Journal of Safe City
Online ISSN: 2676-556X

Journal Homepage: www.ispdrc.ir

Research Paper

Assessment of the Resilience and Energy Consumption Optimization of Residential Buildings with Emphasis on Topics 19 and 21 of the Iranian National Building Regulations: A Case Study of Tehran

Mohammad Bagher Izadi[a] , Seyed Alireza Haji Seyed Mirzahosseini[b], Gholam Reza Jalali Farahani [c], Mostafa Panahi[d]

[a].*Ph.D. Candidate, Department of Energy Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.*
[b]. *Associate Professor, Department of Environmental Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.*
[c]. *Professor, Department of Strategic Management of Passive Defense, National Defense University and Strategic Research Institute, Tehran, Iran.*
[d]. *Associate Professor, Department of Environmental Management, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

Received: 29 July 2026 Received In revised form: 2 August 2026 Accepted: 5 August 2026 p.p: 359 –395

https://doi.org/ 10.22034/ispdrc.2026.2095957.1263

A B S T R A C T

The building sector is one of the largest energy consumers in Iran, and mechanical and electrical systems play a key role in enhancing energy efficiency and building resilience. This study proposes an integrated framework for assessing building resilience and reducing energy consumption in residential buildings based on the requirements of Chapters 19 and 21 of the Iranian National Building Regulations. A representative residential building located in Tehran was modeled using Carrier HAP software under 80 expanded polystyrene (EPS) insulation scenarios, and its thermal performance indicators were evaluated. In addition, the resilience indicators of building systems were weighted using the Best–Worst Method (BWM) and ranked using the Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution (TOPSIS). The results demonstrated that the application of EPS insulation significantly reduced the building's heating and cooling loads, with the optimum insulation thickness ranging from 7 to 8 cm for external walls and from 5 to 6 cm for roofs. Implementing the requirements of Chapter 19 of the Iranian National Building Regulations can reduce residential building energy consumption by approximately 25–40%. Furthermore, continuity of energy supply, equipment redundancy, emergency power systems, and support systems for designated safe areas were identified as the most influential factors in enhancing building resilience. The proposed framework provides a practical decision-support tool for reducing energy consumption, evaluating the resilience of mechanical and electrical systems, and prioritizing resilience enhancement strategies in residential buildings.

Keywords: Energy Consumption Optimization; Building Resilience Passive Defense ; Iranian National. Building Regulations (Topics 19 and 21), Thermal Insulation (EPS).

Corresponding author (Email: mirzahosseini@iau.ac.ir)

Introduction

The building sector is one of the largest energy consumers in Iran, and its mechanical and electrical systems, in addition to their direct impact on energy consumption, play a crucial role in maintaining safety, operational continuity, and the resilience of buildings during emergencies. However, existing studies have generally examined these two aspects separately. Considering the requirements of Chapters 19 and 21 of the Iranian National Building Regulations, there is a need for an integrated framework to simultaneously enhance energy efficiency and the resilience of building mechanical and electrical systems, thereby reducing energy consumption and operational costs while improving the safety and operational sustainability of buildings. The objective of this study is to develop an integrated framework for simultaneously evaluating the energy performance and resilience of mechanical and electrical systems in residential buildings, determining the optimum thickness of expanded polystyrene (EPS) thermal insulation, and prioritizing resilience enhancement strategies in accordance with the requirements of Chapters 19 and 21 of the Iranian National Building Regulations. The research seeks to answer the following questions: What is the optimum thickness of thermal insulation for reducing building energy consumption? Which factors have the greatest influence on the resilience of building mechanical and electrical systems? How can the integration of the requirements of Chapters 19 and 21 of the Iranian National Building Regulations simultaneously improve the energy efficiency and resilience of residential buildings?

Methodology

The present study is application-oriented and developmental in terms of its objective and adopts a descriptive–analytical methodology with a quantitative approach. First, previous studies, the requirements of Chapters 19 and 21 of the Iranian National Building Regulations, ASHRAE standards, and passive defense guidelines were comprehensively reviewed to identify the evaluation indicators for energy performance and resilience and to establish the research framework. Subsequently, a representative residential building was modeled, and its energy performance was simulated using Carrier HAP software under 80 different scenarios involving variations in expanded polystyrene (EPS) insulation thickness, window type, and building orientation. Thereafter, resilience enhancement strategies were prioritized using the Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution (TOPSIS), and a sensitivity analysis was conducted to evaluate the robustness of the results. Finally, the energy performance indicators, including annual heating and cooling loads, the overall heat transfer coefficient (U-value), the heat loss coefficient (H), the specific heat loss coefficient ($\bar{H}$), and the optimum insulation thickness, were calculated. Based on the obtained results, appropriate strategies were proposed to simultaneously improve the energy efficiency and resilience of residential buildings.

Results and discussion

The energy simulation results demonstrated that increasing the thickness of EPS thermal insulation significantly reduced the building's heating and cooling loads. However, as the insulation thickness increased, the incremental energy savings gradually diminished, indicating a reduction in the marginal effectiveness of additional insulation. The results of the energy and economic analyses indicated that the optimum insulation thickness was 7–8 cm for the external walls and 5–6 cm for the roof. Compliance with the requirements of Chapter 19 of the Iranian National Building Regulations can reduce building energy consumption by approximately 25–40%. Furthermore, the resilience assessment revealed that emergency power supply, equipment redundancy, fire detection and suppression systems, emergency ventilation, and safe shelter facilities are among the most critical factors contributing to the resilience of building mechanical and electrical systems. The weighting of the evaluation criteria using the Best–Worst Method (BWM) and the prioritization of resilience enhancement strategies using the Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution (TOPSIS) indicated that upgrading critical systems and ensuring the availability of backup resources have the greatest impact on improving building resilience. Overall, the integration of the requirements of Chapters 19 and 21 of the Iranian

National Building Regulations provides a comprehensive and effective framework for simultaneously enhancing energy efficiency, reducing operational costs, and improving the resilience of residential buildings.

Conclusion

The results of the resilience assessment indicated that the mechanical and electrical systems play the most significant role in enhancing building resilience. Furthermore, measures such as providing an emergency power supply, increasing the redundancy of critical equipment, and improving safe shelter facilities were identified as the most effective strategies for enhancing building resilience. Furthermore, the energy simulation results demonstrated that the combined application of double-glazed windows and expanded polystyrene (EPS) thermal insulation significantly reduced heat loss and annual heating and cooling loads. Moreover, compliance with the requirements of Chapter 19 of the Iranian National Building Regulations can result in energy savings of approximately 25–40%. Based on the technical and economic analyses, the optimum insulation thickness was determined to be 7–8 cm for the external walls and 5–6 cm for the floor above the parking area. The main contribution of this study is the development of an integrated framework for the simultaneous evaluation of building energy performance and resilience through the combined use of energy simulation and the Best–Worst Method (BWM) and the Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution (TOPSIS), which enables more effective decision-making for the design of sustainable and resilient residential buildings. The proposed framework can serve as an effective decision-support tool for the design of sustainable, energy-efficient, and resilient residential buildings. Furthermore, it provides a robust foundation for future research aimed at extending this approach to other climatic regions and diverse building typologies.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved thecontent of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

نشریه علمی شهـــر ایمـــن
شاپا الکترونیکی: 556X-2676
Journal Homepage: www.ispdrc.ir

مقاله پژوهشی

ارزیابی میزان تاب آوری و بررسی بهینه سازی مصرف انرژی ساختمان مسکونی با تاکید بر مباحث ۲۱ و ۱۹ مقررات ملی ساختمان در شهر تهران

محمدباقر ایزدی– دانشجوی دکتری گروه مهندسی انرژی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
سیدعلیرضا حاجی سید میرزای حسینی*– دانشیارگروه مهندسی محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
غلام رضا جلالی فراهانی– استاد گروه مدیریت راهبردی پدافند غیرعامل، دانشگاه و پژوهشگاه دفاع ملی و تحقیقات راهبردی، تهران، ایران
مصطفی پناهی – دانشیارگروه مدیریت محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ ارسال: ۱۴۰۵/۰۵/۱۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۴ ص.ص ۳۹۵-۳۵۹

https://doi.org/ 10.22034/ispdrc.2026.2095957.1263

چکیده:
ساختمان‌های مسکونی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در ایران هستند و ارتقای بهره‌وری انرژی همراه با افزایش تاب‌آوری سامانه‌های مکانیکی و الکتریکی، از الزامات توسعه پایدار و کاهش آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در شرایط بحرانی به شمار می‌رود. هدف این پژوهش، ارائه یک چارچوب یکپارچه برای ارزیابی و اولویت‌بندی هم‌زمان راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی و ارتقای تاب‌آوری سامانه‌های مکانیکی و الکتریکی ساختمان‌های مسکونی بر اساس الزامات مباحث ۱۹ و ۲۱ مقررات ملی ساختمان ایران است. نوآوری پژوهش در تلفیق شبیه‌سازی انرژی ساختمان با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره بهترین–بدترین (BWM) و تاپسیس (TOPSIS) برای ارزیابی هم‌زمان عملکرد انرژی و تاب‌آوری است؛ رویکردی که در اغلب مطالعات پیشین به‌صورت مجزا بررسی شده است. بدین منظور، یک ساختمان مسکونی نمونه در شهر تهران با استفاده از نرم‌افزار Carrier HAP مدل‌سازی شد و عملکرد انرژی آن در ۸۰ سناریوی مختلف عایق‌کاری با پلی‌استایرن منبسط (EPS) ارزیابی شد. سپس، شاخص‌های تاب‌آوری با روش (BWM)وزن‌دهی و با روش (TOPSIS) رتبه‌بندی شدند. نتایج نشان داد افزایش ضخامت عایق (EPS)موجب کاهش مصرف انرژی و بارهای گرمایشی ساختمان می‌شود. ضخامت بهینه عایق برای دیوارهای خارجی ۷ تا ۸ سانتی‌متر و برای بام ۵ تا ۶ سانتی‌متر تعیین شد و اجرای الزامات مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان می‌تواند مصرف انرژی ساختمان‌های مسکونی را حدود ۲۵ تا ۴۰ درصد کاهش دهد. همچنین، تداوم تأمین انرژی، افزونگی تجهیزات، سامانه برق اضطراری و سامانه‌های پشتیبان فضاهای امن به‌عنوان مهم‌ترین شاخص‌های مؤثر بر ارتقای تاب‌آوری شناسایی شدند. چارچوب پیشنهادی این پژوهش می‌تواند به‌عنوان ابزاری کاربردی برای تصمیم‌گیری در زمینه بهینه‌سازی مصرف انرژی و اولویت‌بندی راهبردهای ارتقای تاب‌آوری ساختمان‌های مسکونی مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی مصرف انرژی، تاب‌آوری ساختمان، پدافند غیرعامل، مباحث ۱۹و۲۱ مقررات ملی ساختمان، تأسیسات مکانیکی و برقی، عایق حرارتی***(EPS)*** .

*. نویسنده مسئول Email: mirzahosseini@iau.ac.ir

مقدمه

افزایش مخاطرات طبیعی نظیر زلزله، سیل و آتش‌سوزی و همچنین تهدیدات انسان‌ساخت شامل انفجار، حملات شیمیایی، زیستی و هسته‌ای (*NBC*)، جنگ‌های ترکیبی و اختلال در زیرساخت‌های حیاتی، ضرورت ارتقای تاب‌آوری ساختمان‌ها را بیش از پیش آشکار ساخته است. امروزه از ساختمان‌ها انتظار می‌رود علاوه بر تأمین ایمنی ساکنان، در شرایط بحران نیز قابلیت حفظ عملکرد و تداوم ارائه خدمات را داشته باشند. در این راستا، رویکرد پدافند غیرعامل به‌عنوان یکی از راهبردهای اساسی کاهش آسیب‌پذیری، حفاظت از جان انسان‌ها و افزایش قابلیت استمرار عملکرد ساختمان‌ها، جایگاه ویژه‌ای در طراحی و بهره‌برداری از زیرساخت‌های حیاتی یافته است.*(Zhang et al., 2024; Laska & R., 2024)*

در ساختمان‌های امروزی، دستیابی به تاب‌آوری تنها از طریق افزایش مقاومت سازه‌ای امکان‌پذیر نیست، بلکه مستلزم طراحی یکپارچه معماری، سازه، پوسته ساختمان، سامانه‌های مکانیکی و برقی (MEP) و زیرساخت‌های پشتیبان است. ازاین‌رو، مبحث بیست‌ویکم مقررات ملی ساختمان بر کاهش آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در برابر تهدیدات، حفاظت از تأسیسات مکانیکی و برقی، جانمایی مناسب تجهیزات، تأمین سامانه‌های برق اضطراری، ذخیره آب، ایجاد افزونگی در سامانه‌های حیاتی، حفاظت از فضاهای تأسیساتی و استمرار عملکرد ساختمان در شرایط بحران تأکید دارد .(Radmard et al., 2018) همچنین دستورالعمل‌های پدافند غیرعامل بر ضرورت کاهش تمرکز تجهیزات، ایجاد مسیرهای جایگزین خدمات حیاتی و پیش‌بینی فضاهای امن در ساختمان‌های حساس تأکید می‌کنند.(Abdollahzadeh et al., 2021)

مطالعات انجام‌شده در زمینه سامانه‌های تهویه و فضاهای امن مقاوم در برابر تهدیدات NBC نشان داده‌اند که طراحی مناسب سیستم‌های تهویه، فیلتراسیون و کنترل شرایط محیطی، نقش مهمی در افزایش قابلیت عملکرد ساختمان‌ها در شرایط اضطراری دارد (Rahmani et al., 2017).

در کنار الزامات ایمنی و تاب‌آوری، افزایش مصرف انرژی و پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی ناشی از آن، به یکی از مهم‌ترین چالش‌های صنعت ساختمان تبدیل شده است. بخش ساختمان سهم قابل‌توجهی از مصرف انرژی نهایی جهان را به خود اختصاص داده و سامانه‌های گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع (HVAC) از مهم‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در ساختمان‌ها محسوب می‌شوند (Al-Yasiri & Szabo, 2023; Marincu et al., 2024) مطالعات نشان می‌دهند که بهبود عملکرد پوسته ساختمان، کاهش انتقال حرارت و استفاده از راهکارهای بهینه‌سازی انرژی می‌تواند نقش مؤثری در کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های بهره‌برداری داشته باشد .(Marincu et al., 2024; Dehghanpour & Ansari Manesh, 2020) در ایران نیز شدت مصرف انرژی ساختمان‌ها نسبت به بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته بالا بوده و بخش قابل‌توجهی از اتلاف انرژی از طریق اجزای پوسته ساختمان رخ می‌دهد(D'Agostino et al., 2019) .

ازاین‌رو، ارتقای بهره‌وری انرژی در کنار افزایش تاب‌آوری، به یکی از اهداف اصلی طراحی ساختمان‌های جدید تبدیل شده است. مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان با هدف کاهش مصرف انرژی، الزامات مربوط به طراحی پوسته ساختمان، حدود مجاز ضریب انتقال حرارت (U)، مقاومت حرارتی اجزا و استفاده از عایق‌های حرارتی را تعیین کرده است*(Fatemi & Sadoughi, 2020)* مطالعات مختلف نشان داده‌اند که عایق‌کاری مناسب دیوارها، سقف و کف می‌تواند موجب کاهش قابل‌توجه بارهای گرمایشی و سرمایشی ساختمان شود. *(Ministry of Roads and Urban Development, 2025)*همچنین بررسی اثر ضخامت عایق و ویژگی‌های هندسی ساختمان نشان داده است که انتخاب صحیح مشخصات پوسته می‌تواند عملکرد انرژی ساختمان را به‌طور محسوسی بهبود دهد.*(Huang et al., 2020; Ismail & Ouahrani, 2024)*

در این میان، پلی‌استایرن منبسط‌شده (EPS) به دلیل ضریب هدایت حرارتی پایین، وزن کم، سهولت اجرا و هزینه اقتصادی، یکی از مصالح متداول برای عایق‌کاری حرارتی ساختمان‌های مسکونی محسوب می‌شود. (Kallioğlu et al., 2016) پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که تعیین ضخامت مناسب عایق حرارتی، وابسته به شرایط اقلیمی، نوع ساختمان، هزینه انرژی و ویژگی‌های پوسته بوده و افزایش بیش از حد ضخامت عایق الزاماً به بهبود اقتصادی عملکرد ساختمان منجر نمی‌شود. (Musazadeh & Yaghoubzadeh, 2016; Bentoumi et al., 2024)همچنین استفاده از روش‌های تحلیل انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی برای تعیین ضخامت بهینه عایق، به‌عنوان یک رویکرد مؤثر در طراحی ساختمان‌های کم‌مصرف مطرح شده است . (Musazadeh & Yaghoubzadeh, 2016; Nabavi et al., 2015) مطالعات انجام‌شده در مناطق اقلیمی مختلف نیز نشان داده‌اند که ترکیب مقاومت حرارتی مناسب عایق و انتخاب صحیح سیستم انرژی ساختمان می‌تواند موجب کاهش مصرف سوخت و افزایش بهره‌وری انرژی شود.(Nasser et al., 2018) در سال‌های اخیر، توسعه روش‌های شبیه‌سازی انرژی، الگوریتم‌های هوش مصنوعی و روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه، امکان بررسی دقیق اثر پارامترهای طراحی بر عملکرد ساختمان را فراهم کرده است. استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و روش‌های بهینه‌سازی تکاملی برای طراحی ساختمان‌های کم‌مصرف، کاهش مصرف انرژی و افزایش انعطاف‌پذیری انرژی ساختمان‌ها مورد توجه قرار گرفته است .(Tabib & Ashrafi Zadeh, 2016; Tao et al., 2023) همچنین توسعه سیستم‌های کنترلی هوشمند برای سامانه‌های HVAC توانسته است ظرفیت مدیریت انرژی و انعطاف‌پذیری عملکرد ساختمان را افزایش دهد. (Yuan et al., 2017)پژوهش‌های اخیر در زمینه بهینه‌سازی هم‌زمان پوسته ساختمان و سامانه‌های انرژی نیز کاهش قابل‌توجه مصرف انرژی را گزارش کرده‌اند.(Zamani & Bagheri Esfeh, 2018) علاوه بر عایق‌های متداول، فناوری‌های نوین مانند مواد تغییر فاز (PCM)، پنل‌های عایق هوشمند و سامانه‌های ترکیبی پوسته ساختمان، به‌عنوان راهکارهای جدید برای بهبود عملکرد حرارتی ساختمان مطرح شده‌اند. مطالعات نشان داده‌اند که ترکیب مواد تغییر فاز با عایق‌های حرارتی می‌تواند موجب کاهش نوسانات دمایی، کاهش بارهای سرمایشی و افزایش بهره‌وری انرژی ساختمان شود. (Amani, 2025)

