد لایه محافظ معدنی، آهک، سیمان یا ترکیبی بهینه از این دو به عنوان عامل چسباننده اصلی عمل می‌کند. مزیت کلیدی این لایه محافظ، نفوذپذیری آن‌ها نسبت به بخار است (Zhou et al., 2021).

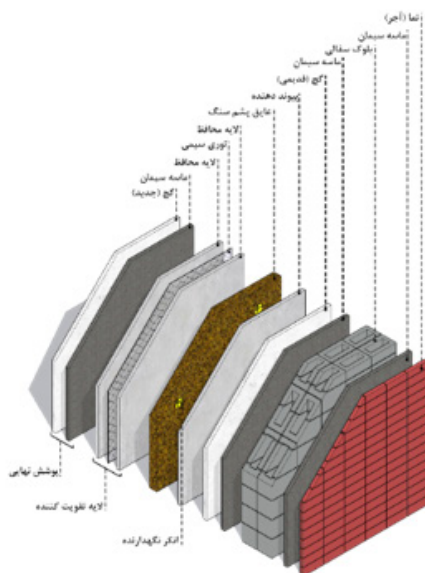
بین دو لایه محافظ، یک لایه مش تقویت‌کننده قرار می‌گیرد. این ساختار کامپوزیت است که پوشش پایه تقویت‌شده را در برابر تنش‌های حرارتی و بارهای مکانیکی که به طور اجتناب‌ناپذیر در طول بهره‌برداری از ساختمان رخ می‌دهند، مقاوم می‌سازد. هدف اولیه از وجود لایه تقویت‌کننده بین عایق و سطح، ایجاد یک پرایمر چسبنده قوی برای مصالح نما است (Zhou et al., 2021). پس از اجرای لایه تقویت‌کننده، نمای اصلی ساختمان اعمال می‌شود که برای این تحقیق، دو نوع سنگ و آجر مطابق با جدول ۳ انتخاب شده‌اند. مراحل لایه‌بندی عایق‌کاری حرارتی در تصویر ۴ ارائه شده است.

### شاخص‌های ارزیابی

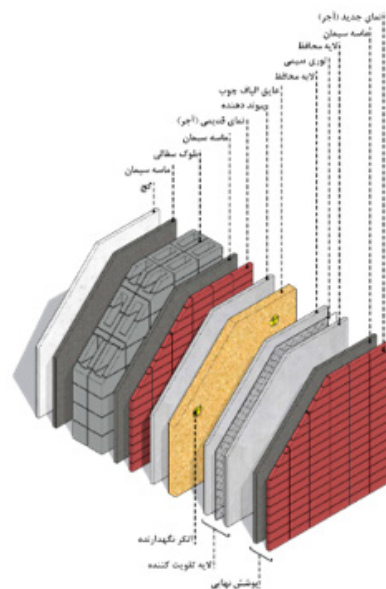
هدف اولیه پژوهش حاضر، بررسی و ارزیابی تأثیر به کارگیری عایق حرارتی بر پنج شاخص بنیادی مرتبط با عملکرد ساختمان بود. این شاخص‌ها به دقت انتخاب شدند تا ابعاد گوناگون پایداری و آسایش در ساختمان‌ها را پوشش دهند، ضمن اینکه تأثیر چشمگیر عایق‌کاری نیز به وضوح قابل تشخیص باشد. علاوه بر این، تلاش شد تا شاخص‌هایی انتخاب شوند که وابستگی خطی و مستقیم قابل توجهی به یکدیگر نداشته باشند، تا بدین ترتیب امکان تحلیل مستقل و چندبعدی اثرات عایق‌کاری فراهم گردد. این پنج شاخص عبارت‌اند از:

۱. سطح مصرف انرژی گرمایش؛
۲. سطح مصرف انرژی سرمایش؛
۳. هزینه‌های مرتبط با عایق‌کاری؛

تصویر ۴. مراحل لایه‌بندی عایق‌کاری حرارتی در چهاره (یافته‌های پژوهش)



