فصلنامه علمی- پژوهشی مطالعات اقتصادیِ کاربردی ایران
سال پنجم، شماره‌ی ۱۹، پاییز ۱۳۹۵
صفحات: ۲۱۱-۲۴۰

سنجش عملکرد زیست‌محیطی شرکت‌های برق منطقه‌ای ایران
(در چارچوب مرز مقارن و متوالی مازاد مبنا و تابع فاصله جهت‌دار)

بهنام نجف‌زاده[۱]
سیاب ممی‌پور[۲*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۱۰

چکیده

بسیاری از کشورها در تلاش برای کاهش مصرف انرژی و انتشار آلاینده CO_2 از طریق افزایش کارایی و بهره‌وری صنایع موجود هستند لذا مطالعه عملکرد زیست‌محیطی صنایع تحت عنوان کارایی زیست‌محیطی از موضوعات پرکاربرد و جذاب در مباحث اقتصاد محیط‌زیست و انرژی محسوب می‌شود. در این تحقیق با استفاده از دو الگوی رهیافت تحلیل پوششی داده‌ها (مازاد مبنا و تابع فاصله جهت‌دار) به ارزیابی کارایی زیست‌محیطی شرکت‌های برق منطقه‌ای کشور در بازه‌ی زمانی ۱۳۸۳-۱۳۹۳ پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد شرکت-های برق منطقه‌ای اصفهان، کرمان و گیلان بالاترین کارایی زیست‌محیطی و شرکت‌های سیستان و بلوچستان و کیش کمترین کارایی زیست‌محیطی را دارند همچنین شرکت‌های آذربایجان، اصفهان، خوزستان و مازندران بیشترین پسرفت تکنولوژی را در این مدت داشته‌اند. به‌طورکلی عملکرد صنعت برق از سال ۱۳۸۹ و با آزادسازی قیمت‌های حامل‌های انرژی مناسب نبوده و با افت پیاپی کارایی و بیشترین پسرفت تکنولوژی در سال‌های اخیر مواجه بوده است. همچنین با استفاده از آزمون کروسکال والیس مشخص گردید که عملکرد صنعت برق در بازه زمانی بعد از سال ۱۳۸۹ نسبت به قبل از آن به‌طور معناداری تفاوت پیدا کرده است.

کلیدواژه‌ها: کارایی زیست‌محیطی، مدل مازاد مبنا، تابع فاصله جهت‌دار، مرز مقارن، مرز متوالی، شرکت‌های برق منطقه‌ای.

طبقه‌بندی JEL: Q57, Q43, C61, C33.

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی سیستم‌های اقتصادی– اجتماعی دانشگاه خوارزمی **Email:** behnamnajafzadeh@ymail.com
۲. استادیار گروه اقتصاد دانشگاه خوارزمی (*نویسنده مسئول) **Email:** mamipours@gmail.com

۱. مقدمه

الکتریسیته یکی از شکل‌های نهایی انرژی است که برای برق‌رسانی به خانه‌ها و صنایع به کار می‌رود. احتراق سوخت‌های فسیلی برای تولید برق بزرگترین منبع انتشار کربن دی‌اکسید است و در حدود ۴۰٪ از کل انتشار CO_2 در جهان ناشی از صنایع الکتریسیته است (ژانگ و همکاران[1]، ۲۰۱۳). بنابراین صنعت تولید برق می‌تواند نقش اساسی در کاهش انتشار CO_2 داشته باشد. به همین سبب مبنا قرار دادن مصرف انرژی و انتشار CO_2 در عملکرد صنایع تولیدی برق و ارزیابی توان کاهش آنها بسیار حائز اهمیت است. افزایش تقاضا برای برق در دهه‌های اخیر اثرات مثبت و منفی بر اجتماع، اقتصاد و محیط‌زیست داشته است که اثر مثبت آن تولید برق بیشتر بوده است. با توجه به این‌که برق تولید شده از نیروگاه‌های برق در ردیف انرژی ثانویه[2] به‌حساب می‌آید که از مواد اولیه‌ای مانند گاز طبیعی، زغال‌سنگ، نفت، سوخت هسته‌ای و منابع تجدیدپذیر به‌دست می‌آید، اولین تصمیم هر کشوری اتخاذ استراتژی انرژی بهینه در انتخاب مواد اولیه مورد نیاز برای تولید برق است. اثر منفی افزایش تولید برق انتشار گازهای گلخانه‌ای همانند کربن دی‌اکسید CO_2، سولفور دی‌اکسید SO_2 و اکسید نیترات NO_X بوده است. در واقع نیروگاه‌های حرارتی تولید برق یکی از منابع اصلی انتشار آلاینده‌های فوق هستند و پیامدهای اخیر ازدیاد آلاینده‌ها یعنی گرمای جهانی و تغییرات آب و هوایی سبب نگرانی بسیاری از محققان، سیاستمداران و دوستداران محیط‌زیست شده است. بنابراین تمام واحدهای صنعتی مانند شرکت‌های برق می‌بایست تلاش خود را برای کاهش انتشار آلاینده‌ها به‌خصوص CO_2 و کمک به بهبود کیفیت محیط‌زیست انجام بدهند. یکی از راهبردهای اصلی در این زمینه بهبود عملکرد واحدها از طریق افزایش کارایی زیست‌محیطی[3] و بهبود تکنولوژی مورد استفاده است. کارایی زیست‌محیطی یعنی تولید کالا و ارایه خدمات با به‌کارگیری انرژی و مواد اولیه کمتر که ضایعات، آلودگی و هزینه کمتر را نیز به دنبال داشته باشد. کارایی زیست‌محیطی دو جنبه محیطی و اقتصادی را بررسی می‌کند. بنابراین می‌توان گفت شاخص کارایی زیست‌محیطی نمایانگر میزان تعهد به توسعه پایدار است (سیفی و همکاران، ۱۳۹۲).

برای ارزیابی کارایی زیست‌محیطی و کمی کردن آن غالباً از تکنیک تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)[4] که یک تکنیک برنامه‌ریزی خطی برای تعیین مرز کارایی است استفاده می‌شود. با مطالعه چارنز و همکاران[5] مدل‌های DEA به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی کارایی به‌کار می‌رود. از آن زمان به بعد در

1. Zhang and *et al.*
2. Secondary
3. Environmental Efficiency
4. Data Envelopment Analysis
5. Charnes and *et al.*

حیطه محیط‌زیست و انرژی از مدل‌های DEA به‌طور فزاینده‌ای استفاده شده است (ژو و همکاران[1]، ۲۰۰۸). به‌طور خاص تحلیل کارایی نیروگاه‌های برق از دیرباز مورد علاقه بسیاری از محققان انرژی بوده است (مانند سیتز[2]، ۱۹۷۱) و بیشترین مطالعات در حوزه کارایی زیست‌محیطی مربوط به صنعت برق است (ژو و همکاران، ۲۰۰۸). بنابراین به‌دلیل اهمیت بالای آن در صنعت برق در این تحقیق نیز به ارزیابی کارایی زیست‌محیطی شرکت‌های برق منطقه‌ای کشور با استفاده از مدل‌های DEA می‌پردازیم. در ادامه تحقیق به چهار بخش تقسیم می‌شود ابتدا در بخش دوم به بیان مبانی نظری الگوهای DEA موردنظر تحقیق پرداخته و سپس در بخش سوم با توجه به مبانی نظری بیان شده به بیان پیشینه و مطالعات تجربی انجام شده در زمینه کارایی زیست‌محیطی پرداخته شده است. بخش چهارم اختصاص به تشریح الگوها و روش‌های مورد استفاده در تحقیق دارد. بخش پنجم با بیان یک کاربرد تجربی یعنی شرکت‌های برق منطقه‌ای به بحث و گفتگو در مورد نتایج به‌دست آمده خواهیم پرداخت و سرانجام در بخش پایانی تحقیق به ارائه جمع‌بندی و پیشنهادات می‌پردازیم.

۲. مبانی نظری

در مطالعات انرژی و زیست‌محیطی فرض سنتی مدل‌های DEA مبنی بر این‌که در حضور ستانده نامطلوب[3] تمام ستانده‌ها می‌بایست بیشینه شوند نادرست است (ژو و همکاران، ۲۰۰۸). رهیافت‌های گوناگونی برای رفع این مشکل مطرح شده‌اند که از جمله پرکاربردترین آن‌ها مدل‌های کارایی شعاعی[4] هستند (شیل[5]، ۲۰۰۱). در مدل‌های شعاعی فرض می‌شود که نهاده‌ها[6] (ستانده‌های نامطلوب) متناسب با یکدیگر کاهش می‌یابند و ستانده‌های مطلوب[7] به یک نسبت افزایش می‌یابند تا به مرز کارایی برسند. اما این فرض متناسب با شرایط واقعی تولید نیست زیرا ممکن است بعضی از متغیرهای ذکر شده متناسب با هم تغییر نیابند. طبقه‌بندی دیگر مدل‌های DEA تقسیم‌بندی آنها به مدل‌های جهت‌دار[8] و غیرجهت‌دار[9] است. مدل‌های جهت‌دار (و یا غیر جهت‌دار) بسته به متغیرهایی (نهاده‌ها، ستانده‌های مطلوب و ستانده‌های نامطلوب) که می‌خواهیم بهینه کنیم انتخاب می‌شوند. اگر هدف اصلی ارزیابی کارایی یک مجموعه معین از پارامترهای بیان شده باشد مدل‌های جهت‌گرا مناسب هستند و در صورتی

1. Zhou and *et al.*
2. Seitz
3. Undesirable Outputs
4. Radial Measures
5. Scheel
6. Inputs
7. Desirable Outputs
8. Oriented
9. Non-oriented

که هدف ارزیابی بیش از یک مجموعه باشد مدل‌های غیرجهت‌دار مناسب هستند. در کل مدل‌های غیرجهت‌دار در مطالعات زیست‌محیطی مناسب‌تر هستند زیرا همزمان هر دو ستانده مطلوب و نامطلوب را به‌کار می‌برند. به همین دلیل در سال‌های اخیر در اکثر مطالعات توجه بیشتری به مدل‌های غیرجهت‌دار شده است (کالوت و همکاران[۱]، ۲۰۱۴) یکی از اولین مطالعات در زمینه مدل‌های غیرجهت‌دار مطالعه بریک[۲] (۱۹۹۷) است که مدل هایپربولیک[۳] را که نوع خاصی از تابع فاصله جهت‌دار (DDF)[۴]است معرفی کرد. مطالعات چانگ و همکاران[۵]، ۱۹۹۷، فاره و همکاران[۶]،۲۰۰۱ و چمبرزو همکاران[۷]، ۱۹۹۶ نیز به ارزیابی تابع فاصله جهت‌دار پرداخته‌اند. تابع فاصله جهت‌دار همزمان ستانده مطلوب را افزایش و ستانده نامطلوب را کاهش می‌دهد. مشکل مدل تابع فاصله جهت‌دار در مدل چمبرز ویژگی شعاعی بودن آن است که سبب صفر بودن تمام مازادها[۸] می‌شود و مقدار کارایی را بیشتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد (فوکویوما و وبر[۹]، ۲۰۱۰). همچنین مشکل دیگر مدل‌های DDF اختیاری بودن بردارهای جهت تخصیص داده شده به آنها است که سبب اریب شدن[۱۰] نتایج می‌گردد. یک مدل جایگزین برای مدل‌های DDF مدل‌های مازاد مبنا[۱۱] (SBM) هستند (تن[۱۲]، ۲۰۰۱). تن در سال ۲۰۰۱ برای نخستین بار مدل مازاد مبنا را پیشنهاد کرد و سپس ژو و همکاران (۲۰۰۶) با توسعه مدل وی امکان در نظر گرفتن ستانده نامطلوب در مدل را با کمینه کردن نسبت متوسط کاهش ستانده نامطلوب به متوسط افرایش ستانده مطلوب فراهم کردند. این مدل غیرشعاعی[۱۳] به‌طور کلی مانند یک شاخص ترکیبی برای ارزیابی کارایی زیست‌محیطی عمل می‌کند. اولاً در مقایسه با مدل‌های شعاعی این مدل قدرت بیشتری در مدل‌سازی عملکرد زیست‌محیطی واحدهای تصمیم‌گیرنده دارد (ژو و همکاران، ۲۰۰۶). ثانیاً در این الگوی غیرشعاعی نهاده‌ها و ستانده‌ها مجبور به تغییر متناسب جهت بهبود کارایی خود نیستند (لوزانو و گوتیرز[۱۴]، ۲۰۱۱). ثالثاً شاخص کارایی برای هر متغیر محاسبه می‌شود و

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

1. Calvet and *et al.*
2. Briec
3. Hyperbolic
4. Directional distance function
5. Chung and *et al.*
6. F*ä*re and and *et al*.
7. Chambers and *et al.*
8. Slack
9. Fukuyama and Weber
10. Biased
11. Slack based measure
12. Tone
13. Non-radial Measure
14. Lozano and Gutierrez

این مقدار برای مطالعه افزایش کارایی هر واحد تصمیم گیرنده[۱] (DMU)[۲] مفید خواهد بود (سانگ و همکاران[۳]، ۲۰۱۵). هر دو مدل SBM و DDF ماهیت مشابهی دارند زیرا هر دو(در شکل اصلی) مدل‌های غیرجهت‌دار هستند و اندازه‌گیری کارایی بر اساس مقدار اسلک‌های[۴] متغیرهای بهینه شده است اگر چه که تعریف تابع هدف در آنها متفاوت با هم است (فاره و گراسکوپف[۵]، ۲۰۱۰). ارتباط دقیق این دو مدل در مقاله فاره و گراسکوپف، ۲۰۱۰ تشریح شده است. برتری اصلی این دو مدل در قدرت تمایز بالاتر آنها نسبت به مدل‌های شعاعی است که اندازه‌گیری کارایی را با دقت بیشتری انجام می‌دهند (سویوشی و گوتی[۶]، ۲۰۱۱a) .