با وجود پیشرفت‌های قابل‌توجه در زمینه بهبود عملکرد انرژی ساختمان و افزایش تاب‌آوری، بیشتر پژوهش‌های پیشین هر یک از این دو حوزه را به‌صورت مستقل بررسی کرده‌اند. بسیاری از مطالعات بر کاهش مصرف انرژی، بهینه‌سازی ضخامت عایق و بهبود عملکرد حرارتی پوسته تمرکز داشته‌اند، در حالی‌که ارتباط میان ویژگی‌های پوسته ساختمان و قابلیت حفظ عملکرد سامانه‌های حیاتی در شرایط بحران کمتر مورد توجه قرار گرفته است. (Jamshidi Ghasemabadi et al., 2025; Arbulu et al., 2025)از سوی دیگر، پژوهش‌های مرتبط با تاب‌آوری ساختمان عمدتاً بر الزامات پدافند غیرعامل، مدیریت بحران و حفاظت از زیرساخت‌ها تمرکز داشته‌اند و ارتباط میان بهره‌وری انرژی و افزایش تاب‌آوری کمتر بررسی شده است.(Khan et al., 2025)

بنابراین، نیاز به یک رویکرد یکپارچه که بتواند اثر پارامترهای پوسته ساختمان، به‌ویژه ضخامت عایق حرارتی، را بر شاخص‌های عملکرد انرژی و الزامات تاب‌آوری ساختمان به‌صورت هم‌زمان ارزیابی کند، همچنان وجود دارد. همچنین توسعه فناوری‌های جدید مانند مواد تغییر فاز و سامانه‌های ترکیبی پوسته ساختمان نشان می‌دهد که آینده طراحی ساختمان‌ها به سمت راهکارهای چندمنظوره حرکت می‌کند.(Bentoumi et al., 2024)

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارائه چارچوبی تلفیقی برای ارزیابی هم‌زمان بهره‌وری انرژی و تاب‌آوری ساختمان‌های مسکونی جدیدالاحداث انجام شده است. در این پژوهش، تأثیر ضخامت‌های مختلف عایق پلی‌استایرن منبسط‌شده (EPS) بر شاخص‌هایی نظیر مقاومت حرارتی (R)، ضریب انتقال حرارت (U)، بارهای گرمایشی و سرمایشی و میزان صرفه‌جویی انرژی با استفاده از نرم‌افزار Carrier HAP بررسی شده و نتایج حاصل با الزامات مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان مقایسه می‌شود. (Fatemi & Sadoughi, 2020)همچنین الزامات مبحث بیست‌ویکم شامل حفاظت از تأسیسات مکانیکی و برقی، تأمین سامانه‌های پشتیبان، انرژی اضطراری، افزونگی سامانه‌های حیاتی و استمرار عملکرد ساختمان در شرایط بحران مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

نوآوری اصلی پژوهش حاضر در ارائه یک چارچوب یکپارچه برای ارزیابی هم‌زمان عملکرد انرژی و تاب‌آوری ساختمان‌های مسکونی بر اساس الزامات مباحث نوزدهم و بیست‌ویکم مقررات ملی ساختمان است. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که به‌صورت مستقل بر بهینه‌سازی مصرف انرژی یا ارزیابی تاب‌آوری ساختمان تمرکز داشته‌اند، در این پژوهش این دو حوزه در قالب یک چارچوب ارزیابی جامع بررسی شده‌اند. در بخش انرژی، تأثیر ضخامت‌های مختلف عایق حرارتی EPS بر شاخص‌های عملکرد حرارتی پوسته با استفاده از شبیه‌سازی Carrier HAP ارزیابی و ضخامت بهینه تعیین شده است. در بخش تاب‌آوری نیز شاخص‌های مؤثر بر عملکرد تأسیسات حیاتی بر اساس مبحث بیست‌ویکم و اصول پدافند غیرعامل استخراج، با روش BWM وزن‌دهی و راهکارهای بهبود با روش TOPSIS اولویت‌بندی شده‌اند. بنابراین، تمایز اصلی این پژوهش، ترکیب شبیه‌سازی انرژی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای ارائه ابزاری کاربردی جهت طراحی ساختمان‌های کم‌مصرف و مقاوم در برابر شرایط بحرانی است.

۱- روش تحقیق

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی–توسعه‌ای و از نظر روش، توصیفی–تحلیلی با رویکرد کمی است. روش تحقیق بر مبنای بررسی کارهای مرتبط، تحلیل سیر تحول موضوع و پاسخ‌گویی به سؤال اصلی پژوهش تدوین شده است. در گام نخست، مطالعات و پژوهش‌های پیشین در زمینه عملکرد انرژی ساختمان، بهینه‌سازی پوسته ساختمان، تاب‌آوری تأسیسات مکانیکی و برقی، الزامات مباحث نوزدهم و بیست‌ویکم مقررات ملی ساختمان، استانداردهای ASHRAE و دستورالعمل‌های پدافند غیرعامل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعات نشان داد که بیشتر پژوهش‌ها به‌صورت مستقل به موضوع بهره‌وری انرژی یا تاب‌آوری ساختمان پرداخته‌اند و مطالعات اندکی به ارزیابی هم‌زمان این دو حوزه با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و شبیه‌سازی انرژی توجه کرده‌اند. این خلأ پژوهشی، ضرورت انجام پژوهش حاضر را نمایان ساخت.

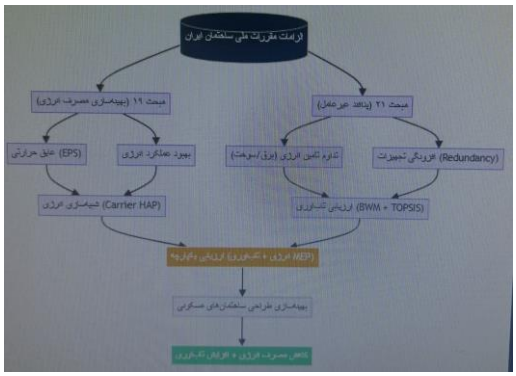
از منظر سیر تحول موضوع، در ابتدا تمرکز پژوهش‌های حوزه ساختمان بر کاهش مصرف انرژی، بهبود عملکرد حرارتی پوسته و افزایش بهره‌وری انرژی بود، اما با افزایش مخاطرات طبیعی و انسان‌ساخت و اهمیت تداوم عملکرد ساختمان‌ها در شرایط بحران، مفهوم تاب‌آوری به یکی از مؤلفه‌های اساسی طراحی و بهره‌برداری ساختمان‌ها تبدیل شد. در سال‌های اخیر، رویکردهای پژوهشی به سمت تلفیق بهره‌وری انرژی و تاب‌آوری حرکت کرده‌اند تا ساختمان‌ها علاوه بر مصرف بهینه انرژی، در شرایط اضطراری نیز از قابلیت ادامه عملکرد و حفظ ایمنی برخوردار باشند. بر همین اساس، این پژوهش با تکیه بر الزامات مباحث نوزدهم و بیست‌ویکم مقررات ملی ساختمان، چارچوبی یکپارچه برای ارزیابی هم‌زمان این دو حوزه ارائه می‌کند.

سؤال اصلی پژوهش این است که چگونه می‌توان عملکرد انرژی پوسته ساختمان و میزان تاب‌آوری تأسیسات مکانیکی و برقی ساختمان‌های مسکونی را به‌صورت هم‌زمان ارزیابی و راهکارهای بهینه برای بهبود آن‌ها را تعیین کرد. برای پاسخ به این سؤال، فرآیند تحقیق در هشت مرحله طراحی و اجرا شد. ابتدا با مرور منابع علمی، شاخص‌های ارزیابی و متغیرهای پژوهش شناسایی شدند. سپس شاخص‌های انرژی و تاب‌آوری بر اساس مباحث نوزدهم و بیست‌ویکم مقررات ملی ساختمان، استانداردهای ASHRAE و دستورالعمل‌های پدافند غیرعامل استخراج و تدوین شدند. در ادامه، مدل پایه ساختمان تهیه و اطلاعات معماری و تأسیساتی موردنیاز گردآوری شد. پس از آن، وضعیت تاب‌آوری ساختمان در بخش‌های تأسیسات مکانیکی، تأسیسات برقی و فضای امن پناهگاهی با استفاده از چک‌لیست‌های مبحث بیست‌ویکم ارزیابی گردید. در مرحله بعد، وزن معیارهای ارزیابی با استفاده از روش Best-Worst Method (BWM) تعیین و شاخص نهایی تاب‌آوری محاسبه شد. سپس سناریوهای مختلف بهبود تاب‌آوری با استفاده از روش TOPSIS اولویت‌بندی و تحلیل حساسیت برای بررسی پایداری نتایج انجام گرفت. همچنین، برای ارزیابی عملکرد انرژی، ۸۰ سناریوی مختلف شامل تغییر ضخامت عایقEPS، نوع پنجره و جهت‌گیری ساختمان تعریف و با توجه به الزامات مبحث ۱۹ در نرم‌افزار Carrier HAP شبیه‌سازی شد. در نهایت، شاخص‌های عملکرد انرژی شامل بار سالانه گرمایش و سرمایش، ضریب انتقال حرارت (U)، ضریب اتلاف حرارت (H)، ضریب اتلاف حرارت ویژه ($\bar{H}$) و ضخامت بهینه عایق محاسبه و تحلیل شد و بر اساس نتایج حاصل، راهکارهای مناسب برای ارتقای هم‌زمان تاب‌آوری و بهبود عملکرد انرژی ساختمان ارائه گردید.

شکل (۱) چارچوب مفهومی پژوهش را نشان می‌دهد که بر دو محور اصلی بهینه‌سازی مصرف انرژی و ارتقای تاب‌آوری سامانه‌های مکانیکی و الکتریکی ساختمان‌های مسکونی استوار است. در محور نخست، بر اساس الزامات مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، تأثیر استفاده از عایق حرارتی پلی‌استایرن منبسط (EPS) با ضخامت‌های مختلف بر کاهش مصرف انرژی ساختمان بررسی شده است. برای این منظور، یک ساختمان مسکونی نمونه در شهر تهران با استفاده از نرم‌افزار Carrier HAP مدل‌سازی و شبیه‌سازی شد و بارهای سرمایشی و گرمایشی در سناریوهای مختلف عایق‌کاری محاسبه گردید.

در محور دوم، با استناد به الزامات مبحث ۲۱ مقررات ملی ساختمان، شاخص‌های مؤثر بر تاب‌آوری سامانه‌های مکانیکی و الکتریکی، از جمله افزونگی تجهیزات (Redundancy)، تداوم تأمین انرژی و سامانه‌های پشتیبان، شناسایی و ارزیابی شدند. در ادامه، اهمیت نسبی این شاخص‌ها با استفاده از روش بهترین–بدترین (BWM) تعیین و راهبردهای ارتقای تاب‌آوری با بهره‌گیری از روش تاپسیس (TOPSIS) رتبه‌بندی شدند.

در نهایت، نتایج حاصل از شبیه‌سازی انرژی و ارزیابی تاب‌آوری در قالب یک مدل یکپارچه سامانه‌های مکانیکی و الکتریکی (MEP) تلفیق شد. این مدل، چارچوبی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی، ارتقای تاب‌آوری و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در طراحی و بهره‌برداری ساختمان‌های مسکونی فراهم می‌کن



شکل (۱): مدل مفهومی بهینه‌سازی مصرف انرژی و تاب‌آوری ساختمان

۲-۱-مرور منابع و تعیین متغیرهای پژوهش

در مرحله نخست، بیش از ۵۰ مقاله علمی، استاندارد، آیین‌نامه و اسناد تخصصی داخلی و بین‌المللی در زمینه تاب‌آوری زیرساخت‌های ساختمانی، پدافند غیرعامل، تأسیسات مکانیکی و برقی، عایق‌های حرارتی، انتقال حرارت در پوسته ساختمان، بهینه‌سازی مصرف انرژی، شبیه‌سازی انرژی ساختمان و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج این مرحله، شاخص‌های ارزیابی تاب‌آوری، متغیرهای مؤثر بر عملکرد انرژی ساختمان و پارامترهای ورودی مدل شبیه‌سازی استخراج شدند.

شاخص‌های تاب‌آوری با استناد به الزامات مبحث بیست‌ویکم مقررات ملی ساختمان و دستورالعمل‌های پدافند غیرعامل، در چهار گروه اصلی شامل تأسیسات برقی، تأسیسات مکانیکی، فضای امن پناهگاهی و ایمنی و مدیریت بحران طبقه‌بندی شدند . (Radmard et al., 2018; Abdollahzadeh et al., 2021) سپس، الزامات مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان به‌عنوان مبنای ارزیابی عملکرد انرژی پوسته ساختمان و تعیین شاخص‌های مرتبط با مصرف انرژی در مدل شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. (Fatemi & Sadoughi, 2020)

در بخش ارزیابی عملکرد حرارتی پوسته ساختمان، مطالعات انجام‌شده در زمینه تأثیر عایق‌های حرارتی، بهینه‌سازی ضخامت عایق، کاهش انتقال حرارت و بهبود عملکرد انرژی ساختمان نشان داده‌اند که انتخاب صحیح مصالح عایق، طراحی مناسب پوسته و توجه به شرایط اقلیمی، نقش مؤثری در کاهش بارهای گرمایشی و سرمایشی ساختمان دارد. *(Ministry of Roads and Urban Development, 2025; Huang et al., 2020; Ismail & Ouahrani, 2024)*

همچنین مطالعات انجام‌شده در زمینه بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان، اهمیت تحلیل هم‌زمان پارامترهای حرارتی، اقتصادی و زیست‌محیطی را در انتخاب ضخامت بهینه عایق مورد تأکید قرار داده‌اند. *(Musazadeh & Yaghoubzadeh, 2016; Nabavi et al., 2015; Nasser et al., 2018)*

بر اساس این مطالعات، متغیرهای اصلی پژوهش شامل ضخامت عایق حرارتی *EPS*، ضریب انتقال حرارت پوسته (*U-value*)، مقاومت حرارتی (*R-value*)، بارهای گرمایش و سرمایش، مصرف انرژی و شاخص‌های تاب‌آوری تأسیسات مکانیکی و برقی و شاخص‌های فضای امن پناهگاهی تعیین شدند. همچنین استانداردهای مرتبط با طراحی و ارزیابی عملکرد انرژی ساختمان بر اساس الزامات مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان انجام شد و در فرآیند مدل‌سازی و شبیه‌سازی با نرم‌افزار *Carrier HAP* ، از معیارها و مفروضات منطبق با استاندارد *ASHRAE 90.1* استفاده شد. *(Rahmani et al., 2017)*

۲-۲- اعتبارسنجی شاخص‌های تاب‌آوری و تعیین وزن معیارها بر اساس مبحث ۲۱ مقررات ملی ساختمان و الزامات پدافند غیرعامل

پس از استخراج شاخص‌های ارزیابی، پرسشنامه در اختیار ۱۲ نفر از خبرگان حوزه‌های تأسیسات مکانیکی، تأسیسات برقی، انرژی ساختمان و پدافند غیرعامل قرار گرفت که به‌صورت هدفمند و بر اساس سابقه تخصصی انتخاب شدند.خبرگان هر معیار را از نظر اهمیت، ارتباط با الزامات مقررات ملی ساختمان، شفافیت و ضرورت حضور در مدل ارزیابی با استفاده از طیف پنج‌درجه‌ای لیکرت ارزیابی کردند. پس از اعمال اصلاحات پیشنهادی، در این روش، ابتدا بهترین و بدترین معیار توسط خبرگان تعیین و سپس بردار اوزان از طریق حل مدل بهینه‌سازی محاسبه شد.همچنین به‌منظور ارزیابی سازگاری قضاوت‌های خبرگان، نرخ سازگاری (*Consistency Ratio*)روش *BWM* محاسبه شد.

۲-۲-۱- ارزیابی تاب‌آوری تأسیسات ساختمان

به‌منظور ارزیابی وضعیت تاب‌آوری ساختمان مورد مطالعه، اطلاعات موردنیاز از طریق بررسی نقشه‌های معماری، مکانیکی و برقی، مدارک فنی تجهیزات، مستندات اجرایی و تکمیل چک‌لیست‌های ارزیابی بر اساس شاخص‌های استخراج‌شده در مرحله قبل تدوین شدند. معیارهای استخراج‌شده بر اساس الزامات مبحث بیست‌ویکم مقررات ملی ساختمان و دستورالعمل‌های پدافند غیرعامل در سه گروه اصلی شامل تاب‌آوری تأسیسات برقی، تاب‌آوری تأسیسات مکانیکی و تاب‌آوری فضاهای امن طبقه‌بندی شدند. *(Bitarafan et al., 2026; Lari et al., 2026; Abdollahzadeh et al., 2021; Radmard et al., 2018)*

در این مرحله، عملکرد هر معیار با استفاده از مقیاس پنج‌درجه‌ای لیکرت امتیازدهی و پس از اعمال وزن‌های به‌دست‌آمده از روش *BWM*، شاخص تاب‌آوری هر یک از گروه‌ها محاسبه شد. عدد (۱) نشان‌دهنده عملکرد بسیار ضعیف و عدد (۵) نشان‌دهنده عملکرد بسیار مطلوب است و در نهایت، شاخص کلی تاب‌آوری ساختمان از ترکیب وزنی شاخص‌های زیرمجموعه به‌دست آمد.

