

فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی
سال سوم / شماره ۸ / پاییز ۱۳۹۶ / صفحات ۶۷-۳۳

مقایسه کارایی فنی و زیست‌کارایی در نیروگاه‌های منتخب حرارتی کشور

علی امامی میبیدی

دانشیار دانشکده اقتصاد دانشگاه علامه طباطبایی
(نویسنده مسئول)
emami@atu.ac.ir

حمید آماده

استادیار دانشکده اقتصاد دانشگاه علامه طباطبایی
amadeh@gmail.com

فیروزه امینی

دانشجوی کارشناسی ارشد پردیس تحصیلات تکمیلی دانشگاه علامه طباطبایی
firouzeh.amini@gmail.com

در این مطالعه، کارایی فنی و زیست‌کارایی ۱۶ نیروگاه منتخب حرارتی ایران طی سال‌های ۱۳۹۴-۱۳۹۰ با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) و بر مبنای مدل ستانده محور مورد ارزیابی قرار گرفته است. نهاده‌های این مدل، نیروی کار، ظرفیت نصب‌شده و سوخت مصرفی است و ستانده‌های آن تولید برق و انتشار CO_2 و SO_2 می‌باشند. نتایج نشان می‌دهد میانگین کارایی فنی نیروگاه‌های تحت بررسی بین ۸۴/۷ و ۸۸/۴ درصد است. بررسی میانگین زیست‌کارایی این نیروگاه‌ها طی دوره مذکور نشان می‌دهد این کارایی بین ۸۵/۷ و ۹۰/۱ درصد بوده است. بهره‌وری با استفاده از شاخص مالم کویست نشان می‌دهد مقادیر بهره‌وری زیست محیطی نیروگاه‌ها طی این ۵ سال نوسان داشته و در نهایت، افزایش یافته است. به منظور افزایش کارایی نیروگاه‌ها، پیشنهاد می‌شود ظرفیت منصوبه هر یک از نیروگاه‌ها افزایش یابد و تجهیزات لازم برای آنها مهیا شود. همچنین ضمن توسعه نیروگاه‌های گازی و سیکل ترکیبی، از گاز طبیعی به عنوان سوخت نیروگاه‌ها استفاده شود. نوسازی و بهینه‌سازی مصرف انرژی و تدوین استانداردها در نیروگاه‌ها از دیگر پیشنهادها سیاستی این مطالعه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: نیروگاه حرارتی، کارایی فنی، زیست‌کارایی، تحلیل پوششی داده‌ها

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۴/۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۶/۲۱

۱. مقدمه

در برنامه توسعه هر کشوری تلاش می‌شود با توجه به امکانات و منابع در دسترس، بیشترین کالاها و خدمات تولید شود. منظور از منابع، کلیه منابع انسانی، سرمایه فیزیکی و منابع طبیعی می‌باشد (لاریجانی، ۱۳۹۰). از آنجا که نیاز انسانها از میزان رفاه نامحدود و منابع و امکانات محدود هستند (ایزدی، ۱۳۸۸)، بشر همواره با مساله محدودیت و کمیابی در تمام زمینه‌ها از جمله عوامل تولید مواجه است و باید به طریقی عمل نماید تا بتواند با تخصیص بهینه منابع، حداکثر تولید را به دست آورد (الیاسی، ۱۳۹۴). یکی از مهمترین عوامل تولید در هر کشوری، منابع مختلف انرژی هستند که عمده‌ترین آنها منابع فسیلی است. در حال حاضر، جوامع با کاهش میزان ذخایر منابع فسیلی مواجه هستند و از سوی دیگر، استفاده از این منابع تهدیدهای جدی زیست محیطی برای بشر به همراه دارد (ناصرزاده، ۱۳۸۹). موفقیت در هر صنعتی مستلزم استفاده از بهترین شیوه‌های تولید و استفاده بهینه از عوامل تولید و امکانات موجود است. بنابراین، مطمئن‌ترین مسیر جهت دستیابی به توسعه اقتصادی، افزایش کارایی و بهره‌وری در تمام صنایع است (رحمانی صفتی، ۱۳۸۸)، چرا که واحدهای کارا نه تنها منابع را هدر نمی‌دهند، بلکه تخصیص منابع را نیز بدرستی انجام می‌دهند (الیاسی، ۱۳۹۴). از آنجا که بهره‌وری نیز چگونگی استفاده از عوامل را در تولید محصول نشان می‌دهد، ارتقای بهره‌وری نیز به عنوان یکی از عوامل مهم در توسعه اقتصادی هر کشوری مورد توجه قرار می‌گیرد. (لاریجانی، ۱۳۹۰)

صنعت برق از جمله صنایع مهم زیربنایی، هزینه‌بر و تاثیرگذار در رشد و توسعه اقتصادی هر کشور و مبین کیفیت زندگی جوامع و ملتهاست. با توجه به فراگیری گسترده صنعت برق و وجود ارتباطات پسین و پیشین بی‌شماری که با سایر صنایع و عوامل موثر بر رشد اقتصادی دارد، هزینه تمام شده برق بر پیکره صنایع پیشین و پسین مرتبط با آن تاثیر خواهد گذاشت (رحمانی صفتی، ۱۳۸۸). این صنعت از سه بخش عمده تولید، انتقال و توزیع تشکیل شده که بخش تولید آن به دلیل سرمایه‌بر و زمان‌بر بودن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (رحمانی صفتی، ۱۳۸۸). وجود ارتباط تنگاتنگ بین این صنعت و سایر بخش‌های اقتصادی، افزایش تقاضای روز افزون جامعه، هزینه‌های کلان مربوط به

سرمایه گذاری اولیه برای احداث یک نیروگاه، هزینه های بهره برداری، تعمیر و نگهداری و تامین قطعات یدکی و حتی آلودگی های ناشی از مصرف سوخت برای تولید برق، تماما سبب می شوند که استفاده بهینه از نیروگاه های موجود و رسیدن به بالاترین سطح کارایی و بهره وری از اهمیت خاصی برخوردار گردد. این صنعت بشدت متکی بر سوخت های فسیلی می باشد و به همین دلیل، موضوعات زیست محیطی از جمله چالش های پیش رو این صنعت است. با توجه به مباحث توسعه پایدار و نگرانی های ناشی از آلودگی های زیست محیطی، موضوع بهره وری سبز نیز در دو دهه اخیر بشدت مورد توجه قرار گرفته است، چرا که ممکن است بنگاهی به لحاظ فنی کارا باشد، اما از لحاظ زیست محیطی ناکارا عمل نماید.

ضرورت دستیابی به بهره وری و کارایی بالا در صنعت برق کشور (لاریجانی، ۱۳۹۰) با توجه به محدودیت منابع، افزایش روز افزون تقاضای برق (ایزدی، ۱۳۸۸)، وابستگی شدید سایر صنایع به این صنعت و مسایل زیست محیطی امری حیاتی است. بهترین و ساده ترین راه ممکن برای افزایش تولید که می تواند به طور مستمر شرایط موجود را بهبود بخشد، استفاده بهینه از منابع و ارتقای کارایی و بهره وری در سیستم های موجود تولید برق است (ایزدی، ۱۳۸۸). توجه به این موضوع در بخش برق سبب می شود نه تنها ارزش افزوده این بخش، بلکه ارزش افزوده سایر واحدهای تولیدی و خدماتی فعال در کشور نیز که به طور مستقیم و غیر مستقیم وابسته به فعالیت های این بخش هستند، افزایش یابد (لاریجانی، ۱۳۹۰). برای سنجش میزان موفقیت سازمانها در بکارگیری از منابع و مقایسه عملکرد آنها با یکدیگر باید کارایی فنی و بهره وری را اندازه گیری و سپس سازمان های ناکارا را شناسایی کرد و به بررسی نقاط قوت و ضعف آنها پرداخت. همچنین با توجه به مسایل زیست محیطی، نیروگاه های کارا از نظر زیست محیطی و بهره وری سبز را بررسی نمود. این روش می تواند به مدیران سازمانها در اتخاذ تصمیمات صحیح و اصلاح الگوی مصرف منابع کمک کرده و ضمن افزایش تولید، از افزایش هزینه ها جلوگیری نماید (رحمانی صفتی، ۱۳۸۸) و بستری مناسب برای برنامه ریزی و دستیابی به

اهداف سازمان جهت حضور قدرتمندتر در بازار، توسعه فعالیت‌ها و رشد تولیدات (لاریجانی، ۱۳۹۰)، افزایش ظرفیت صادرات و تامین نیروی انسانی فراهم سازد.

هدف اصلی این تحقیق با توجه به نقش اساسی نیروگاه‌های حرارتی در تامین برق کشور، بررسی کارایی و بهره‌وری زیست محیطی و فنی در این نوع نیروگاه‌ها می‌باشد. در این مطالعه از روش عملی ناپارامتریک و روش تحلیل پوششی داده‌ها استفاده شده است. این روش تحلیل، زمانی کاربرد دارد که بنگاه‌ها برای تولید ستانده خود به بیش از دو عامل تولید نیاز داشته باشند. به عبارتی، یکی از اهداف این تحقیق، بررسی امکان افزایش تولید برق و کاهش آلودگی‌های زیست محیطی است.

تحقیق حاضر از شش بخش تشکیل شده است: در بخش اول ضمن ارایه مقدمه، ضرورت و هدف بررسی بیان می‌شود؛ در بخش دوم، پیشینه تحقیق و در بخش سوم، مبانی نظری مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ بخش چهارم به روش‌شناسی تحقیق و معرفی متغیرها اختصاص دارد؛ در بخش پنجم، با استفاده از روش تحلیل فراگیر داده‌ها، کارایی فنی و زیست کارایی و بهره‌وری در نیروگاه‌های منتخب حرارتی مورد بررسی قرار می‌گیرد و در بخش ششم، جمع بندی ارایه می‌گردد.

۲. پیشینه تحقیق

امامی میدی، افقه و رحمانی‌صفتی (۱۳۸۸) در مقاله‌ای تحت عنوان اندازه‌گیری کارایی فنی و بهره‌وری در نیروگاه‌های بخاری، گازی و سیکل ترکیبی، با استفاده از روش DEA و شاخص مالم کویست و لحاظ کردن دیدگاه نهاده محور به اندازه‌گیری کارایی فنی و بهره‌وری در ۲۶ نیروگاه حرارتی طی دوره زمانی ۱۳۸۶-۱۳۸۱ پرداخته‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که متوسط مقادیر کارایی فنی نیروگاه‌های تحت فرض بازده ثابت و متغیر نسبت به مقیاس در سال ۱۳۸۶ به ترتیب ۷۶/۴ و ۹۲/۸ درصد بوده است. همچنین متوسط رشد بهره‌وری تمام نیروگاه‌ها ۱/۵ درصد طی سال‌های ۱۳۸۶-۱۳۸۱ بوده که نشان از رشد ناچیز بهره‌وری طی این دوره دارد.

اوروزکو^۱، ویسته^۲، گنزالس^۳ و آلبرتو^۴ (۲۰۱۳) مقاله ای با عنوان تجزیه و تحلیل بهره‌وری در نیروگاه‌های متصل به شبکه: یک مطالعه جدید از اقتصاد زیستی در نیکاراگوئه، منتشر کردند. در این مطالعه، از روش تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) و شاخص مالم کوئیست استفاده شده و سه حالت در نظر گرفته شده است: در حالت اول، بهره‌وری کل عواملی که از زیست توده برای تولید برق استفاده نموده‌اند، مورد بررسی قرار گرفت؛ در حالت دوم، ارزیابی بهره‌وری برای نیروگاه‌هایی که از فرآورده‌های نفتی استفاده نمودند، در نظر گرفته شد و در حالت سوم، بهره‌وری نیروگاه‌هایی که برای تولید برق خود به طور توأمان از انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر استفاده کردند، مورد قیاس قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد در حالت‌های اول و دوم، نیروگاه های حرارتی دارای میزان بالاتری از بهره‌وری کل عوامل بودند که تغییراتی در کارایی فنی ناشی از آموزش نیروی انسانی متخصص شاغل در این نیروگاه‌ها داشتند. در حالت سوم، این نتیجه به دست آمد که استفاده از منابع انرژی زیست توده برای تامین رشد سالانه تقاضای برق می‌تواند بهره‌وری را بهبود بخشد.

