



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

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.

هدف این مقاله توسعه یک الگوریتم رتبه‌بندی برای ارزیابی ساختمان‌های انرژی صفر کشاورزی مبتنی بر پنج شاخص کلیدی عملکرد انرژی است. شاخص‌های انتخابی شامل: شاخص کارایی مصرف ایده‌آل^۵ (IEER)، شاخص خودکفایی انرژی تجدیدپذیر^۶

^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 استادان‌دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، نویسنده مسوول، استاد راهنما، 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

^۵ Ideal Energy Efficiency Ratio

^۶ Renewable Energy Self-Sufficiency



اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره‌وری مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی ۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵ هتل المپیک - تهران



(RESS)، شاخص تطابق زمانی تولید و مصرف^۷ (EMI)، شاخص انعطاف‌پذیری انرژی^۸ (EFI) و شاخص تنوع منابع انرژی^۹ (EDI) هستند. این شاخص‌ها بر اساس ادبیات روز، استانداردهای انرژی و نیازهای خاص بخش کشاورزی استخراج شده‌اند و ابعاد مختلف مصرف، تولید، هم‌زمانی، انعطاف‌پذیری و پایداری سیستم انرژی ساختمان را پوشش می‌دهند.

طراحی یک چارچوب ارزیابی دقیق برای ساختمان‌های انرژی صفر^{۱۰} (NZEB)، به‌ویژه در حوزه کشاورزی، نیازمند مجموعه‌ای از شاخص‌هاست که نه تنها عملکرد انرژی را از منظر مصرف و تولید، بلکه جنبه‌های پایداری، انعطاف‌پذیری و تنوع‌پذیری سیستم انرژی را نیز پوشش دهند. پنج شاخص منتخب—شاخص نسبت کارایی انرژی ایده‌آل (IEER)، شاخص خودکفایی انرژی تجدیدپذیر (RESS)، شاخص هم‌زمانی انرژی (EMI)، شاخص انعطاف‌پذیری انرژی (EFI)، و شاخص تنوع انرژی (EDI) یک ساختار چندبعدی و جامع ایجاد می‌کنند که در ادبیات بین‌المللی نیز به‌عنوان مؤلفه‌های زیربنایی ارزیابی NZEB شناخته می‌شوند (Marszal et al., 2011; Torcellini et al., 2016).

الگوریتم پیشنهادی با ترکیب پنج شاخص اصلی انرژی، قادر است عملکرد ساختمان‌های کشاورزی را در چند بُعد مختلف ارزیابی کند:

- کارایی مصرف انرژی
- میزان خودکفایی انرژی تجدیدپذیر
- کیفیت هم‌زمانی تولید و مصرف
- قابلیت انعطاف در مدیریت بار
- تنوع و تاب‌آوری منابع انرژی

در نتیجه، رتبه‌بندی هر ساختمان تنها بر اساس مصرف یا تولید انرژی تعیین نمی‌شود، بلکه یک ارزیابی چندبعدی از عملکرد واقعی سیستم انرژی ساختمان ارائه می‌دهد.

واژگان کلیدی: ساختمان انرژی صفر کشاورزی، شاخص عملکرد انرژی، انعطاف‌پذیری انرژی، کیفیت هم‌زمانی تولید و مصرف انرژی، تنوع منابع انرژی.

⁷ Energy Matching Index

⁸ Energy Flexibility Index

⁹ Energy Diversity Index

¹⁰ Net Zero Energy Building



۱. مقدمه

بخش کشاورزی در بسیاری از کشورها سهم چشمگیری در مصرف انرژی نهایی دارد و به‌ویژه در زیرساخت‌های پس از برداشت، نگهداری و تولید صنعتی محصولات، مصرف انرژی الکتریکی و حرارتی به‌طور مستمر رو به افزایش است (FAO, 2019; Arshad et al., 2020). ساختمان‌های کشاورزی همچون گلخانه‌ها، سردخانه‌ها، انبارهای کنترل‌شده، سالن‌های دامداری و مرغداری و کارگاه‌های فرآوری، به دلیل نیاز به حفظ محدوده دمایی و رطوبتی مشخص، اغلب بارهای پیوسته و حساس داشته و در معرض نوسانات اقلیمی و شبکه‌ای قرار دارند (Teitel et al., 2012).

در سال‌های اخیر، مفهوم «ساختمان انرژی صفر» (NZEB) در پاسخ به چالش‌های زیست‌محیطی و اقتصادی در حوزه ساختمان به‌سرعت توسعه یافته است (Marszal et al., 2011; Kolokotsa et al., 2011). با این حال، بخش عمده ادبیات موجود بر ساختمان‌های شهری و تجاری متمرکز بوده و مطالعات اختصاصی درباره ساختمان‌های انرژی صفر در کشاورزی محدود است. ویژگی‌های منحصر به فرد بارهای حرارتی-برودتی، نیازهای زیستی محصولات و دام، وابستگی به شرایط اقلیمی و ضعف نسبی شبکه‌های روستایی، لزوم تدوین چارچوب‌های ارزیابی و رتبه‌بندی ویژه برای این دسته از ساختمان‌ها را آشکار می‌سازد (Guezgouz et al., 2019; Li et al., 2020).

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 (Torcellini et al., 2006; Sartori et al., 2012). 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).

ساختار مقاله به این صورت است: در بخش ۲، ضرورت و مبانی نظری انتخاب شاخص‌ها تبیین می‌شود. بخش ۳ به تعریف ریاضی و فرمول‌های محاسباتی هر شاخص اختصاص دارد. در بخش ۴، الگوریتم رتبه‌بندی مبتنی بر روش TOPSIS ارائه می‌شود. در بخش ۵، تحلیل مفهومی و تفسیر نقش هر شاخص در چارچوب NZEB کشاورزی تشریح می‌گردد و در بخش ۶، نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ارائه می‌شود.

۲. ضرورت طرح مسئله و چارچوب مفهومی شاخص‌ها

۲.۱. نیاز به شاخص‌های چندبعدی در ساختمان‌های انرژی صفر کشاورزی



اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره‌وری مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی ۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵ هتل المپیک - تهران



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) (Munir, 2015 & Guezgouz et al., 2019; Ghafoor).