۲-۲-۲- رتبه‌بندی راهکارهای ارتقای تاب‌آوری و تحلیل حساسیت

به‌منظور افزایش سطح تاب‌آوری ساختمان، مجموعه‌ای از سناریوهای بهبود شامل ارتقای سامانه برق اضطراری، افزایش افزونگی تجهیزات حیاتی، بهبود سامانه تهویه اضطراری، تقویت سامانه‌های اعلام و اطفای حریق، بهبود حفاظت فضاهای امن و افزایش استقلال عملکردی شبکه‌های تأسیساتی تعریف شد. *(Lari et al., 2026; Abdollahzadeh et al., 2021; Radmard et al., 2018)*

سناریوهای پیشنهادی با استفاده از روش *Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution (TOPSIS)* و بر اساس معیارهای ارزیابی شامل میزان افزایش تاب‌آوری، هزینه اجرا، زمان پیاده‌سازی، پیچیدگی اجرایی، سهولت نگهداری و قابلیت بهره‌برداری در شرایط بحران رتبه‌بندی شدند. در ادامه، به‌منظور بررسی میزان پایداری نتایج، تحلیل حساسیت بر وزن معیارهای اصلی حاصل از روش *BWM* انجام شد. در این تحلیل، به‌منظور بررسی پایداری نتایج در برابر تغییرات متعارف وزن معیارها، تغییرات مثبت و منفی ۱۰ و ۲۰ درصدی در وزن معیارها اعمال و تأثیر آن بر شاخص نهایی تاب‌آوری و رتبه‌بندی سناریوها بررسی شد. نتایج این مرحله امکان ارزیابی میزان پایداری، قابلیت اعتماد و حساسیت مدل پیشنهادی نسبت به تغییرات وزن معیارها را فراهم آورد.

۲-۳- معرفی ساختمان مورد مطالعه و تعریف سناریوها (بهینه سازی و مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان- مدیریت مصرف و بهینه سازی مصرف انرژی)

در این پژوهش، یک ساختمان مسکونی نمونه در شهر تهران به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. سپس مدل انرژی ساختمان بر اساس الزامات مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان و با استفاده از روش موازنه‌ای توسعه یافت. *(Fatemi & Sadoughi, 2020)*مشخصات هندسی ساختمان، ویژگی‌های حرارتی اجزای پوسته شامل دیوارهای خارجی، سقف و کف، مشخصات پنجره‌ها، شرایط بهره‌برداری، سیستم‌های گرمایش و سرمایش و داده‌های اقلیمی شهر تهران در مدل شبیه‌سازی تعریف گردید.

به‌منظور بررسی تأثیر عایق‌کاری حرارتی بر عملکرد انرژی ساختمان، عایق پلی‌استایرن منبسط‌شده (*Expanded Polystyrene, EPS*) به‌عنوان متغیر اصلی پوسته انتخاب شد. برای این منظور، هشت مقدار مختلف ضریب هدایت حرارتی در محدوده وزن مخصوص ۰.۰۳۸ تا ۰.۰۵۶ *W/m.K* بر اساس مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان و ده سطح ضخامت از ۱ تا ۱۰ سانتی‌متر در مدل شبیه‌سازی تعریف گردید. بر اساس ترکیب مقادیر مختلف ضریب هدایت حرارتی و ضخامت عایق، در مجموع ۸۰ سناریوی شبیه‌سازی برای دیوارهای خارجی و کف مجاور فضای کنترل‌نشده (پارکینگ) ایجاد و ارزیابی شد.

انتخاب عایق *EPS* به دلیل ویژگی‌هایی نظیر ضریب هدایت حرارتی پایین، وزن کم، سهولت اجرا، دسترسی گسترده در بازار داخلی، هزینه اقتصادی مناسب و کاربرد گسترده در صنعت ساختمان ایران انجام گرفت. همچنین این ماده قابلیت دستیابی به الزامات حرارتی تعیین‌شده در مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان را در ضخامت‌های متعارف دارا بوده و از نظر فنی و اقتصادی، گزینه مناسبی برای ساختمان‌های مسکونی محسوب می‌شود *(Fatemi & Sadoughi, 2020; Kallioğlu et al., 2019; Musazadeh & Yaghoubzadeh, 2016)*

۲-۳-۱- شبیه‌سازی انرژی و محاسبات حرارتی

در این مرحله، شبیه‌سازی عملکرد انرژی ساختمان با استفاده از نسخه نرم‌افزار *Carrier Hourly Analysis Program (HAP)* انجام شد. این نرم‌افزار بر پایه روش‌های محاسباتی مورد تأیید استانداردهای *ASHRAE*، امکان تحلیل بارهای گرمایشی

و سرمایشی، بررسی عملکرد سامانه‌های تهویه مطبوع (*HVAC*) و ارزیابی اثر پارامترهای پوسته ساختمان بر مصرف انرژی را فراهم می‌کند. *(Yuan et al., 2017; Rahmani et al., 2017)*

در هر یک از سناریوهای تعریف‌شده، پارامترهایی شامل بار سالانه گرمایش، بار سالانه سرمایش، میزان انتقال حرارت از اجزای پوسته، ضریب انتقال حرارت جداره‌ها و شاخص‌های عملکرد انرژی ساختمان محاسبه شد. همچنین، به‌منظور بررسی اثر عوامل معماری بر عملکرد حرارتی ساختمان، تأثیر استفاده از پنجره‌های دوجداره و تغییر جهت‌گیری ساختمان نسبت به تابش خورشیدی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، ساختمان در ۹ زاویه مختلف با توجه به نسخه نرم‌افزار*HAP* نسبت به مسیر تابش خورشید (از ۰ تا ۱۸۰ درجه با گام‌های ۲۲.۵ درجه‌ای) تحلیل شد.

۲-۳-۲- تحلیل نتایج و تعیین ضخامت بهینه انرژی عایق

در مرحله چهارم، نتایج حاصل از شبیه‌سازی به صورت عددی تحلیل شد. برای هر سناریو، مقاومت حرارتی کل*(R)* ، ضریب انتقال حرارت*(U)* ، ضریب انتقال حرارت طرح *(H)* و ضریب انتقال حرارت مرجع *($\hat{H}$)* مطابق روابط ارائه‌شده در مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان محاسبه گردید. سپس مقادیر به‌دست‌آمده با حدود مجاز آیین‌نامه مقایسه شد. در نهایت، ضخامت بهینه انرژی عایق حرارتی از دیدگاه عملکرد انرژی بر اساس سه معیار اصلی شامل کاهش بارهای گرمایشی و سرمایشی، کاهش ضریب انتقال حرارت پوسته ساختمان و تأمین شرط انطباق با الزامات مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان *($H \leq \hat{H}$)* و بیشترین صرفه‌جویی انرژی را با کمترین افزایش ضخامت ایجاد کند، تعیین شد. نتایج این تحلیل، امکان ارائه راهکار مناسب برای بهبود عملکرد انرژی ساختمان‌های مسکونی در تهران را فراهم ساخت.

۲-۳-۳ - معادلات مرتبط با انتقال حرارت

میزان انتقال حرارت از اجزای پوسته ساختمان تابعی از ضریب انتقال حرارت کلی و اختلاف دمای دو سوی جداره است. نرخ انتقال حرارت از واحد سطح دیوار خارجی از رابطه زیر محاسبه می‌شود: *(Nasser et al., 2018; Bentoumi et al., 2024; Ministry of Roads and Urban Development, 2025)*

جهت بدست آوردن آن از رابطه(۱) استفاده می‌شود که در آن *(q)* شار حرارتی*(W/m^2)* ، *(U)*ضریب انتقال حرارت کلی *($W/m^2.K$)*و *(ΔT.)* اختلاف دمای داخل و خارج ساختمان است *(Kallioğlu et al., 2019)* .

$$q = U.\Delta T \qquad (۱)$$

ضریب انتقال حرارت کلی از رابطه شماره(۲)به دست می‌آید. که در آنRi، Rw، Ro و$Rins$ به‌ترتیب مقاومت حرارتی سطح داخلی، دیوار، سطح خارجی و لایه عایق هستند و Rwt مجموع مقاومت حرارتی اجزای غیرعایق جداره را نشان می‌دهد.

$$\mathrm{U} = \frac{1}{\mathrm{Ri} + \mathrm{Rw} + \mathrm{Rins} + \mathrm{Ro}} = \frac{1}{\mathrm{Rwt} + \mathrm{Rins}} \qquad (۲)$$

مقاومت حرارتی لایه عایق از رابطه (۳) به دست می آید.

$$\mathrm{Rins} = \frac{\mathrm{x}}{\mathrm{k}} \qquad (۳)$$

که در آن *(x)* ضخامت عایق و *(k)* ضریب هدایت حرارتی عایق است. هرچه مقدار مقاومت حرارتی بیشتر باشد، عملکرد

حرارتی عایق مطلوب‌تر خواهد بود.(Yuan et al., 2017)

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی تاب‌آوری ساختمان، تعیین وزن معیارها با استفاده از روشBWM

۳-۱- ۱- استخراج و طبقه‌بندی شاخص‌های تاب‌آوری ساختمان

مطابق جدول (۱)، شاخص‌های مورد استفاده برای ارزیابی تاب‌آوری ساختمان استخراج و در چهار بعد اصلی شامل تأسیسات برقی، تأسیسات مکانیکی، فضای امن پناهگاهی و ایمنی و مدیریت بحران طبقه‌بندی شدند. در بخش تأسیسات برقی، معیارهایی مانند وجود سامانه برق اضطراری، ظرفیت پشتیبان انرژی، حفاظت تجهیزات الکتریکی، افزونگی مسیرهای تأمین برق و قابلیت تداوم عملکرد تجهیزات حیاتی مورد بررسی قرار گرفت. این معیارها بر اساس الزامات مبحث بیست‌ویکم مقررات ملی ساختمان و اصول پدافند غیرعامل انتخاب شدند .*(Radmard et al., 2018; Abdollahzadeh et al., 2021)*همان‌گونه که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، بیشترین تعداد شاخص‌ها مربوط به حوزه تأسیسات مکانیکی و ایمنی ساختمان است که بیانگر نقش این سامانه‌ها در حفظ عملکرد ساختمان طی شرایط بحران است. مجموع این شاخص‌ها، چارچوب ارزیابی جامعی برای تعیین میزان آمادگی ساختمان در برابر تهدیدات طبیعی و انسان‌ساخت فراهم کرده و مبنای محاسبه شاخص نهایی تاب‌آوری ساختمان قرار گرفت.

جدول (۱): شاخص‌های ارزیابی تاب‌آوری بر اساس مبحث ۲۱ مقررات ملی ساختمان و اصول پدافند غیرعامل ***(Radmard et al., 2018; Lari et al., 2026; Rahmani et al., 2017; Bitarafan et al., 2026; Mobaraki et al., 2024)***

شاخص اصلی	بعد ارزیابی
تأسیسات برقی	تأمین برق اضطراری تجهیزات حیاتی، وجود مولد برق اضطراری (ژنراتور)، قابلیت پشتیبانیUPS ، جانمایی مناسب تابلوهای برق، حفاظت تجهیزات الکتریکی در برابر تهدیدات، افزونگی مسیرهای تأمین برق، استقلال عملکردی مدارهای حیاتی
تأسیسات مکانیکی	وجود سامانه تهویه اضطراری، قابلیت ادامه عملکرد سیستم‌های گرمایش و سرمایش در شرایط بحران، تأمین آب اضطراری، حفاظت تجهیزات مکانیکی، دسترسی مناسب برای تعمیرات، افزونگی تجهیزات حیاتی، قابلیت جداسازی و کنترل مستقل سامانه‌های مکانیکی
فضای امن پناهگاهی	محل و دسترسی مناسب فضای امن، ظرفیت پذیرش افراد، تهویه مستقل فضای امن پناهگاهی، تأمین برق اضطراری فضای امن پناهگاهی، ذخیره آب و امکانات اولیه، مقاومت اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای، حفاظت در برابر خطرات محیطی و امکان تداوم بهره‌برداری در شرایط بحران
ایمنی و مدیریت بحران	سامانه اعلام حریق، سامانه اطفای حریق، تجهیزات کنترل دود، مسیرهای خروج اضطراری، علائم هدایت و دسترسی اضطراری، قابلیت مدیریت شرایط بحرانی، آموزش و آمادگی بهره‌برداران، امکان بهره‌برداری ساختمان پس از وقوع حادثه

۳-۱- ۲- اعتبارسنجی و وزن‌دهی معیارهای ارزیابی تاب‌آوری

ساختمان مسکونی واقع در شهر تهران به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. ارزیابی بر مبنای میزان انطباق تأسیسات مکانیکی، برقی و سامانه‌های حیاتی فضای امن پناهگاهی با الزامات مبحث ۲۱ مقررات ملی ساختمان انجام شد.اطلاعات موردنیاز از طریق بررسی نقشه‌های معماری، مکانیکی و برقی، مدارک اجرایی، مشخصات فنی تجهیزات، گزارش‌های راه‌اندازی گردآوری شد. سپس برای هر یک از معیارهای نهایی، وضعیت موجود ساختمان با استفاده از چک‌لیست ارزیابی و مقیاس پنج‌درجه‌ای لیکرت امتیازدهی شد؛ به‌گونه‌ای که امتیاز (۱) بیانگر عدم انطباق و امتیاز (۵) نشان‌دهنده انطباق کامل با الزامات تاب‌آوری بود. شاخص تاب‌آوری

ساختمان بر اساس رابطه (۴) محاسبه شد و به‌منظور تعیین وزن معیارها، مدل برنامه‌ریزی خطی روش *BWM* مطابق رابطه (۴) حل شد.

$$\text{1. Min } \xi \quad \text{Subject to: } |wB - aBj\ wj| \le \xi \quad |wj - ajW\ wW| \le \xi \quad \Sigma wj = 1 \qquad (4)$$

$$wj \ge 0$$

که در آن:

wB : وزن معیار برتر (*Best*)

wW : وزن معیار ضعیف‌تر (*Worst*)

wj : وزن معیار j

aBj : ترجیح معیار *Best* نسبت به معیار j

ajW : ترجیح معیار j نسبت به معیار *Worst*

جدول (۲): وزن معیارهای اصلی حاصل از روش BWM

رتبه	معیار اصلی	وزن
1	تأسیسات مکانیکی حیاتی	0.34
2	تأسیسات برقی حیاتی	0.31
3	تأسیسات حیاتی فضای امن پناهگاهی	0.22
4	قابلیت‌های بازیابی و نگهداری(ایمنی و مدیریت بحران)	0.13
-	جمع	1.00

ξ : شاخص ناسازگاری

پس از استخراج معیارهای مؤثر بر ارزیابی تاب‌آوری تأسیسات ساختمان بر اساس الزامات مبحث ۲۱ مقررات ملی ساختمان، آیین‌نامه‌های مرتبط و مطالعات پیشین، مجموعه معیارهای اولیه در چهار حوزه شامل تأسیسات برقی، تأسیسات مکانیکی، تأسیسات حیاتی فضای امن پناهگاهی و ایمنی و مدیریت بحران تدوین شد. مطابق مطالعات پیشین، استفاده از ۸ تا ۱۵ خبره در مطالعات مبتنی بر *BWM* کفایت دارد؛ بنابراین در این پژوهش از نظرات ۱۲ خبره شامل اعضای هیئت علمی، متخصصان تأسیسات مکانیکی و برقی، مهندسان مشاور و کارشناسان پدافند غیرعامل جهت بررسی روایی محتوایی استفاده شد. خبرگان هر یک از معیارها را از چهار جنبه اهمیت، ارتباط با الزامات مبحث ۲۱، شفافیت و ضرورت بر اساس طیف پنج‌درجه‌ای لیکرت ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که تمامی معیارها میانگین امتیازی بیش از مقدار آستانه (۴ از ۵) کسب کردند؛ بنابراین هیچ‌یک از معیارها حذف نشد و صرفاً اصلاحات پیشنهادی خبرگان در نام‌گذاری و تعریف برخی شاخص‌ها اعمال شد.پس از تأیید نهایی معیارها، وزن‌دهی آن‌ها با استفاده از روش (*Best–Worst Method (BWM)*) انجام شد. در این مرحله، خبرگان ابتدا مهم‌ترین *(Best)* و کم‌اهمیت‌ترین *(Worst)*معیار را تعیین کرده و سپس مقایسات ترجیحی بین معیارها را در مقیاس ۱ تا ۹ تکمیل کردند. با تشکیل بردارهای*(Best-to-Others)*و*(Others-to-Worst)*و حل مدل بهینه‌سازی، وزن نهایی معیارها استخراج شد.

طبق جدول (۲) نتایج نشان داد که در سطح معیارهای اصلی، تأسیسات مکانیکی حیاتی با وزن *0.34*، تأسیسات برقی حیاتی با وزن *0.31*، تأسیسات حیاتی فضای امن پناهگاهی با وزن *0.22*و قابلیت‌های عمومی بازیابی و نگهداری با وزن *0.13*به‌ترتیب بیشترین اهمیت را در افزایش تاب‌آوری ساختمان دارند. این نتیجه نشان می‌دهد که تداوم عملکرد سامانه‌های مکانیکی در شرایط بحران، بیشترین نقش را در حفظ کارکرد ساختمان دارد.