بهلولی و استادزاد (۱۳۹۲) در مقاله‌ای تحت عنوان برآورد کارایی نیروگاه‌های حرارتی: رویکرد دو مرحله‌ای تحلیل پوششی داده‌ها، به سنجش کارایی نیروگاه‌ها در ۱۷ استان ایران برای سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰ پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰ به ترتیب نیروگاه‌های برق در سمنان و کیش و همچنین در سمنان، کیش و کرمان نسبت به سایر نیروگاه‌ها کارآمدتر بوده‌اند و نیروگاه‌ها در استان‌های سیستان و بلوچستان، زنجان و آذربایجان شرقی کمترین سطح کارایی را در سال‌های مورد بررسی داشته‌اند.

پورکاظمی و حیدری (۱۳۸۱) در مقاله خود با عنوان استفاده از تحلیل فراگیر داده‌ها در ارزیابی نیروگاه های حرارتی تولید برق کشور، ۳۷ نیروگاه حرارتی کشور را مورد ارزیابی قرار داده‌اند.

1. Blanco Orozco
2. Napoleón Vicente
3. Zúñiga González
4. Carlos Alberto

نتایج حاصل از این مطالعه تحت دو سناریوی بازده ثابت و متغیر نسبت به مقیاس بررسی شد و متوسط کارایی تحت فرض بازده ثابت به مقیاس ۶۴ درصد و تحت فرض بازده متغیر نسبت به مقیاس ۷۸ درصد به دست آمد. این بدان معناست که با حفظ ظرفیت فعلی نیروگاه‌ها، برق تولیدی در حالت‌های اول و دوم به ترتیب ۳۶ و ۲۲ درصد قابل افزایش است. از طرف دیگر، نیروگاه‌های سیکل ترکیبی از نظر کارایی معمولاً رتبه‌های بالا و نیروگاه‌های گازی رتبه‌های پایین را کسب کردند.

جواهری و خامنه (۱۳۸۸) در مقاله‌ای تحت عنوان ارزیابی عملکرد نیروگاه های حرارتی ایران با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها، به ارزیابی ۴۱ نیروگاه کشور در سال ۱۳۸۲ پرداخته‌اند. در این مقاله، متغیرهای ورودی شامل سنوات کارکرد، سوخت مصرفی نیروگاه‌ها، میزان مصرف داخلی برق و ضریب خروج اضطراری اصلاح شده (خروجی نامطلوب) و متغیرهای خروجی مطلوب نیز میزان تولید سالانه برق، ضریب بار تولید و ضریب ظرفیت می‌باشند و کارایی با دو شرط بازدهی ثابت به مقیاس و بازدهی متغیر به مقیاس محاسبه شده است. با تحلیل عملکرد نیروگاه های کشور در سال ۱۳۸۲ با شرط بازده متغیر به مقیاس کارایی کل، متوسط کارایی مدیریت نیروگاه برابر ۹۲/۵ درصد است.

چن^۱، یه^۲ و لی^۳ (۲۰۱۳) در مقاله‌ای با عنوان مقایسه کارایی نیروگاه های ۷۳ کشور جهان، وضعیت نیروگاه‌های این کشورها را با استفاده از روش DEA طی سال های ۲۰۰۶-۲۰۰۸ بررسی کردند. بررسی‌ها نشان داد در بین کشورهای منطقه اروپا، آسیا و آمریکا، نیروگاه‌های آسیا دارای بالاترین کارایی فنی و نیروگاه های کشورهای اروپایی دارای پایین‌ترین کارایی فنی هستند. علاوه بر این، مقایسه بین مدل‌های با انتشار دی اکسید کربن و بدون انتشار دی اکسید کربن نشان داد تفاوت معناداری بین کارایی فنی و کارایی فنی خالص وجود دارد.

-
1. Tser-Yieth Chen
 2. Tsai- Lien Yeh
 3. Yi-Ting Lee

سانگ^۱، لی^۲، هه^۳ و تائو^۴ (۲۰۱۵) در مقاله‌ای تحت عنوان مطالعه کارایی انرژی و زیست کارایی نیروگاه‌های زغال‌سوز: روش ناپارامتریک، با استفاده از روش DEA به بررسی ۱۲۵ واحد نیروگاهی زغال‌سوز که تنها برق (و نه حرارت) تولید می‌کردند، پرداخته‌اند. مهمترین نتایج این بررسی نشان می‌دهد: در ۷۵ درصد از کل واحدهای نیروگاهی، کارایی مقیاس برابر ۱ بوده که این نشان می‌دهد کارایی مقیاس تاثیری بر کارایی انرژی اکثر واحدهای نیروگاهی ندارد؛ به طور متوسط اگر تمام ۱۲۵ واحد نیروگاهی از لحاظ زیست کارایی کارا عمل نمایند، می‌توان $10^7 \times 1/71$ کیلووات‌ساعت در مصرف برق، ۲۳۶/۵۷ تن در انتشار SO_2 و ۳۸۲/۷۴ تن در انتشار NO_x صرفه‌جویی نمود؛ انتشار SO_2 تاثیر بیشتری بر کارایی زیست محیطی دارد؛ واحد نیروگاهی ۱۰۶ بیشترین اختلاف بین کارایی انرژی و کارایی زیست محیطی دارد و با مقایسه تاثیر عوامل مالکیت در این دو نوع کارایی می‌توان دریافت که شرکت چینی گوادیان^۵ بالاترین کارایی انرژی و کارایی زیست محیطی را داشته است.

عسکری و حبیبی محلی (۱۳۹۵) در مقاله‌ای با عنوان ارزیابی عملکرد و مقایسه کارایی نیروگاه های برق با استفاده از تکنیک تحلیل پوششی داده‌ها، کارایی و بهره‌وری ۱۰ نیروگاه را با توجه به مدل‌های BCC و CCR و دیدگاه ستانده محور ارزیابی نمودند. ظرفیت نصب شده نیروگاه، مقدار برق مصرفی و مقدار گرمای سوخت مصرف شده، ورودی‌های این مدل و تولید برق خالص، خروجی آن می‌باشد. نتایج بررسی نشان می‌دهد کارایی نیروگاه‌ها در سطح قابل قبول یعنی بین ۰/۷۵۷ تا ۱ قرار داشته و میانگین کارایی نیروگاه های سیکل ترکیبی از دیگر نیروگاه ها بیشتر و به عبارتی، کارا تر بوده‌اند. همچنین مشخص شد کاهش مصرف برق مهمترین عامل بهبود عملکرد واحدهای ناکارا می‌باشد.

- 1.Chenxi Song
- 2.Mingjia Lia
- 3.Yaling Ha
- 4.Wenquan Tao
- 5.Guodian

لیو^۱، یونگ^۲ و هه^۳ (۲۰۱۷) در مقاله ای تحت عنوان کارایی انرژی کل عوامل نیروگاه‌های حرارتی برق با استفاده از روش DEA، مالم کویست و تکنیک‌های رگرسیون چندگانه، به بررسی کارایی نیروگاه‌های حرارتی کشور چین برای سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۰۵ پرداخته‌اند. عوامل موثر بر کارایی در این بررسی از دیدگاه‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد شاخص کارایی انرژی کل عوامل عمدتاً متاثر از دو شاخص کارایی فنی و شاخص کارایی محض است. همچنین نتیجه حاصل از مدل رگرسیون روش پانل دیتا نشان داد با کاهش مصرف زغال‌سنگ می‌توان کارایی انرژی را افزایش داد. در نهایت، با توجه به نتایج، برای بهبود کارایی انرژی نیروگاه‌های حرارتی این کشور پیشنهادهایی از جمله توسعه تحقیقات و فناوری، کاهش انتشار آلاینده‌ها، توزیع عقلایی سرمایه و نیروی کار و افزایش نظارت دولت مطرح گردید.

میراحمدی و ملکی (۱۳۹۵) در مقاله خود با عنوان ارزیابی عملکرد تولید و فروش نیروگاه‌های آبی کشور توسط تکنیک تحلیل پوششی داده‌ها، کارایی ۱۰ نیروگاه آبی ایران را با دیدگاه نهاده محور و با فرض بازده به مقیاس ثابت برای دوره زمانی ۱۳۹۴-۱۳۹۳ مورد ارزیابی قرار داده‌اند. در این مدل، ضریب ظرفیت مورد استفاده، حجم آب پشت سد و هزینه‌های عملیاتی به عنوان متغیرهای ورودی و تولید خالص و قیمت فروش به عنوان متغیرهای خروجی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد از ۱۰ نیروگاه مورد بررسی، ۵ نیروگاه مسجد سلیمان، زاینده رود، کارون ۴، امیرکبیر و سیمره کارا بودند و ۵ نیروگاه دز، کارون ۳، گنوند، کرخه و سفیدرود غیرکارا بودند.

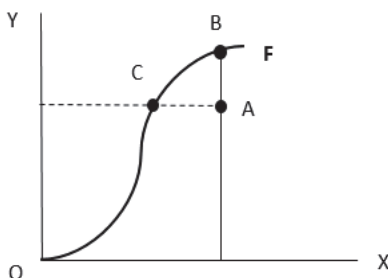
تفاوت این مطالعه با بررسی‌های گذشته در آن است که اولاً، در این مطالعه، کارایی فنی، زیست کارایی و بهره‌وری، هر سه مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و ثانیاً، رتبه‌بندی واحدهای کارا نیز صورت گرفته است. همچنین این بررسی بر اساس آخرین داده‌ها و برای دوره زمانی برنامه پنجم توسعه

1. Jin-Peng Liu
2. Qian-Ru Yang
3. Lin He

(۱۳۹۴-۱۳۹۰) صورت گرفته که در واقع، آخرین ارزیابی از عملکرد نیروگاه های حرارتی منتخب در کشور است.

۳. مبانی نظری^۱

کارایی: براساس تعریف فارل، به میزان دسترسی یک واحد اقتصادی به حداکثر میزان تولید از ترکیب های مختلف نهاده ها، کارایی گفته می شود. به عبارتی، کارایی از نسبت میزان تولید جاری هر واحد به میزان توان بالقوه تولید آن واحد به دست می آید و مفهوم آن تلف نکردن منابع است. یک فرآیند ساده با یک عامل تولید (X) و یک محصول تولیدی (Y) در نظر گرفته می شود.



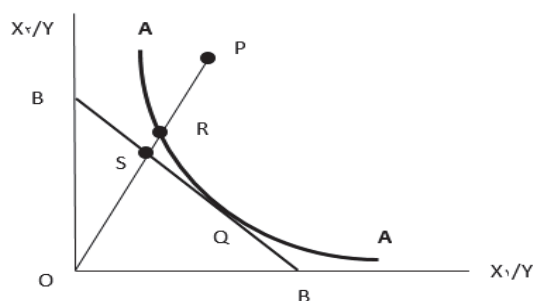
شکل ۱. تابع تولید مرزی و کارایی فنی

OF تابع تولید (مرزی) ارتباط بین محصول و عامل تولید را نشان می دهد و بیانگر حداکثر تولید قابل حصول از عامل تولید در حالات مختلف است، بنابراین، نشاندهنده وضعیت فناوری موجود در آن صنعت نیز می باشد. بنگاه هایی که بر روی این تابع تولید مرزی قرار دارند، کارا هستند و از نهاده های موجود بیشترین محصول را تولید کرده اند و بنگاه هایی که زیر این تابع قرار دارند، با عدم کارایی مواجه هستند.

۱. برای مطالعه بیشتر مراجعه شود به امامی میبیدی، علی (۱۳۷۹)، اصول اندازه گیری کارایی و بهره وری (علمی و کاربردی) و امامی میبیدی، علی (۱۳۹۰)، کارایی و بهره وری از دیدگاه اقتصادی.

انواع کارایی: فارل پیشنهاد نمود که بهتر است عملکرد یک بنگاه با عملکرد بهترین بنگاه‌های موجود در آن صنعت مورد مقایسه قرار گیرد. در این روش، به مفاهیم تابع تولید مرزی به عنوان شاخصی برای اندازه‌گیری کارایی توجه می‌شود.