بنابراین با توجه به اینکه تعداد بسیاری از تحقیقات به مطالعه این دو مدل پرداخته‌اند (کالوت و همکاران، ۲۰۱۴)، ما نیز در این مطالعه به مقایسه نتایج این دو مدل در قالب سیاست‌های انرژی شرکت‌های برق منطقه‌ای می‌پردازیم. در این تحقیق برای اولین بار در بین مطالعات تجربی داخلی از دو مدل SBM و DDF در کنار هم استفاده شده است. نادیده گرفتن اسلک‌ها در مدل DDF سبب تخمین کارایی به مقداری بیش از مقدار واقعی می‌شود و در نظر گرفتن آنها باعث افزایش همبستگی بین مدل‌های SBM و DDF می‌گردد. اما در شرایطی که تعداد متغیرهای مسأله نسبت به تعداد مشاهدات زیاد باشد اسلک‌ها مقدار قابل توجهی از ناکارایی را اندازه‌گیری نمی‌کنند هر چند که این حالت در مسائل واقعی زیست‌محیطی کمتر اتفاق می‌افتد (کالوت و همکاران، ۲۰۱۴).

۳. پیشینه تجربی

۳-۱. پیشینه داخلی

آماده و رضایی (۱۳۹۰) در مطالعه خود به اندازه‌گیری کارایی زیست‌محیطی با استفاده از مدل کارایی سراسری ستاده مطلوب و نامطلوب تفکیک‌ناپذیر سراسری در بخش تولید شرکت‌های برق منطقه‌ای طی دوره زمانی ۱۳۸۸-۱۳۸۳ پرداخته‌اند. نتایج حاصل از این مطالعه حاکی از آن است که در بین شرکت‌های برق منطقه‌ای، شرکت برق منطقه‌ای آذربایجان و خراسان، هم از نظر کارایی فنی و هم از

---

۱. منظور از واحد تصمیم گیرنده، عبارتست از واحدی که با دریافت بردار ورودی$(x_1, \dots, x_m)$ ، بردار خروجی $(y_1, \dots, y_s)$ را تولید می‌کند. واحدهای تصمیم‌گیرنده می‌بایست متجانس باشند به این معنا که واحدها عمل مشابه دارند و با دریافت ورودی‌های مشابه، خروجی‌های مشابه تولید می‌کنند. مانند شعبات یک بانک، کارخانجات یک شرکت خاص یا شرکت‌های برق منطقه‌ای.

2. Decision Making Units
3. Song and *et al.*
4. Slack
5. F*ä*re and Grosskopf
6. Sueyoshi and Goto

نظر کارایی زیست‌محیطی عملکرد ضعیفی دارند. همچنین شرکت برق منطقه‌ای خوزستان برخلاف کارایی فنی بالا، از کارایی زیست‌محیطی اندکی برخوردار است.

سیفی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از توابع فاصله هایپربولیک با در نظر گرفتن ستانده‌های مطلوب و نامطلوب به‌صورت نامتقارن و رهیافت اقتصادسنجی الگوی مرز تصادفی[1] به‌صورت تابع ترانسلوگ[2] و روش حداکثر راست‌نمایی[3] کارایی زیست‌محیطی ۶ نیروگاه حرارتی تولید برق استان‌های خراسان جنوبی، رضوی و شمالی را در بازه زمانی سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۷ اندازه‌گیری کردند. محاسبات نشان داد که کارایی زیست‌محیطی نیروگاه‌ها به‌طور متوسط ۹۳/۸۱ درصد و قیمت سایه‌ای[4] هر کیلوگرم اکسید نیتروژن ۱/۱۲ ریال است.

شهیکی تاش و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از دو رویکرد تابع فاصله جهت‌دار و اندازه‌گیری کارایی مبتنی بر اسلک‌ها (SBM) به‌ترتیب به بررسی کارایی زیست‌محیطی و فنی در صنایع تولید سایر محصولات کانی غیرفلزی(کد ۲۶ طبقه‌بندی ISIC[5]) و تولید فلزات اساسی (کد ۲۷طبقه‌بندی ISIC) پرداختند. نتایج نشان داد که صنایع کد ۲۶ علی‌رغم این‌که از لحاظ فنی کارتر هستند اما از کارایی زیست‌محیطی کمتری برخوردار هستند و صنایع تولید آجر، صنایع تولید سیمان، آهک و گچ و صنعت تولید آسفالت پایین‌ترین کارایی زیست‌محیطی را دارند.

علاوه بر صنعت برق در مطالعات داخلی کارایی زیست‌محیطی در سایر حوزه‌ها همانند کشتارگاه‌ها و پرورش دام (دریجانی و همکاران، ۱۳۸۴؛ جعفرنیا و اسماعیلی، ۱۳۹۲)، صنعت تولید فلزات (شهیکی تاش و خواجه حسنی، ۱۳۹۲؛ شهیکی تاش و همکاران، ۱۳۹۳)، صنعت نفت (امامی میبدی و ایزدی، ۱۳۹۲؛ امامی میبدی و جایدری، ۱۳۹۳)، بخش کشاورزی (عجم و شهرکی، ۱۳۹۳؛ مولائی و ثانی، ۱۳۹۴)، کارخانه‌های تولیدی آلاینده (نیکبخت و همکاران، ۱۳۸۷؛ نصرالهی و همکاران، ۱۳۹۱؛ شاهکوئی و همکاران، ۱۳۹۳)، کشورهای منتخب (رضایی و همکاران، ۱۳۹۱؛ رستمی و همکاران، ۱۳۹۱؛ قاسمی و پاشازاده، ۱۳۹۳) و صنایع استانی (پارسا و همکاران، ۱۳۹۴؛ شهابی‌نژاد، ۱۳۹۴) نیز به‌کار برده شده است.

۳-۲. پیشینه خارجی

مورتی و همکاران[6] (۲۰۰۷)، به‌وسیله رویکرد تابع فاصله ستاده جهت‌دار، کارایی فنی و زیست‌محیطی نیروگاه‌های تولیدکننده برق هند را طی سال‌های ۲۰۰۴-۱۹۹۶ مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج این

1. Stochastic Frontier
2. Translog
3. Maximum Likelihood Estimation
4. Shadow Price
5. International Standard Industrial Classification of All Economic Activities
6. Murty and *et al.*

مطالعه حاکی از آن است که به‌طور میانگین، ناکارآمدی فنی و زیست‌محیطی نیروگاه‌های ایالت آندرا پرداش برابر با ۰/۰۶۱ است و این رقم نشان می‌دهد که این ایالت می‌تواند به‌طور میانگین همراه با ثبات تولید، حدود ۶ درصد آلایندگی خود را کاهش دهد.

فوکویاما و وبر (۲۰۰۹) با رد مدل‌های شعاعی به‌دلیل نادیده گرفتن اسلک‌ها در اندازه‌گیری کارایی، مدل مازاد مبنا جهت‌دار را معرفی کردند. آنها در یک کاربرد تجربی به ارزیابی کارایی خدمات مالی ارائه شده از بانک‌های ژاپن در بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۵ پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که کارایی به‌طور آهسته در حال افزایش است بنابراین آنها به این جمع‌بندی رسیدند که در نظر گرفتن اسلک‌ها باعث تشخیص بهتر ناکارایی موجود در مدل می‌شود اما اکثراً در توابع فاصله جهت‌دار این امر در نظر گرفته نمی‌شود.

مندل و مدهسوارن[1] (۲۰۱۰) مبادرت به ارزیابی کارایی زیست‌محیطی صنایع سیمان استان‌های هند در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵ و با استفاده از تابع فاصله جهت‌دار کردند. آنان سه مدل BCC[2] و تابع فاصله جهت‌دار در دو حالت کارایی قوی و ضعیف را برآورد نمودند. در مدل BCC کربن دی اکسید در نقش نهاده و در دو مدل تابع فاصله جهت‌دار به‌عنوان ستانده نامطلوب و محصول جانبی ستانده مطلوب در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که در هر استان امکان بهبود کارایی وجود دارد و در صورت وضع قوانین زیست‌محیطی همزمان امکان افزایش ستانده مطلوب و کاهش ستانده نامطلوب در سطح معینی از نهاده‌ها وجود دارد اما هزینه‌بر بودن آن مانعی برای تأثیرگذاری زیاد آن است.

ژو و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از رویکرد تابع فاصله جهت‌دار غیرشعاعی و داده‌های ۱۰۰ کشور جهان، به مدل‌سازی کارایی زیست‌محیطی انتشار دی‌اکسیدکربن در تولید برق پرداخته‌اند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، کارایی زیست‌محیطی انتشار کربن در کشورهای عضو سازمان همکاری‌های اقتصادی و توسعه[3] (OECD) بیشتر از کشورهای غیر عضو است.

ژو و همکاران (۲۰۱۳) برای ارزیابی کارایی زیست‌محیطی صنایع برق استان‌های چین در بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۰ از یک رهیافت غیرشعاعی SBM وزنی استفاده نمودند. ستانده نامطلوب در مطالعه آنان CO_2، SO_2 و NO_X است. نتایج حاکی از تفاوت معنادار کارایی زیست‌محیطی بین استان‌ها و روند افزایشی مقدار کارایی در تمام آنها است. همچنین آن‌ها با استفاده از رگرسیون توبیت[4] اثر چند متغیر را بر کارایی تخمین زدند که اصلاحات انجام شده و نسبت برق تولیدی نیروگاه‌های سوخت

1. Mandal and Madheswaran

۲. مدل BCC بر گرفته از حروف اول نام‌های Banker، Charnes وCooper است که در سال ۱۹۸۴ آن را معرفی نمودند.

3. Organization for Economic Co-operation and Development

4. Tobit Regression

زغال‌سنگ و ظرفیت تولید اثر مثبت و معنادار و هدر رفت مالیات و سرمایه‌گذاری بر صنایع آلاینده اثر منفی بر کارایی زیست‌محیطی دارد.

بی و همکاران[1] (۲۰۱۴) ابتدا با استفاده از روش SBM کارایی فنی و زیست‌محیطی نیروگاه‌های حرارتی چین را بین سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۹ اندازه‌گیری نمودند سپس اثر مقررات زیست‌محیطی را بر مقدار کارایی به‌دست‌آمده برآورد نمودند. در این مطالعه انتشار SO_2 ، NO_X و دوده به‌عنوان ستانده نامطلوب در نظر گرفته‌شده است. نتایج بیانگر معنادار بودن اثرات زیست‌محیطی بر کارایی و همچنین تأثیر مقررات زیست‌محیطی بر مقدار کارایی به‌دست‌آمده است که لزوم دخالت دولت و پیش‌بینی سیاست‌های منطقه‌ای را برای کاهش ناکارایی می‌رساند.

کالوت و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی ارزیابی کارایی زیست‌محیطی صنایع برق کشورهای اتحادیه اروپا در بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷ و با استفاده از دو مدل SBM (غیرشعاعی) و تابع فاصله جهت‌دار (شعاعی) پرداختند. آن‌ها با توسعه مدل DDF و استفاده از مازادها یک مدل غیرشعاعی معرفی کردند و در نهایت به مقایسه مدل‌های SBM و DDF در دو حالت مرز جداگانه و مشترک پرداختند. نتایج حاکی از تفاوت معنادار بین کارایی هر کشور بود به‌نحوی‌که کشورهای جدیداً توسعه‌یافته و تازه وارد به اتحادیه اروپا کمترین کارایی را داشتند.

همان‌طور که ملاحظه گردید در اکثر مطالعات کارایی زیست‌محیطی اعم از داخلی و خارجی مجموعه امکان تولید به سه نوع متغیر نهاده، ستانده مطلوب و ستانده نامطلوب تقسیم‌بندی شده است. در این مطالعه با توجه به نقش پررنگ‌تر نهاده انرژی نسبت به سایر نهاده‌ها در انتشار آلاینده‌ها و آلودگی هوا، علاوه بر ستانده‌ها که مانند سایر مطالعات به دو دسته مطلوب و نامطلوب تقسیم می‌شوند، نهاده‌ها نیز به دو دسته انرژی و غیرانرژی تقسیم‌بندی شده‌اند و اولویت با به حداقل رساندن نهاده انرژی است که سبب انتشار آلاینده‌ها می‌شود. علاوه بر این مطالعاتی که در کشور برای ارزیابی بهره‌وری در یک بازه زمانی (بلندمدت) انجام شده‌اند از شاخص مالم کوئیست[2] و یا تحلیل پنجره‌ای[3] بهره گرفته‌اند اما در این مطالعه با معرفی نوع جدیدی از مرز کارایی امکان ارزیابی کارایی و همچنین سنجش تغییرات تکنولوژی واحدهای تصمیم‌گیرنده در طی چند سال فراهم آمده است. مدل تابع فاصله جهت‌داری که در ارزیابی صنایع و حوزه‌های مختلف کشور مورد استفاده قرار گرفته است به‌صورت شعاعی و بدون نظر گفتن مازادها است. در این مطالعه ضمن نشان دادن اریب‌دار شدن نمرات کارایی به‌دلیل نادیده گرفتن مازادها، برای اولین بار (بنا به دانش محققان) با ترکیب مازادها و تابع فاصله جهت‌دار ضمن بهره‌گیری از خواص

1. Bi and *et al.*
2. Malmquist Index (MI)
3. Window Analysis

مدل‌های SBM و DDF در کنار هم از یک مدل غیرشعاعی که تناسب بیشتری با داده‌های دنیای واقعی دارد بهره گرفته شده است.