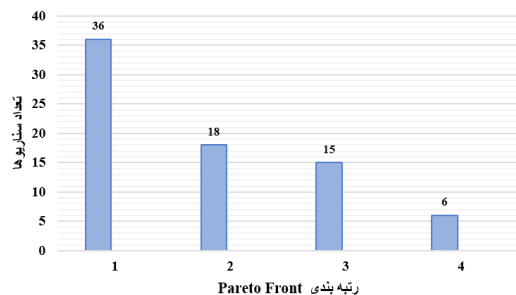
(ب) اجرا عایق از سمت داخل



(الف) اجرا عایق از سمت خارج

این بخش، یافته‌های حاصل از یک بهینه‌سازی چندهدفه را با هدف انتخاب مناسب‌ترین ساختارهای دیوار برای ساختمان‌های مسکونی در شهر تبریز ارائه می‌دهد. برای این منظور، در مجموع ۷۵ سناریوی مجزا که شامل تمامی ترکیبات ممکن از مصالح نما و عایق بودند، شبیه‌سازی و مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای شناسایی گزینه‌های برتر در میان پارامترهای متنوع و گاه متضاد، از روش جبهه پارتو (Pareto Front) استفاده شد. این رویکرد، شناسایی گزینه‌هایی را تسهیل می‌کند که عملکردشان در هیچ‌یک از شاخص‌های مورد نظر، بدتر از گزینه‌های دیگر نباشد و در نتیجه، در مرز پارتوی اول قرار گیرند. شاخص‌های در نظر گرفته شده در این بهینه‌سازی، شامل پنج عامل بنیادی هستند که عبارتند از که مصرف انرژی برای سرمایش و گرمایش، هزینه، انتشارات کربن، ساعات نارضایتی از شرایط حرارتی، و عملکرد حرارتی ساختمان است. برای اطمینان از محاسبات دقیق و قابل اتکا برای هر یک از این شاخص‌ها، ترکیبی از نرم‌افزار دیزاین بیلدر و موتور شبیه‌سازی انرژی پلاس به کار گرفته شد. پس از انجام شبیه‌سازی‌ها و محاسبه شاخص‌ها برای تمامی ۷۵ پیکربندی ممکن دیوار، گزینه‌های واقع شده در مرز پارتوی اول به عنوان انتخاب‌های بهینه اولیه برگزیده شدند. بر این اساس، ۳۶ سناریو از میان کل سناریوهای مورد بررسی، در این جبهه شناسایی شدند. در تصویر ۵ تعداد سناریوهای رتبه‌های ۱ تا ۴ نشان داده شده است که ۳۶ سناریو از مجموع ۷۵ سناریو در رتبه اول قرار داشتند و به همین ترتیب باقی سناریو‌ها در تصویر ۵ نشان داده شده است.

تصویر ۵. تعداد سناریوهای جبهه پارتو فرانت (یافته‌های پژوهش)



به‌عنوان خروجی اصلی انتخاب شد. این شاخص نشان‌دهنده مدت‌زمان قرارگیری شرایط داخلی ساختمان خارج از محدوده آسایش حرارتی بوده و به‌عنوان معیار سنجش کیفیت محیط داخلی در سناریوهای مختلف عایق‌کاری مورد استفاده قرار گرفت.

با توجه به ماهیت چندبعدی مسئله مورد بررسی و تنوع بالای پارامترها، پژوهش در زمره مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره با اهداف متعارض قرار می‌گیرد. در چنین مسائلی، استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری نظیر الگوریتم ژنتیک مستلزم تعریف تابع واحد از طریق ترکیب اهداف مختلف و اعمال وزن‌دهی اولیه است که می‌تواند منجر به افزایش عدم قطعیت و وابستگی نتایج به تنظیمات الگوریتمی شود. از این رو، در این پژوهش از یک چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر شناسایی جبهه پارتو (Pareto Front) و سپس رتبه‌بندی سناریوهای غیرمغلوب با استفاده از روش TOPSIS بهره گرفته شد. این رویکرد امکان بررسی همزمان اثر متغیرهای متعدد، حفظ استقلال شاخص‌ها، و انتخاب گزینه بهینه بر اساس نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل را فراهم می‌سازد. روش TOPSIS به‌ویژه در مسائل مهندسی ساختمان که هدف نهایی انتخاب گزینه‌های قابل اجرا، واقع‌گرایانه و متوازن میان معیارهای مختلف است، کارایی بالایی دارد و امکان تفسیر شفاف نتایج برای کاربردهای عملی را فراهم می‌کند.

### یافته‌های پژوهش

در این مطالعه، در مجموع ۷۵ سناریوی مجزا برای پوسته خارجی ساختمان که شامل عایق حرارتی بودند، برای شهر تبریز مورد بررسی قرار گرفته است. این سناریوهای تمامی ترکیبات ممکن پارامترهای انتخاب شده در پژوهش را در بر می‌گیرند. این سناریوها به گونه‌ای طراحی شدند که منعکس‌کننده یک دامنه جامع از شرایط واقع‌بینانه و قابل اجرا در ساختمان‌های موجود باشند و از این طریق، تحلیل دقیقی از تأثیر هر متغیر را امکان‌پذیر سازند. در ادامه نتایج هر دو روش تحلیل آورده خواهد شد. در جدول ۶ به اختصار سناریو‌ها آورده شده است.

### بررسی نتایج تحلیل چندهدفه جبهه پارتو فرانت

جدول ۶. اختصاری از ۷۵ سناریو (یافته‌های پژوهش)

