اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره وری
مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی
۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵

تعریف بازارمحور" ساختمان انرژی صفر ترکیبی"با تاکیدبر توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در بخش کشاورزی ایران

احمد فضلی[۱]، حسین مبلی*[۲]، شاهین رفیعی[۳]، مجید خانعلی[۴]

چکیده :

در سال‌های اخیر، مفهوم ساختمان انرژی صفر[۵] (NZEB) به‌عنوان یکی از ستون‌های اصلی سیاست‌های کربن‌زدایی و توسعه 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[۶]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 [۷](REC/I-REC)، و خرید یا تولید گواهی صرفه‌جویی انرژی[۸] (ESC) حاصل شود. تعریف پیشنهادی علاوه‌بر کمیت انرژی، عوامل کیفیت انرژی(اکسرژی)، 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 تجدیر پذیر، گواهی انرژی تجدید پذیر 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.

کلمات کلیدی: ساختمان انرژی صفر؛ گواهی انرژی تجدیدپذیر (REC)؛ گواهی کارایی انرژی[۹] (EEC)؛ کیفیت انرژی؛ اکسرژی؛ اقلیم ایران؛ بازار انرژی؛ توسعه پایدار.

---

[۱] دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم گرایش انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران،گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی،fazli.ahmad@ut.ac.ir

[۲] استاددانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران،گروه مهندسی ماشین های کشاورزی، نویسنده مسوول،استادراهنما،hmobli@ut.ac.ir

[۳] استاد دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران،گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، استاد مشاور

[۴] دانشیار دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران،گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، استاد مشاور

[5] Net Zero Energy Bulding

[6]Hybrid NZEB

[7] Renewable Energy Certificates

[8] Energy Saving Certificate

[9] Energy Efficiency Certificates,

اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره وری
مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی
۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵

A Market-Based Definition of Hybrid Net-Zero Energy Buildings Emphasizing Renewable Energy Development in Iran's Agricultural Sector

Fazli ahmad[1],Hosein mobli[2],Shahi rafii[3],Majid khanali[4]

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 a strong reliance 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 (REC/I-REC), and the purchase or generation of Energy Saving Certificates (ESC). 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 saving 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.

Keywords:

Net-Zero Energy Building (NZEB); Renewable Energy Certificate (REC); Energy Efficiency Certificate (EEC); Energy Quality; Exergy; Iran's Climate; Energy Market; Sustainable Development

[1] Ph.D. student in Biosystems Mechanical Engineering (Renewable Energy Engineering), Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Department of Agricultural Machinery Engineering, fazli.ahmad@ut.ac.ir

[2] Professor, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Department of Agricultural Machinery Engineering; Corresponding Author; Academic Supervisor, hmobli@ut.ac.ir

[3] Professor, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Department of Agricultural Machinery Engineering; Co-Supervisor

[4] Associate Professor, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Department of Agricultural Machinery Engineering; Co-Supervisor

در دهه‌های اخیر، مفهوم ساختمان انرژی صفر (NZEB) به‌عنوان یکی از راهبردهای کلیدی برای تحقق توسعه 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 به عنوان معیار «صفر بودن» در نظر گرفته می‌شد. با وجود این، به تدریج آشکار شد که این تعریف صرفاً بر پایه 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 دهه ۲۰۰۰ دارد، جایی که NZEB به‌صورت یک تراز انرژی ساده تعریف می‌شد (Torcellini et al., 2006). در بیشتر کشورها، این تعریف بر پایه 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.

بررسی دقیق ادبیات نشان می‌دهد که اغلب تعاریف پذیرفته‌شده NZEB بر موازنه ساده 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 (ESC/EEC) محقق شود.

مروری بر تعاریف فعلی ساختمان انرژی صفر توسط مراجع معتبر بین المللی:

در ادبیات بهینه‌سازی انرژی ساختمان، مفهوم «ساختمان انرژی صفر» از اواخر دهه 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 از این مفهوم ارائه کرده‌اند. بر اساس استاندارد[1] ASHRAE 228، ساختمان انرژی صفر به‌عنوان ساختمانی تعریف می‌شود که طی دوره 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 محدوده فیزیکی ساختمان است. این رویکرد، چارچوبی نسبتاً سخت‌گیرانه ایجاد می‌کند و اجازه استفاده از گواهی‌های انرژی تجدیدپذیر خارج از محل را نمی‌دهد، زیرا ماهیت «خودکفایی انرژی» در سطح سایت زیربنای این تعریف است.

[1] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

در نقطه مقابل، وزارت انرژی ایالات متحده [1](DOE) و آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر [2](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 هزینه انرژی و صفر انتشار نشان می‌دهند که مفهوم «صفر» می‌تواند بر اساس معیارهای فیزیکی، اقتصادی و زیست‌محیطی تغییر کند. بنابراین، تراز صفر انرژی نه فقط به مقدار انرژی تحویلی و تولیدی، بلکه به *کیفیت انرژی، زنجیره تبدیل انرژی اولیه و پیامدهای زیست‌محیطی مصرف آن* وابسته است. این رویکرد چندبعدی NREL از مهم‌ترین نقاط عطف در ادبیات این حوزه به شمار می‌آید و به‌ویژه در پژوهش‌های بهینه‌سازی چندمعیاره مورد توجه قرار گرفته است، زیرا امکان مقایسه سناریوهای مختلف را در چارچوبی واحد فراهم می‌آورد.

در اتحادیه اروپا، دستورالعمل عملکرد انرژی ساختمان‌ها [3](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 حوزه بهره‌وری انرژی تبدیل کرده است.

از سوی دیگر، استاندارد بین‌المللی [4] ISO 52000-1 یک چارچوب جهانی برای محاسبه انرژی ورودی و خروجی ساختمان ارائه می‌کند و ساختمان صفر انرژی را بر مبنای موازنه انرژی نهایی تعریف می‌نماید. تمایز اصلی ISO در تأکید آن بر مفهوم «مرز تراز انرژی» و ضرورت تفکیک دقیق میان انرژی تحویلی، انرژی صادرشده و نحوه 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 شبکه برابر صفر گردد. این تعریف مزیت استانداردسازی بین‌المللی دارد و برای مقاصد مقایسه‌ای و ارزیابی عملکرد ساختمان‌ها در کشورهای مختلف بسیار مؤثر است.

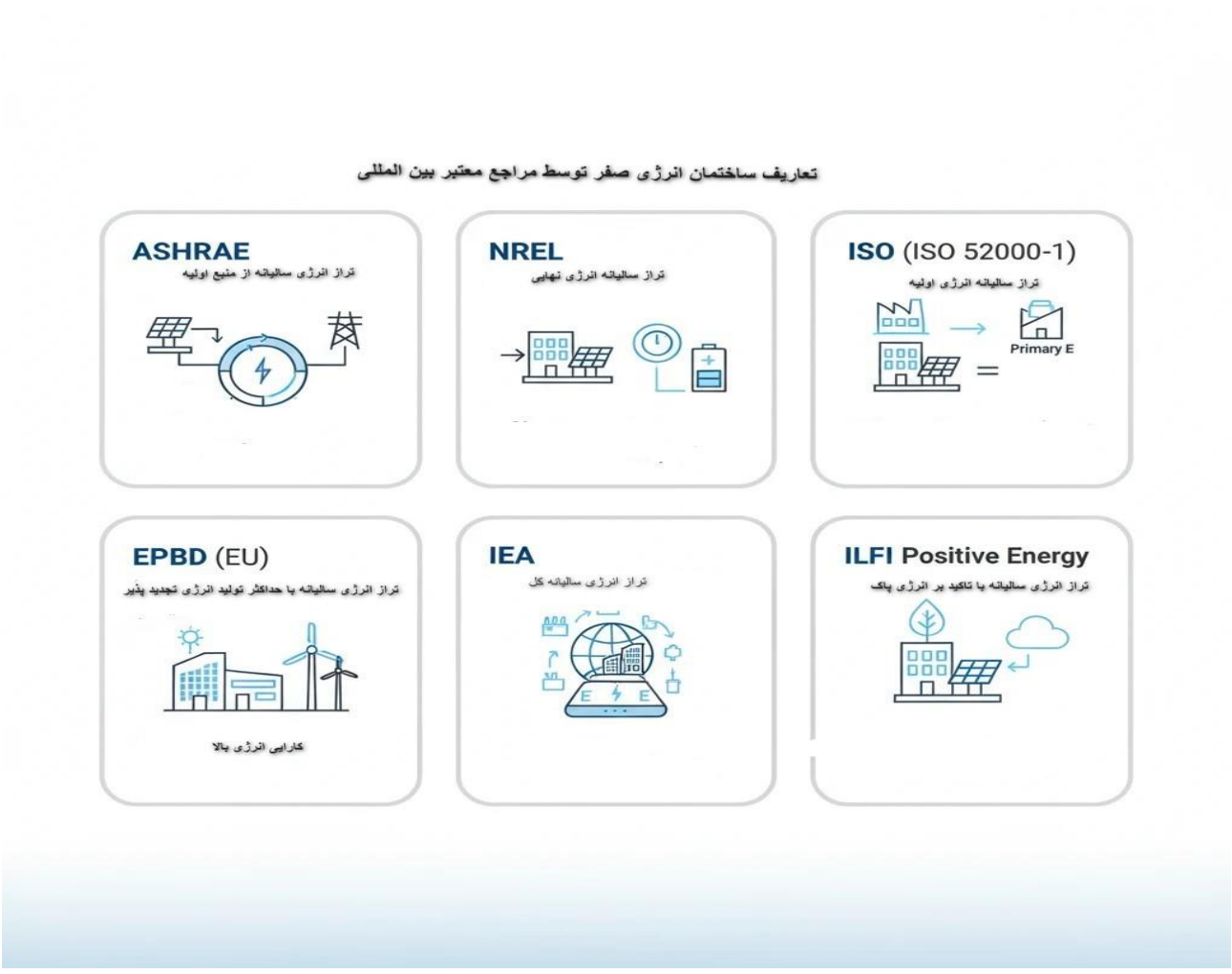
در گزارش‌ها و پروژه‌های پژوهشی آژانس بین‌المللی انرژی [5](IEA) به‌ویژه در برنامه‌های Annex 52 و Annex 67، مفهوم ساختمان انرژی صفر با نگاهی سیستمی‌تر و با توجه به تحلیل اکسرژی توسعه یافته است. در این رویکرد، کیفیت انرژی و قابلیت استفاده از آن در کنار کمیت مصرف، اهمیت می‌یابد. بر اساس این مدل، سطوح مختلفی 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 زمینه اقلیمی، محدودیت‌های طراحی و نیازهای شبکه انرژی منطقه دسته‌بندی شوند؛ به همین دلیل، چارچوب IEA جزو دقیق‌ترین برداشت‌ها از مفهوم «صفر انرژی» در مطالعات سامانه‌های انرژی تلقی می‌شود.

---

[1] U.S. Department of Energy
[2] National Renewable Energy Laboratory
[3] Energy Performance of Buildings Directive
[4] International Organization for Standardization
[5] International Energy Agency

در نهایت، مؤسسه بین المللی آینده [1] (ILFI) یکی از سخت‌گیرانه‌ترین تعاریف موجود را ارائه کرده است. در این تعریف، ساختمان زمانی صفر انرژی تلقی می‌شود که حداقل ۱۰۵ درصد انرژی سالانه 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 عملکرد واقعی[2] با رویکردی آرمان‌گرایانه اما دقیق، خواستار استقلال انرژی کامل و حذف هرگونه اتکای خارج‌سایتی است، به‌گونه‌ای که ساختمان در مقام یک «تولیدکننده واقعی انرژی» عمل کند. شکل شماره ۱ جدول تعاریف مراجع معتبر بین المللی از ساختمان انرژی صفر را نشان می دهد.

شکل۱- تعاریف مراجع بین المللی از ساختمان انرژی صفر



[1] International Living Future Institute
[2] Performance-Based

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 حالی که در سمت دیگر، NREL، ISO و IEA مفهوم «صفر» را در بستری چندلایه و وابسته به سیاست انرژی، ساختار شبکه، کیفیت انرژی و ملاحظات زیست‌محیطی 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 (IEA, 2023؛ Attia, 2018). در ایران، عواملی مانند تنوع اقلیمی، محدودیت ظرفیت نصب فتوولتائیک 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 دوره پرورش می‌گردد؛ و سوم، پتانسیل حضور فعال واحدهای کشاورزی در بازار انرژی که امکان خرید و فروش هدفمند 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 بر اساس 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 نشان‌دهنده تولید یک واحد انرژی تجدیدپذیر خارج از سایت ساختمان است و به‌عنوان یک ابزار مالی معتبر در بسیاری از کشورها پذیرفته شده است (IRENA, 2022؛ Zhou et al., 2021). از سوی دیگر، EEC امکان تبدیل صرفه‌جویی انرژی به یک «منبع قابل مبادله» را فراهم می‌کند و بدین ترتیب بهره‌وری انرژی نقش اقتصادی پررنگ‌تری می‌یابد (Mendes et al., 2020). بنابراین، استفاده 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 بسزایی یافته‌اند (BloombergNEF, 2023؛ Taleb & Pitts, 2009). برای نمونه، تولید فتوولتائیک 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 اکسرژی، ضرایب هم‌زمانی تولید–مصرف و ضرایب اقلیمی را به تعاریفNZEB نشان می‌دهد (Khatibi & 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 حالی که 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[1]، انرژی منبع[2]، انرژی هزینه[3] و انرژی انتشار[4] (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 هزینه انرژی صفر، به ساختار تعرفه‌ای خاص وابسته است و قابلیت تعمیم ندارد (Kibert, 2020). افزون بر آن، هیچ‌یک 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 (UNEP, 2022؛ Rahimi et al., 2021).

بطور کلی تعاریف موجود دارای شکاف‌های زیر است:

- عدم توجه به کیفیت انرژی (اکسرژی).
- 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 بر اساس کمیت ارزیابی نکنند.
- ناتوانی تعاریف رایج در تجاری‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر.

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

[1] Net-Zero Site Energy
[2] Net-Zero Source Energy
[3] Net-Zero Energy Cost
[4] Net-Zero Energy Emissions

روش انجام 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 بر اساس 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.

رابطه کلی محاسبه انرژی مؤثر سالانه به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

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

$E_{eff,annual} =$ 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

$i =$ انرژی مسیر شاخص $\left(EEC \text{ یا } REC \text{، محل در تولید}\right)$

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

$\alpha_i = i$ ضریب کیفیت انرژی

$\beta_i =$ 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

ساختمان زمانی به‌عنوان Hybrid NZEB احراز می‌شود که مقدار انرژی مؤثر سالانه آن برابر یا بیشتر از مصرف نهایی سالانه باشد.

در این مدل، Eeff, annualنمایانگر انرژی مؤثر سالانه 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 iii 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 مسیرiام را بیان می‌کند و نشان‌دهنده 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 اکسرژی (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. بدین منظور، ضریب هم‌زمانی تولید–مصرف (βi) میزان انطباق زمانی انرژی مسیرiام با الگوی مصرف ساختمان را نمایش می‌دهد. این ضریب به‌ویژه در مورد سامانه‌های تجدیدپذیر وابسته به زمان، مانند فتوولتائیک، 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. بدین ترتیب، 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 iام برای شبکه برق را نشان می‌دهد و عواملی نظیر تزریق انرژی در ساعات اوج بار، کاهش نیاز به توسعه زیرساخت و هم‌راستایی با سیاست‌های بهره‌برداری شبکه را در نظر می‌گیرد. این مؤلفه، پیوند میان عملکرد ساختمان و منافع سامانه انرژی کلان را برقرار می‌سازد.

پس از اعمال ضرایب فوق، انرژی مؤثر هر مسیرEeff, iمحاسبه شده و مجموع آن‌ها انرژی مؤثر سالانه ساختمان را تشکیل می‌دهد. در نهایت، ساختمان زمانی به‌عنوان «ساختمان انرژی صفر ترکیبی» شناسایی می‌شود که انرژی مؤثر سالانه آن برابر یا بیش از انرژی نهایی مصرف‌شده ساختمان در یک دوره 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»[1] 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 (BloombergNEF, 2023؛ Mendes et al., 2020). چنین رویکردی

[1] Hybrid NZEB

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 ساختمان‌ها فراهم می‌کند (Hosseini et al., 2022). از سوی دیگر، توسعه بازار تجدیدپذیر در ایران نیازمند ابزارهای مالی مکمل است؛ ابزارهایی مانند REC، EEC و بازارهای شرکت‌های خدمات انرژی[1] 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 اکسرژی، 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 رفع‌کننده‌ی محدودیت‌های فنی، بلکه پیشران توسعه بازار انرژی‌های پاک است.

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

ساختمان انرژی صفر ترکیبی، ساختمانی است که مجموع انرژی تأمین یا جبران‌شده از طریق تولید انرژی تجدیدپذیر در محل، خرید گواهی انرژی تجدیدپذیر (REC/I-REC) و خرید یا تولید گواهی صرفه‌جویی انرژی (EEC/ESC)، پس از تصحیح با ضرایب کیفیت انرژی، ارزش زمانی مصرف، ضرایب اقلیمی و ارزش شبکه‌ای، در پایان یک دوره 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 بر اساس تولید خود ارزیابی نمی‌کند، بلکه آن را درون یک اکوسیستم انرژی قرار می‌دهد.

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

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

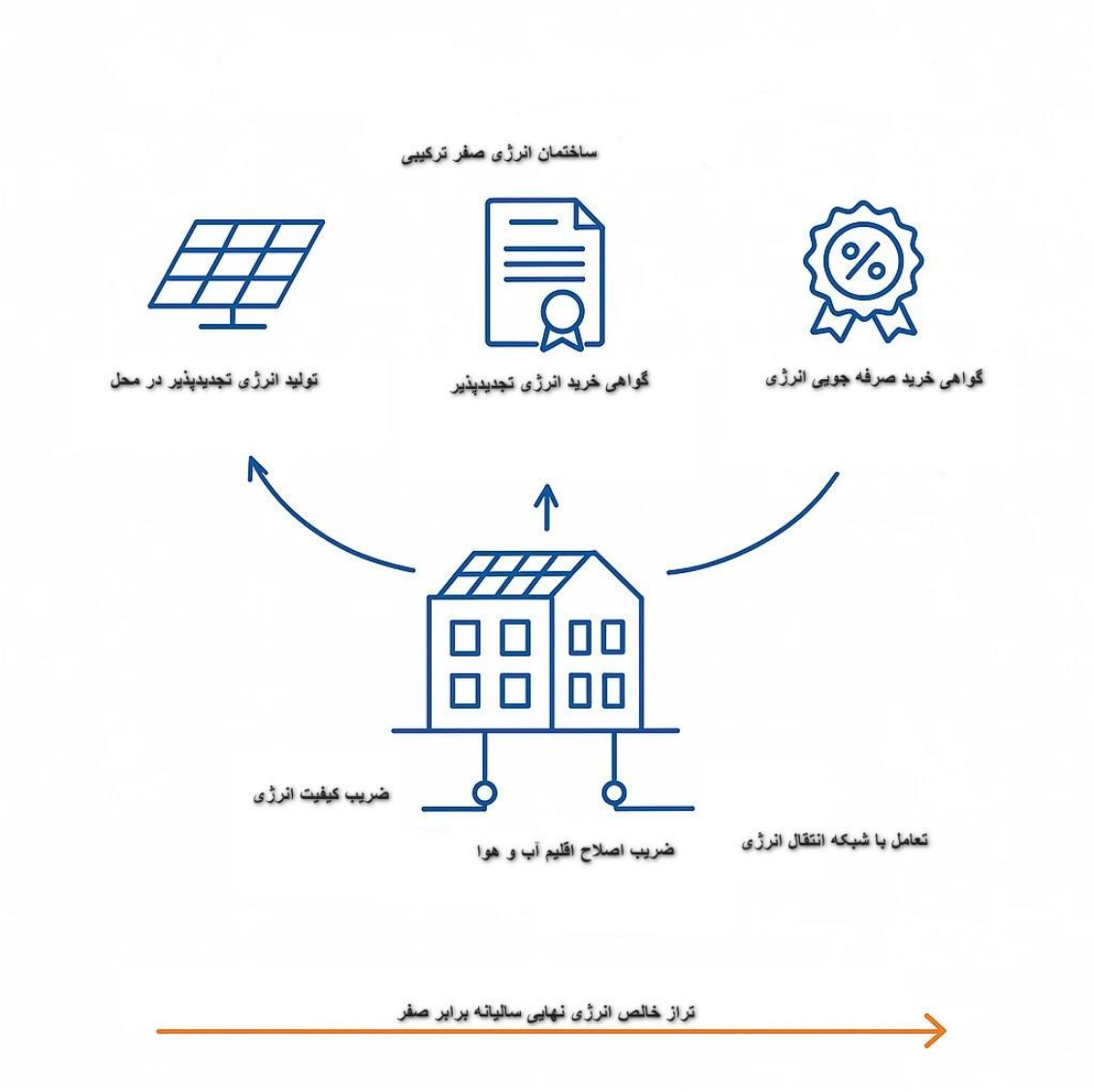
۴. ساختمان انرژی خالص صفر را از یک «تعریف فنی» به یک مدل بازارمحور بیست و چهار ساعته تبدیل می‌کند.

[1] Energy Service Company (ESCO)

به بیان 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 صفر ترکیبی



مطالعه موردی بکارگیری تعریف در یک مرغداری:

هدف از مطالعه 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.

مقایسه 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 بر اساس تولید در محل، بلکه با درنظرگرفتن جریان‌های مکمل انرژی و ضرایب اصلاحی چندبعدی تعیین شود. برای تبیین نحوه عملکرد این چارچوب، یک مرغداری ۲۰ هزار قطعه‌ای واقع در اقلیم گرم‌خشک به‌عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شد. این واحد با مساحت حدود ۲۵۰۰ مترمربع، مصرف سالانه برق برابر با ۱۸۰ مگاوات‌ساعت دارد که بخش عمده 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 سامانه فتوولتائیک ۱۰۰ کیلوواتی در سقف و محوطه پیرامونی می‌کند که توان تولید سالانه 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 به دلیل 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 (I-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 موثر حاصل از این جریان جبرانی به ۴۶.۲ مگاوات‌ساعت می‌رسد. بدین‌ترتیب، I-REC نه‌تنها به‌عنوان پوشش‌دهنده کمبود تولید محلی عمل می‌کند، بلکه از منظر ارزش زمانی و اقلیمی نقش تقویتی در کاهش فشار بر شبکه دارد.

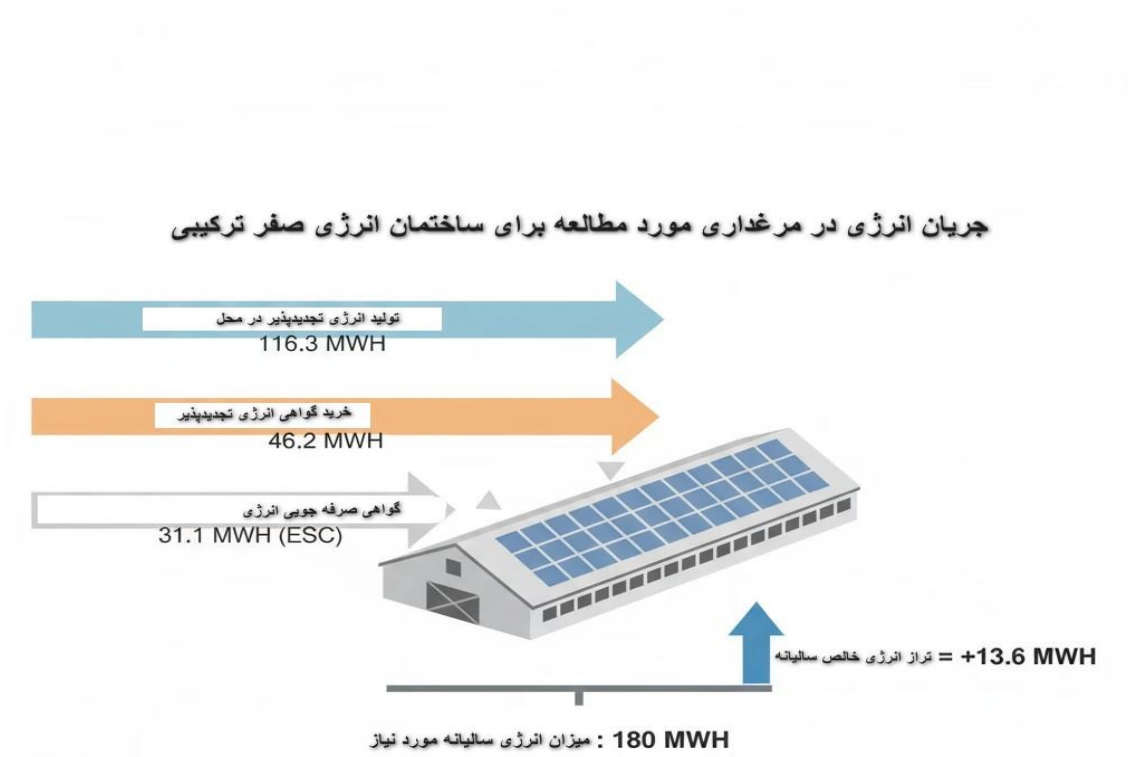
در گام سوم، این واحد یک برنامه بهینه‌سازی انرژی در سامانه تهویه خود را اجرا می‌کند که شامل جایگزینی فن‌های کم‌بازده با نمونه‌های پربازده، نصب کنترل دور و بهبود عایق‌بندی دریچه‌ها است. صرفه‌جویی ایجادشده در نتیجه این مداخله معادل ۲۵ مگاوات‌ساعت در سال است که واجد شرایط صدور گواهی صرفه‌جویی انرژی (ESC) 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 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. نکته بنیادی در این نتیجه آن است که هیچ‌یک از جریان‌های انرژی—چه تولید خورشیدی، چه خرید I-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.

شکل-۳ فرایند تامین انرژی از محل‌های متنوع را برای تحقق مفهوم ساختمان انرژی صفر در یک مرغداری نشان می دهد.

شکل-۳ نحوه تحقق ساختمان انرژی صفر با تعریف جدید در یک مرغداری



یافته‌های کلیدی پژوهش :

تعریف ساختمان انرژی صفر ترکیبی[1] یک رویکرد نسل‌بعدی برای ساختمان‌های انرژی صفر است که با ترکیب فناوری، بازار و ارزش‌سنجی انرژی، نه‌تنها ضعف‌های تعاریف سنتی را برطرف می‌کند، بلکه مسیر تجاری‌سازی و مقیاس‌پذیری آنها را در بستری 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

[1] Hybrid NZEB

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 سالانه 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 نمونه تولید انرژی تجدیر پذیر، گواهی انرژی تجدید پذیر 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.

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. بدین ترتیب، ساختمان‌های انرژی صفر در کشاورزی زمانی معنا پیدا می‌کنند که بر اساس 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.

جمعبندی و نتیجه گیری:

این پژوهش نشان داد که بازتعریف مفهوم NZEB بر پایه رویکردی ترکیبی، ارزش‌محور و بازارمحور می‌تواند محدودیت‌های ساختاری تعاریف کلاسیک را برطرف سازد Hybrid NZEB .ساختمان را نه به‌عنوان یک مصرف‌کننده یا تولیدکننده 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 توسعه بازار انرژی‌های پاک، تجاری‌سازی بهره‌وری انرژی و تدوین استانداردهای ملی اقلیم‌محور خواهد بود.

