فصلنامه نظریه‌های کاربردی اقتصاد/ سال سوم/ شماره ۳/ پاییز ۱۳۹۵/ صفحات ۱۷۸-۱۵۳

ارزیابی کارایی زیست‌محیطی شرکت‌های برق منطقه‌ای: مقایسه مدل‌های شعاعی و غیرشعاعی

سیاب ممی‌پور *

استادیار اقتصاد دانشگاه خوارزمی، mamipours@gmail.com

بهنام نجف‌زاده

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های اقتصادی-اجتماعی دانشگاه خوارزمی،
behnamnajafzadeh@ymail.com

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۲/۰۲ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۷/۰۳

چکیده

در این مطالعه با بهره‌گیری از الگوی ناپارامتریک تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) کارایی زیست‌محیطی ۱۶ شرکت برق منطقه‌ای کشور در بازه زمانی ۱۳۸۹-۱۳۹۳محاسبه شده است. بر خلاف مدل‌های سابق کارایی که بیشتر بر مدل‌های شعاعی تمرکز داشته‌اند در این تحقیق ضمن معرفی چند مدل غیرشعاعی (شامل مازادمبنا، تابع فاصله جهت‌دار بر مبنای مازادها و بُرد تنظیم شده) و مقایسه روش آن‌ها با مدل‌های شعاعی (شامل CCR و تابع فاصله جهت‌دار)، محاسبه کارایی شرکت‌های برق منطقه‌ای با این دو الگو انجام شده و نتایج مدل‌های شعاعی و غیرشعاعی با هم مقایسه شده‌اند. همچنین در این تحقیق علاوه بر این که ستانده‌ها به دو گروه مطلوب (تولید برق) و نامطلوب (انتشار کربن دی اکسید) تقسیم شده‌اند، نهاده‌ها نیز به دو گروه انرژی و غیرانرژی تفکیک شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در بین شرکت‌های برق منطقه‌ای شرکت‌های برق منطقه‌ای کرمان و خوزستان بالاترین کارایی و شرکت‌های برق منطقه‌ای فارس و سیستان و بلوچستان پایین ترین کارایی را دارند. همچنین نتایج آزمون‌های آماری با استفاده از رتبه کارایی شرکت‌ها نشانگر دو مفهوم اقتصادی است، اول این که تغییر مهمی در کارایی و عملکرد صنعت برق ایران بین سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۳ اتفاق نیفتاده است؛ دوم این که بعد از آزادسازی قیمت حامل‌های انرژی استراتژی‌ها و رویکردهای متفاوتی توسط شرکت‌های برق منطقه‌ای اتخاذ شده است.

واژه‌های کلیدی: کارایی زیست‌محیطی، شرکت برق منطقه‌ای، مدل‌های شعاعی و غیرشعاعی.

طبقه‌بندی JEL: C52، Q43، Q57.

---

* نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر رشد اقتصادی با افزایش روزافزون تقاضای انرژی همراه بوده است. تقاضا برای انرژی در ایران رشد چشمگیری یافته است که علت آن توسعه اقتصادی و اجتماعی بوده است. تولید برق به عنوان نوع خاص انرژی، شاخصی برای پیشرفت و توسعه اقتصادی محسوب می‌شود و موجب افزایش سطح رفاه مردم شده است. بیشترین تولید برق توسط نیروگاه‌های حرارتی انجام می‌شود به نحوی که برق تولیدی در نیروگاه‌های حرارتی بیش از ۹۳ درصد از کل برق تولیدی در سال ۹۳ بوده است. اهمیت استراتژیک منابع مورد استفاده در نیروگاه‌های حرارتی به عنوان نهاده در کشورهای در حال توسعه‌ای مانند ایران فوق‌العاده بالا است، زیرا این منابع تجدیدناپذیر بوده و باید به صورت بهینه بهره‌برداری شوند. علاوه بر این اثرات زیست محیطی نیروگاه‌های تولید برق را نیز نمی‌توان نادیده گرفت، زیرا از یک سو توجه کشورهای جهان به مسائل زیست محیطی در پیمان‌نامه‌های بین‌المللی مانند کیوتو نمایان شده است و از سوی دیگر این اثرات در سیاست‌های پایش زیست‌محیطی کشور مورد توجه قرار گرفته است. بیشترین سهم آلاینده‌ها در انتشار CO_2 متعلق به بخش نیروگاهی است که ۳۱ درصد از کل CO_2 تولید شده کشور در سال ۹۳ از نیروگاه‌های تولید برق انتشار یافته‌اند. به همین دلیل صنایع الکتریسیته نقش اساسی در کاهش انتشار آلاینده‌های کشور ایفا می‌کند. پس از افزایش فعالیت‌های صنعتی و مصرف انرژی بیشتر و به تبع آن انتشار آلودگی، کارایی فنی که قبل از ان تنها به ستانده مطلوب و تولید برق اختصاص داشت گسترش یافت و توجه به مسائل زیست‌محیطی به عنوان ستانده نامطلوب شدت یافت. کارایی از بعد زیست‌محیطی به دنبال کاهش انرژی و مواد مصرفی مورد استفاده و کاهش انتشار آلاینده‌ها به عنوان ستانده نامطلوب است.

بنابراین با توجه به این که صنایع برق بیشترین سهم را در مطالعات کارایی انرژی دارد (ژو و همکاران[۱] ، ۲۰۰۸) و از بخش‌های عمده در تولید یکی از زیان‌بارترین آلاینده‌ها یعنی CO_2 محسوب می‌شود، در این مطالعه با استفاده از مدل تحلیل پوششی داده‌ها[۲] (DEA) کارایی زیست‌محیطی شرکت‌های برق منطقه‌ای ایران بررسی می‌شود. مدل‌های DEA به دو گروه شعاعی و غیرشعاعی تقسیم شده‌اند. ضمن بدست آوردن مقدار کارایی برای هر گروه، مقایسه‌ای نیز بین هر دو الگو صورت گرفته است. به نظر می‌رسد که چنین

---

[۱] Zhou et al.

[۲] Data Envelopment Analysis

مقایسه‌ای در سطح شرکت‌های برق منطقه‌ای برای اولین بار در داخل کشور صورت می-گیرد. فرض می‌شود که انتشار آلاینده و پسماند بر کارایی زیست‌محیطی شرکت‌های برق منطقه‌ای تاثیر می‌گذارد. بعد از مقدمه، ادامه مطالب به این صورت سازماندهی شده است که در بخش دومو سوم به ترتیب مبانی نظری و پیشینه تحقیق بیان شده است. در بخش چهارم الگوی تحقیق و در بخش پنجم داده‌های مورد استفاده معرفی و نتایج برآورد مدل بیان شده است. سرانجام بخش ششم به جمع‌بندی و ارائه پیشنهادها اختصاص یافته است.

۲- مبانی نظری

هنگامی یک بنگاه کاملاً کارا است که امکان کاهش یک نهاده و یا افزایش یک ستانده بدون افزایش حداقل یک نهاده و یا کاهش حداقل یک ستانده دیگر در آن بنگاه وجود نداشته باشد (کوپمنز[۱]، ۱۹۵۱). تعریف فوق مرتبط با کارایی سنتی است که ستانده نامطلوب را شامل نمی‌شود. دو مدل عمده در این زمینه، مدل‌های DEA ناپارامتریک CCR و BCC هستند که الگوهای خطی برای حل مسائل کارایی در حالت چند نهاده و چند ستانده بوده و به ترتیب از نوع تکنولوژی بازدهی به مقیاس ثابت و متغیر می‌باشند. مشکل اساسی دو مدل CCR و BCC در رویکرد سنتی، امکان دسترسی قوی[۲] آن‌ها است. امکان دسترسی قوی به این معناست که همراه با ستانده مطلوب، ستانده نامطلوب تولید می‌شود و کاهش ستانده نامطلوب هزینه‌بر است. در فرآیند واقعی تولید چنین چیزی ممکن است صحیح نباشد. برای رفع این مشکل نوع جدیدی از کارایی به نام کارایی زیست محیطی معرفی شد که ستانده نامطلوب را نیز در بر می‌گیرد. در این نوع از کارایی، در مدل‌های DEA ستانده نامطلوب نیز وارد می‌شود (شیل[۳]، ۲۰۰۱). کارایی زیست‌محیطی بنا بر نحوه وارد کردن ستانده نامطلوب به دو دسته غیرمستقیم و مستقیم تقسیم می‌شود. در الگوی غیرمستقیم از مدل‌های سنتی استفاده شده و داده‌های ستانده نامطلوب با استفاده از یک تبدیل[۴] در مدل لحاظ می‌شوند. در الگوی مستقیم داده‌های خام ستانده

---

[۱] Koopmans
[۲] Strong disposability
[۳] Scheel
[۴] Translation

نامطلوب مستقیماً وارد مدل می‌شوند. پیش از آن که مدل‌های موجود در هر الگو تشریح شوند، لازم است که به معرفی چند مفهوم در مدل‌های DEA پرداخته شود.

شعاعی و غیرشعاعی[۱] : در حالت کلی مدل‌های اندازه‌گیری کارایی به دو گروه مدل‌های شعاعی و غیرشعاعی تقسیم می‌شوند. در مدل‌های شعاعی نهاده‌ها و ستانده‌ها متناسب با هم تغییر می‌کنند. مثلا اگر دو نهاده X_1 و X_2 در نظر گرفته شود هر دو به یک مقدار (θ) کاهش می‌یابند. در مدل‌های غیرشعاعی برخلاف مدل‌های شعاعی نهاده‌ها و ستانده‌ها متناسب با هم تغییر نمی‌یابند. بنابراین با توجه به شرایط واقعی تولید مدل‌های غیرشعاعی قدرت تشخیص بالاتری دارند (ژو و همکاران، ۲۰۰۸).

تغییرناپذیری واحدها[۲]: در صورتی که اندازه‌گیری کارایی مستقل از واحدهای نهاده‌ها و ستانده‌ها باشد، گفته می‌شود که آن مدل ویژگی تغییرناپذیری واحدها را داراست. به عبارتی دیگر در صورت تغییر واحد نهاده‌ها یا ستانده‌ها تغییری در رفتار کارایی به وجود نمی‌آید (لاول و پاستور[۳]، ۱۹۹۵).

تغییرناپذیری تبدیل[۴]: در صورتی که اندازه‌گیری کارایی مستقل از تبدیل اختصاص یافته به نهاده‌ها و ستانده‌ها باشد مدل این ویژگی را داراست. در واقع استفاده از یک تبدیل مقدار کارایی را تغییر نمی‌دهد. این ویژگی زمانی مفید است که با داده صفر یا منفی سر و کار داشته و پیش از ورود به مدل لازم باشد که برای انطباق با نرم افزارهای مربوطه با استفاده از یک تبدیل به مقادیر مثبت تبدیل شوند (لاول و پاستور، ۱۹۹۵). با توجه به شکل (۱) که بیانگر انواع مدل‌های الگوهای مستقیم و غیرمستقیم است، مدل‌های موجود در هر الگو و ویژگی‌های آن‌ها به اختصار تشریح می‌شوند.

۲-۱- الگوی غیرمستقیم: با توجه به این که مدل‌های حاضر در این گروه بر اساس مدل‌های CCR و BCC هستند، تماماً مدل‌های شعاعی هستند[۵]. مدل CCR در سال

---

[۱] Radial and Non-Radial

[۲] Units invariance

[۳] Lovell and Pastor

[۴] Translation invariance

[۵]علاقه‌مندان برای کسب جزئیات بیشتر در ارتباط با انواع مدل‌های الگوی غیرمستقیم، مندرج در شکل (۱)، به کوپمنز(۱۹۵۱)، تیتکا(۱۹۹۷)، اقبال‌علی و سیفورد(۱۹۹۰)، گولنی و رول(۱۹۸۹)، شیل(۲۰۰۱) و سیفورد و ژو(۲۰۰۲) مراجعه کنند.

۱۹۷۸ توسط چارنز، کوپر و رودز[۱] مطرح شده است. مدل CCR اولین مدل پایه‌ای در روش DEA برای اندازه‌گیری کارایی نسبی در حالت بازدهی به مقیاس ثابت است. در ادامه بنکر و همکاران[۲](۱۹۸۴)، مدل CCR را در حالت بازدهی به مقیاس متغیر بسط داده و مدل BCC را ارائه نمودند. مشکل مدل‌های پایه‌ای CCR و BCC ستانده یا نهاده محور بودن آن‌ها است. علاوه بر این، در مدل‌های BCC زمانی که دو بنگاه امتیاز کارایی برابری کسب می‌کنند امکان تمایز بین آن‌ها وجود ندارد (آماده و رضایی، ۱۳۹۰).

۲-۲- الگوی مستقیم: یکی از ویژگی‌های اصلی الگوی مستقیم امکان دسترسی ضعیف [۳] است (فاره[۴]، ۱۹۸۹). امکان دسترسی ضعیف به این معناست که کاهش ستانده نامطلوب به تنهایی امکان‌پذیر نیست اما کاهش متناسب هر دو ستانده مطلوب و نامطلوب شدنی است. علاوه بر این برای حذف کل ستانده نامطلوب می‌بایست فرآیند تولید متوقف و ستانده مطلوب نیز حذف شود. نتیجه‌ای که فوراً به دست می‌آید مناسب بودن امکان دسترسی ضعیف نسبت به امکان دسترسی قوی است، زیرا به شرایط واقعی تولید نزدیک‌تر است و هر دو ستانده مطلوب و نامطلوب همزمان با هم تولید می‌شوند (ژو و همکاران ، ۲۰۰۸). همچنین در این الگو به جز مدل‌های هایپربولیک و تابع فاصله جهت‌دار سایر مدل‌ها با توجه به ساختار مدلشان، مدل‌های غیرشعاعی محسوب می‌شوند. با توجه به محبوبیت و گستردگی چهار مدل از الگوی مستقیم به نام‌های تابع فاصله جهت‌دار، مازادمبنا، تابع فاصله جهت‌دار بر مبنای مازادها و RAM، در قسمت بعدی مبانی این چهار مدل بیان خواهد شد.[۵]

مدل تابع فاصله جهت‌دار[۶]: چمبرز[۷] (۱۹۹۶) اولین بار تابع فاصله جهت‌داری را معرفی نمود که بر مبنای الگوی ناپارامتریک DEA است و ساختار ساده و مناسب‌تری برای لحاظ ستانده نامطلوب و بررسی اثر مقررات زیست محیطی دارد. تابع فاصله جهت‌دار همزمان ستانده مطلوب را افزایش و ستانده نامطلوب را کاهش می‌دهد. مشکل مدل تابع فاصله

---

[۱] Charnes, Cooper and Rhodes

[۴] Banker et al.

[۳] Weak disposability

[۴] Fare

[۵] علاقه‌مندان برای کسب جزئیات بیشتر در مورد سایر مدل‌های الگوی مستقیم، به فاره (۱۹۸۹)، بیان، (۲۰۰۸)، فوکویوما و وبر (۲۰۱۰) مراجعه کنند.

[۶] Directional distance function (DDF)

[۷] Chambers

جهت‌دار در مدل چمبرز ویژگی شعاعی بودن (صفر بودن تمام مازادها) و بیشتر نشان دادن نمرات کارایی است (فوکویوما و وبر[۱]،۲۰۱۰). همچنین بردار جهت به سمت مرز تولید یک ثابت دلخواه در نظر گرفته می‌شود که احتمالاً مقدار کارایی را به درستی مشخص نمی‌کند. به همین دلیل ژو و همکاران (۲۰۱۲)، مدل تابع فاصله جهت‌دار در حالت غیرشعاعی را معرفی نمودند که شامل ستانده نامطلوب نیز هست.

مدل مازاد مبنا[۲]: مدل‌های مازاد مبنا توسط تن[۳] (۲۰۰۱) معرفی شد. ژو (۲۰۰۸) با گسترش مدل تن، ستانده نامطلوب را نیز در مدل‌سازی آن وارد کرد. برای محاسبه کارایی، نسبت میانگین کاهش ستانده نامطلوب به میانگین افزایش ستانده مطلوب کمینه می‌شود. ویژگی اصلی مدل‌های SBM، غیرشعاعی بودن است که سبب می‌شود این مدل‌ها نسبت به مدل‌های شعاعی قدرت بیشتری در مشخص نمودن کارایی زیست‌محیطی داشته باشند. ایراد این گونه مدل‌ها در مواردی است که بعضی از نهاده‌ها و ستانده‌ها متناسب با هم و بعضی نامتناسب با هم تغییر یابند. مدل‌های SBM حالت مذکور را در نظر نمی‌گیرند (کوپر و همکاران[۴]، ۲۰۰۷).

مدل تابع فاصله جهت‌دار بر مبنای مازادها[۵]: این مدل توسط فاره و گراسکوپف[۶] (۲۰۱۰) مورد استفاده قرار گرفت. در این الگو از خواص مدل‌های SBM و DDF در کنار هم استفاده شده و ترکیبی از مدل‌های فوق شکل می‌گیرد. همان طور که قبلاً اشاره گردید، هر دو مدل ماهیت خاصی نداشته و شالوده مشابهی دارند. اگر چه تابع هدف هر دو متفاوت است، اما ارتباط بین آن‌ها قابل توجه است (فاره و گراسکوپف، ۲۰۱۰). با توجه به کاربرد گسترده این دو مدل در مطالعات اخیر مدل جدید با ترکیب دو مدل مذکور و در نظر گرفتن مازادها در محدودیت‌های مدل تابع فاصله جهت‌دار معرفی می‌گردد. در این مدل مشکل تخمین بیش از حد کارایی-که سابقاً وجود داشت، برطرف گردیده است. زمانی که مازادها به مدل فاصله جهت‌دار افزوده می‌شوند، همبستگی بین مدل‌های SBM و DDF بیشتر می‌گردد. در کنار مزایای اشاره شده، هنگامی که تعداد متغیرهای مسئله نسبت به تعداد مشاهدات زیاد باشد مازادها مقدار قابل توجهی از ناکارایی را در نظر نمی‌گیرند. اما به ندرت چنین شرایطی رخ می‌دهد (کالوت و همکاران[۷]، ۲۰۱۴).

---

[۱] Fukuyama and Weber

[۲] Slack based measure

[۳] Tone

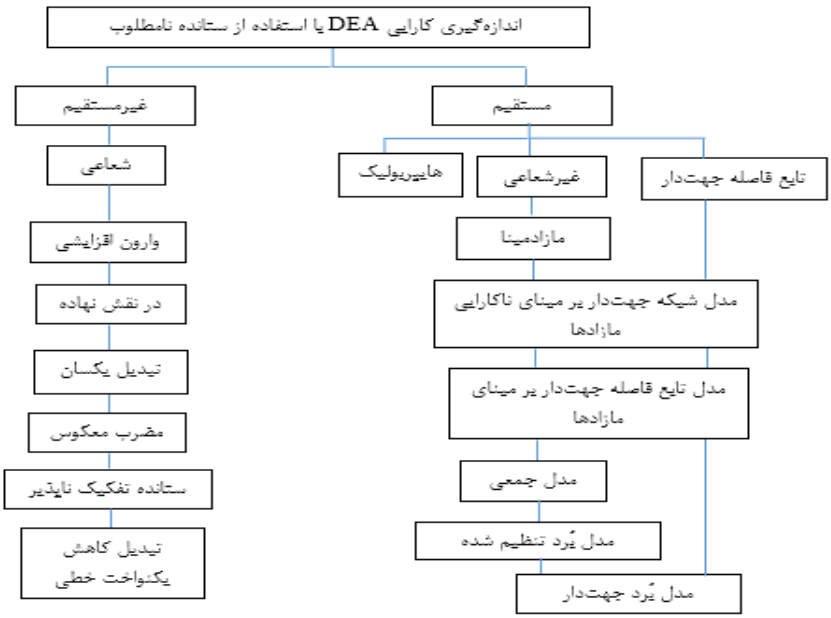
[۴] Cooper et al.

[۵] Slack based measure based on directional distance function

[۶] Fare and Grosskopf

[۷] Calvet et al.

مدل بُرد تنظیم شده[۱]: مدل RAM برای اولین بار توسط کوپر و همکاران (۱۹۹۹) معرفی شد. این مدل در واقع بسط مدل جمعی است که از برد متغیرها به عنوان وزن مازادها در تابع هدف استفاده می‌شود. سویوشی و همکاران[۲] (۲۰۱۰) با بسط مدل کوپر دو مدل جداگانه برای کارایی فنی و زیست محیطی بیان کردند. آن‌ها سپس با ترکیب این دو مدل کارایی واحد[۳] را معرفی نمودند. مزایای این مدل داشتن ویژگی‌های واحد و انتقال یکسان و انعطاف‌پذیری مناسب در خصوص داده‌های منفی است. مشکلات این مدل توسط خود نویسندگان منعکس شد، از جمله این که مقدار کارایی این مدل از مقدار کارایی که در حالت شعاعی به دست می‌آید بیشتر و نزدیک به یک است. همچنین این مدل قابلیت رتبه‌بندی عملکرد واحدهای تصمیم‌گیرنده را نداشته و برای محاسبه کارایی واحدهای تصمیم‌گیرنده بزرگ اریب است.



شکل (۱): چارچوب الگوهای مختلف وارد کردن ستانده نامطلوب به کارایی DEA

منبع : رملی و مونیسامی[۴] (۲۰۱۳)

---

[۱] Range Adjusted Measure (RAM)

[۲] Sueyoshi et al.

[۳] Unified efficiency

[۴] Ramli and Munisamy

۳- پیشینه تجربی

در جدول (۱) مطالعات تجربی انجام شده در زمینه کارایی زیست محیطی برق بیان شده‌اند. دو سطر اول اختصاص به مطالعات داخلی و سطرهای سوم تا نهم مربوط به مطالعات خارجی صورت گرفته است. در چهار سطر پایانی جدول (۱) نیز مطالعات صورت گرفته در ارتباط با مقایسه مدل‌های شعاعی و غیرشعاعی بیان شده‌اند.

جدول (۱): پیشینه تجربی کاربرد کارایی زیست‌محیطی در صنعت برق

مطالعات	نویسنده (سال)	دوره زمانی	مدل تحقیق	یافته‌های تحقیق
داخلی	ناصرزاده (۱۳۸۹)	۴۰ نیروگاه منتخب ایران (۱۳۸۶-۱۳۸۲)	CCR	نزولی بودن نمرات کارایی در بازه زمانی تحقیق –بین کارایی زیست‌محیطی و نوع سوخت مصرفی در نیروگاه‌ها رابطه معناداری وجود دارد.
	آماده و رضایی(۱۳۹۰)	۸ شرکت برق منطقه‌ای ایران (۱۳۸۸-۱۳۸۳)	تفکیک‌ناپذیر سراسری	عملکرد ضعیف فنی و زیست‌محیطی شرکت‌های آذربایجان و خراسان- عملکرد نامطلوب شرکت خوزستان در مسائل زیست‌محیطی
	شهیکی‌تاش و همکاران (۱۳۹۴)	صنایع انرژی‌بر ایران (۱۳۸۷)	تابع فاصله جهت‌دار- SBM	صنایع تولید آجر، صنایع تولید سیمان، آهک و گچ و صنعت تولید آسفالت پایین‌ترین کارایی زیست‌محیطی را دارند-صنایع محصولات کانی غیرفلزی کارایی فنی مناسب و کارایی زیست‌محیطی پایینی دارند.
خارجی	یانگ و پولیت[۱](۲۰۰۷)	۵۸۲ نیروگاه زغال‌سنگ چین (2002)	CCR	وابستگی رشد صنایع برق به منابع مورد استفاده-امکان رشد کارایی و بهبود کنترل آلودگی
	سوزن و همکاران[۲](۲۰۱۰)	۱۱ نیروگاه زغال‌سنگ، ۱ نیروگاه سوخت سنگین و سه نیروگاه گازی ترکیه (۲۰۰۸)	CCR-BCC	معنادار بودن اثرات زیست‌محیطی و لزوم اجرای پیمان کیوتو-کاهش هزینه تولید با کنترل متغیرهای نهاده و ستانده
	ژو و همکاران(۲۰۱۲)	نیروگاه‌های حرارتی ۱۲۶ کشور جهان (۲۰۰۵)	تابع فاصله جهت‌دار غیرشعاعی	بالاتر بودن کارایی زیست‌محیطی کشورهای عضو OECD نسبت به کشورهای غیرعضو

[۱] Yang and Pollitt

[۲] Sözen et al.

	ژو و همکاران(۲۰۱۳)	صنایع برق استان‌های چین (۲۰۱۰-۲۰۰۵)	SBM وزنی	تفاوت معنادار کارایی زیست‌محیطی بین استان‌ها-روند افزایشی مقدار کارایی در تمام استان‌ها
	بی و همکاران[۱](۲۰۱۴)	نیروگاه‌های حرارتی چین (۲۰۰۹-۲۰۰۷)	SBM	معنادار بودن اثرات زیست محیطی و مقررات زیست‌محیطی-لزوم دخالت دولت و سیاست‌گذاری منطقه‌ای برای کاهش ناکارایی
	دو و همکاران[۲] (۲۰۱۶)	۶۴۸ نیروگاه سوخت زغال‌سنگ چین (۲۰۰۸)	تابع پارامتریک	نیروگاه‌های دولتی کمترین کارایی را داشته‌اند-امکان کاهش ۴۴٪ انتشار CO_2 با کارا شدن تمام نیروگاه‌ها
	اورتوسکا و همکاران[۳] (۲۰۱۶)	صنایع برق ۲۷ کشور اروپایی (۲۰۱۳)	CCR	کارا بودن سه کشور نروژ، ایرلند و رومانی-ارائه راهکار برای کارا شدن نهاده‌ها و ستانده‌های ناکارا
مقایسه مدل‌های شعاعی و غیرشعاعی	سویوشی و گوتی(۲۰۱۱)	نیروگاه‌های حرارتی ژاپن (۲۰۰۸-۲۰۰۴)	RAM-انواع مدل‌های شعاعی	تفاوت معنادار نمرات کارایی مدل‌های غیرشعاعی با مدل‌های شعاعی-بی‌تأثیر بودن اجرای پیمان کیوتو بر کارایی نیروگاه‌ها
	سویوشی و گوتی(۲۰۱۲)	۱۳۶ نیروگاه سوخت زغال‌سنگ آمریکا (۲۰۰۷)	سه مدل RAM-سه مدل شعاعی	برتری مدل‌های غیرشعاعی نسبت به مدل‌های شعاعی به دلیل واقعی‌تر بودن نتایج
	سویوشی و گوتی(۲۰۱۲)	۳۹۰ نیروگاه‌های سوخت فسیلی آمریکا (۲۰۰۹)	حالت شعاعی و غیرشعاعی مدل RAM	ضرورت به کارگیری فناوری‌های جدید برای صیانت از محیط‌زیست-لزوم محاسبه مقدار اریبی هر روش در مطالعات انرژی
	کالوت و همکاران(۲۰۱۴)	صنایع برق اتحادیه اروپا (۲۰۰۷-۲۰۰۰)	SBM-تابع فاصله جهت‌دار	تفاوت معنادار بین کارایی هر کشور

۴- روش تحقیق

به منظور سیاست‌گذاری صحیح لازم است که هر دو نوع مدل شعاعی و غیرشعاعی به کار گرفته شود (چارنز و همکاران، ۱۹۸۸). از گذشته پژوهشگران DEA تنها تمایل به

[۱] Bi et al.

[۲] Du et al.

[۳] Ewertowska et al.

استفاده از مدل‌های شعاعی داشته‌اند، زیرا بنیان مدل‌های DEA بر اساس راهبرد شعاعی بودن طرح‌ریزی شده است. اما استفاده صرف از مدل‌های شعاعی امکان تورش نتایج را افزایش می‌دهد، زیرا ارزیابی کارایی به بسیاری از جنبه‌های زیست‌محیطی مرتبط است. بنابراین لازم است که برای سیاست‌گذاری مطلوب روش‌های گوناگون اعم از شعاعی و غیرشعاعی را مورد توجه قرار داد. در این بخش سه مدل شعاعی و سه مدل غیرشعاعی معرفی می‌شود. فرض می‌شود که علاوه بر ستانده‌ها که به دو دسته مطلوب و نامطلوب تقسیم می‌شوند، نهاده‌ها نیز به دو گروه انرژی و غیر انرژی تقسیم شده و قیود آن‌ها به تفکیک بیان می‌شوند.

۴-۱- مدل‌های شعاعی

در این بخش سه مدل شعاعی شامل دو مدل گسترش یافته CCR با امکان دسترسی ضعیف و قوی و یک مدل تابع فاصله جهت‌دار معرفی می‌شود. هر سه مدل با فرض حضور ستانده نامطلوب بیان می‌شوند.

۴-۱-۱- مدل ضعیف CCR

یانگ و پولیت (۲۰۱۰) سه مدل شعاعی معرفی نمودند. با توجه به این که تکنولوژی دسترسی ضعیف و قوی در بخش دوم معرفی شد، تنها دو مدل از آن‌ها، تحت قابلیت دسترسی ضعیف و قوی، انتخاب شده‌اند. ضمن این که با توجه به راهبرد تحقیق مبنی بر تفکیک نهاده‌ها به دو گروه انرژی و غیر انرژی، در مدل نیز این جداسازی انجام پذیرفته است. بنابراین با فرض وجود K واحد تصمیم گیرنده (DMU)، کارایی زیست‌محیطی تحت امکان دسترسی ضعیف طبق مدل شعاعی ذیل به دست می‌آید:

$$
\begin{aligned}
&\text{Min } \theta \\
&\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^{n} x_{ij}\lambda_j \le x_{ik} && (i=1,\ldots,m),\\
&\quad -\sum_{j=1}^{n} e_{qj}\lambda_j + \theta e_{qk} \ge 0 && (q=1,\ldots,p),\\
&\quad \sum_{j=1}^{n} g_{rj}\lambda_j \ge g_{rk} && (r=1,\ldots,s),\\
&\quad -\sum_{j=1}^{n} b_{fj}\lambda_j + \theta b_{fk} = 0 && (f=1,\ldots,h),\\
&\quad \lambda_j \ge 0 \quad (j=1,\ldots,n) && (۱)
\end{aligned}
$$

در مدل (۱) مقدار کارایی برابر با θ است. بردار ستونی $\lambda = (\lambda_1, \ldots, \lambda_n)^T$ معرف متغیرهای شدت یا متغیرهای وزنی هستند که وظیفه برقراری ارتباط بین بردار نهاده، بردارهای ستانده مطلوب و ستانده نامطلوب را بر عهده دارند. θ نامقید است و θ^* مقدار بهینه مدل (۱) است.

مدل (۱) تحت امکان دسترسی ضعیف است، زیرا محدودیت چهارم با علامت تساوی است. ستانده‌ها به دو گروه مطلوب و نامطلوب و نهاده‌ها به دو گروه انرژی و غیر انرژی تقسیم شده‌اند. مدل (۱) با محوریت نهاده انرژی و ستانده نامطلوب است. مجموعه امکان تولید از نوع بازده ثابت به مقیاس (CRS) است، زیرا محدودیت برابری مجموع متغیرهای وزنی (λ) با یک اعمال نشده است. در تحقیق یانگ و پولیت اشاره‌ای به غیرمقید بودن θ نشده است، اما سویوشی و گوتی (۲۰۱۲j) بیان می‌کنند که ذکر آن باعث تسهیل ساخت مدل دوگان و در نتیجه اعتبار مدل می‌شود.

۴-۱-۲- مدل قوی CCR

مدل دوم (با امکان دسترسی قوی) به صورت ذیل است:

$$
\begin{aligned}
&\text{Min } \theta \\
&\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^{n} x_{ij}\lambda_j \le x_{ik} && (i=1,\ldots,m),\\
&\qquad -\sum_{j=1}^{n} e_{qj}\lambda_j + \theta e_{qk} \ge 0 && (q=1,\ldots,p),\\
&\qquad \sum_{j=1}^{n} g_{rj}\lambda_j \ge g_{rk} && (r=1,\ldots,s),\\
&\qquad -\sum_{j=1}^{n} b_{fj}\lambda_j + \theta b_{fk} \ge 0 && (f=1,\ldots,h),\\
&\qquad \lambda_j \ge 0 \quad (j=1,\ldots,n) && (۲)
\end{aligned}
$$

همان طور که مشاهده می‌شود تنها تفاوت موجود بین مدل (۱) و مدل (۲) در محدودیت چهارم است. علامت تساوی در مدل (۱) تبدیل به بزرگتر مساوی در مدل (۲) شده است. مدل‌های (۱) و (۲) ویژگی‌های مهمی دارند. از جمله این که علاوه بر تفکیک نهاده‌ها به دو گروه، کاهش نهاده انرژی و ستانده نامطلوب را به اندازه θ اندازه‌گیری می‌کنند. این قیود در مدل یانگ و پولیت لحاظ نشده است. ضریب θ در محدودیت سوم یعنی محدودیت ستانده مطلوب لحاظ نشده است، زیرا رفتار بردارهای جهت ستانده مطلوب و نامطلوب عکس یکدیگر است و ادغام کردن ستانده مطلوب و ستانده نامطلوب در مدل شعاعی مشکل است (سویوشی و گوتی، ۲۰۱۲).

۴-۱-۳- تابع فاصله جهت دار

چمبرز (۱۹۹۶) برای اولین بار تابع فاصله جهت‌دار را معرفی نمودند. مدل وی دو مشکل عمده داشت. یکی از آن‌ها ناتوانی این مدل در تعیین سطح کارایی واحد (فنی و زیست محیطی) و دیگری مشکل در تعیین بهترین بردار جهت در راستای بیشینه کردن تابع

فاصله جهت‌دار است. برای رفع مشکل دوم، چانگ و همکاران[۱] (۱۹۹۷) با جایگزینی یک بردار مشاهده شده از نهاده‌های انرژی و ستانده‌های مطلوب و نامطلوب به جای بردارهای جهت، مدل شعاعی (۳) را معرفی نمودند. فرم ریاضی مدل(۳) به قرار زیر است:

$$\begin{aligned}
&\beta^* = \text{Max } \beta \\
&\text{s.t.} \quad \textstyle\sum_{j=1}^{n} x_{ij}\lambda_j \le x_{ik} && (i=1,\ldots,m),\\
&\qquad \textstyle\sum_{j=1}^{n} e_{qj}\lambda_j \le e_{qk} - \beta e_{qk} && (q=1,\ldots,p),\\
&\qquad \textstyle\sum_{j=1}^{n} g_{rj}\lambda_j \ge g_{rk} + \beta g_{rk} && (r=1,\ldots,s),\\
&\qquad \textstyle\sum_{j=1}^{n} b_{fj}\lambda_j \le b_{fk} - \beta b_{fk} && (f=1,\ldots,h),\\
&\qquad \lambda_j \ge 0 \quad (j=1,\ldots,n) && (۳)
\end{aligned}$$

در واقع مدل (۳)، با بیشینه کردن مقدار تابع هدف (β^*)، که متغیر آزاد محسوب می‌شود، مقدار ناکارایی را اندازه‌گیری می‌کند.

در مدل (۳) بنگاه در شرایط کاملاً کاراست اگر تمام متغیرهای کمکی برابر با صفر باشند (سویوشی و گوتی، ۲۰۱۱). مزیت مدل (۳) خطی بودن آن و ایراد آن در نظر گرفتن یک جهت خاص است[۲]. در مسائل زیست‌محیطی احتمال وجود جهت‌های دیگر نیز هست اما این مدل آن‌ها را در نظر نمی‌گیرد.

تا به این جا سه نوع مدل شعاعی معرفی شده است. سویوشی و گوتی (۲۰۱۱) بیان می‌کنند که مدل‌های غیر شعاعی بسیار راحت‌تر ستانده مطلوب و نامطلوب را ترکیب می‌نمایند. بنابراین در ادامه، مدل‌های غیرشعاعی معرفی می‌شوند.

۴-۲- مدل‌های غیرشعاعی

هنگامی که متغیرهای مازاد و کمبود در مدل (۳) غیرصفر باشند، مقدار کارایی‌های بدست آمده بیشتر از مقدار واقعی آن است (فوکویوما و وبر، ۲۰۰۹). برای فائق آمدن بر این مشکل، مدل‌های غیرشعاعی بر پایه تعمیم تابع فاصله جهت‌دار و مدل مازادمبنا به وجود آمدند. در ادامه سه مدل غیرشعاعی معرفی می‌شود.

۴-۲-۱- مدل SBM

کالوت و همکاران (۲۰۱۴)، مدل غیر شعاعی SBM مشابه ذیل را ارائه نمودند:

$$\begin{aligned}
&\tau^* = \text{Min}\left\{t - \frac{1}{p}\sum_{q=1}^{p}\frac{S_q}{e_{qk}}\right\}\\
&\text{s.t.} \quad 1 = t + \frac{1}{s+h}\left(\sum_{r=1}^{s}\frac{S_r}{g_{rk}} + \sum_{f=1}^{h}\frac{S_f}{b_{fk}}\right)
\end{aligned}$$

---

[۱] Chung et al.

[۲] برای کسب جزئیات بیشتر در خصوص مدل تابع فاصله جهت‌دار به Chung et al. (1997) رجوع کنید.

$$x_{ik}t = \sum_{j=1}^{n} x_{ij}\Lambda_j + S_i \qquad (i=1,\ldots,m),$$
$$e_{qk}t = \sum_{j=1}^{n} e_{qj}\Lambda_j + S_q \qquad (q=1,\ldots,p),$$
$$g_{rk}t = \sum_{j=1}^{n} g_{rj}\Lambda_j - S_r \qquad (r=1,\ldots,s),$$
$$b_{fk}t = \sum_{j=1}^{n} b_{fj}\Lambda_j + S_f \qquad (f=1,\ldots,h),$$
$$\Lambda_j \geq 0 \quad (j=1,\ldots,n) \quad , \quad S_i \geq 0 , S_q \geq 0 , S_r \geq 0 , S_f \geq 0 , t > 0 \qquad (۴)$$

بردارهای S_i، S_q، S_r و S_f متغیرهای کمکی هستند که به ترتیب نشان‌دهنده نهاده غیر انرژی اضافی، نهاده انرژی اضافی، کمبود ستانده مطلوب و مقدار ستانده نامطلوب اضافی هستند. τ^* نشان‌دهنده مقدار کارایی و بین صفر تا یک است.

یک DMU کارا است اگر و فقط اگر τ^* برابر با یک باشد. در این حالت کل متغیرهای کمکی برابر با صفر هستند. اگر یک DMU کارا نباشد با استفاده از استراتژی‌هایی از قبیل کاهش مازاد نهاده انرژی، افزایش ستانده مطلوب، کاهش مقدار اضافی ستانده نامطلوب و یا ترکیبی از آن‌ها کارایی بهبود می‌یابد.

بر طبق اصول مطلوبیت فاره و لاول (۲۰۰۵)، این مدل سه اصل را برآورده می‌کند:

۱- شاخص کارایی[۱] ۲- تغییر ناپذیری واحد ۳- یکنواختی ضعیف[۲].

تفاوت مدل‌های (۴) با مدل کالوت و همکاران در تفکیک‌پذیری نهاده به دو گروه انرژی و غیر انرژی است.

۴-۲-۲- مدل تابع فاصله جهت‌دار بر مبنای مازادها

در مدل تابع فاصله جهت‌دار در حالت شعاعی (مدل(۳))، احتمال حضور مازادهای غیرشعاعی وجود دارد. برای رسیدن به کارایی جامع‌تر، حضور آن‌ها در مدل بررسی می‌شود. پس از اندازه‌گیری مقدار β^* در مدل (۳)، در گام دوم مدل با در نظر گرفتن این مازادها تحلیل می‌شود. در مدل (۵) ابتدا مقدار بهینه مدل (۳) یعنی β^* را بدست آورده و سپس برای تکمیل تابع هدف مجموع میانگین مازادها بیشینه می‌شود. شکل ریاضی مدل (۵) به صورت ذیل است[۳]:

$$\delta^* = \mathrm{Max}\left[\beta^* + \frac{1}{p+s+h}\left(\sum_{q=1}^{p}\frac{S_q}{e_{qk}} + \sum_{r=1}^{s}\frac{S_r}{g_{rk}} + \sum_{f=1}^{h}\frac{S_f}{b_{fk}}\right)\right]$$

---

[۱] Indication of efficiency

[۲] Weak monotonicity

[۳] برای کسب اطلاعات بیشتر در خصوص اثبات مدل (5) و نقش متغیرهای کمکی در آن به Fare & Grosskopf (2010) و Calvet et al. (2014) رجوع کنید.

$$\begin{aligned}
\text{s.t.}\quad & \textstyle\sum_{j=1}^{n} x_{ij}\lambda_j + S_i = x_{ik} && (i=1,\ldots,m),\\
& \textstyle\sum_{j=1}^{n} e_{qj}\lambda_j + S_q = e_{qk}(1-\beta^*) && (q=1,\ldots,p),\\
& \textstyle\sum_{j=1}^{n} g_{rj}\lambda_j - S_r = g_{rk}(1+\beta^*) && (r=1,\ldots,s),\\
& \textstyle\sum_{j=1}^{n} b_{fj}\lambda_j + S_f = b_{fk}(1-\beta^*) && (f=1,\ldots,h),\\
& \lambda_j \geq 0 \quad (j=1,\ldots,n) \quad , \quad S_i \geq 0,\ S_q \geq 0,\ S_r \geq 0,\ S_f \geq 0 && (۵)
\end{aligned}$$

مزیت استفاده از نسبت مازادها به جای مقدار مطلق آن‌ها، حفظ اصل تغییرناپذیری واحد مدل است (کالوت و همکاران، ۲۰۱۴). بر طبق اصول پایه‌ای اندازه‌گیری ناکارایی، گام اول مدل (۵) سه اصل (الف) یکنواختی ضعیف، (ب) تغییرناپذیری واحد و (ج) پیوستگی تکنولوژی و بردار تولید[۱] را برآورده می‌کند. با افزودن گام دوم، ویژگی چهارم یعنی شاخص کارایی نیز برآورده می‌شود.

در مطالعات تجربی داخلی اندازه‌گیری کارایی تا کنون به روش تابع فاصله جهت‌دار دو مرحله‌ای انجام نپذیرفته است. بنابراین به عنوان یک مدل غیرشعاعی برای مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده مفید است.

۴-۲-۳- مدل RAM

در این قسمت از مدل سویوشی و گوتی (۲۰۱۲) استفاده می‌شود. با فرض تفکیک‌پذیری ستانده‌ها و نهاده‌ها، مدل RAM به صورت ذیل است:

$$\begin{aligned}
\text{Max}\ & \textstyle\sum_{q=1}^{p} R_q^e d_q^e + \sum_{r=1}^{s} R_r^g d_r^g + \sum_{f=1}^{h} R_f^b d_f^b\\
\text{s.t.}\quad & \textstyle\sum_{j=1}^{n} x_{ij}\lambda_j + d_i^x = x_{ik} && (i=1,\ldots,m),\\
& \textstyle\sum_{j=1}^{n} e_{qj}\lambda_j + d_q^e = e_{qk} && (q=1,\ldots,p),\\
& \textstyle\sum_{j=1}^{n} g_{rj}\lambda_j - d_r^g = g_{rk} && (r=1,\ldots,s),\\
& \textstyle\sum_{j=1}^{n} b_{fj}\lambda_j + d_f^b = b_{fk} && (f=1,\ldots,h),\\
& \lambda_j \geq 0 \quad (j=1,\ldots,n) \quad , \quad d_i^x \geq 0, d_q^e \geq 0,\ d_r^g \geq 0,\ d_f^b \geq 0 && (۶)
\end{aligned}$$

در مدل (۶) متغیر کمکی d_i^x متعلق به iامین نهاده غیر انرژی، d_q^e متغیر کمکی qامین نهاده انرژی، d_r^g متغیر کمکی rامین ستانده مطلوب و d_f^b متغیر کمکی fامین ستانده نامطلوب است. نماد R در تابع هدف مدل (۶) نشان‌دهنده بُردهای متغیرهای تحقیق است که برابر با مقادیر ذیل می‌باشند:

$$\begin{aligned}
R_q^e &= 1/\left[(p+s+h)\left(\max_j\{e_{qj}\} - \min_j\{e_{qj}\}\right)\right],\\
R_r^g &= 1/\left[(p+s+h)\left(\max_j\{g_{rj}\} - \min_j\{g_{rj}\}\right)\right],\\
R_f^b &= 1/\left[(p+s+h)\left(\max_j\{b_{fj}\} - \min_j\{b_{fj}\}\right)\right], && (۷)
\end{aligned}$$

---

[۱] Continuity in production vector and technologies

پس از تعیین مقدار بهینه مدل (۶) برای محاسبه کارایی واحد از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\theta^* = 1-\left[\sum_{q=1}^{p} R_q^e d_q^{e*} + \sum_{r=1}^{s} R_r^g d_r^{g*} + \sum_{f=1}^{h} R_f^b d_f^{b*}\right] \quad (۸)$$

d^* مقادیر بهینه متغیرهای کمکی مدل (۶) است. همانند مدل سویوشی و گوتی ستانده‌ها به دو دسته نامطلوب و مطلوب و نهاده‌ها به دو دسته غیر انرژی و انرژی تقسیم‌بندی شده‌اند. برخلاف مدل سویوشی و گوتی، در این تحقیق از قابلیت دسترسی قوی به جای دسترسی‌های مدیریتی و طبیعی استفاده شده است.

در مقالات سویوشی و وانگ (۲۰۱۴)، سویوشی و گوتی (۲۰۱۰ و ۲۰۱۲) نیز مقایسه بین مدل‌های شعاعی و غیر شعاعی انجام شده است. به طور خلاصه نتایج آن‌ها در جدول (۲) انعکاس یافته است.

جدول (۲): تفاوت‌های مدل‌های شعاعی و غیرشعاعی

معیار	مدل‌های شعاعی (۱)، (۲) و (۳)	مدل‌های غیرشعاعی (۴)، (۵) و (۶)
متغیرهای دوگان	متغیرهای دوگان انواع نهاده‌ها و ستانده‌ها ممکن است صفر شود و از آن‌ها در ارزیابی کارایی استفاده نشود. در ارزیابی زیست محیطی DEA چنین مشکلی بسیار محتمل است.	متغیرهای دوگان همیشه مثبت هستند بنابراین از انواع نهاده‌ها و ستانده‌ها در ارزیابی کارایی شرکت‌ها به طور کامل استفاده می‌شود.
اندازه نمونه	نیاز به نمونه بزرگ برای سیاست‌گذاری در زمینه انرژی دارد.	نیاز به نمونه بزرگ برای سیاست‌گذاری در زمینه انرژی دارد.
تعداد شرکت‌های کارا	با توجه به صفر شدن متغیرهای دوگان در مدل‌های شعاعی بسیاری از شرکت‌ها کارا به دست می‌آیند.	مدل‌های غیرشعاعی نیز ممکن است تعداد زیادی از شرکت‌ها را کارا تشخیص دهند اما علت آن صفر شدن متغیرهای دوگان نیست.
اندازه‌گیری کارایی	در سنجش کارایی شرکت‌ها به نهاده‌ها و ستانده نامطلوب آن‌ها توجه می‌شود.	در سنجش کارایی شرکت‌ها به نهاده‌ها، ستانده‌های مطلوب و ستانده‌های نامطلوب آن‌ها توجه می‌شود.

منبع: سویوشی و گوتی (۲۰۱۲)

۴-۳- آزمون مجموع رتبه‌ای[۱]

برای آزمون این فرض که چند گروه یا چند دوره زمانی توزیع یکسانی دارند، از آزمون مجموع رتبه‌ای کروسکال-والیس[۲] استفاده می‌شود. برای محاسبه آماره کروسکال-والیس (H) می‌بایست کارایی تمام واحدهای تصمیم‌گیرنده به ترتیب از بزرگ به کوچک مرتب شوند (هولندر و ولف[۳]، ۱۹۹۹). فرض می‌شود که R_{jt} بیانگر رتبه بنگاه jام در گروه tام (یا

[۱] Rank sum test

[۲] Kruskal–Wallis

[۳] Hollander and Wolfe

دوره tام) است. مجموع رتبه تمام DMUها در گروه tام (یا دوره tام) برابر با $\sum_{j=1}^{n_t} R_{jt} = R_t$ است. n_t تعداد DMU در گروه tام (یا دوره tام) است. آماره کروسکال-والیس (H) طبق رابطه ذیل محاسبه می‌گردد:

$$H = \frac{12}{n(n+1)} \sum_{t=1}^{T} \frac{R_t^2}{n_t} - 3(n+1). \quad (۹)$$

در رابطه (۹) n، تعداد DMUها در کل گروه‌ها (یا دوره‌ها) است. آماره (H) از توزیع خی‌دو (χ^2) با درجه آزادی (df=T-1) تبعیت می‌کند.

۵-یافته‌های تحقیق

در این قسمت ابتدا داده‌های تحقیق معرفی شده و سپس به بیان نتایج پرداخته می‌شود.

۵-۱- پایگاه داده‌ها

در این تحقیق با توجه به روش تحقیق به اندازه‌گیری کارایی زیست‌محیطی شرکت‌های برق منطقه‌ای کشور از سال ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۳پرداخته می‌شود[۱]. هر واحد تصمیم گیرنده (DMU) یک شرکت برق منطقه‌ای از مجموع ۱۶ شرکت برق منطقه‌ای در نظر گرفته شده است[۲]. به مانند سایر تحقیقات مرتبط با کارایی زیست‌محیطی برق، از سه نهاده، یک ستانده مطلوب و یک ستانده نامطلوب استفاده شده است. نهاده‌ها به دو گروه انرژی و غیر انرژی تقسیم شده‌اند. نهاده انرژی، سوخت مصرفی (شامل گازوئیل، گاز و نفت کوره) با واحد میلیون کیلوکالری و نهاده‌های غیر انرژی، ظرفیت نامی (به عنوان جایگزین متغیر سرمایه) با واحد مگاوات و نیروی انسانی با واحد نفر هستند. ستانده مطلوب، تولید ناویژه برق در نیروگاه‌های شرکت‌های برق منطقه‌ای و ستانده نامطلوب، انتشار گاز دی اکسید کربن ناشی از مصرف سوخت در نیروگاه‌های حرارتی با واحد تن است.

هر شرکت برق منطقه‌ای می‌تواند دو نوع نیروگاه داشته باشد:

۱- نیروگاه‌های حرارتی شامل نیروگاه‌های بخاری، گازی، چرخه ترکیبی و دیزلی

۲- نیروگاه‌های تجدیدپذیر مانند نیروگاه‌های برقابی و بادی و خورشیدی و ... .

نیروگاه‌های حرارتی از سوخت‌های فسیلی برای تولید برق استفاده می‌کنند اما ماده اولیه سایر نیروگاه‌ها، انرژی‌های تجدیدپذیر است. در واقع نیروگاه‌های حرارتی-که اکثریت نیروگاه‌های کشور را شامل می‌شوند- به دلیل استفاده از سوخت‌های فسیلی و تجدیدناپذیر باعث انتشار آلاینده‌های مضر مانند CO_2 می‌شوند. بنابراین تمرکز اصلی بر

---

[۱] برای اندازه‌گیری مقدار کارایی از نرم افزار GAMS 24.5 استفاده شده است.

[۲] به دلیل عدم دسترسی به داده‌ها، شرکت آب و برق کیش حذف گردیده است.

نیروگاه‌های حرارتی و ارزیابی کارایی آن‌ها است. تمام داده‌های مورد استفاده، از آمار تفصیلی صنعت برق و سایت آماری سازمان توانیر استخراج شده است. میزان انتشار گاز دی اکسید کربن با استفاده از شاخص ۱ انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای بخش نیروگاهی کشور و مقدار برق تولیدی آن‌ها محاسبه شده است. خلاصه آمارهای متغیرهای مورد استفاده در تحقیق در جدول (الف) در پیوست بیان شده است.

۵-۲- نتایج کارایی زیست‌محیطی

جدول (۳) میانگین مقادیر کارایی ۱۶ شرکت برق منطقه‌ای را در بین سال‌های ۸۹ تا ۹۳ نشان می‌دهد. نتایج در قالب مدل‌های (۱)، (۲) و (۳) به عنوان سه مدل شعاعی و مدل-های (۴)، (۵) و (۶) به عنوان سه مدل غیرشعاعی ارائه شده‌اند. در ستون دوم جدول (۳) شرکت‌های برق منطقه‌ای به ترتیب حروف الفبا نشان داده شده‌اند. ستون‌های بعدی به ترتیب مقادیر کارایی مدل‌های شعاعی و غیرشعاعی را نشان می‌دهند. در دو سطر انتهای جدول نیز میانگین کل و انحراف معیار هر مدل به تفکیک گزارش شده است.

با توجه به این که تابع فاصله جهت‌دار در دو حالت شعاعی و غیرشعاعی استفاده شده و دارای اصولی مانند تغییرناپذیری واحد و یکنواخت ضعیف است، جزو توابع پرکاربرد در مسائل زیست‌محیطی محسوب می‌شوند. بنابراین در این تحقیق نیز به مقایسه جزئی مدل (۳) با مدل غیرشعاعی (۵) پرداخته می‌شود.

همان طور که در بخش قبل بیان شد، مدل (۳) برگرفته از چانگ و همکاران (۱۹۹۷) و مدل (۵) برگرفته از تحقیق کالوت و همکاران (۲۰۱۴) است. در هر دو مدل علاوه بر تفکیک ستانده‌ها به دو گروه ستانده مطلوب و ستانده نامطلوب، نهاده‌ها نیز به دو دسته انرژی و غیر انرژی تقسیم شده‌اند. هر دو مدل از نوع بازده به مقیاس ثابت می‌باشند. اولین تفاوت مدل‌های (۳) و (۵)، بیشتر بودن تعداد شرکت‌های کارا در مدل (۳) است. علت این امر در صفر شدن متغیرهای دوگان مربوط به آن‌ها است. صفر شدن متغیرهای دوگان بیانگر این است که در ارزیابی DEA نهاده‌ها و ستانده‌ها به طور کامل به کار گرفته نشده‌اند (سویوشی و گوتی، ۲۰۱۲). در مدل (۵) متغیرهای دوگان مثبت است اما مجدداً ملاحظه می‌شود که چند شرکت کارا موجود است. یکی دیگر از تفاوت‌های مدل (۳) و مدل (۵) در مقدار کارایی‌های بدست آمده است. مقدار کارایی‌های مدل شعاعی (۳) بیشتر

---

[۱] مقدار این شاخص در ترازنامه انرژی گزارش شده است.

از مقدار متناظر آن در مدل غیر شعاعی (۵) بوده و میانگین کل کارایی‌های بدست آمده حاصل از مدل (۳) برابر با ۰/۹۱۵ و مقدار آن برای مدل (۵) برابر با ۰/۸۸۰ است.

جدول (۳): نتایج کارایی‌زیست‌محیطی: مقایسه مدل‌های شعاعی و غیرشعاعی

سال	شرکت‌های برق منطقه‌ای	مدل‌های شعاعی			مدل‌های غیرشعاعی		
		مدل (۱)	مدل (۲)	مدل (۳)	مدل (۴)	مدل (۵)	مدل (۶)
متوسط ۱۳۸۹-۱۳۹۳	آذربایجان	۰/۸۷۲	۰/۸۲۶	۰/۹۰۶	۰/۷۱۸	۰/۸۶۶	۰/۹۳۴
	اصفهان	۰/۹۴۴	۰/۹۱۶	۰/۹۵۶	۰/۸۵۸	۰/۹۲۶	۰/۹۷۴
	باختر	۱/۰۰۰	۰/۸۸۴	۰/۹۴۶	۰/۷۵۰	۰/۸۶۲	۰/۹۰۰
	تهران	۰/۸۵۶	۰/۸۳۰	۰/۹۲۸	۰/۷۴۲	۰/۸۹۶	۰/۸۵۶
	خراسان	۰/۸۰۸	۰/۷۷۲	۰/۸۷۶	۰/۶۶۴	۰/۸۴۰	۰/۸۹۸
	خوزستان	۱/۰۰۰	۰/۹۸۲	۰/۹۹۴	۰/۹۴۲	۰/۹۶۶	۰/۹۸۴
	زنجان	۰/۷۳۴	۰/۶۸۸	۰/۸۱۸	۰/۵۷۰	۰/۷۷۲	۰/۹۸۲
	سمنان	۰/۷۲۰	۰/۶۸۴	۰/۸۱۰	۰/۵۶۲	۰/۷۶۸	۰/۹۸۸
	سیستان و بلوچستان	۰/۶۱۲	۰/۶۰۶	۰/۷۵۴	۰/۴۹۸	۰/۷۴۰	۰/۹۵۰
	غرب	۰/۸۹۲	۰/۸۲۴	۰/۹۲۲	۰/۶۹۸	۰/۸۶۲	۰/۹۴۲
	فارس	۰/۷۵۰	۰/۷۴۸	۰/۸۵۸	۰/۶۳۴	۰/۸۳۶	۰/۹۴۲
	کرمان	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
	گیلان	۰/۹۲۰	۰/۹۱۶	۰/۹۸۰	۰/۸۸۰	۰/۹۷۲	۰/۹۹۰
	مازندران	۰/۹۸۸	۰/۹۷۰	۰/۹۹۲	۰/۹۲۰	۰/۹۵۴	۰/۹۷۲
	هرمزگان	۰/۹۲۸	۰/۷۶۶	۰/۹۱۶	۰/۶۴۶	۰/۸۵۰	۰/۸۷۸
	یزد	۰/۹۶۸	۰/۹۶۸	۰/۹۸۶	۰/۹۱۰	۰/۹۷۰	۰/۹۹۸
	میانگین کل	۰/۸۷۵	۰/۸۳۶	۰/۹۱۵	۰/۷۵۰	۰/۸۸۰	۰/۹۴۹
	انحراف از معیار	۰/۱۳۲	۰/۱۳۱	۰/۰۸۲	۰/۱۷۳	۰/۰۹۲	۰/۰۵۵

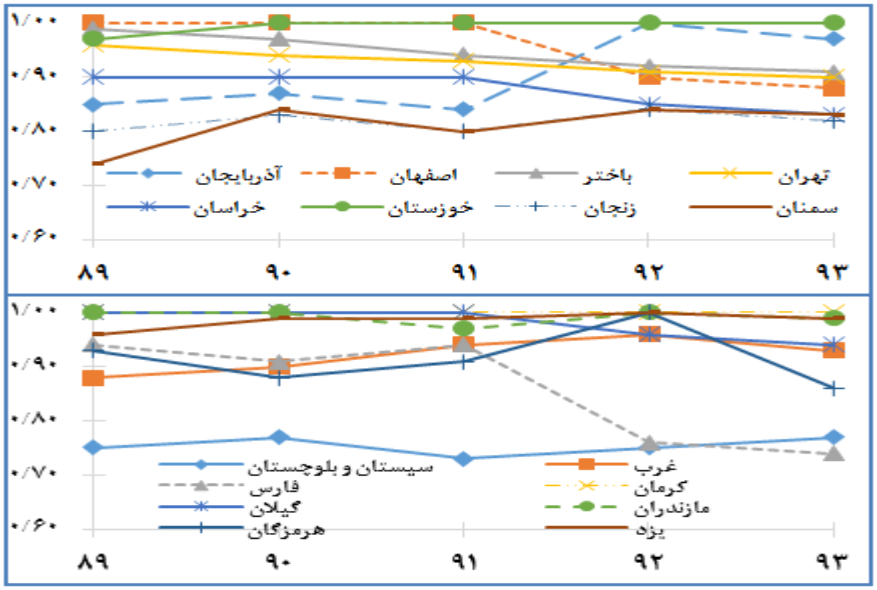
منبع: نتایج تحقیق

مقدار کارایی بدست آمده از مدل (۳) از لحاظ منطق ریاضی قابل قبول است اما از لحاظ مدیریتی قابل پذیرش نیست، زیرا بسیاری از شرکت‌ها، کارا نشان داده شده‌اند و در فرآیند رتبه‌بندی شرکت‌های برق منطقه‌ای خلل ایجاد می‌شود (سویوشی و گوتی، 2011). بنا بر توضیحات فوق می‌توان نتیجه گرفت که هیچ کدام از روش‌های DEA اعم از شعاعی و غیرشعاعی روش کاملی نیستند و هر کدام نقطه ضعف‌هایی دارند.

نمودار (۱) روند نمرات کارایی ۱۶ شرکت برق منطقه‌ای را تحت مدل (۳) در فاصله سال‌های ۸۹ تا ۹۳ نشان می‌دهد. در بازه زمانی مورد نظر شرکت‌های برق منطقه‌ای آذربایجان، خوزستان و یزد روند صعودی دارند اما شرکت‌هایی مانند باختر، تهران،

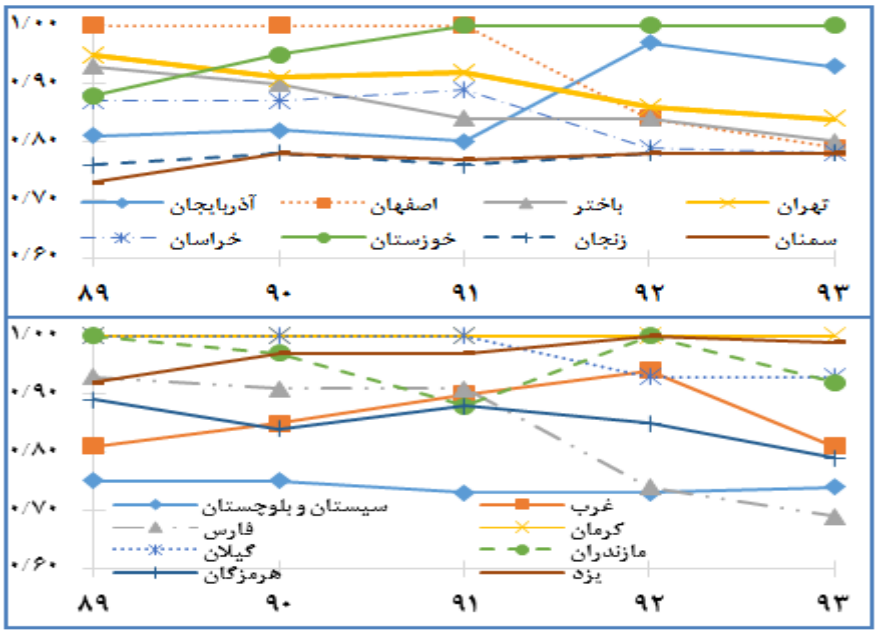
خراسان، اصفهان، فارس و گیلان دارای روند نزولی هستند و سایر شرکت‌ها روند غالبی ندارند. شرکت‌های برق منطقه‌ای سیستان و بلوچستان و فارس بدترین عملکرد را دارند. البته این بدان معنا نیست که به طور کلی این دو شرکت بدترین عملکرد را در میان شرکت‌های برق منطقه‌ای دارند، زیرا نیروگاه‌های تجدیدپذیر و هسته‌ای به دلیل عدم انتشار گاز دی اکسیدکربن حذف شده‌اند. بنابراین این نتیجه‌گیری تنها در مورد نیروگاه-های حرارتی (بخاری، گازی، سیکل ترکیبی و دیزلی) صادق است. همچنین شرکت‌های برق منطقه‌ای کرمان و خوزستان بهترین عملکرد را در میان شرکت‌های برق منطقه‌ای به خود اختصاص داده‌اند.

نمودار (۲) روند کارایی‌های بدست آمده حاصل از مدل (۵) را در بازه زمانی تحقیق نشان می‌دهد. سه شرکت خوزستان، آذربایجان و یزد روند صعودی دارند اما شرکت‌های اصفهان، فارس، خراسان، تهران، باختر و گیلان دارای روندی نزولی می‌باشند. سایر شرکت‌ها روند غالبی ندارند. همانند حالت قبل شرکت‌های سیستان و بلوچستان و فارس بدترین عملکرد و شرکت‌های کرمان و خوزستان بهترین عملکرد را در میان شرکت‌های برق منطقه‌ای به خود اختصاص داده‌اند. با استدلال مشابه مدل (۳) در اینجا نیز می‌توان گفت که تنها نیروگاه‌های حرارتی در نظر گرفته شده است.



نمودار (۱): روند کارایی حاصل از تابع فاصله جهت‌دار (مدل ۳)

منبع: یافته‌های تحقیق

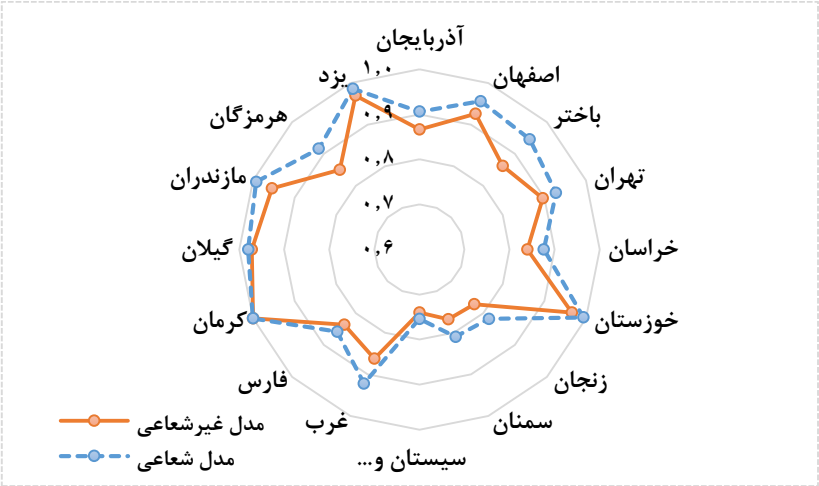


نمودار (۲): روند کارایی حاصل از تابع فاصله جهت‌دار غیرشعاعی (مدل ۵)

منبع: یافته‌های تحقیق

با مقایسه نمودارهای (۱) و (۲) می‌توان دریافت که در هر دو مدل (۳) و (۵) شرکت‌های برق منطقه‌ای کرمان و خوزستان بهترین عملکرد و شرکت‌های برق منطقه‌ای سیستان و بلوچستان و فارس بدترین عملکرد را به نام خود ثبت کرده‌اند. در واقع شرکت‌های کرمان و خوزستان در کلیه سال‌ها به‌طور تقریبی باثبات بوده و کارایی مطلوبی داشته‌اند. نمودار کارایی شرکت‌های سیستان و بلوچستان و فارس در بیشتر سال‌ها در سطح پایین‌تری نسبت به سایر شرکت‌ها قرار دارد. شرکت برق منطقه‌ای فارس بیشترین نزول را در هر دو مدل داشته است. این شرکت از مقدار تقریبی ۰/۹۴ به پایین‌ترین مقدار کارایی در سال ۹۳ نسبت به سایر شرکت‌ها رسیده است و بدترین عملکرد را در این سال دارد. لذا نیاز به توجه بیشتر به افزایش کارایی آن از طریق پیشرفت تکنولوژی و استفاده از نیروگاه-های تجدیدپذیر و یا افزایش بازده از طریق کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده کمتر و توجه بیشتر به مسائل زیست‌محیطی احساس می‌شود. همچنین در هر دو مدل روند شرکت‌های برق منطقه‌ای آذربایجان، یزد و خوزستان صعودی و روند شرکت‌های اصفهان، فارس، خراسان، تهران، باختر و گیلان نزولی بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تفاوت قابل توجهی بین مدل‌های (۳) و (۵) وجود ندارد و روند کارایی‌های شرکت‌های

برق منطقه‌ای در بازه زمانی مورد نظر تقریباً مشابه هم هست. در واقع این دو مدل مشکل اریبی[۱] -که در بسیاری از تحقیقات شایع است- ندارند و تأییدکننده یکدیگر می‌باشند.
نمودار (۳) میانگین نمرات کارایی هر شرکت را تحت دو مدل (۳) و (۵) نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌گردد نمودار مدل شعاعی (۳) به دلیل صفر بودن متغیرهای مازاد در سطح بالاتری نسبت به مدل غیر شعاعی (۵) قرار دارد. به عبارتی دیگر در تمام شرکت‌ها نمره کارایی حاصل از مدل (۳) نسبت به مقدار متناظر آن در مدل (۵) بیشتر است.



نمودار (۳): میانگین نمرات کارایی زیست‌محیطی شرکت‌های برق منطقه‌ای ایران با استفاده از مدل تابع فاصله جهت‌دار در دو وضعیت شعاعی و غیر شعاعی

منبع: نتایج تحقیق

همچنین با توجه به این که به ستانده مطلوب نیز در سنجش کارایی مدل (۵) توجه می‌شود و ناکارایی آن بر ناکارایی کل شرکت اثر می‌گذارد، نمره کارایی در این مدل پایین‌تر است. نتایج فوق منطبق با نتایج سویوشی و گوتی (۲۰۱۱ و ۲۰۱۲) و سویوشی و وانگ (۲۰۱۴) است.
به طور متوسط در مدل (۳) شرکت‌های کرمان، خوزستان و مازندران به ترتیب رتبه‌های اول تا سوم را به خود اختصاص داده‌اند، اما در مدل (۵) دو شرکت خوزستان و مازندران

[۱] اریب بودن به این معناست که هر مدل نتیجه متفاوتی نسبت به مدل دیگر نشان دهد.

رتبه‌های چهارم و پنجم را داشته‌اند. در مدل (۵) رتبه‌های برتر متعلق به شرکت‌های کرمان، گیلان و یزد است.

در هر دو مدل شرکت‌های سیستان و بلوچستان، سمنان و زنجان کمترین کارایی‌ها را داشته‌اند. سایر شرکت‌ها نیز عملکرد متوسطی داشته‌اند و رتبه آن‌ها در هر دو مدل تقریباً مشابه بوده است. حال با استفاده از آزمون کروسکال-والیس دو فرض صفر ذیل مورد آزمون قرار داده می‌شود:

I) آزادسازی قیمت حامل‌های انرژی در سال ۱۳۸۹ بر کارایی تولید برق در نیروگاه‌های حرارتی کشور تأثیری نداشته است.

II) شرکت‌های برق منطقه‌ای بعد از آزادسازی در سال ۱۳۸۹ نیز عملکرد مشابهی با دوره قبل از آزادسازی داشتند و نتایج یکسانی عاید شده است.

فرض اول با توجه به قرار گرفتن کشور در رکود اقتصادی و عدم تغییرات قابل توجه در عملکرد و کارایی صنعت برق کشور بیان شده است. فرض دوم نیز به دلیل نبود فرصت لازم برای شرکت‌های برق منطقه‌ای در زمینه تغییر استراتژی خود با توجه به قوانین موجود و تازگی آزادسازی لحاظ شده است.

جدول (۴): نتایج آزمون کروسکال- والیس

	I		II	
	آماره	احتمال	آماره	احتمال
مدل (۳)	۱/۴۰۱	۰/۸۸	۵۹/۴۲۸	۰/۰۰
مدل (۵)	۲/۲۰۱	۰/۸۴	۵۷/۲۴۷	۰/۰۰

منبع: نتایج تحقیق

همان طور که جدول (۴) نشان می‌دهد فرض صفر مورد I در هر دو مدل رد نمی‌شود. بنابراین آزادسازی قیمت حامل‌های انرژی اثر معناداری بر صنعت برق کشور نداشته است. اما در مورد II فرض صفر رد می‌شود و فرض جایگزین آن یعنی تغییر استراتژی و رویکرد شرکت‌های برق منطقه‌ای بعد از اجرای آزادسازی قیمت حامل‌های انرژی انتخاب می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها

با توجه به گسترش صنعت برق و سهم عمده گاز منتشر شده از نیروگاه‌های حرارتی در آلودگی هوا و کاهش کیفیت محیط زیست ارزیابی کارایی زیست‌محیطی شرکت‌های

منطقه‌ای برق اهمیت دوچندانی یافته است. در این تحقیق کارایی زیست‌محیطی نیروگاه-های حرارتی ۱۶ شرکت برق منطقه‌ای کشور در بین سال‌های ۱۳۹۳-۱۳۸۹، با استفاده از الگوی DEA محاسبه شده است. برخلاف مدل‌های شعاعی رایج که نهاده‌ها (ستانده‌ها) متناسب با هم تغییر می‌یابند، در این تحقیق از مدل‌های غیرشعاعی متناسب با ارزیابی زیست‌محیطی بهره گرفته شده است. سه مدل شعاعی (CCR قوی، CCR ضعیف و تابع فاصله جهت‌دار) و سه مدل غیر شعاعی (مازادمبنا، تابع فاصله جهت‌دار بر مبنای مازادها و بُرد تنظیم شده) معرفی و برای مقایسه این دو گروه از نتایج دو مدل تابع فاصله جهت‌دار و تابع فاصله جهت‌دار بر مبنای مازادها استفاده شده است. در محاسبه کارایی علاوه بر این که ستانده‌ها به دو گروه مطلوب و نامطلوب تقسیم‌بندی شده‌اند، نهاده‌ها نیز به دو گروه انرژی و غیر انرژی تقسیم‌بندی شده‌اند. نتایج هر دو الگوی شعاعی و غیرشعاعی تفاوت قابل توجهی با هم نداشت و در واقع نتایج اریبی چندانی نداشتند. نتایج حاکی از آن بود که شرکت‌های برق منطقه‌ای کرمان و خوزستان بهترین عملکرد و شرکت‌های برق منطقه‌ای سیستان و بلوچستان و فارس بدترین عملکرد را در میان شرکت‌های برق منطقه‌ای داشتند. همچنین شرکت‌های اصفهان، خراسان، تهران، باختر، فارس و گیلان دارای روندی نزولی و شرکت‌های یزد، آذربایجان و خوزستان روندی صعودی داشتند و بقیه شرکت‌ها روند خاصی نداشتند. بنابراین برای بهبود کارایی در شرکت‌هایی که کارایی پایینی دارند، می‌بایست به مسائل زیست‌محیطی از طریق تأسیس نیروگاه‌های تجدیدپذیر و ارتقای تکنولوژی توجه شود. آزمون کروسکال-والیس نشان می‌دهد که شرکت‌های برق منطقه‌ای استراتژی و رویکرد خود را پس از آزادسازی تغییر داده‌اند، اما این تغییر معنادار نبوده است.

به عنوان پیشنهاد می‌توان بازه زمانی محاسبه را افزایش داد تا در بلندمدت کارایی شرکت‌های برق مقایسه شود و اثر تغییر تکنولوژی در آن‌ها برجسته‌تر باشد. همچنین محاسبه کارایی با استفاده از مدل‌های غیر شعاعی جدید و یا مدل‌های DEA تصادفی امکان‌پذیر است. محاسبه کارایی شرکت‌های برق کشورهای منطقه، شامل ایران و کشورهای همسایه آن، می تواند یک ایده نو در این زمینه باشد.

فهرست منابع

۱. آماده، حمید، و رضایی، علی (۱۳۹۰). اندازه‌گیری کارایی زیست‌محیطی با استفاده از مدل کارایی سراسری ستاده مطلوب و نامطلوب تفکیک‌ناپذیری سراسری در بخش تولید انرژی الکتریکی شرکت‌های برق منطقه‌ای. *مطالعات اقتصاد انرژی*، ۸(۳۰)، ۱۵۴-۱۲۵.

۲. شهیکی‌تاش، محمدنبی، خواجه‌حسنی، مصطفی، و جعفری، سعید (۱۳۹۴). محاسبه کارایی زیست‌محیطی در صنایع انرژی‌بر ایران با استفاده از رویکرد تابع فاصله جهت‌دار. *نظریه‌های کاربردی اقتصاد*، ۲(۱)، ۱۲۰-۹۹.

۳. ناصرزاده، سمیه (۱۳۸۹). ارزیابی زیست‌کارایی نیروگاه‌های حرارتی کشور با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها DEA. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علامه طباطبایی.

1. 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.

2. Bi, G. B., Song, W., Zhou, P., & Liang, L. (2014). Does environmental regulation affect energy efficiency in China's thermal power generation? Empirical evidence from a slacks-based DEA model. *Energy Policy*, 66, 537-546.

3. Bian, Y. (2008). Efficiency evaluation with undesirable factors based on dea. *Proceedings of 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*.

4. Calvet, R., Conesa, D., Calvet, A., & 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.

5. Chambers, R. G., Chung, Y., & Fare, R. (1996). Benefit and distance functions. *Journal of Economic Theory*, 70, 407-419.

6. Charnes, A., Cooper, W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of DMU. *European Journal of Operation Research*, 2(6), 429-444.

7. Charnes, A., Cooper, W. W., Golany, B., Seiford, L. M., & Stutz, J. (1985). Foundations of data envelopment analysis for Pareto-Koopmans efficient empirical production functions. *Journal of Econometrics*, 30, 91-107.

8. Chung, Y. H., Fare, R., & Grosskopf, S. (1997). Productivity and undesirable outputs:a directional distance function approach. *Journal of Environmental Management*, 51, 229–240.

9. Cooper, W. W., Park, K. S., & Pastor, J. T. (1999). RAM: A range adjusted measure of inefficiency for use with additive models, and relations to other models and measures in DEA. *Journal of Productivity Analysis*, 11(1), 5-42.

10. Cooper, W. W., Seiford, L. M., & Tone, K. (2007). *Data envelopment analysis: A comprehensive text with model, applications, references and DEA-solver software* (2nd Ed.). Springer US.

11. Du, L., Hanley, A., & Zhang, N. (2016). Environmental technical efficiency, technology gap and shadow price of coal-fuelled power plants

in China: A parametric meta-frontier analysis. *Resource and Energy Economics*, 43, 14-32.
12. Ewertowska, A., Martin, A. G., Gosalbez, G. G., Gavalda, J., & Jimenez, L. (2016). Assessment of the environmental efficiency of the electricity mix of the top European economies via data envelopment analysis. *Journal of Cleaner Production*, 116, 13-22.
13. Fare, R., & Grosskopf, S. (2010). Directional distance functions and slacks-based measures of efficiency. *European Journal of Operation Research*, 200(1), 320–322.
14. Färe, R., Grosskopf, S., Lovell, C. A. K., & Pasurka, C. (1989). Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable: A non-parametric approach. *The Review of Economics and Statistics*, 71, 90-98.
15. Fare, R., & Lovell, C. A. K. (2005). Measuring the technical efficiency of production. *Journal of Economic Theory*, 19(1), 150–162.
16. Fukuyama, H., & Weber, W. L. (2009). A directional slacks-based measure of technical inefficiency. *Socio-Economic Planning Science*, 43(4), 274–287.
17. Fukuyama, H., & Weber, W. L. (2010). A slacks-based inefficiency measure for a two-stage system with bad outputs. *Omega*, 38, 398-409.
18. Golany, B., & Roll, Y. (1989). An application procedure for DEA. *Omega*, 17, 237-250.
19. Hollander, M., & Wolfe, D. A. (1999). *Nonparametric statistical methods*. John Wiley & Sons, Inc, New York.
20. Iqbal Ali, A., & Seiford, L. M. (1990). Translation invariance in data envelopment analysis. *Operations Research Letters*, 9, 403-405.
21. Koopmans, T. C. (1951). An analysis of production as an efficient combination of activities. In Koopmans, T. C. (Ed.), *Activity Analysis of production and allocation*. New York: Wiley.
22. Lovell, C. A. K., & Pastor, J. T. (1995). Units invariant and translation invariant DEA models. *Operations Research Letters*, 18(3), 147-151.
23. Ramli, N. A., & Munisamy, S. (2013). Modeling undesirable factors in efficiency measurement using data envelopment analysis: A review. *Journal of Sustainability Science and Management*, 8 (1), 126-135.
24. Scheel, H. (2001). Undesirable outputs in efficiency valuations. European *Journal of Operational Research*, 132, 400-410.
25. Seiford, L. M., & Zhu, J. (2002). Modeling undesirable factors in efficiency evaluation. *European Journal of Operational Research*, 142, 16-20.
26. S*ö*zen, A., Alp, I., & *ö*zdemir, A. (2010). Assessment of operational and environmental performance of the thermal power plants in Turkey by using data envelopment analysis. *Energy policy*, 38, 6194-6203.
27. Sueyoshi, T., & Goto, M. (2010b). Should the US clean air act include CO_2 emission control?: Examination by data envelopment analysis. *Energy Policy*, 38, 5902–5911.
28. Sueyoshi, T., & Goto, M. (2011a). DEA approach for unified efficiency measurement: Assessment of Japanese fossil fuel power generation. *Energy Economics*, 33, 195–208.

29. Sueyoshi, T., & Goto, M. (2012b). DEA radial measurement for environmental assessment and planning: desirable procedures to evaluate fossil fuel power plants. *Energy Policy*, 41, 422–432.
30. Sueyoshi, T., & Goto, M. (2012g). DEA radial and non-radial models for unified efficiency under natural and managerial disposability: theoretical extension by strong complementary slackness conditions. *Energy Economics*, 34, 700–713.
31. Sueyoshi, T., & Goto, M. (2012j). DEA environmental assessment of coal fired power plants:methodological comparison between radial and non-radial models. *Energy Economics*, 34, 1854–1863.
32. Sueyoshi, T., & Wang, D. (2014). Radial and non-radial approaches for environmental assessment by data envelopment analysis: Corporate sustainability and effective investment for technology innovation. *Energy Economics*, 45, 537–551.
33. Tone, K. (2001). A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 130, 498-509.
34. Tyteca, D. (1997). Linear programming models for the measurement of environmental performance of firms-concepts and empirical results. *Productivity Analysis*, 8, 183-197.
35. Yang, H., & Pollitt, M. (2007). Distinguishing weak and strong disposability among undesirable outputs in DEA: The example of the environmental efficiency of chinese coal-fired power plants. http://dx.doi.org/10.17863/ CAM. 5094.
36. Yang, H., & Pollitt, M. (2010). The necessity of distinguishing weak and strong disposability among undesirable outputs in DEA: Environmental performance of Chinese coal-fired power plants. *Energy Policy*, 38(8), 4440-4444.
37. Zhou, P., Ang, B. W., & Poh, K. L. (2008). Slacks-based efficiency measures for modeling environmental performance. *Ecological Economics*, 60, 111-118.
38. Zhou, P., Ang, B. W., & Wang, H. (2012). Energy and CO_2 emission performance in electricity generation: A non-radial directional distance function approach. *European Journal of Operational Research*, 221, 625-635.
39. Zhou, Y., Xinpeng, X., Kuangnan, F., Dapeng, L., & Chunlin, X. (2013). Environmental efficiency analysis of power industry in China based on an entropy SBM model. *Energy Policy*, 57, 68-75.