محل عایق	لایه ۱	لایه ۲	لایه ۳	کربن نهفته	گرمایش	ساعات عدم آسایش	هزینه	سرمایش
خارج	سیمان	پلی‌استایرن	آجر	۴۷۹۵۱/۵۳	۲۹۷۹۰/۴	۶۹۴/۵۸	۲۷۴۸۹/۵۷	۸۵۸/۷۸
خارج	سیمان	پلی‌استایرن	سنگ	۴۸۶۵۶/۶۸	۲۹۷۹۸/۰۷	۶۹۴/۹۳	۲۷۲۷۰/۴/۷۶	۸۵۹/۵۹
خارج	سیمان	الیاف چوب	آجر	۴۷۷۰۵/۷۱	۳۰۰۴۴/۲۵	۷۰۱/۷۱	۲۷۴۸۸۸/۳۵	۸۶۰/۷۲
خارج	سیمان	الیاف چوب	سنگ	۴۸۴۱۰/۹۱	۳۰۰۶۰/۰	۷۰۱/۸۷	۲۷۲۷۳۳/۵۳	۸۶۰/۷۶
داخل	سنگ گرانیت	پلی‌استایرن	-	۴۷۸۵۱/۱۸	۲۹۸۶۴/۹۱	۶۹۸/۲۲	۲۷۲۶۵۸/۵۴	۸۷۳/۳۲
داخل	سنگ گرانیت	الیاف چوب	-	۴۷۶۰۵/۳۹	۳۰۱۰۲/۹۷	۷۰۵/۱۲	۲۷۲۶۸۷/۳۲	۸۷۳/۱۶
داخل	سنگ گرانیت	پشم سنگ	-	۴۸۰۳۵/۵۳	۲۹۹۶۰/۶۹	۷۰۱/۰۳	۲۷۲۶۷۲/۹۳	۸۷۳/۳۰
خارج	سیمان	پشم سنگ	سنگ	۴۸۸۴۱/۰۱	۲۹۹۰۳/۲۲	۶۹۷/۳۴	۲۷۲۷۱۹/۱۴	۸۵۹/۴۹
داخل	سنگ گرانیت	سیسال	-	۴۷۸۱۱/۹۱	۳۰۱۵۷/۸۶	۷۰۶/۲۳	۲۷۲۷۰/۸/۹۰	۸۷۲/۸۷
داخل	سیمان	پلی‌استایرن	-	۴۶۹۳۵/۸۴	۲۹۸۵۵/۳۳	۶۹۷/۹۴	۲۷۰۹۰/۶۰	۸۷۳/۹۱
داخل	سیمان	الیاف چوب	-	۴۶۶۹۰/۰۷	۳۰۰۹۰/۴۱	۷۰۴/۷۴	۲۷۰۹۳۵/۳۷	۸۷۳/۸۹
داخل	سیمان	پشم سنگ	-	۴۷۱۲۰/۱۷	۲۹۹۵۰/۱۶	۷۰۰/۸۷	۲۷۰۹۲۰/۹۸	۸۷۳/۹۰
داخل	سیمان	سیسال	-	۴۶۹۶۶/۵۷	۳۰۱۴۵/۳۵	۷۰۶/۰۲	۲۷۰۹۵۶/۹۴	۸۷۳/۴۷

### بررسی نتایج رتبه‌بندی نهایی با روش TOPSIS

گزینه‌های جایگزین بر اساس این ضریب، به صورت نزولی رتبه‌بندی می‌شوند و گزینه‌ای که بالاترین ضریب نزدیکی را کسب کند، به عنوان بهینه‌ترین بیکربندی دیوار از منظر چندمعیاره انتخاب می‌شود. با توجه به اینکه انتخاب نهایی صرفاً بر اساس یک شاخص واحد امکان‌پذیر نبود، ۳۶ سناریو مرز پارتو به عنوان داده‌های ورودی برای روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس (TOPSIS) (تکنیک رتبه‌بندی بر اساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل) استفاده شدند. در جدول ۸ نتایج حاصل از این روش به اختصار آورده شده است و سناریوها بر اساس اولویت‌های ما رتبه‌بندی شده‌اند.

نتایج حاصل از رتبه‌بندی سناریوهای عایق‌کاری با استفاده از روش TOPSIS نشان می‌دهد که سناریوهای منتخب، به‌جای بهینه‌سازی صرف یک شاخص خاص، عملکردی متوازن در میان مجموعه معیارهای انرژی، اقتصادی، زیست‌محیطی و آسایش حرارتی ارائه می‌دهند. این امر بیانگر آن است که سناریوی برتر صرفاً کمترین مصرف انرژی یا کمترین هزینه را نداشته، بلکه از منظر نزدیکی هم‌زمان به وضعیت ایده‌آل در تمامی شاخص‌ها انتخاب شده است. بررسی مقادیر نزدیکی نسبی (Close-ness Coefficient) نشان می‌دهد که اختلاف میان سناریوهای برتر و سناریوهای با رتبه پایین‌تر عمدتاً ناشی از عملکرد نامتوازن آن‌ها در یک یا چند شاخص کلیدی بوده است. به‌طور مشخص، برخی سناریوها علی‌رغم عملکرد مناسب در کاهش مصرف انرژی، به دلیل افزایش هزینه اجرایی یا اثرات زیست‌محیطی بالاتر، رتبه پایین‌تری کسب کرده‌اند. در مقابل، سناریوهای منتخب توانسته‌اند تعادل بهتری میان کاهش مصرف انرژی، کنترل هزینه و بهبود آسایش حرارتی برقرار کنند.

نتایج همچنین نشان می‌دهد که در شرایط اقلیمی سرد شهر تبریز، معیارهای مرتبط با آسایش حرارتی و مصرف انرژی نقش تعیین‌کننده‌تری در تفکیک سناریوها ایفا می‌کنند، در حالی که معیارهای اقتصادی و زیست‌محیطی بیشتر به‌عنوان عوامل تعدیل‌کننده در رتبه‌بندی نهایی عمل می‌نمایند. این موضوع اهمیت رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره را در انتخاب راهکارهای عایق‌کاری مناسب برای ساختمان‌های موجود برجسته می‌سازد. در مجموع، نتایج TOPSIS تأیید می‌کند که چارچوب بهینه‌سازی به‌کاررفته در این پژوهش قادر است سناریوهایی را شناسایی نماید که نه تنها از نظر فنی و انرژی‌محور کارآمد هستند، بلکه از منظر اجرایی و رفاه ساکنین نیز گزینه‌هایی واقع‌گرایانه و قابل‌اتکا محسوب می‌شوند.