۴. روش تحقیق

ادبیات DEA بر مبنای نظریه تولید است و ایده اصلی آن مقایسه واحدهای مختلف تحت تکنولوژی یکسان است. مجموعه امکان تولید[1](T) مجموعه‌ای است که نهاده‌ها $x \in \mathbb{R}_{+}^{m}$ را به ستانده‌های مطلوب $g \in \mathbb{R}_{+}^{s}$ و ستانده‌های نامطلوب $b \in \mathbb{R}_{+}^{h}$ تبدیل می‌کند:

$S = \{(x, g, b)\}$ → x می‌تواند $\{g, b\}$ را تولید کند

در این تحقیق متغیرها شامل نهاده‌ها (انرژی و غیرانرژی) و ستانده‌ها (مطلوب و نامطلوب) برای n واحد تصمیم‌گیرنده است.

$Z = \{x_j , e_j , q_j , b_j\}$, j=1, … , n

که $x_j = (x_{1j} , x_{2j} , \dots , x_{mj})' \in \mathbb{R}_{+}^{m}$، $e_j = (e_{1j} , e_{2j} , \dots , e_{pj})' \in \mathbb{R}_{+}^{p}$ $g_j = (g_{1j} , g_{2j} , \dots , g_{sj})' \in \mathbb{R}_{+}^{s}$ و $b_j = (b_{1j} , b_{2j} , \dots , b_{hj})' \in \mathbb{R}_{+}^{h}$ به‌ترتیب نهاده‌های غیرانرژی، نهاده‌های انرژی، ستانده‌های مطلوب و ستانده‌های نامطلوب متناظر با شرکت j هستند. فرض می‌کنیم که مقادیر کارایی بین صفر تا یک است و تکنولوژی تحت بازده ثابت به مقیاس[2] (CRS) است[3]. آزمون یک شرکت برق منطقه‌ای زمانی کاراست که در حضور ستانده نامطلوب هیچ بردار $(x , e , g , b) \in \hat{S}$ وجود نداشته باشد به‌طوری‌که $x_{ik} \geq x$ ، $e_{qk} \geq e$ ، $g_{rk} \leq g$ و $b_{fk} \geq b$ و حداقل یکی از نامساوی‌ها به‌طور اکید باشد. اینک به معرفی دو مدل مورد استفاده در تحقیق (SBM و DDF) برگرفته از مطالعه (کالوت و همکاران، ۲۰۱۴) می‌پردازیم.

۴-۱. مدل SBM

در مدل SBM برای محاسبه مقدار کارایی هر DMU و با در نظر گرفتن ستانده نامطلوب از مدل برنامه‌ریزی کسری (معادله ۱) که یک مدل بی‌ماهیت[4] است، استفاده می‌شود. با توجه به هدف مورد

1. Production Possibility set (PPS)
2. Constant Return to scale

۳. علت انتخاب بازدهی ثابت، کاربرد آن در مطالعات تجربی کارایی در بخش تولید برق کشور است (همانند مطالعات آماده و رضایی، ۱۳۹۰؛ متفکر آزاد و همکاران، ۱۳۹۳). علاوه‌بر این با توجه به این که متغیرهای مازاد قید ستانده مطلوب (تولید برق) در کلیه سال‌ها برای تمام شرکت‌ها صفر است صنعت برق در مقیاس بهینه تولید قرار دارد و امکان مقایسه تمام شرکت ها با هم فراهم است. همچنین برای حصول اطمینان بیشتر در این مطالعه، از آزمون پیشنهادی سیمر و ویلسون (۲۰۰۲) برای انتخاب بازدهی ثابت یا متغیر به مقیاس استفاده شد. فرضیه صفر این آزمون بیانگر بازدهی ثابت به مقیاس بوده و هر چه آماره آزمون برآوردی به یک نزدیک‌تر باشد نشانگر مناسب بودن بازدهی ثابت به مقیاس است. نتایج این آزمون در هر سال به تفکیک و کل بازه زمانی تحقیق مقدار آماره مورد بررسی بالاتر از ۰/۹۰ و نزدیک به یک برآورد شد بنابراین فرضیه بازدهی ثابت به مقیاس در بخش تولید برق را نمی‌توان رد کرد.

4. Non-oriented

نظر و سیاست مربوطه که در واقع با استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی خطی همزمان در پی کمینه کردن نهاده‌ها و بیشینه کردن ستانده‌ها هستیم از یک مدل بی‌ماهیت استفاده می‌کنیم. بی‌ماهیت بودن تابع هدف تضمینی برای در نظر گرفتن همزمان اسلک‌های هر دو ماهیت نهاده محور و ستانده محور است زیرا در بسیاری از صنایع هر دو هدف دنبال می‌شود (آوکیران و مک کریستال[1]، ۲۰۱۲).

$$\rho\ (x_k,e_k,g_k,b_k)= \text{Min}\left\{\frac{1-\frac{1}{p}\sum_{q=1}^{p}\frac{u_q}{e_{qk}}}{1+\frac{1}{s+h}\left(\sum_{r=1}^{s}\frac{u_r}{g_{rk}}+\sum_{f=1}^{h}\frac{u_f}{b_{fk}}\right)}\right\}$$

$$\begin{aligned}
&\text{s.t. } x_{ik} = \sum_{j=1}^{n} x_{ij}\,\lambda_j + u_i \quad (i=1, \dots ,m),\\
&\quad e_{qk} = \sum_{j=1}^{n} e_{qj}\,\lambda_j + u_q \quad (q=1, \dots ,p),\\
&\quad g_{rk} = \sum_{j=1}^{n} g_{rj}\,\lambda_j - u_r \quad (r=1, \dots ,s),\\
&\quad b_{fk} = \sum_{j=1}^{n} b_{fj}\,\lambda_j + u_f \quad (f=1, \dots ,h),\\
&\quad \lambda_j \geq 0\ (j=1, \dots,n)\ ,\ u_i \geq 0\ ,\ u_q \geq 0\ ,\ u_r \geq 0\ ,\ u_f \geq 0
\end{aligned} \qquad (۱)$$

بردارهای u_i ، u_q ، u_r و u_f متغیرهای کمکی هستند که به‌ترتیب نشان‌دهنده نهاده غیرانرژی اضافی، نهاده انرژی اضافی، کمبود ستانده مطلوب و مقدار ستانده نامطلوب اضافی هستند. $\rho(x_k,e_k,g_k,b_k)$نشان‌دهنده مقدار کارایی و بین صفر تا یک است و در صورتی یک DMU کارا است اگر و فقط اگر $\rho(x_k,e_k,g_k,b_k)$ برابر با یک باشد. در این حالت کل متغیرهای کمکی برابر با صفر هستند. اگر یک DMU کارا نباشد می‌تواند با استفاده از استراتژی‌هایی از قبیل کاهش مازاد نهاده انرژی، افزایش ستانده مطلوب و کاهش مقدار اضافی ستانده نامطلوب و یا ترکیبی از آنها کارایی خود را بهبود بخشد. در حالتی که یک DMU ناکارا است هدف انتقال به مقادیر ذیل به‌منظور دستیابی به کارایی موردنظر است:

$$\begin{aligned}
\hat{x}_{ik} &= x_{ik} - u_i^*\\
\hat{e}_{qk} &= e_{qk} - u_q^*\\
\hat{g}_{rk} &= g_{rk} + u_r^*\\
\hat{b}_{fk} &= b_{fk} - u_f^*
\end{aligned}$$

مدل (۱) یک مدل غیرخطی است. با استفاده از تبدیل چارنز و کوپر[2] (۱۹۶۲) آن را با مدل خطی ذیل جایگزین می‌کنیم:

$$\tau\ (x_k,e_k,g_k,b_k)= \text{Min}\left\{t - \frac{1}{p}\sum_{q=1}^{p}\frac{U_q}{e_{qk}}\right\}$$

$$\text{s.t. } 1 = t + \frac{1}{s+h}\left(\sum_{r=1}^{s}\frac{U_r}{g_{rk}} + \sum_{f=1}^{h}\frac{U_f}{b_{fk}}\right)$$

1. Avkiran and McCrystal
2. Charnes and Cooper

$$x_{ik}t = \sum_{j=1}^{n} x_{ij}\,\Lambda_j + U_i \quad (i=1, \ldots, m),$$
$$e_{qk}t = \sum_{j=1}^{n} e_{qj}\,\Lambda_j + U_q \quad (q=1, \ldots, p),$$
$$g_{rk}t = \sum_{j=1}^{n} g_{rj}\,\Lambda_j - U_r \quad (r=1, \ldots, s),$$
$$b_{fk}t = \sum_{j=1}^{n} b_{fj}\,\Lambda_j + U_f \quad (f=1, \ldots, h),$$

$$\Lambda_j \geq 0 \ (j=1, \ldots, n) \ , \ U_i \geq 0 \ , U_q \geq 0 \ , U_r \geq 0 \ , U_f \geq 0 \ , t > 0 \qquad (۲)$$

با فرض این‌که جواب بهینه مدل (۲) برابر با (Λ^*، U_i^*، U_q^*، U_r^*، U_f^*، t^*) باشد جواب مدل (۱) برابر خواهد بود با:

$$\rho^* = \tau^* \ , \lambda = \Lambda^*/t^* \ , u_i^* = U_i^*/t^* \ , u_q^* = U_q^*/t^* \ , u_r^* = U_r^*/t^* \ , u_f^* = U_f^*/t^* \qquad (۳)$$

بر طبق اصول مطلوبیت فاره و لاول[1] (۲۰۰۵) این مدل سه اصل را برآورده می‌کند: ۱- شاخص کارایی[2] ۲- پایداری نسبت به واحدها[3] ۳- یکنواختی ضعیف[4]. پایداری نسبت به واحد به این معناست که اندازه‌گیری کارایی مستقل از واحدهای نهاده‌ها و ستانده‌ها باشد. تفاوت مدل‌های (۱) و (۲) با مدل کالوت و همکاران در تفکیک‌پذیری نهاده به دو گروه انرژی و غیرانرژی است.

۴-۲. تابع فاصله جهت‌دار

تابع فاصله جهت‌دار (DDF) یک شاخص ناکارایی است که مقدار انقباض ممکن نهاده‌ها و ستانده‌های نامطلوب و انبساط ستانده‌های مطلوب را در جهت انتخاب‌شده اندازه‌گیری می‌کند. این مدل هنگامی پرکاربرد است که ستانده‌های نامطلوب به دلیل انعطاف‌پذیری در انتخاب بردار جهت به مدل اضافه می‌شوند. از تابع فاصله جهت‌دار که برای اولین بار توسط چمبرز (۱۹۹۶) معرفی شد، استفاده می‌کنیم:

$$\begin{aligned}
&\vec{D}(x_k, e_k, g_k, b_k; \xi_e, \xi_g, \xi_b) = \text{Max } \beta \\
&\text{s.t. } \sum_{j=1}^{n} x_{ij}\,\lambda_j \leq x_{ik} \quad (i=1, \ldots, m), \\
&\sum_{j=1}^{n} e_{qj}\,\lambda_j \leq e_{qk} - \beta\xi_e \quad (q=1, \ldots, p), \\
&\sum_{j=1}^{n} g_{rj}\,\lambda_j \geq g_{rk} + \beta\xi_g \quad (r=1, \ldots, s), \\
&\sum_{j=1}^{n} b_{fj}\,\lambda_j \leq b_{fk} - \beta\xi_b \quad (f=1, \ldots, h), \\
&\lambda_j \geq 0 \ (j=1, \ldots, n)
\end{aligned} \qquad (۴)$$

مدل(۴) یک مدل شعاعی بوده که مقدار کارایی برابر با β^* و بازدهی ثابت به مقیاس است. در واقع مدل (۴) فرم گسترش‌یافته مدل CCR [5] است. تفاوت این مدل با مدل چمبرز در نظر گرفتن ستانده

1. Fare and Lovell
2. Indication of efficiency
3. Unit invariant
4. Weak monotonicity

۵. مدل CCR برگرفته از حروف اول نام‌های Charnes، Cooper و Rhodes است که در سال ۱۹۷۸ آن را معرفی نمودند.

