



The University of Tehran Press

Performance Evaluation of Active and Passive Systems on Energy Consumption Reduction Based on Comfort Conditions

Seyede Farnaz Masoumi¹ | Sepideh Abedi^{2*}

1. Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: Farnazmasoumi@yahoo.com

2. Corresponding Author, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: s_abedi@abu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:

Received: 23 July 2025

Revised: 21 August 2025

Accepted: 21 December 2025

Published Online: 28 May 2026

Keywords:

Building Energy Use,
Active and Passive Methods,
Environmental Comfort.

ABSTRACT

This study focuses on the design and modeling of an office building aimed at increasing energy efficiency and reducing greenhouse gas emissions. In this regard, both passive and active energy methods have been employed, including changing consumption patterns, insulation, adjusting the dimensions and positions of windows, and improving the efficiency of lighting and ventilation systems. Analyses show that the highest electricity consumption in this building is attributed to electricity for rooms (55/4%) and cooling systems (22/04%). Additionally, refrigerators and lighting systems account for 56/9% of internal unwanted heat generation. The results indicate that by employing a combination of active methods in reducing heating and cooling energy consumption and passive methods in reducing electricity and gas consumption in office rooms, electricity and gas consumption will be reduced by 58/73% and 39/59%, respectively. Improving the usage patterns of office equipment and lighting has had a more significant impact on reducing electricity consumption (81/6%). Additionally, the capacity of heating and cooling coils will be reduced by 57/70% and 69/71%, respectively. The highest energy consumption is evident in providing gas for heating and electricity for cooling, which will decrease by 7/89 and 33/97 Megawatt-hours, respectively, following the implementation of energy optimization strategies. The peak heating and cooling loads have also decreased by 88/8% and 65/7%, respectively, resulting in a 65% increase in user environmental comfort. These results highlight the importance of optimizing energy consumption in buildings and its significant impact on improving environmental conditions.

Cite this article: Masoumi, F. & Abedi, S. (2026). Performance Evaluation of Active and Passive Systems on Energy Consumption Reduction Based on Comfort Conditions. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 5 (2), 273-296. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.400478.1180>



© Seyede Farnaz Masoumi, Sepideh Abedi **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.400478.1180>

Introduction

Population growth and rising energy demand have led to resource scarcity and increased greenhouse gas emissions in many societies. In Iran, energy use in residential, commercial, and service buildings represents 32% of total energy consumption and 21/93% of carbon dioxide emissions. With a projected rise in electricity demand in residential buildings by 2040, optimizing energy consumption in buildings has become crucial. Global goals for 2050 include reducing energy costs in buildings by 2/5%, boosting geothermal energy use by 6%, and increasing the adoption of solar thermal systems and biomass fuels. Predictions suggest that enhancing energy efficiency and transitioning to renewable energy sources could decrease fossil fuel consumption by 800 tons of crude oil equivalent and lower greenhouse gas emissions by 75% by 2050. Zero-energy buildings are pivotal to these efforts, achieving a balance between energy production and consumption through renewable energy systems

and efficient construction practices. Defined as buildings that produce as much energy as they consume over a specified period, zero-energy buildings utilize energy-efficient designs alongside renewable technologies. This study employs Design Builder software to model a zero-energy office building in Tehran, focusing on local climatic conditions and resident comfort. Key strategies include minimizing energy source demand, enhancing insulation, optimizing mechanical systems, and implementing smart controls for lighting and HVAC. A comprehensive energy audit analyzed the building's performance before and after improvements, identifying effective methods for energy savings and the integration of renewable sources. The results of this study provide insights for designing zero-energy office buildings in Tehran and similar climates, offering a practical framework for optimizing energy consumption in the built environment.

Material and Methods

This study focuses on the energy efficiency of an office building in Tehran, which was initially modeled using Design Builder software based on its actual architectural plans and operational details, such as lighting, ventilation, and electrical equipment usage. The research involved two main phases:

1. **Building Design and Energy Consumption Analysis:** The building's specifications, including structural details and HVAC systems, were input into the software. This enabled the simulation of energy use, loss, and the performance of various systems based on the local climate.
2. **Energy Reduction Strategies:** Various modifications were implemented to reduce energy consumption. These included altering consumption patterns, using control systems, improving insulation, changing window dimensions and positions, and replacing the existing heating and cooling system with a geothermal heat pump (GSHP). An energy audit was conducted to assess the building's initial energy consumption, followed by the implementation of both passive and active methods of energy reduction. Passive methods involved changing to more energy-efficient lighting, while active strategies focused on enhancing the efficiency of electrical systems and integrating renewable energy sources.

The study also evaluated the heating and cooling system's capacity and assessed how well the building met comfort conditions in both summer and winter. The results of the energy audits, comparing before and after implementation, demonstrated the effectiveness of the strategies applied. Design Builder software proved instrumental in modeling the building's energy dynamics and calculating outcomes such as total energy consumption, cost, and carbon emissions, allowing for a comprehensive analysis of energy efficiency improvements in the building.

Result and Discussion

The application of active and passive solutions in building audits revealed the significant role of window design in energy efficiency. Strategies such as upgrading windows, optimizing cooling and lighting system usage, and enhancing equipment and controls contributed to reduced energy consumption and costs. The study demonstrated that implementing a combination of these methods led to notable decreases in electricity and gas use, initial expenses, and improved comfort levels.

Key findings include:

1. Combining active and passive methods achieved reductions of 58/73% in electricity and 59/39% in gas consumption.
2. The highest gas fuel consumption is for providing thermal energy in the heating sector, while the highest electricity consumption is for meeting cooling demand, which decreased by 7/89 MWh and 33/97 MWh, respectively, following energy optimization.
3. Improved usage patterns lowered the capacity of energy-intensive heating and cooling coils by 57/70% and 71/69%.
4. The most significant impacts were from optimizing cooling system usage and upgrading lighting to more efficient devices, leading to reductions of 81/6% and 75/4% in electricity consumption, respectively.
5. Peak loads for heating and cooling were reduced by 88/8% and 65/7% post-audit.
6. User comfort levels increased by 65% after the energy audit.

Conclusion

This study utilized both active and passive energy audit methods to assess the effectiveness of various strategies in reducing energy consumption in buildings. The results reveal that targeted improvements in energy usage can significantly boost efficiency and comfort levels. However, while zero-energy buildings offer substantial energy savings and environmental advantages, they require considerable investment and have longer payback periods. The study recommends that future research focus on the economic challenges associated with these buildings, including the integration of renewable energy systems, fostering a culture of responsible consumption, and implementing incentive-based financial policies by government entities and planners. The findings of this research provide valuable insights for designing zero-energy office buildings in Tehran and similar climates. These results not only enhance future building designs but also serve as a practical model for optimizing energy consumption.



ارزیابی عملکرد سیستم‌های فعال و غیر فعال بر کاهش مصرف انرژی ساختمان مبتنی بر شرایط آسایش

سیده فرناز معصومی^۱ | سپیده عابدی^{۲*}

۱. دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: farnazmas77@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: s_abedi@abu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۰۷

کلیدواژه:

مصرف انرژی ساختمان،
روش‌های فعال و غیر فعال،
آسایش محیطی.

این مطالعه به ممیزی انرژی در یک ساختمان با کاربری اداری می‌پردازد که هدف آن، افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. در این راستا، از روش‌های غیر فعال (شامل تغییر الگوهای مصرف، عایق‌بندی، اصلاح ابعاد و موقعیت پنجره‌ها) و فعال (شامل بهبود کارایی سیستم‌های روشنایی و تهویه و جایگزینی منابع) استفاده شده است. بالاترین مصرف برق در این ساختمان به برق اتاق‌ها (۵۵/۴ درصد) و سیستم‌های سرمایشی (۲۲/۴ درصد) مربوط می‌شود و یخچال‌ها و سیستم‌های روشنایی (۵۶/۹ درصد) از گرمای ناخواسته داخلی را تولید می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد کاربست روش‌های فعال در کاهش مصرف انرژی سیستم‌های سرمایش و گرمایش و روش‌های غیر فعال در کاهش مصرف برق و گاز اتاق‌ها بیشترین تأثیر را داشته و مصرف برق و گاز به ترتیب ۵۸/۷۳ درصد و ۵۹/۳۹ درصد کاهش یافته است. بهبود الگوی استفاده از تجهیزات اداری و روشنایی، تأثیر بیشتری بر کاهش مصرف برق (۸۱/۶ درصد) داشته است. همچنین، ظرفیت کویل‌های گرمایش و سرمایش به ترتیب ۵۷/۷۰ درصد و ۷۱/۶۹ درصد کاهش می‌یابد. بیشترین مصرف انرژی در تأمین گاز داخلی برای گرمایش و برق برای سرمایش بوده که پس از اجرای استراتژی‌های بهینه‌سازی انرژی به ترتیب ۷/۸۹ و ۳۳/۹۷ مگاوات ساعت کاهش یافته است. بار اوج گرمایش و سرمایش نیز در صورت اعمال سیاست‌های پیشنهادی به ترتیب ۸/۸ درصد و ۶۵/۷ درصد کاهش و شرایط آسایش محیطی کاربران ۶۵ درصد افزایش خواهد یافت. این نتایج نشان‌دهنده اهمیت بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها و تأثیر آن بر بهبود شرایط زیست‌محیطی است.

استناد: معصومی، سیده فرناز و عابدی، سپیده (۱۴۰۵). ارزیابی عملکرد سیستم‌های فعال و غیر فعال بر کاهش مصرف انرژی ساختمان مبتنی بر شرایط آسایش. فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۵ (۲) ۲۷۳-۲۹۶.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.400478.1180>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© سیده فرناز معصومی، سپیده عابدی

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.400478.1180>



۱. مقدمه

رشد جمعیت همراه با افزایش تقاضای انرژی، جوامع مختلف را با بحران کمبود منابع و انتشار گازهای گلخانه‌ای مواجه ساخته است. ساختمان‌های مسکونی، تجاری و خدماتی در ایران سهم ۳۲ درصدی در مصرف کل انرژی و ۲۱/۹۳ درصدی در انتشار دی‌اکسید کربن را به خود اختصاص داده‌اند [۱]. با توجه به افزایش مصرف سالیانه انرژی در ساختمان‌های کشور و پیش‌بینی رشد چشمگیر تقاضای برق در ساختمان‌های مسکونی کشور تا سال ۲۰۴۰، بحث بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها به صورت ویژه مورد توجه قرار گرفته است [۲]، به طوری که این مهم با رویکرد کاهش هزینه‌های انرژی به میزان ۲/۵ درصد در ساختمان‌ها و بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید حرارت ساختمان‌ها به یکی از اهداف جهانی تا سال ۲۰۵۰ تبدیل شده است [۳ و ۴].

بر اساس پیش‌بینی‌های صورت‌گرفته با بهبود در بازدهی سامانه‌های مصرف و جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر، مصرف سوخت‌های فسیلی به میزان ۸۰۰ تن بشکه معادل نفت خام و انتشار گازهای گلخانه‌ای به میزان ۷۵ درصد تا سال ۲۰۵۰ کاهش خواهد یافت [۵]. به این ترتیب، توسعه ساختمان‌های صفر انرژی با استفاده از راهکارهایی نظیر پوشش‌های ساختمانی بهبود یافته که تقاضای انرژی را کاهش می‌دهند، به یکی از اهداف توسعه پایدار جهانی تبدیل شده است [۶ و ۷].

ساختمان‌های صفر انرژی و ساختمان‌های سبز مجهز به سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر با افزایش بازدهی سیستم‌های موجود در ساختمان، تولید و مصرف انرژی را طی یک سال متعادل می‌سازند [۸]. در تعریف دیگر ساختمان صفر انرژی، ساختمانی با میزان مصرف انرژی برابر با تولید ساختمان در یک دوره زمانی مشخص تعریف شده است [۹ و ۱۰]. به طور کلی، ساختمان‌های انرژی صفر با استفاده از ترکیب بهره‌وری انرژی و تولید انرژی تجدیدپذیر، مصرف انرژی ساختمان را به میزان تولیدات ممکن از طریق منابع تجدیدپذیر در سایت طی یک دوره زمانی مشخص می‌رساند [۱۱]. انواع روش‌های کاهش مصرف انرژی در این ساختمان‌ها به دو دسته کلی زیر تقسیم می‌شود:

الف) روش‌های فعال^۱: در این روش‌ها از سیستم‌های کنترلی و بهبود بازدهی در روشنایی، سرمایش، گرمایش، آب گرم و سیستم‌های تأمین‌کننده منابع انرژی مورد نیاز ساختمان (برق و گاز طبیعی) استفاده می‌شود.

ب) روش‌های غیرفعال^۲: این روش‌ها بر اساس جهت‌گیری ساختمان، سایه، ابعاد و نوع پنجره‌ها و میزان عبور جریان هوا طراحی شده‌اند.

انتخاب مناسب ابعاد و موقعیت مکانی پنجره‌ها، به عنوان یک روش غیرفعال، امکان کاهش بار سرمایشی و گرمایشی ساختمان و بهره‌گیری از روشنایی روز را فراهم می‌آورد [۱۲ و ۱۳]. جهت‌گیری ساختمان نسبت به راستای تابش خورشید و شکل ساختمان و همچنین قرارگیری نواحی مختلف ساختمان براساس دو ویژگی یادشده، در مصرف انرژی نیز مؤثر است. در مناطق گرم، ایجاد جریان هوا زیر ساختمان، سایه‌بان‌های بزرگ، حیاط‌ها و ایوان‌های متعدد برای تهویه طبیعی پیشنهاد می‌شود، در حالی که در مناطق سرد، ساختمان با هندسه مکعب فشرده و عایق‌بندی مناسب بهینه است و امتداد شرق - غرب موجب افزایش دریافت گرمای خورشیدی در زمستان می‌شود [۱۴ و ۱۵].