به‌منظور بررسی میزان سازگاری قضاوت‌های خبرگان، نرخ سازگاری (*Consistency Ratio: CR*) روش *Best–Worst Method* محاسبه شد. مقدار *CR* برابر با ۰.۰۸ به‌دست آمد که کمتر از مقدار پیشنهادی ۰.۱۰ است؛ بنابراین، قضاوت‌های خبرگان از سازگاری مناسبی برخوردار بوده و وزن‌های استخراج‌شده از اعتبار لازم برای ادامه تحلیل‌ها برخوردار هستند.گرچه بسیاری از سامانه‌های مکانیکی ساختمان برای عملکرد خود به انرژی الکتریکی وابسته هستند، نتایج وزن‌دهی نشان داد که از دیدگاه خبرگان، تأسیسات مکانیکی حیاتی نقش مستقیمی در حفظ عملکرد ساختمان در شرایط بحران دارند. این موضوع به دلیل وابستگی تاب‌آوری ساختمان به عملکرد سامانه‌هایی نظیر تهویه اضطراری، تأمین آب اضطراری، کنترل دود و تجهیزات مکانیکی پشتیبان است. در این پژوهش، وزن بالاتر تأسیسات مکانیکی به معنای بی‌اهمیت بودن سامانه‌های برقی نیست، بلکه نشان‌دهنده اهمیت عملکرد نهایی خدمات حیاتی ساختمان در شرایط اضطراری است. همچنین وزن بالای معیار «تداوم تأمین برق اضطراری» در سطح زیرمعیارها نشان می‌دهد که نقش زیرساخت برق نیز در مدل پیشنهادی به‌طور مستقل لحاظ شده است.طبق جدول (۳) در سطح زیرمعیارها نیز تداوم تأمین برق اضطراری (E1)، سیستم اطفای حریق(M2) ، تهویه اضطراری و فیلتراسیون هوا (S3) و تأمین آب اضطراری (M1) بالاترین وزن را کسب کردند که بیانگر نقش کلیدی این سامانه‌ها در حفظ عملکرد ساختمان در شرایط بحران است. کسب بیشترین وزن توسط تداوم تأمین برق اضطراری نشان می‌دهد که حفظ عملکرد تجهیزات حیاتی در ساعات اولیه بحران، مهم‌ترین مؤلفه تاب‌آوری ساختمان از دیدگاه خبرگان است. همچنین وزن بالای سیستم اطفای حریق و تهویه اضطراری بیانگر اهمیت کنترل پیامدهای ثانویه بحران نظیر آتش‌سوزی و کاهش کیفیت هوا است. نرخ سازگاری (Consistency Ratio) حاصل از اجرای روش BWMبرابر با 0.08به دست آمد که کمتر از حد مجاز یا مقدار پیشنهادی (۰.۱۰) بوده و بیانگر سازگاری مناسب قضاوت خبرگان و قابلیت اعتماد نتایج است. وزن‌های استخراج‌شده در ادامه پژوهش به‌عنوان ضرایب اهمیت در محاسبه شاخص‌های تاب‌آوری و رتبه‌بندی سناریوهای ارتقای تاب‌آوری مورد استفاده قرار گرفت

جدول (۳): رتبه‌بندی زیرمعیارهای کلیدی مؤثر بر تاب‌آوری ساختمان

کد	رتبه	زیرمعیار	وزن
E1	1	تداوم تأمین برق اضطراری	0.18
M2	2	سیستم اطفای حریق	0.16
S3	3	تهویه اضطراری و فیلتراسیون هوا	0.15
M1	4	تأمین آب اضطراری	0.14
E3	5	استقلال شبکه برق	0.13
S1	6	تأمین برق اضطراری فضای امن پناهگاهی	0.12

۳-۱- ۳- ارزیابی ساختمان مورد مطالعه

ارزیابی بر مبنای میزان انطباق تأسیسات مکانیکی، برقی و سامانه‌های حیاتی فضای امن پناهگاهی و ایمنی و مدیریت بحران با الزامات مبحث ۲۱ مقررات ملی ساختمان انجام شد .شاخص تاب‌آوری ساختمان بر اساس رابطه *(5)* محاسبه شد. که در آن *(R)* شاخص نهایی تاب‌آوری ساختمان، *(Wi)* وزن اهمیت معیار i حاصل از روش (*BWM*) و *(Si)* امتیاز عملکرد ساختمان در معیار

i و (n) : تعداد کل معیارهای ارزیابی

$$R = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{Wi} \cdot \mathbf{Si} \qquad (۴)$$

طبق جدول (۴) نتایج نشان داد که شاخص تاب‌آوری تأسیسات برقی 0.78، شاخص تاب‌آوری تأسیسات مکانیکی 0.81و شاخص تاب‌آوری تأسیسات فضای امن پناهگاهی 0.70است. همچنین شاخص کلی تاب‌آوری ساختمان برابر 0.77محاسبه شد که بیانگر عملکرد مطلوب ساختمان از نظر الزامات پدافند غیرعامل است.

جدول (۴): نتایج ارزیابی ساختمان

ردیف	حوزه ارزیابی	شاخص تاب‌آوری	سطح عملکرد
۱	تأسیسات برقی	0.78	مطلوب
۲	تأسیسات مکانیکی	0.81	مطلوب
۳	تأسیسات فضای امن پناهگاهی	0.70	قابل قبول
۴	شاخص کلی ساختمان	0.77	مطلوب

۳-۱-۴- ارزیابی سناریوهای ارتقای تاب‌آوری

با توجه به جدیدالاحداث بودن ساختمان، سناریوهای پیشنهادی با هدف ارتقای سطح تاب‌آوری فراتر از الزامات حداقلی طراحی تدوین شدند و ماهیت بهسازی ساختمان فرسوده ندارند. سناریوهای پیشنهادی شامل موارد زیر است:

- سناریوی ۱ : ارتقای سامانه تأمین برق اضطراری(UPS) ، افزایش ظرفیت ژنراتور و تفکیک بارهای حیاتی
- سناریوی ۲ : افزایش افزونگی تجهیزات حیاتی (پمپ، فن و تجهیزات رزرو)
- سناریوی۳ : ارتقای تأسیسات فضای امن پناهگاهی (تهویه اضطراری، فیلتراسیون هوا، روشنایی و ارتباطات)
- سناریوی ۴ : توسعه سامانه‌های اعلام و اطفای حریق
- سناریوی ۵ : فزایش استقلال عملکردی شبکه‌های تأسیساتی

سناریوها بر اساس معیارهای افزایش تاب‌آوری، هزینه اجرا، زمان اجرا، سهولت بهره‌برداری و قابلیت نگهداری با استفاده از روش $TOPSIS$رتبه‌بندی شدند. نتایج نشان داد که ارتقای سامانه برق اضطراری، افزایش افزونگی تجهیزات و توسعه تأسیسات فضای امن پناهگاهی بیشترین تأثیر را بر افزایش تاب‌آوری ساختمان دارند. لازم به ذکر است برتری سناریوی ارتقای سامانه تأمین برق اضطراری با نتایج وزن‌دهی BWM نیز همخوانی دارد؛ زیرا «تداوم تأمین برق اضطراری» بالاترین وزن را در میان زیرمعیارهای ارزیابی کسب کرده است. همچنین رتبه بالای سناریوهای افزایش افزونگی تجهیزات و ارتقای فضای امن پناهگاهی بیانگر اهمیت حفظ تداوم عملکرد سامانه‌های حیاتی در شرایط بحران است.

۳-۱-۵- تحلیل حساسیت

به‌منظور ارزیابی پایداری نتایج، تحلیل حساسیت با اعمال تغییرات (±۱۰٪) و (±۲۰٪) در وزن معیارهای حاصل از روش BWM انجام شد. در هر مرحله، شاخص تاب‌آوری و رتبه‌بندی سناریوهای ارتقای تاب‌آوری مجدداً با استفاده از روش $TOPSIS$ محاسبه شد. نتایج طبق جدول (۵) نشان می دهد که تغییرات وزن معیارها تأثیر محدودی بر رتبه‌بندی نهایی سناریوها داشته و سناریوی

ارتقای سامانه تأمین برق اضطراری در تمامی حالات رتبه نخست را حفظ کرده است. همچنین سناریوهای ارتقای تأسیسات پناهگاهی و افزایش افزونگی تجهیزات مکانیکی نیز در اکثر حالات در رتبه‌های دوم و سوم باقی ماندند. درنهایت مشاهده گردید که مدل پیشنهادی از پایداری و قابلیت اعتماد مناسبی برخوردار بوده و تصمیم‌گیری نهایی وابستگی قابل توجهی به تغییرات محدود در وزن معیارها ندارد و تنها در حالت کاهش ۲۰ درصدی وزن معیارها، جایگاه سناریوهای دوم و سوم جابه‌جا شد؛ در حالی که سناریوی نخست در تمامی حالات بدون تغییر باقی ماند.

جدول (۵): نتایج تحلیل حساسیت

تغییر وزن	رتبه سناریوی۱	رتبه سناریوی۳	رتبه سناریوی۳
وزن اولیه	1	2	۳
-٪10	1	2	3
+٪10	1	2	3
-٪20	1	3	2
+٪20	1	2	3

۳-۱- ۶- نتیجه‌گیری بخش تاب‌آوری ساختمان

نتایج ارزیابی تاب‌آوری تأسیسات ساختمان نشان داد که چارچوب پیشنهادی مبتنی بر الزامات مبحث بیست‌ویکم مقررات ملی ساختمان و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، قابلیت مناسبی برای سنجش عملکرد سامانه‌های حیاتی ساختمان دارد. پس از استخراج و اعتبارسنجی شاخص‌ها توسط خبرگان، معیارهای مؤثر با استفاده از روش BWM وزن‌دهی شدند. نتایج وزن‌دهی نشان داد که تأسیسات مکانیکی حیاتی با وزن ۰.۳۴ و تأسیسات برقی حیاتی با وزن ۰.۳۱ بیشترین اهمیت را در ارتقای تاب‌آوری ساختمان دارند؛ در حالی‌که تأسیسات فضای امن پناهگاهی و قابلیت بازیابی و نگهداری به‌ترتیب با وزن‌های ۰.۲۲ و ۰.۱۳ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. همچنین نرخ سازگاری مدل BWM برابر ۰.۰۸ به دست آمد که بیانگر اعتبار مناسب قضاوت‌های خبرگان است. ارزیابی ساختمان مورد مطالعه نشان داد که شاخص کلی تاب‌آوری برابر ۰.۷۷ بوده و ساختمان از سطح عملکرد مطلوبی برخوردار است. در میان حوزه‌های ارزیابی، تأسیسات مکانیکی با شاخص تاب‌آوری ۰.۸۱ بالاترین عملکرد را داشته و پس از آن تأسیسات برقی با شاخص ۰.۷۸ قرار گرفت. همچنین حوزه تأسیسات فضای امن پناهگاهی با شاخص ۰.۷۰ در سطح قابل قبول ارزیابی شد که نشان‌دهنده نیاز به تقویت برخی زیرساخت‌های مرتبط با تداوم عملکرد در شرایط بحران است. نتایج رتبه‌بندی سناریوهای ارتقای تاب‌آوری با استفاده از روش $TOPSIS$ نشان داد که ارتقای سامانه تأمین برق اضطراری، افزایش افزونگی تجهیزات حیاتی و بهبود سامانه‌های فضای امن پناهگاهی، مؤثرترین راهکارها برای افزایش سطح تاب‌آوری ساختمان هستند. همچنین تحلیل حساسیت نشان داد که تغییرات ±۱۰ و ±۲۰ درصدی در وزن معیارها تأثیر قابل توجهی بر رتبه‌بندی نهایی نداشته و سناریوی ارتقای سامانه برق اضطراری در تمامی حالت‌ها رتبه نخست را حفظ کرده است. این موضوع پایداری و قابلیت اعتماد مدل پیشنهادی را در اولویت‌بندی راهکارهای ارتقای تاب‌آوری تأیید می‌کند. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که ارزیابی همزمان عملکرد تأسیسات مکانیکی، برقی و فضای امن پناهگاهی می‌تواند دیدگاه جامع‌تری نسبت به میزان آمادگی ساختمان در

برابر شرایط بحرانی ارائه دهد و چارچوب پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان ابزاری کاربردی برای تصمیم‌گیری در زمینه ارتقای تاب‌آوری ساختمان‌های مسکونی مورد استفاده قرار گیرد.

۳-۲- نمونه موردی و تعیین ضخامت بهینه انرژی عایق حرارتی طبق مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان

تعیین ضخامت بهینه انرژی عایق حرارتی بر اساس الزامات مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان (صرفه‌جویی در مصرف انرژی) و با استفاده از روش کارکردی (موازنه‌ای) مندرج در مبحث ۱۹ انجام شد. *(Ministry of Roads and Urban Development, 2025)* در این روش، عملکرد حرارتی ساختمان از طریق مقایسه ضریب انتقال حرارت طرح با ضریب انتقال حرارت مرجع ارزیابی می‌شود. ساختمان مورد مطالعه یک ساختمان مسکونی واقع در شهر تهران که بر اساس شرایط اقلیمی و الزامات مبحث ۱۹ مورد تحلیل قرار گرفته است. فرآیند تحقیق شامل محاسبه مشخصات حرارتی پوسته ساختمان، تعیین ضرایب انتقال حرارت طرح و مرجع بر اساس روابط ارائه‌شده در مبحث نوزدهم، بررسی سناریوهای مختلف عایق‌کاری و در نهایت ارزیابی انرژی با استفاده از نرم‌افزار *Carrier HAP* است. به‌منظور انجام تحلیل انرژی، مدل ساختمان در نرم‌افزار Carrier HAP ایجاد و مشخصات هندسی، اقلیمی، مصالح پوسته و شرایط بهره‌برداری وارد نرم‌افزار شد. نمونه‌ای از خروجی بارهای طراحی سرمایش و گرمایش حاصل از شبیه‌سازی در شکل (۱) ارائه شده است

Zone Design Load Summary for RADIATOR

Project Name: TEHRAN k=0.560w=7 EPS POLIMER 1cm 010 02 1405 — 05/09/2026
Prepared by: HP — 09:28AM

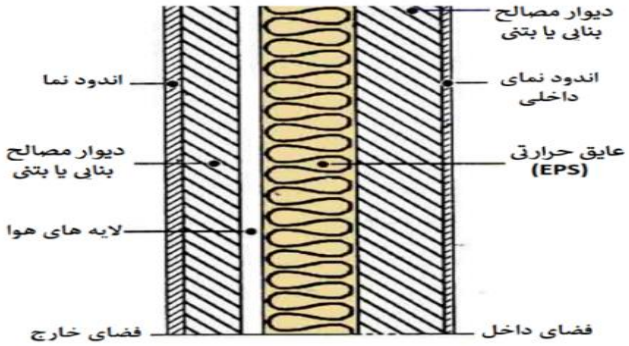
Zone 1	DESIGN COOLING			DESIGN HEATING		
	COOLING DATA AT Jul 1500 COOLING OA DB / WB 38.9 °C / 23.9 °C			HEATING DATA AT DES HTG HEATING OA DB / WB -6.7 °C / -8.8 °C		
	OCCUPIED T-STAT 23.9 °C			OCCUPIED T-STAT 21.1 °C		
ZONE LOADS	Details	Sensible (W)	Latent (W)	Details	Sensible (W)	Latent (W)
Window & Skylight Solar Loads	122 m²	11111	-	122 m²	-	-
Wall Transmission	329 m²	5570	-	329 m²	11765	-
Roof Transmission	130 m²	1479	-	130 m²	4831	-
Window Transmission	122 m²	3264	-	122 m²	7366	-
Skylight Transmission	0 m²	0	-	0 m²	0	-
Door Loads	0 m²	0	-	0 m²	0	-
Floor Transmission	160 m²	0	-	160 m²	0	-
Partitions	293 m²	0	-	293 m²	0	-
Ceiling	269 m²	0	-	269 m²	0	-
Overhead Lighting	2765 W	2765	-	0	0	-
Task Lighting	0 W	0	-	0	0	-
Electric Equipment	0 W	0	-	0	0	-
People	79	5540	4000	0	0	0
Infiltration	-	12340	4842	-	1766	7
Miscellaneous	-	0	0	-	0	0
Safety Factor	10% / 10%	4207	884	0%	0	0
>> Total Zone Loads	-	46277	9726	-	25728	7

شکل (۱): خروجی مدل ساختمان در نرم‌افزار **Carrier HAP**

۳-۲-۱- مشخصات عایق حرارتی

در این پژوهش از عایق پلی‌استایرن منبسط‌شده *(EPS)* به دلیل کاربرد گسترده آن در صنعت ساختمان استفاده شد. مشخصات حرارتی این عایق بر اساس پیوست هفتم مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان استخراج گردید. *(Ministry of Roads and Urban Development, 2025)* هشت نوع *(EPS)* با چگالی خشک ۷ تا بیش از ۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ضریب هدایت حرارتی بین ۰.۰۵۶ تا ۰.۰۳۸ وات بر متر-کلوین بررسی شدند. یکی از متداول‌ترین و موثرترین روش‌ها، استفاده از عایق پلی‌استایرن

منبسط‌شده (EPS) در ساختار دیوارهاست. همان‌طور که در شکل(۲) نشان داده شده است، سیستم دیواری طراحی شده شامل لایه‌های متعددی است که با هدف بهینه‌سازی حرارتی و محافظت از فضای داخلی چیده شده‌اند. همچنین ضخامت عایق در بازه ۰.۰۱ تا ۰.۱۰ متر برای تعیین ضخامت بهینه انرژی در نظر گرفته شد.



شکل (۲): لایه های تشکیل دهنده دیوار خارجی

۲-۲-۳-تعیین گروه انرژی ساختمان

بر اساس پیوست‌های سوم و چهارم مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان و با توجه به نوع کاربری و موقعیت ساختمان، نمونه مورد مطالعه در گروه ساختمانی ۲، گونهA، با نیاز غالب گرمایشی و درجه انرژی متوسط طبقه‌بندی شد.

جدول (۶): دیوار مجاور فضای کنترل‌نشده با وزن مخصوص

چیدمان دیواربا ضخامت ۰.۲۲ متر (U=1.11W/m2.K)					
مصالح بکار رفته	اندود گچ	بلوک سفالی	عایق حرارت(EPS)	اندود سیمان	لایه هوا
D(m)	0.03	0.15	0.02	0.02	0
K(W/m.K)	0.57	0.5	0.056	1	۰
R (m2K/W)	0.053	0.3	0.35	0.02	0.17

جدول (۷):مشخصات حرارتی دیوار خارجی مجهز به عایق حرارت

چیدمان دیواربا ضخامت ۰.۲۲ متر (U=1.343W/m2.K)					
مصالح بکار رفته	اندود گچ	بلوک سفالی	عایق حرارت(EPS)	اندود گچ	
D(m)	0.03	0.15	0.02	0.02	
k (W/m.K)	0.57	0.5	0.056	0.57	0
R (m2K/W)	0.053	0.3	0.357	0.035	

۳۷-۱۰(kg/m3)

جدول (۸): مشخصات حرارتی کف روی پارکینگ با عایق حرارتی (EPS)

(U=1.343W/m2.K) لایه هوا K=0.25(W/m.K)					
مصالح بکار رفته	موزاییک	عایق حرارت(EPS)	ملات ماسه و سیمان	سقف تیرچه و بلوک سفالی	اندود سیمان
D (m)	0.02	0.02	0.02	0.2	0.03
k(W/m.K)	1.2	0.056	۱	0.5	0.3
R (m2K/W	0.017	0.357	0.02	0.4	0.1

3-۲-۳- مشخصات حرارتی پوسته ساختمان

مشخصات حرارتی اجزای مختلف پوسته ساختمان شامل دیوار خارجی، دیوار مجاور فضای کنترل‌نشده و کف روی پارکینگ تعیین شد. برای هر جدار، مقاومت حرارتی لایه‌ها، مقاومت حرارتی کل و ضریب انتقال حرارت *(U-value)* بر اساس ضخامت و ضریب هدایت حرارتی مصالح محاسبه گردید. نتایج این محاسبات در جداول (۶)، (۷) و(۸) ارائه شده است.

