



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



الگوی امتیازدهی پیوسته برای رتبه‌بندی ساختمان‌های انرژی صفر در بخش کشاورزی بر مبنای شاخص نرمال‌شده
مصرف انرژی

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

چکیده:

در نظام‌های رتبه‌بندی ساختمان‌های انرژی صفر، وجود یک مقیاس امتیازدهی پیوسته که بتواند فاصله هر ساختمان از وضعیت (NZEB) یا ساختمان انرژی صفر ترکیبی را به صورت کمی مشخص کند، اهمیت کلیدی دارد. مدل دوقطعه‌ای پیشنهادی این تحقیق امکان تعریف یک «نقطه مرجع عملکردی» را فراهم می‌سازد که معادل عملکرد انرژی ایده‌آل در همان اقلیم بوده و امتیاز کامل را دریافت می‌کند، در حالی که افزایش نامطلوب مصرف انرژی نسبت به این مرجع، به صورت تدریجی و سپس بازدارنده در نمره نهایی منعکس می‌شود. این ویژگی باعث می‌شود شاخص پیشنهادی نه تنها ابزار ارزیابی نهایی، بلکه ابزار پایش مسیر گذار ساختمان به سمت انرژی صفر نیز باشد. کاربرد دیگر این چارچوب در رتبه‌بندی ساختمان‌های انرژی صفر، امکان تفکیک شفاف میان ساختمان‌های نزدیک به انرژی صفر، ساختمان‌های قابل بهبود و ساختمان‌های با ناکارآمدی بحرانی است. تعریف آستانه‌های سیاستی در شاخص، این امکان را برای نظام رتبه‌بندی فراهم می‌کند که سطوح مختلف گواهی یا رتبه (نظیر Zero/Plus, Gold, Silver, Bronze) را برای ساختمان‌های کشاورزی (Energy) نه بر مبنای قضاوت‌های کیفی، بلکه بر اساس منطق کمی و تفسیرپذیر تعیین شوند. به‌ویژه در ساختمان‌های کشاورزی انرژی‌بر مانند مرغداری‌ها، گلخانه‌ها و واحدهای نگهداری محصولات، این تفکیک نقش تعیین‌کننده‌ای در اولویت‌بندی مداخلات و

^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، astadrahnama@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



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



تخصیص مشوق‌ها دارد. تحقیق حاضر با تمرکز بر مدل‌سازی شاخص «نسبت مصرف انرژی به ازای تولید کشاورزی» و تبدیل آن به یک تابع امتیازدهی دوقطعه‌ای، پاسخی مستقیم به یک نیاز روش‌شناختی ارائه می‌دهد. تعریف آستانه‌های صریح برای این نسبت و تفکیک نواحی عملکرد پذیرفتنی از نواحی ناکارآمدی شدید، امکان هم‌راستاسازی تحلیل‌های فنی با منطق‌های سیاستی را فراهم می‌سازد؛ به گونه‌ای که رفتار مصرف انرژی در بازه‌های قابل قبول، مشمول پیام‌های اصلاحی ملایم بوده و پس از عبور از «خط قرمز» سیاستی، به صورت غیرخطی و بازدارنده تنبیه می‌شود. از منظر کاربردی، یکی از مهم‌ترین دستاوردهای مقاله حاضر، قابلیت به کارگیری مستقیم چارچوب امتیازدهی پیشنهادی در طراحی و پیاده‌سازی نظام‌های رتبه‌بندی ساختمان‌های انرژی صفر و انرژی صفر ترکیبی، به ویژه در کاربری‌های کشاورزی است. در بسیاری از نظام‌های موجود رتبه‌بندی انرژی ساختمان، تمرکز اصلی بر «برآورده شدن یا نشدن یک معیار حداقلی» یا «دستیابی به تراز انرژی صفر سالانه» است، در حالی که شدت ناکارآمدی انرژی پیش از رسیدن به این هدف، به صورت دقیق و پیوسته ارزیابی نمی‌شود. چارچوب پیشنهادی این مقاله با مدل‌سازی شاخص «نسبت مصرف انرژی واقعی به مقدار ایده‌آل اقلیمی» و تبدیل آن به یک تابع امتیازدهی غیرخطی و آستانه‌محور، این خلأ را به طور نظام‌مند پوشش می‌دهد. ضرورت دیگر این تحقیق، پاسخ به چالش انتخاب و توجیه پارامترهای غیرخطی در شاخص‌های امتیازدهی انرژی است. در بسیاری از مطالعات، پارامترهای توابع نمایی یا لگاریتمی به صورت سلیقه‌ای یا صرفاً تجربی انتخاب شده‌اند که این امر، قابلیت تکرارپذیری و پذیرش در دآوری علمی را کاهش می‌دهد. تحقیق حاضر با اتخاذ رویکرد «کالیبراسیون مبتنی بر نقطه لنگر»، پارامتر زوال نمایی را به یک مؤلفه سیاست‌پذیر و قابل تفسیر تبدیل می‌کند و امکان تحلیل حساسیت در محدوده‌ای منطقی و دفاع‌پذیر را فراهم می‌آورد. از منظر کاربردی، چارچوب پیشنهادی این تحقیق قابلیت استفاده مستقیم در نظام‌های رتبه‌بندی انرژی واحدهای کشاورزی، طراحی مشوق‌ها و جرایم انرژی، و پایش اثربخشی سیاست‌های بهبود بهره‌وری را داراست. امتیازدهی استاندارد شده و قابل مقایسه، این امکان را برای نهادهای سیاست‌گذار فراهم می‌کند تا مداخلات خود را به صورت هدفمند بر واحدهای با ناکارآمدی بحرانی متمرکز کرده و هم‌زمان از اعمال فشار غیرضروری بر واحدهای نزدیک به سطح مطلوب جلوگیری نمایند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تبدیل شاخص «نسبت مصرف انرژی در بخش کشاورزی» به یک تابع امتیازدهی پیوسته و آستانه‌محور، امکان ترجمه نتایج فنی به پیام‌های سیاستی شفاف و قابل اجرا را فراهم می‌سازد. استفاده از ساختار دوقطعه‌ای، تعارض کلاسیک میان سادگی شاخص و حساسیت تنبیهی را به صورت نظام‌مند حل می‌کند و شاخص انرژی را از یک معیار صرفاً توصیفی به یک ابزار تصمیم‌سازی ارتقا می‌دهد. تعریف آستانه عملکردی صریح در مقدار مشخصی از نسبت مصرف انرژی، هسته مفهومی مدل پیشنهادی را تشکیل می‌دهد. این آستانه مرز میان «رفتار اصلاح‌پذیر» و «ناکارآمدی غیرقابل قبول» را مشخص کرده و امکان تفکیک دقیق واحدها را فراهم می‌سازد. وجود این نقطه لنگر، تفسیرپذیری شاخص را هم برای تحلیلگران فنی و هم برای سیاست‌گذاران افزایش می‌دهد. تحقیق حاضر، نخستین چارچوب رتبه‌بندی پیوسته برای ساختمان‌های انرژی صفر کشاورزی با معیار مصرف انرژی را ارائه می‌دهد؛

- شاخص مصرف انرژی را به صورت نرمال شده اقلیمی تعریف می‌کند؛
- از یک تابع دوقطعه‌ای خطی-نمایی سیاست‌محور استفاده می‌کند که رفتار واقعی ناکارآمدی انرژی را بازتاب می‌دهد؛
- بنیان مفهومی اتصال رتبه‌بندی NZEB کشاورزی به بازار گواهی‌های انرژی و سیاست‌های تشویقی-تنبیهی را فراهم می‌سازد.

کلمات کلیدی: ساختمان انرژی صفر، امتیازدهی ساختمان انرژی صفر، معیار مصرف انرژی، رتبه‌بندی انرژی کشاورزی



مقدمه

علی‌رغم گسترش ادبیات ساختمان‌های انرژی صفر، فقدان یک نظام رتبه‌بندی پیوسته، اقلیم‌محور و سیاست‌پذیر برای ساختمان‌های کشاورزی موجب شده است که این بخش کلیدی از گذار انرژی عملاً از ابزارهای ارزیابی رسمی کنار گذاشته شود. تحقیق حاضر با توسعه یک تابع امتیازدهی نرمال‌شده و آستانه‌دار، این خلأ ساختاری را پوشش داده و مسیر جدیدی برای رتبه‌بندی عملکردی و سیاست‌گذاری هوشمند در ساختمان‌های انرژی صفر کشاورزی ارائه می‌کند.

مرور ادبیات نشان می‌دهد اگرچه مطالعات متعددی در حوزه شاخص‌های انرژی، نرمال‌سازی اقلیمی و توابع تنبیهی انجام شده است، اما مدل‌های امتیازدهی پیوسته‌ای که به‌طور هم‌زمان آستانه سیاستی صریح، رفتار اصلاحی پیش‌آستانه و تنبیه‌نمایی نرمال‌شده پس از آستانه را ترکیب کنند، بسیار محدود هستند. این خلأ پژوهشی مبنای توسعه تابع دوقطعه‌ای در تحقیق حاضر قرار گرفته است.