کارایی فنی: بنا به تعریف فارل، در واقع، توانایی واحد تصمیم‌گیرنده در به دست آوردن حداکثر ستانده با استفاده از نهاده مشخص را منعکس می‌کند. در این مفهوم، به قیمت نهاده‌ها و بهترین ترکیب نهاده‌ها توجه نمی‌شود، بلکه هدف این است که با نهاده‌های داده شده حداکثر تا چه اندازه می‌توان تولید کرد یا بنگاه با این میزان نهاده تا چه میزان با حداکثر تولید فاصله دارد یا میزان مازاد / کمبود نهاده برای تولید ستانده معین مورد نیاز چه اندازه است. بنگاهی دارای کارایی فنی بالاتر است که بتواند با مجموعه نهاده‌های مفروض، میزان محصول بیشتری را نسبت به سایر بنگاه‌ها تولید نماید. فارل برای مثال بنگاه‌هایی را که تنها از دو عامل تولید X_1 و X_2 برای تولید یک محصول Y استفاده می‌کنند، در نظر می‌گیرد. منحنی هم‌مقداری تولید بنگاه‌های کاملاً کارا به وسیله منحنی AA با فرض بازده ثابت نسبت به مقیاس تولید در شکل زیر نشان داده شده است. این منحنی ترکیبات مختلفی از عوامل تولید که سطح مشخصی از محصول را عرضه می‌نمایند، نشان می‌دهد.



شکل ۲. توصیف انواع کارایی به روش فارل

اگر نقطه P نمایانگر یکی از بنگاه ها باشد، کارایی فنی این بنگاه به صورت OR / OP تعریف می شود. یک تولید کننده به لحاظ فنی کاملاً کاراست اگر تولید او بر روی مجموعه هم مقداری تولید AA انجام شود (یعنی OP = OR). اگر تولید بنگاه در سمت راست منحنی AA انجام پذیرد، این بنگاه ناکارا خواهد بود. هرچه فاصله بین OP و OR افزایش یابد، کارایی فنی به سمت صفر میل می نماید.

کارایی تخصیصی (کارایی قیمت): این کارایی نشاندهنده توانایی بنگاه برای استفاده از ترکیب بهینه عوامل تولید با توجه به قیمت آنها می باشد تا از این طریق، هزینه تولید حداقل و سود بنگاه حداکثر گردد. به عبارتی، یک بنگاه کارا از نظر فنی می تواند ترکیبات مختلفی از عوامل تولید را برای سطح معینی از تولید داشته باشد که همگی دارای کارایی فنی یکسان هستند، اما هزینه تولید آنها به دلیل تفاوت ها در عوامل تولیدی متفاوت است. فارل با در نظر گرفتن قیمت عوامل تولید به وسیله خط هزینه یکسان (BB)، کارایی تخصیصی بنگاهی را که در P تولید می کند به صورت فرمول (۱) تعریف می نماید:

$$\text{OS / OR} = \text{کارایی تخصیصی} \quad (1)$$

کارایی اقتصادی (کارایی هزینه): با توجه به فرمول (۲)، به بنگاهی کارا اطلاق می شود که هم کارایی فنی و هم کارایی تخصیصی داشته باشد. به بیان دیگر، کارایی اقتصادی عبارت است از تخصیص بهینه منابع توأم با حداکثر کردن میزان ستانده به ازای ترکیبات مختلف نهاده ها.

$$\text{OR/OP} \times \text{OS/OR} = \text{کارایی تخصیصی} \times \text{کارایی فنی} = \text{کارایی اقتصادی} \quad (2)$$

زیست کارایی (کارایی اکولوژی): به معنای تولید خدمات و کالای بیشتر با استفاده از منابع کمتر و ایجاد ضایعات و آلودگی کمتر است. در واقع، هدف این کارایی، افزایش ارزش تولیدات و خدمات، استفاده بهینه از منابع و کاهش اثرات زیست محیطی می باشد. در این تعریف، اثرات زیان بار زیست محیطی، یک ستاده نامطلوب محسوب می شوند.

اندازه‌گیری کارایی به روش تحلیل پوششی داده‌ها (DEA): این روش مبتنی بر اقدامات بهینه‌سازی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی می‌باشد که به آن روش ناپارامتریک نیز گفته می‌شود. روش پیشنهادی فارل برای اندازه‌گیری کارایی بنگاه‌ها به دلیل وجود فروض محدود کننده، کاربرد عملی چندانی نیافت تا اینکه چارنز، کوپر و رودرز (CCR) ^۱ مدلی را تحت عنوان تحلیل پوششی داده‌ها در سال ۱۹۷۸ ارائه نمودند که توانایی اندازه‌گیری کارایی با چند نهاد و چند ستانده را داشت. در این روش می‌توان با توجه به نهاده‌های مشخص، ستانده‌ها را حداکثر نمود یا با استفاده از دوگان آن، می‌توان با توجه به ستانده معین، نهاده‌ها را حداقل کرد. در این مدل، امکان استفاده از نهاده‌ها و ستانده‌های موردنیاز با مقیاس‌های اندازه‌گیری متفاوت وجود دارد. همچنین به پیش فرض خاصی در مورد شکل تابع تولید یکسان نیاز نمی‌باشد. با استفاده از این مدل می‌توان ضمن محاسبه کارایی، برای بنگاه‌های ناکارا بنگاه مرجع نیز معرفی نمود. همچنین مشخص نمود که واحدهای تصمیم‌ساز در کجای مرز کارایی قرار دارند و برای رسیدن به مرز کارا باید چه ترکیبی از نهاده‌ها و ستانده‌ها را انتخاب نمایند. این امر تنها به وسیله مشخص کردن ضرایب نهاده‌ها و ستانده‌ها برای هر واحد میسر می‌گردد. در سال ۱۹۸۴ بانکر، چارنز و کوپر (BCC) ^۲ با در نظر گرفتن فرض بازده متغیر نسبت به مقیاس، اندازه‌گیری کارایی به این روش را بسط دادند. بنابراین، مدل تحلیل پوششی داده‌ها با دو فرض بازده ثابت نسبت به مقیاس (CRS) و بازده متغیر نسبت به مقیاس (VRS) مورد توجه قرار گرفت.

1. Charnes, Cooper and Rhodes

2. Banker, Charnes and Cooper

روش تحلیل پوششی داده‌ها با فرض بازدهی ثابت نسبت به مقیاس (CRS): این روش، حالت چند محصولی و چند عامل تولیدی را به حالت ساده یک عاملی و یک محصولی تبدیل می‌نماید. اگر اطلاعات در مورد K عامل تولید و M محصول برای هر کدام از N بنگاه وجود داشته باشد، فرآیند محاسبه به صورت فرمول (۳) خواهد بود:

$$\text{Max } \frac{u' y}{v' x_i} = \frac{\text{مجموع وزنی محصولات}}{\text{مجموع وزنی عوامل تولید}} \quad (3)$$

$$\text{St: } \frac{u' y_j}{v' x_j} \leq 1 \quad j = 1, \dots, N$$

$$u \geq 0, \quad v \geq 0$$

U یک بردار $M \times 1$ شامل وزن‌های محصولات و V یک بردار $K \times 1$ شامل وزن‌های عوامل تولید و V' و U' ترانسپوز و U می‌باشد. ماتریس X یک $K \times N$ از عوامل تولید و ماتریس Y یک ماتریس $M \times N$ از محصولات است. این دو ماتریس نشان‌دهنده کلیه اطلاعات مربوط به N بنگاه (DMU) خواهد بود. در رابطه فوق، هدف به دست آوردن مقادیر بهینه برای U و V به گونه‌ای است که نسبت کل مجموع وزنی محصولات به مجموع وزنی عوامل تولید (میزان کارایی هر بنگاه) حداکثر گردد مشروط بر اینکه اندازه کارایی هر بنگاه بایستی کوچکتر و یا مساوی واحد باشد. رابطه کسری بالا، تعداد بی‌شماری راه حل بهینه دارد. همچنین این مدل غیرخطی و غیرمحدب است. این مشکل با تبدیل مدل به یک مدل برنامه‌ریزی خطی رفع می‌گردد. از آنجا که مدل تبدیل به مدل خطی شده است، به جای U و V علایم μ و u به کار برده می‌شود. مدل ریاضی این روش پس از آنکه مدل به مدل برنامه‌ریزی خطی تبدیل می‌شود، به صورت مدل ریاضی (۴) محاسبه می‌شود:

$$\text{Max } \mu' y_i$$

$$\text{St: } u' x_i = 1$$

$$\mu' y_i - X_i \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

$$\mu \geq 0, \quad u \geq 0$$

μ بردار وزن‌های محصولات و U بردار وزن‌های عوامل تولید پس از تبدیل خطی می‌باشند. μ' و U' ترانسپوز μ و U است. ماتریس X ماتریس از عوامل تولید و ماتریس Y ماتریس از محصولات است. در استفاده از برنامه‌ریزی خطی برای حل مساله دوگان، نیاز به قیود کمتری می‌باشد و به همین دلیل، شکل دوگان زیر برای حل مساله ارجح است.

روش تحلیل پوششی داده‌ها با فرض بازدهی متغیر نسبت به مقیاس (VRS): بانکر، چارنر و کوپر (BCC, 1984) مدل CCR را به گونه‌ای بسط دادند که بازده متغیر نسبت به مقیاس را در برگیرد. اگر تمام بنگاه‌ها در مقیاس بهینه فعالیت نمایند، استفاده از فرض بازده ثابت نسبت به مقیاس مقادیر محاسبه‌شده کارایی فنی (با در برداشتن کارایی مقیاس) و تحلیل را دچار اختلال خواهد کرد. استفاده از بازده متغیر نسبت به مقیاس موجب محاسبه و تحلیل دقیق‌تری از کارایی می‌گردد. در صورت استفاده از مساله دوگان در برنامه‌ریزی خطی با فرض بازده ثابت نسبت به مقیاس و افزودن قید تحدب $\sum \lambda = 1$ ، با فرض بازده متغیر نسبت به مقیاس می‌توان محاسبات زیر را (۵) انجام داد.

$$\begin{aligned} \text{Min } \theta \\ \text{St: } & -y_i + Y\lambda \geq 0 \\ & \theta x_i - X\lambda \geq 0 \\ & \sum \lambda = 1 \\ & \lambda \geq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

برای درک اینکه بنگاه در ناحیه بازده صعودی یا نزولی مقیاس فعالیت می‌کند، باید قید بازده غیرصعودی نسبت به مقیاس ($\sum \lambda \leq 1$) را در نظر گرفت. (مدل ریاضی ۶)

$$\begin{aligned} \text{Min } \theta \\ \text{St: } & -y_i + Y\lambda \geq 0 \\ & \theta x_i - X\lambda \geq 0 \\ & \sum \lambda \leq 1 \\ & \lambda \geq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

بهره‌وری: به مفهوم مقایسه کارایی یک بنگاه طی دو زمان متفاوت و یا مقایسه کارایی دو بنگاه نسبت به یکدیگر در یک زمان می باشد. به عبارت دیگر، بهره‌وری مقایسه کارایی است. به طور کلی، بهره‌وری بیان کننده ارتباط میان مقدار کالاها و خدمات تولید شده و مقدار منابع مصرف شده در جریان تولید این کالاها و خدمات می باشد که این روابط کمی و قابل اندازه گیری است. (امامی)

روش های اندازه گیری بهره‌وری: برای این مهم شاخصی به نام مالم کوئیست (تابع مسافت) وجود دارد که نیازی به آمار قیمت ندارد. این شاخص، بهره‌وری کل را به دو جزو عمده آن یعنی تغییرات فناوریانه و تغییرات کارایی تفکیک می نماید که هر یک از نظر تحلیلی و سیاستگذاری اقدامات متفاوتی را می طلبند. کارایی مدیریتی به معنای سخت کوشی، تلاش و حسن تدبیر مدیریت و تلاش کارکنان و ترکیب صحیح عوامل تولید است. صرفه جویی های ناشی از مقیاس نیز به این معناست که اگر در یک صنعت هزینه متوسط تولید برای تولید کنندگان با مقیاس بزرگ کمتر از هزینه متوسط تولید برای تولید کنندگان با مقیاس کوچک باشد، در آن صنعت صرفه جویی های ناشی از مقیاس تولید وجود دارد. کارایی فنی نیز به این معناست که تکنیک برتر و تحولات فناوریانه، مقدار سرمایه، انرژی و یا نیروی کاری لازم را برای تولید همان واحد محصول کاهش داده و در نتیجه، باعث افزایش بهره‌وری می گردد. شاخص مالم کوئیست طبق فرمول (۷) برای دو دوره زمانی t و $t+1$ ، بردار عامل تولید X^t و X^{t+1} و محصولات q^t و q^{t+1} تابع مسافت: $D^t_i(q^t, X^t)$ ، $D^{t+1}_i(q^{t+1}, X^{t+1})$ ، $D^t_i(q^{t+1}, X^{t+1})$ و $D^{t+1}_i(q^t, X^t)$ بیان می گردد. در این معادله، کسر خارج از براکت، تغییرات کارایی و قسمت داخل براکت نیز تغییرات فناوریانه را اندازه گیری می نماید.

$$M_i^{t+1}(q^{t+1}, X^{t+1}, q^t, X^t) = \frac{D^t_i(q^{t+1}, X^{t+1})}{D^t_i(q^t, X^t)} \times \left[\frac{D^t_i(q^{t+1}, X^{t+1})}{D^{t+1}_i(q^{t+1}, X^{t+1})} \times \frac{D^t_i(q^t, X^t)}{D^{t+1}_i(q^t, X^t)} \right]^{1/2} \quad (7)$$

اگر اندازه شاخص بهره‌وری و اجزای آن بر مبنای حداقل سازی عوامل تولید، کوچکتر از یک باشد، دلالت بر بهبود بهره‌وری و اگر بزرگتر از یک باشد، به کاهش بهره‌وری طی دو دوره زمانی اشاره دارد و برعکس، اگر بر مبنای حداکثر سازی محصول باشد، مقدار شاخص بزرگتر از واحد نشان از بهبود عملکرد بنگاه دارد.