۳-۲-۴- تعیین ضرایب انتقال حرارت مرجع

ضریب انتقال حرارت مرجع ساختمان $(\hat{H})$ بیانگر حداکثر انتقال حرارت مجاز از پوسته ساختمان بوده و بر اساس رابطه (۶) محاسبه می‌شود. در این رابطه، AW، AR، AF، AG و AD به‌ترتیب بیانگر مساحت دیوارهای خارجی، بام، کف، سطوح مجاور زمین و سطوح مجاور فضاهای کنترل‌نشده بوده و $\hat{U}$ ضریب انتقال حرارت هر جزء از پوسته ساختمان است.همچنین ضریب انتقال حرارت طرح ساختمان (H) بر اساس مشخصات واقعی اجزای پوسته و مطابق رابطه (۷) محاسبه شد. در این رابطه، τضریب تصحیح دمایی و Ψ ضریب انتقال حرارت خطی پل‌های حرارتی است. معیار پذیرش طرح، برآورده شدن الزامات مبحث نوزدهم و کمتر بودن ضریب انتقال حرارت طرح نسبت به مقدار مرجع است. ضریب انتقال حرارت مرجع ساختمان $(\hat{H})$، مطابق روابط ارائه‌شده در روش کارکردی مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان محاسبه شد: *(Ministry of Roads and Urban Development, 2025).*

$$H\hat{} = (AW \times U\hat{}W) + (AR \times U\hat{}R) + (AF \times U\hat{}F) + (P \times U\hat{}P) + (AG \times U\hat{}G) + (AD \times U\hat{}D) + (A \tag{۵}$$

$$H = \sum_{i+1}^{n}(\mathrm{A}wi \times \hat{\mathrm{U}}\mathrm{Wi} \times \tau\mathrm{i}) + \sum_{i=1}^{n}(\mathrm{ARi} \times \hat{\mathrm{U}}\mathrm{Ri} \times \tau\mathrm{i}) + \sum_{i=1}^{n}(\mathrm{AFi} \times \hat{\mathrm{U}}\mathrm{Fi} \times \tau\mathrm{i}) + \sum_{i=1}^{n}(\mathrm{AGi} \times \hat{\mathrm{U}}\mathrm{Gi} \times \tau\mathrm{i}) + \sum_{i=1}^{n}(\mathrm{ADi} \times \hat{\mathrm{U}}\mathrm{Di} \times \tau\mathrm{i}) + \sum_{i=1}^{n}(\mathrm{Pi} \times \Psi\mathrm{i} \times \tau\mathrm{i}) \tag{۶}$$

۳-۲-۵- تعریف سناریوهای بخش مبحث۱۹ مقررات ملی ساختمان

در این پژوهش، سه سناریوی اصلی بخش صرفه جویی انرژی به منظور ارزیابی اثر عایق‌کاری و نوع پنجره تعریف شد:

حالت پایه: ساختمان بدون عایق حرارتی و با پنجره تک‌جداره

- سناریوی (1): ساختمان بدون عایق حرارتی و با پنجره دوجداره
- سناریوی (2): ساختمان با پنجره دوجداره و مجهز به عایق EPS با ضخامت متغیر (۱تا ۱۰ سانتی متر) برای دیوار خارجی
- سناریوی (3): ساختمان با پنجره دوجداره و مجهز به عایق EPS با ضخامت متغیر (۱تا ۱۰ سانتی متر) برای دیوار خارجی و کف رو پارکینگ

در سناریوی دوم و سوم، مجموعه‌ای از سناریوهای فرعی شامل ترکیب هشت نوع عایق *(EPS)* و ضخامت‌های ۱ تا ۱۰ سانتی‌متر برای دیوار خارجی و کف روی پارکینگ بررسی شد تا اثر نوع و ضخامت عایق بهینه انرژی به‌صورت دقیق ارزیابی شود.

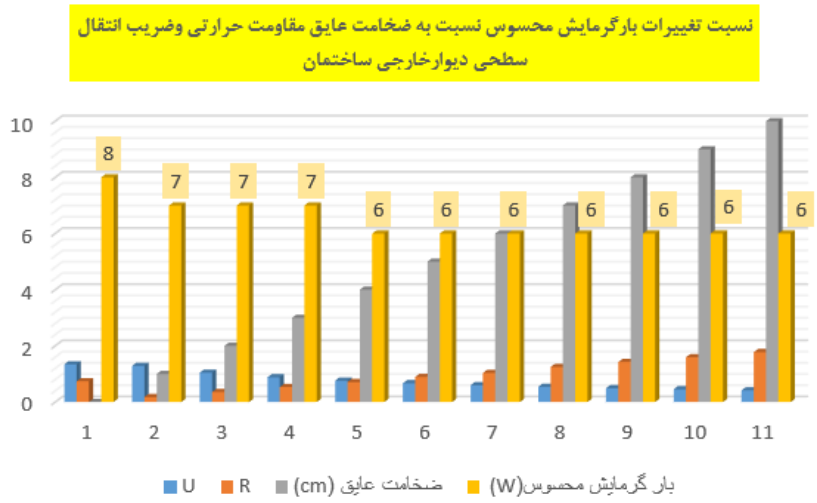
۳-۳- تحلیل بارهای سرمایش و گرمایش از خروجی های نرم افزار کریر و مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان

۳-۳-۱- خروجی های نرم افزار کریر در بخش دیوار های خارجی

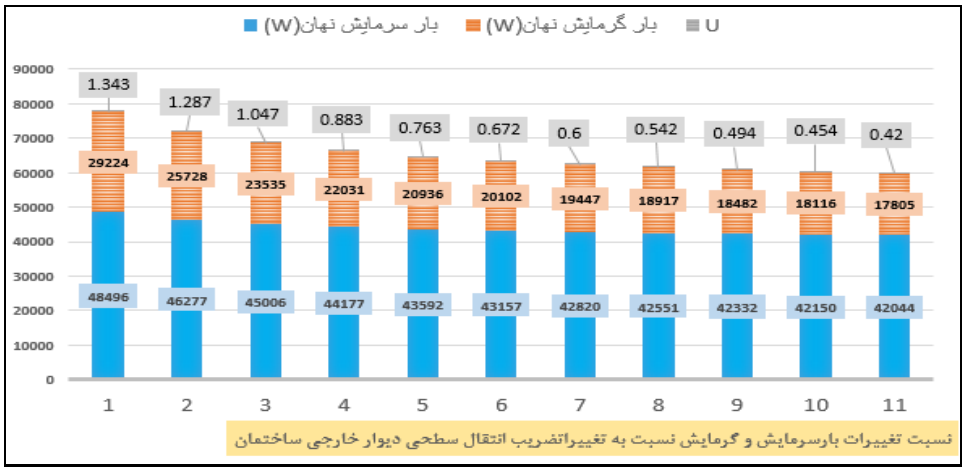
طبق جدول (۹) و شکلهای (۴) و (۵) نتایج شبیه‌سازی دیوار خارجی در نرم‌افزار *Carrier HAP* برای تهران نشان داد که افزایش ضخامت عایق حرارتی با ضریب هدایت ۰.۰۵۶ *W/m.K* از ۰ به ۱۰ سانتی‌متر، موجب کاهش ضریب انتقال حرارت *(U)* از ۱.۳۴۳ به ۰.۴۲۰ *W/m².K* (حدود ۶۹ درصد کاهش) و افزایش مقاومت حرارتی *(R)* از ۰.۷۴ به ۱.۷۸ *m².K/W* (حدود ۱۴۰ درصد افزایش) شد. این بهبود حرارتی باعث کاهش بار گرمایش محسوس از ۲۹۲۲۴ به ۱۷۸۰۵ وات (حدود ۳۹ درصد) کاهش بار سرمایش نهان از ۴۸۴۹۶ به ۴۲۰۴۴ وات (حدود ۱۳ درصد) گردید، در حالی که تغییرات بار سرمایش محسوس محدود و کمتر از ۴ درصد بود. دیوار خارجی بیشترین تأثیر را بر کاهش بار گرمایشی ساختمان داشته و افزایش ضخامت عایق تا حدود ۷ تا ۸ سانتی‌متر بیشترین بازده انرژی را فراهم می‌کند، اما پس از این محدوده پدیده بازده نزولی مشاهده می‌شود. همچنین مقادیر *(U)* حاصل در ضخامت‌های ۸ تا ۱۰ سانتی‌متر به الزامات مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان نزدیک شده و عملکرد حرارتی مطلوب‌تری را برای ساختمان‌های مسکونی در اقلیم شهر تهران فراهم می‌آورد.

جدول (۹): خروجی های نرم افزار کریر دیوار خارجی

(U) (W/m².K)	ضخامت عایق (cm)	بارسرمایش محسوس (W)	بار گرمایش نهان (W)
1.343	0	9452	29224
1.287	1	9726	25728
1.047	2	9626	23535
0.883	3	9557	22031
0.763	4	9514	20936
0.672	5	9507	20102
0.6	6	9879	19447
0.542	7	9832	18917
0.494	8	9799	18482
0.454	9	9775	18116
0.42	10	9759	17805



شکل(۴): تغییرات بارگرمایش محسوس(سه پارامتر انتقال حرارت در دیوار خارجی)

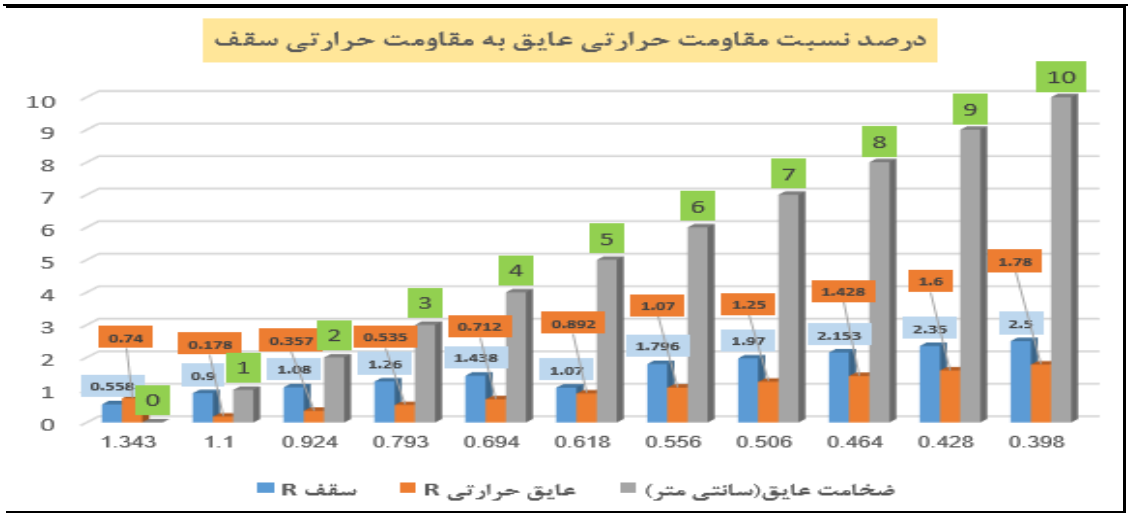


شکل(۵): تغییرات بارگرمایش و سرمایش نسبت ضریب انتقال سطحی دیوار خارجی

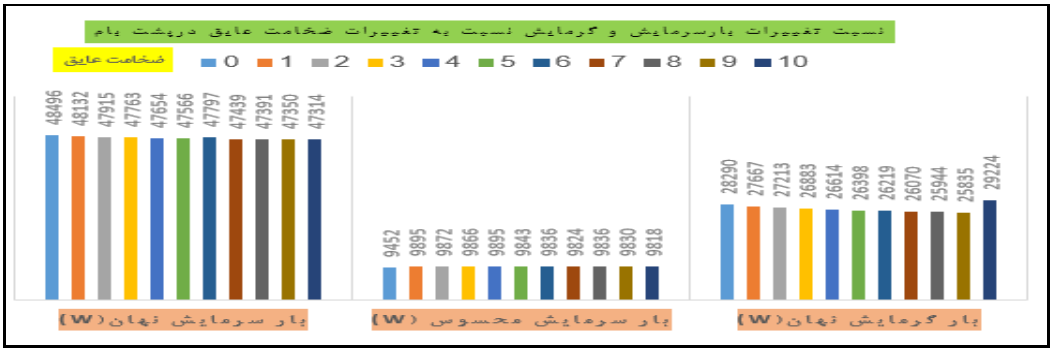
3-۳-۲- خروجی های نرم افزار کریر در بخش سقف (پشت بام)

بر اساس نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزار کریر برای سقف بام در اقلیم تهران در شکلهای (۵) و (۶) نشان داده شده است که افزایش ضخامت عایق سقف از ۰ به ۱۰ سانتی‌متر موجب بهبود عملکرد حرارتی ساختمان و کاهش بارهای انرژی شده است .بار سرمایش نهان از ۴۸۴۹۶وات به ۴۷۳۱۴ وات کاهش یافته که معادل ۲.۴۴ درصد صرفه‌جویی است. همچنین بار گرمایش نهان از ۲۸۲۹۰ وات به ۲۵۸۳۵ وات کاهش یافته و بیانگر ۸.۶۸ درصد کاهش است. در مقابل، بار سرمایش محسوس تغییرات محدودی داشته و در بازه ۹۴۵۲ تا ۹۸۱۸ وات قرار گرفته است. بررسی شکل(۶) نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت عایق و در نتیجه افزایش مقاومت

حرارتی کل سقف از ۰.۵۵۸ به ۲.۵ $m^2.K/W$، روند بارهای گرمایشی و سرمایشی نهان به‌طور کلی نزولی بوده و بیشترین کاهش در بار گرمایش نهان مشاهده شده است. این نتایج بیانگر آن است که عایق‌کاری سقف، به‌ویژه در کاهش تلفات حرارتی، نقش مؤثری داشته و با اهداف مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان در زمینه کاهش اتلاف انرژی از پوسته ساختمان و افزایش بهره‌وری انرژی همسو است. با این حال، میزان صرفه‌جویی حاصل نشان می‌دهد که برای دستیابی به کاهش چشمگیر مصرف انرژی، بهینه‌سازی سقف باید همزمان با سایر اجزای پوسته نظیر دیوارهای خارجی و پنجره‌ها انجام شود. همانطور که در شکل(۷) نشان داده شده است عایق حرارتی با ضخامت ۵ تا ۶ سانتی‌متر می‌تواند بخش عمده‌ای از صرفه‌جویی انرژی را با توجیه فنی و اقتصادی مناسب فراهم آورد، در حالی که افزایش بیشتر ضخامت عایق عمدتاً موجب کاهش تدریجی نرخ بهبود عملکرد حرارتی می‌شود.



شکل(۶): افزایش ضخامت عایق و تغییر مقاومت های حرارتی در سقف پشت بام

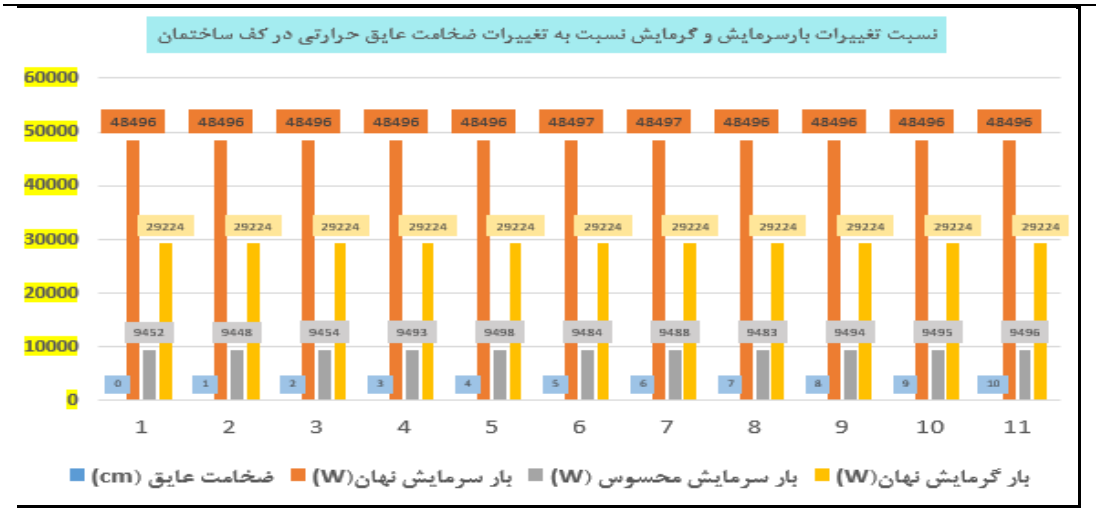


شکل(۷): نسبت تغییرات مقاومت حرارتی عایق نسبت به تغییرات ضخامت عایق حرارتی سقف

۳-۳-۳- خروجی های کریر کف مرتبط با پارکینگ

نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزار *Carrier HAP* برای کف ساختمان مجاور پارکینگ در اقلیم تهران در شکل (۸) نشان داد که افزایش ضخامت عایق کف از ۰تا ۱۰ سانتی‌متر وقتی فقط این بخش یعنی کف عایق کاری می شود تأثیر محسوسی بر بارهای حرارتی و سرمایشی ساختمان نداشته است. به‌طوری‌که بار سرمایش نهان در محدوده ۴۸۴۹۶ تا ۴۸۴۹۷ وات تقریباً ثابت باقی مانده و میزان تغییر آن کمتر از ۰.۰۱ درصد بوده است. همچنین بار گرمایش نهان در تمامی حالات برابر۲۹۲۲۴ وات و بار گرمایش محسوس برابر ۵ وات ثبت شده است .منحنی بار سرمایش محسوس نیز تنها در بازه ۹۴۴۸ تا ۹,۴۹۸ وات نوسان داشته که حداکثر اختلاف آن ۵۰ وات حدود ۰.۵۳ درصد است. بنابراین، شکل منحنی‌ها بیانگر آن است که علیرغم رعایت الزامات مبحث نوزدهم

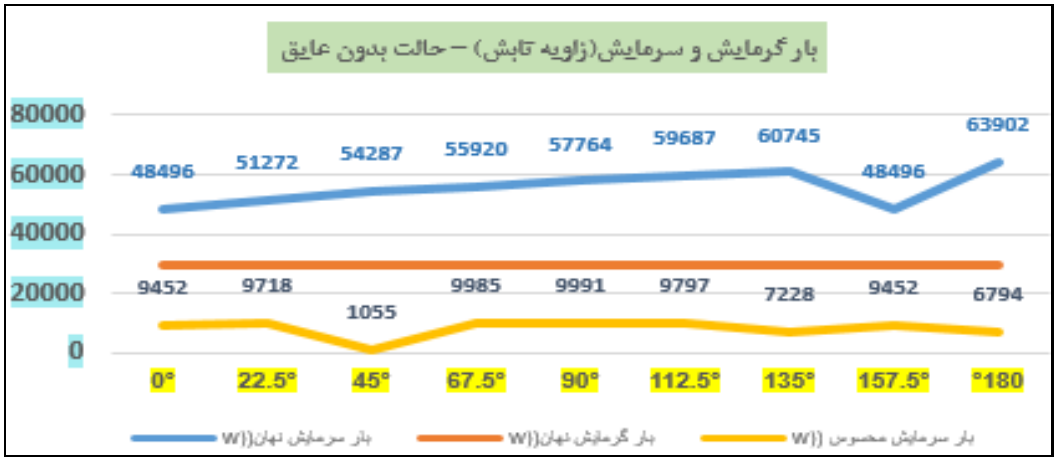
مقررات ملی ساختمان افزایش ضخامت عایق کف در شرایط مورد مطالعه تأثیر قابل توجهی بر کاهش بارهای حرارتی و مصرف انرژی ساختمان نداشته است. این نتایج نشان می‌دهد که اگرچه مبحث ۱۹ بر بهبود عملکرد حرارتی اجزای پوسته تأکید دارد، اما در این ساختمان سهم کف در اتلاف انرژی نسبت به سایر اجزای پوسته نظیر دیوارهای خارجی، سقف و پنجره‌ها محدود بوده و افزایش ضخامت عایق کف به تنهایی نمی‌تواند نقش مؤثری در کاهش مصرف انرژی ایفا کند؛ ازاین‌رو تمرکز بر سایر اجزای پوسته می‌تواند در دستیابی به اهداف مبحث ۱۹ مؤثرتر باشد. لازم به ذکر است هرچند عایق‌کاری کف به‌تنهایی کاهش محسوسی در بارهای گرمایشی و سرمایشی ایجاد نکرد، اما در ارزیابی شاخص انتقال حرارت کل ساختمان مطابق روش کارکردی مبحث ۱۹، ترکیب آن با عایق‌کاری دیوارها موجب کاهش قابل توجه (H) و دستیابی به مقدار کمتر از ($\hat{H}$) شد.