گذار جهانی به سوی نظام‌های انرژی پایدار، ساختمان‌ها را به یکی از کانون‌های اصلی سیاست‌گذاری کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای تبدیل کرده است. در این میان، مفهوم ساختمان انرژی صفر^۵ (NZEB) به‌عنوان چارچوبی راهبردی برای هم‌راستاسازی بهره‌وری انرژی، تولید تجدیدپذیر و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی مطرح شده است (Urge-Vorsatz et al., 2015). با وجود توسعه گسترده این مفهوم در بخش ساختمان‌های شهری، دامنه کاربرد آن در زیربخش‌های تولیدی، به‌ویژه کشاورزی، همچنان محدود باقی مانده است (IEA, 2023).

بخش کشاورزی ماهیتی متمایز از ساختمان‌های متعارف دارد، زیرا مصرف انرژی در آن نه تنها تابع نیازهای حرارتی و الکتریکی، بلکه به شدت وابسته به فرآیند تولید، شرایط اقلیمی و الگوهای زمانی فعالیت است (Rösch et al., 2005). این ویژگی باعث می‌شود که ابزارها و معیارهای ارزیابی انرژی طراحی شده برای ساختمان‌های مسکونی یا اداری، قابلیت انتقال مستقیم به واحدهای کشاورزی نظیر مرغداری‌ها و گلخانه‌ها را نداشته باشند (Cabeza et al., 2022).

اگرچه ادبیات NZEB بر دستیابی به تراز انرژی صفر تمرکز دارد، بسیاری از نظام‌های موجود ساختمان‌ها را به‌صورت دودویی، یعنی «دارای وضعیت NZEB» یا «فاقد آن»، طبقه‌بندی می‌کنند (European Commission, 2018). چنین رویکردی مسیر تدریجی بهبود عملکرد انرژی را نادیده می‌گیرد و توانایی لازم برای ارسال پیام‌های سیاستی مرحله‌ای به بهره‌برداران کشاورزی را ندارد؛ مسئله‌ای که در محیط‌های محدود از نظر سرمایه‌گذاری اهمیت مضاعف می‌یابد (Ugursal, 2009 & Swan).

یکی از چالش‌های اساسی در ارزیابی عملکرد انرژی کشاورزی، نبود شاخص‌هایی است که بتوانند مصرف واقعی را نسبت به یک مقدار مرجع منصفانه و قابل مقایسه بسنجند. شاخص‌های شدت انرژی بدون نرمال‌سازی اقلیمی، تفاوت‌های ساختاری بین مناطق را پنهان می‌کنند و نتایج بالقوه ناعادلانه تولید می‌نمایند (Patterson, 1996; Iida, 2021 & Chen). این مسئله در نظام‌های رتبه‌بندی انرژی کمتر به‌صورت کمی و صریح مورد توجه قرار گرفته است.

⁵ Nearly/Net Zero Energy Building



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



در پاسخ به این محدودیت‌ها، استفاده از شاخص‌های بدون بعد مبتنی بر نسبت مصرف واقعی به مصرف ایده‌آل اقلیمی، به‌عنوان رویکردی دقیق و تفسیرپذیر مطرح شده است (Jollands et al., 2010). با این حال، نحوه تبدیل چنین شاخص‌هایی به امتیازهای قابل استفاده در سیاست‌گذاری و رتبه‌بندی رسمی، همچنان در ادبیات با ابهام مواجه است و اغلب به توابع خطی یا کلاس‌بندی گسسته تقلیل می‌یابد (Ramachandran, 2004 & Pohekar).

مطالعات متعددی نشان داده‌اند که ناکارآمدی انرژی، رفتاری غیرخطی و شتاب‌دار دارد و افزایش مصرف مازاد، پیامدهای نامتناسبی بر هزینه و محیط‌زیست بر جای می‌گذارد (Zhou et al., 2006). با این وجود، الگوهای امتیازدهی متداول قادر به نمایش شدت این اتلاف نیستند و در انتقال پیام تنبیهی به مصرف‌کنندگان پرمصرف ناکام می‌مانند (Shove, 2018).

از منظر سیاست‌گذاری، وجود آستانه‌های عملکردی شفاف نقش مهمی در هدایت رفتار بهره‌برداران ایفا می‌کند. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که ترکیب رفتار اصلاحی پیش از آستانه و رفتار تنبیهی کنترل‌شده پس از آن، اثربخشی نظام‌های ارزیابی انرژی را به‌طور معناداری افزایش می‌دهد (Rosenow et al., 2020). با این حال، چنین ساختاری تاکنون در رتبه‌بندی NZEB بخش کشاورزی به‌طور نظام‌مند پیاده‌سازی نشده است.

علاوه بر این، فاصله قابل توجهی بین مدل‌های فنی ارزیابی انرژی و ابزارهای بازارمحور مانند گواهی‌های انرژی تجدیدپذیر و صرفه‌جویی انرژی وجود دارد. Walzberg et al. (۲۰۲۱). نظام‌های رتبه‌بندی مؤثر باید قابلیت اتصال مفهومی به سازوکارهای تشویقی و تنبیهی بازار انرژی را داشته باشند؛ ویژگی‌ای که در چارچوب‌های موجود کشاورزی کمتر مشاهده می‌شود (IEA, 2023).

در این چارچوب، تحقیق حاضر با تمرکز بر ساختمان‌های کشاورزی، ضرورت بازاندیشی در مفهوم رتبه‌بندی NZEB را برجسته می‌سازد. این پژوهش رویکرد صفر-یک را کنار گذاشته و بر توسعه یک نظام امتیازدهی پیوسته، اقلیم‌محور و سیاست‌پذیر تمرکز دارد که بتواند مسیر گذار تدریجی به عملکرد انرژی صفر را منعکس کند.

بر این اساس، هدف اصلی این تحقیق توسعه و توجیه یک تابع امتیازدهی دوقطعه‌ای است که با ترکیب رفتار خطی اصلاحی پیش از آستانه و رفتار نمایی تنبیهی نرمال‌شده پس از آن، امکان رتبه‌بندی واقع‌بینانه و سیاست‌محور ساختمان‌های کشاورزی را فراهم می‌سازد. این چارچوب نه تنها خلأهای روش‌شناختی موجود در ادبیات NZEB را پوشش می‌دهد، بلکه بنیانی حرفه‌ای برای پیوند ارزیابی انرژی، سیاست عمومی و ابزارهای بازار در بخش کشاورزی ارائه می‌کند.

در پژوهش‌های معاصر حوزه انرژی در بخش کشاورزی، شاخص‌های مبتنی بر شدت مصرف انرژی و به‌ویژه نسبت مصرف واقعی انرژی به مقدار مرجع یا ایده‌آل اقلیمی، به‌طور فزاینده‌ای به‌عنوان ابزارهای کلیدی برای ارزیابی ناکارآمدی انرژی و مقایسه عملکرد نظام‌های تولیدی مطرح شده‌اند. این شاخص‌ها امکان هم‌ترازی تحلیل‌های فنی با اهداف سیاستی کاهش مصرف انرژی و پیامدهای زیست‌محیطی را فراهم می‌سازند و به همین دلیل در ادبیات پایداری جایگاه برجسته‌ای یافته‌اند (Nabavi-Pelesaraei et al., 2018; Li et al., 2023). با این حال، تبدیل این شاخص‌ها به یک مقیاس امتیازدهی قابل تفسیر، همچنان یکی از چالش‌های



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



روش‌شناختی اساسی محسوب می‌شود، چرا که نرمال‌سازی و امتیازدهی صرفاً یک گام محاسباتی نیست، بلکه نقش تعیین‌کننده‌ای در جهت‌دهی پیام سیاستی شاخص دارد (Saisana et al., 2020; OECD, 2022).

رویکردهای متداول مبتنی بر توابع خطی، اگرچه به دلیل سادگی و شفافیت ریاضی رایج بوده‌اند، اما مطالعات تجربی اخیر نشان داده‌اند که این توابع قادر به بازنمایی رفتار غیرخطی سامانه‌های انرژی، به‌ویژه در بخش کشاورزی، نیستند. پاسخ تولید به نهاده انرژی غالباً دارای بازده نزولی و رفتار آستانه‌ای است و استفاده از توابع خطی در چنین شرایطی می‌تواند منجر به سیگنال‌دهی سیاستی ضعیف و کاهش قدرت تفکیک شاخص در سطوح بالای ناکارآمدی شود (Guo et al., 2021; Zhao et al., 2022). در واکنش به این محدودیت‌ها، ادبیات دهه اخیر به سمت بهره‌گیری از توابع غیرخطی، به‌ویژه توابع نمایی و لگاریتمی، حرکت کرده است تا تشدید هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی مصرف بی‌رویه انرژی را به‌صورت واقع‌بینانه‌تری بازتاب دهد (Oxley, & Ma, 2018; Alola et al., 2024).