۴. معرفی روش و متغیرهای تحقیق

از آنجا که هدف این تحقیق، مقایسه کارایی و بهره‌وری زیست محیطی و فنی در نیروگاه‌های منتخب حرارتی کشور است، جامعه آماری نیروگاه‌های حرارتی کشور می‌باشد. البته در این راستا، محدودیت‌هایی مطرح است از جمله آنکه گاه برخی از فعالیت‌های چند نیروگاه در یک شرکت مدیریت تولید انجام می‌شود، یعنی یک شرکت مدیریت تولید عملیاتی نظیر تعمیر و نگهداری و ... چند نیروگاه را به عهده دارد، لذا تفکیک آمار شرکت‌های مدیریت تولید به تفکیک نیروگاه‌ها امکان‌پذیر نبود. بنابراین، محدودیت‌هایی در دسترسی به آمار نیروی کار کلیه نیروگاه‌های حرارتی کشور، باعث محدود شدن جامعه آماری گردید. همچنین تعدادی از نیروگاه‌ها به صورت ترکیبی به تولید برق می‌پردازند، یعنی دارای واحد گازی و بخاری و یا واحدهای بخاری و سیکل ترکیبی توأمان بوده‌اند که در مورد این نیروگاه‌ها از آنجا که نیروی کار به طور همزمان در هر دو واحد فعالیت می‌کنند و امکان تفکیک شاغلین هر واحد مقدور نبود، از بررسی این گونه نیروگاه‌ها نیز چشم‌پوشی گردید. با توجه به محدودیت‌های آماری و نبود برخی از داده‌های مورد نیاز این بررسی، تنها امکان بررسی ۱۶ نیروگاه حرارتی به صورت قطعی وجود داشت. بنابراین، جامعه آماری قابل بررسی در این مطالعه شامل نیروگاه‌های شهید محمد منتظری، شهید محمد مفتاح، شازند، ری، بعثت، دماوند، شهید فیروزی (طرشت)، پرند، قم، توس، نیشابور (خیام)، بیستون، زرنند، چرخه ترکیبی کرمان، چرخه ترکیبی گیلان و خلیج فارس (هرمزگان) می‌باشد. این مطالعه برای دوره زمانی برنامه پنجم توسعه (۱۳۹۰-۱۳۹۴) صورت می‌گیرد.

برای اندازه گیری کارایی، دو روش پارامتریک و ناپارامتریک وجود دارد: روش های پارامتریک (SFA) ^۱ به دنبال تخمین یک تابع بر اساس نهاده ها و ستانده های مشخص و تعیین شده است (امامی میبدی، ۱۳۷۹). روش های ناپارامتریک عموماً عملکرد یک بنگاه را با بهترین عملکرد بالفعل بنگاه های داخل آن صنعت با استفاده از برنامه ریزی خطی ارزیابی می نماید. در این روش، دو رویکرد نهاده محور و ستانده محور وجود دارد، یکی بر اساس حداقل سازی نهاده ها و عوامل تولید و دیگری بر مبنای حداکثر سازی محصول (ستانده) است. روش تحلیل پوششی داده ها زمانی کاربرد دارد که بنگاه ها برای تولید ستانده خود به بیش از دو عامل تولید نیاز داشته باشند. در این مطالعه، بعد از انجام اقدامات بهینه سازی و با استفاده از نرم افزار win4deap2، واحدهای کارا و غیر کارا مشخص می شوند. سپس یک گروه معنادار به نام الگو یا مجموعه مرجع برای هر یک از مشاهدات غیر کارا را به منظور الگوبرداری در افزایش کارایی، مشخص و ارایه می نماید. از آنجا که واحدهای کارا دارای امتیاز "یک" هستند و با استفاده از مدل های کلاسیک تحلیل پوششی داده ها قابل رتبه بندی نیستند، برای رتبه بندی واحدهای کارا با استفاده از نرم افزار PIM-DEA و از روش اندرسون - پترسون استفاده می شود. علاوه بر اندازه گیری کارایی، در این روش با استفاده از شاخص مالم کوئیست می توان بهره وری را محاسبه کرد. در این بررسی، تابع تولید نیروگاه ها مشخص نیست، اطلاعات قیمتی در دسترس نمی باشد و نیروگاه ها برای تولید برق به بیش از یک نهاده نیاز دارند. بنابراین، در این مطالعه با بهره گیری از مدل ستانده محور روش ناپارامتریک تحلیل پوششی داده ها (DEA)، به بررسی وضعیت هر یک از نیروگاه های منتخب حرارتی پرداخته می شود.

متغیر نهاده های این بررسی شامل متغیرهای نیروی کار، ظرفیت نصب شده و سوخت مصرفی هستند. نهاده سوخت شامل نفت گاز، نفت کوره و گاز طبیعی می باشد که در این بررسی، همگی بر حسب یک واحد یکسان (میلیون بشکه معادل نفت خام) ارایه شده است. نیروی کار بر حسب تعداد کارکنان شاغل در

1. Statistic Frontier Analysis

نیروگاه‌ها اندازه گیری می شود. ظرفیت نصب شده نیروگاه (نهاده سرمایه) بر حسب مگاوات نشان داده شده است. ستانده برق تولید شده بر حسب مگاوات ساعت به عنوان کالای مطلوب حاصل از نیروگاه وارد مدل می شود. در خصوص ستانده‌های نامطلوب برای اندازه گیری زیست کارایی، دی اکسید کربن و دی اکسید گوگرد به عنوان ستانده نامطلوب بر حسب تن وارد مدل گردیدند. ورودی‌ها و خروجی‌های مدل مورد بررسی در جداول (۱) تا (۳) نشان داده شده است.

جدول ۱. میزان نیروی کار و ظرفیت اسمی نیروگاه‌های حرارتی منتخب کشور

نام نیروگاه	نیروی کار (نفر) - ورودی					ظرفیت اسمی (مگاوات) - ورودی				
	۱۳۹۰	۱۳۹۱	۱۳۹۲	۱۳۹۳	۱۳۹۴	۱۳۹۰	۱۳۹۱	۱۳۹۲	۱۳۹۳	۱۳۹۴
شهید فیروزی (طرشت)	۱۲۱	۱۲۱	۱۱۷	۱۱۵	۱۱۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
بعثت	۲۱۸	۱۹۹	۱۷۷	۱۶۴	۱۵۲	۲۴۸	۲۴۸	۲۴۸	۲۴۸	۲۴۸
زرنند	۱۰۰	۸۰	۶۸	۶۵	۵۵	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰
شهید محمد منتظری	۶۰۷	۵۵۱	۶۲۸	۶۰۲	۵۹۷	۱۶۱۶	۱۶۱۶	۱۶۱۶	۱۶۱۶	۱۶۱۶
توس	۴۳۱	۳۲۸	۲۸۹	۲۸۷	۲۶۲	۶۰۰	۶۰۰	۶۰۰	۶۰۰	۶۰۰
بیستون	۳۰۳	۳۰۲	۲۹۸	۳۰۰	۱۹۰	۶۴۰	۶۴۰	۶۴۰	۶۴۰	۶۴۰
شهید مفتح همدان	۳۷۱	۳۶۶	۳۲۲	۲۲۷	۱۷۳	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰
شازند	۲۶۰	۲۷۷	۳۱۱	۳۲۱	۳۳۲	۱۳۰۰	۱۳۰۰	۱۳۰۰	۱۳۰۰	۱۳۰۰
ری	۲۰۳	۱۶۹	۱۷۷	۱۷۶	۱۴۵	۹۳۲	۹۳۲	۹۳۲	۹۳۲	۹۳۲
خلیج فارس (هرمزگان)	۴۶	۵۱	۵۱	۸۶	۸۷	۹۹۰	۹۹۰	۹۹۰	۹۹۰	۹۹۰
پرند	۶۷	۶۶	۸۴	۸۳	۱۵۳	۹۵۴	۹۵۴	۹۵۴	۹۵۴	۹۵۴
چرخه ترکیبی گیلان	۲۵۱	۲۵۳	۲۵۲	۲۴۸	۲۴۱	۱۳۰۶	۱۳۰۶	۱۳۰۶	۱۳۰۶	۱۳۰۶
چرخه ترکیبی قم	۱۶۶	۱۶۰	۱۷۰	۱۶۳	۱۴۶	۷۱۴	۷۱۴	۷۱۴	۷۱۴	۷۱۴
چرخه ترکیبی نیشابور	۱۸۳	۱۶۵	۱۶۳	۱۶۷	۱۶۳	۱۰۴۰	۱۰۴۰	۱۰۴۰	۱۰۴۰	۱۰۴۰
چرخه ترکیبی کرمان	۲۲۳	۲۳۴	۲۳۷	۲۴۸	۲۶۸	۱۹۱۲	۱۹۱۲	۱۹۱۲	۱۹۱۲	۱۹۱۲
چرخه ترکیبی دماوند	۲۹۲	۲۸۵	۲۹۰	۲۸۴	۲۸۳	۲۸۶۸	۲۸۶۸	۲۸۶۸	۲۸۶۸	۲۸۶۸

مأخذ: "آمار تفصیلی صنعت برق ایران (تولید)، (۱۳۸۴ الی ۱۳۹۴)"، شرکت مادر تخصصی توانیر

