University of Tehran Press

Journal of Natural Environment

Online ISSN: 2423-7817

Homepage: https://jne.ut.ac.ir/

A Market-based definition of the "Hybrid Zero-Energy Building" with an emphasis on renewable energy development in Iran's agricultural buildings

Ahmad Fazli[1] | Hossein Mobli[2]✉ | Shahin Rafiee[3] | Majid Khanali[4]

1. Department of Agricultural Machinery Engineering, College of Agriculture, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: fazli.ahmad@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Agricultural Machinery Engineering, College of Agriculture, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: hmobli@ut.ac.ir
3. Department of Agricultural Machinery Engineering, College of Agriculture, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: shahinrafiee@ut.ac.ir
4. Department of Agricultural Machinery Engineering, College of Agriculture, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: khanali@ut.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 27 December 2025

Received in revised form 21 July 2026

Accepted 1 August 2026

Keywords:

Energy Efficiency Certificate,
Energy market,
Energy Quality,
Exergy,
Iran's climate,
Net-Zero Energy Building,
Renewable Energy Certificate,
Sustainable development.

ABSTRACT

In recent years, the concept of Net Zero Energy Buildings (NZEBs) has emerged as a central pillar of decarbonization policies and sustainable development strategies. However, most existing definitions are primarily based on annual energy balance and rely heavily on on-site renewable energy generation. This approach shows limited practical applicability across diverse climatic conditions, transitioning energy systems, and urban contexts with constrained installation capacity, such as many regions of Iran. To address these limitations, the present study identifies existing conceptual gaps through a critical review of the literature and proposes an innovative definition—termed the Hybrid Net Zero Energy Building (Hybrid NZEB)—by integrating market-based mechanisms with technical energy approaches. Within the proposed framework, net-zero status can be achieved through an optimal and weighted combination of three energy sources: on-site renewable energy generation, procurement of Renewable Energy Certificates (RECs), and the purchase or generation of Energy Efficiency Certificates (EECs). Beyond energy quantity, the proposed definition explicitly incorporates energy quality (exergy), temporal value of energy consumption, climatic adjustment factors, and grid value coefficients into the energy balance calculations. Consequently, the building is conceptualized not as an isolated entity but as an active component of an integrated energy–market ecosystem. A critical assessment of existing NZEB literature indicates that the proposed Hybrid NZEB framework not only overcomes key shortcomings of conventional NZEB definitions but also enhances renewable energy markets, stimulates decentralized investment, and increases the economic value of energy efficiency measures. Furthermore, the application of the proposed methodology to a representative poultry farm case study demonstrates that the combined utilization of on-site renewable energy production, renewable energy certificates, and energy efficiency certificates increases the annual effective energy to 193.6 MWh, exceeding the facility's annual energy demand of 180 MWh. The resulting positive net energy balance of 13.6 MWh confirms that the examined poultry unit qualifies as a Hybrid NZEB under the proposed definition.

Cite this article: Fazli, A., Mobli, H., Rafiee, SH., & Khanali, M. (2026). A Market-based definition of the "Hybrid Zero-Energy Building," with an emphasis on renewable energy development in Iran's agricultural buildings. *Journal of Natural Environment*, *79* (4), 725-744.

DOI: http//doi.org/10.22059/jne.2026.408931.2876

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

Introduction

Net-zero energy buildings (NZEBs) can contribute to reducing fossil-fuel consumption, greenhouse gas emissions, and dependence on centralized energy systems. However, conventional NZEB definitions are generally based on an annual energy balance and substantial reliance on onsite renewable energy generation. Applying these definitions to agricultural buildings is challenging because such buildings may face limited installation area, seasonal and process-dependent loads, restricted investment capacity, climatic diversity, and temporal mismatches between renewable generation and energy demand. These challenges are particularly important in Iran, where agricultural buildings operate under diverse climatic and technical conditions. Furthermore, conventional energy accounting often treats different energy flows as equivalent without adequately considering energy quality, temporal matching, climatic performance, or their value to the electricity grid. Consequently, a building may fail to meet a conventional net-zero criterion despite making measurable contributions to renewable-energy development, energy-efficiency improvement, and grid support. This study proposes a market-based definition of the Hybrid Net-Zero Energy Building (Hybrid NZEB). The framework combines onsite renewable energy generation, Renewable Energy Certificates (RECs/I-RECs), and Energy Efficiency Certificates (EECs). It considers an agricultural building an active component of an integrated energy–market ecosystem rather than an isolated energy consumer.

Material and Methods

A conceptual and analytical framework was developed to assess the net-zero performance of an agricultural building through three complementary pathways: (1) onsite renewable electricity generation using a photovoltaic system; (2) the purchase and retirement of verified RECs/I-RECs; and (3) the generation or acquisition of verified EECs representing eligible energy savings. The nominal annual energy associated with each pathway is converted into effective energy using four correction coefficients. The energy-quality coefficient, alpha_i, represents the quality or exergy content of the relevant energy carrier. The temporal-matching coefficient, beta_i, indicates the coincidence between renewable generation, certificate-based compensation or energy savings and the building's load profile. The climatic coefficient, gamma_i, accounts for the effects of climate on energy demand and renewable-energy performance. The grid-value coefficient, delta_i, reflects the contribution of each pathway to peak-load reduction, loss mitigation, grid flexibility, and avoided network-capacity expansion.
The effective energy of pathway i is calculated as:

$$E_i, eff = E_i, nom * alpha_i * beta_i * gamma_i * delta_i$$

The total effective annual energy is calculated as:

$$E_{eff}, annual = \sum_1^n [E_i, nom * alpha_i * beta_i * gamma_i * delta_i]$$

For the three pathways examined in this study:

$$E_{eff}, annual = E_{PV}, eff + E_{REC}, eff + E_{EEC}, eff$$

A building is classified as a Hybrid NZEB when its total effective annual energy is equal to or greater than its annual final energy consumption:

$$E_{eff}, annual \geq E_{final}, annual$$

The annual net-zero balance is calculated as:

$$B_{Hybrid} - NZEB = E_{eff}, annual - E_{final}, annual$$

Results

The effective annual contribution of the onsite photovoltaic system was 116.3 MWh. The effective contribution of purchased and retired RECs/I-RECs was 46.2 MWh, while verified EECs contributed 31.1 MWh. Therefore, the total effective annual energy was:

$$E_{eff}, annual = 116.3 + 46.2 + 31.1 = 193.6 \frac{MWh}{year}$$

The annual hybrid net-zero balance was:

$$B_{Hybrid} - NZEB = 193.6 - 180 = +13.6 \frac{MWh}{year}$$

Because the balance was positive, the case-study building satisfied the proposed Hybrid NZEB criterion. Onsite photovoltaic generation accounted for approximately 60.1% of the total effective energy. RECs/I-RECs and EECs accounted for approximately 23.9% and 16.1%, respectively. Onsite generation therefore remained the principal pathway, while certificate-based mechanisms compensated for the portion of demand that could not practically be covered by onsite renewable generation alone.

Discussion

The results demonstrate that agricultural buildings do not necessarily need to depend exclusively on onsite renewable energy generation to achieve net-zero performance. Under technical, spatial, climatic, or financial constraints, a diversified portfolio consisting of onsite photovoltaic generation, verified renewable-energy certificates, and documented energy-efficiency improvements can provide a more practical pathway toward net-zero energy. Unlike a simple annual energy-balance method, the proposed framework differentiates among energy pathways according to their quality, timing, climatic performance, and grid value. It can therefore assign greater value to renewable generation and energy savings occurring during high-demand periods or providing measurable benefits to the electricity network. The market-based structure can also promote renewable-energy investment beyond the physical boundary of an individual building. Agricultural buildings may participate in broader energy markets through distributed renewable generation, verified energy savings, and certificate procurement. Nevertheless, certificate-based claims must meet the requirements of traceability, exclusivity, additionality, and formal retirement to prevent double counting. Reliable monitoring, reporting, and verification procedures are therefore necessary for credible implementation.

Conclusion

The proposed Hybrid NZEB definition extends conventional net-zero assessment by integrating onsite renewable generation, RECs/I-RECs, and EECs within a value-adjusted annual energy balance. The case-study building achieved 193.6 MWh of effective annual energy against 180 MWh of annual final consumption, producing a positive balance of 13.6 MWh. It therefore satisfied the proposed criterion. This framework provides a flexible pathway for agricultural buildings unable to achieve net-zero performance exclusively through onsite generation. Future research should focus on empirical coefficient calibration, uncertainty analysis, economic optimization, certificate-market development, and standardized monitoring and verification procedures.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

CRediT authorship contribution statement

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank anonymous reviewers for their valuable suggestions in manuscript revision.

محیط زیست طبیعی
انتشارات دانشگاه تهران
شاپای الکترونیکی: ۷۸۱۷-۲۴۲۳
Homepage: https://jne.ut.ac.ir/

تعریف بازارمحور "ساختمان انرژی صفر ترکیبی" با تأکید بر توسعهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر درساختمان‌های کشاورزی ایران

احمد فضلی[۱] | حسین مبلی[۲]✉ | شاهین رفیعی[۳] | مجید خانعلی[۴]

۱. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: fazli.ahmad@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: hmobli@ut.ac.ir
۳. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: shahinrafiee@ut.ac.ir
۴. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: khanali@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۰

کلیدواژه‌ها:
پتانسیل کاردهی،
اقلیم ایران،
بازار انرژی،
توسعهٔ پایدار،
ساختمان انرژی صفر،
کیفیت انرژی،
گواهی انرژی تجدیدپذیر (REC)،
گواهی کارایی انرژی.

چکیده

در سال‌های اخیر، مفهوم ساختمان انرژی صفر[۱] (NZEB) به‌عنوان یکی از ستون‌های اصلی سیاست‌های کربن‌زدایی و توسعهٔ پایدار معرفی شده است. با این حال، اغلب تعاریف موجود بر مبنای تراز انرژی سالیانه و تمرکز بر تولید انرژی تجدیدپذیر در محل بنا شده‌اند؛ رویکردی که در اقلیم‌های متنوع، نظام‌های انرژی در حال گذار، و شهرهای با محدودیت فضای نصب همچون بسیاری از مناطق ایران، کارایی عملی محدودی دارند. پژوهش حاضر با تحلیل شکاف‌های موجود، مرور انتقادی ادبیات، و تلفیق رویکردهای بازارمحور و فنی، یک تعریف نوآورانه با عنوان ساختمان انرژی صفر ترکیبی[۲] ارائه می‌کند. در این تعریف، وضعیت انرژی صفر می‌تواند از طریق ترکیب بهینه و وزنی سه منبع انرژی شامل تولید انرژی تجدیدپذیر در محل، خرید گواهی انرژی تجدیدپذیر[۳] (REC)، و خرید یا تولید گواهی کارایی انرژی[۴] (EEC) حاصل شود. تعریف پیشنهادی علاوه بر کمیت انرژی، عوامل کیفیت انرژی (پتانسیل کاردهی)، ارزش زمانی مصرف، ضریب اقلیمی، و ارزش شبکه‌ای را وارد محاسبات می‌کند و ساختمان را بخشی از یک اکوسیستم انرژی–بازار نه یک واحد منفرد در نظر می‌گیرد. بررسی انتقادی ادبیات نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی نه‌تنها ضعف‌های تعاریف سنتی NZEB را رفع می‌کند، بلکه موجب توانمندسازی بازارهای تجدیدپذیر، تحریک سرمایه‌گذاری غیرمتمرکز و ارتقای ارزش اقتصادی بهره‌وری انرژی نیز می‌شود. در این راستا، پژوهش حاضر نشان داد در واحد مرغداری نمونه تولید انرژی تجدیدپذیر، گواهی انرژی تجدیدپذیر و خرید یا تولید گواهی کارایی انرژی می‌تواند مقدار انرژی مؤثر سالانه را به ۱۹۳/۶ مگاوات‌ساعت افزایش دهد که این مقدار انرژی از مصرف سالانهٔ واحد (۱۸۰ مگاوات‌ساعت) فراتر می‌رود. تراز نهایی مثبت ۱۳/۶ مگاوات‌ساعت نشان می‌دهد که مرغداری مذکور، مطابق تعریف ساختمان انرژی صفر ترکیبی، یک واحد Hybrid NZEB محسوب می‌شود.