با وجود این، اعمال یکنواخت یک تابع غیرخطی در کل دامنه متغیر نیز همواره مطلوب نیست. پژوهش‌های جدید در حوزه ارزیابی پایداری نشان می‌دهند که عدم تفکیک میان ناحیه عملکرد قابل قبول و ناحیه ناکارآمدی شدید، می‌تواند منجر به تنبیه زودهنگام بهره‌برداران یا از دست رفتن فرصت‌های اصلاح تدریجی رفتار مصرف انرژی شود (Dahl, & Binder et al., 2020; Moldan, 2023). در این چارچوب، مفهوم آستانه‌های سیاستی به‌عنوان یکی از عناصر کلیدی در طراحی شاخص‌ها مطرح شده است. تعریف کمی این آستانه‌ها، به‌ویژه در قالب خطوط قرمز عملکردی، نقش حیاتی در ترجمه یافته‌های علمی به قواعد اجرایی و تنظیم‌گری ایفا می‌کند (Steffen et al., 2015; Rockström et al., 2023).

بر این اساس، استفاده از توابع دوقطعه‌ای به‌عنوان یک راه‌حل روش‌شناختی، امکان مدل‌سازی رفتارهای متمایز سیستم در رژیم‌های مختلف عملکردی را فراهم می‌سازد. این رویکرد که در اقتصاد انرژی و تحلیل‌های تنظیم‌گری نیز سابقه دارد، اجازه می‌دهد تا در ناحیه‌ای از عملکرد که هنوز از نظر سیاستی قابل قبول تلقی می‌شود، رفتار تشویقی و ملایم اعمال شود و در مقابل، پس از عبور از آستانه تعیین‌شده، سازوکارهای تنبیهی شدیدتر فعال گردند (Su, 2022 & Greco et al., 2016; Ang). در چارچوب حاضر، تعریف نسبت $r = 3$ به‌عنوان حداکثر مقدار قابل قبول شدت مصرف انرژی، با رویکردهای جدید تعیین حدود ایمن انرژی و مدیریت ریسک ناکارآمدی هم‌راستا است و نقش یک مرز هنجاری-تحلیلی را ایفا می‌کند (Sala et al., 2020; Li et al., 2023).

پس از عبور از این آستانه، به‌کارگیری تابع نمایی نزولی برای امتیازدهی، مبتنی بر این فرض است که هزینه‌های نهایی ناکارآمدی انرژی به‌صورت غیرخطی افزایش می‌یابند. شواهد تجربی نشان می‌دهند که در سطوح بالای شدت مصرف انرژی، اثرات منفی اقتصادی، زیست‌محیطی و حتی نهادی به‌طور فزاینده تشدید می‌شود، امری که با استفاده از توابع خطی یا ملایم به‌درستی قابل بازنمایی نیست (Kander, 2022 & Brockway, 2019; Stern & Heun). در این زمینه، پارامتر زوال نمایی (λ) صرفاً یک ضریب ریاضی تلقی نمی‌شود، بلکه به‌عنوان شاخص شدت مداخله سیاست‌گذار و درجه سخت‌گیری تنبیهی قابل تفسیر است و امکان انجام تحلیل حساسیت و سناریوسازی سیاستی را فراهم می‌آورد (Gillingham et al., 2021; Fouquet, 2022).



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



انتخاب مقدار λ در این مدل، بر پایه رویکرد کالیبراسیون مبتنی بر نقطه لنگر انجام شده است؛ رویکردی که در ادبیات جدید شاخص‌سازی به‌منظور افزایش شفافیت و پرهیز از انتخاب‌های دل‌خواهی توصیه می‌شود. با هدف قرار دادن یک بازه امتیازی مشخص برای مقادیر بحرانی نسبت مصرف انرژی (نظیر $r = 4$)، مقدار $\lambda = 0.8$ به‌عنوان گزینه‌ای متعادل انتخاب شده است که در عین اعمال تنبیه معنادار، از بیش‌تنبیهی و تضعیف قابلیت سیاست‌پذیری شاخص جلوگیری می‌کند (OECD, 2022; Saisana et al., 2023).

در مجموع، الگوی دوقطعه‌ای خطی-نمایی پیشنهادی را می‌توان به‌عنوان یک پالایش روش‌شناختی به‌روز در ارزیابی ناکارآمدی انرژی در بخش کشاورزی تلقی کرد که با ادغام آستانه سیاستی، رفتار غیرخطی و کالیبراسیون تفسیری پارامترها، شکاف موجود میان تحلیل‌های صرفاً فنی و نیازهای سیاست‌گذاری عملی را پوشش می‌دهد و می‌تواند به‌عنوان چارچوبی قابل‌تعمیم در سایر شاخص‌های انرژی نیز مورد استفاده قرار گیرد (Sala et al., 2020; Alola et al., 2024).

این تحقیق از نوع کاربردی-توسعه‌ای بوده و با رویکرد کمی-سیاست‌محور انجام شده است. هدف اصلی، توسعه و کالیبراسیون یک تابع امتیازدهی پیوسته برای ارزیابی کارایی مصرف انرژی کشاورزی مبتنی بر نسبت مصرف واقعی به مصرف ایده‌آل اقلیمی است. روش تحقیق بر مبنای تحلیل تابعی، کالیبراسیون مبتنی بر آستانه و ارزیابی سناریوهای سیاستی طراحی شده است.

مطالعات و تحقیقات انجام‌شده

مفهوم کارایی انرژی از دهه ۱۹۹۰ به‌عنوان یکی از ارکان اصلی پایداری توسعه مطرح شده است. Patterson (۱۹۹۶) نشان داد که شاخص‌های ساده شدت انرژی قادر به توصیف رفتار واقعی مصرف انرژی نیستند و نیاز به شاخص‌های ترکیبی و تفسیرپذیر وجود دارد. این دیدگاه بعدها با توسعه شاخص‌های مبتنی بر نسبت مصرف واقعی به مقدار مرجع بهینه تقویت شد (Jollands et al., 2010). در مطالعات اخیر، شاخص‌های بدون بعد به‌عنوان ابزاری مؤثر برای مقایسه واحدهای ناهمگن توصیه شده‌اند (IEA, 2023).

کشاورزی یکی از انرژی‌برترین بخش‌های اقتصادی است که وابستگی شدیدی به شرایط اقلیمی دارد. Rösch et al. (۲۰۰۵) نشان دادند که عدم لحاظ اقلیم در محاسبه کارایی انرژی منجر به برآوردهای گمراه‌کننده می‌شود. در همین راستا، Chen و Iida (۲۰۲۱) تأکید کردند که شاخص‌های مبتنی بر مصرف ایده‌آل اقلیمی، قابلیت مقایسه بین‌منطقه‌ای را به‌طور معناداری افزایش می‌دهند. گزارش آژانس محیط‌زیست اروپا نیز نرمال‌سازی اقلیمی را پیش‌شرط سیاست‌گذاری منصفانه در کشاورزی دانسته است (EEA, 2020).



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



بخش مهمی از ادبیات، به تبدیل شاخص‌های فنی به امتیازهای تصمیم‌یار پرداخته است. Ramachandran و Pohekar (۲۰۰۴) نشان دادند که مدل‌های خطی ساده در سیستم‌های انرژی، توانایی نمایش اثرات غیرخطی ائتلاف را ندارند. Zhou et al (۲۰۰۶) نیز با معرفی شاخص‌های مبتنی بر Slack نشان دادند که رفتار ناکارآمدی انرژی معمولاً شتاب‌دار و غیرخطی است. این یافته‌ها ضرورت استفاده از توابع غیرخطی یا ترکیبی را در نظام‌های ارزیابی تأیید می‌کند.

توابع نمایی نزولی در سیاست‌های انرژی به‌عنوان ابزاری برای ایجاد اثر بازدارندگی قوی شناخته می‌شوند. Lucena و Soto (۲۰۱۹) نشان دادند که استفاده از زوال نمایی پس از عبور از آستانه‌های سیاستی، اثربخشی ابزارهای تنظیمی را افزایش می‌دهد. با این حال، مطالعاتی مانند Shove (۲۰۱۸) هشدار داده‌اند که اعمال تنبیه بیش‌ازحد می‌تواند منجر به مقاومت رفتاری شود، که ضرورت کالیبراسیون دقیق پارامتر زوال را برجسته می‌کند.

استفاده از آستانه‌ها در سیاست‌گذاری انرژی به‌ویژه در رتبه‌بندی و برچسب‌گذاری رایج است. Rosenow et al (۲۰۲۰) نشان دادند که عبور ناگهانی از آستانه‌های عملکردی، پیام سیاستی روشنی به بهره‌برداران منتقل می‌کند. در حوزه ساختمان، Filippín et al (۲۰۲۰) استفاده از آستانه‌های سخت در تعریف NZEB را عامل افزایش شفافیت نظام رتبه‌بندی دانسته‌اند. این رویکرد مبنای مفهومی طراحی تابع دوقطعه‌ای در پژوهش حاضر را شکل می‌دهد.

