

رتبه‌بندی کارایی نیروگاه‌های برق ایران با استفاده از روش ابرکارایی:

کاربرد دو روش لین-چن و LJK

سکینه سجودی

استادیار اقتصاد دانشگاه تبریز، sakinehsojoodi@gmail.com

لاله دستمالچی

دانشجوی کارشناسی ارشد اقتصاد دانشگاه تبریز، lalahdastmalchi96@gmail.com

هادی نشاط

دانشجوی کارشناسی ارشد اقتصاد دانشگاه تبریز، hadineshat@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۶/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۷/۱۵

چکیده

امروزه با توسعه روزافزون جوامع، تقاضا برای انواع انرژی از جمله انرژی برق افزایش قابل توجهی یافته‌است. از این‌رو، توجه به بهره‌وری انرژی به‌ویژه انرژی برق امری ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به وجود نیروگاه‌های متعدد در سراسر کشور و نیز بالا بودن هزینه تأسیس، تعمیر، نگهداری و تأمین قطعات نیروگاه جدید، محاسبه کارایی نیروگاه‌های موجود و رتبه‌بندی و مقایسه آن‌ها با یکدیگر از لحاظ میزان کارایی می‌تواند اقدامی مفید برای استفاده بهینه از ظرفیت تولید نیروگاه‌های موجود و رساندن آن‌ها به بالاترین سطح کارایی و بهره‌وری ممکن باشد. روش‌های گوناگونی برای محاسبه کارایی و رتبه‌بندی واحدهای تصمیم‌گیرنده (DMUs) وجود دارد که تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) و به‌ویژه روش ابرکارایی یکی از مهمترین آن‌ها به‌شمار می‌رود. در این مقاله اقدام به رتبه‌بندی کارایی نیروگاه‌های حرارتی ایران در سال ۱۳۹۵ با استفاده از مدل ابرکارایی لین و چن (۲۰۱۸) و مدل ابرکارایی LJK (۲۰۰۷) و مقایسه نتایج آن‌ها با یکدیگر شده است. طبق ارزیابی هر دو روش، نیروگاه‌های سیکل ترکیبی از نظر کارایی معمولاً رتبه‌های بهتر و نیروگاه‌های گازی رتبه‌های پایین‌تری را کسب کرده‌اند ولی در تقسیم‌بندی از لحاظ دولتی و خصوصی بین دو روش اتفاق نظر وجود ندارد به‌عبارتی با استفاده از مدل لین و چن نیروگاه‌های بخش دولتی و با استفاده از مدل LJK نیروگاه‌های بخش خصوصی دارای عملکرد بهتری بوده‌اند.

کلیدواژه‌ها: تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)، رتبه‌بندی، ابرکارایی، واحدهای تصمیم‌گیرنده (DMUs)

طبقه‌بندی JEL: C61، C67.

۱. مقدمه

برق یکی از مهمترین انرژی‌های پاک است که می‌تواند در یک اقتصاد در حال توسعه مانند اقتصاد ایران نقش به‌سزایی داشته باشد. انرژی برق یکی از ورودی‌های تولید هر کشوری است و رشد بلندمدت بسیاری از کشورها به توانایی نیروگاه‌های آن‌ها در عرضه‌ی کارآمد برق بستگی دارد. در ایران نیروگاه‌های متعددی در سراسر کشور وجود دارد، با این‌وجود در برخی مناطق و دوره‌های زمانی، تولید این نیروگاه‌ها قادر به تأمین کامل برق مصرفی کشور نیست. شایان ذکر است که منابع مالی لازم برای تأسیس یک نیروگاه جدید، بسیار کلان بوده و هزینه بهره‌برداری، تعمیر، نگهداری و تأمین قطعات یدکی آن نیز سالانه مبالغ هنگفتی را به چرخه اقتصاد کشور تحمیل می‌کند. لذا استفاده بهینه از ظرفیت تولید نیروگاه‌های موجود و رساندن آن‌ها به بالاترین سطح کارایی و بهره‌وری ممکن، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. محاسبه میزان کارایی این نیروگاه‌ها و اقدام به رتبه‌بندی آن‌ها به ترتیب از کاراترین به ناکارترین می‌تواند کمک شایانی به اتخاذ تصمیمات درست و سازنده در سطح کلان مدیریتی و در نتیجه بهبود بهره‌وری نیروگاه‌ها بنماید.

برای محاسبه کارایی از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد که تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) یک روش پرکاربرد در میان آن‌ها است. تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) یکی از مهم‌ترین ابزارهای مدیریتی جهت تصمیم‌گیری بر پایه‌ی روش‌های علمی، برای محاسبه کارایی و ارزیابی عملکرد واحدهای تصمیم‌گیری است. امروزه استفاده از DEA با سرعت زیادی در حال گسترش بوده و در ارزیابی عملکرد سازمان‌ها و صنایع مختلف مانند صنعت بانکداری، پست، بیمارستان‌ها، مراکز آموزشی و نیروگاه‌ها و ... استفاده می‌شود. مطالعات گسترده‌ای از نظر تئوری و کاربردی در مدل‌های DEA انجام شده است. با وجود مزیت‌های فراوان این روش، یکی از مشکلات بارز تحلیل پوششی داده‌ها آن است که اگر تعداد واحدهای کارا (دارای شاخص کارایی برابر یک) بیش از یک مورد باشد، آن‌گاه نمی‌توان بهترین را بین آن‌ها انتخاب نمود، به عبارت دیگر رتبه‌بندی واحدهای تحت بررسی با شاخص کارایی صد درصد یکی از چالش‌های روش DEA محسوب می‌شود. در ادبیات مربوط به DEA، روش‌های مختلفی برای حل این مشکل و رتبه‌بندی واحدهای تحت بررسی معرفی شده است، به طوری که هر تصمیم‌گیرنده می‌تواند با توجه به فرآیند جاری و شرایط واحدهای تحت ارزیابی، یکی از روش‌های رتبه-

بندی را به نحوی انتخاب نماید که واحدهای مدنظر به صورت جامع‌تر و با دقت بیشتری متمایز شوند. روش ابرکارایی یکی از مهمترین روش‌های رتبه‌بندی در رویکرد DEA محسوب می‌شود.

روش ابرکارایی به مدل DEA اصلاح شده‌ای اطلاق می‌شود که در آن بنگاه‌ها می‌توانند مقادیر کارایی بیشتر از یک (۱۰۰ درصد) داشته باشند. دلیل این امر آن است که بنگاه‌ها برای محاسبه کارایی، هیچ محدودیتی در رابطه با قرار دادن خود به عنوان یک مرجع پیش رو ندارند. این روش نخستین بار توسط اندرسون و پیترسون^۱ (۱۹۹۳) ارائه شد که هدف اصلی آن، فراهم نمودن مدلی برای رتبه‌بندی بنگاه‌ها است که در آن می‌توان بین بنگاه‌های موجود بر روی نقاط مرزی مجموعه امکان تولید (PPS)^۲، تمایز قائل شد. مهم‌ترین مزیتی که استفاده از مدل‌های ابرکارایی برای رتبه‌بندی دارد این است که با حذف واحد تصمیم‌گیری تحت ارزیابی از مجموعه واحدهای تصمیم‌گیری، حجم عملیات محاسباتی کاهش می‌یابد و این مطلوب مدیران است. استفاده از مدل‌های ابرکارایی می‌تواند به ارائه فهرست دقیق‌تری از DMUهای کارا کمک کند.

با وجود اهمیت افزایش کارایی در تولید برق و نقش رتبه‌بندی نیروگاه‌ها برای برنامه‌ریزی دقیق‌تر در این زمینه، و همچنین با وجود توسعه روزافزون روش‌های ابرکارایی رتبه‌بندی، تاکنون در مطالعات داخلی توجه چندانی به استفاده از این روش‌ها برای رتبه‌بندی کارایی نیروگاه‌های حرارتی کشور نشده است. بنابراین هدف این مطالعه رتبه‌بندی کارایی نیروگاه‌های حرارتی ایران در سال ۱۳۹۵ است. در این مطالعه از بین مدل‌های متنوع ابرکارایی در DEA برای رتبه‌بندی نیروگاه‌های حرارتی کشور ایران، مدل ابرکارایی لین و چن (۲۰۱۸) و مدل ابرکارایی LJK (۲۰۰۷) به دلیل مزیت‌های ویژه آن‌ها، برگزیده شده است و در ادامه نتایج به دست آمده از دو مدل، با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲. مبانی نظری و پیشینه تحقیق

اهمیت نیروگاه‌های هر کشور به عنوان تأمین‌کنندگان یکی از حیاتی‌ترین انرژی‌های مورد نیاز هر کشور بر همگان شناخته شده است و با توجه به اینکه صنعت برق، صنعت

^۱ Anderson and Peterson

^۲ Production Possibility Set

مهم و پرهزینه‌ای است که رکن اصلی توسعه اقتصادی کشورها بوده و میزان تولید و مصرف انرژی الکتریکی یکی از شاخص‌های مهم رشد اقتصادی و مبین کیفیت زندگی جوامع و ملت‌ها است (جواهری و خامنه، ۱۳۸۸، ص. ۱)، لذا تعیین میزان کارایی و بهره‌وری نیروگاه‌ها می‌تواند به مدیران در شناخت واحدهای ناکارا و اتخاذ تصمیمات درست در جهت رفع موانع و مشکلات پیش روی واحدهای ناکارا و لذا افزایش بهره‌وری آن‌ها کمک کند. در راستای ارتقای کارایی و بهره‌وری، روش‌های رتبه‌بندی بسیاری وجود دارد که مدیران تصمیم‌گیرنده می‌توانند متناسب با شرایط پروژه خود مناسب‌ترین آن‌ها را انتخاب کرده و اقدام به رتبه‌بندی واحدهای تصمیم‌گیری تحت ارزیابی خود بکنند. بیشتر این روش‌ها توسط تحلیل پوششی داده‌ها مدل‌بندی شده‌اند.

تا قبل از سال ۱۹۵۷ اغلب تحقیقاتی که به محاسبه کارایی واحدهای تصمیم‌گیرنده یک سیستم می‌پرداختند، از روش‌های پارامتریک استفاده می‌نمودند. این روش‌ها با وجود مزایای متعدد، دو مشکل عمده داشتند که استفاده از آن‌ها را در سطح گسترده غیرممکن می‌ساخت. این دو مشکل عبارت بودند از:

الف) روش‌های پارامتریک برای حالت‌های یک یا چند ورودی و تنها یک خروجی مناسب هستند.

ب) محاسبه پارامترها و تعیین تابع پارامتریک در حالت کلی آسان نیست و نیاز به تصریح فرم تبعی خاص دارد.