استناد: فضلی، احمد؛ مبلی، حسین؛ رفیعی، شاهین؛ و خانعلی، مجید (۱۴۰۵). تعریف بازارمحور "ساختمان انرژی صفر ترکیبی" با تأکید بر توسعهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر درساختمان‌های کشاورزی ایران. *محیط زیست طبیعی*، ۷۹ (۴)، ۷۴۴-۷۲۵.

DOI: http//doi.org/10.22059/jne.2026.408931.2876

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
© نویسندگان.

[1] Net Zero Energy Building
[2] Hybrid NZEB
[3] Renewable Energy Certificates
[4] Energy Efficiency Certificates

مقدمه

در دهه‌های اخیر، مفهوم ساختمان انرژی صفر (NZEB) به‌عنوان یکی از راهبردهای کلیدی برای تحقق توسعهٔ پایدار و کاهش انتشار کربن در مقیاس ساختمان و شهر مطرح شده است. در تعریف متداول ساختمان انرژی صفر (NZEB)، برابری میان انرژی کل تولیدی و مصرفی سالانه به‌عنوان معیار «صفر بودن» در نظر گرفته می‌شد. با وجود این، به‌تدریج آشکار شد که این تعریف صرفاً بر پایهٔ تراز حسابداری انرژی است و از جنبه‌های کیفیت انرژی، اثر اقتصادی، و پویایی عملکرد غافل می‌ماند. ادبیات موجود پیرامون ساختمان‌های انرژی صفر عمدتاً ریشه در مطالعات دههٔ ۲۰۰۰ دارد، جایی که NZEB به‌صورت یک تراز انرژی ساده تعریف می‌شد (Torcellini *et al*., 2006). در بیشتر کشورها، این تعریف بر پایهٔ تولید انرژی تجدیدپذیر در محل بنا شده است (Marszal *et al*., 2011)؛ اما با گسترش فناوری‌ها، تغییر ساختار شبکه‌ها و ظهور ابزارهای بازار انرژی، ضعف‌های این تعاریف آشکارتر شده است.

مطالعات اخیر نشان می‌دهند که اگرچه ادبیات مرتبط با نیروگاه مجازی[5] (VPP) کشاورزی هنوز محدود است، اما دو جریان پژوهشیِ مجاور با سرعت قابل‌توجهی توسعه یافته‌اند. جریان نخست به نیروگاه‌های مجازی، انرژی تراکنشی، و هماهنگی انعطاف‌پذیری در شبکه‌های توزیع (Sarathkumar *et al*., 2025; Wang *et al*., 2024) مربوط است که در آن، موضوعاتی مانند بهینه‌سازی مشارکتی، حضور در بازار، و بهره‌برداری پشتیبان شبکه از منابع انرژی پراکنده مورد توجه قرار گرفته‌اند. جریان دوم به مدیریت پیشرفته انرژی در سامانه‌های کشاورزی و گلخانه‌ای (Nagarsheth *et al*., 2025) اختصاص دارد که شامل انعطاف‌پذیری سمت تقاضا، ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر، و کنترل هوشمند بارهای حرارتی و الکتریکی است. برآیند این مطالعات نشان می‌دهد که کانون های انرژی کشاورزی می‌توانند به‌عنوان گزینه‌هایی امیدبخش برای تجمیع در قالب ساختارهای مشابه نیروگاه مجازی تفسیر شوند، به‌ویژه هنگامی‌که برق خورشیدی محلی، ذخیره‌ساز انرژی، بارهای حرارتی، و بهره‌برداری انعطاف‌پذیر به‌صورت یکپارچه مدیریت شوند.

بررسی دقیق ادبیات نشان می‌دهد که اغلب تعاریف پذیرفته‌شدهٔ NZEB بر موازنهٔ سادهٔ انرژی سالانه و اتکای حداکثری بر تولید انرژی تجدیدپذیر در محل ساختمان استوار هستند؛ رویکردی که در عمل، در بسیاری از اقلیم‌ها و نظام‌های انرژی در حال گذار، با محدودیت‌های فنی، فضایی و اقتصادی جدی مواجه است. در کشورهایی نظیر ایران، تنوع شدید اقلیمی، محدودیت تابش خورشیدی در برخی فصول، کیفیت پایین ساختمان‌های موجود، و محدودیت سطح نصب سامانه‌های تجدیدپذیر، موجب شده است که تحقق NZEB کلاسیک تنها برای تعداد محدودی از ساختمان‌ها امکان‌پذیر باشد. افزون بر این، تعاریف متعارف NZEB عموماً انرژی را صرفاً از منظر کمّی ارزیابی کرده و مفاهیمی همچون کیفیت انرژی، ارزش زمانی مصرف، نقش شبکه و سازوکارهای بازار انرژی را نادیده می‌گیرند. در چنین بستری، ضرورت بازاندیشی در تعریف NZEB و حرکت به‌سوی چارچوب‌هایی منعطف، چندمنبعی و ارزش‌محور آشکار می‌شود. پژوهش حاضر با هدف پاسخ به این خلأ مفهومی، یک تعریف بازارمحور و فنی جدید تحت عنوان «ساختمان انرژی صفر ترکیبی» (Hybrid NZEB) ارائه می‌دهد که در آن، وضعیت صفر انرژی می‌تواند از طریق ترکیب وزنی تولید تجدیدپذیر در محل، گواهی انرژی تجدیدپذیر (REC/I-REC) و گواهی صرفه‌جویی انرژی (EEC) محقق شود.

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی بر نقش مزارع انرژی مجازی، خوشه‌های انرژی محلی و کلاسترهای انرژی کشاورزی در افزایش انعطاف‌پذیری، تجمیع منابع پراکنده و بهینه‌سازی تبادل انرژی در سطح شبکهٔ توزیع تمرکز کرده‌اند. این مطالعات نشان می‌دهند که اتصال ساختمان‌ها و واحدهای کشاورزی به ساختارهای تجمیعی انرژی می‌تواند امکان مدیریت همزمان تولید، ذخیره‌سازی، مصرف و گواهی‌های انرژی را فراهم کند. در این چارچوب، ساختمان انرژی صفر ترکیبی را می‌توان به‌عنوان یک رویکرد مکمل برای این ساختارهای نوین در نظر گرفت که علاوه بر تراز فیزیکی انرژی، ارزش زمانی، اقلیمی و شبکه‌ای منابع را نیز در ارزیابی نهایی لحاظ می‌کند.

مروری بر تعاریف فعلی ساختمان انرژی صفر توسط مراجع معتبر بین‌المللی

در ادبیات بهینه‌سازی انرژی ساختمان، مفهوم «ساختمان انرژی صفر» از اواخر دههٔ ۱۹۹۰ تا امروز مسیر تکامل قابل‌توجهی را طی کرده و هر یک از مراجع معتبر بین‌المللی، با توجه به اولویت‌های سیاستی، فناورانه و محیط‌زیستی خود، تعریفی متمایز اما همپوشان

[5] virtual power plant

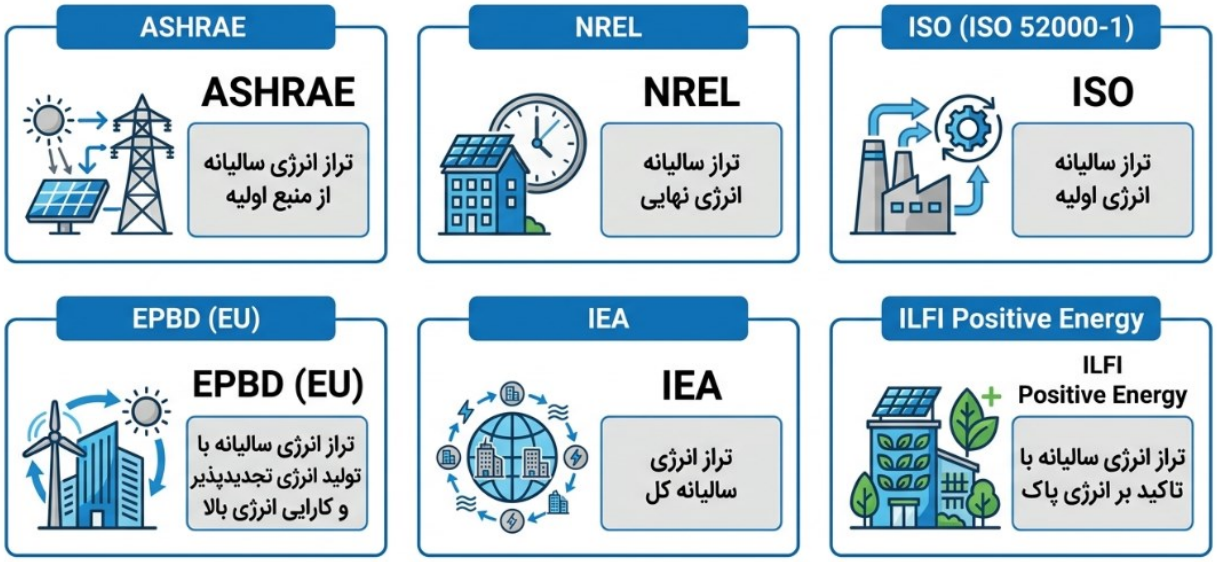
از این مفهوم ارائه کرده‌اند. براساس استاندارد[۶] ASHRAE 228، ساختمان انرژی صفر به‌عنوان ساختمانی تعریف می‌شود که طی دورهٔ ارزیابی سالانه، انرژی تحویلی آن از شبکه با انرژی تجدیدپذیر تولیدشده در محل برابر گردد؛ بنابراین منطق حاکم بر این تعریف، تأکید بر تراز مستقیم انرژی سایت و ضرورت تولید انرژی تجدیدپذیر در همان محدودهٔ فیزیکی ساختمان است. این رویکرد، چارچوبی نسبتاً سخت‌گیرانه ایجاد می‌کند و اجازهٔ استفاده از گواهی‌های انرژی تجدیدپذیر خارج از محل را نمی‌دهد، زیرا ماهیت «خودکفایی انرژی» در سطح سایت زیربنای این تعریف است. در نقطه مقابل، وزارت انرژی ایالات متحده[۷](DOE) و آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر[۸] (NREL) مفهوم ساختمان انرژی صفر را از زاویه‌ای گسترده‌تر و با چهار طبقه‌بندی مکمل تبیین کرده‌اند. این چهار طبقه‌بندی صفر انرژی سایت، صفر انرژی منبع، صفر هزینهٔ انرژی و صفر انتشار نشان می‌دهند که مفهوم «صفر» می‌تواند براساس معیارهای فیزیکی، اقتصادی و محیط‌زیستی تغییر کند. بنابراین، تراز صفر انرژی نه فقط به مقدار انرژی تحویلی و تولیدی، بلکه به کیفیت انرژی، زنجیرهٔ تبدیل انرژی اولیه و پیامدهای محیط‌زیستی مصرف آن وابسته است. این رویکرد چندبعدی NREL از مهم‌ترین نقاط عطف در ادبیات این حوزه به‌شمار می‌آید و به‌ویژه در پژوهش‌های بهینه‌سازی چندمعیاره مورد توجه قرار گرفته است، زیرا امکان مقایسهٔ سناریوهای مختلف را در چارچوبی واحد فراهم می‌آورد.

در اتحادیهٔ اروپا، دستورالعمل عملکرد انرژی ساختمان‌ها[۹] (EPBD) مفهوم «ساختمان تقریباً صفر انرژی» را مطرح می‌کند که نسبت به رویکرد ایالات متحده انعطاف‌پذیرتر اما الزام‌آورتر است. براساس این دستورالعمل، ساختمان باید مصرف انرژی بسیار پایینی داشته باشد و بخش قابل‌توجهی از این انرژی باید از منابع تجدیدپذیر محلی یا «نزدیک محل» تأمین شود. ازآنجا که تعیین مقادیر کمی در اختیار کشورهای عضو گذاشته شده، تعریف EPBD در عمل به مجموعه‌ای از استانداردهای ملی تبدیل می‌شود. با این حال، روح کلی این تعریف بر کاهش شدید تقاضای انرژی و یکپارچگی سیاست‌گذاری انرژی در سطح اتحادیه استوار است، که آن را به یکی از موفق‌ترین چارچوب‌های قانونی در حوزهٔ بهره‌وری انرژی تبدیل کرده است. از سوی دیگر، استاندارد بین‌المللی[۱۰] ISO 52000-1 یک چارچوب جهانی برای محاسبهٔ انرژی ورودی و خروجی ساختمان ارائه می‌کند و ساختمان صفر انرژی را بر مبنای موازنه انرژی نهایی تعریف می‌نماید. تمایز اصلی تعریف استاندارد بین المللی در تأکید آن بر مفهوم «مرز تراز انرژی» و ضرورت تفکیک دقیق میان انرژی تحویلی، انرژی صادرشده و نحوهٔ ارزیابی انرژی‌های تجدیدپذیر خارج از سایت است. در این رویکرد، ساختمان زمانی صفر انرژی تلقی می‌شود که موازنه سالانه انرژی تحویلی و انرژی صادرشده به شبکهٔ برابر صفر گردد. این تعریف مزیت استانداردسازی بین‌المللی دارد و برای مقاصد مقایسه‌ای و ارزیابی عملکرد ساختمان‌ها در کشورهای مختلف بسیار مؤثر است.

