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

بسم الله الرحمن الرحیم

پنج شاخص کلیدی عملکرد انرژی برای طراحی الگوریتم رتبه‌بندی ساختمان‌های انرژی صفر کشاورزی

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

۱-دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم گرایش انرژی های تجدید پذیر دانشگاه تهران، Email: Fazli.ahmad@ut.ac.ir

۲- استاد دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران،استاد راهنما، Email:hmobli@ut.ac.ir

۳- استاد دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران،استاد مشاور

۴-دانشیار دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران،استاد مشاور

EFAB015831205

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

چکیده :

بخش کشاورزی یکی از مصرف‌کنندگان عمده انرژی در جهان است و ساختمان‌های این بخش – شامل گلخانه‌ها، سردخانه‌ها، انبارهای مواد غذایی، سالن‌های مرغداری و دامداری و واحدهای فرآوری – سهم قابل توجهی از مصرف انرژی حرارتی و الکتریکی را به خود اختصاص می‌دهند (FAO, 2019). افزایش قیمت حامل‌های انرژی، تشدید نگرانی‌ها درباره انتشار گازهای گلخانه‌ای و ضرورت حفظ امنیت غذایی، کشورها را به سمت توسعه ساختمان‌های «انرژی صفر» در کشاورزی سوق داده است (IEA, 2021). با این حال، ساختمان‌های کشاورزی به دلیل وابستگی شدید به شرایط اقلیمی، دما، رطوبت و بارهای حرارتی – برودتی ویژه محصولات، به چارچوب‌های ارزیابی و رتبه‌بندی اختصاصی نیاز دارند.

کلید واژه‌ها:
ساختمان انرژی صفرکشاورزی، شاخص عملکرد انرژی، انعطاف‌پذیری انرژی، کیفیت همزمانی تولید و مصرف انرژی،تنوع منابع انرژی

مقدمه :

"در ارزیابی NZEB، صرف تراز سالانه انرژی تولیدی و مصرفی کافی نیست و ابعاد زمانی، پایداری شبکه، تنوع منابع و انعطاف‌پذیری مصرف باید به‌صورت کمی لحاظ شوند از این رو، نیاز به مجموعه‌ای از شاخص‌های چندبعدی وجود دارد که بتوانند تصویری جامع از عملکرد انرژی ساختمان‌های کشاورزی ارائه کنند.

در این مقاله، یک الگوریتم رتبه‌بندی مبتنی بر پنج شاخص کلیدی عملکرد انرژی برای ساختمان‌های انرژی صفر کشاورزی توسعه داده می‌شود. این شاخص‌ها عبارت‌اند از: (۱) شاخص کارایی مصرف ایده‌آل (IEER)، (۲) شاخص خودکفایی انرژی تجدیدپذیر (RESS)، (۳) شاخص تطابق زمانی تولید و مصرف (EMI)، (۴) شاخص انعطاف‌پذیری انرژی (EFI) و (۵) شاخص تنوع منابع انرژی (EDI).

انتخاب شاخص‌های مناسب در ارزیابی ساختمان‌های انرژی صفر (NZEB) در بخش کشاورزی نیازمند توجه به سه اصل روش‌شناختی است:

- **جامعیت (پوشش کل چرخه انرژی: مصرف، تولید، زمان، انعطاف، ریسک)**
- **استقلال (عدم هم‌پوشانی مفهومی یا هم‌بستگی شدید)**
- **کاربردپذیری (قابل اندازه‌گیری، داده‌محور، قابل مقایسه در اقلیم‌های مختلف)**

ارزیابی عملکرد انرژی در ساختمان‌های کشاورزی صرفاً با نگاه به میزان مصرف سالانه یا شاخص‌های سنتی شدت مصرف انرژی قابل انجام نیست؛ زیرا این ساختمان‌ها:

- **دارای بارهای حیاتی و پیوسته (تهویه، گرمایش، سرمایش، پمپاژ، روشنایی) هستند؛**
- **نسبت به نوسانات اقلیمی و شبکه‌ای حساس‌اند؛**
- **در بسیاری موارد در مناطق روستایی با زیرساخت شبکه محدود قرار دارند؛**
- **و معمولاً ظرفیت قابل توجهی برای بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر دارند (مثلاً نصب پنل‌های خورشیدی بر روی سقف سالن‌ها)**
- **بنابراین، چارچوب ارزیابی باید علاوه بر کارایی مصرف، سهم انرژی تجدیدپذیر، هم‌زمانی تولید و مصرف، انعطاف‌پذیری بار و تنوع منابع را در بر گیرد**

یافته های تحقیق

(پنج شاخص منتخب، مجموعه‌ای منسجم و مکمل را تشکیل می‌دهند که ابعاد اساسی رفتار انرژی در یک ساختمان انرژی‌صفر را به‌طور جامع توصیف می‌کنند. شاخص IEER بُعد کارایی را نمایندگی می‌کند و امکان می‌دهد میزان صحیح‌بودن و منطقی‌بودن الگوی مصرف صرف‌نظر از مقدار تولید تجدیدپذیر ارزیابی شود. در کنار آن، شاخص‌های RESS و EMI تصویر کاملی از کیفیت و کمیت تولید انرژی تجدیدپذیر ارائه می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که RESS میزان تأمین انرژی از منابع پاک را بیان می‌کند و EMI نشان می‌دهد تا چه اندازه انرژی تولیدی دقیقاً در زمان نیاز مصرف می‌شود. دو شاخص دیگر، یعنی EFI وEDI ، جنبه‌های پایداری و تاب‌آوری سیستم انرژی را پوشش می‌دهند EFI .ظرفیت انعطاف‌پذیری عملیاتی ساختمان را نشان می‌دهد و بیان می‌کند تا چه حد امکان جابه‌جایی یا مدیریت بار وجود دارد، در حالی که EDI میزان تنوع منابع انرژی و مقاومت سیستم در برابر نوسانات یا اختلالات را منعکس می‌سازد. ترکیب این پنج شاخص باعث می‌شود ارزیابی نهایی نه تنها بر کارایی لحظه‌ای، بلکه بر خودکفایی، ثبات عملکرد و آمادگی سیستم برای آینده استوار باشد.این ساختار سه‌گانه باعث می‌شود مدل پیشنهادی نه‌تنها تراز انرژی را بسنجد، بلکه پویایی مصرف، قابلیت کنترل، پایداری منابع و کیفیت عرضه را نیز ارزیابی کند—موضوعاتی که برای ساختمان‌های کشاورزی ضروری اما کم‌توجه بوده‌اند.

. شاخص کارایی مصرف ایده‌آل (IEER)

برای هر ساختمان کشاورزی، مصرف واقعی سالانه انرژی نهایی را با $Ereal$ و مصرف ایده‌آل استانداردشده بر اساس اقلیم و کاربری را باEideal نشان می‌دهیم. شاخص IEER به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$IIEER = E_actual / E_ideal$$

که در آن:

E_actual : مصرف واقعی انرژی

E_ideal : مصرف ایده‌آل بر اساس شرایط اقلیمی

- **IEER تنها شاخصی است که کیفیت مصرف انرژی را مستقل از میزان تولید انرژی اندازه‌گیری می‌کند؛ بنابراین مبنای تشخیص اینکه آیا ساختمان اساساً کارآمد است یا صرفاً با تولید تجدیدپذیر، کم‌کاری مصرفی را پوشش می‌دهد، محسوب می‌شود.**
- **در بخش کشاورزی، بسیاری از بارها مانند تهویه مکانیکی مرغداری، سرمایش گلخانه، یا پمپ‌های آبیاری بارهای پیوسته، حجیم و حساس هستند. بنابراین یک انحراف کوچک در مصرف از مقدار ایده‌آل می‌تواند منجر به هدررفت انرژی قابل‌توجه شود.**
- **IEER به ارزیاب اجازه می‌دهد عملکرد انرژی را با مقیاس اقلیمی و عملکردی واقعی تطبیق دهد؛ موضوعی که در بسیاری از استانداردهای عمومی NZEB نادیده گرفته می‌شود.**
- **این شاخص پایه تحلیل سایر شاخص‌هاست؛ زیرا مشخص می‌کند آیا مصرف انرژی قابل‌قبول است یا خیر.**

IEER ستون «کارایی بنیادی» سیستم انرژی در ارزیابی ساختمان انرژی صفر کشاورزی است.