در سال ۱۹۷۸ فارل^۱ با تکیه بر اصولی پنج‌گانه، مجموعه‌ای به نام «مجموعه امکان تولید» را ساخت و مرز آن را به‌عنوان تخمینی از مرز کارایی تولید در نظر گرفت. در روش فارل هر واحد تصمیم‌گیرنده‌ای که روی این مرز قرار گیرد کارا است و در غیر اینصورت ناکارا تلقی می‌گردد. به دلیل مشکلات علمی در اندازه‌گیری و محدودیت‌هایی که در روش فارل (بازده ثابت نسبت به مقیاس) مطرح بود، این روش کاربرد عملی چندانی نیافت و سال‌ها مسکوت ماند، تا اینکه در سال ۱۹۷۸ چارلز، کوپر و رودز^۲ (CCR) با جامعیت بخشیدن به روش فارل، به‌گونه‌ای که خصوصیت فرآیند تولید با چند عامل تولید و محصول را در برگیرد، روش تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) را معرفی نمودند. در این روش برای تخمین تابع تولید به پیش‌فرض خاصی در مورد شکل

^۱ Farrel

^۲ Charnes, Cooper and Rhodes

تابع تولید نیاز نبوده و کارایی یک بنگاه نسبت به کارایی سایر بنگاه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. برای آشنایی با این روش، فرض کنید سیستم تحت ارزیابی شامل n واحد تصمیم‌گیری $(DMU_1, DMU_2, \dots, DMU_n)$ باشد که هر DMU_j ، m ورودی و s خروجی $Y = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{sj})$ مصرف می‌نماید. ورودی‌ها و خروجی‌های هر DMU یا بنگاه، همگی نامنفی بوده و هر DMU حداقل یک ورودی مثبت و یک خروجی مثبت دارد. یعنی $Y \geq 0$ ، $X \neq 0$ و $X \geq 0$. با در نظر گرفتن این فروض، چارنز و همکاران (۱۹۷۸) مدل اولیه خود را که مدل مضربی نام داشت به صورت کسری و غیرخطی معرفی نمودند. از جمله مشکلات معادله اولیه، می‌توان به وجود بی‌شمار راه‌حل بهینه و همچنین محدب و غیرخطی بودن آن اشاره کرد. برای حل این مشکلات چارنز و همکاران (۱۹۷۸) با برابر یک قراردادن مخرج تابع هدف، آن را از یک مدل غیرخطی به صورت یک مدل خطی بازنویسی کرده و برای محاسبه کارایی ستاده‌گرا (با قید نهاده‌های معین، میزان تولید حداکثر می‌شود) در بنگاه p ، از الگوی برنامه‌ریزی خطی زیر استفاده نمودند (شهیکی تاش و همکاران، ۱۳۹۴):

$$E = \max \sum_{r=1}^s u_r y_{rp}$$

$$s. t. \quad \sum_{i=1}^m v_i x_{ip} = 1 \quad (1)$$

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

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

در معادله فوق u وزن‌های محصولات و v وزن‌های عوامل تولید است. در این مدل برنامه‌ریزی خطی، هدف حداکثر کردن مقدار محصول است و قید اول همان محدودیت بودجه نرمال شده است و قید دوم بیانگر آن است که نسبت مجموع وزنی درآمدها به مجموع وزنی هزینه‌ها (شاخص کارایی) حداکثر ۱ است. مسأله فوق به DEA خروجی-محور^۱ مشهور است و می‌توان آن را با بهره‌گیری از فرم دوگانش، که دارای قیود کمتری

^۱ Output Oriented

نسبت به رابطه فوق است، حل نمود. این مدل که به نام مدل ورودی-محور^۱ با بازده ثابت نسبت به مقیاس شناخته می‌شود، به صورت رابطه (۲) نشان داده می‌شود (کوئلی^۲، ۱۳۸۹).

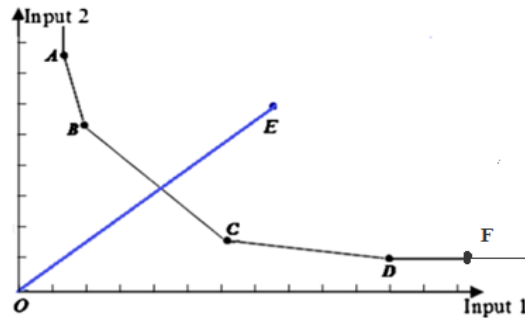
$$\begin{aligned} \min \quad & \theta \\ \text{s. t.} \quad & \theta x_{ip} - \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \geq 0 \quad , \quad i = 1, \dots, m \\ & y_{rp} - \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} \leq 0 \quad , \quad r = 1, \dots, s \\ & \lambda_j \geq 0 \quad , \quad j = 1, \dots, n \\ & \theta \text{ is free} \end{aligned} \quad (2)$$

در این مدل، θ کارایی واحد تصمیم‌گیرنده p نسبت به سایر واحدها است و مقدار آن کوچکتر یا مساوی ۱ است. وقتی θ برابر با یک باشد، واحد تصمیم‌گیرنده p روی مرز کارا است و نشان می‌دهد که این واحد به صورت کارا عمل می‌کند. مقادیر کمتر از یک نیز نشان‌دهنده نقاط خارج از مرز کارا و در عین حال داخل مجموعه امکان تولید بوده و نشان از فعالیت ناکارآمد واحد تصمیم‌گیری دارند. $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ نیز مقادیر عددی نامنفی هستند که وزن‌های هر کدام از واحدهای تصمیم‌گیری را برای محاسبه مجموعه مرجع نشان می‌دهند. مجموعه مرجع، از ترکیب خطی واحدهای تصمیم‌گیری مورد بررسی به دست می‌آید و برای هر بنگاه، نقطه‌ای بر روی مرز کاراست که آن بنگاه برای دسترسی به سطح کارایی صد درصد باید در آن نقطه قرار گیرد. در صورتی که محدودیت دیگری به این مدل اضافه شود که نشان دهد مجموع λ ها باید برابر ۱ باشد، مدل به مدل نهاده‌محور با بازدهی متغیر به مقیاس^۳ (VRS) تبدیل خواهد شد. شکل (۱) نشان‌دهنده نحوه سنجش میزان کارایی مدل نهاده‌محور زمانی که دو نهاده و یک محصول وجود دارد، است.

¹ Input Oriented

² Koelli (2010)

³ Variable Return to Scale



شکل (۱): مدل DEA نهاده‌گرا

منبع: منگ و شی^۱ (۲۰۱۷)

همان‌طور که شکل (۱) نشان می‌دهد، واحدهای تصمیم‌گیری A، B، C، D، F روی مرز کارایی قرار داشته و دارای شاخص کارایی برابر با یک هستند. بنگاه E بالای این مرز قرار دارد و می‌تواند با کاهش استفاده از هر یک از نهاده‌ها و باثبات تولید، به سمت نقطه‌ای روی مرز تشکیل شده توسط بنگاه‌های کارا حرکت نماید و کارایی خود را بهبود بخشد.

واحدهای تصمیم‌گیری مانند DMU_F روی مرز کارا قرار داشته و به ظاهر کارایی صددرصد دارند، ولی می‌توان نهاده (در اینجا ورودی اول) آن را کاهش داد و همچنان روی مرز کارایی باقی ماند، در این حالت گفته می‌شود که بنگاه F به صورت ضعیف کارا است. بنابراین تشخیص واحد کارا با روش DEA چندان دقیق نیست. برای حل این مشکل و رتبه‌بندی بنگاه‌هایی که دارای کارایی ۱ هستند، می‌توان از روش ابرکارایی استفاده نمود که در آن واحد تحت بررسی را از مجموعه DMUها حذف کرده و به بررسی عملکرد این واحد نسبت به بقیه واحدها می‌پردازد. در این بخش به معرفی مدل اولیه ابرکارایی پرداخته می‌شود. این روش ابرکارایی توسط اندرسن و پیترسن (۱۹۹۳) برای رتبه‌بندی واحدهای کارا ارائه گردید.

در این روش واحد تحت ارزیابی از مجموعه همه DMUها حذف شده و سپس عملکرد این واحد نسبت به بقیه واحدها سنجیده می‌شود. این مدل که صورت دستکاری شده مدل CCR می‌باشد، چنین است:

¹ Meng and Shi

$$\theta_k^* = \min \theta_k$$

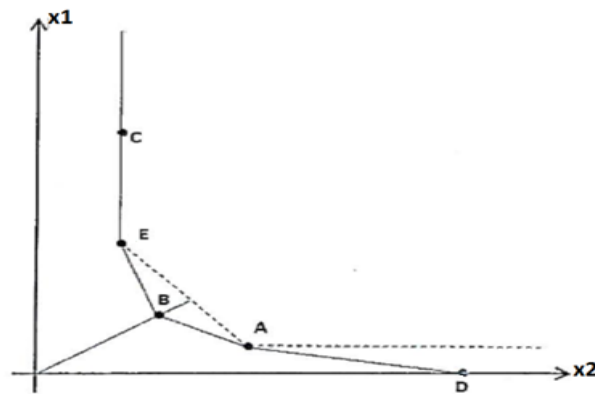
$$s. t. \quad \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \lambda_j X_j \leq \theta_k X_k$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \lambda_j Y_j \geq Y_k \quad (3)$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad , \quad j = 1, \dots, n \quad , \quad j \neq k$$

$$\theta_k \quad \text{is free}$$

در این مسأله، مقدار کارایی می‌تواند بزرگتر از ۱ باشد. برای مثال در شکل ۲ مقدار ابرکارایی محاسبه شده برای نقطه B بزرگتر از ۱ خواهد بود. یکی از مشکلات مدل‌های ابرکارایی این است که برای برخی واحدهای تصمیم‌گیری بر روی مرز کارا، بدون حضور این واحدها نمی‌توان مرزی برای مجموعه تولید تعریف نمود (نقطه D). در این حالت گفته می‌شود که مسأله فوق برای آن نقطه نشدنی^۱ است. مسأله نشدنی بودن مانع اصلی در کاربرد مدل‌های ابرکارایی است.