در گزارش‌ها و پروژه‌های پژوهشی آژانس بین‌المللی انرژی[۱۱] (IEA) به‌ویژه در برنامه‌های Annex 52 و Annex 67، مفهوم ساختمان انرژی صفر با نگاهی سیستمی‌تر و با توجه به تحلیل پتانسیل کاردهی توسعه یافته است. در این رویکرد، کیفیت انرژی و قابلیت استفاده از آن در کنار کمیت مصرف، اهمیت می‌یابد. براساس این مدل، سطوح مختلفی از صفر انرژی شامل حالت‌هایی مبتنی بر تولید تجدیدپذیر در محل، ترکیبی از تولید محلی و خارج از محل، یا حتی جبران انتشار از طریق رویکردهای خارج‌سایتی تعریف می‌شود. این انعطاف‌پذیری امکان می‌دهد ساختمان‌ها بر حسب زمینهٔ اقلیمی، محدودیت‌های طراحی و نیازهای شبکه انرژی منطقه دسته‌بندی شوند؛ به‌همین دلیل، چارچوب IEA جزء دقیق‌ترین برداشت‌ها از مفهوم «صفر انرژی» در مطالعات سامانه‌های انرژی تلقی می‌شود. در نهایت، مؤسسهٔ بین‌المللی آینده[۱۲] (ILFI) یکی از سخت‌گیرانه‌ترین تعاریف موجود را ارائه کرده است. در این تعریف، ساختمان زمانی صفر انرژی تلقی می‌شود که حداقل ۱۰۵ درصد انرژی سالانهٔ خود را صرفاً از طریق منابع تجدیدپذیر در محل تأمین کند و علاوه‌برآن، عملکرد واقعی سامانه در دوره‌ای حداقل ۱۲ماهه اندازه‌گیری گردد. این نگاه کاملاً مبتنی بر

[6]American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
[7]U.S. Department of Energy
[8]National Renewable Energy Laboratory
[9]Energy Performance of Buildings Directive
[10]International Organization for Standardization
[11]International Energy Agency
[12]International Living Future Institute

عملکرد واقعی[۱۳] با رویکردی آرمان‌گرایانه اما دقیق، خواستار استقلال انرژی کامل و حذف هرگونه اتکای خارج‌سایتی است، به‌گونه‌ای که ساختمان در مقام یک «تولیدکنندهٔ واقعی انرژی» عمل کند. شکل ۱ تعاریف مراجع معتبر بین المللی از ساختمان انرژی صفر را نشان می‌دهد.



شکل ۱- تعاریف فعلی ساختمان انرژی صفر توسط مراجع بین المللی

Figure 1. Current definitions of zero-energy buildings by international authorities

در مجموع، این شش تعریف، طیفی پیوسته از برداشت‌های سخت‌گیرانه تا انعطاف‌پذیر از مفهوم ساختمان انرژی صفر را تشکیل می‌دهند. در یک سر طیف، تعاریف ASHRAE و ILFI قرار دارند که استقلال انرژی فیزیکی در محل را شرط اصلی می‌دانند؛ در حالی‌که در سمت دیگر، NREL، ISO و IEA مفهوم «صفر» را در بستری چندلایه و وابسته به سیاست انرژی، ساختار شبکه، کیفیت انرژی و ملاحظات محیط‌زیستی تفسیر می‌کنند. تعریف EPBD نیز نقش میانجی دارد و با تأکید بر کاهش تقاضا و الزام قانونی، پیوند میان بهره‌وری انرژی و سیاستگذاری منطقه‌ای را تقویت می‌کند. این تنوع تعاریف نه تنها بیانگر پیچیدگی مفهوم صفر انرژی است، بلکه نشان می‌دهد طراحی، ارزیابی و رتبه‌بندی ساختمان‌های انرژی صفر نیازمند رویکردی مقایسه‌ای و چندمعیاره است تا بتواند میان اهداف فناورانه، پایداری و سیاستی توازن برقرار کند؛ رویکردی که دقیقاً بستر مناسب برای روش‌های تحلیلی پیشرفته مورد علاقه را، مانند AMW و ANMW در ارزیابی NZEB فراهم می‌کند.

بیشتر تعاریف موجود از NZEB بر مبنای تراز سالیانه انرژی و با تأکید بر تولید انرژی تجدیدپذیر در محل بنا شده‌اند (Torcellini *et al*., 2006; Marszal *et al*., 2011). هرچند این تعاریف از نظر مفهومی ساده و قابل درک هستند، اما در اقلیم‌های متنوع، مناطق با محدودیت فضایی و کشورهایی با بازار انرژی کمتر توسعه‌یافته، قابلیت اجرایی محدودی دارند (Attia, 2018; IEA, 2023). در ایران، عواملی مانند تنوع اقلیمی، محدودیت ظرفیت نصب برق خورشیدی در برخی پهنه‌ها، بهره‌وری پایین ساختمان‌های موجود و محدودیت سطح بام، دستیابی به NZEB را برای بسیاری از ساختمان‌ها دشوار می‌کند (Hosseini *et al*., 2022). این محدودیت‌ها نشان می‌دهد که رویکردهای مبتنی بر تولید محلی انرژی به‌تنهایی کافی نیستند و لازم است از سازوکارهای بازار انرژی در کنار فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر بهره گرفته شود.

در نظام‌های تولیدی کشاورزی سه ویژگی کلیدی باعث می‌شود مدل انرژی صفر سنتی ناکافی باشد: نخست، بارهای لحظه‌ای با شدت بالا که در سردخانه‌ها و سامانه‌های گرمایش گلخانه‌ای مشاهده می‌شود و نیازمند توان لحظه‌ای قابل‌توجه است؛ دوم، نوسانات فصلی چشمگیر که موجب افزایش چندبرابری بار حرارتی گلخانه در زمستان یا بار گرمایش سالن مرغداری در هفته‌های ابتدایی دورهٔ پرورش می‌گردد؛ و سوم، پتانسیل حضور فعال واحدهای کشاورزی در بازار انرژی که امکان خرید و فروش هدفمند

[13] Performance-Based

انرژی را فراهم می‌سازد. این پویایی مصرف و تعامل با شبکه موجب می‌شود تعریف «ساختمان انرژی صفر» در کشاورزی به‌صورت ایستا قابل تحقق نباشد و باید براساس چارچوب «انرژی صفر هیبریدی» بازتعریف شود. در پاسخ به این شرایط، طی سال‌های اخیر توجه پژوهشگران به استفاده از ابزارهای مالی مانند گواهی انرژی تجدیدپذیر (REC) و گواهی صرفه‌جویی انرژی (EEC) جلب شده است (UNEP, 2022; Abhyankar *et al*., 2023). این ابزارها امکان می‌دهند که ساختمان در صورت محدودیت فنی یا فضایی بتواند از طریق مشارکت در بازار انرژی‌های پاک بخشی از تراز انرژی خود را جبران کند. در این میان، REC نشان‌دهندهٔ تولید یک واحد انرژی تجدیدپذیر خارج از سایت ساختمان است و به‌عنوان یک ابزار مالی معتبر در بسیاری از کشورها پذیرفته شده است (Zhou *et al*., 2021; IRENA, 2022). از سوی دیگر، EEC امکان تبدیل صرفه‌جویی انرژی به یک «منبع قابل مبادله» را فراهم می‌کند و بدین‌ترتیب بهره‌وری انرژی نقش اقتصادی پررنگ‌تری می‌یابد (Mendes *et al*., 2020). بنابراین، استفادهٔ همزمان از REC، EEC و تولید انرژی تجدیدپذیر در محل می‌تواند یک چارچوب چندمنبعی و منعطف برای تعریف NZEB فراهم کند. همچنین، تعریف‌های رایج NZEB انرژی را تنها از منظر کمّیت در نظر می‌گیرند و کیفیت انرژی، ارزش زمانی مصرف و ارزش شبکه‌ای را نادیده می‌گیرند؛ مسائلی که درسامانه‌های انرژی مدرن اهمیت به‌سزایی یافته‌اند (Bloomberg Taleb and Pitts, 2009; NEF, 2023). برای نمونه، تولید برق خورشیدی در ساعت‌های کم‌مصرف، ارزش شبکه‌ای پایین‌تری دارد، در حالی که صرفه‌جویی در ساعات اوج بار، ارزشی به‌مراتب بالاتر ایجاد می‌کند (Zhao *et al*., 2020). این تفاوت‌ها ضرورت وارد کردن ضرایب پتانسیل کاردهی، ضرایب همزمانی تولید–مصرف و ضرایب اقلیمی را به تعاریف NZEB نشان می‌دهد (Khatibi and Amidpour, 2020). افزون بر این، رویکردهای رایج عموماً نسبت به تفاوت‌های اقلیمی حساس نیستند و تنها یک معیار ثابت برای مناطق مختلف اعمال می‌شوند، در حالی‌که ساختمان‌ها در اقلیم‌های گرم مرطوب، سرد کوهستانی یا خشک مرکزی نیازهای بسیار متفاوتی دارند (Attia, 2018; Gori *et al*., 2020).

مرور ادبیات نشان می‌دهد که چهار گروه تعریف رایج NZEB شامل: انرژی سایت[۱۴]، انرژی منبع[۱۵]، انرژی هزینه[۱۶] و انرژی انتشار[۱۷](Sartori *et al*., 2012)، هرچند کاربردهای متنوعی دارند، اما قادر نیستند نیازهای اقلیمی، بازار انرژی و کیفیت انرژی را به‌صورت یکپارچه پوشش دهند. برای مثال، تعاریف به ظرفیت تولید محلی وابسته است و در مناطق با محدودیت تابشی، کارایی پایین دارد؛ یا تعریف خالص هزینهٔ انرژی صفر، به ساختار تعرفه‌ای خاص وابسته است و قابلیت تعمیم ندارد (Kibert, 2020). افزون بر آن، هیچ یک از این دسته‌بندی‌ها ابزارهای بازار انرژی مانند REC یا EEC را در ساختار خود وارد نکرده‌اند، مسئله‌ای که در ادبیات جدید به‌عنوان یک ضعف جدی شناخته می‌شود (Rahimi *et al*., 2021; UNEP, 2022).

به‌طور کلی تعاریف موجود دارای شکاف‌های زیر است:

- عدم توجه به کیفیت انرژی (پتانسیل کاردهی).
- نبود سازوکاری برای تلفیق تولید تجدیدپذیر با گواهی‌های انرژی بازارمحور (REC, EEC).
- بی‌توجهی به ارزش زمانی انرژی و همزمانی تولید–مصرف
- عدم سازگاری با اقلیم‌های مختلف و وابستگی شدید به تولید محلی
- نبود رویکردهای انعطاف‌پذیر و چندمنبعی برای کشورهای در حال توسعه.
- فقدان مدل‌های ارزش‌محور که انرژی را تنها براساس کمیت ارزیابی نکنند.
- ناتوانی تعاریف رایج در تجاری‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر.

این شکاف‌ها، ضرورت ارائهٔ یک تعریف جدید را اثبات می‌کنند.

