

Development of an Operational Framework for Smart Management and Energy Flexibility in Net-Zero Energy Buildings

Mojtaba Masoumnezhad¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University, Tehran, Iran.

* mmasomnezhad@tvu.ac.ir

ABSTRACT

The transition toward Net-Zero Energy Buildings (NZEBS) necessitates the integration of energy flexibility with smart management systems. However, a literature review reveals a significant gap between theoretical flexibility frameworks and their operational feasibility in real-world contexts, particularly concerning cybersecurity challenges and stakeholder interest conflicts. To bridge this gap, the present study develops an integrated conceptual-operational framework grounded in the philosophical foundations of Critical Realism. This framework is structured into a five-layer architecture (physical, digital, optimization, grid, and policy). For its operationalization, the IDADA method and novel composite indicators, including the Composite Flexibility Index (CFI), the Stakeholder Benefit Index (SBI), and privacy-related metrics, are utilized. For validation, a 10-unit residential complex in a hot and dry climate was simulated using the Design Builder/Energy Plus environment, and the indicators were weighted through a hybrid AHP-Delphi approach.

The results demonstrate that implementing this framework leads to an 85.7% improvement in the CFI and a 134% surge in the SBI (balancing the interests of residents and the grid). Furthermore, sensitivity analysis via the Monte Carlo method confirmed the high robustness of the model against behavioral and economic uncertainties with a 95% confidence interval. The findings suggest that through layered smart management, it is possible to reduce the investment payback period to 7 years while increasing the responsiveness to grid signals by up to 240% without significant detriment to occupant comfort. This framework provides a novel pathway for policymakers and engineers to institutionalize grid-interactive buildings.

KEYWORDS

Net-Zero Energy Building (NZEBS), Energy Flexibility, Smart Management, Critical Realism, Cybersecurity.

1. Introduction

The transition toward Net-Zero Energy Buildings (NZEBS) is a cornerstone of global decarbonization. However, a significant gap exists between theoretical energy flexibility and its operational execution [1, 2].

Current models often fail to integrate multi-stakeholder interests, cyber-security resilience, and socio-economic policy layers. This research proposes an integrated five-layer conceptual-operational framework to bridge this gap, ensuring that NZEBs are not only energy-efficient but also grid-responsive and resilient [3, 4].

2. Methodology: The IDADA Approach

Based on the philosophy of Critical Realism, this study employs the IDADA (Identify, Define, Analyze, Develop, Apply) methodology. This approach allows for the identification of underlying causal mechanisms rather than mere statistical correlations [5].

The framework is structured into five interacting layers: Physical Energy Systems, Digital Intelligence, Flexibility Optimization, Grid Interaction, and Strategic Policy. A hybrid AHP–Delphi approach was employed to weight the newly developed performance indicators. The expert panel comprised 15 purposively selected academic and industrial specialists with demonstrated experience in Net-Zero Energy Buildings, smart energy management, HVAC systems, building energy simulation, and smart grids. The panel size was determined based on Delphi methodological recommendations, which consider 10–20 experts sufficient to achieve consensus in specialized decision-making processes [6]. Pairwise comparison matrices were constructed based on expert judgments, and the consistency of the obtained weights was verified using the consistency ratio before their integration into the framework.

3. Framework Operationalization and Metrics

To quantify the framework's efficacy, several composite indicators were introduced. The Privacy Preservation Index (PPI) was derived from three dimensions: data anonymization, system transparency, and compliance with cybersecurity requirements. The Composite Flexibility Index (CFI) measures technical shifting capacity, while the Stakeholder Benefit Index (SBI) evaluates the equilibrium between grid requirements and occupant comfort.

4. Case Study and Quantitative Results

The framework was validated using a high-fidelity dynamic simulation of a 10-unit residential complex in a

hot-dry climate via Design Builder/Energy Plus (v.7.0). The building integration included a 30kW PV array, 60kWh BESS, and 40% EV penetration.

Table 1: Comparative Performance Analysis (Baseline vs. Optimized)

Key Performance Indicator	Symbol	Baseline	Optimized	Improvement
Privacy Preservation Index	PPI	0.58	0.86	+48.3%
Composite Flexibility Index	CFI	0.42	0.78	+85.7%
Occupant Comfort Index	OCI	0.91	0.87	-4.4%
Stakeholder Benefit Index	SBI	0.35	0.82	+134%
Grid Responsiveness	GSR	0.25	0.85	+240%
Return on Investment	ROI	8.2%	14.5%	+77%

The economic analysis considered not only the investment in PV and battery systems but also the costs of smart infrastructure, including the Energy Management System (EMS), communication networks, sensing devices, and cybersecurity requirements.

Table 1 shows that the proposed framework simultaneously improves technical, economic, and privacy-related performance. While the Occupant Comfort Index (OCI) decreased by approximately 4.4%, the reduction remained within acceptable thermal comfort limits and was outweighed by substantial improvements in flexibility, stakeholder benefits, economic performance, and grid responsiveness.

5. Robustness and Uncertainty Analysis

To ensure the reliability of the results, a Monte Carlo simulation with 10,000 iterations was performed. In each iteration, uncertain input parameters were randomly sampled from their probability distributions, and the simulation model was re-executed to evaluate the CFI, SBI, and OCI.

The analysis confirmed the framework's robustness against uncertainties in occupant behavior and energy price volatility, with a 95% confidence interval [0.65, 0.86] for the CFI.

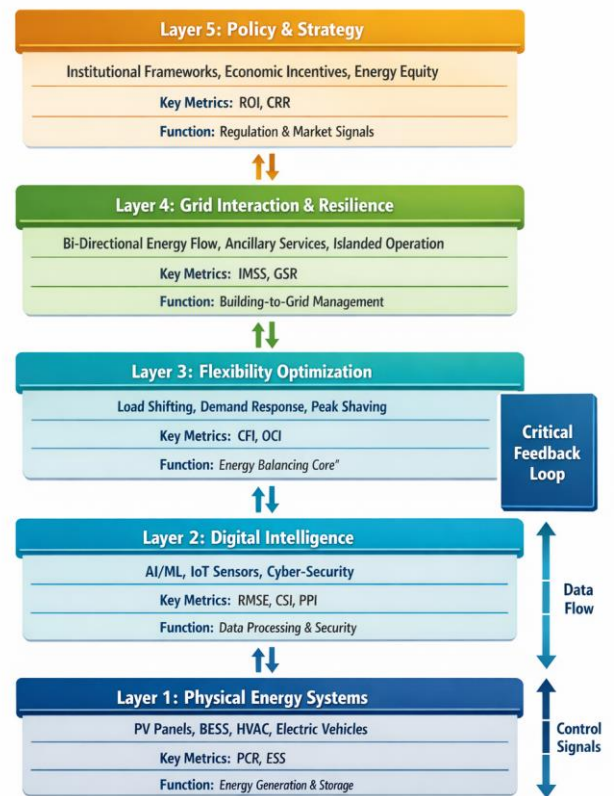
6. Conclusion and Strategic Implications

The findings demonstrate that the proposed multi-layered framework effectively resolves the conflict between grid profitability and occupant comfort. Beyond technical gains, the model reduced the investment payback period from 12 to 7 years.

This research provides a scalable roadmap for policymakers and engineers to implement grid-interactive NZEBs that are economically viable and socially acceptable (Figure 1).

The proposed framework also provides a flexible foundation for integrating future digital technologies and evolving grid-interactive energy services. The main limitations of this study include validation based solely on simulation results, investigation of a single residential building in a hot-dry climate, and occupant behavior modeling using standard EnergyPlus schedules. Future research should therefore validate the framework under real operating conditions across different climates and building types while incorporating machine-learning-based predictive control, data-driven occupant behavior models, enhanced cybersecurity mechanisms, and applications to positive energy districts.

Figure 1: Integrated Conceptual-Operational Framework for NZEBs



7. References

- [1] H. Yuan, & Tang, W., Flexibility Provision From Urban Buildings to Low-Carbon Power Systems: Quantification, Aggregation and System Integration, IET Energy Systems Integration, 7(1) (2025) e70017.
- [2] M.S. Lu, Yongjun; Kokogiannakis, Georgios; Ma, Zhenjun, Design of Flexible Energy Systems for Nearly/Net Zero Energy Buildings Under Uncertainty Characteristics: A Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 205 (2024) 114828.
- [3] Z. Yang, Kong, D., Chen, Z., Zhang, Z., Du, D., & Zhu, Z., A Data-Driven Battery Energy Storage Regulation Approach Integrating Machine Learning Forecasting Models for Enhancing Building Energy Flexibility-A Case Study of a Net-Zero Carbon Building in China. , Buildings, 15(19) (2025) 3611.
- [4] C. Finck, et al. , Review of applied and tested control possibilities for energy flexibility in buildings, Energy Reports, 6 (2020) 709-718.
- [5] A.J. Marszal, et al., Zero Energy Building--A review of definitions and calculation methodologies, Energy and Buildings, 43(4) (2011) 971-979.
- [6] I.R. Diamond, Grant, R. C., Feldman, B. M., et al. , Defining consensus: A systematic review recommends methodologic criteria for reporting of Delphi studies, Journal of Clinical Epidemiology, 67(4) (2014) 401-409.

توسعه چارچوب عملیاتی مدیریت هوشمند و انعطاف‌پذیری انرژی در ساختمان‌های

صفر خالص

مجتبی معصوم نژاد^{۱*}

۱- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران، mmasomnezhad@tvu.ac.ir

چکیده

گذار به ساختمان‌های با انرژی خالص صفر مستلزم یکپارچه‌سازی انعطاف‌پذیری انرژی با سامانه‌های مدیریت هوشمند است. با این حال، مرور ادبیات نشان می‌دهد میان چارچوب‌های نظری و اجرای عملی آن‌ها، به‌ویژه در مواجهه با چالش‌های امنیت سایبری و تعارض منافع ذی‌نفعان، شکاف قابل‌توجهی وجود دارد. این پژوهش با هدف رفع این شکاف، یک چارچوب یکپارچه مفهومی-عملیاتی مبتنی بر واقع‌گرایی انتقادی ارائه می‌کند. چارچوب پیشنهادی در قالب معماری پنج‌لایه شامل لایه‌های فیزیکی، دیجیتال، بهینه‌سازی، شبکه و سیاست‌گذاری سازمان‌دهی شده و برای عملیاتی‌سازی آن از روش شناسایی، تعریف، تحلیل، توسعه و ارزیابی، شاخص ترکیبی انعطاف‌پذیری انرژی، شاخص تعادل منافع و شاخص‌های حفظ حریم خصوصی استفاده شده است. برای اعتبارسنجی، یک مجتمع مسکونی ۱۰ واحدی در اقلیم گرم و خشک با نرم‌افزارهای انرژی پلاس و دیزاین‌بیلدر شبیه‌سازی و شاخص‌ها با ترکیب روش تحلیل سلسله‌مراتبی و دلفی وزن‌دهی شدند. نتایج نشان داد اجرای چارچوب، شاخص ترکیبی انعطاف‌پذیری انرژی را ۸۵/۷ درصد و شاخص تعادل منافع را ۱۳۴ درصد افزایش می‌دهد. همچنین، تحلیل حساسیت با شبیه‌سازی مونت‌کارلو، پایداری مدل را در برابر عدم قطعیت‌های رفتاری و اقتصادی با سطح اطمینان ۹۵ درصد تأیید کرد. افزون بر این، دوره بازگشت سرمایه به هفت سال کاهش یافت و ظرفیت پاسخ‌گویی ساختمان به سیگنال‌های شبکه، بدون افت محسوس آسایش ساکنان، تا ۲۴۰ درصد افزایش یافت. این چارچوب می‌تواند مبنایی برای توسعه ساختمان‌های متعامل با شبکه برق باشد.

کلمات کلیدی

ساختمان انرژی صفر خالص، انعطاف‌پذیری انرژی، مدیریت هوشمند، واقع‌گرایی انتقادی، امنیت سایبری.

بخش ساختمان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در جهان است و بر اساس گزارش‌های آژانس بین‌المللی انرژی، حدود ۳۰ درصد از مصرف نهایی انرژی و نزدیک به ۲۷ درصد از انتشار دی‌اکسیدکربن را به خود اختصاص می‌دهد [۱، ۲].. افزایش جمعیت شهری، توسعه ساختمان‌های هوشمند، رشد تقاضای انرژی و ضرورت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای موجب شده است که ارتقای بهره‌وری انرژی در ساختمان‌ها به یکی از مهم‌ترین راهبردهای توسعه پایدار و تحقق اهداف کربن‌زدایی تبدیل شود. در این راستا، مفهوم ساختمان‌های انرژی صفر خالص به عنوان یکی از مهم‌ترین راهکارهای کاهش مصرف انرژی و استفاده حداکثری از منابع تجدیدپذیر، جایگاه ویژه‌ای در سیاست‌های انرژی کشورهای مختلف پیدا کرده است. مطابق دستورالعمل عملکرد انرژی ساختمان‌های اتحادیه اروپا، از سال ۲۰۲۰ تمامی ساختمان‌های جدید باید به سمت استانداردهای ساختمان‌های انرژی صفر حرکت کنند [۳، ۴].

اگرچه توسعه سامانه‌های فتوولتائیک، ذخیره‌سازهای انرژی، تجهیزات با راندمان بالا و مصالح نوین ساختمانی موجب افزایش کارایی انرژی در ساختمان‌ها شده است، اما تجربه بهره‌برداری از ساختمان‌های انرژی صفر نشان می‌دهد که دستیابی به عملکرد پایدار تنها از طریق افزایش بازده تجهیزات امکان‌پذیر نیست. نوسانات تولید انرژی خورشیدی، تغییرات شرایط اقلیمی، رفتار متغیر ساکنان، افزایش نفوذ خودروهای برقی و تغییرات تعرفه برق موجب شده است که ساختمان‌ها به سامانه‌هایی پویا و وابسته به شرایط بهره‌برداری تبدیل شوند. در چنین شرایطی، بهره‌گیری از سامانه‌های مدیریت هوشمند انرژی و افزایش انعطاف‌پذیری ساختمان‌ها به عنوان یکی از ارکان اصلی بهره‌برداری پایدار مطرح شده است [۵، ۶].

انعطاف‌پذیری انرژی به توانایی ساختمان در تغییر الگوی مصرف، ذخیره‌سازی یا تولید انرژی در پاسخ به شرایط شبکه، قیمت انرژی یا محدودیت‌های بهره‌برداری گفته می‌شود؛ به گونه‌ای که آسایش حرارتی کاربران، ایمنی و عملکرد ساختمان حفظ شود. این مفهوم در سال‌های اخیر به یکی از مؤلفه‌های اصلی ساختمان‌های متعامل با شبکه تبدیل شده و نقش مهمی در کاهش بار پیک، افزایش قابلیت اطمینان شبکه، تسهیل ادغام منابع تجدیدپذیر و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری ایفا می‌کند [۷، ۸].

