



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Comparative Assessment of the Energy Performance of an Office Building Based on Chapter 19 with ESGB and Green Mark

Reza Ebadi ⁽¹⁾ , Mehran Golsanamlou ^{(2)*} 

1. M.A of Architecture Technology, Department of construction, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. (<https://orcid.org/0009-0003-2060-5955>)

2. M.A of Architectural and Energy, Department of construction, Faculty of Architecture and Urban Planning, Tabriz Islamic Arts University, Tabriz, Iran. (<https://orcid.org/0009-0009-9191-306X>)

Publisher: Iran University of Art

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 16/09/2025 Revised: 22/10/2025 Accepted: 07/11/2025 PP.7-28 Keywords: <i>Comparative Assessment, nearly Zero Energy Building, Topic 19, ESGB, Green Mark.</i>  Use your device to scan and read the article online	Introduction: The building sector is a major contributor to global energy consumption and energy-related carbon emissions, making the improvement of building energy performance an important component of climate and sustainability policies. In Iran, Chapter 19 of the National Building Regulations (2020 edition) provides the principal regulatory framework for reducing building energy demand and improving the thermal and energy performance of buildings. However, its scope is mainly focused on minimum requirements for the building envelope and technical systems, while several aspects addressed by contemporary green building assessment systems, including renewable energy, air infiltration, mechanical ventilation, and operational energy management, receive limited attention. This issue is particularly relevant in hot-arid cities such as Kashan, where high cooling loads, solar radiation, envelope characteristics, and the potential for solar energy generation simultaneously influence building energy performance. International assessment systems such as China's ESGB and Singapore's Green Mark consider a broader range of energy and environmental criteria and establish different levels of performance. Despite numerous studies comparing green building assessment systems, limited research has directly evaluated the performance of an office building designed according to Iran's Chapter 19 against both ESGB and Green Mark within the climatic context of Iran. The present study addresses this gap by linking the requirements of the Iranian regulation to quantitative building-energy performance indicators and comparable criteria within two Asian assessment frameworks. The Purpose of the Research: The study aims to comparatively evaluate the energy performance of a representative office building in Kashan according to Chapter 19 and examine its alignment with the relevant requirements of China's ESGB and Singapore's Green Mark 2021. The research also evaluates the contribution of a photovoltaic system to reducing energy consumption and electricity purchased from the grid. Accordingly, the study seeks to determine the effectiveness of Chapter 19 as a basis for energy reduction and identify the regulatory areas that require further development to approach the broader scope of international green building assessment systems. Methodology: The research follows a quantitative approach and is applied in purpose, with a descriptive-analytical method based on building energy modeling and simulation. A two-story office building with a total useful floor area of 480 m², located in Kashan's hot-arid climate, was selected as the case study. A three-dimensional model was developed in SketchUp and transferred through OpenStudio to EnergyPlus version 23.2. Annual energy simulations were performed using a six-minute time step and considering climatic conditions, envelope properties, occupancy schedules, internal loads, lighting, equipment, and HVAC systems. Three simulation scenarios were developed. The Base Case represented the building without energy optimization measures and included uninsulated walls and roof, single-glazed windows, a conventional heating system, conventional cooling equipment, and higher air-infiltration rates. The Optimized Scenario incorporated the requirements of Chapter 19, including a 15-degree adjustment in building orientation, improved

ARTICLE INFO	ABSTRACT
	thermal insulation, Low-E windows, more efficient heating and cooling systems, reduced air infiltration, and horizontal shading. The third scenario combined the optimized building with a 40 kWp photovoltaic system consisting of 114 polycrystalline 350 W panels with a total area of 228 m². Because measured operational data were not available, model verification was performed using three complementary procedures: annual energy-balance checking, sensitivity analysis of key parameters, and comparison of the resulting energy-use intensity with values reported for comparable office buildings in hot-arid climates. The simulated energy indicators were subsequently compared with relevant ESGB and Green Mark criteria. A sequential parametric analysis was also used to determine the relative contribution of individual optimization measures to the reduction in annual energy consumption. Findings and Discussion: The annual simulation results showed that energy consumption decreased from 75,823 kWh in the Base Case to 58,301 kWh in the Chapter 19-compliant Optimized Scenario, corresponding to a 23.11% reduction. The largest individual contributions to this reduction were associated with optimal building orientation (7.03%) and continuous thermal insulation of the envelope (5.08%), followed by improved heating and cooling systems (4.52%), Low-E windows (3.36%), and horizontal shading (3.12%). These results indicate that reducing the building's energy demand through coordinated envelope and system improvements is more influential than relying solely on renewable energy generation. The integration of the 40 kWp photovoltaic system produced approximately 40,500 kWh annually and reduced electricity purchased from the grid to 17,850 kWh per year. The resulting net energy use intensity reached 37.19 kWh/m²/year. Nevertheless, photovoltaic generation was insufficient to fully offset the building's annual energy demand; therefore, the building did not achieve a true near-zero-energy condition. The comparative assessment revealed that the building performed relatively well against the energy-saving requirements of ESGB. It achieved the required energy-saving improvement, complied with the assessed envelope and window-to-wall-ratio criteria, and satisfied the requirement for energy simulation. However, deficiencies remained in air-infiltration testing, operational energy management and monitoring, mechanical ventilation with heat recovery, and the extent of renewable-energy integration. Based on the eight shared criteria considered in the study, the project's alignment with ESGB was 50%. The comparison with Green Mark 2021 revealed a more substantial gap. The calculated Envelope Thermal Transfer Value remained below the 50 W/m² limit for non-residential buildings, indicating acceptable overall envelope performance according to this indicator. However, the project did not satisfy the prescribed U-value requirements for individual envelope components and lacked several measures associated with advanced building performance, including mechanical ventilation with heat recovery, air-infiltration testing, continuous energy management, and sufficient renewable-energy contribution. The resulting alignment index with Green Mark was only 12.5% (1 of 8 criteria). These findings indicate that the principal difference between Chapter 19 and the two international systems is not limited to the stringency of thermal requirements. More importantly, the international systems cover a broader range of operational and environmental performance dimensions. Chapter 19 can therefore provide an effective regulatory basis for reducing operational energy consumption, but compliance with its requirements alone does not ensure comprehensive green-building performance or near-zero-energy operation. Conclusion: The study demonstrates that applying the energy-efficiency measures of Chapter 19 can substantially improve the performance of office buildings in hot-arid climates. In the case study, the optimized configuration reduced annual energy consumption by 23.11%, while the photovoltaic system further reduced dependence on grid electricity. However, the building remained above the near-zero-energy threshold because renewable generation did not completely offset annual demand. The comparative assessment also shows that the main limitation of Chapter 19 is not simply insufficiently stringent thermal requirements, but its narrower scope compared with comprehensive green building assessment systems. Greater alignment with ESGB and Green Mark would require further development of requirements for envelope performance, air-infiltration control and testing, mechanical ventilation with heat recovery, renewable-energy integration, and

ARTICLE INFO	ABSTRACT
	operational energy monitoring and management. The findings are limited to a single office building in the hot-arid climate of Kashan and rely on simulation-based verification rather than measured operational data. Future studies should therefore examine additional building typologies and Iranian climate zones and incorporate field measurements, air-infiltration testing, and long-term operational monitoring. Developing a locally adapted green building assessment framework that integrates energy performance, renewable energy, indoor environmental quality, operational management, life-cycle carbon, and Iran's climatic conditions could also provide a basis for future revisions of national building regulations. Funding: There is no funding support. Authors' Contribution: Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work. Conflict of Interest: Authors declared no conflict of interest. AI Usage Declaration: The authors declare that ChatGPT was used for language polishing. All scientific content, analyses, results, and ultimate responsibility for the manuscript rest with the authors. Acknowledgments: We are grateful to all the persons for scientific consulting in this paper.

Highlight

- Chapter 19 reduced energy use by 23.11%;
- A 40 kWp PV system reduced grid dependence;
- Chapter 19 has a narrower green-building scope.



This paper is an open access and licensed under the [Creative Commons CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) license

©2024, AGM. All rights reserved.

Cite This Article: Ebadi, R., & Golsanamlou, M. (2025). Comparative Assessment of the Energy Performance of an Office Building Based on Chapter 19 with ESGB and Green Mark. *The Art of Green Management*, 3(3), 7-28. [10.30480/agm.2026.6574.1083](https://doi.org/10.30480/agm.2026.6574.1083)



<http://doi.org/10.30480/agm.2026.6574.1083>



http://agm.journal.art.ac.ir/article_1548.html

*. Corresponding Author (Email: me.golsanamlou@tabriziau.ac.ir)/ (Phone: +989363395653)



ارزیابی تطبیقی عملکرد انرژی ساختمان اداری مبتنی بر مبحث ۱۹ با ئی.اس.جی.بی و گرین مارک^۲

رضا عبادی^(۱)، مهران گل صنم^(۲)

۱- کارشناس ارشد فناوری معماری، گروه ساختمان، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. (<https://orcid.org/0009-0003-2060-5955>)

۲- کارشناس ارشد معماری و انرژی، گروه ساختمان، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران. (<https://orcid.org/0009-0009-9191-306X>)

ناشر: دانشگاه هنر ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۳۰ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۶ صص: ۲۸-۷	مقدمه: افزایش الزامات کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد زیست محیطی ساختمان‌ها، ضرورت بازنگری چارچوب‌های مقرراتی و مقایسه آن‌ها با استانداردهای بین‌المللی را برجسته کرده است. در ایران، مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان (ویرایش ۱۳۹۹) چارچوب اصلی مدیریت مصرف انرژی را ارائه می‌دهد، اما میزان انطباق آن با استانداردهای بین‌المللی نیازمند بررسی است.
واژگان کلیدی: ارزیابی تطبیقی، ساختمان نزدیک به صفر انرژی، مبحث ۱۹، ئی.اس.جی.بی، گرین مارک	هدف پژوهش: ژوهرش حاضر با هدف ارزیابی تطبیقی عملکرد انرژی یک ساختمان اداری دوطبقه در شهر کاشان بر اساس الزامات مبحث ۱۹ و مقایسه آن با استانداردهای انرژی و پایداری ساختمان در چین و سنگاپور، یعنی ئی.اس.جی.بی و گرین مارک، انجام شده است.
	روش‌شناسی: این پژوهش با رویکرد کمی و روش شبیه‌سازی انرژی انجام شد. عملکرد ساختمان با استفاده از نرم‌افزارهای این‌استودیو ^۴ و انرژی‌پلاس ^۴ در سناریوهای مختلف بررسی شد. پس از اعمال الزامات مبحث ۱۹ و راهکارهای بهبود عملکرد انرژی، سامانه فتوولتائیک با ظرفیت ۴۰ کیلووات‌پیک نیز به مدل افزوده و نتایج با معیارهای ئی.اس.جی.بی و گرین مارک مقایسه شد.
	یافته‌ها و بحث: نتایج نشان داد مصرف سالانه انرژی با اجرای راهکارهای بهینه‌سازی از ۷۵۸۲۳ به ۵۸۳۰۱ کیلووات‌ساعت کاهش یافت که معادل ۱۱/۲۳ درصد است. همچنین، سامانه فتوولتائیک متشکل از ۱۱۴ پنل با سطح ۲۲۸ مترمربع، مصرف نهایی برق از شبکه را به ۱۷۸۵۰ کیلووات‌ساعت در سال کاهش داد و شدت مصرف انرژی خالص به مقدار ۳۷/۱۹ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال رسید. مقایسه تطبیقی نشان داد ساختمان از نظر صرفه‌جویی انرژی عملکرد قابل‌قبولی دارد، اما در زمینه نفوذپذیری هوا، تهویه مکانیکی، انرژی‌های تجدیدپذیر و مدیریت بهره‌برداری با برخی الزامات ئی.اس.جی.بی و گرین مارک فاصله دارد.
	نتیجه‌گیری: در نتیجه تقویت الزامات مبحث ۱۹ در زمینه عملکرد حرارتی پوسته، کنترل نفوذپذیری هوا، تهویه مکانیکی، انرژی‌های تجدیدپذیر و مدیریت بهره‌برداری می‌تواند به همگرایی بیشتر مقررات ملی با استانداردهای بین‌المللی ساختمان‌های کم‌مصرف و پایدار کمک کند.
	نکات برجسته: - کاهش ۲۳/۱۱ درصدی مصرف انرژی با اجرای مبحث ۱۹ - فتوولتائیک ۴۰ کیلوواتی وابستگی به شبکه را کاهش داد؛ - مبحث ۱۹ در پوشش الزامات سبز، دامنه محدودتری دارد.