شکل(۸): تغییرات بارسرمایش و گرمایش نسبت به تغییر ضخامت عایق در کف ساختمان

۳-۳-۴- خروجی های نرم افزار کریر در بخش تاثیر جهت تابش خورشید

نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزار *Carrier HAP* در حالت بدون عایق شکل (۹) نشان داده که زاویه تابش تأثیر قابل توجهی بر بار سرمایش ساختمان دارد. بار سرمایش محسوس از ۴۸۴۹۶ وات در زاویه صفر درجه به ۶۳۹۰۲ وات در زاویه ۱۸۰ درجه افزایش یافته که بیانگر ۳۱.۸ درصد افزایش است. همچنین این بار در زاویه ۱۳۵ درجه به ۶۰۷۴۵ وات رسیده که نسبت به حالت اولیه حدود ۲۵.۳ درصد افزایش را نشان می‌دهد. در مقابل، بار گرمایش محسوس در تمامی زوایا تقریباً ثابت و در محدوده ۵ تا ۱۰ وات قرار دارد و بار گرمایش نهان نیز تقریباً بدون تغییر و حدود ۲۹۲۴۴ وات باقی مانده است. بنابراین، در ساختمان بدون عایق، تغییر زاویه تابش عمدتاً بر افزایش بار سرمایش محسوس اثرگذار بوده و بیشترین بار سرمایشی در زاویه ۱۸۰ درجه مشاهده شده است.این موضوع نشان می‌دهد که زاویه تابش بیشترین تأثیر را بر بار سرمایشی ساختمان دارد.همانطور که در شکل شماره (۸) نشان می دهد منحنی بار سرمایش محسوس با افزایش زاویه تابش روندی عمدتاً صعودی دارد؛ به‌طوری‌که از ۴۸۴۹۶ وات در زاویه صفر درجه به ۶۰۷۴۵ وات در زاویه ۱۳۵ درجه رسیده و پس از یک افت در زاویه ۱۵۷.۵ درجه، در زاویه ۱۸۰ درجه به بیشینه مقدار خود یعنی ۶۳۹۰۲ وات می‌رسد. در مقابل، منحنی بار سرمایش نهان نوسانات محدودی داشته و در بازه ۶۷۹۴ تا ۱۰۰۵۵ وات تغییر کرده است. همچنین منحنی بار گرمایش نهان تقریباً به‌صورت یک خط افقی و ثابت در حدود ۲۹۲۴۴ وات مشاهده می‌شود و بار گرمایش محسوس نیز با مقادیر بسیار کم (۵ تا ۱۰ وات) تغییرات ناچیزی دارد. بنابراین، شکل منحنی‌ها نشان می‌دهد که زاویه تابش عمدتاً بر بار سرمایش محسوس تأثیرگذار بوده و سایر مؤلفه‌های بار حرارتی تقریباً مستقل از تغییر زاویه تابش هستند.



شکل(۹): تغییرات بارسرمایش و گرمایش نسبت به جهات جغرافیایی (تغییر زاویه تابش خورشید)

۳-۴-تجزیه و تحلیل مقالات بررسی شده

در این پژوهش بیش از ۵۰ منبع علمی منتشرشده در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۶ بررسی شد بررسی این مطالعات نشان می‌دهد که راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی عمدتاً بر بهبود عملکرد پوسته ساختمان، استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی و روش‌های هوشمند بهینه‌سازی متمرکز بوده‌اند *(Al-Yasiri & Szabo, 2023; Bentoumi et al., 2024; D'Agostino et al., 2019; Huang et al., 2020; Ismail & Ouahrani, 2024; Khan et al., 2025; Marincu et al., 2024; Radmard et al., 2018; Tao et al., 2023; Z. Lianying et al., 2024)*

نتایج پژوهش‌های مرتبط با پوسته ساختمان نشان می‌دهد که استفاده از عایق‌های حرارتی مناسب، تعیین ضخامت بهینه عایق و به‌کارگیری پنجره‌های دوجداره می‌تواند موجب کاهش ۲۱ تا ۵۰ درصدی بارهای گرمایشی و سرمایشی شود.

(Aynur, 2024; D'Agostino et al., 2019; Hadded et al., 2025; Huang et al., 2020; Ioannidis et al., 2026; Kabundu et al., 2024; Kallioğlu et al., 2019; Mirzaei & Barati, 2017; Nabavi et al., 2015; Tabib & Ashrafi Zadeh, 2016; Tao et al., 2023)

همچنین مطالعات مبتنی بر نرم‌افزارهای *Carrier HAP*، *EnergyPlus* و *DesignBuilder* صرفه‌جویی انرژی بین ۳۰ تا ۷۰ درصد را گزارش کرده‌اند. *(Bahalou-Houreh & Borghei, 2023; Fakari et al., 2017; Fatemi & Sadoughi, 2020; Ibrahim, 2024; Mirzaei & Barati, 2017; Ponechal et al., 2024; Radmard et al., 2018)*

پژوهش‌های مبتنی بر الگوریتم‌های هوشمند نیز کاهش بیش از ۵۰ درصدی مصرف انرژی و بهبود شرایط آسایش حرارتی را نشان داده‌اند. *(Andersen et al., 2026; Esmaeilzadeh et al., 2026; Ghomimoghadam et al., 2026; Hamdy et al., 2026; Ioannidis et al., 2026; Mshragi & Petri, 2026; Naß et al., 2026; Yu et al., 2026)*

علاوه بر این، نتایج مطالعات اقلیمی بیانگر آن است که طراحی متناسب با شرایط اقلیمی و جهت‌گیری مناسب ساختمان می‌تواند مصرف انرژی را حدود ۲۰ تا ۲۶ درصد کاهش دهد. *(Abdollahzadeh et al., 2021; Hadded et al., 2025; Hajitaher et al., 2024; Madahi & Tavanaiee, 2019; Mobaraki et al., 2024; Tao et al., 2023)*

بررسی مطالعات نشان می‌دهد که تفاوت در میزان صرفه‌جویی انرژی عمدتاً ناشی از شرایط اقلیمی، نوع ساختمان، مشخصات پوسته خارجی، نوع عایق و روش بهینه‌سازی مورد استفاده است؛ با این حال، تقریباً تمامی پژوهش‌ها بر نقش مؤثر بهبود پوسته ساختمان و عایق‌کاری حرارتی در کاهش مصرف انرژی تأکید دارند *(Al-Yasiri & Szabo, 2023; Bentoumi et al., 2024; Hadded et al., 2025; Heidari et al., 2024; Ismail & Ouahrani, 2024; Kasmaei & Varmaghani, 2021; Lianying et al., 2024)*.

در پژوهش حاضر، با استفاده از الزامات مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان و تحلیل انرژی مبتنی بر نرم‌افزار *Carrier HAP*،

تأثیر عایق‌کاری دیوارها، سقف، کف و استفاده از پنجره‌های دوجداره بررسی شد. نتایج نشان داد که اجرای این راهکارها می‌تواند به‌طور متوسط ۲۵ تا ۴۰ درصد مصرف انرژی ساختمان‌های مسکونی را کاهش دهد که با نتایج پژوهش‌های پیشین همخوانی دارد.

مرور مطالعات نشان می‌دهد که پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان عمدتاً بر چهار محور اصلی شامل بهبود عملکرد پوسته ساختمان، عایق‌کاری حرارتی، استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی، طراحی اقلیمی و به‌کارگیری روش‌های هوشمند متمرکز بوده‌اند . *(Al-Yasiri & Szabo, 2023; Hadded et al., 2025; Heidari et al., 2024; Huang et al., 2020; Ismail & Ouahrani, 2024; Lianying et al., 2024; Tao et al., 2023)*

در حوزه عایق‌کاری حرارتی، پژوهش‌های مختلفی، نشان داده‌اند که انتخاب صحیح نوع عایق و ضخامت بهینه آن نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش انتقال حرارت، کاهش بارهای گرمایشی و سرمایشی و افزایش بهره‌وری انرژی ساختمان دارد. در زمینه بهینه‌سازی پوسته ساختمان، مطالعات مختلفی نشان داده‌اند که استفاده هم‌زمان از عایق حرارتی، پنجره‌های دوجداره، مصالح نوین و مواد تغییر فاز *(PCM)* می‌تواند عملکرد حرارتی ساختمان را به‌طور قابل‌توجهی ارتقا دهد.

در زمینه طراحی اقلیمی نیز نتایج پژوهش‌های *(Abdollahzadeh et al., 2021; Hajitaher et al., 2024; Musazadeh & Yaghoubzadeh, 2016a, 2016b; Yuan et al., 2017)* بیانگر آن است که جهت‌گیری مناسب ساختمان، شرایط اقلیمی و طراحی معماری متناسب با اقلیم می‌تواند موجب کاهش قابل‌توجه مصرف انرژی شود.

مطالعات مبتنی بر هوش مصنوعی، الگوریتم‌های ژنتیک و یادگیری ماشین نیز در سال‌های اخیر توسعه چشمگیری داشته‌اند و پژوهش‌های *(Andersen et al., 2026; Esmaeilzadeh et al., 2026; Ghomimoghadam et al., 2026; Hamdy et al., 2026; Ioannidis et al., 2026; Kasmaei & Varmaghani, 2021; Mshragi & Petri, 2026; Naß et al., 2026; Yu et al., 2026)* کاهش مصرف انرژی، هزینه‌های بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌ها را گزارش کرده‌اند.

در کنار مطالعات شبیه‌سازی، پژوهش‌های تجربی *(Laska et al., 2024; Amani, 2025; Bahalou-Houreh et al., 2023; Ponechal et al., 2024)* نیز عملکرد واقعی ساختمان‌ها را ارزیابی کرده و اثربخشی عایق‌کاری، اصلاح پوسته و استفاده از مصالح نوین را تأیید کرده‌اند.

در مجموع، مطالعات مرورشده نشان می‌دهند که بهینه‌سازی پوسته ساختمان، انتخاب عایق مناسب، تعیین ضخامت بهینه، استفاده از پنجره‌های دوجداره، بهره‌گیری از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی و روش‌های هوشمند، مؤثرترین راهکارهای کاهش مصرف انرژی ساختمان محسوب می‌شوند.*(Lianying et al., 2024; Payandeh, E., & Bayati, M, 2024)* لازم به ذکر است اگرچه بیشتر پژوهش‌ها کاهش ۳۰ تا ۵۰ درصدی مصرف انرژی را گزارش کرده‌اند، اختلاف میان نتایج عمدتاً ناشی از تفاوت در اقلیم، نوع ساختمان، مشخصات پوسته و روش شبیه‌سازی است.

۳-۵-تجزیه و تحلیل نمونه موردی انجام شده با استفاده از روش مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان

مقررات و استانداردها توسط کارشناسان و متخصصان بومی سازی و به مهندسین و سازمان های اجرایی ابلاغ می شود. طبیب و اشرفی زاده طی پژوهشی ثابت کرده اند که ضخامت بیش از حد مواد عایق، حتی اگر مطابق با الزامات و استانداردهای قانونی انجام شود، می تواند در ساختمان هایی با بار حرارتی داخلی زیاد و یا در اقلیم هایی با زمستان های سرد و تابستان های گرم مضر باشند*(Tabib & Ashrafi Zadeh, 2016)*. در ادامه با توجه به اثبات اهمیت استفاده از عایق حرارتی جهت کاهش بارهای سرمایشی و گرمایشی با استفاده از روش موازنه ای(کارکردی) طبق الزامات مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان برای ساختمانی در شهر تهران مورد بررسی قرارگرفت.

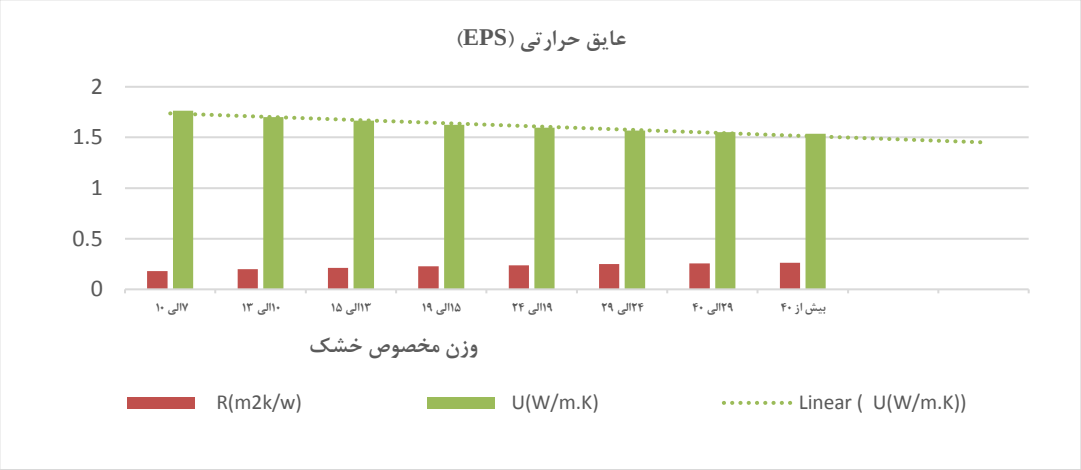
۳-۵-۱-تحلیل و بهینه‌سازی عملکرد حرارتی پوسته ساختمان

به‌منظور ارزیابی راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان، عملکرد حرارتی ترکیب عایق پلی‌استایرن منبسط‌شده (*EPS*) در سه سناریوی طراحی، برای دیوارهای خارجی و سقفِ روی پارکینگ مورد تحلیل قرار گرفت. در تمامی سناریوها، از پنجره‌های دوجداره به‌عنوان یک پارامتر ثابت جهت بهبود عملکرد حرارتی بازشوها استفاده شده است. اثرگذاری عایق حرارتی (*EPS*) با ضخامت ثابت ۰.۱ متر بر ضریب انتقال حرارت کلی طرح (*Overall Heat Transfer Coefficient*) تحلیل شد. مقایسه

سناریوهای مختلف نشان می‌دهد که چگونه تلفیق سطوح عایق‌کاری‌شده با ضخامت‌های بهینه می‌تواند منجر به دستیابی به ضریب انتقال حرارت مرجع (*Reference Heat Transfer Coefficient*) گردد.

۳-۵-۲- تأثیر وزن مخصوص خشک بر مقاومت حرارتی و ضریب انتقال حرارت عایق پلی‌استایرن منبسط

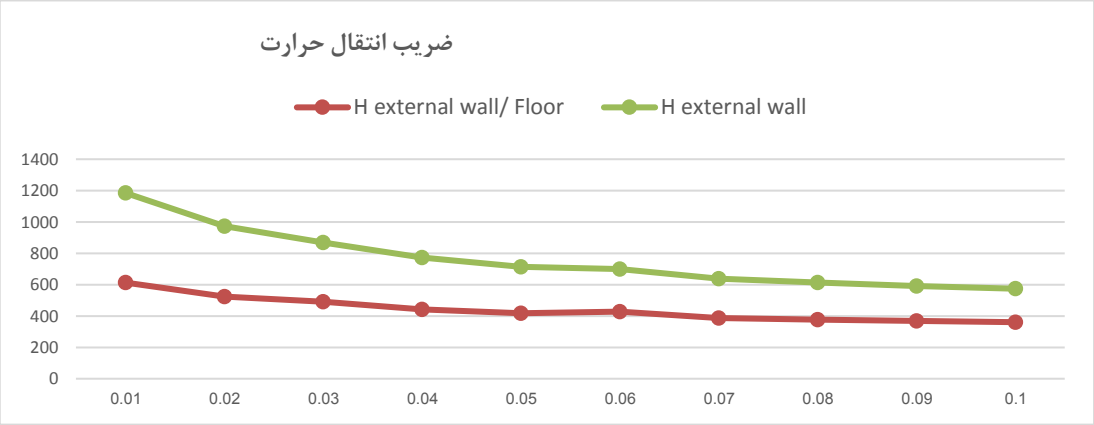
شکل (۱۰) تغییرات مقاومت حرارتی *(R)* و ضریب انتقال حرارت *(U)* عایق پلی‌استایرن منبسط *(EPS)* با ضخامت ۰.۰۱ متر را در وزن‌های مخصوص خشک ۷ تا بیش از ۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که با افزایش وزن مخصوص خشک، مقاومت حرارتی از حدود ۰.۱۸ به ۰.۲۶ مترمربع کلوین بر وات افزایش یافته و ضریب انتقال حرارت از حدود ۱.۷۵ به ۱.۵۲ وات بر مترمربع کلوین کاهش یافته است. این روند نشان می‌دهد که افزایش وزن مخصوص خشک، عملکرد حرارتی عایق را بهبود داده و موجب کاهش انتقال حرارت و افزایش کارایی انرژی ساختمان می‌شود.