شکل (۲): مرز ابرکارایی

منبع: لی و زو^۲ (۲۰۱۲)

همان‌طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، وقتی یک DMU کارا مانند DMU_D دارای مقدار صفر در ورودی‌هایش است، ممکن است مدل SE با بازدهی ثابت به مقیاس با

^۱ Infeasible

^۲ Lee and Zhu

مشکل نشدنی بودن روبه‌رو بشود (زو^۱، ۱۹۹۶). برای مدل ابرکارایی تحت شرط بازده به مقیاس متغیر (VRS)، مشکل نشدنی بودن رایج‌تر است. حتی اگر همه داده‌های ورودی و خروجی مثبت باشند، نشدنی بودن ممکن است در مدل SE در حالت VRS اتفاق بیفتد (سیفورد و زو^۲، ۱۹۹۹). روش‌های ابرکارایی قبلی به طور کامل مشکل نشدنی بودن مدل SE در حالت VRS را تحت مجموعه داده‌های نامنفی رفع نمی‌کنند و یا بین DMUهای کارا به خوبی تمایز قائل نمی‌شوند. رویکرد پیشنهادی لین و چن (۲۰۱۸) نسبت به روش‌های پیشین خود، مزیت‌های زیر را دارد:

- ۱) همیشه تحت مجموعه داده‌های نامنفی شدنی است،
 - ۲) وقتی که یک آشفتگی کوچک برای DMU تحت ارزیابی اتفاق می‌افتد، مدل پیشنهادی قوی‌تر عمل می‌کند،
 - ۳) یک مقدار ابرکارایی کران‌دار و منحصر به فرد برای ارزیابی همه DMUها به دست می‌دهد،
 - ۴) توانایی خوبی برای تمایز قائل شدن بین DMUهای کارا دارد،
 - ۵) مدل ارائه شده همچنین می‌تواند در شرایط بازده به مقیاس ثابت (CRS^۳) برای حل نشدنی بودن ناشی از داده‌های صفر استفاده شود،
 - ۶) رویکردهای ارائه شده می‌تواند کارایی مشابه مدل‌های DEA مرسوم ورودی-محور (خروجی‌محور) را بدهد (لین و چن، ۲۰۱۸).
- و از جمله مزایای مدل LJK می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:
- ۱) همیشه تحت مجموعه داده‌های نامنفی شدنی است،
 - ۲) توانایی خوبی برای تمایز قائل شدن بین DMUهای کارا دارد،
 - ۳) یک مقدار ابرکارایی کران‌دار و منحصر به فرد برای ارزیابی همه DMUها به دست می‌دهد.

¹ Zhu, J.

² Seiford and Zhu

³ Constant Return to Scale

در ادامه، ابتدا به بررسی مطالعات انجام گرفته در خارج از کشور و سپس به مطالعات انجام گرفته در داخل کشور پرداخته می‌شود.

از میان مطالعات خارجی گولانی و رباک^۱ (۱۹۹۴)، در پژوهش خود اقدام به اندازه‌گیری و ارزیابی کارایی نیروگاه‌های برق اسرائیل کرده‌اند که برای این منظور از روش تحلیل پوششی داده‌ها (مدل BCC) استفاده کرده‌اند و آن‌ها را به ترتیب از کاراترین به ناکاراترین رتبه‌بندی کرده‌اند. آزاده و همکاران^۲ (۲۰۰۷)، در مطالعه خود اقدام به ارزیابی بهره‌وری و رتبه‌بندی ۴۰ نیروگاه حرارتی ایران در طی سال‌های ۱۹۹۷-۲۰۰۰ با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها (مدل BCC) و آنالیز چندمتغیره کرده‌اند. نتایج این پژوهش علاوه بر نشان دادن میزان کارایی و رتبه نیروگاه‌ها در مقایسه با یکدیگر، همچنین نشان‌دهنده این است که نیروگاه‌های سیکل ترکیبی در طی این چهار سال از لحاظ بهره‌وری بهتر از سایر نیروگاه‌ها هستند. لیو و لین و جویس^۳ (۲۰۱۰)، در پژوهش خود اقدام به محاسبه کارایی و ارزیابی عملکرد نیروگاه‌های حرارتی در تایوان در طی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۶ با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها کرده‌اند، نتایج حاصل شده از این مطالعه می‌تواند در بهبود کارایی برخی از نیروگاه‌های موجود و برای استراتژی‌های عملیاتی کارآمدتر و سیاست‌گذاری مرتبط با نیروگاه‌های آینده در تایوان مفید باشد. عسکری و حبیبی محلی (۲۰۱۶)، در مطالعه خود اقدام به ارزیابی عملکرد و مقایسه کارایی نیروگاه‌ها با استفاده از تکنیک تحلیل پوششی داده‌ها (مدل‌های CCR-BCC) کرده‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که نیروگاه‌های سیکل ترکیبی دارای کارایی مؤثرتری بوده‌اند و کاهش در مصرف انرژی مهمترین عامل برای بهبود عملکرد واحدهای ناکارا است. در واقع می‌توان با صرفه‌جویی در مصرف انرژی، کارایی این نیروگاه‌ها را افزایش داد بدون اینکه از میزان برق تولیدی کاسته شود. ساریکا^۴ (۲۰۱۷)، در مطالعه خود اقدام به ارزیابی و رتبه‌بندی کارایی ۶۵ نیروگاه حرارتی در کشور ترکیه با استفاده از روش‌های SFA^۵ و DEA و مقایسه نتایج حاصل شده نسبت به هم کرده است. یانگ و همکاران^۶ (۲۰۱۸)، در مطالعه خود براساس مدل ابرکارایی SBM^۷، کارایی

¹ Golani and Rebak

² Azadeh and et al. (2007)

³ Liu, Lin and Jewis (2010)

⁴ Sarica (2017)

⁵ Stochastic Frontier Analysis

⁶ Yang and et al. (2018)

⁷ Slack Based Model (SBM)

انرژی ۳۰ استان چین در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ را ارزیابی و راندمان انرژی مناطق مختلف و تفاوت‌های آن‌ها را مورد تجزیه و تحلیل و رتبه‌بندی قرار داده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد که تفاوت‌های منطقه‌ای قابل توجهی در کارایی انرژی استان‌ها وجود دارد. بنابراین، فرمول‌بندی ذخیره انرژی و کاهش انتشار گازهای گل‌خانه‌ای باید به شرح کامل عوامل منطقه‌ای و تعامل بین منطقه‌ای پردازد و دولت برای مناطق مختلف، سیاست‌های متفاوت صرفه‌جویی در انرژی و کاهش انتشار را در نظر بگیرد. ساغلام^۱ (۲۰۱۸)، در مطالعه خود اقدام به مقایسه کارایی هفت تکنولوژی انرژی تجدیدپذیر اولیه تولیدکننده برق با استفاده از چهار روش تحلیل مختلف کارایی مجازی^۲، کارایی متقاطع^۳، ابرکارایی^۴ و روش تطبیق با الگو^۵ کرده است و نیز اقدام به رتبه‌بندی نیروگاه‌ها نموده است.

از میان مطالعات داخلی پورکاظمی و حیدری (۱۳۸۱)، در مطالعه خود با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها (CCR^۶-BCC)، اقدام به ارزیابی وضعیت کارایی نیروگاه‌های حرارتی کشور که بیش از ۹۰ درصد برق کشور را تولید می‌کنند، کرده‌اند و نتایج حاصل شده نشان می‌دهد که متوسط کارایی نیروگاه‌های حرارتی کشور تحت فرض بازده ثابت به مقیاس ۶۴ درصد و تحت فرض بازده متغیر به مقیاس ۷۸ درصد می‌باشد. فلاحی و احمدی (۱۳۸۴)، در پژوهش خود اقدام به محاسبه کارایی ۴۲ شرکت توزیع برق ایران در سال ۱۳۸۱ با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها کرده‌اند و رشد بهره‌وری مجموع عوامل، با استفاده از شاخص بهره‌وری مال‌کوئیسیت برای شرکت‌های مزبور در دوره زمانی ۱۳۷۰-۱۳۸۰ محاسبه شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که عدم کارایی مقیاس، مهم‌ترین عامل عدم کارایی شرکت‌های توزیع برق در ایران است. اکثر شرکت‌ها در ناحیه بازده به مقیاس فزاینده فعالیت می‌کنند و تحصیلات کارکنان تأثیر معنی‌داری بر مقادیر کارایی شرکت‌ها ندارد. علاوه بر این، رشد بهره‌وری مجموع عوامل شرکت‌های مزبور طی دوره زمانی مورد بررسی منفی است. مهم‌ترین دلیل رشد

¹ Saglam (2018)

² Virtual efficiency

³ Cross efficiency

⁴ Super efficiency

⁵ Benchmark ranking

⁶ Banker, R.D., Charnse, A. and Cooper, W.W.

منفی بهره‌وری شرکت‌ها، استفاده از تجهیزات فرسوده و از رده خارج در شرکت‌های توزیع است. جواهری و خامنه (۱۳۸۸)، در مطالعه خود اقدام به ارزیابی عملکرد نیروگاه‌های حرارتی کشور در سال ۱۳۸۲ با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها (مدل BCC) کرده‌اند. نتیجه این پژوهش نشان می‌دهد که نیروگاه‌های کشور در سال ۱۳۸۲ با شرط بازده متغیر به مقیاس، متوسط کارایی مدیریت نیروگاه برابر ۹۲/۵ درصد است، یعنی ما شاهد ۷/۵ درصد عدم کارایی مدیریت در سیستم نیروگاه‌های حرارتی هستیم که با برطرف کردن این عدم کارایی و با اصلاح شیوه‌های مدیریتی می‌توان ۷/۵ درصد در میزان استفاده از نهاده‌ها صرفه‌جویی کرد. شاهین و همکاران (۱۳۹۲)، در مطالعه خود به ارزیابی عملکرد و رتبه‌بندی نیروگاه‌های برق‌آبی کشور در سال ۱۳۹۰ با استفاده از تکنیک تحلیل پوششی داده‌ها (مدل CCR) و بر اساس آمار تفصیلی صنعت برق ایران پرداخته‌اند و طبق نتایج به دست آمده از مجموع ۳۰ واحد نیروگاهی مورد مطالعه، تنها شش نیروگاه کارا بوده و نتایج رتبه‌بندی نشان از رتبه یک برای نیروگاه مسجد سلیمان دارد. متفکر آزاد و همکاران (۱۳۹۳)، در پژوهشی به محاسبه سطح کارایی فنی نیروگاه‌های حرارتی ایران و بررسی عوامل مؤثر در این نیروگاه‌ها طی سال‌های ۱۳۷۸ تا ۱۳۹۰ پرداخته‌اند و برای این منظور از روش تصادفی ناپارامتریک پوششی داده‌ها (StoNED) استفاده کرده‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که اندازه و نرخ بهره‌برداری از ظرفیت اثر مثبت و عمر نیروگاه تأثیر منفی در کارایی فنی نیروگاه‌های حرارتی دارد. همچنین، نیروگاه‌ها با سوخت گاز به مراتب از کارایی بالاتری برخوردارند. یافته‌ها حاکی از آن است که تجدید ساختار بازار برق در سال ۱۳۸۲ اثر مثبت در کارایی فنی نیروگاه‌های حرارتی ایران داشته است. صدرائی جواهری و حسین استادزاد (۱۳۹۳) در مطالعه خود اقدام به برآورد کارایی نیروگاه‌های برق تجدیدپذیر و فسیلی با استفاده از داده‌های سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ و با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها (مدل CCR ورودی‌محور) کرده‌اند. طبق نتایج این مطالعه نیروگاه‌های برق در کشور براساس کارایی دسته‌بندی شده‌اند و براساس سناریوهای مختلف جهت بهبود کارایی نیروگاه‌ها توصیه‌های سیاستی ارائه شده است. جعفری، دیباچی و ایزدی-خواه (۱۳۹۶)، در پژوهشی اقدام به ارزیابی کارایی و رتبه‌بندی ۱۶ شرکت برق منطقه‌ای ایران (از سال ۸۵ تا ۹۳) با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها (مدل BCC و AP^۱) در

^۱ Anderson, P. and Peterson, N.C.