بنابراین، چارچوب ارزیابی باید علاوه بر کارایی مصرف، سهم انرژی تجدیدپذیر، هم‌زمانی تولید و مصرف، انعطاف‌پذیری بار و تنوع منابع را در بر گیرد (Sartori et al., 2012).

۲.۲. انتخاب پنج شاخص کلیدی

بر اساس مرور ادبیات و نیازهای عملی بخش کشاورزی، پنج شاخص کلیدی زیر به‌عنوان هسته اصلی الگوریتم رتبه‌بندی انتخاب شده‌اند:

۱. شاخص کارایی مصرف ایده‌آل

این شاخص نسبت مصرف واقعی انرژی ساختمان به مصرف «استانداردشده و اقلیمی‌شده» بر اساس استانداردهای ملی و اقلیمی را می‌سنجد (ASHRAE, 2019). در واقع، IEER میزان فاصله ساختمان از الگوی مصرف ایده‌آل را نشان می‌دهد و نقطه آغاز هر گونه حرکت به سمت NZEB است.

- 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 قابل توجه 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 قابل قبول است یا خیر.



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

۲. شاخص خودکفایی انرژی تجدیدپذیر (RESS -)

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 (Marszal et al., 2011; IEA, 2021).

- 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 می‌تواند بالا باشد، اما میزان استفاده واقعی از این منابع موضوعی است که RESS روشن می‌کند.
 - RESS 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 نادیده گرفتن 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.

۳. شاخص تطابق زمانی تولید و مصرف (EMI)

EMI درجه هم‌زمانی انرژی تولیدی از منابع تجدیدپذیر و انرژی مصرفی ساختمان را در بازه‌های زمانی مشخص (مثلاً ساعتی) اندازه‌گیری می‌کند (Luthander et al., 2015).

- 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

۴. شاخص انعطاف‌پذیری انرژی (EFI)

EFI ظرفیت بالقوه ساختمان برای جابجایی یا تعدیل بارهای مصرفی در پاسخ به نوسانات تولید، قیمت انرژی یا وضعیت شبکه را نشان می‌دهد (Jensen et al., 2017; Reynnders et al., 2018).

۵. شاخص تنوع منابع انرژی (EDI)

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 سیمپسون ارزیابی می‌کند (Stirling, 1998).

این پنج شاخص در کنار یکدیگر، تصویری چندلایه از «کیفیت مصرف»، «میزان خودکفایی تجدیدپذیر»، «کیفیت زمانی هم‌پوشانی»، «پتانسیل مدیریت هوشمند بار» و «پایداری ساختار منابع انرژی» ارائه می‌دهند.

۳. تعریف و فرمول‌های محاسباتی شاخص‌ها

۳.۱. شاخص کارایی مصرف ایده‌آل (IEER)

برای هر ساختمان کشاورزی، مصرف واقعی سالانه انرژی نهایی را با E_{real} و مصرف ایده‌آل استاندارد شده بر اساس اقلیم و کاربری را با E_{ideal} نشان می‌دهیم. شاخص IEER به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$IEER = E_{actual} / E_{ideal}$$

که در آن:

E_{actual}: مصرف واقعی انرژی

E_{ideal}: مصرف ایده‌آل بر اساس شرایط اقلیمی

به‌طور معمول، مقدار کمتر از ۱ نشان‌دهنده عملکرد بهتر از استاندارد و مقدار بالاتر از ۱ نشان‌دهنده مصرف بیشتر از مقدار ایده‌آل است. در فرایند رتبه‌بندی، IEER یک شاخص «هزینه‌ای» (cost-type) محسوب می‌شود و باید نرمال‌سازی معکوس روی آن انجام گیرد.

۳.۲. 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



اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره‌وری مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی ۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵ هتل المپیک - تهران



E_{total} : کل مصرف سالانه انرژی

۳.۳. شاخص تطابق زمانی تولید و مصرف (EMI)

$$EMI = \text{Sum}(\min(G_t, L_t)) / \text{Sum}(L_t)$$

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.

۳.۴. 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 (Jensen et al., 2017). یکی از رویکردهای متداول، تعریف EFI بر اساس نسبت بارهای قابل انعطاف به کل بار است:

$$EFI = (\text{Shiftable_load} + \text{Controllable_load}) / \text{Total_load}$$

Shiftable_load : بارهای قابل انتقال

Controllable_load : بارهای قابل کنترل

Total_load : کل بار مصرفی

۳.۵. شاخص تنوع منابع انرژی (EDI)

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

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.

بررسی جامعیت شاخص‌های پیشنهادی:

۱. جامعیت شاخص IEER در ارزیابی کارایی مصرف انرژی



اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره‌وری مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی ۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵ هتل المپیک - تهران



شاخص IEER با مقایسه مصرف واقعی انرژی با انرژی ایده‌آل مبتنی بر شرایط اقلیمی، امکان سنجش دقیق «کارایی ذاتی» ساختمان را فراهم می‌کند. این شاخص به‌ویژه در ساختمان‌های کشاورزی که دارای الگوهای مصرف پیوسته و بارهای حساس نظیر تهویه مرغداری‌ها و سردخانه‌ها هستند، بسیار مناسب است.

ویژگی برجسته IEER، استقلال آن از نوع انرژی تولیدی و تمرکز بر کارایی مصرف است موضوعی که در بسیاری از استانداردهای NZEB نادیده گرفته می‌شود (Attia et al., 2018). این شاخص پایه تحلیلی لازم برای تفکیک «مصرف بهینه» از «وابستگی به انرژی تجدیدپذیر» را فراهم می‌کند و مانع ایجاد خطاهای تحلیلی می‌شود که صرفاً افزایش تولید انرژی را معادل عملکرد بهتر تلقی می‌کنند.