ارجاع به این مقاله: عبادی، رضا و گل‌صنملو، مهران (۱۴۰۴). ارزیابی تطبیقی عملکرد انرژی ساختمان اداری مبتنی بر مبحث ۱۹ با ئی.اس.جی.بی و گرین‌مارک. هنر مدیریت سبز، ۳(۳)، ۲۸-۷. [10.30480/agm.2026.6574.1083](https://doi.org/10.30480/agm.2026.6574.1083)



<http://doi.org/10.30480/agm.2026.6574.1083>



http://agm.journal.art.ac.ir/article_1548.html



این مقاله به صورت دسترسی باز و با مجوز
استفاده است. [Creative Commons CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) قابل

©2024, UST. All rights reserved.

* نویسنده مسئول (رایانامه: me.golsanamlou@tabriziau.ac.ir) / (تلفن: +۹۸۹۳۶۳۳۹۵۶۵۳)

بخش ساختمان با سهم حدود ۳۶ درصد از مصرف نهایی انرژی و ۳۹ درصد از انتشار دی‌اکسیدکربن مرتبط با انرژی در سطح جهانی، یکی از محوری‌ترین بخش‌ها برای سیاست‌گذاری در جهت کاهش مصرف انرژی و مقابله با تغییرات اقلیمی محسوب می‌شود (Chen et al., 2023). در پاسخ به این چالش، کشورهای مختلف علاوه بر تدوین الزامات حداقلی انرژی، به توسعه استانداردها و نظام‌های ارزیابی عملکرد ساختمان روی آورده‌اند تا عملکرد ساختمان‌ها را از منظر مصرف انرژی، کیفیت محیط داخلی، انرژی‌های تجدیدپذیر و سایر ابعاد پایداری ارزیابی کنند (Filippini & Obrist, 2022). در ایران، بخش ساختمان به دلیل وابستگی قابل‌توجه مصرف انرژی به سوخت‌های فسیلی و همچنین تفاوت شرایط اقلیمی، کالبدی و الگوی بهره‌برداری ساختمان‌ها با بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته، با چالش‌های ویژه‌ای در زمینه بهبود بهره‌وری انرژی مواجه است (یارمحمد و مهدیزاده سراج، ۱۴۰۱). مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، به‌عنوان چارچوب اصلی قانونی در این حوزه، الزامات مربوط به کاهش نیاز و مصرف انرژی ساختمان را تعیین می‌کند (احمدنژاد و یکتا خشکواپی، ۱۴۰۳). ویرایش ۱۳۹۹ این مبحث، موضوعاتی همچون عملکرد حرارتی پوسته، تأسیسات مکانیکی و الکتریکی و روش‌های ارزیابی کارایی انرژی ساختمان را پوشش می‌دهد. با این حال، چارچوب آن عمدتاً بر تعیین الزامات عملکردی و حداقل‌های موردنیاز برای کاهش مصرف انرژی متمرکز است و ارتباط آن با برخی رویکردهای جدید در ارزیابی ساختمان‌های پایدار، از جمله توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، ارزیابی جامع عملکرد ساختمان و الزامات بهره‌برداری، نیازمند بررسی بیشتر است.

این موضوع در شهرهایی با اقلیم گرم و خشک، مانند کاشان، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ زیرا شرایط اقلیمی، بارهای سرمایشی و گرمایشی، ویژگی‌های پوسته ساختمان و ظرفیت استفاده از انرژی خورشیدی می‌توانند به‌طور هم‌زمان بر عملکرد انرژی ساختمان اثرگذار باشند (Ibrahim et al., 2025). بنابراین، صرف بررسی انطباق ساختمان با الزامات حداقلی مبحث ۱۹ نمی‌تواند تصویر کاملی از سطح عملکرد انرژی و ظرفیت آن برای دستیابی به عملکردهای بالاتر ارائه کند.

از سوی دیگر، استانداردها و نظام‌های ارزیابی بین‌المللی، به‌ویژه در کشورهای آسیایی، الزامات گسترده‌تری را برای ارزیابی عملکرد ساختمان دنبال می‌کنند. نظام گرین مارک سنگاپور علاوه بر عملکرد انرژی، معیارهایی مرتبط با عملکرد پوسته، سامانه‌های مکانیکی، کیفیت محیط داخلی و سایر ابعاد پایداری را در ارزیابی ساختمان مورد توجه قرار می‌دهد (Jangyoung & Kwok Wai, 2016). همچنین استاندارد ئی.اس.جی.بی.چین، رویکردی چندبعدی به عملکرد ساختمان دارد و در نسخه‌های جدیدتر خود توجه بیشتری به مصرف انرژی، انتشار کربن و عملکرد زیست‌محیطی نشان داده است (Wang et al., 2024). تفاوت در دامنه، ساختار و سطح الزامات این نظام‌ها با مبحث ۱۹، این پرسش را مطرح می‌کند که یک ساختمان اداری منطبق با الزامات مبحث ۱۹ در مقایسه با معیارهای انرژی و پایداری این دو نظام چه سطحی از عملکرد را نشان می‌دهد.

با وجود مطالعات متعدد درباره عملکرد انرژی ساختمان، ساختمان‌های سبز و نظام‌های رتبه‌بندی بین‌المللی، مقایسه مستقیم عملکرد یک ساختمان اداری در بستر اقلیمی ایران که بر اساس الزامات مبحث ۱۹ ویرایش ۱۳۹۹ طراحی شده باشد، با معیارهای ئی.اس.جی.بی.چین و گرین مارک سنگاپور کمتر مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات تطبیقی موجود عمدتاً به مقایسه ساختار، معیارها و وزن‌دهی نظام‌های رتبه‌بندی مختلف پرداخته‌اند و کمتر به ارزیابی عملکرد انرژی یک نمونه ساختمان در شرایط اقلیمی ایران و بررسی میزان انطباق آن با الزامات این دو نظام آسیایی توجه کرده‌اند. از این رو، شکاف اصلی پژوهش حاضر در پیوند دادن الزامات مقررات ملی ایران با شاخص‌های عملکردی دو نظام ارزیابی آسیایی و سنجش این ارتباط در یک ساختمان اداری واقع در اقلیم گرم و خشک ایران است.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تطبیقی عملکرد انرژی یک ساختمان اداری نمونه در شهر کاشان، ابتدا عملکرد انرژی ساختمان را بر اساس الزامات مبحث ۱۹ ویرایش ۱۳۹۹ ارزیابی کرده و سپس میزان انطباق آن را با معیارهای مرتبط در استاندارد ئی.اس.جی.بی و نظام گرین مارک بررسی می‌کند. همچنین، اثر افزودن سامانه فتوولتائیک بر عملکرد انرژی ساختمان و ظرفیت آن برای کاهش مصرف برق از شبکه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. از این رو، پرسش اصلی پژوهش حاضر این است که: ساختمان اداری منطبق با الزامات مبحث ۱۹ در مقایسه با معیارهای انرژی و پایداری استانداردهای ئی.اس.جی.بی و گرین مارک چه سطحی از عملکرد و انطباق را نشان می‌دهد، و افزودن سامانه فتوولتائیک تا چه میزان می‌تواند این شکاف عملکردی را کاهش داده و ساختمان را به شرایط نزدیک به صفر انرژی نزدیک‌تر کند؟



۲- مبانی نظری

پژوهش حاضر بر پایه سه حوزه اصلی دانش شکل گرفته است: نظام‌های ارزیابی ساختمان سبز، مفهوم ساختمان‌های صفر انرژی و رویکردهای کربن‌خشی. مطالعات پیشین نشان می‌دهند که سیستم‌های رتبه‌بندی مختلف (لید، بریم، کاسی، گرین مارک، ئی.اس.جی.بی) با وجود اشتراک در اهداف کلی پایداری، در وزن‌دهی معیارها، سطح سخت‌گیری و تناسب اقلیمی-فرهنگی تفاوت‌های معناداری دارند. از سوی دیگر، ادبیات پژوهش بر لزوم ترکیب راهکارهای غیرفعال، فعال و تجدیدپذیر برای کاهش مصرف انرژی تأکید می‌کند. این مبانی نظری، چارچوب لازم برای مقایسه تطبیقی مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان ایران با استانداردهای آسیایی را فراهم می‌آورد.

۲-۱- نظام‌های ارزیابی ساختمان سبز و مطالعات تطبیقی

پژوهش‌های متعددی به مقایسه نظام‌های ارزیابی ساختمان سبز پرداخته‌اند. لی با مقایسه پنج نظام ارزیابی از جمله ئی.اس.جی.بی نشان داد که لید سخت‌گیرانه‌ترین الزامات را دارد و همه سیستم‌ها بر اساس عملکرد نسبی عمل می‌کنند (Lee, 2012). در مقابل، آگاروال و همکاران با بررسی ساختمان‌های مسکونی دارای گواهی گرین مارک در سنگاپور، پدیده‌ای موسوم به «اثر ثروت» را شناسایی کردند که طی آن ساکنان به دلیل صرفه‌جویی در هزینه انرژی، مصرف آب و برق خود را افزایش می‌دهند (Agarwal et al., 2024). این یافته با نتایج گنگ و همکاران هم‌راستاست که نشان دادند حدود ۲۵ درصد ساختمان‌های دارای گواهی سبز عملکردی ضعیف‌تر از طراحی اولیه دارند (Geng et al., 2019).

در سطح تطبیقی، دوآن و همکاران تفاوت‌های معنادار سیستم‌های رتبه‌بندی را در وزن‌دهی معیارها و سطح سخت‌گیری نشان دادند (Doan et al., 2017)، در حالی که وارما و پالانیپان دریافتند سیستم‌های آسیایی مانند کاسی و گرین مارک تناسب بیشتری با شرایط اقلیمی و فرهنگی منطقه خود دارند (Varma & Palaniappan, 2019). ماتونی و همکاران نیز ناهمگونی معیارها و وزن‌دهی میان ابزارهایی چون کاسی، گرین استار، بریم، لید و ایتاکا را تأیید کردند (Mattoni et al., 2018). حوزه آسیا، کاسی ژاپن با استفاده از شاخص نسبت کیفیت محیط ساخته‌شده به بار محیطی^۱ ساختمان‌ها را در پنج سطح اس تا سی طبقه‌بندی می‌کند (MURAKAMI et al., 2004)، و در اروپا استاندارد مینرژ۱^۲ سوئیس، به‌ویژه سطح مینرژ۱ آ، به مفهوم صفر انرژی بسیار نزدیک است (Hall et al., 2014). برای مقایسه فشرده نظام‌های مطرح‌شده در ادبیات، جدول ۱ ساختار، ابعاد ارزیابی و سطوح گواهینامه شش نظام بین‌المللی پرکاربرد را در کنار هم نشان می‌دهد.