جدول ۲. میزان سوخت مصرفی و تولید ناویژه نیروگاه های حرارتی منتخب کشور

نام نیروگاه	سوخت (میلیون بشکه معادل نفت خام)					تولید ناویژه (گیگاوات ساعت)				
	۱۳۹۰	۱۳۹۱	۱۳۹۲	۱۳۹۳	۱۳۹۴	- خروجی مطلوب				
شهید فیروزی	۰/۷	۰/۸	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۱۳۹۴	۱۳۹۳	۱۳۹۲	۱۳۹۱	۱۳۹۰
بعثت	۳/۳	۳/۵	۲/۵	۲/۵	۳/۰	۲۲۸	۲۴۶	۲۲۰	۲۴۵	۲۲۴
زرند	۰/۸	۰/۶	۰/۵	۰/۷	۰/۷	۱۴۲۶	۱۲۱۱	۱۱۸۶	۱۵۹۶	۱۵۱۴
شهید منتظری	۱۹/۱	۲۰/۴	۲۱/۹	۱۸/۰	۲۰/۱	۳۲۳	۲۹۶	۲۰۹	۲۶۷	۳۵۲
توس	۷/۲	۷/۲	۷/۴	۷/۱	۶/۸	۱۱۰۳۹	۹۸۳۶	۱۱۸۸۳	۱۱۵۸۲	۱۱۲۵۱
بیستون	۷/۶	۶/۹	۵/۹	۶/۲	۶/۴	۳۷۶۵	۳۹۵۹	۴۱۶۷	۳۹۹۳	۳۹۶۳
شهید مفتاح	۷/۳	۵/۸	۵/۱	۴/۳	۶/۳	۳۸۰۶	۳۷۴۶	۳۴۹۷	۴۱۵۷	۴۶۷۳
شازند	۱۳/۶	۱۲/۷	۱۲/۹	۱۲/۲	۱۱/۸	۳۷۷۵	۲۵۰۶	۲۹۵۰	۳۴۳۶	۴۳۴۸
ری	۳/۱	۳/۱	۳/۲	۴/۸	۲/۵	۶۹۷۳	۷۲۵۴	۷۸۲۱	۷۹۸۱	۸۵۷۹
خلیج فارس	۱۰/۴	۹/۹	۹/۰	۹/۴	۱۰/۰	۹۲۹	۱۷۵۸	۱۱۶۸	۱۱۳۶	۱۱۵۸
پرند	۴/۵	۶/۱	۶/۶	۶/۵	۶/۵	۵۰۷۲	۴۷۵۸	۴۶۳۱	۵۱۰۴	۵۴۱۳
گیلان	۱۰/۰	۱۰/۷	۱۱/۸	۱۲/۵	۱۱/۵	۳۱۳۱	۳۰۶۵	۳۱۵۰	۲۸۶۵	۲۱۷۹
قم	۶/۱	۶/۲	۶/۶	۷/۱	۶/۷	۸۰۶۹	۸۶۸۱	۸۳۶۸	۷۵۵۴	۷۲۱۷
نیشابور	۷/۷	۸/۱	۷/۸	۸/۸	۹/۱	۴۴۶۵	۴۷۸۴	۴۵۹۰	۴۲۶۹	۴۴۷۴
کرمان	۱۳/۷	۱۱/۶	۱۲/۶	۱۴/۰	۱۴/۱	۶۲۵۳	۶۰۶۶	۶۰۲۸	۵۹۹۶	۵۳۲۷
دماوند	۱۳/۵	۱۷/۳	۱۷/۸	۱۹/۷	۲۱/۴	۱۰۰۲۰	۹۹۶۹	۹۰۹۷	۹۰۲۳	۹۸۸۶
						۱۵۱۳۸	۱۴۰۶۶	۱۲۶۹۸	۱۲۱۴۱	۹۰۶۱

مأخذ: آمار تفصیلی صنعت برق ایران (تولید)، (۱۳۸۴ الی ۱۳۹۴)، شرکت مادر تخصصی توانیر

جدول ۳. میزان انتشار CO₂ و SO₂ نیروگاه های حرارتی منتخب کشور (خروجی نامطلوب)

نام نیروگاه	دی اکسید کربن (میلیون تن)					دی اکسید گوگرد (هزار تن)				
	۱۳۹۰	۱۳۹۱	۱۳۹۲	۱۳۹۳	۱۳۹۴	۱۳۹۰	۱۳۹۱	۱۳۹۲	۱۳۹۳	۱۳۹۴
شهید فیروزی	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	-	-	-	-	-
بعثت	۱/۳	۱/۵	۱/۱	۱/۰	۱/۲	۰/۳۰	۰/۴۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۳۰
زرند	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۴/۸	۷/۷	۵/۵	۰/۷	۲/۹
شهید منتظری	۱۰/۰	۲/۱۱	۷/۱۱	۳/۶	۱/۷	۲/۰	۶/۰	۲/۱۷۷	۴/۱۶۳	۴/۱۲۰
توس	۳/۱	۷/۳	۱/۴	۸/۳	۲/۳	۲/۳۴	۳/۵۷	۹/۶۴	۸/۵۰	۲/۲۴
بیستون	۴/۲	۸/۳	۳/۳	۵/۳	۶/۳	۷/۲۶	۵/۲۶	۷/۲۳	۶/۲۴	۱/۲۵
شهید مفتاح	۳/۵	۸/۲	۵/۲	۱/۲	۱/۳	۷/۳۷	۷/۲۸	۸/۳۶	۳/۳۵	۵/۴۳
شازند	۵/۷	۴/۵	۴/۴	۸/۳	۷/۳	۰/۵	۲/۳	۴/۱۹	۰/۶۷	۳/۶۶
ری	۱/۰	۰/۱	۰/۱	۴/۱	۸/۰	۵/۰	۰/۲۰	۹/۰	۴/۰	۶/۰
خلیج فارس	۲/۴	۹/۳	۵/۳	۶/۳	۸/۳	۳/۰	۲/۰	۷/۰	۵/۰	۰/۱
پرند	۱/۲	۶/۲	۰/۳	۸/۲	۸/۲	۲/۲	۶/۲	۲/۴	۱/۲	۰/۳
گیلان	۵/۳	۶/۳	۱/۴	۱/۴	۸/۳	۰۰۰/۱۰	۰۰۰/۱۰	۰۰۰/۱۰	۰۰۰/۱۰	۰۰۰/۱۰
قم	۴/۲	۱/۲	۵/۲	۳/۲	۲/۲	۰۰۰/۳۰	۰۰۰/۳۰	۰۰۰/۲۰	۰۰۰/۲۰	۰۰۰/۲۰
نیشابور	۶/۲	۰/۳	۱/۳	۰/۳	۱/۳	۰۰۰/۲۰	۰۰۰/۲۰	۰۰۰/۲۰	۰۰۰/۲۰	۰۰۰/۲۰
کرمان	۱/۵	۵/۴	۵/۴	۸/۴	۶/۴	۶/۱	۳/۵	۳/۶	۹/۶	۸/۹
دماوند	۶/۴	۰/۶	۶/۶	۰/۷	۲/۷	۸/۵	۶/۹	۱۳/۴	۱/۸	۷/۳

مأخذ: وزارت نیرو، دفتر برنامه ریزی و اقتصاد کلان برق و انرژی

۵. اندازه‌گیری کارایی فنی و زیست کارایی

نتایج حاصل از اندازه‌گیری کارایی به روش DEA بر مبنای حداکثرسازی محصول (ستانده محور) و با فرض بازدهی متغیر نسبت به مقیاس در جدول (۴) (بر پایه مدل ریاضی شماره ۶) نشان می‌دهد میانگین کارایی فنی نیروگاه‌های تحت بررسی بین ۸۴/۷ و ۸۸/۴ درصد بوده است، یعنی بدون نیاز به عوامل تولید بیشتر می‌توان ۱۵/۳-۱۱/۶ درصد تولید را افزایش داد، به طوری که علاوه بر قرار گرفتن بر روی مرز کارایی، امکان تولید در مقیاس بهینه نیز فراهم گردد.

بر اساس جدول (۷)، طی دوره مورد بررسی نیروگاه ری دارای کمترین کارایی فنی و نیروگاه خلیج فارس (هرمزگان) همواره دارای بالاترین کارایی فنی بوده است. بررسی میانگین زیست کارایی این نیروگاه‌ها طی این دوره در جدول (۴) نشان می‌دهد این کارایی بین ۸۵/۷ و ۹۰/۱ درصد بوده است، یعنی بدون نیاز به عوامل تولید بیشتر می‌توان به طور متوسط ۱۴/۳ - ۹/۹ درصد تولید را افزایش داد، به طوری که علاوه بر قرار گرفتن بر روی مرز کارایی، امکان تولید در مقیاس بهینه نیز فراهم گردد.

بر اساس جدول (۸)، طی دوره مورد بررسی، نیروگاه ری دارای کمترین زیست کارایی و نیروگاه خلیج فارس (هرمزگان) و چرخه ترکیبی گیلان، قم و نیشابور همواره دارای بالاترین زیست کارایی بوده‌اند. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهند کارایی فنی و زیست کارایی در سال ۱۳۹۲ به دلایل متعدد از جمله ناکارایی مدیریتی یا ناکارایی مقیاس یا هر دو ناکارایی به صورت توأمان کاهش یافته است. عمده‌ترین علت این کاهش متاثر از کاهش سوخت نیروگاه‌ها (بویژه گاز طبیعی و نفت کوره)، کاهش ظرفیت نیروگاه‌ها و افزایش نیروی کار در این سال بوده است.

جدول ۴. میانگین کارایی فنی و زیست کارایی نیروگاه های منتخب (۱۳۹۴-۱۳۹۰)

سال	کارایی فنی / زیست کارایی	کارایی فنی	کارایی مدیریتی	کارایی ناشی از مقیاس
۱۳۹۰	کارایی فنی	۰/۸۷۵	۰/۹۳۷	۰/۹۳۶
	زیست کارایی	۰/۸۸۸	۰/۹۸۱	۰/۸۸۸
۱۳۹۱	کارایی فنی	۰/۸۸۴	۱/۰۰۰	۰/۹۳۶
	زیست کارایی	۰/۹۰۱	۱/۰۰۰	۰/۹۰۱
۱۳۹۲	کارایی فنی	۰/۸۴۷	۰/۹۱۱	۰/۹۳۳
	زیست کارایی	۰/۸۵۷	۰/۹۹۵	۰/۸۶۲
۱۳۹۳	کارایی فنی	۰/۸۶۷	۰/۹۲۷	۰/۹۳۶
	زیست کارایی	۰/۸۷۵	۰/۹۶۵	۰/۹۰۶
۱۳۹۴	کارایی فنی	۰/۸۸۰	۰/۹۲۴	۰/۸۸۰
	زیست کارایی	۰/۸۹۰	۰/۹۹۱	۰/۸۹۹

مأخذ: یافته های تحقیق

بررسی کارایی فنی و زیست کارایی این نیروگاه ها در هر یک از سال های مورد مطالعه به شرح ذیل

است:

کارایی فنی: میانگین کارایی فنی و مدیریتی نیروگاه های تحت بررسی در سال ۱۳۹۰ براساس داده های جدول (۴) به ترتیب ۸۷/۵ و ۹۳/۷ درصد بوده است، یعنی با ۶/۳ درصد اعمال مدیریت (سختکوشی، تلاش، حسن تدبیر مدیریت و تلاش کارکنان و ترکیب صحیح عوامل تولید)، امکان دست یابی به سطح کارایی مدیریتی فراهم می گردید. همچنین بدون نیاز به عوامل تولید بیشتر می توان به طور متوسط ۱۲/۵ درصد تولید را افزایش داد، به طوری که علاوه بر قرار گرفتن بر روی مرز کارایی، به تولید در مقیاس بهینه نیز دست یافت. بر اساس جدول (۵)، درحالی که تمام نیروگاه های مورد بررسی از لحاظ فنی کارا عمل می نمودند، امکان دست یابی به ۳۶۶۴ گیگاوات ساعت تولید برق بیشتر امکان پذیر می گردید. در این سال، ۵۹۲ نیروی کار مازاد و ۳۹۰ مگاوات ظرفیت بلااستفاده وجود داشت. همچنین در صورت انتخاب سوخت مناسب بویژه گاز طبیعی و انجام اقدامات بهینه سازی مصرف انرژی و استفاده از تجهیزات با مصرف انرژی کمتر و استاندارد، امکان کاهش ۴۱۹ هزار بشکه معادل نفت خام سوخت وجود داشت.

زیست کارایی: میانگین زیست کارایی و کارایی مدیریتی نیروگاه های تحت بررسی در سال ۱۳۹۰ براساس داده های جدول (۴) به ترتیب ۸۸/۸ و ۹۸/۱ درصد بوده است، یعنی تنها با ۱/۹ درصد اعمال مدیریت، امکان دست یابی به سطح کارایی مدیریتی فراهم می گردید. همچنین بدون نیاز به عوامل تولید بیشتر می توان

به طور متوسط ۱۱/۲ درصد تولید را افزایش داد، به طوری که علاوه بر قرار گرفتن بر روی مرز کارایی به تولید در مقیاس بهینه نیز دست یافت. درحالی که تمام نیروگاه‌های مورد بررسی از لحاظ زیست کارایی به صورت کارا عمل می‌نمودند، امکان دست‌یابی به ۱۰۸۸ گیگاوات ساعت تولید برق بیشتر امکان پذیر می‌گردید. در این سال، ۱۴۴ نیروی کار مازاد و ۱۱۶۹ مگاوات ظرفیت بلا استفاده وجود داشت. همچنین در صورت انتخاب سوخت مناسب بویژه گاز طبیعی، امکان کاهش انتشار آلاینده‌ها به میزان ۵۴ میلیون تن CO_۲ و ۳۱۳ هزار تن گاز SO_۲ وجود داشت.