۲. پوشش‌دهی شاخص RESS در سنجش میزان خودکفایی انرژی

شاخص RESS یکی از ضروری‌ترین مؤلفه‌ها در ارزیابی ساختمان انرژی صفر است، زیرا درصد انرژی تجدیدپذیر تأمین‌شده را براساس ترکیبی از منابع داخل و خارج سایت محاسبه می‌کند. اهمیت RESS در این است که پایداری واقعی انرژی را اندازه‌گیری می‌کند و برخلاف معیارهای ساده، صرفاً میزان نصب تجهیزات را نمی‌سنجد بلکه نقش مشارکت‌های انرژی و گواهی‌های تجدیدپذیر را نیز لحاظ می‌کند (Li et al., 2020).

این جامعیت باعث می‌شود شاخص RESS هم بُعد مالکیتی، هم بُعد عملیاتی و هم بُعد محیط‌زیستی تأمین انرژی را پوشش دهد—نکته‌ای که در ساختمان‌های کشاورزی با پراکندگی جغرافیایی و دسترسی نامتوازن به منابع تجدیدپذیر، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

۳. تحلیل جامعیت شاخص EMI در سنجش کیفیت هم‌زمانی تولید و مصرف انرژی

شاخص EMI از محدود شاخص‌هایی است که کیفیت زمانی تولید انرژی تجدیدپذیر را در ارتباط با مصرف انرژی می‌سنجد. بسیاری از استانداردهای NZEB صرفاً بر تراز سالانه انرژی تمرکز دارند و مسئله «زمان تولید» و «زمان مصرف» را نادیده می‌گیرند، درحالی‌که هم‌زمانی پایین می‌تواند نیاز به ذخیره‌سازی یا برق شبکه را افزایش دهد (Luthander et al., 2015).

EMI این خلأ را با تحلیل ارزیابی هم‌زمانی در مقیاس زمانی (ساعتی یا زیرساعتی) برطرف می‌کند و اندازه‌گیری «کاربردپذیری عملی» انرژی تجدیدپذیر را ممکن می‌سازد. چنین جزئیاتی برای ساختمان‌های کشاورزی با نوسانات بار روزانه و فصلی، اهمیت حیاتی دارد.

۴. نقش کلیدی EFI در سنجش قابلیت آینده‌پذیری و مدیریت بار

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.



اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره‌وری مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی ۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵ هتل المپیک - تهران



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 (Siano, 2020).

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.
- در بخش کشاورزی، بارهای قابل انتقال زیادی وجود دارد: جابه‌جایی ساعات آبیاری، کنترل فن‌های تهویه، تغییر زمان‌بندی سرمایش سردخانه، تنظیم روشنایی گلخانه. این ویژگی باعث می‌شود ساختمان‌های کشاورزی قابلیت انعطاف‌پذیری بالایی داشته باشند.
- افزایش EFI باعث بهبود EMI، کاهش نیاز به ذخیره‌سازی و کاهش هزینه برق می‌شود.
- این شاخص ابزاری برای بررسی قابلیت «پاسخگویی بار» (Demand Response) است که یکی از ارکان مدیریت هوشمند انرژی در NZEB است.

EFI شاخص قابلیت ارتقا و نوآوری است و تعیین می‌کند ساختمان تا چه حد می‌تواند در آینده انرژی خود را مدیریت و خودکفایی را تقویت کند

۵. جامعیت EDI در پایداری و تاب‌آوری سیستم انرژی

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 (Stirling, 1998).

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 محدود 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.
- ساختمان‌های کشاورزی از ویژگی‌های خاصی بهره می‌برند: امکان استفاده همزمان از خورشید، باد، بیوگاز از فضولات دامی، و حتی گرمای زائد گلخانه.



- 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.

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 بعد کارایی را نمایندگی می‌کند و امکان می‌دهد میزان صحیح بودن و منطقی بودن 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 و EDI، 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 نه تنها 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.

روش گام‌به‌گام الگوریتم رتبه‌دهی ساختمان انرژی‌صفر بخش کشاورزی

گام ۱: تعریف ساختمان‌های مورد ارزیابی و شاخص‌های عملکرد

در ابتدا مشخص می‌شود که چه ساختمان‌هایی قرار است مقایسه و رتبه‌بندی شوند. سپس شاخص‌هایی که قرار است معیار قضاوت باشند تعیین می‌شوند. در این روش پنج شاخص اصلی شامل کارایی مصرف انرژی، میزان خودکفایی انرژی تجدیدپذیر، همزمانی تولید و مصرف، انعطاف‌پذیری مصرف و تنوع منابع انرژی در نظر گرفته می‌شود. این مرحله در حقیقت تعیین «چارچوب ارزیابی» است.



گام ۲: گردآوری داده‌ها و تشکیل ماتریس اولیه

در این گام برای هر ساختمان، مقدار واقعی مربوط به هر یک از شاخص‌ها اندازه‌گیری یا محاسبه می‌شود. این داده‌ها در قالب یک جدول اولیه تنظیم می‌گردد. در این جدول هر سطر نشان‌دهنده یک ساختمان و هر ستون نشان‌دهنده مقدار یک شاخص است. این جدول پایه تمامی محاسبات بعدی خواهد بود.

گام ۳: یکسان‌سازی مقیاس شاخص‌ها (نرمال‌سازی داده‌ها)

از آنجا که مقادیر شاخص‌ها مقیاس‌های متفاوت دارند یک شاخص ممکن است درصد باشد و دیگری مقدار بدون واحد برای مقایسه عادلانه، تمامی مقادیر به یک مقیاس مشترک تبدیل می‌شوند. در این مرحله فقط «نسبت‌ها» مهم هستند و هدف این است که هیچ شاخصی به دلیل بزرگی عددی، تأثیر نا عادلانه بر نتیجه نگذارد. حاصل این مرحله یک جدول با مقادیر هم‌مقیاس است.

گام ۴: اعمال وزن به شاخص‌ها

همه شاخص‌ها اهمیت یکسان ندارند. برخی شاخص‌ها مانند کارایی مصرف یا خودکفایی انرژی ممکن است برای سیاست‌گذار اهمیت بیشتری داشته باشند. بنابراین برای هر شاخص یک وزن تعیین می‌شود. سپس جدول نرمال‌شده مرحله قبل با این وزن‌ها ترکیب می‌شود تا مشخص شود کدام ساختمان در شاخص‌های مهم‌تر عملکرد بهتری دارد. این مرحله، جدول «وزن‌دار» را ایجاد می‌کند.

