ISSN: 2538-2594; Naqshejahan - Basic studies and New Technologies of Architecture and Planning. 2026;16(4): 65-86

A Comparative Assessment of Energy Performance in Zero-Energy Residential Buildings Based on Iran's Chapter 19, LEED, and BREEAM Standards: A Case Study of Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Article Type
Analytic Study

Authors

Mehran Gol Sanamloo[1]
Aida Maleki[2]*
Javad Ahmadi[3]

How to cite this article

F….

ABSTRACT

Aims: The building sector in Iran, accounting for about 40% of total energy consumption, is one of the main contributors to energy use and greenhouse gas emissions. This study aims to comparatively evaluate the energy performance of a 48-unit residential complex in Tabriz, designed based on Section 19, against LEED v4 and BREEAM standards.

Methods: Building energy modeling was conducted using EnergyPlus v23.2 through the OpenStudio v3.7.0 interface in two scenarios: baseline and optimized (according to Section 19). A 30 kWp photovoltaic system was also added for an annual generation of 15,249 kWh of renewable energy.

Findings: Optimization according to Section 19 reduced energy consumption by approximately 21%. Photovoltaic panels with an annual generation of 56% of the optimized consumption reduced grid energy demand to 27% of the baseline consumption. The net Energy Use Intensity (EUI) (the difference between generation and consumption) was calculated as -4.12 kWh/m² per year. The project achieved 15 out of 15 points in the BREEAM rating system and 18 out of 21 points in the LEED v4 energy section, equivalent to the highest certification level (Platinum).

Conclusion: Compliance with the requirements of Iran's Section 19, despite its minimum coverage, demonstrates the potential for alignment with international standards. Achieving higher scores primarily requires greater precision in implementation and further development in the areas of renewable energy and energy management during both the construction and operational phases.

Keywords: Comparative Assessment, Nearly Zero Energy Building (nZEB), Iranian National Building Regulations (INBR) Section 19, LEED, BREEAM, Sustainability, Sustainable Architecture

CITATIONLINKS

1- M.Sc. Graduate in Architectural Engineering and Energy, Faculty of Architecture and Urban Planning, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran.
2. Associate Professor, Faculty of Architecture and Urban Planning, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran *(Corresponding Author)*
3. Assistant Professor, Faculty of Architecture and Urban Planning, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran.

Correspondence
Address: Faculty of Architecture and Urban Planning, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran.
Email:
a.maleki@tabriziau.ac.ir

Article History
Received:
Accepted:
Published:

[۱] Chen, L., Huang, L., Hua, J., Chen, Z., Wei, L., Osman, A. I., Fawzy, S., Rooney, D. W., Dong, L.,… [۲] Singh, N., Sharma, R. L., & Yadav, K. (2023). Sustainable development by carbon emission.. [۳] Lee, G., Avelina, N., Rim, D., Chi, S., & Ahn, H. (2023). Systematic review of carbon….[۴] Marszal, A. J., Heiselberg, P., Bourrelle, J. S., Musall, E., Voss,… [۵] Omrany, H., Chang, R., Soebarto, V., Zhang, Y., Ghaffarianhoseini…[۶] Sartori, I., Napolitano, A., & Voss, K. (2012). Net zero…[۷] Wei, W., & Skye, H. M. (2021). Residential net-zero energy buildings…[۸] H. Gholami, H. Kamelnia , M. J. Mahdavinejad, H. Sangin, (2025). Optimizing.. [۹] Hasan, A. H., Tarish, A. L., & Al-Mudhafar, A. H. N. (2025). Recent advances…[۱۰] Ferreira, A., Pinheiro, M. D., de Brito, J., & Mateus, R. (2023). A critical…[۱۱] Ferreira, J., Pinheiro, M. D., & de Brito, J. (2014). Portuguese sustainabl…[۱۲] Mattoni, B., Guattari, C., Evangelisti, L., Bisegna, F., Gori, P., & Asdrubali…[۱۳] Kokatnur, T., Faris, F., Gunay, B., O'Brien, W., & Azar, E. (2025). The WELL Building.. [۱۴] Dharmarathna, D., Graham, P., & Bunster, V. (2025). Unpacking…[۱۵] Olanrewaju, O. I., Imoudu Enegbuma, W., & Donn, M….[۱۶] Geng, Y., Ji, W., Wang, Z., Lin, B., & Zhu, Y. (2019). A review of operating.. [۱۷] Espinoza-Zambrano, P., Roig-Hernando, J., & Marmolejo…[۱۸] Norouzian, N. (2016). Indigenous model for evaluating energy efficiency…[۱۹] Narmin Ariannia , Mohammadjavad Mahdavinejad, (2020). Responsive…[۲۰] Mohammad Moradi, A., Hosseini, S. B., & Yazdani, H. (2012). Controlling environmental….[۲۱] Mir-Masoumi, F. S., Salavati, M., & Ahmadi, F. (2018). Green housing in Isfahan, reflection….

Copyright© 2021, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-Non-Commercial terms.

eISSN:2538-2594 نقش جهان - مطالعات نظری و فناوری های نوین معماری و شهرسازی-۱۴۰۵؛ (۴) ۱۶:۸۶-۶۵

ارزیابی تطبیقی سنجش مصرف انرژی ساختمان‌های مسکونی صفر انرژی منطبق بر استاندارد مبحث ۱۹ با استانداردهای لید و بریم در نمونه موردی: شهر تبریز

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: تحقیق بنیادی

نویسندگان

مهران گل صنم لو[۱]

آیدا ملکی[۲*]

جواد احمدی[۳]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی معماری و انرژی ، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، ، تبریز، ایران.

۲-دانشیار دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز ، تبریز. ایران. (نویسنده مسئول)

۳-استادیار دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز تبریز . ایران.

نویسنده مسئول *

a.maleki@tabriziau.ac.ir

تاریخ مقاله

تاریخ دریافت:

تاریخ پذیرش:

تاریخ انتشار:

ارجاع‌دهی

چکیده

اهداف: بخش ساختمان در ایران با سهم حدود ۴۰ درصد از کل مصرف انرژی، یکی از اصلی‌ترین حوزه‌های مصرف‌کننده انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای است. این پژوهش با هدف ارزیابی تطبیقی عملکرد انرژی یک مجتمع مسکونی ۴۸ واحدی در تبریز که بر اساس مبحث ۱۹ طراحی شده، با استانداردهای لیید نسخه ۴ و بریم انجام گرفته است.

روش ها: مدل‌سازی انرژی ساختمان با نرم افزار انرژی پلاس نسخه ۲۳.۲ از طریق رابط اپن‌استودیو نسخه ۳.۷.۱ در دو حالت پایه و بهینه‌سازی‌شده (مطابق با مبحث ۱۹) انجام شد. سیستم فتوولتائیک ۳۰ کیلووات‌پیک نیز برای تولید سالانه ۱۵,۲۴۹ کیلووات‌ساعت انرژی تجدیدپذیر افزوده شد.

یافته‌ها: بهینه‌سازی مطابق با مبحث ۱۹، مصرف انرژی را حدود ۲۱ درصد کاهش داد. پنل‌های فتوولتائیک با تولید سالانه ۵۶ درصد از مصرف بهینه‌شده، انرژی دریافتی از شبکه را به ۲۷ درصد مصرف اولیه کاهش دادند. شاخص شدت انرژی خالص (اختلاف تولید از مصرف) ۴.۱۲- کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال محاسبه شد. پروژه در نظام ارزیابی بریم ۱۵ از ۱۵ امتیاز و در لیید نسخه ۴، ۱۸ از ۲۱ امتیاز بخش انرژی کسب کرد که معادل بالاترین سطح گواهی (پلاتین) است.

نتیجه‌گیری: رعایت الزامات مبحث ۱۹ ایران با وجود پوشش حداقلی، قابلیت هماهنگی با استانداردهای بین‌المللی را داشته و برای کسب امتیازات بالاتر عمدتاً نیازمند رعایت و دقت بالا در اجرا و توسعه در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر و مدیریت انرژی در فازهای حین ساخت و بهره برداری می باشد.

کلید واژگان: ارزیابی تطبیقی، ساختمان نزدیک به صفر انرژی، مبحث ۱۹، لیید، بریم، پایداری، معماری پایدار

این نشریه ی دارای دسترسی باز، تحت قوانین گواهینامه بین‌المللی Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International License منتشر می‌شود که اجازه اشتراک (تکثیر و بازآرایی محتوا به هر شکل) و انطباق (بازترکیب، تغییر شکل و بازسازی بر اساس محتوا) را می‌دهد.

مقدمه و پیشینه پژوهش

بخش ساختمان با سهم حدود ۳۶ درصد از مصرف نهایی انرژی و ۳۹ درصد از انتشار دی‌اکسیدکربن (CO_2) مرتبط با انرژی در سطح جهانی، یکی از محوری‌ترین بخش‌ها برای سیاست‌گذاری در جهت کاهش مصرف انرژی و مقابله با تغییرات اقلیمی محسوب می‌شود [۱، ۲]. بر اساس پژوهش‌های گسترده، ساختمان‌های مسکونی و تجاری حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد از مصرف انرژی جهانی و حدود یک‌سوم از انتشار گازهای گلخانه‌ای را به خود اختصاص می‌دهند [۳]. در سال‌های اخیر، نظام‌های گواهی‌دهی ساختمان‌های سبز به عنوان ابزارهای کلیدی برای ارتقای پایداری در صنعت ساخت‌وساز ظهور کرده‌اند. در عمل، به دلیل محدودیت‌های اقتصادی، فنی و فضایی، بسیاری از پروژه‌ها به وضعیت نزدیک به صفر (Nearly Zero Energy Building: nZEB) دست می‌یابند که در آن سهم تولید تجدیدپذیر بین ۵۰ تا ۹۰ درصد مصرف است [۴]. پژوهش‌های کتاب‌سنجی نشان می‌دهد که حوزه nZEB از سه حوزه اصلی تشکیل شده است: (۱) بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان، (۲) تولید و ذخیره‌سازی انرژی، و (۳) رویکردهای روش‌شناختی [۵]. سارتوری و همکاران (۲۰۱۲) در چارچوب تعریف سازگار خود نشان دادند که اصطلاح Net ZEB به ساختمانی متصل به شبکه‌های انرژی گفته می‌شود که در آن تنها ارضای تراز سالانه برای توصیف کامل کافی نیست و تعامل بین ساختمان و شبکه‌های انرژی نیاز به بررسی دقیق دارد [۶]. در این راستا، مطالعه مروری جامع بر ساختمان‌های مسکونی با انرژی خالص صفر نشان می‌دهد که اقدامات بهینه‌سازی شامل طراحی پوسته ساختمان، سیستم‌های کارآمد گرمایش، تهویه و تهویه‌مطبوع(HVAC) ، سیستم‌های آب گرم و استفاده از مواد تغییر فازدهنده (PCM) می‌باشد [۷]. در پژوهش آرین نیا و مهدوی نژاد (۱۳۹۹) نتیجه عملیاتی پژوهش انجام یافته به شکل پوسته‌ای هوشمند و پویا معرفی می شود که وجود نور را درک کرده و به منظور کنترل نور خورشید، سایه اندازی و بهبود شرایط آسایش محیطی، تغییر فرم می‌دهد [۸]. همچنین پژوهش‌های اخیر در زمینه پیشرفت‌های ساختمان‌های نزدیک به صفر انرژی نشان می‌دهد که ترکیب راهکارهای غیرفعال و فعال می‌تواند مصرف انرژی را تا ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش دهد [۹].