جدول ۵. بررسی ورودی و خروجی‌های نیروگاه‌های حرارتی منتخب در سال ۱۳۹۰

وضع موجود	اختلاف با وضع موجود	
	در حالت کارایی فنی	در حالت زیست کارایی
تولید (گیگاوات ساعت)	۳۶۶۴	۱۰۸۸
نیروی کار (نفر)	-۵۹۲	-۱۴۴
ظرفیت (مگاوات)	-۳۹۰	-۱۱۶۹
سوخت (هزار بشکه معادل نفت خام)	-۴۱۹	۰
انتشار گاز CO _۲ (میلیون تن)	-	۵۴
انتشار گاز SO _۲ (هزار تن)	-	۳۱۳

مأخذ: یافته‌های تحقیق

کارایی فنی: میانگین کارایی فنی و مدیریتی نیروگاه‌های تحت بررسی در سال ۱۳۹۱ براساس داده‌های جدول (۴) به ترتیب ۸۸/۴ و ۹۰/۱ درصد بوده است، یعنی با ۹/۹ درصد اعمال مدیریت (سخت‌کوشی، تلاش، حسن تدبیر مدیریت و تلاش کارکنان و ترکیب صحیح عوامل تولید)، امکان دست‌یابی به سطح کارایی مدیریتی فراهم می‌گردید. همچنین بدون نیاز به عوامل تولید بیشتر می‌توان به طور متوسط ۱۱/۶ درصد تولید را افزایش داد، به طوری که علاوه بر قرار گرفتن بر روی مرز کارایی، به تولید در مقیاس بهینه نیز دست یافت. براساس جدول (۶)، درحالی که تمام نیروگاه‌های مورد بررسی از لحاظ فنی کارا عمل می‌نمودند، امکان دست‌یابی به ۲۶۱۱ گیگاوات ساعت تولید برق بیشتر امکان پذیر می‌گردید. در این سال، ۴۸۳ نیروی کار مازاد وجود داشت. از سویی، در صورت انتخاب سوخت مناسب

بویره گاز طبیعی و انجام اقدامات بهینه سازی مصرف انرژی و استفاده از تجهیزات با مصرف انرژی کمتر و استاندارد، امکان کاهش ۳۳۲ هزار بشکه معادل نفت خام سوخت نیز فراهم می گردید. از سوی دیگر، در این سال، امکان افزایش ۱۲۸ مگاوات ظرفیت نیروگاهی در کشور نیز وجود داشت.

زیست کارایی: میانگین زیست کارایی و کارایی مدیریتی نیروگاه های تحت بررسی در سال ۱۳۹۱ براساس داده های جدول (۴) به ترتیب ۹۰/۱ و ۱۰۰/۰ درصد بوده است، یعنی بدون نیاز به عوامل تولید بیشتر می توان به طور متوسط ۹/۹ درصد تولید را افزایش داد، به طوری که علاوه بر قرار گرفتن بر روی مرز کارایی به تولید در مقیاس بهینه نیز دست یافت. درحالی که تمام نیروگاه های مورد بررسی از لحاظ زیست کارایی به صورت کارا عمل می نمودند، در صورت انتخاب سوخت مناسب بویره گاز طبیعی، امکان کاهش انتشار آلاینده ها به میزان ۵۶ میلیون تن CO_2 و ۳۶۶ هزار تن گاز SO_2 وجود داشت.

جدول ۶. بررسی ورودی و خروجی های نیروگاه های حرارتی منتخب در سال ۱۳۹۱

اختلاف با وضع موجود		وضع موجود	
در حالت زیست کارایی	در حالت کارایی فنی		
۰	۲۶۱۱	۸۱۳۴۵	تولید (گیگاوات ساعت)
۰	-۴۸۳	۳۶۰۷	نیروی کار (نفر)
۰	۱۲۸	۱۸۷۱۳	ظرفیت (مگاوات)
۰	-۳۳۲	۱۲۵۹۹۰	سوخت (هزار بشکه معادل نفت خام)
۵۶	-	۵۶	انتشار گاز CO_2 (میلیون تن)
۳۶۶	-	۳۶۶	انتشار گاز SO_2 (هزار تن)

مأخذ: یافته های تحقیق

کارایی فنی: میانگین کارایی فنی و مدیریتی نیروگاه های تحت بررسی در سال ۱۳۹۲ بر اساس داده های جدول (۴) به ترتیب ۸۴/۷ و ۹۱/۱ درصد بوده است، یعنی با ۹/۹ درصد اعمال مدیریت (سختکوشی، تلاش، حسن تدبیر مدیریت و تلاش کارکنان و ترکیب صحیح عوامل تولید)، امکان دستیابی به سطح کارایی مدیریتی فراهم می گردید. همچنین بدون نیاز به عوامل تولید بیشتر می توان به طور متوسط ۱۵/۳ درصد تولید را افزایش داد، به طوری که علاوه بر قرار گرفتن بر روی مرز کارایی، به تولید در مقیاس بهینه نیز دست یافت. براساس جدول (۷)، درحالی که تمام نیروگاه های مورد بررسی از لحاظ

فنی کارا عمل می‌نمودند، امکان دست‌یابی به ۴۸۰۴ گیگاوات ساعت تولید برق بیشتر امکان‌پذیر می‌گردید. در این سال، ۴۹۸ نیروی کار مازاد وجود داشت. همچنین در صورت انتخاب سوخت مناسب بویژه گاز طبیعی و انجام اقدامات بهینه‌سازی مصرف انرژی و استفاده از تجهیزات با مصرف انرژی کمتر و استاندارد، امکان کاهش ۳۱۴ هزار بشکه معادل نفت خام سوخت نیز فراهم می‌گردید. در این سال، امکان افزایش ۲۹۴ مگاوات ظرفیت نیروگاهی در کشور نیز وجود داشت.

زیست‌کارایی: میانگین زیست‌کارایی و کارایی مدیریتی نیروگاه‌های تحت بررسی در سال ۱۳۹۲ بر اساس داده‌های جدول (۴) به ترتیب ۸۵/۷ و ۹۹/۵ درصد بوده است، یعنی تنها با ۰/۵ درصد اعمال مدیریت، امکان دست‌یابی به سطح کارایی مدیریتی فراهم می‌گردید. همچنین بدون نیاز به عوامل تولید بیشتر می‌توان به طور متوسط ۱۴/۳ درصد تولید را افزایش داد، به طوری که علاوه بر قرار گرفتن بر روی مرکز کارایی به تولید در مقیاس بهینه نیز دست یافت. براساس جدول (۷)، درحالی که تمام نیروگاه‌های مورد بررسی از لحاظ زیست‌کارایی به صورت کارا عمل می‌نمودند، امکان دست‌یابی به ۷۴۲ گیگاوات ساعت تولید برق بیشتر امکان‌پذیر می‌گردید. در این سال، ۵ نیروی کار مازاد وجود داشت. همچنین در صورت انتخاب سوخت مناسب بویژه گاز طبیعی، امکان کاهش انتشار آلاینده‌ها به میزان ۵۶ میلیون تن CO_2 و ۳۵۳ هزار تن گاز SO_2 وجود داشت.

جدول ۷. بررسی ورودی و خروجی‌های نیروگاه‌های حرارتی منتخب در سال ۱۳۹۲

اختلاف با وضع موجود		وضع موجود	
در حالت زیست‌کارایی	در حالت کارایی فنی		
۷۴۲	۴۸۰۴	۸۱۶۶۳	تولید (گیگاوات ساعت)
-۵	-۴۹۸	۳۶۳۴	نیروی کار (نفر)
۰	۲۹۴	۱۸۱۸۰	ظرفیت (مگاوات)
۰	-۳۱۴	۱۲۸۰۰۴	سوخت (هزار بشکه معادل نفت خام)
۵۶	-	۵۶	انتشار گاز CO_2 (میلیون تن)
۳۵۳	-	۳۵۳	انتشار گاز SO_2 (هزار تن)

مأخذ: یافته‌های تحقیق

کارایی فنی: میانگین کارایی فنی و مدیریتی نیروگاه های تحت بررسی در سال ۱۳۹۳ براساس داده های جدول (۴) به ترتیب ۸۶/۷ و ۹۲/۷ درصد بوده است، یعنی با ۷/۳ درصد اعمال مدیریت (سخت کوشی، تلاش، حسن تدبیر مدیریت و تلاش کارکنان و ترکیب صحیح عوامل تولید)، امکان دست یابی به سطح کارایی مدیریتی فراهم می گردید. همچنین بدون نیاز به عوامل تولید بیشتر می توان به طور متوسط ۳۵/۳ درصد تولید را افزایش داد، به طوری که علاوه بر قرار گرفتن بر روی مرز کارایی، به تولید در مقیاس بهینه نیز دست یافت. براساس جدول (۸)، درحالی که تمام نیروگاه های مورد بررسی از لحاظ فنی کارا عمل می نمودند، امکان دست یابی به ۴۲۰۳ گیگاوات ساعت تولید برق بیشتر امکان پذیر می گردید. در این سال، ۶۱۹ نیروی کار مازاد و ۱۵۷ مگاوات ظرفیت بلااستفاده وجود داشت. همچنین در صورت انتخاب سوخت مناسب بویژه گاز طبیعی و انجام اقدامات بهینه سازی مصرف انرژی و استفاده از تجهیزات با مصرف انرژی کمتر و استاندارد، امکان کاهش ۱۵۶۸ هزار بشکه معادل نفت خام سوخت وجود داشت.

زیست کارایی: میانگین زیست کارایی و کارایی مدیریتی نیروگاه های تحت بررسی در سال ۱۳۹۳ براساس داده های جدول (۴) به ترتیب ۸۷/۵ و ۹۶/۵ درصد بوده است، یعنی تنها با ۳/۵ درصد اعمال مدیریت، امکان دست یابی به سطح کارایی مدیریتی فراهم می گردید. همچنین بدون نیاز به عوامل تولید بیشتر می توان به طور متوسط ۱۲/۵ درصد تولید را افزایش داد، به طوری که علاوه بر قرار گرفتن بر روی مرز کارایی به تولید در مقیاس بهینه نیز دست یافت. براساس جدول (۸)، درحالی که تمام نیروگاه های مورد بررسی از لحاظ زیست کارایی به صورت کارا عمل می نمودند، امکان دست یابی به ۲۴۶۲ گیگاوات ساعت تولید برق بیشتر امکان پذیر می گردید. در این سال، ۸۱ نیروی کار مازاد و ۲۹۱ مگاوات ظرفیت بلااستفاده وجود داشت. همچنین در صورت انتخاب سوخت مناسب بویژه گاز طبیعی و انجام اقدامات بهینه سازی مصرف انرژی و استفاده از تجهیزات با مصرف انرژی کمتر و

استاندارد، امکان کاهش یک هزار بشکه معادل نفت خام سوخت و در نتیجه، امکان کاهش انتشار آلاینده ها به میزان ۵۰ میلیون تن CO_2 و ۱۴۲ هزار تن گاز SO_2 وجود داشت.