[14]Net-Zero Site Energy
[15]Net-Zero Source Energy
[16]Net-Zero Energy Cost
[17]Net-Zero Energy Emissions

روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش، چارچوب Hybrid NZEB به‌عنوان یک مدل ارزش‌محور برای ارزیابی تراز انرژی ساختمان ارائه می‌شود. برخلاف تعاریف کلاسیک که انرژی را صرفاً براساس کمّیت سالانه می‌سنجند، در این چارچوب، هر جریان جبرانی انرژی پیش از ورود به تراز نهایی، از طریق مجموعه‌ای از ضرایب اصلاحی به «انرژی مؤثر سالانه» تبدیل می‌شود. ضریب α بیانگر کیفیت ذاتی حامل انرژی و تفاوت میان انرژی‌های با سطح کیفیت متفاوت است. ضریب β میزان همزمانی تولید یا تأمین انرژی با الگوی بار ساختمان را نشان می‌دهد و در سامانه‌هایی مانند برق خورشیدی که تولید آنها با منحنی بار همپوشانی کامل ندارد، نقش مهمی دارد. ضریب γ اثر تفاوت‌های اقلیمی را در عملکرد انرژی ساختمان و سامانه‌های جبرانی لحاظ می‌کند تا مقایسهٔ میان اقلیم‌های مختلف منصفانه‌تر شود. در نهایت، ضریب δ ارزش شبکه‌ای انرژی را منعکس می‌کند و عواملی مانند تزریق در ساعات اوج بار، کاهش نیاز به توسعه زیرساخت و هم‌راستایی با بهره‌برداری شبکه را در نظر می‌گیرد. بر این اساس، انرژی مؤثر هر مسیر با اعمال ضرایب فوق محاسبه شده و مجموع آنها انرژی مؤثر سالانه ساختمان را تشکیل می‌دهد. این ضرایب در مقادیر بیشتر از واحد، منعکس‌کنندهٔ ارزش افزودهٔ سیستم در مقایسه با تولید صرف انرژی هستند. فرمول‌های محاسبهٔ ضرایب مذکور در پیوست جداگانه این مقاله به تفسیر ارائه شده است.

رابطهٔ کلی محاسبهٔ انرژی مؤثر سالانه به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$E_{eff,annual} = \sum_{i=1}^{n} (E_i \times \alpha_i \times \beta_i \times \gamma_i \times \delta_i)$$

$E_{eff,annual} =$ انرژی مؤثر سالانه ساختمان (MWh)

$i \in \{E_(RE, on-site), E_{REC}, E_{EEC}\}$

$E_(RE, on-site) =$ انرژی تولیدی تجدیدپذیر در محل

$E_{REC} =$ انرژی معادل خرید گواهی انرژی تجدیدپذیر

$E_{EEC} =$ انرژی معادل صرفه‌جویی ناشی از گواهی کارایی انرژی

$i =$ مسیر $\left(\text{تولیددرمحل} \text{ ، REC یا EEC}\right)$

$E_i = i$ مقدار اسمی انرژی جبرانی مسیر $\left(\frac{\text{MWh}}{\text{year}}\right)$

$\alpha_i = i$ ضریب کیفیت انرژی

در این مطالعه، برای حامل برق، ضریب کیفیت انرژی ۱ در نظر گرفته می‌شود. برای بارهای حرارتی و برودتی، ضریب پتانسیل کاردهی باید براساس دمای مرجع T_0 و دمای منبع یا دمای بهره‌برداری T_s محاسبه شود. برای جریان حرارتی، از رابطهٔ کارنو استفاده می شود $\alpha_{heat} = 1 - \frac{T_0}{T_s}$:

$\beta_i =$ ضریب همزمانی تولید یا صرفه‌جویی با بار ساختمان

$\gamma_i =$ ضریب تصحیح اقلیمی متناسب با موقعیت جغرافیایی

$\delta_i = i$ ضریب ارزش شبکه‌ای انرژی مسیر

کل انرژی مؤثر از مجموع انرژی تولیدشده در محل، اثر خالص گواهی انرژی تجدیدپذیر و اثر خالص گواهی کارایی انرژی محاسبه می‌شود:

$$E_{effective}, total = E_{onsite} + E_{REC}, effective + E_{EEC}, effective$$

و برای هر مسیر انرژی نیز رابطهٔ زیر برقرار است:

$$E_{eff}, i = E_{nom}, i * \alpha_i * \beta_i * \gamma_i * \delta_i$$

در این رابطه:

- $E_{eff}, annual$= انرژی مؤثر سالانه
- E_{eff}, i= انرژی مؤثر مسیر i

- E_{nom}, i= انرژی اسمی سالانه مسیر i
- α_i = ضریب کیفیت انرژی یا پتانسیل کاردهی
- β_i= ضریب همزمانی تولید/مصرف
- γ_i = ضریب تعدیل اقلیمی
- δ_i = ضریب ارزش شبکه‌ای

انرژی مؤثر تولیدشده توسط سامانهٔ برق خورشیدی در محل، پس از اعمال ضریب تعدیل عملکرد سامانه و ضریب همزمانی تولید با بار، از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha_{PV} = 1 \qquad \delta_{PV} = 1$$

$$E_{onsite} = E_{PV}, nominal * \gamma_PV * \beta_PV$$

اثر مؤثر خرید گواهی انرژی تجدیدپذیر از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{REC}, effective = E_{REC}, nominal * \alpha_{REC} * \beta_{REC} * \gamma_{REC} * \delta_{REC}$$

اثر مؤثر گواهی کارایی انرژی حاصل از اجرای اقدامات بهینه‌سازی از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{EEC}, effective = E_{EEC}, nominal * \beta_{EEC} * \delta_{EEC}$$

- مقدار $\alpha_{PV} = 1$ در نظر گرفته شد؛ زیرا خروجی سامانهٔ برق خورشیدی برق است و در چارچوب تراز انرژی الکتریکی، ضریب کیفیت آن برابر واحد فرض می‌شود.
- مقدار $\delta_PV,onsite = 1$ در محاسبهٔ پایهٔ انرژی تولیدشده در محل فرض شد؛ زیرا در این رابطه صرفاً مقدار انرژی مؤثر فیزیکی محاسبه می‌شود. اگر ارزش شبکه‌ای تولید محلی به‌طور جداگانه وارد مدل شود، می‌توان برای $\delta_PV,onsite$ مقداری متفاوت از یک در نظر گرفت .
- ضریب γ_PV برای بازتاب افت‌های عملکردی و اقلیمی سامانه، از جمله اثر دمای سلول، شرایط محیطی و سایر افت‌های وابسته به عملکرد استفاده می‌شود .
- ضریب β_PV میزان انطباق زمانی تولید برق خورشیدی با تقاضای ساختمان را نشان می‌دهد.

ساختمان زمانی به‌عنوان Hybrid NZEB احراز می‌شود که مقدار انرژی مؤثر سالانه آن برابر یا بیشتر از مصرف نهایی سالانه باشد .در این مدل، $E_{eff,annual}$ بیانگر انرژی مؤثر سالانهٔ ساختمان است و به‌عنوان شاخص اصلی برای ارزیابی تحقق وضعیت «انرژی صفر ترکیبی» به‌کار می‌رود. این کمیت از تجمیع انرژی‌های نامی حاصل از مسیرهای مختلف جبرانی شامل تولید انرژی تجدیدپذیر در محل، خرید گواهی انرژی تجدیدپذیر (REC) و خرید یا تولید گواهی صرفه‌جویی انرژی (EEC)، پس از اعمال مجموعه‌ای از ضرایب اصلاحی، محاسبه می‌شود. هر مسیر انرژی با نماد i مشخص شده و سهم آن در تراز نهایی، متناسب با ارزش واقعی‌اش برای ساختمان و سامانه انرژی کلان تعیین می‌گردد. کمیت Ei انرژی اسمی سالانه مسیرi ام را بیان می‌کند و نشان‌دهندهٔ مقدار فیزیکی انرژی تولیدشده، جبران‌شده یا صرفه‌جویی‌شده بدون درنظرگرفتن قیود کیفی و سیستمی است. با این حال، از آنجا که انرژی‌های مختلف از توان انجام کار مفید یکسانی برخوردار نیستند، ضریب کیفیت انرژی یا پتانسیل کاردهی (αi) به‌منظور تفکیک تفاوت ذاتی میان حامل‌های انرژی وارد مدل می‌شود. این ضریب امکان می‌دهد انرژی‌هایی با کیفیت بالاتر، نظیر برق، نسبت به انرژی‌های با کیفیت پایین‌تر، وزن بیشتری در تراز نهایی داشته باشند. عامل مهم دیگر در ارزیابی ارزش انرژی، همزمانی تولید یا صرفه‌جویی با بار واقعی ساختمان است. بدین‌منظور، ضریب همزمانی تولید–مصرف (βi) میزان انطباق زمانی انرژی مسیر i ام با الگوی مصرف ساختمان را نمایش می‌دهد. این ضریب به‌ویژه در مورد سامانه‌های تجدیدپذیر وابسته به زمان،

مانند برق خورشیدی، نقش تعیین‌کننده‌ای دارد، زیرا تولید انرژی در ساعات کم‌بار، علی‌رغم مقدار بالا، می‌تواند ارزش عملیاتی محدودی برای ساختمان و شبکه داشته باشد.

به‌منظور سازگاری مدل با شرایط اقلیمی متفاوت، ضریب اقلیمی (γi) در محاسبات لحاظ می‌شود. این ضریب اثر تفاوت‌های اقلیمی بر عملکرد انرژی ساختمان و سامانه‌های جبرانی را منعکس می‌کند و باعث می‌شود ساختمان‌های واقع در اقلیم‌های مختلف، با معیارهای منصفانه و قابل‌مقایسه ارزیابی شوند. بدین‌ترتیب، وابستگی شدید تعاریف کلاسیک NZEB به شرایط اقلیمی خاص کاهش می‌یابد. علاوه‌بر ملاحظات ساختمانی، ارزش انرژی از منظر شبکه نیز در این چارچوب مورد توجه قرار می‌گیرد. ضریب ارزش شبکه‌ای (δi) میزان مفیدبودن انرژی مسیر i ام برای شبکهٔ برق را نشان می‌دهد و عواملی نظیر تزریق انرژی در ساعات اوج بار، کاهش نیاز به توسعهٔ زیرساخت و هم‌راستایی با سیاست‌های بهره‌برداری شبکه را در نظر می‌گیرد. این مؤلفه، پیوند میان عملکرد ساختمان و منافع سامانهٔ انرژی کلان را برقرار می‌سازد. ضریب ارزش شبکه‌ای بازتاب‌دهندهٔ منافع یک منبع انرژی از منظر بهره‌برداری شبکهٔ توزیع است. در یک واحد کوچک کشاورزی مثل یک مرغداری ۲۰ هزار قطعه‌ای با سامانه برق خورشیدی ۱۰۰ کیلوواتی، اثر این ضریب در مقیاس شبکهٔ سراسری محدود است، اما در سطح شبکهٔ توزیع می‌تواند قابل‌توجه باشد؛ به‌ویژه در کاهش بار فیدر، کاهش تلفات موضعی، کمک به مدیریت اوج بار و کاهش نیاز به توسعهٔ ظرفیت محلی. از این‌رو، δ در این مطالعه به‌عنوان شاخصی برای ارزش‌گذاری محلی انرژی تولیدی یا صرفه‌جویی‌شده در سطح توزیع در نظر گرفته شده است، و به‌عنوان متغیری با اثر مستقیم و بزرگ در مقیاس ملی مد نظر نیست. پس از اعمال ضرایب فوق، انرژی مؤثر هر مسیر $E_{eff,i}$ محاسبه شده و مجموع آنها انرژی مؤثر سالانهٔ ساختمان را تشکیل می‌دهد. در نهایت، ساختمان زمانی به‌عنوان «ساختمان انرژی صفر ترکیبی» شناسایی می‌شود که انرژی مؤثر سالانهٔ آن برابر یا بیش از انرژی نهایی مصرف‌شده ساختمان در یک دورهٔ سالانه باشد. این شرط نه‌تنها تحقق تراز انرژی، بلکه کیفیت، زمان‌مندی و ارزش سیستمی انرژی را نیز در ارزیابی نهایی لحاظ می‌کند.