مرور ادبیات موضوع نشان می‌دهد که پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه نظام‌های گواهی‌دهی ساختمان و عملکرد انرژی انجام شده است. در حوزه ارزیابی تطبیقی سیستم‌های رتبه‌بندی، فریرا و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی تحت عنوان «تحلیل انتقادی لیید(LEED) ، بریم (BREEAM) و دی‌جی‌ان‌بی (DGNB) به عنوان روش‌های ارزیابی پایداری برای ساختمان‌های تجاری» نشان دادند که لیید و بریم عمدتاً بر جنبه‌های زیست‌محیطی پایداری (به ویژه انرژی) متمرکز هستند، در حالی که دی‌جی‌ان‌بی ابعاد زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی را به طور برابر تلفیق می‌کند [۱۰]. همچنین پژوهش فریرا و همکاران (۲۰۱۴) در حوزه ارزیابی تطبیقی ابزارهای پایداری در مقیاس محلی نشان داد که سیستم‌های ارزیابی ملی با الهام از بریم و متناسب با استانداردهای محلی می‌توانند عملکرد مؤثری داشته باشند [۱۱]. مطالعه مروری انتقادی بر سیستم‌های رتبه‌بندی سبز بین‌المللی شامل کاسبی(CASBEE) ، گرین‌استار(Green Star) ، بریم(BREEAM) ، لیید (LEED)و ایتاکا (ITACA) نشان می‌دهد که این ابزارها از نظر معیارهای ارزیابی و وزن‌دهی با یکدیگر ناهمگون هستند و هر یک بر جنبه‌های خاصی از پایداری تأکید دارند [۱۲]. در این راستا، مطالعه‌ای بر روی سیستم گواهی‌دهی وِل (WELL) نشان می‌دهد که ساختمان‌های دارای این گواهی، علی‌رغم تمرکز بر سلامت و تندرستی ساکنین، عمدتاً رضایت بیشتری از نظر سلامت روان، تندرستی و بهره‌وری نسبت به ساختمان‌های فاقد این گواهی نشان می‌دهند [۱۳]. همچنین پژوهش دیگری به بررسی روند تکامل ابزارهای رتبه‌بندی گرین‌استار (Green Star) در استرالیا پرداخته و نشان داده است که به‌روزرسانی‌های این سیستم بر معیارهای اقلیمی و چرخه‌ای متمرکز بوده است [۱۴].

در زمینه ارزیابی چرخه حیات و انتشار کربن، اولانروا و همکاران (۲۰۲۴) با بررسی پنج سیستم گواهی‌دهی شامل لیید، بریم، گرین‌استار نیوزیلند، لوتوس (LOTUS) و گرین‌اس‌ال (GREENSL) دریافتند که به طور میانگین، اعتبارات مربوط به کربن عملیاتی سه برابر بیشتر از اعتبارات

کربن نهفته مورد توجه قرار گرفته‌اند و مفهوم اقتصاد چرخشی هنوز در بسیاری از این سیستم‌ها جایگاه چندانی نیافته است [۱۵]. یافته دیگری نشان‌دهنده گذار تدریجی نظام‌های گواهی‌دهی از تمرکز صرف بر کربن عملیاتی به سمت رویکرد جامع‌تر کربن کل چرخه حیات است که با اهداف جهانی کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای هماهنگ می‌باشد. بررسی عملکرد عملیاتی ساختمان‌های سبز نشان می‌دهد که حدود ۲۵ درصد از ساختمان‌های دارای گواهی سبز، عملکردی ضعیف‌تر از طراحی اولیه دارند و حتی برخی از آنها بیشتر از ساختمان‌های معمولی انرژی مصرف می‌کنند [۱۶]. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که گواهی‌های سبز می‌توانند ارزش افزوده اقتصادی قابل‌توجهی برای ساختمان‌ها ایجاد کنند و تمایل به پرداخت حق بیمه سبز در بازار املاک وجود دارد [۱۷].

در ایران، پژوهش‌های متعددی به ارزیابی و بهبود کارایی انرژی در ساختمان‌ها پرداخته‌اند. نوروزیان (۱۳۹۵) الگوی بومی‌سازی‌شده‌ای برای ارزیابی کارایی انرژی در ساختمان‌های شهر تهران ارائه داد که می‌تواند مبنایی برای سنجش تطبیقی عملکرد انرژی ساختمان‌های مسکونی در اقلیم‌های مختلف ایران قرار گیرد [۱۸]. غلامی و همکاران (۱۴۰۴) دریافتند افزایش فاصله بین بلوک‌ها، مصرف انرژی را کاهش می‌دهد، بهره‌وری از نور روز را افزایش می‌دهد و شرایط آسایش حرارتی را بهبود می‌بخشد [۱۹]. محمدمرادی و همکاران (۱۳۹۱) با بررسی انرژی نهان در ساختمان‌های مسکونی نشان دادند که با جایگزینی مصالح با انرژی نهان کمتر، می‌توان مصرف انرژی را تا ۱.۶ درصد کاهش داد [۲۰]. میرمعصومی و همکاران (۱۳۹۷) در مطالعه‌ای بر روی مسکن سبز اصفهان نشان دادند که بهینه‌سازی مصرف انرژی در مسکن با رویکرد معماری سبز، تأثیر قابل‌توجهی بر کیفیت زندگی ساکنان دارد [۲۱،۲۲]. حبیب و همکاران (۱۳۹۳) با رتبه‌بندی پارامترهای مؤثر بر مصرف انرژی ساختمان، نشان دادند که نسبت پنجره به دیوار (WWR) مؤثرترین پارامتر در مصرف انرژی ساختمان است [۲۳]. مطالعه مروری سیستماتیک بر معماری زیست‌اقلیمی در ساختمان‌های مسکونی شهری ایران نشان می‌دهد که پوسته ساختمان اولویت اصلی اکثر ارزیابی‌های معاصر است و عوامل شهری تأثیر قابل‌توجهی بر انتخاب راهکارهای بهینه‌سازی دارند؛ این مطالعه با مرور ۵۷۳ مقاله از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۴، نشان داد که تعداد محدودی از مطالعات به طور مستقیم به کاربرد استراتژی‌های معماری زیست‌اقلیمی در ساختمان‌های معاصر پرداخته‌اند [۲۴].

علاوه بر مباحث مرتبط با گواهی‌ها و ارزیابی‌های کلان انرژی، کیفیت محیط داخلی و بهره‌وری انرژی نیز از محورهای اصلی پژوهش‌های اخیر بوده است؛ چراکه این دو عامل به‌طور مستقیم بر سلامت، آسایش و بهره‌وری ساکنان تأثیر می‌گذارند. در حوزه کیفیت هوای داخل و عوامل مؤثر بر آن، توریانی و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه مروری سیستماتیک بر روی ۳۹ مطالعه میدانی و آزمایشگاهی، به بررسی عوامل مرتبط با ساختمان و ساکنین بر کیفیت هوای درک‌شده (Perceived Air Quality: PAQ)در دفاتر کار پرداختند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که عواملی مانند سیستم‌های گرمایش، تهویه و تهویه‌مطبوع(HVAC) ، سیستم‌های آسایش شخصی، پنجره‌های قابل‌بازشو و انتشارات ناشی از مبلمان و مصالح از مهم‌ترین عوامل مرتبط با ساختمان هستند [۲۵]. در زمینه هماهنگ‌سازی استانداردهای کیفیت هوای داخل، ری-آلوارز و همکاران (۲۰۲۶) با توسعه یک چارچوب تطبیقی سه‌بعدی، رویکردهای نظارتی هفت حوزه قضایی اروپایی را ارزیابی کردند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مقررات کیفیت هوای داخل در کشورهای اتحادیه اروپا دچار پراکندگی قابل‌توجهی است؛ به عنوان مثال، محدودیت‌های فرمالدئید بین کشورها تا ۳۰۰ درصد تفاوت دارد [۲۶]. پژوهش‌های سیستماتیک در زمینه ارزیابی کیفیت محیط داخلی در ساختمان‌های مسکونی نیز نشان‌دهنده افزایش روزافزون شناخت کیفیت محیط داخلی به عنوان عاملی جدایی‌نشدنی از تندرستی، بهره‌وری و عملکرد کلی ساختمان است [۲۷]. در حوزه سیستم‌های غیرفعال و بهره‌وری انرژی در ساختمان‌های مسکونی، مطالعه مروری بر سیستم‌های تهویه غیرفعال در ساختمان‌های مسکونی مدرن‌سازی‌شده نشان می‌دهد که این سیستم‌ها می‌توانند به طور مؤثری مصرف انرژی را کاهش دهند و همزمان کیفیت هوای داخل را حفظ کنند [۲۸]. در این زمینه، پژوهش‌های نوین با استفاده از

نظریه پاسخ به سؤال (Item Response Theory- IRT) به شناسایی شاخص‌های کلیدی محیط مسکونی پرداخته‌اند که می‌تواند به طراحی دقیق‌تر پرسش‌نامه‌های ارزیابی کیفیت محیط داخلی کمک کند [۲۹].

در حوزه یکپارچه‌سازی پایداری و تاب‌آوری در طراحی و ساخت ساختمان، و نیز مباحث مرتبط با کربن، پژوهش‌های مهمی انجام شده است. مطالعه مروری سیستماتیک بر ادبیات علمی از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ نشان می‌دهد که بیشتر تحلیل‌ها رویکردی یک‌جهته و متوالی داشته‌اند و رویکردهای کاملاً دوطرفه بین معیارهای تاب‌آوری و پایداری همچنان محدود بوده است [۳۰]. همچنین پژوهش بائو و همکاران (۲۰۲۴) در هنگ‌کنگ به بررسی استراتژی‌های یکپارچه‌سازی کشاورزی شهری (مزارع عمودی) در ساختمان‌های بلندمرتبه مسکونی پرداخت و طراحی یک ساختمان مختلط را ارائه داد که قادر است سالانه ۱,۰۸۰,۰۰۰ کیلووات‌ساعت برق تولید کند [۳۱]. در حوزه انتشار کربن، پژوهش ساوست-ورداگه‌ر و همکاران (۲۰۲۵) به ایجاد زیرساخت داده‌ای برای اندازه‌گیری انتشار کربن کل چرخه حیات ساختمان‌ها در اسپانیا پرداخته است [۳۲]. همچنین لولی و لوسلت (۲۰۲۵) با بررسی ۱۸۶ مطالعه موردی در نروژ، یک سیستم معیار سه‌سطحی (هدف، مرجع، حد) برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در ساختمان‌های آپارتمانی ارائه داده‌اند [۳۳]. پژوهش مون و همکاران (۲۰۲۵) نیز به لزوم رعایت حداقل استانداردهای انرژی در مقاوم‌سازی‌ها جهت دست‌یابی به صرفه‌جویی در کربن پرداخته است [۳۴].

مطالعه مروری سیستماتیک بر فناوری‌های کربن‌خنثی در ساختمان‌ها نشان می‌دهد که پتانسیل صرفه‌جویی انرژی این فناوری‌ها در گروه‌های اقلیمی و انواع ساختمان‌ها متفاوت است و ساختمان‌های غیرمسکونی نسبت به ساختمان‌های مسکونی کاهش بیشتری در شدت مصرف انرژی دارند؛ همچنین یکپارچه‌سازی چندین فناوری کربن‌خنثی به طور قابل‌توجهی توجیه اقتصادی را بهبود می‌بخشد و نسبت انرژی تجدیدپذیر ۲۰ تا ۳۰ درصد توصیه شده است [۳]. در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر در سیستم‌های رتبه‌بندی سبز، مطالعه مروری جامع نشان می‌دهد که روش‌های ارزیابی انرژی تجدیدپذیر در سیستم‌هایی مانند LEED و BREEAM می‌تواند به بهبود این سیستم‌ها کمک کند [۳۵].

بهزادپور و طلوعی (۱۴۰۴) در پژوهشی به شناسایی مولفه‌های موثر استاندارد اشری در مدل‌سازی اطلاعات ساختمان جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی پرداختند و نشان دادند که حدود ۷۳.۳ درصد از مصرف انرژی الکتریکی ساختمان مربوط به تجهیزات گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع است [۳۶]. مولایی و همکاران (۱۳۹۸) با بهینه‌سازی تناسبات بازشو و جبهه نورگیری در ساختمان‌های اداری نشان دادند که نسبت پنجره به دیوار ۲۰ تا ۲۸ درصد بهترین نتایج را در کاهش مصرف انرژی دارد [۳۷]. مهروز و همکاران (۱۴۰۳) با بهینه‌سازی الگوی معماری بوشهر با هدف آسایش بصری و کنترل مصرف انرژی، نشان دادند که با بهینه‌سازی راهکارهای غیرفعال، مصرف انرژی تا ۱۷۴.۱ کیلووات‌ساعت بر مترمربع قابل کاهش است [۳۸]. بلوهری و همکاران (۱۳۹۹) با بررسی آموزه‌های معماری سنتی برای آینده معماری انرژی‌کارا در کشور، اصولی مانند جهت‌گیری، بادگیر و حیاط مرکزی را به عنوان راهکارهای مؤثر در کاهش مصرف انرژی معرفی کردند [۳۹]. خیامی و دانشجو (۱۴۰۱) با بررسی تاثیر نمای دوپوسته متحرک بر بهره‌وری مصرف انرژی در ساختمان اداری نشان دادند که این سیستم می‌تواند سالانه ۱۳۰ هزار کیلووات‌ساعت در مصرف انرژی صرفه‌جویی ایجاد کند [۴۰]. سیف‌اللهی اصل و منصوری (۱۴۰۴) با بررسی معماری پایدار جزیره قشم، درس‌هایی برای طراحی انرژی‌کارا در اقلیم گرم و مرطوب ارائه دادند که استفاده از بادگیر، حیاط مرکزی و بازشوهای کنترل‌شده را شامل می‌شود [۴۱].