جدول ۸. بررسی ورودی و خروجی های نیروگاه های حرارتی منتخب در سال ۱۳۹۳

اختلاف با وضع موجود		وضع موجود	
در حالت کارایی فنی	در حالت زیست کارایی		
۴۲۰۳	۲۴۶۲	۸۲۲۰۱	تولید (گیگاوات ساعت)
-۶۱۹	-۸۱	۳۵۳۶	نیروی کار (نفر)
-۱۷۵	-۲۹۱	۱۷۷۳۶	ظرفیت (مگاوات)
-۱۵۶۸	-۱	۱۳۱۱۳۲	سوخت (هزار بشکه معادل نفت خام)
-	۵۰	۵۰	انتشار گاز CO_2 (میلیون تن)
-	۱۴۲	۱۴۲	انتشار گاز SO_2 (هزار تن)

مأخذ: یافته های تحقیق

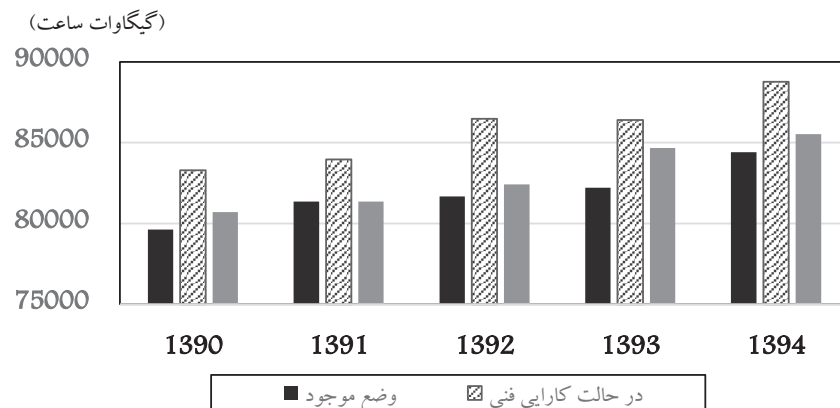
کارایی فنی: میانگین کارایی فنی و مدیریتی نیروگاه های تحت بررسی در سال ۱۳۹۴ بر اساس داده های جدول (۴) به ترتیب ۸۸/۰ و ۹۲/۴ درصد بوده است، یعنی با ۷/۶ درصد اعمال مدیریت (سخت کوشی، تلاش، حسن تدبیر مدیریت و تلاش کارکنان و ترکیب صحیح عوامل تولید)، امکان دست یابی به سطح کارایی مدیریتی فراهم می گردید. همچنین بدون نیاز به عوامل تولید بیشتر می توان به طور متوسط ۱۲/۰ درصد تولید را افزایش داد، به طوری که علاوه بر قرار گرفتن بر روی مرز کارایی، به تولید در مقیاس بهینه نیز دست یافت. براساس جدول (۹)، درحالی که تمام نیروگاه های مورد بررسی از لحاظ فنی کارا عمل می نمودند، امکان دست یابی به ۴۳۴۲ گیگاوات ساعت تولید برق بیشتر امکان پذیر می گردید. در این سال، ۳۰۳ نیروی کار مازاد و ۱۴۲ مگاوات ظرفیت بلااستفاده وجود داشت. همچنین در صورت انتخاب سوخت مناسب بویژه گاز طبیعی و انجام اقدامات بهینه سازی مصرف انرژی و استفاده از تجهیزات با مصرف انرژی کمتر و استاندارد، امکان کاهش ۱۷۰ هزار بشکه معادل نفت خام سوخت وجود داشت.

زیست کارایی: میانگین زیست کارایی و کارایی مدیریتی نیروگاه های تحت بررسی در سال ۱۳۹۴ براساس داده های جدول (۴) به ترتیب ۸۹/۰ و ۹۹/۱ درصد بوده است، یعنی تنها با ۰/۹ درصد اعمال مدیریت، امکان دستیابی به سطح کارایی مدیریتی فراهم می گردید. همچنین بدون نیاز به عوامل تولید بیشتر می توان به طور متوسط ۱۱/۰ درصد تولید را افزایش داد، به طوری که علاوه بر قرار گرفتن بر روی مرز کارایی، به تولید در مقیاس بهینه نیز دست یافت. براساس جدول (۹)، درحالی که تمام نیروگاه های مورد بررسی از لحاظ زیست کارایی به صورت کارا عمل می نمودند، امکان دستیابی به ۱۱۰۹ گیگاوات ساعت تولید برق بیشتر امکان پذیر می گردید. در این سال، ۷۸ نیروی کار مازاد وجود داشت. همچنین در صورت انتخاب سوخت مناسب بویژه گاز طبیعی و انجام اقدامات بهینه سازی مصرف انرژی و استفاده از تجهیزات با مصرف انرژی کمتر و استاندارد، امکان کاهش ۱۰۷ هزار بشکه معادل نفت خام سوخت و در نتیجه، امکان کاهش انتشار آلاینده ها به میزان ۵۱ میلیون تن CO₂ و ۱۲۳ هزار تن گاز SO₂ وجود داشت.

جدول ۹. بررسی ورودی و خروجی های نیروگاه های حرارتی منتخب در سال ۱۳۹۴

اختلاف با وضع موجود		وضع موجود	
در حالت زیست کارایی	در حالت کارایی فنی		
۱۱۰۹	۴۳۴۲	۸۴۴۱۲	تولید (گیگاوات ساعت)
-۷۸	-۳۰۳	۳۳۵۷	نیروی کار (نفر)
۰	-۱۴۲	۱۹۰۰۵	ظرفیت (مگاوات)
-۱۰۷	-۱۷۰	۱۳۲۳۱۹	سوخت (هزار بشکه معادل نفت خام)
۵۱	-	۵۱	انتشار گاز CO ₂ (میلیون تن)
۱۲۳	-	۱۲۳	انتشار گاز SO ₂ (هزار تن)

مأخذ: یافته های تحقیق



نمودار ۱. مقایسه روند تولید نیروگاه های حرارتی منتخب (۱۳۹۰-۱۳۹۴)

رتبه بندی واحدهای کارا

برای تمایز بین واحدهای کارا از روش اندرسون - پترسون و از نرم افزار PIM-DEA استفاده شد تا این امکان وجود داشته باشد که کارایی عددی بیش از یک برآورد گردد. در صورتی که این برآورد برای بنگاه های ناکارا صورت پذیرد، میزان کارایی آن تغییر نمی کند. بر اساس نتایج جدول (۱۰)، نیروگاه خلیج فارس (هرمزگان) طی سال های ۱۳۹۰-۱۳۹۳ بالاترین میزان کارایی فنی را در بین سایر نیروگاه ها دارا بوده است، اما از سال ۱۳۹۳ با افزایش نیروی کار و افزایش سوخت گاز طبیعی و در شرایطی که ظرفیت نیروگاه تغییر نکرده، با افت شدید کارایی مواجه گردیده است، به طوری که کارایی این نیروگاه در سال ۱۳۹۴ کاهش یافته و در رتبه دوم کشور پس از چرخه ترکیبی دماوند قرار گرفت. بررسی ها نشان می دهد به استثنای دو نیروگاه چرخه ترکیبی گیلان و قم، سایر نیروگاه ها در سال دوم خصوصی سازی دچار افت کارایی فنی شده اند. در مجموع، نیروگاه های گازی و چرخه ترکیبی از کارایی بالاتری برخوردارند.

جدول ۱۰. بررسی کارایی فنی نیروگاه های حرارتی منتخب پس از تبه بندی واحدهای کارا

نام نیروگاه	۱۳۹۰	۱۳۹۱	۱۳۹۲	۱۳۹۳	۱۳۹۴
شهید فیروزی (طرشت)	۰/۶۱۳	۰/۶۸۳	۰/۵۹۸	۰/۷۳۴	۰/۶۶۷
بعثت	۰/۸۳۶	۰/۸۹۸	۰/۷۲۳	۰/۷۲۹	۰/۸۵۰
زرند	۰/۸۰۵	۰/۶۸۵	۰/۵۸۱	۰/۷۳۷	۰/۷۸۷
شهید محمد منتظری	۰/۹۹۲	۱/۱۳۱	۱/۰۸۶	۰/۹۰۹	۰/۰۹۰
نوس	۰/۹۰۵	۰/۹۵۳	۰/۹۷۷	۰/۹۸۵	۰/۹۴۶
بیسون	۱/۰۴۴	۰/۹۸۱	۰/۸۴۹	۰/۸۸۰	۰/۹۳۲
شهید مفتح همدان	۰/۸۱۴	۰/۷۶۰	۰/۷۴۰	۰/۸۲۰	۰/۸۴۳
شازند	۱/۰۷۱	۰/۹۸۹	۰/۹۱۳	۰/۸۶۵	۰/۸۶۱
ری	۰/۵۰۵	۰/۴۷۵	۰/۴۷۴	۰/۵۱۱	۰/۵۲۰
خلیج فارس (هرمزگان)	۲/۶۵۴	۲/۳۰۶	۲/۰۷۴	۱/۳۵۱	۱/۰۹۰
پرند	۰/۶۹۱	۰/۷۶۱	۰/۷۳۶	۰/۷۲۶	۰/۸۷۸
چرخه ترکیبی گیلان	۰/۹۸۱	۰/۹۸۲	۱/۰۵۴	۱/۰۷۱	۱/۰۲۵
چرخه ترکیبی قم	۱/۰۶۷	۰/۹۹۵	۰/۹۹۷	۱/۰۰۸	۱/۰۰۱
چرخه ترکیبی نیشابور	۰/۹۴۵	۱/۰۶۴	۱/۰۸۶	۰/۹۸۸	۰/۰۲۱
چرخه ترکیبی کرمان	۱/۱۴۰	۱/۰۵۶	۰/۹۶۵	۱/۰۶۶	۱/۰۰۵
چرخه ترکیبی دماوند	۰/۹۱۸	۰/۹۸۰	۱/۰۲۳	۰/۹۷۶	۱/۱۸۶

* اعداد زیر خط دار معرف مالکیت بخش خصوصی می باشند.

مأخذ: یافته های تحقیق

بررسی زیست کارایی از روش اندرسون - پترسون در جدول (۸) نشان می دهد نیروگاه خلیج فارس (هرمزگان) در سال ۱۳۹۰، نیروگاه شهید محمد منتظری در سال های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ و چرخه ترکیبی دماوند در سال های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ دارای بالاترین میزان زیست کارایی در بین سایر نیروگاه ها بوده اند. ظرفیت نیروگاه شهید محمد منتظری در سال ۱۳۹۱ اندکی افزایش یافته که نیروی کار و سوخت نیروگاه به شیوه مناسبی عمل نموده است. در این سال، نیروی کار این نیروگاه کم شده و سوخت به طور متناسب افزایش یافته و این تغییرات در نهایت منجر به افزایش زیست کارایی نیروگاه شده است. در سال ۱۳۹۴ نیروگاه چرخه ترکیبی دماوند با نیروی کار و ظرفیت ثابت نسبت به سال گذشته خود و همچنین کاهش مصرف نفت گاز در این نیروگاه توانست بالاترین زیست کارایی را در بین نیروگاه های تحت بررسی به دست آورد.

جدول ۱۱. بررسی زیست کارایی نیروگاه های حرارتی منتخب پس از تبه بندی واحدهای کارا

نام نیروگاه	۱۳۹۰	۱۳۹۱	۱۳۹۲	۱۳۹۳	۱۳۹۴
شهید فیروزی (طرشت)	۰/۷۱۴	۰/۸۱۹	۰/۶۸۳	۰/۷۳۴	۰/۷۲۹
بعثت	۰/۸۳۶	۰/۸۹۸	۰/۷۲۳	۰/۷۲۹	۰/۸۵۰
زرنند	۰/۸۰۵	۰/۶۸۵	۰/۵۸۱	۰/۷۳۷	۰/۸۰۴
شهید محمد منتظری	۲/۳۴۴	۳/۲۰۱	۳/۴۳۹	۱/۲۳۴	۱/۲۴۱
توس	۰/۹۰۵	۰/۹۵۳	۰/۹۷۷	۰/۹۸۸	۱/۰۰۵
بیستون	۱/۰۴۴	۰/۹۸۱	۰/۸۴۹	۰/۸۸۰	۰/۹۵۲
شهید مفتح همدان	۰/۸۲۲	۰/۷۸۴	۰/۷۴۰	۰/۸۲۰	۰/۸۴۹
شازند	۱/۲۷۲	۱/۰۴۸	۰/۹۱۳	۰/۸۵۶	۰/۸۶۳
ری	۰/۵۰۵	۰/۴۷۵	۰/۴۷۴	۰/۵۱۱	۰/۵۲۰
خلیج فارس (هرمزگان)	۲/۶۵۴	۲/۳۱۲	۲/۰۷۴	۱/۳۵۰	۱/۰۹۰
پرند	۰/۶۹۱	۰/۸۲۲	۰/۷۷۷	۰/۸۳۹	۰/۶۷۸
چرخه ترکیبی گیلان	۱/۷۶۷	۱/۵۱۷	۱/۸۲۶	۱/۹۵۵	۱/۶۰۴
چرخه ترکیبی قم	۱/۱۳۴	۱/۰۳۴	۱/۰۰۳	۱/۰۰۸	۱/۰۱۲
چرخه ترکیبی نیشابور	۱/۰۱۲	۱/۲۱۷	۱/۱۱۴	۱/۰۳۶	۱/۱۴۶
چرخه ترکیبی کرمان	۱/۲۸۶	۱/۰۹۶	۰/۸۹۸	۱/۲۷۵	۱/۰۵۰
چرخه ترکیبی دماوند	۰/۹۲۵	۱/۳۹۷	۱/۵۸۴	۲/۱۵۱	۱/۹۰۷

*اعداد زیر خط دار قرمز معرف مالکیت بخش خصوصی می باشند.