شکل(۱۰): تأثیر تغییرات وزن مخصوص خشک بر مقاومت حرارتی (R) و ضریب انتقال حرارت (U) در عایق پلی‌استایرن منبسط (EPS) با ضخامت ۰.۰۱ متر

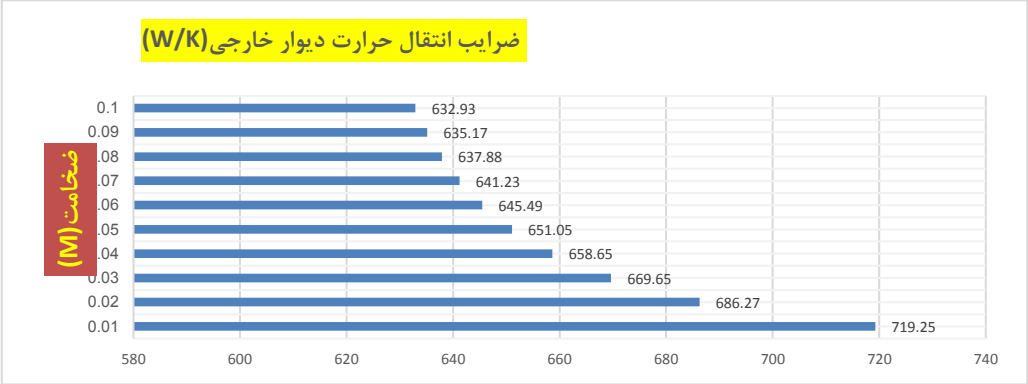
۳-۵-۳- بررسی تأثیر افزایش ضخامت عایق و عایق‌کاری کف پارکینگ بر ضریب انتقال حرارت

شکل (۱۱) تأثیر افزایش ضخامت عایق و عایق‌کاری کف پارکینگ بر ضریب انتقال حرارت پوسته ساختمان را نشان می‌دهد. با افزایش ضخامت عایق از ۰.۰۱ به ۰.۱۰ متر، ضریب انتقال حرارت در هر دو سناریو کاهش یافته است، اما این کاهش در کف روی پارکینگ به دلیل مساحت بیشتر، چشمگیرتر از دیوارهای خارجی بوده است. همچنین، عایق‌کاری دیوارهای خارجی به‌تنهایی برای دستیابی به ضریب انتقال حرارت هدف کافی نبوده، در حالی که اجرای هم‌زمان عایق‌کاری کف پارکینگ و دیوارهای خارجی، بیشترین کاهش اتلاف حرارتی را ایجاد کرده و ضریب انتقال حرارت ساختمان را به مقدار هدف نزدیک‌تر ساخته است. این نتایج بر نقش مهم کف روی پارکینگ هم زمان با دیوار خارجی در کاهش تلفات حرارتی ساختمان تأکید دارد.



شکل(۱۱): تغییرات ضریب انتقال حرارت دیوارهای خارجی ساختمان و کف روی پارکینگ در اثر افزایش ضخامت عایق

۳-۵-۴ – مطابق با شکل (۱۱)، تغییرات ضریب انتقال حرارت دیوار خارجی (نماهای شرقی و شمالی) تحت تأثیر استفاده از عایق حرارتی پلی‌استایرن منبسط‌شده (*EPS*) در ده ضخامت مختلف ۱تا۱۰ سانتیمتر مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که با افزایش ضخامت عایق، ضریب انتقال حرارت پوسته ساختمان روندی نزولی را طی می‌کند. این رفتار نشان‌دهنده بهبود مقاومت حرارتی دیوار است که منجر به همگرایی بیشتر به سمت هدف بهینه با ضریب انتقال حرارت مرجع (استاندارد) در دیوارهای خارجی می‌گردد.



شکل(۱۱): ضرایب انتقال حرارت دیوارهای خارجی ســاختمان در ۱۰ ضخامت متفاوت

۳-۵-۵- تحلیل حساسیت عملکرد حرارتی کف ساختمان نسبت به ضریب هدایت حرارتی

در جدول (۱۰) عملکرد حرارتی کف ساختمان (با مساحت ۱۷۶ مترمربع و ضخامت عایق ثابت ۰.۰۱ متر) در هشت سناریوی مختلف با تغییر ضریب هدایت حرارتی (***k***) در بازه‌ی *0.056 (W/m.K)* تا *0.038* مورد ارزیابی قرار گرفته است. تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که میان ضریب هدایت حرارتی مصالح عایق و ضرایب انتقال حرارت پوسته (شامل ***H*** و ***U***) رابطه‌ای مستقیم برقرار است. تحلیل کمی نتایج نشان می‌دهد که با کاهش ضریب هدایت حرارتی از بازه‌ی *0.056 (W/m.K)* تا *0.038* (معادل ۳۲ درصد بهبود در کیفیت عایق)، ضریب انتقال حرارت (***H***) از بازه‌ی *60.55 (W/K)* تا *82.06* کاهش یافته که بیانگر بهبود تقریبی ۲۶ درصدی در عملکرد حرارتی کف ساختمان است. همزمان، ضریب انتقال حرارت سطحی (***U***) نیز با کاهشی معادل ۲/۲۶ درصد، از بازه‌ی *0.446 (W/M2 K)* تا *0.344* رسیده است.این روند نشان‌دهنده همگرایی مستقیم بهبود خواص فیزیکی

مصالح (کاهش k) با کاهش اتلافات حرارتی در پوسته ساختمان است که بر اهمیت انتخاب عایق با ضریب هدایت حرارتی بهینه در پروژه‌های بهینه‌سازی انرژی تأکید دارد. باید توجه داشت که کاهش ۲۶ درصدی در نرخ اتلاف حرارت (H) با بهبود ۳۲ درصدی در ضریب هدایت (k)، نشان‌دهنده یک رابطه غیرخطی است. این موضوع به دلیل وجود مقاومت‌های حرارتی دیگر (مانند مقاومت لایه‌های دیگر کف یا لایه‌های مرزی هوا) است که در محاسبات مستتر است و ذکر این نکته که بهبود خواص عایق، اثری مستقیم اما تعدیل‌شده بر کل سیستم دارد.

جدول (۱۰): تغییرات (K)، (H)، (U) در سناریوهای مختلف

عایق حرارتی پلی استایرن منبسط با ضخامت (0.01(M و مساحت (176 (M^2)		
تغییرات ضریب هدایت حرارتی K(W/m.K)	ضریب انتقال حرارت H(W/ K)	ضریب انتقال حرارت سطحی کف U(W/M^2 K)
0.056	**82.06**	**0.466**
0.05	**75.30**	**0.428**
0.047	**71.76**	**0.428**
0.044	**68.13**	**0.387**
0.042	**65.65**	**0.373**
0.04	63.13	**0.358**

۳-۵-۶ - ارزیابی سناریوهای مختلف عایق‌کاری جهت دستیابی به ضریب انتقال حرارت مرجع

به منظور تعیین استراتژی بهینه برای کاهش اتلاف حرارتی ساختمان، عملکرد حرارتی در سه سناریوی مختلف مقایسه شده است. نتایج این مقایسه در جدول (۱۱) ارائه گردیده است. بر اساس داده‌های استخراج شده، در حالت پایه (بدون عایق و با پنجره‌های تک‌جداره)، بیشترین میزان اتلاف حرارتی ۹۱۱.۴ وات بر کلوین مشاهده می‌شود. در سناریو اول با جایگزینی پنجره‌های تک‌جداره با دوجداره، میزان اتلاف حرارتی به ۸۲۰.۸ وات بر کلوین کاهش می‌یابد ولی همچنان بالاتر از حالت مرجع می باشد. سناریو دوم با اعمال عایق پلی‌استایرن (*EPS*) بر روی دیوارهای خارجی، میزان انتقال حرارت به ۷۱۹.۲۵ وات بر کلوین تقلیل یافته است. با این حال هنوز بالاتر از حالت مرجع می باشد. در سناریو سوم کارآمدترین استراتژی شناسایی شده، ترکیب عایق‌کاری دیوارهای خارجی با عایق‌کاری کف پارکینگ است. که در حالت عایق کاری چهار سانتی متری منجر به کاهش چشمگیر نرخ انتقال حرارت به مقدار ۷۱۹.۲۵ وات بر کلوین می‌گردد. نکته حائز اهمیت این است که این مقدار، نه تنها از سناریوهای اولیه بسیار بهتر عمل می‌کند، بلکه از ضریب انتقال حرارت مرجع ۴۸۶.۲۸ وات بر کلوین نیز کمتر شده است این امر نشان‌دهنده پتانسیل بالای این ترکیب عایق در دستیابی به سطوح بالاتر از استانداردهای مصرف انرژی مرجع است. نتایج نشان داد با یافته‌های مطالعات پیشین هم‌راستا است. در پژوهش‌های انجام‌شده توسط *Nasser et al. (2018)* ، ضخامت بهینه عایق پلی‌استایرن در اقلیم‌های مختلف بین ۳ تا ۷ سانتی‌متر گزارش شد که نشان‌دهنده اهمیت انتخاب ضخامت مناسب عایق در کاهش اتلاف انرژی ساختمان است. همچنین *Erfan* و *Akbari (2026)* با استفاده از نرم‌افزار *Carrier HAP*، ضخامت حدود ۷.۵ سانتی‌متر عایق را به‌عنوان گزینه بهینه معرفی کردند و کاهش قابل توجه بارهای گرمایشی و سرمایشی را گزارش نمودند و در این تحقیق مشاهده گردیدکه با ترکیب عایق‌کاری دیوارهای خارجی و کف پارکینگ، می‌توان به ضریب انتقال حرارت ۴۲۲ وات بر کلوین دست یافت که از حد استاندارد مرجع ۲۸.۴۸۶ وات بر کلوین کمتر بوده و نشان‌دهنده کارایی بالای این راهکار در کاهش اتلاف انرژی ساختمان است.

جدول (۱۱): تغییرات ضرایب انتقال حرارت نسبت به ضریب هدایت حرارتی (k)

	توان حرارتی(w/k)		
ضریب انتقال حرارت مرجع	$\hat{H}$	486.28	ضریب انتقال حرارت مرجع
بدون عایق با پنجره تک جداره	H(W1D)	911.4	بسیار بالاتر از حالت مرجع
سناریو اول-بدون عایق با پنجره دو جداره	H(W2D)	820.8	بالاتر از حالت مرجع
سناریو دوم- عایق پلی‌استایرن (دیوار خارجی)	H(W)	719.25	بالاتر از حالت مرجع
سناریو سوم- عایق پلی‌استایرن (دیوار + کف پارکینگ) عایق کاری با ضخامت ۴ سانتیمتر	H(W,F)	422	بهینه‌تر از حالت مرجع

۳-۵-۷ – نتایج بخش انرژی (جدول ۱۲) نشان داد که استفاده از عایق حرارتی پلی‌استایرن منبسط (*EPS*) در دیوارهای خارجی و کف روی پارکینگ، همراه با به‌کارگیری پنجره‌های دوجداره، تأثیر قابل توجهی بر کاهش ضریب انتقال حرارت پوسته ساختمان دارد. بر اساس نتایج، ضریب انتقال حرارت کل ساختمان از ۹۱۱.۴ وات بر کلوین در حالت پایه (بدون عایق و با پنجره تک‌جداره) به ۸۲۰.۸ وات بر کلوین با استفاده از پنجره دوجداره کاهش یافت. با عایق‌کاری دیوارهای خارجی، این مقدار به ۷۱۹.۲۵ وات بر کلوین رسید و در نهایت، با عایق‌کاری هم‌زمان دیوارهای خارجی و کف روی پارکینگ، به ۴۲۲ وات بر کلوین کاهش یافت که بیانگر کاهش حدود ۵۳ درصدی انتقال حرارت نسبت به ساختمان پایه است. این نتایج نشان می‌دهد که بیشترین بهبود عملکرد حرارتی زمانی حاصل می‌شود که تمامی اجزای اصلی پوسته ساختمان به‌صورت یکپارچه بهینه‌سازی شوند.

میزان کاهش انتقال حرارت به‌دست‌آمده در این پژوهش با نتایج همخوانی دارد؛ به‌گونه‌ای که این پژوهش‌ها نیز به‌ترتیب کاهش حدود ۵۰ و ۳۸ درصدی اتلاف حرارتی ناشی از بهینه‌سازی پوسته ساختمان را گزارش کرده‌اند. همچنین، نتایج پژوهش حاضر در محدوده مقادیر گزارش‌شده توسط (*Laska & Rokicka, 2024*) قرار می‌گیرد که صرفه‌جویی انرژی بین ۵۷ تا ۷۰ درصد را برای سناریوهای مختلف بهینه‌سازی حرارتی ساختمان ارائه کرده‌اند. اختلاف جزئی میان نتایج این مطالعات را می‌توان به تفاوت در شرایط اقلیمی، ویژگی‌های هندسی ساختمان، نوع مصالح و روش‌های ارزیابی نسبت داد.

یافته‌های این پژوهش همچنین نشان داد که استفاده از پنجره دوجداره به‌تنهایی، اگرچه موجب کاهش ضریب انتقال حرارت از ۹۱۱.۴ به ۸۲۰.۸ وات بر کلوین می‌شود، اما برای دستیابی به الزامات عملکردی مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان کافی نیست و لازم است با عایق‌کاری اجزای اصلی پوسته، به‌ویژه دیوارهای خارجی و کف مجاور فضای کنترل‌نشده، همراه شود. این نتیجه با یافته‌های (Mirzaei & Barati, 2017; Zamani & Bagheri Esfeh, 2018; Abbasi & Madahi, 2017) مطابقت دارد که بر نقش هم‌زمان بهبود ویژگی‌های حرارتی دیوارها، سقف و پنجره‌ها در کاهش بارهای گرمایشی و سرمایشی ساختمان تأکید کرده‌اند.

از سوی دیگر، نقش مؤثر دیوارهای خارجی و کف در کاهش انتقال حرارت، با نتایج (*Kabundu et al., 2024; Aynur, 2024*) نیز همسو است. این پژوهش‌ها نشان داده‌اند که استفاده از عایق‌های پلیمری نظیر *EPS* و *XPS* در اجزای اصلی پوسته، علاوه بر کاهش مصرف انرژی، به کاهش انتشار کربن و بهبود عملکرد زیست‌محیطی ساختمان نیز منجر می‌شود.

در مجموع، نتایج این بخش نشان می‌دهد که یافته‌های پژوهش حاضر از نظر میزان کاهش انتقال حرارت، اثربخشی عایق *EPS* و تأثیر هم‌زمان راهکارهای مختلف بهینه‌سازی پوسته، با مطالعات معتبر داخلی و خارجی همخوانی دارد. با این حال، نوآوری این پژوهش در ارزیابی هم‌زمان اثر پنجره، دیوارهای خارجی و کف روی پارکینگ در قالب سناریوهای مختلف و بررسی انطباق نتایج با الزامات مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان برای اقلیم تهران است که می‌تواند مبنایی برای تصمیم‌گیری در طراحی ساختمان‌های کم‌مصرف و منطبق با شرایط اقلیمی کشور باشد.