بر اساس پژوهش‌های انجام‌شده، سهم بخش ساختمان در ایران حدود ۴۰ درصد از کل انرژی نهایی کشور را به خود اختصاص می‌دهد که از این میزان، سهم غالب مربوط به بخش مسکونی است. مصرف بالای انرژی در این بخش عمدتاً ناشی از فرسودگی سیستم‌های گرمایشی، ناکارآمدی جداره‌ها و عدم استفاده کافی از انرژی‌های تجدیدپذیر است که به طور قابل توجهی بالاتر از متوسط جهانی می‌باشد [۴۲]. پژوهش‌های انجام‌شده در ایران نشان می‌دهد که عوامل متعددی از جمله مسائل اقتصادی، فقدان آگاهی عمومی و ضعف در اجرای قوانین، مانع از تحقق بهره‌وری کامل انرژی در ساختمان‌های

مسکونی شده است [۴۳]. در سطح سیاست‌گذاری ملی، مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان ایران (ویرایش ۱۳۹۹) نقش مهمی در تعیین حداقل الزامات صرفه‌جویی در مصرف انرژی ایفا می‌کند [۴۴]. با این حال، مبحث ۱۹ فاقد هرگونه الزام اجباری برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و پایش مصرف در فاز بهره‌برداری است که این امر دستیابی به ساختمان‌های صفر انرژی را با چالش مواجه می‌سازد.

با وجود پژوهش‌های گسترده در زمینه نظام‌های گواهی‌دهی ساختمان و عملکرد انرژی، شکاف علمی اصلی آن است که تاکنون مطالعه‌ای به ارزیابی تطبیقی عملکرد انرژی یک مجتمع مسکونی واقعاً طراحی‌شده با رویکرد صفر انرژی بر اساس مبحث ۱۹، با هر دو استاندارد لیید و بریم به طور همزمان نپرداخته است. به عبارت دیگر، مشخص نیست که یک طراحی بهینه‌سازی‌شده بر اساس ضوابط داخلی ایران (مبحث ۱۹) تا چه میزان با امتیازات انرژی این استانداردهای بین‌المللی همخوانی دارد و قابل قیاس است. همچنین، مقایسه میزان هماهنگی مبحث ۱۹ با هر یک از این دو سیستم رتبه‌بندی و تعیین اینکه کدام یک از آنها الزامات سختگیرانه‌تری در حوزه مصرف انرژی و انتشار کربن دارند، جزو سوالات اصلی این پژوهش است که دنبال پاسخگویی آن است.

به این ترتیب، هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی تطبیقی عملکرد انرژی یک مجتمع مسکونی نمونه در شهر تبریز (اقلیم سرد ایران) است که بر اساس مبحث ۱۹ طراحی شده، با استانداردهای لیید نسخه ۴ و بریم ENE01 می‌باشد.

اهداف فرعی پژوهش عبارتند از:

۱. تعیین میزان هماهنگی مبحث ۱۹ با شاخص‌های انرژی لیید و بریم ؛
۲. محاسبه امتیازات قابل‌کسب پروژه در هر یک از این دو سیستم رتبه‌بندی؛
۳. تحلیل نقاط قوت و ضعف مبحث ۱۹ نسبت به استانداردهای بین‌المللی در اقلیم سرد؛
٤. ارائه توصیه‌های سیاستی برای به‌روزرسانی مبحث ۱۹ بر اساس یافته‌های پژوهش.

مواد و روش ها

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی است، چرا که درصدد آن است که بتوان در بهبود استانداردهای ملی ساختمان و ارزیابی عملکرد انرژی پروژه‌های مسکونی مورد استفاده قرار گیرد. این پژوهش از نظر ماهیت و روش گردآوری داده‌ها، رویکرد کمی را در پیش گرفته و شبیه‌سازی کامپیوتری به منظور تحلیل و ابزار بهره گرفته است. روش انجام پژوهش شامل مراحل زیر است:

أ. انتخاب نمونه موردی: انتخاب یک مجتمع مسکونی واقعی (یا طراحی‌شده) در اقلیم مورد نظر که دارای اطلاعات کامل معماری و تأسیساتی باشد.

ب. جمع‌آوری داده‌های ورودی: شامل داده‌های اقلیمی (فایل آب‌وهوای استاندارد: TMY)، مشخصات هندسی و معماری (ابعاد، جداره‌ها، بازشوها)، مشخصات سیستم‌های تأسیساتی (گرمایش، سرمایش، تهویه، آب گرم)، الگوهای رفتاری ساکنین (اشغال، روشنایی، تجهیزات) و تعرفه‌های انرژی.

ج. مدلسازی انرژی در حالت پایه: شبیه‌سازی مصرف انرژی ساختمان با فرض رعایت نکردن هیچ راهکار بهینه‌سازی (بدون عایق، پنجره ساده، سیستم‌های معمولی) به منظور ایجاد خط پایه (Baseline) برای مقایسه.

د. اعمال راهکارهای بهینه‌سازی: اعمال تدریجی راهکارهای بهینه‌سازی مطابق با ضوابط مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان ایران (عایق‌کاری، بهینه‌سازی بازشوها، سیستم‌های کارآمد) و همچنین راهکارهای غیرفعال (جهت‌گیری بهینه، تهویه طبیعی، آبگرمکن خورشیدی) و فعال (سیستم فتوولتائیک).

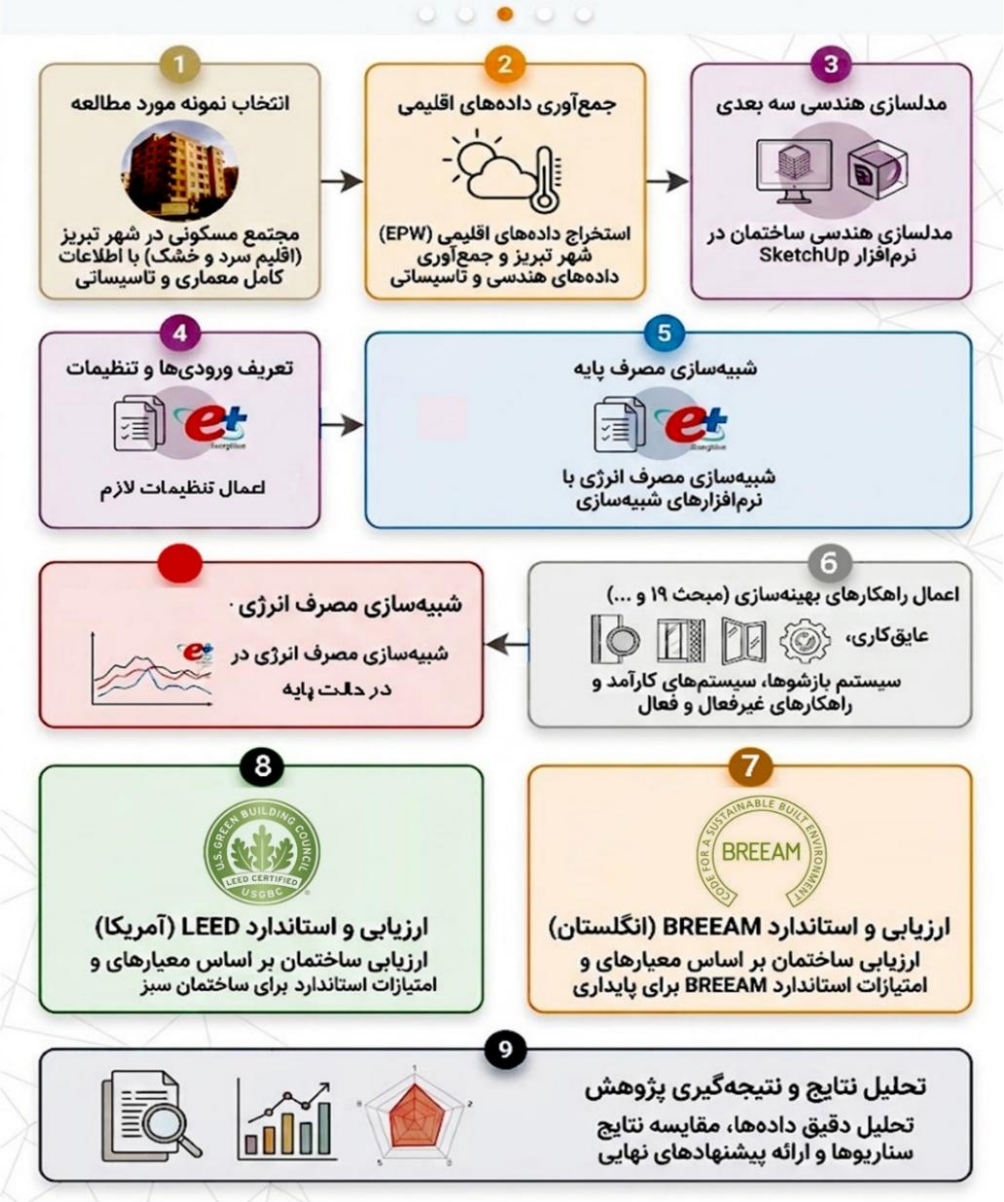
ه. شبیه‌سازی سناریوهای مختلف: انجام شبیه‌سازی برای حالت پایه، حالت بهینه‌سازی‌شده (مطابق مبحث ۱۹) و حالت بهینه‌سازی‌شده به همراه تولید تجدیدپذیر.

و. ارزیابی تطبیقی: استخراج شاخص‌های کلیدی عملکرد انرژی مانند مصرف نهایی، مصرف اولیه، انتشار دی‌اکسیدکربن، شاخص شدت انرژی (EUI)

و مقایسه آنها با معیارهای استانداردهای لیید نسخه ۴ و بریم ENE01.

ز. تحلیل و نتیجه‌گیری: تحلیل نتایج، شناسایی شکاف‌های عملکردی مبحث ۱۹ در مقایسه با استانداردهای بین‌المللی و ارائه پیشنهادات اصلاحی.

برای مدلسازی و شبیه‌سازی انرژی در این پژوهش، از نرم‌افزار انرژی‌پلاس (EnergyPlus) نسخه ۲۳.۲ استفاده شده است. این نرم‌افزار که توسط آزمایشگاه ملی لارنس برکلی (LBNL) وابسته به وزارت انرژی ایالات متحده توسعه یافته، یکی از قدرتمندترین و دقیق‌ترین موتورهای شبیه‌سازی دینامیک عملکرد انرژی ساختمان در جهان محسوب می‌شود[۴۵]. واسط کاربری مورد استفاده برای مدلسازی هندسی و تعریف ورودی‌ها، نرم‌افزار اپن‌استودیو (OpenStudio) نسخه ۳.۷.۱ بوده است.



شکل شماره ۱: سیر کلی پژوهش (Research design-RD) و گام های اصلی طی شده.

در این زیربخش، جزئیات مربوط به نمونه موردی، فرضیات مدلسازی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی ارائه می‌شود.