### بررسی نتایج سناریو نهایی

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، سناریوی بهینه پیشنهادی که دارای بالاترین امتیاز از روش تاپسیس (TOPSIS) است شامل جانمایی عایق در سطح خارجی ساختار دیوار، استفاده از عایق پلی‌استایرن، با نمای موجود سیمانی و نمای نهایی آجری برای دستیابی به بهترین خروجی است. با توجه به اولویت‌های پژوهش (مصرف انرژی و آسایش)، این سناریو کاهش تقریبی ۱۷٪ در مصرف انرژی گرمایشی، کاهش ۸/۷۵٪ در مصرف انرژی سرمایشی و بهبود ۹۲/۱۷٪ در رضایت ساکنین را در مقایسه با حالت پایه نشان داد. این دستاوردها، نه تنها کارایی بالای عایق‌کاری خارجی در اقلیم سرد تبریز را تأیید می‌کند، بلکه نشان می‌دهد که انتخاب نوع خاص عایق و موقعیت‌یابی آن بر اساس اولویت‌های چندمعیاره، منجر به بهبود توأمان عملکرد انرژی و آسایش حرارتی می‌گردد.

روش تاپسیس (TOPSIS) (تکنیک رتبه‌بندی بر اساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل)، به عنوان یک تکنیک رایج در تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)، به دلیل سادگی، انطباق‌پذیری بالا و کارایی محاسباتی، از سایر رویکردهای ابتکاری پیشی می‌گیرد. این روش با تبدیل داده‌های چندگانه به یک شاخص عملکرد واحد، گزینه‌های جایگزین را بر اساس نزدیکی آن‌ها به بهترین راه‌حل ایده‌آل فرضی و فاصله از بدترین راه‌حل ایده‌آل فرضی، رتبه‌بندی می‌کند. اصل هسته‌ای تاپسیس بر این فرض استوار است که گزینه بهینه، دارای کوتاه‌ترین فاصله هندسی از راه‌حل ایده‌آل مثبت و بیشترین فاصله هندسی از راه‌حل ایده‌آل منفی است؛ این ویژگی امکان جبران عملکرد ضعیف در یک معیار را با عملکرد قوی در معیار دیگر فراهم می‌سازد (Shukla et al., 2017). در این پژوهش، فرآیند ماتریس تصمیم، به‌طور انحصاری شامل گزینه‌های جایگزینی است که در مرز پارتوی اول رتبه‌بندی شده‌اند.

با توجه به اینکه معیارهای مختلف دارای مقیاس‌ها و واحدهای اندازه‌گیری متفاوتی هستند مانند کیلووات ساعت برای مصرف انرژی، پوند برای هزینه ساخت، کیلوگرم  $CO_2$  برای انتشارات کربن، و ساعت برای آسایش حرارتی تمامی مقادیر درون ماتریس تصمیم در گام دوم فرآیند نرمال‌سازی می‌شوند تا یک مقیاس یکنواخت ایجاد شود. پس از نرمال‌سازی داده‌ها، مرحله بعدی شامل تخصیص وزن‌ها به هر معیار است. این گام حیاتی در تحلیل چندمعیاره، اهمیت نسبی هر معیار در فرآیند تصمیم‌گیری را تعیین می‌کند (Wang et al., 2009) و در پژوهش حاضر این وزن‌دهی به معیارها بر اساس اهداف اولیه و هدف بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها تخصیص داده شدند در نتیجه، معیارهای مرتبط با انرژی گرمایش و سرمایش در مقایسه با عواملی نظیر آسایش، هزینه و انتشارات کربن، وزن‌های بالاتری دریافت کردند که نشان‌دهنده تأکید کلی مطالعه بر کاهش مصرف انرژی است. این ضرایب وزن‌دهی در جدول ۷ ارائه شده‌اند.

جدول ۷. مشخصات مربوط به اولویت‌بندی و وزن‌دهی پارامترها (یافته‌های پژوهش)

معیارها	وزن دهی (%)
سرمایش	۲۵
گرمایش	۲۵
ساعات ناراضی	۲۰
هزینه	۲۰
کربن	۱۰

مجموع این وزن‌ها برابر با صد است و پس از تعیین، آن‌ها به ماتریس نرمال‌شده اعمال شدند تا ماتریس وزن‌دهی شده به دست آید. این ماتریس، مبنای اصلی برای محاسبات بعدی جهت ارزیابی نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل و رتبه‌بندی نهایی گزینه‌های جایگزین را تشکیل می‌دهد. در مرحله پایانی روش TOPSIS، پس از نرمال‌سازی و اعمال وزن‌ها، نزدیکی هر گزینه جایگزین به راه‌حل ایده‌آل محاسبه می‌شود. این شاخص، که تحت عنوان ضریب نزدیکی شناخته می‌شود، به عنوان معیاری برای ارزیابی برتری هر گزینه جایگزین در مقایسه با سایرین عمل می‌کند. در نهایت،