جدول (۱۲): مقایسه ضریب انتقال حرارت (H) در سناریوهای مختلف

ضریب انتقال حرارت عایق حرارتی یونولیت (EPS) ضخامت ۱ سانتیمتر				
سناریو (۳) عایقکاری دیوار خارجی و کف ساختمان	سناریو (۲) عایقکاری دیوار خارجی	سناریو (۱) بدون عایق با پنجره دوجداره	حالت پایه و بدون عایق	**سناریو ها**
۴۲۲	۷۱۹.۲۵	۸۲۰.۸	۹۱۱.۴	ضریب انتقال حرارت H(W/K)

۴- نتیجه گیری

- نتایج ارزیابی تاب‌آوری نشان داد که تأسیسات مکانیکی و برقی به‌ترتیب با وزن‌های ۰.۳۴ و ۰.۳۱ بیشترین نقش را در ارتقای تاب‌آوری ساختمان دارند و شاخص کلی تاب‌آوری برابر با ۰.۷۷، بیانگر وضعیت مطلوب ساختمان از نظر قابلیت تداوم عملکرد است. همچنین، رتبه‌بندی سناریوها با استفاده از روش TOPSIS نشان داد که ارتقای سامانه تأمین برق اضطراری، افزایش افزونگی تجهیزات حیاتی و بهبود فضای امن پناهگاهی، مؤثرترین راهکارها برای افزایش تاب‌آوری ساختمان محسوب می‌شوند. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های *(Radmard et al., 2018; Abdollahzadeh et al., 2021)* همخوانی دارد. نتایج بخش تاب آوری این دیدگاه را تأیید می‌کند که تاب‌آوری ساختمان بیش از هر چیز به پایداری عملکرد سامانه‌های خدماتی و زیرساختی وابسته است.
- در بخش عملکرد انرژی، نتایج شبیه‌سازی نشان داد که استفاده هم‌زمان از پنجره‌های دوجداره، عایق حرارتی پلی‌استایرن منبسط (EPS)در دیوارهای خارجی و عایق‌کاری کف روی پارکینگ، ضریب انتقال حرارت کل ساختمان را از ۹۱۱.۴ به ۴۲۲ وات بر کلوین کاهش داده و موجب کاهش حدود ۵۳ درصدی اتلاف حرارت از طریق پوسته ساختمان شده است. همچنین، بررسی ضخامت عایق نشان داد که ضخامت مؤثر انرژی برای دیوار خارجی حدود ۷ تا ۸ سانتی‌متر و ۵ تا ۶ سانتی‌متر برای کف روی پارکینگ، محدوده بهینه برای ساختمان مورد مطالعه در اقلیم تهران است. لازم به ذکر است در ترکیب دیوار و کف، دستیابی به مقدار مطلوب مبحث ۱۹ از ضخامت ۴ سانتی‌متر نیز امکان‌پذیر شد این نتایج با یافته‌های *Nasser et al. (2018), D'Agostino et al. (2019), Huang et al. (2020), Marincu et al. (2024), Zhang et al. (2024), Ponechal et al. (2024), Ghomimoghadam et al. (2026), and Andersen et al (۲۰۲۶)*.همسو است. این مقالات نیز نشان داده‌اند که بهینه‌سازی مشخصات حرارتی پوسته ساختمان، انتخاب مصالح مناسب و استفاده از پنجره‌های با عملکرد حرارتی مطلوب، موجب کاهش بار گرمایش و سرمایش، کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری انرژی ساختمان می‌شود. همچنین، همسویی نتایج مربوط به ضخامت بهینه عایق با مطالعات انجام‌شده در اقلیم‌های مختلف نشان می‌دهد که انتخاب ضخامت مناسب باید متناسب با شرایط اقلیمی، ویژگی‌های ساختمان و ملاحظات اقتصادی انجام گیرد.
- وجه تمایز پژوهش حاضر نسبت به مطالعات پیشین، ارائه چارچوبی یکپارچه برای ارزیابی هم‌زمان عملکرد انرژی و تاب‌آوری ساختمان با بهره‌گیری از شبیه‌سازی انرژی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره BWM و TOPSIS است. در حالی که اغلب مطالعات گذشته این دو حوزه را به‌صورت مستقل بررسی کرده‌اند، چارچوب پیشنهادی این پژوهش امکان تحلیل هم‌زمان شاخص‌های بهره‌وری انرژی و تاب‌آوری را فراهم می‌کند و می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان در انتخاب راهکارهایی کمک کند که ضمن کاهش مصرف انرژی، قابلیت تداوم عملکرد ساختمان را در شرایط بحران نیز افزایش دهند.
- در مجموع، نتایج نشان داد که تلفیق راهکارهای ارتقای تاب‌آوری، شامل بهبود سامانه‌های پشتیبان برق و افزایش افزونگی تجهیزات حیاتی، با راهکارهای بهینه‌سازی انرژی نظیر ارتقای عملکرد حرارتی پوسته و استفاده از پنجره‌های دوجداره، می‌تواند ضمن بهبود عملکرد حرارتی ساختمان، زمینه افزایش قابلیت تداوم بهره‌برداری در شرایط بحران را فراهم کند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که طراحی ساختمان‌های پایدار نیازمند رویکردی یکپارچه است که هم‌زمان کاهش مصرف انرژی و حفظ عملکرد

سامانه‌های حیاتی را مورد توجه قرار دهد. ساختمان کم‌مصرف، در صورت نبود سامانه‌های پشتیبان و زیرساخت‌های حیاتی، الزاماً ساختمان تاب‌آوری نخواهد بود و در مقابل، ساختمان تاب‌آور با مصرف انرژی بالا نیز در شرایط محدودیت منابع، از پایداری مطلوب برخوردار نخواهد بود. ازاین‌رو، هم‌افزایی الزامات مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان در زمینه صرفه‌جویی در مصرف انرژی و مبحث بیست‌ویکم در زمینه پدافند غیرعامل، می‌تواند مبنایی مناسب برای طراحی ساختمان‌های مسکونی پایدار و تاب‌آور فراهم آورد. چارچوب پیشنهادی این پژوهش نیز می‌تواند به‌عنوان ابزاری تصمیم‌یار برای طراحان، مهندسان مشاور و مدیران ساختمان در انتخاب راهکارهای بهینه به‌منظور کاهش مصرف انرژی، افزایش قابلیت تداوم عملکرد و ارتقای تاب‌آوری ساختمان‌های مسکونی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، توسعه این چارچوب برای سایر اقلیم‌های کشور، انواع مختلف ساختمان‌ها و تلفیق شاخص‌های اقتصادی و زیست‌محیطی، می‌تواند زمینه‌ساز پژوهش‌های آینده در این حوزه باشد.

۲- مراجع

1. *Abdollahzadeh, M. M., Bali, A., & Soltani, I. (2021). Strategies for securing hospitals in metropolitan cities in crisis situations with a passive defense approach. Passive Defense, 12(4), 81–93. https://sid.ir/paper/986073/fa (In Persian)*

2. *Al-Yasiri, Q., & Szabó, M. (2023). Building envelope-combined phase change material and thermal insulation for energy-effective buildings during harsh summer: Simulation-based analysis. Sustainable Cities and Society. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082623000029*

3. *Amani, N. (2025). Energy efficiency of residential buildings using thermal insulation of external walls and roof based on simulation analysis. Energy Storage and Saving, 4(1), 48–55. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S277268352400058X*

4. *Andersen, S., Zhou, J., & Dargaville, R. (2026). Multi-variable least-cost optimisation of residential efficiency retrofits. Energy and Buildings, 359, 117253. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2026.117253*

5. *Arbulu, M., Otaegi, J., Rodríguez-Vidal, I., & Oregi, X. (2025). Overheating risk assessment in insulation-based energy renovations in Spain. Environmental and Climate Technologies, 29(1), 447–459. https://reference-global.com/download/article/10.2478/rtuect-2025-0030.pdf*

6. *Aynur, U. (2024). Optimization of insulation thickness of walls and roofs using energy, exergy, economic and environmental (4E) analyses. Journal of Mechanical Engineering and Sciences. https://doi.org/10.15282/jmes.18.1.2024.12.0787*

7. *Bahalou-Houreh, N., & Borghei, S. M. R. (2023). Energy optimization of an educational building in Tehran with different configurations of windows, curtains, lighting system and temperature regulation along with economic analysis. Journal of Sustainable Architecture and Urban Design. https://jsaud.sru.ac.ir/article_1905.html?lang=en*

8. *Bentoumi, L., Bouacida, T., Bessaïh, R., & Bouttout, A. (2024). Impact of thermal insulation on energy consumption in buildings. Journal of Thermal Engineering. https://jten.yildiz.edu.tr/storage/upload/pdfs/1720601226-en.pdf*

9. *Bitarafan, A., Shahbazi, M., & Habib, F. (2026). Explaining the indicators for improving the resilience of residential areas against man-made threats (Case study: Evin neighborhood). Journal of Passive Defence, 17(1), 103–122. https://pd.ihu.ac.ir/article_210447.html?lang=en (In Persian).*

10. S. Dehghanpour and M. Ansari Manesh, Optimal Insulation Design to Reduce Energy Consumption in Tall Buildings in Kermanshah. The Second National Conference on Modern Studies in Civil Engineering, Architecture, Urban Planning and Environment in the 21st Century, Tehran, Iran. https://civilica.com/doc/952597/ (In Persian).

11. Payandeh, E., & Bayati, M. (2024). *Sustainable architecture and Topic 19 of the National Building Regulations of Iran*. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Architecture, Civil Engineering, Urban Planning, Environment, and the Horizons of Islamic Art in the Second Phase of the Revolution Statement* (Tabriz, Iran *https://civilica.com/doc/1959220 (In Persian).*

12. *Ghomimoghadam, A., Adibian, M., Barbierato, L., Schiera, D. S., & Sepasgozar, S. M. E. (2026). Machine-learning assisted optimization of residential building envelopes across contrasting Italian climates: Energy, thermal comfort, and carbon footprint. Energy and Buildings, 363, 117532. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2026.117532*

13. Hadded, M. H., Dardouri, S., Yüksel, A., Sghaier, J., & Arıcı, M. (2025). Enhancing energy efficiency and thermal comfort through integration of PCMs in passive design: An energetic, environmental, and economic (3E) analysis. Buildings, 15(18), Article 3319. https://www.mdpi.com/2075-5309/15/18/3319

14. Hajitaher, N., Amirhajloo, S., & Neyestani, J. (2024). Principles of climate responsive architecture in Qajarid residential architecture in Ashtian, Iran. Parseh Journal of Archaeological Studies, 8(27), 337–361. https://journal.richt.ir/mbp/article-1-691-en.html

15. Hamdy, M., Nielsen, A. H., & Braun, J. E. (2026). Data-driven methodology for building energy flexibility optimization. Applied Energy. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2026

16. Heidari, E., Mehdinejad, J., & Dolabi, P. (2024). External shading based on reducing cooling energy consumption: Case study of Bushehr historical fabric. Sustainable Architecture and Urbanism, 12(1), Article 23. https://jsaud.sru.ac.ir/article_2202.html

17. Huang, H., Zhou, Y., Huang, R., Wu, H., Sun, Y., Huang, G., & Xu, T. (2020). Optimum insulation thicknesses and energy conservation of buildings. Sustainable Cities and Society, 52, 101840. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101840

18. Fakari, S. A. J., Maboudi Roshti, N., & Ali. (2017). Study of the effect of insulation thickness on building energy consumption. In Proceedings of the Second National Conference on New and Applied Approaches in Mechanical Engineering. https://civilica.com/doc/737819/ (In Persian).

19. Fatemi, S., & Sadoughi, A. (2020). The effect of thermal insulation of walls, window replacement and building location in reducing energy consumption in buildings. In Proceedings of the 4th Congress of Electrical, Computer and Mechanical Engineering. https://civilica.com/doc/1039296/ (In Persian).

20. Esmaeilzadeh, A., Deal, B., & Hamdy, M. (2026). Adaptive supervisory control for optimizing buildings' energy flexibility with hybrid HVAC systems under variable climates and operation conditions. Energy Reports, 15, Article 109049. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2026.109049

21. Ibrahim, A. J. (2024). Effectiveness of building envelope parameters and adopting PV panels to reduce reliance on local generators in hot-dry climate. International Journal of Renewable Energy Development. https://ijred.cbiore.id/index.php/ijred/article/view/60111

22. Ioannidis, D., Rigopoulos, P., Braimakis, K., Pallis, P., & Karellas, S. (2026). Multi-objective ANN-driven genetic algorithm optimization of energy efficiency measures in an NZEB multi-family house building in Greece. Energy and Buildings, 353, Article 116653. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116653

23. Ismail, N., & Ouahrani, D. (2024). A comprehensive state-of-the-art review of sustainable thermal insulation systems used in external walls for reducing energy consumption in buildings. International Journal of Refrigeration, 156, 97–120.

24. Jamshidi Ghasemabadi, M., Shamsaei Zafarghandy, F., Mirzakouchak Khoshnevis, M. H., & Mahdinia, S. A. (2025). Analysis of passive defense considerations and requirements in hospital design: A case study of Shahid Rajaee Heart Hospital, Tehran. Journal of Passive Defence, 16(3), 95–109. https://pd.ihu.ac.ir/article_210198_56ba114140922721f60ee88b3a8d801a.pdf (In Persian)

25. Kabundu, E., Mbanga, S., Brink, B., & K. A., E. (2024). Relative comparison of benefits of floor slab insulation methods using Polyiso and extruded polystyrene materials in South Africa subject to the new national building energy efficiency standards. Energies, 17, 539. https://doi.org/10.3390/en17020539

26. Kallioğlu, M. A., Ercan, U., Avcı, A. S., Fidan, C., & Karakaya, H. (2019). Empirical modeling between degree days and optimum insulation thickness for external walls. Energy Sources, Part A:

Recovery, Utilization, and Environmental Effects. https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1651797

27. Kasmaei, A., & Varmaghani, H. (2021). Factors affecting the reduction of energy consumption in buildings: A case study of high-rise buildings in District 22 of Tehran. Iranian Energy Journal, 24(1), 67–100. https://necjournals.ir/browse.php?a_id=1677&sid=1&slc_lang=fa (In Persian).

28. Khan, A. M., Alaloul, W. S., Ashrafi, S. M. Y., Aamir, H., Rehman, S. K. U., & Tariq, M. A. B. (2025). Optimizing residential building energy efficiency through smart composite insulated panel systems. Discover Environment, 3(1), Article 13. https://link.springer.com/article/10.1007/s44274-025-00196-9

29. Lari, S. F., Beyti, H., & Shafaei, B. (2026). Analysis of design components for safe residential complexes with a passive defense approach (Case study: Tabriz). Journal of Passive Defence, 17(1), 123–140. https://doi.org/10.47176/pd.2026.1572 (In Persian).

30. Laska, M., & Rokicka, K. (2024). Analysis of internal conditions and energy consumption during winter in an apartment located in a tenement building in Poland. Sustainability, 16(10), 3958. https://doi.org/10.3390/su16103958

31. Madahi, S. M., & Tavanaiee, F. (2019). Optimization of thermal performance of external walls of residential buildings in cold and dry climate by utilizing the energy simulation software (Case study: Mashhad, Iran). Journal of Energy Management, 9. https://sid.ir/paper/223779/en (In Persian).

32. Marincu, C., Daniel, D., & Ligia, M. (2024). Investigating the influence of building shape and insulation thickness on energy efficiency of buildings. Journal of Renewable Energy and Environment, 11. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0973082624000103

33. Ministry of Roads and Urban Development, Office of National Building Regulations and Building Control. (2016). National Building Regulations of Iran, Topic 21: Passive Defense (2nd ed., 1st printing). Tehran, Iran. (In Persian).

34. Ministry of Roads and Urban Development, Office of National Building Regulations and Building Control. (2025). National Building Regulations of Iran, Topic 19: Energy Conservation (4th ed., 1st printing). Tehran, Iran. (In Persian).

35. Mirzaei, A. A., & Barati, E. (2017). Simulation and analysis of energy consumption and the effects of reducing the temperature of the interior design, changing the type of glass and adding thermal insulation in the office building with DesignBuilder software. Proceedings of the 2nd International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering. https://civilica.com/doc/637673/ (In Persian).

36. Mobaraki, O., Esmaeilpour, M., & Ebrahimi, V. (2024). Assessment of the vulnerability of urban housing from the perspective of passive defense (Case study: Mahabad City). Journal of Scientific-Research in Passive Defense, 14(4), 57–74. https://www.sid.ir/paper/1162731/fa (In Persian).

37. Mshragi, M., & Petri, I. (2026). FastML-GA: FPGA-accelerated machine learning for real-time energy HVAC optimization in buildings. Neural Computing and Applications. https://doi.org/10.1007/s00521-025-11737-x

38. Musazadeh, N., & Yaghoubzadeh, N. (2016a). Evaluation of energy savings in hot and dry climate buildings: Green roof and ceiling and wall insulation in residential buildings (Case study: Isfahan). https://civilica.com/doc/623363/ (In Persian).

39. Musazadeh, N., & Yaghoubzadeh, N. (2016b). Investigation of energy saving in hot and dry climate buildings: Case study of green roof and roof and wall insulation in residential buildings in Isfahan. https://elmnet.ir/doc/20710319-89491 (In Persian).

40. Naß, H. L., Grunenberg, J. B., Aoun, F., Bartkowski, M., & Nebel, A. (2026). Modeling residential energy systems and building renovation using evolutionary algorithms with multi-objective optimization. Energy, Sustainability and Society, 16, Article 23. https://doi.org/10.1186/s13705-026-00581-z

41. Nabavi, S. A. A., Alamshah, S. S., & Ashrafizadeh, S. A. (2015). Evaluation of energy savings due to proper insulation of walls, ceiling and floor of a building in Tehran. Proceedings of the First National Conference on New and Applied Approaches in Mechanical Engineering. https://civilica.com/doc/492145/ (In Persian).

42. Nasser, K., Yousefizadeh Dibazer, S., & Salehi, G. (2018). Analysis and selection of building insulation using a multi-criteria decision-making method. Proceedings of the 12th International Energy Conference. https://civilica.com/doc/848339/ (In Persian).

43. Ponechal, R., Jandačka, J., & Ďurica, P. (2024). Evaluation of residential buildings savings for various envelope retrofits and heating energy sources: A simulation study. Buildings, 14, 332. https://www.mdpi.com/2075-5309/14/2/332

44. Radmard, H., Karimi Mehrabadi, S., & Farrokhizadeh, F. (2018). Principles and criteria for designing mechanical installations for a safe buried hospital with a passive defense approach. In Proceedings of the National Conference on Civil Engineering, Architecture and Sustainable Urban Development. https://civilica.com/doc/930046/ (In Persian).

45. Rahmani, M., Shukoori Ganjavi, H., & Aaliyah, K. B. (2017). Presenting a multi-objective optimization model for increasing energy efficiency in residential buildings. Journal of Industrial Management. https://imj.ut.ac.ir/article_63905.html (In Persian).

46. Rashid, L. F., Dulaimi, A., Hatem, W. A., Al-Obaidi, M. A., Ameen, A., Eleiwi, M. A., Jawad, S. A., Luís, F. A. B., & Jong, W. H. (2024). Recent advances and developments in phase change materials in high-temperature building envelopes: A review of solutions and challenges. Buildings, 14(6), 1582. https://doi.org/10.3390/buildings14061582

47. Tabib, S. M., & Ashrafizadeh, S. A. (2016). Effect of external wall thermal insulation on exergy losses of buildings. In Proceedings of the 4th International Congress of Civil Engineering, Architecture and Urban Development. https://civilica.com/doc/618890/ (In Persian).

48. Tao, L., Li, Q., Ma, Q., Chen, M., Ma, C., Wang, D., & Liu, Y. (2023). Optimization design research of insulation thickness of exterior wall based on the orientation difference of solar radiation intensity. Applied Thermal Engineering.
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431123000066

49. Yuan, J., Farnham, C., & Emura, K. (2017). Optimal combination of thermal resistance of insulation materials and primary fuel sources for six climate zones of Japan. Energy and Buildings, 153, 487–495. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037877881731647X

50. Yu, Y., Chen, X., Guo, X., Chen, W., & Wei, S. (2026). A multi-objective optimization strategy for ultra-low energy residential buildings based on a hybrid machine learning algorithm. Energy, 344, 140037. https://doi.org/10.1016/j.energy.2026.140037

51. Zamani, M., & Bagheri Esfeh, H. (2018). Study of the effect of using different thermal insulation in reducing heat loss of the building. In Proceedings of the Second National Conference on Applied Mechanical Engineering. Shahrekord University. https://civilica.com/doc/818284/ (In Persian).

52. Zhang, L., Zhang, Q., Jiang, L., Chen, X., & Yang, X. (2024). Energy, economic and environmental (3E) analysis of residential building walls enhanced with phase change materials. Journal of Building Engineering, 84, Article 108606
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710224000706