هم‌زمان با توسعه فناوری‌های دیجیتال، روش‌های نوینی مانند کنترل پیش‌بین مدل‌مبنا، یادگیری ماشین، اینترنت اشیا، محاسبات لبه‌ای و سامانه‌های مدیریت انرژی هوشمند برای افزایش انعطاف‌پذیری ساختمان‌ها توسعه یافته‌اند [۶، ۹]. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، مرور مطالعات اخیر نشان می‌دهد که اغلب پژوهش‌ها تنها بر یکی از ابعاد فنی مسئله تمرکز داشته‌اند و کمتر مطالعه‌ای موفق شده است جنبه‌های مکانیکی، اقتصادی، مدیریتی، اجتماعی و امنیت اطلاعات را در قالب یک چارچوب منسجم و عملیاتی تلفیق کند. علاوه بر این، موضوعاتی مانند تعادل منافع میان بهره‌برداران ساختمان و شبکه برق، حفظ حریم خصوصی کاربران و امنیت سایبری در بسیاری از مطالعات به‌صورت مستقل بررسی شده و ارتباط آن‌ها با عملکرد فیزیکی ساختمان کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

بررسی انتقادی پژوهش‌های منتشرشده طی سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۵ نیز نشان می‌دهد که اگرچه پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه بهینه‌سازی سامانه‌های تهویه مطبوع، مدیریت پاسخگویی بار، تعامل ساختمان با شبکه و توسعه الگوریتم‌های هوشمند حاصل شده است، اما هنوز شکاف قابل توجهی میان مدل‌های نظری و قابلیت پیاده‌سازی آن‌ها در ساختمان‌های واقعی وجود دارد. بسیاری از مدل‌های موجود تنها یک زیرسامانه ساختمان را بررسی کرده و اثر هم‌زمان پوسته ساختمان، سامانه‌های مکانیکی، رفتار ساکنان، امنیت اطلاعات و سیاست‌های تشویقی را در قالب یک چارچوب واحد در نظر نگرفته‌اند.

بر این اساس، هدف پژوهش حاضر توسعه یک چارچوب مفهومی - عملیاتی برای مدیریت هوشمند و ارتقای انعطاف‌پذیری انرژی در ساختمان‌های انرژی صفر است. چارچوب پیشنهادی بر مبنای فلسفه واقع‌گرایی انتقادی، روش پنج‌مرحله‌ای شناسایی، تعریف، تحلیل، توسعه و ارزیابی^۱ و تصمیم‌گیری چندمعیاره ترکیبی تحلیل سلسله‌مراتبی و دلفی^۲ توسعه یافته و با بهره‌گیری از معماری پنج‌لایه، تعامل میان اجزای فیزیکی ساختمان، سامانه مدیریت انرژی، شبکه برق و ذی‌نفعان را مدل‌سازی می‌کند. همچنین برای ارزیابی

^۱ . Identify-Define-Analyze-Develop-Assess (IDADA)

^۲ . AHP-Delphi

عملکرد چارچوب، سه شاخص ترکیبی شامل شاخص انعطاف‌پذیری ترکیبی^۱، شاخص تعادل منافع ذی‌نفعان^۲ و شاخص حفظ حریم خصوصی^۳ (PPI) معرفی شده و در یک مطالعه موردی ساختمان مسکونی انرژی صفر مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، توسعه ساختمان‌های انرژی صفر از تمرکز صرف بر کاهش مصرف انرژی به سمت مدیریت هوشمند، تعامل با شبکه و افزایش انعطاف‌پذیری انرژی حرکت کرده است. این تغییر رویکرد موجب شده است که پژوهشگران علاوه بر بهبود ویژگی‌های ترمودینامیکی پوسته ساختمان و افزایش راندمان سامانه‌های تهویه مطبوع، به موضوعاتی مانند پیش‌بینی بار، پاسخگویی به تقاضا، ذخیره‌سازی انرژی، امنیت سایبری و مشارکت فعال ساختمان در بهره‌برداری از شبکه برق نیز توجه ویژه‌ای داشته باشند [۹، ۶].

مطالعات منتشرشده طی سال‌های اخیر نشان می‌دهد که کنترل پیش‌بین مدل‌منا، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و سیستم‌های مدیریت انرژی هوشمند، مهم‌ترین ابزارهای افزایش انعطاف‌پذیری انرژی محسوب می‌شوند [۱۰]. در این مطالعات، عمدتاً سامانه‌های تهویه مطبوع، ذخیره‌سازهای انرژی، سامانه‌های فتوولتائیک و تجهیزات پاسخگویی بار به‌عنوان اجزای اصلی مدیریت انرژی معرفی شده‌اند. در مقابل، بررسی هم‌زمان تمامی بارهای داخلی ساختمان، رفتار واقعی ساکنان، شرایط مرزی پوسته و تعامل آن‌ها با شاخص‌های اقتصادی و امنیت اطلاعات کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۵، ۱۱].

به منظور تحلیل روند توسعه دانش و شناسایی خلأهای موجود، مهم‌ترین پژوهش‌های منتشرشده بین سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۵ از نظر روش تحقیق، دستاوردهای مهندسی، محدودیت‌ها و تفاوت آن‌ها با پژوهش حاضر در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مرور تطبیقی پژوهش‌های شاخص در زمینه مدیریت هوشمند و انعطاف‌پذیری انرژی در ساختمان‌های انرژی صفر و استخراج شکاف پژوهشی

Table 1. Comparative Analysis of Key Studies on Smart Energy Management and Energy Flexibility in Net-Zero Energy Buildings with Identified Research Gaps

محور پژوهشی	مطالعات شاخص	روش‌ها و مفاهیم کلیدی	مهم‌ترین دستاوردهای مهندسی	محدودیت‌ها و شکاف‌های پژوهشی	نوآوری و تفاوت پژوهش حاضر
مدیریت هوشمند انرژی	Yang et al. [۱۲] Li et al. [۱۳] Cui et al. [۱۴]	کنترل پیش‌بین، یادگیری ماشین، سیستم مدیریت انرژی، بهینه‌سازی بلادرنگ	کاهش پیک بار، افزایش بهره‌وری انرژی، بهبود عملکرد سیستم‌های HVAC و پیش‌بینی بار معرفی	تمرکز عمدتاً بر سامانه HVAC؛ عدم لحاظ هم‌زمان روشنایی، تجهیزات برقی، رفتار ساکنان و شرایط واقعی بهره‌برداری	توسعه چارچوب یکپارچه مدیریت انرژی که کلیه بارهای ساختمان، سامانه‌های HVAC، روشنایی، تجهیزات و رفتار کاربران را به‌صورت هم‌زمان مدل‌سازی می‌کند.
انعطاف‌پذیری انرژی	Clauß et al. [۱۵] Li et al. [۱۶] Le Dréau et al. [۱۷]	جابه‌جایی بار، ذخیره‌سازی حرارتی، پاسخگویی بار، شاخص‌های انعطاف‌پذیری	شاخص‌های فنی انعطاف‌پذیری و افزایش قابلیت پاسخگویی ساختمان به شبکه	شاخص‌ها عمدتاً فنی بوده و آسایش حرارتی، منافع ذی‌نفعان و رفتار کاربران کمتر بررسی شده است.	معرفی شاخص انعطاف‌پذیری ترکیبی (CFI) همراه با ارزیابی آسایش حرارتی بر مبنای شاخص PMV و تحلیل رفتار کاربران.

^۱ . Composite Flexibility Index (CFI)

^۲ . Stakeholder Balance Index (SBI)

^۳ . Privacy Protection Index (PPI)

ادامه جدول ۱: مرور تطبیقی پژوهش‌های شاخص در زمینه مدیریت هوشمند و انعطاف‌پذیری انرژی در ساختمان‌های انرژی صفر و استخراج شکاف پژوهشی

Table 1 (Continued). Comparative Analysis of Key Studies on Smart Energy Management and Energy Flexibility in Net-Zero Energy Buildings with Identified Research Gaps

محور پژوهشی	مطالعات شاخص	روش‌ها و مفاهیم کلیدی	مهم‌ترین دستاوردهای مهندسی	محدودیت‌ها و شکاف‌های پژوهشی	نوآوری و تفاوت پژوهش حاضر
تعامل ساختمان با شبکه	NREL [۱۸] Zhao et al. [۱۹] Zhang et al. [۲۰]	ساختمان‌های متعامل با شبکه (GEB)، پاسخگویی بار، V2G/V2B، ذخیره‌سازی انرژی	بهبود تبادل انرژی با شبکه و کاهش بار پیک	اغلب مطالعات صرفاً بر منافع مالک یا شبکه تمرکز داشته و تعادل منافع ذی‌نفعان بررسی نشده است.	معرفی شاخص تعادل منافع برای ایجاد توازن میان منافع بهره‌بردار ساختمان، شبکه برق و سیاست‌گذار.
امنیت سایبری و حفظ حریم خصوصی	Li et al. [۲۱] Llaria et al. [۲۲] Liu et al. [۲۳]	اینترنت اشیاء، محاسبات لبه، امنیت سایبری، IEC 27001، ناشناس‌سازی داده‌ها	ارتقای امنیت ارتباطات و کاهش آسیب‌پذیری سامانه‌های مدیریت انرژی	امنیت اطلاعات معمولاً به‌صورت مستقل بررسی شده و اثر آن بر عملکرد انرژی ساختمان ارزیابی نشده است.	توسعه شاخص حفظ حریم خصوصی، کمی‌سازی ناشناس‌سازی داده‌ها و ارزیابی همزمان امنیت سایبری و عملکرد انرژی در بستر محاسبات لبه.
مدل‌سازی ترمودینامیکی ساختمان	Vera-Piazzini & Scarpa [۲۴] Mendes et al. [۲۵] Ahmad et al. [۲۶]	شبیه‌سازی نرم‌افزار انرژی پلاس، مدل‌سازی پوسته ساختمان، سامانه‌های HVAC، مصالح و شرایط مرزی	افزایش دقت پیش‌بینی مصرف انرژی و تحلیل رفتار حرارتی ساختمان	در بسیاری از مطالعات جزئیات مشخصات پوسته، شرایط مرزی، بارهای داخلی و رفتار ساکنان به‌طور کامل گزارش نشده است.	مدل‌سازی کامل ویژگی‌های ترموفیزیکی پوسته، بارهای داخلی، سامانه تهویه مطبوع، برنامه حضور ساکنان و کالیبراسیون مدل بر اساس استانداردهای معتبر.
تحلیل اقتصادی و سیاست‌گذاری	Le Dréau et al. [۲۷] Li et al. [۲۸] Afroz et al. [۲۹]	تحلیل هزینه-فایده، سیاست‌های تشویقی، پاسخگویی تقاضا، مشوق‌های مالی	نشان دادن مزایای اقتصادی فناوری‌های هوشمند و انرژی‌های تجدیدپذیر	هزینه‌های حسگرها، محاسبات لبه، ارتباطات و امنیت سایبری کمتر در تحلیل اقتصادی لحاظ شده و اغلب سیاست‌ها ظرفیت‌محور هستند.	تحلیل جامع هزینه چرخه عمر با احتساب هزینه تجهیزات هوشمند، زیرساخت ارتباطی، امنیت سایبری و ارائه پیشنهاد سیاستی مبتنی بر مشوق‌های عملکردمحور و سطح انعطاف‌پذیری.
جمع‌بندی شکاف پژوهشی	—	—	مطالعات موجود هر یک بخشی از مسئله را پوشش داده‌اند.	نبود یک چارچوب عملیاتی جامع که به‌طور همزمان ابعاد مکانیکی، انرژی، اقتصادی، امنیت سایبری، رفتار کاربران و تعامل با شبکه را پوشش دهد.	پژوهش حاضر با توسعه یک چارچوب مفهومی-عملیاتی مبتنی بر روش شناسایی، تعریف، تحلیل، توسعه و ارزیابی، تصمیم‌گیری چندمعیاره، شبیه‌سازی انرژی پلاس و شاخص‌های ترکیبی انعطاف‌پذیری انرژی، تعادل منافع ذی‌نفعان و حفظ حریم خصوصی، این شکاف را برطرف می‌کند.

در حوزه مدیریت هوشمند انرژی، تمرکز اصلی مطالعات بر توسعه الگوریتم‌های کنترل پیش‌بین، یادگیری ماشین و بهینه‌سازی عملکرد سامانه‌های تهویه مطبوع بوده است، در حالی که سهم سایر بارهای داخلی ساختمان شامل روشنایی، تجهیزات الکتریکی و رفتار واقعی کاربران در بسیاری از مدل‌ها ناچیز است. این موضوع سبب می‌شود نتایج حاصل از شبیه‌سازی با شرایط واقعی بهره‌برداری فاصله داشته باشد.

در مطالعات مربوط به انعطاف‌پذیری انرژی، اگرچه شاخص‌های مختلفی برای سنجش قابلیت پاسخگویی ساختمان به شبکه پیشنهاد شده‌اند، اما اغلب این شاخص‌ها صرفاً بر معیارهای فنی یا اقتصادی استوار هستند و شاخص‌هایی نظیر آسایش حرارتی، تعادل منافع میان ذی‌نفعان و حفظ حریم خصوصی کاربران به‌صورت هم‌زمان در ارزیابی لحاظ نشده‌اند. علاوه بر این، امنیت سایبری معمولاً به‌عنوان موضوعی مستقل از مدیریت انرژی بررسی شده و ارتباط متقابل آن با عملکرد فیزیکی ساختمان کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

از سوی دیگر، در بخش قابل توجهی از پژوهش‌های مرور شده، اطلاعات کافی درباره مشخصات ترموفیزیکی پوسته ساختمان، شرایط مرزی، مشخصات سامانه تهویه مطبوع، بارهای داخلی، مدل‌سازی رفتار ساکنان، روش کالیبراسیون مدل و تحلیل حساسیت ارائه نشده است. این محدودیت‌ها قابلیت تعمیم نتایج را کاهش داده و ارزیابی عملکرد واقعی ساختمان را با عدم قطعیت همراه می‌سازد.

همچنین بررسی مطالعات نشان می‌دهد که تحلیل اقتصادی اغلب به مقایسه هزینه و منافع انرژی محدود شده و هزینه‌های مرتبط با تجهیزات هوشمند، حسگرها، زیرساخت‌های ارتباطی، محاسبات لبه و پیاده‌سازی الزامات امنیت سایبری کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از سوی دیگر، سیاست‌های تشویقی ارائه‌شده عمدتاً بر افزایش ظرفیت نصب سامانه‌های تولید انرژی متمرکز بوده و سازوکارهای تشویقی مبتنی بر میزان انعطاف‌پذیری واقعی ساختمان کمتر بررسی شده‌اند.

بر این اساس، مهم‌ترین شکاف موجود در ادبیات، نبود یک چارچوب عملیاتی جامع است که بتواند به‌صورت هم‌زمان مدل ترمودینامیکی ساختمان، سامانه‌های مکانیکی، مدیریت هوشمند انرژی، تعامل با شبکه، تحلیل اقتصادی، امنیت سایبری و رفتار کاربران را در قالب یک ساختار یکپارچه مدل‌سازی و ارزیابی کند.

بر پایه شکاف‌های شناسایی‌شده، پژوهش حاضر چارچوبی یکپارچه برای مدیریت هوشمند انرژی در ساختمان‌های انرژی صفر ارائه می‌کند که در آن مدل ترمودینامیکی پوسته ساختمان، سامانه‌های مکانیکی، مدیریت پاسخگویی بار، تعامل با شبکه برق، تحلیل اقتصادی، امنیت سایبری و تصمیم‌گیری چندذی‌نفعی در قالب یک معماری پنج‌لایه تلفیق شده‌اند. همچنین سه شاخص ترکیبی شامل شاخص ترکیبی انعطاف‌پذیری انرژی، شاخص تعادل منافع ذی‌نفعان و شاخص حفظ حریم خصوصی برای ارزیابی هم‌زمان عملکرد فنی، اقتصادی و امنیتی پیشنهاد شده و اعتبار چارچوب از طریق شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار شبیه‌سازی انرژی ساختمان انرژی پلاس، روش تصمیم‌گیری چندمعیاره ترکیبی تحلیل سلسله‌مراتبی و دلفی و تحلیل حساسیت بررسی شده است. بدین ترتیب، چارچوب پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای طراحی و بهره‌برداری از ساختمان‌های انرژی صفر با قابلیت تعامل مؤثر با شبکه برق مورد استفاده قرار گیرد و امکان توسعه آن برای سایر اقلیم‌ها و کاربری‌های ساختمانی در پژوهش‌های آتی وجود دارد.