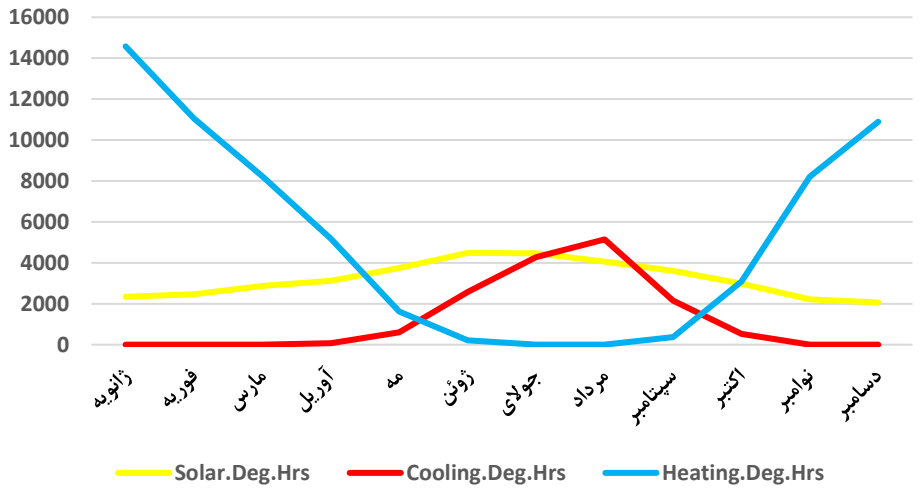
اقلیم و داده‌های آب‌وهوایی

شهر تبریز، مرکز استان آذربایجان شرقی، در شمال غربی ایران و در موقعیت جغرافیایی ۳۸° ۰۴' شمالی و ۴۶° ۱۷' شرقی و ارتفاع ۱۳۶۰ متری از سطح دریا واقع شده است. بر اساس سامانه طبقه‌بندی اقلیمی کوپن-گایگر (Köppen-Geiger)، اقلیم تبریز در دسته BSk (اقلیم استپی سرد) یا «سرد و نیمه‌خشک» قرار می‌گیرد [۴۶]. این اقلیم با زمستان‌های سرد و طولانی، تابستان‌های معتدل و گرم و خشک، و بارندگی نسبتاً کم مشخص می‌شود. میانگین دمای سالانه تبریز حدود ۱۲.۸ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه حدود ۲۹۱ میلی‌متر است. دمای حداقل در زمستان به ۲۵- درجه سانتی‌گراد و دمای حداکثر در تابستان به ۳۵+ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. این نوسانات دمایی شدید، طراحی جداره‌های خارجی با عایق حرارتی مناسب و استفاده از راهکارهای غیرفعال خورشیدی را در این اقلیم ضروری می‌سازد.

بر اساس داده‌های نمودار ۱، شدت نیاز به گرمایش در ماه دی با ۱۴,۵۷۷ درجه- ساعت در بالاترین مقدار و در ماه تیر به صفر می‌رسد. نیاز سرمایشی نیز در ماه مرداد با ۵,۱۴۳ درجه-ساعت به اوج خود می‌رسد. پتانسیل دریافت انرژی خورشیدی در ماه خرداد با ۴,۴۸۲ درجه-ساعت در بیشترین مقدار و در ماه آذر با ۲,۰۶۱ درجه-ساعت در کمترین مقدار قرار دارد. این داده‌ها نشان می‌دهد که شهر تبریز با وجود زمستان‌های سرد و تابستان‌های گرم، پتانسیل بالایی برای بهره‌گیری از انرژی خورشیدی در طول سال دارد.

جدول شماره ۱: اطلاعات اولیه اقلیم و داده‌های آب و هوایی شهر تبریز

اطلاعات اولیه اقلیم و داده‌های آب و هوایی			
موقعیت جغرافیایی	N۳۸.۱۲°، °E ۴۲.۲۴		
دمای هوا °c	-۴	دمای بیشینه °c	۰.۶
		دمای کمینه °c	-۹
میانگین سرعت باد سالانه (متر برثانیه)	۲.۱		
جهت باد (درجه)	۷۰ درجه (سمت شمال شرقی)		
رطوبت نسبی (درصد)	۵۸		



شکل شماره ۲: نمودار روز درجه سرمایش، گرمایش و خورشیدی براساس اطلاعات EPW شهر تبریز

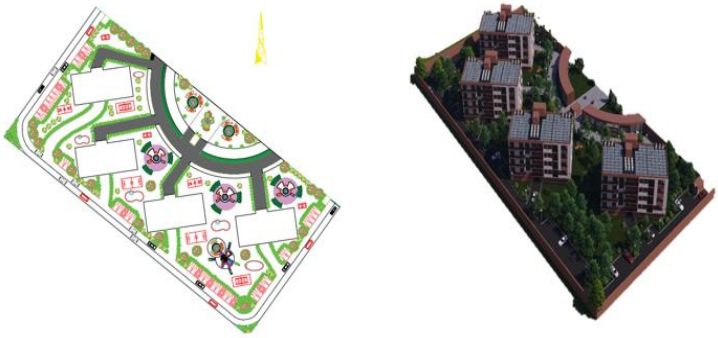
تعریف مدل مرجع(Baseline Building)

مدل مرجع یا حالت پایه (Baseline) در این پژوهش، ساختمانی است که هیچ یک از راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی (عایق حرارتی، پنجره دوجداره، سیستم گرمایشی کارآمد، تولید تجدیدپذیر) در آن اعمال نشده است. این مدل برای ایجاد یک خط پایه برای سنجش میزان بهبود عملکرد انرژی تعریف شده است. مشخصات مدل مرجع به شرح زیر است:

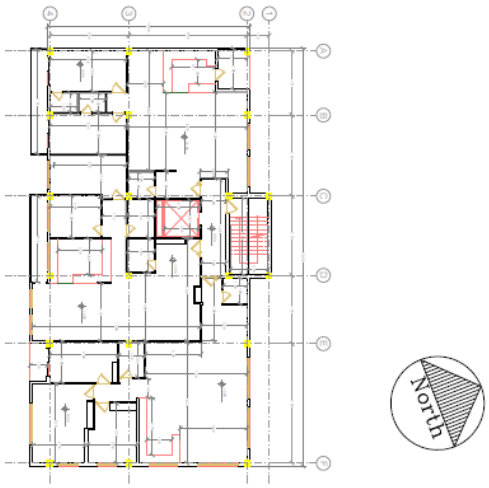
- جداره‌ها: دیوارهای بدون عایق حرارتی با ضریب انتقال حرارت (U-value) بالاتر از ۱.۵ وات بر مترمربع بر کلوین ($W/m^2.K$)
- پنجره‌ها: شیشه ساده تک‌جداره با ضریب انتقال حرارت حدود ۵.۷ وات بر مترمربع بر کلوین
- سیستم گرمایش: پکیج معمولی با راندمان ۷۵ درصد
- سیستم سرمایش: کولر گازی (اسپلیت) با ضریب عملکرد ۲.۵ (Coefficient of Performance-COP)
- بدون سیستم تهویه مکانیکی (تهویه صرفاً طبیعی از طریق بازشوها)
- بدون عایق بام و کف

لازم به ذکر است که مدل مرجع از نظر هندسه، کاربری، الگوی اشغال و تعداد واحدها با مدل بهینه‌سازی‌شده یکسان است. این مدل‌سازی برای ساختمان‌های مسکونی معمولاً شامل تعریف مناطق حرارتی، الگوهای حضور ساکنین (اشغال)، الگوهای مصرف روشنایی و تجهیزات، و پروفیل دمای ترموستات (تنظیم دما) در ساعات مختلف شبانه‌روز می‌باشد. رعایت صحیح این مفروضات در شبیه‌سازی، اعتبار نتایج را تضمین می‌کند.

هندسه و مشخصات پلان‌ها :هندسه و مشخصات پلان‌ها در شکل شماره ۳ و ۴ قابل مشاهده است:



شکل شماره ۳: سایت پلان پروژه

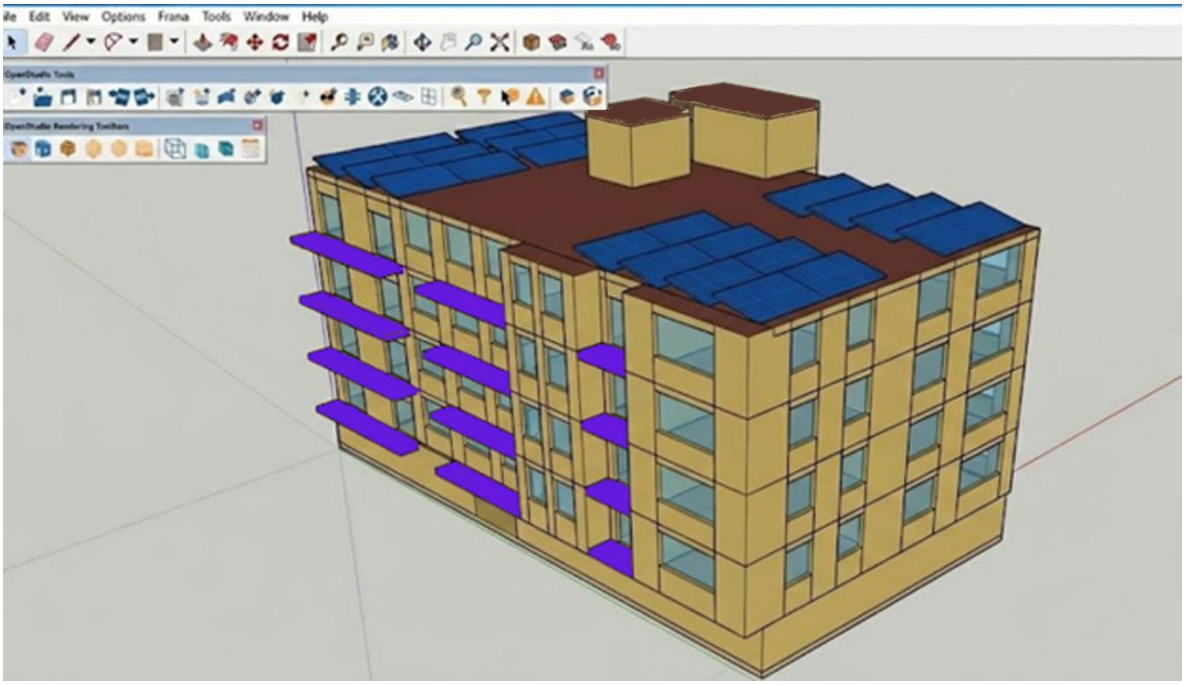


شکل شماره ۴: پلان تیپ واحدها و ابعاد فضاها (مقیاس: ۱:۱۰۰)

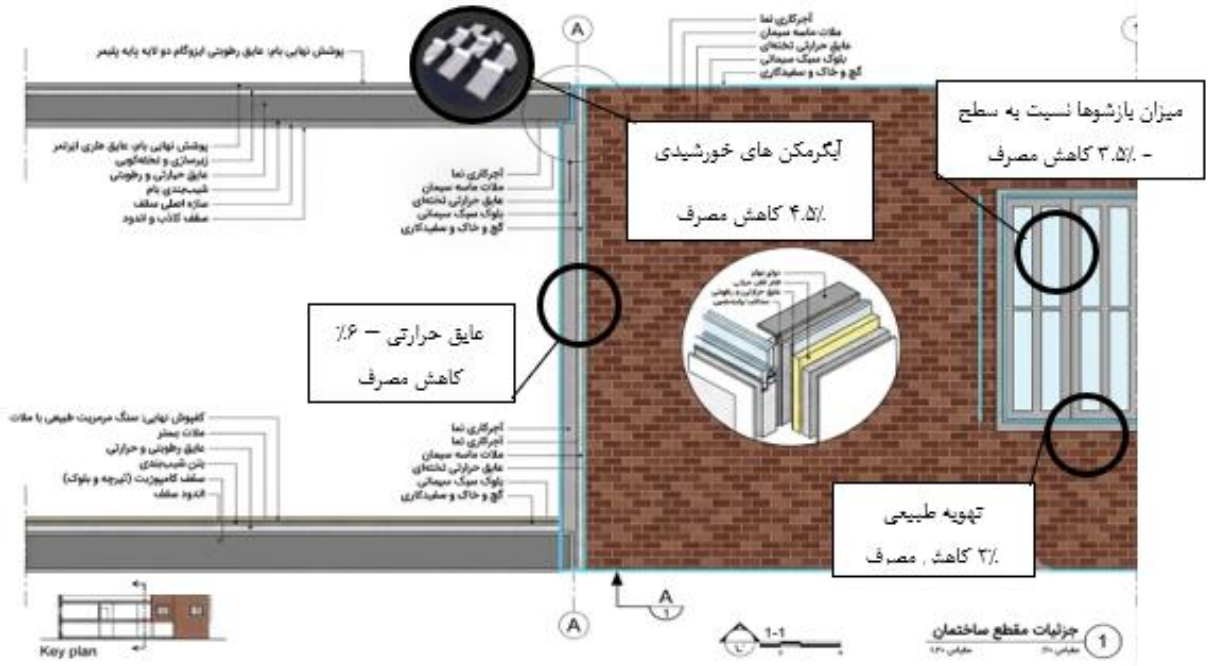
فرضیات مدلسازی در نرم‌افزار EnergyPlus

هندسه ساختمان در نرم‌افزار اسکچ‌آپ (SketchUp) مدل‌سازی شده و از واسط اپن‌استودیو (OpenStudio) برای ارتباط با موتور شبیه‌سازی استفاده گردید.