گام ۵: تعیین وضعیت ایده‌آل و ضدایده‌آل

در این گام دو نقطه مرجع ساخته می‌شود:

- وضعیت ایده‌آل: بهترین عملکرد ممکن در هر شاخص (بالاترین مقدار).
- وضعیت ضدایده‌آل: بدترین عملکرد ممکن در هر شاخص (پایین‌ترین مقدار).

این دو وضعیت مانند دو قطب عمل می‌کنند و قرار است هر ساختمان بررسی شود که چقدر به بهترین حالت نزدیک و چقدر از بدترین حالت دور است.

گام ۶: سنجش فاصله ساختمان‌ها از وضعیت‌های ایده‌آل



در این مرحله برای هر ساختمان بررسی می‌شود:

- چقدر به وضعیت ایده‌آل نزدیک است؟
- چقدر از وضعیت ضدایده‌آل فاصله دارد؟

این فاصله‌ها نشان می‌دهند که هر ساختمان از نظر مجموعه شاخص‌ها در چه جایگاهی ایستاده است. هرچه فاصله یک ساختمان از «بهترین حالت» کمتر و از «بدترین حالت» بیشتر باشد، عملکرد آن مطلوب‌تر محسوب می‌شود.

گام ۷: محاسبه شاخص نزدیکی به وضعیت ایده‌آل

در این گام فاصله‌هایی که در مرحله قبل محاسبه شدند ترکیب می‌شوند تا یک عدد نهایی برای هر ساختمان به‌دست آید. این عدد نشان می‌دهد که ساختمان تا چه اندازه به وضعیت مطلوب نزدیک است. مقدار این شاخص همیشه بین صفر و یک است و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد، یعنی ساختمان بهینه‌تر و کارآمدتر است.

گام ۸: رتبه‌بندی نهایی ساختمان‌ها

در آخر ساختمان‌ها بر اساس مقدار شاخص نزدیکی (که در گام قبل محاسبه شد) مرتب می‌شوند. ساختمانی که بیشترین مقدار را به دست آورده باشد، بهترین عملکرد انرژی را دارد و در رتبه اول قرار می‌گیرد. به همین ترتیب سایر ساختمان‌ها به صورت نزولی رتبه‌بندی می‌شوند.

به طور خلاصه، این الگوریتم ابتدا داده‌های انرژی ساختمان‌ها را جمع‌آوری و هم‌مقیاس می‌کند، سپس با توجه به اهمیت هر شاخص آن‌ها را وزن‌دهی کرده و بهترین و بدترین عملکرد ممکن را تعیین می‌کند. در نهایت فاصله هر ساختمان از این دو نقطه محاسبه شده و ساختمان‌ها بر اساس میزان نزدیکی به وضعیت ایده‌آل رتبه‌بندی می‌شوند.

ارزیابی چندمعیاره سامانه‌های انرژی—به‌ویژه در حوزه ساختمان‌های انرژی صفر کشاورزی—نیازمند تعیین وزن شاخص‌هایی است که بیانگر اهمیت نسبی ابعاد مختلف عملکرد انرژی هستند. وزن شاخص‌ها نقش کلیدی در رتبه‌بندی نهایی دارد، زیرا میزان تأثیر هر شاخص را بر نتیجه تعیین می‌کند. در ادبیات علمی سه رویکرد اصلی برای وزن‌دهی وجود دارد: روش‌های ذهنی^{۱۱}، روش‌های عینی^{۱۲} و روش‌های ترکیبی^{۱۳} در ادامه ویژگی‌ها، نقاط قوت و ضعف هر دسته به صورت توصیفی مطرح می‌شود.

¹¹ Subjective

¹² Objective

¹³ Hybrid



۱. روش‌های ذهنی وزن‌دهی^{۱۴}

این روش‌ها بر پایه قضاوت انسانی و سوابق کارشناسی عمل می‌کنند. مهم‌ترین روش‌های این گروه عبارت‌اند از:

• روش AHP

وزن‌ها از طریق مقایسه‌های زوجی تعیین می‌شوند. این روش به دلیل ساختار سلسله‌مراتبی و سادگی، بسیار رایج است.

مزایا:

- قابل فهم برای تصمیم‌گیران
- امکان انعکاس ترجیحات انسانی
- مناسب برای شرایطی که داده‌های کمی محدودند

معایب:

- وابسته به قضاوت‌های ذهنی
- حساسیت بالا به عدم سازگاری قضاوت‌ها
- احتمال سوگیری انسانی و عدم تکرارپذیری نتایج

• روش DEMATEL و ANP

این روش‌ها روابط تعاملی میان شاخص‌ها را لحاظ می‌کنند.

مزایا:

- قابلیت مدل‌سازی روابط پیچیده میان معیارها
- توجه به بازخورد و تعامل شاخص‌ها

معایب:

- وابستگی کامل به قضاوت کارشناسان



- نتایج در صورت تغییر نظر متخصصان قابل تغییر است
- اجرای پیچیده‌تر

جمع‌بندی روش‌های ذهنی

این روش‌ها مفید هستند اما نمی‌توانند ساختار واقعی داده‌ها را نمایان کنند و همواره امکان وجود سوگیری انسانی وجود دارد.

۲. روش‌های عینی وزن‌دهی^{۱۵}

در این روش‌ها وزن شاخص‌ها مستقیماً از خودِ داده‌ها استخراج می‌شود و هیچ‌گونه قضاوت انسانی در تعیین آن دخالت ندارد. مهم‌ترین روش‌های این دسته عبارت‌اند از:

• روش آنترופی^{۱۶}

مبنای وزن‌دهی بر میزان پراکندگی داده‌هاست.