۳- روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش با بهره‌گیری از رویکرد واقع‌گرایی انتقادی، تلاش می‌کند علاوه بر توصیف رفتار انرژی ساختمان، سازوکارهای مؤثر بر انعطاف‌پذیری انرژی را نیز تبیین کند. در این چارچوب، عواملی نظیر ویژگی‌های ترمودینامیکی پوسته ساختمان، عملکرد سامانه تهویه مطبوع، رفتار ساکنان، ساختار تعرفه برق و راهبردهای کنترلی به‌عنوان سازوکارهای مؤثر بر عملکرد انرژی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این رویکرد امکان تحلیل روابط علت و معلولی میان اجزای فیزیکی و مدیریتی ساختمان را فراهم می‌کند و بر همین اساس، چارچوب پیشنهادی صرفاً بر همبستگی میان متغیرها متکی نبوده، بلکه تلاش می‌کند مکانیسم‌های فیزیکی، مدیریتی و رفتاری مؤثر بر انعطاف‌پذیری انرژی را به‌صورت یکپارچه تبیین نماید. [۳۰، ۳۱].

فرآیند تحقیق با اتخاذ رویکرد مرور نظام‌مند ادبیات در پایگاه‌های اطلاعاتی علمی اسکوپوس^۱، وب آو ساینس^۲ و پایگاه اطلاعاتی مؤسسه مهندسان برق و الکترونیک^۳ آغاز شد. جست‌وجوی منابع بر اساس پروتکل گزارش‌دهی ترجیحی برای مرورهای نظام‌مند و فراتحلیل‌ها^۴ انجام گرفت. معیارهای ورود شامل انتشار مقاله در مجلات علمی داوری‌شده و نمایه‌شده، ارتباط مستقیم با ساختمان‌های انرژی صفر، مدیریت هوشمند انرژی، انعطاف‌پذیری انرژی و تعامل ساختمان با شبکه بود. معیارهای خروج نیز شامل مقالات کنفرانسی، مطالعات فاقد متن کامل، منابع تکراری و پژوهش‌های خارج از دامنه موضوعی ساختمان‌های انرژی صفر بود. از مجموع ۲۸۷ رکورد اولیه، پس از حذف منابع تکراری و اعمال معیارهای ورود و خروج، در نهایت ۷۸ مقاله برای تحلیل نهایی انتخاب شدند (شکل ۱).



شکل ۱: نمودار جریان PRISMA برای فرایند غربالگری و انتخاب مقالات

Figure 1. PRISMA Flow Diagram of the Study Screening and Selection Process

به‌منظور تحلیل ساختار موضوعی پژوهش‌های منتخب، شبکه هم‌رخدادی کلیدواژه‌ها با استفاده از نرم‌افزار تحلیل و مصورسازی شبکه‌های علمی^۵ و روش شمارش کامل^۶ ترسیم شد. در این تحلیل، حداقل تعداد تکرار هر کلیدواژه پنج بار در نظر گرفته شد تا کلیدواژه‌های دارای فراوانی مناسب در شبکه وارد شوند. کلیدواژه‌ها از عنوان، چکیده و واژگان کلیدی ۷۸ مقاله استخراج شدند و پس از یکسان‌سازی واژه‌های هم‌معنی (مانند ساختمان انرژی صفر خالص و ساختمان با انرژی خالص صفر)، شبکه هم‌رخدادی بر اساس روش شمارش کامل در نرم‌افزار تحلیل و مصورسازی شبکه‌های علمی تولید گردید. نتایج حاصل، چهار خوشه اصلی شامل انعطاف‌پذیری فنی، هوش مصنوعی، تاب‌آوری و سیاست‌گذاری را آشکار ساخت. مطابق داده‌های استخراج‌شده از طبقه‌بندی مطالعات (جدول ۲)،

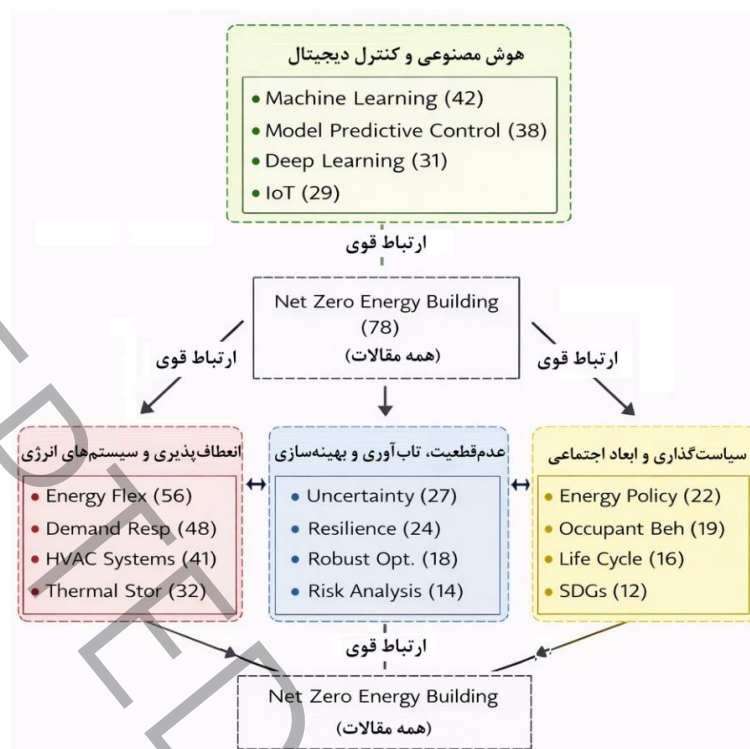
1. Scopus
2. Web of Science
3. IEEE Xplore
4. PRISMA
5. VOSviewer
6. Full Counting

جدول ۲: طبقه‌بندی و تحلیل مطالعات منتخب (تعداد: ۷۸ مقاله)

Table 2. Classification and Analysis of the Selected Studies (n = 78)

ردیف	معیار طبقه‌بندی	زیرشاخه‌ها	تعداد مقالات	درصد	روند و ارتباط با پژوهش حاضر
۱	محدوده زمانی	۲۰۱۵-۲۰۱۰	۱۸	۲۳٪	مطالعات اولیه با تمرکز بر تعاریف و کارایی انرژی
		۲۰۱۹-۲۰۱۶	۲۲	۲۸٪	رشد پژوهش‌ها در زمینه انعطاف‌پذیری و ذخیره‌سازی
		۲۰۲۵-۲۰۲۰	۳۸	۴۹٪	انفجار پژوهش‌ها در حوزه هوش مصنوعی، تعامل با شبکه و تاب‌آوری
۲	منطقه جغرافیایی	اروپا	۳۴	۴۴٪	پیشرو به دلیل سیاست‌های اتحادیه اروپا
		آسیا	۲۶	۳۳٪	رشد سریع به دلیل شهرنشینی و سرمایه‌گذاری
		آمریکای شمالی	۱۲	۱۵٪	تمرکز بر تعامل با شبکه و پاسخ‌گویی تقاضا
		سایر	۶	۸٪	مطالعات محدود اما رو به رشد
۳	روش پژوهش	کمی	۴۲	۵۴٪	رویکرد غالب با استفاده از شبیه‌سازی و بهینه‌سازی
		کیفی	۲۰	۲۶٪	شامل مرورهای نظام‌مند و توسعه چارچوب‌های مفهومی
		ترکیبی	۱۶	۲۰٪	رویکردی نوظهور که شبیه‌سازی را با مطالعات موردی ترکیب می‌کند
۴	نوع ساختمان	اداری	۳۱	۴۰٪	محبوب‌ترین نوع برای مطالعات
		مسکونی	۲۸	۳۶٪	پیچیدگی به دلیل رفتار متغیر ساکنان
		آموزشی/عمومی	۱۲	۱۵٪	مطالعات موردی در مدارس و ساختمان‌های عمومی
		ترکیبی/تعریف‌نشده	۷	۹٪	مطالعاتی که نوع خاصی را مد نظر ندارند
۵	شاخص انعطاف‌پذیری اصلی	شاخص‌های فنی محض	۴۴	۵۶٪	عمدتاً بر اساس پروژه IEA EBC Annex 67
		شاخص‌های فنی-اقتصادی	۱۸	۲۳٪	ترکیب شاخص‌های فنی با هزینه/درآمد
		شاخص‌های فنی-رفاهی	۱۰	۱۳٪	توجه به آسایش ساکنان
		شاخص‌های ترکیبی	۶	۸٪	رویکردهای جدید که ابعاد مختلف را تلفیق می‌کنند
		چندبعدی			

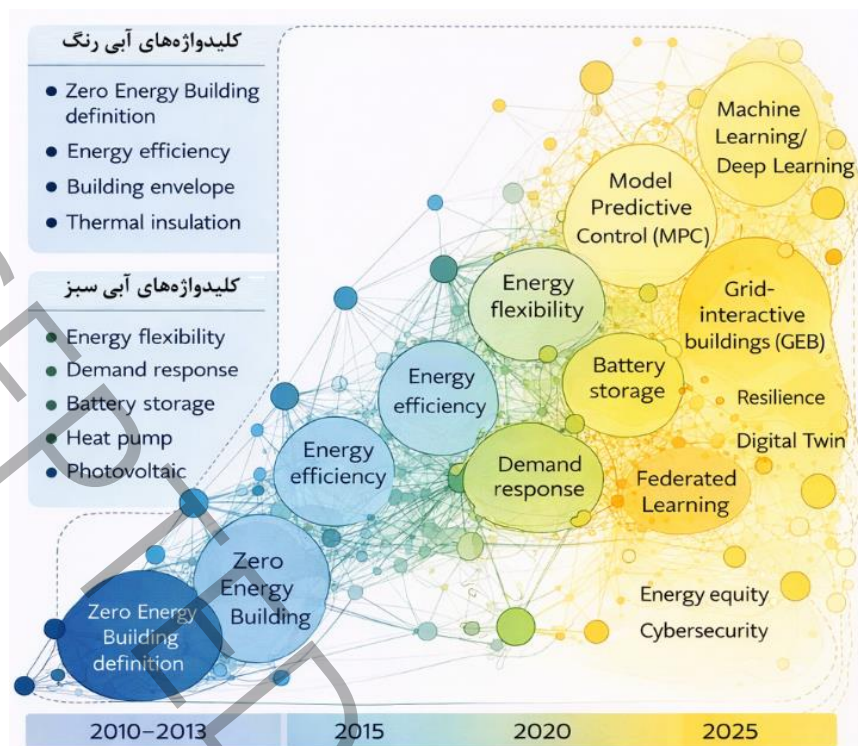
روند زمانی پژوهش‌ها نشان می‌دهد که از سال ۲۰۲۰ به بعد تمرکز مطالعات به‌طور معناداری به سمت هوشمندسازی، تعامل ساختمان با شبکه و مدیریت انعطاف‌پذیری انرژی تغییر یافته است؛ به‌طوری‌که نزدیک به نیمی از مقالات منتخب در این بازه زمانی منتشر شده‌اند. همچنین، غلبه شاخص‌های صرفاً فنی در ۵۶ درصد مطالعات، ضرورت توسعه شاخص‌های ترکیبی و چندبعدی را که هدف اصلی پژوهش حاضر است، نشان می‌دهد (شکل ۲).



شکل ۲: شبکه هم‌رخدادی کلیدواژه‌های پژوهش‌های منتخب در حوزه ساختمان‌های انرژی صفر و انعطاف‌پذیری انرژی

Figure 2. Keyword Co-occurrence Network Derived from the Selected Studies on Net-Zero Energy Buildings and Energy Flexibility

شکل ۳ با استفاده از اطلاعات کتاب‌سنجی ۷۸ مقاله منتخب تهیه شد؛ به گونه‌ای که تعداد مقالات هر سال و محورهای پژوهشی غالب استخراج و روند زمانی توسعه پژوهش‌ها ترسیم گردید. تحلیل روند زمانی پژوهش‌ها سیر تحول این حوزه را در سه دوره اصلی نشان می‌دهد؛ به گونه‌ای که دوره نخست (۲۰۱۵-۲۰۱۰) به تبیین مفاهیم پایه، دوره دوم (۲۰۱۹-۲۰۱۶) به توسعه سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر و ذخیره‌سازی، و دوره سوم (۲۰۲۵-۲۰۲۰) به هوشمندسازی، تعامل ساختمان با شبکه و افزایش انعطاف‌پذیری انرژی اختصاص یافته است.

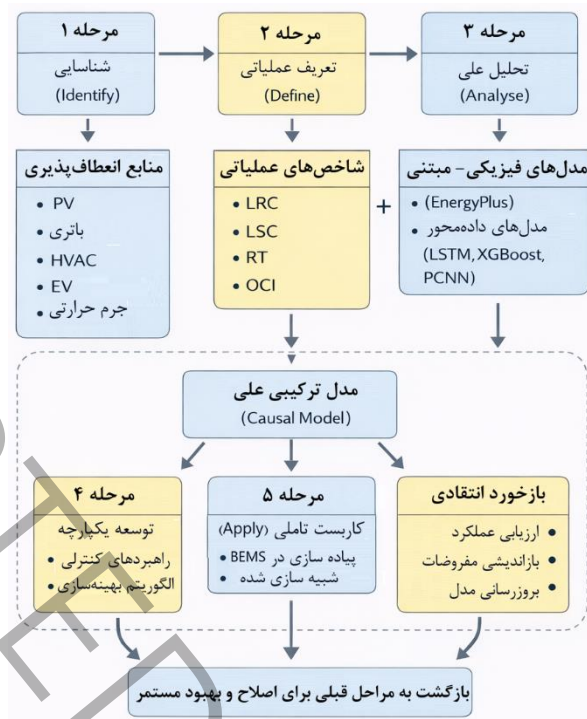


شکل ۳: روند زمانی مطالعات منتخب بر اساس سال انتشار و محورهای پژوهشی (داده‌های استخراج شده از مرور نظام‌مند)
Figure 3. Temporal Distribution of the Selected Studies by Publication Year and Research Theme
(Based on Data Extracted from the Systematic Review)

به منظور پر کردن شکاف میان مبانی نظری و الزامات اجرایی مدیریت هوشمند انرژی، در این پژوهش از روش پنج مرحله‌ای شامل شناسایی، تعریف، تحلیل، توسعه و کاربست استفاده شده است. در مرحله شناسایی، منابع فیزیکی انعطاف‌پذیری انرژی، عدم قطعیت‌های ناشی از رفتار ساکنان، شرایط اقلیمی، تولید انرژی تجدیدپذیر و محدودیت‌های شبکه برق شناسایی و مستندسازی شدند. سپس در مرحله تعریف، شاخص‌های ارزیابی عملکرد و معیارهای تصمیم‌گیری استخراج گردیدند. هسته اصلی پژوهش در مرحله تحلیل قرار دارد؛ در این مرحله، مدل ترمودینامیکی ساختمان در محیط نرم‌افزار انرژی پلاس با سامانه مدیریت انرژی^۱ و الگوریتم‌های تصمیم‌گیری هوشمند تلفیق شد. در مدل شبیه‌سازی، مشخصات ترموفیزیکی پوسته ساختمان، شرایط مرزی، سامانه تهویه مطبوع^۲، بارهای داخلی شامل روشنایی، تجهیزات الکتریکی و الگوی حضور ساکنان، سامانه فتوولتائیک، ذخیره‌ساز انرژی و تعامل ساختمان با شبکه برق به صورت هم‌زمان مدل‌سازی شدند تا اثر متقابل این مؤلفه‌ها بر عملکرد انرژی، آسایش حرارتی، شاخص‌های انعطاف‌پذیری و نتایج اقتصادی ارزیابی شود. در ادامه، بر پایه نتایج این تحلیل، راهبردهای کنترل پیش‌بین و مدیریت هوشمند انرژی توسعه یافته و در مرحله کاربست، عملکرد چارچوب پیشنهادی از طریق شبیه‌سازی و تحلیل نتایج مورد ارزیابی و بازبینی قرار گرفت. نمای کلی این فرآیند در شکل ۴ ارائه شده است.