پس از اجرای شبیه‌سازی برای هر سناریو حالت پایه، بهینه‌سازی‌شده با مبحث ۱۹، مقادیر خروجی زیر از فایل نتایج EnergyPlus استخراج و در شکل شماره ۵ و ۶ ارائه شد. (شکل شماره ۵ و۶)



شکل شماره ۵: هندسه ساختمان مدل شده در اسکچاپ و واسط OpenStudio v.3.7.1



شکل شماره ۶: جزئیات مقطع ساختمان و ارائه راهکارهای کاهش مصرف انرژی

جدول شماره ۲ : تنظیمات و فرضیات کلیدی در شبیه‌سازی

ردیف	گروه پارامتر	مشخصات / فرضیات	واحد
۱	**نرم‌افزار واسط**	OpenStudioنسخه ۳.۷.۱	-
۲	**موتور شبیه‌سازی**	EnergyPlusنسخه ۲۳.۲	-
۳	**گام زمانی شبیه‌سازی**	۶ دقیقه (۴ ناحیه محاسباتی در ساعت)	**دقیقه**
۴	**معیار همگرایی حرارتی**	نسبت تغییر دما ۰.۰۴ و نسبت تغییر انرژی ۰.۰۰۵	-
۵	**تعداد تکرار در هر گام زمانی**	حداکثر ۲۰ تکرار	-
۶	**شرایط مرزی زمین**	دمای زمین در عمق ۴ متری با استفاده از مدل ساده فضای نیمه‌بینهایت	-
۷	**مشخصات جداره‌ها (حالت پایه)**	دیوارU=1.89 ؛ بامU=1.50 ؛ پنجره U=5.70 :تک‌جداره	**W/m².K**
۸	**مشخصات جداره‌ها (حالت بهینه‌سازی)**	دیوارU=0.48 ؛ بامU=0.35 ؛ پنجره U=2.00 :دوجداره Low-E	**W/m².K**
۹	**نسبت پنجره به دیوار (WWR)**	جبهه جنوبی ٪۳۰، جبهه شمالی ٪۲۰	**%**
۱۰	**تهویه طبیعی (بادگیر)**	مدل المان بازشو با ضریب افت فشار ۰.۶۵ و نسبت سطح مؤثر ۰.۵	-
۱۱	**سیستم گرمایش**	پکیج چگالشی با راندمان ٪۹۰	**%**
۱۲	**سیستم سرمایش**	اسپلیت اینورتر باSEER=4.2 ، EER=3.8	-
۱۳	**الگوی اشغال (ساکنین)**	پروفیل هفتگی بر اساس آمار رفتار ساکنین ایرانی (خروج از ۸ صبح تا ۲ بعدازظهر)	-
۱۴	**الگوی مصرف روشنایی**	۵ وات بر مترمربع، مجهز به حسگر حضور (کاهش ٪۲۰ در ساعات غیر اشغال)	**W/m²**
۱۵	**الگوی مصرف تجهیزات**	۳ وات بر مترمربع (یخچال، تلویزیون، کامپیوتر، ماشین لباسشویی)	**W/m²**
۱۶	**دمای تنظیم ترموستات – گرمایش**	۲۱ °Cدر ساعات اشغال، ۱۸ °Cدر ساعات غیراشغال	**درجه سانتی‌گراد**
۱۷	**دمای تنظیم ترموستات – سرمایش**	۲۶ °Cدر ساعات اشغال، ۳۲ °Cدر ساعات غیراشغال (بدون سرمایش فعال در صورت نبود ساکن)	**درجه سانتی‌گراد**
۱۸	**نرخ نفوذ هوا (Infiltration)**	۰.۵ ACH در حالت بسته بودن پنجره‌ها (ساختمان با نفوذپذیری متوسط)	**1/h**
۱۹	**شبکه برق و فاکتور انتشار CO_2**	شبکه برق ایران، ضریب انتشار ۰.۵۰ کیلوگرم CO_2 به ازای هر کیلووات‌ساعت	**kg CO_2/kWh**
۲۰	**مشخصات مفروض در پنل های فتوولتائیک**		
۲۰.۱	**نوع پنل**	پلی‌کریستال(Polycrystalline)	-
۲۰.۲	**توان نامی (ظرفیت اسمی)**	۳۰	**Wp**
۲۰.۳	**مساحت کل پنل‌ها (Gross Area)**	۲۰۰	**m²**
۲۰.۴	**مساحت مفید پنل‌ها (Aperture Area)**	۱۸۰	**m²**
۲۰.۵	**راندمان پنل (Module Efficiency)**	۱۶	**%**
۲۰.۶	**راندمان سیستم (System Efficiency)**	۱۴.۴	**%**
۲۰.۷	**زاویه نصب (Tilt Angle)**	۲۵ (رو به جنوب)	**درجه**

نتایج شبیه‌سازی

داده‌های حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از روش‌های آمار توصیفی (میانگین، درصد، نسبت) تحلیل شده و نتایج در قالب توضیحات، جداول و نمودارهای مقایسه‌ای ارائه گردید. بررسی توزیع درصدی مصرف انرژی ماهانه نشان می‌دهد که در حالت پایه، ماه دی با ۱۸.۵ درصد بیشترین سهم و ماه اردیبهشت با ۲.۸ درصد کمترین سهم را در مصرف سالانه داشته‌اند. پس از اعمال راهکارهای بهینه‌سازی (شامل عایق‌کاری جداره‌ها، بهینه‌سازی بازشوها و تهویه طبیعی شبانه)، مصرف کل سالانه ۲۱ درصد کاهش یافته است. بیشترین کاهش سهم مصرف مربوط به ماه‌های سرد سال بوده است (ماه دی با ۰.۹- درصد، بهمن با ۰.۸- درصد و آذر با ۰.۷- درصد)، در حالی که در ماه‌های گرم سال، افزایش جزئی سهم مصرف (مانند تیر با ۰.۶+ درصد) با بهره‌گیری از تهویه طبیعی شبانه کنترل شده است. این نتایج نشان می‌دهد که ترکیب راهکارهای غیرفعال و کنترلی، نقش مؤثری در کاهش بار گرمایشی در زمستان و مدیریت بار سرمایشی در تابستان داشته است.

با توجه به شکل ۷، نمودار مصرف انرژی در حالت پایه بدون رعایت الزامات مبحث ۱۹ بوده و توانایی دریافت هیچ کدام از گواهینامه‌های سه نظام را ندارد، اما با رعایت موارد کاهش مصرف انرژی بر اساس الزامات بر اساس مبحث ۱۹ در حدود ٪۲۱ در مصرف انرژی کل صرفه جویی شد و این باعث شد تا بتوان با رعایت الزامات ساختمان مورد نظر را در محدوده سنجش نظام‌نامه های معتبر خارجی قرار داد. همچنین میزان تولید سالانه پنل‌های فتوولتائیک ۱۵۲۴۹ (kWh/year) می‌باشد که نشان می‌دهد میزان کسری مصرف به میزان ۸۰۵۶ (kWh/year) از شبکه تامین می‌شود.

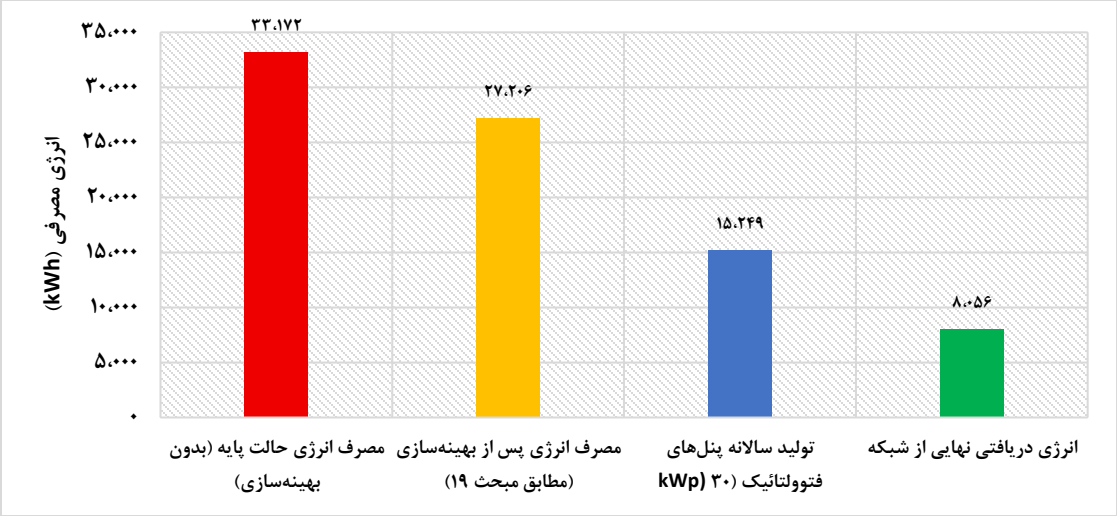
یافته‌ها

نتایج شبیه‌سازی مصرف و تولید انرژی (سالانه)

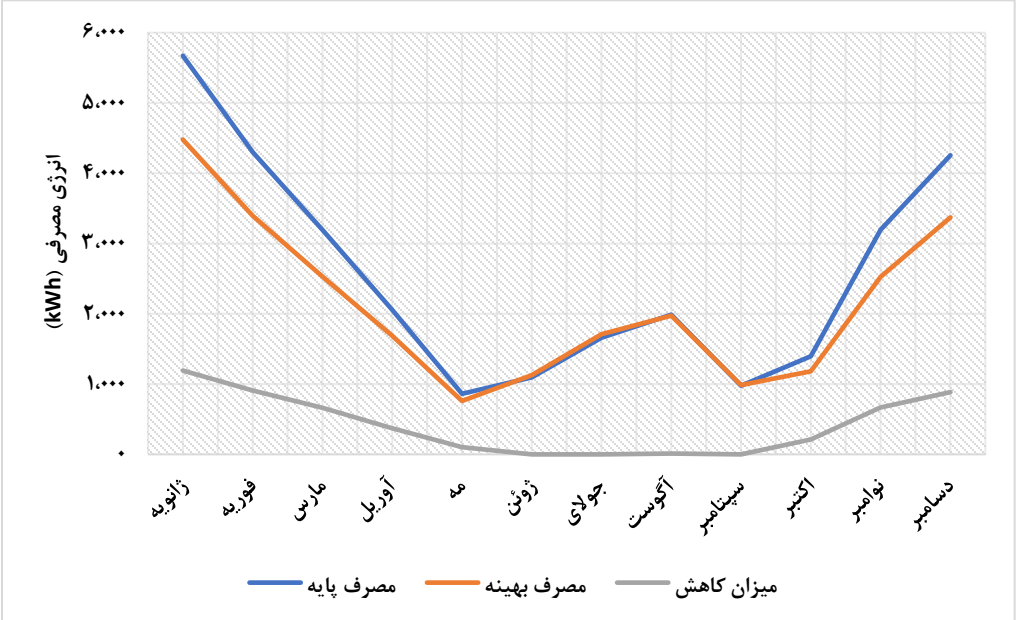
مقدار منفی شاخص شدت انرژی (EUI) خالص نشان می‌دهد که تولید سالانه انرژی تجدیدپذیر نه‌تنها مصرف بهینه‌شده ساختمان را پوشش می‌دهد، بلکه مازاد نیز تولید می‌کند. این وضعیت کاملاً با تعریف یک ساختمان نزدیک به صفر انرژی (nZEB)مطابقت دارد. هرچند به دلیل توجیه اقتصادی کمتر برای نصب پنل‌های بیشتر، وضعیت «صفر مطلق» محقق نشد، اما عملکرد پروژه در سطح بین‌المللی کاملاً رقابتی و قابل قبول است. بر اساس بررسی توزیع ماهانه مصرف انرژی در حالت پایه و بهینه‌سازی‌شده، شکل شماره ۸ توزیع ماهانه مصرف انرژی را در دو حالت پایه و بهینه‌سازی‌شده بر اساس مصرف کل سالانه (۳۳,۱۷۲ و ۲۷,۲۰۶ کیلووات‌ساعت) و الگوی مصرف در اقلیم سرد و نیمه‌خشک تبریز ارائه می‌کند.