حالت غیرقطعی کرده‌اند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که در سطح $\alpha=0/45$ شرکت برق منطقه‌ای استان تهران دارای بالاترین رتبه کارایی و شرکت برق منطقه‌ای استان سیستان و بلوچستان دارای پایین‌ترین رتبه کارایی است. شفیع‌ی نیک‌آبادی و همکاران (۱۳۹۷)، در مطالعه خود اقدام به ارزیابی کارایی شرکت‌های برق منطقه‌ای ایران با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها (مدل BCC) و شبکه عصبی برای ۱۶ شرکت برق منطقه‌ای ایران برای سال‌های ۱۳۸۹-۱۳۹۴ کرده‌اند که نقطه قوت این پژوهش استفاده از شبکه عصبی مصنوعی با هدف تعیین مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار بر روی نمرات کارایی شرکت‌های برق منطقه‌ای است.

۳. روش تحقیق

در این مطالعه، هر یک از نیروگاه‌های برق به‌عنوان یک واحد تصمیم‌گیری (DMU) با ورودی‌ها و خروجی‌های مربوط به خود در نظر گرفته می‌شود. فرض کنید n تا DMU در دست است که هر کدام از آن‌ها دارای m تا ورودی و s تا خروجی هستند، به عبارت دیگر مجموعه شامل همه DMUها به صورت زیر است:

$$\{DMU_1, DMU_2, DMU_3, \dots, DMU_j, \dots, DMU_n\}$$

اگر DMU_p را از بین همه DMUهای موجود در مجموعه فوق به‌عنوان واحد تصمیم‌گیری تحت ارزیابی انتخاب کنیم:

مجموعه همه ورودی‌های DMU_p به صورت زیر است:

$$\{x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{pm}\}$$

و مجموعه همه خروجی‌های DMU_p به صورت زیر است:

$$\{y_{p1}, y_{p2}, \dots, y_{ps}\}$$

مدل زیر، مدل ابرکارایی خروجی محور لین و چن (۲۰۱۸) در حالت بازده به مقیاس متغیر (VRS) است که برای اندازه‌گیری ابرکارایی (SE) واحد تصمیم‌گیری p ام (DMU_p) استفاده می‌شود:

$$\begin{aligned} \min \quad & \max_r \{\beta_{rp}\} + M \times \max_i \{t_{ip}\} \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{j=1, j \neq p}^n x_{ij} \lambda_{jp} - t_{ip} x_{ip}^{max} \leq x_{ip} \quad , \quad i = 1, \dots, m \quad (I) \\ & \sum_{j=1, j \neq p}^n y_{rj} \lambda_{jp} + \beta_{rp} y_r^{max} = y_{rp} \quad , \quad r = 1, \dots, s \quad (II) \quad (4) \end{aligned}$$

$$\sum_{j=1, j \neq p}^n \lambda_{jp} = 1 \quad (III)$$

$$\lambda_{jp} \geq 0, \quad j = 1, \dots, n, \quad j \neq p$$

$$t_{ip} \geq 0, \quad i = 1, \dots, m$$

$$\beta_{rp} \text{ is free}, \quad r = 1, \dots, s$$

در تابع هدف، M یک عدد مثبت به اندازه کافی بزرگ است که توسط استفاده‌کنندگان از مدل تعیین می‌شود و به‌عنوان نمونه در مقاله لی و زو^۱ (۲۰۱۲)، برابر 10^5 در نظر گرفته شده است و در این مقاله 10^9 در نظر گرفته شده است و دلیل این انتخاب این است که عدد 10^9 از مقادیر همه داده‌های ورودی و خروجی مربوط به همه DMUها بزرگتر است و حضور M به اندازه کافی بزرگ به‌عنوان یک ضریب عددی متغیرهای ورودی در تابع هدف باعث می‌شود که از حرکت واحدهای ناکارا به سوی مرز کارایی در راستای محور ورودی‌ها جلوگیری شده و در نتیجه مدل، تبدیل به یک مدل خروجی-محور شود و مدل فوق به دلیل غیرخطی بودن تابع هدف، غیرخطی محسوب می‌شود. کارایی $t_{ip} x_{ip}^{max}$ نشان‌دهنده توان یا امکان ذخیره‌سازی ورودی نام DMU_p نسبت به مرز کارایی جدید تشکیل شده به‌وسیله بقیه DMUها بعد از حذف DMU_p از مجموعه همه DMUها است. همچنین $\beta_{rp} y_r^{max}$ نشان‌دهنده مازاد تولید در خروجی یا ستانده نام DMU_p نسبت به مرز کارایی جدید تشکیل شده به‌وسیله بقیه DMUها بعد از حذف DMU_p از مجموعه همه DMUها است. لذا t_{ip} و β_{rp} به‌منزله scale یا مقیاس برای رساندن DMU_p به مرز کارایی جدید تشکیل شده به‌وسیله بقیه DMUها بعد از حذف DMU_p از مجموعه همه DMUها به ترتیب در راستای ورودی‌ها و در راستای خروجی‌ها است. تابع هدف نیز یک تابع ترکیبی از ماکزیمم t_{ip} ها (ماکزیمم m تا مقیاس متناظر با m تا ورودی DMU_p در رسیدن به مرز کارایی جدید) با ضریب وزنی M و ماکزیمم β_{rp} ها (ماکزیمم s تا مقیاس متناظر با s تا خروجی DMU_p در رسیدن به مرز کارایی جدید) با ضریب وزنی ۱ است و هدف از مینیمم کردن این ترکیب وزنی، دست یافتن به یک مقدار ابرکارایی (SE) منحصر به فرد است.

به دلیل اینکه کار کردن با مدل‌های خطی به مراتب ساده‌تر از مدل‌های غیرخطی است، لذا در ادامه اقدام به خطی کردن تابع هدف در مدل فوق شده است و همان‌طور که از

¹ Lee, H. S., & Zhu, J. (2012)

مدل (۴) مشهود است محدودیت‌های مدل همگی خطی هستند و در نتیجه مشکلی در راستای خطی بودن مدل ایجاد نمی‌کنند.

به منظور حذف توابع max در تابع هدف که علت غیرخطی بودن تابع هدف می‌باشد، مقادیر T_p و β_p را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$T_p = \max_i \{t_{ip}\} \quad , \quad i = 1, \dots, m$$

$$\beta_p = \max_r \{\beta_{rp}\} \quad , \quad r = 1, \dots, s$$

پس به ازای هر i به قسمی که $i = 1, \dots, m$ همه t_{ip} ها کوچکتر یا مساوی T_p خواهند بود، لذا داریم:

$$t_{ip} \leq T_p \quad , \quad i = 1, \dots, m \quad (\Delta)$$

لذا در راستای خطی‌سازی تابع هدف، متغیر T_p به جای عبارت $\max_i \{t_{ip}\}$ در تابع هدف قرار گرفته و در عوض قید (Δ) به مجموعه محدودیت‌های مدل افزوده می‌شود. همچنین به طور مشابه برای هر $r = 1, \dots, s$ همه β_{rp} ها کوچکتر یا مساوی β_p خواهند بود، بنابراین داریم:

$$\beta_{rp} \leq \beta_p \quad , \quad r = 1, \dots, s \quad (\epsilon)$$

لذا به منظور خطی‌سازی تابع هدف، متغیر β_p به جای عبارت $\max_r \{\beta_{rp}\}$ در تابع هدف قرار گرفته و در عوض قید (ϵ) به مجموعه محدودیت‌های مدل اضافه می‌شود. در نتیجه مدل خطی زیر را داریم:

$$\begin{aligned} \min \quad & \beta_p + M \times T_p \\ \text{s. t.} \quad & t_{ip} - T_p \leq 0 \quad , \quad i = 1, \dots, m \\ & \beta_{rp} - \beta_p \leq 0 \quad , \quad r = 1, \dots, s \\ & \sum_{j=1, j \neq p}^n x_{ij} \lambda_{jp} - t_{ip} x_{ip}^{\max} \leq x_{ip} \quad , \quad i = 1, \dots, m \quad (I) \\ & \sum_{j=1, j \neq p}^n y_{rj} \lambda_{jp} + \beta_{rp} y_r^{\max} = y_{rp} \quad , \quad r = 1, \dots, s \quad (II) \quad (\gamma) \\ & \sum_{j=1, j \neq p}^n \lambda_{jp} = 1 \quad (III) \\ & \lambda_{jp} \geq 0 \quad , \quad j = 1, \dots, n \quad , \quad j \neq p \\ & t_{ip} \geq 0 \quad , \quad i = 1, \dots, m \\ & \beta_{rp} \text{ is free} \quad , \quad r = 1, \dots, s \end{aligned}$$

و همچنین رابطه‌های زیر برقرار است:

$$x_i^{\max} = \max_{j=1, \dots, n} \{x_{ij}\} \quad , \quad i = 1, \dots, m$$

$$y_r^{\max} = \max_{j=1, \dots, n} \{y_{rj}\} \quad , \quad r = 1, \dots, s$$

محدودیت نامساوی (I)، خود شامل m تا قید برای ورودی‌ها است و محدودیت تساوی (II)، خود شامل S تا قید برای خروجی‌ها است و محدودیت شماره (III)، محدودیت مربوط به شرط بازده به مقیاس متغیر (VRS) است که اگر از مدل فوق حذف شود مدل ارائه شده تبدیل به یک مدل با بازده به مقیاس ثابت (CRS) می‌شود. آزاد بودن S تا متغیر β_{rp} به این مفهوم است که این متغیرها محدودیتی از نظر علامت ندارند و این آزاد بودن به علت خروجی محور بودن مدل است. t_{ip} ها که اندیس i مقادیر 1 تا m را اختیار می‌کند و β_{rp} ها که اندیس r مقادیر 1 تا s را اختیار می‌کند و λ_{jp} ها که اندیس j مقادیر 1 تا n را به خود می‌گیرد، متغیرهایی (وزن‌هایی برای ورودی‌ها و خروجی‌ها) هستند که مدل ابرکارایی فوق اقدام به ارزیابی آن‌ها به منظور تعیین رتبه کارایی واحد تصمیم‌گیری تحت ارزیابی می‌کند. $\beta_{rp} y_r^{\max}$ در قید (II) مقدار مازاد یا کمبود λ_{jp} خروجی DMU_p را اندازه می‌گیرد و نیز $t_{ip} x_i^{\max}$ در قید (I) مقدار مازاد یا کمبود λ_{jp} ورودی DMU_p را اندازه می‌گیرد. در مدل‌های ابرکارایی DMU تحت ارزیابی بایستی از مجموعه همه DMU ها کنار گذاشته شود، لذا در قیدهای (I)، (II) و (III)، DMU_p از مجموعه n تا DMU موجود کنار گذاشته شده است. به عبارت دیگر DMU تحت ارزیابی خودش نمی‌تواند به عنوان واحد مرجع (الگو) شناخته شود.