^۱ . Energy Management System (EMS)

^۲ . Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC)



شکل ۴: نمودار جریان تلفیق روش IDADA با مدل‌های کمی‌سازی انعطاف‌پذیری

Figure 4. Flowchart of the Integration of the IDADA Framework with Energy Flexibility Quantification Models

همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، چارچوب پیشنهادی پژوهش حاضر فرایند مدیریت هوشمند انرژی را در قالب یک ساختار یکپارچه از مرحله شناسایی منابع انعطاف‌پذیری تا توسعه راهبردهای کنترلی و ارزیابی عملکرد سامان‌دهی می‌کند. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که هر یک تنها بر یکی از ابعاد فنی، اقتصادی یا اطلاعاتی تمرکز داشته‌اند، در این چارچوب تعامل میان سامانه‌های مکانیکی ساختمان، سامانه مدیریت انرژی، شبکه برق و لایه تصمیم‌گیری به‌صورت یکپارچه در نظر گرفته شده است. این یکپارچگی امکان ارزیابی هم‌زمان عملکرد انرژی، آسایش حرارتی، منافع ذی‌نفعان و الزامات امنیت اطلاعات را از طریق شاخص‌های ترکیبی انعطاف‌پذیری انرژی، تعادل منافع ذی‌نفعان و حفظ حریم خصوصی فراهم می‌سازد و مبنای تحلیل‌های ارائه‌شده در بخش‌های بعدی مقاله را تشکیل می‌دهد.

۴- توسعه چارچوب یکپارچه پیشنهادی

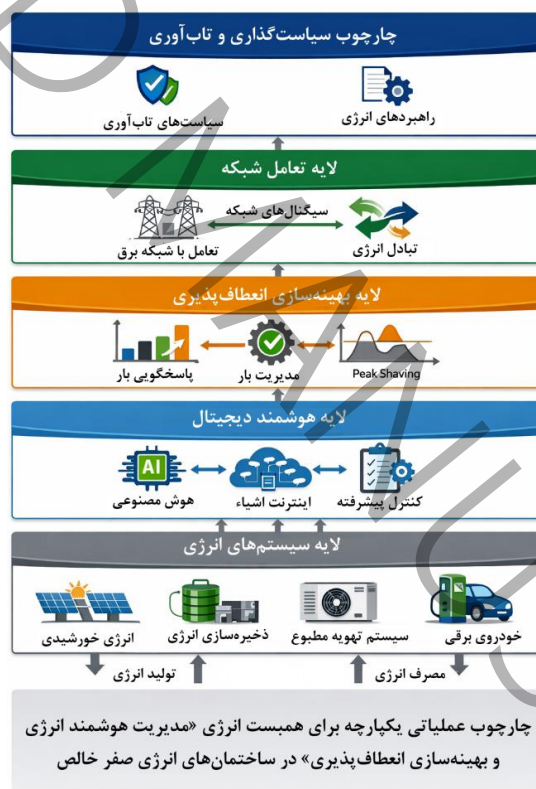
نتایج مرور نظام‌مند ادبیات (جدول ۱) و تحلیل مطالعات منتخب (جدول ۲) نشان داد که پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر جنبه‌های منفردی نظیر بهینه‌سازی سامانه‌های تهویه مطبوع، پاسخگویی بار، امنیت سایبری یا تحلیل اقتصادی متمرکز بوده‌اند و کمتر مطالعه‌ای توانسته است این ابعاد را در قالب یک چارچوب عملیاتی واحد تلفیق کند. همچنین، مدل‌سازی هم‌زمان سامانه‌های HVAC، بارهای داخلی، رفتار ساکنان، تعامل ساختمان با شبکه، امنیت اطلاعات و ارزیابی منافع ذی‌نفعان در اغلب مطالعات مورد غفلت قرار گرفته است. بر این اساس، چارچوب یکپارچه پیشنهادی با هدف رفع این شکاف‌ها و ایجاد بستری منسجم برای مدیریت هوشمند انرژی در ساختمان‌های انرژی صفر توسعه یافته است.

این چارچوب بر چهار اصل بنیادین چندلایگی، علیت‌گرایی، زمینه‌مندی و بازخورد انتقادی استوار است. بر این مبنای انعطاف‌پذیری انرژی صرفاً به‌عنوان یک شاخص فنی تلقی نمی‌شود، بلکه به‌عنوان پدیده‌ای چندبعدی در تعامل میان سامانه‌های فیزیکی، زیرساخت‌های دیجیتال، راهبردهای مدیریتی و الزامات سیاست‌گذاری تحلیل می‌شود. از این‌رو، چارچوب پیشنهادی فراتر از تبیین

روابط همبستگی میان متغیرها، مکانیسم‌های فیزیکی، مدیریتی و رفتاری مؤثر بر عملکرد انرژی را شناسایی کرده و از طریق بازخورد مستمر میان نتایج شبیه‌سازی، فرآیند تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری، امکان بهبود و بازنگری مداوم راهبردهای مدیریت انرژی را فراهم می‌آورد.

۴-۱- معماری پنج‌لایه و جریان تعاملی

ساختار پیشنهادی از پنج لایه اصلی تشکیل شده است که به‌صورت عمودی و افقی با یکدیگر در تعامل هستند (شکل ۵). در قاعده این معماری، لایه سامانه‌های انرژی فیزیکی قرار دارد که شامل منابع تولید انرژی خورشیدی فتوولتائیک، ذخیره‌سازهای انرژی باتری، مصرف‌کننده‌های انعطاف‌پذیر شامل سامانه‌های گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع و خودروهای برقی است. داده‌های حاصل از این لایه توسط لایه هوشمندی دیجیتال که به‌عنوان مغز متفکر سامانه عمل می‌کند، پردازش می‌شود. این لایه با بهره‌گیری از زیرساخت‌های اینترنت اشیا، سامانه مدیریت انرژی ساختمان و الگوریتم‌های هوش مصنوعی، بستر لازم را برای لایه بهینه‌سازی انعطاف‌پذیری فراهم می‌آورد. در این لایه، عملکرد سامانه به‌صورت هم‌زمان با استفاده از سه شاخص شامل شاخص ترکیبی انعطاف‌پذیری انرژی، شاخص تعادل منافع ذی‌نفعان و شاخص حفظ حریم خصوصی، از جنبه‌های فنی، اقتصادی و امنیت اطلاعات ارزیابی می‌شود. بر این اساس، راهبردهایی نظیر جابه‌جایی بار، مدیریت بار اوج، بهره‌برداری از سامانه‌های ذخیره‌سازی و تعامل هوشمند با شبکه برق تدوین و اجرا می‌شوند.



شکل ۵: چارچوب مفهومی-عملیاتی یکپارچه پیشنهادی در ساختمان‌های انرژی صفر خالص

Figure 5. Proposed Integrated Conceptual-Operational Framework for Net-Zero Energy Buildings

در سطوح بالاتر، لایه تعامل با شبکه و تاب‌آوری به مدیریت تبادل دوطرفه انرژی و مشارکت ساختمان در بازارهای خدمات جانبی می‌پردازد، در حالی که لایه سیاست‌گذاری و راهبردها به عنوان چتر هدایت‌گر، چارچوب‌های نهادی و مشوق‌های اقتصادی را تنظیم

می‌کند. جریان داده در این معماری به گونه‌ای طراحی شده است که تغییرات در لایه سیاستی مستقیماً بر الگوریتم‌های بهینه‌سازی اثر گذاشته و بازخورد عملکرد فیزیکی ساختمان نیز جهت اصلاح سیاست‌ها به سطوح بالا مخابره می‌شود.

۲-۴- مدیریت تعارض منافع و امنیت سایبری

یکی از چالش‌های اساسی در ساختمان‌های انرژی صفر، مدیریت تعارض میان سودآوری شبکه و آسایش ساکنان است. چارچوب پیشنهادی با معرفی شاخص آسایش ساکنان و سیگنال‌های قیمتی-رفاهی ترکیبی، مکانیسم ایجاد تعادل پویا را در لایه عملیاتی ادغام کرده است. این رویکرد به جای تحمیل الگوهای مصرف، بر شفافیت و مشارکت‌پذیری ساکنان تأکید دارد تا پذیرش اجتماعی سیستم‌های هوشمند تضمین شود.

همزمان با افزایش اتصال‌پذیری، لایه هوشمندی دیجیتال با چالش‌های جدی در حوزه امنیت سایبری و حریم خصوصی مواجه است. برای مقابله با حملات احتمالی به الگوریتم‌های هوش مصنوعی یا افشای داده‌های رفتاری، این چارچوب مکانیسم‌های طراحی امنیت‌محور^۱ را برگزیده است. این مکانیسم‌ها شامل پیاده‌سازی محاسبات لبه‌ای^۲ برای پردازش محلی داده‌ها، استفاده از روش‌های یادگیری فدرال جهت حفظ حریم خصوصی، و مطابقت با استانداردهای بین‌المللی نظیر ISO/IEC 27001 است. بدین ترتیب، تاب‌آوری سیستم نه تنها در برابر اختلالات انرژی، بلکه در برابر تهدیدات سایبری نیز تضمین می‌گردد.

در مجموع، چارچوب پیشنهادی با یکپارچه‌سازی مدل ترمودینامیکی ساختمان، سامانه مدیریت انرژی، تعامل ساختمان با شبکه برق، تحلیل اقتصادی و الزامات امنیت سایبری، بستری فراهم می‌کند که در آن شاخص‌های ترکیبی انعطاف‌پذیری انرژی، تعادل منافع ذی‌نفعان و حفظ حریم خصوصی به‌صورت هم‌زمان محاسبه و ارزیابی می‌شوند. این چارچوب مبنای توسعه مدل‌های کمی و تحلیل‌های ارائه‌شده در بخش‌های بعدی مقاله است.

۵- شاخص‌های عملیاتی و وزن‌دهی

عملیاتی‌سازی چارچوب پیشنهادی مستلزم تعریف شاخص‌های کمی در پنج لایه اصلی است تا امکان پایش و بهینه‌سازی عملکرد ساختمان‌های انرژی صفر خالص فراهم گردد. این شاخص‌ها به‌صورت مستقل تعریف نشده‌اند، بلکه هر یک متناظر با یکی از لایه‌های چارچوب پنج‌لایه معرفی‌شده در شکل ۵ بوده و به‌صورت تعاملی عملکرد فنی، اقتصادی، مدیریتی و امنیت اطلاعات را ارزیابی می‌کنند. در این چارچوب، شاخص ترکیبی انعطاف‌پذیری انرژی در لایه بهینه‌سازی، شاخص تعادل منافع ذی‌نفعان در لایه سیاست‌گذاری و شاخص حفظ حریم خصوصی در لایه هوشمندی دیجیتال قرار گرفته و نتایج آن‌ها به‌صورت متقابل بر تصمیم‌گیری سامانه مدیریت انرژی اثرگذار است. کلیه پارامترهای موردنیاز برای محاسبه شاخص‌های پیشنهادی از خروجی شبیه‌سازی ترمودینامیکی در محیط نرم‌افزار شبیه‌سازی انرژی ساختمان انرژی‌پلاس و داده‌های سامانه مدیریت انرژی ساختمان استخراج شده‌اند؛ از این‌رو، شاخص‌های معرفی‌شده مستقیماً بر مبنای داده‌های حاصل از مدل شبیه‌سازی و عملکرد عملیاتی سامانه محاسبه می‌شوند.

در لایه سیستم‌های انرژی فیزیکی، عملکرد پایه ساختمان از طریق شاخص‌های نسبت تولید به مصرف و خودکفایی سنجیده می‌شود. نسبت تولید به مصرف (PCR) که بیانگر توازن کل انرژی است، طبق رابطه (۱) محاسبه می‌گردد [۳۲]:

$$PCR = \frac{E_{gen}(t)}{E_{load}(t)} \quad (1)$$

که در آن، E_{gen} انرژی الکتریکی تولیدشده توسط سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر ساختمان (بر حسب kWh)، E_{load} انرژی کل مصرفی ساختمان (بر حسب kWh) است.

همچنین میزان استقلال ساختمان از شبکه از طریق شاخص خودکفایی انرژی (ESS) مطابق رابطه (۲) تعیین می‌شود [۳۲]:

$$ESS = \frac{\int_0^T \min(E_{gen}(t), E_{load}(t)) dt}{\int_0^T E_{load}(t) dt} \quad (2)$$

¹ Security by Design

² Edge Computing

در لایه هوشمندی دیجیتال، دقت الگوریتم‌های پیش‌بینی بار و تولید، نقشی حیاتی در کاهش عدم قطعیت‌ها دارد. این دقت بر اساس خطای جذر میانگین مربعات^۱ طبق رابطه (۳) ارزیابی می‌شود [۳۳]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

که در آن، $RMSE$ ریشه میانگین مربعات خطا، y_i مقدار واقعی یا مرجع متغیر مورد بررسی، $\hat{y}_i$ مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل شبیه‌سازی، n تعداد کل نمونه‌ها یا مشاهدات و i شماره هر مشاهده است.

علاوه بر دقت، تاب‌آوری دیجیتال ساختمان با شاخص‌های نوظهور امنیت سایبری و حفظ حریم خصوصی سنجیده می‌شود. شاخص حفظ حریم خصوصی که تابعی از سطح ناشناس‌سازی (A)، شفافیت (T) و مطابقت با استانداردها (C) است و در این پژوهش با الهام از چارچوب‌های ارزیابی حریم خصوصی در ساختمان‌های هوشمند، به‌ویژه مطالعه [۳۴] توسعه یافته است. بر اساس رابطه (۴) و وزن‌های استخراج شده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی محاسبه می‌گردد:

$$PPI = \beta_1.A_{normalized} + \beta_2.T_{normalized} + \beta_3.C_{normalized} \quad (4)$$

که در آن، ضرایب β_1 ، β_2 و β_3 نیز وزن‌های اختصاص یافته به هر یک از مؤلفه‌ها بوده که از طریق روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند تحلیل سلسله‌مراتبی یا دلفی تعیین می‌شوند. در محیط شبیه‌سازی، مؤلفه‌های شاخص حفظ حریم خصوصی شامل سطح ناشناس‌سازی داده‌ها، شفافیت عملکرد سامانه و میزان انطباق با الزامات امنیت اطلاعات، در قالب پارامترهای ارزیابی چارچوب مدیریت انرژی در نظر گرفته شدند. بنابراین، شاخص حفظ حریم خصوصی میزان رعایت الزامات مدیریت و حفاظت از داده‌ها را در چارچوب پیشنهادی نشان می‌دهد. شایان ذکر است که پیاده‌سازی و ارزیابی فیزیکی زیرساخت‌ها و تجهیزات امنیت سایبری خارج از دامنه این پژوهش بوده و به مطالعات آتی موکول شده است.