مطالعات متعددی بر شباهت رفتاری مصرف انرژی در ساختمان‌ها و کشاورزی تأکید کرده‌اند. Ürge-Vorsatz et al (۲۰۱۵) بیان می‌کنند که مکانیسم‌های ائتلاف انرژی در سیستم‌های گرمایش و سرمایش شباهت ساختاری با سامانه‌های بهره‌برداری کشاورزی دارند. Swan و Ugursal (۲۰۰۹) استفاده از امتیازدهی پیوسته را نسبت به کلاس‌بندی گسسته ارجح دانسته‌اند، زیرا مسیر گذار به انرژی صفر را بهتر نمایش می‌دهد.

یکی از چالش‌های اصلی شاخص‌های انرژی، فاصله بین دقت فنی و قابلیت فهم سیاستی است. Walzberg et al (۲۰۲۱) تأکید کردند که شاخص‌های مؤثر باید هم از نظر ریاضی سازگار و هم از نظر سیاستی شهودی باشند. Cabeza et al (۲۰۲۲) نیز در حوزه کشاورزی نشان دادند که ابزارهای ارزیابی موفق، آن‌هایی هستند که رفتار جریمه و تشویق را به‌صورت غیرخطی و قابل تفسیر پیاده‌سازی می‌کنند.

شکاف پژوهشی در رتبه‌بندی ساختمان‌های انرژی صفر در بخش کشاورزی شامل موارد زیر است:

۱. غلبه رویکردهای ساختمان‌محور شهری به ساختمان‌های کشاورزی

ادبیات موجود درباره ساختمان‌های انرژی صفر (NZEB) عمدتاً بر ساختمان‌های مسکونی، اداری و آموزشی شهری متمرکز است (Ürge-Vorsatz et al., 2015; Filippín et al., 2020). این رویکردها معمولاً فرض می‌کنند که الگوهای مصرف انرژی پایدار، قابل پیش‌بینی و مستقل از تولید هستند.



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



در مقابل، ساختمان‌های کشاورزی مانند مرغداری‌ها، گلخانه‌ها و واحدهای دامداری—دارای بارهای انرژی تولیدمحور، فصلی و وابسته به اقلیم هستند (Rösch et al., 2005; Cabeza et al., 2022). نبود چارچوب رتبه‌بندی تخصصی برای این ساختمان‌ها نخستین شکاف مهمی است که تحقیق حاضر به آن پاسخ می‌دهد.

۲. تمرکز بر «تحقق NZEB» به جای «درجه‌بندی عملکرد»

بیشتر نظام‌های موجود، ساختمان را به صورت دو حالت ارزیابی می‌کنند: یا NZEB هست یا نیست (European Commission, 2018). این منطق صفر-یک:

- مسیر گذار تدریجی را نادیده می‌گیرد،
 - ابزار سیاستی برای بهبود مرحله‌ای فراهم نمی‌کند،
 - و بهره‌برداران کشاورزی را که عموماً با محدودیت سرمایه مواجه‌اند، از نظام ارزیابی طرد می‌کند.
- مطالعات اخیر بر ضرورت رتبه‌بندی پیوسته تأکید دارند (Ugursal, 2009 & Swan; Walzberg et al., 2021)، اما پیاده‌سازی عملی آن در کشاورزی تقریباً مغفول مانده است. تحقیق حاضر این خلأ را با معرفی تابع امتیازدهی پیوسته و سیاست‌محور پر می‌کند.

۳. فقدان شاخص‌های نرمال‌شده اقلیمی در رتبه‌بندی NZEB کشاورزی

اگرچه نرمال‌سازی اقلیمی در ارزیابی انرژی یک اصل پذیرفته‌شده است (Patterson, 1996; Iida, 2021 & Chen)، اما در نظام‌های رتبه‌بندی NZEB به ندرت به صورت صریح و کمی وارد شده است.

در کشاورزی، این ضعف حیاتی‌تر است؛ زیرا:

- مصرف انرژی به طور مستقیم به دما، رطوبت و طول دوره تولید وابسته است،
 - و مقایسه بدون نرمال‌سازی، ذاتاً ناعادلانه است.
- نبود شاخصی مانند نسبت مصرف واقعی به مصرف ایده‌آل اقلیمی در ادبیات رتبه‌بندی NZEB کشاورزی، یک شکاف روش‌شناختی جدی محسوب می‌شود که تحقیق حاضر آن را هدف قرار داده است.

۴. شکست توابع امتیازدهی ساده در نمایش ناکارآمدی انرژی



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



بخش قابل توجهی از مطالعات، همچنان از کلاس‌بندی گسسته یا توابع خطی برای امتیازدهی استفاده می‌کنند (Pohekar & Ramachandran, 2004). این رویکردها:

- شدت اتلاف انرژی در مقادیر بالا را کم‌برآورد می‌کنند،
 - و پیام سیاستی ضعیفی به مصرف‌کنندگان پرمصرف می‌دهند.
- مطالعات نظری نشان می‌دهند که ناکارآمدی انرژی ماهیتی غیرخطی و شتاب‌دار دارد (Zhou et al., 2006)، اما مدلی که این رفتار را به‌صورت نرمال‌شده، پیوسته و کالیبره‌شده در رتبه‌بندی NZEB کشاورزی پیاده‌سازی کند، وجود ندارد.

۵. فقدان آستانه‌های سیاستی شفاف در نظام‌های رتبه‌بندی

نظام‌های رتبه‌بندی اغلب یا بیش‌ازحد نرم هستند یا به‌صورت ناگهانی تنبیهی عمل می‌کنند. Rosenow et al. (۲۰۲۰) نشان می‌دهند که وجود آستانه‌های روشن، اما با رفتار تابعی کنترل‌شده، اثربخشی سیاست‌های انرژی را به‌طور معناداری افزایش می‌دهد. با این حال، در حوزه NZEB کشاورزی:

- آستانه‌های کمی تعریف نشده‌اند،
 - یا در صورت وجود، فاقد منطق ریاضی قابل‌دفاع‌اند.
- تحقیق حاضر با معرفی یک آستانه سیاستی صریح و تفکیک رفتار اصلاحی و تنبیهی، این شکاف را به‌طور مستقیم پوشش می‌دهد. بخش مهمی از ادبیات NZEB، خرید گواهی انرژی تجدیدپذیر (REC/I-REC) و گواهی صرفه‌جویی انرژی (EEC/ESC) را به‌صورت حاشیه‌ای یا صرفاً حسابداری بررسی کرده است (IEA, 2023).
- مدلی که رتبه‌بندی ساختمان کشاورزی را به‌طور مفهومی با بازارهای انرژی، کیفیت انرژی و ارزش زمانی مصرف پیوند دهد، به‌طور نظام‌مند توسعه نیافته است. این خلأ، مانع اصلی سیاست‌گذاری هوشمند در کشورهای در حال توسعه محسوب می‌شود.
- در پاسخ به شکاف‌های فوق، ت

ضرورت تحقیق:

از منظر کاربردی، یکی از مهم‌ترین دستاوردهای تحقیق حاضر، قابلیت به‌کارگیری مستقیم چارچوب امتیازدهی پیشنهادی در طراحی و پیاده‌سازی نظام‌های رتبه‌بندی ساختمان‌های انرژی صفر و انرژی صفر ترکیبی به‌ویژه در کاربری‌های کشاورزی است. در



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



بسیاری از نظام‌های موجود رتبه‌بندی انرژی ساختمان، تمرکز اصلی بر برآورده شدن یا عدم برآورده شدن یک معیار حداقلی^۶ یا دستیابی به تراز انرژی صفر به صورت سالانه است، در حالی که شدت ناکارآمدی انرژی پیش از رسیدن به این هدف، به صورت دقیق و پیوسته مورد ارزیابی قرار نمی‌گیرد. چارچوب پیشنهادی این تحقیق با مدل‌سازی شاخص نسبت مصرف انرژی واقعی به مقدار ایده‌آل اقلیمی و تبدیل آن به یک تابع امتیازدهی غیرخطی و آستانه‌محور، این خلأ را به طور نظام‌مند پوشش می‌دهد.