در این مقاله، به منظور ارزیابی کارایی نیروگاه‌ها و رتبه‌بندی آن‌ها از دو نهاد (ورودی) و یک ستانده (خروجی) برای واحدهای تصمیم‌گیری استفاده می‌شود. منبع اخذ داده‌ها، سایت رسمی شرکت توانیر، گزارش‌های آماری صنعت برق است.

نهاد ۱: ظرفیت نصب‌شده (به منزله جایگزین نهاد سرمایه)

نهاد ۲: میزان سوخت مصرفی (بر حسب بی‌تی‌یو)

ستانده: میزان برق تولیدی نیروگاه‌ها (بر حسب مگاوات ساعت)

قدرت نامی یک دستگاه توربین یا دستگاه تولیدی نیروی محرکه از طرف سازنده بر روی پلاک مشخصات آن برای شرایط معینی بر حسب اسب‌بخار یا مگاوات نوشته شده است. علت استفاده از نهاد قدرت نامی به جای نهاد سرمایه، در دسترس نبودن داده‌های مربوط به نهاد سرمایه است.

میزان سوخت مصرفی نیروگاه‌ها به عنوان یک نهاد مهم و تعیین‌کننده در میزان تولید نیروگاه‌های حرارتی، شامل سه نوع سوخت مختلف است که عبارتند از:

۱. گازوئیل (برحسب لیتر)

۲. گاز (برحسب مترمکعب)

۳. نفت کوره (برحسب لیتر)

به دلیل اینکه واحد اندازه‌گیری این سه نوع سوخت با هم متفاوت است، لذا بایستی ابتدا عمل یکسان‌سازی واحد اندازه‌گیری روی داده‌ها صورت بگیرد و همه آن‌ها به واحد BTU تبدیل بشوند. پس از یکسان‌سازی واحد، هر سه نوع سوخت را با هم جمع کرده و تحت عنوان یک ورودی به نام سوخت مصرفی با واحد بی‌تی‌یو در نظر می‌گیریم. تولید ویژه که به‌عنوان تنها خروجی هر واحد تصمیم‌گیرنده در نظر گرفته می‌شود و عبارت است از تولید انرژی برق ناویژه منهای مصرف داخلی نیروگاه‌ها در یک دوره معین و برحسب کیلووات ساعت یا مگاوات ساعت محاسبه می‌شود که آن هم به واحد بی‌تی‌یو تبدیل می‌شود.

برای محاسبه مقادیر ابرکارایی به‌صورت زیر اقدام می‌کنیم:

$$\begin{aligned} \tilde{t}_p &= \begin{cases} 1 + \sum_{i \in \hat{I}_p} \tilde{t}_{ip}^* / |\hat{I}_p| & , \text{ if } |\hat{I}_p| > 0 \\ 0 & , \text{ if } |\hat{I}_p| = 0 \end{cases} \\ o_p^+ &= \begin{cases} 2 / (2 - \sum_{r \in R_p^+} \frac{\tilde{\beta}_{rp}^*}{|R_p^+|}) & , \text{ if } |R_p^+| > 0 \\ 0 & , \text{ if } |R_p^+| = 0 \end{cases} \quad (\lambda) \\ o_p^- &= \begin{cases} 2 / (2 - \sum_{r \in R_p^- \cup R_p^0} \frac{\tilde{\beta}_{rp}^*}{|R_p^-| + |R_p^0|}) & , \text{ if } |R_p^+| = 0 \\ 0 & , \text{ if } |R_p^+| > 0 \end{cases} \end{aligned}$$

که در آن

$$\begin{aligned} \hat{I}_p &= \{i | \tilde{t}_{ip}^* > 0, i = 1, \dots, m\} \\ R_p^+ &= \{r | \tilde{\beta}_{rp}^* > 0, r = 1, \dots, s\} \\ R_p^- &= \{r | \tilde{\beta}_{rp}^* < 0, r = 1, \dots, s\} \\ R_p^0 &= \{r | \tilde{\beta}_{rp}^* = 0, r = 1, \dots, s\} \end{aligned}$$

مقدار ابرکارایی SE به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{1}{\varphi_p} = \hat{t}_p + o_p^+ + o_p^-$$

DMU_p کارای VRS است اگر و تنها اگر یکی از دو شرط زیر برقرار باشد:

(۱) φ_P برابر با یک است، $|R_p^-| = |R_p^+| = 0$ و همه slack‌های مدل برابر با صفر باشند.

(۲) φ_P کمتر از یک است.

در غیر این صورت، DMU_p ناکارای VRS است.

در ادامه به شرح مدل LJK به‌عنوان دومین مدل ابرکارایی در این مقاله پرداخته می‌شود.

ابتدا با مدل CCR مقدار کارایی همه DMUها را به‌دست می‌آید، بدیهی است که با حل مدل CCR مقدار کارایی برای همه DMUهای کارا (شامل DMUهای کارای رأسی و غیررأسی) برابر یک می‌شود و لذا در ادامه با حل مدل ابرکارایی LJK برای همه DMUهای کارا که مقدار کارایی آنها توسط مدل CCR برابر یک شده است مقدار ابرکارایی و لذا رتبه دقیق برای آنها به‌دست می‌آید.

مدل CCR عبارتست از:

$$\begin{aligned} \min \quad & \theta \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \leq \theta x_{io} \quad , \quad i = 1, \dots, m \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} \geq y_{ro} \quad , \quad r = 1, \dots, s \\ & \lambda_j \geq 0 \quad , \quad j = 1, \dots, n \\ & \theta \text{ is free} \end{aligned} \quad (9)$$

و مدل LJK که برای به‌دست آوردن رتبه DMUهای کارا مورد استفاده قرار می‌گیرد به‌صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \min \quad & 1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_{i2}^+}{R_i^-} \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_{i1}^- - s_{i2}^+ = x_{io} \quad , \quad i = 1, \dots, m \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = y_{ro} \quad , \quad r = 1, \dots, s \\ & \lambda_j \geq 0 \quad , \quad j = 1, \dots, n \quad , \quad j \neq 0 \\ & s_{i1}^-, s_{i2}^+ \geq 0 \quad , \quad i = 1, \dots, m \\ & s_r^+ \geq 0 \quad , \quad r = 1, \dots, s \end{aligned} \quad (10)$$

قابل توجه است که در جواب بهینه از میان متغیرهای کمبود و مازاد s_{i1}^- و s_{i2}^+ فقط یکی می‌تواند مقدار مثبت بگیرد. در حقیقت در مدل (۱۰) می‌توان به جای $s_{i1}^- - s_{i2}^+$ از متغیر آزاد s استفاده کرد ولی این عمل احتمالاً منجر به نشدنی بودن مدل خواهد شد، لذا تأکید می‌شود که به همین صورت مورد استفاده قرار گیرد.

۴. داده‌ها و یافته‌های تحقیق

در این مقاله رتبه‌بندی کارایی برای ۵۲ نیروگاه حرارتی کشور ایران با استفاده از دو نوع مدل ابرکارایی (مدل ابرکارایی لین و چن و مدل ابرکارایی LJK) انجام شده است که در بخش قبل به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت و در ادامه نتایج حاصل از دو روش مورد مقایسه و بحث قرار گرفته است و برای این منظور از داده‌های شرکت توانیر استفاده شده است و برای انجام محاسبات از نرم‌افزار WINQSB استفاده شده است. لازم به ذکر است که حروف اختصاری در مقابل نام نیروگاه‌ها در جدول ۱ به صورت زیر معرفی می‌شود:

(ب: بادی، گ: گازی، چ: چرخه ترکیبی، د: دولتی، خ: خصوصی)

نتایج کلی برای ۵۲ نیروگاه حرارتی در سال ۱۳۹۵ به صورت زیر است:

جدول ۱: رتبه و مقادیر کارایی کل نیروگاه‌ها بدست آمده از مدل ابرکارایی لین و چن و مدل