در لایه بهینه‌سازی انعطاف‌پذیری، توانمندی ساختمان در پاسخ‌گویی به نیازهای شبکه برق از طریق شاخص ترکیبی انعطاف‌پذیری انرژی^۲ سنجیده می‌شود. این شاخص که از ترکیب ظرفیت کاهش بار^۳، قابلیت جابه‌جایی بار^۴، زمان پاسخ‌گویی^۵ و نرخ بازیابی حاصل می‌شود، طبق رابطه (۵) تعریف می‌گردد:

$$CFI = w_1 \cdot \frac{LRC}{LRC_{max}} + w_2 \cdot \frac{LSC}{LSC_{max}} + w_3 \cdot \left(1 - \frac{RT}{RT_{max}}\right) + w_4 \cdot \eta_{recovery} \quad (5)$$

که در آن:

$$LRC(t) = P_{baseline}(t) - P_{flexible}(t) \quad (6)$$

$$LSC = \int_{t_1}^{t_2} (P_{baseline}(t) - P_{flexible}(t)) dt \quad (7)$$

$$RT = t_{response} - t_{signal} \quad (8)$$

در روابط (۵) تا (۸)، $\eta_{recovery}$ نرخ بازیابی سیستم پس از پایان رویداد پاسخگویی بار، w_i وزن هر یک از مؤلفه‌های شاخص که از طریق فرآیند دلفی AHP تعیین شده است، $P_{baseline}$ توان مصرفی ساختمان در شرایط مرجع، $P_{flexible}$ توان مصرفی ساختمان پس از اعمال راهبردهای مدیریت هوشمند بار، t_{signal} زمان ارسال سیگنال کنترلی توسط شبکه و $t_{response}$ زمان واقعی شروع پاسخ ساختمان به این سیگنال است. قابل ذکر است شاخص انعطاف‌پذیری ترکیبی در این پژوهش با الهام از چارچوب‌های ارزیابی انعطاف‌پذیری انرژی ساختمان ارائه شده در مطالعات اخیر، به‌ویژه پژوهش [۳۵]، توسعه یافته است.

۱ . Root Mean Square Error (RMSE)

۲ . Composite Flexibility Index (CFI)

۳ . Load Reduction Capacity (LRC)

۴ . Load Shifting Capacity (LSC)

۵ . Response Time (RT)

در نهایت، در لایه سیاست‌گذاری و راهبردها، به‌منظور تضمین پذیرش اجتماعی و اقتصادی چارچوب پیشنهادی، شاخص تعادل منافع ذی‌نفعان^۱ با الهام از چارچوب‌های ارزش‌آفرینی و ارزیابی منافع ذی‌نفعان در سامانه‌های انرژی هوشمند، به‌ویژه مطالعه [۳۶] تعریف شده است. این شاخص با تلفیق کیفیت آسایش ساکنان^۲ و پتانسیل درآمدزایی^۳، توازن میان منافع اجتماعی و اقتصادی را در ارزیابی عملکرد ساختمان هوشمند برقرار کرده و مطابق رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

$$SBI = 1 - \frac{|OCI_{normalized} - RGP_{normalized}|}{OCI_{normalized} + RGP_{normalized}} \quad (9)$$

که در آن:

$$OCI = \gamma_1 \cdot PMV + \gamma_2 \cdot Illuinance_{satisfaction} \quad (10)$$

$$RGP = \sum_{j=1}^N (E_{DR,j} \cdot Price_{DR,j}) + (E_{FR,j} \cdot Price_{FR,j}) \quad (11)$$

که در روابط (۱۰) و (۱۱)، PMV شاخص میانگین پیش‌بینی شده احساس حرارتی، $Illuinance$ شاخص رضایت از روشنایی فضاهای داخلی، γ_1 و γ_2 ضرایب وزن‌دهی مؤلفه‌های آسایش، E_{DR} انرژی مبادله‌شده در برنامه‌های پاسخگویی بار، $Price_{DR}$ قیمت یا تعرفه انرژی در برنامه‌های پاسخگویی بار، E_{FR} انرژی تخصیص‌یافته به خدمات تنظیم فرکانس شبکه، $Price_{FR}$ تعرفه یا قیمت خدمات تنظیم فرکانس و N تعداد رویدادها یا دوره‌های مشارکت ساختمان در بازار خدمات انرژی است.

۵-۱- تبیین شاخص‌های ترکیبی انعطاف‌پذیری انرژی، تعادل منافع ذی‌نفعان و حفظ حریم خصوصی

هسته ارزیابی عملکرد چارچوب پیشنهادی بر سه شاخص ترکیبی شامل شاخص ترکیبی انعطاف‌پذیری انرژی، شاخص تعادل منافع ذی‌نفعان و شاخص حفظ حریم خصوصی استوار است. این شاخص‌ها به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که به‌ترتیب ابعاد فنی، اقتصادی-اجتماعی و امنیت اطلاعات را پوشش دهند و در کنار یکدیگر تصویری جامع از عملکرد سامانه مدیریت هوشمند انرژی ارائه کنند. شاخص ترکیبی انعطاف‌پذیری انرژی، میزان توانایی ساختمان در پاسخ‌گویی انعطاف‌پذیر به شرایط شبکه برق را با در نظر گرفتن ظرفیت کاهش و جابه‌جایی بار، زمان پاسخ‌گویی و نرخ بازایی سامانه کمی‌سازی می‌کند. شاخص تعادل منافع ذی‌نفعان، توازن میان آسایش ساکنان و منافع اقتصادی حاصل از تعامل با شبکه برق را ارزیابی کرده و شاخص حفظ حریم خصوصی نیز سطح حفاظت از داده‌ها را بر اساس معیارهایی نظیر ناشناس‌سازی اطلاعات، شفافیت عملکرد سامانه و انطباق با الزامات امنیت اطلاعات می‌سنجد. روابط ریاضی و نحوه محاسبه هر یک از این شاخص‌ها در ادامه ارائه شده است.

۵-۲- وزن‌دهی شاخص‌ها با رویکرد تحلیل سلسله‌مراتبی-دلفی

جهت تعیین اهمیت نسبی مؤلفه‌ها، از ترکیب فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و تکنیک دلفی با مشارکت ۱۵ خبره دانشگاهی و صنعتی استفاده شد. خبرگان مشارکت‌کننده شامل اعضای هیئت علمی و متخصصان صنعتی با سابقه پژوهش یا اجرای پروژه در حوزه ساختمان‌های انرژی صفر، مدیریت هوشمند انرژی، سامانه‌های گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع، شبیه‌سازی انرژی ساختمان و شبکه‌های هوشمند بودند. انتخاب آنان به‌صورت هدفمند و بر اساس سوابق علمی، تجربه حرفه‌ای و آشنایی با موضوع پژوهش انجام شد. تعداد ۱۵ نفر نیز با استناد به مطالعات روش‌شناختی دلفی، که مشارکت ۱۰ تا ۲۰ خبره را برای دستیابی به اجماع در مسائل تخصصی کافی می‌دانند، انتخاب گردید [۳۷، ۳۸]. فرآیند مقایسات زوجی در نرم‌افزار تخصصی تحلیل سلسله‌مراتبی انجام گرفت که نتایج آن حاکی از نسبت ناسازگاری کمتر از ۰/۱ و پایایی بالای نظرات است (شکل ۶).

^۱ . Stakeholder Balance Index (SBI)

^۲ . Occupant Comfort Index (OCI)

^۳ . Revenue Generation Potential (RGP)

LEVEL 1: GOAL Energy Flexibility Optimization (CFI - Composite Flexibility Index)
--

▼▼▼▼

LRC Load Reduction Capacity Weight: 0.42 Priority: 1	LSC Load Shifting Capacity Weight: 0.28 Priority: 2	REC Recovery Rate Weight: 0.18 Priority: 3	RT Response Time Weight: 0.12 Priority: 4
---	--	---	--

Pairwise Comparison Matrix (AHP)

	LRC	LSC	REC	RT	Final Weight
LRC	1	2	3	4	0.42
LSC	1/2	1	2	3	0.28
REC	1/3	1/2	1	2	0.18
RT	1/4	1/3	1/2	1	0.12

Consistency Ratio (CR) = 0.03 CR < 0.1 → Judgments are Acceptable

شکل ۶: ساختار سلسله مراتبی AHP برای وزن دهی شاخص CFI

Figure 6. AHP Hierarchical Structure for Weighting the Composite Flexibility Index (CFI)

مطابق با نتایج استخراج شده در جداول ۳ تا ۵، در شاخص ترکیبی انعطاف پذیری انرژی، مؤلفه ظرفیت کاهش بار با وزن ۰/۴۲ بالاترین اولویت را کسب کرده است. همچنین در شاخص تعادل منافع ذی نفعان، خبرگان وزن بیشتری را به کیفیت آسایش ساکنان (۰/۵۵) در مقایسه با درآمدزایی اقتصادی اختصاص داده اند که نشان دهنده رویکرد انسان محور در مدیریت هوشمند انرژی است. در نهایت، برای شاخص حفظ حریم خصوصی، سطح ناشناس سازی داده ها (۰/۵۰) به عنوان حیاتی ترین پارامتر شناسایی شد. تفاوت وزن مؤلفه ها بیانگر اهمیت نسبی آن ها از دیدگاه خبرگان در تحقق اهداف مدیریت هوشمند انرژی است. بیشترین وزن اختصاص یافته به ظرفیت کاهش بار ناشی از نقش مستقیم این مؤلفه در کاهش بار اوج، افزایش انعطاف پذیری ساختمان و بهبود تعامل با شبکه برق است. در مقابل، مؤلفه هایی مانند زمان پاسخ گویی و نرخ بازیابی، اگرچه در عملکرد سامانه مؤثر هستند، اما اثر آن ها تا حد زیادی به میزان ظرفیت واقعی جابه جایی و کاهش بار وابسته است؛ از این رو وزن کمتری دریافت کرده اند. به همین ترتیب، در شاخص تعادل منافع ذی نفعان، اولویت بیشتر به آسایش ساکنان بیانگر تأکید خبرگان بر حفظ کیفیت بهره برداری ساختمان در کنار اهداف اقتصادی است و در شاخص حفظ حریم خصوصی نیز ناشناس سازی داده ها به دلیل نقش اساسی آن در حفاظت از حریم خصوصی کاربران، بیشترین وزن را به خود اختصاص داده است.

جدول ۳: وزن‌های نهایی مؤلفه‌های شاخص انعطاف‌پذیری ترکیبی (CFI)

Table 3. Final Weights of the Components of the Composite Flexibility Index (CFI)

اولویت	انحراف معیار نظرات	وزن نهایی (w_i)	نماد	مؤلفه
۱	۰/۰۵	۰/۴۲	LRC	ظرفیت کاهش بار
۲	۰/۰۴	۰/۲۸	LSC	ظرفیت جابجایی بار
۳	۰/۰۳	۰/۱۸	η_{recovery}	نرخ بازیابی سیستم
۴	۰/۰۲	۰/۱۲	RT	زمان پاسخ
		۱/۰۰		مجموع

جدول ۴: وزن‌های نهایی مؤلفه‌های شاخص تعادل منافع (SBI)

Table 4. Final AHP-Derived Weights of the Components of the Stakeholder Benefit Index (SBI)

مؤلفه	نماد	وزن نهایی	انحراف معیار نظرات
شاخص کیفیت آسایش ساکنان	OCI	۰/۵۵	۰/۰۶
پتانسیل درآمدزایی از خدمات شبکه	RGP	۰/۴۵	۰/۰۶
مجموع		۱/۰۰	

جدول ۵: وزن‌های نهایی مؤلفه‌های شاخص حفظ حریم خصوصی

Table 5. Final AHP-Derived Weights of the Components of the Privacy Preservation Index (PPI)

مؤلفه	نماد	وزن نهایی	انحراف معیار نظرات
سطح ناشناس‌سازی داده‌ها	A	۰/۵۰	۰/۰۷
سطح شفافیت برای کاربران	T	۰/۳۰	۰/۰۵
میزان مطابقت با استانداردها	C	۰/۲۰	۰/۰۴
مجموع		۱/۰۰	

۳-۵- تحلیل حساسیت و پایداری نتایج

به‌منظور اطمینان از استحکام شاخص‌های پیشنهادی، تحلیل حساسیت با اعمال تغییر ۱۰ درصدی در وزن‌ها انجام یافت. نتایج نشان داد که شاخص ترکیبی انعطاف‌پذیری انرژی با تغییر حداکثر ۳/۲ درصدی، پایداری بسیار بالایی در برابر نوسان نظرات دارد. در

مقابل، شاخص تعادل منافع ذی‌نفعان حساسیت بیشتری (۴/۵ درصد) نسبت به تغییر وزن آسایش ساکنان نشان داد که بر لزوم دقت بالا در تنظیم پارامترهای رفاهی در سامانه‌های مدیریت هوشمند تأکید می‌کند. با این حال، تغییرات اعمال‌شده موجب تغییر معنادار در نتایج نهایی شاخص‌ها نشد و نشان داد که تغییر محدود در قضاوت یا ترکیب خبرگان نیز تأثیر اساسی بر وزن‌های نهایی ندارد؛ از این رو، چارچوب پیشنهادی از پایداری و قابلیت اتکای مناسبی در برابر تغییرات احتمالی گروه خبرگان برخوردار است.

۶- اعتبارسنجی چارچوب: مطالعه موردی

به‌منظور ارزیابی عملیاتی چارچوب پیشنهادی، یک مجتمع مسکونی ۱۰ واحدی با زیربنای ۱۰۰۰ مترمربع و جمعیت ۳۸ نفر ساکن در اقلیم گرم و خشک (شهر یزد) به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. شبیه‌سازی انرژی ساختمان با استفاده از نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر (نسخه ۷/۰) و موتور محاسباتی نرم‌افزار انرژی‌پلاس انجام گرفت، که در آن الگوریتم‌های مدیریت هوشمند بار از طریق زیربرنامه سامانه مدیریت انرژی ساختمان پیاده‌سازی و با داده‌های اقلیمی سال ۲۰۲۴ همگام‌سازی شدند. در این پژوهش، الگوریتم مدیریت بار بر پایه کنترل مبتنی بر قوانین در محیط سامانه مدیریت انرژی ساختمان پیاده‌سازی شد. در هر گام زمانی یک‌ساعته، تصمیمات کنترلی بر اساس توان تولیدی سامانه فتوولتائیک، وضعیت شارژ ذخیره‌ساز انرژی، تعرفه زمان استفاده^۱ و وضعیت بارهای ساختمان اتخاذ گردید. خروجی الگوریتم شامل زمان‌بندی بارهای انعطاف‌پذیر، کنترل شارژ و تخلیه ذخیره‌ساز انرژی و مدیریت تبادل انرژی با شبکه برق بود.