در چنین بستری، مفهوم «ساختمان انرژی صفر ترکیبی»[18] یک گام مفهومی و عملی مهم رو به جلو است. در این رویکرد، ساختمان به‌جای آنکه ملزم به تأمین تمام تراز انرژی از طریق تولید محلی باشد، می‌تواند از طریق ترکیب وزنی سه منبع انرژی شامل تولید تجدیدپذیر در محل، خرید REC و خرید یا تولید EEC به تراز انرژی صفر برسد. در این تعریف، انرژی معادل‌شده از هر سه منبع با استفاده از ضرایب کیفیت انرژی، ارزش زمانی مصرف، ضرایب اقلیمی و ارزش شبکه‌ای تصحیح می‌شود و تنها پس از این اصلاحات وارد تراز انرژی سالانه می‌گردد (Mendes *et al*., 2020; BloombergNEF, 2023). چنین رویکردی امکان می‌دهد NZEB علاوه‌بر ابعاد فنی، از منظر اقتصادی، اقلیمی و سیاست‌گذاری نیز معنا یابد و به‌جای یک مدل صرفاً مهندسی، به یک مدل «ارزش-بازار» تبدیل شود.

در ایران، تنوع اقلیمی، محدودیت تابش خورشید در برخی ماه‌ها، کیفیت نامناسب ساختمان‌های موجود، و محدودیت سطح پشت‌بام، امکان دستیابی به NZEB را تنها برای تعداد اندکی از ساختمان‌های فراهم می‌کند (Hosseini *et al*., 2022). از سوی دیگر، توسعهٔ بازار تجدیدپذیر در ایران نیازمند ابزارهای مالی مکمل است؛ ابزارهایی مانند REC، EEC و بازارهای شرکت‌های خدمات انرژی[19] که بتوانند «انرژی صفر بودن» را از یک مفهوم صرفاً فنی به یک مکانیزم بازارمحور تبدیل کنند (IRENA, 2022).

صرفه‌جویی انرژی و تولید تجدیدپذیر، به‌ویژه در ساعات اوج بار شبکه، دارای ارزش شبکه‌ای و اقتصادی به‌مراتب بالاتری نسبت به تولید در ساعات کم‌بار هستند. این امر ضرورت وارد کردن ضرایبی نظیر پتانسیل کاردهی، همزمانی تولید–مصرف و ضرایب اقلیمی را به تعاریف NZEB برجسته می‌سازد. با این حال، هیچ‌یک از تعاریف رایج به‌صورت نظام‌مند، این ضرایب را در قالب یک مدل محاسباتی یکپارچه وارد تراز انرژی نکرده‌اند. در چنین بستری، تعریف «انرژی صفر ترکیبی» نه‌تنها رفع‌کنندهٔ محدودیت‌های فنی، بلکه پیشران توسعهٔ بازار انرژی‌های پاک است.

به استناد موارد مذکور "تعریف پیشنهادی ساختمان انرژی صفر" به شرح زیر است:

[18] Hybrid NZEB
[19] Energy Service Company (ESCO)

ساختمان انرژی صفر ترکیبی، ساختمانی است که مجموع انرژی تأمین یا جبران‌شده از طریق تولید انرژی تجدیدپذیر در محل، خرید گواهی انرژی تجدیدپذیر (REC) و خرید یا تولید گواهی کارایی انرژی (EEC)، پس از تصحیح با ضرایب کیفیت انرژی، ارزش زمانی مصرف، ضرایب اقلیمی و ارزش شبکه‌ای، در پایان یک دورهٔ سالانه برابر یا بیش از انرژی نهایی مصرف‌شده ساختمان باشد. در این مدل، ساختمان بخشی از یک اکوسیستم انرژی–بازار در نظر گرفته شده و تراز انرژی آن می‌تواند از طریق مشارکت همزمان در منابع محلی و سازوکارهای بازار انرژی حاصل شود.

مزایای این تعریف شامل موارد زیر است:

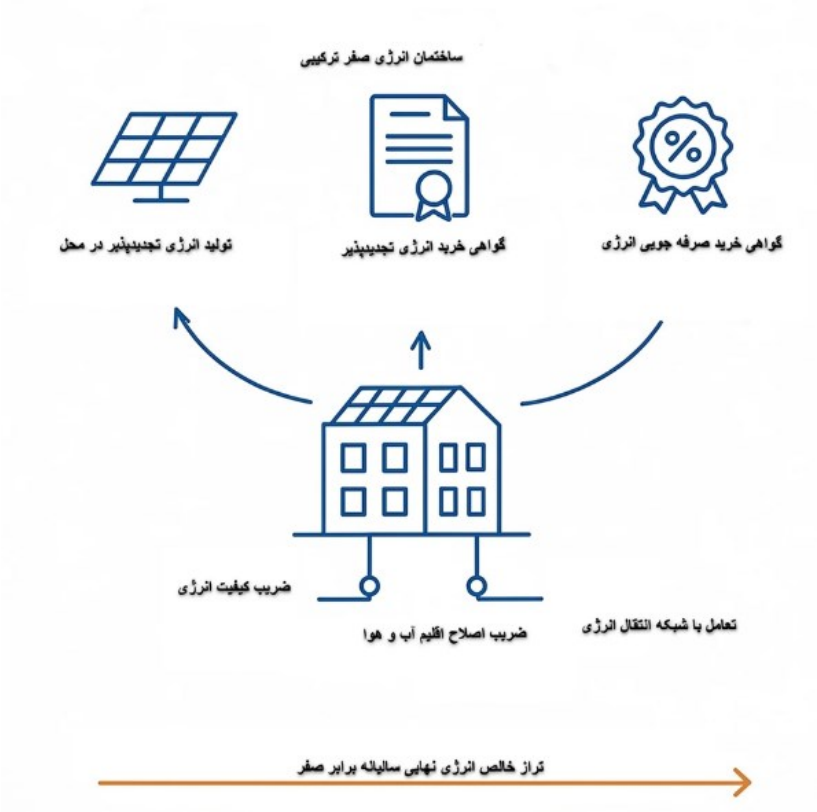
۱. ساختمان را تنها براساس تولید خود ارزیابی نمی‌کند، بلکه آن را درون یک اکوسیستم انرژی قرار می‌دهد.

۲. مرزهای فنی و اقتصادی انرژی‌های تجدیدپذیر را از سقف تولید داخل ساختمان فراتر می‌برد.

۳. قابلیت تجاری‌سازی انرژی تجدیدپذیر را در سطح ساختمان، محله، و حتی شبکه فراهم می‌کند.

۴. ساختمان انرژی خالص صفر را از یک «تعریف فنی» به یک مدل بازارمحور تبدیل می‌کند.

به‌بیان دیگر، ساختمان انرژی صفر دیگر یک مدل فیزیکی–مهندسی نیست؛ بلکه یک مدل اقتصادی–بازاری–تکنیکی است که در آن ساختمان،«مصرف‌کننده»، «تولیدکننده»، و خریدار/سرمایه‌گذار در گواهی انرژی به‌شکل یک واحد ترکیبی عمل می‌کند. شکل ۲ تصویری از مفهوم ساختمان انرژی صفر ترکیبی نشان می دهد.



شکل ۲- مفاهیم ساختمان انرژی صفرترکیبی

Figure 2. Concepts of hybrid zero-energy buildings

اگرچه مطالعهٔ موردی اصلی این مقاله بر یک واحد مرغداری متمرکز است، منطق چارچوب پیشنهادی برای سایر ساختمان‌های کشاورزی با بارهای متغیر نیز قابل استفاده است. برای مثال، گلخانه‌های تجاری و سردخانه‌های بزرگ به‌دلیل وابستگی شدید به شرایط اقلیمی، نیاز به بار لحظه‌ای بالا، و محدودیت در توسعهٔ تولید محلی، از منظر مفهومی می‌توانند پذیرای همین منطق ترکیبی

باشند. در چنین سامانه‌هایی، ترکیب تولید تجدیدپذیر در محل با گواهی‌های انرژی و بهبود کارایی می‌تواند مسیر دستیابی به تراز انرژی صفر ترکیبی را هموار کند. هدف از مطالعهٔ موردی، ارائه تعمیم آماری نیست، بلکه تعمیم تحلیلی چارچوب Hybrid NZEB به کلاس خاصی از ساختمان‌هاست. واحد مورد بررسی نماینده ساختمان‌هایی با بار انرژی متغیر زمانی، مصرف وابسته به فرآیند و محدودیت تولید محلی است؛ ویژگی‌هایی که در بسیاری از واحدهای کشاورزی نظیر گلخانه‌ها، سردخانه‌ها و دامداری‌ها مشترک است.

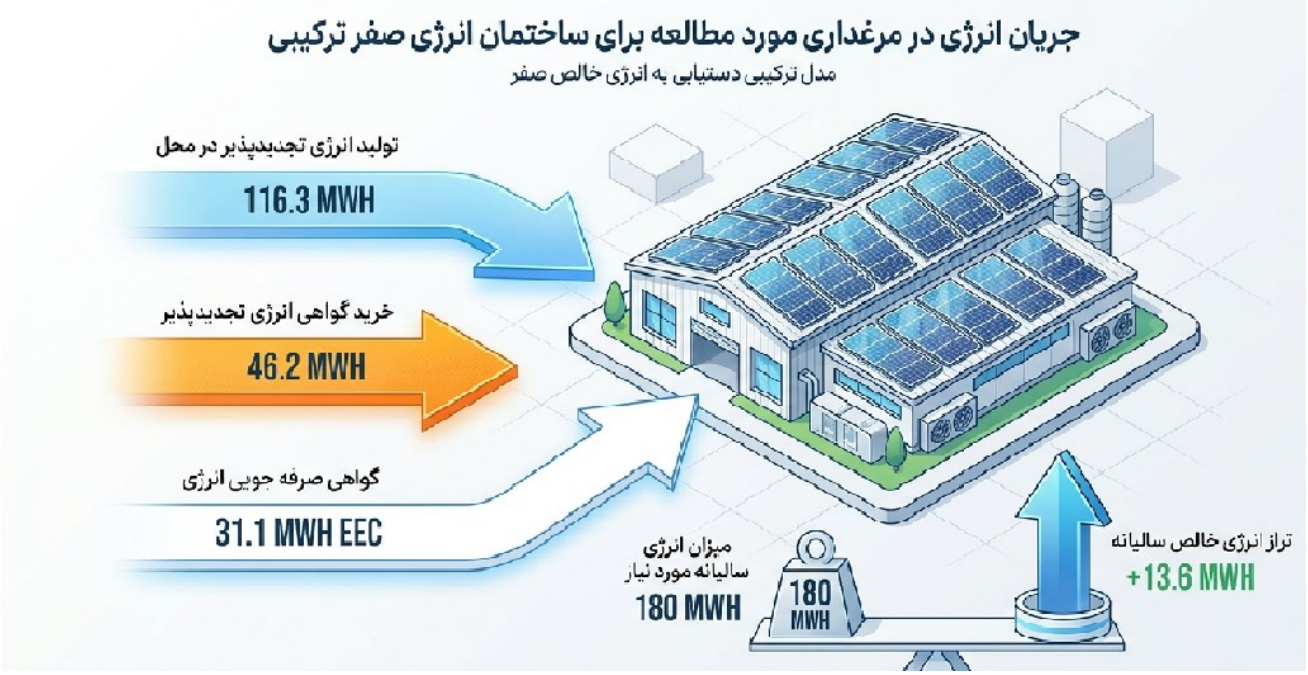
مقایسهٔ نتایج با چارچوب NZEB کلاسیک نشان می‌دهد که واحد مورد مطالعه، تحت تعریف کلاسیک و صرفاً بر مبنای تولید در محل، قادر به دستیابی به تراز صفر نبوده است. در مقابل، چارچوب Hybrid NZEB با در نظر گرفتن سازوکارهای بازارمحور و ضرایب ارزش انرژی، به تراز مثبت سالانه دست یافته است.