نامطلوب است (کالوت و همکاران، ۲۰۱۴). همان‌طور که در بخش دوم اشاره شد مدل (۴) دو مشکل عمده دارد. یکی از آنها ناتوانی این مدل در تعیین سطح کارایی واحد (فنی و زیست‌محیطی) و دیگری مشکل در تعیین بهترین بردار جهت در راستای بیشینه کردن تابع فاصله جهت‌دار است. علاوه‌بر این مدل (۴) یک مدل غیرخطی است. چانگ و همکاران (۱۹۹۷) با جایگزینی یک بردار مشاهده‌شده از نهاده‌های انرژی و ستانده‌های مطلوب و نامطلوب به‌جای بردارهای جهت مدل (۴) مدل شعاعی (۵) را استفاده نمود. فرم ریاضی مدل (۵) به قرار زیر است:

$$
\begin{aligned}
&\vec{D}(x_k,e_k,g_k,b_k;e_k,g_k,b_k)= \text{Max } \beta \\
&\text{s.t. } \textstyle\sum_{j=1}^{n} x_{ij}\,\lambda_j \le x_{ik} \qquad (i=1, \dots ,m),\\
&\textstyle\sum_{j=1}^{n} e_{qj}\,\lambda_j \le e_{qk} - \beta e_{qk} \quad (q=1, \dots ,p),\\
&\textstyle\sum_{j=1}^{n} g_{rj}\,\lambda_j \ge g_{rk} + \beta g_{rk} \quad (r=1, \dots ,s),\\
&\textstyle\sum_{j=1}^{n} b_{fj}\,\lambda_j \le b_{fk} - \beta b_{fk} \quad (f=1, \dots ,h),\\
&\lambda_j \ge 0 \ (j=1, \dots ,n)
\end{aligned}
\qquad (۵)
$$

مدل (۵) با بیشینه کردن مقدار تابع هدف (β^*)، که متغیر آزاد محسوب می‌شود، مقدار ناکارایی را اندازه‌گیری می‌کند. در مدل (۵) یک بنگاه در شرایطی کاملاً کاراست که تمام متغیرهای کمکی برابر با صفر باشند (سویوشی و گوتی ، ۲۰۱۱a). مزیت مدل (۵) نسبت به مدل (۴) خطی بودن آن است که عملکرد بهتری دارد. همچنین هر دو مدل (۴) و (۵) یک جهت را در نظر می‌گیرند در حالی‌که احتمال وجود جهت‌های دیگر به‌خصوص در مسائل زیست‌محیطی هست.

در مدل تابع فاصله جهت‌دار در حالت شعاعی (مدل‌های (۴) و (۵)) احتمال حضور مازادهای غیرشعاعی هست. برای رسیدن به کارایی جامع‌تر حضور آنها را در مدل بررسی می‌کنیم. بنابراین پس از اندازه‌گیری مقدار β^* در مدل‌های (۴) و (۵)، در گام دوم مدل را با در نظر گرفتن این مازادها تحلیل می‌کنیم. در مدل (۶) ابتدا مقدار بهینه مدل (۴) یعنی β^* را به‌دست آورده و سپس برای تکمیل تابع هدف مجموع میانگین مازادها را بیشینه می‌کنیم. شکل ریاضی مدل (۶) به‌صورت ذیل است:

$$
\begin{aligned}
&\vec{S}(x_k,e_k,g_k,b_k;e_k,g_k,b_k) = \text{Max } \delta = \text{Max}\left[\beta^* + \frac{1}{p+s+h}\left(\sum_{q=1}^{p}\frac{S_q}{\xi_e} + \sum_{r=1}^{s}\frac{S_r}{\xi_g} + \sum_{f=1}^{h}\frac{S_f}{\xi_b}\right)\right]\\
&\text{s.t. } \textstyle\sum_{j=1}^{n} x_{ij}\,\lambda_j + S_i = x_{ik} \qquad (i=1, \dots ,m),\\
&\textstyle\sum_{j=1}^{n} e_{qj}\,\lambda_j + S_q = e_{qk} - \beta^*\xi_e \quad (q=1, \dots ,p),\\
&\textstyle\sum_{j=1}^{n} g_{rj}\,\lambda_j - S_r = g_{rk} + \beta^*\xi_g \quad (r=1, \dots ,s),\\
&\textstyle\sum_{j=1}^{n} b_{fj}\,\lambda_j + S_f = b_{fk} - \beta^*\xi_b \quad (f=1, \dots ,h),\\
&\lambda_j \ge 0 \ (j=1, \dots ,n) \ , \ S_i \ge 0 \ , \ S_q \ge 0 \ , \ S_r \ge 0 \ , \ S_f \ge 0
\end{aligned}
\qquad (۶)
$$

در صورتی‌که مجدداً بردارهای جهت ξ_e ، ξ_g و ξ_b را برابر با بردارهای مشاهده شده از نهاده‌های انرژی، ستانده‌های مطلوب و نامطلوب در نظر بگیریم مدل (۶) به مدل (۷) تبدیل خواهد شد.

$$\vec{S}(x_k,e_k,g_k,b_k;e_k,g_k,b_k) = \text{Max } \delta = \text{Max}\left[\beta^* + \frac{1}{p+s+h}\left(\sum_{q=1}^{p}\frac{S_q}{e_{qk}} + \sum_{r=1}^{s}\frac{S_r}{g_{rk}} + \sum_{f=1}^{h}\frac{S_f}{b_{fk}}\right)\right]$$

$$\begin{aligned}
&\text{s.t. } \sum_{j=1}^{n} x_{ij}\,\lambda_j + S_i = x_{ik} && \text{(i=1, . . . ,m)},\\
&\sum_{j=1}^{n} e_{qj}\,\lambda_j + S_q = e_{qk}(1-\beta^*) && \text{(q=1, . . . ,p)},\\
&\sum_{j=1}^{n} g_{rj}\,\lambda_j - S_r = g_{rk}(1+\beta^*) && \text{(r=1, . . .,s)},\\
&\sum_{j=1}^{n} b_{fj}\,\lambda_j + S_f = b_{fk}(1-\beta^*) && \text{(f=1, . . .,h)},\\
&\lambda_j \geq 0 \text{ (j=1, . . .,n)} \ , \ S_i \geq 0 \ , S_q \geq 0 \ , S_r \geq 0 \ , S_f \geq 0
\end{aligned} \qquad (۷)$$

مزیت استفاده از نسبت مازادها به‌جای مقدار مطلق آنها، حفظ اصل پایداری نسبت به واحد مدل است (کالوت و همکاران، ۲۰۱۴). برطبق اصول پایه‌ای اندازه‌گیری ناکارایی گام اول مدل (۷) اصول «یکنواختی ضعیف»، «پایداری نسبت به واحد» و «پیوستگی تکنولوژی و بردار تولید»[1] را برآورده می‌کند. با افزودن گام دوم ویژگی چهارم یعنی شاخص کارایی نیز برآورده می‌شود. برای اندازه‌گیری مقدار عددی استانداردشده کارایی زیست‌محیطی در تابع فاصله جهت‌دار از رابطه (۸) استفاده می‌گردد (شهیکی تاش و همکاران، ۱۳۹۴):

$$\varphi^* = \frac{1}{1+\delta^*} \qquad (۸)$$

در رابطه (۸) δ^* ناکارایی به‌دست‌آمده از مدل (۶)–(۷) و φ^* مقدار کارایی استانداردشده است. مقادیر بهینه با توجه به قیود مدل (۷) به‌صورت ذیل هستند:

$$\begin{aligned}
x_{ik}^* &= x_{ik} - S_i\\
e_{qk}^* &= e_{qk} - \beta^* e_{qk} - S_q\\
g_{rk}^* &= g_{rk} + \beta^* g_{rk} + S_r\\
b_{fk}^* &= b_{fk} - \beta^* b_{fk} - S_f
\end{aligned} \qquad (۹)$$

با استفاده از چهار هدف بیان‌شده فوق مقدار ناکارایی برای هر متغیر با توجه به مقدار کمکی مربوط به آن به این صورت اندازه‌گیری می‌شود:

$$\begin{aligned}
&\text{نهاده انرژی}: \frac{e_{qk}-e_{qk}^*}{e_{qk}} = \frac{\beta^* e_{qk}+S_q}{e_{qk}} = \beta^* + \frac{S_q}{e_{qk}}\\
&\text{ستانده مطلوب}: \frac{g_{rk}^*-g_{rk}}{g_{rk}} = \frac{\beta^* g_{rk}+S_r}{g_{rk}} = \beta^* + \frac{S_r}{g_{rk}}
\end{aligned} \qquad (۱۰)$$

1. Continuity in production vector and technologies

ستانده نامطلوب : $\frac{b_{fk}-b_{fk}^{*}}{b_{fk}}=\frac{\beta^{*}b_{fk}+S_f}{b_{fk}}=\beta^{*}+\frac{S_f}{b_{fk}}$

بر اساس ناکارایی‌های هر متغیر که در رابطه (۱۰) بدان اشاره شد، میانگین آنها طبق رابطه (۱۱) به‌دست می‌آید:

$$\begin{aligned}\delta^{*}&=\frac{1}{p+s+h}\left[\sum_{q=1}^{p}\frac{\beta^{*}e_{qk}+S_q}{e_{qk}}+\sum_{r=1}^{s}\frac{\beta^{*}g_{rk}+S_r}{g_{rk}}+\sum_{f=1}^{h}\frac{\beta^{*}b_{fk}+S_f}{b_{fk}}\right]\\&=\frac{1}{p+s+h}\left[\sum_{q=1}^{p}\left[\beta^{*}+\frac{S_q}{e_{qk}}\right]+\sum_{r=1}^{s}\left[\beta^{*}+\frac{S_r}{g_{rk}}\right]+\sum_{f=1}^{h}\left[\beta^{*}+\frac{S_f}{b_{fk}}\right]\right]\\&=\frac{1}{p+s+h}\left[p\beta^{*}+s\beta^{*}+h\beta^{*}+\sum_{q=1}^{p}\frac{S_q}{e_{qk}}+\sum_{r=1}^{s}\frac{S_r}{g_{rk}}+\sum_{f=1}^{h}\frac{S_f}{b_{fk}}\right]\\&=\beta^{*}+\frac{1}{p+s+h}\left[\sum_{q=1}^{p}\frac{S_q}{e_{qk}}+\sum_{r=1}^{s}\frac{S_r}{g_{rk}}+\sum_{f=1}^{h}\frac{S_f}{b_{fk}}\right]\end{aligned}\qquad(۱۱)$$

بنابراین مدل (۷) طبق رابطه (۱۱) اثبات می‌شود. در مطالعات تجربی داخلی اندازه‌گیری کارایی تاکنون به روش تابع فاصله جهت‌دار دو مرحله‌ای انجام نپذیرفته است. بنابراین به‌عنوان یک مدل غیرشعاعی برای مقایسه نتایج اندازه‌گیری‌شده مفید است.

۴-۳. ساخت مرز تولید

در ادبیات DEA سه نوع مرز برای ارزیابی کارایی داده‌های ترکیبی[1] بیان شده است. اولین و مشهورترین آنها مرز مقارن (یا همزمان)[2] است. در این حالت مرز هر سال تنها توسط داده‌های همان سال ایجاد می‌شود نوع دوم مرز ترتیبی (یا متوالی)[3] است که مرز هر سال توسط داده‌های آن سال و سال‌های قبل از آن ساخته می‌شود. نوع سوم مرز بین زمانی[4] است که مرز بر اساس تمام مشاهدات کل بازه زمانی ساخته می‌شود. در این تحقیق برای ارزیابی کارایی از دو نوع مقارن و ترتیبی استفاده می‌شود. نوع ترتیبی بیان می‌کند که مجموعه امکان تولید در هر سال تنها می‌تواند توسعه یابد و هرگونه پسرفت فنی در قالب ناکارایی جریمه می‌شود[5]. بنابر هدف این تحقیق و پیشرفت گسترده صنایع برق جهان و بهبود تکنولوژی در سال‌های اخیر مرز ترتیبی شرایط مناسبی برای تحلیل صنعت برق ارائه می‌دهد و مقایسه نتایج هر دو نوع مرز بیان شده امکان شناسایی پسرفت تکنولوژیکی[6] احتمالی که در شرکت‌های برق منطقه‌ای رخ داده را به دست می‌دهد. قیود مدل‌های (۲) و (۷) به‌ترتیب تحت مرز ترتیبی به شکل قیود (۱۲) و (۱۳) هستند.

1. Panel data
2. Contemporaneous
3. Sequential
4. Inter temporal

۵. برای کسب جزئیات بیشتر درباره انواع مختلف مرزهای DEA به تالکنز و وندن اسکات، ۱۹۹۵ رجوع کنید.

6. Technological regress

$$\begin{aligned}
&\sum_{j=1}^{n}\sum_{l=1}^{L} x_{ij}^{l}\,\Lambda_j + U_i = x_{ik}t \qquad (i=1, \dots ,m),\\
&\sum_{j=1}^{n}\sum_{l=1}^{L} e_{qj}^{l}\,\Lambda_j + U_q = e_{qk}t \qquad (q=1, \dots ,p),\\
&\sum_{j=1}^{n}\sum_{l=1}^{L} g_{rj}^{l}\,\Lambda_j - U_r = g_{rk}t \qquad (r=1, \dots ,s),\\
&\sum_{j=1}^{n}\sum_{l=1}^{L} b_{fj}^{l}\,\Lambda_j + U_f = b_{fk}t \qquad (f=1, \dots ,h),
\end{aligned} \tag{۱۲}$$

$$\begin{aligned}
&\sum_{j=1}^{n}\sum_{l=1}^{L} x_{ij}^{l}\,\lambda_j + S_i = x_{ik} \qquad (i=1, \dots ,m),\\
&\sum_{j=1}^{n}\sum_{l=1}^{L} e_{qj}^{l}\,\lambda_j + S_q = e_{qk}(1-\beta^{*}) \qquad (q=1, \dots ,p),\\
&\sum_{j=1}^{n}\sum_{l=1}^{L} g_{rj}^{l}\,\lambda_j - S_r = g_{rk}(1+\beta^{*}) \qquad (r=1, \dots ,s),\\
&\sum_{j=1}^{n}\sum_{l=1}^{L} b_{fj}^{l}\,\lambda_j + S_f = b_{fk}(1-\beta^{*}) \qquad (f=1, \dots ,h),
\end{aligned} \tag{۱۳}$$

در روابط فوق n نشان‌دهنده تعداد واحدهای تصمیم‌گیرنده و L بیانگر بازه زمانی مربوطه است.