جدول ۱- مقایسه تطبیقی نظام‌های بین‌المللی ارزیابی ساختمان سبز

سیستم ارزیابی (کشور مبدأ)	نوع رویکرد ارزیابی	ابعاد کلیدی ارزیابی	درجات گواهینامه
لید (ایالات متحده)	رتبه‌بندی چندسطحی داوطلبانه	سایت پایدار، بهره‌وری آب، انرژی و اتمسفر، مصالح و منابع، کیفیت محیط داخلی، نوآوری	گواهینامه، نقره، طلا، پلاتینیوم
بریم (بریتانیا)	رتبه‌بندی چندسطحی داوطلبانه	مدیریت، بهداشت و سلامت، انرژی، آب، مصالح، زمین و بوم‌شناسی، آلودگی و حمل‌ونقل، پسماند	قابل قبول، خوب، خیلی خوب، عالی، ممتاز
کاسی (ژاپن)	نسبت کیفیت محیط به بار محیطی	کیفیت داخلی، عملکرد، محیط‌زیست خرد، انرژی، منابع، محیط‌زیست کلان	C (ضعیف) تا S (عالی)
گرین استار (استرالیا)	رتبه‌بندی ستاره‌ای	مدیریت، کیفیت محیط داخلی، انرژی و حمل‌ونقل، آب و مصالح، زمین و بوم‌شناسی، آلودگی و نوآوری	۴ تا ۶ ستاره
ای.اس.جی.بی (چین)	رتبه‌بندی ستاره‌ای (۱ تا ۳ ستاره)	صرفه‌جویی زمین، صرفه‌جویی انرژی، صرفه‌جویی آب، صرفه‌جویی مصالح، کیفیت محیط داخلی، مدیریت بهره‌برداری	۱ تا ۳ ستاره
گرین مارک (سنگاپور)	رتبه‌بندی چندسطحی داوطلبانه	سایت پایدار، بهره‌وری آب، انرژی و اتمسفر، مصالح و منابع، کیفیت محیط داخلی، نوآوری	گواهینامه، گلد، گلد پلاس، پلاتینیوم
مبحث ۱۹ مقررات ملی (ایران)	کد حداقلی عملکرد انرژی	مدیریت، بهداشت و سلامت، انرژی، آب، مصالح، زمین و بوم‌شناسی، آلودگی و حمل‌ونقل، پسماند	تطبیق/عدم تطبیق با آستانه حداقلی مصرف انرژی

۲-۲- جایگاه مبحث ۱۹ در چارچوب نظری مقررات حداقلی

از منظر نظری، مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان ایران در دسته کدهای حداقلی عملکرد انرژی قرار می‌گیرد؛ رویکردی که بر خلاف نظام‌های رتبه‌بندی چندسطحی (مانند گرین مارک و ئی.اس.جی.بی)، به‌جای تعریف طیفی از سطوح عملکرد، صرفاً یک آستانه حداقلی تعیین می‌کند (Soltan Ahmadi et al., 2024). این تفاوت پارادایمی پیامد مهمی دارد: کدهای حداقلی به‌طور ذاتی فاقد سازوکار تشویقی برای فراتر رفتن از آستانه هستند و معمولاً بعد پایش عملکرد در دوره بهره‌برداری را پوشش نمی‌دهند (Heravi et al., 2016)؛ در حالی‌که نظام‌های رتبه‌بندی با تعریف سطوح رقابتی مانند (طلایی تا پلاتینیوم) در گرین مارک انگیزه بهبود مستمر ایجاد می‌کنند. کاظمی نیز نشان داد که در غیاب چنین انگیزه‌ای، عواملی مانند مسائل اقتصادی و ضعف اجرا مانع از تحقق کامل بهره‌وری انرژی می‌شوند (Kazemi, 2023). بنابراین، مقایسه مبحث ۱۹ با ئی.اس.جی.بی و گرین مارک صرفاً مقایسه دو عدد یا آستانه نیست، بلکه مقایسه دو پارادایم مقرراتی متفاوت (حداقلی در برابر رتبه‌بندی چندسطحی) است که این پژوهش در پی سنجش فاصله میان آن‌هاست.

۲-۳- ساختمان نزدیک به صفر انرژی

مفهوم صفر انرژی را می‌توان نقطه تلاقی نظری دو رویکرد پیشین دانست: از یک‌سو معیار کمی و قابل سنجش ارائه می‌دهد (سهم تولید تجدیدپذیر از مصرف)، و از سوی دیگر به‌جای صرفاً کاهش بار مصرف، بر توازن میان مصرف و تولید تمرکز دارد. مارسزال و همکاران نشان دادند که به‌دلیل محدودیت‌های اقتصادی و فضایی، اغلب پروژه‌ها به‌جای صفر مطلق، به بازه ۵۰ تا ۹۰ درصد پوشش تجدیدپذیر می‌رسند (Marszal et al., 2011)؛ این یافته نشان می‌دهد که صفر انرژی یک طیف است، نه یک نقطه، و همین ویژگی آن را به چارچوبی مناسب برای مقایسه سیستم‌های رتبه‌بندی که خود چندسطحی هستند، تبدیل می‌کند. سارتوری و همکاران با تأکید بر تعامل ساختمان شبکه (Sartori et al., 2012) و عمرانی و همکاران با تفکیک این حوزه به سه محور بهینه‌سازی مصرف، تولید، ذخیره‌سازی و روش‌شناسی (Omran et al., 2022)، عملاً چارچوبی تحلیلی فراهم کرده‌اند که در این پژوهش برای ساختاردهی به مقایسه مبحث ۱۹ (که عمدتاً بر بهینه‌سازی مصرف تمرکز دارد) با ابعاد گسترده‌تر ئی.اس.جی.بی و گرین مارک (که تولید تجدیدپذیر و مدیریت بهره‌برداری را نیز پوشش می‌دهند) به کار گرفته می‌شود. وی و اسکای نیز نشان دادند دستیابی به این هدف نیازمند اقدام هم‌زمان در چند لایه پوسته است، نه یک راهکار منفرد (Wu & Skye, 2021)؛ نکته‌ای که توجیه نظری ترکیب هم‌زمان الزامات مبحث ۱۹ با سامانه فتوولتائیک^۳ به خصوص در اقلیم گرم و خشک در طرح پژوهش حاضر است (جعفری و صلواتیان، ۱۴۰۲). همچنین، مطالعاتی درباره استفاده از سایبان و جهت‌گیری ساختمان صورت گرفته که در آن بر نقش کنترل تابش خورشیدی و ویژگی‌های هندسی ساختمان در بهبود عملکرد انرژی تأکید کرده‌اند (آرام و ایرجی، ۱۴۰۱؛ شیخی نسلجی و مهدیزاده سراج، ۱۴۰۱).

۲-۴- کربن و انرژی تجدیدپذیر

بررسی ادبیات در کربن و چرخه حیات نشان می‌دهد نابرابری نظری دیگری در نظام‌های ارزیابی وجود دارد: اولانرو و همکاران دریافتند اعتبارات کربن عملیاتی سه برابر بیشتر از کربن نهفته مورد توجه سیستم‌های گواهی‌دهی قرار می‌گیرد (Olanrewaju et al., 2024)، که نشان می‌دهد این نظام‌ها عمدتاً بر مرحله بهره‌برداری متمرکزند، نه کل چرخه حیات؛ همین سوگیری در مبحث ۱۹ نیز به‌طور مشابه دیده می‌شود، چرا که این مبحث نیز عمدتاً معطوف به مصرف دوره بهره‌برداری است. از سوی دیگر، ژانگ و همکاران نشان دادند روش‌های ارزیابی انرژی تجدیدپذیر در نظام‌هایی مانند لید و برییم هنوز جای بهبود دارد (Zhang et al., 2019)، و حسن و همکاران نشان دادند ترکیب راهکارهای غیرفعال و فعال می‌تواند ۳۰ تا ۵۰ درصد مصرف را کاهش دهد (A.H. et al., 2026). علاوه بر این در حوزه ابزارهای خط و مشی‌گذاری توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر سلیمانخانی نشان داد برای تعیین سهم انرژی‌های نو از سبد انرژی باید مجموعه از ابزارهای خط مشی‌گذاری بکار گرفته شود، تا روند استفاده از انرژی‌های نو در ایران بهبود یابد و با توجه به قیمت ارزان نفت و گاز در ایران برای توسعه هر چه بیشتر انرژی‌های تجدیدپذیر باید با کمک تکنولوژی قیمت تمام شده تولید انرژی از طریق انرژی‌های تجدیدپذیر، قابل رقابت با انرژی‌های فسیلی شود (سلیمانخانی، ۱۴۰۱). این شواهد در کنار هم نشان می‌دهند که وزن‌دهی به انرژی تجدیدپذیر، برخلاف وزن‌دهی به کاهش مصرف، هنوز در بسیاری از نظام‌ها از جمله مبحث ۱۹ جایگاه نظری روشنی ندارد؛ خلأیی که مبنای فرضیه ضمنی این پژوهش درباره فاصله مبحث ۱۹ از استانداردهای آسیایی در بعد تجدیدپذیرهاست.

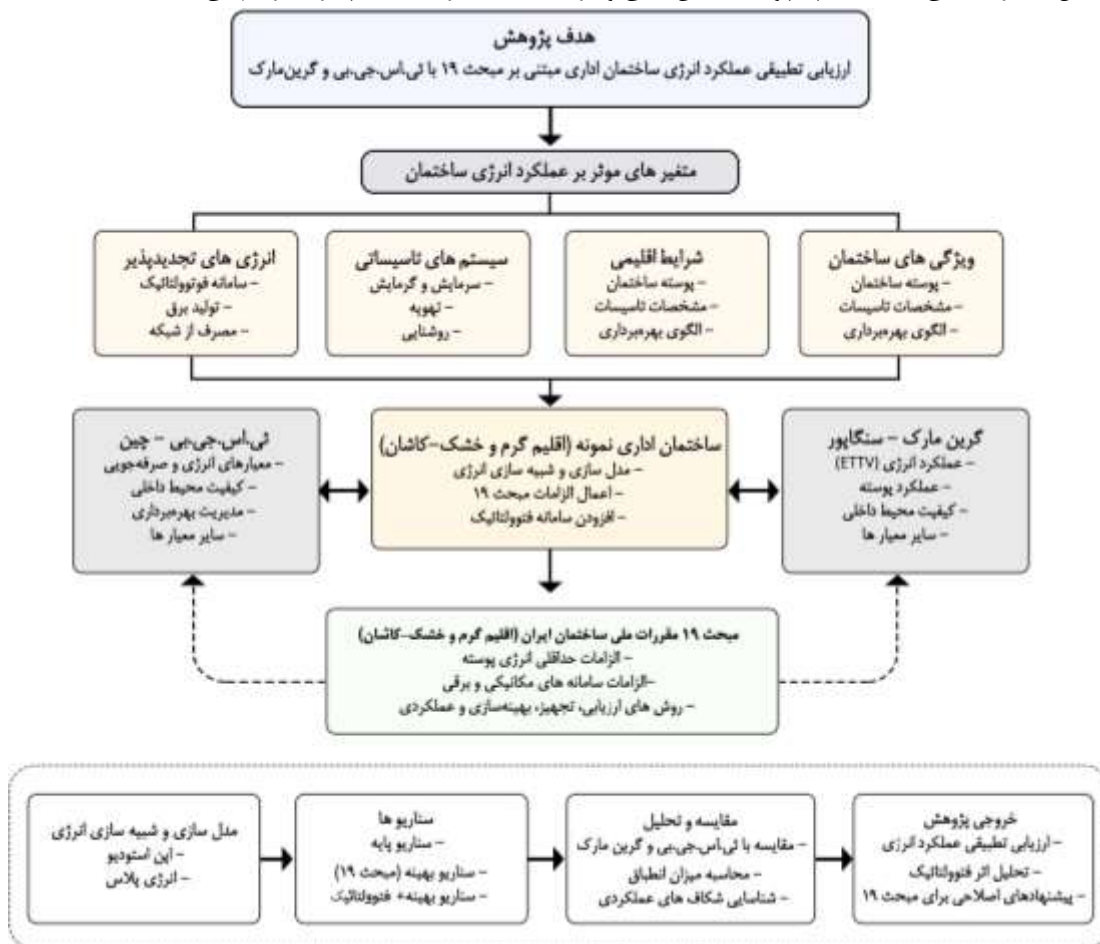
مرور نظری فوق سه شکاف مفهومی را آشکار می‌کند که چارچوب تحلیلی این پژوهش را شکل می‌دهند: (۱) شکاف میان انطباق طراحی و عملکرد واقعی، که ضرورت شبیه‌سازی به‌جای صرفاً تطبیق چک‌لیستی را توجیه می‌کند؛ (۲) شکاف پارادایمی میان



کدهای حداقلی (مبحث ۱۹) و نظام‌های رتبه‌بندی چندسطحی (ئی.اس.جی.بی، گرین مارک)، که چارچوب مقایسه را تعیین می‌کند؛ و (۳) شکاف وزن‌دهی در بعد انرژی تجدیدپذیر و چرخه حیات، که محور اصلی تحلیل تطبیقی این پژوهش خواهد بود. تجربه استاندارد مینرژئ سوئیس (Hall et al., 2014) و کاسی ژاپن با شاخص ترکیبی نسبت کیفیت محیط ساخته‌شده به بار محیطی؛ نشان می‌دهد که عبور از رویکرد حداقلی به رویکرد چندسطحی و ترکیبی، مسیری است که استانداردهای پیشرو طی کرده‌اند؛ مسیری که در پژوهش ماهان و خرم رویی در خصوص سامانه ارزیابی کازی دریافتند که مبحث ۱۹ هنوز در ابتدای آن قرار دارد (ماهان و خرم رویی، ۱۴۰۲).

۲-۵- مدل مفهومی پژوهش

در چارچوب مفهومی پژوهش (تصویر ۱)، شرایط اقلیمی و مشخصات ساختمان به‌عنوان ورودی‌های پایه، بر عملکرد انرژی ساختمان اثر می‌گذارند؛ مبحث ۱۹ چارچوب مقرراتی طراحی و ارزیابی را تعیین می‌کند؛ شبیه‌سازی انرژی شاخص‌های کمی عملکرد ساختمان را استخراج می‌کند؛ سپس این شاخص‌ها با معیارهای متناظر ئی.اس.جی.بی و گرین مارک مقایسه می‌شوند. در مرحله بعد، سامانه فتوولتائیک به‌عنوان راهکار تولید انرژی تجدیدپذیر وارد مدل شده و تأثیر آن بر مصرف نهایی انرژی و برق دریافتی از شبکه ارزیابی می‌شود. بدین ترتیب، چارچوب پژوهش امکان بررسی هم‌زمان عملکرد ساختمان در وضعیت پایه، انطباق با مقررات ملی، مقایسه با چارچوب‌های بین‌المللی و اثر یک راهکار انرژی تجدیدپذیر را فراهم می‌کند.



تصویر ۱- مدل مفهومی پژوهش

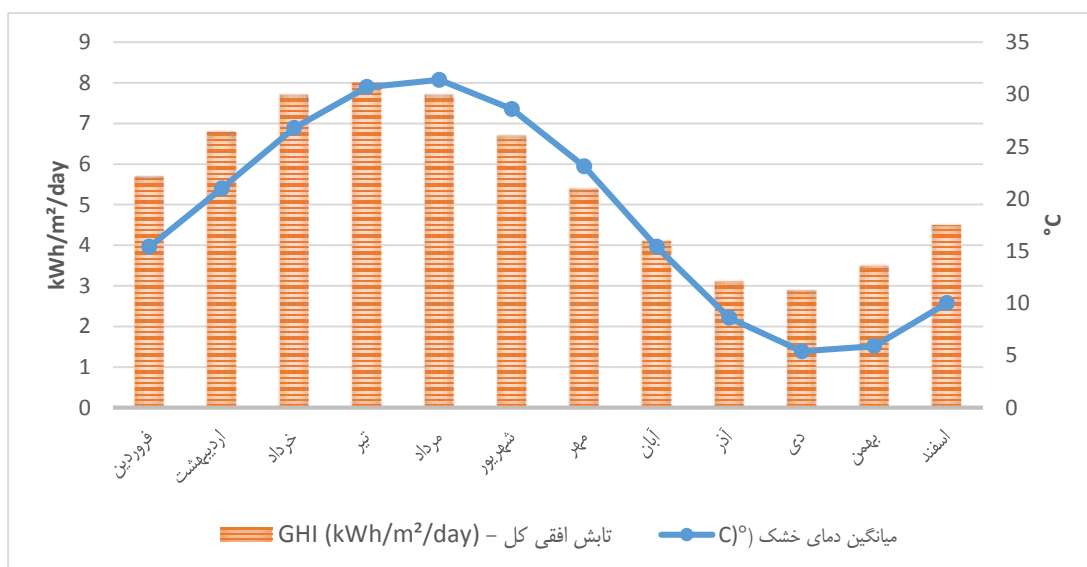
۳- روش پژوهش

پژوهش حاضر از نظر رویکرد، کمی، از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش، توصیفی تحلیلی و مبتنی بر مدل‌سازی و شبیه‌سازی انرژی است. هدف پژوهش، ارزیابی عملکرد انرژی یک ساختمان اداری نمونه در اقلیم گرم و خشک کاشان و بررسی میزان انطباق آن با الزامات مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان (ویرایش ۱۳۹۹) و معیارهای مرتبط در استاندارد ارزیابی ساختمان سبز

چین (ئی.اس.جی.بی) و نظام گرین مارک سنگاپور است. همچنین، تأثیر افزودن سامانه فتوولتائیک بر عملکرد انرژی ساختمان به صورت کمی ارزیابی می شود. بنابراین، روش پژوهش بر پایه ایجاد مدل انرژی ساختمان، شبیه سازی سناریوهای مختلف، استخراج شاخص های کمی عملکرد انرژی و در نهایت مقایسه نتایج با معیارهای سه چارچوب مورد بررسی است. جزئیات هر یک از مراحل و نحوه اجرای آن ها در بخش های بعدی به تفصیل ارائه خواهد شد.

۳-۱- اقلیم و داده های اقلیمی

شهر کاشان به عنوان نمونه اقلیمی پژوهش انتخاب شد. این شهر در مختصات جغرافیایی $59^{\circ}33'$ عرض شمالی و $26^{\circ}51'$ طول شرقی و در ارتفاع ۹۴۰ متر از سطح دریا قرار دارد و بر اساس طبقه بندی کوپن گایگر دارای اقلیم گرم و خشک است. میانگین دمای سالانه حدود ۲۰ درجه سانتی گراد، حداکثر دمای تابستان ۴۲ درجه سانتی گراد، حداقل دمای زمستان صفر درجه سانتی گراد، میانگین بارش سالانه حدود ۱۰۰ میلی متر و رطوبت نسبی متوسط ۳۶ درصد است. بر اساس داده های اقلیمی شهر کاشان، تصویر ۲ میانگین ماهانه دمای خشک بیرون و شدت تابش افقی کل را نشان می دهد. این دو شاخص به ترتیب بیانگر نیاز گرمایشی/سرمایشی و پتانسیل تولید انرژی خورشیدی در منطقه هستند.

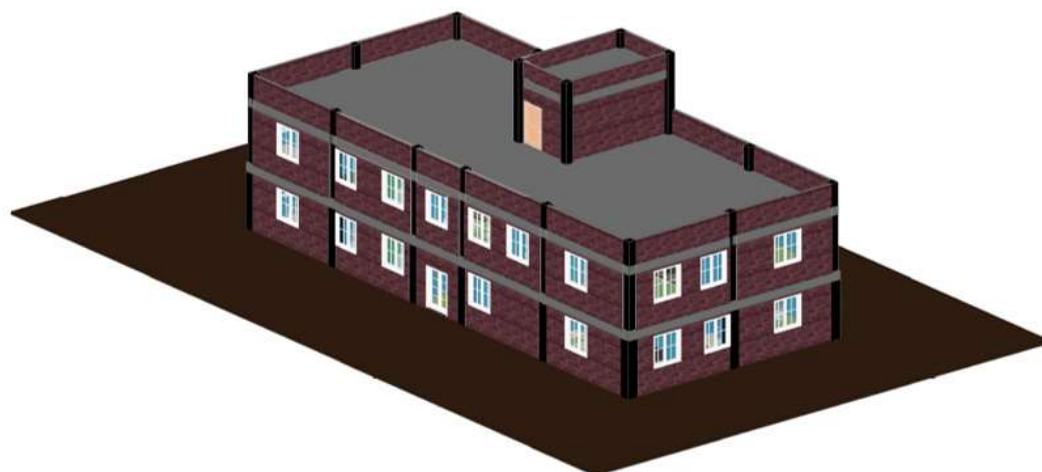


تصویر ۲- داده های میانگین ماهانه دمای خشک و تابش افقی کل براساس اطلاعات اقلیمی شهر کاشان

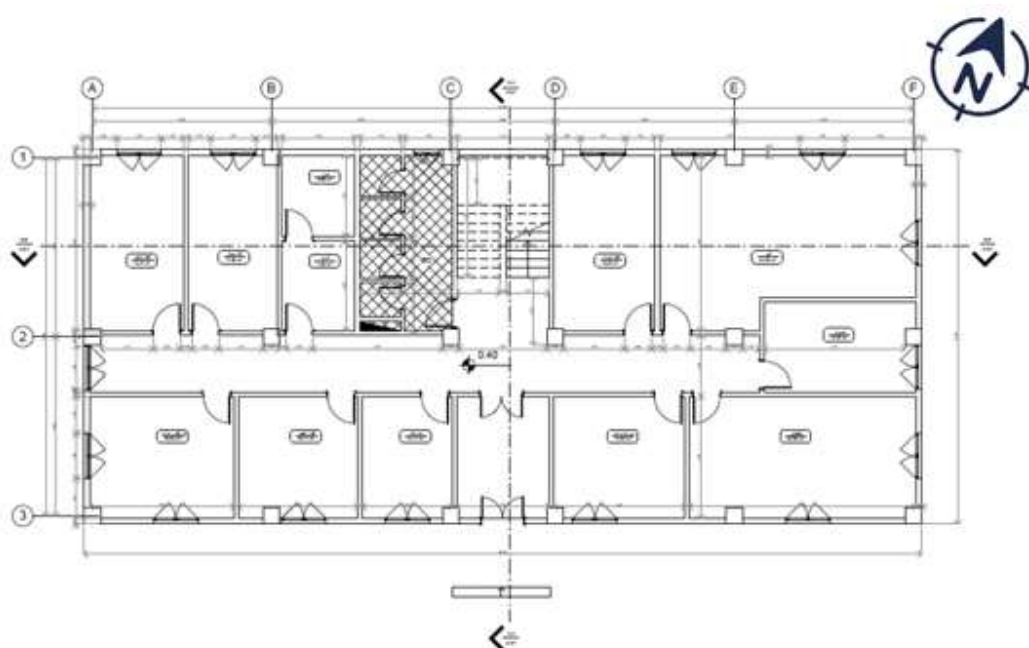
۳-۲- نمونه مورد مطالعه

نمونه مورد مطالعه (تصویر ۳ الف))، یک ساختمان اداری دوطبقه با زیربنای مفید ۴۸۰ مترمربع (۲۴۰ مترمربع در هر طبقه) است که پلان تیپ آن شامل فضاهای اداری باز، اتاق های مدیریت، سالن جلسات و فضاهای خدماتی است (تصویر ۳ ب)). در این پژوهش، سه سناریوی جداگانه تعریف و شبیه سازی شد:

- سناریوی پایه: ساختمان بدون اعمال هرگونه راهکار بهینه سازی انرژی؛ دیوارها و بام فاقد عایق حرارتی پنجره ها تک جداره، سیستم گرمایش شامل پکیج معمولی با راندمان ۷۵٪، سیستم سرمایش کولر گازی با ضریب عملکرد ۱۴/۵ و ۲/۵ و نرخ نفوذ هوا ۰/۸ تعویض هوا در ساعت.
- سناریوی منطبق با مبحث ۱۹ (ویرایش ۱۳۹۹): اعمال تمام الزامات حداقلی مبحث ۱۹ شامل چرخش ۱۵ درجه ای جهت گیری ساختمان، عایق کاری جداره ها دیوار و بام، پنجره های کم گسیل با ضریب انتقال حرارت 0.4 W/m^2 ، سیستم های تأسیساتی کارآمد پکیج چگالشی با راندمان ۹۰٪ و اسپلیت اینورتر با ضریب بهره وری انرژی فصلی ۴/۲ و کاهش نفوذ هوا به ۰/۵ تعویض در ساعت.
- سناریوی تجدیدپذیر: سناریوی شماره ۲ به همراه سامانه فتوولتائیک ۴۰ کیلووات پیک (شامل ۱۱۴ پنل پلی کریستال با توان ۳۵۰ وات) بر روی بام ساختمان.
- نسبت پنجره به دیوار در نماهای جنوبی و شرقی ۳۰ درصد و در نماهای شمالی و غربی ۲۰ درصد لحاظ شد.



(الف)

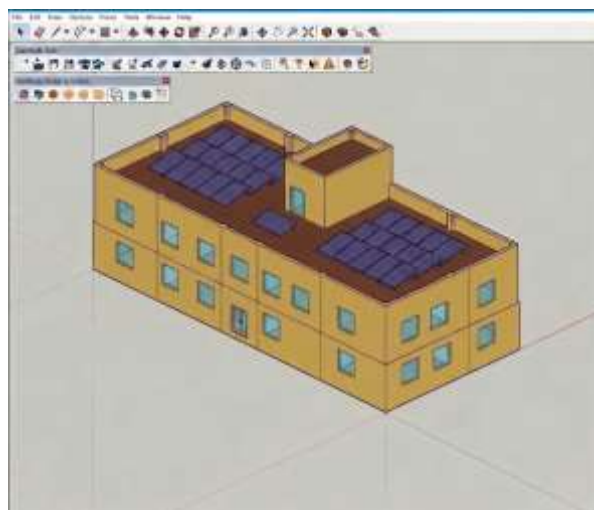


(ب)

تصویر ۳- نمونه مورد مطالعه (الف) مدل سه بعدی (ب) پلان تیپ طبقات

۳-۳- مدل سازی و شبیه سازی انرژی

مدل سه بعدی ساختمان در نرم افزار اسکچاپ^۷ تهیه و از طریق افزونه اُپن استودیو به موتور شبیه سازی انرژی پلاس نسخه ۲۳/۲ متصل شد (تصویر ۴). شبیه سازی با گام زمانی ۶ دقیقه و بر اساس داده های اقلیمی، مشخصات مصالح، برنامه زمانی بهره برداری و بارهای داخلی انجام گرفت. علاوه بر مدل پایه، سناریوی بهینه مطابق الزامات مبحث ۱۹ شامل بهبود مشخصات حرارتی پوسته ساختمان، استفاده از پنجره های کم گسیل، ارتقای سیستم های سرمایش و گرمایش، کاهش نفوذ هوا و نصب سامانه فتوولتائیک ۴۰ کیلووات پیک نیز تعریف و شبیه سازی شد تا امکان مقایسه عملکرد انرژی ساختمان در شرایط مختلف فراهم شود. تنظیمات و فرضیات کلیدی در جدول ۲ ارائه شده است.



تصویر ۴- هندسه ساختمان مدل شده در اسکچاپ و واسطه اپن استودیو

جدول ۲- تنظیمات و فرضیات کلیدی در شبیه سازی

گروه پارامتر	حالت پایه	حالت بهینه
نرم افزار و گام زمانی	اپن استودیو ۳۰۷ - انرژی پلاس ۲۳۰۲ - گام زمانی: ۶ دقیقه	بدون تغییر
جهت یابی ساختمان	جهت گیری اولیه (محور طولی شرقی - غربی)	چرخش ۱۵ درجه نسبت به جنوب بهینه (به گونه ای که جبهه های جنوبی و شرقی بیشترین دریافت تابش مفید را در زمستان و کمترین دریافت را در تابستان داشته باشند)
ضریب انتقال حرارت دیوار خارجی	$1.089 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ، بدون عایق	$0.048 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ، با عایق پلی استایرن
ضریب انتقال حرارت بام	$1.05 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ، بدون عایق	$0.035 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ، با عایق پلی استایرن
ضریب انتقال حرارت پنجره	$5.7 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ، تک جداره شفاف	$2 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ، شیشه کم گسیل
نسبت پنجره به دیوار ۱۸	جنوب و شرق: ۳۰٪ - شمال و غرب: ۲۰٪	بدون تغییر (همراه با سایه بان افقی به عمق ۰.۰۸ متر برای جبهه های جنوبی)
سیستم گرمایش	پکیج معمولی با راندمان ۷۰٪	پکیج چگالشی با راندمان ۹۰٪ (بازده جزئی در ۷۵٪ بار: ۰.۰۸۵)
سیستم سرمایش	کولر گازی با ضریب عملکرد ۲.۰۵	اسپلیت اینورتر با ضریب بهره دوری انرژی فصلی ۴.۰۴۹
تهویه و هوای تازه	۱۰ لیتر بر ثانیه به ازای هر نفر (مطابق اشاره ۶۲/۱)	بدون تغییر
نفوذ هوا	۰.۰۸ نرخ تعویض هوا در ساعت	۰.۰۵ نرخ تعویض هوا در ساعت
زون بندی حرارتی	۵ زون حرارتی	بدون تغییر
شرایط مرزی زمین (کف)	دمای ثابت ۱۸ درجه سانتی گراد در عمق ۱ متری	بدون تغییر
الگوی اشغال	روزهای کاری (شنبه تا چهارشنبه) ۸ تا ۱۷؛ تراکم ۰.۰۱ نفر بر مترمربع	بدون تغییر
تعطیلات	آخر هفته (پنجشنبه و جمعه) + ۲۲ روز تعطیل رسمی در سال	بدون تغییر
روشنایی	۸ W/m^2 با حسگر حضور و کنترل نور روز	بدون تغییر
تجهیزات اداری	رایانه، مانیتور، پرینتر 6 W/m^2 با ضریب همزمانی ۰.۰۷	بدون تغییر
ترموستات گرمایش	21°C (اشغال) / 16°C (غیر اشغال)	بدون تغییر
ترموستات سرمایش	24°C (اشغال) / 32°C (غیر اشغال)	بدون تغییر
ضریب انتشار کربن دی اکسید	$0.050 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$	بدون تغییر
سامانه فتوولتائیک	-	۱۱۴ عدد سامانه فتوولتائیک 40 kWp ، پنل پلی کریستال 350 واتی، سطح کل 228 m^2 ، راندمان مازول 17.05% ، راندمان اینورتر 96% ، تلفات سیستم



۱۲٪ (گردوغبار، کابل، تطابق)، زاویه ۲۵° رو به جنوب، شبیه‌سازی با مازول فتوولتائیک در انرژی پلاس		
بررسی بیلان انرژی سالانه با خطای کمتر از ۰.۵٪ و آزمون حساسیت پارامترهای کلیدی (ضرب انتقال حرارت و نفوذ هوا) جهت تأیید همبستگی منطقی نتایج	راستی آزمایشی مدل	

۳-۴- راستی آزمایشی مدل شبیه‌سازی

راستی آزمایشی مدل شبیه‌سازی در این پژوهش با رویکردی چندمرحله‌ای و کمی انجام شده است تا اطمینان از صحت و دقت نتایج حاصل از انرژی پلاس فراهم شود. با توجه به عدم دسترسی به داده‌های اندازه‌گیری شده از ساختمان نمونه، راستی آزمایشی بر اساس سه روش مکمل انجام شده است:

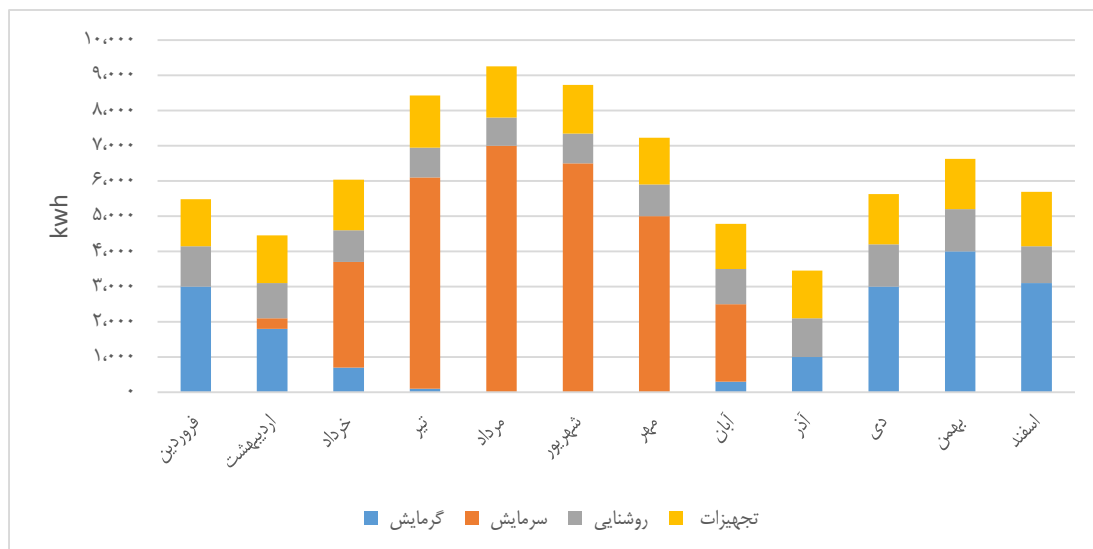
- بیلان انرژی سالانه: در هر دو سناریوی پایه و بهینه، خطای بیلان انرژی سالانه کمتر از ۰.۵٪ محاسبه شد که نشان‌دهنده همگرایی عددی مناسب حلگرهای انرژی پلاس است.
- آزمون حساسیت پارامترهای کلیدی: نتایج آزمون حساسیت نشان داد که تغییرات $\pm 10\%$ در ضریب انتقال حرارت دیوارها، به ترتیب منجر به تغییرات $\pm 4\%/2$ و $\pm 3\%/8$ در مصرف سالانه انرژی در حالت پایه شد. همچنین، تغییرات $\pm 1\%/10$ در نرخ نفوذ هوا، مصرف سالانه را به ترتیب $\pm 2\%/1$ و $\pm 1\%/9$ تغییر داد.
- مقایسه با مطالعات مشابه: شدت مصرف انرژی در حالت پایه (۱۵۷/۹۶ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال) و در حالت بهینه (۳۷/۱۹ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال) در محدوده‌ی گزارش شده برای ساختمان‌های اداری مشابه در اقلیم‌های گرم و خشک ایران و جهان قرار دارد (Fatemi et al., 2023).

۴- تحلیل داده‌ها

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی انرژی ساختمان در سناریوهای مختلف مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. تحلیل داده‌ها با هدف شناسایی میزان تأثیر راهکارهای بهینه‌سازی بر مصرف انرژی و مقایسه عملکرد ساختمان در شرایط پایه، حالت منطبق با الزامات مبحث ۱۹ و حالت مجهز به سامانه فتوولتائیک انجام شده است. ابتدا الگوی مصرف انرژی در مقیاس ماهانه و سالانه بررسی و تغییرات مصرف در دوره‌های مختلف سال تحلیل می‌شود. سپس سهم هر یک از راهکارهای بهینه‌سازی، شامل بهبود عملکرد حرارتی پوسته، جهت‌یابی، پنجره‌های کم‌گسیل، سایه‌بان و ارتقای سامانه‌های گرمایش و سرمایش، در کاهش مصرف انرژی ارزیابی خواهد شد. در ادامه، شاخص‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی با معیارهای مرتبط در استاندارد ئی.اس.جی.بی چین و نظام گرین مارک سنگاپور مقایسه می‌شوند تا میزان انطباق و شکاف عملکردی ساختمان مشخص شود. در نهایت، اثر استفاده از سامانه فتوولتائیک بر تولید انرژی و کاهش وابستگی ساختمان به برق شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۱- تحلیل مصرف انرژی و کاهش‌ها

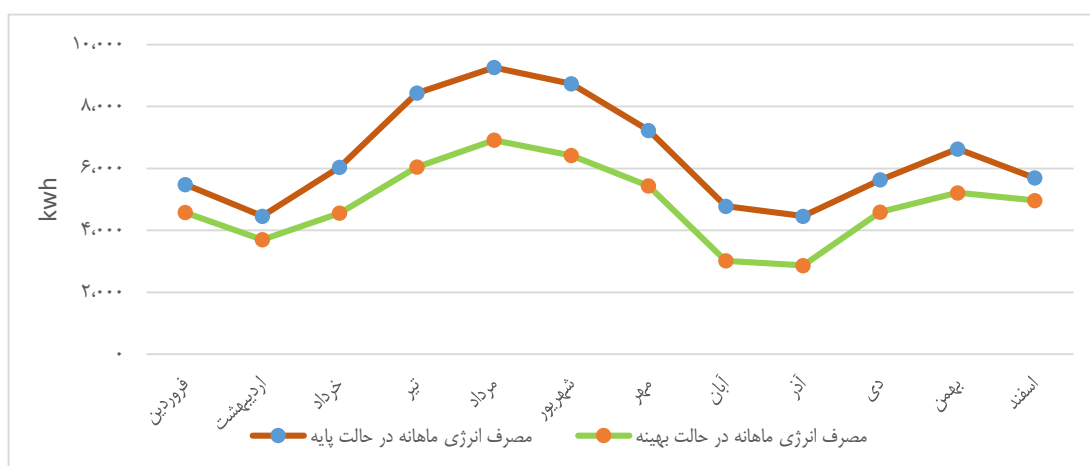
شبیه‌سازی سالانه انرژی در انرژی پلاس برای سناریوهای پایه، بهینه و بهینه + فتوولتائیک انجام شد. بررسی توزیع ماهانه مصرف نشان داد بیشترین مصرف در ماه‌های تیر و مرداد رخ داده که با اوج بار سرمایشی اقلیم گرم و خشک کاشان مطابقت دارد؛ پس از بهینه‌سازی، بیشترین میزان کاهش مربوط به همین دوره‌های اوج بار سرمایشی بود (تصویر ۵ (الف الی ج)). نتایج نشان داد مصرف سالانه انرژی از ۷۵۸۲۳ کیلووات ساعت در سناریوی پایه به ۵۸۳۰۱ کیلووات ساعت در سناریوی بهینه کاهش یافت که معادل کاهش ۲۳/۱۱ درصدی است (تصویر ۶).



(الف)



(ب)



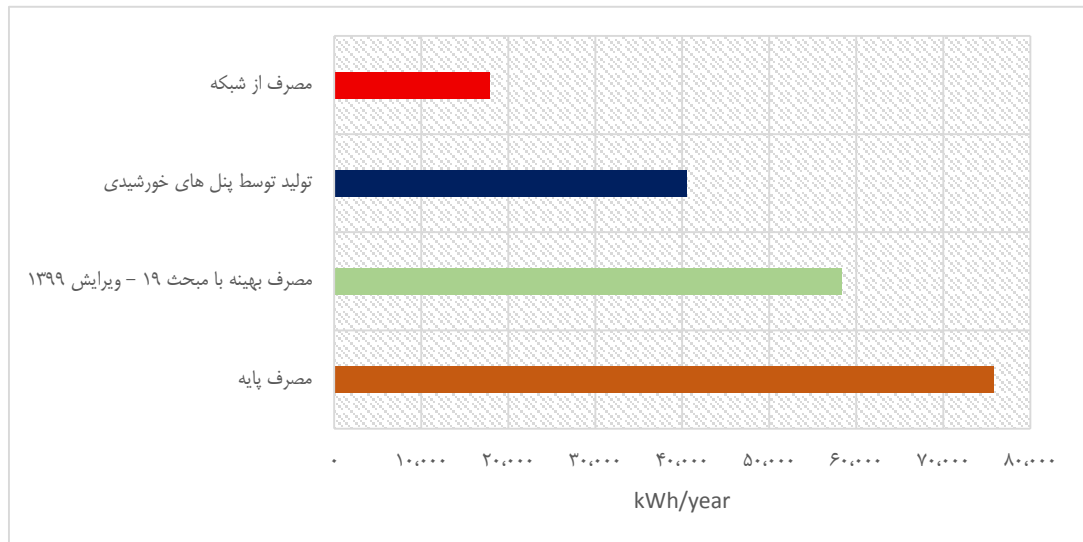
(ج)

تصویر ۵- مصرف ماهانه انرژی ساختمان در حالت (الف) پایه (ب) بهینه (ج) مقایسه پایه و بهینه

نتایج شبیه‌سازی نشان داد مصرف سالانه انرژی از ۷۵۸۲۳ کیلووات‌ساعت در سناریوی پایه به ۵۸۳۰۱ کیلووات‌ساعت در سناریوی بهینه کاهش یافت (۲۳٪/۱۱). افزودن سامانه‌ی فتوولتائیک ۴۰ کیلووات‌پیک با تولید سالانه ۴۰۴۵۱ کیلووات‌ساعت، مصرف



خالص از شبکه را به ۱۷۸۵۰ کیلووات ساعت رساند. بدین ترتیب، پنل‌ها حدود ۶۹/۴٪ از تقاضای انرژی ساختمان در سناریوی بهینه را تأمین کردند و تنها ۳۰/۶٪ از شبکه دریافت شد. هرچند این میزان تولید برای دستیابی کامل به شرایط نزدیک به صفر انرژی کافی نیست، اما وابستگی به شبکه را به‌طور قابل توجهی کاهش داده است. ترکیب راهکارهای غیرفعال و بهبود تأسیسات با تولید تجدیدپذیر، رویکردی مؤثر در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و حرکت به‌سوی ساختمان‌های کم‌مصرف در اقلیم گرم و خشک محسوب می‌شود.



تصویر ۶- نمودار نتایج شبیه‌سازی انرژی سالانه

۴-۲- تحلیل سهم راهکارها در کاهش مصرف

برای تعیین سهم هر راهکار در کاهش ۲۳/۱۱ درصدی مصرف، تحلیل پارامتریک متوالی با افزودن گام‌به‌گام راهکارها به مدل پایه انجام شد (جدول ۳). نتایج نشان داد جهت‌یابی بهینه (۷/۰۳٪) و عایق‌کاری حرارتی پوسته (۵/۰۸٪) بیشترین سهم را دارند و پس از آن به‌ترتیب سامانه‌های گرمایش/سرمایش (۴/۵۲٪)، پنجره‌های کم‌گسیل (۳/۳۶٪) و سایه‌بان افقی (۳/۱۲٪) قرار می‌گیرند. تقدم سهم راهکارهای مرتبط با پوسته نشان می‌دهد در اقلیم گرم و خشک کاشان، بار حرارتی ورودی از جداره‌ها (به‌ویژه در تابستان) تعیین‌کننده‌ترین مؤلفه در مصرف سالانه انرژی است. سهم کمتر سایه‌بان نسبت به عایق‌کاری دیوارها نیز بیانگر آن است که در این اقلیم، مدیریت هدایت حرارتی از طریق کاهش ضریب انتقال حرارت جداره‌ها، اولویت بیشتری نسبت به مدیریت تابش خورشید از طریق سایه‌بان دارد. این ترتیب‌بندی سهم راهکارها با پژوهش‌های پیشین در اقلیم‌های مشابه هم‌راستا است (Hong et al., 2026).

جدول ۳- سهم هر راهکار در کاهش ۲۳/۱۱ درصدی مصرف انرژی (تحلیل پارامتریک متوالی)

راهکار	سهم در کاهش مصرف انرژی
جهت‌یابی بهینه	۷/۰۳
عایق‌کاری حرارتی پیوسته	۵/۰۸
سیستم گرمایش و سرمایش کارآمد	۴/۵۲
پنجره‌های کم‌گسیل	۳/۳۶
سایه‌بان افقی	۳/۱۲
جمع کل	۲۳/۱۱

۴-۳- ارزیابی بر اساس استاندارد ئی.اس.جی.بی چین

برای ارزیابی عملکرد ساختمان بر اساس استاندارد ئی.اس.جی.بی، شاخص‌های کلیدی مربوط به بخش انرژی و صرفه‌جویی در منابع مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه ئی.اس.جی.بی یک سیستم امتیازی با حداقل امتیاز مورد نیاز برای کسب سطوح مختلف گواهی (یک‌ستاره، دوستاره و سه‌ستاره) است، ارزیابی پروژه در این پژوهش صرفاً محدود به الزامات الزامی (پیش‌نیاز)

مرتبط با عملکرد انرژی، پوسته حرارتی، تهویه و انرژی تجدیدپذیر شده و معیارهای امتیازی مربوط به سایر حوزه‌ها نظیر آب، مصالح و کیفیت محیط داخلی، به دلیل عدم تناسب مستقیم با اهداف پژوهش حاضر، از دامنه بررسی خارج شده‌اند. انتخاب این زیرمجموعه از شاخص‌ها بر اساس امکان استخراج مستقیم آن‌ها از خروجی‌های شبیه‌سازی انرژی پلاس صورت گرفت تا امکان مقایسه کمی و مستند با نتایج بخش ۴-۱ فراهم شود. بر همین اساس، در جدول ۴ برای هر شاخص، الزام رسمی استاندارد، مقدار به‌دست‌آمده از پروژه، و وضعیت تطابق (کامل، نسبی یا عدم تطابق) به‌طور جداگانه گزارش شده است. بدین ترتیب، جدول ۳ نه‌تنها وضعیت کلی انطباق را نشان می‌دهد، بلکه مبنای روش‌شناختی محدودسازی دامنه ارزیابی را نیز برای خواننده شفاف می‌سازد.

جدول ۴- تطابق پروژه با الزامات استاندارد ئی.اس.جی.بی

شاخص ارزیابی	الزامات ئی.اس.جی.بی	پروژه	تطابق	شاخص ارزیابی
عملکرد حرارتی پوسته (ضریب انتقال حرارت)	مطابق با استانداردهای ملی چین	$0.48 = 0.35 / \text{بام}$	✓ (نسبی)	عملکرد حرارتی پوسته (ضریب انتقال حرارت)
محدودیت (نسبت پنجره به دیوار)	حداکثر ۳۰٪ در اقلیم گرم	۳۰٪ (جنوب)، ۳۰ (شمال)	✓	محدودیت (نسبت پنجره به دیوار)
شبیه‌سازی انرژی	الزامی	انجام شده	✓	شبیه‌سازی انرژی
صرفه‌جویی در انرژی	حداقل ۱۵٪ بهبود نسبت به خط پایه	۲۳٪ بهبود	✓	صرفه‌جویی در انرژی
انرژی تجدیدپذیر	امتیاز تشویقی	۴۰۵۰۰ kWh/year	✓ جزئی	انرژی تجدیدپذیر
کنترل نفوذپذیری هوا	الزامات مشخص	تست نشده	X	کنترل نفوذپذیری هوا
مدیریت بهره‌برداری	پایش و بهینه‌سازی	فاقد سیستم	X	مدیریت بهره‌برداری
تهویه مکانیکی با بازیابی حرارت	توصیه شده	ندارد	X	تهویه مکانیکی با بازیابی حرارت

۴-۴- ارزیابی بر اساس استاندارد گرین‌مارک سنگاپور

ارزیابی بر اساس استاندارد گرین‌مارک ۲۰۲۱ با تمرکز بر معیارهای انرژی و عملکرد حرارتی پوسته انجام شد. شاخص انتقال حرارت پوسته ساختمان به‌عنوان یکی از معیارهای کلیدی این سیستم محاسبه شد. نتایج ارزیابی در جدول ۵ ارائه شده است. برای دقیق‌سازی ارزیابی این شاخص، محاسبه‌ای بر اساس فرمول رسمی ضوابط عملکرد حرارتی پوسته ساختمان و با استفاده از هندسه واقعی پروژه (ابعاد پلان ۱۰×۲۴ متر، ارتفاع کل ۶/۴ متر) انجام شد. با در نظر گرفتن مساحت دقیق هر جبهه، ضرایب اصلاح تابش رسمی به تفکیک جهت، و ضریب مؤثر سایبان^۲ جنوبی (نسبت عمق سایبان به ارتفاع پنجره ۵۳/۰)، مقادیر شاخص انتقال حرارت پوسته ساختمان به تفکیک جبهه به‌ترتیب برابر ۲۳/۴ (جنوب)، ۳۹ (شرق)، ۲۱/۵ (شمال) و ۲۹/۸ (غرب) وات بر مترمربع به‌دست آمد.

جدول ۵- تطابق پروژه با الزامات استاندارد گرین‌مارک

معیار	الزامات گرین‌مارک ۲۰۲۱	پروژه	تطابق	معیار
شاخص انتقال حرارت پوسته ساختمان	حداکثر 50 Wh/m^2 (برای ساختمان‌های غیرمسکونی)	26 Wh/m^2 (محاسبه شده)	✓ (نسبی)	شاخص انتقال حرارت پوسته ساختمان
ضریب انتقال حرارت دیوار	$0.25 \text{ Wh/m}^2\text{K}$	$0.48 \text{ Wh/m}^2\text{K}$	X	ضریب انتقال حرارت دیوار
ضریب انتقال حرارت بام	$0.2 \text{ Wh/m}^2\text{K}$	$0.35 \text{ Wh/m}^2\text{K}$	X	ضریب انتقال حرارت بام
ضریب انتقال حرارت پنجره	$1.2 \text{ Wh/m}^2\text{K}$	$2 \text{ Wh/m}^2\text{K}$	X	ضریب انتقال حرارت پنجره
تهویه مکانیکی	الزامی برای ساختمان‌های با تراکم بالا	ندارد	X	تهویه مکانیکی
انرژی تجدیدپذیر	حداقل ۲۰٪ برای سطوح بالاتر	تأمین جزئی	X	انرژی تجدیدپذیر
نفوذپذیری هوا	آزمون بلوتردور الزامی	انجام نشده	X	نفوذپذیری هوا
مدیریت انرژی	پایش و گزارش‌دهی مستمر	فاقد سیستم	X	مدیریت انرژی

۵- یافته‌ها و بحث

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که اعمال مجموعه راهکارهای بهینه‌سازی منطبق با مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، شامل بهبود عملکرد حرارتی پوسته، استفاده از پنجره‌های کم‌گسیل، ارتقای سامانه‌های سرمایش و گرمایش و کاهش نفوذ هوا، موجب کاهش



۲۳/۱۱ درصدی مصرف سالانه انرژی ساختمان نسبت به حالت پایه شد. در میان این راهکارها، بهبود عملکرد حرارتی پوسته و کاهش انتقال حرارت از جداره‌ها بیشترین تأثیر را بر کاهش مصرف انرژی داشتند. این نتیجه با توجه به غلبه بار سرمایشی در ساختمان مورد مطالعه در اقلیم گرم و خشک کاشان قابل تبیین است؛ زیرا کاهش ورود حرارت از پوسته در دوره‌های گرم سال، بار مورد نیاز سامانه سرمایش را به‌طور مستقیم کاهش می‌دهد. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که الزامات مبحث ۱۹، در صورت اجرای هم‌زمان مجموعه‌ای از راهکارهای پوسته و تأسیسات، می‌تواند به کاهش قابل توجه مصرف انرژی در ساختمان‌های اداری این اقلیم منجر شود.