ایجاد سایه با استفاده از کنترل نور ورودی به ساختمان به منظور کاهش بار سرمایشی ساختمان در فصل‌های گرم سال و همچنین، ایجاد شرایط روشنایی متناسب با نوع فعالیت کاربران، از عوامل مؤثر در طراحی ساختمان صفر انرژی است. به منظور کاهش بار روشنایی و گرمایشی، استفاده از سایبان‌های خارجی در ساختمان‌های واقع در نیم‌کره جنوبی و جلوگیری از ورود نور مستقیم در تابستان و ورود نور با زاویه تابش کم در زمستان پیشنهاد می‌شود [۱۶]. سایبان‌های افقی در وجه جنوبی ساختمان ورود نور خورشید به داخل ساختمان و سایبان‌های عمودی، ورود حرارت ورودی به ساختمان را در اوایل و اواخر روز کاهش می‌دهد [۱۷]. ابعاد، موقعیت و جنس پنجره‌ها نیز تأثیر قابل توجهی در شدت روشنایی ورودی به ساختمان، ایجاد بارهای سرمایشی و گرمایشی و همچنین هدررفت هوا به بیرون دارند [۱۸]. به طور مثال، استفاده از پنجره‌ها با ضریب عبور نور بالا و ضریب جذب گرمای کم در نواحی گرمسیر مناسب است.

یکی از عوامل مؤثر بر ساختمان‌های صفر انرژی، بهینه‌سازی تهویه هوا و جلوگیری از اتلاف بارهای حرارتی و برودتی در داخل ساختمان و تداخل در شرایط آسایش است. باز و بسته کردن پنجره‌ها به صورت دستی یا با استفاده از سیستم کنترلی، درزبندی پنجره‌ها و همچنین، انتخاب نوع سیستم‌های روشنایی در کنترل رطوبت و شرایط آسایش ساکنان از عوامل مؤثر بر تهویه هوا است. عدم کنترل نفوذ و خروج هوا موجب افزایش بار سرمایشی و گرمایشی در فصل‌های گرم و سرد سال می‌شود [۱۹].

در زمینه بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها به روش فعال و غیر فعال، با بهره‌مندی از منابع انرژی تجدیدپذیر و یا با استفاده از ممیزی انرژی تحقیق‌های متعددی صورت گرفته است. رویز و رومرو (۲۰۱۱) به طراحی مدل بهینه‌سازی با هدف کاهش مصرف انرژی در ساختمان و استفاده از روش‌های مؤثر اقتصادی ضمن حفظ شرایط آسایش پرداختند و تأثیر روش‌های ممیزی شامل پنجره‌ها، عایق‌بندی سطوح و نصب پنل‌های خورشیدی را با استفاده از مدل توسعه‌یافته ارزیابی کردند [۲۰].

سکيون و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از نرم‌افزار انرژی پلاس^۱ اثر اجرای مواد تغییردهنده فاز^۲ بر تقاضای انرژی را بررسی کردند. استفاده از این مواد در آب‌وهوای مدیترانه‌ای به کاهش تقاضای انرژی منجر شد [۲۱]. پیلودی و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی میزان کاهش انرژی با استفاده از سناریوهای عایق‌بندی دیوارها و سقف، جابه‌جایی پنجره‌ها، جایگزینی روشنایی و کاهش مصرف انرژی در کامپیوترها، تغییر تنظیمات سیستم سرمایش و تهویه مطبوع، استفاده از پنل خورشیدی، استفاده از توربین بادی و ترکیب سناریوها در یک ساختمان اداری در یونان با استفاده از نرم‌افزارهای هومر و ترنسیس^۳ پرداختند و ترکیب روش‌های فعال و غیرفعال به عنوان بهترین روش کاهش مصرف انرژی معرفی شد [۲۲]. کائونروئن و کرینونتا (۲۰۱۹) به ممیزی انرژی و محاسبه مصرف انرژی یک ساختمان مسکونی در واشنگتن با استفاده از بهبود بازدهی حرارتی، افزایش ضخامت دیوار و پنجره‌های هوشمند در نرم‌افزار رویت^۴ پرداختند [۲۳]. شاهی و همکاران (۲۰۲۴) طی مطالعه‌ای کاهش مصرف انرژی یک ساختمان مسکونی در فلوریدا را بررسی کردند. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر، دو سناریو عایق‌بندی حرارتی و سایبان‌ها و استفاده از سلول‌های فتوولتائیک برای رسیدن به ساختمان صفر انرژی برای بهبود بهره‌وری انرژی بررسی شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد اجرای سناریوی اول مصرف انرژی ساختمان را تا ۲۰۰ کیلووات‌ساعت کاهش می‌دهد و رتبه‌بندی انرژی ساختمان با استانداردهای انرژی استار و لید^۵ تعیین شد. این مطالعه تأکید می‌کند که ترکیب بهینه‌سازی مصرف انرژی و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند به کاهش مصرف انرژی و حرکت به سمت ساختمان‌های صفر انرژی کمک کند [۲۴]. مطالعه‌ای توسط عبدوس و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی طراحی و تحلیل ساختمان‌های صفر انرژی و صفر کربن با استفاده از انرژی تجدیدپذیر و مصالح بازیافتی پرداخته است. این تحقیق در دو شهر در آمریکا و دبئی، امارات با استفاده از نرم‌افزارهای دیزاین بیلدر برای تحلیل مصرف انرژی و پی‌وی سیستم^۶ برای ارزیابی نیاز انرژی تجدیدپذیر انجام شد. چهار استراتژی بررسی شد: استفاده از سایه‌بان‌های داخلی، سیستم‌های شید داخلی، استفاده از پنل‌های فتوولتائیک، و به‌کارگیری مصالح کم‌کربن بازیافتی. نتایج پژوهش یادشده نشان داد این اقدامات می‌توانند مصرف انرژی را به طور چشمگیری کاهش دهند و انرژی قابل توجهی به شبکه تزریق کنند. این مطالعه تأکید می‌کند که ترکیب بهینه‌سازی مصرف انرژی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و مصالح پایدار می‌تواند به دستیابی به ساختمان‌های صفر انرژی و صفر کربن کمک کند [۲۵].

فنگ و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه جامع کارآمدی روش‌های فعال انرژی در روشنایی، لوازم خانگی، تجهیزات دفتر، کنترل‌های پیشرفته روشنایی، مدیریت بار و آنتالپی هوا و بهبود حرارت و آب گرم، جابه‌جایی و تهویه، خنک‌کننده تابشی، پمپ حرارتی منبع هوا، فن، تبخیرکننده و خنک‌کننده و روش‌های غیرفعال شامل نسبت پنجره به دیوار، نورگیر، لوله‌های خورشیدی، پرده‌ها به منظور کنترل تابش نور، نقشه بهینه طبقه‌بندی حرارتی، پوشش و لعاب پیشرفته، افزایش گرمای خورشیدی غیرفعال، جرم حرارتی، سایه خورشیدی، استفاده از تهویه طبیعی و سایت گیاهی در ۳۴ نمونه ساختمان در دنیا را با کاربری‌های مختلف

1. Energy Plus
2. Phase Change Material
3. HOMER & TRNSYS
4. REVIT
5. Energy Star and LEED
6. PV Syst

بررسی کرده و تهویه مطبوع و استفاده از نور روز را به عنوان بهترین روش معرفی کردند [۲۶]. در مطالعه دیگری، عبدو و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند با استفاده از نرم‌افزار ترنسیس و اعمال روش‌های جهت‌گیری ساختمان، تعیین نوع پنجره و نسبت پنجره به دیوار و میزان نفوذ هوا، عایق‌بندی دیوار و سقف در یک ساختمان مسکونی مراکشی، به کاهش هزینه‌های چرخه عمر، افزایش صرفه‌جویی انرژی و بهبود شرایط آسایش حرارتی می‌انجامد [۲۷].

در ایران نیز مطالعات متعددی در این زمینه به انجام رسیده است. خاکیان (۱۳۹۸) کارایی انرژی ساختمان مسکونی دوطبقه واقع در روستای کوهستانی با استفاده از پارامترهای مختلف از جمله جهت‌گیری ساختمان، نسبت پنجره به دیوار، نوع شیشه، سایبان‌ها و عایق‌بندی را ارزیابی کرد. سلگی و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی، هزینه‌های اولیه و مدت زمان بازگشت سرمایه برای یک ساختمان مسکونی در ناحیه سرد ایران پرداختند و استفاده از پنجره‌های دوجداره را به عنوان مؤثرترین سناریو معرفی کردند. شریف‌زاده و سریر (۱۴۰۳) روش‌های فعال و غیر فعال طراحی ساختمان‌های انرژی صفر در مناطقی با اقلیم خشک و گرم را بررسی کردند [۲۸]. اصغری (۱۴۰۳) نیز به مطالعه تحلیل حساسیت برای ارزیابی تأثیر پارامترهای مختلف بر هزینه‌های ساختمان و مصرف انرژی پرداخت. نتایج مطالعه یادشده نشان داد نوع شیشه، ساخت دیوار، نسبت پنجره به دیوار، و المان‌های سایه‌انداز به عنوان عواملی شناسایی شدند که بیشترین تأثیر را بر هزینه‌های ساختمان و مصرف برق دارند [۲۹].

هدف از مطالعه پیش رو، کاهش مصرف انرژی در یک ساختمان اداری با استفاده از روش‌های فعال و غیر فعال است. این مطالعه به طور خاص روی انطباق با شرایط آب‌وهوایی تهران و تأمین آسایش ساکنان تمرکز دارد و تلاش می‌کند تا نیازهای حرارتی و برودتی ساختمان را بهینه‌سازی کند. به این منظور، یک ممیزی جامع انرژی انجام شد که شامل اصلاح ابعاد و موقعیت پنجره‌ها، نصب سایبان‌های برقی، عایق‌بندی مناسب، تهویه طبیعی، سیستم‌های هوشمند کنترل روشنایی و تهویه، و بهینه‌سازی سیستم‌های سرمایش و گرمایش بود. همچنین، ساعت‌های عملکردی سیستم‌های روشنایی، گرمایش و سرمایش بر اساس استفاده از نور طبیعی و شرایط محیطی کاهش یافت و مصرف انرژی ساختمان قبل و بعد از ممیزی مقایسه شد. اعمال روش‌های بهینه کاهش مصرف انرژی و توجیه اقتصادی آن‌ها، به دلیل بالا بودن هزینه سرمایه‌گذاری پروژه‌های بهینه‌سازی در ساختمان‌های اداری و تجاری، یکی از چالش‌های اساسی مهم محسوب می‌شود. از آنجا که در ساختمان‌های اداری بخش قابل توجهی از مصرف انرژی به الگوی مصرف و مدیریت تقاضا وابسته است و تأمین شرایط آسایش بر راندمان عملکردی کارکنان اثر مضاعف دارد، در این تحقیق عملکرد سیستم‌های فعال و غیرفعال با در نظر گرفتن شرایط آسایش محیطی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این راستا، با استفاده از داده‌های یک ساختمان اداری واقعی، ابتدا گلوگاه‌های اصلی مصرف انرژی شناسایی شده و سپس، با توجه به وضعیت فعلی مصرف و واکنش‌های معکوس احتمالی، مناسب‌ترین راهکارهای کاهش مصرف انرژی همراه با بهبود شرایط آسایش پیشنهاد شد. علاوه بر این، تقاضای انرژی ساختمان و اجزای مختلف آن نیز در مقایسه با مصرف انرژی پیش و پس از ممیزی تحلیل شده و مؤثرترین روش‌های بهبود شناسایی شده است. بنابراین، پژوهش حاضر در قالب دو سناریوی کلی به تحلیل و مقایسه مصرف انرژی و شرایط آسایش در وضعیت موجود یک ساختمان واقعی با شرایطی که ترکیبی از روش‌های فعال و غیرفعال به کار گرفته شده‌اند، می‌پردازد. در نهایت، نتایج این تحقیق می‌تواند به توسعه ساختمان‌های اداری با کاربرد منطقی انرژی در تهران و سایر مناطق با اقلیم مشابه کمک کند. یافته‌های این مطالعه نه تنها موجب ارتقای کیفیت طراحی‌های آینده خواهد شد، بلکه می‌تواند به عنوان الگویی عملی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها به کار گرفته شود.

۲. روش کار

در این تحقیق ابتدا یک ساختمان اداری در نرم‌افزار دیزاین بیلدر مطابق با نقشه و اطلاعات واقعی ساختمان شامل سازه، کاربران، نوع و توان مصرفی سیستم‌های روشنایی، تهویه و تجهیزات الکتریکی، طراحی شد. در مرحله دوم، با اصلاح الگوی مصرف، استفاده از سیستم‌های کنترلی، عایق‌بندی، تغییر ابعاد و موقعیت پنجره‌ها و همچنین جایگزینی سیستم پمپ حرارتی زمین گرمایی، کاهش مصرف انرژی مورد بررسی قرار گرفت. ظرفیت سیستم‌های گرمایش و سرمایش بر اساس اطلاعات ورودی

ساختمان محاسبه و پوشش تقاضا بر اساس ایجاد شرایط آسایش ارزیابی شد. در نهایت، مصرف سالانه انرژی برای هر یک از روش‌های فعال و غیر فعال برآورد شده و نتایج قبل و بعد از اعمال ممیزی مقایسه شد.