ساختمان مورد مطالعه به سامانه فتوولتائیک با ظرفیت ۳۰ کیلووات، ذخیره‌ساز باتری ۶۰ کیلووات‌ساعت، سامانه گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع، روشنایی، تجهیزات الکتریکی و زیرساخت شارژ خودروهای برقی مجهز بوده و تحت تعرفه زمان استفاده در دو سناریوی «پایه» (بدون مدیریت هوشمند انرژی) و «بهینه‌سازی‌شده» (با اجرای چارچوب پیشنهادی) مورد ارزیابی قرار گرفت.

پارامترهای ورودی مدل شامل مشخصات ترموفیزیکی پوسته ساختمان (ضریب انتقال حرارت دیوارها، سقف، کف و پنجره‌ها)، سامانه گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع از نوع جریان متغیر مبرد با پمپ حرارتی^۲، بارهای داخلی ناشی از روشنایی، تجهیزات الکتریکی و حضور ساکنان، برنامه زمان‌بندی بهره‌برداری تجهیزات، مشخصات سامانه فتوولتائیک، سامانه ذخیره‌ساز انرژی، تعرفه زمان‌مند برق و داده‌های اقلیمی بودند. این پارامترها بر اساس مقررات ملی ساختمان^۳، استاندارد انجمن مهندسان گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع آمریکا، فایل اقلیمی^۴ استاندارد شهر یزد و مطالعات مرجع انتخاب و در محیط نرم‌افزار انرژی‌پلاس پیاده‌سازی شدند. رفتار ساکنان نیز بر اساس برنامه زمان‌بندی استاندارد ساختمان‌های مسکونی^۵ موجود در نرم‌افزار انرژی‌پلاس مدل‌سازی شد تا اثر حضور و الگوی مصرف آنان بر بارهای داخلی، عملکرد سامانه گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع و تصمیمات سامانه مدیریت انرژی ساختمان در شبیه‌سازی لحاظ شود.

آسایش حرارتی ساکنان بر اساس شاخص میانگین پیش‌بینی‌شده احساس حرارتی^۵ مطابق استاندارد انجمن مهندسان گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع آمریکا محاسبه شد و مقدار شاخص آسایش ساکنان بر مبنای نتایج این ارزیابی تعیین گردید. در شبیه‌سازی، محدوده قابل قبول شاخص میانگین پیش‌بینی‌شده احساس حرارتی مطابق توصیه استاندارد مذکور، در بازه ۰/۵- تا ۰/۵+ به‌عنوان ارزیابی آسایش حرارتی در نظر گرفته شد.

به‌منظور شفاف‌سازی مشخصات مطالعه موردی و پارامترهای اصلی مورد استفاده در شبیه‌سازی، مشخصات ساختمان، سامانه‌های انرژی، بارهای داخلی و شرایط بهره‌برداری در جدول ۶ ارائه شده‌اند. این اطلاعات مبنای توسعه مدل ترمودینامیکی ساختمان در محیط نرم‌افزار انرژی‌پلاس و اجرای سناریوهای تحلیل در پژوهش حاضر را تشکیل می‌دهند.

اگرچه اعتبارسنجی چارچوب پیشنهادی در این پژوهش بر پایه شبیه‌سازی انجام شده است، مدل نرم‌افزار انرژی‌پلاس مطابق رویه‌های معتبر مدل‌سازی و اعتبارسنجی انرژی ساختمان توسعه یافته و خروجی‌های آن مبنای محاسبه شاخص‌های عملکردی قرار

۱ . Time of Use (TOU)

۲ . Variable Refrigerant Flow Heat Pump (VRF Heat Pump)

۳ . EnergyPlus Weather File (EPW)

۴ . Residential Schedule

۵ . Predicted Mean Vote (PMV)

گرفته‌اند. از این رو، نتایج حاصل به ساختمان مسکونی مورد مطالعه در اقلیم گرم و خشک محدود بوده و تعمیم آن به سایر اقلیم‌ها، شرایط آب‌وهوایی و انواع کاربری ساختمان مستلزم انجام شبیه‌سازی‌ها و اعتبارسنجی‌های متناظر است. همچنین، ارزیابی میدانی چارچوب با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری‌شده ساختمان‌های واقعی به‌عنوان یکی از محورهای اصلی پژوهش‌های آینده در نظر گرفته شده است.

جدول ۶: مشخصات مطالعه موردی، ویژگی‌های ساختمان و پارامترهای ورودی مورد استفاده در شبیه‌سازی چارچوب پیشنهادی

Table 6. Case Study Description, Building Characteristics, and Simulation Input Parameters for the Proposed Framework

گروه پارامتر	پارامتر	مقدار/مشخصات
مشخصات ساختمان	نوع ساختمان	مجتمع مسکونی
	تعداد واحدها	۱۰ واحد
	تعداد ساکنان	۳۸ نفر
	زیربنای کل	۱۰۰۰ مترمربع
پوسته ساختمان	اقلیم	گرم و خشک (شهر یزد)
	فایل اقلیمی	EPW سال ۲۰۲۴
	ضریب انتقال حرارت دیوار خارجی	$0.58 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
	ضریب انتقال حرارت سقف	$0.38 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
	ضریب انتقال حرارت کف	$0.67 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
	ضریب انتقال حرارت پنجره دوجداره	$2.80 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
سامانه تهویه مطبوع	نسبت سطح پنجره به دیوار (WWR)	۳۰٪
	شرایط مرزی	دیوارهای خارجی و سقف بام در تماس با هوای آزاد و کف طبقه همکف در تماس با زمین در مدل ترمودینامیکی نرم‌افزار انرژی پلاس تعریف شدند.
	نوع سیستم	سامانه جریان متغیر میرد با پمپ حرارتی
	روش کنترل	ترموستات هوشمند متصل به سامانه مدیریت انرژی
بارهای داخلی	روشنایی، تجهیزات الکتریکی و حضور ساکنان	مطابق برنامه زمان‌بندی استاندارد ساختمان‌های مسکونی (Residential Schedule) موجود در نرم‌افزار انرژی پلاس
	شاخص آسایش حرارتی	PMV مطابق استاندارد ASHRAE 55 (محدوده مجاز ۰.۵- تا ۰.۵+)
مدیریت انرژی	ظرفیت سامانه فتوولتائیک	۳۰ کیلووات
	ظرفیت ذخیره‌ساز باتری	۶۰ کیلووات‌ساعت
	زیرساخت شارژ خودرو برقی	موجود
	سامانه کنترل	Energy Management System (EMS) با الگوریتم کنترل مبتنی بر قوانین
تعارف برق	گام زمانی کنترل و شبیه‌سازی	۱ ساعت
	نوع تعارف	تعارف زمان‌استفاده (TOU) (جزئیات مقادیر در جدول ۸ ارائه شده است).
سناریوهای شبیه‌سازی	سناریوی پایه	بدون مدیریت هوشمند انرژی
	سناریوی پیشنهادی	اجرای چارچوب یکپارچه پیشنهادی

۶-۱- تحلیل عملکرد انعطاف‌پذیری و آسایش ساکنان

نتایج حاصل از شبیه‌سازی که در جدول ۷ خلاصه شده است، نشان‌دهنده ارتقای چشمگیر شاخص‌های عملکردی در سناریوی بهینه‌سازی شده است. پیاده‌سازی چارچوب منجر به افزایش ۸۵/۷ درصدی شاخص انعطاف‌پذیری ترکیبی شده که از ۰/۴۲ به ۰/۷۸ ارتقا یافته است. اگرچه این افزایش انعطاف‌پذیری، کاهش جزئی ۴/۴ درصدی در شاخص آسایش ساکنان را به همراه داشته است، اما این مبادله با توجه به بهبود سایر پارامترها، از نظر عملیاتی قابل توجیه ارزیابی می‌شود.

جدول ۷: مقایسه شاخص‌های کلیدی عملکرد در دو سناریوی پایه و بهینه‌سازی شده

Table 7. Comparison of Key Performance Indicators (KPIs) Between the Baseline and Optimized Scenarios

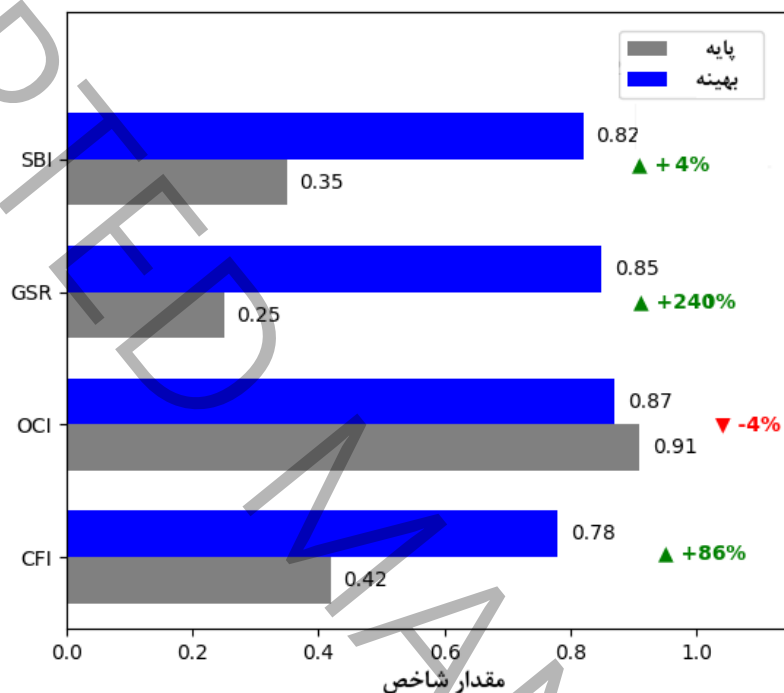
مؤلفه	نماد	سناریوی پایه	سناریوی بهینه‌سازی شده	تغییرات
لایه ۲: هوشمندی دیجیتال				
شاخص حفظ حریم خصوصی	PPI	۰/۵۸	۰/۸۶	+۴۸/۳ %
لایه ۳: بهینه‌سازی انعطاف‌پذیری				
شاخص انعطاف‌پذیری ترکیبی	CFI	۰/۴۲	۰/۷۸	+۸۵/۷ %
شاخص کیفیت آسایش ساکنان	OCI	۰/۹۱	۰/۸۷	- ۴/۴ %
لایه ۴: تعامل شبکه و تاب‌آوری				
نرخ خودکفایی در شرایط جزیره‌ای	IMSS	۰/۶۰ (برای ۴ ساعت)	۰/۹۵ (برای ۸ ساعت)	+۵۸/۳ %
شاخص پاسخ‌دهی به سیگنال‌های شبکه	GSR	۰/۲۵	۰/۸۵	+٪۲۴۰
لایه ۵: سیاست‌گذاری				
نرخ بازگشت سرمایه	ROI	٪۸/۲ (دوره بازگشت ۱۲ سال)	٪۱۴/۵ (دوره بازگشت ۷ سال)	+٪۷۷
نسبت کاهش انتشار کربن	CRR	٪۵۵	٪۶۸	+۱۳ واحد درصد
شاخص تعادل منافع (ساکنان/شبکه)	SBI	۰/۳۵	۰/۸۲	+٪۱۳۴

نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد که اجرای چارچوب پیشنهادی موجب بهبود هم‌زمان شاخص‌های فنی، اقتصادی و امنیت اطلاعات شده است. شاخص حفظ حریم خصوصی بر اساس رابطه (۴) و با استفاده از سه مؤلفه سطح ناشناس‌سازی داده‌ها (A)، شفافیت سامانه (T) و میزان انطباق با الزامات امنیت اطلاعات (C) محاسبه گردید. در سناریوی بهینه‌سازی شده، به‌کارگیری پردازش محلی داده‌ها، کنترل دسترسی و افزایش شفافیت عملکرد سامانه مدیریت انرژی باعث بهبود این شاخص نسبت به سناریوی پایه شد. همچنین، هرچند اجرای راهبردهای مدیریت هوشمند انرژی موجب کاهش حدود ۴ درصدی شاخص آسایش ساکنان گردید، این کاهش در محدوده قابل‌قبول آسایش حرارتی قرار داشته و در مقابل، افزایش قابل‌توجه شاخص‌های انعطاف‌پذیری، تعادل منافع، بازده اقتصادی و

قابلیت پاسخ‌گویی به شبکه را به همراه داشته است؛ بنابراین، مبادله میان آسایش و انعطاف‌پذیری در چارچوب پیشنهادی از دیدگاه بهره‌برداری ساختمان قابل توجیه ارزیابی می‌شود.

۲-۶- تعامل با شبکه برق و ارزیابی تعادل منافع ذی‌نفعان

یکی از برجسته‌ترین دستاوردهای چارچوب پیشنهادی، افزایش ۱۳۴ درصدی شاخص تعادل منافع است که از ۰/۳۵ در حالت پایه به ۰/۸۲ رسیده است. این جهش معنادار نشان‌دهنده موفقیت مکانیسم‌های کنترلی در لایه‌های هوشمندی و سیاست‌گذاری برای مدیریت تعارض میان نیازهای اپراتور شبکه و ترجیحات ساکنان است. همچنین، توانمندی ساختمان در پاسخ‌گویی به سیگنال‌های شبکه^۱ با رشد ۲۴۰ درصدی، آمادگی ساختمان برای مشارکت در بازارهای خدمات جانبی برق را تأیید می‌کند (شکل ۷).



شکل ۷: مقایسه شاخص‌های عملکردی در مطالعه موردی

Figure 7. Comparison of Performance Indicators in the Case Study

۳-۶- تحلیل اقتصادی و زیست‌محیطی

از منظر اقتصادی، اجرای چارچوب پیشنهادی منجر به افزایش نرخ بازگشت سرمایه^۲ از ۸/۲٪ به ۱۴/۵٪ شده که به معنای کاهش دوره بازگشت سرمایه از ۱۲ سال به ۷ سال است. در تفسیر نتایج اقتصادی، علاوه بر هزینه سامانه‌های تولید و ذخیره انرژی، هزینه‌های موردنیاز برای استقرار زیرساخت هوشمندسازی شامل حسگرهای هوشمند، زیرساخت‌های ارتباطی، سامانه مدیریت انرژی، تجهیزات و خدمات مرتبط با محاسبات لایه‌ای و الزامات امنیت اطلاعات نیز مدنظر قرار گرفته است. با توجه به اینکه این هزینه‌ها به عواملی نظیر نوع و ظرفیت تجهیزات، مقیاس ساختمان، معماری سامانه و شرایط اجرایی پروژه وابسته هستند، ارائه مقادیر ثابت و تعمیم‌پذیر برای آن‌ها امکان‌پذیر نیست. با این حال، مطالعات پیشین نشان می‌دهد که هزینه پیاده‌سازی سامانه‌های مدیریت هوشمند انرژی در ساختمان‌ها معمولاً در بازه ۲/۵ تا ۷ دلار به ازای هر مترمربع قرار داشته [۳۹] و هزینه فناوری‌های هوشمندسازی و اینترنت اشیا نیز می‌تواند حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد از سرمایه‌گذاری اولیه سامانه را تشکیل دهد [۴۰]. این موضوع نشان می‌دهد که اگرچه پیاده‌سازی

^۱ . Grid Signal Response (GSR)

^۲ . Return on Investment (ROI)

چارچوب پیشنهادی مستلزم افزایش هزینه اولیه است، اما صرفه جویی در مصرف انرژی، افزایش درآمد ناشی از مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی بار و تعامل با شبکه، امکان جبران این هزینه‌ها را در دوره بهره‌برداری فراهم می‌سازد. این جذابیت اقتصادی با بهبود شاخص‌های زیست‌محیطی نیز همراه بوده است؛ به طوری که نسبت کاهش انتشار کربن با ۱۳ واحد درصد افزایش، به ۶۸٪ رسیده است. در لایه تاب‌آوری نیز، نرخ خودکفایی در شرایط جزیره‌ای از ۴ ساعت به ۸ ساعت مداوم ارتقا یافته که نشان‌دهنده توانمندی چارچوب در حفظ عملکردهای حیاتی در زمان اختلالات شبکه است. با وجود نتایج مطلوب حاصل از مطالعه موردی، اعتبارسنجی حاضر صرفاً برای یک ساختمان مسکونی در اقلیم گرم و خشک انجام شده است. از این رو، تعمیم نتایج به سایر اقلیم‌ها، انواع کاربری ساختمان و شرایط بهره‌برداری متفاوت نیازمند انجام شبیه‌سازی‌ها و اعتبارسنجی‌های تکمیلی با داده‌های واقعی در مطالعات آینده است.