ابرکارایی LJK

مقادیر ابرکارایی (L&CH)	رتبه (L&CH)	مقادیر ابرکارایی (LJK)	رتبه (LJK)	نام نیروگاه
۱/۰۱۱۸۵	۲۲	۰/۸۹۸۴	۹	سهند (ب-د)
۰/۴۹۹۵۳۷۷۰۲	۴	۰/۶۴۳۱	۳۳	شهید فیروزی (طرشت) (ب-د)
۰/۴۹۴۴۷۳۷۶۸	۲	۱/۰۰۴۵۵	۲	بعثت (ب-د)
۱/۰۱۷۲	۲۷	۰/۷۱۶۱	۲۴	شهید بهشتی (لوشان) (ب-د)
۰/۴۹۶۵۲۶۴۶۵	۳	۰/۸۰۳۳	۱۵	زرند (ب-د)
۱/۰۶۴۴	۴۶	۰/۷۶۲۱	۲۱	شازند (ب-د)
۱/۰۴۶۶	۴۱	۰/۷۰۳۷	۲۵	اصفهان (اسلام آباد) (ب-د)
۱/۰۴۴۳	۳۹	۰/۷۸۷۸	۱۸	شهید مفتاح (همدان) (ب-د)
۱/۰۴۷۴	۴۲	۰/۸۲۳۰	۱۳	رامین (اهواز) (ب-د)
۱/۰۸۷۵	۵۲	۰/۸۲۳۰	۱۲	بندر عباس (ب-د)
۰/۴۸۵۵۹۲۸۳۳	۱	۰/۹۵۲۷	۵	بیستون (ب-د)
۱/۰۳۳۴۵	۳۵	۰/۹۱۶۳	۷	شهید رجایی (ب-د)
۱/۰۵۷۶۵	۴۴	۰/۷۹۶۳	۱۶	شهید سلیمی (نکا) (ب-د)
۱/۰۱۸۱	۲۸	۰/۷۶۵۱	۲۰	ایرانشهر (ب-د)
۱/۰۰۲۴۵	۱۶	۰/۴۶۴۵	۴۸	صوفیان (گ-د)
۱/۰۰۱۶	۱۴	۰/۴۸۳۰	۴۵	ارومیه (گ-د)
۱/۰۰۱۳۵	۱۳	۰/۵۷۹۹	۳۸	هسا (گ-د)
۱/۰۰۲	۱۵	۰/۴۳۱۹	۵۰	درود (گ-د)
۱/۰۴۳۸	۳۸	۰/۵۰۲۸	۴۳	ری (گ-د)
۱/۰۰۴	۱۷	۰/۵۰۴۱	۴۲	قائن (گ-د)
۱/۰۵۳۹۵	۴۳	۰/۶۷۵۸	۲۷	شهید کاوه (گ-د)
۱/۰۴۶۵	۴۰	۰/۷۳۶۵	۲۳	شیروان (گ-د)
۱/۰۲۶۷۵	۳۲	۰/۶۴۳۶	۳۲	بسطامی (شاهرود) (گ-د)
۱/۰۱۸۲۵	۲۹	۰/۶۰۵۳	۳۶	کیش (گ-د)
۱/۰۷۷۷	۵۰	۰/۶۷۳۰	۲۸	خلیج فارس (هرمزگان) (گ-د)
۱/۰۱۸۵	۳۰	۰/۳۸۰۸	۵۲	کنارک (چابهار) (گ-د)
۱/۰۱۳۷	۲۴	۰/۶۵۰۵	۳۱	کنگان (گ-د)
۰/۴۹۹۸۶۱۷۷۴	۵	۰/۴۵۷۵	۴۹	بوشهر (گ-د)

۱/۰۰۸۲۵	۲۰	۰/۵۷۶۶	۳۹	شهید بهشتی (لوشان) (گ-د)
۱/۰۳۱۳	۳۴	۰/۴۱۴۲	۵۱	زاهدان (گ-د)
۰/۹۹۹۷۵	۱۰	۰/۵۴۱۳	۴۱	بندر عباس (گ-د)
۰/۹۹۹۵	۹	۰/۷۴۱۸	۲۲	شیراز (گ-د)
۱/۰۰۴۲	۱۸	۰/۵۰۱۸	۴۴	یزد (گ-د)
۱/۰۲۳۰۵	۳۱	۰/۸۶۸۳	۱۰	شهید رجایی (چ-د)
۰/۸۹۶۱۵	۷	۰/۹۵۱۸	۶	کرمان (چ-د)
۱/۰۰۰۱۵	۱۲	۰/۹۹۵۲	۳	شهید سلیمی (نکا) (چ-د)
۰/۹۹۹۸۵	۱۱	۰/۹۷۷۱	۴	یزد (چ-د)
۱/۰۱۳۰۵	۲۳	۰/۸۲۲۸	۱۴	زرگان (شهید مدحج) (ب-خ)
۱/۰۱	۲۱	۰/۵۴۶۳	۴۰	زرگان (شهید مدحج) (گ-خ)
۱/۰۷۸۲	۵۱	۰/۶۵۹۷	۳۰	جنوب اصفهان (چهل‌ستون) (گ-خ)
۱/۰۳۶۳۵	۳۶	۰/۷۹۵۶	۱۷	رودشور (گ-خ)
۱/۰۴۱۶۵	۳۷	۰/۷۸۷۸	۱۹	عسلویه (گ-خ)
۱/۰۶۴۱	۴۵	۰/۶۰۵۴	۳۵	فردوسی (گ-خ)
۱/۰۰۴۵۵	۱۹	۰/۴۷۶۸	۴۶	کهنوج (گ-خ)
۱/۰۷۶۸۵	۴۹	۰/۶۷۱۱	۲۹	خرمشهر (گ-خ)
۱/۰۳۰۹۵	۳۳	۰/۶۱۹۹	۳۴	کاشان (گ-خ)
۰/۴۹۹۸۷۴۷۲۹	۶	۰/۴۶۷۶	۴۷	نوشهر (گ-خ)
۱/۰۷۳۹	۴۸	۰/۶۰۵۱	۳۷	گلستان (گ-خ)
۱/۰۶۸۷۵	۴۷	۰/۶۹۸۶	۲۶	حافظ (گ-خ)
۰/۹۸۶۱۵	۸	۱/۰۱۶۱۵	۱	زواره (چ-خ)
۱/۰۱۶۴۵	۲۶	۰/۹۰۵۶	۸	پره سر (چ-خ)
۱/۰۱۶	۲۵	۰/۸۶۶۳	۱۱	تولید پراکنده (گ-خ)
	۲۴/۴۳۲۴		۲۶/۵۹۴۶	میانگین رتبه بخش دولتی
	۳۱/۶		۲۶/۲۶۶۷	میانگین رتبه بخش خصوصی
	۲۷/۲۶۶۷		۱۵/۶	میانگین نیروگاه‌های بخاری
	۲۸/۱۹۳۵		۳۵/۸۷۰۹۷	میانگین نیروگاه‌های گازی
	۱۵/۸۳۳۳		۵/۳۳۳۳	میانگین نیروگاه‌های چرخه ترکیبی

منبع: یافته‌های تحقیق

همان‌طور که مشاهده می‌کنیم میانگین رتبه نیروگاه‌های دولتی با استفاده از روش لین و چن بهتر از میانگین رتبه نیروگاه‌های خصوصی است ولی با استفاده از روش LJK میانگین رتبه نیروگاه‌های خصوصی بهتر از نیروگاه‌های دولتی است و اگر بخواهیم مقایسه‌ای بین میانگین رتبه سه نوع نیروگاه حرارتی انجام دهیم در هر دو روش میانگین رتبه نیروگاه‌های چرخه ترکیبی بهتر از نیروگاه‌های بخاری و آن هم بهتر از نیروگاه‌های گازی شده است که این نشان‌دهنده بالا بودن بازده و توان نیروگاه‌های چرخه ترکیبی است. علت این امر آن است که نیروگاه‌های سیکل ترکیبی در واقع ترکیبی از توربین بخار و توربین گازی هستند به نحوی که ژنراتور توربین گازی، برق را تولید می‌کند و در عین حال انرژی حرارتی تلف شده از توربین گاز (توسط محصولات احتراق) برای تولید بخار مورد نیاز توربین بخار مورد استفاده قرار می‌گیرد و به این طریق برق اضافی تولید می‌شود. به عبارت دیگر، نیروگاه‌های سیکل ترکیبی راه‌حل بسیار کارآمد، انعطاف‌پذیر، قابل اعتماد، مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست برای تولید برق است. یکی از عمده‌ترین دلایل ناکارآتر بودن نیروگاه‌های گازی پایین بودن تولید (خروجی) نیروگاه‌های گازی در مقایسه با نیروگاه‌های دیگر است. از نیروگاه‌های گازی به دلیل بالا بودن قیمت تمام شده برق تولیدی توسط آن‌ها، معمولاً در بار پیک استفاده می‌شود و این نیروگاه‌ها مدام در حال ورود و خروج به شبکه تولید می‌باشند و به دلیل اینکه برای کاهش فعالیت نیروگاه فقط نهاده سوخت قابل کاهش است و نهاده ظرفیت نیروگاه قابل تغییر نیست لذا تولید در سطح متناسب با ظرفیت نیروگاه صورت نمی‌گیرد و این باعث کاهش کارایی نیروگاه‌های گازی در مقایسه با سایر نیروگاه‌ها می‌شود. هر چه از عدد ۱ به سمت عدد ۵۲ حرکت می‌کنیم از میزان کارایی نیروگاه‌ها کاسته شده و بر میزان ناکارآمدی آن‌ها افزوده می‌شود. لذا با استفاده از روش ابرکارایی رتبه‌بندی لین و چن نیروگاه بیستون با رتبه اول و بندرعباس با رتبه ۵۲م به ترتیب به- عنوان کاراترین و ناکارآترین واحدها شناخته شده‌اند. همچنین با استفاده از مدل ابرکارایی LJK همان‌طور که از جدول ۱ قابل مشاهده است نیروگاه زواره با رتبه ۱ و کنارک چابهار با رتبه ۵۲م به ترتیب به عنوان کاراترین و ناکارآترین نیروگاه‌ها شناخته شده‌اند. رتبه دو نیروگاه بعثت و بسطامی شاهرود در هر دو مدل یکسان است و ۱۲ نیروگاه دارای اختلاف رتبه کمتر از ۱۰ واحد در دو مدل هستند. نکته قابل توجه این است که در مدل لین و چن کاراترین و ناکارآترین واحد هر دو از بین نیروگاه‌های بخاری

دولتی انتخاب شده است ولی در مدل LJK کاراترین واحد از بین نیروگاه‌های چرخه ترکیبی بخش خصوصی و ناکارآمدترین واحد از بین نیروگاه‌های گازی بخش دولتی است. از این رو به نظر می‌رسد که نتایج مدل LJK نسب به مدل لین و چن با واقعیت مطابقت بیشتری دارد.