کاربرد مفهوم «ساختمان انرژی صفر ترکیبی» (Hybrid NZEB) 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 ــ که متکی بر تولید کامل انرژی در محل هستند ــ 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/I-REC)، و دریافت گواهی‌های صرفه‌جویی انرژی (EEC/ESC) را در یک چارچوب یکپارچه قرار دهد و تراز سالانه انرژی نهایی را برقرار سازد. در این چارچوب، واحدهای کشاورزی نه‌فقط مصرف‌کننده 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 به دلیل ماهیت ساختارهای شفاف و محدودیت‌های سازه‌ای، ظرفیت نصب سامانه‌های فتوولتائیک 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 حاشیه زمین زراعی یا از بیوگاز حاصل از واحد دامداری مجاور تأمین کند و کسری تراز را از طریق خرید I-REC یا EEC پوشش دهد. ارزش زمانی انرژی (Time-of-Use Value) 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 پایه 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 صرفه‌جویی انرژی (EEC/ESC) حاصل از این بهینه‌سازی‌ها می‌توانند به‌عنوان یکی از جریان‌های جبران‌کننده در مدل Hybrid NZEB محسوب شوند و در کنار تولید محدود انرژی تجدیدپذیر و خرید I-REC، 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 فتوولتائیک بر سقف سوله‌ها یا حاشیه 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 سالانه 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 I-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 دیده می‌شود. این واحدها معمولاً در دوره 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 دوره 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 زمینه 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 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 توسعه انرژی های تجدیدپذیر در کشور نیز ارائه می‌دهد.

فهرست منابع :

1. Abhyankar, N., Phadke, A., & Shah, N. (2023). Energy efficiency certificates and building decarbonization. *Energy Policy*, 176, 113523.
2. Attia, S. (2018). *Net zero energy design: A guide for architects*. Springer.
3. BloombergNEF. (2023). *Time-based energy valuation*. BNEF Publications.
4. Gori, V., Marinosci, C., & Causone, F. (2020). Distributed energy systems in buildings. *Renewable Energy*, 160, 1235–1246.
5. Hosseini, S. M., et al. (2022). Barriers to NZEB deployment in Iran. *Energy for Sustainable Development*, 66, 101–115.
6. IEA. (2023). *Net-zero buildings roadmap*. International Energy Agency.
7. IRENA. (2022). *Power market design for renewable integration*. International Renewable Energy Agency.
8. Kastner, I., & Noussan, M. (2021). PV penetration in buildings. *Renewable Energy*, 170, 1321–1334.
9. Kibert, C. (2020). *Sustainable construction*. Wiley.
10. Khatibi, A., & Amidpour, M. (2020). Exergy in Iranian climates. *Journal of Cleaner Production*, 276, 123–139.
11. Marszal, A. J., et al. (2011). Zero energy building: A review. *Energy and Buildings*, 43(4), 971–979.
12. Mendes, G., et al. (2020). Exergy indicators for building systems. *Energy Conversion and Management*, 210, 112706.
13. NREL. (2019). *Grid-interactive efficient buildings*. National Renewable Energy Laboratory.
14. Pless, S., & Torcellini, P. (2010). *Net-zero energy buildings*. NREL.
15. Rahimi, M., et al. (2021). Barriers to renewable certificate markets in developing countries. *Energy Policy*, 151, 112122.
16. Sartori, I., Napolitano, A., & Voss, K. (2012). NZEB definitions. *Energy and Buildings*, 48, 220–232.
17. Taleb, H., & Pitts, A. (2009). Exergy-based building design. *Energy and Buildings*, 41(11), 1149–1156.
18. UNEP. (2022). *Energy efficiency certificate markets*. United Nations Environment Programme.
19. Zangheri, P., et al. (2022). Multi-energy pathways for buildings. *Applied Energy*, 312, 118823.
20. Zhao, X., et al. (2020). Hybrid NZEB frameworks. *Energy and Buildings*, 209, 109691.