۷- تحلیل حساسیت و عدم قطعیت

به منظور ارزیابی استحکام چارچوب پیشنهادی و سنجش پایداری نتایج در مواجهه با متغیرهای تصادفی، یک تحلیل حساسیت جامع بر مبنای دو رویکرد «سناریو-محور» و «شبیه‌سازی مونت کارلو» انجام گرفت. در این تحلیل، پارامترهای کلیدی شامل وزن آسایش در تابع هدف، نوسانات قیمت برق در ساعات اوج بار، نرخ نفوذ خودروهای برقی و تغییرپذیری رفتار ساکنان به عنوان ورودی‌های مدل با توزیع‌های احتمالی مشخص لحاظ شدند (جدول ۸).

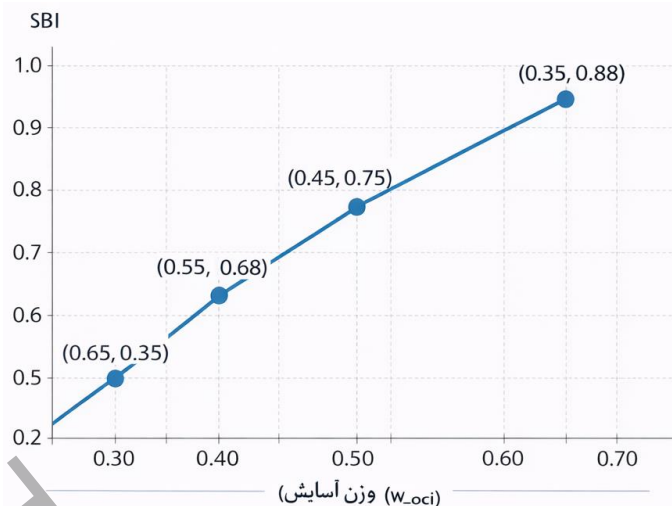
جدول ۸: پارامترهای ورودی و دامنه تغییرات در تحلیل حساسیت

Table 8. Input Parameters and Variation Ranges Used in the Sensitivity Analysis

پارامتر	نماد	مقدار پایه	دامنه تغییرات	نوع توزیع
وزن شاخص آسایش در تابع هدف	w_oci	۰/۳	۰/۱ تا ۰/۸	یکنواخت
قیمت برق در ساعات اوج بار	P_peak	۱۰۰۰ ریال/کیلووات ساعت	۰/۵ تا ۳ برابر	نرمال
نرخ نفوذ خودروهای برقی	EV_pen	۴۰٪	۲۰٪ تا ۸۰٪	یکنواخت
ضریب تغییرپذیری رفتار ساکنان	Occ_var	-	±۱۵٪	نرمال

۷-۱- تحلیل حساسیت سناریو-محور و اثر سیگنال‌های قیمتی

تحلیل سناریوها نشان می‌دهد که وزن اختصاص یافته به آسایش ساکنان (w_{oci}) بحرانی‌ترین پارامتر در تعیین عملکرد سیستم است. با افزایش این وزن از ۰/۳ به ۰/۶، اگرچه شاخص آسایش بهبود می‌یابد، اما به دلیل محدود شدن فضای مانور سیستم برای جابجایی بار، شاخص انعطاف‌پذیری ترکیبی حدود ۱۶٪ کاهش یافته و متعاقباً شاخص تعادل منافع نیز تنزل می‌یابد (نمودار ۸). از سوی دیگر، پاسخ‌دهی سیستم به محرک‌های اقتصادی بسیار معنادار است؛ به طوری که دو برابر شدن قیمت در ساعات پیک، منجر به رشد غیرخطی ۱۳۵ درصدی در پتانسیل درآمدزایی گردید که نشان‌دهنده کشش‌پذیری بالای مدل پیشنهادی نسبت به سیگنال‌های بازار انرژی است.

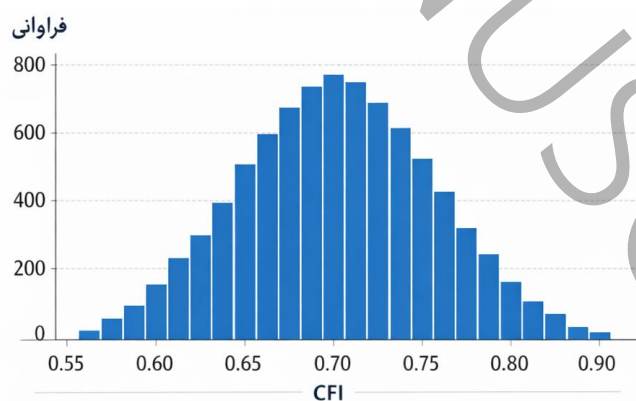


شکل ۸: تحلیل حساسیت SBI نسبت به تغییر وزن آسایش

Figure 8. Sensitivity Analysis of the Stakeholder Benefit Index (SBI) with Respect to Changes in the Comfort Weight

۷-۲- شبیه‌سازی مونت کارلو و استحکام مدل

جهت سنجش تأثیر هم‌زمان عدم قطعیت‌ها، شبیه‌سازی مونت کارلو با ۱۰۰۰۰ تکرار اجرا گردید. در هر تکرار مونت کارلو، پارامترهای معرفی شده در جدول ۸ مطابق توزیع‌های احتمالی متناظر به صورت تصادفی نمونه‌برداری شده و پس از اجرای مجدد مدل شبیه‌سازی، شاخص‌های ترکیبی انعطاف‌پذیری انرژی، تعادل منافع ذی‌نفعان و آسایش ساکنان محاسبه شدند. نتایج حاصل از توزیع احتمالی شاخص‌ها (نمودار ۹) نشان‌دهنده استحکام بالای چارچوب است؛ به‌طوری‌که میانگین شاخص ترکیبی انعطاف‌پذیری انرژی برابر ۰/۷۶ و میانگین شاخص تعادل منافع ذی‌نفعان برابر ۰/۷۹ با بازه‌های اطمینان نسبتاً باریک به دست آمد. همچنین، محاسبه ضریب همبستگی منفی ۰/۴۵ میان دو شاخص ترکیبی انعطاف‌پذیری انرژی و آسایش ساکنان در این شبیه‌سازی، وجود رابطه معوضه‌ای میان انعطاف‌پذیری عملیاتی و آسایش حرارتی را به صورت کمی تأیید می‌کند.



شکل ۹: توزیع احتمالی شاخص CFI و SBI در شبیه‌سازی مونت کارلو

Figure 9. Probability Distributions of the CFI and SBI Obtained from the Monte Carlo Simulation

این نتایج در مجموع اثبات می‌کند که چارچوب پیشنهادی نه تنها در شرایط ایده‌آل، بلکه در مواجهه با نوسانات رفتاری ساکنان و تغییرات قیمت انرژی، عملکردی پایدار و قابل پیش‌بینی ارائه می‌دهد.

۸- بحث و مقایسه با پژوهش‌های پیشین

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که چارچوب یکپارچه پیشنهادی با اتخاذ رویکردی چندلایه، توانسته است شکاف میان مبانی نظری و الزامات عملیاتی در مدیریت انرژی ساختمان‌های صفر انرژی را پوشش دهد. برخلاف رویکردهای سنتی که اغلب به صورت تک‌بعدی بر لایه‌های فنی یا صرفاً مفهومی تمرکز دارند، این مدل با برقراری پیوند میان پنج لایه فیزیکی، دیجیتال، بهینه‌سازی، شبکه و سیاست‌گذاری، یک ساختار منسجم برای مدیریت انعطاف‌پذیری فراهم آورده است.

۸-۱- تحلیل تطبیقی و تمایزات راهبردی

مقایسه تطبیقی این چارچوب با مدل‌های موجود (ارائه شده در جدول ۸) بیانگر آن است که هسته مرکزی این مدل بر «سازوکار علی» استوار است؛ امری که در رویکردهای صرفاً فنی [۴۱، ۴۲] به نفع تحلیل‌های همبستگی‌محور نادیده گرفته شده بود. تمایز کلیدی دیگر، تعبیه لایه مستقل «بازخورد انتقادی» است که برخلاف مدل‌های خطی کنترل پیش‌بین [۱۱، ۴۳]، امکان بازاندیشی مستمر در مفروضات مدل را بر اساس داده‌های تجربی فراهم می‌سازد.

جدول ۹: مقایسه چارچوب پیشنهادی با رویکردهای رایج

Table 9. Comparison of the Proposed Framework with Conventional Approaches

معیار ارزیابی	رویکردهای صرفاً فنی	رویکردهای صرفاً نظری	چارچوب پیشنهادی
دامنه و پوشش	تک‌بعدی (فناوری‌محور)	تک‌بعدی (انتزاعی-مفهومی)	چندلایه یکپارچه
ارتباط نظر و عمل	پیوند ضعیف (عمل‌زدگی)	پیوند ضعیف (نظریه‌زدگی)	پیوند قوی
توجه به بافت و زمینه	ناچیز	محدود	برجسته
جایگاه سازوکار علی	فروکاسته یا نادیده گرفته شده	گاهی مورد توجه	هسته مرکزی تحلیل
حلقه بازخورد انتقادی	فاقد این سازوکار	فاقد این سازوکار	دارای لایه مستقل بازخورد
قابلیت عملیاتی‌سازی	بالا (با رویکردی تقلیل‌گرا)	پایین	بالا (همراه با حفظ کلیت نگرش)

علاوه بر این، در حالی که بسیاری از پژوهش‌ها موضوع امنیت سایبری و حریم خصوصی را به‌عنوان متغیرهای حاشیه‌ای در نظر می‌گیرند، در چارچوب حاضر این مؤلفه‌ها به‌عنوان ارکان لایه هوشمندی دیجیتال ادغام شده‌اند. در چارچوب پیشنهادی، الزامات مدیریت داده و حفظ حریم خصوصی از طریق شاخص حفظ حریم خصوصی در فرآیند ارزیابی عملکرد سامانه مدیریت انرژی لحاظ شده‌اند. با این حال، پیاده‌سازی و ارزیابی فیزیکی زیرساخت‌ها و تجهیزات امنیت سایبری خارج از دامنه این پژوهش بوده و به‌عنوان یکی از محورهای مطالعات آتی در نظر گرفته می‌شود.

همچنین معرفی شاخص تعادل منافع پاسخی مستقیم به تعارضات چنددلی‌نفعی است که در مدل‌های پیشین به‌عنوان یک گره کور عملیاتی باقی مانده بود. این رویکرد چندبعدی باعث شده است تا مدل پیشنهادی علاوه بر حفظ کارایی فنی، از منظر اجتماعی و نهادی نیز قابلیت پذیرش بالایی داشته باشد.

با وجود مزایای ذکر شده، پیاده‌سازی این چارچوب با چالش‌هایی همچون پیچیدگی اجرایی و نیاز به تخصص‌های چندگانه (انرژی، فناوری اطلاعات و سیاست‌گذاری) مواجه است. لایه‌های دیجیتال و بهینه‌سازی به شدت به داده‌های باکیفیت و با نرخ نمونه‌برداری بالا وابسته‌اند که تأمین آن‌ها در تمامی ساختمان‌ها میسر نیست. علاوه بر این، حفظ تعادل میان «عمومیت چارچوب» برای استفاده گسترده و «زمینه‌مندی» آن برای اقلیم‌های خاص، نیازمند کالیبراسیون دقیق مدل در بسترهای واقعی است. از مهم‌ترین محدودیت‌های این پژوهش، اتکای اعتبارسنجی چارچوب پیشنهادی به نتایج شبیه‌سازی، بررسی تنها یک ساختمان مسکونی در اقلیم گرم و خشک و مدل‌سازی رفتار ساکنان بر اساس برنامه زمان‌بندی استاندارد نرم‌افزار انرژی پلاس است. بنابراین، تعمیم نتایج به سایر اقلیم‌ها، انواع ساختمان و الگوهای بهره‌برداری مستلزم انجام مطالعات تکمیلی، شبیه‌سازی‌های متناظر و اعتبارسنجی میدانی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری‌شده ساختمان‌های واقعی خواهد بود. پویایی سریع فناوری‌های اینترنت اشیاء و هوش مصنوعی نیز ایجاب می‌کند که این چارچوب به صورت دوره‌ای مورد بازنگری و به‌روزرسانی قرار گیرد تا کارآمدی خود را در برابر تهدیدات نوین سایبری و تغییرات بازار انرژی حفظ نماید.

۹- نتیجه‌گیری و توصیه‌ها

این پژوهش با هدف گذار از مفاهیم انتزاعی به قابلیت‌های عملیاتی، یک چارچوب یکپارچه مفهومی-عملیاتی برای مدیریت هوشمند انرژی و بهینه‌سازی انعطاف‌پذیری در ساختمان‌های انرژی صفر خالص توسعه داد. یافته‌های مطالعه موردی و تحلیل حساسیت نشان داد که چارچوب پیشنهادی علاوه بر بهبود شاخص‌های انعطاف‌پذیری انرژی، تعادل منافع ذی‌نفعان، حفظ حریم خصوصی و نرخ بازگشت سرمایه، در برابر تغییرات قیمت برق، رفتار ساکنان و نرخ نفوذ خودروهای برقی نیز عملکرد پایدار دارد. این نتایج نشان می‌دهد که یکپارچه‌سازی لایه‌های فیزیکی، دیجیتال، بهینه‌سازی، تعامل با شبکه برق و سیاست‌گذاری می‌تواند شکاف میان مدل‌های مفهومی و پیاده‌سازی عملی در ساختمان‌های انرژی صفر خالص را کاهش دهد. دستاورد اصلی این مطالعه، ارائه معماری پنج‌لایه منسجمی است که با بهره‌گیری از روش‌شناسی شناسایی، تعریف، تحلیل، توسعه و کاربست و بنیان‌های فلسفی واقع‌گرایی انتقادی، توانسته است ابعاد فیزیکی، دیجیتال، بهینه‌سازی، شبکه برق و سیاست‌گذاری را در یک بستر واحد یکپارچه سازد. اعتبارسنجی مدل از طریق مطالعه موردی و تحلیل حساسیت مونت کارلو، نه تنها افزایش ۸۵/۷ درصدی در شاخص ترکیبی انعطاف‌پذیری انرژی و بهبود ۱۳۴ درصدی در شاخص تعادل منافع ذی‌نفعان را تأیید کرد، بلکه نشان داد که مدل پیشنهادی دارای استحکام بالایی در برابر عدم قطعیت‌های رفتاری و اقتصادی است.

۹-۱- توصیه‌های کاربردی برای ذی‌نفعان

یافته‌های این پژوهش، ضرورت تغییر رویکرد در طراحی و سیاست‌گذاری ساختمان‌های هوشمند را آشکار می‌سازد. برای مهندسان و طراحان، توصیه می‌شود که به جای نگاه تک‌بعدی به تجهیزات، «طراحی یکپارچه از ابتدا» را مبنا قرار داده و زیرساخت‌های دیجیتال را با دیدگاه قابلیت توسعه و امنیت‌محوری پیاده‌سازی کنند. از سوی دیگر، سیاست‌گذاران و بهره‌برداران شبکه برق باید از تشویق‌های صرفاً «ظرفیت‌محور» (مانند یارانه نصب پنل خورشیدی) به سمت مشوق‌های «انعطاف‌پذیری‌محور» حرکت کنند. استانداردسازی شاخص‌های معرفی‌شده در این مقاله (نظیر شاخص ترکیبی انعطاف‌پذیری انرژی و شاخص حفظ حریم خصوصی) و الزام به رعایت پروتکل‌های امنیت سایبری در تجهیزات اینترنت اشیاء، می‌تواند مسیر گذار به شبکه‌های هوشمند پایدار را تسهیل نموده و عدالت انرژی را با مشارکت فعال ساکنان تضمین نماید.

۹-۲- افق‌های پژوهشی آتی

اگرچه چارچوب پیشنهادی گام مهمی در جهت عملیاتی‌سازی مدیریت هوشمند انرژی و انعطاف‌پذیری در ساختمان‌های انرژی صفر برداشته است، اما اعتبارسنجی تجربی آن در ساختمان‌های واقعی با اقلیم‌ها و کاربری‌های متنوع (از جمله ساختمان‌های اداری، آموزشی و تجاری) همچنان یک ضرورت پژوهشی محسوب می‌شود. از مهم‌ترین مسیرهای پژوهشی آینده می‌توان به توسعه الگوریتم‌های پیش‌بین مبتنی بر یادگیری ماشین برای مدیریت هوشمند بار، مدل‌سازی رفتار واقعی ساکنان بر پایه داده‌های

اندازه‌گیری شده، توسعه و ارزیابی عملی مؤلفه‌های امنیت سایبری و حفظ حریم خصوصی، ارزیابی عملکرد چارچوب در اقلیم‌ها و کاربری‌های مختلف، توسعه ابزارهای نرم‌افزاری خودکار برای پیاده‌سازی لایه‌های دیجیتال و بهینه‌سازی، بررسی اثر مشارکت در بازارهای خدمات جانبی برق بر شاخص‌های ترکیبی انعطاف‌پذیری انرژی، تعادل منافع ذی‌نفعان و حفظ حریم خصوصی، و همچنین بسط چارچوب به مقیاس‌های بزرگ‌تر نظیر محله‌های انرژی مثبت اشاره کرد. افزون بر این، تحلیل موانع نهادی، اقتصادی و سیاستی مؤثر بر پذیرش فناوری‌های پاسخ‌گویی به تقاضا می‌تواند زمینه توسعه کاربردهای عملی این چارچوب و تسریع در تحقق اهداف کربن صفر را فراهم سازد.

۱۰- مراجع

- [۱] H. Yuan, & Tang, W., Flexibility Provision From Urban Buildings to Low-Carbon Power Systems: Quantification, Aggregation and System Integration, IET Energy Systems Integration, 7(1) (2025) e70017.
- [۲] IEA, World Energy Outlook 2023, IEA, Paris, 2023.
- [۳] S.G. Cai, Zhonghua, Defining the energy role of buildings as flexumers: A review of definitions, technologies, and applications, Energy and Buildings, 311 (2024) 113821.
- [۴] A.J. Marszal, et al., Zero Energy Building definitions, Energy and Buildings, 43 (2011) 971-979.
- [۵] M.S. Lu, Yongjun; Kokogiannakis, Georgios; Ma, Zhenjun, Design of Flexible Energy Systems for Nearly/Net Zero Energy Buildings Under Uncertainty Characteristics: A Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 205 (2024) 114828.
- [۶] Z. Yang, Kong, D., Chen, Z., Zhang, Z., Du, D., & Zhu, Z., A Data-Driven Battery Energy Storage Regulation Approach Integrating Machine Learning Forecasting Models for Enhancing Building Energy Flexibility-A Case Study of a Net-Zero Carbon Building in China. , Buildings, 15(19) (2025) 3611.
- [۷] V. Rezaee, & Masoumnezhad, M., Study of the impact of thermal mass changes on the thermal comfort of buildings in Irans climates using the Köppen-Geiger method, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 57(8) (2025) 989-1012.
- [۸] C. Finck, et al. , Review of applied and tested control possibilities for energy flexibility in buildings, Energy Reports, 6 (2020) 709-718.
- [۹] Y.E. Himeur, Mariam; Fadli, Fodil; Meskin, Nader; Petri, Ioan; Rezgui, Yacine; Bensaali, Faycal; Amira, Abbes, AI-big data analytics for building automation and management systems: A survey, actual challenges and future perspectives, Artificial Intelligence Review, 56(6) (2023) 4929–5021.
- [۱۰] A. Arteconi, & Polonara, F., Assessing the demand side management potential and the energy flexibility of heat pumps in buildings, Energies, 11(9) (2018) 2346.
- [۱۱] K. Le, et al., A review of reinforcement learning for building energy flexibility, Energy and AI, 12 (2023) 100228.
- [۱۲] S.W. Yang, Man Pun; Ng, Bing Feng; Dubey, Swapnil; Henze, Gregor P.; Chen, Wanyu; Baskaran, Krishnamoorthy, Model Predictive Control for Integrated Control of Air-Conditioning and Mechanical Ventilation, Lighting and Shading Systems, Applied Energy, 297 (2021) 117112.
- [۱۳] G.F. Li, Yangyang; Pertzborn, Amanda; O'Neill, Zheng; Wen, Jin, Demand Flexibility Evaluation for

- Building Energy Systems with Active Thermal Storage Using Model Predictive Control, in: 2022 ASHRAE Annual Conference, 2022, pp. 650–658.
- [14] B.D. Cui, Jin; Lee, Seungjae; Im, Piljae; Salonvaara, Mikael; Hun, Diana; Shrestha, Som, Model Predictive Control for Active Insulation in Building Envelopes, *Energy and Buildings*, 267 (2022) 112108.
- [15] J. Clauß, Brozovsky, J., & Georges, L., Demonstrating the load-shifting potential of a schedule-based control in a real-life educational building, *Energy and Buildings*, 316 (2024) 114321.
- [16] H. Li, Johra, H., de Andrade Pereira, F., Hong, T., Le Dréau, J., Maturo, A., Wei, M., Liu, Y., Saberi-Derakhthenjani, A., Nagy, Z., Marszal-Pomianowska, A., Finn, D., Miyata, S., Kaspar, K., Nweye, K., O'Neill, Z., Pallonetto, F., & Dong, B., Data-driven key performance indicators and datasets for building energy flexibility: A review and perspectives, *Applied Energy*, 343 (2023) 121217.
- [17] J. Le Dréau, Lopes, R. A., O'Connell, S., Finn, D., Hu, M., Queiroz, H., Alexander, D., Satchwell, A., Österreicher, D., Polly, B., et al., Developing energy flexibility in clusters of buildings: A critical analysis of barriers from planning to operation, *Energy and Buildings*, 300 (2023) 113608.
- [18] Y.F. Ye, Cary A.; Xu, Rong; Huang, Sen; Liu, Yuan; Vrabie, Draguna; Zhang, Jian; Zuo, Wangda, System Modeling for Grid-Interactive Efficient Building Applications, *Journal of Building Engineering*, 69 (2023) 106148.
- [19] Y.P. Fu, Amanda; O'Neill, Zheng; Bushby, Steven T.; Wen, Jin, Utilizing Commercial Heating, Ventilating, and Air Conditioning Systems to Provide Grid Services: A Review, *Applied Energy*, 307 (2022) 118133.
- [20] L. Zhang, Huo, M., Zhou, T., Pan, J., & Xu, Y., Energy Flexibility Realization in Grid-Interactive Buildings for Demand Response: State-of-the-Art Review on Strategies, Resources, Control, and KPIs, *Energies*, 18(18) (2025) 4960.
- [21] G. Li, Ren, L., Fu, Y., Yang, Z., et al., A critical review of cyber-physical security for building automation systems, *Annual Reviews in Control*, 55 (2023) 237-254.
- [22] A. Llaría, Dos Santos, J., Terrasson, G., Boussaada, Z., Merlo, C., & Curea, O., Intelligent Buildings in Smart Grids: A Survey on Security and Privacy Issues Related to Energy Management, *Energies*, 14(9) (2021) 2733.
- [23] Z. Liu, Zhang, X., Sun, Y., & Zhou, Y., Advanced controls on energy reliability, flexibility and occupant-centric control for smart and energy-efficient buildings, *Energy and Buildings*, 297 (2023) 113436.
- [24] O. Vera-Piazzini, & Scarpa, M., Building energy model calibration: A review of the state of the art in approaches, methods, and tools, *Journal of Building Engineering*, 86 (2024) 108287.
- [25] V.F. Mendes, A.S. Cruz, A.P. Gomes, J.C. Mendes, A systematic review of methods for evaluating the thermal performance of buildings through energy simulations, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 198 (2024) 113875.
- [26] O. Ahmed, N. Sezer, M. Ou, L.L. Wang, I.G. Hassan, State-of-the-art review of occupant behavior modeling and implementation in building performance simulation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 185 (2023) 113558.

- [٢٧]J. Le Dréau, Lopes, R. A., O'Connell, S., Finn, D., Hu, M., Queiroz, H., et al., Developing energy flexibility in clusters of buildings: A critical analysis of barriers from planning to operation, *Energy and Buildings*, 300 (2023) 113608.
- [٢٨]H. Li, Johra, H., de Andrade Pereira, F., Hong, T., Le Dréau, J., Maturo, A., et al., Data-driven key performance indicators and datasets for building energy flexibility: A review and perspectives, *Applied Energy*, 343 (2023) 121217.
- [٢٩]Z. Afroz, Wu, H., Sethuvenkatraman, S., Henze, G., Junker, R. G., & Shepit, M., A study on price responsive energy flexibility of an office building under cooling dominated climatic conditions, *Energy and Buildings*, 316 (2024) 114359.
- [٣٠]A.J. Marszal, et al., Zero Energy Building--A review of definitions and calculation methodologies, *Energy and Buildings*, 43(4) (2011) 971-979.
- [٣١]S.Ø. Jensen, et al., IEA EBC Annex 67: Energy Flexible Buildings, *Energy Procedia*, 2017.
- [٣٢]J. Salom, A.J. Marszal, J. Widén, J. Candanedo, K.B. Lindberg, Analysis of load match and grid interaction indicators in net zero energy buildings with simulated and monitored data, *Applied Energy*, 136 (2014) 119-131.
- [٣٣]M. Masoumnezhad, M. Tehrani, A. Akoushideh, N. Narimanzadeh, A new adaptive fuzzy hybrid unscented Kalman/H-infinity filter for state estimating dynamical systems, *IET Signal Processing*, 15(7) (2021) 459-466.
- [٣٤]A.A. Bakar, Yussof, S., Ghapar, A. A., Sameon, S. S., & Jørgensen, B. N., A Review of Privacy Concerns in Energy-Efficient Smart Buildings: Risks, Rights, and Regulations, *Energies*, 17(5) (2024) 977.
- [٣٥]M. de-Borja-Torrejon, Mor, G., Cipriano, J., Leon-Rodriguez, A.-L., Auer, T., & Crawley, J., Closing the energy flexibility gap: Enriching flexibility performance rating of buildings with monitored data, *Energy and Buildings*, 311 (2024) 114141.
- [٣٦]K. Sirviö, S. Motta, K. Rauma, C. Evens, Multi-level functional analysis of developing prosumers and energy communities with value creation framework, *Applied Energy*, 368 (2024) 123496.
- [٣٧]I.R. Diamond, Grant, R. C., Feldman, B. M., et al. , Defining consensus: A systematic review recommends methodologic criteria for reporting of Delphi studies, *Journal of Clinical Epidemiology*, 67(4) (2014) 401-409.
- [٣٨]C. Okoli, & Pawlowski, S. D., The Delphi method as a research tool: An example, design considerations and applications, *Information & Management*, 42(1) (2004) 15-29.
- [٣٩]B. Mataloto, Ferreira, J. C., & Cruz, N., LoBEMS—IoT for Building and Energy Management Systems, *Electronics*, 8(7) (2019) 763.
- [٤٠]M. Poyyamozhi, Murugesan, B., Rajamanickam, N., Shorfuzzaman, M., & Aboelmagd, Y., IoT—A Promising Solution to Energy Management in Smart Buildings: A Systematic Review, Applications, Barriers, and Future Scope, *Buildings*, 14(11) (2024) 3446.

- [۴۱] W. Li, Koo, C., Cha, S. H., Lai, J. H. K., & Lee, J., A conceptual framework for the real-time monitoring and diagnostic system for the optimal operation of smart building: A case study in Hotel ICON of Hong Kong, *Energy Procedia*, 158 (2019) 3107-3112.
- [۴۲] V. Rezaee, Taghizadeh, A., & Masoumnezhad, M. , Comparative Feasibility Study of Two Direct Expansion Solar Water Heater Heat Pump Systems in Rasht Climate, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 57(5) (2025) 589-610.
- [۴۳] W. Liang, Li, H., Zhan, S., Chong, A., & Hong, T., Energy flexibility quantification of a tropical net-zero office building using physically consistent neural network-based model predictive control, *Advances in Applied Energy*, 14 (2024) 100167.

Development of an Operational Framework for Smart Management and Energy Flexibility in Net-Zero Energy Buildings

Mojtaba Masoumnezhad^{a1}

^a Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University, Tehran, Iran

ABSTRACT

The transition toward net-zero energy buildings requires the integration of energy flexibility with intelligent energy management systems. However, a review of the literature reveals a significant gap between theoretical frameworks of energy flexibility and their practical implementation, particularly in addressing cybersecurity challenges and conflicts of interest among stakeholders. This study aims to bridge this gap by proposing an integrated conceptual–operational framework grounded in the philosophical foundations of critical realism. The proposed framework is structured as a five-layer architecture comprising the physical, digital, optimization, grid, and policy layers. Its operationalization is achieved through the Identify–Define–Analyze–Develop–Assess methodology, together with a Composite Flexibility Index, a Stakeholder Balance Index, and privacy indicators. For validation, a ten-unit residential building located in a hot-arid climate was simulated using EnergyPlus and DesignBuilder, while the indicators were weighted through a combination of the Analytic Hierarchy Process and the Delphi method. The results demonstrate that implementing the proposed framework increases the Composite Flexibility Index by 85.7% and the Stakeholder Balance Index by 134%. Furthermore, sensitivity analysis based on Monte Carlo simulation confirmed the robustness of the model against behavioral and economic uncertainties at a 95% confidence level. In addition, the investment payback period was reduced to seven years, while the building's capacity to respond to grid signals increased by 240% without causing a significant reduction in occupant comfort. The proposed framework provides a practical foundation for the development of grid-interactive buildings.

KEYWORDS

Net-Zero Energy Building (NZEB), Energy Flexibility, Smart Management, Critical Realism, Cybersecurity.

¹ Corresponding Author: Email: mmasomnezhad@tvu.ac.ir