جدول ۸. رتبه‌بندی سناریوها به روش TOPSIS (یافته‌های پژوهش)

محل عایق	لایه ۱	لایه ۲	لایه ۳	کربن نهفته	گرمایش	ساعات عدم آسایش	هزینه ساخت	سرمایش	ضریب نزدیکی
خارج	سیمان	پلی‌استایرن	آجر	۴۷۹۵۱/۵۳	۲۹۷۹۰/۴۹	۶۹۴/۵۸	۲۷۴۸۵۹/۵۷	۸۵۸/۷۸	۰/۶۵۷۱
خارج	سیمان	پلی‌استایرن	سنگ	۴۸۶۵۶/۶۸	۲۹۷۹۸/۰۷	۶۹۴/۹۳	۲۷۲۷۰۴/۷۶	۸۵۹/۵۹	۰/۶۲۹۵
داخل	سیمان	پلی‌استایرن	-	۴۶۹۳۵/۸۴	۲۹۸۵۵/۳۳	۶۹۷/۹۴	۲۷۰۹۰/۶۰	۸۷۳/۹۱	۰/۶۲۷۲
داخل	سیمان	پشم سنگ	-	۴۷۱۲۰/۱۷	۲۹۹۵۰/۱۶	۷۰۰/۸۷	۲۷۰۹۲/۹۸	۸۷۳/۹۰	۰/۵۹۱۷
خارج	سیمان	پشم سنگ	سنگ	۴۸۸۴۱/۰۱	۲۹۹۰۳/۲۲	۶۹۷/۳۴	۲۷۲۷۱۹/۱۴	۸۵۹/۴۹	۰/۵۸۳۹
داخل	سنگ تراورتن	پلی‌استایرن	-	۴۷۲۱۹/۰۵	۲۹۸۵۹/۹۰	۶۹۷/۹۶	۲۷۲۷۰۴/۷۶	۸۷۳/۸۹	۰/۵۸۱۰
خارج	سنگ تراورتن	پلی‌استایرن	آجر	۴۸۲۳۴/۷۹	۲۹۷۹۸/۳۵	۶۹۴/۷۶	۲۷۶۶۵۸/۰۹	۸۵۷/۳۱	۰/۵۷۹۱
داخل	سیمان	الیاف چوب	-	۴۶۶۹۰/۰۷	۳۰۰۹۰/۴۱	۷۰۴/۷۴	۲۷۰۹۳۵/۳۷	۸۷۳/۸۹	۰/۵۷۳۳
خارج	سیمان	الیاف چوب	آجر	۴۷۷۰۵/۷۱	۳۰۰۴۴/۲۵	۷۰۱/۷۱	۲۷۴۸۸۸/۳۵	۸۶۰/۷۲	۰/۵۷۲۷
داخل	آجر رسی	پلی‌استایرن	-	۴۶۸۲۳/۴۰	۲۹۸۴۹/۸۴	۶۹۸/۰۹	۲۷۴۸۵۹/۵۷	۸۷۲/۸۷	۰/۵۶۹۵
خارج	سنگ تراورتن	پلی‌استایرن	سنگ	۴۸۹۳۹/۸۹	۲۹۷۹۹/۶۹	۶۹۵/۰۴	۲۷۴۵۰۲/۹۲	۸۵۹/۵۹	۰/۵۵۴۳
داخل	آجر نسوز	پلی‌استایرن	-	۴۷۱۴۵/۷۹	۲۹۸۵۴/۶۵	۶۹۸/۳۶	۲۷۴۸۱۴/۲۷	۸۷۲/۲۵	۰/۵۵۳۹
خارج	آجر رسی	پلی‌استایرن	آجر	۴۷۸۳۹/۲۷	۲۹۷۹۱/۱۳	۶۹۴/۶۶	۲۷۸۸۱۴/۵۰	۸۵۶/۸۷	۰/۵۵۲۹
داخل	سیمان	سیسال	-	۴۶۹۶۶/۵۷	۳۰۱۴۵/۳۵	۷۰۶/۰۲	۲۷۰۹۵۶/۹۴	۸۷۳/۴۷	۰/۵۴۷۹
داخل	سنگ گرانیت	پلی‌استایرن	-	۴۷۸۵۱/۱۸	۲۹۸۶۴/۹۱	۶۹۸/۲۲	۲۷۲۶۵۸/۵۴	۸۷۳/۳۲	۰/۵۳۸۷
خارج	سنگ تراورتن	پلی‌استایرن	سنگ	۴۸۹۳۹/۵۹	۲۹۷۹۹/۶۹	۶۹۵/۰۴	۲۷۴۵۰۲/۹۲	۸۵۹/۵۹	۰/۵۵۴۳

