

## تحلیل آلودگی زیست‌محیطی و اثرات آن بر سلامت، کاربرد مدل‌سازی غیرشعاعی مبتنی بر DFM

فاطمه زمزم<sup>۱</sup>، حبیب زارع احمدآبادی<sup>۲\*</sup>، علیرضا ناصرصدرآبادی<sup>۳</sup>، علی مروتی‌شیرف‌آبادی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲- دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۳- دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۴- دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

رسید مقاله: ۴ دی ۱۴۰۱

پذیرش مقاله: ۱۸ اردیبهشت ۱۴۰۲

### چکیده

تحلیل کارایی کشورها در زمینه توسعه پایدار با توجه ویژه به اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های هوا بر روی سلامت انسان می‌تواند کمک شایانی به سیاست‌گذاری توسعه منطقه‌ای و جهانی کند. پژوهش حاضر با ارایه یک مدل DFM به ارزیابی عملکرد ۳۳ کشور OECD می‌پردازد. مقایسه تغییرات، میزان افزایش در خروجی و کاهش در ورودی‌ها جهت کارا شدن واحدهای تصمیم‌گیری در مدل‌های DFM و CCR از اهداف این پژوهش می‌باشد. این پژوهش از نظر هدف کاربردی و از نظر اجرا جزء پژوهش‌های توصیفی می‌باشد. بر اساس بررسی ادبیات و پیشینه پژوهش انتشار گازهای  $SO_2$ ،  $NOx$ ،  $CO_2$ ، بودجه سلامت و فلزات سنگین به عنوان متغیرهای ورودی، و شاخص‌های کیفیت هوا بر اساس گزارش شاخص عملکرد زیست‌محیطی (EPI) از قبیل  $PMW$ ،  $PME$  و  $HAD$  به عنوان متغیرهای خروجی در نظر گرفته شده‌است. در نهایت نتایج نشان داد که کشورهای ناکارا جهت رسیدن به مرز کارا باید بیشترین تغییر را در متغیرهای ورودی از قبیل انتشار گازهای  $CO_2$ ،  $NOx$  و  $SO_2$  ایجاد کنند؛ لذا توجه به مدیریت و کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های هوا و پرداختن به این موارد می‌تواند در کارا شدن کشورهای ناکارا و دارای عملکرد ضعیف در پایداری زیست‌محیطی، موثر واقع شود. همچنین تحلیل‌ها نشان داد که در کشورهای ناکارا جهت بهبود وضعیت پایداری، سیاست‌گذاران باید بیشترین توجه خود را معطوف به کاهش و کنترل انتشار گازهای  $CO_2$ ،  $NOx$  و  $SO_2$  و مباحث مربوط به تخصیص بودجه مشخص برای پیشگیری و درمان بیماری‌های مرتبط با آلودگی‌های هوا نمایند. همچنین بر مبنای روش پژوهش اشاره‌شده، به مقایسه دو شیوه مدل‌سازی ارزیابی کارایی کشورها در زمینه توسعه پایدار پرداخته شده است و مزیت‌های مدل DFM نسبت به CCR مورد تحلیل قرار گرفته‌است.

**کلمات کلیدی:** ارزیابی کارایی، تحلیل پوششی داده‌ها، پایداری زیست‌محیطی، حداقل‌سازی اصطکاک فاصله‌ای، سلامت.

\* عهده‌دار مکاتبات

آدرس الکترونیکی: Zarehabib@yazd.ac.ir

## ۱ مقدمه

امروزه آلاینده‌های زیست‌محیطی یکی از مهم‌ترین مشکلات بشر و یک خطر جدی برای سلامتی انسان و محیط زیست به‌شمار می‌آیند که در بین آن‌ها آلودگی هوا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱]. گاز منوکسید کربن (CO)، انیدرید سولفور (SO<sub>2</sub>)، اکسیدهای ازت (NO<sub>x</sub>) و کل ذرات معلق عمومی‌ترین و عمده‌ترین آلاینده‌های هوا هستند [۲]. آلاینده‌های هوا با ایجاد بیماری‌ها، بر روی سلامتی انسان اثر می‌گذارد [۳] و کیفیت زندگی افراد در مجاورت جوامع صنعتی را با مشکل روبه‌رو می‌کنند [۴]. آلودگی هوا علاوه بر تخریب محیط‌زیست و ضررهای اقتصادی، یکی از ۱۰ عامل برتر و مهم افزایش مرگ و میر در جهان شناخته‌شده است [۵]. بر اساس برآورد سازمان بهداشت جهانی<sup>۱</sup> (WHO) در سال ۲۰۱۲، سالانه ۳/۷ میلیون نفر مرگ منتسب به آلودگی هوای آزاد اتفاق می‌افتد که حدود ۸۸ درصد از آن در کشورهای کم درآمد و متوسط رخ می‌دهد. در بین آلاینده‌های هوا، ذرات معلق از دیدگاه مخاطرات بهداشت عمومی و سلامتی از آلاینده‌های اصلی محسوب می‌شود [۶]. از طرف دیگر سلامت انسان نسبت به تغییر الگوهای آب و هوا و سایر تغییرات اقلیمی حساس است. تغییرات اقلیمی به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم به روش‌های گوناگونی به سلامت انسان آسیب می‌رساند و منجر به اثرات نامطلوب فزاینده‌ای در آینده می‌شوند [۷]. در سال ۲۰۰۰، سازمان بهداشت جهانی تخمین زد که تغییرات اقلیمی می‌تواند باعث مرگ بیش از ۱۵۰۰۰۰ نفر و از دست دادن ۵.۵ میلیون سال عمر تطبیق‌شده برای ناتوانی<sup>۲</sup> در سراسر جهان شود [۸]. بنابراین، تغییرات اقلیمی به‌عنوان یکی دیگر از بزرگ‌ترین عوامل تهدیدکننده سلامت انسان‌ها و محیط زیست در قرن بیست و یکم بیان شده است، انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) ناشی از تولید انرژی مرتبط با فعالیت‌های انسانی از قبیل حمل و نقل، غذا و کشاورزی، فرآیندهای خانگی و صنعتی، به‌عنوان محرک اصلی تغییرات آب و هوایی در نظر گرفته می‌شود [۷]. افزایش نگرانی در مورد تغییرات اقلیمی و آلودگی زیست‌محیطی، تحلیل کارایی زیست‌محیطی را به یک چالش بزرگ و موضوع مهم مطالعاتی تبدیل کرده است [۹]. بررسی کارایی و عملکرد زیست‌محیطی یکی از الگوهای اصلی سنجش توسعه پایدار منطقه‌ای است [۱۰]. مفهوم توسعه پایدار عبارت است از تامین نیازهای حال حاضر بدون این‌که به توانایی نسل‌های آینده برای برآورده ساختن نیازهای خود آسیب وارد کند [۱۱، ۱۲]. بنابراین، استفاده منطقی و پایدار از منابع طبیعی و انرژی برای ادامه حیات جوامع امری ضروری است [۱۳، ۱۴]. مساله دیگری که مطرح می‌شود نحوه سنجش توسعه پایدار است که در این زمینه، مفهوم پایداری به‌عنوان مقیاس پایداری سیستم‌های طبیعی و جهت سنجش میزان دستیابی به توسعه پایدار به‌صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. به دلیل پیچیدگی و چندبعدی بودن مفهوم پایداری، رویکردهای مبتنی بر روش تحلیل هزینه - سود ممکن است قادر به نمایش و بررسی کامل مسایل پایداری نباشند [۱۵] بنابراین در این‌گونه مسایل ضرورت استفاده از رویکردهای کمی، مبتنی بر تابع تولید و سیستماتیک وجود دارد. تحلیل پوششی داده‌ها<sup>۳</sup> یکی از بهترین روش‌های ناپارامتریک ارزیابی عملکرد است [۱۶]

<sup>1</sup> World Health Organization

<sup>2</sup> disability-adjusted life years

<sup>3</sup> Data envelopment analysis

در این روش ناپارامتری به جای توجه به تابع تولید<sup>۱</sup> به مرز تولید<sup>۲</sup> توجه می‌شود و نیازی به تخمین تابع تولید وجود ندارد [۱۷]. به طور کلی روش‌های ناپارامتری جهت رفع معایب روش‌های پارامتری به وجود آمدند. این روش‌ها از آن جهت ناپارامتری خوانده می‌شوند که پیش فرضی از شکل اساسی تابع تولید ندارند [۱۸]. و یک رویکرد متفاوت جهت سنجش عملکرد پایدار است [۱۵] به طور کلی DEA یکی از ابزارهای ناپارامتری اندازه‌گیری کارایی DMUها با ورودی‌ها و خروجی‌های مشابه است. تحلیل پوششی داده‌ها به طور گسترده جهت بررسی طیف گسترده‌ای از صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرد و از برنامه‌ریزی ریاضی جهت محاسبه DMUهای کارا استفاده می‌کند [۱۹-۲۱]. به طور کلی وجه تمایز این پژوهش در نحوه مدل‌سازی است. رویکرد مورد استفاده در این پژوهش غیرشعاعی بودن تحلیل‌ها و استفاده از رویکرد مدل‌سازی حداقل‌سازی اصطکاک فاصله‌ای<sup>۳</sup> (DFM) با هدف بررسی اثر آلاینده‌های ناشی از گازهای گلخانه‌ای و سایر آلاینده‌های هوا بر سلامت انسان است. رویکرد DFM یک روش مدل‌سازی چندهدفه است که در این روش کمترین فاصله تا مرز ناکارا ملاک انتخاب برترین DMU ناکارا می‌باشد. در مطالعات گذشته مدل‌های مختلفی جهت محاسبه امتیاز کارایی عملکرد زیست‌محیطی کشورها ارائه شده است که عموماً تمرکز بر روی مدل‌های شعاعی است [۲۲-۲۵]. اما پژوهشی که پایداری کشورهای عضو سازمان همکاری و توسعه اقتصادی<sup>۴</sup> (OECD) را با رویکرد DFM با هدف بررسی اثر آلاینده‌های ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای بر سلامت انسان در حوزه محیط‌زیست مورد بررسی قرار دهد، ارائه نشده است. مدل ارائه شده در این پژوهش به گونه‌ای است که امکان محاسبه میزان کاهش در ورودی و افزایش در خروجی‌ها را به صورت هم‌زمان فراهم می‌کند. به طور کلی این پژوهش به دنبال ارائه روش کمی جهت بررسی غیرشعاعی کارایی و ارزیابی عملکرد زیست‌محیطی (پایداری) کشورهای منتخب بر مبنای رویکرد DFM است. شکل ۱ (الف) منطق رسیدن به مرز کارا در مدل DFM بر مبنای ورودی‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل سه  $DMU_A$ ،  $DMU_B$  و  $DMU_C$  کارا و  $DMU_D$  ناکارا ارزیابی می‌شوند و راه‌حل بهبود  $DMU_D$  در مدل CCR ورودی محور، بر اساس شرط کاهش شعاعی ورودی‌ها با نسبت یکسان  $(\theta^* = OD' / OD)$  می‌باشد. همان‌گونه که در شکل می‌توان مشاهده نمود، نقطه ایده‌آل برای هر  $DMU_D$  ناکارا برابر با  $D'$  است، اما تفاوت مدل DFM با سایر مدل‌های سنتی تحلیل پوششی داده‌ها در محاسبه کمترین فاصله (d) تا مرز کارا است و DMUها در مدل‌های DFM لزوماً روی محور OD که ماهیت شعاعی دارد حرکت نمی‌کنند. شکل ۱ (ب) نیز منطق رسیدن به مرز کارا در مدل DFM بر مبنای خروجی‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱ (ب) مشاهده می‌شود در صورتی که مدل خروجی محور باشد و درصد تعیین نقطه بهینه برای  $DMU_D$  در ساختار شعاعی باشید نقطه  $D'$  حاصل می‌شود؛ اما در صورتی که در مدل DFM، کمترین فاصله تا مرز کارا را مبنای قرار دهید  $D^*$  نقطه بهینه خواهد بود. در این حالت واضح است که در صورتی که صرفاً بر اساس خروجی اول  $(y_1)$  میزان تغییرات تا کارا شدن را مدنظر قرار دهید این مقدار برابر با  $u_1^* d_{10}^y$  خواهد بود. متناظر با آن بر حسب متغیر

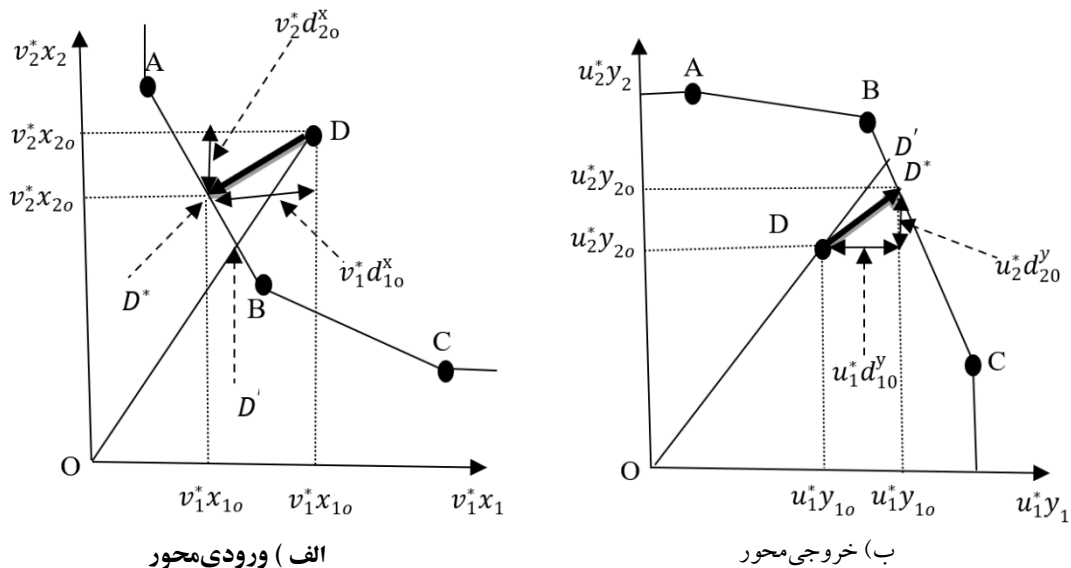
<sup>1</sup>Production Function

<sup>2</sup>Production Frontier

<sup>3</sup>Distance Friction Minimization Model

<sup>4</sup>Organisation for Economic Co-operation and Development

خروجی دوم ( $y_2$ ) این مقدار برابر با  $u_2^* d_{20}^y$  خواهد بود [۲۶].



شکل ۱. منطق رسیدن به مرز کارا در مدل DF

با توجه به این که امروزه محیط‌زیست به یک مساله روز جهانی تبدیل شده است؛ عدم توجه به آن می‌تواند خسارت‌های جبران ناپذیری به همراه داشته باشد. همچنین قرار گرفتن کشورها در مسیر صنعتی شدن موجب افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای شده است که از مهم‌ترین آثار آن می‌توان به اختلال در اکوسیستم، تغییرات شدید آب و هوایی، آلودگی هوا و محیط‌زیست و یا حتی افزایش بلایای طبیعی اشاره کرد که به صورت مستقیم و غیرمستقیم بر سلامت انسان و سایر موجودات تاثیر می‌گذارد. کشورها درصدد هستند با برنامه‌ریزی‌های مختلف نقش مهمی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته باشند و همچنین ارزیابی کارایی کشورها به یکی از مطالب پژوهشی محققین و دانشمندان در نقاط مختلف جهان تبدیل شده است. در همین راستا پژوهش حاضر درصدد ارزیابی کارایی کشورهای منتخب با استفاده از رویکرد DF در زمینه اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های هوا بر سلامت انسان می‌باشد.

بخش‌های بعدی این مقاله عبارتند از: در بخش ۲ بررسی پیشینه پژوهش ارزیابی عملکرد زیست‌محیطی و تحلیل پوششی داده‌ها ارائه شده، روش پژوهش و مدل DF در بخش ۳ مطرح شده و در بخش ۴ تعریف متغیرهای ورودی و خروجی و همچنین نتایج پیاده‌سازی بر روی داده‌های واقعی ارزیابی شده بیان شده است. نتیجه‌گیری پژوهش حاضر و پیشنهادات برای پژوهش‌های آتی در بخش ۵ ارائه شده است.

## ۲ ادبیات و پیشینه پژوهش

### ۲-۱ ارزیابی عملکرد زیست‌محیطی و تحلیل پوششی داده‌ها

امروزه آلودگی هوا و اثرات آن بر سلامتی انسان به یکی از مشکلات شهرهای بزرگ و صنعتی جهان و ساکنان آن‌ها تبدیل شده است [۲۷]. مواجهه با آلودگی هوا، میزان ریسک مرگ و میر یا بیماری را در سراسر جهان

افزایش می‌دهد [۲۸]. به طوری که برآورد شده است که آلودگی هوا حدود ۱/۴ درصد کل مرگ و میر در جهان را به خود اختصاص داده است [۲۹]. در میان این آلاینده‌ها ذرات معلق (PM) اهمیت ویژه‌ای دارند. ذرات معلق می‌توانند هم منشا طبیعی و هم منشا غیرطبیعی (مصنوعی) داشته باشند [۳۰]. این ذرات ریز ترکیبی ناهمگون از ذرات جامد و مایع می‌باشند که در هوا معلق هستند و از حیث اندازه و ترکیب شیمیایی با هم تفاوت دارند [۳۱]. آلودگی زیست محیطی ناشی از انتشار ریزگردها، مشکلات جدی برای سلامت انسان‌ها به همراه دارد و انسان‌ها را با خطراتی مانند بیماری‌های تنفسی و ناراحتی‌های قلبی و عروقی مواجه می‌سازد. بنابراین توجه به این موضوع از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۲]. به طوری که تعداد متعددی از پژوهش‌های گذشته به این موضوع پرداخته و بر اساس کلیه پژوهش‌ها، مشخص شد که قرار گرفتن در معرض PM تاثیر مستقیمی بر بیماری و مرگ و میر ناشی از بیماری‌ها دارد [۳۲-۳۶] توجه به محیط‌زیست و مسایل پایداری بیش از چهار دهه است که مورد توجه محققین و دانشگاهیان قرار گرفته است [۳۷]. و رویکرد تحلیل پوششی داده‌ها به عنوان یکی از ابزارهای تحلیل کارایی زیست محیطی است که همواره از سوی محققین مورد توجه قرار می‌گیرد [۳۸]. تحلیل پوششی داده‌ها یکی از رویکردهای ارزیابی کارایی است که برای اولین بار در سال ۱۹۷۸ توسط چارنر و همکاران (۱۹۷۸) [۳۹] بر مبنای مطالعه فارل (۱۹۵۷) [۴۰] جهت ارزیابی کارایی واحدهای تصمیم‌گیری (DMU) معرفی شد از آنجا که این الگو توسط چارنر، کوپر و رودز ارایه شد، به الگوی (CCR) که از حروف اول نام سه فرد یادشده تشکیل شده است، معروف شد و در سال ۱۹۷۸، در مقاله‌ای با عنوان اندازه‌گیری کارایی واحدهای تصمیم‌گیرنده، ارایه شد. سپس در سال ۱۹۸۴، چارنر و کوپر به همراه بنکر [۴۱]، مدلی را ارایه کردند که با توجه به حروف اول نام آنان به مدل BCC مشهور شد. مدل BCC از جمله مدل‌های DEA است که بازده نسبت به مقیاس را به صورت متغیر در نظر می‌گیرد [۴۲، ۴۳] در مطالعات گذشته انواع مختلف مدل‌های DEA در تحلیل توسعه پایدار مورد استفاده قرار گرفته است که از جمله آن‌ها مدل‌های شعاعی BCC, CCR و غیر شعاعی SBM [۱۶، ۴۴-۵۳] و مدل‌سازی‌های شبکه‌ای [۵۴-۶۰] بوده است.

در ادامه به خلاصه‌ای از مطالعات مرتبط اشاره می‌گردد.

سوزوکی و نیجکامپ<sup>۱</sup> (۲۰۱۶) کارایی اقتصادی- زیست محیطی- انرژی<sup>۲</sup> کشورهای اتحادیه اروپا، اپک و آسه آن را در چارچوب یک مدل تارگت محور DFM با عوامل ثابت مورد ارزیابی و بررسی قرار دادند که در این پژوهش متغیرهای جمعیت و کل مصرف انرژی اولیه به عنوان ورودی و متغیرهای تولید ناخالص داخلی (GDP) و انتشار گاز CO<sub>2</sub> به عنوان خروجی در نظر گرفته شده است [۶۱]. در پژوهش ژانگ<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۸) جهت سنجش کارایی زیست محیطی و سلامت شهرهای چین، متغیرهای نیروی کار، دارایی ثابت و مصرف انرژی اولیه به عنوان ورودی و متغیر تولید ناخالص داخلی (GDP) به عنوان خروجی مرحله اول و متغیر بودجه سلامت به عنوان ورودی و متغیر نرخ تولد به عنوان خروجی مطلوب مرحله دوم، متغیرهای انتشار SO<sub>۲</sub>، NO<sub>۲</sub> و PM<sub>۲.۵</sub> به عنوان

<sup>1</sup>. Suzuki & Nijkamp

<sup>2</sup>. energy-environment-economic efficiency

<sup>3</sup>. Zhang

میانجی بین دو مرحله و نرخ مرگ و میر و بیماری‌های تنفسی به عنوان متغیر منقول<sup>۱</sup> لحاظ شده است [۶۲]. لی<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی جهت سنجش کارایی زیست‌محیطی، اقتصادی و بهداشتی<sup>۳</sup>، ۳۱ شهر بزرگ کشور چین در چارچوب دو مرحله تولید و سلامت، از مدل DEA دو مرحله‌ای استفاده کردند. که در این پژوهش متغیرهای نیروی کار، دارایی ثابت و مصرف انرژی به عنوان ورودی و GDP به عنوان خروجی مرحله تولید، متغیر بودجه سلامت به عنوان ورودی و متغیرهای نرخ تولد و میزان مرگ و میر به عنوان خروجی مرحله سلامت و متغیرهای انتشار CO<sub>۲</sub> و شاخص کیفیت هوا (AQI) به عنوان میانجی بین دو مرحله لحاظ شده است [۶۳]. وو<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهش خود از متغیرهای SO<sub>۲</sub>، NO<sub>x</sub>، دوده، مصرف زغال سنگ، سرمایه و نیروی کار به عنوان ورودی و از GDP به عنوان میانجی و از انتشارات PM<sub>۲.۵</sub> به عنوان خروجی استفاده کرده‌اند [۶۴]. هی<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی کارایی اقتصادی-زیست‌محیطی-سلامتی<sup>۶</sup>، ۳۰ استان چین را در چارچوب یک مدل DEA دو مرحله‌ای پویا<sup>۷</sup> مورد ارزیابی و بررسی قرار دادند که در این پژوهش متغیرهای نیروی کار، دارایی ثابت و مصرف انرژی به عنوان ورودی و متغیر تولید ناخالص داخلی (GDP) به عنوان خروجی مرحله اول و متغیر بودجه سلامت به عنوان ورودی و متغیرهای نرخ تولد به عنوان خروجی مطلوب و میزان مرگ و میر و فساد بافت‌ها<sup>۸</sup> به عنوان خروجی نامطلوب مرحله دوم و متغیرهای انتشار CO<sub>۲</sub>، SO<sub>۲</sub>، NO<sub>x</sub> به عنوان میانجی بین دو مرحله در نظر گرفته شده است [۶۵]. هالکاس و آرگیروپائولو<sup>۹</sup> (۲۰۲۱) در پژوهش خود با رویکرد DEA دو مرحله‌ای، کارایی ۲۳ کشور را در دوره زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۷ مورد بررسی قرار دادند در این پژوهش متغیرهای نیروی کار، مصرف انرژی و سرمایه به عنوان ورودی، متغیرهای تولید ناخالص داخلی (GDP) به عنوان میانجی مطلوب، SO<sub>x</sub> به عنوان میانجی نامطلوب و مرگ و میر ناشی از بیماری‌های تنفسی به عنوان خروجی نامطلوب لحاظ شده است [۶۶]. هالکاس و آرگیروپائولو<sup>۱۰</sup> (۲۰۲۱) در پژوهشی دیگر جهت برآورد کارایی ۱۸ کشور اروپایی در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۵، ۲۰۱۰، ۲۰۱۴، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ از رویکرد DEA استفاده کردند. در این پژوهش نیروی کار و سرمایه به عنوان ورودی‌های مدل، GDP به عنوان خروجی مطلوب، میزان مرگ و میر ناشی از در معرض قرار گرفتن ریزگردها (PM<sub>۲.۵</sub>) به عنوان خروجی نامطلوب و در نهایت درآمد مالیاتی مربوط به محیط زیست نیز به عنوان یک ورودی فرعی در نظر گرفته شده است [۲]. ژانگ<sup>۱۱</sup> و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهش خود جهت بررسی امتیاز کارایی کنترل آلودگی PM<sub>۲.۵</sub> شهرهای کشور چین در سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۰۳ از مدل سوپر SBM با خروجی نامطلوب و شاخص GLM<sup>۱۲</sup> استفاده کردند. در این پژوهش متغیرهای مصرف انرژی، مصرف

<sup>1</sup> Carry-over

<sup>2</sup> Li

<sup>3</sup> environmental, economic and health efficiency

<sup>4</sup> Wu

<sup>5</sup> He

<sup>6</sup> energy-environment-economic efficiency

<sup>7</sup> dynamic two-stage DEA

<sup>8</sup> phthisis

<sup>9</sup> Halkos & Argyropoulou

<sup>10</sup> Halkos & Argyropoulou

<sup>11</sup> Zhang

<sup>12</sup> using the Global Malmquist-Luenbe

آب، نیروی کار و دارایی‌های ثابت به عنوان ورودی و متغیر GDP به عنوان خروجی مطلوب و آلودگی ناشی از  $PM_{2.5}$  به عنوان خروجی نامطلوب در نظر گرفته شد [۶۷].

در جدول زیر خلاصه‌ای از تحقیقات مرتبط مشاهده می‌شود.

جدول ۱. تحقیقات انجام شده در حوزه کاربرد DEA در ارزیابی عملکرد زیست محیطی

نویسندگان و سال انتشار	مدل DEA	DMUs	ورودی‌ها	میانجی‌ها	خروجی‌ها
سوزوکی و همکاران (۲۰۱۶) [۶۱]	مدل Target-Oriented DFM با عوامل ثابت در DEA	کشورهای اتحادیه اروپا، اپک و آسه آن	مصرف انرژی، جمعیت	-	انتشار $CO_2$ و GDP
سوزوکی و نیجکامپ (۲۰۱۷) [۶۸]	Time-Series Target-Oriented DFM	کشورهای آسه آن	مصرف انرژی، جمعیت	-	انتشار $CO_2$ و GDP
سوزوکی و نیجکامپ (۲۰۱۷) [۶۹]	TO-DFM-FF	کشورهای اتحادیه اروپا، اپک و آسه آن	مصرف انرژی، جمعیت	-	انتشار $CO_2$ و GDP
لنز و همکاران (۲۰۱۸) [۵۲]	SBM-DEA	۲۸ کشور اروپایی	سرمایه، اشتغال، انرژی	-	انتشار $SO_x$ ، انتشار $CO_2$ و GDP
ژانگ و همکاران (۲۰۱۸) [۶۲]	DEA دو مرحله‌ای	شهرهای چین	مرحله اول: نیروی کار، دارایی ثابت و مصرف انرژی اولیه مرحله دوم: بودجه سلامت	انتشار $SO_2$ ، $PM_{2.5}$ و $NO_2$	مرحله اول: متغیر تولید ناخالص داخلی (GDP) مرحله دوم: نرخ تولد
آمووین و همکاران (۲۰۱۹) [۴۸]	dynamic SBM-DEA و شاخص مالم کوئیست	۲۸ کشور منتخب آفریقایی	موجودی سرمایه، کل نیروی کار، کل مصرف انرژی اولیه	-	انتشار $CO_2$ و GDP
لی و همکاران (۲۰۱۹) [۶۳]	DEA دو مرحله‌ای	۳۱ شهر بزرگ کشور چین	مرحله تولید: نیروی کار، دارایی ثابت و مصرف انرژی مرحله سلامت: بودجه سلامت	انتشار $CO_2$ و شاخص کیفیت هوا (AQI)	مرحله تولید: GDP مرحله سلامت: نرخ تولد و میزان مرگ و میر
وو و همکاران (۲۰۱۹) [۶۴]	DEA دو مرحله‌ای	۳۰ نیروگاه حرارتی در چین	$NO_x$ ، $SO_2$ ، مصرف زغال سنگ، سرمایه و نیروی کار	GDP	انتشار $PM_{2.5}$
هی و همکاران (۲۰۲۰) [۶۵]	DEA دو مرحله‌ای پویا	۳۰ استان چین	مرحله اول: نیروی کار، دارایی ثابت و مصرف انرژی مرحله دوم: بودجه	انتشار $CO_2$ ، $NO_x$ و $SO_2$	مرحله اول: تولید ناخالص داخلی (GDP) مرحله دوم: نرخ تولد به عنوان خروجی مطلوب و میزان مرگ

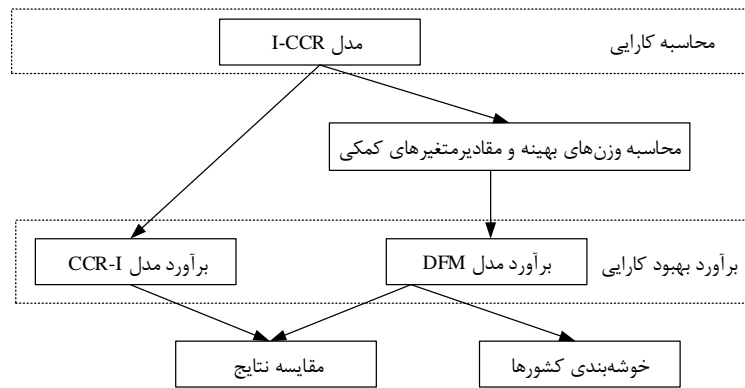
نویسندگان و سال انتشار	مدل DEA	DMUs	ورودی‌ها	میانجی‌ها	خروجی‌ها
			سلامت		و میر و فساد بافت‌ها <sup>۱</sup> به عنوان خروجی نامطلوب
هالکاس و آرگیروپاتولو (۲۰۲۱) [۶۶]	DEA دو مرحله‌ای	۲۳ کشور	نیروی کار، مصرف انرژی و سرمایه	تولید ناخالص داخلی (GDP) و SO <sub>x</sub>	مرگ و میر ناشی از بیماری‌های تنفسی
هالکاس و آرگیروپاتولو (۲۰۲۱) [۲]	DEA	۱۸ کشور اروپایی	نیروی کار، سرمایه و درآمد مالیاتی	-	GDP و میزان مرگ و میر ناشی از در معرض ریزگردها (PM <sub>۱۰</sub> )
ژانگ و همکاران (۲۰۲۱) [۶۷]	SBM با خروجی نامطلوب و شاخص GLM <sup>۲</sup>	شهرهای کشور چین	مصرف انرژی، مصرف آب، نیروی کار و دارایی‌های ثابت	-	GDP و آلودگی ناشی از PM <sub>۱۰</sub>

ویژگی‌هایی که مدل‌سازی DFM را برای ارزیابی عملکرد نسبی پیشنهاد می‌کنند شامل مواردی چون غیرشعاعی بودن تحلیل‌ها به معنای هم‌زمانی کاهش در ورودی‌ها و افزایش در خروجی‌ها و عدم نیاز به شهود تصمیم‌گیرنده در ارزیابی است [۷۰]. با وجود مزیت‌های فراوان روش DEA، یکی از مشکلات بارز مدل‌های سنتی تحلیل پوششی داده‌ها، شعاعی بودن تحلیل‌ها است. از آنجایی که مدل‌های DFM مبتنی بر تحلیل‌های غیر شعاعی می‌باشند؛ بنابراین اخیراً تعدادی محدودی از پژوهشگران از رویکردهای DFM جهت بررسی عملکرد زیست‌محیطی کشورهای مختلف استفاده کردند [۶۱، ۶۸-۷۰] به‌طور کلی وجه تمایز پژوهش حاضر در استفاده از روش DFM جهت بررسی اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های هوا بر سلامت انسان در ۳۳ کشور عضو OECD می‌باشد.

### ۳ روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، جزء پژوهش‌های کاربردی و از نظر روش اجرا یک پژوهش توصیفی محسوب می‌شود. در این پژوهش، با کاربرد رویکرد DFM به ارزیابی عملکرد زیست‌محیطی ۳۳ کشورهای OECD پرداخته می‌شود. پس از تحلیل نتایج به‌دست آمده و ارزیابی رفتار متغیرها، نتایج دو مدل CCR و DFM با یکدیگر مقایسه می‌گردد. روند انجام پژوهش در شکل ۲ مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که در این پژوهش متغیرهای ورودی و خروجی بر اساس بررسی ادبیات و پیشینه پژوهش تعیین شده است و داده‌های مربوط به این متغیرها از پایگاه‌های جهانی از قبیل بانک جهانی، از وب‌سایت UNSD و EPI استخراج شد. در ادامه دو رویکرد DFM و تحلیل خوشه‌بندی به ترتیب تشریح می‌شوند.

<sup>۱</sup>. phthisis  
<sup>۲</sup> using the Global Malmquist-Luenbe



شکل ۲. مراحل انجام پژوهش

### ۳-۱ مدل حداقل سازی اصطکاک فاصله‌ای (DFM)

مدل DFM مدلی چندهدفه است که برای اولین بار توسط سوزوکی بر اساس مدل CCR ارائه شده توسط چارلز و همکاران (۱۹۷۸) در سال ۲۰۱۰ مطرح شد. مدل‌های استاندارد DEA از قبیل مدل‌های CCR و BCC بر کاهش ورودی یا افزایش خروجی در جهت‌های شعاعی تمرکز دارند. مدل DFM چشم‌انداز جدیدی را در مورد بهبود کارایی و اهداف بهینه‌کاو<sup>۱</sup> با استفاده از یک تابع پیش‌بینی (برآورد) موزون<sup>۲</sup> ارائه می‌دهد. تابع برآورد موزون مساله بهبود کارایی را از منظر هم‌زمانی کاهش در ورودی و افزایش در خروجی بررسی می‌کند. به‌طور کلی رویکرد DFM یک روش مدل‌سازی چند هدفه است که شامل گام‌های زیر است [۲۶]. در ادامه ابتدا اندیس‌ها، پارامترها و متغیرها مطابق جدول زیر تعریف و سپس گام‌های رویکرد DFM تشریح می‌شود.

جدول ۲. مجموعه اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای مدل‌ها

اندیس		پارامترها		متغیرهای تصمیم	
نماد	مفهوم	پارامتر	مفهوم	متغیر	مفهوم
i	ورودی	$x_{ij}$	میزان ورودی ا ام کشور زام	$\theta_0^*$	میزان کارایی بهینه $DMU_0$
r	خروجی	$y_{rj}$	میزان خروجی ام کشور زام	$v_i$	مقدار وزن ورودی اام
j	کشور (DMU)	S	تعداد کل خروجی‌ها	$u_r$	مقدار وزن خروجی اام
	سهم نسبی DMUها برای رسیدن به مرز کارا	$\lambda_j$	تعداد کل ورودی‌ها	$s_i^-$	میزان مازاد ورودی اام

<sup>۱</sup> benchmarking targets

<sup>۲</sup> Weighted Projection Function

گام اول: مقادیر بهینه کارایی و وزن ورودی و خروجی ها  $(\theta^*, v^*, u^*)$  با حل مدل CCR ورودی محور طبق مدل زیر محاسبه می شوند. در این رابطه  $\theta^*$  میزان کارایی بهینه مدل CCR و  $v^*$  و  $u^*$  به ترتیب مقادیر بهینه وزن ورودی ها و خروجی ها می باشند.

$$\begin{aligned} \text{Max } \theta &= \sum_r u_r y_{ro} \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^m v_i x_{io} &= 1, \\ \sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} &\leq 0 \quad \forall j, j=1, \dots, n, \\ v_i &\geq 0, \\ u_r &\geq 0, \\ i &= 1, \dots, m, \\ r &= 1, \dots, s. \end{aligned} \quad (1)$$

گام دوم: با توجه به مقدار  $\theta^*$ ، مقادیر بهینه متغیرهای کمکی یا به عبارتی متغیرهای مازاد ورودی و کمبود خروجی  $(s_i^-, s_r^+)$  از طریق حل مدل جمعی زیر محاسبه می شوند.

$$\begin{aligned} \text{Max } \sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{r=1}^s s_r^+ \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- &= \theta_o^* x_{io} \quad (\forall i, i=1, \dots, m) \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ &= y_{ro} \quad (\forall r, r=1, \dots, s) \\ s_i^- &\geq 0, \quad s_r^+ \geq 0, \quad \lambda_j \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

سیس DMUها بر اساس مقادیر  $s_i^-, s_r^+$  و  $\theta^*$  به شرح زیر طبقه بندی می شوند. زمانی که  $\theta^* = 1$ ،  $s_i^- = s_r^+ = 0$  باشد؛ DMU ارزیابی شده یک DMU کاملاً کارا است و فاصله ای با مرز کارا ندارد.

زمانی که  $\theta^* = 1$ ،  $s_i^- \neq 0$  یا  $s_r^+ \neq 0$  باشد؛ DMU ارزیابی شده یک DMU کارا ضعیف (تا حدی کارا) است و جواب های بهینه با کمک روابط ذیل محاسبه می شوند.

$$x_o = \theta_o^* x_o - s_i^- \quad (\forall i, i=1, \dots, m) \quad (3)$$

$$y_o = y_o + s_r^+ \quad (\forall r, r=1, \dots, s) \quad (4)$$

زمانی که  $\theta^* \neq 1$ ،  $s_i^- \neq 0$  یا  $s_r^+ \neq 0$  باشد؛ DMU ارزیابی شده یک DMU غیر کارا است و جواب های بهینه با کمک گام های ۳، ۴ و ۵ مدل DFM محاسبه می شوند.

گام سوم: فواصل کاهش ورودی و افزایش خروجی با استفاده از حل مساله  $MOQP^1$  زیر و با جایگذاری مقادیر بهینه مدل CCR  $(\theta^*, v^*, u^*)$  و توابع اصطکاک فاصله‌ای  $Fr^x$  و  $Fr^y$  که با فاصله اقلیدسی در فضای موزون تعریف شده‌اند، محاسبه می‌شوند.

$$\begin{aligned} \text{Min } Fr^x &= \sqrt{\sum_{i=1}^m (v_i^* x_{io} - v_i^* d_{io}^x)^2} \\ \text{Min } Fr^y &= \sqrt{\sum_{r=1}^s (u_r^* y_{ro} - u_r^* d_{ro}^y)^2} \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^m v_i^* (x_{io} - d_{io}^x) &= \frac{2\theta_o^*}{1 + \theta_o^*} \\ \sum_{r=1}^s u_r^* (y_{ro} + d_{ro}^y) &= \frac{2\theta_o^*}{1 + \theta_o^*} \\ x_{io} - d_{io}^x &\geq 0 \quad (\forall_i i = 1, \dots, m) \\ d_{io}^x &\geq 0 \quad (\forall_i i = 1, \dots, m) \\ d_{ro}^y &\geq 0 \quad (\forall_r r = 1, \dots, s) \end{aligned}$$

(۵)

در مدل فوق  $x_{io}$  و  $y_{ro}$  به ترتیب بیانگر ورودی  $i$ ام و خروجی‌های  $r$ ام هر  $DMU_0$  ناکارا می‌باشند. همچنین در این مدل،  $d_{ro}^y$  و  $d_{io}^x$  متغیرهای تصمیم مدل هستند که کاهش فاصله ورودی  $x_{io}$  و  $d_{ro}^y$  افزایش فاصله خروجی  $y_{ro}$  را نشان می‌دهند.  $v_i^*$  و  $u_r^*$  پارامترهای مدل DFM هستند که  $v_i^*$  بیانگر وزن بهینه ورودی  $i$ ام و  $u_r^*$  به عنوان وزن بهینه خروجی  $r$ ام در نظر گرفته می‌شود. مقدار پارامترهای  $v_i^*$  و  $u_r^*$  و  $\theta^*$  در مرحله اول از حل مدل CCR به دست می‌آیند. به طور کلی در این مدل، هدف از تابع  $Fr^x$  و  $Fr^y$  به ترتیب یافتن راه‌حلی جهت حداقل کردن مجموع فواصل کاهش ورودی و مجموع فواصل افزایش خروجی می‌باشد. همچنین محدودیت‌های اول و دوم مدل فوق به ترتیب به مقادیر هدف کاهش ورودی و افزایش خروجی اشاره دارند.

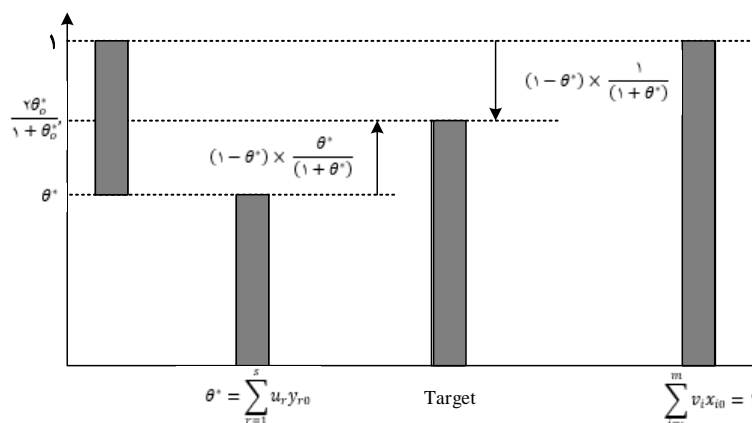
شکل ۳ سطح آرمان متغیرهای ورودی و خروجی (کل فضای ممکن بهبود  $TIR^2$ ) جهت دستیابی به کارایی که همان نقطه بهینه می‌باشد را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل کل فضای ممکن بهبود<sup>۳</sup> برای متغیرهای ورودی و خروجی برابر با  $(1 - \theta^*)$  در نظر گرفته شده است. بدین صورت با فرض ورودی محور بودن مدل در شروع مدل‌سازی، با توجه به این که مجموع موزون ورودی‌ها برابر با ۱ ( $\sum_{i=1}^m v_i x_{io} = 1$ ) و مقدار تابع هدف یا همان مجموع موزون خروجی‌ها برابر با  $\theta^*$  ( $\theta^* = \sum_{r=1}^s u_r y_{ro}$ ) می‌باشد، پس از حل مدل ورودی محور، اختلاف بین مقادیر هدف ورودی و خروجی برابر با کل ظرفیت بهبودی است که می‌تواند برای ورودی و خروجی‌ها در نظر گرفته شود  $(1 - \theta^*)$ . همان‌طور که ذکر شد سهم ورودی‌ها برای رسیدن به TIR برابر ۱ و سهم خروجی‌ها برابر با  $\theta^*$  است، بنابراین کل سهم مشارکت ورودی و خروجی برای رسیدن به TIR برابر با  $(1 + \theta^*)$  می‌باشد. بدین

<sup>1</sup>. multi-objective quadratic programming

<sup>2</sup>. Total Improvement Room

<sup>۳</sup>. دامنه تغییراتی است که کارایی می‌تواند افزایش یابد یا به عبارتی شکاف کارایی که توسط ورودی و خروجی‌ها باید پوشش داده‌شود.

ترتیب سهم ورودی و خروجی‌ها از کل تغییرات به ترتیب برابر با  $\frac{1}{(1+\theta^*)}$  و  $\frac{\theta^*}{(1+\theta^*)}$  خواهد بود. در نهایت این سهم به صورت یک وزن در مقدار فضای ممکن بهبود ضرب می‌شود و ما را به نقطه تعادلی می‌رساند که نقطه بهینه است. سهم کاهش ورودی و افزایش خروجی برای رسیدن به نقطه آرمان به ترتیب برابر با  $\frac{1}{(1+\theta^*)}$  و  $(1-\theta^*) \frac{\theta^*}{(1+\theta^*)}$  می‌باشد.



شکل ۳. نحوه تعیین سطح آرمانی کارایی متغیرهای ورودی و خروجی در مدل DFM

محدودیت سوم، محدودیتی برای کاهش ورودی است درحالی که دو محدودیت آخر اثر هم‌زمان کاهش ورودی و افزایش خروجی را نشان می‌دهند.

گام چهارم: پس از حل مدل MOQP، جواب بهینه  $DMU_o$  ناکارا با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$x_{io}^* = x_{io} - d_{io}^{x^*} \quad (\forall i, i = 1, \dots, m) \quad (6)$$

$$y_{ro}^* = y_{ro} + d_{ro}^{y^*} \quad (\forall r, r = 1, \dots, s) \quad (7)$$

گام پنجم: در این مرحله در مدل ریاضی مرحله ۲ (مدل (۲)) مقدار  $\theta = 1$  و به جای مقادیر  $x_{io}, y_{ro}$  به ترتیب مقادیر  $x_{io}^*, y_{ro}^*$  را جایگزین کرده، سپس مقادیر مطلوب  $s_i^{-**}$  و  $s_r^{+**}$  محاسبه می‌گردد.

در نهایت جهت محاسبه جواب‌های بهینه  $DMU_o$  غیرکارا از روابط زیر استفاده می‌شود

$$x_{io}^{**} = x_{io}^* - s_i^{-**} \quad (\forall i, i = 1, \dots, m) \quad (8)$$

$$y_{ro}^{**} = y_{ro}^* + s_r^{+**} \quad (\forall r, r = 1, \dots, s) \quad (9)$$

### ۲-۳ تحلیل خوشه‌بندی

خوشه‌بندی یکی از شاخه‌های یادگیری بدون نظارت است و فرآیند خودکاری است که در طی آن، اشیا به دسته‌هایی تقسیم می‌شوند که اعضای آن از نظر شاخص‌های مورد نظر مشابه یکدیگرند [۷۱]. در پژوهش حاضر از خوشه‌بندی برای بررسی شباهت‌ها و تفاوت‌های بین کشورهای مورد بررسی در الگوی عملکردی‌شان در زمینه

توسعه پایدار بهره گرفته شده است. بدین منظور ابتدا با کمک شیوه سلسله‌مراتبی و محاسبه شاخص فاصله بین خوشه‌ها و نمودار دندروگرام بهترین تعداد خوشه‌ها تعیین شد. سپس با استفاده از روش K-Means ترکیب خوشه‌های نهایی مشخص شد. الگوریتم K-means از کاربردی‌ترین روش خوشه‌بندی داده‌هاست [۷۱] که برای اولین بار در سال ۱۹۶۷ توسط مک کوئین ارایه شده‌است [۷۲]. در این الگوریتم هر الگو در یک زمان می‌تواند فقط دارای یک مرکز باشد به طوری که اگر  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  شامل مجموعه‌ای از داده‌ها باشد. در این مجموعه  $n$  بیان‌کننده تعداد نقاط آن مجموعه است، همچنین اگر  $V = \{V_1, V_2, \dots, V_C\}$  مجموعه‌ای از مراکز خوشه‌ها باشد، در این مجموعه  $C$  تعداد خوشه‌ها را نشان می‌دهد. هدف از الگوریتم خوشه‌بندی K-means کمینه کردن تابع هدف  $J(V)$  است که با توجه به رابطه ذیل محاسبه می‌شود.

$$J(V) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^C \|x_{ij} - v_j\|^2 \quad (10)$$

در رابطه فوق،  $\|x_{ij} - v_j\|$  فاصله اقلیدسی بین  $x_{ij}$  و  $v_j$  است،  $G_i$  نقاط داده‌های خوشه  $i$ ام است، مرکز  $i$ امین  $v_i$  با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$v_i = \frac{1}{C_j} \sum_{j=1}^{C_j} x_{ij}, \quad i = 1, \dots, C \quad (11)$$

الگوریتم خوشه‌بندی K-Means یک الگوریتم نظارت نشده‌است و دارای فرآیند تکرار است که در آن مجموعه‌ای از داده‌ها به  $k$  خوشه تقسیم‌بندی می‌شوند و نقاط داده به صورت تصادفی به هر یک از خوشه‌ها تعلق می‌گیرد، سپس برای هر نقطه مورد نظر به مرکز خوشه تعلق می‌گیرد. این مراحل تا جایی تکرار می‌شوند که دیگر هیچ نقطه‌ای تغییر مکان ندهد.

#### ۴ چارچوب تحلیل و مجموعه داده‌ها

در پژوهش حاضر ابتدا با بررسی ادبیات و پیشینه پژوهش، گازهای  $CO_2$  (معکوس)،  $NO_x$  (معکوس)،  $SO_2$  (معکوس)، بودجه سلامت و فلزات سنگین<sup>۱</sup> به‌عنوان ورودی و شاخص‌های کیفیت هوا بر اساس گزارش شاخص عملکرد زیست‌محیطی (EPI<sup>۲</sup>) از قبیل مرگ و میر ناشی از ذرات معلق نوع ۱ (PME<sup>۳</sup>)، مرگ و میر ناشی از ذرات معلق نوع ۲ (PMW<sup>۴</sup>) و HAD<sup>۵</sup> به‌عنوان خروجی انتخاب شدند. داده‌های مربوط به متغیرهای ورودی  $CO_2$ ،  $SO_2$ ،  $NO_x$  از وب‌سایت UNSD، ورودی بودجه سلامت از بانک جهانی، متغیر ورودی فلزات سنگین و متغیرهای خروجی PMW، HAD، PME از وب‌سایت EPI استخراج شد. لازم به ذکر است که امتیازات سه شاخص مرگ و میر ناشی از ذرات معلق نوع ۱، مرگ و میر ناشی از ذرات معلق نوع ۲ و HAD در وب‌سایت

<sup>۱</sup> نتایج واقعی ناشی از قرار گرفتن در معرض سرب را اندازه‌گیری می‌کند.

<sup>۲</sup> Environmental Performance Index

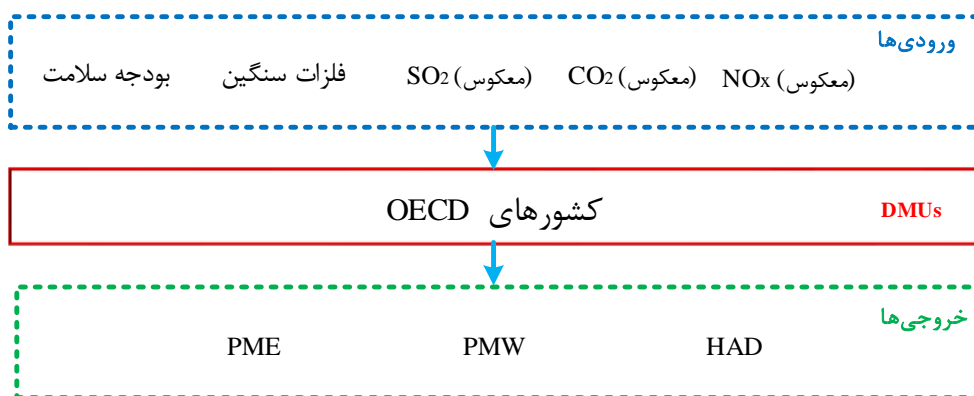
<sup>۳</sup> میانگین غلظت سالانه  $PM_{2.5}$  را که شهروندان معمولی هر کشور در معرض آن هستند اندازه‌گیری می‌کند.

<sup>۴</sup> درصد وزنی جمعیت کشور را در معرض غلظت سالانه  $PM_{2.5}$  قرار می‌دهد که از دستورالعمل WHO در چهار سطح مختلف ۱۰، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ میکروگرم بر متر مکعب فراتر می‌رود.

غلظت‌های بالاتر در فرایند میانگین‌گیری وزن‌های بالاتری داده می‌شود.

<sup>۵</sup> نتایج قرار گرفتن در معرض آلودگی هوای داخل ساختمان ناشی از سوخت جامد خانگی را اندازه‌گیری می‌کند.

EPI بر اساس طیف ۰ تا ۱۰۰ می باشد یعنی امتیاز بالاتر کشورها نشان دهنده عملکرد بهتر آن کشور می باشد. مدل مفهومی پژوهش در شکل زیر قابل مشاهده است.



شکل ۴. ساختار متغیرهای ورودی و خروجی کشورها

## ۵ یافته‌ها

بر اساس داده‌های متغیرها، مراحل مدل سازی DFM بر اساس دیدگاه سوزوکی و همکاران (۲۰۱۰) در محیط نرم افزار لینگو کدنویسی شده و پس از رفع تمامی خطاهای مدل سازی نتایج به صورت زیر به دست آمد. در ابتدا طبق گام‌های اول تا سوم مدل DFM، شامل حل مدل CCR اولیه، مدل CCR ثانویه و مدل جمعی مقادیر  $\theta^*$  و متغیرهای کمکی  $S^+$  و  $S^-$  محاسبه و DMUها گروه بندی می شوند (طبق جدول ۳).

جدول ۳. مقادیر کارایی و متغیرهای کمکی ورودی و خروجی‌ها

گروه	خروجی			ورودی‌ها				مدل CCR		کشور
	$S_1^+$	$S_2^+$	$S_3^+$	$S_4^-$	$S_5^-$	$S_6^-$	$S_7^-$	$S_8^-$	$\theta^*$	
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	استرالیا
۳	۰	۰/۱۵۵۲	۰/۱۶۹	۰/۰۰۴۸	۰	۰/۰۴۳۱	۰	۰	۰/۷۷	اتریش
۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	بلژیک
۳	۰/۱۴۲۱	۰/۱۲۸۳	۰/۰۰۵۳	۰/۰۲۷۸	۰/۰۲۳۵	۰	۰	۰	۰/۹۸	شیلی
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	کلمبیا
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	کاستاریکا
۳	۰	۰/۱۵۱۶	۰/۲۱۸۸	۰/۰۳۹۶	۰	۰/۰۰۲۵	۰	۰	۰/۹۲	جمهوری چک

گروه	خروجی			ورودی‌ها				مدل CCR		کشور
	$S_p^+$	$S_p^+$	$S_1^+$	$S_\delta^-$	$S_p^-$	$S_p^-$	$S_p^-$	$S_1^-$	$\theta^*$	
۳	۰	۰/۰۷۲۵	۰/۰۲۳۶	۰	۰/۰۱۱۳	۰/۰۳۳۹	۰	۰/۰۹۱	۰/۷۲	دانمارک
۳	۰/۰۱۵۱	۰/۰۰۵	۰/۰۲۴۷	۰/۲۵۹۹	۰/۰۸۹۵	۰/۰۰۷۲	۰	۰	۰/۷۳	استونی
۳	۰	۰/۱۰۲۸	۰/۰۹۷۲	۰/۰۱۰۳	۰	۰/۰۰۲۳	۰	۰	۰/۷۵	فنلاند
۳	۰	۰/۰۹۹۲	۰/۰۶۱۸	۰/۰۰۵۸	۰	۰/۰۰۲۲	۰	۰	۰/۹۸	فرانسه
۳	۰/۰۰۱۴	۰/۰۷۳۳	۰/۰۹۹۳	۰/۰۰۵۴	۰	۰/۰۰۲۲	۰	۰	۰/۹۹	آلمان
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	یونان
۳	۰	۰	۰/۱۳۶۲	۰/۰۳۸۳	۰/۱۸	۰/۰۱۷۷	۰	۰	۰/۶۵	مجارستان
۳	۰	۰/۰۲۲۷	۰/۶۹	۰/۶۲۶	۰/۷۴۲۲	۰	۰	۰/۰۵۷۷	۰/۷۸	ایسلند
۳	۰	۰/۰۵۰۲	۰/۰۲۵	۰/۰۲۱۷	۰/۰۱۷۹	۰/۰۴۲۶	۰	۰/۱۲۷۷	۰/۸۷	ایرلند
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	ایتالیا
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	ژاپن
۳	۰	۰/۰۰۸۹	۰	۰/۰۶۴۳	۰/۰۵۹۵	۰/۰۹۷۳	۰	۰	۰/۷۶	لتونی
۳	۰	۰/۱۱۴۶	۰/۱۶۳۲	۰/۱۹۶۹	۰/۱۵۹۷	۰/۰۵۰۵	۰	۰	۰/۸	لیتوانی
۳	۰	۰/۰۹۶۵	۰/۰۱۳۲	۰/۶۰۷۹	۰/۲۲۷۷	۰/۷۱۶	۰	۰/۰۶۴۹	۰/۷۴	لوکزامبورگ
۳	۰	۰/۰۵۶۸	۰/۰۵۷۹	۰/۰۲۴۸	۰	۰/۰۱۹۹	۰	۰	۰/۸۳	هلند
۳	۰	۰/۰۱۹	۰/۰۱۰۸	۰/۰۳۱۹	۰/۰۶۱۱	۰	۰	۰	۰/۹۸	نیوزلند
۳	۰	۰/۰۰۶۳	۰	۰	۰/۰۲۲۵	۰/۰۲۷۷	۰	۰/۰۹۳۷	۰/۷۸	نروژ
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	لهستان
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	پرتغال
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	اسلواکی

گروه	مدل CCR								کشور	
	خروجی			ورودی‌ها						
	$S_1^+$	$S_2^+$	$S_3^+$	$S_4^-$	$S_5^-$	$S_6^-$	$S_7^-$	$S_8^-$	$\theta^*$	
۳	۰	۰	۰/۰۶۲۲	۰/۱۷۷۹	۰/۰۳۵۷	۰/۱۰۱۸	۰	۰	۰/۵۹	اسلوانی
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	اسپانیا
۳	۰	۰/۰۲۵۷	۰	۰	۰/۰۱۲۳	۰/۰۱۹۱	۰	۰/۰۱۶۴	۰/۷۴	سوئد
۳	۰	۰/۰۶۰۶	۰/۰۰۲	۰/۰۹۷۸	۰/۰۱۹۵	۰/۱۱۳۲	۰	۰/۳۱۴۸	۰/۷۴	سوئیس
۳	۰	۰/۰۳۸۴	۰/۰۰۸۹	۰/۰۰۳۲	۰	۰/۰۰۲۸	۰	۰	۰/۹۶	انگلستان
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	آمریکا

بر اساس خروجی مدل CCR و مدل جمعی، DMUها به سه دسته (گام ۲ مدل DFM) تقسیم می‌شوند؛ بنابراین با توجه به مقادیر  $\theta^*$  و متغیرهای  $S^+$  و  $S^-$  در جدول فوق کشورهای استرالیا، بلژیک، کلمبیا، کاستاریکا، یونان، ایتالیا، ژاپن، لهستان، پرتغال اسلوانی، اسپانیا و آمریکا کارا هستند و در دسته اول قرار می‌گیرند و سایر DMUها در دسته سوم جای گرفته و وارد مدل DFM می‌شوند.

همچنین بر اساس خروجی مدل CCR ثانویه (مقادیر  $\lambda$ )، برای هریک از کشورها که دچار ضعف عملکردی هستند کشورهایی به‌عنوان واحد مرجع در نظر گرفته می‌شود و به میزان بزرگی ضعف در عملکرد، فاصله تا کشور الگو نیز بیشتر می‌شود. کشورهای مرجع برای هریک از کشورهای مورد بررسی در جدول ۴ قابل مشاهده است.

جدول ۴. کشورهای مرجع هر کشور مورد ارزیابی

کشور مورد ارزیابی	کشورهای مرجع	کشور مورد ارزیابی	کشورهای مرجع
استرالیا	استرالیا	ایتالیا	ایتالیا
اتریش	استرالیا، بلژیک، پرتغال و اسپانیا	ژاپن	ژاپن
بلژیک	بلژیک	لتونی	کلمبیا، کاستاریکا و یونان
شیلی	استرالیا، کاستاریکا و لهستان	لیتوانی	کلمبیا، یونان و اسلواکی
کلمبیا	کلمبیا	لوکزامبورگ	بلژیک و پرتغال
کاستاریکا	کاستاریکا	هلند	استرالیا، بلژیک و ایتالیا
جمهوری چک	یونان، ایتالیا و لهستان	نیوزلند	استرالیا، بلژیک، یونان و پرتغال
دانمارک	بلژیک، پرتغال و آمریکا	نروژ	بلژیک، پرتغال و آمریکا
استونی	کلمبیا، کاستاریکا و پرتغال	لهستان	لهستان
فنلاند	استرالیا، بلژیک، یونان، پرتغال و اسپانیا	پرتغال	پرتغال
فرانسه	استرالیا، بلژیک، ایتالیا و اسپانیا	اسلواکی	اسلواکی

کشور مورد ارزیابی	کشورهای مرجع	کشور مورد ارزیابی	کشورهای مرجع
آلمان	استرالیا، ژاپن و آمریکا	اسلوونی	کلمبیا، کاستاریکا، یونان و پرتغال
یونان	یونان	اسپانیا	اسپانیا
مجارستان	کلمبیا، کاستاریکا، یونان و پرتغال	سوئد	استرالیا، بلژیک، پرتغال و آمریکا
ایسلند	استرالیا، بلژیک، پرتغال و آمریکا	سوئیس	پرتغال و آمریکا
ایرلند	بلژیک و پرتغال	انگلستان	یونان، ایتالیا، ژاپن و اسپانیا
		آمریکا	آمریکا

با مشاهده دقیق تر می توان دریافت که پرتکرارترین کشورها در جدول فوق کشور پرتغال و بلژیک است و این بدان معناست که این دو کشور به دلیل عملکردشان در پایداری و عملکرد زیست محیطی به عنوان مرجع بیشتر کشورها در نظر گرفته می شود. سپس بر اساس حل مدل DFM و CCR ورودی محور، برای DMU های دسته سوم، مقادیر و درصد افزایش و کاهش متغیرهای ورودی و خروجی جهت رسیدن DMU ها به مرز کارا در دو مدل DFM و CCR محاسبه شده که در جداول زیر ارائه شده است.

**جدول ۵.** درصد و میزان تغییر (کاهش / افزایش) متغیرهای ورودی و خروجی مدل DFM

کشور	DFM														
	در صد افزایش خروجی			در صد کاهش ورودی ها				مقادیر افزایش خروجی ها					مقادیر کاهش ورودی ها		
	$Y_2$	$Y_1$	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$Y_2$	$Y_1$	$Y_0$	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
اتریش	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
شیلی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
جمهوری چک	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
دانمارک	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
استونی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
فنلاند	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
فرانسه	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
آلمان	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
مجارستان	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
ایسلند	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
ایرلند	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
لتونی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
لیتوانی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
لوکزامبورگ	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
هلند	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

DFM																کشور
در صد افزایش خروجی			در صد کاهش ورودی‌ها				مقادیر افزایش خروجی‌ها				مقادیر کاهش ورودی‌ها					
$Y_T$	$Y_T$	$Y_1$	$X_0$	$X_1$	$X_T$	$X_T$	$X_1$	$Y_T$	$Y_T$	$Y_1$	$X_0$	$X_1$	$X_T$	$X_T$	$X_1$	
/۰۱	.	.	۱	۱	.	/۰۱	.	/۶۴۱۴	.	.	/۰۰۵۹	.	.	۰/۹۱۵۵	.	نیوزلند
/۱۸	.	.	.	۱	۱	/۰۱۳	۱	/۰۵۷	.	.	.	.	۰/۰۶۱۴	۱۲/۱۷۴	۸۲۳۹/۱۰	نروژ
/۳۴	/۱۵	.	۱	.	۱	/۰۳۶	.	۲۰/۶۸	/۷۳۶۷	.	۰/۰۲۹۶	.	۰/۲۴۴۸	۳۱/۸۴۱	.	اسلونی
.	.	.	.	۱	۱	/۰۱۶	.	۲۱/۵۰	۱۱	.	.	.	۰/۰۵۷۶	۱۵/۸۵۹	.	سوئد
/۲۱	.	.	۱	۱	۱	/۰۱۵	۱	۲۰/۷۹	.	.	۰/۰۱۵۶	.	۰/۲۰۰۴	۱۴/۱۹۵	۹۸۷/۶۶	سوئیس
/۰۲	.	.	۱	.	۱	/۰۰۳	.	/۸۸۲۸	.	.	۰/۰۰۱۲	.	۰/۰۰۶۱	۳/۳۰۱۷	.	انگلستان

جدول ۶. درصد و میزان کاهش متغیرهای ورودی مدل CCR

CCR						کشور
مقادیر کاهش ورودی‌ها					در صد کاهش ورودی‌ها	
$X_0$	$X_1$	$X_T$	$X_T$	$X_1$		
۰/۰۰۱۵۷۲	۰/۰۰۰۰۰۴	۰/۰۲۰۰۷	۲۱/۴۷	۱۲۴۷/۲۶	۰/۲۳	اتریش
۰/۰۰۰۰۵۸	.	۰/۰۰۰۰۴۸	۲۵۵۶۹	۲۵/۲۳	۰/۰۲	شیلی
۰/۰۰۰۰۵۲	۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۸۷۶	۱۴۳۹۷	۱۴۷/۷۲	۰/۰۸	جمهوری چک
۰/۰۰۲۵۳۸	۰/۰۰۰۰۰۸	۰/۰۲۳۳۷۴	۲۷/۶۳	۱۷۱۷/۸۲	۰/۲۸	دانمارک
۰/۰۰۶۳۸۵	۰/۰۰۰۰۱۵	۰/۰۰۷۴۸۳	۲۳/۵۲	۴۱۷/۹	۰/۲۷	استونی
۰/۰۰۲۰۷۳	۰/۰۰۰۰۰۵	۰/۰۰۷۴۳۸	۲۴/۸۴	۱۱۲۱/۵۷	۰/۲۵	فنلاند
۰/۰۰۰۰۱۸	.	۰/۰۰۰۰۸۸	۱۲۰۵۵	۷۴/۴۹	۰/۰۲	فرانسه
۰/۰۰۰۰۰۵	.	۰/۰۰۰۰۲۲	۰/۵۸	۳۴/۸۵	۰/۰۱	آلمان
۰/۰۰۲۸۹۹	۰/۰۰۰۰۰۷	۰/۰۱۴۹۸۷	۲۳/۵۵	۳۷۳/۵۹	۰/۳۵	مجارستان
۰/۰۰۱۰۴۹	۰/۰۰۰۰۰۶	۰/۰۰۴۰۶۳	۲۱/۳۶	۱۴۵۱/۷۵	۰/۲۲	ایسلند
۰/۰۰۱۱۷۲	۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۱۰۴۵۲	۱۹۲۶۸	۶۹۸/۰۶	۰/۱۳	ایرلند
۰/۰۰۶۹۹۶	۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۶۱۸۲	۱۸/۵۷	۲۶۰/۸۶	۰/۲۴	لتونی
۰/۰۰۳۴۸۵	۰/۰۰۰۰۱۴	۰/۰۱۵۴۷۷	۱۶/۴۴	۲۴۴/۷۸	۰/۲	لیتوانی
۰/۰۱۳۳۳۹	۰/۰۰۰۰۰۲۸	۰/۲۸۶۴۹۲	۲۵/۳	۱۶۳۹/۳۶	۰/۲۶	لوکزامبورگ
۰/۰۰۰۰۷۸	۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۶۷۳۸	۱۵/۷۱	۸۷۶/۳۳	۰/۱۷	هلند
۰/۰۰۰۰۹۵	.	۰/۰۰۰۲۲۴	۴۴۹۴۷	۶۴/۵	۰/۰۲	نیوزلند
۰/۰۰۱۳۱۹	۰/۰۰۰۰۰۵	۰/۰۱۳۲۴۳	۲۰/۲۷	۱۷۷۶/۷۷	۰/۲۲	نروژ
۰/۰۱۲۱۲۲	۰/۰۰۰۰۰۲۸	۰/۱۰۰۲۹۶	۳۶/۰۹	۸۸۸/۸۶	۰/۴۱	اسلونی
۰/۰۰۲۰۱۲	۰/۰۰۰۰۰۶	۰/۰۱۴۶۹۱	۲۵/۰۲	۱۵۲۶/۹۳	۰/۲۶	سوئد
۰/۰۰۳۹۷۴	۰/۰۰۰۰۰۷	۰/۰۵۱۱۹۳	۲۴/۲۷	۲۵۲۲/۰۲	۰/۲۶	سوئیس
۰/۰۰۰۰۴۳	.	۰/۰۰۰۲۲۲	۱۵۴۰۱	۱۵۵/۹۸	۰/۰۴	انگلستان

بر اساس یافته‌های جدول فوق، برخلاف مدل CCR که جهت دستیابی به کارایی تمام ورودی‌ها به نسبت یکسان تغییر می‌کنند، در مدل DFM فقط تعدادی از ورودی‌ها جهت نیل به این هدف تغییر (کاهش) می‌یابد. بر اساس میزان تغییرات در متغیرهای ورودی مطابق جدول ۵، می‌توان بیان نمود که متغیرهای ورودی از قبیل انتشار گازهای  $SO_2$  ( $X_3$ )،  $NO_x$  ( $X_5$ ) و  $CO_2$  ( $X_4$ ) به بیشترین تغییر جهت بهبود وضعیت کشورهای ناکارا در حوزه سلامت انسان نیاز دارند؛ بنابراین با اعمال سیاست‌های کنترل آلودگی تا حدی زیادی می‌توان به بهبود کشورها در این زمینه کمک کرد. همچنین بر اساس یافته‌های جدول ۶، از آنجایی که کشورهایی نظیر آلمان، فرانسه، شیلی، نیوزلند و انگلیس نسبت به سایر کشورهای ناکارا، از وضعیت بهتری در حوزه سلامت انسان برخوردار می‌باشند؛ بنابراین جهت بهبود وضعیت سلامت انسان در این کشورها به تغییرات کمتری و در کشورهایی نظیر اسلوانی، مجارستان، دانمارک و استونی به تغییرات بیشتری در متغیرهای ورودی نسبت به سایر کشورها نیاز است.

اکنون با توجه به وضعیت درصدهای تغییر متغیرهای ورودی و خروجی، حاصل حل مدل‌های DFM، می‌توان با کمک نرم‌افزار SPSS به خوشه‌بندی کشورها پرداخت. ابتدا بر اساس نمودار دندروگرام و میزان جهشی که در شاخص فاصله بین خوشه‌ها بررسی شد، مشخص شد که مناسب‌ترین تعداد خوشه برابر با ۳ است. در ادامه بر اساس روش K-means به خوشه‌بندی کشورهای ناکارا پرداخته شده و میانگین تغییرات متغیرهای ورودی و خروجی هر یک از خوشه‌ها تعیین می‌گردد (طبق جدول ۷).

جدول ۷. خوشه‌بندی کشورها بر اساس روش K-means با مقادیر مرکز خوشه‌ها

متغیرها	خوشه‌ها		
	۱	۲	۳
$X_1$	۰/۸۳	۰/۲۵	۰/۰۱
$X_2$	۰/۱۴	۰/۰۸	۰/۱۵
$X_3$	۱	۰/۰۱	۰/۹۲
$X_4$	۱	۱	۰/۱۷
$X_5$	۰/۵	۱	۰/۸۳
$Y_1$	۰	۰	۰
$Y_2$	۰	۰/۰۴	۰/۰۲
$Y_3$	۰/۲	۰/۰۵	۰/۱۱
	دانمارک	شیلی	اتریش
	ایرلند	استونی	جمهوری چک
	لوکزامبورگ	ایسلند	فنلاند
	نروژ	نیوزلند	فرانسه
	سوئد		آلمان
	سوئیس		مجارستان
			لتونی
			لیتوانی
			هلند

متغیرها	خوشه‌ها		
	۱	۲	۳
			اسلوونی
			انگلیس

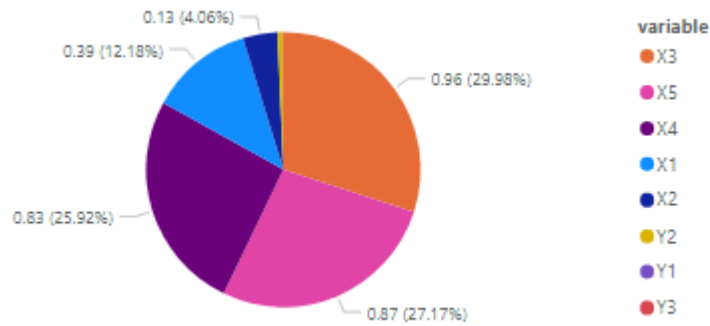
اگر بخواهیم خوشه‌ها را بر اساس متغیرها توصیف کنیم؛ مطابق جدول ۷، متغیر بودجه سلامت ( $X_1$ )، در کشورهای خوشه اول در بهترین وضعیت و در کشورهای خوشه دوم در وضعیت متوسط قرار دارد؛ اما وضعیت بودجه سلامت در کشورهای خوشه سوم ضعیف می‌باشد و ایجاد زیرساخت‌های ایجاد سیستم ایمنی در این کشورها نامناسب می‌باشد. میزان متغیر فلزات سنگین و انتشار گاز  $SO_2$  ( $X_2$ ) در دو خوشه اول و سوم مشابه هم می‌باشد؛ اما میزان این دو متغیر در خوشه دو در کمترین میزان ممکن قرار دارد. میزان انتشار گاز  $CO_2$  ( $X_4$ ) در خوشه اول و دوم بسیار زیاد و میزان انتشار این گاز گلخانه‌ای در خوشه سوم در وضعیت بهتری قرار دارد. سایر متغیرها نیز به همین ترتیب تحلیل می‌گردد.

یکی از اقداماتی که در این مرحله جهت بررسی نقش هر یک از متغیرها در کارا شدن همه DMUها می‌توان انجام داد محاسبه میزان درصد تغییرات لازم برای همه متغیرهای ورودی و خروجی به صورت مجزا جهت رسیدن به مرز کارا می‌باشد. در ادامه درصد تغییرات لازم کل کشورهای ناکارا در متغیرهای ورودی و خروجی محاسبه می‌شود. این مقادیر در جدول ۸ قابل مشاهده است.

جدول ۸. کل درصد تغییرات متغیرهای ورودی و خروجی

متغیرها	مجموع مقادیر موجود	مجموع میزان تغییرات لازم	درصد تغییرات
$X_1$	۹/۰۳	۳/۵۶	۰/۳۹
$X_2$	۱۹/۶۶	۲/۵۷	۰/۱۳
$X_3$	۲/۲۷	۲/۱۸	۰/۹۶
$X_4$	۳/۵۵	۲/۹۴	۰/۸۳
$X_5$	۵/۹۷	۵/۲۱	۰/۸۷
$Y_1$	۱۹/۶۱	۰/۰۱	۰/۰۰۱
$Y_2$	۱۹/۸۲	۰/۳۸	۰/۰۲
$Y_3$	۱۹/۱۲	۲/۳۱	۰/۰۰۱

همچنین شکل زیر نحوه توزیع کل میزان تغییرات لازم در متغیرهای ورودی و خروجی کشورهای ناکارا را در قالب نمودار دایره‌ای نشان داده شده است.



شکل ۵. نمودار دایره‌ای میزان تغییرات متغیرها

با توجه به نمودار فوق متغیرهای ورودی از قبیل انتشار گازهای  $(X_5)$   $NO_x$  و  $(X_4)$   $CO_2$  بیشترین تاثیر را بر سلامت انسان و همچنین بیشترین سهم را در کارا شدن کشورهای ناکارا دارد. لذا توجه به این متغیرها و پرداختن به آن می‌تواند در کارا شدن و بهبود وضعیت سلامت در این کشورها موثرتر باشد. طبق شکل ۵ کشورها برای رسیدن به کارایی باید با ایجاد سیستم‌های جامع‌تر مدیریت در حوزه بهداشت و درمان جهت کنترل شکل‌گیری آلاینده‌های محیط زیستی و تاثیر نهایی آن بر سلامت انسان، بیشترین تغییر را در متغیرهای ورودی خود ایجاد کند. همچنین با توجه به جدول ۸ و نمودار ۵ نیز مشخص می‌شود که متغیرهای فلزات سنگین و بودجه سلامت تاثیر کمتری بر سلامت انسان و بهبود وضعیت کشورهای ضعیف در این زمینه دارند بنابراین هنگام تدوین سیاست‌گذاری در اولویت پایین‌تر نسبت به سایر متغیرها قرار دارند.

## ۶ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پژوهش حاضر با هدف تحلیل غیرشعاعی کارایی کشورهای منتخب به معنای بررسی هم‌زمان میزان افزایش خروجی‌ها و کاهش ورودی‌ها جهت بررسی اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های هوا بر سلامت انسان طراحی شده است. در این راستا بر مبنای مطالعه و بررسی ادبیات و پیشینه پژوهش یک مدل مفهومی دربرگیرنده ۵ متغیر ورودی  $CO_2$ ،  $NO_x$ ،  $SO_2$ ، بودجه سلامت و فلزات سنگین و ۳ متغیر خروجی مرگ و میر ناشی از ذرات معلق نوع ۱ (PME)، مرگ و میر ناشی از ذرات معلق نوع ۲ (PM<sub>10</sub>) و HAD ارائه شد. در مرحله اول از حل مدل DFM، کشورهای استرالیا، بلژیک، کلمبیا، کاستاریکا، یونان، ایتالیا، ژاپن، لهستان، پرتغال اسلوانی، اسپانیا و آمریکا کارا شدند و روی مرز کارا قرار گرفتند و سایر DMUها وارد مدل DFM می‌شوند و کلیه مراحل مدل‌سازی DFM بر اساس کشورهای ناکارا صورت می‌پذیرد. با بررسی میزان تغییرات به دست آمده برای کلیه ورودی و خروجی‌ها و میزان شکاف عملکردی کشورهای مختلف برای کارا شدن، به اهمیت بیشتر نهاد ورودی نظیر انتشار گازهای  $SO_2$ ،  $NO_x$  و  $CO_2$  پی برده می‌شود. این بدین معناست که انتشار گازهای گلخانه‌ای در سلامت انسان در نتیجه پایداری زیست‌محیطی کشورها نقش کلیدی را ایفا می‌کنند در واقع کشورها برای بهبود وضعیت خود در پایداری زیست‌محیطی باید با ایجاد سیستم جامع مدیریت جهت کنترل میزان آلاینده‌های هوا بخصوص انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا حد ممکن کاهش دهند و توسعه پایدار قوی برای کشورها به میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و تاثیر آن بر سلامت انسان‌ها و بنابراین برنامه‌ها و سیاست‌های آن کشور جهت مدیریت

کنترل آلاینده‌های هوا و تاثیر آن بر میزان مرگ و میرها گره خورده است و متغیرهایی نظیر فلزات سنگین و بودجه سلامت نسبت به انتشار گازهای  $SO_2$ ،  $NO_x$  و  $CO_2$  در بهبود وضعیت سلامت انسان در کشورهای ناکارا و ضعیف از اهمیت کمتری برخوردارند؛ بنابراین این متغیرها هنگام تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری در اولویت پایین‌تری قرار می‌گیرند. تعدادی زیادی از محققین در مطالعات گذشته خود اظهار داشتند که انتشارهای گازهای  $SO_2$ ،  $NO_x$  و  $CO_2$  بر میزان مرگ و میر و بیماری‌ها و به‌صورت کلی بر سیستم سلامت جوامع تاثیر می‌گذارد که موید آن نتایج این پژوهش نیز نشان می‌دهد که کنترل میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های هوا در سیستم سلامت کشورهای بزرگ دنیا امری ضروری است [۷، ۷۳]. در ادامه با استفاده از روش K-means به خوشه‌بندی کشورهای ناکارا اقدام شد. بر اساس نتایج خوشه‌بندی (مطابق جدول ۷) می‌توان دریافت کشورهای خوشه ۱ نظیر دانمارک، ایرلند، لوکزامبورگ، نروژ در حوزه کشاورزی که منبع اصلی انتشار آلاینده‌های  $NO_x$  می‌باشد، توانسته‌اند سیاست‌های کنترلی خوبی داشته‌باشند؛ اما برعکس در بخش‌های مربوط به آلاینده‌های ناشی از صنعت که منجر به انتشار گازهای  $SO_2$  و  $CO_2$  می‌شود نسبت به سایر خوشه‌ها وضعیت نامناسب‌تری دارند. همچنین زیرساخت‌ها و سیاست‌های حمل و نقل عمومی در این کشورها باعث شده‌است که آلاینده‌های ناشی از فلزات سنگین از قبیل سرب<sup>۱</sup> و جیوه<sup>۲</sup> در این کشورها کاهش پیدا کند. اما سیاست‌های کشورهای خوشه ۲ نظیر شیلی، استونی، ایسلند و نیوزلند بیشتر مبتنی بر حمایت از صنایع مادر می‌باشد؛ بنابراین صنایع مادر در این کشورها رشد پیدا کرده‌است. همچنین این کشورها استفاده از سوخت‌های خانگی را نیز نتوانسته‌اند کنترل نمایند. حمایت از صنایع مادر در کشورهای خوشه ۲ باعث شده‌است که آلاینده‌های زیست‌محیطی اعم از  $CO_2$  و  $NO_x$  در این جوامع رشد زیادی پیدا کند و از آنجایی که بودجه سلامت قوی هم ندارند بنابراین قادر به پیشگیری از مرگ و میرها نمی‌باشند. در کشورهای خوشه ۳ نظیر آلمان، اتریش، انگلیس و هلند نیز آلاینده‌های زیست‌محیطی اعم از  $SO_2$  و  $NO_x$  رشد زیادی پیدا و از آنجایی که وضعیت بودجه سلامت در این کشورها نیز ضعیف می‌باشد و ایجاد زیرساخت‌های ایجاد سیستم ایمنی در این کشورها نامناسب می‌باشد بنابراین قادر به پیشگیری از مرگ و میرها نمی‌باشند. به‌طور کلی از جدول بالا می‌توان دریافت که کشورهای هر خوشه الگوهای شبیه به هم دارند بنابراین لازم است تا رفتارهای مشابه جهت تدوین و اجرا سیاست‌ها و اقدامات خود در جهت بهبود وضعیت موجود و کاهش مصرف متغیرهای ورودی بین خود شکل دهند. به عنوان مثال کشورهایی نظیر لوکزامبورگ و دانمارک جهت بهبود وضعیت خود باید بیشتر از هر چیزی بر روی کنترل آلودگی ناشی از صنعت و کشورهای نظیر آلمان، اتریش و انگلیس جهت بهبود وضعیت خود باید سیاست‌هایی جهت افزایش بودجه سلامت در نظر بگیرند. همچنین هر کشور ناکارا و دارای عملکرد ضعیف در عملکرد زیست‌محیطی و حوزه سلامت انسان می‌تواند کشور پیشرو و موفق در خوشه خود را الگو قرار داده و در جهت بهبود وضعیت و عملکرد زیست‌محیطی خود تلاش کند. در آخر به محققین توصیه می‌شود در پژوهش‌های خود سایر روش‌هایی تحلیل پوششی داده‌ها نظیر مدل‌های شبکه‌ای را با رویکرد DFM تلفیق کنند و یک مدل مرحله‌ای کامل و جامع در این زمینه ارائه

<sup>۱</sup>. pd  
<sup>۲</sup>. hg

دهند. همچنین توصیه می‌گردد در همین چارچوب از متغیرهای غیراختیاری (ثابت) نظیر جمعیت در مدل مفهومی خود استفاده و نتایج پژوهش حاضر با مدل‌های دیگر نظیر NDEA و مدل DFM در حضور عوامل ثابت مقایسه گردد. محققین در پژوهش‌های خود می‌توانند از سایر مدل‌های توسعه‌یافته DFM نظیر مدل مبتنی بر هدف<sup>۱</sup> استفاده نمایند. علاوه بر این محققین حوزه ارزیابی عملکرد می‌توانند در پژوهش‌های آتی از روش‌های دیگر جهت برخورد با خروجی‌های نامطلوب استفاده نمایند و مدل مناسب ارایه و نتایج مقایسه گردد. پیشنهاد می‌گردد از مدل‌های DFM مبتنی بر مدل‌های BCC در پژوهش‌های آتی استفاده شود و نتایج مقایسه گردد. در آخر نیز توصیه می‌گردد که محققین حوزه ارزیابی عملکرد شاخص‌های سلامت انسان را در کشورهای دیگر نیز بررسی کنند.

## منابع

- [1] Naddafi, K., Ehrampoush, M., Jafari, V., Nabizadeh, R., Younesian, M. (2009). Complete Evaluation of Suspended Air Particles and Their Composition in the Central Area of Yazd City. The Journal of Shahid Sadoughi University of Medical Sciences, 16(4), 26-32 .
- [2] Halkos, G., Argyropoulou, G. (2021b). Pollution and health effects: A nonparametric approach. Computational Economics, 58(3), 691-714 .
- [3] Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D., Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. Nature, 525(7569), 367-371.
- [4] Dobaradaran, S., & Mohamadzadeh, F. (2014). Survey of the oil and gas pollutant impacts on the human and environment. Iranian South Medical Journal, 17(1), 85-95 .
- [5] Khorsandi, H., Karimzade, S., Aghaei, M., Aghapour, A. A., Mousavi Moghanjooghi, S., Kargar, H. (2016). Health impact assessment of exposure to particulate matter less than 10 micron and sulfur dioxide using airtq model in urmia, iran. Studies in Medical Sciences, 27(5), 438-448 .
- [6] Khorsandi, H., Amini Tapok, F., Cargar, H., Mousavi Moughanjogi, S. (2013). Study of Urmia city air quality according to the air quality index (AQI). Studies in Medical Sciences, 23(7), 767-775 .
- [7] Gao, J., Hou, H., Zhai, Y., Woodward, A., Vardoulakis, S., Kovats, Liu, Q. (2018). Greenhouse gas emissions reduction in different economic sectors: Mitigation measures, health co-benefits, knowledge gaps, and policy implications. Environmental Pollution, 240, 683-698 .
- [8] McMichael, A. J., Woodruff, R. E., & Hales, S. (2006). Climate change and human health: present and future risks. The Lancet, 367(9513), 859-869.
- [9] Chu, J., Wu, J., Zhu, Q., An, Q., Xiong, B. (2019). Analysis of China's regional eco-efficiency: A DEA two-stage network approach with equitable efficiency decomposition. Computational Economics, 54(4), 1263-1285.
- [10] Wang, M., Huang, Y., Li, D. (2021). Assessing the performance of industrial water resource utilization systems in China based on a two-stage DEA approach with game cross efficiency. Journal of Cleaner Production, 312, 127722 .
- [11] Jiang, T., Zhang, Y., Jin, Q. (2021). Sustainability efficiency assessment of listed companies in China: a super-efficiency SBM-DEA model considering undesirable output. Environmental Science and Pollution Research .
- [12] Zahedi, S., Najafi, G. (2021). Sustainable Development, A New Conceptual Framework (10), 43-76.
- [13] Mathew, M. J., Sautter, B., Ariffin, E. H., Menier, D., Ramkumar, M., Siddiqui, N. A., Gensac, E. (2020). Total vulnerability of the littoral zone to climate change-driven natural hazards in north Brittany, France. Science of The Total Environment, 706, 135963. .
- [14] Niknaghsh, E., Shoja, N., Movahedi, M. M., Gholam Abri, A. (2020). Energy Efficiency and its Priority in Iran Manufacturing Industries. Journal of Operational Research and Its Applications, 17(3), 135-147. (In Persian)
- [15] Tsaples, G., Papathanasiou, J. (2021). Data envelopment analysis and the concept of sustainability: A review and analysis of the literature. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 138, 110664 .

<sup>1</sup>. Target-Oriented DFM

- [16] Zhou, P., Ang, B. W., Poh, K. L. (2006). Slacks-based efficiency measures for modeling environmental performance. *Ecological Economics*, 60(1), 111-118 .
- [17] Wong, W.-P. (2021). A Global Search Method for Inputs and Outputs in Data Envelopment Analysis: Procedures and Managerial Perspectives. *Symmetry*, 13(7), 1155 .
- [18] Mehregan, M. (2016). Data Envelopment Analysis: Quantitative models in evaluating the performance of organizations. Academic book . (In Persian)
- [19] Ramezanzadeh, S. (2016). Desining a Model for Performance Evaluation Based on Common Weights in DEA and PCA Approaches with Fuzzy Data (Case Study: Amin Police University) Allameh Tabataba'i University. (In Persian)
- [20] Xu, T., You, J., Li, H., Shao, L. (2020). Energy Efficiency Evaluation Based on Data ture Review. *Energies*, 13(14), 3548 .
- [21] Bozorgi, F., Soufi, M., Amirteimoori, A., Homayounfar, M. (2021). Analysis of Marginal Rates of Substitution in the Presence of Undesirable Factors Using Data Envelopment Analysis. *Journal of Operational Research and Its Applications*, 18(4), 103-119. (In Persian)
- [22] Yu, Y., Zhu, W., Shi, Q., Zhang, Q. (2016). Network-like DEA approach for environmental assessment: Evidence from US manufacturing sectors. *Journal of Cleaner Production*, 139, 277-286 .
- [23] Chen, H., Liu, J., Li, Y., Chiu, Y.-H., Lin, T.-Y. (2019). A Two-stage Dynamic Undesirable Data Envelopment Analysis Model Focused on Media Reports and the Impact on Energy and Health Efficiency. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(9), 1535 .
- [24] Mehmood, K., Iftikhar, Y., Chen, S., Amin, S., Manzoor, A., Pan, J. (2020). Analysis of Inter-Temporal Change in the Energy and CO<sub>2</sub> Emissions Efficiency of Economies: A Two Divisional Network DEA Approach. *Energies*, 13(13), 3300 .
- [25] Tone, K., Tsutsui, M. (2014). Dynamic DEA with network structure: A slacks-based measure approach. *Omega*, 42(1), 124-131 .
- [26] Suzuki, S., Nijkamp, P. (2017b). *Regional Performance Measurement and Improvement: New Developments and Applications of Data Envelopment Analysis (Vol. 9)*: Springer.
- [27] Dadbakhsh, M., Khanjani, N., Bahrampour, A. (2015). Death from respiratory diseases and air pollutants in Shiraz, Iran (2006-2012). *Journal of Environment Pollution and Human Health*, 3(1), 4-11.
- [28] Song, C., He, J., Wu, L., Jin, T., Chen, X., Li, R., Mao, H. (2017). Health burden attributable to ambient PM<sub>2.5</sub> in China. *Environmental Pollution*, 223, 575-586 .
- [29] Evans, J., van Donkelaar, A., Martin, R. V., Burnett, R., Rainham, D. G., Birkett, N. J., Krewski, D. (2013). Estimates of global mortality attributable to particulate air pollution using satellite imagery. *Environmental research*, 120, 33-42 .
- [30] Goudarzi, G., Geravandi, S., Foruozaandeh, H., Babaei, A. A., Alavi, N., Niri, M. V., Mohammadi, M. J. (2015). Cardiovascular and respiratory mortality attributed to ground-level ozone in Ahvaz, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(8), 1-9 .
- [31] Karimi Ghoozlou, R., Ahmadi, A., Abbaspour, M., Abbaszadeh, N. (2021). Assessment of Environmental Pollutant Particles PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> with Air Quality Index Method (Case Study: Tehran Industrial Cement Complex). *Journal of Environmental Science and Technology*, 23(8), 155-167 .
- [32] Kim, K.-H., Kabir, E., Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment international*, 74, 136-143 .
- [33] Fang, Y., Naik, V., Horowitz, L., Mauzerall, D. L. (2013). Air pollution and associated human mortality: the role of air pollutant emissions, climate change and methane concentration increases from the preindustrial period to present. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(3), 1377-1394 .
- [34] Krewski, D. (2009). Evaluating the effects of ambient air pollution on life expectancy. *Mass Medical Soc*, In (360), 413-415.
- [35] Laden, F., Schwartz, J., Speizer, F. E., Dockery, D. W. (2006). Reduction in fine particulate air pollution and mortality: extended follow-up of the Harvard Six Cities study. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 173(6), 667-672 .
- [36] Pope III, C. A., Burnett, R. T., Thurston, G. D., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Godleski, J. (2004). Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution: epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease. *Circulation*, 109(1), 71-77.
- [37] Glasson, J., Therivel, R. (2013). *Introduction to environmental impact assessment*: Routledge.

- [38] Mardani, A., Zavadskas, E. K., Streimikiene, D., Jusoh, A., Khoshnoudi, M. (2017). A comprehensive review of data envelopment analysis (DEA) approach in energy efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1298-1322 .
- [39] Charnes, A., Cooper, W. W., Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429-444 .
- [40] Farrell, M. J. (1957). The measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (General)*, 120(3), 253-281.
- [41] Banker, R. D., Charnes, A., Cooper, W. W. (1984). Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis. *Management Science*, 30(9), 1078-1092 .
- [42] Mardani, A., Streimikiene, D., Balezentis, T., Saman, M. Z. M., Nor, K. M., Khoshnava, S. M. (2018). Data Envelopment Analysis in Energy and Environmental Economics: An Overview of the State-of-the-Art and Recent Development Trends. *Energies*, 11(8), 2002 .
- [43] Hassanzadeh, A., Yousefi, S., Farzipoor Saen, R., Hosseininia, S. S. S. (2018). How to assess sustainability of countries via inverse data envelopment analysis? *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(1), 29-40 .
- [44] Łozowicka, A. (2020). Evaluation of the Efficiency of Sustainable Development Policy Implementation in Selected EU Member States Using DEA. *The Ecological Dimension. Sustainability*, 12(1), 435 .
- [45] Wang, L.-W., Le, K.-D., & Nguyen, T.-D. (2019). Assessment of the Energy Efficiency Improvement of Twenty-Five Countries: A DEA Approach. *Energies*, 12(8), 1535 .
- [46] Amowine, N., Ma, Z., Li, M., Zhou, Z., Yaw Naminse, E., Amowine, J. (2020). Measuring Dynamic Energy Efficiency in Africa: A Slack-Based DEA Approach. *Energy Science & Engineering*, 8(11), 3854-3865 .
- [47] Lin, X., Zhu, X., Han, Y., Geng, Z., Liu, L. (2020). Economy and carbon dioxide emissions effects of energy structures in the world: Evidence based on SBM-DEA model. *Science of The Total Environment*, 729, 138947 .
- [48] Amowine, N., Ma, Z., Li, M., Zhou, Z., Azembila Asunka, B., Amowine, J. (2019). Energy Efficiency Improvement Assessment in Africa: An Integrated Dynamic DEA Approach. *Energies*, 12(20), 3915.
- [49] Gómez-Calvet, R., Conesa, D., Gómez-Calvet, A. R., Tortosa-Ausina, E. (2014). Energy efficiency in the European Union: What can be learned from the joint application of directional distance functions and slacks-based measures?. *Applied Energy*, 132, 137-154.
- [50] Wang, C.-N., Hsu, H.-P., Wang, Y.-H., Nguyen, T.-T. (2020). Eco-Efficiency Assessment for Some European Countries Using Slacks-Based Measure Data Envelopment Analysis. *Applied Sciences*, 10(5), 1760.
- [51] Camioto, F. d. C., Rebelatto, D. A. d. N., Rocha, R. T. (2015). Energy efficiency analysis of BRICS countries: a study using Data Envelopment Analysis. *Gestão & Produção*, 23, 192-203 .
- [52] Lenz, N. V., Segota, A., Maradin, D. (2018). Total-factor Energy Efficiency in EU: Do Environmental Impacts Matter?. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 8 (3), 92-96.
- [53] Lu, C. C., Lin, I. F., Wu, D., Zhang, X. (2021). The effect of forestry on energy efficiency in EU countries: A non-oriented dynamic slack-based data envelopment analysis. *Energy Science & Engineering*.
- [54] Halkos, G. E., Tzeremes, N. G., Kourtzidis, S. A. (2016). Measuring sustainability efficiency using a two-stage data envelopment analysis approach. *Journal of Industrial Ecology*, 20(5), 1159-1175.
- [55] Halkos, G. E., Tzeremes, N. G., Kourtzidis, S. A. (2015). Regional sustainability efficiency index in Europe: an additive two-stage DEA approach. *Operational Research*, 15(1), 1-23.
- [56] Tsaples, G., Papatthasiou, J., Georgiou, A. C., & Samaras, N. (2019). Assessing multidimensional sustainability of European countries with a novel, two-stage DEA. Paper presented at the International Conference on Decision Support System Technology. 111-122
- [57] Yeh, W.-C., Huang, H.-C., Hu, C.-F. (2020). Network data envelopment analysis with common weights: an application to the sustainability measurement of OECD countries. *Environmental Engineering and Management Journal*, 19(5), 809-818.
- [58] Feng, Y., Yu, X., Chiu, Y.-H., Lin, T.-Y. (2020). Energy Efficiency and Health Efficiency of Old and New EU Member States. *Frontiers in Public Health*, 8 (168).
- [59] Sarkhosh-Sara, A., Tavassoli, M., Heshmati, A. (2020). Assessing the sustainability of high-, middle-, and low-income countries: A network DEA model in the presence of both zero data and undesirable outputs. *Sustainable Production and Consumption*, 21, 252-268.

- [60] 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. *Technological Forecasting and Social Change*, 144, 553-562 .
- [61] Suzuki, S., Nijkamp, P. (2016b). An evaluation of energy-environment-economic efficiency for EU, APEC and ASEAN countries: Design of a Target-Oriented DFM model with fixed factors in Data Envelopment Analysis. *Energy Policy*, 88, 100-112 .
- [62] Zhang, T., Chiu, Y.-h., Li, Y., Lin, T.-Y. (2018). Air pollutant and health-efficiency evaluation based on a dynamic network data envelopment analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(9), 2046.
- [63] Li, Y., Chiu, Y.-h., Lin, T.-Y. (2019). The impact of economic growth and air pollution on public health in 31 Chinese cities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(3), 393 .
- [64] Wu, J., Xia, P., Zhu, Q., Chu, J. (2019). Measuring environmental efficiency of thermoelectric power plants: a common equilibrium efficient frontier DEA approach with fixed-sum undesirable output. *Annals of Operations Research*, 275(2), 731-749.
- [65] He, X., Chiu, Y.-h., Chang, T.-H., Lin, T.-Y., Wang, Z. (2020). The energy efficiency and the impact of air pollution on health in China. Paper presented at the Healthcare.
- [66] Halkos, G., Argyropoulou, G. (2021a). Modeling energy and air pollution health damaging: a two-stage DEA approach. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 14(8), 1221-1231.
- [67] Zhang, Y., Chen, X., Mao, Y., Shuai, C., Jiao, L., Wu, Y. (2021). Analysis of resource allocation and PM2.5 pollution control efficiency: Evidence from 112 Chinese cities. *Ecological Indicators*, 127, 107705 .
- [68] Suzuki, S., Nijkamp, P. *Regional performance measurement and improvement: Springer*
- [69] Suzuki, S., Nijkamp, P. (2016a). An Evaluation of Energy-Environment-Economic Efficiency for Asian Countries: A Proposal for a Time-Series Target-Oriented DFM Model in Data Envelopment Analysis. *Regional Growth and Sustainable Development in Asia*, 7, 113 .
- [70] Suzuki, S., Nijkamp, P. (2017a). Measurement of Energy-Environment-Economic Performance for EU, APEC, and ASEAN Countries: Combination of a Fixed-Factor Model with an SE Model. In *Regional Performance Measurement and Improvement: New Developments and Applications of Data Envelopment Analysis* , 143-162 .
- [71] Niknam, T., Amiri, B. (2010). An efficient hybrid approach based on PSO, ACO and k-means for cluster analysis. *Applied Soft Computing*, 10(1), 183-197.
- [72] MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. Paper presented at the Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability.
- [73] Li, Y., Lin, T.-Y., Chiu, Y.-H. (2020). Dynamic linkages among economic development, environmental pollution and human health in Chinese. *Cost Effectiveness and Resource Allocation*, 18(1), 1-19.