بررسی توزیع ماهانه مصرف انرژی در حالت پایه نشان می‌دهد که ماه دی با ۱۷.۱ درصد بیشترین سهم و ماه اردیبهشت با ۲.۶ درصد کمترین سهم را در مصرف سالانه دارند. ماه‌های سرد سال (آذر تا اسفند) مجموعاً حدود ۵۲.۵ درصد از کل مصرف سالانه را به خود اختصاص می‌دهند که نشان‌دهنده تأثیر غالب بار گرمایشی در اقلیم سرد تبریز است. پس از اعمال راهکارهای بهینه‌سازی، مصرف کل سالانه با ۲۱ درصد کاهش از ۳۳,۱۷۲ به ۲۷,۲۰۶ کیلووات‌ساعت رسیده است. بیشترین کاهش مصرف در ماه‌های سرد سال رخ داده است؛ به‌گونه‌ای که در ماه بهمن با ۲۱.۱ درصد و در ماه دی با ۲۱.۰ درصد بیشترین کاهش مشاهده می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که عایق‌کاری حرارتی و بهینه‌سازی بازشوها بیشترین تأثیر را در کاهش بار گرمایشی در ماه‌های سرد داشته‌اند. در ماه‌های گرم سال (خرداد تا شهریور)، مصرف انرژی در حالت بهینه نسبت به حالت پایه تغییرات جزئی داشته است. افزایش جزئی مصرف در ماه‌های خرداد (۲.۸- درصد)، تیر (۳.۳- درصد) و شهریور (۱.۱- درصد) عمدتاً به دلیل جذب حرارت بیشتر از طریق سطوح شیشه‌ای بهینه‌سازی‌شده برای زمستان است. با این حال، استفاده از بادگیر برای تهویه طبیعی شبانه (که در طراحی مجتمع به کار رفته است) توانسته است از افزایش چشمگیر بار سرمایشی جلوگیری کند.

شاخص شدت انرژی (EUI) خالص برابر ۴.۱۲- کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال محاسبه شده است. این مقدار منفی نشان می‌دهد که تولید سالانه انرژی تجدیدپذیر از طریق پنل‌های فتوولتائیک (۱۵,۲۴۹ کیلووات‌ساعت در سال) نه‌تنها مصرف بهینه‌شده ساختمان را به طور کامل پوشش می‌دهد، بلکه مازاد نیز تولید می‌کند. این وضعیت کاملاً با تعریف یک ساختمان نزدیک به صفر انرژی (nZEB) مطابقت دارد.



شکل شماره ۷ : نمودار نتایج شبیه‌سازی انرژی سالانه (kWh/year)



شکل شماره ۸ : مصرف انرژی ماهانه در حالت پایه و بهینه (کیلووات‌ساعت)

ارزیابی بر اساس بریم – (BREEAM) معیار ENE01

برای ارزیابی بر اساس بریم (BREEAM) International New Construction 2016[۴۷]، ابتدا مقدار انتشار دی‌اکسیدکربن (CO_2) در حالت پایه (بدون بهینه‌سازی) و حالت نهایی (پس از بهینه‌سازی و تولید تجدیدپذیر)، طبق رابطه (۱) [۴۸] محاسبه شده است:

رابطه شماره ۱ : فرمول محاسبه انتشار دی‌اکسیدکربن (CO_2)

$$\text{انتشار } CO_2 = \text{مصرف انرژی (kWh)} \times \text{ضریب انتشار شبکه برق} \left(\frac{\text{kg } CO_2}{\text{kWh}}\right)$$

انتشار دی‌اکسیدکربن در حالت پایه و نهایی به ترتیب با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد:

$$E_{\text{پایه}} = 33{,}172 \times 0.50 = 16{,}586 \text{ kg } CO_2\text{/year} \quad (۱)$$

$$E_{\text{نهایی}} = 8{,}056 \times 0.50 = 4{,}028 \text{ kg } CO_2\text{/year} \quad (۲)$$

سپس درصد بهبود انتشار CO_2 از رابطه (۳) محاسبه گردید:

$$\text{درصد بهبود} = \frac{16{,}586 - 4{,}028}{16{,}586} \times 100 = 75.7\% \qquad (۳)$$

بر اساس دستورالعمل برییم International (BREEAM) New Construction 2016، امتیاز معیار ENE01 از رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$\text{امتیاز ENE01} = 15 \times \frac{\text{درصد بهبود}}{40} \qquad (۴)$$

با توجه به اینکه درصد بهبود محاسبه‌شده (٪۷۵.۷) بیشتر از سقف تعیین‌شده (٪۴۰) است، پروژه موفق به کسب حداکثر امتیاز یعنی ۱۵ از ۱۵ می‌شود. بر اساس دستورالعمل معیار ENE01در برییم International New (BREEAM) Construction 2016، حداکثر ۱۵ امتیاز برای بهبود بیش از ۴۰ درصد در انتشار دی‌اکسیدکربن تعلق می‌گیرد. از آنجا که درصد بهبود محاسبه‌شده (۷۵.۷ درصد) بسیار بیشتر از سقف تعیین‌شده (۴۰ درصد) است، پروژه موفق به کسب ۱۵ از ۱۵ امتیاز برای معیار ENE01 می‌شود.

علاوه بر این، با توجه به استفاده از پنل‌های فتوولتائیک که بیش از ۱۰ درصد انرژی نهایی را تأمین می‌کنند، پروژه واجد شرایط دریافت یک امتیاز اضافی از معیار ENE04 (فناوری‌های کم‌کربن یا صفر کربن) نیز می‌باشد.

ارزیابی بر اساس لیید (LEED) نسخه ۴ – اعتبار EAc1 (بهینه‌سازی انرژی)

در لیید (LEED) نسخه ۴، اعتبار بهینه‌سازی عملکرد انرژی (EAc1) [۴۹] تا ۱۸ امتیاز دارد. برای محاسبه درصد بهبود، ساختمان مرجع مطابق استاندارد اشری-90.1 (ASHRAE) 2010[۵۰] تعریف شد. با توجه به اینکه مبحث ۱۹ برگرفته از استانداردهای اشری است، حالت بهینه‌شده بدون تولید تجدیدپذیر یک بهبود تقریبی ۲۰ تا ۲۵ درصد نسبت به اشری 90.1-2010 (ASHRAE) نشان می‌دهد. با احتساب تولید تجدیدپذیر (که ۵۶ درصد از مصرف بهینه‌شده را پوشش می‌دهد)، بهبود کلی به حدود ۶۵ تا ۷۰ درصد می‌رسد.

طبق مقیاس امتیازدهی لیید نسخه ۴ که به ازای هر ۵ درصد بهبود اضافی نسبت به خط پایه (Baseline) ۵ درصد اولیه، ۱ تا ۳ امتیاز تعلق می‌گیرد(، این میزان بهبود، ۱۵ تا ۱۸ امتیاز از اعتبار EAc1 را شامل می‌شود. علاوه بر این، با توجه به تأمین بیش از ۵۰ درصد انرژی مصرفی از منابع تجدیدپذیر در محل، پروژه حداکثر ۳ امتیاز از اعتبار EAc2 (تولید انرژی تجدیدپذیر) را نیز کسب می‌کند. جمع امتیازات بخش انرژی در لیید نسخه ۴ به حدود ۱۸ تا ۲۱ امتیاز می‌رسد که بسیار فراتر از حداقل امتیاز مورد نیاز برای دریافت گواهی پلاتین (Platinum)است.

جدول شماره ۳ : مقایسه امتیازات کسب‌شده پروژه در سه نظام‌نامه

ردیف	شاخص ارزیابی	مبحث ۱۹	LEED v4	BREEAM ENE01
۱	الزامات حداقل جداره (U-value)	✓	✓ معادل ASHRAE	✓ قابل قبول
۲	محدودیت WWR	✓ رعایت ٪۳۰	X الزام مستقیم ندارد	✓ توصیه می‌شود
۳	نیاز به شبیه‌سازی انرژی	✓ الزامی	✓ پیش‌نیاز اجباری	✓ الزامی
۴	امتیاز بهینه‌سازی انرژی	–	۱۵ از ۱۸	–
۵	امتیاز کاهش انتشار CO_2	–	–	۱۵ از ۱۵
۶	امتیاز تولید انرژی تجدیدپذیر	–	۳ از ۳	۱ (اضافی)
مجموع امتیازات بخش انرژی	–	EP^+ ضریب توان اصلاح شده : ۰.۹۳	۱۸	۱۶

بحث و نتیجه گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که یک مجتمع مسکونی طراحی‌شده بر اساس مبحث ۱۹ و با رویکرد نزدیک به صفر انرژی، پتانسیل بسیار بالایی برای انطباق با سختگیرانه‌ترین استانداردهای بین‌المللی مانند بریم (BREEAM) و لید (LEED)دارد. نکات قابل تأمل در این نتایج عبارتند از:

سازگاری بریم (BREEAM) با پروژه‌های مبتنی بر مقررات ملی :پروژه مورد مطالعه به دلیل استفاده از مبحث ۱۹ به عنوان خط پایه و پوشش ۵۶ درصد از مصرف انرژی از طریق انرژی خورشیدی، موفق به کسب حداکثر امتیاز (۱۵ از ۱۵) از معیار ENE01 بریم شد. این موضوع نشان‌دهنده سازگاری بالای منطق ارزیابی بریم با پروژه‌های واقعی در کشورهایی است که مقررات ملی جامعی دارند، در نتیجه بریم در مقایسه با لید رویکرد انعطاف‌پذیرتری برای تطبیق با شرایط محلی دارد.

عملکرد قوی لید (LEED) در مواجهه با پروژه‌های با تولید تجدیدپذیر بالا :اگرچه لید وابستگی بیشتری به استاندارد اشری 90.1 (ASHRAE) دارد، اما پروژه مورد مطالعه به دلیل تولید قابل توجه انرژی تجدیدپذیر (۵۶ درصد مصرف) موفق به کسب حداکثر امتیازات در اعتبارات EAc1 و EAc2 شد. نکته حائز اهمیت این است که با وجود عدم الزام مبحث ۱۹ به استفاده از انرژی تجدیدپذیر، الحاق یک سیستم فتوولتائیک ۳۰ کیلووات‌پیک به طراحی مبتنی بر مبحث ۱۹، پروژه را تا سطح پلاتین (Platinum) لید ارتقا داده است. این موضوع نشان می‌دهد که مبحث ۱۹ پایه محکمی برای طراحی انرژی‌کارآمد فراهم می‌کند و با افزودن مؤلفه تجدیدپذیر می‌توان به بالاترین سطوح استانداردهای بین‌المللی دست یافت.

شکاف‌های مبحث ۱۹ در مقایسه با استانداردهای بین‌المللی :با وجود عملکرد قابل قبول، تحلیل تطبیقی نشان می‌دهد که مبحث ۱۹ در چند حوزه خاص با شکاف‌هایی نسبت به استانداردهای بین‌المللی مواجه است:

- انرژی‌های تجدیدپذیر: مبحث ۱۹ فاقد هرگونه الزام یا امتیاز تشویقی برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است. این در حالی است که در هر دو استاندارد لید و بریم ، تولید انرژی تجدیدپذیر یکی از مهم‌ترین منابع امتیازدهی است (در لید تا ۳ امتیاز و در بریم یک امتیاز اضافی).
- مدیریت انرژی در فاز بهره‌برداری: بریم دارای معیار ENE02 (مدیریت انرژی) با تأکید بر پایش و بهینه‌سازی مصرف در حین بهره‌برداری است، در حالی که مبحث ۱۹ عمدتاً بر طراحی و اجرا متمرکز است و توجه کمتری به فاز بهره‌برداری دارد.
- انتشار کربن: اگرچه مبحث ۱۹ به کاهش مصرف انرژی کمک می‌کند، اما مستقیماً به انتشار دی‌اکسیدکربن اشاره ندارد. در مقابل، معیار ENE01بریم به طور خاص بر کاهش انتشار کربن متمرکز است و این رویکرد با اهداف جهانی کاهش گازهای گلخانه‌ای هماهنگ است[۶].