۵. یافته‌های تحقیق

در این بخش ابتدا به معرفی داده‌ها و روش‌های گردآوری آنها و سپس به بیان نتایج به‌دست آمده در تحقیق می‌پردازیم.

۵-۱. پایگاه داده‌ها

در این تحقیق با توجه به روش تحقیق به اندازه‌گیری کارایی زیست‌محیطی شرکت‌های برق منطقه‌ای کشور از سال ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۳ پرداخته می‌شود[۱]. علت انتخاب این بازه زمانی ایجاد بازار برق در سال ۱۳۸۳ و رقابتی‌تر شدن صنعت برق در این دوران است. هر واحد تصمیم‌گیرنده (DMU) نشانگر یک شرکت برق منطقه‌ای و ۱۵ شرکت برق منطقه‌ای به‌عنوان نمونه آماری در نظر گرفته شده است[۲]. در این مطالعه، از سه نهاده و یک ستانده مطلوب و یک ستانده نامطلوب استفاده شده است، به‌طوری‌که نهاده‌ها به دو گروه انرژی و غیرانرژی تقسیم شده‌اند که نهاده انرژی سوخت مصرفی (شامل گازوئیل، گاز و نفت کوره) با واحد میلیارد کیلوکالری و نهاده‌های غیر انرژی ظرفیت نامی (به‌عنوان جایگزین متغیر سرمایه) با واحد مگاوات و نیروی انسانی با واحد نفر هستند. ستانده مطلوب تولید ناویژه برق در نیروگاه‌های شرکت‌های برق منطقه‌ای با واحد میلیون کیلووات ساعت و ستانده نامطلوب انتشار گاز دی‌اکسیدکربن ناشی از مصرف سوخت در نیروگاه‌های حرارتی است که با واحد هزار تن معرفی شده است.

نیروگاه‌های حرارتی از سوخت‌های فسیلی که اشاره شد برای تولید برق استفاده می‌کنند در واقع نیروگاه‌های حرارتی که اکثریت نیروگاه‌های کشور را شامل می‌شوند به دلیل استفاده از سوخت‌های

---

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

۲. به‌دلیل عدم دسترسی کامل به داده‌های شرکت‌های برق منطقه‌ای سمنان و زنجان این شرکت‌ها از لیست ارزیابی خارج شده‌اند.

فسیلی و تجدیدناپذیر باعث انتشار آلاینده‌های مضر مانند CO_2 می‌شوند. بنابراین تمرکز اصلی را بر نیروگاه‌های حرارتی و ارزیابی کارایی آنها قرار می‌دهیم. تمام داده‌های مورد استفاده از آمار تفصیلی صنعت برق و سایت آماری سازمان توانیر[1] استخراج شده است. میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن با استفاده از شاخص انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای بخش نیروگاهی کشور که در ترازنامه انرژی گزارش شده و بر مبنای مقدار برق تولیدی شرکت‌های برق منطقه‌ای محاسبه شده است. نمودار (۱) مقدار متوسط CO_2 منتشر شده از شرکت‌های برق منطقه‌ای را در بازه زمانی تحقیق نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود شرکت تهران بیشترین مقدار و شرکت کیش کمترین مقدار CO_2 را منتشر می‌کنند. در پایان جدول (۱) خلاصه آماره‌های متغیرهای مورد استفاده در تحقیق را در بازه زمانی موردنظر نشان می‌دهد.

نمودار ۱: مقدار متوسط CO_2 منتشرشده از شرکت‌های برق منطقه‌ای

۵-۲. تحلیل نتایج

همان‌طور که در بخش روش تحقیق بیان شد در این تحقیق از دو مدل SBM و DDF برای ارزیابی کارایی شرکت‌های برق منطقه‌ای استفاده می‌شود. همچنین برای نشان دادن تغییرات تکنولوژی از دو مرز مرجع در ادبیات DEA یعنی مقارن و ترتیبی بهره گرفته می‌شود. نتایج مدل‌های SBM و DDF در جداول ۲ و ۳ گزارش شده‌اند. جدول ۲ مقادیر کارایی مرز مقارن و جدول ۳ مقادیر کارایی مرز ترتیبی را برای دو مدل نشان می‌دهند و نمودارهای ۲ و ۳ نشان‌دهنده‌ی نمای گرافیکی جدول‌های مربوطه هستند. در نمودارهای ۲ و ۳ روند کارایی شرکت‌های برق منطقه‌ای و تفاوت بین دو مرز مقارن و ترتیبی در هر سال نشان داده شده است. در هر دو شکل دایره‌های توپر نشان‌دهنده مرز مقارن و دایره‌های تو خالی نشان‌دهنده مرز ترتیبی هستند. به‌دلیل اینکه مرز مقارن در توی[2] مرز ترتیبی قرار گرفته، مقدار کارایی به‌دست آمده از مدل SBM مرز ترتیبی همیشه کوچک‌تر مساوی مقدار متناظر آن در مرز مقارن

1. http://amar.tavanir.org.ir
2. Nested

است و در مدل‌های DDF که مقدار ناکارایی اندازه‌گیری می‌شود دقیقاً عکس این موضوع صادق است (کالوت و همکاران، ۲۰۱۴).

بر طبق نمرات جداول (۲) و (۳) مقادیر کارایی به‌دست آمده از مدل SBM (رابطه ۲) از مقادیر استاندارد شده مدل DDF (رابطه ۶) کمتر بوده و به‌عبارتی مدل SBM ناکارایی را بیشتر تخمین زده است (به‌طور مثال میانگین نمرات کارایی در سال ۱۳۹۳ در مدل SBM تحت مرز ترتیبی برابر با ۰/۶۳۲ و میانگین کارایی استاندارد شده حاصل از مدل DDF تحت مرز ترتیبی در سال مشابه برابر با $\frac{1}{1+0/189}$ = ۰/۸۴۱ است). کلیه شرکت‌های کارا در مدل SBM در مدل DDF نیز کارا بوده و در مورد شرکت‌های ناکارا نیز رفتار مشابهی در هر دو مدل مشاهده می‌گردد. همچنین روند کارایی در کلیه شرکت‌ها در دو مدل یکسان است. این نتایج منطبق با نتایج فوکویوما و وبر (۲۰۰۹)، فاره و گراسکوپف (۲۰۱۰) و کالوت و همکاران (۲۰۱۴) است که رفتار دو مدل SBM وDDF با لحاظ مازادها را مشابه هم توصیف نمودند.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

جدول ۱: خلاصه آماره نهاده‌ها و ستانده‌های شرکت‌های برق منطقه‌ای در بازه زمانی۱۳۸۳-۱۳۹۳

متغیرها	نوع متغیر (واحد اندازه‌گیری)	آمار توصیفی	۸۳	۸۴	۸۵	۸۶	۸۷	۸۸	۸۹	۹۰	۹۱	۹۲	۹۳
نهاده غیرانرژی	ظرفیت نصب شده (مگاوات)	میانگین	1627/05	1566/33	2784/13	2749/80	2727/80	2631/87	2549/67	2426/40	2293/53	2137/67	2080/67
		میانه	1476/8	1452	2360	2360	2360	2360	2360	2360	2195	2035	2035
		انحراف از معیار	915/25	868/00	2143/97	2077/02	2085/92	2059/21	1959/45	1967/66	1951/91	1768/83	1720/05
		جمع کل	24405/۷۳	23495	41762	41247	40917	39478	38245	36396	34403	32065	31210
	نیروی کار (نفر)	میانگین	1135/00	1132/60	1079/93	1119/33	619/00	672/60	709/53	752/80	790/73	798/07	834/07
		میانه	1015	1016	951	969	613	626	647	657	679	717	756
		انحراف از معیار	623/66	625/92	632/86	687/37	365/67	411/06	413/90	449/09	474/56	444/16	460/24
		جمع کل	17025	16989	16199	16790	9285	10089	10643	11292	11861	11971	12511
نهاده انرژی	سوخت مصرفی (میلیارد کیلوکالری)	میانگین	16180/45	16932/81	30161/90	29562/84	29689/25	29202/99	29391/56	27224/61	26200/84	24680/75	23417/09
		میانه	11388/15	16472/32	26419/25	29246/06	28768/47	29961/42	29847/70	28119/02	27280/95	24480/03	21263/28
		انحراف از معیار	11104/73	9496/37	21245/88	19692/04	21702/41	20981/35	21635/45	20545/34	20121/35	19301/96	17159/78
		جمع کل	242706/7	253992/2	452428/5	443442/5	445338/6	438044/8	440873/4	408369/0	393012/6	370211/2	351256/3
ستانده مطلوب	تولید برق (میلیون کیلووات ساعت)	میانگین	6737/93	7183/07	13379/07	12987/40	12973/47	12541/20	12515/67	11460/20	10885/81	10333/13	9956/64
		میانه	5106	6569	11932	12994	12746	11951	12763	12741	12013	10566	9200/65
		انحراف از معیار	4793/15	4247/53	9729/32	8957/96	9663/31	8856/53	8947/13	8638/28	8343/53	8181/19	7500/26
		جمع کل	101069	107746	200686	194811	194602	188118	187735	171903	163287/2۰	154997	149349/57
ستانده نامطلوب	انتشار کربن دی‌اکسید (هزار تن)	میانگین	5613/36	5743/00	9508/53	9154/78	8750/42	8591/11	8628/14	7378/86	7347/32	6385/87	6044/56
		میانه	4473/30	4618/91	9898/45	9928/00	9172/02	9441/89	9923/25	7941/38	7570/61	7117/34	5250/68
		انحراف از معیار	4093/90	3492/37	6299/36	5868/93	5976/19	5720/48	6205/13	5596/29	5516/47	4834/42	4342/96
		جمع کل	84200/43	86145/04	142627/94	137321/69	131256/29	128866/58	129422/16	110682/83	110209/77	95788/10	90668/42

منبع: یافته‌های تحقیق

با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده در جداول ۲ و۳ به محاسبه همبستگی بین مدل SBM وDDF می‌پردازیم. تحت مرز مقارن همبستگی بین این دو مدل برابر با مقدار بالای ۰/۹۷- و تحت مرز ترتیبی مقدار همبستگی برابر با ۰/۹۸- است[۱]. اما همبستگی بین مدل مازاد مبنا و حالت شعاعی مدل تابع فاصله جهت‌دار یعنی مدل (۵) کمتر و برابر با ۰/۹۴- است. در نتیجه همان‌طور که در ادبیات نظری اشاره شد مدل SBM حالت خاصی از مدل DDF غیرشعاعی است و همبستگی بالای این دو مدل تأییدی بر این ادعا است. بر طبق جداول ۲ و ۳ به‌طور متوسط در بازه زمانی ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۳ شرکت‌های برق منطقه‌ای اصفهان، کرمان و گیلان بالاترین کارایی و شرکت‌های سیستان و بلوچستان و کیش کمترین کارایی‌ها را داشته‌اند.

همچنین بر اساس نمودارهای ۲ و ۳ شرکت‌های آذربایجان، اصفهان، خوزستان و مازندران بیشترین تفاوت در مقادیر کارایی اندازه‌گیری شده از دو مرز مقارن و ترتیبی را دارند. این نتیجه حاکی از آن است که این شرکت‌ها در سال‌های اخیر از پسرفت تکنولوژی تأثیر پذیرفته‌اند. نمودار ۴ مقدار متوسط کارایی صنعت برق کشور را در بین سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۳ نشان می‌دهد. نمودار شامل سه مرحله است در مرحله اول از سال ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۶ تفاوت بین مرزهای مقارن و ترتیبی افزایش‌یافته و سپس در سال ۱۳۸۶ این تفاوت کاهش‌یافته تا این‌که در سال ۱۳۸۹ به کمترین مقدار ممکن رسیده است و پسرفت تکنولوژی تقریباً نزدیک به صفر بوده است. از سال ۱۳۸۹ به بعد این تفاوت افزایش‌یافته و تا سال ۱۳۹۳ این روند ادامه داشته است به‌نحوی‌که در سال‌های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ بیشترین مقدار خود را داشته و در واقع بیشترین پسرفت تکنولوژی در این سال‌ها اتفاق افتاده است (به‌طور متوسط در سال ۱۳۹۲ تغییر کارایی بوجود آمده در مدل SBM، ۰/۰۹۵ و مقدار ناکارایی در مدل DDF برابر با ۰/۰۵۹ بوده است) و علت‌های این پسرفت نیازمند مطالعه بیشتر و جزئی‌تر است. در نمودار (۵) برای ارزیابی مناسب‌تر میانگین کارایی شرکت‌های برق منطقه‌ای به‌ترتیب از راست به چپ نتایج مربوط به مدل SBM و DDF آورده شده است. هر دو نمودار تحت مرز ترتیبی رسم شده‌اند. علت انتخاب مرز ترتیبی به دلیل ساده‌تر بودن تحلیل آن است (کالوت و همکاران، ۲۰۱۴). در هر جزء از نمودار دو منحنی رسم گردیده است که یکی بیان‌کننده میانگین ساده مدل مربوطه و دیگری بیانگر میانگین وزنی آن مدل است. میانگین ساده که نشانگر متوسط نمرات کارایی تمام شرکت‌ها است. برای محاسبه میانگین وزنی از سهم تولید برق هر شرکت در کل برق تولید شده به‌عنوان ضریب وزنی استفاده می‌کنیم. در واقع با استفاده از ضریب وزنی اهمیت اقتصادی و اندازه شرکت را در مقدار کارایی به‌دست‌آمده لحاظ می‌کنیم. همان‌طور که مشخص است در نمودار ۵ منحنی‌های میانگین ساده و وزنی رفتار مشابهی دارند و تفسیر آن‌ها شامل دو مرحله است.