## بحث

این مطالعه بر اهمیت یکپارچه‌سازی تحلیل هزینه چرخه حیات (LCCA) و ارزیابی چرخه حیات (LCA) در مراحل اولیه طراحی صحنه می‌گذارد. مطابق با یافته‌های کابزا و همکاران (Cabeza et al., 2014) که فاز بهره‌برداری را عامل بیش از ۹۰ درصد مصرف انرژی و بیش از ۵۰ درصد اثرات گرمایش جهانی می‌دانند، پژوهش حاضر نیز اثبات می‌کند که مدیریت دقیق پوسته ساختمان مستقیماً بر تقلیل این اثرات مخرب تأثیرگذار است. همچنین، مقایسه رویکرد اقتصادی این پژوهش با بررسی‌های مطالعات کاینکلی، دهایف و استنفانی (Kaynakli, 2012) و (Dhaif & Stephan, 2021) نشان می‌دهد که اگرچه انتخاب سیستم‌های پیشرفته‌تر (نظیر پنل‌های عایق ساختاری یا تغییر در نوع مصالح نما) ممکن است هزینه‌های سرمایه‌ای اولیه را افزایش دهد، اما این هزینه‌ها از طریق کاهش چشمگیر بارهای برودتی و حرارتی در فاز عملیاتی ساختمان جبران می‌گردند. در نهایت، با توجه به سهم ۶۰ درصدی مصالح سنگین نظیر بتن در انرژی تجسم‌یافته مطابق با مطالعه زابالزا و همکاران (Zabalza, 2011) (Bribián et al., 2011)، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تصمیم‌گیری چندمعیاره در انتخاب مصالح نه تنها یک الزام اقتصادی است، بلکه گامی گریزناپذیر در جهت کربن‌زدایی از بخش ساختمان محسوب می‌شود.

## نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی ۷۵ سناریوی مجزا، نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل توجهی در عملکرد مصالح عایق و پیکربندی‌های نصب است. به طور مشخص، عایق پلی‌استایرن خارجی کارایی برتری را در اقلیم سرد تبریز نشان می‌دهد در حالی که عایق پشم

یافته‌های این پژوهش و رویکرد متدولوژیک اتخاذ شده در آن، همگرایی قابل توجهی با مطالعات اخیر در حوزه بهینه‌سازی پوسته ساختمان و مدیریت مصرف انرژی دارد. در زمینه تأثیر جانمایی و نوع عایق، نتایج این مطالعه مفروضات ارائه شده توسط ویت و همکاران (Veit et al., 2023) و لئو و همکاران (Luo et al., 2024) را تأیید می‌کند؛ پژوهش‌هایی که نشان دادند عایق کاری خارجی نسبت به روش‌های داخلی برتری داشته و می‌تواند مقاومت حرارتی را تا ۲۰ درصد بهبود بخشیده و مصرف انرژی را به طور چشمگیری تقلیل دهد. با این حال، چالش بنیادینی که در این پژوهش با ثابت در نظر گرفتن ضخامت عایق به آن پاسخ داده شد، ریشه در رفتار غیرخطی عملکرد حرارتی دارد. همان‌گونه که فانگ و همکاران (Fang et al., 2012) استدلال نمودند، افزایش بی‌رویه ضخامت عایق، اگرچه عدم آسایش سرمایشی در زمستان را کاهش می‌دهد، اما با حبس حرارت داخلی می‌تواند به افزایش ساعات گرمای بیش از حد در تابستان منجر شود. بنابراین، رویکرد این مطالعه در اجتناب از افزایش بی‌نهایت ضخامت و تمرکز بر نوع و چیدمان مصالح، با منطق حاکم بر مطالعات شارستون و ماری (Sharston and Murray, 2020) مبنی بر وجود نقطه بازدهی نزولی در افزایش ضخامت عایق، مطابقت کامل دارد و اهمیت رویکردهای اقلیم‌محور نظیر استراتژی‌های غیرفعال توسعه‌یافته توسط اللهیاری و همکاران (Allahyari et al., 2025) برای اقلیم‌های خشک ایران را بیش از پیش برجسته می‌سازد.

از منظر ارزیابی‌های اقتصادی و زیست‌محیطی، چارچوب تحلیلی

(استانداردهای بین‌المللی ASHRAE) استوار گردید. از آنجا که هدف محوری پژوهش، ارزیابی مقایسه‌ای استراتژی‌های مختلف تحت شرایط عملیاتی یکسان بوده است، این محدودیت تأثیری بر اعتبار رتبه‌بندی نسبی سناریوها در فرآیند تصمیم‌گیری چندمعیاره ندارد. یافته‌های کمی این مطالعه نمایشگر یک الگوی نمونه‌وار تحت شرایط استاندارد هستند و به جای پیش‌بینی قطعی عملکرد یک سازه خاص، خطوط راهنمای اولیه را برای انتخاب گزینه‌های بهینه فراهم می‌آورند.

فراتر از موارد یادشده، پژوهش حاضر با ساده‌سازی‌های روش‌شناختی دیگری نیز همراه بوده است. فرض ضخامت ثابت برای عایق، اتکا به یک تیپ ساختمانی منفرد، مدل‌سازی ساده‌شده انتقال رطوبت و عدم احتساب هزینه‌های نگهداری، تا حدی ظرفیت بهینه‌سازی و گستره کاربرد نتایج را محدود می‌سازد. برای رفع این شکاف‌ها، پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آتی اقداماتی نظیر: ارزیابی حساسیت نتایج نسبت به متغیرهای تصادفی، بررسی ضخامت متغیر متناسب با نوع مصالح، شبیه‌سازی در هندسه‌های ساختمانی متنوع و تحلیل‌های پیشرفته هیگروترمال (مرطوب‌حرارتی) در دستور کار قرار گیرد. علاوه بر این، ادغام چارچوب‌های پویای ارزیابی چرخه عمر (LCA) و هزینه چرخه عمر (LCC) قویاً توصیه می‌گردد تا بتوان اثرات بلندمدت تخریب حرارتی، فرسودگی مصالح، صرفه‌جویی‌های زیست‌محیطی وابسته به اقلیم و دوام اقتصادی را به‌صورتی جامع ارزیابی نمود.