جدول ۲: رتبه نیروگاه‌های دولتی به دست آمده از مدل ابرکارایی لین و چن و مدل

ابرکارایی LJK

رتبه (L & CH)	رتبه (LJK)	نام نیروگاه
۲۰	۷	سهند (ب-د)
۳۴	۲۴	شهید فیروزی (طرشت) (ب-د)
۳۶	۱	بعثت (ب-د)
۱۸	۱۸	شهید بهشتی (لوشان) (ب-د)
۳۵	۱۱	زرنند (ب-د)
۳	۱۵	شازند (ب-د)
۷	۱۹	اصفهان (اسلام آباد) (ب-د)
۹	۱۳	شهید مفتح (همدان) (ب-د)
۶	۱۰	رامین (اهواز) (ب-د)
۱	۹	بندر عباس (ب-د)
۳۷	۴	بیستون (ب-د)
۱۱	۶	شهید رجایی (ب-د)
۴	۱۲	شهید سلیمی (نکا) (ب-د)
۱۷	۱۴	ایران شهر (ب-د)
۲۴	۳۳	صوفیان (گ-د)
۲۶	۳۲	ارومیه (گ-د)
۲۷	۲۶	هسا (گ-د)
۲۵	۳۵	درود (گ-د)
۱۰	۳۰	ری (گ-د)
۲۳	۲۹	قائن (گ-د)
۵	۲۰	شهید کاوه (گ-د)
۸	۱۷	شیروان (گ-د)
۱۳	۲۳	بسطامی (شاهرود) (گ-د)
۱۶	۲۵	کیش (گ-د)
۲	۲۱	خلیج فارس (هرمزگان) (گ-د)
۱۵	۳۷	کنارک (چابهار) (گ-د)
۱۹	۲۲	کنگان (گ-د)
۳۳	۳۴	بوشهر (گ-د)
۲۱	۲۷	شهید بهشتی (لوشان) (گ-د)

۱۲	۳۶	زاهدان (گ-د)
۳۰	۲۸	بندر عباس (گ-د)
۳۱	۱۶	شیراز (گ-د)
۲۲	۳۱	یزد (گ-د)
۱۴	۸	شهید رجائی (چ-د)
۳۲	۵	کرمان (چ-د)
۲۸	۲	شهید سلیمی (نکا) (چ-د)
۲۹	۳	یزد (چ-د)
۱۷	۱۱/۶۴۲۸	میانگین نیروگاه‌های بخاری دولتی
۱۹/۰۵۲۶	۲۷/۴۷۳۷	میانگین نیروگاه‌های گازی دولتی
۲۵/۷۵	۴/۵	میانگین نیروگاه‌های سیکل ترکیبی دولتی

منبع: یافته‌های تحقیق

همان‌طور که از جدول ۲ مشهود است با استفاده از مدل رتبه‌بندی لین و چن نیروگاه بخاری بندرعباس به‌عنوان کاراترین و نیروگاه بخاری بیستون به‌عنوان ناکارترین نیروگاه شناسایی شده است و با استفاده از مدل رتبه‌بندی LJK نیروگاه بخاری بعثت و نیروگاه گازی چابهار به ترتیب به‌عنوان کاراترین و ناکارترین نیروگاه‌ها شناسایی شده‌اند. همچنین شایان ذکر است که نیروگاه بخاری دولتی شهید بهشتی لوشان تنها نیروگاهی است که در هر دو مدل دارای رتبه یکسان ۱۸ است. با استفاده از مدل لین و چن عملکرد نیروگاه‌های بخاری دولتی بهتر از گازی دولتی و آن هم بهتر از سیکل ترکیبی دولتی بوده است و با استفاده از مدل LJK نیروگاه‌های سیکل ترکیبی دولتی کاراتر از بخاری دولتی و آن هم کاراتر از گازی دولتی شده است. لذا مشاهده می‌شود که نتایج مدل LJK در مقایسه با نتایج مدل لین و چن به واقعیت نزدیک‌تر است.

جدول ۳: رتبه نیروگاه‌های خصوصی به‌دست آمده از مدل ابرکارایی لین و چن و مدل

ابرکارایی LJK

رتبه (L & CH)	رتبه (LJK)	نام نیروگاه
۱۱	۴	زرگان (شهید مدحج) (ب-خ)
۱۲	۱۳	زرگان (شهید مدحج) (گ-خ)
۱	۹	جنوب اصفهان (چهل‌ستون) (گ-خ)
۷	۵	رودشور (گ-خ)
۶	۶	عسلویه (گ-خ)
۵	۱۱	فردوسی (گ-خ)
۱۳	۱۴	کهنوج (گ-خ)
۲	۸	خرمشهر (گ-خ)

۸	۱۰	کاشان (گ-خ)
۱۵	۱۵	نوشهر (گ-خ)
۳	۱۲	گلستان (گ-خ)
۴	۷	حافظ (گ-خ)
۱۴	۱	زواره (چ-خ)
۹	۲	پره‌سر (چ-خ)
۱۰	۳	تولید پراکنده (گ-خ)
۱۱	۴	میانگین نیروگاه‌های بخاری خصوصی
۷/۱۶۶۷	۹/۴۱۶۷	میانگین نیروگاه‌های گازی خصوصی
۱۱/۵	۱/۵	میانگین نیروگاه‌های سیکل ترکیبی خصوصی

منبع: یافته‌های تحقیق

همان‌طور که از جدول ۳ مشهود است با استفاده از مدل رتبه‌بندی لین و چن نیروگاه گازی جنوب اصفهان (چهل‌ستون) به‌عنوان کاراترین و نیروگاه گازی نوشهر به‌عنوان ناکاراترین نیروگاه در بین نیروگاه‌های خصوصی شناسایی شده است و با استفاده از مدل رتبه‌بندی LJK نیروگاه سیکل ترکیبی زواره و نیروگاه گازی نوشهر به‌ترتیب به‌عنوان کاراترین و ناکاراترین نیروگاه‌های خصوصی شناسایی شده‌اند. همچنین شایان ذکر است که نیروگاه‌های گازی عسلویه و نوشهر تنها نیروگاه‌هایی هستند که در هر دو مدل دارای رتبه یکسان هستند. با استفاده از مدل لین و چن عملکرد نیروگاه‌های گازی خصوصی بهتر از بخاری خصوصی و آن هم بهتر از سیکل ترکیبی خصوصی بوده است و با استفاده از مدل LJK نیروگاه‌های سیکل ترکیبی خصوصی کاراتر از بخاری خصوصی و آن هم کاراتر از گازی خصوصی شده است. لذا مشاهده می‌شود در مورد نیروگاه‌های خصوصی نیز نتایج مدل LJK در مقایسه با نتایج مدل لین و چن به واقعیت نزدیک‌تر است.

۵. نتیجه‌گیری

این مقاله اقدام به رتبه‌بندی کارایی نیروگاه‌های حرارتی ایران با استفاده از مدل ابرکارایی لین و چن و مدل ابرکارایی LJK کرده است مطابق نتایج به‌دست آمده و در مقام مقایسه، هرچه مقدار ابرکارایی از لحاظ قدر مطلق بزرگتر باشد میزان کارایی

افزایش می‌یابد و به عبارت دیگر واحد مزبور کاراتر می‌شود (لین و چن (۲۰۱۸)^۱). نتایج حاصل نشان می‌دهند که با استفاده از هر دو روش و با دسته‌بندی نیروگاه‌ها، نیروگاه‌های سیکل ترکیبی از نظر کارایی معمولاً رتبه‌های بهتر و نیروگاه‌های گازی رتبه‌های پایین‌تری را کسب کرده‌اند و با تقسیم‌بندی نیروگاه‌ها به دو بخش دولتی و خصوصی، نتایج به دست آمده حاکی از آن است که با استفاده از مدل لین و چن نیروگاه‌های بخش دولتی و با استفاده از مدل LJK نیروگاه‌های بخش خصوصی دارای عملکرد بهتری بوده‌اند. در مدل لین و چن کاراترین و ناکاراترین واحد هر دو از بین نیروگاه‌های بخاری دولتی انتخاب شده‌اند ولی در مدل LJK کاراترین واحد از بین نیروگاه‌های چرخه ترکیبی بخش خصوصی و ناکاراترین واحد از بین نیروگاه‌های گازی بخش دولتی انتخاب شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق، مدل LJK نسبت به مدل لین و چن با دنیای واقعیت مطابقت بیشتری دارد.

با توجه به نتایج رتبه‌بندی کارایی به دست آمده، مسئولان امر می‌توانند با شناسایی واحدهای ناکارا، اقدام به بررسی و شناسایی عوامل به وجود آورنده ناکارایی نموده و با توجه به شرایط، امکانات و زیرساخت‌های موجود اقدام به کاستن میزان ناکارایی و یا به عبارت دیگر افزایش کارایی و بهره‌وری نیروگاه مورد نظر بنمایند. در این راستا، با توجه به ثابت بودن نهاده قدرت نامی، حرکت به سمت کارایی و لذا دستیابی به بهره‌وری بیشتر می‌تواند با کاهش نهاده باقی‌مانده دیگر یعنی سوخت مصرفی و یا افزایش خروجی یعنی برق تولیدی به دست آید. همچنین با توجه به میانگین رتبه‌ای که انواع نیروگاه‌های حرارتی (بخاری، گازی و چرخه ترکیبی) به دست آورده‌اند، می‌توان تصمیمات کارا جهت جایگزینی آن‌ها با یکدیگر را اتخاذ نمود.

¹ Chen,Z Lin,R. (2018)

فهرست مطالب

۱. ابراهیمی‌مهر، محمدرضا (۱۳۸۹)، مقدمه‌ای بر تجزیه و تحلیل کارایی و بهره‌وری، تیم کوئلی، مؤسسه مطالعات و پژوهش‌های بازرگانی.
۲. اسفندیار، محمد، فلاح جلودار، مهدی، و درویش متولی، محمدحسین (۱۳۹۰). طراحی مدل تلفیقی برای ارزیابی عملکرد کارکنان دانشگاه‌ها با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها و مجموعه‌های فازی. *فصل‌نامه پژوهشگر (مدیریت)*، (۸)، ۲۲-۲۴، ۳۵-۲۴.
۳. پورکاظمی، محمدحسین، و حیدری، کیومرث (۱۳۸۱). استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) در ارزیابی کارایی نیروگاه‌های حرارتی تولید برق کشور. *مجله مدرس علوم انسانی*، ۶(۱)، ۳۵-۵۴.
۴. جعفری، فتانه، دیباچی، حسین، و ایزدی‌خواه، محمد (۱۳۹۶). ارزیابی کارایی و رتبه‌بندی شرکت‌های برق منطقه‌ای ایران با استفاده از DEA تصاعدی در حضور توزیع نرمال. *دهمین کنفرانس بین‌المللی انجمن تحقیق در عملیات ایران. بابلسر: انجمن ایرانی تحقیق در عملیات*.
۵. جواهری، زهرا، و خامنه، امیرحسین (۱۳۸۸). ارزیابی عملکرد نیروگاه‌های حرارتی ایران با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها. *اولین کنفرانس صنعت نیروگاه‌های حرارتی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران*.
۶. سایت رسمی شرکت توانیر، گزارش‌های آماری صنعت برق، (www.tavanir.org.ir).
۷. شاهین، آرش، ملک‌پور، هیوا، توان، فرشته، و کرمی، معصومه (۱۳۹۲). رتبه‌بندی نیروگاه‌های برق تجدیدپذیر با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها، مورد مطالعه: نیروگاه‌های برق آبی کشور در سال ۱۳۹۰. *دومین کنفرانس ملی مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد*.
۸. شفیعی نیک‌آبادی، محسن، شاهرودی، کامبیز، اویسی عمران، اکرم، و خسروی، محمدرضا (۱۳۹۷). ارزیابی کارایی شرکت‌های برق منطقه‌ای ایران با استفاده از تحلیل

پوششی داده‌ها و شبکه‌های عصبی. *فصل‌نامه مطالعات مدیریت صنعتی*، ۱۶(۵۱)، ۱۸۱-۲۰۶.