---

۱. منفی بودن مقدار همبستگی به‌دلیل تفاوت در سنجش کارایی روش‌های مورد استفاده است بدین مفهوم که مدل SBM مقدار کارایی و مدل DDF مقدار ناکارایی شرکت‌ها را اندازه‌گیری می‌کند، لذا شرکتی که در مدل SBM کارایی بالاتری داشته باشد در مدل DDF دارای ناکارایی پایین‌تری است.

جدول ۲: تخمین مدل‌های SBM و DDF تحت مرز مقارن

شرکت‌های برق منطقه‌ای	مدل SBM مقارن (برآورد کارایی)										
	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
آذربایجان	0/775	0/767	0/744	0/793	0/749	0/715	0/625	0/659	0/602	0/914	0/803
اصفهان	1/000	1/000	1/000	1/000	1/00	1/00	1/00	1/00	1/00	0/646	0/639
باختر	0/931	1/000	0/814	1/000	0/823	1/000	0/884	0/799	0/699	0/686	0/680
تهران	0/907	0/946	0/809	0/911	0/831	0/842	0/749	0/806	0/750	0/709	0/693
خراسان	0/867	0/838	0/777	0/836	0/793	0/931	0/718	0/726	0/678	0/605	0/585
خوزستان	0/835	0/850	0/817	0/874	0/832	0/832	0/790	0/922	1/000	1/000	1/000
سیستان و بلوچستان	0/528	0/546	0/520	0/565	0/547	0/542	0/500	0/516	0/473	0/490	0/514
غرب	0/953	0/779	0/708	0/766	0/748	0/791	0/659	0/702	0/756	0/664	0/713
فارس	0/747	0/801	0/753	1/000	1/000	1/000	0/769	0/771	0/733	0/505	0/398
کرمان	0/592	0/609	0/579	1/000	1/000	1/000	1/000	1/000	1/000	1/000	1/000
گیلان	1/000	1/000	1/000	1/000	1/000	1/000	1/000	1/000	1/000	0/712	0/692
مازندران	1/000	1/000	1/000	1/000	1/000	1/000	1/000	0/956	0/786	1/000	0/854
هرمزگان	0/762	0/826	1/000	1/000	0/882	0/858	0/617	0/627	0/640	0/717	0/623
یزد	0/563	0/533	0/706	0/879	0/867	0/850	0/772	0/916	0/895	1/000	0/962
کیش	0/386	0/400	0/402	0/604	0/511	0/534	0/489	0/516	0/465	0/446	0/481
میانگین	0/790	0/793	0/775	0/882	0/839	0/860	0/771	0/794	0/765	0/740	0/709
	مدل DDF مقارن (برآورد ناکارایی)										
آذربایجان	0/087	0/090	0/103	0/081	0/135	0/144	0/187	0/177	0/205	0/027	0/067
اصفهان	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/161	0/212
باختر	0/043	0/000	0/078	0/000	0/110	0/000	0/071	0/097	0/158	0/162	0/197
تهران	0/028	0/017	0/057	0/024	0/053	0/035	0/050	0/087	0/083	0/141	0/157
خراسان	0/048	0/058	0/086	0/058	0/090	0/026	0/131	0/131	0/114	0/211	0/219
خوزستان	0/090	0/082	0/104	0/067	0/119	0/120	0/116	0/047	0/000	0/000	0/000
سیستان و بلوچستان	0/205	0/193	0/216	0/153	0/229	0/237	0/253	0/247	0/270	0/265	0/256
غرب	0/013	0/091	0/138	0/107	0/143	0/051	0/186	0/150	0/102	0/064	0/186
فارس	0/109	0/087	0/121	0/000	0/000	0/000	0/066	0/090	0/086	0/256	0/306
کرمان	0/200	0/188	0/228	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000
گیلان	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/072	0/075
مازندران	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/025	0/116	0/000	0/081
هرمزگان	0/076	0/049	0/000	0/000	0/061	0/056	0/107	0/163	0/124	0/147	0/213
یزد	0/214	0/221	0/114	0/026	0/061	0/056	0/082	0/029	0/032	0/000	0/011
کیش	0/297	0/283	0/314	0/178	0/257	0/248	0/264	0/251	0/273	0/285	0/264
میانگین	0/094	0/091	0/104	0/046	0/084	0/065	0/101	0/100	0/104	0/119	0/150

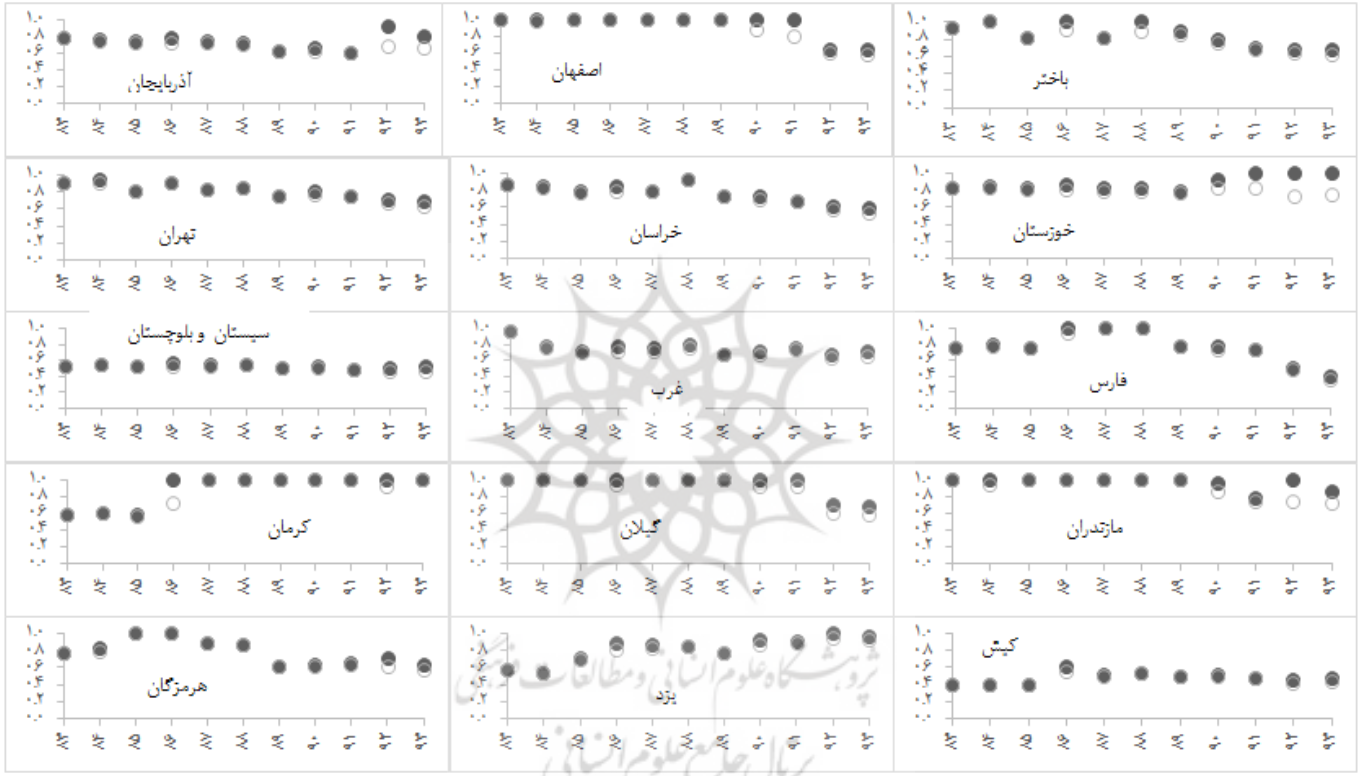
منبع: یافته‌های تحقیق

پرتال جامع علوم انسانی

جدول ۳: تخمین مدل‌های SBM و DDF تحت مرز ترتیبی

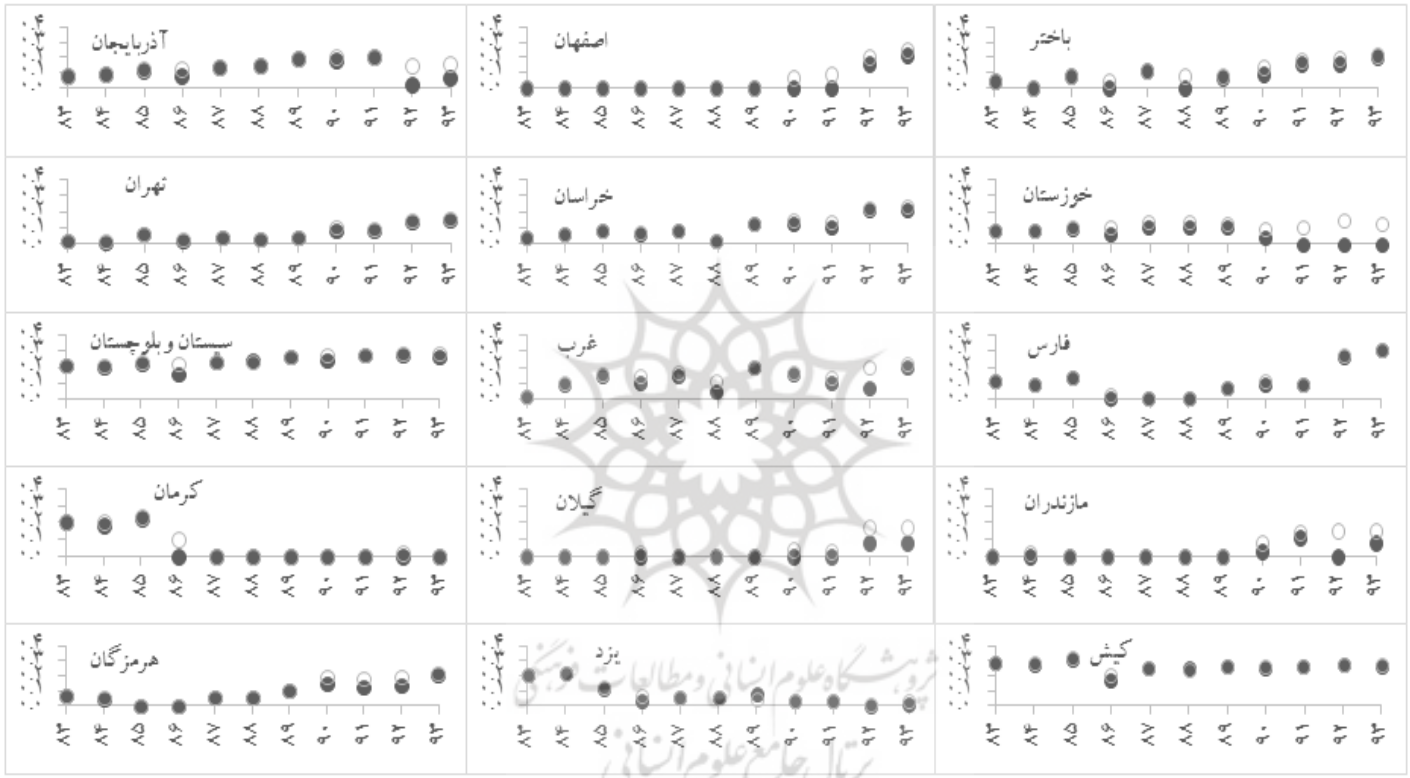
شرکت‌های برق منطقه‌ای	مدلSBM ترتیبی (محاسبه کارایی)										
	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
آذربایجان	0/775	0/749	0/727	0/728	0/731	0/701	0/625	0/623	0/602	0/679	0/666
اصفهان	1/000	0/976	1/000	1/000	1/000	1/000	1/000	0/885	0/799	0/602	0/580
باختر	0/931	1/000	0/812	0/916	0/806	0/891	0/860	0/749	0/686	0/639	0/618
تهران	0/907	0/913	0/809	0/895	0/831	0/842	0/749	0/760	0/750	0/660	0/629
خراسان	0/867	0/817	0/769	0/779	0/787	0/931	0/718	0/686	0/678	0/563	0/531
خوزستان	0/835	0/831	0/800	0/804	0/777	0/790	0/759	0/833	0/828	0/737	0/751
سیستان و بلوچستان	0/528	0/534	0/510	0/521	0/524	0/537	0/500	0/489	0/473	0/457	0/466
غرب	0/953	0/761	0/694	0/706	0/701	0/748	0/659	0/664	0/726	0/616	0/647
فارس	0/747	0/782	0/743	0/936	1/000	1/000	0/764	0/726	0/733	0/470	0/361
کرمان	0/592	0/597	0/570	0/715	1/000	1/000	1/000	1/000	1/000	0/931	1/000
گیلان	1/000	1/000	1/000	0/949	1/000	1/000	1/000	0/919	0/925	0/603	0/591
مازندران	1/000	0/947	1/000	1/000	1/000	1/000	1/000	0/858	0/742	0/750	0/725
هرمزگان	0/762	0/796	1/000	1/000	0/882	0/858	0/615	0/605	0/620	0/607	0/565
یزد	0/563	0/522	0/689	0/801	0/835	0/848	0/772	0/860	0/891	0/948	0/920
کیش	0/386	0/392	0/396	0/559	0/488	0/529	0/489	0/489	0/465	0/415	0/436
میانگین	0/790	0/774	0/768	0/821	0/824	0/845	0/767	0/743	0/728	0/645	0/632
	مدل DDF ترتیبی (محاسبه ناکارایی)										
آذربایجان	0/087	0/099	0/118	0/121	0/140	0/146	0/187	0/197	0/205	0/154	0/166
اصفهان	0/000	0/005	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/061	0/094	0/203	0/240
باختر	0/043	0/000	0/078	0/040	0/107	0/074	0/079	0/137	0/175	0/193	0/222
تهران	0/028	0/026	0/057	0/031	0/053	0/035	0/050	0/108	0/095	0/154	0/171
خراسان	0/048	0/066	0/087	0/080	0/090	0/021	0/131	0/151	0/140	0/224	0/247
خوزستان	0/090	0/093	0/118	0/108	0/140	0/138	0/130	0/097	0/111	0/152	0/125
سیستان و بلوچستان	0/205	0/202	0/229	0/216	0/231	0/234	0/253	0/267	0/269	0/281	0/283
غرب	0/013	0/103	0/153	0/141	0/160	0/109	0/186	0/165	0/130	0/195	0/214
فارس	0/109	0/094	0/125	0/019	0/000	0/000	0/067	0/111	0/090	0/273	0/304
کرمان	0/200	0/198	0/240	0/101	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/014	0/000
گیلان	0/000	0/000	0/000	0/014	0/000	0/000	0/000	0/042	0/023	0/180	0/174
مازندران	0/000	0/016	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/077	0/141	0/149	0/151
هرمزگان	0/076	0/061	0/000	0/000	0/061	0/056	0/107	0/196	0/184	0/200	0/230
یزد	0/214	0/231	0/126	0/076	0/059	0/056	0/045	0/036	0/031	0/014	0/025
کیش	0/297	0/293	0/327	0/216	0/259	0/244	0/264	0/270	0/271	0/285	0/287
میانگین	0/094	0/099	0/111	0/078	0/087	0/074	0/100	0/128	0/131	0/178	0/189