معدنی کاربرد به نسبت کمتری داشته در حالی که در هیچ یک از نتایج تحلیل نهایی شرکت نداشته است. ارزیابی با روش TOPSIS، یک راه‌حل بهینه برای تبریز شناسایی کرد که به ۱۷ درصد کاهش در مصرف انرژی گرمایشی، ۶/۸ درصد کاهش در نیازهای سرمایشی و ۱۸ درصد بهبود در شاخص‌های نارضیاتی حرارتی دست می‌یابد. این یافته‌ها یک چارچوب پاسخگو به اقلیم تبریز ارائه می‌دهند و نتایج به‌دست‌آمده می‌توانند برای طراحی عایق‌کاری در سایر شهرهای با اقلیم مشابه نیز به کار روند. این امر شواهد مبتنی بر داده را برای سیاست‌گذاران، معماران و مهندسان ساخت‌وساز فراهم می‌سازد تا شیوه‌های ساختمانی با بهره‌وری انرژی بالا را ارتقا دهند. این متدولوژی به ویژه در مناطق دارای تنوع اقلیمی، از توسعه سازه‌های پایدار از طریق راه‌حل‌های بومی‌سازی شده که تعادل بین ملاحظات زیست‌محیطی، اقتصادی و ارگونومیک را برقرار می‌سازند، حمایت می‌کند.

### محدودیت‌های پژوهش

یکی از چالش‌های روش‌شناختی و محدودیت‌های عمده این پژوهش، فقدان اعتبارسنجی تجربی و کالیبراسیون مدل شبیه‌سازی بر اساس داده‌های میدانی اخذشده از یک ساختمان در حال بهره‌برداری است. با توجه به ماهیت این مطالعه که بر مراحل اولیه طراحی و ارزیابی مقایسه‌ای طیف وسیعی از پیکربندی‌های فرضی متمرکز است، ساخت و پایش فیزیکی تمامی این ترکیب‌ها عملاً امکان‌پذیر نبود. با این وجود، برای جبران این محدودیت، شبیه‌سازی‌ها بر بستر موتور محاسباتی معتبر EnergyPlus

### References

- Allahyari, S., Khorram, Z. R., Ahmadi, M., Ahmadi, J., & Aram, F. (2025). Optimization of energy use and thermal comfort in under-served hot-dry climate schools using a machine learning framework. *Energy Reports*, 14, 4737–4749. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.11.058>
- Aktemur, C., Çakır, M. T., & Çakır, M. F. (2024). Optimising of thermal insulation thickness based on wall orientations and solar radiation using heating-degree hour method. *Case Studies in Thermal Engineering*, 60, 104725. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104725>
- Alyami, M. (2024). The impact of the composition and location of thermal insulation in the building envelope on energy consumption in low-rise residential buildings in hot climate regions. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(4), 5305–5351. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08366-8>
- Amani, N. (2024). Simulation-based design: Minimizing energy consumption in residential buildings through optimal thermal insulation. *World Journal of Engineering*. <https://doi.org/10.1108/WJE-04-2024-0188>
- ASHRAE, A. S. of H. R. and A.-C. E. (2014). Guideline 14-2014: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings.
- Atashbar, H., & Noorzai, E. (2023). Optimization of exterior wall cladding materials for residential buildings using the non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) based on the integration of building information modeling (BIM) and life cycle assessment (LCA) for energy consumption: A case study. *Sustainability*, 15(21), 15647. <https://doi.org/10.3390/su152115647>
- Bastos Porsani, G., & Fernández Bandera, C. (2023). A case study of empirical validation of EnergyPlus infiltration models based on different wind data. *Buildings*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/buildings13020511>
- Bazoovarz, A., Abdolkhani, S., Khaki, R., & Malayeri, A. (2023). Determination of optimum energy-economic insulation thickness for building walls in climate zones of Iran. *International Journal of Smart Energy Technology and Environmental Engineering*, 2(2). <http://globalpublisher.org/journals-1007/www.globalpublisher.org>
- Bagheri, S., Moradinasab, H., & Yeganeh, M. (2024). The effect of window proportions in low-rise residential buildings on annual energy consumption in humid temperate climate (case study: Rasht city in Iran). *Frontiers in Energy Research*, 12, 1463678. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1463678>
- Bouchark, A. (2024). Comparative analysis of the effect of thermal insulation on the energy requirements of a tertiary building in Meknes. In *Selected Papers from the 8th International Conference on Smart City Applications* (pp. 149–159). <https://doi.org/10.21741/9781644903117-16>
- Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394–416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>
- Chen, Z., Hammad, A., Kamardeen, I., & Akbarnezhad, A. (2020). Optimising embodied energy and thermal performance of thermal insulation in building envelopes via an automated building information modelling (BIM) tool. *Buildings*, 10(12), 218. <https://doi.org/10.3390/buildings10120218>