۲-۱. مدل‌سازی ساختمان با استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر

تحقیق حاضر بر پایه مطالعه موردی ساختمان واقعی، بر اساس شبیه‌سازی، ورودی و استخراج داده‌ها در نرم‌افزار دیزاین بیلدر^۱ انجام شده است. این نرم‌افزار برای مدل‌سازی جنبه‌های مختلف ساختمان کاربردی بوده و قادر به استفاده از داده‌های اقلیمی شهرهای مختلف برای محاسبه ورودی انرژی، مصرف و اتلاف انرژی در منطقه مورد مطالعه است. همچنین، با استفاده از موتور شبیه‌سازی انرژی پلاس^۲، برای شبیه‌سازی انرژی و آب در ساختمان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و می‌تواند شرایط حرارتی منطقه‌ای را حل کند و به سیستم‌های سرمایش، گرمایش و آب گرم پاسخ دهد. این نرم‌افزار همچنین می‌تواند معادلات انتقال حرارت، تابش، هدایت، جابه‌جایی، گام‌های زمانی، مدل‌های تعریف‌شده توسط کاربر برای انتقال هم‌زمان گرما و جرم، مدل‌های پیشرفته شامل سایبان‌های قابل کنترل پنجره، شیشه‌های الکتروکرومیک و تعادل حرارتی لایه‌به‌لایه، محاسبات روشنایی، سیستم‌های کنترل روشنایی و دستگاه‌های سایه‌زنی، سیکل‌های سرمایش و گرمایش با امکان ایجاد سیکل‌ها و اجزای جدید را شبیه‌سازی کند [۳۰].

ورودی‌های نرم‌افزار شامل اطلاعات طراحی ساختمان شامل طرح سازه، نقشه پنجره‌ها، دیوارها و بازشوها، نوع کاربری‌ها، ساختار شیشه و پنجره‌ها، نوع سیستم‌های روشنایی، گرمایش، تهویه و سرمایش (HVAC^۳) است. خروجی نرم‌افزار، مصرف انرژی کل (شامل برق و گاز)، به تفکیک واحدهای مختلف مصرف‌کننده انرژی، تبادل حرارتی ساختمان، ظرفیت سیستم‌های گرمایش و سرمایش در فصل‌های سرد و گرم در بازه‌های سالانه، ماهانه، روزانه و ساعتی، میزان هزینه و انتشار کربن است.

۲-۲. مشخصات ساختمان مورد مطالعه

ساختمان مورد مطالعه دارای کاربری اداری در مرکز شهر تهران بوده و اطلاعات جغرافیایی و اقلیمی آن بر اساس موقعیت مکانی در شهر تهران در نرم‌افزار وارد شده است. مشخصات ساختمان شامل اطلاعاتی در مورد مصالح سقف و کف، عایق‌بندی، سقف، دیوارهای داخلی و خارجی پارکینگ و انبار، تأسیسات بهداشتی و انتقال مصالح و موادی که در هر بخش استفاده شده‌اند، در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱. مشخصات سازه و مصالح در دیوار داخلی، خارجی، کف، سقف پارکینگ و انباری، سرویس بهداشتی و طبقات (متر)

| کاربری | زیرزمین | پارکینگ | انباری | سرویس بهداشتی | طبقات |
|----------------------|---------|-------------|-------------|---------------|-------|
| جنس | کف | دیوار داخلی | دیوار خارجی | کف | سقف |
| بتن با پوکة معدنی | ۰/۱ | ۰/۰۸ | - | - | ۰/۰۵ |
| ملات سیمان | ۰/۰۲ | ۰/۰۲ | - | - | ۰/۰۲ |
| موزاییک | ۰/۰۳ | - | - | - | - |
| آجر | - | ۰/۲ | ۰/۱ | - | ۰/۱ |
| گچ و خاک | - | ۰/۰۲ | ۰/۰۴ | ۰/۰۲ | ۰/۰۲ |
| گچ | - | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۰۵ |
| رنگ روغن | - | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۰۱ |
| لایه هوا | - | - | ۰/۴ | - | ۰/۴ |
| دال بتنی | - | ۰/۱ | - | - | ۰/۱ |
| سرامیک - پرسلن و سنگ | - | - | ۰/۰۲ | - | - |
| گرانیت | - | ۰/۰۰۱ | - | - | - |
| کاشی رسی - سرامیکی | - | - | - | - | ۰/۰۴ |

1. Design Builder
2. Energy Plus
3. Heating, Ventilation, and Air Conditioning

در جدول ۲ نیز مصرف برق در هر بخش انرژی بر ساختمان بر اساس نوع استفاده و برحسب مترمربع ساختمان ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات کاربری، تجهیزات الکتریکی، روشنایی و HVAC در هر بخش ساختمان (وات به ازای هر متر مربع)

| کاربری | پارکینگ | سرویس بهداشتی | فضای اداری | اتاق اداری |
|----------------------------------|---------|---------------|------------|---------------------------------|
| چگالی حضور افراد | ۰/۰۰۵۹ | ۰/۱ | ۰/۱۱۱ | ۰/۰۵ |
| توان مصرفی وسایل اداری | ندارد | ندارد | ۱۰ | کامپیوتر: ۱۰ وسایل اداری: ۲۰ |
| توان مصرفی سایر وسایل | ندارد | ندارد | ۴۴ | ۱۰ |
| توان مصرفی سماور برقی | ندارد | ندارد | ۴ | ندارد |
| چگالی توان لامپ روشنایی | ۷/۵ | ۴ | ۷/۵ | ۷/۵ |
| توان مصرفی نور نمایش وسایل موجود | ۷ | ندارد | ۷ | ۷ |
| HVAC | ندارد | ندارد | روشن | روشن |

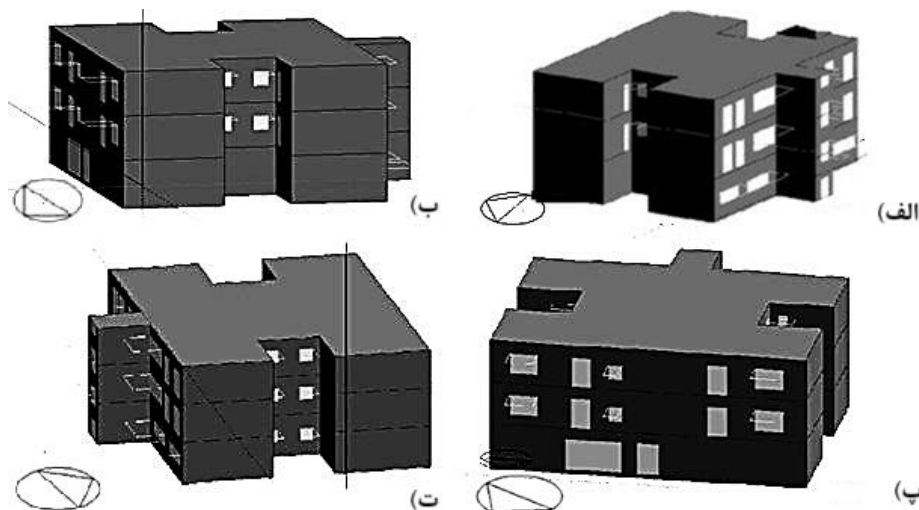
۲-۳. اعمال روش‌های غیر فعال در ممیزی انرژی ساختمان

در این مطالعه، تعداد پنجره‌ها، ابعاد، جهت‌ها و جنس آن‌ها ارزیابی شده است. تعداد پنجره‌ها بر میزان نور ورودی به ساختمان تأثیر می‌گذارد که می‌تواند نیاز به روشنایی مصنوعی طی روز را کاهش دهد، اما پنجره‌های بیشتر به معنای از دست رفتن گرمای بیشتر در زمستان و جذب گرمای بیشتر در تابستان است. اندازه پنجره‌ها نیز بر مصرف انرژی تأثیر می‌گذارد. پنجره‌های بزرگ‌تر نور طبیعی بیشتری به داخل ساختمان وارد می‌کنند که نیاز به روشنایی مصنوعی را کاهش می‌دهد. از سوی دیگر، پنجره‌های بزرگ‌تر همچنین به معنای انتقال حرارت بیشتر و از دست رفتن گرما در ماه‌های زمستان هستند.

علاوه بر این، جهت‌گیری و جهت پنجره‌ها از عوامل حیاتی تأثیرگذار بر مصرف انرژی هستند. پنجره‌های رو به جنوب در زمستان نور خورشید بیشتری دریافت می‌کنند که نیاز به گرمایش را کاهش می‌دهند، اما در تابستان می‌توانند باعث گرمای بیش از حد شوند. پنجره‌های رو به شرق و غرب به ترتیب در صبح و عصر نور مستقیم خورشید دریافت می‌کنند که می‌تواند بار سرمایشی تابستان را افزایش دهد. پنجره‌های رو به شمال نور مستقیم خورشید کمی دریافت می‌کنند، بنابراین احتمال اینکه به بارهای گرمایشی یا سرمایشی کمک کنند، کم است.

جنس پنجره‌ها نیز نقش مهمی در حفظ انرژی ایفا می‌کند. قاب‌های پنجره ساخته شده از موادی مانند چوب، فیبر شیشه یا وینیل نسبت به قاب‌های آلومینیومی که به راحتی گرما را هدایت می‌کنند، ویژگی‌های عایق بهتری دارند. شیشه‌های با عملکرد بالا، مانند پنجره‌های پوشش‌دهی شده با لایه‌های کم‌انرژی یا پر شده با گاز، همچنین می‌توانند با محدود کردن انتقال حرارت بین داخل و خارج ساختمان به کاهش مصرف انرژی کمک کنند.

بنابراین، ابتدا ممیزی انرژی در ساختمان مورد مطالعه با استفاده از اعمال روش‌های غیر فعال انجام شد. برای این منظور، مدل طراحی شده ساختمان در نرم‌افزار پیاده‌سازی شد (شکل ۱). طراحی پنجره‌ها یکی از جنبه‌های حیاتی کارایی انرژی ساختمان است که نیاز به دقت در توجه به جزئیات دارد تا عملکرد بهینه شود. به همین منظور، پنجره‌های رو به جنوب از ۳/۰۸ به ۴/۹۷ مترمربع افزایش یافته تا نور طبیعی و گرما را در ماه‌های زمستان به حداکثر برسانند. سه پنجره وسیع (۳/۵ متر در ۱ متر) به طور استراتژیک در سمت جنوبی قرار گرفته‌اند تا توزیع یکنواخت نور خورشید تضمین شود و دستگاه‌های سایه‌بان برای کاهش احتمال تابش بیش از حد در تابستان نصب شد. از سوی دیگر، تعداد پنجره‌ها در سمت شمال از ۱۵ به ۹ کاهش می‌یابد تا از ورود نور کنترل نشده جلوگیری شود و پنجره‌های وسیع‌تری در فضاهای اداری نصب می‌شوند که نور مناسب و خنک برای محیط‌های کاری فراهم می‌کنند. علاوه بر این، تعداد پنجره‌ها در سمت‌های شرقی و غربی از ۲۴ به ۱۲ کاهش می‌یابد تا حرارت و نور مستقیم و غیرقابل تنظیم حذف شده و به طور قابل توجهی بار حرارتی ورودی داخلی به میزان ۶۸/۳۵ درصد کاهش یابد. چنین اقداماتی به بهبود بهره‌وری انرژی و پایداری کمک کرده و در عین حال نور طبیعی و تهویه مطبوع را بهینه می‌کند. علاوه بر این، نصب سایه‌بان برای محدود کردن ورود نور مستقیم خورشید در ماه‌های تابستان در تمام طرف‌های ساختمان پیش‌بینی شد.



شکل ۱. نمای ساختمان و نحوه قرارگیری نورگیرها در نمای الف (جنوبی؛ ب) غربی؛ پ) شمالی؛ ت) شرقی ساختمان

همچنین، این ساختمان از پنجره‌های سه‌جداره استفاده می‌کند و اقدامات زیر برای عایق‌بندی در نظر گرفته شد: الف) افزودن دو لایه پشم شیشه با ضخامت $0/75$ متر قبل از لایه آجر در دیوارهای خارجی. ب) افزودن دو لایه پشم شیشه با ضخامت $0/85$ متر بین لایه بتن سقف هر طبقه.

۲-۴. اعمال روش‌های اصلاح الگوی مصرف در ساختمان

تغییر الگوهای مصرف یا تغییر رفتار مصرف می‌تواند تأثیر قابل توجهی در ممیزی انرژی در ساختمان‌های صفر انرژی داشته باشد. در این مطالعه، تجهیزات روشنایی با مصرف انرژی بالا به سیستم‌های روشنایی با بازده انرژی بیشتر تغییر داده شده است. همچنین، تنظیم دما بر اساس شرایط آب‌وهوایی و پیاده‌سازی سیستم‌های گرمایش و سرمایش کارآمدتر برای دستیابی به کاربرد منطقی انرژی انجام شده است. علاوه بر این، تغییر رفتار مصرفی مانند خاموش کردن چراغ‌ها شامل کاهش زمان مصرف به ۵ ساعت در روز، زمانی که از آن‌ها استفاده نمی‌شود یا کاهش زمان مصرف وسایل الکترونیکی به ۳ ساعت در روز با خارج کردن دوشاخه زمانی که استفاده نمی‌شوند، نیز لحاظ شده است.

وسایل برقی و سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی به گونه‌ای برنامه‌ریزی شدند که در ساعت‌های اداری (از ساعت ۸ صبح تا ۶ بعدازظهر) فعالیت کنند و در ساعت‌های غیر اداری (۱۶ ساعت در روز در فصل زمستان) خاموش شده یا روی دماهای پایین‌تر تنظیم شوند. در فصل تابستان این برنامه‌ریزی برعکس انجام شد و ساعت‌های غیرفعال‌سازی به ۱۸ ساعت در روز رسید. علاوه بر این، سیستم روشنایی به گونه‌ای تنظیم شد که به صورت خودکار در زمان وجود نور طبیعی کافی خاموش شود، که این امر می‌تواند مصرف انرژی را تا ۵ درصد کاهش دهد.

۲-۵. اعمال روش‌های فعال در ممیزی انرژی ساختمان

برای اعمال روش‌های فعال از دو راهبرد شامل الف) ارتقای بهره‌وری سیستم‌ها و تجهیزات الکتریکی، روشنایی، گرمایش و سرمایش و ب) جایگزینی منابع تجدیدپذیر جهت تأمین گرمایش و سرمایش استفاده شده است.