منبع: یافته‌های تحقیق



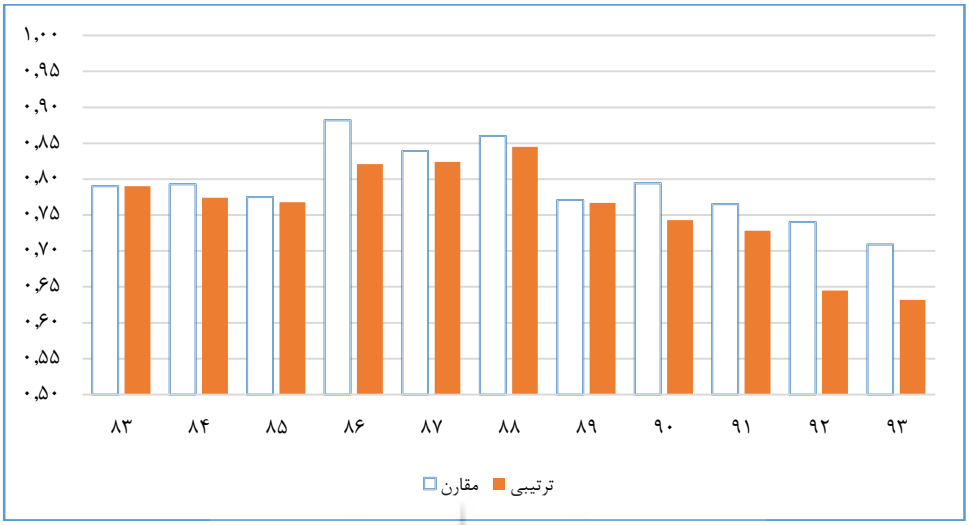
نمودار ۲ : کارایی شرکت‌های برق منطقه‌ای با استفاده از مدل SBM (دایره‌های توپر مرز مقارن و توخالی مرز ترتیبی هستند)

منبع: یافته‌های تحقیق

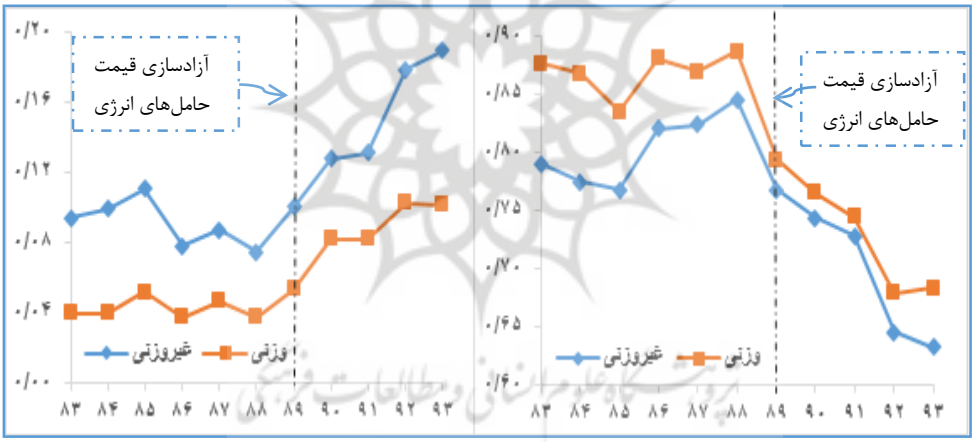


نمودار ۳ : ناکارایی شرکت‌های برق منطقه ای با استفاده از مدلDDF (دایره های توپر مرز مقارن و توخالی مرز ترتیبی هستند)

منبع: یافته‌های تحقیق



نمودار ۴ : متوسط کارایی صنعت برق کشور (منبع: یافته‌های تحقیق)



نمودار ۵ : متوسط کارایی و ناکارایی صنعت برق کشور (وزنی و غیر وزنی)
سمت راست: کارایی SBM ؛ سمت چپ: ناکارایی DDF

(منبع : یافته‌های تحقیق)

از ابتدای سال ۱۳۸۳ تا سال ۱۳۸۹ روند کارایی با ثبات بوده و تغییر چشمگیری در مقادیر کارایی ملاحظه نمی‌شود و حول یک مقدار مشخص نوسان می‌کند اما از سال ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۳ پیوسته مقدار کارایی کاهش‌یافته است (در مورد مدل DDF مقدار ناکارایی افزایش‌یافته است). در واقع از سال ۱۳۸۹ و همزمان با آزادسازی قیمت حامل‌های انرژی به‌مرور مقدار کارایی شرکت‌های بزرگ تولیدکننده برق مانند اصفهان، فارس و مازندران افت قابل‌ملاحظه‌ای داشته است (به‌طور مثال شرکت اصفهان که تا

قبل از سال ۱۳۸۹ همواره کارا و یا نزدیک به کارا بوده است در پایان سال ۹۳ طبق مدل SBM کارایی آن برابر با ۰/۵۸۰ و طبق مدل DDF ناکارایی آن برابر با ۰/۲۴۰ شده است). بنابراین این کاهش کارایی در شرکت‌های بزرگ بر کارایی کل صنعت برق تأثیر گذاشته و مقدار کارایی کل را کاهش می‌دهند.

بنابراین طبق بررسی‌های صورت گرفته صنعت برق کشور از سال ۱۳۸۹ به بعد از لحاظ تکنولوژی پسرفت داشته است و در بازه زمانی ذکر شده پیوسته با افت کارایی روبرو بوده است. برای اینکه تفاوت مقادیر کارایی شرکت‌های برق منطقه‌ای در سال‌های قبل از ۱۳۸۹ را با سال‌های بعد از آن ارزیابی کنیم از آزمون کروسکال والیس[1] استفاده کردیم. در آزمون کروسکال والیس فرضیه صفر مشابه بودن عملکرد سال‌های قبل از ۱۳۸۹ و سال‌های بعد از آن است که مورد آزمون قرار داده شده و نتایج آن در جدول (۴) بیان شده است.

جدول ۴ : نتایج آزمون کروسکال- والیس

مدل	آماره	احتمال
SBM	14/981	۰/۰۰۰
DDF	15/584	۰/۰۰۰

منبع: یافته‌های تحقیق

بر طبق نتایج به‌دست آمده فرضیه صفر در هر دو مدل SBM و DDF رد شده بنابراین روند کارایی شرکت‌های برق منطقه‌ای در سال‌های بعد از ۱۳۸۹ به‌طور معناداری با سال‌های قبل از آن تفاوت دارد.

۶. نتیجه‌گیری

صنعت برق به‌عنوان یکی از صنایع بزرگ کشور نقش مهمی در انتشار آلاینده‌هایی مانند CO_2 و SO_2 دارد به‌نحوی‌که پیمان‌نامه‌های بین‌المللی بسیاری مرتبط با صنعت برق و آلاینده‌های آن وضع شده‌اند. همچنین در مطالعات اقتصاد انرژی بیشترین سهم از تحقیقات را ارزیابی کارایی فنی و زیست‌محیطی صنعت برق به خود اختصاص داده است. در این تحقیق ارزیابی کارایی زیست‌محیطی ۱۵ شرکت برق منطقه‌ای کشور در بین سال‌های ۱۳۸۳-۱۳۹۳با تأکید بر تغییرات تکنولوژی انجام شده است. برای محاسبه کارایی زیست‌محیطی از مدل‌های ناپارامتریک DEA استفاده می‌کنیم که یک مسأله برنامه-ریزی خطی با چند نهاده و چند ستانده است. علاوه بر اینکه ستانده‌ها به دو دسته مطلوب (تولید برق) و غـیرمطلوب (انتشار کربن دی‌اکسید) تقسیم شده‌انـد نهاده‌ها نیز به دو دسته انرژی و غیرانرژی طبقه‌بندی شده‌اند به‌طوری‌که نهاده انرژی سوخت مصرفی و نهاده غیرانرژی شامل تعداد نیروی کار و

1. Kruskal-Wallis Test

ظرفیت نصب شده است. در میان انواع الگوهای DEA دو الگوی مازاد مبنا و تابع فاصله جهت‌دار از محبوبیت بالاتری در بین محققان برخوردار است. در این میان با گسترش مدل تابع فاصله جهت‌دار و لحاظ کردن اثرات اسلک‌ها در مدل ضمن اینکه خواص هر دو مدل در قالب یک مدل جدید لحاظ می‌شود نهاده‌ها و ستانده‌ها به‌طور غیرمتناسب و غیرشعاعی تغییر می‌یابند. مدل‌های مازاد مبنا و تابع فاصله جهت‌دار با اسلک‌ها همبستگی بالایی دارند و نقش اسلک‌ها در الگوی هر دو لحاظ شده است بنابراین برای محاسبه کارایی در این تحقیق مناسب هستند.

نتایج تحقیق حاکی از آن است که شرکت‌های برق منطقه‌ای اصفهان، کرمان و گیلان بالاترین کارایی‌ها و شرکت‌های سیستان و بلوچستان و کیش کمترین کارایی را در میان شرکت‌ها داشته‌اند. با استفاده از دو تکنولوژی مرز تولید به نام‌های مقارن و ترتیبی تغییرات تکنولوژی در شرکت‌های برق منطقه‌ای ارزیابی و شرکت‌های اصفهان، آذربایجان، خوزستان و مازندران بیشترین پسرفت تکنولوژی را در این مدت داشته‌اند. با ارزیابی کل صنعت برق در می‌یابیم که عملکرد آن بعد از سال ۱۳۸۹ یعنی با آزادسازی قیمت حامل‌های انرژی مناسب نبوده است و کارایی شرکت‌های برق منطقه‌ای در مجموع کاهش یافته است و تکنولوژی نیز در این سال‌ها پسرفت داشته است به نحوی‌که در سال‌های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ بیشترین پسرفت اتفاق افتاده است. نتایج آزمون آماری کروسکال والیس نیز نشان می‌دهد که عملکرد صنعت برق بعد از سال ۱۳۸۹ با دوره قبل از آن به‌طور معناداری متفاوت است که نشان از تأثیر منفی آزادسازی بر کارایی صنعت برق است. بنابراین با توجه به نامناسب بودن تکنولوژی مورد استفاده در شرکت‌های برق سرمایه‌گذاری در این زمینه و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و روش‌های کارا در زمینه تولید برق ضروری است. بدیهی است بررسی دلالیل دقیق‌تر و علمی این پسرفت تکنولوژی نیازمند مطالعه مستقل دیگری است.