در نظام‌های رتبه‌بندی ساختمان انرژی صفر، وجود یک مقیاس امتیازدهی پیوسته که بتواند فاصله هر ساختمان از وضعیت NZEB یا Hybrid-NZEB را به صورت کمی مشخص کند، اهمیت کلیدی دارد. مدل دوقطعه‌ای پیشنهادی این تحقیق امکان تعریف یک «نقطه مرجع عملکردی» را فراهم می‌سازد که معادل عملکرد انرژی ایده‌آل در همان اقلیم بوده و امتیاز کامل را دریافت می‌کند، در حالی که افزایش ناسازگار مصرف انرژی نسبت به این مرجع، به صورت تدریجی و سپس بازدارنده در نمره نهایی منعکس می‌شود. این ویژگی باعث می‌شود شاخص مذکور نه تنها ابزار ارزیابی نهایی، بلکه ابزار پایش مسیر گذار ساختمان به سمت انرژی صفر نیز باشد.

کاربرد دیگر این چارچوب در رتبه‌بندی ساختمان انرژی صفر، امکان تفکیک شفاف میان ساختمان‌های نزدیک به انرژی صفر، ساختمان‌های قابل بهبود و ساختمان‌های با ناکارآمدی بحرانی است. تعریف آستانه سیاستی در شاخص، این امکان را برای نظام رتبه‌بندی فراهم می‌کند که سطوح مختلف گواهی یا رتبه (نظیر Zero/Plus Energy, Gold, Silver, Bronze) نه بر مبنای قضاوت‌های کیفی، بلکه بر اساس منطق کمی و تفسیرپذیر تعیین شوند. به‌ویژه در ساختمان‌های کشاورزی انرژی‌بر مانند مرغداری‌ها، گلخانه‌ها و واحدهای نگهداری محصولات، این تفکیک نقش تعیین‌کننده‌ای در اولویت‌بندی مداخلات و تخصیص مشوق‌ها دارد.

از منظر طراحی نظام‌های Hybrid-NZEB، شاخص و تابع امتیازدهی توسعه‌یافته در این تحقیق قابلیت ادغام مستقیم با مؤلفه‌هایی مانند تولید انرژی تجدیدپذیر در محل، خرید گواهی انرژی تجدیدپذیر (REC/I-REC) و گواهی صرفه‌جویی انرژی (EEC/ESC) را دارد. با در نظر گرفتن شدت انرژی پایه ساختمان به عنوان هسته رتبه‌بندی، می‌توان سهم جبران انرژی از مسیرهای مختلف را به صورت وزن‌دار بر آن اعمال کرد، بدون آنکه ضعف شدید در عملکرد انرژی ساختمان پشت پوشش‌های جبرانی پنهان شود. این ویژگی، مسئله‌ای را هدف قرار می‌دهد که در بسیاری از نظام‌های موجود رتبه‌بندی انرژی صفر مورد انتقاد قرار گرفته است.

در نهایت، انعطاف‌پذیری ساختاری مدل دوقطعه‌ای و تفسیر سیاست‌محور پارامتر زوال‌نمایی، این امکان را فراهم می‌کند که شاخص پیشنهادی به عنوان یکی از هسته‌های کمی نظام رتبه‌بندی ساختمان انرژی صفر در سطوح ملی و منطقه‌ای مورد استفاده قرار گیرد. تنظیم مقدار آستانه و شدت تنبیه می‌تواند متناسب با شرایط اقلیمی، نوع کاربری ساختمان و اهداف سیاست‌گذار انجام

^۶ pass/fail



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



شود، امری که شاخص حاضر را به ابزاری قابل تعمیم و بومی‌پذیر برای توسعه نظام‌های رتبه‌بندی NZEB و Hybrid-NZEB. به‌ویژه در بخش کشاورزی، تبدیل می‌کند.

افزایش فشار بر منابع انرژی، تشدید تغییرات اقلیمی و محدودیت‌های فزاینده زیست‌محیطی، بخش کشاورزی را به یکی از کانون‌های اصلی مداخله سیاستی در حوزه بهره‌وری انرژی تبدیل کرده است. در حالی که کشاورزی نقش اساسی در امنیت غذایی ایفا می‌کند، سهم قابل توجه آن از مصرف انرژی نهایی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، ضرورت توسعه ابزارهای تحلیلی دقیق برای پایش و مدیریت مصرف انرژی در این بخش را برجسته می‌سازد. در این میان، فقدان شاخص‌های امتیازدهی شده‌ای که بتوانند هم‌زمان ناکارآمدی انرژی را به‌صورت کمی اندازه‌گیری کرده و پیام سیاستی روشنی ارائه دهند، به‌عنوان یکی از خلأهای اساسی ادبیات معاصر شناخته می‌شود (OECD, 2022; Li et al., 2023).

بخش عمده مطالعات موجود، علیرغم تمرکز بر محاسبه شدت مصرف انرژی یا شاخص‌های مبتنی بر نسبت نهاده-ستانده، در ترجمه نتایج به مقیاس‌های قابل استفاده برای تصمیم‌گیران با محدودیت مواجه‌اند. استفاده از مقادیر خام یا شاخص‌های خطی، امکان تفکیک مؤثر بین واحدهای با ناکارآمدی متوسط و شدید را کاهش داده و منجر به تضعیف کارایی ابزارهای تنظیم‌گری و مشوق‌های انرژی می‌شود (Saisana et al., 2020; Guo et al., 2021). بنابراین، ضرورت توسعه یک چارچوب امتیازدهی وجود دارد که نه تنها دقیق و از نظر ریاضی سازگار باشد، بلکه از منظر سیاست‌گذاری نیز تفسیرپذیر و قابل دفاع باشد.

در این راستا، تحقیق حاضر با تمرکز بر مدل‌سازی شاخص نسبت مصرف انرژی به ازای تولید کشاورزی و تبدیل آن به یک تابع امتیازدهی دوقطعه‌ای، پاسخی مستقیم به این نیاز روش‌شناختی ارائه می‌دهد. تعریف آستانه صریح برای نسبت مصرف انرژی و تفکیک نواحی عملکرد پذیرفتنی از نواحی ناکارآمدی شدید، امکان هم‌راستاسازی تحلیل‌های فنی با منطق‌های سیاستی را فراهم می‌سازد؛ به‌گونه‌ای که رفتار مصرف انرژی در بازه قابل قبول، مشمول پیام‌های اصلاحی ملایم بوده و پس از عبور از خط قرمز سیاستی، به‌صورت غیرخطی و بازدارنده تنبیه می‌شود (Su, 2022 & Sala et al., 2020; Ang).

ضرورت دیگر این تحقیق، پاسخ به چالش انتخاب و توجیه پارامترهای غیرخطی در شاخص‌های امتیازدهی انرژی است. در بسیاری از مطالعات، پارامترهای توابع نمایی یا لگاریتمی به‌صورت دل‌خواهی یا صرفاً تجربی انتخاب شده‌اند که این امر قابلیت تکرارپذیری و پذیرش داور را کاهش می‌دهد. تحقیق حاضر با اتخاذ رویکرد کالیبراسیون مبتنی بر نقطه لنگر، پارامتر زوال نمایی را به یک مؤلفه سیاست‌پذیر و قابل تفسیر تبدیل می‌کند و امکان تحلیل حساسیت در محدوده‌ای منطقی و دفاع‌پذیر را فراهم می‌آورد (Gillingham et al., 2021; Saisana et al., 2023).

از منظر کاربردی، چارچوب پیشنهادی این تحقیق قابلیت استفاده مستقیم در نظام‌های رتبه‌بندی انرژی واحدهای کشاورزی، طراحی مشوق‌ها و جرایم انرژی، و پایش اثربخشی سیاست‌های بهبود بهره‌وری را داراست. امتیازدهی استاندارد شده و قابل مقایسه، این امکان را برای نهادهای سیاست‌گذار فراهم می‌کند تا مداخلات خود را به‌صورت هدفمند بر واحدهای با ناکارآمدی بحرانی



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



متمرکز کنند و همزمان از اعمال فشار غیرضروری بر واحدهای نزدیک به سطح مطلوب جلوگیری نمایند (OECD, 2022; Rockström et al., 2023).

علاوه بر این، ساختار منعطف مدل دوقطعه‌ای پیشنهادی، قابلیت تعمیم به سایر زیربخش‌های کشاورزی و حتی بخش‌های غیرکشاورزی را فراهم می‌سازد، به گونه‌ای که با تغییر مقدار آستانه و کالیبراسیون مجدد پارامتر زوال، می‌توان آن را با شرایط اقلیمی، الگوهای تولید یا اهداف سیاستی متفاوت سازگار کرد. این ویژگی، تحقیق حاضر را از یک تحلیل موردی فراتر برده و آن را به یک ابزار تحلیلی قابل استفاده در چارچوب‌های ملی و منطقه‌ای مدیریت انرژی تبدیل می‌کند (Alola et al., 2024; Stern & Kander, 2022).

در مجموع، ضرورت تحقیق حاضر از ترکیب همزمان یک نیاز سیاستی فوری، یک خلأ روش‌شناختی مشخص و یک امکان کاربردی عملی نشأت می‌گیرد و کاربرد آن نه تنها در تولید دانش نظری در حوزه شاخص‌سازی انرژی کشاورزی، بلکه در طراحی ابزارهای اجرایی برای گذار به نظام‌های تولید کم‌انرژی و پایدار قابل ملاحظه است.

معرفی تابع امتیازدهی دوقطعه‌ای برای شاخص ناکارآمدی انرژی

به منظور ارزیابی ناکارآمدی مصرف انرژی در تولید کشاورزی، نسبت مصرف انرژی واقعی به مقدار ایده‌آل متناظر با شرایط اقلیمی به صورت متغیر بی‌بعد

$$r = E_{\text{actual}} / E_{\text{ideal, climate}}$$

تعریف می‌شود. این نسبت، میزان انحراف سیستم تولید از وضعیت بهینه انرژی را نشان می‌دهد. از آنجا که رفتار سیاستی و تحلیلی مورد انتظار از شاخص در کل دامنه ۲ یکنواخت نیست، استفاده از یک تابع پیوسته با رفتار همگن در کل بازه منجر به تضعیف قدرت تفسیری شاخص می‌شود. به همین دلیل، در این مطالعه یک تابع امتیازدهی دوقطعه‌ای با رفتار متفاوت در نواحی عملکرد قابل قبول و ناکارآمدی شدید معرفی می‌گردد.

ساختار تابع پیشنهادی دوقطعه‌ای تابع امتیازدهی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S(r) = \left\{ \begin{array}{ll} 100 - 15(r - 1) & \text{for } 1 \leq r \leq 3 \\ 70 * \frac{(\exp(-\lambda(r - 3)) - \exp(-3\lambda))}{1 - \exp(-3\lambda)} & \text{for } 3 < r \leq 6 \end{array} \right\}$$



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



در این ساختار، دامنه تعریف تابع به دو ناحیه مفهومی تفکیک شده است. قطعه اول ($1 \leq r \leq 3$) نمایانگر بازه‌ای است که در آن افزایش مصرف انرژی نسبت به مقدار ایده‌آل، همچنان در چارچوب قابل‌مدیریت و اصلاح‌پذیر قرار دارد. در این ناحیه، استفاده از یک رابطه خطی نزولی با شیب ثابت، بیانگر کاهش تدریجی امتیاز در پاسخ به ناکارآمدی‌های خفیف تا متوسط است. این انتخاب عامدانه بوده و از اعمال تنبیه غیرخطی زود هنگام جلوگیری می‌کند تا شاخص کارکردی تشویقی-اصلاحی داشته باشد.

قطعه دوم تابع ($r > 3$) به ناحیه ناکارآمدی شدید اختصاص دارد؛ ناحیه‌ای که در آن مصرف انرژی به بیش از سه برابر سطح ایده‌آل می‌رسد و از منظر سیاست انرژی غیرقابل قبول تلقی می‌شود. در این بخش، فرم نمایی نزولی نرمال شده به کار گرفته شده تا امکان اعمال جریمه شدید اما تدریجی فراهم گردد، به نحوی که افت امتیاز اولیه چشمگیر بوده ولی در مقادیر بالاتر r به سمت اشباع میل کند. نرمال‌سازی تابع تضمین می‌کند که شرایط مرزی $S(6) = 0$ و $S(3) = 70$ به طور دقیق برقرار باشند.

نقش و تفسیر پارامتر λ

پارامتر λ در قطعه دوم تابع، نرخ زوال امتیاز پس از عبور از آستانه ناکارآمدی بحرانی را کنترل می‌کند. این پارامتر تعیین می‌کند که سیستم ارزیابی با چه شدتی به افزایش اتلاف انرژی در ناحیه عملکرد غیرقابل قبول واکنش نشان دهد. بنابراین، λ می‌تواند به عنوان پارامتر شدت پیام سیاستی تفسیر کرد؛ مقداری که مرز میان یک رویکرد ملایم اصلاح‌محور و یک رویکرد سخت‌گیرانه تنبیهی را مشخص می‌سازد.

اگر λ بیش از حد کوچک انتخاب شود، تابع نمایی رفتاری شبه خطی پیدا می‌کند و افت امتیاز پس از $r = 3$ کند خواهد بود. در چنین شرایطی، قدرت هشداردهندگی شاخص کاهش یافته و تمایز بین ناکارآمدی متوسط و شدید تضعیف می‌شود. در مقابل، مقادیر بزرگ λ منجر به سقوط سریع امتیاز بلافاصله پس از آستانه می‌شود و امتیاز سطوح مختلف ناکارآمدی شدید را در نزدیکی صفر همگرا می‌سازد، که این امر توان رتبه‌بندی و تفکیک شاخص را از بین می‌برد.

چارچوب روش شناختی انتخاب بهینه λ

انتخاب مقدار بهینه λ بر اساس یک فرآیند کالیبراسیون ساختارمند و چندمرحله‌ای انجام شد. در گام نخست، قیود پیشینی شامل پیوستگی تابع در $r = 3$ ، یکنواختی نزولی در کل دامنه و صفر شدن دقیق امتیاز در $r = 6$ اعمال گردید. سپس، بر اساس ادبیات شاخص‌های بهره‌وری انرژی و آزمون رفتار تابع، بازه کاندید

$$0.6 \leq \lambda \leq 1.2$$

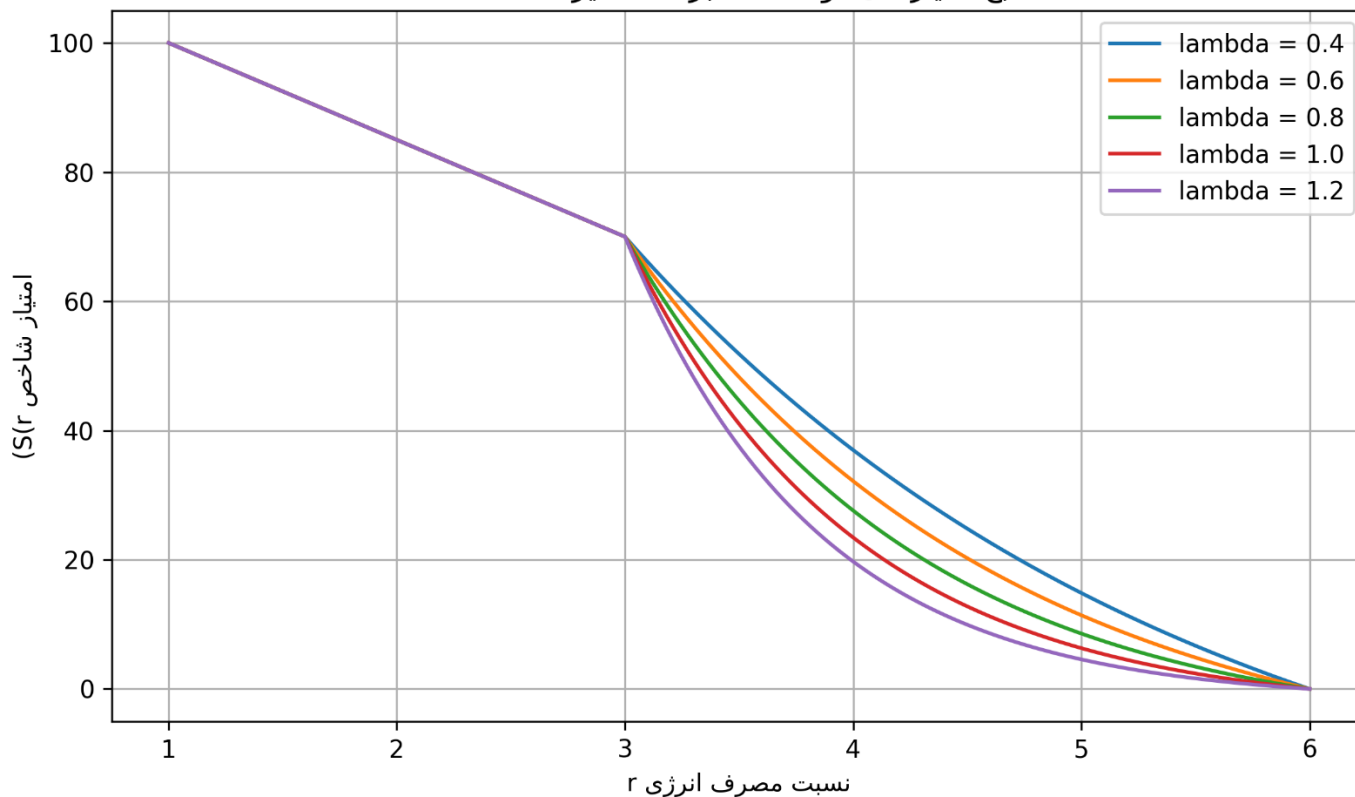
به عنوان محدوده رفتار سالم تابع تعیین شد؛ بازه‌ای که در آن نه پدیده رقیق شدن پیام سیاستی رخ می‌دهد و نه اشباع زود هنگام تنبیه.