۲-۵-۱. ارتقای بهره‌وری تجهیزات الکتریکی و سیستم‌های روشنایی، گرمایش و سرمایش

در این مرحله همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، وسایل برقی با مصرف بالا و قدیمی با وسایل کم‌مصرف انرژی جایگزین شدند. به این ترتیب استفاده از وسایل برقی، سیستم‌های روشنایی، گرمایشی و سرمایشی ساختمان با هدف صرفه‌جویی در مصرف انرژی اصلاح و جایگزین شدند. برای بهبود بیشتر بهره‌وری انرژی، سیستم کنترل روشنایی به گونه‌ای تنظیم شد که براساس حضور افراد و میزان نور طبیعی فعال یا غیرفعال شود. این تغییر مصرف انرژی را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. در

نهایت، سیستم کنترل جریان هوا برای ورود هوای خنک در تابستان و هوای گرم در زمستان تنظیم شد که بار حرارتی سیستم گرمایشی را کاهش داد. سیستم کنترل روشنایی نیز با نسبت توان ورودی - خروجی خطی حداقل ۰/۱ وات طراحی شد تا بهینه عمل کند و در عین حال کمترین مصرف برق را داشته باشد.

جدول ۳. ارتقای بهره‌وری وسایل الکتریکی ساختمان در هر طبقه و کاهش توان مصرفی آن‌ها [۳۱]

| وسيله برقی | توان مصرفی فعلی (وات) | توان مصرفی پیشنهادی (وات) | تعداد وسایل در هر طبقه | مساحت سرویس داده شده توسط وسيله در هر طبقه (مترمربع) |
|----------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|--|
| کامپیوتر | ۱۵۰ | ۱۰۰ | ۸ | ۹۵/۸۲ |
| وسایل اداری (پرینتر) | ۱۵۰۰ | ۱۰۰۰ | ۴ | ۹۵/۸۲ |
| سایر وسایل (شامل اسپلیت و یخچال) | اسپلیت: ۲۰۰۰ یخچال: ۱۵۰ | اسپلیت: ۱۰۰۰ یخچال: ۱۵۰ | اسپلیت: ۱۲ یخچال: ۶ | ۲۶۶/۷ |
| سماور برقی | ۱۰۰۰ | ۷۰۰ | ۵ | ۱۷۰/۸۸ |

۲-۵-۲. جایگزینی سیستم هیت پمپ زمین گرمایی برای مصارف حرارتی

در این مطالعه برای کاهش مصرف انرژی، سیستم پمپ حرارتی زمین گرمایی (GSHP) برای تأمین سرمایش و گرمایش جایگزین و عملکرد هر جزء از سیستم برای فصل‌های تابستان و زمستان ارزیابی شده است. گرمایش و سرمایش با استفاده از یک پمپ حرارتی و مبدل حرارتی زمین تأمین شده است. در سیستم توزیع گرمایش و سرمایش از فن کویل‌ها استفاده شده است. با توجه به بار گرمایش و سرمایش که حداکثر به ترتیب ۱۸ و ۱۷۷/۴۳ مگاژول در ساعت است و ویژگی‌های ترمودینامیکی سیستم HVAC طبق جدول ۴، طول و قطر چاه‌های گرمایی با استفاده از معادلات ۱ و ۲ محاسبه شد [۳۲].

$$L_{\text{Borehole}} = \frac{Q_{\text{Heat Transfer to Ground}}}{(T_{\text{Ground}} - T_{\text{Avg,Water}}) \times \text{Conductivity}_{\text{Ground}}} \quad (1)$$

$$R_{\text{Borehole}} = \sqrt{\frac{Q_{\text{Heat Transfer to Ground}} \times t_{\text{C or H}}}{\text{Heat Capacity}_{\text{Ground}} \times 3.14 \times (T_{\text{Ground}} - T_{\text{Avg,Water}})}} \quad (2)$$

در معادله‌های یادشده $Q_{\text{Heat Transfer to Ground}}$ حرارت داده شده یا گرفته شده از زمین، $\text{Conductivity}_{\text{Ground}}$ رسانش حرارتی زمین و Heat Capacity ظرفیت حرارتی زمین است. همچنین T_{Ground} دمای زمین معادل ۱۳ درجه سانتی‌گراد است و $T_{\text{Avg,Water}}$ دمای متوسط آب در گرمایش و سرمایش که به ترتیب ۴۷/۵ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد است. هدایت حرارتی زمین و ظرفیت حرارتی به ترتیب معادل $0.690 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ و $3/9 \text{ MJ.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$ است. ساعت‌های سرمایش و گرمایش در روز به ترتیب ۱۰ و ۸/۵ ساعت لحاظ شده است. لذا با استفاده از معادلات ۱ و ۲، طول لوله ۵۰۴ متر و قطر آن ۲/۸۶ متر محاسبه شده است.

جدول ۴. ویژگی‌های ترمودینامیکی سیستم گرمایش و سرمایش [۳۳ و ۳۴]

| واحد | سیکل گرمایش | سیکل سرمایش |
|-----------------------|-------------|-------------|
| $T_{\text{C,Load}}$ | ۱۰ | ۱۰ |
| $T_{\text{H,Load}}$ | ۸۰ | ۱۲ |
| $T_{\text{C,Source}}$ | ۵ | ۶ |
| $T_{\text{H,Source}}$ | ۹۰ | ۱۵ |
| m° | ۰/۵۷ | ۰/۵۷۳ |
| Q_{H} | ۱۶/۷۵ | ۲۱۶/۵۸ |
| w | ۴/۱۸ | ۳۹/۴۲ |
| Q_{C} | ۲۰/۹۴ | ۱۷۷/۴۳ |
| T_{In} | ۵ | ۱۰ |
| T_{Out} | ۹۰ | ۱۲ |
| m° | ۰/۵۷ | ۰/۵۷۳ |

۲-۶. معادلات حاکم بر مدل سازی

۲-۶-۱. معادلات انتقال حرارت

الف) انتقال حرارت رسانشی

شبیه‌سازی انتقال حرارت رسانشی سازه ساختمان در معادله ۳ با استفاده از روش کراک-نیکلسون^۱ و روش تفاضل محدود، برای محاسبه انتقال حرارت جابه‌جایی در نرم‌افزار دیزاین بیلدر استفاده می‌شود [۳۵]. در روش تفاضل محدود^۲، سطح انتقال حرارت مورد بررسی را با استفاده از روش مش‌بندی^۳ به بخش‌های کوچک‌تر تقسیم می‌کند و مشتقات جزئی دما بر حسب زمان و مکان در نقاط یا گره‌های^۴ تعیین شده در بخش‌های مختلف محاسبه می‌شود.

$$C_p \cdot \rho \cdot \Delta X \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = \frac{1}{2} \times \left(K_w \frac{T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} + K_E \frac{T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} + K_E \frac{T_{i-1}^j - T_i^j}{\Delta x} \right) \quad (3)$$

در این معادله T دمای گره، ρ چگالی سطح، Δt گام زمانی محاسباتی، Δx ضخامت لایه تفاضل محدود (همیشه کمتر از ضخامت لایه سازه‌ای)، C_p گرمای ویژه ماده، K_w رسانایی حرارتی برای سطح مشترک بین گره i و i+1، K_E رسانایی حرارتی برای سطح مشترک بین گره i و i-1 و J گام زمانی است.

ب) انتقال حرارت جابه‌جایی

برای محاسبه ضریب حرارت جابه‌جایی در سطوح مختلف انتقال حرارت (دیوار، سقف و کف و سایر سطوح) از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود؛ برای نواحی‌ای که به صورت جابه‌جایی گرم می‌شود و برای سطوح داخلی دیوارهایی که از منبع حرارتی فاصله دارند، از معادله ۴ و برای نواحی‌ای که به صورت جابه‌جایی گرم می‌شوند و سطوح داخلی سقف‌هایی که از منبع حرارتی فاصله دارند، از معادله ۵ استفاده می‌شود [۳۶]:

$$h = 2.07 |\Delta T|^{0.23} \quad (4)$$

$$h = 2.72 |\Delta T|^{0.13} \quad (5)$$

در نتیجه انتقال حرارت جابه‌جایی توسط معادله ۶ محاسبه می‌شود که واحد h وات بر مترمربع کلین است.

$$q = h \times A \times \Delta T \quad (6)$$

ج) انتقال حرارت تابشی

انتقال حرارت تابشی بر حسب وات به فرم معادله ۷ است که در آن σ ثابت استفان - بولتزمن، A مساحت صفحه بر حسب متر مربع و T دما بر حسب کلین است.

$$\frac{\sigma}{2} \times A \times (T_1^4 - T_2^4) = q \quad (7)$$

۲-۶-۲. معادلات انتقال حرارت کف ساختمان

به منظور محاسبه انتقال حرارت جابه‌جایی در کف ساختمان، اگر سطوح در چندین منطقه به یک سطح و جنس یکسان اشاره کنند، هر سطح با استفاده از معادله ۸ به طور جداگانه محاسبه خواهد شد. هر سطح انتقال حرارت بررسی شده با ارتفاع دیوار متفاوت، شارهای حرارتی، ضرایب همرفت و دمای سطحی متفاوتی را برای دیوار و کف محاسبه خواهد کرد. شار حرارتی عبوری از کف مربوطه بر اساس کسری از محیط کل در معرض دید (P_{exp,tot}) که توسط هر بخش با ارتفاع متفاوت نمایندگی می‌شود، وزن‌دهی خواهد شد [۳۷]. مجموع شار حرارتی عبوری از کف زیرزمین بر حسب وات بر مترمربع برابر معادله ۸ است. در این معادله T_∞ دمای جریان آزاد است.

1. Crank-Nichols.on
2. Finite Difference Method
3. Meshing
4. Node

$$\dot{q} = \sum_i^{\text{segments}} \frac{P_{\text{exp},i}}{P_{\text{exp,tot}}} h_i (T_{\infty} - T_{\text{floor},i}) \quad (۸)$$

۲-۶-۳. حرارت دریافتی از تابش خورشید بر سطوح خارجی

دیوارهای ساختمان به عنوان یک جرم حرارتی، نور خورشید را در سطح خود جذب کرده و آن را به گرما تبدیل می‌کنند و گرما به‌آرامی به داخل ساختمان منتقل می‌شود. مدل ریاضی برای محاسبه مقدار انرژی جذب‌شده در سطح خارجی دیوار برحسب وات بر مترمربع بر اساس معادله ۹ به دست می‌آید که در این معادله، تابعی از کل تابش ورودی به سطح^۱ و ضریب جذب سطح (α) است [۳۸].

$$QSM = \alpha \times \text{Incident Solar} \quad (۹)$$

۲-۶-۴. محاسبه گرمای محسوس ناخواسته از فعالیت کاربران

نرخ متابولیک تعدیل‌شده میانگین، نرخ متابولیکی است که برای یک گروه مختلط از افراد با ترکیب درصدی معمولی، برای زنان معادل ۰/۸۵ درصد و برای مردان و کودکان معادل ۰/۷۵ درصد مردان محاسبه می‌شود. گرمای محسوس از طریق معادله ۱۰ محاسبه می‌شود [۳۹].

$$S = 6.46 + 0.94M + 0.000255M^2 + 7.13T - 0.062TM - 0.00059TM^2 - 0.19T^2 + 0.00094T^2M - 0.0000149T^2M^2 \quad (۱۰)$$

M نرخ متابولیک بر حسب وات، T دمای هوا بر حسب درجه سلسیوس و S گرمای محسوس بر حسب وات است.

۲-۶-۵. محاسبه شرایط آسایش محیطی

مدل فنگر^۲ بر اساس یک تحلیل انرژی است که تمامی حالت‌های اتلاف انرژی از بدن را در نظر می‌گیرد، از جمله اتلاف حرارت ناشی از نفوذ بخار آب از طریق پوست، اتلاف حرارت تنفسی نهان و خشک^۳، اتلاف حرارت جابه‌جایی و تابشی از سطح خارجی لباس^۴، انتقال حرارت از پوست به سطح خارجی لباس و اتلاف حرارت ناشی از تبخیر عرق از سطح پوست^۵. این مدل فرض می‌کند که فرد با محیط داخلی در حالت تعادل حرارتی قرار دارد.

• انتقال حرارت تنفسی نهان و خشک توسط معادلات ۱۱ تا ۱۳ محاسبه می‌شود. اتلاف حرارتی تنفسی نهان و خشک از طریق سطح فعالیت متابولیکی فرد^۶ و فشار بخار آب در هوای اطراف^۷ بر حسب پاسکال محاسبه می‌شود [۴۰].

$$\text{RespHeatLoss} = \text{LatRespHeatLoss} + \text{DryRespHeatLoss} \quad (۱۱)$$

$$\text{LatRespHeatLoss} = 0.000017 \times \text{ActLevel} \times (5867. - \text{VapPress}) \quad (۱۲)$$

$$\text{DryRespHeatLoss} = 0.0014 \times \text{ActLevel} \times (34 - \text{AirTemp}) \quad (۱۳)$$

پارامترهای استفاده‌شده در معادلات ۱۴ تا ۱۶، سطح فعالیت، نسبت مقاومت حرارتی لباس به سطح بدن^۸، دمای سطح لباس^۹، ضریب انتقال حرارت همرفتی بین سطح لباس و هوا (Hc) برحسب وات بر مترمربع بر کلونین، دمای سطح خارجی لباس توسط انتقال حرارت از پوست به لباس^{۱۰} برحسب کلونین، دمای مطلق میانگین اجسام اطراف^{۱۱} برحسب کلونین است.