بنابراین با توجه به اینکه شرکت‌های بزرگ در روند کارایی صنعت برق کشور تأثیرگذار هستند و تغییرات آنها موجب تغییر روند کل صنعت برق می‌شود، توجه بیشتر به تکنولوژی به‌کار رفته و سرمایه‌گذاری‌های صورت گرفته در آن‌ها می‌تواند بر بهبود تکنولوژی کل صنعت برق مؤثر باشد. در پایان اشاره می‌شود که تحقیق حاضر، برای نیروگاه‌های حرارتی صورت گرفته است لذا برای ارزیابی دقیق‌تر صنعت برق با توجه به اینکه قسمتی از برق تولید شده مربوط به نیروگاه‌های تجدیدپذیر مانند نیروگاه‌های برقابی، بادی و خورشیدی است لحاظ کردن نقش آنها می‌تواند نتایج را تحت تأثیر قرار دهد و تغییرات تکنولوژی در این نیروگاه‌ها می‌تواند بر روند کلی کارایی و ناکارایی صنعت برق مؤثر باشد. همچنین در این تحقیق از دو مدل مازاد مبنا و تابع فاصله جهت‌دار برای محاسبه کارایی استفاده‌شده است اما برای اینکه مقید به مدل‌های خاص و نتایج اریب‌دار نشویم پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی از سایر مدل‌های غیرشعاعی (مانند مدل‌های شبکه‌ای یا چندمرحله‌ای) برای بررسی تغییر تکنولوژی استفاده شود.

منابع

امامی‌میبدی، علی و ایزدی، زهرا (۱۳۹۲)، "سیر تحول روش های اندازه‌گیری کارایی بنگاه‌های تولیدی با تأکید بر کارایی زیست‌محیطی مطالعه موردی: صنعت پالایش نفت"، اولین همایش ملی محیط‌زیست، صنعت و اقتصاد.

امامی‌میبدی، علی و جایدری، فرزانه (۱۳۹۳)، "اندازه‌گیری زیست کارایی پالایشگاه‌های نفت ایران با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها"، فصلنامه پژوهش‌های اقتصادی(رشد و توسعه پایدار)، سال چهاردهم، شماره ۴: ۷۹-۹۶.

آماده، حمید و رضایی، علی (۱۳۹۰)، "اندازه‌گیری کارایی زیست‌محیطی با استفاده از مدل کارایی سراسری ستاده مطلوب و نامطلوب تفکیک ناپذیری سراسری در بخش تولید انرژی الکتریکی شرکت های برق منطقه‌ای". مطالعات اقتصاد انرژی، شماره ۳۰: ۱۲۵-۱۵۴.

پارسا، پریا؛ صادقی، زین‌العابدین و جلائی اسفندآبادی، عبدالمجید (۱۳۹۴)، "تجزیه رشد بهره وری زیست محیطی عوامل تولید با استفاده از تابع فاصله‌ای در استان های ایران"، مطالعات اقتصادی کاربردی ایران، دوره ۴، شماره ۱۶: ۱-۲۴.

جعفرنیا، مریم و اسماعیلی، عبدالکریم (۱۳۹۲)، "به‌کارگیری اثرات زیست‌محیطی در تحلیل کارایی فنی مطالعه موردی: واحدهای پرواربندی شهرستان شیراز"، تحقیقات اقتصادی کشاورزی، جلد ۵، شماره ۲: ۱۵۱-۱۶۴.

دریجانی، علی؛ شرزه‌ای، غلامعلی؛ یزدانی، سعید؛ پیکانی، غلامرضا و صدرالاشرافی، مهریار (۱۳۸۴)، "برآورد کارایی زیست‌محیطی با استفاده از تحلیل مرز تصادفی (مطالعه موردی کشتارگاه های دام استان تهران)"، اقتصادکشاورزی و توسعه، سال سیزدهم، شماره ۵۱: ۱۱۳-۱۴۵.

رستمی مال خلیفه، محسن؛ حسین‌زاده لطفی، فرهاد و روشن ضمیر، سوسن (۱۳۹۱)،"اندازه‌گیری کارایی زیست‌محیطی با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها"، چهارمین کنفرانس ملی تحلیل پوششی داده‌ها.

رضایی، علی؛ آماده، حمید و محمدی، تیمور (۱۳۹۱)،"تحلیل بهره‌وری و کارایی زیست‌محیطی در کشورهای منتخب واردکننده و صادرکننده منابع انرژی فسیلی: رویکرد تابع مسافت جهت‌دار"، فصلنامه اقتصاد محیط زیست و انرژی، سال اول، شماره ۲: ۹۳-۱۲۶.

سیفی، احمد؛ سلیمی‌فر، مصطفی و فنودی، هانیه (۱۳۹۲)، "اندازه‌گیری کارایی زیست محیطی: بررسی موردی نیروگاه‌های حرارتی تولید برق در استان‌های خراسان جنوبی، رضوی و شمالی»، اقتصاد انرژی ایران، سال دوم، شماره ۷: ۱۷-۴۱.

شاهکوئی، ملیحه؛ ژیانی رضایی، حامد و شاهکوئی، اسمعیل (۱۳۹۳)، "بررسی آلاینده‌های زیست‌محیطی کارخانه های با سوخت‌های فسیلی و اندازه‌گیری کارایی زیست‌محیطی آنها با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها"، کنفرانس بین‌المللی و آنلاین اقتصاد سبز.

شهابی‌نژاد، وحید (۱۳۹۴)، "تحلیل مقایسه‌ای کارایی انرژی صنایع بزرگ استان‌های ایران با استفاده از روش تحلیل فراگیر داده‌ها در دوره‌ی ۱۳۹۰-۱۳۸۷"، مطالعات اقتصادی کاربردی ایران، دوره ۴، شماره ۱۶: ۱۵۷-۱۷۸.

شهیکی‌تاش، محمدنبی و خواجه حسنی، مصطفی (۱۳۹۲)، "اندازه‌گیری کارایی زیست‌محیطی صنایع آلاینده ایران صنایع فلزات اساسی و کانی‌های غیرفلزی"، دومین همایش ملی توسعه پایدار کشاورزی و محیط‌زیست سالم.

شهیکی‌تاش، محمدنبی؛ رحیمی، غلامعلی و خواجه حسنی، مصطفی (۱۳۹۳)، "استفاده از روش برنامه‌ریزی ریاضی و تابع فاصله جهت‌دار در راستای محاسبه کارایی زیست‌محیطی (مطالعه صنایع تولید فلزات اساسی ایران)"، تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، سال یازدهم، شماره ۴۱: ۱۲۵-۱۳۸.

شهیکی‌تاش، محمدنبی؛ خواجه حسنی، مصطفی و جعفری، سعید (۱۳۹۴)، "محاسبه کارایی زیست‌محیطی در صنایع انرژی بر ایران با استفاده از رویکرد تابع فاصله جهت‌دار"، نظریه‌های کاربردی اقتصاد، سال دوم، شماره ۱: ۹۹-۱۲۰.

عجم، نیما و شهرکی، جواد (۱۳۹۳)، "بررسی کارایی زیست‌محیطی محصول گندم در شهرستان چناران"، اولین کنفرانس بین‌المللی مهندسی محیط‌زیست.

قاسمی، عبدالرسول و پاشازاده، حامد (۱۳۹۳)، "پایش کارایی زیست‌محیطی در کشورهای در حال توسعه (مطالعه موردی: ایران، هند، ترکیه و مصر)"، فصلنامه سیاست‌گذاری پیشرفت اقتصادی، دوره دوم، شماره ۳: ۹۵-۱۱۸.

متفکرآزاد، محمدعلی؛ پورعبادالهان کویچ، محسن؛ فلاحی، فیروز؛ رنج‌پور، رضا و سجودی، سکینه (۱۳۹۳)، "محاسبه کارایی فنی نیروگاه‌های حرارتی کشور و بررسی عوامل مؤثر بر آن: کاربرد روش تصادفی ناپارامتریک پوششی داده‌ها"، فصلنامه تحقیقات اقتصادی، دوره چهل و نهم، شماره۱: ۹۳-۱۱۳.

مولائی، مرتضی و ثانی، فاطمه (۱۳۹۴)، "برآورد کارایی زیست‌محیطی بخش کشاورزی"، دانش کشاورزی و تولید پایدار، جلد ۲۵، شماره ۲: ۹۱-۱۰۱.

نصرالهی، زهرا؛ صادقی‌آرانی، زهرا؛ غفاری گولک، مرضیه (۱۳۹۱)، "اندازه‌گیری کارایی صنایع تولیدی ایران با رویکرد تحلیل پوششی داده‌ها و با تأکید بر ستاده‌های نامطلوب (آلاینده های زیست محیطی)"، سیاست‌های اقتصادی (نامه مفید)، دوره هشتم، شماره ۱: ۸۷-۱۱۰.

نیکبخت، علیرضا؛ فتحی، مهدی؛ دهقانیان، فرزاد و منصور، سعید (۱۳۸۷)، "ارائه روشی برای ارزیابی کارایی زیست‌محیطی با استفاده از روش تحلیل پوششی داده"، ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع.

Avkiran, N.K. and McCrystal, A (2012); Sensitivity analysis of network DEA: NSBM versus NRAM, Applied Mathematics and Computation, 218: 11226-11239.

Banker, R.D.; Charnes, A. and Cooper, W.W. (1984); Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis, Management Science, 30(9): 1078-1092.

Bi, GB.; Song, W.; Zhou, P. and 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.

Briec, W. (1997); A graph-type extension of Farrell technical efficiency measure. Journal of Productivity Analysis; 8 (1): 95-110.

Calvet, R.; Conesa, D.; Calvet, A. and 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.

Chambers, R.G.; Chung, Y. and Fare, R. (1996); Benefit and Distance Functions, Journal of Economic Theory 70: 407-419.

Charnes, A. and Cooper, W.W. (1962); Programming with linear fractional functionals. Naval Research Logistics; 9(3-4):181-186.

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

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

Fare, R. and Grosskopf, S. (2010); Directional distance functions and slacks-based measures of efficiency. European Journal of Operation Research; 200(1): 320-322.
Fare, R.; Grosskopf, S. and Pasurka, Jr. C. (2001); Accounting for air pollution emissions in measures of state manufacturing productivity growth. Journal of Regional Science; 41(3): 381-409.
Fare, R. and Lovell, CAK. (2005); Measuring the technical efficiency of production. Journal of Economic Theory; 19(1): 150-162.
Fukuyama, H. and Weber, W. (2009); A directional slacks-based measure of technical inefficiency. Socio-Economic Planning Sciences; 43(4): 274-287.
Fukuyama, H. and Weber, W. L. (2010); A Slacks-based Inefficiency Measure for A Two-stage System with Bad Outputs. Omega, 38: 398-409.
Koopmans, TC. (1951); An analysis of production as an efficient combination of activities. In: Koopmans TC, editor. Activity Analysis of production and allocation. New York: Wiley.
Lozano, S. and Gutiérrez, E. (2011); Slacks-based measure of efficiency of airports with airplanes delays as undesirable outputs. Computers & Operations Research., 38: 131-139.
Mandal, S.K. and Madheswaran, S. (2010); Environmental efficiency of the Indian cement industry: an interstate analysis. Energy Policy 38: 1108-1118.
Murty, M.N.; Kumar, S. and Dhavala, K. (2007); Measuring environmental efficiency of industry: a case study of thermal power generation in India. Environmental and Resource Economics, 38(1): 31-50.
Scheel, H. (2001); Undesirable Outputs in Efficiency Valuations. European Journal of Operational Research, 132: 400-410.
Seitz, W.D. (1971); Productive efficiency in the steam-electric generating industry. Journal of Political Economy, 79 (4): 878-886.
Simar, L. and Wilson, P. (2002); Non-parametric tests of returns to scale. European Journal of Operation Research; 139(1): 115-132.
Song, X.; Hao, Y. and Zhu, X (2015); Analysis of the Environmental Efficiency of the Chinese Transportation Sector Using an Undesirable Output Slacks-Based Measure Data Envelopment Analysis Model. journal of Sustainability, 7: 9187-9206.
Sueyoshi, T. and Goto, M. (2011a); DEA approach for unified efficiency measurement: assessment of Japanese fossil fuel power generation. Energy Economics. 33: 195-208.
Tone, K. (2001); A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. European Journal of Operation Research., 130: 498-509.
Tulkens, H. and Vanden Eeckaut, P. (1995); Non-parametric efficiency, progress and regress measures for panel data: methodological aspects. European Journal of Operation Research; 80(3): 474-499.
Yang, H. and 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.
Zhang, N.; Zhou, P. and Choi, Y. (2013); Energy efficiency, CO2 emission performance and technology gaps in fossil fuel electricity generation in Korea: A

meta-frontier non-radial directional distance function analysis. Energy Policy; 56: 653-662.

Zhou, P.; Ang, B. and Poh, K. (2008); Measuring environmental performance under different environmental DEA technologies. Energy Economics; 30(1): 1-14.

Zhou, P.; Ang, B.W. and Poh, K.L. (2006); Slacks-based efficiency measures for modeling environmental performance. Ecol Economics. 60: 111-118.

Zhou, P.; Ang, B. W. and 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.

Zhou, Y.; Xinpeng, X.; Kuangnan, F.; Dapeng, L. and Chunlin, X. (2013); Environmental efficiency analysis of power industry in China based on an entropy SBM model, Energy Policy 57: 68-75.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی