



یک مدل جمعی مبتنی بر مجموعه وزن‌های مشترک در تحلیل پوششی داده‌ها

حجت اثباتی

گروه ریاضی، واحد پارس‌آباد مغان، دانشگاه آزاد اسلامی، پارس‌آباد مغان، ایران

حسین عزیزی

گروه ریاضی، واحد پارس‌آباد مغان، دانشگاه آزاد اسلامی، پارس‌آباد مغان، ایران

شهر روز فتحی اجیرلو

گروه ریاضی، واحد پارس‌آباد مغان، دانشگاه آزاد اسلامی، پارس‌آباد مغان، ایران

چکیده

این مقاله، یک مدل مجموعه اوزان مشترک (CSW) را برای مدل جمعی در تحلیل پوششی داده‌ها توسعه می‌دهد که از برنامه‌ریزی آرمانی برای تحلیل کارایی انرژی در کشورهای سازمان همکاری و توسعه اقتصادی (OECD)، استفاده می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهند که کشورهای OECD باید مصرف انرژی تجدیدپذیر خود را افزایش و پسماندهای شهری و انتشارات دی‌اکسید کربن را کاهش دهند.

کلمات کلیدی: تحلیل پوششی داده‌ها، اوزان مشترک، کارایی انرژی، انرژی‌های تجدیدپذیر.

۱- مقدمه

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برای دستیابی به خنثی‌سازی کربن، یک هدف اصلی در کاهش اثرات تغییر اقلیم است (Han et al., 2022; Rubem et al., 2017; Zhou et al., 2022). از آنجایی که انتشارات کربن، نتیجه مصرف انرژی و سیاست انرژی است، بسیاری از کشورها، اقداماتی مانند سیاست‌های تعیین سقف انرژی را برای کاهش انتشارات کلی کربن و انتقال به اقتصادهای سبز، اجرا کرده‌اند (Han et al., 2022). خنثی‌سازی کربن در پاسخ به رویدادهایی مانند انتشارات روزافزون CO₂ و آلودگی محیط زیستی، در تلاش است تا با توسعه و پیشرفت فناوری‌های تولید انرژی کم‌کربن، انتشار کربن انسان‌ساخت را متعادل سازد تا به یک ردپای کربن صفر خالص دست یابد (Dahal et al., 2018) که موجب افزایش امنیت انرژی، بهبود کارایی انرژی و تقویت توسعه اقتصادی می‌شود (Wang et al., 2022).

فناوری‌های کربن صفر خالص یا کارای انرژی، نسبت به جایگزین‌های سنتی، سطوح کمتری از کربن را آزاد می‌کنند یا به کربن صفر خالص دست می‌یابند. بنابراین، تمام انرژی باید با استفاده از منابع تجدیدپذیر، تولید شود و هر کربن منتشرشده باید با مازادهایی که به شبکه بازمی‌گردند، خنثی شود (Department for Communities and Local Government, 2008; Kempton, 2014).

شرکت‌ها می‌توانند مصرف انرژی خود را با اجرای رویه‌های مدیریت انرژی کارا از جمله اندازه‌گیری عملکرد انرژی، ایجاد اهداف صرفه‌جویی در انرژی و نظارت مستمر بر پیشرفت، تا ۳۰ درصد کاهش دهند (Ashuri et al., 2019). سطح بالاتر از کارایی انرژی، منجر به مصرف انرژی کمتر و در عین حال حفظ همان سطح خروجی اقتصادی می‌شود که معادل با صرفه‌جویی بیشتر انرژی در فرآیند تولید، بهره‌وری بالاتر و رشد اقتصادی اثرگذارتر می‌شود (Ding et al., 2022). سیاست‌های تجدیدپذیر موثر، سرمایه‌گذاری‌ها در انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولید برق را تسهیل می‌کنند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۲; Wen et al., 2022). کشورها، سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر را به دلیل مقرون به صرفه بودن و پیشرفت‌های فناورانه که مستقیماً به پایداری محیط زیستی و نوآوری‌های فناورانه کمک می‌کنند، به میزان ۱۷ درصد افزایش داده‌اند (International Energy Agency, 2019). سیاست‌های دولت در اقتصادهای توسعه‌یافته، نقش مهمی در کنترل تقاضای انرژی ایفا می‌کنند. به عنوان مثال، یکی از اجزای اصلی سیاست بریتانیا، به دنبال ادغام اهداف کربن صفر خالص با توسعه اقتصادی است (Webb and van der Horst, 2021). در بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته مانند هلند، بریتانیا، آلمان و ایالات متحده آمریکا، جوامع انرژی تجدیدپذیر (RECs) برای ترویج تولید و استفاده از انرژی پاک، پدید آمده‌اند. این RECها تقریباً تمام انرژی موردنیاز خود را با استفاده از فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر تولید کرده‌اند (Krarti and Aldubyan, 2021). RECها که به عنوان استراتژی‌های کلیدی برای انتقال به اقتصادهای کربن‌زدایی‌شده و در نهایت مقابله با بحران تغییر اقلیم استفاده می‌شوند، در ایجاد اقدامات مرتبط با انرژی در زمینه کاهش مصرف آب و تولید پسماند، مفید هستند (Romero-Rubio and de Andrés Díaz, 2015).

مصرف انرژی، یک شمشیر دو لبه است. به عنوان مثال، کشورهایی که تولید ناخالص داخلی (GDP) بالایی دارند، انرژی بیشتری مصرف می‌کنند. ولی در عین حال، مصرف انرژی بیشتر، منجر به انتشارات CO₂ بیشتر می‌شود (هیئت بین دولتی تغییر اقلیم^۱، ۲۰۱۴). پرسشی که در تحقیقات مطرح می‌شود این است که چگونه یک خود را داشته باشید (GDP بالاتر) و آن را بخورید (انتشار CO₂ کمتر). به طور خلاصه، بر طبق گزارش‌های صورت‌گرفته، چگونه می‌توان ارزیابی قابل اطمینانی در خصوص کارا بودن یک کشور از لحاظ انرژی داشت؟ کشورها می‌توانند با کاهش شدت انرژی که به عنوان انرژی مصرف‌شده برای تولید یک واحد از GDP تعریف می‌شود، کارایی انرژی خود را بهبود بخشند (Yu et al., 2022). به گفته ژو و همکاران، پیشرفت و توسعه فناوری‌های سبزتر، منجر به هدایت توسعه اقتصادی سبز می‌شود (Zhu et al., 2021). بنابراین افزایش سطح ملی کارایی انرژی با

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

استفاده از فناوری‌های پاک و کارای انرژی، به همراه اتکای بیشتر بر منابع انرژی تجدیدپذیر، ضروری است. این امر برای مهار تغییر اقلیم و گرمایش جهانی‌ر دستیابی به اهداف COP26 ضروری است (Kiani Mavi and Kiani Mavi, 2019, 2021; Wee and Choong, 2019). برای دستیابی به انتشارات کربن صفر، تمام کشورها باید مسئولیت دستیابی به خنثی‌سازی کربن تا اواسط قرن را بر عهده بگیرند. کشورهای OECD و G20، مسئول ۸۰ درصد مصرف انرژی جهانی و از این رو ۸۰ درصد CO₂ منتشرشده هستند (سازمان همکاری و توسعه اقتصادی^۲، ۲۰۱۶). شایان ذکر است که کشورهای OECD در اروپا، در مقایسه با سایر اقتصادهای عضو، CO₂ بسیار کمتری منتشر می‌کنند زیرا آنها به طور گسترده، انرژی را از منابع تجدیدپذیر (۳۴.۷۴ درصد) تولید می‌کنند، برخلاف ایالات متحده آمریکا که این میزان در آن، برابر با ۳۰.۶۱ درصد است (Vaninsky, 2018).

بازار انرژی کنونی به احتمال زیاد به دلیل اثرات نامطلوب گرمایش جهانی و تغییر اقلیم، سیاست‌های انرژی و محیط‌زیستی ایزوله و مدیریت ناکارای فرآیندهای کربن‌زدایی، همچنان با اختلالات مواجه خواهد بود. تهاجم روسیه به اوکراین، منجر به تغییر رویکرد قابل توجهی در سیاست اروپا شد. به عنوان مثال، آلمان، بیش از یک دهه قبل، ۲۰۰ میلیارد یورو را برای دستیابی به هدف ۱۰۰ درصد انرژی تجدیدپذیر خود متعهد شد (Mathis et al., 2022). الکتریکی شدن اقتصادها، پیش‌نیازی برای انتقال به منابع انرژی پاک برای همگام شدن با مقابله با گرمایش جهانی است (Popkostova, 2022). بنابراین، کشف فرصت‌های فناورانه یا اطمینان از جریان مداوم پیشرفت در فناوری‌های موجود، اهمیت قابل توجهی برای صنعت و دولت دارد. در واقع، استفاده از چنین فناوری‌های مطلوب و سودمندی می‌تواند منجر به مزیت نسبی بزرگی شود (Yoon et al., 2014). در اصل، پیش‌بینی فناوری انرژی در حول محور «تلاش‌های هدفمند و سیستماتیک برای پیش‌بینی و درک جهت بالقوه، نرخ، ویژگی‌ها و اثرات تغییرات فناورانه، به ویژه در اختراع، نوآوری، پذیرش و استفاده» (Coates et al., 2001) از جدیدترین فناوری‌ها برای تولید، توزیع، مصرف و مدیریت انرژی، حرکت می‌کند. یکی از جنبه‌های ارزیابی توسعه فناوری‌های انرژی، به حداکثر رساندن کارایی اقتصادی کلی فعلی و آتی با توجه به مجموعه‌ای از محدودیت‌های فنی و خارجی است (Mikheev, 2018). بنابراین، این مطالعه به دنبال پاسخ به پرسش تحقیقاتی زیر است: چگونه کشورهای OECD می‌توانند کارایی انرژی‌های تجدیدپذیر خود را ارزیابی کرده و آن را برای تحقق اهداف توسعه پایدار، بهبود بخشند؟

تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)^۳ به عنوان یک تکنیک تثبیت‌شده برای ارزیابی عملکرد، فرض می‌کند که واحدهای تصمیم‌گیرنده (DMU) (ها)^۴، ورودی‌های متعددی را برای تولید خروجی‌های متعدد، مصرف می‌کنند. با وجود اینکه مدل‌های کلاسیک DEA، DMUها را به سادگی به واحدهای کارا و ناکارا طبقه‌بندی می‌کنند، ولی نقطه ضعف عمده آن‌ها، فقدان یک مجموعه ثابت از اوزان برای ورودی‌ها و خروجی‌ها در سراسر تمام DMUها است (Kazemi et al., 2021). بنابراین، نیاز به یک مجموعه مشترک از اوزان (CSW)^۵ وجود دارد تا در تحلیل ورودی-خروجی استفاده شود. یکی از رویکردها، تولید CSW (جهانشاهلو و همکاران، ۲۰۱۱)، برای ورودی‌ها و خروجی‌ها است تا مبنای ثابتی را برای ارزیابی تمام DMUها ارائه دهد. لازم به ذکر است که CSW، امکان کسب یک امتیاز کارایی کامل را برای تمام DMUها فراهم نمی‌کند (قاضی و حسین‌زاده لطفی، ۲۰۱۹).

مدل‌های CSW، صرف‌نظر از تکنیک مورد استفاده برای تولید CSW، تصمیم‌گیرندگان (DMs) را قادر می‌سازند تا با استفاده از مجموعه‌ای از اوزان، عملکرد تمام DMUها را به طور مداوم اندازه‌گیری کنند و در نتیجه، استراتژی‌های بهبود را برای DMUهایی با کارایی کمتر، پیشنهاد دهند. با این حال، امتیاز کارایی به دست آمده توسط مدل‌های DEA شعاعی، مستلزم آن است که DMUها به طور متناسب، ورودی‌ها را کاهش یا خروجی‌ها را افزایش دهند که ممکن است امری چالش‌برانگیز، غیرواقعی یا حتی

^۲OECD

^۳ Data envelopment analysis

^۴ decision-making units

^۵ common set of weights

غیرعملی باشد (Chang et al., 2014). در عمل، DMUها به دنبال یافتن منابع اصلی ناکارایی در میان ورودی‌ها و خروجی‌ها و برطرف ساختن آن هستند. بنابراین، مدل‌های DEA غیرشعاعی و بدون ماهیت مانند مدل جمعی، برای ساماندهی تجاری، مناسب‌تر هستند و جواب‌هاب واقعی‌تری را ارائه می‌دهند (پورحجازی و همکاران، ۲۰۱۷).

برنامه‌ریزی آرمانی (GP) با به حداقل رساندن مجموع انحرافات نامطلوب از سطح مورد انتظار هر تابع هدف، یک مسئله تصمیم‌گیری چندهدفه را به طور کارا به یک مسئله هدف واحد تبدیل می‌کند (کیانی ماوی و همکاران، ۲۰۲۱؛ ماکوئی و همکاران، ۲۰۰۸). GP فرصتی را برای DMها فراهم می‌کند تا سطح مورد انتظار توابع هدف را در صورت تغییر محیط عملیاتی DMUها

تعیین کنند. برنامه‌ریزی آرمانی می‌تواند به طور هم‌زمان، چندین هدف اغلب متناقض را با یافتن یک جواب شدنی، مدیریت کند. تحلیل اوزان مشترک مدل DEA جمعی، جدید و کاربردی است. بنابراین، این مطالعه، یک CSW را توسعه می‌دهد که برای تحلیل کارایی انرژی کشورهای OECD، از GP استفاده می‌کند. از آنجایی که مدل DEA جمعی، اهمیت (اولویت) یکسانی را به ورودی‌ها و خروجی‌ها می‌دهد، مدل CSW پیشنهادی، با توجه به ورودی (استفاده بیش از حد از ورودی‌ها) یا خروجی (کسری خروجی‌ها)، ماهیت خاصی ندارد. مزیت استفاده از GP برای تولید یک CSW در DEA، در توانایی آن برای برطرف‌سازی مشکلات تصمیم‌گیری در دنیای واقعی، نهفته است. GP به طور خلاصه، تصمیم‌گیرندگان را قادر به ادغام ملاحظات سازمانی، مدیریتی و محیطی در یک مدل DEA می‌سازد تا با به حداقل رساندن انحرافات نامطلوب از سطوح مورد انتظار، کارایی تمام DMUها را به طور هم‌زمان، به حداکثر برسانند (کیانی ماوی و همکاران، ۲۰۱۹b).

جدول ۱، مدل‌های اخیر CSW برای تحلیل کارایی انرژی را برای تکمیل این امر، خلاصه می‌کند. این جدول، نشان می‌دهد که مدل‌های قبلی، فقط بر ورودی‌ها تمرکز داشتند. مدل CSW، هم ورودی‌ها و هم خروجی‌ها را در نظر می‌گیرد. به علاوه، کاهش ورودی‌های بیش از حد و خروجی‌های نامطلوب، به مقادیر فعلی آنها محدود شده است که دقت نتایج را افزایش می‌دهد و قدرت تمایز مدل CSW پیشنهادی را بهبود می‌بخشد. مطالعه ما، با تحلیل رویه‌های فعلی شرکت‌ها و مدیران تجاری در مورد انرژی‌های تجدیدپذیر و ارائه پیشنهادهایی برای تغییر با استفاده از مجموعه داده OECD، یک دیدگاه نظری جدید و کاربردهای عملی را برای آنها ارائه می‌دهد. اصلی‌ترین دستاوردهای این مطالعه، به طور خلاصه به شرح زیر است:

- یک مدل جدید برای مدل DEA جمعی، به منظور اندازه‌گیری کارایی انرژی کشورهای OECD توسعه داده شد.
- مدل CSW مبتنی بر GP پیشنهادی، به حداکثر رساندن هم‌زمان کارایی تمام DMUها را امکان‌پذیر می‌سازد.
- مدل CSW، به منظور تحلیل کارایی، خروجی‌های نامطلوب را در مدل جمعی، ادغام می‌کند.

سایر بخش‌های این مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است: بخش ۲، توسعه یک مدل CSW با استفاده از GP را برای مدل DEA جمعی، شرح می‌دهد، بخش ۳، یک مطالعه موردی از کشورهای OECD را ارائه می‌دهد و بخش ۴، نتیجه‌گیری نهایی مطالعه را خلاصه می‌کند.

جدول ۱: خلاصه‌ای از مدل‌های CSW اخیر برای تحلیل کارایی انرژی و محیط زیستی.

منبع	رویکرد CSW	ماهیت (ورودی/خروجی)	
		ورودی	خروجی
چنگ و همکاران (۲۰۱۸)	برنامه‌ریزی سازشی	بله	خیر
وو و همکاران (۲۰۱۸)	نظریه بازی‌ها	بله	خیر
کیانی ماوی و کیانی ماوی (۲۰۱۹)	نقطه ایده‌آل	بله	خیر
عمرانی و همکاران (۲۰۱۹)	نظریه بازی‌ها	بله	خیر
ژو و همکاران (۲۰۲۰)	اولویت انتخاب اوزان مشترک	بله	خیر
مقاله ما	برنامه‌ریزی آرمانی	بله	بله

۲- روش‌شناسی تحقیق

۲-۱- چارچوب DEA

Charnes و همکاران (۱۹۷۸) برای اولین بار مدل CCR را برای ارزیابی کارایی نسبی DMUها پیشنهاد کردند. کارایی نسبی با ماهیت ورودی DMU_k ، تحت شرایط بازده به مقیاس ثابت، با استفاده از مدل (۱) به دست می‌آید:

$$E_k^{CCR} = \text{Max} \sum_{r=1}^s u_r y_{rk} \quad (1)$$

$$s. t. \quad \sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0; j = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ik} = 1$$

$$u_r, v_i \geq 0; r = 1, 2, \dots, s; i = 1, 2, \dots, m$$

اگر $E_k^* = 1$ باشد، آنگاه DMU_k ، کارا است. $E_k^* < 1$ به یک DMU ناکارا اشاره دارد.

۲-۲- CSW برای مدل DEA جمعی با GP

مدل جمعی در مدل (۲) ارائه شده است که هدف آن به حداکثر رساندن کاهش احتمالی ورودی‌ها و افزایش احتمالی خروجی‌ها است (ژو، ۲۰۱۴).

$$Z_k = \text{Max} \sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{r=1}^s s_r^+ \quad (2)$$

$$s. t. \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- = x_{ik} \quad i = 1, 2, \dots, m;$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = y_{rk} \quad r = 1, 2, \dots, s;$$

$$\lambda_j, s_i^-, s_r^+ \geq 0$$

تعریف ۱: DMU_k ، کارای جمعی است اگر و فقط اگر $s_i^{+*} = 0$ و $s_i^{-*} = 0$ باشند (Cooper et al., 2007)

دوگان (شکل مضربی) مدل (۲)، در مدل (۳) نشان داده شده است:

$$W_k = \text{Min} \sum_{i=1}^m v_i x_{ik} - \sum_{r=1}^s u_r y_{rk} \quad (3)$$

$$s. t. \quad \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} - \sum_{r=1}^s u_r y_{rj} \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n;$$

$$v_i \geq 1 \quad i = 1, \dots, m;$$

$$u_r \geq 1 \quad r = 1, \dots, s.$$

زمانی که تعدادی از خروجی‌ها، نامطلوب هستند، تبدیل خطی $\bar{y}_j^b = -y_j^b + w > 0$ با $w = \text{Max } y_j^b + 1$ (Seiford and Zhu, 2002)، می‌تواند برای تبدیل آنها به خروجی‌های نرمال، استفاده شود. s_r^{+*} در مدل جمعی (۲)، می‌تواند بزرگ‌تر از y_r باشد (چن و ژو، ۲۰۲۰). متغیرهای اسلک برای خروجی‌ها (s_r^{+*})، کمبود در خروجی مربوطه (y_r) را نشان می‌دهند. به عبارت دیگر، اگر

یک DMU مفروض بتواند تمام خروجی‌های خود را به $y_r + s_r^+$ افزایش دهد، کارای ماهیت خروجی، می‌شود. با توجه به اینکه خروجی‌های نامطلوب، برعکس عمل می‌کنند (هرچه خروجی نامطلوب کمتر باشد، بهتر است)، باید آنها را با مدل جمعی ترکیب کرد تا از مقادیر منفی، جلوگیری شود. مدل (۴) برای این منظور، پیشنهاد شده است. فرض کنید O_D و O_{UD} به ترتیب مجموعه خروجی‌های مطلوب و نامطلوب با $O_D \cap O_{UD} = \emptyset$ هستند. در نتیجه،

$$Z_k = \text{Max} \sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{r=1}^{s_1} s_r^+ + \sum_{r=s_1+1}^s \bar{s}_r^+ \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{s. t. } & \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- = x_{ik} \quad i = 1, 2, \dots, m; \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = y_{rk} \quad r = 1, 2, \dots, s_1 (r \in O_D); \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j \bar{y}_{rj} - \bar{s}_r^+ = \bar{y}_{rk} \quad r = s_1 + 1, s_1 + 2, \dots, s (r \in O_{UD}); \\ & \bar{s}_r^+ \leq y_{rk} \quad r = s_1 + 1, s_1 + 2, \dots, s (r \in O_{UD}); \\ & \lambda_j, s_i^-, s_r^+, \bar{s}_r^+ \geq 0 \end{aligned}$$

شکل دوگان مدل (۴) که برابر با مدل (۳) به همراه خروجی‌های نامطلوب است، به عنوان مدل (۵) پیشنهاد شده است:

$$W_k = \text{Min} \sum_{i=1}^m v_i x_{ik} - \sum_{r=1}^{s_1} u_r y_{rk} - \sum_{r=s_1+1}^s \bar{u}_r \bar{y}_{rk} + \sum_{r=s_1+1}^s t_r y_{rk} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{s. t. } & \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} - \sum_{r=1}^{s_1} u_r y_{rj} - \sum_{r=s_1+1}^s \bar{u}_r \bar{y}_{rj} \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \\ & \bar{u}_r + t_r \geq 1 \quad r = s_1 + 1, s_1 + 2, \dots, s \\ & v_i \geq 1 \quad i = 1, \dots, m \\ & u_r \geq 1 \quad r = 1, \dots, s_1 \\ & \bar{u}_r, t_r \geq 0 \quad r = s_1 + 1, s_1 + 2, \dots, s. \end{aligned}$$

مبنای توسعه مجموعه‌ای از اوزان مشترک برای مدل DEA جمعی، به حداکثر رساندن همزمان کاهش ورودی و افزایش خروجی برای تمام DMUها در مدل‌های (۲) و (۴)، یا به حداقل رساندن همزمان تفاضل مجموع وزنی ورودی‌ها و مجموع وزنی خروجی برای تمام DMUها در مدل‌های (۳) و (۵) است. این مفهوم، همان‌طور که در مدل (۶) نشان داده شده است، به عنوان برنامه‌ریزی خطی چند هدفه (MOLP) فرموله شده است.

$$\text{Min}_j \left[\sum_{i=1}^m v_i x_{ik} - \sum_{r=1}^{s_1} u_r y_{rk} - \sum_{r=s_1+1}^s \bar{u}_r \bar{y}_{rk} + \sum_{r=s_1+1}^s t_r y_{rk} \right] \quad (6)$$

$$\begin{aligned} s. t. \quad & \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} - \sum_{r=1}^{s_1} u_r y_{rj} - \sum_{r=s_1+1}^s \bar{u}_r \bar{y}_{rj} \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \\ & \bar{u}_r + t_r \geq 1 \quad r = s_1 + 1, s_1 + 2, \dots, s \\ & v_i \geq 1 \quad i = 1, \dots, m \\ & u_r \geq 1 \quad r = 1, \dots, s_1 \\ & \bar{u}_r, t_r \geq 0 \quad r = s_1 + 1, s_1 + 2, \dots, s. \end{aligned}$$

GP را برای تبدیل MOLP مدل (۶) به یک LP تک‌هدفه، که به عنوان مدل (۷) تنظیم شده است، استفاده می‌کنیم:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{j=1}^n d_j^+ \\ s. t. \quad & \sum_{i=1}^m v_i x_{ik} - \sum_{r=1}^{s_1} u_r y_{rk} - \sum_{r=s_1+1}^s \bar{u}_r \bar{y}_{rk} + \sum_{r=s_1+1}^s t_r y_{rk} - d_j^+ + d_j^- = W_j^* \quad j = 1, 2, \dots, n; \\ & \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} - \sum_{r=1}^{s_1} u_r y_{rj} - \sum_{r=s_1+1}^s \bar{u}_r \bar{y}_{rj} \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n; \\ & \bar{u}_r + t_r \geq 1 \quad r = s_1 + 1, s_1 + 2, \dots, s \\ & v_i \geq 1 \quad i = 1, \dots, m; \\ & u_r \geq 1 \quad r = 1, \dots, s_1 \\ & \bar{u}_r, t_r \geq 0 \quad r = s_1 + 1, s_1 + 2, \dots, s. \\ & d_j^+, d_j^- \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (7)$$

که W_j^* در آن، مقدار تابع هدف بهینه مدل (۵) برای DMU_j است. بنابراین $(v_i^*, u_r^*, \bar{u}_r^*)$ ، جواب‌های بهینه مدل (۷) هستند که CSW در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، مقدار تابع هدف در مدل (۵) (شکل مضربی مدل جمعی) که از CSW استفاده می‌کند، به صورت معادله (۸) بیان می‌شود.

$$W_k^{*CSW} = \sum_{i=1}^m v_i^* x_{ik} - \sum_{r=1}^{s_1} u_r^* y_{rk} - \sum_{r=s_1+1}^s \bar{u}_r^* \bar{y}_{rk} + \sum_{r=s_1+1}^s t_r^* y_{rk} \quad (8)$$

مدل (۹) برای تعیین میزان کاهش ورودی، s_i^- و میزان افزایش خروجی پیشنهاد شده است که برای هر DMU به ترتیب برابر با s_r^+ و \bar{s}_r^+ هستند:

$$Z_k^{CSW} = \text{Max} \sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{r=1}^{s_1} s_r^+ + \sum_{r=s_1+1}^s \bar{s}_r^+ \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
 s. t. \quad & \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- = x_{ik} \quad i = 1, 2, \dots, m; \\
 & \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = y_{rk} \quad r = 1, 2, \dots, s_1 (r \in O_D); \\
 & \sum_{j=1}^n \lambda_j \bar{y}_{rj} - \bar{s}_r^+ = \bar{y}_{rk} \quad r = s_1 + 1, s_1 + 2, \dots, s (r \in O_{UD}); \\
 & \sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{r=1}^{s_1} s_r^+ + \sum_{r=s_1+1}^s \bar{s}_r^+ \geq W_k^{*CSW} \\
 & \bar{s}_r^+ \leq y_{rk} \quad r = s_1 + 1, s_1 + 2, \dots, s (r \in O_{UD}); \\
 & \lambda_j, s_i^-, s_r^+, \bar{s}_r^+ \geq 0
 \end{aligned}$$

فرض کنید λ_j^* , s_i^{-*} , s_r^{+*} و \bar{s}_r^{+*} جواب‌های بهینه مدل (۹) باشند. معادله (۱۰)، برای تبدیل تابع هدف مدل (۹) به یک امتیاز کارایی در بازه $[0, 1]$ ، به کار رفته است (چن و ژو، ۲۰۲۰):

$$E_k^* = \frac{1}{s+m} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{y_{rk}}{y_{rk} + s_r^{+*}} + \sum_{r=s_1+1}^s \frac{\bar{y}_{rk}}{\bar{y}_{rk} + \bar{s}_r^{+*}} + \sum_{i=1}^m \frac{x_{ik} - s_i^{-*}}{x_{ik}} \right) \quad (10)$$

۳- مطالعه موردی

۳-۱- انتخاب ورودی‌ها و خروجی‌ها

برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی CSW (۵)، از داده‌های مربوط به بهره‌وری انرژی و انتشارات کربن برای کشورهای OECD استفاده کرده‌ایم. برای ارزیابی کارایی انرژی‌های تجدیدپذیر از چندین معیار مانند مصرف انرژی تجدیدپذیر (چنگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ Sohag و همکاران، ۲۰۲۱؛ زی و همکاران، ۲۰۲۱؛ یو و همکاران، ۲۰۱۹)، GDP (چنگو همکاران، ۲۰۲۱؛ یو و همکاران، ۲۰۱۹؛ Zubair و همکاران، ۲۰۲۱)، قیمت‌های انرژی (لی و همکاران، ۲۰۲۰؛ لی و همکاران، ۲۰۲۱a)، شدت انرژی، بهره‌وری انرژی (Bhattacharya et al., 2020; Krarti et al., 2019) نیروی کار (بامپاتسو و همکاران، ۲۰۲۱؛ لی و همکاران، ۲۰۲۱a)، مصرف انرژی (هان و همکاران، ۲۰۲۲؛ کیانی ماوی و کیانی ماوی، ۲۰۱۹؛ زی و همکاران، ۲۰۲۱)، پسماندهای شهری (Giannakitsidou et al., 2020؛ کیانی ماوی و کیانی ماوی، ۲۰۱۹)، نسبت انرژی‌های تجدیدپذیر به انرژی‌های تجدیدناپذیر (سوهاگ و همکاران، ۲۰۲۱)، هزینه نوآوری فناوریانه (چنگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۱)، انتشارات CO₂ (بامپاتسو و همکاران، ۲۰۲۱؛ Geng و همکاران، ۲۰۲۱؛ لی و همکاران، ۲۰۲۱a؛ یانگ و همکاران، ۲۰۲۰) و منطقه جنگلی (Sun et al., 2020). استفاده کردیم. هفت شاخص برای ارزیابی کارایی انرژی کشورهای OECD، انتخاب شدند. داده‌های نیروی کار، GDP و انتشارات CO₂ از پایگاه داده بانک جهانی (www.worldbank.org) گرفته شده است. سایر داده‌ها نیز از پایگاه داده OECD (www.oecd.org) به‌دست آمده است (جدول ۲). برای تحلیل کارایی انرژی، از آخرین داده‌های موجود برای تمام متغیرها (تا سال ۲۰۱۹) استفاده کردیم. از آنجایی که داده‌های مربوط به انتشارات CO₂ برای سال ۲۰۱۹ در دسترس نیست، بنابراین داده‌های سال ۲۰۱۸، جایگزین آن شده‌اند. همچنین با توجه به اینکه کلمبیا و کاستاریکا به ترتیب فقط در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ به OECD پیوستند، در این مطالعه در نظر گرفته نمی‌شوند.

خروجی‌ها:

y_1 : GDP (10^9 دلار آمریکا)

ورودی‌ها:

x_1 : نیروی کار (10^3 نفر)

- x_2 : تشکیل سرمایه ثابت ناخالص (10^9 دلار آمریکا).
 x_3 : تقاضای انرژی اولیه (10^6 تن معادل نفت)
 y_2 : مصرف انرژی تجدیدپذیر (10^3 تن معادل نفت)
 y_3 : انتشار CO_2 (10^6 تن)
 y_4 : پسماندهای شهری (10^6 تن)

جدول ۲: مجموعه داده‌های OECD

خروجی				ورودی			کشور
y_4	y_3	y_2	y_1	x_3	x_2	x_1	
13.800	386.620	9405.018	1396.567	132.430	302.6662	13,500.080	Australia
5.220	63.180	9993.287	445.075	33.100	128.7205	4622.075	Austria
4.779	93.470	4283.027	533.255	55.220	150.598	5137.174	Belgium
35.500	574.400	49,455.393	1741.576	302.040	412.9706	20,743.970	Canada
8.200	86.620	9787.230	279.385	40.320	110.2619	9514.561	Chile
12.100	79.490	10,200.000	323.430	40.000	123.7935	26,413.532	Colombia
4.907	33.380	6103.857	350.104	16.530	72.70464	3023.904	Denmark
0.490	16.000	1205.728	31.471	5.210	12.77049	703.864	Estonia
3.123	44.360	11,566.806	268.966	33.890	66.17278	2748.960	Finland
36.740	309.960	25,787.301	2715.518	241.400	774.7687	30,385.859	France
50.612	709.540	44,019.095	3861.124	300.830	988.1776	43,871.267	Germany
5.613	65.290	2838.403	205.327	22.130	34.42805	4822.612	Greece
3.780	46.390	2754.985	163.504	26.720	88.69537	4750.636	Hungary
0.230	2.200	5456.835	24.837	6.050	4.491872	215.408	Iceland
1.950	37.110	1500.285	398.590	13.480	231.0656	2429.748	Ireland
5.791	61.970	651.521	394.652	22.760	75.39221	4159.779	Israel
30.079	324.850	26,916.586	2004.913	147.600	474.3836	25,787.158	Italy
42.720	1106.150	26,186.206	5064.873	419.080	1365.548	68,838.956	Japan
20.500	630.870	6616.127	1646.739	279.920	669.6526	28,541.664	Korea
0.840	7.630	1849.364	34.055	4.470	14.13918	983.777	Latvia
1.319	11.590	1560.807	54.640	7.670	23.10187	1469.927	Lithuania
0.491	9.320	292.540	71.105	3.960	12.77572	313.152	Luxembourg
42.300	472.140	16,290.354	1268.871	184.080	522.0366	57,839.046	Mexico
8.806	151.170	5108.830	907.051	71.190	217.5197	9374.012	Netherlands
3.750	32.210	8614.550	209.127	20.590	53.13112	2787.494	New Zealand
4.151	37.350	13,034.934	405.510	23.880	96.01328	2829.759	Norway
12.753	312.740	9681.232	595.862	103.580	234.7532	18,318.734	Poland
5.281	49.780	5016.287	239.511	21.660	67.36887	5288.733	Portugal
2.299	33.000	1631.470	105.119	16.470	37.6264	2749.141	Slovak Republic
1.052	14.050	1128.712	54.174	6.780	16.66449	1028.117	Slovenia
22.438	258.340	17,898.937	1393.491	121.720	394.6569	23,227.683	Spain
4.611	36.000	19,194.045	531.283	47.060	136.9912	5455.406	Sweden
6.079	37.480	5466.512	731.474	24.340	157.4957	4965.077	Switzerland
35.017	412.970	23,382.166	761.428	146.620	580.1172	33,318.941	Turkey
30.707	358.800	21,408.052	2830.814	171.360	580.778	34,639.274	UK
265.225	4981.300	174,468.181	21,433.225	2204.140	4492.626	167,329.067	United States

از آنجایی که انتشار CO_2 و پسماندهای شهری، خروجی‌های نامطلوب هستند، از تبدیل خطی $\bar{y}_j^b = -y_j^b + w > 0$ که در آن $w = \max y_j^b + 0.1$ است، استفاده کردیم تا آنها را به خروجی‌های نرمال تبدیل کنیم. برای بهبود کارایی انرژی کشورهای OECD با کاهش همزمان ورودی‌ها و افزایش خروجی‌ها، از مدل DEA جمعی برای درک موقعیت ورودی‌ها و خروجی‌ها استفاده کردیم. مدل CSW، مبنای ثابتی را برای اندازه‌گیری و مقایسه کارایی انرژی کشورهای OECD برای DMها فراهم می‌کند. بنابراین، ارزیابی کارایی انرژی این کشورها آنها را قادر می‌سازد تا سیاست‌های محیط زیستی و انرژی خود را برای ارتقای توسعه اقتصادی ایجاد کنند یا بهبود بخشند و در عین حال، اثرات منفی محیط زیستی عملیات تجاری را برطرف سازند.

جدول ۳، خروجی مدل DEA جمعی را نشان می‌دهد که با حل مدل (۴) به دست آمده است.

۲-۳- بحث در مورد یافته‌ها



تابع هدف مدل جمعی، فضایی را برای بهبود نشان می‌دهد که می‌توان چه مقدار از ورودی‌ها را کاهش و چه مقدار از خروجی‌ها را افزایش داد تا DMU، کارا شود. همان‌طور که جدول ۳ نشان می‌دهد، مدل متداول DEA جمعی، هفت کشور دانمارک، یونان، ایسلند، ایرلند، لتونی، لوکزامبورگ و سوئیس را به عنوان کشورهای کارایی انرژی شناسایی می‌کند زیرا تابع هدف آنها، صفر است یعنی از کمترین ورودی‌های احتمالی برای تولید بیشترین خروجی‌های احتمالی استفاده می‌کنند. حل مدل (۷) همان‌طور که در (۱۱) نشان داده شده است، منجر به CSW برای ورودی‌ها و خروجی‌ها می‌شود.

$$v_1, v_2 = 1; v_3 = 92.0149; u_1 = 9.2969; u_2 = 1; \bar{u}_3, \bar{u}_4 = 0; t_3, t_4 = 1 \quad (11)$$

نتایج تحلیل اوزان مشترک برای تعیین متغیرهای اسلک در کشورهای OECD، در جدول ۴ نشان داده شده است. CSW پیشنهادی برای مدل DEA جمعی برخلاف مدل DEA جمعی کلاسیک، تنها یک کشور OECD، یعنی ایسلند را با بالاترین کارایی انرژی (نمره کارایی = ۰.۹۹۹۷) شناسایی می‌کند. با وجود اینکه متغیرهای اسلک ورودی‌ها و خروجی‌ها برای لوکزامبورگ، بسیار کوچک است، مجموع اسلک‌ها، کشور لوکزامبورگ را پس از ایسلند، در جایگاه دوم قرار می‌دهد. به طور کلی، DMU باید بیشتر بر روی خروجی‌ها تمرکز کنند، و به‌طور ویژه، مصرف انرژی تجدیدپذیر را افزایش و در عین حال انتشار CO₂ و پسماندهای شهری را کاهش دهند تا کارا شوند. ضریب همبستگی اسپیرمن میان رتبه‌بندی DMUها برحسب اندازه کارایی با CSW و مدل DEA جمعی کلاسیک، برابر با ۰.۷۰۲۸ است زیرا توابع هدف، (مجموع اسلک‌ها) با مدل پیشنهادی CSW و با مدل DEA جمعی کلاسیک برای بسیاری از کشورهای OECD تغییر کرده‌اند. بنابراین، مدل CSW پیشنهادی، مقادیر اسلک بالاتری را برای ورودی‌ها و خروجی‌ها به همراه دارد. این امر نشان می‌دهد که کشورهای OECD باید ورودی‌ها (کاهش ورودی بیشتر) و خروجی‌های (افزایش بیشتر) خود را بهبود بخشند.

جدول ۳: متغیرهای اسلک کشورهای OECD که از مدل DEA جمعی استفاده می‌کنند: مدل (۴)

کشور	تابع هدف (مدل ۴)	امتیاز کارایی از معادله (۱۰) (رتبه)	s_1^-	s_2^-	s_3^-	s_1^+	s_2^+	s_3^+	s_4^+
Australia	286.4134	0.9517 (10)	11.7190	0.0000	0.0000	0.0000	0.8570	260.0374	13.8000
Austria	2270.5775	0.8704 (19)	1066.1436	26.9295	0.0000	0.0000	1109.8006	63.1800	4.5238
Belgium	3496.5514	0.8604 (21)	0.0000	35.5960	2.2791	0.0000	3406.1575	47.7395	4.7793
Canada	10,249.3834	0.7494 (29)	4407.9295	37.4421	134.7440	0.0000	5193.9154	439.8525	35.5000
Chile	8183.3206	0.8051 (27)	6834.2148	50.4481	10.7791	0.0000	1214.9525	64.7262	8.2000
Czech Republic	4765.1408	0.8345 (25)	3038.8975	70.2170	15.6472	0.0000	1551.7567	83.2848	5.3375
Denmark	0.0000	1.0000 (1)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Estonia	698.7132	0.9429 (11)	448.6626	4.9202	0.0000	12.1238	216.5816	16.0000	0.4249
Finland	1179.5613	0.8936 (16)	169.5080	8.6234	5.3105	0.0000	969.5532	23.4436	3.1227
France	11,931.5240	0.7237 (30)	8714.7610	199.1159	0.0000	0.0000	2671.1201	309.9600	36.5671
Germany	5510.9880	0.8609 (20)	4573.3848	185.2841	0.0000	0.0000	0.0000	709.5400	42.7791
Greece	0.0000	1.0000 (1)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Hungary	4461.6855	0.8517 (24)	3192.4437	54.0668	7.8716	0.0000	1168.0942	35.4292	3.7800
Iceland	0.0000	1.0000 (1)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ireland	0.0000	1.0000 (1)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Israel	75.6073	0.9841 (9)	8.2823	0.0000	0.0000	0.0000	2.0440	61.9700	3.3110
Italy	8602.5066	0.8554 (22)	8199.6682	51.8984	0.0000	0.0000	0.0000	324.8500	26.0901
Japan	23,609.0926	0.5635 (34)	20,785.9542	311.2350	0.0000	0.0000	1372.5782	1106.1500	33.1752
Korea	23,299.8786	0.6430 (33)	12,946.0108	314.0029	122.3768	0.0000	9400.6579	496.3301	20.5000
Latvia	0.0000	1.0000 (1)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Lithuania	1531.5054	0.9121 (14)	1036.2091	11.5576	0.0000	0.0000	471.0526	11.5900	1.0960
Luxembourg	0.0000	1.0000 (1)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Mexico	53,255.8984	0.3134 (36)	45,576.8394	247.1706	63.2371	0.0000	6969.4602	356.8910	42.3000
Netherlands	5772.7477	0.8265 (26)	1466.0019	17.8244	0.0000	0.0000	4151.8142	128.3012	8.8060
New Zealand	1613.7006	0.8985 (15)	941.0198	7.3309	0.0000	0.0000	633.9972	27.6027	3.7500
Norway	39.5468	0.9904 (8)	0.0000	0.0519	0.0000	0.0000	0.1556	37.3500	1.9893
Poland	16,272.5263	0.6887 (32)	12,573.7275	106.1572	44.8371	0.0000	3274.0684	260.9833	12.7528
Portugal	4344.4963	0.8530 (23)	3255.8602	14.0829	0.0000	0.0000	1019.4929	49.7800	5.2803
Slovak Republic	2707.3961	0.8780 (18)	1756.3300	15.6870	3.0090	0.0000	902.5262	27.5450	2.2989
Slovenia	1066.3331	0.9195 (13)	617.6481	5.8387	0.0000	0.0000	428.0180	14.0500	0.7782
Spain	16,687.3696	0.7163 (31)	10,459.7014	93.5980	0.0000	0.0000	5936.1112	175.5213	22.4378
Sweden	2071.1371	0.8805 (17)	691.8035	19.5175	0.0000	0.0000	1340.1500	15.0552	4.6108

0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000 (1)	0.0000	Switzerland
35.0174	345.6041	2975.6634	0.0000	72.5999	415.5375	25,970.6473	0.5271 (35)	29,815.0697	Turkey
19.1051	358.8000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	243.4424	0.9384 (12)	621.3475	United Kingdom
265.2250	4975.6113	876.2931	0.0000	10.5031	0.0000	0.0000	0.7571 (28)	6127.6325	United States

مجموع اسلک‌ها = ۵۴۷.۶۵۱۴، میانگین امتیاز کارایی: ۰.۸۴۶۹

برای اعتبارسنجی مدل، همان‌طور که در جدول ۵ نشان داده شده است، مدل CCR (مدل ۱) و مدل DEA جمعی کلاسیک (مدل ۲) برای شناسایی امتیازهای کارایی DMUها، حل شده‌اند. مدل جمعی بهبودیافته (مدل ۴) با توجه به نتایج، هفت کشور OECD را به عنوان DMUهای کارا شناسایی کرد. این کشورها توسط هر دو مدل CCR (مدل ۱) و مدل DEA جمعی کلاسیک (مدل ۲)، به عنوان کشورهای کارا شناخته شده‌اند که نشان از عملکرد مناسب مدل جمعی بهبودیافته دارد. با وجود اینکه ورودی‌ها و خروجی‌های مطلوب را می‌توان تغییر داد تا کارایی DMUها را بهبود بخشند، مشکل اصلی این است که اسلک‌های یافت‌شده برای خروجی‌های نامطلوب با مدل جمعی، غیرواقعی هستند. به عنوان مثال، مدل جمعی، در زمانی که سطح فعلی استرالیا برابر با $(386.620, 13.800)$ شد، $(\bar{s}_3^+, \bar{s}_4^+) = (89142.7974, 4734.5307)$ را برای انتشار CO_2 و پسماندهای شهری در استرالیا شناسایی می‌کند. مدل CSW پیشنهادی با محدود کردن اسلک خروجی‌های نامطلوب به مقدار مشاهده‌شده، این ضعف را برطرف می‌سازد.

مزیت مدل CSW پیشنهادی این است که رتبه‌بندی کاملی از تمام DMUها ارائه می‌دهد و ناحیه‌های بهبود برای ورودی‌ها و خروجی‌ها را تعیین می‌کند. مدل پیشنهادی CSW نه تنها مشکل داشتن کشورهای کارای جمعی چندگانه را حل می‌کند، بلکه منجر به افزایش مجموع اسلک‌ها برای سایر کشورهای OECD نیز شده است که به معنای کاهش یافتن امتیازهای کارایی آنها است زیرا مدل CSW پیشنهادی، آن دسته از نواحی که نیاز به بهبود دارند را به طور کارا شناسایی می‌کند. افزایش مجموع اسلک برای اعضای OECD نشان می‌دهد که کشورها باید ورودی‌ها و خروجی‌های خود را به طور کارا مدیریت کنند تا کارایی انرژی‌های تجدیدپذیر خود را بهبود بخشند. متغیرهای اسلک برای ورودی‌ها نشان می‌دهد که تقاضای انرژی اولیه (x_3) به طور کارا برای تولید انرژی‌های تجدیدپذیر مصرف می‌شود. بنابراین، اسلک (s_3^-) بسیار کوچک است. در واقع ۱۹ کشور، $s_3 = 0$ را نشان می‌دهند و سه کشور، s_3^- بسیار کوچک را نشان می‌دهند. چهار عضو OECD، $s_2^- = 0$ داشتند و سه کشور OECD، s_2 بسیار کوچک را گزارش کردند. بنابراین، این کشورهای OECD براساس تشکیل سرمایه ثابت ناخالص (x_2) ، از نظر فنی، کارا بوده‌اند. نیروی کار (x_1) ، تنها ورودی با اسلک بالاتر (s_1^-) است. فقط ایرلند $s_1^- = 0$ را نشان داد، در حالی که سایر کشورها، s_1^- مثبت داشتند. بنابراین، کشورهای OECD می‌توانند برنامه‌های آموزشی و توسعه بیشتری را برای افزایش کارایی انرژی‌های تجدیدپذیر خود، اجرا کنند.

متغیرهای اسلک برای خروجی‌ها نشان می‌دهند که کشورهای OECD ناکارا می‌توانند کارایی خود را با افزایش خروجی‌های خود به اندازه اسلک‌های متناظر خود، بهبود بخشند. به عنوان مثال، استرالیا برای GDP و تولید انرژی تجدیدپذیر، به ترتیب دارای $s_1^+ = 0.0134$ و $s_2^+ = 2183.9707$ است. استرالیا فضای زیادی برای بهبود تولید انرژی‌های تجدیدپذیر خود دارد، زیرا تنها ۷ درصد از مصرف انرژی استرالیا در سال ۲۰۱۹-۲۰۲۰ از طریق منابع تجدیدپذیر، تامین شده است. انرژی بادی و خورشیدی، دو محرک اصلی برای دوبرابر کردن تولید انرژی‌های تجدیدپذیر در استرالیا از دهه ۱۹۶۰ بوده‌اند که سهم هر کدام برابر با ۹ درصد است، در حالی که انرژی برق آبی، ۶ درصد سهم داشته است. تولید انرژی خورشیدی در مقیاس کوچک در استرالیا در طی دهه گذشته، رشد متوسط ۲۸ درصدی را تجربه کرده است، در حالی که انرژی تولیدشده از باد در دهه گذشته، به طور سالانه، ۱۴ درصد رشد داشته است. تولید انرژی خورشیدی در مقیاس بزرگ در بین سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱، با نرخ متوسط ۱۷۴۷ درصد در

سال، افزایش یافت (دپارتمان تغییر اقلیم، انرژی، محیط‌زیست و آب^۶، ۲۰۲۲). از آنجایی که پسماندهای شهری و انتشار CO₂ خروجی‌های نامطلوب هستند، متغیرهای اسلک آنها، حداکثر کاهش را نشان می‌دهند. به عنوان مثال، $\bar{s}_4^+ = \bar{s}_3^+ = 386.62$ ، 13.80 نشان می‌دهند که استرالیا باید انتشار CO₂ و پسماندهای شهری خود را به طور قابل توجهی کاهش دهد تا در انرژی‌های تجدیدپذیر، کارا باشد.

جدول ۴: متغیرهای اسلک کشورهای OECD که از CSW برای مدل DEA جمعی استفاده می‌کنند: مدل‌های (۷)–(۹)

کشور	تابع هدف (مدل ۹)	امتیاز کارایی از معادله (۱۰) (رتبه)	s_1^-	s_2^-	s_3^-	s_1^+	s_2^+	s_3^+	s_4^+
Australia	3997.0555	0.9270 (8)	1386.9307	24.5587	1.1621	0.0134	2183.9707	386.6200	13.8000
Austria	2727.2402	0.9064 (9)	1229.4908	30.1041	0.0036	0.0035	1399.2383	63.1800	5.2200
Belgium	5082.5665	0.8553 (16)	620.5195	46.5814	2.9126	0.0089	4372.2154	35.5496	4.7790
Canada	28,409.7504	0.7347 (28)	10,507.6412	152.2492	144.1746	0.0167	16,995.7687	574.4000	35.5000
Chile	9851.6705	0.7340 (29)	7471.2934	61.7688	11.4332	0.0001	2212.3550	86.6200	8.2000
Czech Republic	6800.2793	0.6868 (31)	3834.5881	84.2766	16.4894	0.0004	2789.9395	68.0085	6.9768
Denmark	790.5899	0.9638 (6)	635.4771	0.0000	0.0000	0.0000	117.0828	33.3800	4.6501
Estonia	799.3511	0.7818 (24)	495.4526	6.6647	0.0000	3.8753	276.8589	16.0096	0.4900
Finland	2323.0052	0.8882 (11)	606.2058	16.3382	5.7496	0.0001	1648.3608	43.2277	3.1230
France	25,885.3667	0.8286 (18)	8859.1853	246.4450	0.0000	0.0142	16,433.0222	309.9600	36.7400
Germany	33,019.1856	0.8195 (21)	18,825.8470	267.5725	0.0000	0.0045	13,165.6095	709.5400	50.6120
Greece	4769.9043	0.8048 (22)	3571.3299	0.0000	6.8260	0.0008	1120.8447	65.2900	5.6130
Hungary	5550.8710	0.6879 (30)	3610.2668	61.4605	8.2990	0.0001	1820.6746	46.3900	3.7800
Iceland	2.4304	0.9997 (1)	0.1164	0.0000	0.0000	0.0106	0.0152	2.1724	0.1158
Ireland	84.5964	0.9850 (5)	0.0000	16.3784	0.0000	0.0000	29.1580	37.1100	1.9500
Israel	2662.0354	0.8561 (15)	1236.0017	0.0000	0.0000	0.0000	1358.2728	61.9700	5.7910
Italy	18,861.7915	0.8567 (14)	11,686.6823	84.6354	0.0000	0.0000	6778.8895	281.5053	30.0790
Japan	60,192.4018	0.7653 (26)	35,198.7433	427.3090	0.0000	0.0000	23,657.0740	866.5554	42.7200
Korea	39,623.2989	0.6146 (35)	18,644.9942	419.1727	130.2826	0.0001	19,777.4794	630.8700	20.5000
Latvia	916.1097	0.7772 (25)	794.0509	7.0835	0.0000	8.3087	98.2138	7.6300	0.8228
Lithuania	1547.6098	0.7919 (23)	1041.8821	11.6684	0.0000	0.0000	481.1504	11.5900	1.3190
Luxembourg	9.8124	0.9992 (2)	0.4774	0.0002	0.0000	0.0421	0.0644	8.7389	0.4894
Mexico	62,376.2350	0.6443 (33)	49,061.3723	309.0609	66.8062	0.0000	12,424.5556	472.1400	42.3000
Netherlands	7357.1584	0.8714 (12)	2089.4579	26.0922	0.0000	0.0000	5112.6981	120.1042	8.8060
New Zealand	1964.9619	0.9034 (10)	1065.1765	9.7470	0.0011	0.0026	854.0748	32.2100	3.7500
Norway	91.3060	0.9958 (3)	26.1130	0.0001	0.0000	0.0000	25.0404	37.3500	2.8024
Poland	21,893.5603	0.6584 (32)	14,731.5482	144.4082	47.0355	0.0017	6645.0736	312.7400	12.7530
Portugal	4675.3964	0.8417 (17)	3374.0179	16.3937	0.0000	0.0000	1229.9239	49.7800	5.2810
Slovak Republic	3196.3795	0.7365 (27)	1943.7295	19.0085	3.2004	0.0000	1195.1421	33.0000	2.2990
Slovenia	1067.4655	0.8238 (20)	617.6741	5.8369	0.0000	0.0000	428.8526	14.0500	1.0519
Spain	20,353.5289	0.8242 (19)	11,461.6098	109.9053	0.0000	0.0004	8501.2353	258.3400	22.4380
Sweden	3103.6876	0.9281 (7)	1064.5675	26.7881	0.0000	0.0002	2002.2855	5.4352	4.6110
Switzerland	58.7415	0.9952 (4)	7.5596	0.0355	0.0001	0.0000	7.5874	37.4800	6.0790
Turkey	38,407.4494	0.6162 (34)	29,272.1705	473.9742	75.9776	0.0008	8137.3393	412.9700	35.0170
United Kingdom	22,907.9911	0.8613 (13)	19,708.8504	58.1307	0.0000	0.0000	2751.5031	358.8000	30.7070
United States	163,011.6898	0.6061 (36)	14,760.5285	614.4724	184.2019	0.0004	142,205.9617	4981.3000	265.2250

مجموع اسلک‌ها = ۶۰۴,۳۷۲,۴۷۳۸، میانگین امتیاز کارایی = ۰.۸۲۱۴.

در واقع، دستیابی به انتشار کربن صفر خالص و بهبود کارایی انرژی، نیازمند سیاست‌های اقتصاد کلان آینده‌نگر است که سرمایه‌گذاری‌ها در پروژه‌های نوآورانه انرژی تجدیدپذیر را تقویت می‌کند (Zubair et al., 2021). زمینه‌های عمده تغییر، مربوط به خروجی است. دانمارک از سال ۲۰۰۷، بالاترین میزان پسماند شهری سرانه را داشت و پس از آن، نروژ در رده بعدی قرار داشت. در مقایسه با میانگین سرانه ۵۲۴ کیلوگرم پسماند شهری سرانه برای کشورهای عضو OECD، این شاخص در سال ۲۰۱۷، به ازای هر دانمارکی، برابر با ۷۸۵ کیلوگرم و به ازای هر نروژی برابر با ۷۴۵ کیلوگرم است که به فعالیت‌های ملی مانند تولید ۱۲۷ کیلوگرم

^۶ Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water

پسماند باغی مربوط می‌شود. با این حال، دانمارک در تبدیل پسماندهای شهری از محل‌های دفن پسماند و بازیابی انرژی از پسماندسوزی، عملکرد مناسبی داشته است. پسماندسوزی با بازیابی انرژی که ۵۳ درصد از پسماندهای شهری تصفیه‌شده در سال ۲۰۱۷ را تشکیل می‌داد، شامل ۱۹ درصد پسماند کمپوست شده، ۲۷ درصد پسماند بازیافت‌شده و فقط ۱ درصد پسماند دفن‌شده در محل بود (سازمان همکاری و توسعه اقتصادی، ۲۰۱۹).

کاهش اثرات تغییر اقلیم، مستلزم اجرای منابع انرژی پایدار و تجدیدپذیر است. در ایسلند، تقریباً ۸۵ درصد از کل تامین انرژی اولیه، از طریق منابع انرژی تجدیدپذیر داخلی صورت می‌گیرد. ایسلند، موقعیت منحصر به فردی را در تولید و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، ارائه می‌دهد زیرا بالاترین نسبت انرژی‌های تجدیدپذیر را در بودجه کل انرژی ملی دارد و ۱۰۰ درصد برق در آن، توسط منابع تجدیدپذیر انرژی تولید می‌شود. به عنوان مثال در سال ۲۰۱۵، انرژی آبی و انرژی زمین‌گرمایی به ترتیب ۷۳ و ۲۷ درصد از تولید برق در ایسلند را به خود اختصاص دادند. با وجود اینکه میانگین تولید برق در اتحادیه اروپا، تقریباً برابر با ۶۰۰۰ کیلووات ساعت سرانه است، سرانه ایسلند از ۵۵۰۰۰ کیلووات ساعت بیشتر شده و این کشور را به بزرگ‌ترین تولیدکننده انرژی سبز در جهان تبدیل کرده است (Government of Iceland, 2021). جدول ۲ نشان می‌دهد که ایسلند، کم‌ترین تولید انتشار CO_2 و پسماندهای شهری را دارد که به طور قابل توجهی به بالاترین کارایی انرژی آن، کمک می‌کند. با وجود اینکه ایسلند، مسئول ۰.۰۱ درصد انتشار CO_2 در جهان است، بیشتر CO_2 تولیدشده در آن، با استفاده از فناوری جذب و ذخیره کربن (CCS) پردازش می‌شود. این فناوری، CO_2 را جذب کرده و از سایر گازها جدا می‌کند، آن را با لوله‌کشی یا کشتی به مکان مناسبی می‌برد و سپس در اعماق زمین شامل مناطق وسیعی از سنگ‌های رسوبی یا میادین نفت و گاز تخلیه شده، تزریق می‌کند. این فرآیند به جای آلودگی آسمان، CO_2 را به مواد معدنی کربناتی بی‌ضرر، تبدیل می‌کند (Veal, 2020). با مقایسه ایسلند و ایالات متحده آمریکا که از نظر GDP، به ترتیب کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین کشورهای OECD هستند، نشان داده می‌شود که نیروی کار در ایسلند، برابر با حدود ۰.۱۳ درصد از نیروی کار ایالات متحده آمریکا است که به ترتیب با تولیدی معادل با ۰.۰۴ درصد انتشارات CO_2 و ۰.۰۸ درصد پسماندهای شهری ایالات متحده، معادل با ۰.۱۱ درصد GDP این کشور را تولید می‌کند. در عین حال، نسبت مصرف انرژی تجدیدپذیر در ایالات متحده آمریکا، ۱۱ برابر بیشتر از مصرف انرژی اولیه در ایسلند است. بنابراین، کارایی کامل انرژی ایسلند را می‌توان به مقدار اندکی از ورودی‌های موردنیاز برای تولید خروجی‌های نسبتاً زیاد، نسبت داد.

جدول ۵: امتیاز کارایی انرژی تجدیدپذیر و متغیرهای اسلک کشورهای OECD

کشور	مدل (۱)							مدل DEAJمعی کلاسیک مدل (۲)						
	امتیاز کارایی	مجموع اسلک ها	امتیاز کارایی	s_1^-	s_2^-	s_3^-	s_1^+	s_2^+	s_3^+	s_4^+	s_5^+	s_6^+	s_7^+	s_8^+
Australia	0.9766	97,458.6698	0.7153	3561.4390	19,9028	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	4734.5307	89,142.7974	0.0000	0.0000	0.0000
Austria	0.7121	36,910.2020	0.7589	2400.8388	44.5731	0.0000	23.0133	0.0000	0.0000	1743.3391	32,698.4378	0.0000	0.0000	0.0000
Belgium	0.6326	65,278.6176	0.6318	1252.7062	0.0000	0.0000	304.6196	0.0000	0.0000	3176.6112	59,646.4523	898.2282	0.0000	0.0000
Canada	0.7475	315,041.2894	0.4795	6686.7042	0.0000	0.0000	550.7726	0.0000	0.0000	14,756.9025	277,041.6631	16,005.2470	0.0000	0.0000
Chile	0.4951	51,438.0271	0.6803	6683.5562	0.6035	0.0000	330.7119	0.0000	0.0000	2249.7641	42,173.3914	0.0000	0.0000	0.0000
Czech Republic	0.3758	51,708.5129	0.6583	2312.7214	0.0000	0.0000	438.1572	0.0000	0.0000	2460.1088	46,191.0344	306.4910	0.0000	0.0000
Denmark	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Estonia	0.8517	1373.6468	0.8848	362.5424	0.0000	0.0000	39.5610	0.0000	0.0000	46.1055	872.8955	52.5423	0.0000	0.0000
Finland	0.7287	33,156.7784	0.6951	824.4834	0.0000	0.0000	98.8590	0.0000	0.0000	1603.5284	30,097.1690	532.7385	0.0000	0.0000
France	0.6448	323,183.2213	0.5306	11,713.8320	19,8235	0.0000	1485.9725	0.0000	0.0000	15,694.0859	294,269.5074	0.0000	0.0000	0.0000
Germany	0.7302	403,839.8273	0.4338	21,226.2614	83.0156	0.0000	1175.9677	0.0000	0.0000	19,297.0260	362,057.5566	0.0000	0.0000	0.0000
Greece	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Hungary	0.3542	32,696.3303	0.7396	2678.6570	4.8343	0.0000	303.2110	0.0000	0.0000	1503.6649	28,205.9632	0.0000	0.0000	0.0000
Iceland	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ireland	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Israel	0.9487	27,398.9836	0.7470	2359.9458	1.9641	0.0000	14.0222	0.0000	0.0000	1262.5927	23,657.4742	102.9846	0.0000	0.0000
Italy	0.7919	196,871.2632	0.5474	14,955.7982	46.2261	0.0000	377.5338	0.0000	0.0000	9189.9248	172,301.7803	0.0000	0.0000	0.0000
Japan	0.6718	588,765.2204	0.1796	35,698.6176	13.5153	0.0000	2460.0471	0.0000	0.0000	27,804.3225	522,311.4385	477.2796	0.0000	0.0000
Korea	0.4369	344,523.5821	0.3956	10,491.6627	0.0000	0.0000	2077.7690	0.0000	0.0000	16,308.2734	306,457.2295	9188.6474	0.0000	0.0000
Latvia	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Lithuania	0.5794	5345.7505	0.8411	915.5879	1.3390	0.0000	66.4521	0.0000	0.0000	221.2569	4141.1147	0.0000	0.0000	0.0000
Luxembourg	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Mexico	0.4368	273,827.5856	0.0670	44,539.6931	0.0000	0.0000	1635.8142	0.0000	0.0000	11,420.7457	214,105.3064	2126.0262	0.0000	0.0000
Netherlands	0.7474	91,510.0717	0.6190	3957.1116	0.0000	0.0000	303.4526	0.0000	0.0000	4391.6422	82,437.6611	420.2042	0.0000	0.0000
New Zealand	0.7731	19,697.1532	0.7915	1531.6681	7.9799	0.0000	41.9374	0.0000	0.0000	917.8932	17,197.6746	0.0000	0.0000	0.0000
Norway	0.9922	8620.5535	0.8368	31.5977	10.9903	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	433.8334	8144.1320	0.0000	0.0000	0.0000
Poland	0.4481	129,510.2728	0.4495	11,867.8821	0.0000	0.0000	709.6095	0.0000	0.0000	5751.5626	108,069.6099	3111.6087	0.0000	0.0000

1093.3861	20,479.6317	0.0000	92.2727	0.0000	7.7360	3755.2353	0.7568	25,428.2617	0.6820	Portugal
694.4514	13,029.8853	475.5966	104.1274	0.0000	0.0000	1718.1757	0.7201	16,022.2365	0.4932	Slovak Republic
140.7918	2638.2379	110.8878	38.5179	0.0000	0.0000	583.1404	0.8320	3511.5757	0.6531	Slovenia
7649.3776	143,452.8391	0.0000	643.1110	0.0000	28.6803	14,069.8297	0.5465	165,843.8377	0.6616	Spain
2448.8384	45,931.5867	0.0000	50.8256	0.0000	32.3094	2559.1257	0.7422	51,022.6858	0.7771	Sweden
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	Switzerland
9225.7313	172,967.9002	0.0000	1661.3279	0.0000	144.7375	22,383.3230	0.4185	206,383.0199	0.2924	Turkey
10,981.8338	205,962.6053	0.0000	99.7567	0.0000	54.1794	21,547.6556	0.4950	238,646.0308	0.9031	United Kingdom
123,096.9992	2,311,451.8526	86,132.5562	3542.6682	0.0000	0.0000	38,858.8214	0.0605	2,563,082.8976	0.8507	United States

میانگین امتیاز کارایی (CCR): ۰.۷۳۳۰، مجموع اسلک‌ها (جمع): ۶۳,۶۸۰,۹۶۱.۱۰۵۲ = میانگین امتیاز کارایی (جمع): ۰.۶۷۳۷

لوکزامبورگ از نظر کارایی انرژی در رتبه دوم قرار گرفته است. با وجود اینکه متغیرهای اسلک آن، بسیار کوچک هستند، این کشور با تعداد اندکی اسلک صفر، می‌تواند موقعیت خود را در مصرف انرژی تجدیدپذیر و انتشار CO₂ بهبود بخشد. امتیاز کارایی بسیار بالای لوکزامبورگ (۰.۹۹۹۲) عمدتاً به عرضه اندک انرژی اولیه و GDP بالا نسبت داده شده است. با وجود اینکه انتشار CO₂ و پسماندهای شهری در لوکزامبورگ، بسیار بیشتر از ایسلند است، بالاترین میزان GDP سرانه را در میان کشورهای OECD دارد و پس از آن، سوئیس و ایرلند در رده‌های بعدی قرار دارند (بانک جهانی، ۲۰۱۹). دولت لوکزامبورگ در تلاش است تا سال ۲۰۳۰، انتشار گازهای گلخانه‌ای را به میزان ۵۰ تا ۵۵ درصد کاهش دهد.

با این حال، رشد سریع جمعیت، اقتصاد رو به رشد و اتکای شدید به سوخت‌های فسیلی، مانع از دستیابی به این اهداف شده است. هر چند، قیمت پایین انرژی برای مصرف‌کنندگان و قدرت خرید بالا، مانعی برای جذب سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر و بهبود کارایی انرژی است. در سال ۲۰۱۸، ۹۵ درصد عرضه انرژی لوکزامبورگ (۱۰۰ درصد نفت، گاز طبیعی، سوخت‌های زیستی و ۸۶ درصد برق)، وارداتی بوده است. سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در بازار انرژی لوکزامبورگ، بسیار ناچیز بود (۷.۵ درصد در سال ۲۰۱۸) و از کشورهای دیگر وارد شد. بنابراین لوکزامبورگ با توجه به هدف انتشار گازهای گلخانه‌ای صفر خالص و ۱۰۰ درصد برق تجدیدپذیر تا سال ۲۰۵۰ و به‌ویژه به دلیل اتکای شدید به نفت در بخش حمل و نقل، نیاز به تغییر رویکرد قابل‌توجهی در ترکیب انرژی شدیداً کربن‌زای خود دارد (آژانس بین‌المللی انرژی، ۲۰۲۰). ایالات متحده آمریکا، بالاترین میزان CO₂ و پسماندهای شهری را در سال ۲۰۱۹ تولید کرده است و در عین تولید بالاترین میزان GDP و بیشترین انرژی تجدیدپذیر در سال ۲۰۱۹، بیشترین مقدار CO₂ را نیز منتشر کرد و با استفاده از بیشترین تعداد نیروی کار و بالاترین عرضه انرژی، بیشترین میزان پسماند شهری را نیز تولید کرد. تولید و مصرف انرژی تجدیدپذیر در ایالات متحده در بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸، دو برابر شد. شرایط بازار از جمله هزینه، نزدیکی به ایستگاه‌های تقاضا یا انتقال، در دسترس بودن منابع انرژی تجدیدپذیر، فناوری‌های مناسب برای تولید انرژی‌های تجدیدپذیر، سیاست‌ها و مقررات دولتی از جمله اعتبارات مالیاتی، و استانداردهای پورتفوی تجدیدپذیر، یکی از عوامل اصلی موثر بر استقرار انرژی‌های تجدیدپذیر در ایالات آمریکا متحده است.

۴- نتیجه‌گیری

کشورها باید کارایی انرژی خود را افزایش دهند و از منابع انرژی تجدیدپذیر بیشتری برای مقابله با تغییر اقلیم، بهبود کیفیت هوا و کاهش هزینه انرژی برای شهروندان استفاده کنند. از برنامه‌ریزی آرمانی برای ایجاد مجموعه‌ای از وزن‌ها برای مدل DEA جمعی استفاده کردیم تا کاهش‌های احتمالی ورودی و افزایش‌های احتمالی خروجی را به منظور بهبود کارایی DMUها، به طور همزمان، اندازه‌گیری کنیم. نتایج نشان می‌دهند که ایسلند، بالاترین کارایی انرژی تجدیدپذیر را در بین کشورهای OECD دارد. از آنجایی که بهبود کارایی انرژی تجدیدپذیر، نیاز به برنامه‌ریزی طولانی‌مدت دارد، مطالعات بیشتری برای تحلیل پیشرفت کارایی انرژی در طول زمان با استفاده از تکنیک‌های شناخته‌شده مانند شاخص بهره‌وری مالم کوئیست توصیه می‌شود.

منابع

- Ashuri, B., Wang, J., Shahandashti, M., Baek, M., 2019. A data envelopment analysis (DEA) model for building energy benchmarking. J. Eng. Des. 17 (4), 747–768. <https://doi.org/10.1108/jedt-08-2018-0127>.
- Bhattacharya, M., Inekwe, J.N., Sadorsky, P., 2020. Convergence of energy productivity in Australian states and territories:

- determinants and forecasts. *Energy Econ.* 85 <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.104538>.
- Chang, Y.-T., Park, H.-S., Jeong, J.-B., Lee, J.-W., 2014. Evaluating economic and environmental efficiency of global airlines: a SBM-DEA approach. *Transp. Res. D: Transp. Environ.* 27, 46–50. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2013.12.013>.
- Chang, K., Wan, Q., Lou, Q., Chen, Y., Wang, W., 2020. Green fiscal policy and firms' investment efficiency: new insights into firm-level panel data from the renewable energy industry in China. *Renew. Energy* 151, 589–597. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.064>.
- Charnes, A., Cooper, W.W., Rhodes, E., 1978. Measuring the efficiency of decision-making units. *Eur. J. Oper. Res.* 2 (6), 429–444.
- Chen, L., Wu, F.-M., Feng, F., Lai, F., Wang, Y.-M., 2018. A common set of weights for ranking decision-making units with undesirable outputs: a double Frontiers data envelopment analysis approach. *Asia-Pac. J. Oper. Res.* 35 (06), 1–25. <https://doi.org/10.1142/s0217595918500392>.
- Christodoulou, D., Lev, B., Ma, L., 2018. The productivity of Chinese patents: the role of business area and ownership type. *Int. J. Prod. Econ.* 199, 107–124. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.12.024>.
- Coates, V., Farooque, M., Klavans, R., Lapid, K., Linstone, H.A., Pistorius, C., Porter, A.L., 2001. On the future of technological forecasting. *Technol. Forecast. Soc. Change* 67 (1), 1–17. [https://doi.org/10.1016/s0040-1625\(00\)00122-0](https://doi.org/10.1016/s0040-1625(00)00122-0).
- Cooper, W.W., Seiford, L.M., Tone, K., 2007. *Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software*, Second edition. Springer Science+Business Media.
- Dahal, K., Juhola, S., Niemelä, J., 2018. The role of renewable energy policies for carbon neutrality in Helsinki metropolitan area. *Sustain. Cities Soc.* 40, 222–232. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.015>.
- Department of Climate Change the Environment and Water, Energy, 2022. Renewables. Available at: <https://www.energy.gov.au/data/renewables>.
- Department for Communities and Local Government, 2008. Definition of Zero Carbon Homes and Non-domestic Buildings.
- Dong, K., Dou, Y., Jiang, Q., 2022. Income inequality, energy poverty, and energy efficiency: who cause who and how? *Technol. Forecast. Soc. Change*. 179 <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121622>.
- Ezici, B., Eşgilmez, G., Gedik, R., 2020. Assessing the eco-efficiency of U.S. manufacturing industries with a focus on renewable vs. non-renewable energy use: an integrated time series MRIO and DEA approach. *J. Clean. Prod.* 253 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119630>.
- Geng, Z., Song, G., Han, Y., Chu, C., 2021. Static and dynamic energy structure analysis in the world for resource optimization using total factor productivity method based on slacks-based measure integrating data envelopment analysis. *Energy Convers. Manag.* 228 <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113713>.
- Ghazi, A., Hosseinzadeh Lotfi, F., 2019. Assessment and budget allocation of Iranian natural gas distribution company- a CSW DEA based model. *Socio-Econ. Plan. Sci.* 66, 112–118. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2018.07.009>.
- Giannakitsidou, O., Giannikos, I., Chondrou, A., 2020. Ranking European countries on the basis of their environmental and circular economy performance: a DEA application in MSW. *Waste Manag.* 109, 181–191. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.055>.
- Government of Iceland., 2021. Energy. Retrieved 15 October 2021 from. <https://www.government.is/topics/business-and-industry/energy/>.
- Han, R., Li, J., Guo, Z., 2022. Optimal quota in China's energy capping policy in 2030 with renewable targets and sectoral heterogeneity. *Energy* 239. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121971>.
- IEA, 2018. *Energy Efficiency 2018: Analysis and Outlook to 2040*. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2018>.
- IEA, 2019. *World Energy Outlook 2019*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>.
- IEA, 2020. *Luxembourg 2020: Energy Policy Review*. Retrieved 15 October 2021 from. <https://www.iea.org/reports/luxembourg-2020>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014. *Climate change 2014*. In: Synthesis Report. Summary for Policymakers. www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf.
- Jahanshahloo, G.R., Zohrehbandian, M., Alinezhad, A., Naghneh, S.A., Abbasian, H., Mavi, R.K., 2011. Finding common weights based on the DM's preference information. *J. Oper. Res. Soc.* 62 (10), 1796–1800. <https://doi.org/10.1057/jors.2010.156>.
- Kazemi, S., Mavi, R.K., Emrouznejad, A., Kiani Mavi, N., 2021. Fuzzy clustering of homogeneous decision making units with common weights in data envelopment analysis. *J. Intell. Fuzzy Syst.* 40 (1), 813–832. <https://doi.org/10.3233/jifs-200962>.
- Kempton, J., 2014. Asset management of low-zero carbon technology in social housing. *Struct. Surv.* 32 (1), 14–31. <https://doi.org/10.1108/ss-09-2012-0027>.
- Kiani Mavi, N., Kiani Mavi, R., 2019. Energy and environmental efficiency of OECD countries in the context of the circular economy: common weight analysis for malmquist productivity index. *J. Environ. Manag.* 247, 651–661. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.069>.
- Kiani Mavi, R., Kiani Mavi, N., 2021. National eco-innovation analysis with big data: A common-weights model for dynamic DEA. *Technol. Forecast. Soc. Change*. 162, 120369 <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120369>.
- Kiani Mavi, R., Kazemi, S.M., Jahangiri, J., 2013. Developing common set of weights with considering nondiscretionary inputs and using ideal point method. *J. Appl. Math.* 2013, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2013/906743>.
- Kiani Mavi, R., Fathi, A., Farzipoor Saen, R., Kiani Mavi, N., 2019. Eco-innovation in transportation industry: a double frontier

- common weights analysis with ideal point method for Malmquist productivity index. *Resour. Conserv. Recycl.* 147, 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.04.017>.
- Kiani Mavi, R., Saen, R.F., Goh, M., 2019. Joint analysis of eco-efficiency and eco-innovation with common weights in two-stage network DEA: a big data approach. *Technol. Forecast. Soc. Change.* 144, 553–562. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.01.035>.
- Kiani Mavi, R., Kiani Mavi, N., Farzipoor Saen, R., Goh, M., 2021. Eco-innovation analysis of OECD countries with common weight analysis in data envelopment analysis. *Supply Chain Manag. Int. J.* <https://doi.org/10.1108/scm-01-2021-0038> ahead-of-print (ahead-of-print).
- Krarti, M., Aldubyan, M., 2021. Role of energy efficiency and distributed renewable energy in designing carbon neutral residential buildings and communities: case study of Saudi Arabia. *Energy Build.* 250 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111309>.
- Krarti, M., Dubey, K., Howarth, N., 2019. Energy productivity analysis framework for buildings: a case study of GCC region. *Energy* 167, 1251–1265. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.060>.
- Li, W., Chien, F., Hsu, C.-C., Zhang, Y., Nawaz, M.A., Iqbal, S., Mohsin, M., 2021a. Nexus between energy poverty and energy efficiency: estimating the long-run dynamics. *Resour. Policy* 72 <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102063>.
- Li, W., Xu, J., Ostic, D., Yang, J., Guan, R., Zhu, L., 2021b. Why low-carbon technological innovation hardly promote energy efficiency of China? – based on spatial econometric method and machine learning. *Comput. Ind. Eng.* 160 <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107566>.
- Liu, R., Huang, R., Shen, Z., Wang, H., Xu, J., 2021. Optimizing the recovery pathway of a net-zero energy wastewater treatment model by balancing energy recovery and eco-efficiency. *Appl. Energy* 298. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117157>.
- Makuei, A., Alinezhad, A., Kiani Mavi, R., Zohrehbandian, M., 2008. A goal programming method for finding common weights in DEA with an improved discriminating power for efficiency. *J. Ind. Syst. Eng.* 1 (4), 293–303.
- Mathis, W., Rath, A., Ainger, J., Bloomberg, 2022. How Europe is Trying to Wean Itself Off Its \$1 Billion a Day Russia Energy Habit. March 9, 2022. *Fortune*. <https://fortune.com/2022/03/09/europe-wean-1-billion-russia-energy-habit/>.
- Mikheev, A.V., 2018. Ontology-based Data Access for Energy Technology Forecasting. *Advances in Intelligent Systems Research Vth International Workshop on Critical infrastructures: Contingency Management, Intelligent, Agent-based, Cloud Computing and Cyber Security (IWCI 2018)*, Irkutsk, Russia. OECD, 2016. Effective Carbon Rates: Pricing CO2 through Taxes and Emissions Trading Systems. OECD, 2019. OECD Environmental Performance Reviews: Denmark 2019. Retrieved 15 October 2021 from <https://www.oecd-ilibrary.org/>.
- Omrani, H., Amini, M., Babaei, M., Shafaat, K., 2019. Use shapley value for increasing power distinguish of data envelopment analysis model: an application for estimating environmental efficiency of industrial producers in Iran. *Energy Environ.* 31 (4), 656–675. <https://doi.org/10.1177/0958305x19882377>.
- Popkostova, Y., 2022. January 28, 2022. Europe's energy crisis conundrum: origins, impact and way forward. Retrieved April 12, 2022 from <https://www.iss.europa.eu/content/europes-energy-crisis-conundrum>.
- Pourhejazy, P., Kwon, O., Chang, Y.-T., Park, H., 2017. Evaluating sustainability of supply chain network: a data envelopment analysis approach. *Sustainability* 9 (2). <https://doi.org/10.3390/su9020255>.
- Romero-Rubio, C., de Andrés Díaz, J.R., 2015. Sustainable energy communities: a study contrasting Spain and Germany. *Energy Policy* 85, 397–409. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.06.012>.
- Rubem, A.P.D.S., Soares de Mello, J.C.C.B., Angulo Meza, L., 2017. A goal programming approach to solve the multiple criteria DEA model. *Eur. J. Oper. Res.* 260 (1), 134–139. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.11.049>.
- Seiford, L.M., Zhu, J., 2002. Modeling undesirable factors in efficiency evaluation. *Eur. J. Oper. Res.* 142 (1), 16–20. [https://doi.org/10.1016/s0377-2217\(01\)00293-4](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(01)00293-4).
- Sohag, K., Chukavina, K., Samargandi, N., 2021. Renewable energy and total factor productivity in OECD member countries. *J. Clean. Prod.* 296 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126499>.
- Sun, H., Mohsin, M., Alharthi, M., Abbas, Q., 2020. Measuring environmental sustainability performance of South Asia. *J. Clean. Prod.* 251 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119519>.
- Vaninsky, A., 2018. Energy-environmental efficiency and optimal restructuring of the global economy. *Energy* 153, 338–348. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.063>.
- Veal, L., 2020. How Iceland is undoing carbon emissions for good. BBC. Retrieved 15 October 2021 from <https://www.bbc.com/future/article/20200616-how-iceland-is-undoing-carbon-emissions-for-good>.
- Wang, Y.-M., Luo, Y., Lan, Y.-X., 2011. Common weights for fully ranking decision making units by regression analysis. *Expert Syst. Appl.* 38 (8), 9122–9128. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.01.004>.
- Wang, C., Xia, M., Wang, P., Xu, J., 2022. Renewable energy output, energy efficiency and cleaner energy: evidence from non-parametric approach for emerging seven economies. *Renew. Energy* 198, 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.154>.
- Webb, J., van der Horst, D., 2021. Understanding policy divergence after United Kingdom devolution: strategic action fields in Scottish energy efficiency policy. *Energy Res. Soc. Sci.* 78 <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102121>.
- Wee, S.C., Choong, W.W., 2019. Gamification: predicting the effectiveness of variety game design elements to intrinsically motivate users' energy conservation behaviour. *J. Environ. Manag.* 233, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.108711>.



- jenvman.2018.11.127.
- Wen, J., Okolo, C.V., Ugwuoke, I.C., Kolani, K., 2022. Research on influencing factors of renewable energy, energy efficiency, on technological innovation. Does trade, investment and human capital development matter? *Energy Policy* 160. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112718>.
- WorldBank, 2019. GDP Per Capita. <https://data.worldbank.org>. Wu, J., Xia, P., Zhu, Q., Chu, J., 2018. Measuring environmental efficiency of thermoelectric power plants: a common equilibrium efficient frontier DEA approach with fixed-sum undesirable output. *Ann. Oper. Res.* 275 (2), 731–749. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2958-0>.
- Yang, M., Hou, Y., Ji, Q., Zhang, D., 2020. Assessment and optimization of provincial CO₂ emission reduction scheme in China: an improved ZSG-DEA approach. *Energy Econ.* 91 <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104931>.
- Yoon, B., Park, I., Coh, B.-Y., 2014. Exploring technological opportunities by linking technology and products: application of morphology analysis and text mining. *Technol. Forecast. Soc. Change.* 86, 287–303. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2013.10.013>.
- Yu, A., Lin, X., Zhang, Y., Jiang, X., Peng, L., 2019. Analysis of driving factors and allocation of carbon emission allowance in China. *Sci. Total Environ.* 673, 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.047>.
- Yu, S., Liu, J., Hu, X., Tian, P., 2022. Does development of renewable energy reduce energy intensity? Evidence from 82 countries. *Technol. Forecast. Soc. Change.* 174 <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121254>.
- Zhou, D., Hu, F., Zhu, Q., Wang, Q., 2022. Regional allocation of renewable energy quota in China under the policy of renewable portfolio standards. *Resour. Conserv. Recycl.* 176 <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105904>. Zhu, J., 2014. Quantitative Models for Performance Evaluation and Benchmarking: Data Envelopment Analysis With Spreadsheets, T. edition. Springer International Publishing.
- Zhu, W., Zhu, Y., Yu, Y., 2020. China's regional environmental efficiency evaluation: a dynamic analysis with biennial malmquist productivity index based on common weights. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 27 (32), 39726–39741. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06966-2>.
- Zhu, L., Luo, J., Dong, Q., Zhao, Y., Wang, Y., Wang, Y., 2021. Green technology innovation efficiency of energy-intensive industries in China from the perspective of shared resources: dynamic change and improvement path. *Technol. Forecast. Soc. Change.* 170. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120890>.
- Zubair, A.O., Alsaleh, M., Abdul-Rahim, A.S., 2021. Evaluating the profit efficiency of bioenergy industry and its determinants in EU28 region. *Int. J. Energy Sect. Manag.* 15 (3), 678–696. <https://doi.org/10.1108/ijes-10-2020-0016>.



A additive model based on a common set of weights in data envelopment analysis

Hojjat Esbati*

Department of Applied Mathematics, Parsabad Moghan Branch,
Islamic Azad University, Parsabad Moghan, Iran.

Hossein Azizi

Department of Applied Mathematics, Parsabad Moghan Branch,
Islamic Azad University, Parsabad Moghan, Iran.

Shahruz Fathi Ajirlu

Department of Applied Mathematics, Parsabad Moghan Branch, Islamic Azad University, Parsabad Moghan, Iran.

Abstract

This paper develops a common set of weights (CSW) model for the additive model in data envelopment analysis using goal programming to analyse the energy efficiency of the Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) countries. Our findings suggest that OECD countries should increase their renewable energy consumption and reduce municipal waste and CO₂ emissions.

Keywords: Data envelopment analysis, Common weights, Energy efficiency, Renewables.

* Corresponding Author