1. Incident Solar
2. Fanger
3. RespHeatLoss
4. DryHeatLoss
5. EvapHeatLoss
6. ActLevel
7. VapPress
8. CloBodyRat
9. CloSurfTemp
10. AbsCloSurfTemp
11. AbsRadTemp

$$\text{DryHeatLoss} = \text{ConvHeatLoss} + \text{RadHeatLoss} \quad (۱۴)$$

$$\text{HeatLos} = \text{CloBodyRat} \times \text{Hc} \times (\text{CloSurfTemp} - \text{AirTemp}) \quad (۱۵)$$

$$3.96 \times \text{CloBodyRat} \times [(0.01 \times \text{AbsCloSurfTemp})^4 - (0.01 \times \text{AbsRadTemp})^4] \text{RadHeatLoss} = \quad (۱۶)$$

• اتلاف حرارتی جابه‌جایی و تابشی از سطح خارجی لباس با استفاده از معادلات ۱۷ تا ۱۹ محاسبه می‌شود [۴۰].

$$\text{EvapHeatLossRegComf} = 0.42 \times (\text{IntHeatProd} - \text{ActLevelConv}) \quad (۱۷)$$

$$\text{EvapHeatLossDiff} = 0.00305 \times (5733.0 - 6.99 \times \text{IntHeatProd} - \text{VapPress}) \quad (۱۸)$$

$$\text{EvapHeatLoss} = \text{EvapHeatLossRegComf} + \text{EvapHeatLossD} \quad (۱۹)$$

در معادلات ۱۷ تا ۱۹، اتلاف گرمای تبخیری ناشی از تعریق تنظیمی^۱ برحسب وات بر مترمربع (مقدار گرمایی که بدن از طریق تعریق کنترل شده برای حفظ تعادل حرارتی از دست می‌دهد)، تولید گرمای داخلی بدن^۲، جزء همرفتی سطح فعالیت متابولیکی^۳، اتلاف حرارت تبخیری غیرفعال^۴ (مقدار گرمای دفع شده از بدن از طریق تبخیر رطوبت طبیعی پوست و مجاری تنفسی) و کل اتلاف حرارت تبخیری (مجموع اتلاف حرارت تبخیری ناشی از تعریق فعال و تبخیر غیرارادی رطوبت بدن) است. یکی از شاخص‌های شرایط آسایش میانگین رأی پیش‌بینی شده^۵ است. این مدل به عنوان یکی از مدل‌های اصلی برای ارزیابی شرایط آسایش حرارتی، احساس راحتی افرادی را بر اساس پارامترهای مختلف شامل دما (دمای هوای محیط)، رطوبت نسبی (میزان رطوبت هوا)، سرعت هوا (سرعت جریان هوا در محیط)، سطح فعالیت بدن (فعالیت‌های فیزیکی که افراد انجام می‌دهند) و لباس‌ها (نوع و میزان لباس‌هایی که افراد به تن دارند) پیش‌بینی کند. این مدل تقاضای فرد را در مقیاس ۳- تا ۳+ محاسبه می‌کند که ۳- به معنای احساس سردی شدید و از ۳+ به معنای احساس گرمای شدید است. مقدار ۰ در این مدل نشان‌دهنده شرایط آسایش کامل است.

$$\text{ThermSensTransCoef} = 0.303 e^{(-0.036 \times \text{ActLevel})} + 0.028 \quad (۲۰)$$

$$\text{IntHeatProd} = \text{ActLevel} - \text{WorkEf} \quad (۲۱)$$

$$\text{PMV} = \text{ThermSensTransCoef} \times (\text{IntHeatProd} - \text{EvapHeatLoss} - \text{RespHeatLoss} - \text{DryHeatLoss}) \quad (۲۲)$$

$$\text{PMV} = (0.303 e^{-0.036M} + 0.028)(H - L) \quad (۲۳)$$

در معادله ۲۰ ضریب انتقال حس حرارتی^۶ که نشان‌دهنده میزان حساسیت بدن به تبادل حرارتی در شرایط مختلف متابولیکی است، محاسبه می‌شود. مطابق معادله ۲۱ تولید گرمای داخلی بدن برابر با میزان گرمای تولیدشده در بدن پس از کسر انرژی مورد استفاده برای کار مکانیکی^۷ است. در معادله ۲۳ نیز M نرخ متابولیک بدن ساکنان ساختمان بر حسب وات بر مترمربع، H حرارت تولیدی توسط بدن افراد و L اتلاف حرارتی کل است [۴۰].

۳. یافته‌ها

۳-۱. نتایج ارزیابی مصرف انرژی در ساختمان

پس از بررسی ظرفیت کاربست روش‌های فعال و غیرفعال در ساختمان مورد مطالعه، میزان کاهش مصرف برق و گاز طبیعی در صورت اعمال این روش‌ها در بخش‌ها و تأسیسات مختلف ساختمان شامل اتاق‌ها، فن‌ها و پمپ‌های سیستم‌های گرمایش و سرمایش، روشنایی، و تجهیزات الکتریکی مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول ۵ میزان کاهش مصرف انرژی در صورت کاربست سیاست‌های پیشنهادی را نشان می‌دهد.

1. EvapHeatLossRegComf
2. IntHeatProd
3. ActLevelConv
4. EvapHeatLossDiff
5. Predicted Mean Vote
6. ThermSensTransCoef
7. WorkEf

جدول ۵. ارزیابی مصرف برق و گاز قبل و بعد از ممیزی انرژی در ساختمان مورد مطالعه (کیلووات ساعت)

| میزان تغییر تقاضای مصرف انرژی | ارزیابی مصرف در صورت کاربست روش‌های فعال و غیرفعال | مصرف فعلی ساختمان | مصارف انرژی |
|-------------------------------|--|-------------------|----------------------|
| ۱/۹ برابر کاهش | ۷۵/۵۲ | ۱۴۳/۹۵ | مصرف برق در اتاق‌ها |
| ۴/۶ برابر کاهش | ۱۲/۵۷ | ۵۸/۴۹ | مصرف برق در روشنایی |
| ۱/۵ برابر کاهش | ۱/۹۶ | ۲/۹۶ | مصرف گاز در اتاق‌ها |
| ۳/۸ برابر کاهش | ۵/۰۴ | ۱۹/۵۲ | مصرف برق در فن |
| ۲/۱ برابر کاهش | ۱/۲۱ | ۲/۶ | مصرف برق در پمپ |
| ۲/۱ برابر کاهش | ۱۲/۶۹ | ۲۷/۷۲ | مصرف برق در سرمایش |
| ۴/۹۸ برابر کاهش | -۰/۷۴ | ۳/۶۹ | مصرف گاز در گرمایش |
| - | -۰/۷۲ | ۰/۷۲ | روشنایی نمای ساختمان |
| ۲/۴۲ برابر کاهش | ۱۰۷/۰۳ | ۲۵۹/۳۷ | مصرف کل برق |
| ۲/۴۶ برابر کاهش | ۲/۷ | ۶/۶۵ | مصرف کل گاز |

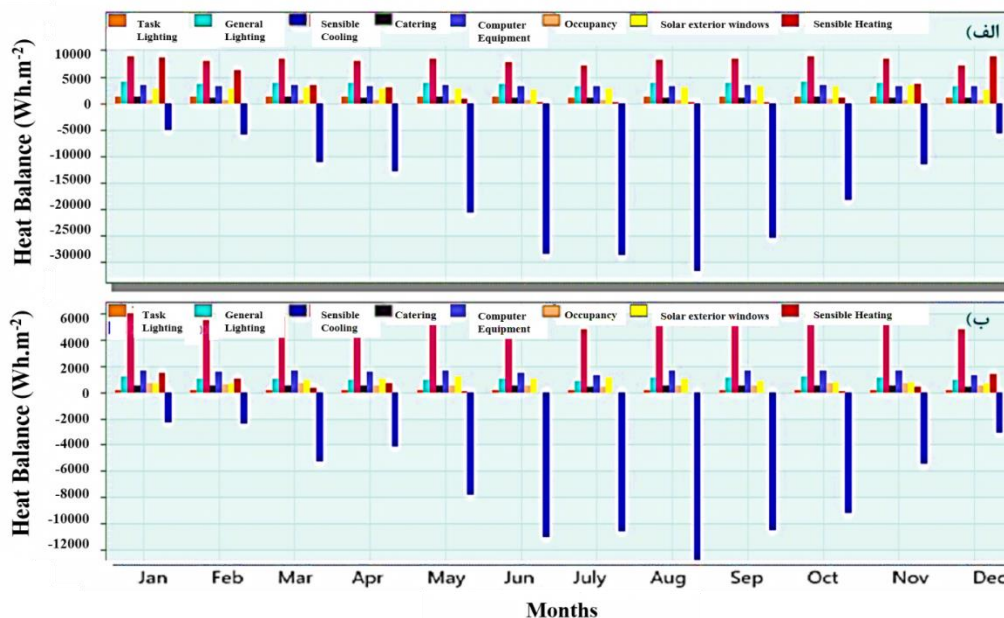
بر اساس آنالیز انجام شده، بالاترین مصرف انرژی در سیستم‌های داخلی برق و گاز برای بخش‌های گرمایشی ساختمان بوده است. این سیستم‌ها اجزای اصلی هستند که عملکردهای پایه ساختمان را ممکن می‌سازند. با این حال، پس از انجام ممیزی انرژی، می‌توان استراتژی‌های مختلفی را برای بهبود بهره‌وری انرژی این سیستم‌ها و کاهش مصرف کلی انرژی پیاده‌سازی کرد. این استراتژی‌ها شامل تغییرات در سیستم‌های روشنایی و گرمایشی و همچنین، بهبود مدیریت تجهیزات اداری و سایر دستگاه‌ها است. بهبود الگوی استفاده از تجهیزات اداری و سیستم‌های روشنایی می‌تواند شامل خاموش کردن دستگاه‌ها در زمان عدم استفاده یا استفاده از لامپ‌های LED کارآمدتر باشد. به طور مشابه، بهینه‌سازی سیستم گرمایش ممکن است شامل به‌روزرسانی کنترلرها و تنظیم نقاط دمایی باشد تا از گرمایش یا سرمایش غیرضروری جلوگیری شود. این تغییرات بر کاهش مصرف برق تأثیر قابل توجهی دارند؛ به طوری که پس از اجرای سیستم‌های جدید و کارآمدتر، مصرف برق تا ۶۰/۹۲ درصد کاهش یافته است. این کاهش به دلیل ترکیبی از عوامل، از جمله جایگزینی تجهیزات قدیمی و ناکارآمد با تجهیزات مدرن و کارآمدتر و تغییر الگوهای مصرف برای کاهش استفاده غیرضروری انرژی است. همچنین، بهبود الگوی استفاده از سیستم گرمایش شامل ارتقای تجهیزات، بهبود عایق‌بندی، یا تغییر در کنترل‌های سیستم همراه با جایگزینی منابع و استفاده از پمپ حرارتی زمین‌گرمایی می‌تواند به کاهش قابل توجه مصرف گاز منجر شود.

اعمال روش‌های یادشده در مجموع موجب کاهش مصرف انرژی معادل ۳۳۹۷۰ کیلووات ساعت برای سیستم‌های داخلی برق سرمایشی و ۷۸۹۰ کیلووات ساعت برای گاز گرمایشی شده که نشان‌دهنده اجرای موفقیت‌آمیز استراتژی‌های بهره‌وری انرژی شناسایی شده در ممیزی انرژی ساختمان مورد مطالعه بوده است. این تغییرات همچنین بر صورت‌حساب انرژی و ردپای زیست‌محیطی ساختمان تأثیر مثبتی داشته باشند، در حالی که همچنان راحتی و بهره‌وری ساکنان حفظ شده است.

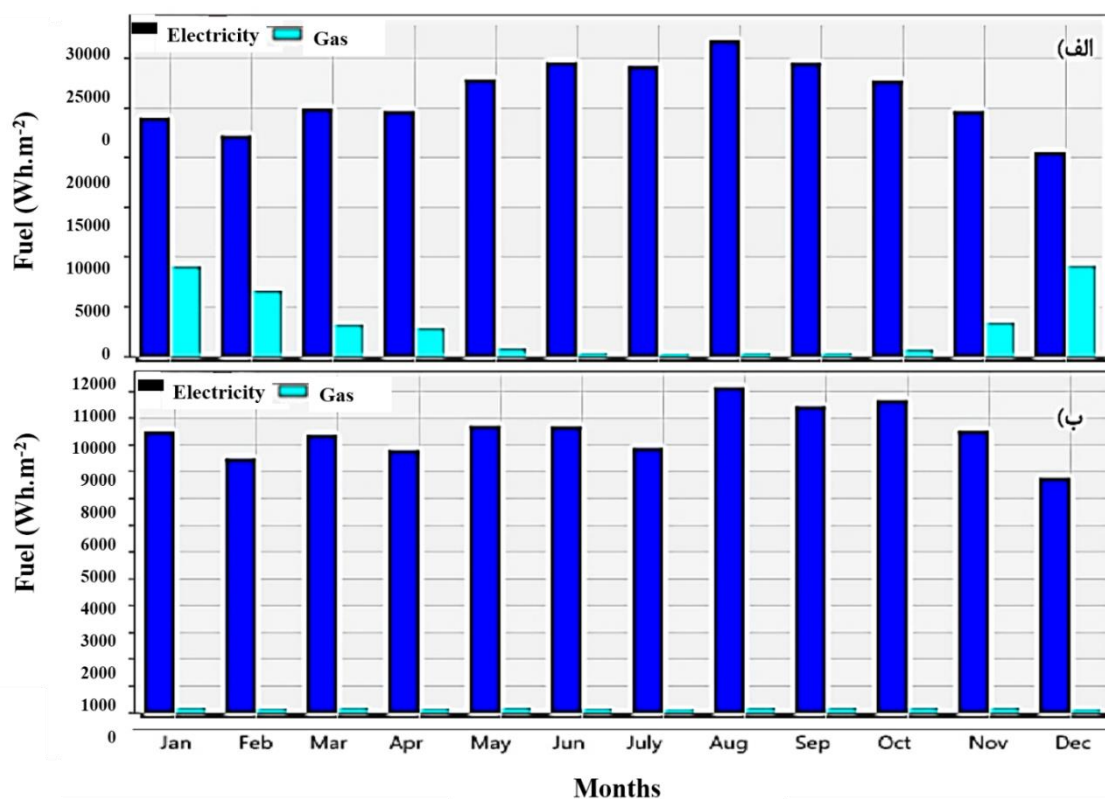
قبل از انجام ممیزی انرژی، یخچال‌ها و سیستم روشنایی بالاترین تولیدکنندگان گرما در ساختمان بودند، در حالی که بعد از ممیزی، اتلاف حرارتی از سیستم‌های روشنایی از تجهیزات اداری مانند کامپیوتر و پرینتر کمتر شده است (شکل ۲). به این صورت، استفاده از سیستم روشنایی LED باعث کاهش قابل توجهی در تولید گرمای ناخواسته پس از ممیزی شد. دلیل این تغییر علاوه بر ارتقای سیستم‌ها به تغییرات رفتاری مصرف‌کنندگان پس از ممیزی انرژی نیز برمی‌گردد. پیش از ممیزی، یخچال‌ها و سیستم روشنایی‌ها از فناوری‌های قدیمی و ناکارآمد استفاده می‌کردند که انرژی بیشتری مصرف کرده و گرمای اضافی تولید می‌کردند. همچنین، چراغ‌ها برای مدت زمان طولانی روشن می‌ماندند که مقدار زیادی گرما تولید می‌کردند، اما پس از ممیزی، بهبودهایی در سیستم روشنایی مانند تعویض لامپ‌ها با LED یا نصب حسگرهای حرکتی برای خاموش کردن چراغ‌ها در مواقع عدم استفاده انجام شد. این تغییرات، مصرف انرژی و میزان حرارت تولیدی توسط سیستم روشنایی را کاهش دادند.

از سوی دیگر، یخچال‌ها با مدل‌های جدیدتر و کارآمدتر جایگزین شده باشند که به کاهش تولید گرمای آن‌ها کمک کرده است. با این حال، کامپیوترها و پرینترها نیز می‌توانند مقدار قابل توجهی گرما تولید کنند، به خصوص اگر به صورت مداوم روشن

باشند یا به‌درستی مدیریت نشوند. اگر ممیزی استفاده ناکارآمد از تجهیزات اداری را شناسایی کرده باشد، تغییراتی برای اطمینان از خاموش کردن تجهیزات در زمان عدم استفاده یا جایگزینی آن‌ها با مدل‌های کارآمدتر پیشنهاد داده است. به همین دلیل، پس از ممیزی این تجهیزات اداری به بزرگ‌ترین تولیدکنندگان گرما تبدیل شدند.



شکل ۲. بالانس انرژی حرارتی ساختمان قبل (الف) و بعد از ممیزی انرژی (ب) طی سال



شکل ۳. مقایسه میزان برق و گاز مصرفی کل ساختمان قبل (الف) و بعد از ممیزی انرژی (ب) طی سال

شکل ۳ مصرف سالانه برق و گاز قبل و بعد از ممیزی انرژی را نشان می‌دهد. بیشترین مصرف برق در ماه آگوست با مقدار ۳۵ مگاوات ساعت، قبل و بعد از ممیزی ثبت شده است. همچنین، بیشترین مصرف گاز در ماه دسامبر به دلیل استفاده از گاز برای گرمایش بوده است. ثبت بیشترین مصرف برق در ماه آگوست و بیشترین مصرف گاز در ماه دسامبر الگوهای رایجی در بسیاری از ساختمان‌ها هستند، به‌ویژه در مناطقی که طی سال تغییرات فصلی مشخصی را تجربه می‌کنند. در چنین مناطقی به طور کلی، مصرف برق در ماه‌های تابستان به دلایل زیر در اوج قرار می‌گیرد:

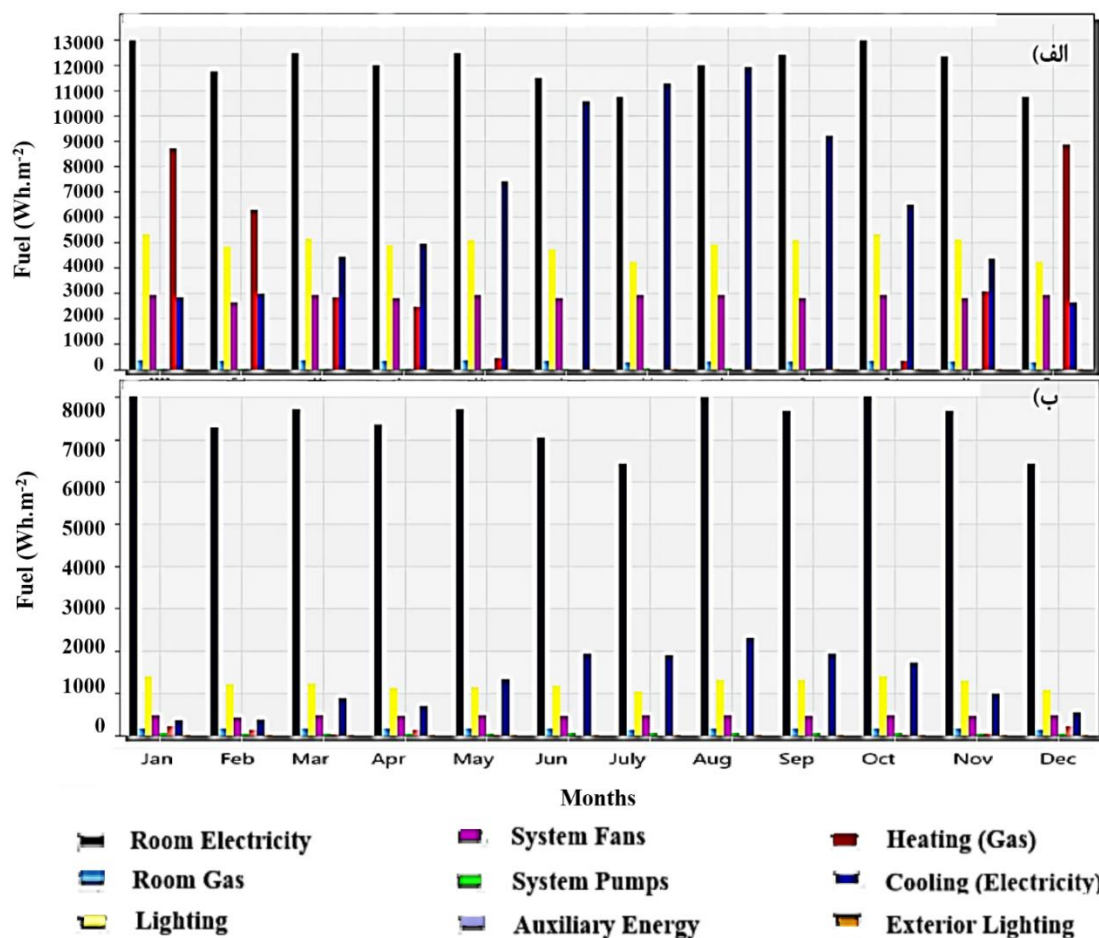
۲. افزایش استفاده از سیستم‌های تهویه مطبوع برای حفظ دمای آسایش داخل ساختمان در هوای گرم؛

۳. طولانی‌تر بودن روزها در تابستان و استفاده بیشتر از سیستم‌های روشنایی؛

۴. تعطیلات تابستانی و کارایی کمتر دفاتر و ساختمان‌ها در مصرف انرژی.

از سوی دیگر، اوج مصرف گاز در ماه دسامبر به دلیل نیاز بیشتر به گرمایش در ماه‌های سرد زمستان است. بسیاری از ساختمان‌ها برای گرمایش از گاز طبیعی یا سایر انواع سوخت استفاده می‌کنند که این امر موجب افزایش قابل توجه مصرف گاز در زمستان نسبت به سایر ماه‌های سال می‌شود.

نتیجه ممیزی انرژی در این ساختمان نشان داد با وجود ثابت ماندن اوج مصرف برق قبل و بعد از ممیزی، تغییراتی در کل مصرف انرژی یا استفاده بهینه‌تر از برق در دوره‌های غیر اوج رخ داده است. ممیزی فرصت‌هایی برای کاهش مصرف کلی انرژی شناسایی کرده است که موجب کاهش هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی منجر می‌شود. از سوی دیگر، در حالی که اوج مصرف گاز در دسامبر به دلیل نیاز گرمایشی پیش‌بینی شده است، ممیزی انرژی، راه‌هایی برای بهبود کارایی سیستم گرمایش یا کاهش مصرف گاز در سایر بخش‌ها شناسایی کرده است که این نیز به کاهش هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی کمک می‌کند.

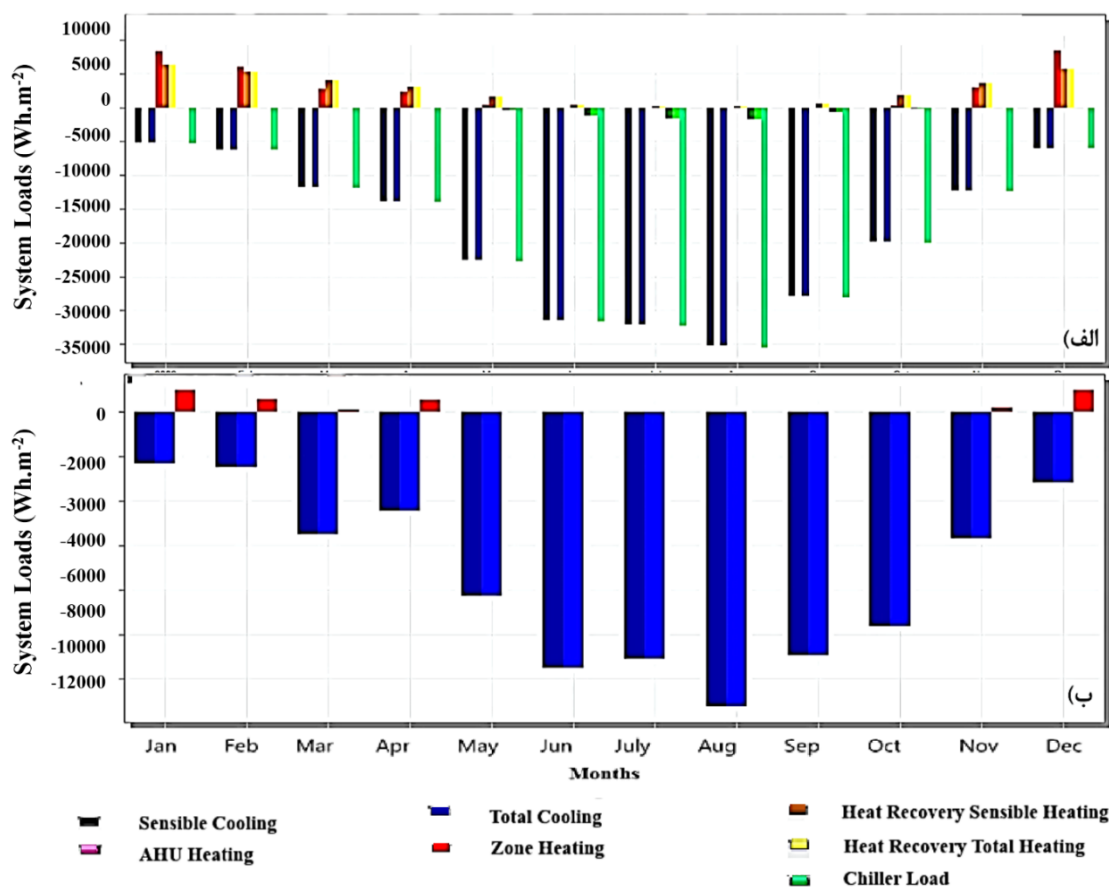


شکل ۴. مصرف سوخت در بخش‌های مختلف ساختمان قبل (الف) و بعد از ممیزی انرژی (ب) طی سال

در شکل ۴، مصرف برق و گاز برای بخش‌های مختلف مصرف انرژی نشان داده شده است. بیشترین مصرف برق به عنوان منبع اصلی انرژی در ساختمان قبل و بعد از ممیزی مربوط به برق اتاق‌ها و سیستم‌های سرمایشی است. مؤثرترین روش ممیزی، تغییر الگوی استفاده از سیستم سرمایشی و بهبود الگوی استفاده از تجهیزات روشنایی با جایگزینی آن‌ها با دستگاه‌های کارآمدتر بود که به کاهش مصرف برق به میزان ۸۱/۶ درصد و ۷۵/۴ درصد منجر شده است.

بیشترین مصرف برق در اتاق‌ها و سیستم‌های سرمایشی، الگویی رایج در بسیاری از ساختمان‌ها، به‌ویژه در فضاهای اداری یا تجاری است. سیستم‌های روشنایی و سرمایشی نقش اساسی در ایجاد آسایش محیط داخلی دارند، اما مقادیر زیادی انرژی مصرف می‌کنند. در جریان ممیزی، فرصت‌هایی برای بهبود بهره‌وری این سیستم‌ها شناسایی شده است. تغییر الگوی استفاده از سیستم سرمایشی می‌تواند شامل تنظیم دما یا زمان‌بندی استفاده برای کاهش زمان عملکرد سیستم سرمایشی، به‌ویژه در دوره‌های با اشغال کم یا خارج از ساعات کاری باشد. این اقدامات صرفه‌جویی قابل توجهی در انرژی ایجاد می‌کنند، در حالی که دمای آسایش داخلی حفظ می‌شود.

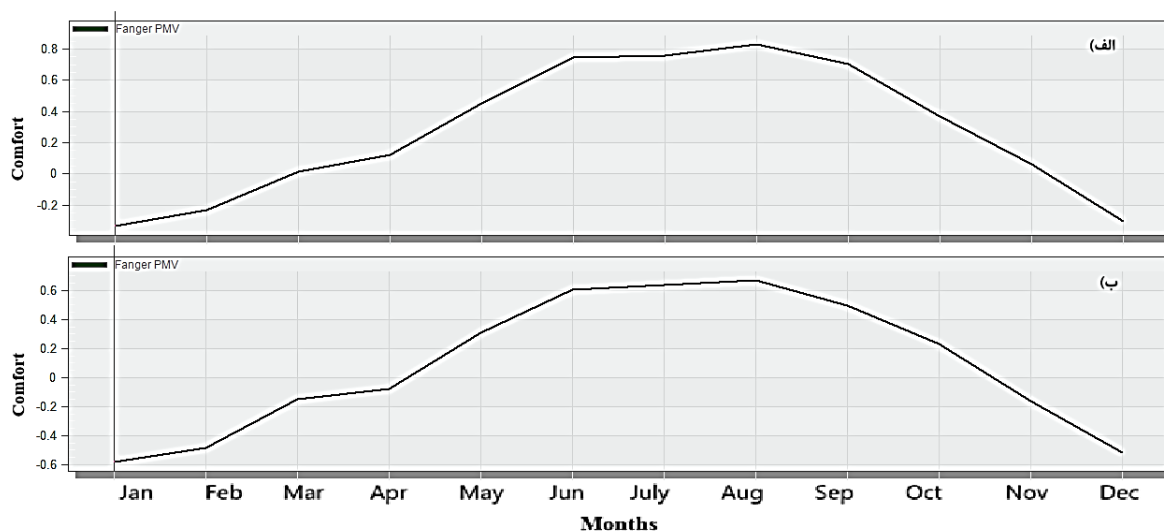
بهبود الگوی استفاده از تجهیزات روشنایی می‌تواند شامل جایگزینی لامپ‌های قدیمی با لامپ‌های LED کارآمدتر یا نصب حسگرها یا تایمرها برای خاموش کردن نورها در زمان عدم نیاز باشد. این تغییرات بدون اینکه کیفیت یا میزان روشنایی کاهش یابد به صرفه‌جویی قابل توجهی در انرژی و کاهش هزینه‌ها منجر می‌شوند. همچنین، کاهش مصرف برق برای سیستم‌های سرمایشی و روشنایی تأثیر مثبتی بر هزینه انرژی ساختمان و ردپای کربنی آن خواهد داشت و می‌تواند باعث بهبود راحتی و بهره‌وری کاربران شوند.



شکل ۵. بار سرمایشی و گرمایشی ساختمان قبل (الف) و بعد از ممیزی انرژی (ب) طی سال

بر اساس شکل ۵، بار اوج سیستم‌های گرمایش و سرمایش پس از انجام ممیزی انرژی به ترتیب ۸۸/۸ درصد و ۶۵/۷ درصد کاهش یافته است. بار اوج سیستم‌های گرمایش و سرمایش، به حداکثر میزان انرژی مورد نیاز برای حفظ دمای آسایش در یک

ساختمان در دوره‌های با تقاضای بالا اشاره دارد. این اتفاق می‌تواند در زمان‌های خاصی از روز یا در فصل‌های معینی که تعداد زیادی از افراد در ساختمان حضور دارند و به طور هم‌زمان از سیستم‌های گرمایشی یا سرمایشی استفاده می‌کنند، رخ دهد.



شکل ۶. شرایط آسایش ساکنان ساختمان قبل (الف) و بعد از ممیزی انرژی (ب) طی سال

شکل ۶ شرایط آسایش ساکنان ساختمان قبل و بعد از ممیزی انرژی طی سال را نمایش می‌دهد. مطابق ارزیابی صورت‌گرفته، در ماه‌های تیر و مرداد و دی، قبل از اعمال روش‌های کاهش مصرف انرژی در خارج از محدوده آسایش قرار دارند. اعمال روش‌های کاهش مصرف، موجب بهبود شرایط آسایش و افزایش مدت زمان آسایش ساکنان شده است. به طور مثال، اگر درصد شرایط آسایش در تیرماه به طور میانگین ۲۵ درصد پیش از ممیزی بوده، بعد از ممیزی این مقدار به ۷۵ درصد رسیده و در دی‌ماه نیز میزان بهره‌مندی از شرایط آسایش از ۳۰ درصد به ۶۰ درصد افزایش یافته است.

پس از یک ممیزی انرژی، معمولاً فرصت‌هایی برای بهبود کارایی سیستم‌های گرمایش و سرمایش شناسایی می‌شود. با اجرای تغییراتی نظیر ارتقای تجهیزات، بهبود کنترل‌ها یا تنظیم برنامه‌های عملیاتی، می‌توان میزان انرژی مورد نیاز برای تأمین دمای آسایش را کاهش داد و در نتیجه، بار اوج را نیز کم کرد. اگر در ممیزی مشخص شود که سیستم گرمایشی ناکارآمد است و ارتقای آن توصیه شود، این تغییر می‌تواند به صرفه‌جویی قابل توجهی در انرژی و کاهش بار اوج گرمایش منجر شود. به همین ترتیب، اگر مشخص شود که سیستم سرمایشی بیش از حد بزرگ یا ناکارآمد است، تغییراتی مانند تنظیمات دمایی هوشمند، بهبود کنترل‌ها یا جایگزینی تجهیزات می‌تواند به کاهش مصرف انرژی و کاهش بار اوج سرمایش منجر شود. علاوه بر ارتقای تجهیزات و تغییرات عملیاتی، تغییرات رفتاری نیز می‌تواند به کاهش بار اوج کمک کنند. اقدامات ساده‌ای مانند خاموش کردن چراغ‌ها یا تجهیزات اداری در زمان عدم استفاده، می‌تواند مصرف کلی انرژی ساختمان را کاهش داده و در نتیجه بار اوج را نیز کم کند.

۴. بحث

مطابق جدول ۵، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد سیستم‌های گرمایشی، تهویه و سرمایشی بیشترین سهم را در مصرف انرژی ساختمان دارند. مطالعات کلی نشان داده‌اند این سیستم‌ها می‌توانند بین ۱۵ تا ۶۰ درصد از مصرف انرژی ساختمان‌ها را به خود اختصاص دهند. بهینه‌سازی این سیستم‌ها، از جمله جایگزینی تجهیزات ناکارآمد، بهبود کنترل دما و اصلاح رفتار استفاده از تجهیزات، می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کاهش مصرف انرژی داشته باشد [۴۱]. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند ترکیب بهینه‌سازی تجهیزات و تغییر الگوهای استفاده از سیستم‌های HVAC می‌تواند به کاهش ۱۴ تا ۳۸ درصد مصرف انرژی منجر شود [۴۲]. پژوهش حاضر نیز تحلیل هم‌زمان روش‌های فعال و غیرفعال را به جای بررسی جداگانه هر روش که تصویر دقیق‌تری از مصرف انرژی ارائه می‌دهد، صحنه‌گذاری می‌کند. علاوه بر سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی، بخش‌های روشنایی

و تجهیزات اداری نیز سهم قابل توجهی در مصرف انرژی دارند. بهبود الگوی استفاده از این تجهیزات، حتی با کاهش نسبی مصرف، نشان‌دهنده اهمیت توجه به جزئیات عملکردی ساختمان است. مطالعات نشان داده‌اند بهینه‌سازی سیستم‌های روشنایی می‌تواند به کاهش ۱۰ تا ۲۶ درصد مصرف انرژی منجر شود [۴۳].

از سوی دیگر، مطالعات اخیر نشان می‌دهند استفاده از لامپ‌های LED می‌تواند تا ۹۰ درصد مصرف انرژی را کاهش دهد و از تولید گرما به میزان قابل توجهی بکاهد. این لامپ‌ها نسبت به لامپ‌های رشته‌ای که ۹۰ درصد انرژی خود را به صورت گرما هدر می‌دهند، بسیار کارآمدتر هستند. در ممیزی انرژی انجام‌شده، با تعویض لامپ‌های قدیمی با لامپ‌های LED و نصب حسگرهای حرکتی برای خاموش کردن خودکار چراغ‌ها در زمان عدم استفاده، تولید گرما به طور قابل توجهی کاهش یافت. در پژوهش حاضر، پس از ممیزی انرژی، تجهیزات اداری مانند کامپیوترها و پرینترها به عنوان منابع اصلی تولید گرما شناسایی شدند. مطالعات مشابه نیز نشان داده‌اند تجهیزات اداری می‌توانند سهم قابل توجهی در تولید گرما داشته باشند. برای مثال، تحقیقی نشان داد بار حرارتی ناشی از تجهیزات اداری در سال ۲۰۱۵ نسبت به سال ۱۹۸۰ حدود ۴۹/۶ درصد افزایش یافته است [۴۴]. علاوه بر بهبودهای فنی، تغییر رفتار مصرف‌کنندگان نقش مهمی در کاهش تولید گرما دارد. تحقیقی در سال ۲۰۲۴ نشان داد آموزش و آگاهی‌بخشی به مصرف‌کنندگان می‌تواند به کاهش مصرف انرژی و تولید گرما منجر شود. این نتایج با یافته‌های پژوهش حاضر که نشان‌دهنده تأثیر تغییر رفتار مصرف‌کنندگان بر کاهش تولید گرما است، منطبق است [۴۵].

همچنین، مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۳ نشان داد بهبود بهره‌وری سیستم‌های روشنایی و سرمایشی می‌تواند به کاهش چشمگیر مصرف انرژی و بهبود کارایی و پایداری منجر شود [۴۶]. این یافته با نتایج پژوهش حاضر در شکل ۴، که کاهش ۸۱/۶ درصد در مصرف برق سیستم‌های سرمایشی و ۷۵/۴ درصد در مصرف برق سیستم‌های روشنایی را نشان می‌دهد، همخوانی دارد. همچنین، پژوهشی در سال ۲۰۲۲ نشان داد استفاده از لامپ‌های LED و بهینه‌سازی سیستم‌های سرمایشی می‌تواند باعث کاهش قابل توجهی در مصرف انرژی شود. این نتایج، یافته‌های پژوهش حاضر که استفاده از لامپ‌های LED و بهبود الگوی استفاده از سیستم‌های سرمایشی را به عنوان مؤثرترین روش‌های ممیزی انرژی معرفی می‌کند، تقویت می‌کند [۴۷].

علاوه بر این، مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۵ نشان داد با اجرای ممیزی انرژی و بهبود سیستم‌های HVAC، شرایط آسایش در ساختمان‌های اداری به طور میانگین ۳۰ درصد بهبود یافته است. این یافته با نتایج پژوهش حاضر که افزایش ۵۰ درصدی در شرایط آسایش در ماه‌های تیر و دی را نشان می‌دهد، همسو است [۴۸]. در نهایت، نتایج به‌دست‌آمده با یافته‌های مطالعات پیشین هم‌راستا بوده است. این همسویی نشان می‌دهد الگوهای مشاهده‌شده محدود به شرایط خاص این مطالعه نبوده و می‌توان آن‌ها را در زمینه‌های مشابه نیز معتبر دانست.

بار گرمایش و سرمایش مطالعه حاضر با مطالعه‌ای که در یک ساختمان اداری در کشور سوئد در سال ۲۰۲۱ [۴۹] و در ساختمان اداری دیگر در منطقه گرم تابستان و سرد زمستان چین در سوئو [۵۰] گزارش شده‌است، هم‌خوانی دارد. در این مطالعه، طراحی سیستم گرمایش و سرمایش زمین‌گرمایی برای ساختمان اداری انجام شد. بار گرمایشی و سرمایشی سیستم به ترتیب ۱۸ و ۱۷۷/۴۳ مگاژول بر ساعت محاسبه شد. طول چاه‌های گرمایش و سرمایش به ترتیب ۱۷۳ و ۵۰۴ متر و قطر آن‌ها به ترتیب ۱/۵۴ و ۲/۸۶ متر تعیین شد. مقایسه این نتایج با مطالعات مشابه در مناطق با شرایط اقلیمی مشابه نشان‌دهنده همخوانی مناسب است. به عنوان مثال، در مطالعه‌ای، بار گرمایشی در ساختمان‌های اداری مشابه ۱۸ تا ۲۰ مگاژول بر ساعت و بار سرمایشی ۴۰ تا ۴۵ مگاژول بر ساعت گزارش شده است. همچنین، طول چاه‌های گرمایشی در این مطالعه بین ۴۵۰ تا ۵۵۰ متر متغیر بود [۵۱].

همچنین به منظور مقایسه نتایج مدل، مطالعات پیشین در ژاپن نیز مورد بررسی قرار گرفت. به عنوان نمونه، مطالعه بینا و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از شبیه‌سازی در مقیاس ملی، طول مورد نیاز چاه‌های مبادله‌گر زمین را برای ساختمان‌های مرجع در مناطق مختلف ژاپن بررسی کرده است. نتایج پژوهش یادشده نشان می‌دهد طول مورد نیاز چاه‌ها در حدود ۸۵ درصد از مناطق کمتر از ۴۰۰ متر برای تأمین بار گرمایشی و سرمایشی بوده و طول بهینه چاه‌ها وابستگی بالایی به شرایط اقلیمی و بار مصرفی ساختمان‌ها دارد و نتایج مدل حاضر نیز با روندهای گزارش‌شده در ادبیات پیشین همخوانی داشته است [۵۲].

با توجه به مقایسه‌های انجام‌شده، بارهای گرمایشی و برودتی محاسبه‌شده در مطالعه حاضر با مقادیر گزارش‌شده در مطالعات

مشابه همخوانی دارند، این همخوانی نشان‌دهنده دقت و اعتبار مدل محاسباتی انتخاب شده است. علت تفاوت در بار سرمایشی و گرمایشی در مطالعات ناشی از تفاوت در شرایط اقلیمی، ویژگی‌های فنی ساختمان‌ها مانند عایق‌بندی حرارتی، میزان نفوذ هوا و استفاده از سیستم‌های تهویه و بازیافت انرژی و نوع کاربری ساختمان است. همچنین، نتایج محاسباتی مشخصات ترمودینامیکی سیستم سرمایش، گرمایش در این مطالعه با داده‌های موجود در مطالعات مشابه همخوانی دارند و طراحی سیستم GSHP برای ساختمان اداری در تهران از نظر بارهای حرارتی و ابعاد چاه‌ها معتبر و منطقی ارزیابی می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه از روش‌های ممیزی انرژی فعال و غیرفعال برای ارزیابی تأثیر استراتژی‌های مختلف بر کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها استفاده شده است. نتایج حاصل از کاربست راهکارهای فعال و غیرفعال در ممیزی ساختمان نشان داد طراحی پنجره عامل مهمی در تأثیرگذاری بر ممیزی انرژی است و استفاده از دوربین‌های ترموگرافی می‌تواند به ممیزی انرژی کمک کند تا نشت حرارتی از طریق پنجره‌ها را ارزیابی کند. تعویض یا ارتقای پنجره‌ها به منظور بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌ها، اصلاح الگوی استفاده از سیستم‌های سرمایش و روشنایی به عنوان روش‌های مؤثر در کاهش مصرف انرژی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، ارتقای تجهیزات، بهبود کنترل‌ها، تنظیم برنامه‌های کاری و تغییر رفتار پس از ممیزی انرژی به کاهش بار اوج در سیستم‌های سرمایش و گرمایش منجر شد. این مطالعه نشان داد اجرای هر دو روش فعال و غیرفعال می‌تواند به کاهش در مصرف برق و گاز، هزینه‌های اولیه و افزایش سطح راحتی منجر شود. بهبود الگوی استفاده از تجهیزات سرمایش و روشنایی با تغییر آن به دستگاه‌های کارآمدتر، بیشترین تأثیر مثبت را در ساختمان مورد مطالعه نشان داد، گرچه جایگزینی و استفاده از روشنایی LED باعث افزایش هزینه‌های اولیه می‌شود. با توجه به مصرف انرژی و هزینه‌های اولیه، بهبود الگوی استفاده از سیستم‌های گرمایش و سرمایش به عنوان بهترین روش ممیزی انرژی لحاظ شد. این مطالعه همچنین بخش‌های مصرف‌کننده بالای انرژی را در تأمین برق داخلی و گاز برای گرمایش شناسایی کرد. نتایج نشان داد ظرفیت سیستم‌های گرمایش و سرمایش پس از ممیزی کاهش یافته و تولید حرارت ناخواسته پس از استفاده از روشنایی جایگزین کاهش یافته است. مهم‌ترین نتایج کلیدی این مطالعه عبارت‌اند از:

۱. در صورتی که ترکیبی از روش‌های فعال و غیرفعال به کار گرفته شود، مصرف برق و گاز به ترتیب ۵۸/۷۳ درصد و ۵۹/۳۹ درصد کاهش خواهد یافت.
۲. بیشترین مصرف سوخت گازی در تأمین انرژی حرارتی بخش گرمایش و بیشترین مصرف برق در تأمین تقاضا برودتی ساختمان است که این تقاضا پس از اجرای استراتژی‌های بهینه‌سازی انرژی در ساختمان به ترتیب به میزان ۷/۸۹ و ۳۳/۹۷ مگاوات ساعت کاهش یافت.
۳. اگر الگوی استفاده بهبود یابد، ظرفیت کویل‌های گرمایش و سرمایش که دو سیستم پرمصرف در چرخه گرمایش و سرمایش هستند به ترتیب ۵۷/۷۰ درصد و ۷۱/۶۹ درصد کاهش خواهد یافت.
۴. بیشترین تأثیر ممیزی با تغییر الگوی استفاده از سیستم سرمایش و بهبود الگوی استفاده از تجهیزات روشنایی با تغییر آن به دستگاه‌های کارآمدتر با کاهش مصرف برق به ترتیب ۸۱/۶ درصد و ۷۵/۴ درصد بود.
۵. بار اوج برای گرمایش و سرمایش پس از ممیزی انرژی به ترتیب ۸۸/۸ درصد و ۶۵/۷ درصد کاهش یافت.
۶. میزان آسایش محیطی کاربران پس از ممیزی انرژی ۶۵ درصد افزایش یافت.

تقدیر و تشکر

این پژوهش بخشی از نتایج مطالعه تحت حمایت مالی شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت است. نویسندگان از این شرکت بابت حمایت ارزشمند و نقش برجسته آن در تحقق این پژوهش علمی، نهایت سپاسگزاری را دارند.

منابع

- [1] IEA, I., Renewable energy market update. Renewable Energy Market Update, 2022.
- [2] Newell, R., et al., Global Energy Outlook 2020: energy transition or energy addition. Resources for the Future, 2020.
- [3] Aram, K., R. Taherkhani, and A. Šimelytė, Multistage optimization toward a nearly net zero energy building due to climate change. *Energies*, 2022. 15(3): p. 983.
- [4] I., R., Analysis and Forecast to 2026. 2021.
- [5] Liu, Z., et al., Review of energy conservation technologies for fresh air supply in zero energy buildings. *Applied Thermal Engineering*, 2019. 148: p. 544-556.
- [6] Edziah, B.K. and E.E.O. Opoku, Enhancing energy efficiency in Asia-Pacific: Comprehensive energy policy analysis. *Energy Economics*, 2024. 138: p. 107831.
- [7] Liang, Y., R. Kleijn, and E. Van der Voet, Increase in demand for critical materials under IEA Net-Zero emission by 2050 scenario. *Applied Energy*, 2023. 346: p. 121400.
- [8] Marszal, A.J. and P. Heiselberg, Life cycle cost analysis of a multi-storey residential Net Zero Energy Building in Denmark. *Energy*, 2011. 36(9): p. 5600-5609.
- [9] Noguchi, M., et al. Net zero energy homes of the future: A case study of the EcoTerra™ house in Canada. *Renewable Energy Congress*, Glasgow, Scotland. 2008.
- [10] Maduta, C., et al., From Nearly Zero-Energy Buildings (NZEBs) to Zero-Emission Buildings (ZEBs): Current status and future perspectives. *Energy and Buildings*, 2024: p.115133.
- [11] Ahmed, A., et al., Assessment of the renewable energy generation towards net-zero energy buildings: A review. *Energy and Buildings*, 2022. 256: p. 111755.
- [12] Senyonyi, B., H. Mahmoud, and H. Hassan, Systematic review of solar techniques in zero energy buildings. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2024: p. 1-46.
- [13] Salama, A., H. Kady, and H. Mohktar. A Performance Evaluation of Passive Solar Strategies in Achieving Near-Zero Energy in Modern Office Buildings. *The International Conference on Civil and Architecture Engineering*. 2024. Military Technical College.
- [14] Habibi, S., The effect of building orientation on energy efficiency. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2024. 26(4): p. 1315-1330.
- [15] Renuka, S., et al., Optimization of energy consumption based on orientation and location of the building. *Materials Today: Proceedings*, 2022. 65: p.526-537.
- [16] Akbarzadeh, N. and Sh. Adamnowehsi, The role of shading systems in building climate design, in *The First International Comprehensive Conference on Engineering Sciences in Iran*. 2016.
- [17] Jafari Tabrizi, S., F. Haghparast, and A. Maleki, Investigating the role of adaptive shading systems in energy consumption and their driving mechanism. 2016. 8 (1).
- [18] Gercek, M. and I. Gucu, The impacts of window to wall ratio and window orientation on building energy consumption and CO₂ emissions under climate change. *International Journal of Global Warming*, 2019. 18(3-4): p. 269-286.
- [19] Du, Y., et al., A Case Study of Air Infiltration for Highly Airtight Buildings under the Typical Meteorological Conditions of China. *Buildings*, 2024. 14(6): p. 1585.
- [20] Ruiz, M. and E. Romero, Energy saving in the conventional design of a Spanish house using thermal simulation. *Energy and buildings*, 2011. 43(11): p. 3226-3235.
- [21] Ascione, F., et al., Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials: Energy savings and indoor comfort in the cooling season. *Applied Energy*, 2014. 113: p. 990-1007.
- [22] Pyloudi, E., S. Papantoniou, and D. Kolokotsa, Retrofitting an office building towards a net zero energy building. *Advances in Building Energy Research*, 2015. 9(1): p. 20-33.
- [23] Kaewunruen, S., J. Sresakoolchai, and L. Kerinnonta, Potential reconstruction design of an existing townhouse in Washington DC for approaching net zero energy building goal. *Sustainability*, 2019. 11(23): p. 6631.
- [24] Shahee, A., et al., Reducing the energy consumption of buildings by implementing insulation scenarios and using renewable energies. *Energy Informatics*, 2024. 7(1): p. 18.
- [25] Abdous, M., et al., Design and analysis of zero-energy and carbon buildings with renewable energy supply and recycled materials. *Energy and Buildings*, 2024: 324. p. 114922.

- [26] Feng, W., et al., A review of net zero energy buildings in hot and humid climates: Experience learned from 34 case study buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019. 114: p. 109303.
- [27] Abdou, N., et al., Multi-objective optimization of passive energy efficiency measures for net-zero energy building in Morocco. *Building and environment*, 2021. 204: p. 108141.
- [28] Sarir, P. and M. Sharifzadeh, Application of passive and active scenarios to a residential building in a dry and hot climate to achieve a positive energy building (PEB). *Heliyon*, 2024. 10 (10).
- [29] Motlagh, A.A., et al., Achieving Net-Zero Energy Buildings: Analyzing and Optimizing Strategies Using Sensitivity Analysis. *Journal of Asian Energy Studies*, 2024. 8 :p. 51-67.
- [30] Crawley, D.B., et al., EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and buildings*, 2001. 33(4): p. 319-331.
- [31] Kelly, J. and W. Knottenbelt, The UK-DALE dataset, domestic appliance-level electricity demand and whole-house demand from five UK homes. *Scientific data*, 2015. 2(1): p. 1-14.
- [32] Chiasson, A.D., *Geothermal heat pump and heat engine systems: Theory and practice*. 2016: John Wiley & Sons.
- [33] Murugappan, A., Implementing ground source heat pump and ground loop heat exchanger models in the EnergyPlus simulation environment. 2002, Citeseer.
- [34] Yavuzturk, C., *Modeling of vertical ground loop heat exchangers for ground source heat pump systems*. 1999: Oklahoma State University.
- [35] Tabares-Velasco, P.C .and B. Griffith, Diagnostic test cases for verifying surface heat transfer algorithms and boundary conditions in building energy simulation programs. *Journal of Building Performance Simulation*, 2012. 5(5): p. 329-346.
- [36] Khalifa, A.-J.N., *Heat transfer processes in buildings*. 1989, University of Wales, College of Cardiff.
- [37] Kruijs, N. and M. Krarti, KivaTM: a numerical framework for improving foundation heat transfer calculations. *Journal of Building Performance Simulation*, 2015. 8(6): p. 449-468.
- [38] Platzer, W.J., *Transparent insulation materials: a review*. *Optical Materials Technology for Energy Efficiency and Solar Energy Conversion XIII*, 1994. 2255: p. 616-627.
- [39] Conditioning, C.A., *Handbook of air conditioning system design*. 1965: McGraw-Hill Interamericana.
- [40] Fanger, P., Introduction of a basic comfort equation. *Ashrae Trans.*, 1967. 73(2): p. 1-20.
- [41] Qaisar, I., et al., An experimental comparative study of energy saving based on occupancy-centric control in smart buildings. *Building and Environment*, 2025. 268: p. 112322.
- [42] Tran, L.N., Q. Wu, and H.T. Hoang, The effect of changing heat use patterns on residential energy efficiency in a Japanese smart community. *Scientific Reports*, 2025. 15(1): p. 20404.
- [43] Roisin, B., et al., Lighting energy savings in offices using different control systems and their real consumption. *Energy and buildings*, 2008. 40(4): p. 514-523.
- [44] Kim, H., et al., Study on variation of internal heat gain in office buildings by chronology. *Energies*, 2018. 11 (4): p. 1013.
- [45] Iatauro, D., et al. Thermal comfort monitoring in office buildings: A case study. *E3S Web of Conferences*. 2024. EDP Sciences.
- [46] Kandothillath, F.J. and F.M. Guangul, Energy auditing of HVAC systems for the enhancement of efficiency and sustainability. *The Journal of Engineering Research*, 2024. 21(1): p. 71-86.
- [47] Van Sant, A., C. CaraDonna, and A. Parker, *End-Use Savings Shapes Measure Documentation: LED Lighting*. 2023, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States.)
- [48] Kajjoba, D., et al., Assessment of thermal comfort and its potential for energy efficiency in low-income tropical buildings: a review. *Sustainable Energy Research*, 2025. 12(1): p. 25.
- [49] Davis, J.M., H. Witte, and G. Geo-Energysystems, *IEA HPT Annex 52-Long-term performance monitoring of GSHP systems for commercial, institutional, and multi-family buildings*. 2021.
- [50] Ma, W., M.K. Kim, and J. Hao, Numerical simulation modeling of a GSHP and WSHP system for an office building in the Hot Summer and Cold Winter Region of China: A Case Study in Suzhou. *Sustainability*, 2019. 11(12): p. 3282.

- [51] Sakata, Y., T. Katsura, and K. Nagano, Nationwide determination of required total lengths of multiple borehole heat exchangers under variable climate and geology in Japan. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021. 10(4): p. 205.
- [52] Bina, S.M., et al., A predictive model of long-term performance assessment of Ground Source Heat Pump (GSHP) systems in Japanese regions. Geothermics, 2024. 119: p. 1029-55.