جنبه اقتصادی و تعادل بین صرفه‌جویی و هزینه : همان‌طور که در بخش نتیجه‌گیری پایان‌نامه اشاره شد و توسط مطالعات پیشین در حوزه اقتصاد شهرهای پایدار نیز تأیید شده است، دستیابی به صفر مطلق انرژی نه تنها توجیه اقتصادی ندارد، بلکه می‌تواند به دلیل تولید مازاد برق و عدم وجود زیرساخت مناسب برای تزریق به شبکه، اثرات زیست‌محیطی غیرمستقیم نیز به دنبال داشته باشد. پژوهش حاضر نشان می‌دهد که نقطه بهینه اقتصادی در این پروژه در سطح حدود ۵۶ درصد تولید تجدیدپذیر وضعیت ساختمان نزدیک به صفر انرژی (nZEB) قرار دارد. این یافته با نتایج پژوهش‌های مشابه که دریافتند کاهش ۸۰ تا ۹۰ درصد در انرژی اولیه برای ساختمان‌های جدید در تمام اقلیم‌ها شدنی و بهینه است، همخوانی دارد[۵۱].

ملاحظات اقلیمی تبریز :تبریز با اقلیم سرد نیمه‌خشک، تابش خورشیدی مناسب (متوسط ۴.۵۵ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در روز [۵۲]) و زمستان‌های طولانی، شرایط ویژه‌ای دارد. تأمین ۵۶ درصد انرژی از طریق پنل‌های فتوولتائیک در این اقلیم نشان‌دهنده پتانسیل بالای انرژی خورشیدی در تبریز است. با این حال، چالش اصلی این اقلیم، نیاز بالای گرمایش در زمستان است که با طراحی غیرفعال مناسب (جهت‌گیری بهینه، عایق‌کاری، بهینه‌سازی پنجره‌ها) تا حدود زیادی قابل مدیریت است.

پیشنهادات

در این پژوهش، عملکرد انرژی یک مجتمع مسکونی ۴۸ واحدی در تبریز که بر اساس مبحث ۱۹ طراحی شده بود، با دو سیستم رتبه‌بندی بین‌المللی لیید (LEED) نسخه ۴ و برییم (BREEAM) ENE01 مورد ارزیابی تطبیقی قرار گرفت. نتایج نشان داد:

- ترکیب راهکارهای غیرفعال منطبق با مبحث ۱۹ با یک سیستم فتوولتائیک ۳۰ کیلووات‌پیک، منجر به کاهش ۲۱ درصد مصرف انرژی (تنها با بهینه‌سازی جداره‌ها و سیستم‌ها) و در نهایت کاهش ۷۵.۷ درصد انتشار دی‌اکسیدکربن پس از احتساب تولید تجدیدپذیر شد. شاخص شدت انرژی (EUI) خالص برابر ۴.۱۲- کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال محاسبه شد که بیانگر نزدیکی کامل به وضعیت ساختمان نزدیک به صفر انرژی (nZEB) است.
- پروژه مورد مطالعه موفق به کسب ۱۵ از ۱۵ امتیاز از معیار ENE01 در سیستم برییم (حداکثر امتیاز ممکن) و ۱۸ تا ۲۱ امتیاز در بخش انرژی لیید نسخه ۴ شد که در هر دو سیستم معادل بالاترین سطح گواهی عالی (Excellent) در برییم و پلاتین (Platinum) در لیید است.
- تحلیل تطبیقی نشان داد که مبحث ۱۹ پایه مناسبی برای طراحی انرژی‌کارآمد فراهم می‌کند، اما برای همگام شدن کامل با استانداردهای بین‌المللی نیازمند بازنگری در چند حوزه خاص است: الزامات نفوذپذیری هوا، ایجاد امتیازات تشویقی برای انرژی‌های تجدیدپذیر، افزودن معیارهای مدیریت انرژی در فاز بهره‌برداری، و توجه مستقیم به انتشار دی‌اکسیدکربن.
- نقطه بهینه اقتصادی پروژه در سطح حدود ۵۶ درصد تولید تجدیدپذیر وضعیت ساختمان نزدیک به صفر انرژی (nZEB) قرار دارد و تلاش برای دستیابی به صفر مطلق نه تنها توجیه اقتصادی ندارد، بلکه می‌تواند اثرات زیست‌محیطی غیرمستقیم نیز به دنبال داشته باشد.

الگوهای پیشنهادی برای معماری آینده در اقلیم سرد و نیمه‌خشک

بر اساس یافته‌های این پژوهش و تحلیل نقاط قوت و ضعف طراحی مجتمع مسکونی نمونه در تبریز، الگوهای زیر برای معماری آینده در اقلیم سرد و نیمه‌خشک ایران (با تأکید بر شهرهای مشابه تبریز) پیشنهاد می‌شود:



شکل شماره ۹ : دیاگرام گرافیکی الگوی‌های پیشنهادی برای معماری آینده در اقلیم سرد و نیمه خشک

الگوی اول: ترکیب راهکارهای غیرفعال و فعال

ترکیب راهکارهای غیرفعال (عایق‌کاری، بهینه‌سازی بازشوها، بادگیر) با سیستم‌های فعال تولید انرژی (فتوولتائیک) می‌تواند ساختمان‌های مسکونی را به سطح نزدیک به صفر انرژی (nZEB)برساند. در این پژوهش، این ترکیب منجر به کاهش ۲۱ درصدی مصرف انرژی و شاخص EUI خالص منفی (۴.۱۲- کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال) شده است.

الگوی دوم: طراحی پاسخگو به اقلیم سرد و نیمه‌خشک

طراحی ساختمان باید بر اساس واکنش به شرایط اقلیمی انجام شود؛ به‌گونه‌ای که در زمستان از حداکثر جذب حرارت خورشیدی و در تابستان از حداکثر تهویه طبیعی و سایه‌اندازی بهره‌مند شود. این رویکرد در پژوهش حاضر با استفاده از بادگیر و جهت‌گیری بهینه، منجر به کاهش مصرف انرژی در ماه‌های سرد سال (آذر تا اسفند) به میزان متوسط ۲۱ درصد شده است.

الگوی سوم: سیستم‌های ترکیبی گرمایش و سرمایش

استفاده از سیستم‌های با راندمان بالا در کنار انرژی‌های تجدیدپذیر (آبگرمکن خورشیدی) می‌تواند مصرف انرژی را به طور قابل‌توجهی کاهش دهد. در این پژوهش، استفاده از پکیج چگالشی و اسپلیت اینورتر در کنار آبگرمکن خورشیدی، سهم قابل‌توجهی در کاهش ۲۱ درصدی مصرف انرژی داشته است.

الگوی چهارم: مدیریت انرژی در فاز بهره‌برداری

دستیابی به ساختمان صفر انرژی تنها به طراحی مناسب محدود نمی‌شود؛ مدیریت انرژی در فاز بهره‌برداری و آگاهی ساکنین نقش کلیدی در تحقق این هدف دارند. در پژوهش حاضر، با وجود طراحی بهینه، دستیابی به صفر مطلق انرژی به دلیل عدم توجیه اقتصادی و ملاحظات زیست‌محیطی محقق نشد که نشان‌دهنده اهمیت مدیریت مصرف در فاز بهره‌برداری است.

الگوی پنجم: استانداردهای بین‌المللی و بومی‌سازی

بومی‌سازی استانداردهای بین‌المللی با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی، اقتصادی و فرهنگی ایران، می‌تواند مسیر دستیابی به ساختمان‌های پایدار را هموارتر سازد. نتایج این پژوهش نشان داد که ساختمان طراحی‌شده بر اساس مبحث ۱۹، توانایی کسب امتیازات بالایی در هر دو سیستم LEED (۱۸ از ۲۱ امتیاز) و BREEAM (۱۵ از ۱۵ امتیاز) را دارد، اما برای هماهنگی کامل نیازمند بازنگری در حوزه‌های نفوذپذیری هوا، انرژی‌های تجدیدپذیر و مدیریت انرژی است.

پیشنهادات به سیاست‌گذاران و دست‌اندرکاران

بر اساس یافته‌های این پژوهش، پیشنهادات زیر به وزارت راه و شهرسازی، سازمان نظام مهندسی ساختمان و سایر نهادهای مرتبط ارائه می‌شود:

- ایجاد امتیازات تشویقی برای انرژی‌های تجدیدپذیر: اضافه کردن یک بخش جدید در مبحث ۱۹ با امتیازات تشویقی برای پروژه‌هایی که حداقل ۲۰ درصد، ۳۰ درصد یا ۵۰ درصد انرژی مصرفی خود را از منابع تجدیدپذیر تأمین می‌کنند. این امتیازات می‌تواند شامل کاهش عوارض شهرداری، تسهیل در اخذ پروانه، یا اولویت در تخصیص وام‌های ساختمانی باشد.
- هماهنگی با استانداردهای بین‌المللی: تدوین نقشه راه برای هماهنگ‌سازی تدریجی مبحث ۱۹ با استانداردهای بریم و لیید، به ویژه در حوزه معیارهای انرژی و انتشار کربن.
- آموزش و فرهنگ‌سازی: برگزاری دوره‌های آموزشی تخصصی برای مهندسان و معماران در زمینه طراحی ساختمان‌های نزدیک به صفر انرژی (nZEB)و آشنایی با استانداردهای بین‌المللی ارزیابی پایداری.

پیشنهادات برای پژوهش‌های آتی

با توجه به محدودیت‌های پژوهش حاضر (مانند عدم بررسی دقیق هزینه-فایده سناریوهای مختلف فتوولتائیک و عدم ارزیابی کیفیت هوای داخل ساختمان)، پیشنهادات زیر برای پژوهش‌های آتی ارائه می‌شود:

- تحلیل هزینه-فایده دقیق برای سناریوهای مختلف نصب پنل خورشیدی در تبریز: تعیین نقطه بهینه اقتصادی تولید تجدیدپذیر با در نظر گرفتن تعرفه‌های فعلی برق، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و نرخ بهره.
- ارزیابی کیفیت هوای داخل (IAQ) ساختمان‌های نزدیک به صفر انرژی (nZEB) در اقلیم سرد:

- بررسی اثرات افزایش عایق‌کاری و کاهش نفوذپذیری هوا بر کیفیت هوای داخل و ارائه راهکارهای تهویه مناسب.
- قابلیت انطباق ویرایش جدید مبحث ۱۹ با نسخه جدید بریم International (BREEAM) V6 New Construction - تحلیل تغییرات ایجادشده در معیار ENE01 و الزامات جدید مرتبط با کربن عملیاتی و نهفته.
- توسعه ابزار ارزیابی بومی مبتنی بر بریم برای ایران: طراحی یک سیستم رتبه‌بندی متناسب با شرایط اقلیمی، اقتصادی و اجتماعی ایران.
- تحلیل چرخه حیات (LCA) مصالح ساختمانی در پروژه‌های نزدیک به صفر انرژی (nZEB) اقلیم سرد: تعیین ردپای کربن نهفته مصالح بومی در مقایسه با مصالح پیشرفته.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تائیده‌های اخلاقی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

سهم نویسندگان: این مقاله مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول به راهنمایی نویسنده دوم و مشاوره نویسنده سوم تحت عنوان «طراحی مجتمع مسکونی با رویکرد صفر انرژی در شهر تبریز» در دانشگاه هنر اسلامی تبریز انجام گرفته است.