شاخص خودکفایی انرژی تجدیدپذیر (RESS)

$$RESS = (E_on + 0.7 * E_off + 0.3 * E_REC) / E_total$$

E_on : تولید تجدیدپذیر داخل سایت

E_off : تولید تجدیدپذیر خارج از سایت (مالکیتی/اشتراکی)

E_REC : گواهی‌های انرژی تجدیدپذیر

E_total : کل مصرف سالانه انرژی

RESS سهم انرژی تجدیدپذیر در تأمین نیاز انرژی ساختمان را با لحاظ سه منبع اصلی – تولید در محل، تولید خارج از محل با مالکیت یا مشارکت مستقیم، و گواهی‌های انرژی تجدیدپذیر – بیان می‌کند .

- مهم‌ترین نقش **RESS**، سنجش درجه استقلال انرژی ساختمان است؛ زیرا **NZEB** واقعی باید حداقل به میزان مشخصی از انرژی خود را از منابع پاک و پایدار تأمین کند.
- در ساختمان‌های کشاورزی که غالباً در مناطق روستایی قرار دارند، دسترسی به منابع تجدیدپذیر، تابش خورشید و بیوماس می‌تواندبالا باشد، اما میزان استفاده واقعی از این منابع موضوعی است که **RESS** روشن می‌کند.
- برخلاف شاخص‌های ساده، تنها «نصب تجهیزات» را نمی‌سنجد، بلکه ترکیب مالکیتی و عملیاتی تولید انرژی را نیز لحاظ می‌کند.
- این شاخص امکان مقایسه ساختمان‌ها را بدون نادیده‌گرفتن محدودیت‌های اقلیمی و زیرساختی فراهم می‌کند.

RESS شاخصی کلیدی برای سنجش میزان وابستگی ساختمان کشاورزی به انرژی پاک، تاب‌آوری انرژی و تحقق واقعی مفهوم « انرژی صفر» است.

شاخص تطابق زمانی تولید و مصرف (EMI)

$$\mathbf{EMI} = \frac{\mathbf{Sum}(min(G_t, L_t))}{Sum(L_t)}$$

G_t : تولید لحظه‌ای تجدیدپذیر

L_t : مصرف لحظه‌ای

min(G_t, L_t) : هم‌زمانی تولید و مصرف در هر بازه زمانی

لازم به تأکید است که انرژی‌های Off-site و REC در محاسبه EMI دخالت داده نمی‌شوند.

EMI درجه هم‌زمانی انرژی تولیدی از منابع تجدیدپذیر و انرژی مصرفی ساختمان را در بازه‌های زمانی مشخص (مثلاً ساعتی) اندازه‌گیری می‌کند

- **در ساختمان‌های کشاورزی، بسیاری از بارها مانند هوادهی دامداری یا سیستم‌های پمپاژ، الگوی مصرف زمان‌محور دارند. اگر تولید تجدیدپذیر با این الگو منطبق نباشد، ساختمان مجبور به استفاده از شبکه یا ذخیره‌ساز خواهد شد.**
- **EMI برخلاف RESS نه «میزان» انرژی تجدیدپذیر، بلکه کاربردپذیری عملی آن را اندازه‌گیری می‌کند.**
- **EMI اطلاعات دقیقی درباره «نیاز به ذخیره‌سازی»، «فشار بر شبکه» و «پایداری عملیاتی» ایجاد می‌کند.**
- **ساختمان‌ها ممکن است RESS بالایی داشته باشند اما EMI پایین؛ این یعنی انرژی تولید می‌شود، اما در زمان مناسب قابل استفاده نیست.**