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

۱۰. صدرائی جواهری، احمد، و حسین استادزاد، علی (۱۳۹۳). برآورد کارایی نیروگاه‌های برق تجدیدپذیر و فسیلی: مطالعه استانی در ایران. *مجله مطالعات اقتصادی ایرانیان (IJES)*، ۳(۲)، ۱۹-۴۲.

۱۱. عسکری رباطی، غلام‌حسین، و حبیبی محلی، غلام‌رضا (۲۰۱۶). ارزیابی عملکرد و مقایسه کارایی نیروگاه‌های برق با استفاده از تکنیک تحلیل پوششی داده‌ها. *کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت، تهران، دبیرخانه دائمی کنفرانس*.

۱۲. فلاحی، محمدعلی، و احمدی، وحیده (۱۳۸۴). ارزیابی کارایی شرکت‌های توزیع برق در ایران. *مجله تحقیقات اقتصادی*، ۴۰(۴)، ۲۹۷-۳۲۰.

۱۳. قلی‌پور خطیر، فاطمه، مزیکی، علی، و حوری جعفری، حامد (۱۳۹۷). اثر حذف یارانه‌ها بر کارایی فنی نیروگاه‌های تولید برق در ایران. *فصل‌نامه مطالعات اقتصاد انرژی*، ۱۴(۵۷)، ۱۴۶-۱۲۵.

۱۴. متفکرآزاد، محمدعلی، پورعبداللہان کویچ، محسن، فلاحی، فیروز، رنج‌پور، رضا، و سجودی، سکینه (۱۳۹۳). محاسبه کارایی فنی نیروگاه‌های حرارتی کشور و بررسی عوامل مؤثر بر آن: روش تصادفی ناپارامتریک پوششی داده‌ها. *فصل‌نامه تحقیقات اقتصادی*، ۴۹(۱)، ۹۳-۱۱۳.

1. Adler, N., Friedman, L., & Sinuany-Stern, Z. (2002). Review of ranking methods in the data envelopment analysis context. *European journal of operational research*, 140(2), 249-265.
2. Andersen, P., & Petersen, N. C. (1993). A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis. *Management science*, 39(10), 1261-1264.
3. Askari Robati, G., Habibi Mahalli, G. (2016). Evaluate the performance and compare the efficiency of power plants using data envelopment analysis

- technique. International Conference on Industrial Engineering and Management, Tehran, (In Persian).
4. Azadeh, A., Ghaderi, F., Anvari, M., Izadbakhsh, H., & Dehghan, S. (2007). Performance assessment and optimization of thermal power plants by DEA BCC and multivariate analysis.
 5. 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.
 6. Banker, R. D., Charnes, A., Cooper, W. W., Swarts, J., & Thomas, D. (1989). An introduction to data envelopment analysis with some of its models and their uses. *Research in governmental and nonprofit accounting*, 5, 125-163.
 7. Bazaraa, M. S., Jarvis, J. J., & Sherali, H. D. (2011). *Linear programming and network flows*. John Wiley & Sons.
 8. Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European journal of operational research*, 2(6), 429-444.
 9. Chen, C. M. (2013). Super efficiencies or super inefficiencies? Insights from a joint computation model for slacks-based measures in DEA. *European Journal of Operational Research*, 226(2), 258-267.
 10. Chen, Y. (2004). Ranking efficient units in DEA. *Omega*, 32(3), 213-219.
 11. Chen, Y. (2005). Measuring Super Efficiency in DEA in the Presence of Infeasibility. *European Journal of Operational Research*, 161: 545-551.
 12. Chen, J. X., Deng, M., & Gingras, S. (2011). A modified super-efficiency measure based on simultaneous input-output projection in data envelopment analysis. *Computers & Operations Research*, 38(2), 496-504.
 13. Chen, Y., Du, J., & Huo, J. (2013). Super-efficiency based on a modified directional distance function. *Omega*, 41(3), 621-625.
 14. Chen, Y., & Liang, L. (2011). Super-efficiency DEA in the presence of infeasibility: One model approach. *European Journal of Operational Research*, 213(1), 359-360.
 15. Cook, W. D., Liang, L., Zha, Y., & Zhu, J. (2009). A modified super-efficiency DEA model for infeasibility. *Journal of the Operational Research Society*, 60(2), 276-281.

16. Ebrahimi Mehr, M.R. (2009). An introduction to efficiency and productivity analysis. Coelli, T., Institute of Business Studies And Research, (In Persian).
17. Esfandyai Mohammad, Fallah Jelodar Mehdi, Darvish Motevali Mohammad Hosein (2011). A Combination Model Design For University Employees Performance Appraisal, Using Data Envelop Analysis And Fuzzi Logic Set (A Case Study). *Journal Of Management*, Volume 8 , Number 22 ; Page(s) 24 To 35, (In Persian).
18. Falahi M.A., Ahmadi V., Measuring The Efficiency of Iranian Electricity Distribution Companies, *Tahghighat-e-Eghtesadi Winter 2006* , Volume 40 , Number 4; Page(s) 297 To 320, (In Persian).
19. Jafari, F., Dibachi, H. & Izadikhah, M. (2017). Evaluating the efficiency and ranking of regional electricity companies in Iran using random DEA in the presence of normal distribution. 10th International Conference of the Iranian Operations Research Association. Babolsar: Iranian Operations Research Association, (In Persian).
20. Javaheri, Z., Khameneh, A., (2009). Evaluation Performance of Iranian Thermal Power Plants Using Data Envelopment Analysis Method. The First National on The Thermal Power Plants Instudy. Tehran University.
21. Lee, H. S., Chu, C. W., & Zhu, J. (2011). Super-efficiency DEA in the presence of infeasibility. *European Journal of Operational Research*, 212(1), 141-147.
22. Lee, H. S., & Zhu, J. (2012). Super-efficiency infeasibility and zero data in DEA. *European Journal of Operational Research*, 216(2), 429-433.
23. Li, S., Jahanshahloo, G. R., & Khodabakhshi, M. (2007). A super-efficiency model for ranking efficient units in data envelopment analysis. *Applied mathematics and computation*, 184(2), 638-648.
24. Lin, R., & Chen, Z. (2015). Super-efficiency measurement under variable return to scale: an approach based on a new directional distance function. *Journal of the Operational Research Society*, 66(9), 1506-1510.
25. Lin, R., & Chen, Z. (2018). Modified super-efficiency DEA models for solving infeasibility under non-negative data set. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 56(3), 265-285.
26. Liu, C. H., Lin, S. J., & Lewis, C. (2010). Evaluation of thermal power plant operational performance in Taiwan by data envelopment analysis. *Energy policy*, 38(2), 1049-1058.
27. Motafakker Azad, M., Pourebadollahan Covich, M., Fallahi, F., Ranj Pour, R., Sojoodi, S., (2014). Measuring the Technical Efficiency of Iranian

- Thermal Power Plants and Analysis of its Determinants: Application of Stochastic Nonparametric Data Envelopment Method, *Tahghighate Eghtesadi*, 106, 93-113, (In Persian).
28. Mehrabian, S., Alirezaee, M. R., & Jahanshahloo, G. R. (1999). A complete efficiency ranking of decision making units in data envelopment analysis. *Computational optimization and applications*, 14(2), 261-266.
29. Meng, X. L., & Shi, F. G. (2017). An extended inequality approach for evaluating decision making units with a single output. *Journal of inequalities and applications*, 2017(1), 199.
30. Pourkazemi, M.H., Heydari, K. (2002). Data Envelopment Analysis And Its Application In Evaluating The Efficiency of Power Plants In Iran. *Modern Human Sciences*, Volume 6, Number 1 (Tome 24); Page(s) 35 To 54, (In Persian).
31. Sadraei Javaheri, A., Ostadzad, A. (2014). Estimating Efficiency of Thermal and Hydroelectric Power Plants in Iranian Provinces, *Economics Studies (JELS)*, Volume 3, Issue 2, Pages 19-42, (In Persian).
32. Saglam, Ü. (2018, November). The Efficiency Assessment of Renewable Energy Sources with Data Envelopment Analysis. In 2018 Annual Meeting of the Decision Sciences Institute Proceedings, Chicago IL.
33. Sarica, K., (2017). Parametric VS. Non-Parametric Efficiency Assessment: Case of Power Plants in Turkey, *Journal of the Faculty of Engineering*, Vol. 22, No. 3.
34. Seiford, L. M., & Zhu, J. (1999). Infeasibility of super-efficiency data envelopment analysis models. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 37(2), 174-187.
35. Shafee Nikabadi, M., Shahroodi, K., Oveysiomran, A. & Khosravi, M., (2019). Inputs and Outputs Selection of Data Envelopment Analysis to Evaluate the Performance of Regional Electricity Companies in Iran by Neural Network. *Industrial Management Studies*, Volume 16, Issue 51, Pages 181-206, (In Persian).
36. Shahiki Tash, Mohammadnabi, Hasani, Mostafa Khajeh & Jafari, Saeid (2015). Assessment of the Environmental Performance in Energy Intensive Industries of Iran by Using Directional Distance Function Approach, *Applied Theoretical of Economics*, Volume 2, Issue 1, Pages 99-120, (In Persian).
37. Shahin, A., Malekpoor, H., Tavan, F. & Karami, M. (2013). Ranking of Renewable Power Plants Using Data Envelopment Analysis, Case Study:

- Hydropower Plants in 2011. Second National Conference on Industrial and Systems Engineering, Islamic Azad University of Najaf Abad, (In Persian).
38. Tone, K. (2001). A Slack-Based Measure of Super Efficiency in Data Envelopment Analysis. *European Journal of Operational Research*.
39. Golany, B., Roll, Y., & Rybak, D. (1994). Measuring efficiency of power plants in Israel by data envelopment analysis. *IEEE transactions on engineering management*, 41(3), 291-301.
40. Gholipour Khatir, F., Mazyaki, A., Houri Jafari, H., Effect of Cutting Subsidies on Technical Efficiency of Power Plants in Iran. *QEER*. 2018; 14 (57) :125-146, (In Persian).
41. Yang, T., Chen, W., Zhou, K., & Ren, M. (2018). Regional energy efficiency evaluation in China: A super efficiency slack-based measure model with undesirable outputs. *Journal of cleaner production*, 198, 859-866.
42. Zhu, J., (1996). Robustness of the efficient DMUs in data envelopment analysis. *European Journal of operational research*, 90(3), 451-460.