کاربرد چارچوب «ساختمان انرژی صفر ترکیبی» در واحدهای تولیدی کشاورزی، به‌ویژه مرغداری‌های گوشتی، این امکان را فراهم می‌سازد که تراز انرژی سالانه نه‌تنها براساس تولید در محل، بلکه با درنظرگرفتن جریان‌های مکمل انرژی و ضرایب اصلاحی چندبعدی تعیین شود. برای تبیین نحوهٔ عملکرد این چارچوب، یک مرغداری ۲۰ هزار قطعه‌ای واقع در اقلیم گرم‌خشک به‌عنوان مطالعهٔ موردی در نظر گرفته شد. این واحد با مساحت حدود ۲۵۰۰ مترمربع، مصرف سالانهٔ برق برابر با ۱۸۰ مگاوات‌ساعت دارد که بخش عمدهٔ آن به تهویه، گرمایش و روشنایی اختصاص می‌یابد. الگوی مصرف این مرغداری به‌طور مشخص وابسته به شرایط اقلیمی و ساعات بحرانی تابستان و زمستان است و همین وابستگی ضرورت توجه به ضرایب زمانی، اقلیمی و شبکه‌ای را تقویت می‌کند. در گام نخست، مرغداری اقدام به نصب یک سامانهٔ برق خورشیدی ۱۰۰ کیلوواتی در سقف و محوطهٔ پیرامونی می‌کند که توان تولید سالانهٔ ۱۶۰ مگاوات‌ساعت برق را دارد. با این حال، تولید انرژی خورشیدی در ساعت‌های میانی روز متمرکز است و همزمانی محدودی با بارهای عصرگاهی تابستان دارد. بر این اساس، تولید سالانه پس از اعمال ضریب کیفیت انرژی، ضریب ارزش زمانی، ضریب اقلیمی و ضریب ارزش شبکه‌ای، از ۱۶۰ مگاوات‌ساعت به ۱۱۶/۳ مگاوات‌ساعت انرژی مؤثر کاهش می‌یابد. این میزان نشان می‌دهد که بخشی از تولید انرژی خورشیدی، به‌رغم ارزش فیزیکی بالا، در تراز نهایی به‌دلیل ناهمزمانی با پیک بار و ارزش شبکه‌ای محدود، تأثیر تعدیل‌شده‌تری دارد. برای جبران کمبود انرژی در فصول سرد که نیاز گرمایی افزایش می‌یابد و تولید خورشیدی به حداقل می‌رسد، مرغداری اقدام به خرید ۴۰ مگاوات‌ساعت گواهی انرژی تجدیدپذیر (REC) می‌کند. با توجه به آنکه این انرژی در ساعات پربار زمستان استفاده می‌شود، ضرایب زمانی و اقلیمی موجب افزایش وزن مؤثر آن در تراز نهایی می‌گردند. در نتیجه، انرژی مؤثر حاصل از این جریان جبرانی به ۴۶/۲ مگاوات‌ساعت می‌رسد. بدین‌ترتیب، REC نه‌تنها به‌عنوان پوشش‌دهندهٔ کمبود تولید محلی عمل می‌کند، بلکه از منظر ارزش زمانی و اقلیمی نقش تقویتی در کاهش فشار بر شبکه دارد. در گام سوم، این واحد یک برنامهٔ بهینه‌سازی انرژی در سامانهٔ تهویه خود را اجرا می‌کند که شامل جایگزینی فن‌های کم‌بازده با نمونه‌های پربازده، نصب کنترل دور و بهبود عایق‌بندی دریچه‌ها است. صرفه‌جویی ایجادشده در نتیجه این مداخله معادل ۲۵ مگاوات‌ساعت در سال است که واجد شرایط صدور گواهی کارایی انرژی (EEC) می‌شود. از آنجا که این صرفه‌جویی عمدتاً در ساعات پربار تابستان اتفاق می‌افتد، ضریب ارزش زمانی و ضریب ارزش شبکه‌ای نقش تقویتی مهمی ایفا می‌کنند و در نهایت انرژی مؤثر این جریان به ۳۱/۱ مگاوات‌ساعت می‌رسد. این موضوع نشان می‌دهد که صرفه‌جویی انرژی، در چارچوب Hybrid NZEB، صرفاً یک کاهش مصرف نیست، بلکه یک «منبع انرژی مؤثر» است که ارزش زمانی–شبکه‌ای متمایزی نسبت به تولید انرژی خورشیدی دارد. با تجمیع سه جریان جبرانی، مقدار انرژی مؤثر سالانه برابر با ۱۹۳/۶ مگاوات‌ساعت به‌دست می‌آید که از مصرف سالانهٔ واحد (۱۸۰ مگاوات‌ساعت) فراتر می‌رود. تراز نهایی مثبت ۱۳/۶ مگاوات‌ساعت نشان می‌دهد که مرغداری مذکور، مطابق تعریف ساختمان انرژی صفر ترکیبی، یک واحد Hybrid NZEB محسوب می‌شود. نکتهٔ بنیادی در این نتیجه آن است که هیچ‌یک از جریان‌های انرژی؛ چه تولید خورشیدی، چه خرید REC، و چه صرفه‌جویی انرژی به‌تنهایی توانایی رساندن واحد به تراز صفر را نداشتند، اما ادغام آنها در یک نظام وزنی و اصلاحی مشترک، امکان تحقق تراز انرژی پایدار را فراهم کرده است. این مثال بیان‌گر آن است که استفاده از چارچوب Hybrid NZEB در واحدهای کشاورزی نه‌تنها امکان‌پذیر بلکه از منظر اقلیمی، اقتصادی و عملیاتی کارآمدتر از مدل‌های کلاسیک ساختمان‌های انرژی صفر است؛ زیرا به‌جای جایگزینی کامل یک مسیر، از ظرفیت مکمل و هم‌افزای سه مسیر جبرانی به شکل هم‌زمان بهره می‌گیرد. جدول ۱ نتایج مدل موردی را نشان می دهد:

جدول ۱-نتایج مطالعهٔ موردی
Table 1. Results of the case study

مسیر انرژی	مقدار اسمی E nom,i (MWh/year)	α	β	γ	δ	مقدار مؤثر E eff,i (MWh/year)
سامانهٔ برق خورشیدی درون‌سایت	160.0	1.00	0.78	0.88	1.06	116.3
گواهی انرژی تجدیدپذیر	40.0	1.00	1.05	1.00	1.10	46.2
گواهی کارایی انرژی	25.0	1.00	1.12	1.03	1.08	31.1
مجموع مسیرهای جبرانی	225.0	—	—	—	—	193.6
تقاضای نهایی سالانهٔ مرغداری	180.0	—	—	—	—	180.0
تراز نهایی Hybrid NZEB	+45.0 اسمی	—	—	—	—	+13.6 مؤثر

شکل ۳ فرآیند تأمین انرژی از محل‌های متنوع را برای تحقق مفهوم ساختمان انرژی صفر در یک مرغداری نشان می‌دهد.



شکل ۳- نحوهٔ تحقق ساختمان انرژی صفر با تعریف جدید در یک مرغداری
Figure 3. Pathway to achieving a zero-energy building under the new definition in a poultry farm

یافته‌های پژوهش

در مطالعهٔ موردی مرغداری ۲۰۰۰۰ قطعه‌ای، ضرایب اصلاحی با هدف تفکیک چهار مؤلفه شامل کیفیت انرژی، انطباق زمانی، اثر اقلیم و ارزش شبکه‌ای هر مسیر تعریف شدند. ازآنجا که هر سه مسیر جبرانی به تولید برق یا صرفه‌جویی در مصرف برق مربوطاند، ضریب کیفیت انرژی برای همهٔ مسیرها برابر یک در نظر گرفته شد:

$$\alpha PV = \alpha REC = \alpha EEC = 1.00$$

در مسیر سامانهٔ برق خورشیدی درون‌سایت، ضریب انطباق زمانی برابر با:

$$\beta PV = 0.78$$

در نظر گرفته شد. این مقدار، عدم انطباق کامل تولید روزانه برق خورشیدی با بارهای عصرگاهی و شبانه مرغداری را منعکس می‌کند. همچنین، ضریب اقلیمی این مسیر برابر با:

$$\gamma PV = 0.88$$

تعیین شد که بیانگر افت عملکرد حرارتی سامانه برق خورشیدی در اقلیم گرم‌وخشک است. ضریب ارزش شبکه‌ای مسیر PV نیز برابر با:

$$\delta PV = 1.06$$

در نظر گرفته شد. این مقدار نشان‌دهندهٔ ارزش محدود، اما مثبت، تولید برق در محل مصرف از نظر کاهش بار فیدر و تلفات شبکه توزیع است. در نتیجه، ضریب مرکب مسیر PV از رابطهٔ زیر حاصل می‌شود:

$$CPV = \alpha PV \times \beta PV \times \gamma PV \times \delta PV$$
$$CPV = 1.00 \times 0.78 \times 0.88 \times 1.06 = 0.727584 \approx 0.727$$

برای مسیر گواهی انرژی تجدیدپذیر (REC)، ضریب انطباق زمانی برابر با:

$$\beta REC = 1.05$$

در نظر گرفته شد. این مقدار بر فرض برخورداری گواهی از انطباق زمانی تقویت‌شده با دوره‌های کمبود انرژی یا بار بالای شبکه استوار است. ضریب ارزش شبکه‌ای این مسیر نیز برابر با:

$$\delta REC = 1.10$$

تعیین شد که ارزش سناریویی زمان و محل تولید برق متناظر با گواهی را منعکس می‌کند. ازآنجاکه REC خارج از مرز فیزیکی مرغداری صادر می‌شود، اثر اقلیم محلی بر آن خنثی فرض شد؛ بنابراین:

$$\gamma REC = 1.00$$

در نتیجه، ضریب مرکب مسیر REC به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$CREC = \alpha REC \times \beta REC \times \gamma REC \times \delta REC$$
$$CREC = 1.00 \times 1.05 \times 1.00 \times 1.10 = 1.155$$

در مسیر گواهی کارایی انرژی (EEC)، ضریب انطباق زمانی برابر با:

$$\beta EEC = 1.12$$

در نظر گرفته شد. این مقدار نشان‌دهندهٔ ارزش زمانی بیشتر صرفه‌جویی برق فن‌ها و تجهیزات تهویه در ساعات گرم و پربار تابستان است. ضریب اقلیمی این مسیر نیز برابر با:

$$\gamma EEC = 1.03$$

تعیین شد که پتانسیل بیشتر صرفه‌جویی انرژی در سامانه‌های تهویه و سرمایش مرغداری در اقلیم گرم‌وخشک را منعکس می‌کند. علاوه بر این، ضریب ارزش شبکه‌ای مسیر EEC برابر با:

$$\delta EEC = 1.08$$

در نظر گرفته شد که بیانگر ارزش شبکه‌ای کاهش مصرف برق در محل، از جمله کاهش بار فیدر، بار ترانسفورماتور و تلفات شبکه توزیع است. در نتیجه، ضریب مرکب مسیر EEC از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$CEEC = \alpha EEC \times \beta EEC \times \gamma EEC \times \delta EEC$$
$$CEEC = 1.00 \times 1.12 \times 1.03 \times 1.08 = 1.245888 \approx 1.244$$

با توجه به اینکه ضرایب تفکیکی فوق با استفاده از داده‌های تفصیلی ساعتی، داده‌های عملکرد حرارتی پنل‌ها یا مطالعات مستقل بار فیدر کالیبره نشده‌اند، در مطالعهٔ حاضر به‌عنوان پارامترهای سناریویی در نظر گرفته شدند. بنابراین، حاصلضرب آنها به‌صورت ضریب مرکب هر مسیر گزارش شد. این ضرایب برای ارزش‌گذاری مؤثر مسیرهای انرژی در تراز Hybrid NZEB به‌کار می‌روند و نباید به‌عنوان افزایش یا کاهش مستقیم مقدار فیزیکی انرژی تولیدشده، خریداری‌شده یا صرفه‌جویی‌شده تفسیر شوند.

این پژوهش نشان داد که بازتعریف مفهوم NZEB بر پایهٔ رویکردی ترکیبی، ارزش‌محور و بازارمحور می‌تواند محدودیت‌های ساختاری تعاریف کلاسیک را برطرف سازد. Hybrid NZEB ساختمان را نه به‌عنوان یک مصرف‌کننده یا تولیدکنندهٔ منفرد، بلکه به‌عنوان یک بازیگر فعال در اکوسیستم انرژی–بازار تعریف می‌کند. این چارچوب، به‌ویژه در بخش کشاورزی ایران، امکان تحقق انرژی صفر را بدون وابستگی مطلق به تولید محلی فراهم می‌سازد و زمینه‌ساز توسعهٔ بازار انرژی‌های پاک، تجاری‌سازی بهره‌وری انرژی و تدوین استانداردهای ملی اقلیم‌محور خواهد بود.

کاربرد مفهوم «ساختمان انرژی صفر ترکیبی» در بخش کشاورزی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا الگوی مصرف انرژی در فعالیت‌های کشاورزی از ویژگی‌هایی همچون فصل‌محوری، تغییرات شدید بار، وابستگی به شرایط اقلیمی، و پراکندگی جغرافیایی برخوردار

است. این ویژگی‌ها باعث می‌شوند که تعاریف کلاسیک ساختمان انرژی صفر که متکی بر تولید کامل انرژی در محل هستند کارایی محدودی در محیط‌های کشاورزی داشته باشند. در مقابل، رویکرد Hybrid NZEB با انعطاف‌پذیری ذاتی خود قادر است سه منبع مکمل یعنی تولید انرژی تجدیدپذیر در محل، خرید گواهی‌های انرژی تجدیدپذیر (REC)، و دریافت گواهی‌های کارایی انرژی (EEC) را در یک چارچوب یکپارچه قرار دهد و تراز سالانهٔ انرژی نهایی را برقرار سازد. در این چارچوب، واحدهای کشاورزی نه‌فقط مصرف‌کنندهٔ انرژی بلکه به‌عنوان کنشگران فعال در یک «اکوسیستم انرژی—بازار» ایفای نقش می‌کنند.

یکی از مهم‌ترین مصادیق این رویکرد، گلخانه‌های مدرن وسامانه‌های کشاورزی محیط‌کنترل‌شده است. چنین واحدهایی نیاز پیوسته‌ای به گرمایش، سرمایش، رطوبت‌زنی و تأمین روشنایی دارند، اما به‌دلیل ماهیت ساختارهای شفاف و محدودیت‌های سازه‌ای، ظرفیت نصب سامانه‌های برق خورشیدی در محل اغلب محدود است. بنابراین، تحقق تعادل انرژی سالانه تنها از طریق تولید محلی امکان‌پذیر نیست. رویکرد Hybrid NZEB این محدودیت را با پذیرش منابع مکمل جبران می‌کند؛ به‌گونه‌ای که گلخانه می‌تواند بخشی از نیاز خود را از انرژی خورشیدی تولیدشده در حاشیهٔ زمین زراعی یا از زیست گاز حاصل از واحد دامداری مجاور تأمین کند و کسری تراز را از طریق خرید REC یا EEC پوشش دهد. ارزش زمانی انرژی[۲۰] در این محیط‌ها اهمیت ویژه دارد، زیرا پیک مصرف معمولاً در فصول سرد رخ می‌دهد.

سردخانه‌ها و مراکز نگه‌داری محصولات کشاورزی نیز نمونه مهم دیگر هستند. این واحدها بار پایهٔ نسبتاً ثابتی می‌طلبند و کیفیت انرژی موردنیاز آنها (به‌ویژه برای تبرید) نسبت به بارهای حرارتی حساسیت بیشتری دارد. با این‌حال، این واحدها از ظرفیت بالایی برای کاهش مصرف انرژی برخوردارند؛ از جمله استفاده از درایوهای دورمتغیر، بهینه‌سازی سیکل تبرید، کنترل تطبیقی فن‌ها و مدیریت پیشرفته بار. گواهی‌های کارایی انرژی (EEC) حاصل از این بهینه‌سازی‌ها می‌توانند به‌عنوان یکی از جریان‌های جبران‌کننده در مدل Hybrid NZEB محسوب شوند و در کنار تولید محدود انرژی تجدیدپذیر و خریدREC، تراز انرژی سالانه را برقرار سازند. کاربرد مهم دیگر این رویکرد در دامداری‌ها و مرغداری‌ها مشاهده می‌شود. این واحدها از یک‌سو پتانسیل ارزشمند تولید انرژی از طریق بیوگاز دارند و از سوی دیگر امکان نصب سامانه‌های برق خورشیدی بر سقف سوله‌ها یا حاشیهٔ زمین‌های اطراف را فراهم می‌کنند. افزون بر این، با بهینه‌سازی سامانه‌های تهویه، گرمایش و روشنایی، پتانسیل قابل‌توجهی برای تولید گواهی‌های صرفه‌جویی انرژی ایجاد می‌شود. ترکیب این سه مؤلفه دقیقاً همان منطق Hybrid NZEB را تشکیل می‌دهد و امکان دستیابی به تراز صفر سالانهٔ انرژی نهایی را فراهم می‌سازد، حتی اگر هیچ‌یک از منابع به‌تنهایی پاسخگوی نیاز کامل واحد نباشند.

مصرف انرژی در واحدهای پمپاژ چاه‌های عمیق نمونه‌ای برجسته از بارهای فصلی و اقلیم‌محور است. الگوهای آبیاری، بارهای پمپاژ و ساعات کارکرد پمپ‌ها به‌شدت تابع شرایط اقلیمی و الگوی کشت هستند. با توجه به اینکه تابش خورشیدی که اصلی‌ترین منبع تولید برق تجدیدپذیر است با فصل آبیاری هم‌بستگی کامل ندارد، تولید محلی انرژی در بسیاری از مواقع مازاد فصلی ایجاد می‌کند و در فصول بدون آبیاری کسری رخ می‌دهد. Hybrid NZEB این رفتار متغیر را از طریق ترکیب تولید PV فصلی با خرید REC و استفاده از ضریب ارزش زمانی انرژی مدیریت می‌کند و تراز سالانه را در سطح سیستم کشاورزی برقرار می‌سازد.

در صنایع تبدیلی کوچک شامل خشک‌کن‌ها، واحدهای فرآوری محصولات باغی، سامانه‌های بسته‌بندی و تصفیه‌خانه‌های پساب کشاورزی نیز الگوی فصلی مشابهی مشاهده می‌شود. این واحدها معمولاً در دورهٔ برداشت و فرآوری فعالیت شدید دارند، اما ماه‌های زیادی بدون بار یا با بار حداقلی کار می‌کنند. این ناهمزمانی میان تولید و مصرف انرژی، کارآمدی مدل‌های کلاسیک NZEB را کاهش می‌دهد. در مقابل، مدل Hybrid NZEB امکان فروش مازاد تولید در ماه‌های کم‌بار و خرید گواهی در دورهٔ اوج مصرف را فراهم می‌کند و یک تراز پایدار، اقتصادی و قابل‌اجرا ایجاد می‌نماید.

در نهایت، از آنجا که فعالیت‌های کشاورزی معمولاً به‌صورت پراکنده در سطح جغرافیا توزیع شده‌اند، رویکرد Hybrid NZEB زمینهٔ ایجاد «کلاسترهای انرژی کشاورزی» را فراهم می‌کند. در چنین ساختاری می‌توان تولید بیوگاز در یک دامداری را با نیاز گرمایی گلخانه مجاور ترکیب کرد، تولید PV را میان چند مزرعه به اشتراک گذاشت، و صرفه‌جویی انرژی یک سردخانه را در تراز

[20]Time-of-Use Value

کلی منطقه لحاظ نمود. این تجمیع چندمنبعی نه‌تنها امکان تحقق تراز صفر سالانه انرژی را افزایش می‌دهد، بلکه بهبود قابل‌توجهی در پایداری شبکه و بهره‌وری اقتصادی با رویکرد توسعهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر در کشور نیز ارائه می‌دهد.

بحث و نتیجه‌گیری

تعریف ساختمان انرژی صفر ترکیبی[۲۱] یک رویکرد نسل بعدی برای ساختمان‌های انرژی صفر است که با ترکیب فناوری، فناوری، بازار و ارزش‌سنجی انرژی، نه‌تنها ضعف‌های تعاریف سنتی را برطرف می‌کند، بلکه مسیر تجاری‌سازی و مقیاس‌پذیری آنها را در کشوری چون ایران تسهیل می‌نماید. این مدل می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای تدوین استاندارد ملی NZEB اقلیم‌محور و ارزش‌محور مورد استفاده قرار گیرد و با اتصال به مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به شاخصی قابل محاسبه، پایش و حسابرسی تبدیل شود. تعریف «ساختمان انرژی صفر ترکیبی در بخش کشاورزی ایران، یک تحول مفهومی و عملی مهم ایجاد می‌کند؛ زیرا واحدهای کشاورزی اعم از گلخانه‌ها، سالن‌های دام و طیور، مراکز فرآوری محصولات، سردخانه‌ها از نظر مصرف انرژی با ساختمان‌های معمولی تفاوت اساسی دارند. انرژی در کشاورزی نه‌تنها برای آسایش حرارتی، بلکه برای فرآیندهای تولیدی وابسته به زمان، دما، رطوبت و پیوستگی عملکرد مصرف می‌شوند. در چنین شرایطی، تعریف سنتی NZEB که صرفاً بر موازنه سالانه انرژی تکیه کرده، به‌هیچ‌وجه توانایی پوشش پیچیدگی‌های انرژی کشاورزی را ندارد.

تعریف ساختمان انرژی صفر ترکیبی، به دلیل ماهیت چندمسیره و ارزش‌محور خود، دقیقاً با همین پیچیدگی‌ها سازگار است. وجود سه مسیر جبرانی—تولید محلی، خرید گواهی انرژی تجدیدپذیر و خرید/تولید گواهی صرفه‌جویی انرژی امکان می‌دهد که یک واحد کشاورزی بدون نیاز به استقرار کامل زیرساخت تولید تجدیدپذیر، همچنان به وضعیت «صفر انرژی» برسد. این امر برای گلخانه‌های تجاری و سردخانه‌های بزرگ که محدودیت فضایی یا نیاز بار لحظه‌ای بالا دارند، کاملاً حیاتی است.

از منظر سیاست‌گذاری، این تعریف فرصت پیوند کشاورزی با بازارهای انرژی پاک را ایجاد می‌کند؛ زیرا گلخانه‌ها، مرغداری‌ها و مزارع پمپاژ می‌توانند پس از اجرای طرح‌های بهره‌وری، گواهی EEC تولید کرده و آن را به بخش ساختمان‌های شهری یا صنعتی بفروشند. این مکانیزم به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و خشک با بار سرمایشی بسیار بالا (کرمان، یزد، اهواز) سبب می‌شود کشاورزی نه‌تنها مصرف‌کننده انرژی، بلکه یک بازیگر فعال در بازار انرژی باشد. چنین نقشی در چارچوب NZEB سنتی قابل تعریف نبود.

در رویکرد هیبریدی، تعادل انرژی سالانهٔ واحد کشاورزی از طریق ترکیب سه مؤلفه حاصل می‌شود: تولید انرژی تجدیدپذیر در محل، خرید برق یا گواهی‌های انرژی پاک در ساعات اوج بار (EEC) و خرید گواهی‌های انرژی تجدیدپذیر (REC) برای جبران شکاف میان تولید و مصرف. این مدل، برخلاف رویکردهای متکی بر خودکفایی مکانی، با ماهیت فصلی و متغیر بخش کشاورزی سازگار است و به واحدهای تولیدی اجازه می‌دهد از طریق مدیریت انعطاف‌پذیری بار و مشارکت در بازار انرژی، به‌جای مصرف‌کننده صرف، به بازیگر فعال شبکه تبدیل شوند. در این راستا، پژوهش حاضر نشان داد در واحد مرغداری نمونهٔ تولید انرژی تجدیرپذیر، گواهی انرژی تجدیدپذیر و خرید یا تولید گواهی صرفه‌جویی می‌تواند مقدار انرژی مؤثر سالانه را به ۱۹۳/۶ مگاوات‌ساعت افزایش دهد که این مقدار انرژی از مصرف سالانه واحد (۱۸۰ مگاوات‌ساعت) فراتر می‌رود. تراز نهایی مثبت ۱۳/۶ مگاوات‌ساعت نشان می‌دهد که مرغداری مذکور، مطابق تعریف ساختمان انرژی صفر ترکیبی، یک واحد Hybrid NZEB محسوب می‌شود. انتخاب مسیر مناسب برای دستیابی به وضعیت خالص صفر ترکیبی، صرفاً یک مسئلهٔ فنی مبتنی بر تراز انرژی نیست، بلکه تصمیمی فنی–اقتصادی و وابسته به سیاست‌گذاری است. واحدهای کشاورزی ممکن است به‌دلیل محدودیت‌های وابسته به سایت، مانند سطح

[21] Hybrid NZEB

مناسب نصب، رقابت با سایر کاربری‌های زمین، محدودیت‌های سازه‌ای، ظرفیت اتصال به شبکه، الگوی بار و بودجهٔ سرمایه‌گذاری، ظرفیت عملی محدودی برای توسعهٔ سامانه‌های خورشیدی در محل داشته باشند. بنابراین، حتی در صورت برخورداری از تابش خورشیدی مناسب، تأمین تمام نیاز انرژی از طریق سامانه برق خورشیدی ممکن است از نظر فنی امکان‌پذیر یا از نظر اقتصادی مطلوب نباشد. پس از بهره‌برداری از ظرفیت فنی و اقتصادی قابل‌توجیه تولید خورشیدی در محل، کسری باقی‌مانده را می‌توان با مسیرهای جایگزین یا مکمل جبران کرد. این مسیرها می‌توانند شامل خرید گواهی انرژی تجدیدپذیر، تولید بیوگاز از پسماندهای کشاورزی، استفاده از انرژی بادی در مناطق دارای پتانسیل مناسب، و اجرای اقدامات تکمیلی بهره‌وری انرژی و مدیریت سمت تقاضا باشند. انتخاب میان این گزینه‌ها باید بر مبنای مقایسهٔ سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری، دسترسی به منابع محلی، هزینهٔ انرژی اجتناب‌شده، قیمت گواهی‌ها، عمر تجهیزات، شرایط تأمین مالی و دورهٔ بازگشت سرمایه انجام شود. ازاین‌رو، هیچ مسیر واحدی را نمی‌توان برای تمام واحدهای کشاورزی برتر دانست و راه‌حل مناسب باید به‌صورت یک سبد اختصاصی و متناسب با شرایط هر واحد انتخاب شود.

سیاست‌های تشویقی و تنبیهی و الزامات دولتی نیز می‌توانند جذابیت اقتصادی نسبی این مسیرها را تغییر دهند. ابزارهایی مانند یارانهٔ سرمایه‌گذاری، تسهیلات مالی، تعرفه‌های ترجیحی، تعهدات استفاده از انرژی تجدیدپذیر، گواهی‌های انرژی، قیمت‌گذاری کربن و جرایم عدم انطباق می‌توانند انتخاب واحدهای کشاورزی را به‌سمت گزینه‌هایی با منافع بیشتر برای کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن هدایت کنند. در مقابل، عدم تقارن قیمت خرید و فروش برق، نقدشوندگی محدود بازار گواهی‌ها، نوسان قیمت‌ها و نبود سیاست‌های بلندمدت و قابل پیش‌بینی ممکن است سرمایه‌گذاری در گزینه‌های فنی مناسب را محدود کند. بنابراین، در چارچوب پیشنهادی، انتخاب ترکیب تولید در محل، فناوری‌های جایگزین و ابزارهای بازارمحور باید با در نظر گرفتن همزمان امکان‌پذیری فنی، صرفهٔ اقتصادی و الزامات سیاستی انجام شود.

در مجموع، می‌توان بیان کرد که کارکرد اصلی NZEB در کشاورزی نه در خودکفایی کامل انرژی، بلکه در ایجاد یک چارچوب هوشمند و بازارمحور برای مدیریت تعاملات انرژی است. بدین‌ترتیب، ساختمان‌های انرژی صفر در کشاورزی زمانی معنا پیدا می‌کنند که براساس ترکیب تولید محلی، گواهی‌های انرژی پاک، و مشارکت فعال در بازار انرژی تعریف شوند؛ رویکردی که با ماهیت انرژی‌بر، نوسانی و اقلیم‌وابسته این بخش به‌طور کامل همخوانی دارد و می‌تواند کشاورزی ایران را به یکی از بازیگران کلیدی بازار انرژی تبدیل کند.

در نهایت، تعریف Hybrid NZEB فرصت می‌دهد که بخش کشاورزی ایران که یکی از انرژی‌برترین و در عین حال کم‌بهره‌ترین بخش‌های اقتصاد است وارد عصر اقتصاد انرژی ارزش‌محور شود؛ عصری که در آن انرژی نه فقط برای تولید محصول، بلکه به‌عنوان یک «منبع درآمد» و «دارایی قابل تجارت» برای کشاورز تعریف می‌شود.

محدودیت‌های پژوهش

با وجود ظرفیت‌های مفهومی و کاربردی چارچوب پیشنهادی، نتایج این پژوهش دارای محدودیت‌هایی است. نخست آنکه مطالعهٔ موردی ارائه‌شده ماهیت تحلیلی دارد و برای تعمیم آماری طراحی نشده است. دوم، ضرایب اصلاحی به‌کاررفته در مدل نیازمند کالیبراسیون تجربی و اعتبارسنجی در داده‌های واقعی هستند. سوم، کارایی اقتصادی و نهادی این چارچوب به توسعهٔ بازارهای گواهی انرژی، سازوکارهای راستی‌آزمایی، قیمت‌گذاری شفاف، و ساختار تعرفه‌ای وابسته است. همچنین، شرایط اقلیمی، الگوی بار، و قابلیت توسعهٔ تولید تجدیدپذیر در محل می‌توانند نتایج را به‌طور معنی‌داری تغییر دهند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، این چارچوب در اقلیم‌ها، کاربری‌ها و ساختارهای بازار مختلف با داده‌های واقعی آزمون و بهینه‌سازی شود.

در بافت انرژی ایران، پیاده‌سازی سازوکارهای مبتنی بر بازار همچون REC و EEC با چالش‌های ساختاری مواجه است. بررسی‌های فعلی نشان می‌دهد که نقش‌آفرینی «ساتبا» به‌عنوان نهاد ناظر و توسعه‌دهندهٔ زیرساخت‌های بورس انرژی، تعیین‌کننده است. محدودیت‌های فعلی در نقدشوندگی گواهی‌های صرفه‌جویی انرژی (EEC) در بورس انرژی، پتانسیل مشارکت واحدهای کشاورزی را در کلاسترهای انرژی محدود کرده است. با این حال، حرکت به‌سمت مدل‌های Hybrid NZEB می‌تواند با سیگنال‌دهی قیمت واقعی، سرمایه‌گذاران را به‌سمت مدیریت غیرمتمرکز بار تشویق نماید اگرچه چارچوب Hybrid NZEB از نظر مفهومی قابلیت استفاده از REC و EEC را در تراز انرژی ساختمان فراهم می‌کند، تحقق عملی آن در ایران مستلزم وجود بازارهای توسعه‌یافته، شفاف و نقدشونده برای این گواهی‌ها است. در حال حاضر، توسعهٔ این بازارها با چالش‌هایی نظیر نبود عمق کافی در معاملات، محدودیت در زیرساخت‌های تسویه و پایاپای، نبود استانداردهای یکپارچه برای صدور و تبادل گواهی‌ها، و محدودیت مشارکت بازیگران خصوصی مواجه است. در این میان، نقش نهادهایی نظیر ساتبا در صدور و اعتبارسنجی گواهی‌ها، بورس انرژی در ایجاد بستر معاملاتی رسمی، وESCO ها در شناسایی، طراحی و تجمیع پروژه‌های صرفه‌جویی انرژی، برای شکل‌گیری یک بازار کارآمد بسیار تعیین‌کننده است. بنابراین، هرچند مدل پیشنهادی از منظر فنی قابل اجراست، تحقق کامل آن در عمل به بلوغ نهادی و توسعه بازارهای انرژی در کشور وابسته است

یکی از محدودیت‌های مطالعهٔ حاضر، نبود داده‌های تفصیلی ساعتی تولید، تقاضا، شرایط اقلیمی و ارزش نهایی شبکه برای برآورد مستقل ضرایب کیفیت، همزمانی، اقلیم و ارزش شبکه‌ای است. ازاین‌رو، مقادیر استفاده‌شده در مطالعهٔ موردی به‌صورت ضرایب تعدیل مرکب سناریویی بیان شده‌اند. اگرچه این رویکرد برای نمایش قابلیت عملیاتی چارچوب پیشنهادی مناسب است، کالیبراسیون تجربی و تحلیل عدم‌قطعیت ضرایب منفرد برای کاربردهای تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری ضروری خواهد بود.

مطالعهٔ موردی حاضر عمدتاً بر ارزیابی تراز انرژی مؤثر تمرکز دارد و یک امکان‌سنجی مالی کامل محسوب نمی‌شود. به‌دلیل در دسترس نبودن داده‌های اختصاصی پروژه دربارهٔ سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری، تعرفهٔ خرید و فروش انرژی، قیمت گواهی‌ها، نرخ تنزیل و عمر تجهیزات، محاسبه کمی شاخص‌هایی مانند دوره بازگشت سرمایه، نرخ بازدهٔ سرمایه‌گذاری، ارزش فعلی خالص و نرخ بازدهٔ داخلی امکانپذیر نبود. بنابراین، نتایج حاضر نباید به‌عنوان اثبات قطعی توجیه‌پذیری مالی گزینه‌های بررسی‌شده تفسیر شوند. مطالعات آینده باید با استفاده از داده‌های واقعی پروژه و تحلیل جریان نقدی تنزیل‌شده، عملکرد اقتصادی مسیرهای مختلف دستیابی به خالص صفر را مقایسه کنند.

ملاحظات اخلاقی

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به‌طور مساوی در کلیهٔ مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان (نویسنده مسئول) قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به‌خاطر ارائهٔ نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

References

Abhyankar, N., Phadke, A., Shah, N., 2023. Energy efficiency certificates and building decarbonization. Energy Policy 176, Article 113523.

Attia, S., 2018. Net zero energy design: A guide for architects. Springer.

Bloomberg, N.E.F., 2023. Time based energy valuation. BNEF Publications.

Gori, V., Marinosci, C., Causone, F., 2020. Distributed energy systems in buildings. Renewable Energy

160, 1235-1246.
Hosseini, S. M., Safavi, M., Rezvani, A., 2022. Barriers to NZEB deployment in Iran. Energy for Sustainable Development 66, 101-115.
International Energy Agency. 2023. Net zero buildings roadmap. IEA.
International Renewable Energy Agency. 2022. Power market design for renewable integration. IRENA.
Khatibi, A., Amidpour, M., 2020. Exergy in Iranian climates. Journal of Cleaner Production 276, 123-139.
Kibert, C.J., 2020. Sustainable construction: Green building design and delivery. Wiley.
Marszal, A. J., Heiselberg, P., Bourrelle, J.S., Musall, E., Voss, K., Sartori, I., Napolitano, A., 2011. Zero energy building: A review. Energy and Buildings 43(4), 971-979.
Mendes, G., Silva, C., Santos, J., 2020. Exergy indicators for building systems. Energy Conversion and Management 210, Article 112706.
Nagarsheth, S., Agbossou, K., Henao, N., Bendouma, M., 2025. The advancements in agricultural greenhouse technologies: An energy management perspective. Sustainability 17(8), Article 3407.
National Renewable Energy Laboratory. 2019. Grid interactive efficient buildings. NREL.
Pless, S., Torcellini, P., 2010. Net zero energy buildings. National Renewable Energy Laboratory.
Rahimi, M., Karimi, M., & Ahmadi, H., 2021. Barriers to renewable certificate markets in developing countries. Energy Policy 151, Article 112122.
Sarathkumar, T.V., Goswami, A.K., Khan, B., Shoush, K.A., Ghoneim, S.S., Ghaly, R.N., 2025. Forecasting of virtual power plant generating and energy arbitrage economics in the electricity market using machine learning approach. Scientific Reports 15(1), 3812.
Sartori, I., Napolitano, A., Voss, K., 2012. Net-zero energy buildings: A consistent definition framework. Energy and Buildings 48, 220-232.
Taleb, H.M., Pitts, A.C., 2009. The energy and exergy design for buildings: A review. Energy and Buildings 41(11), 1149-1156.
United Nations Environment Programme. 2022. Energy efficiency certificate markets. UNEP.
Wang, S., Sheng, W., Shang, Y., & Liu, K., 2024. Distribution network voltage control considering virtual power plants cooperative optimization with transactive energy. Applied Energy 371, Article 123680.
Zangheri, P., Armani, R., Rossi, M., 2022. Multi-energy pathways for buildings. Applied Energy 312, Article 118823.
Zhao,. X., Li, Y., Wang, Z., 2020. Hybrid NZEB frameworks. Energy and Buildings 209, Article 109691.