EMI شاخصی حیاتی برای فهم کیفیت تطابق تولید و مصرف، پیش‌بینی نیاز به ذخیره‌سازی انرژی و طراحی الگوی بهره‌برداری بهینه در ساختمان‌های انرژی صفر کشاورزی است

شاخص تنوع منابع انرژی (EDI)

$$EDI = 1 - Sum(p_i\text{^}2)$$

p_i : سهم هر منبع انرژی از کل انرژی تأمین‌شده

مقدار بالاتر EDI بیانگر توزیع متوازن‌تر انرژی میان منابع مختلف و در نتیجه پایداری و تاب‌آوری بیشتر سیستم است.

EDI میزان تنوع و توزیع متوازن میان منابع مختلف انرژی (برق شبکه، تولید تجدیدپذیر در محل، مشارکت در تولید خارج از محل، سوخت‌های فسیلی پشتیبان و ...) را با استفاده از مدل تنوع ارزیابی می‌کند

در بسیاری از ارزیابی‌های NZEB، مسئله «ریسک وابستگی به یک منبع انرژی» نادیده گرفته می‌شود. شاخص EDI با بهره‌گیری از تنوع انرژی به روش سیمپسون، میزان تنوع و تاب‌آوری سیستم انرژی را نشان می‌دهد در محیط‌های کشاورزی که ممکن است تولید خورشیدی در زمستان ناکافی باشد یا دسترسی به بیوماس محدود گردد، شاخص EDI نقش حیاتی دارد.

این شاخص به‌صورت مستقل، یکی از معدود معیارهایی است که پایداری طولانی‌مدت و ریسک تأمین انرژی را اندازه‌گیری می‌کند و تکمیل‌کننده RESS و EMI است.

- **تنوع منابع انرژی یکی از پایه‌های تاب‌آوری انرژی است؛ چیزی که در ارزیابی NZEB معمولاً نادیده گرفته می‌شود.**
- **شاخص EDI میزان ریسک وابستگی به یک منبع را مشخص می‌کند. برای مثال، اگر تمام انرژی از خورشید تأمین شود، عملکرد ساختمان در زمستان یا روزهای ابری مختل خواهد شد.**
- **EDI همچنین نشان‌دهنده امکان توسعه آینده منابع انرژی است.**

EDI معیار کلیدی برای سنجش پایداری بلندمدت، ریسک‌پذیری و تاب‌آوری سیستم انرژی ساختمان کشاورزی است.

شاخص انعطاف‌پذیری انرژی (EFI)

EFI بیانگر ظرفیت ساختمان برای تغییر، جابجایی یا تعدیل بارهای انرژی در پاسخ به سیگنال‌های مختلف (تولید تجدیدپذیر، قیمت، وضعیت شبکه) است. یکی از رویکردهای متداول، تعریف EFI بر اساس نسبت بارهای قابل انعطاف به کل بار است:

$$\mathbf{EFI} = \frac{(\boldsymbol{Shiftable_{load}} + \boldsymbol{Controllable_{load}})}{\boldsymbol{Total_{load}}}$$

Shiftable_load : بارهای قابل انتقال

Controllable_load : بارهای قابل کنترل

Total_load : کل بار مصرفی

EFI ظرفیت بالقوه ساختمان برای جابجایی یا تعدیل بارهای مصرفی در پاسخ به نوسانات تولید، قیمت انرژی یا وضعیت شبکه را نشان می‌دهد

- **EFI شاخصی پیش‌نگرانه و قابلیت‌محور است که نشان می‌دهد ساختمان تا چه حد توانایی جابه‌جایی یا کنترل بار را برای تنظیم الگوی مصرف نسبت به تولید دارد.**
- **این شاخص برخلاف EMI که عملکرد فعلی را نشان می‌دهد، پتانسیل بهبود را اندازه‌گیری می‌کند و امکان تحلیل سناریوهای بهره‌برداری و بهینه‌سازی را فراهم می‌سازد.**
- **در تأسیسات کشاورزی، قابلیت جابه‌جایی بار—مانند تعویق روشن‌سازی لامپ‌ها در گلخانه یا تنظیم ساعات تهویه—می‌تواند به‌طور چشمگیری هزینه خرید انرژی و نیاز به ذخیره‌سازی را کاهش دهد.**
- **بنابراین EFI بعد مهمی از «انعطاف عملیاتی» را پوشش می‌دهد که در هیچ‌یک از شاخص‌های سنتی NZEB وجود ندارد.**
- **EFI برخلاف EMI نگاهی «پیش‌نگرانه» دارد و به بررسی پتانسیل ساختمان برای بهبود آینده می‌پردازد.**

بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش، یک چارچوب مفهومی و روش ارزیابی چندمعیاره برای ساختمان‌های انرژی‌صفر کشاورزی ارائه شد که بر پایه پنج شاخص کلیدی عملکرد انرژی بنا شده است: IEER، RESS، EMI، EFI و EDI. این شاخص‌ها به‌ترتیب ابعاد کارایی مصرف، خودکفایی انرژی تجدیدپذیر، کیفیت همزمانی تولید و مصرف، انعطاف‌پذیری بار و تنوع منابع انرژی را پوشش می‌دهند و در کنار یکدیگر تصویری جامع از عملکرد انرژی ساختمان ارائه می‌کنند.

با تعریف ریاضی و فرموله‌سازی محاسباتی این شاخص‌ها ، امکان رتبه‌بندی ساختمان‌های کشاورزی بر اساس ترکیبی از شاخص‌ها فراهم شد. نتایج مطالعه موردی نشان داد که صرفاً داشتن تراز سالانه مطلوب یا سطح بالای تولید تجدیدپذیر برای ارزیابی واقعی عملکرد کافی نیست و عواملی مانند همزمانی تولید و مصرف، ظرفیت انعطاف‌پذیری و تنوع منابع نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری و تاب‌آوری سیستم انرژی دارند. در عین حال، شاخص IEER به‌عنوان پایه‌ای‌ترین معیار کارایی مصرف باقی می‌ماند و عملکرد سایر شاخص‌ها را مشروط می‌کند.

چارچوب پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان ابزار تصمیم‌گیری برای طراحان، بهره‌برداران و سیاست‌گذاران در برنامه‌ریزی و ارزیابی پروژه‌های ساختمان انرژی‌صفر در بخش کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، این چارچوب با داده‌های واقعی در مقیاس‌های زمانی ریزتر (مثلاً ساعتی) و در اقلیم‌ها و انواع مختلف ساختمان‌های کشاورزی آزموده شود، روش‌های پیشرفته‌تری برای وزن‌دهی داده‌محور (مانند تحلیل مؤلفه‌های اصلی یا روش‌های یادگیری ماشین) به‌کار گرفته شود و تأثیر عدم‌قطعیت در پیکربندی منابع انرژی بر شاخص‌های پیشنهادی بررسی گردد.

1. Alanne, K., & Saari, A. (2014). Distributed energy generation and sustainable development. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 37, 585–595.
2. Arshad, M., Ali, S., & Zhang, Q. (2020). Energy use and management in the poultry industry: A review. Journal of Cleaner Production, 263, 121433.
3. Attia, S., Marszal, A., & Yannou, B. (2012). Towards regenerative and positive energy buildings. Energy and Buildings, 55, 727–737.
4. Baldinelli, G., Barelli, L., & Bidini, G. (2021). Energy balance and load matching in nearly zero energy buildings: A review. Applied Energy, 289, 116684.
5. Chen, C., Wang, H., & Zuo, W. (2022). A comprehensive review of multi-criteria decision-making methods for building energy assessment. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 157, 112067.
6. D'Agostino, D., & Parker, D. (2021). Nearly Zero Energy Buildings: Advances and challenges. Energy and Buildings, 243, 110992.

7.D'Agostino, D., Zangheri, P., & Castellazzi, L. (2017). Towards nearly zero energy buildings in Europe: A focus on retrofit in non-residential buildings. Energies, 10(1), 117

تشکر وقدردانی
پایان