در گام بعد، از کالیبراسیون مبتنی بر نقاط لنگر استفاده شد. نقطه $r = 4$ به عنوان مرجع ناکارآمدی شدید ولی قابل تفکیک در نظر گرفته شد و دامنه امتیاز هدف برای آن در بازه ۳۰ تا ۳۵ تعیین گردید. حل عددی تابع نشان داد که مقادیر λ در حدود ۰.۸ تا ۰.۹ این شرط را به طور مناسب برآورده می کنند.

در نهایت، با تحلیل حساسیت محلی شیب تابع در $r = 3$ و بررسی پایداری رتبه بندی نسبت به تغییرات کوچک λ ، مقدار $\lambda = 0.8$ به عنوان مقدار بهینه انتخاب شد. این مقدار افت امتیاز سریع و معناداری را پس از عبور از آستانه ناکارآمدی ایجاد می کند، در عین حال از فروپاشی تمایز بین سطوح مختلف ناکارآمدی شدید جلوگیری کرده و قابلیت استفاده سیاستی شاخص را حفظ می نماید.

نمودار ۱-تابع امتیاز دهی برای شاخص معیار مصرف انرژی

تابع امتیازدهی دوقطعه ای برای مقادیر مختلف λ



تفسیر و تحلیل نمودار تابع امتیازدهی دوقطعه ای برای λ های مختلف:



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



نمودار ارائه شده رفتار تابع امتیازدهی شاخص نسبت مصرف انرژی $r = E_{actual}/E_{ideal}$ را در بازه $1 \leq r \leq 6$ برای پنج مقدار مختلف پارامتر زوال نمایی λ نشان می دهد. ساختار دوقطعه ای تابع، به طور هدفمند برای تفکیک ناحیه عملکرد قابل قبول از ناحیه ناکارآمدی شدید طراحی شده است و این ویژگی به وضوح در رفتار منحنی ها قابل مشاهده است.

۱. ناحیه پیش از آستانه سیاستی ($1 \leq r \leq 3$)

در بازه $1 \leq r \leq 3$ ، تمامی منحنی ها کاملاً بر هم منطبق هستند و شیب خطی یکسانی را نشان می دهند. این هم پوشانی کامل بیانگر آن است که رفتار تابع در این ناحیه مستقل از پارامتر λ بوده و کاملاً تابع منطق سیاستی از پیش تعریف شده است. کاهش تدریجی امتیاز از ۱۰۰ در $r = 1$ تا ۷۰ در $r = 3$ پیام اصلاحی ملایمی را منتقل می کند که هدف آن تشویق به بهبود بهره وری انرژی، بدون اعمال شوک سیاستی یا تنبیه شدید است. این ویژگی، تابع را برای کاربردهای تنظیم گری و رتبه بندی، به ویژه در مراحل گذار به بهره وری بالاتر، مناسب می سازد.

۲. نقطه شکست و پیوستگی تابع ($r = 3$)

تمام منحنی ها در نقطه $r = 3$ دقیقاً در مقدار امتیاز $S = 70$ به هم می رسند که نشان دهنده پیوستگی کامل تابع و کالیبراسیون مبتنی بر نقطه لنگر است. این نقطه به عنوان یک آستانه سیاستی تفسیر می شود که عبور از آن به معنای ورود به محدوده ناکارآمدی انرژی غیرقابل قبول است. وجود چنین نقطه لنگری، امکان تفسیر شفاف و قابل دفاع نتایج برای سیاست گذار و ذی نفعان را فراهم می کند.

۳. ناحیه پس از آستانه ($3 < r \leq 6$):

نقش λ در ناحیه پس از آستانه، واگرایی منحنی ها به وضوح مشاهده می شود و تفاوت رفتار تابع برای مقادیر مختلف λ آشکار می گردد. هرچه مقدار λ بزرگ تر باشد، افت امتیاز سریع تر و شدیدتر است. به عبارت دیگر، λ نقش پارامتر شدت تنبیه سیاستی را ایفا می کند.

برای مقادیر بالاتر λ (مانند ۱.۲)، کاهش امتیاز بلافاصله پس از عبور از $r = 3$ بسیار تند است که نشان دهنده رویکردی سخت گیرانه و بازدارنده نسبت به اتلاف شدید انرژی است. در مقابل، مقادیر کمتر λ (مانند ۰.۶) منحنی های نرم تر و تدریجی تری ایجاد می کنند که رویکردی محافظه کارانه تر و سازگارتر با سیاست های گذار تدریجی را بازتاب می دهد.

۴. ارزیابی λ بهینه از منظر سیاست گذاری

مقایسه منحنی ها نشان می دهد که مقدار $\lambda = 0.8$ رفتاری میانی و متعادل ارائه می دهد؛ به گونه ای که افت امتیاز پس از آستانه به اندازه کافی شدید هست تا پیام سیاستی بازدارنده را منتقل کند، اما در عین حال از شوک بیش از حد امتیازدهی که می تواند



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



منجر به طرد واحدهای قابل اصلاح شود، پرهیز می‌کند. این ویژگی $\lambda=0.8$ را به گزینه‌ای سیاست‌پذیر برای نظام‌های رتبه‌بندی انرژی تبدیل می‌کند، به‌ویژه در کاربردهایی که هدف، هدایت تدریجی واحدها به سمت عملکرد بهینه یا انرژی صفر است.

۵. پیامدهای کاربردی در رتبه‌بندی انرژی و NZEB

رفتار نمودار به‌روشنی نشان می‌دهد که تابع پیشنهادی نه تنها یک ابزار امتیازدهی ایستا، بلکه یک ابزار دینامیک پایش مسیر گذار انرژی است. در نظام‌های رتبه‌بندی ساختمان انرژی صفر یا Hybrid-NZEB، این ویژگی امکان تشخیص فاصله واقعی ساختمان از وضعیت هدف و تمایز بین ناکارآمدی متوسط و شدید را فراهم می‌کند. به‌ویژه، واگرایی سریع امتیازها پس از آستانه، مانع از آن می‌شود که ساختمان‌های با عملکرد بسیار ضعیف، به‌واسطه جبران‌های ثانویه، امتیاز مشابه ساختمان‌های نزدیک به NZEB دریافت کنند

کالیبراسیون پارامتر زوال نمایی (λ)

کالیبراسیون پارامتر λ با هدف ایجاد تعادل میان شدت پیام سیاستی و اجتناب از شوک بیش‌ازحد امتیازدهی انجام شد. بر اساس تحلیل سناریو و مقایسه رفتاری توابع، بازه $\lambda \in [0.6, 1.2]$ "به‌عنوان دامنه منطقی انتخاب گردید. مقدار نهایی $\lambda = 0.8$ به دلیل ایجاد افت امتیاز معنادار پس از آستانه، بدون اشباع فوری تابع، به‌عنوان مقدار بهینه سیاستی تعیین شد.

روش تحلیل داده‌ها و سناریوسازی

تحلیل‌ها به‌صورت سناریومحور و با محاسبه مقدار $S(r)$ برای مقادیر مختلف r در بازه ۱ تا ۶ انجام شد. رفتار تابع برای چندین مقدار λ به‌صورت مقایسه‌ای بررسی گردید تا حساسیت نتایج نسبت به شدت تنبیه سیاستی ارزیابی شود. نقاط بحرانی، اختلاف امتیاز پیش و پس از آستانه و نرخ افت امتیاز به‌عنوان شاخص‌های تحلیلی کلیدی مورد استفاده قرار گرفتند.

ابزار تحلیل و محاسبه



اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره وری مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی

۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵ هتل المپیک - تهران



محاسبات عددی و ترسیم نمودارها با استفاده از Python و کتابخانه‌های علمی شامل NumPy و Matplotlib انجام شد. توابع دوقطه‌ای به صورت برنامه‌نویسی شده پیاده‌سازی و برای سناریوهای مختلف پارامتر λ اجرا شدند. خروجی‌های گرافیکی به عنوان ابزار تحلیل بصری برای ارزیابی رفتار سیاستی تابع مورد استفاده قرار گرفتند.

اعتبارسنجی مفهومی و روش‌شناختی

اعتبار مدل نه از طریق داده‌های تجربی گسترده، بلکه از طریق سازگاری منطقی، تحقق قیود سیاستی، پیوستگی ریاضی و تفسیرپذیری رفتاری ارزیابی شد. بررسی ناسازگاری توابع نمایی خالص و تحلیل علامت پارامتر زوال به عنوان آزمونی برای رد مدل‌های نامعتبر مورد استفاده قرار گرفت. این رویکرد تضمین می‌کند که تابع نهایی از نظر فیزیکی، ریاضی و سیاستی قابل دفاع باشد.

جمع‌بندی نهایی

این تحقیق نشان داد که تبدیل شاخص نسبت مصرف انرژی در بخش کشاورزی به یک تابع امتیازدهی پیوسته و آستانه‌محور، امکان ترجمه نتایج فنی به پیام‌های سیاستی شفاف و قابل اجرا را فراهم می‌سازد. استفاده از ساختار دوقطه‌ای، تعارض کلاسیک میان سادگی شاخص و حساسیت تنبیهی را به صورت نظام‌مند حل می‌کند. این رویکرد، شاخص انرژی را از یک معیار صرفاً توصیفی به یک ابزار تصمیم‌سازی ارتقا می‌دهد.

تعریف آستانه عملکردی صریح در مقدار مشخصی از نسبت مصرف انرژی، هسته مفهومی مدل پیشنهادی را تشکیل می‌دهد. این آستانه مرز میان رفتار اصلاح‌پذیر و ناکارآمدی غیرقابل قبول را مشخص کرده و امکان تفکیک دقیق واحدها را فراهم می‌سازد. وجود این نقطه لنگر، تفسیرپذیری شاخص را هم برای تحلیلگران فنی و هم برای سیاست‌گذاران افزایش می‌دهد.

نتایج نشان داد که پارامتر زوال نمایی λ نقش مستقیمی در بیان شدت پیام سیاستی در ناحیه ناکارآمدی ایفا می‌کند. افزایش λ منجر به تشدید افت امتیاز پس از آستانه و تقویت خاصیت بازدارندگی شاخص می‌شود، در حالی که مقادیر پایین‌تر آن مسیر گذار تدریجی‌تری را القا می‌کنند. انتخاب مقدار میانی λ ، تعادلی میان اثربخشی سیاستی و اجتناب از شوک بیش‌ازحد ایجاد می‌کند.



اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره‌وری مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی

۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵ هتل المپیک - تهران



چارچوب پیشنهادی قابلیت به کارگیری مستقیم در نظام‌های رتبه‌بندی انرژی، طراحی مشوق‌ها و اولویت‌بندی مداخلات بهبود بهره‌وری را دارد. ساختار منعطف مدل، امکان تنظیم آستانه و پارامتر زوال را متناسب با شرایط اقلیمی، نوع کاربری و اهداف سیاستی فراهم می‌سازد. از این رو، مدل ارائه‌شده به‌طور طبیعی قابل تعمیم به ساختمان‌های انرژی صفر و سیستم‌های Hybrid-NZEB است.

در مجموع، نوآوری اصلی تحقیق در ترکیب هدفمند رفتار خطی اصلاحی با رفتار نمایی تنبیهی، مبتنی بر کالیبراسیون آگاهانه سیاستی نهفته است. این ترکیب، شاخص انرژی را به ابزاری پویا برای پایش مسیر گذار از ناکارآمدی به عملکرد بهینه تبدیل می‌کند. چنین رویکردی می‌تواند به‌عنوان ستون کمی نظام‌های ارزیابی و رتبه‌بندی انرژی در سطوح ملی و منطقه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

در مجموع، تابع دوقطعه‌ای پیشنهادی با ترکیب یک رفتار خطی اصلاح‌محور در ناحیه قابل قبول و یک رفتار نمایی کنترل‌شده در ناحیه ناکارآمدی شدید، چارچوبی منعطف و تفسیرپذیر برای ارزیابی بهره‌وری انرژی فراهم می‌سازد. انتخاب پارامتر $\lambda=0.8$ نه بر مبنای ملاحظات تجربی صرف، بلکه به‌عنوان حاصل یک فرآیند کالیبراسیون تحلیلی و سیاست‌محور انجام شده و تعادل مناسبی میان شدت تنبیه، قدرت تمایز و قابلیت تصمیم‌سازی ایجاد می‌کند.

اگرچه تمرکز این تحقیق بر بخش کشاورزی است، ساختار شاخص و تابع امتیازدهی به‌گونه‌ای طراحی شده که به‌سادگی قابل تعمیم به حوزه‌هایی مانند ساختمان‌های کم‌مصرف و صفرانرژی (NZEB) باشد. تنها تفاوت، بازتعریف مصرف ایده‌آل مرجع و تنظیم آستانه سیاستی متناسب با نوع کاربری خواهد بود. این ویژگی، قابلیت استفاده مجدد و توسعه‌پذیری مدل را تقویت می‌کند.



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



فهرست منابع

1. Ayres, R. U., & Warr, B. (2009). *The economic growth engine: How energy and work drive material prosperity*. Edward Elgar Publishing.
2. Bandura, A. (1986). *Social foundations of thought and action: A social cognitive theory*. Prentice-Hall.
3. Bastianoni, S., Coscieme, L., Caro, D., Marchettini, N., & Pulselli, F. M. (2019). Energy and sustainability metrics: An integrative review. *Ecological Indicators*, 98, 112–125. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.036>
4. Brundtland, G. H. (1987). *Our common future*. Oxford University Press.
5. Cabeza, L. F., Chàfer, M., Mata, É., & Pitelis, C. (2022). Energy efficiency in agriculture: Concepts, metrics and policy tools. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112105. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112105>
6. Chen, C., & Iida, Y. (2021). Comparative assessment of energy indicators for agricultural systems. *Energy*, 235, 121368. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121368>
7. Debreu, G. (1951). The coefficient of resource utilization. *Econometrica*, 19(3), 273–292. <https://doi.org/10.2307/1906814>
8. European Commission. (2018). *Directive (EU) 2018/844 on the energy performance of buildings (EPBD recast)*. Official Journal of the European Union.
9. European Environment Agency. (2020). *Energy efficiency and energy consumption in agriculture*. EEA Report No. 21/2020.

10. Filippín, C., Larsen, T. S., & Akander, J. (2020). Performance indicators for nearly zero energy buildings: A critical review. *Energy and Buildings*, 209, 109683.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109683>
11. Färe, R., Grosskopf, S., Norris, M., & Zhang, Z. (1994). Productivity growth, technical progress, and efficiency change. *American Economic Review*, 84(1), 66–83.
12. IPCBEE. (2021). *Energy benchmarking methodologies for sustainable agriculture*. International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering.
13. IPCC. (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change*. Cambridge University Press.
14. IEA. (2023). *Energy efficiency indicators: Fundamentals on statistics*. International Energy Agency.
15. ISO. (2018). *ISO 50001: Energy management systems – Requirements with guidance for use*. International Organization for Standardization.
16. Jollands, N., Ellis, M., Grubb, M., & Missfeldt, F. (2010). Indicators for energy efficiency. *Energy Policy*, 38(6), 2988–2997. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.01.062>
17. Kalogirou, S. A. (2014). *Solar energy engineering: Processes and systems* (2nd ed.). Academic Press.
18. Lund, H., Arler, F., Østergaard, P. A., Hvelplund, F., Connolly, D., & Mathiesen, B. V. (2017). Sustainable energy systems and scenario analysis. *Energy*, 137, 556–565.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.154>
19. Patterson, M. G. (1996). What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues. *Energy Policy*, 24(5), 377–390.
[https://doi.org/10.1016/0301-4215\(96\)00017-1](https://doi.org/10.1016/0301-4215(96)00017-1)
20. Pohekar, S. D., & Ramachandran, M. (2004). Multi-criteria evaluation of energy alternatives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(4), 365–381.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2003.12.007>
21. Rosenow, J., Ang, G., Fawcett, T., & O’Shaughnessy, E. (2020). Energy efficiency policy evaluation. *Energy Policy*, 139, 111321. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111321>
22. Rösch, C., Kaltschmitt, M., & Knorr, W. (2005). Energy efficiency of agricultural systems. *Energy Policy*, 33(4), 457–467. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00096-X](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00096-X)



23. Shove, E. (2018). What is wrong with energy efficiency? *Building Research & Information*, 46(7), 779–789. <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1361746>
24. Soto, R., & Lucena, A. F. P. (2019). Energy efficiency indicators under policy thresholds. *Energy Economics*, 80, 233–244. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.01.021>
25. Steg, L., Perlaviciute, G., & van der Werff, E. (2015). Understanding energy behavior. *Energy Research & Social Science*, 1, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.10.002>
26. Swan, L. G., & Ugursal, V. I. (2009). Modeling of end-use energy consumption in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 1819–1835. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.033>
27. Ürge-Vorsatz, D., Cabeza, L. F., Serrano, S., Barreneche, C., & Petrichenko, K. (2015). Heating and cooling energy trends in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 85–98. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.039>
28. Walzberg, J., Carpenter, A., Heath, G. A., & James, R. L. (2021). Energy system indicators and decarbonization pathways. *Joule*, 5(9), 2303–2336. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.07.012>
29. Zhou, P., Ang, B. W., & Poh, K. L. (2006). Slacks-based energy efficiency indicators. *Energy Policy*, 34(14), 2045–2056. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.02.020>
30. Zuo, J., Xia, B., & Yang, Y. (2020). Application of energy performance metrics in policy evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120698. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120698>



اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره وری مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی

۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵ هتل المپیک - تهران



برگزار کننده

همایش