بر اساس مدل نهایی، کاهش ضریب انتقال حرارت اجزای اصلی پوسته، استفاده از شیشه کم‌گسیل، کاهش نرخ نفوذ هوا و بهبود بازده سامانه‌های سرمایش و گرمایش، در کنار استفاده از سامانه فتوولتائیک، به‌عنوان مؤثرترین مجموعه راهکارهای بهینه‌سازی شناسایی شدند. مقایسه حالت پایه و حالت بهینه نشان داد که بخش اصلی کاهش مصرف انرژی پیش از ورود سامانه فتوولتائیک حاصل می‌شود و تولید انرژی تجدیدپذیر عمدتاً در کاهش مصرف خالص و وابستگی ساختمان به شبکه نقش دارد. این تفکیک اهمیت دارد، زیرا نشان می‌دهد دستیابی به عملکرد انرژی بهتر صرفاً از طریق تولید انرژی تجدیدپذیر امکان‌پذیر نیست و ابتدا باید تقاضای انرژی ساختمان از طریق راهکارهای غیرفعال و بهبود سامانه‌های تأسیساتی کاهش یابد.

سامانه فتوولتائیک ۴۰ کیلووات‌پیک نصب‌شده در ساختمان توانست سالانه ۴۰۵۰۰ کیلووات‌ساعت انرژی تولید کند. با وجود این، انرژی تولیدشده برای تأمین کامل تقاضای سالانه ساختمان کافی نبود و همچنان ۱۷۸۵۰ کیلووات‌ساعت انرژی از شبکه دریافت شد. بنابراین، ساختمان مورد مطالعه با وجود کاهش قابل توجه مصرف انرژی و بهره‌گیری از انرژی خورشیدی، هنوز به شرایط ساختمان نزدیک به صفر انرژی دست نیافته است. این نتیجه نشان می‌دهد که در اقلیم گرم و خشک، ترکیب کاهش تقاضای انرژی با تولید انرژی تجدیدپذیر رویکرد مناسب‌تری نسبت به اتکای صرف بر تولید برق خورشیدی است. یافته حاضر با مطالعاتی که دستیابی به ساختمان‌های کم‌انرژی و صفر انرژی را حاصل تعامل راهکارهای غیرفعال، بهبود سامانه‌های فعال و تولید انرژی تجدیدپذیر می‌دانند، هم‌راستا است.

مقایسه عملکرد ساختمان با استانداردهای ئی.اس.جی.بی و گرین مارک (جدول ۶) نشان داد که رعایت الزامات مبحث ۱۹، اگرچه کاهش قابل توجه مصرف انرژی را به همراه دارد، به‌تنهایی برای تأمین تمام الزامات یک نظام جامع ارزیابی ساختمان سبز کافی نیست. ساختمان در ارزیابی ئی.اس.جی.بی در حوزه صرفه‌جویی انرژی عملکرد مطلوب‌تری داشت و شاخص هم‌راستایی آن با این استاندارد ۵۰ درصد (۴ از ۸ معیار) به دست آمد. در مقابل، شاخص هم‌راستایی ساختمان با گرین مارک ۱۲/۵ درصد (۱ از ۸ معیار) بود. این اختلاف نشان می‌دهد که فاصله ساختمان با ئی.اس.جی.بی نسبتاً محدودتر است، در حالی که الزامات گرین مارک در برخی حوزه‌ها فراتر از چارچوب متعارف مبحث ۱۹ قرار می‌گیرند.

در مورد گرین مارک، ساختمان در شاخص انتقال حرارتی پوسته عملکرد قابل قبولی داشت، اما در الزامات تجویزی مربوط به ضرایب انتقال حرارت اجزای منفرد پوسته، شامل دیوار، بام و پنجره، با محدودیت مواجه شد. این نتیجه از یک نکته مهم در مقایسه استانداردها پرده برمی‌دارد: عملکرد مناسب یک شاخص کلی پوسته لزوماً به معنای تأمین الزامات مستقل تمام اجزای پوسته نیست. به بیان دیگر، ساختمان مورد مطالعه توانست در ارزیابی کلی عملکرد حرارتی پوسته وضعیت مناسبی داشته باشد، اما به دلیل مقادیر بالاتر ضرایب انتقال حرارت برخی اجزاء، نتوانست الزامات تجویزی گرین مارک را به‌طور کامل تأمین کند.

جدول ۶- مقایسه جامع الزامات مبحث ۱۹ با استانداردهای ئی.اس.جی.بی و گرین مارک.

شاخص ارزیابی	مبحث ۱۹	ئی.اس.جی.بی	گرین مارک
الزامات ضریب انتقال حرارت	✓ (حداقلی)	✓ (سخت‌گیرانه‌تر)	✓ (بسیار سخت‌گیرانه)
محدودیت نسبت پنجره به دیوار	✓ ۳۰٪	✓ (۳۰٪ در اقلیم گرم)	✓ (توصیه‌شده)
شبیه‌سازی انرژی	✓ (الزامی)	✓ (الزامی)	✓ (الزامی)
کنترل نفوذپذیری هوا	X	✓ (الزامی)	✓ (الزامی)
تهویه مکانیکی با بازایی حرارتی	X	✓ (توصیه‌شده)	✓ (الزامی)
انرژی تجدیدپذیر	X	✓ (امتیازی)	✓ (الزامی برای سطوح بالا)
مدیریت بهره‌برداری	X	✓	✓
ارزیابی کربن چرخه حیات	X	✓	✓ (در نسخه جدید)
شاخص تخصصی اقلیمی	X	✓ (منطقه‌بندی اقلیمی)	✓ شاخص انتقال حرارت پوسته ساختمان برای اقلیم گرمسیری

مهم‌تر از آن، مقایسه تطبیقی نشان داد که تفاوت اصلی میان مبحث ۱۹ و دو نظام مورد بررسی تنها در میزان سخت‌گیری الزامات حرارتی نیست، بلکه در دامنه موضوعات مورد ارزیابی نیز وجود دارد. مبحث ۱۹ عمدتاً بر کنترل مصرف انرژی و عملکرد حرارتی ساختمان تمرکز دارد، در حالی که ئی.اس.جی.بی و گرین مارک موضوعاتی مانند کنترل نفوذپذیری هوا، عملکرد سامانه‌های تهویه، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، مدیریت انرژی در مرحله بهره‌برداری و برخی جنبه‌های چرخه حیات را نیز در ارزیابی خود وارد می‌کنند. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد که فاصله مبحث ۱۹ با نظام‌های پیشرفته‌تر صرفاً به افزایش یا کاهش یک حد عددی محدود نیست، بلکه به تفاوت در رویکرد کلی ارزیابی عملکرد ساختمان مربوط می‌شود.

این یافته با مطالعات تطبیقی نظام‌های ارزیابی ساختمان سبز در کشورهای آسیایی نیز هم‌راستا است که نشان داده‌اند این نظام‌ها، علاوه بر شاخص‌های انرژی، ابعاد گسترده‌تری از عملکرد ساختمان را در نظر می‌گیرند. کاهش ۲۳ درصدی مصرف انرژی در سناریوی بهینه با کاهش مصرف گزارش شده در پژوهش (Filippini & Obrist, 2022) که حدود ۲۵ درصد کاهش مصرف انرژی را در ساختمان‌های کم‌مصرف گزارش کردند، در یک محدوده قابل مقایسه قرار دارد، هرچند تفاوت در اقلیم و نوع کاربری ساختمان‌ها مانع از مقایسه مستقیم می‌شود. همچنین، تأثیر قابل توجه بهبود عملکرد پوسته بر کاهش مصرف انرژی با نتایج (Babu et al., 2017; Hong et al., 2026) هم‌راستا است. از سوی دیگر، نتیجه پژوهش حاضر درباره ضرورت ترکیب راهکارهای کاهش تقاضای انرژی با تولید انرژی تجدیدپذیر، با یافته‌های (Ahmed et al., 2022; Maghami et al., 2025) مطابقت دارد. بنابراین، اگرچه مقدار صرفه‌جویی انرژی در مطالعات مختلف به دلیل تفاوت اقلیم، کاربری، مشخصات ساختمان و ترکیب راهکارهای بهینه‌سازی متفاوت است، جهت کلی نتایج پژوهش حاضر با شواهد موجود در ادبیات موضوع سازگار است. با این حال، نکته قابل توجه در پژوهش حاضر آن است که مبحث ۱۹ حتی در محدوده اصلی تمرکز خود، یعنی کاهش مصرف انرژی، توانسته است عملکرد قابل قبولی ایجاد کند. بنابراین، مسئله اصلی را نمی‌توان صرفاً ناکارآمدی مبحث ۱۹ دانست؛ بلکه می‌توان آن را محدود بودن دامنه پوشش آن نسبت به نظام‌های جامع‌تر ارزیابی ساختمان سبز دانست.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مبحث ۱۹ می‌تواند به‌عنوان یک پایه مؤثر برای کاهش مصرف انرژی ساختمان‌های اداری در اقلیم گرم و خشک مورد استفاده قرار گیرد، اما برای دستیابی به چارچوبی جامع‌تر، لازم است الزامات آن از تمرکز صرف بر عملکرد حرارتی و انرژی عملیاتی فراتر رفته و موضوعاتی مانند کنترل نفوذپذیری هوا، تهویه با بازیابی حرارت، انرژی‌های تجدیدپذیر و مدیریت عملکرد ساختمان در مرحله بهره‌برداری را نیز پوشش دهد. از این منظر، یافته‌های پژوهش نه تنها عملکرد فعلی مبحث ۱۹ را ارزیابی می‌کند، بلکه حوزه‌هایی را که می‌توانند در بازنگری‌های آتی مقررات مورد توجه قرار گیرند نیز مشخص می‌سازد.

۶- نتیجه گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی تطبیقی عملکرد انرژی یک ساختمان اداری در شهر کاشان بر اساس الزامات مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان ایران و مقایسه آن با چارچوب‌های ارزیابی ئی.اس.جی.بی چین و گرین مارک سنگاپور انجام شد. در پاسخ به پرسش اصلی پژوهش، یافته‌ها نشان داد ساختمان اداری منطبق با الزامات مبحث ۱۹ در بعد کاهش مصرف انرژی عملکرد قابل قبولی دارد و شاخص هم‌راستایی آن با ئی.اس.جی.بی و گرین مارک به ترتیب ۵۰ و ۵/۱۲ درصد است؛ اما در حوزه‌های نفوذپذیری هوا، تهویه مکانیکی، انرژی تجدیدپذیر و مدیریت بهره‌برداری با هر دو استاندارد فاصله معناداری دارد. همچنین افزودن سامانه فتوولتائیک ۴۰ کیلووات پیک اگرچه وابستگی ساختمان به برق شبکه را کاهش داد، اما به‌تنهایی برای پوشش این شکاف و دستیابی به شرایط نزدیک به صفر انرژی کافی نبود. نتایج نشان داد که اجرای مجموعه راهکارهای بهینه‌سازی منطبق با مبحث ۱۹، شامل بهبود عملکرد حرارتی پوسته، استفاده از پنجره‌های کم‌گسیل، کاهش نفوذ هوا و ارتقای سامانه‌های سرمایش و گرمایش، توانست مصرف سالانه انرژی ساختمان را ۲۳/۱۱ درصد نسبت به حالت پایه کاهش دهد. همچنین افزودن سامانه فتوولتائیک ۴۰ کیلووات پیک، با تولید سالانه ۴۰۵۰۰ کیلووات ساعت، وابستگی ساختمان به شبکه را کاهش داد، اما برای دستیابی به شرایط نزدیک به صفر انرژی کافی نبود. بنابراین، پاسخ به پرسش اصلی پژوهش نشان می‌دهد که مبحث ۱۹ می‌تواند مبنای مؤثری برای کاهش مصرف انرژی ساختمان‌های اداری در اقلیم گرم و خشک باشد، اما تحقق سطوح بالاتر عملکرد انرژی نیازمند ترکیب الزامات پوسته و تأسیسات با تولید انرژی تجدیدپذیر و مدیریت عملکرد ساختمان در مرحله بهره‌برداری است.

مقایسه تطبیقی نشان داد که فاصله میان مبحث ۱۹ و نظام‌های ارزیابی مورد بررسی، تنها به سخت‌گیری بیشتر در الزامات حرارتی محدود نمی‌شود، بلکه به تفاوت در دامنه ارزیابی نیز مربوط است. در حالی که مبحث ۱۹ عمدتاً بر مصرف انرژی و



عملکرد حرارتی ساختمان تمرکز دارد، ئی.اس.جی.بی و به‌ویژه گرین مارک موضوعات گسترده‌تری مانند کنترل نفوذپذیری هوا، عملکرد سامانه‌های تهویه، انرژی‌های تجدیدپذیر و مدیریت انرژی در مرحله بهره‌برداری را مورد توجه قرار می‌دهند. از این رو، کاربرد اصلی یافته‌های پژوهش برای حوزه معماری و فناوری ساختمان، فراهم کردن مبنایی برای شناسایی نقاط قوت و خلأهای مقررات ملی در مقایسه با چارچوب‌های جامع‌تر ارزیابی ساختمان سبز است. نتایج می‌تواند در بازنگری الزامات میحث ۱۹ و همچنین در تدوین معیارهای ارزیابی عملکرد انرژی ساختمان‌های اداری در اقلیم‌های مختلف ایران مورد استفاده قرار گیرد.

این پژوهش با چهار محدودیت اصلی مواجه است. نخست، تحلیل بر اساس یک ساختمان اداری در اقلیم گرم و خشک کاشان انجام شده و تعمیم نتایج به سایر تیپولوژی‌های ساختمانی و اقلیم‌های ایران نیازمند بررسی‌های بیشتر است. دوم، به دلیل نبود ساختمان ساخته‌شده مطابق سناریوی بهینه و فقدان داده‌های واقعی مصرف انرژی، امکان اعتبارسنجی کامل مدل با داده‌های میدانی فراهم نبود. سوم، نرخ نفوذ هوا بر اساس مقادیر فرضی و متعارف در نظر گرفته شد و آزمون میدانی نفوذپذیری هوا انجام نشد؛ بنابراین، نتایج مربوط به این پارامتر به صحت فرض اولیه وابسته است. چهارم، ارزیابی تطبیقی ئی.اس.جی.بی و گرین مارک بر اساس معیارها و اطلاعات فنی قابل دسترسی انجام شد و به دلیل عدم دسترسی به سامانه‌های رسمی امتیازدهی، نتایج نباید به‌عنوان گواهی رسمی ساختمان تلقی شوند.

پژوهش‌های آتی می‌توانند با بررسی ساختمان‌های اداری در چند اقلیم مختلف ایران، تعمیم‌پذیری نتایج را ارزیابی کنند. همچنین استفاده از داده‌های واقعی بهره‌برداری، آزمون میدانی نفوذپذیری هوا و پایش عملکرد سامانه‌های انرژی می‌تواند دقت مدل‌های شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد واقعی ساختمان را افزایش دهد. توسعه یک چارچوب بومی ارزیابی ساختمان سبز که علاوه بر مصرف انرژی، انرژی‌های تجدیدپذیر، کیفیت محیط داخلی، عملکرد بهره‌برداری، کربن چرخه حیات و شرایط اقلیمی ایران را در نظر بگیرد نیز می‌تواند مسیر مناسبی برای مطالعات آینده و توسعه مقررات ملی باشد.

پی‌نوشت

- 1- ESGB
- 2- Green Mark
- 3- OpenStudio
- 4- EnergyPlus
- 5- nZEB (nearly Zero Energy Building)
- 6- LEED
- 7- BREEAM
- 8- CASBEE
- 9- Green Star
- 10- ITACA
- 11- BEE (Built Environment Efficiency)
- 12- Minergie
- 13- Photovoltaic
- 14- COP (Coefficient of Performance)
- 15- Low Emission
- 16- U-value
- 17- Sketchup
- 18- WWR (Window wall Ration)
- 19- SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio)
- 20- ETTV (Envelope Thermal Transfer Value)
- 21- BCA (Code on Envelope Thermal Performance for Buildings)
- 22- Scef

حامیان مالی: این مقاله هیچ‌گونه حمایت مالی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان: نویسندگان تایید می‌کنند مه همگی در مراحل مختلف پژوهش مشارکت داشته‌اند.

اعلام عدم تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌دارند که در انجام این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافی برای ایشان وجود

نداشته است.

بیانیه شفافیت کاربست هوش مصنوعی: نویسندگان اعلام می‌کنند که از ابزارهای هوش مصنوعی ChatGPT برای ویرایش زبانی استفاده شده است. تمامی محتوای علمی، تحلیل‌ها، نتایج و مسئولیت نهایی مقاله بر عهده نویسندگان است. **قدردانی:** ما از همه افراد برای مشاوره علمی در این مقاله سپاس‌گزاریم.

منابع

- احمدنژاد، فرهاد؛ یکتا حشکواپی، مریم. (۱۴۰۳). تطابق معیارهای مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان و سامانه ارزیابی DGNB در ارزیابی مجتمع مسکونی آسمان تبریز. معماری و شهرسازی آرمان شهر، ۱۷(۴۶)، ۱۲۳-۱۴۲.
<https://doi.org/10.22034/aud.2023.395698.2784>
- آرام، تیم؛ ایراجی، جواد. (۱۴۰۱). جهت‌گیری بهینه ساختمان با هدف سایه‌افکنی بهینه و کاهش مصرف انرژی (مطالعه موردی: تالار موسیقی تهران). مطالعات فناوری‌های معماری، ۲(۲)، ۶۵-۸۰.
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.28209818.1401.2.2.3.0>
- جعفری، لیلا؛ صلواتیان، سید مریم مامک. (۱۴۰۲). ارزیابی عملکرد فتوولتائیک یکپارچه با سیستم سایبان در بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان در اقلیم گرم و خشک (نمونه موردی ساختمان اداری در شهر شیراز). نشریه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو، ۱۰(۱)، ۷۰-۸۵.
<https://doi.org/10.52547/jrenew.10.1.70>
- سلیمانخانی، علیرضا. (۱۴۰۱). شناسایی ابزارهای خط‌مشی‌گذاری در جهت توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران. هنر مدیریت سبز، ۱(۱)، ۷۳-۸۶.
<https://doi.org/10.30480/agm.2021.3048.1008>
- شیخی نسلجی، مهدی؛ مهدیزاده سراج، فاطمه. (۱۴۰۱). طراحی سایبان هوشمند برای ساختمان اداری جهت کنترل ورود نور مستقیم خورشید مبتنی بر کاهش بار سرمایشی با الگوبرداری از گره‌های ایرانی اسلامی. پژوهش‌های معماری نوین، ۲(۱)، ۷-۲۶.
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.28209818.1401.2.1.1.6>
- ماهان، امین؛ خرم رویی، ریحانه. (۱۴۰۲). سامانه ارزیابی کازی، رویکردی تکنیکی در ارزش‌گذاری پایداری زیست‌محیطی ساختمان‌های سبز در زاین. نشریه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو، ۱۰(۱)، ۱۷۷-۱۸۷.
<https://doi.org/10.52547/jrenew.10.1.177>
- یارمحمد، فاطمه؛ مهدیزاده سراج، فاطمه. (۱۴۰۱). امکان‌سنجی استفاده از راهکارهای بهینه‌سازی پوسته ساختمان‌های اداری در مناطق معتدل ایران با بهره‌گیری از نمونه بناهای صفر انرژی اجرا شده در اقلیم‌های مشابه. معماری و شهرسازی ایران (JIAU)، ۱۳(۲)، ۱۷۵-۱۹۵.
<https://doi.org/10.30475/isau.2022.225316.1384>
- Agarwal, S., Araral, E., Fan, M., Qin, Y., & Zheng, H. (2024). *The unintended effects of green building certification*. <https://ireus.nus.edu.sg/unintended-effects-green-building-certification/>
- A.H., H., Tarish, A. L., & Al-Mudhafar, A. H. N. (2026). Recent advances in nearly zero energy commercial and residential buildings: Innovations, challenges, and climate-specific solutions. *Green Technologies and Sustainability*, 4(2), 100330. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2025.100330>
- Ahmed, A., Ge, T., Peng, J., Yan, W.-C., Tee, B. T., & You, S. (2022). Assessment of the renewable energy generation towards net-zero energy buildings: A review. *Energy and Buildings*, 256, 111755. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111755>
- Babu, S., Lamano, A., & Pawar, P. (2017). Sustainability assessment of a laboratory building: case study of highest rated laboratory building in Singapore using Green Mark rating system. *Energy Procedia*, 122, 751-756. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.391>
- 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>
- Doan, D. T., Ghaffarianhoseini, A., Naismith, N., Zhang, T., Ghaffarianhoseini, A., & Tookey, J. (2017). A critical comparison of green building rating systems. *Building and Environment*, 123, 243-260. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.007>
- Fatemi, A., Heidarinejad, G., Zabetian Targhi, M., & Safarzadeh, M. (2023). Energy simulation and life cycle cost discussion for a novel fixed model in offices as a zero energy building in a country with hot and cold dry weather. *Energy Conversion and Management*, 277, 116604. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116604>
- Filippini, M., & Obrist, A. (2022). Are households living in green certified buildings consuming less energy? Evidence from Switzerland. *Energy Policy*, 161, 112724. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112724>

- 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>
- Hall, M., Geissler, A., & Burger, B. (2014). Two Years of Experience with a Net Zero Energy Balance – Analysis of the Swiss MINERGIE-A® Standard. *Energy Procedia*, 48, 1282–1291. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.145>
- 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>
- Hong, D., Cheng, R., Lei, H., Zhou, X., Yang, L., Feng, C., & Gao, S. (2026). Comprehensive review on the impact of building envelopes on indoor thermal comfort in office buildings: Balancing occupant comfort and energy efficiency. *Building and Environment*, 289, 114018. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.114018>
- Ibrahim, A. J., Zangana, D. D., Liu, S., Samuelson, H., & Yang, L. (2025). Impacts of climate change on energy-saving sensitivity of residential building envelope design parameters in three hot-dry cities. *Journal of Building Engineering*, 99, 111481. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.111481>
- Jangyoung, L., & Kwok Wai, T. (2016). *The Evolution of the BCA Green Mark Scheme in Singapore: A Paradigm Shift from an Energy Focused Rating System to an Occupant Centric Criteria with Higher Emphasis on IAQ*. ASHRAE & AIVC. <https://ashraem.confex.com/ashraem/iaq16/webprogram/Paper20054.html>
- Kazemi, M. (2023). Behavioral barriers to the use of renewable and energy-efficient technologies in residential buildings in Iran. *Energy Efficiency*, 16(7), 79. <https://doi.org/10.1007/s12053-023-10162-0>
- Lee, W. L. (2012). Benchmarking energy use of building environmental assessment schemes. *Energy and Buildings*, 45, 326–334. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.024>
- Maghami, M. R., Maghoul, A., Thang, K. F., & Sundaram, S. (2025). Net zero energy buildings: An overview of passive and active designs. *Energy Reports*, 14, 1327–1348. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.07.028>
- 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>
- 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, 950–960. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.105>
- MURAKAMI, S., IWAMURA, K., SAKAMOTO, Y., YASHIRO, T., BOGAKI, K., SATO, M., IKAGA, T., & ENDO, J. (2004). CASBEE; COMPREHENSIVE ASSESSMENT SYSTEM FOR BUILDING ENVIRONMENTAL EFFICIENCY (Environmental Engineering). *AIJ Journal of Technology and Design*, 10(20), 199–204. <https://doi.org/10.3130/aijt.10.199>
- Olanrewaju, O. I., Enebuma, W. I., & 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>
- Omran, 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>
- 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>
- Soltan Ahmadi, P., Khoshgard, A., & Ahmadi Danesh Ashtiani, H. (2024). 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>
- Varma, C. R. S., & Palaniappan, S. (2019). Comparison of green building rating schemes used in North America, Europe and Asia. *Habitat International*, 89, 101989. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2019.05.008>



-
- Wang, Q., Gao, W., Su, Y., & Zhang, Y. (2024). A Comparative Study of the Latest Editions of China–Japan–US Green Building Evaluation Standards. *Buildings*, 14(11), 3698. <https://doi.org/10.3390/buildings14113698>
- Wu, 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>
- 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>