- Dhaif, M., & Stephan, A. (2021). A life cycle cost analysis of structural insulated panels for residential buildings in a hot and arid climate. *Buildings*, 11(6), 255. <https://doi.org/10.3390/buildings11060255>
- Dombaycı, O. A., Ulu, E. Y., Guven, S., Atalay, O., & Ozturk, H. K. (2020). Determination of optimum insulation thickness for building external walls with different insulation materials using environmental impact assessment. *Thermal Science*, 24(1 Part A), 303–311. <https://doi.org/10.2298/TSCI180903010D>
- Fang, M., Fang, T., Chen, J., & Yu, Z. (2012). Impact analysis of the thickness of wall insulation on indoor comfort in hot summer and cold winter area. *Applied Mechanics and Materials*, 193–194, 1069–1074. <https://doi.org/10.4028/AMM193-194.1069>
- Heydari, H., & Movaghari, A. (2025). The change in weather types in two population centers in northwestern Iran (Urmia and Tabriz) around Lake Urmia with the Woś classification approach. *Journal of Water and Climate Change*. <https://doi.org/10.2166/wcc.2025.356>
- Kakhki, M., & Sepehri, A. (2011). Climate change trends during two periods in Hamedan and Tabriz. *Semantic Scholar*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:128719813>
- Kallioğlu, M. A., Ercan, U., Avci, A. S., Fidan, C., & Karakaya, H. (2020). Empirical modeling between degree days and optimum insulation thickness for external wall. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(11), 1314–1334. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1651797>
- Kaynakli, O. (2012). A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 415–425. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.006>
- Luo, X., Xu, D., Bing, Y., He, Y., & Chen, Q. (2024). Thermal performance and building energy simulation of precast insulation walls in two climate zones. *Buildings*, 14(9), 2612. <https://doi.org/10.3390/buildings14092612>
- Madahi, A. M., & Abbasi, S. M. (2020). Thermal behavior analysis of the external shell of buildings constructed with traditional and modern materials and execution technologies for energy consumption optimization: Case study of residential buildings in Mashhad city. *Armanshahr Architecture & Urban Development*, 12(29). <https://doi.org/10.22034/AAUD.2020.102374>
- Ministry of Roads and Urban Development. (2020). *National Building Regulations of Iran: Part 19 – Energy Conservation* (in Persian). Building and Housing Research Center.
- Muhiedeen, M. W., Chong Lye, L., & Adam, N. M. (2020). Analysis of Optimum Thickness of Glass Wool Roof Thermal Insulation Performance. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 76(3), 1–11. <https://doi.org/10.37934/arfmts.76.3.111>
- Ouhaibi, S., Mradjji, O., El Wazna, M., Gounni, A., Belouaggadia, N., Ez-zine, M., Lbibb, R., El Bouari, A., & Cherkaoui, O. (2022). Sisal-fibre based thermal insulation for use in buildings. *Advances in Building Energy Research*, 16(4), 489–513. <https://doi.org/10.1080/17512549.2021.1982768>
- Özel, G., Açıkcalp, E., Görgün, B., Yamık, H., & Caner, N. (2015). Optimum insulation thickness determination using the environmental and life cycle cost analyses based entransy approach. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 11, 87–91. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2015.06.004>
- Ryder, P. (2009). Flood forecasting and warning. *Meteorological Applications*, 16(1), 1–2. <https://doi.org/10.1002/met.133>
- Serino, R., Hickey, B., & Dale, K. H. (2006). *An insulation and finish system for use with associated substrate layers of a building*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:132603683>
- Sharston, R., & Murray, S. (2020). The combined effects of thermal mass and insulation on energy performance in concrete office buildings. *Advances in Building Energy Research*, 14(3), 322–337. <https://doi.org/10.1080/17512549.2018.1547220>
- Shukla, A., Agarwal, P., Rana, R. S., & Purohit, R. (2017). Applications of TOPSIS algorithm on various manufacturing processes: A review. *Materials Today: Proceedings*, 4(4), 5320–5329. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.05.042>
- Ulutaş, A., Balo, F., & Topal, A. (2023). Identifying the most efficient natural fibre for common commercial building insulation materials with an integrated PSI, MEREK, LOPCOW and MCRAT model. *Polymers*, 15(6), 1500. <https://doi.org/10.3390/polym15061500>
- Ustaoglu, A., Kurtoğlu, K., & Yaraş, A. (2018). *Evaluation of energy performance of PMS added polyurethane in building heat insulation*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:139993061>
- Veit, M., Johra, H., Jensen, R. L., Rask, N., & Roesgaard, S. (2023). Numerical sensitivity analysis of the energy performance of building envelope with dynamic conditions. *Journal of Physics: Conference Series*, 2654(1), 012109. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2654/1/012109>
- Wang, J. J., Jing, Y. Y., Zhang, C. F., & Zhao, J. H. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2263–2278. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.021>
- Zabalza Bribián, I., Aranda Usón, A., & Scarpellini, S. (2011). Life cycle assessment of building materials: A review and classification of available databases. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(12), 1014–1023.
- Zhou, J., Jiang, J., Deng, L., Huang, J., Yuan, J., & Cao, X. (2021). Influence of bond coat on thermal shock resistance and thermal ablation resistance for polymer matrix composites. *Frontiers in Materials*, 8, 672617. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.672617>