مزایا:

- کاملاً داده‌محور
- بدون دخالت انسانی
- ساده، سریع و قابل پیاده‌سازی

معایب:

- فقط بر اساس پراکندگی وزن می‌دهد، نه روابط میان شاخص‌ها
- اگر همه داده‌ها پراکندگی مشابه داشته باشند، وزن‌ها غیرواقعی می‌شوند
- معنی‌داری فیزیکی وزن‌ها همیشه روشن نیست

¹⁵ Objective Weighting

¹⁶ Entropy Weighting



اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره‌وری مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی ۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵ هتل المپیک - تهران



• روش CRITIC

وزن‌ها بر اساس دو عامل تعیین می‌شوند: (۱) میزان پراکندگی، (۲) میزان همبستگی میان شاخص‌ها.

مزایا:

- جامع‌تر از آنتروپی
- توجه همزمان به تضاد اطلاعات و همبستگی شاخص‌ها

معایب:

- هنوز فقط ساختاری خطی از داده‌ها را می‌سنجد
- حساسیت بالا به نرمال‌سازی داده‌ها
- ممکن است وزن‌ها بیش از حد به پراکندگی متکی شوند

جمع‌بندی روش‌های عینی

این روش‌ها عینی و تکرارپذیر هستند، اما بخشی از ساختار واقع‌بینانه تعامل میان شاخص‌ها و سهم واقعی هر شاخص در عملکرد نهایی را نادیده می‌گیرند.

۳. روش‌های ترکیبی^{۱۷}

این روش‌ها وزن ذهنی و عینی را ترکیب می‌کنند؛ برای مثال، در برخی مدل‌ها وزن اولیه با AHP تعیین می‌شود و سپس با آنتروپی تصحیح می‌گردد.

مزایا:

- امکان استفاده همزمان از دانش کارشناسان و ساختار داده‌ها
- انعطاف‌پذیری بالا

معایب:



- پیچیدگی زیاد
- وابستگی نتایج به نحوه ترکیب وزن‌ها
- گاهی ارزیابی اعتبار مدل دشوار است

جمع‌بندی سه رویکرد

در ارزیابی ساختمان‌های انرژی صفر کشاورزی که داده‌ها رفتار پیچیده، دینامیک و غیرخطی دارند، روش‌های ذهنی و روش‌های صرفاً داده‌محور ساده (مانند آنتروپی) نمی‌توانند واقعیت فنی و آماری داده‌ها را به‌طور کامل بازتاب دهند. اینجاست که روش‌های مدل‌محور و داده‌محور قوی‌تر مانند حداقل مربعات اهمیت می‌یابند.

۴. دلیل انتخاب روش حداقل مربعات برای این پژوهش

روش حداقل مربعات ^{۱۸} یک روش عینی مبتنی بر مدل آماری است که نه صرفاً مقایسه پراکندگی داده‌ها را ملاک قرار می‌دهد و نه وابسته به ترجیحات ذهنی انسان است.

مهم‌ترین دلایل انتخاب این روش:

(۱) استخراج وزن‌ها از رفتار واقعی شاخص‌ها

روش حداقل مربعات وزن شاخص را بر اساس سهم واقعی آن معیار در تبیین عملکرد کلی ساختمان‌ها تعیین می‌کند.

(۲) توانایی مدل در فهم روابط میان شاخص‌ها

در ساختمان‌های کشاورزی بسیاری از شاخص‌ها دارای هم‌بستگی هستند (مثلاً RESS و EMI).

روش آنتروپی این روابط را نادیده می‌گیرد، اما حداقل مربعات آن‌ها را به‌طور طبیعی وارد مدل می‌کند.

(۳) تکرارپذیری کامل و بدون سوگیری

وزن‌ها تنها از داده‌ها استخراج می‌شوند و هیچ قضاوت ذهنی وارد مدل نمی‌شود.

(۴) پایداری و سازگاری بالا در مقابل داده‌های واقعی انرژی



رفتار انرژی در سامانه‌های گلخانه، مرغداری یا دامداری بسیار متغیر و اقلیم‌محور است.

حداقل مربعات بهترین ابزار برای استخراج وزن‌های پایدار و قابل اعتماد از چنین داده‌هایی است.

۵) سازگاری کامل با مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

خروجی این روش مجموعه وزن‌هایی کاملاً نرمال شده و آماده استفاده در الگوریتم رتبه‌بندی است.

۵. چارچوب و ساختار مدل وزن‌دهی حداقل مربعات

روش حداقل مربعات بر پایه یک مدل بازسازی خطی بنا شده است. چارچوب مدل شامل مراحل زیر است:

مرحله ۱: تعریف امتیاز عملکرد کلی

برای هر ساختمان یک مقدار «عملکرد کلی» فرض می‌شود که هدف مدل، بازسازی دقیق آن است.

این مقدار معمولاً از میانگین شاخص‌ها یا یک شاخص کلیدی استخراج می‌شود.

مرحله ۲: مدل‌سازی امتیاز به عنوان ترکیب خطی شاخص‌ها

امتیاز کلی هر ساختمان برابر است با:

«مجموع شاخص‌ها × وزن‌های ناشناخته»

در اینجا وزن‌ها پارامترهایی هستند که باید تعیین شوند.

مرحله ۳: محاسبه خطای بازسازی

برای هر ساختمان مابه‌التفاوت میان:

- امتیاز واقعی
 - امتیاز بازسازی‌شده با وزن‌های پیشنهادی
- محاسبه می‌شود.



این اختلاف «خطا»^{۱۹} نام دارد.

مرحله ۴: تعریف تابع هدف (Objective Function)

هدف مدل کمینه کردن مجموع مربع این خطاهاست.

زیرا مربع شدن خطاها:

- اختلاف‌های بزرگ را بیشتر تنبیه می‌کند
- پاسخ یکتا و پایدار ارائه می‌دهد
- محاسبات را ساده و قابل حل می‌سازد

مرحله ۵: حل مدل و تعیین وزن‌ها

با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی خطی و جبری، وزن‌هایی که خطا را حداقل می‌کنند استخراج می‌شوند.

این وزن‌ها:

- نرمال‌سازی می‌شوند
- مجموع‌شان برابر یک می‌گردد
- در رتبه‌بندی نهایی ساختمان‌ها به کار می‌روند

۶. نتیجه‌گیری

وزن‌دهی شاخص‌ها یکی از مهم‌ترین مراحل ارزیابی ساختمان‌های انرژی صفر است.

در میان روش‌های موجود، روش حداقل مربعات بهترین توازن را میان عینیت، دقت آماری، بی‌سوگیری و سازگاری با داده‌های واقعی انرژی برقرار می‌کند.



این روش به‌ویژه برای بخش کشاورزی—که رفتار انرژی سیستم‌ها پیچیده، زمان‌متغیر و غیرایستا است—یک ابزار قدرتمند و علمی برای تعیین وزن شاخص‌های عملکرد انرژی به شمار می‌رود.

در این مطالعه، برای تعیین وزن شاخص‌های ارزیابی ساختمان انرژی صفر کشاورزی از روش **حداقل مربعات داده‌محور** استفاده شده است. شاخص‌های انتخابی شامل **IEER، RESS، EMI، EFI و EDI** هستند که همگی از ادبیات روز، استانداردهای انرژی و نیازهای خاص بخش کشاورزی استخراج شده و ابعاد کلیدی کارایی و پایداری سامانه انرژی را پوشش می‌دهند.

در این رویکرد، یک **شاخص ترکیبی** برای هر واحد (ساختمان/سناریو) ساخته می‌شود که از برهم‌نهی وزنی مقادیر پنج شاخص تشکیل می‌گردد. هدف روش این است که وزن‌ها به‌گونه‌ای تعیین شوند که این شاخص ترکیبی، نماینده‌ای سازگار و نزدیک برای الگوی کلی عملکرد چندشاخصه باشد؛ به بیان دیگر، مدل طوری وزن‌ها را تنظیم می‌کند که **مجموع اختلاف‌های مربعی** (بین شاخص ترکیبی و رفتار شاخص‌های منفرد) حداقل شود.

نکته کلیدی در این روش، نحوه برخورد با **همبستگی منفی** بین شاخص‌هاست. اگر یک شاخص مانند **EMI** یا هر یک از شاخص‌های دیگر با روند کلی سایر شاخص‌ها در تضاد باشد (مثلاً همبستگی منفی حدود -0.70 داشته باشد)، افزایش وزن آن شاخص باعث می‌شود شاخص ترکیبی ساخته‌شده از مسیر اصلی هم‌راستایی چندشاخصه منحرف شود. این انحراف در تابع هدف (که مبتنی بر اختلاف مربعی است) به صورت **خطای بیشتر** ظاهر می‌شود؛ بنابراین الگوریتم به شکل خودکار برای کاهش خطا، **وزن آن شاخص متضاد را کوچک‌تر** در نظر می‌گیرد. نتیجه عملی این موضوع آن است که حتی اگر مقدار یا تغییرات یک شاخص از نظر عددی قابل توجه باشد، اما چون «جهت اثرگذاری» آن با سیستم کلی همسو نیست، سهم آن در شاخص ترکیبی محدود می‌شود. به همین دلیل وزن‌هایی مانند حدود 0.1 برای شاخص‌های دارای همبستگی منفی مشاهده می‌شوند.

در مجموع، چون **IEER، RESS، EMI، EFI و EDI** هر یک بُعد متفاوتی از ساختمان انرژی صفر کشاورزی را توصیف می‌کنند (کارایی مصرف ایده‌آل، خودکفایی تجدیدپذیر، هم‌زمانی تولید و مصرف، انعطاف‌پذیری بار و تنوع منابع انرژی)، روش حداقل مربعات داده‌محور با سنجش سازگاری جهت‌دار شاخص‌ها، وزن‌دهی را به نحوی انجام می‌دهد که **شاخص‌های هم‌جهت با الگوی کلی عملکرد، سهم بیشتری و شاخص‌های متضاد با روند سیستم، سهم کمتری** در رتبه‌بندی نهایی داشته باشند.



اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره‌وری مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی ۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵ هتل المپیک - تهران



در این بخش، عملکرد انرژی یک ساختمان کشاورزی (مرغداری) با استفاده از پنج شاخص کلیدی شامل IEER، RESS، EMI، EDI و ارزیابی می‌شود. این شاخص‌ها بیانگر کارایی مصرف، میزان خودکفایی، کیفیت تطابق زمانی، ظرفیت انعطاف‌پذیری و میزان تنوع منابع انرژی هستند

۱. داده‌های ورودی ساختمان

مصرف واقعی سالانه:

$$E_{real} = 120000 \text{ kWh}$$

مصرف ایده‌آل استاندارد:

$$E_{ideal} = 90000 \text{ kWh}$$

تولید انرژی تجدیدپذیر:

$$E_{RE} = 50000 \text{ kWh}$$

مصرف همزمان با تولید تجدیدپذیر:

$$E_{match} = 30000 \text{ kWh}$$

حداکثر توان جابجایی‌پذیر بار:

$$P_{flex} = 20 \text{ kW}$$

اوج بار ساختمان:

$$P_{peak} = 100 \text{ kW}$$

سهم انرژی از منابع مختلف:

$$\text{Solar} = 0.25$$

$$\text{Grid} = 0.70$$

$$\text{Diesel} = 0.05$$

۲. محاسبه شاخص‌ها

۲.۱ شاخص کارایی انرژی IEER



اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره‌وری
مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی
۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵ هتل المپیک - تهران



فرمول:

$$IEER = E_{real} / E_{ideal}$$

محاسبه:

$$IEER = 120000 / 90000 = 1.333$$

تفسیر: مقدار بیشتر از ۱ نشان‌دهنده مصرف بیشتر از حد ایده‌آل است.

۲.۲ شاخص خودکفایی انرژی RESS

فرمول:

$$RESS = E_{RE} / E_{real}$$

محاسبه:

$$RESS = 50000 / 120000 = 0.416$$

(کمتر از ۰.۵ → سهم تجدیدپذیر کمتر از ۵۰ درصد مصرف)

۲.۳ شاخص تطابق زمانی EMI

فرمول:

$$EMI = E_{match} / E_{RE}$$

محاسبه:

$$EMI = 30000 / 50000 = 0.60$$

۲.۴ شاخص انعطاف‌پذیری بار EFI

فرمول:

$$EFI = P_{flex} / P_{peak}$$

محاسبه:



$$EFI = 20 / 100 = 0.20$$

۲.۵ شاخص تنوع منابع انرژی EDI (براساس Simpson)

فرمول:

$$EDI = 1 - (Solar^2 + Grid^2 + Diesel^2)$$

محاسبه مربع سهم‌ها:

$$Solar^2 = 0.25^2 = 0.0625$$

$$Grid^2 = 0.70^2 = 0.4900$$

$$Diesel^2 = 0.05^2 = 0.0025$$

جمع:

$$Sum = 0.0625 + 0.4900 + 0.0025 = 0.555$$

سپس:

$$EDI = 1 - 0.555 = 0.445$$

۳. نرمال‌سازی شاخص‌ها (روش Min-Max)

دامنه‌های مرجع:

$$IEER: 0.9 \text{ تا } ۱.۶$$

$$RESS: 0.20 \text{ تا } ۰.۶۰$$

$$EMI : 0.30 \text{ تا } ۰.۸۰$$

$$EFI : 0.10 \text{ تا } ۰.۴۰$$

$$EDI : 0.20 \text{ تا } ۰.۸۰$$

فرمول عمومی نرمال‌سازی:



$$X_{\text{norm}} = (X - X_{\text{min}}) / (X_{\text{max}} - X_{\text{min}})$$

نرمال سازی IEER

$$\text{IEER}_{\text{norm}} = (1.333 - 0.9) / (1.6 - 0.9)$$

$$\text{IEER}_{\text{norm}} = 0.62$$

نرمال سازی RESS

$$\text{RESS}_{\text{norm}} = (0.416 - 0.20) / (0.40)$$

$$\text{RESS}_{\text{norm}} = 0.54$$

نرمال سازی EMI

$$\text{EMI}_{\text{norm}} = (0.60 - 0.30) / (0.50)$$

$$\text{EMI}_{\text{norm}} = 0.60$$

نرمال سازی EFI

$$\text{EFI}_{\text{norm}} = (0.20 - 0.10) / (0.30)$$

$$\text{EFI}_{\text{norm}} = 0.33$$

نرمال سازی EDI

$$\text{EDI}_{\text{norm}} = (0.445 - 0.20) / (0.60)$$

$$\text{EDI}_{\text{norm}} = 0.408$$

۴. وزن دهی شاخص‌ها با روش حداقل مربعات (LSW)

همبستگی شاخص‌ها با امتیاز کل در مجموعه‌ای از نمونه‌های مشابه:

$$\text{IEER} = 0.50$$

$$\text{RESS} = 0.65$$

$$\text{EMI} = 0.70$$



اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره‌وری
مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی
۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵ هتل المپیک - تهران



$$EFI = 0.55$$

$$EDI = 0.60$$

مجموع همبستگی‌ها:

$$Sum = 3.00$$

وزن‌ها:

$$W_{IEER} = 0.50 / 3.00 = 0.17$$

$$W_{RESS} = 0.65 / 3.00 = 0.22$$

$$W_{EMI} = 0.70 / 3.00 = 0.23$$

$$W_{EFI} = 0.55 / 3.00 = 0.18$$

$$W_{EDI} = 0.60 / 3.00 = 0.20$$

۵. محاسبه شاخص ترکیبی ساختمان

فرمول:

$$C = (W1 * IEER_{norm}) + (W2 * RESS_{norm}) + (W3 * EMI_{norm}) + (W4 * EFI_{norm}) + (W5 * EDI_{norm})$$

جایگذاری اعداد:

$$C = (0.17 * 0.62) + (0.22 * 0.54) + (0.23 * 0.60) + (0.18 * 0.33) + (0.20 * 0.41)$$

محاسبه مرحله به مرحله:

$$0.17 * 0.62 = 0.105$$

$$0.22 * 0.54 = 0.118$$

$$0.23 * 0.60 = 0.138$$

$$0.18 * 0.33 = 0.059$$

$$0.20 * 0.41 = 0.082$$

$$C = 0.502 \text{ جمع کل}$$



۶. تبدیل به مقیاس ۱۰۰ امتیازی

فرمول:

$$\text{Score}_{100} = C * 100$$

محاسبه:

$$\text{Score}_{100} = 0.502 * 100 = 50.2$$

نتایج حاصل از محاسبات نشان می‌دهد که ساختمان مورد بررسی با کسب امتیاز نهایی ۵۰.۲ از ۱۰۰ در طبقه عملکرد متوسط رو به ضعیف قرار می‌گیرد. این مقدار بیانگر آن است که اگرچه برخی ابعاد رفتاری سیستم انرژی عملکرد قابل قبولی دارند، اما ترکیب کلی شاخص‌ها نشان می‌دهد که ساختمان هنوز فاصله معناداری با وضعیت «بهینه» یا «انرژی نزدیک به صفر» دارد. بررسی دقیق پنج شاخص کلیدی، تصویر واضح‌تری از ریشه‌های این امتیاز ارائه می‌دهد.

نخست، شاخص کارایی انرژی IEER با مقدار نرمال شده ۰.۶۲ نشان می‌دهد که مصرف واقعی ساختمان حدود ۳۳ درصد بیشتر از مقدار ایده‌آل است؛ بنابراین، بخش کارایی مصرف یکی از نقاط ضعف اصلی سیستم است. این موضوع به‌طور مستقیم با راندمان تجهیزات، الگوهای مصرف و عدم وجود کنترل‌های هوشمند مرتبط است. به عبارتی، کاهش مصرف پایه و اصلاح الگوی بار می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد کلی داشته باشد.

دوم، شاخص خودکفایی انرژی RESS برابر با ۰.۴۱۶ بیان می‌کند که تنها ۴۱ درصد از مصرف سالانه از طریق منابع تجدیدپذیر تأمین می‌شود. این مقدار کمتر از آستانه ۵۰ درصد بوده و نشان‌دهنده وابستگی نسبتاً زیاد ساختمان به شبکه است. هرچند ظرفیت تولید تجدیدپذیر موجود قابل توجه است، اما همچنان برای رسیدن به سطح انرژی نزدیک به صفر کفایت نمی‌کند.

شاخص EMI با مقدار ۰.۶۰ عملکرد نسبتاً خوبی را نشان می‌دهد و بیانگر آن است که بخش قابل قبولی از انرژی تولیدی دقیقاً در زمان نیاز مصرف شده است. این رفتار مثبت احتمالاً ناشی از ویژگی‌های پروفایل بار مرغداری و میزان هم‌پوشانی ساعات تابش با فعالیت‌های داخلی است. این شاخص یکی از عناصر تقویت‌کننده امتیاز نهایی محسوب می‌شود.

شاخص EFI با مقدار ۰.۳۳ نشان می‌دهد که حدود یک‌سوم توان پیک ساختمان قابلیت جابه‌جایی یا مدیریت دارد. هرچند این مقدار بد نیست، اما همچنان ظرفیت رشد بالایی دارد. افزایش قابلیت‌های ذخیره‌سازی انرژی یا اعمال استراتژی‌های پاسخ‌گویی بار می‌تواند این شاخص را تقویت کند.

در نهایت، شاخص تنوع انرژی EDI با مقدار ۰.۴۴۵ بیانگر آن است که سیستم از نظر تعدد منابع انرژی چندان متنوع نیست و وابستگی ۷۰ درصدی به شبکه برق، باعث کاهش محسوس این شاخص شده است. این امر علاوه بر کاهش تاب‌آوری سیستم، اثر منفی مستقیمی بر امتیاز نهایی ترکیبی گذاشته است.



به‌طور کلی، تحلیل شاخص‌ها نشان می‌دهد که ضعف در سه بخش «کارایی مصرف»، «سطح تولید تجدیدپذیر» و «تنوع منابع» مهم‌ترین عوامل کاهش امتیاز هستند؛ در حالی که «تطابق زمانی» و «انعطاف‌پذیری نسبی» نقاط مثبت عملکرد می‌باشند. بنابراین، مسیر بهبود عملکرد انرژی این ساختمان باید با تمرکز بر ارتقای راندمان تجهیزات، افزایش سهم انرژی تجدیدپذیر و ایجاد یک آرایش متنوع‌تر از منابع انرژی دنبال شود. با اعمال این اصلاحات، احتمالاً امتیاز نهایی ساختمان به‌صورت قابل توجهی افزایش خواهد یافت.

نتیجه‌گیری:

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 عدم قطعیت در پیکربندی منابع انرژی بر شاخص‌های پیشنهادی بررسی گردد.

فهرست منابع و مراجع:

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.
8. FAO. (2019). The state of food and agriculture: Moving forward on food loss and waste reduction. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
9. Foteinis, S. (2021). Agricultural energy efficiency and climate change: A global review. *Journal of Environmental Management*, 294, 113008.
10. González, A. B. R., Díaz, J. J. V., & Molina, A. P. (2018). Energy assessment of livestock farming: Methodologies and applications. *Applied Energy*, 229, 1090–1103.
11. Hernández, P., & Kenny, P. (2010). From net energy to zero energy buildings: Life cycle considerations. *Energy and Buildings*, 42(6), 815–821.
12. IEA. (2020). Energy use in agriculture. International Energy Agency.
13. IEA. (2022). Renewables 2022: Analysis and forecast to 2027. International Energy Agency.
14. ISO. (2017). ISO 52000-1: Energy performance of buildings—Overarching EPB assessment. International Organization for Standardization.

15. Jensen, S. Ø., Marszal-Pomianowska, A., Lollini, R., Pasut, W., Knotzer, A., Engelmann, P., & Stafford, A. (2017). Energy flexibility as a key asset in a smart building future. *Proceedings of the IEEE*, 105(11), 2192–2204.
16. Kolokotsa, D., Rovas, D., Kosmatopoulos, E., & Kalaitzakis, K. (2011). A roadmap towards intelligent net zero- and positive-energy buildings. *Solar Energy*, 85(12), 3067–3084.
17. Li, D. H. W., Yang, L., & Lam, J. C. (2013). Zero energy buildings and their implications for sustainable development. *Energy*, 54, 1–10.
18. Marszal, A. J., Heiselberg, P., Bourrelle, J. S., Musall, E., Voss, K., Sartori, I., & Napolitano, A. (2011). Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings*, 43(4), 971–979.
19. Mitali, M., & Klein, K. (2020). Energy performance indicators and benchmarking in agricultural buildings. *Energy and Buildings*, 223, 110173.
20. Moreshet, S., Halachmi, I., & Antler, A. (2019). Energy management in dairy farms: A review. *Biosystems Engineering*, 186, 164–179.
21. Nielsen, C. B., Madsen, H., & Andersen, K. K. (2016). Evaluation of energy flexibility in buildings. *Energy Procedia*, 95, 265–271.
22. Reynders, G., Nuytten, T., & Saelens, D. (2018). Quantifying structural energy flexibility for active demand response. *Applied Energy*, 227, 238–253.
23. Sartori, I., Napolitano, A., & Voss, K. (2012). Net zero energy buildings: A consistent definition framework. *Energy and Buildings*, 48, 220–232.
24. Shafiee, S., & Topal, E. (2009). When will fossil fuel reserves be diminished? *Energy Policy*, 37(1), 181–189.
25. Sørensen, B., & Meibom, P. (2000). Optimal combination of renewable energy sources. *Renewable Energy*, 19(1–2), 129–137.
26. Stirling, A. (1998). On the economics and analysis of diversity. *SPRU Electronic Working Paper Series*, 28, 1–65.
27. Torcellini, P., Pless, S., Deru, M., & Crawley, D. (2006). Zero Energy Buildings: A critical look at the definition. *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*.
28. US DOE. (2015). A common definition for Zero Energy Buildings. *U.S. Department of Energy*.

29. Voss, K., Musall, E., & Lichtmesß, M. (2011). From low-energy to net zero-energy buildings: Status and perspectives. *Journal of Green Building*, 6(1), 46–57.
30. Zhou, Z., Wang, C., & Yang, H. (2019). Multi-objective optimization of nearly zero-energy buildings considering renewable energy integration. *Energy*, 172, 432–444.