منابع مالی/ حمایت‌ها: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

References

[۱] Chen, L., Huang, L., Hua, J., Chen, Z., Wei, L., Osman, A. I., Fawzy, S., Rooney, D. W., Dong, L., & Yap, P.-S. (2023). Green construction for low-carbon cities: a review. Environmental Chemistry Letters, 21(3), 1627-1657. https://doi.org/10.1007/s10311-022-01544-4

[۲] Singh, N., Sharma, R. L., & Yadav, K. (2023). Sustainable development by carbon emission reduction and its quantification: an overview of current methods and best practices. Asian Journal of Civil Engineering, 24(8), 3797-3822. https://doi.org/10.1007/s42107-023-00732-z

[۳] Lee, G., Avelina, N., Rim, D., Chi, S., & Ahn, H. (2023). Systematic review of carbon-neutral building technologies (CNBTs) by climate groups and building types. Journal of Building Engineering, 78, 107627. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107627

[۴] Marszal, A. J., Heiselberg, P., Bourrelle, J. S., Musall, E., Voss, K., Sartori, I., & Napolitano, A. (2011). Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. Energy and Buildings, 43(4), 971-979. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.022

[۵] Omrany, H., Chang, R., Soebarto, V., Zhang, Y., Ghaffarianhoseini, A., & Zuo, J. (2022). A bibliometric review of net zero energy building research 1995–2022. Energy and Buildings, 262, 111996. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111996

[۶] Sartori, I., Napolitano, A., & Voss, K. (2012). Net zero energy buildings: A consistent definition framework. Energy and Buildings, 48, 220-232. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.032

[۷] Wei, W., & Skye, H. M. (2021). Residential net-zero energy buildings: Review and perspective. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 142, 110859. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110859

[۸] H. Gholami, H. Kamelnia , M. J. Mahdavinejad, H. Sangin, (2025). Optimizing Building Configuration and Orientation for Social Housing Projects in Iran, *Iranica Journal of Energy & Environment,* 16(2), 289-308. https://doi.org/10.5829/ijee.2025.16.02.11

[۹] Hasan, A. H., Tarish, A. L., & Al-Mudhafar, A. H. N. (2025). Recent advances in nearly zero energy commercial and residential buildings: Innovations, challenges, and climate-specific solutions. Results in Engineering, 25, 104164. https://doi.org/10.1016/j.grets.2025.100330

[۱۰] Ferreira, A., Pinheiro, M. D., de Brito, J., & Mateus, R. (2023). A critical analysis of LEED, BREEAM and DGNB as sustainability assessment methods for retail buildings. Journal of Building Engineering, 66, 105825. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105825

[۱۱] Ferreira, J., Pinheiro, M. D., & de Brito, J. (2014). Portuguese sustainable construction assessment tools benchmarked with BREEAM and LEED: An energy analysis. Energy and Buildings, 69, 451-463. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.039

[۱۲] Mattoni, B., Guattari, C., Evangelisti, L., Bisegna, F., Gori, P., & Asdrubali, F. (2018). Critical review and methodological approach to evaluate the differences among international green building rating tools. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82(1), 950-960. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.105

[۱۳] Kokatnur, T., Faris, F., Gunay, B., O'Brien, W., & Azar, E. (2025). The WELL Building Standard: A literature review and bibliometric analysis of a nascent field. Journal of Building Engineering, 103, 112121. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.112121

[۱۴] Dharmarathna, D., Graham, P., & Bunster, V. (2025). Unpacking the evolution of Green Star rating tools and their certification trends in Australian building projects. Journal of Building Engineering, 111, 113328. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113328

[۱۵] Olanrewaju, O. I., Imoudu Enegbuma, W., & Donn, M. (2024). Operational, embodied and whole life cycle assessment credits in green building certification systems: Desktop analysis and natural language processing approach. Building and Environment, 258, 111569. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111569

[۱۶] Geng, Y., Ji, W., Wang, Z., Lin, B., & Zhu, Y. (2019). A review of operating performance in green buildings: Energy use, indoor environmental quality

and occupant satisfaction. Energy and Buildings, 183, 500-514. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.017
[۱۷] Espinoza-Zambrano, P., Roig-Hernando, J., & Marmolejo-Duarte, C. (2024). Do green certifications add value? Feedback from high-level stakeholders in the Spanish office market. Journal of Cleaner Production, 483, 144276. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144276
[۱۸] Norouzian, N. (2016). Indigenous model for evaluating energy efficiency in buildings of Tehran. Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning, 6(3), 195-204. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224991.1395.6.3.7.9
[۱۹] Narmin Ariannia , Mohammadjavad Mahdavinejad, (2020). Responsive canopy and designerly approach to visual-thermal comfort, *Journal of Environmental Science Studies,* 5(3), 2895-2904 .https://www.jess.ir/article_113078.html
[۲۰] Mohammad Moradi, A., Hosseini, S. B., & Yazdani, H. (2012). Controlling environmental impacts of building by measuring and reducing embodied energy per unit area in construction phase (Case study: A 7-story residential building in north of Tehran). Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning, 2(2), 55-65. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224991.1391.2.2.6.8
[۲۱] Mir-Masoumi, F. S., Salavati, M., & Ahmadi, F. (2018). Green housing in Isfahan, reflection of energy efficiency optimization on quality of life. Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning, 8(3), 195-204. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224991.1397.8.3.7.3
[۲۲] Tavakoli, E., Nikkhah, A., Zomorodian, Z. S., Tahsildoost, M., & Hoonejani, M. R. (2022). Estimating the impact of occupants' behaviour on energy consumption by PLS-SEM: A case study of Pakdel residential complex in Isfahan, Iran. Frontiers in Sustainable Cities, 4, 700090. https://doi.org/10.3389/frsc.2022.700090
[۲۳] Habib, F., Barzegar, Z., & Cheshmeh Ghasabani, M. (2014). Ranking of effective parameters on building energy consumption using analytical hierarchy process (AHP). Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning, 4(2), 47-56. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224991.1393.4.2.5.1
[۲۴] Mousavi Rizi, S. M., Aminsharei, F., Lamea, M., & Ghazimoradi, M. (2025). Bioclimatic architecture in thermal energy efficiency of sustainable urban residential buildings in developing countries: A synthesis review in Iran. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 212, 115743. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115743
[۲۵] Torriani, G., Torresin, S., Albatici, R., & Babich, F. (2024). Influence of building- and occupant-related factors on perceived air quality (PAQ) in offices: A systematic review. Journal of Building Engineering, 100, 111758. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111758
[۲۶] Rey-Álvarez, B., Sanchez-Montañes, B., & Silvestre, E. (2026). Harmonizing indoor air quality standards across Europe: A comparative analysis framework for building material regulations and public health protection. Building and Environment, 288, 113967. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113967
[۲۷] Shagar, M., Zeng, Q., Baru, A., Yang, E., & Pishdad, P. (2025). Systematic review of residential indoor environmental quality assessment surveys and the development of an exemplary novel survey identifying and analyzing tool. Building and Environment, 284, 113448. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113448
[۲۸] Myroniuk, K., Zhelykh, V., Furdas, Y., Jesson, M., & Mitoulis, S.-A. (2026). Energy-saving of passive ventilation systems in thermally modernized residential buildings – a review. Energy and Buildings, 321, 116681. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116681
[۲۹] Kawakubo, S., Kamata, T., Arata, S., & Murakami, S. (2024). Item response theory in building environment engineering: A novel approach to identifying key residential environment items. Building and Environment, 111764. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111764
[۳۰] Nemati Aghdam, M., & Dixit, M. K. (2026). A systematic review of methods and frameworks integrating environmental sustainability and resilience in building design and construction. Building and Environment, 288, 113968. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2026.114381
[۳۱] Bao, Y., Leung, M. K., Poon, D., & Xiang, C. (2024). Integrating vertical farm into low-carbon high-rise building in high-density context: A design case study in Hong Kong. Journal of Building Engineering, 96, 110472. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110472
[۳۲] Soust-Verdaguer, B., García-Martínez, A., Rey-Álvarez, B., de Diego, B., de la Fuente, A., & Röck, M. (2025). Data infrastructure for whole-life carbon emissions baselines of buildings in Spain. Energy and Buildings, 347, 116307. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116307
[۳۳] Loli, A., & Lausselet, C. (2025). Setting benchmark values for apartment blocks in Norway as the basis for GHG emission reduction along the building process. Building and Environment, 280,

113127. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113127
[۳۴] Mok, B., Gutai, M., Vincent, T., & Cavana, G. (2025). Carbon viability of retrofitting office buildings to residential use. Energy and Buildings, 345, 115979. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115979
[۳۵] Zhang, C., Cui, C., Zhang, Y., Yuan, J., Luo, Y., & Gang, W. (2019). A review of renewable energy assessment methods in green building and green neighborhood rating systems. Energy and Buildings, 195, 68-81. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.040
[۳۶] Behzadpour, M., & Tolouei, A. (2025). Identifying effective components of ASHRAE standard in building information modeling for energy consumption optimization; Case study: Evergreen villa in Tehran. Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning, 15(2), 143-166. https://doi.org/10.48311/bsnt.2025.75027.0
[۳۷] Molaie, M. M., Pilehchiha, P., & Shadanfar, A. (2019). Optimization of opening proportions and daylighting frontage with approach of reducing energy consumption in office buildings. Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning, 9(2), 77-90. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224991.1398.9.2.6.7
[۳۸] Mehrooz, F., Bemanian, M. R., & Zarkesh, A. (2024). Optimizing the architectural model of Bushehr with the aim of visual comfort and energy consumption control. Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning, 14(2). https://bsnt.modares.ac.ir/article_993.html
[۳۹] Bolhari, S., Barbara, L. V., & Etesam, I. (2020). Lessons from traditional architecture for the future of energy-efficient architecture in Iran; Case study: Yazd city. Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning, 10(1), 21-32. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224991.1399.10.2.3.1
[۴۰] Khayami, S., & Daneshjoo, K. (2022). The effect of movable double-skin facade on energy consumption efficiency in office building (Case study: Khayyam office building in Mashhad). Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning, 12(2), 110-137. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224991.1401.12.2.6.8
[۴۱] Seifollahi Asl, M., & Mansouri, R. (2025). Sustainable architecture of Qeshm Island: Lessons for energy-efficient design in hot and humid climate. Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning, 15(1). https://doi.org/10.48311/bsnt.2025.23865
[۴۲] Heravi, G., Nafisi, T., & Mousavi, R. (2016). Evaluation of energy consumption during production and construction of concrete and steel frames of residential buildings. Energy and Buildings, 130, 244-252. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.067
[۴۳] Kazemi, M. (2023). Behavioral barriers to the use of renewable and energy-efficient technologies in residential buildings in Iran. Energy Efficiency, 16, 79. https://doi.org/10.1007/s12053-023-10162-0
[۴۴] Soltan Ahmadi, P., Khoshgard, A., & Ahmadi Danesh Ashtiani, H. (2025). Investigating Energy Performance Criteria in Compliance with Iranian National Building Regulations: The Role of Residential Building Envelope Adjacency. Buildings, 15(1), 44. https://doi.org/10.3390/buildings15010044
[۴۵] Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). (n.d.). EnergyPlus. Simulation Research Group. https://simulationresearch.lbl.gov/projects/energyplus [Accessed: 15 July 2026]
[۴۶] Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorologische Zeitschrift, 15(3), 259-263. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130
[۴۷] BRE Global. (2017). BREEAM International New Construction 2016 Technical Manual (SD233, Issue 2.0). Watford, UK: BRE Global Limited. https://www.breeam.com
[۴۸] Ou, Y., Xiao, Y., Wang, J., & Li, J. (2023). Exploratory research and practical application on life-cycle carbon emission calculation method for near-zero carbon buildings. AIP Conference Proceedings, 2872(1), 020009. https://doi.org/10.1063/5.0166367
[۴۹] U.S. Green Building Council (USGBC). (2013). LEED v4 Reference Guide for Building Design and Construction. Washington, DC: U.S. Green Building Council. https://www.usgbc.org/leed
[۵۰] ASHRAE. (2010). ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2010: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. https://www.ashrae.org
[۵۱] Gisbert, J., Roig-Hernando, J., & Campana-Vargas, J. R. (2026). Sustainable cities and urban transformation: The economics and drivers of residential sustainability certifications. Cities, 174, 106954. https://doi.org/10.1016/j.cities.2026.106954
[۵۲] Ghasemi Mobtaker, H., Ajabshirchi, Y., Ranjbar, S. F., Matloobi, M., & Taki, M. (2016). Estimation of monthly mean daily global solar radiation in Tabriz using empirical models and artificial neural networks. Journal of Renewable Energy and Environment, 3(3), 1-10. https://doi.org/10.30501/jree.2016.70089