مأخذ: یافته های تحقیق

۶. بررسی روند بهره وری در نیروگاه های منتخب حرارتی ایران

در محاسبه بهره وری از شاخص مالم کوپست و روش تحلیل پوششی داده ها (DEA) استفاده شده است. استفاده از این شاخص در محاسبه بهره وری، امکان تفکیک بهره وری به دو جزو اصلی آن یعنی تغییرات کارایی و فناوری را ایجاد می کند:

$$M_i^{t+1}(q^{t+1}, X^{t+1}, q^t, X^t) = \text{تغییرات فناوری} \times \text{تغییرات کارایی}$$

در این بررسی، با استفاده از رویکرد حداکثر سازی محصول یا ستانده، اقدام به محاسبه تغییرات بهره وری و هر یک از اجزای آنها در سال های مورد بررسی شده است. همانطور که ذکر شد، اگر مقدار شاخص مذکور بزرگتر از یک باشد، نشان دهنده بهبود عملکرد آن بنگاه خواهد بود.

جدول ۱۲. تغییرات بهره‌وری نیروگاه‌های حرارتی منتخب (۱۳۹۴-۱۳۹۰)

سال	تغییرات کارایی فنی	تغییرات کارایی فناورانه	تغییرات کارایی مدیریتی	تغییرات کارایی مقیاس	زیست محیطی کل عوامل تولید
۱۳۹۰-۹۱	۱/۱۷۲	۰/۹۷۹	۱/۱۳۹	۱/۰۲۹	۱/۱۴۸
۱۳۹۱-۹۲	۰/۹۶۷	۱/۰۳۸	۰/۹۶۲	۱/۰۰۵	۱/۰۰۳
۱۳۹۲-۹۳	۱/۰۰۷	۰/۹۳۹	۱/۰۲۲	۰/۹۸۵	۰/۹۴۶
۱۳۹۳-۹۴	۱/۰۱۴	۱/۰۰۶	۰/۹۹۷	۱/۰۱۷	۱/۰۲۰
میانگین	۱/۰۳۷	۰/۹۹۰	۱/۰۲۸	۱/۰۰۹	۱/۰۲۶

مأخذ: یافته‌های تحقیق

نتایج نشان می‌دهد تغییرات بهره‌وری دارای روند نامشخصی بوده و رشد بهره‌وری تمام نیروگاه‌های منتخب به طور متوسط معادل ۲/۶ درصد بوده است. همانطور که ذکر شد، بهره‌وری از حاصلضرب تغییرات کارایی فنی در تغییرات فناورانه به دست می‌آید. بنا براین، افزایش ۲/۶ درصدی از حاصلضرب افزایش تغییرات کارایی فنی (۱/۰۳۷) و کاهش تغییرات فناورانه (۰/۹۹۰) به دست می‌آید و نشان می‌دهد این افزایش بهره‌وری متأثر از افزایش کارایی فنی بوده است. تغییرات کارایی فنی نیز از حاصلضرب تغییرات کارایی مدیریتی (۱/۰۲۸) و تغییرات کارایی مقیاس (۱/۰۰۹) به دست می‌آید که نشان می‌دهد تغییرات کارایی فنی نیز عمدتاً متأثر از کارایی مدیریتی بوده است. به عبارت دیگر، نیروگاه‌های مذکور طی این ۵ سال نتوانستند تغییرات مثبتی در کارایی فناورانه ایجاد نمایند، اما توانسته‌اند با ایجاد تغییرات مثبت در کارایی فنی که متشکل از کارایی مدیریتی و مقیاس بوده است، تغییرات مثبتی در بهره‌وری کل عوامل تولید ایجاد نمایند.

۲. نتیجه گیری

بررسی روند میانگین کارایی فنی و زیست کارایی نیروگاه‌های منتخب نشان می‌دهد این روند همواره افزایشی نبوده و دارای افت و خیزهایی بوده است. نتایج حاصل از کاربرد روش DEA در تعیین کارایی فنی و زیست کارایی نمایانگر آن است که میانگین کارایی فنی نیروگاه‌های تحت بررسی بین ۸۴/۷ و ۸۸/۴ درصد و میانگین زیست کارایی آنان بین ۸۵/۷ و ۹۰/۱ درصد بوده است.

همچنین مطالعات نشان می‌دهد کارایی فنی و زیست کارایی در سال ۱۳۹۲ به دلایل متعدد از جمله ناکارایی مدیریتی یا ناکارایی مقیاس یا هر دو ناکارایی به صورت توأمان کاهش یافته است. عمده‌ترین علت این کاهش متاثر از کاهش سوخت نیروگاه‌ها (بوئیه گاز طبیعی و نفت کوره)، کاهش ظرفیت نیروگاه‌ها و افزایش نیروی کار در این سال بوده است.

میزان انتشار دی اکسید کربن در سال ۱۳۹۲ از سایر سال‌های مورد بررسی بیشتر بوده که این امر ناشی از کاهش مصرف گاز طبیعی بوده است. همچنین میزان انتشار دی اکسید گوگرد طی سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۹۲ به دلیل مصرف بالای نفت کوره و نفت گاز بیش از سایر سال‌ها بوده که این شیوه مصرف سوخت موجب کاهش زیست کارایی نیروگاه‌ها در این سال گردیده است.

مقادیر بهره‌وری زیست محیطی نیروگاه‌ها طی این ۵ سال نوسان داشته و در نهایت افزایش یافته است. متوسط رشد بهره‌وری تمام نیروگاه‌های منتخب طی این دوره معادل ۲/۶ درصد بوده که این تغییر متاثر از تغییرات کارایی فنی بوده و تغییرات کارایی فنی نیز عمدتاً متاثر از کارایی مدیریتی بوده است.

نیروگاه های منتخب طی ۵ سال مورد بررسی نتوانستند تغییرات مثبتی در کارایی فناورانه ایجاد نمایند، اما توانسته اند با ایجاد تغییرات مثبت در کارایی فنی که متشکل از کارایی مدیریتی و مقیاس بوده است، تغییرات مثبتی را در بهره وری کل عوامل تولید ایجاد نمایند.

مقایسه نتایج این بررسی با سایر تحقیقات انجام شده در این زمینه نشان می دهد کارایی فنی و زیست کارایی نیروگاه های حرارتی نوسان داشته و همچنان متأثر از نوع سوخت می باشد و همچنان بالاترین کارایی متعلق به نیروگاه های گازی و چرخه ترکیبی بوده است.

بنابراین، پیشنهاد می شود ضمن ایجاد زمینه لازم برای توسعه نیروگاه هایی که بازده نسبت به مقیاس آنها صعودی است، امکانات لازم برای نیروگاه هایی که بازده نسبت به مقیاس آنها نزولی است نیز فراهم گردد. همچنین در نیروگاه های حرارتی بیشتر از گاز طبیعی استفاده شود و نیروگاه های گازی و چرخه ترکیبی توسعه یابند. علاوه بر این، لازم است اقداماتی در خصوص بهینه سازی مصرف انرژی، تدوین استانداردهای مربوط و نیروی انسانی مازاد صورت گیرد.

منابع

- الیاسی، بهرام** (۱۳۹۴)، *تحلیل عوامل موثر و مقایسه کارایی فنی و کارایی زیست محیطی کارخانه‌های منتخب سیمان ایران*، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده اقتصاد، دانشگاه علامه طباطبایی.
- امامی میبیدی، علی** (۱۳۷۹)، *اصول اندازه‌گیری کارایی و بهره‌وری (علمی و کاربردی)*، تهران: موسسه مطالعات و پژوهش های بازرگانی، چاپ دوم.
- امامی میبیدی، علی** (۱۳۹۰)، *کارایی و بهره‌وری از دیدگاه اقتصادی*، تهران: انتشارات دانشگاه علامه طباطبایی، چاپ اول.
- امامی میبیدی، علی؛ افقه، مرتضی و محمد حسین رحمانی صفتی** (۱۳۸۸)، "اندازه‌گیری کارایی فنی و بهره‌وری در نیروگاه‌های بخاری، گازی و سیکل ترکیبی"، *فصلنامه اقتصاد مقداری*، دوره ۶ شماره ۳، صص ۱۰۳-۷۹.
- ایزدی، زهرا** (۱۳۸۸)، *اندازه‌گیری کارایی فنی و بهره‌وری پالایشگاه های نفت ایران*، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده اقتصاد، دانشگاه علامه طباطبایی.
- بهلولی، پریسا و علی حسین استادزاد** (۱۳۹۲)، "برآورد کارایی نیروگاه‌های حرارتی: رویکرد دو مرحله‌ای تحلیل پوششی داده‌ها"، *مجموعه مقالات سومین همایش ملی سوخت، انرژی و محیط زیست*، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده انرژی.
- پورکاظمی، محمد حسن و کیومرث حیدری** (۱۳۸۱)، "استفاده از تحلیل فراگیر داده‌ها در ارزیابی نیروگاه های حرارتی تولید برق کشور"، *نشریه مدرس*، دوره ۶ شماره ۱، صص ۵۴-۳۵.
- جواهری، زهرا و امیر حسن خامنه** (۱۳۸۸)، "ارزیابی عملکرد نیروگاه های حرارتی ایران با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها"، *مجموعه مقالات اولین کنفرانس صنعت نیروگاه های حرارتی*، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران.
- رحمانی صفتی، محمد حسین** (۱۳۸۸)، *اندازه‌گیری کارایی فنی و بهره‌وری در نیروگاه های بخاری، گازی و سیکل ترکیبی*، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده اقتصاد و علوم اجتماعی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- عسکری، غلامحسین و محمدرضا حبیبی محلی** (۱۳۹۵)، "ارزیابی عملکرد و مقایسه کارایی نیروگاه های برق با استفاده از تکنیک تحلیل پوششی داده‌ها"، *کنفرانس بین‌المللی صنایع و مدیریت*، دانشگاه تهران.
- لاریجانی، ریحانه** (۱۳۹۰)، *بررسی کارایی شرکت ملی نفت ایران و مقایسه تطبیقی آن با شرکت های منتخب*، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده اقتصاد، دانشگاه تهران.
- میراحمدی، محمدرضا و احسان ملکی** (۱۳۹۵)، "ارزیابی عملکرد تولید و فروش نیروگاه های آبی کشور توسط تکنیک تحلیل پوششی داده‌ها"، *کنفرانس جامع علوم مدیریت و حسابداری*، دانشگاه تهران.

ناصرزاده، سمیه (۱۳۸۹)، ارزیابی زیست کارایی نیروگاه های حرارتی کشور با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده اقتصاد، دانشگاه علامه طباطبائی.

وزارت نیرو (۱۳۹۳ و ۱۳۹۴)، *ترازنامه انرژی سال های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳*، معاونت برق و انرژی، دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی، چاپ اول.

وزارت نیرو (۱۳۸۴ الی ۱۳۹۴)، *آمار تفصیلی صنعت برق ایران (تولید)*، شرکت مادر تخصصی توانیر، معاونت منابع انسانی و تحقیقات، دفتر فناوری اطلاعات و آمار، چاپ اول.

Blanco, Orozco and Napoleón Vicente (2013), "Productivity Analysis in Power Generation Plants Connected to The National Grid: A New Case of Bio Economy in Nicaragua", *Journal of Agricultural*, Vol. 1, No. 1, pp. 81-102.

Chenxi, Song; Mingjia, Lia; Yaling, Ha and Tao Wenquan (2015), "Study on Energy and Environmental Efficiency for Coal-Fired Power Units: A Non-Parameter Approach", *Energy Procedia*, Vol. 75, pp. 2772 – 2778.

Jin-Peng, Liu; Qian-Ru, Yang and He Lin (2017), "Total-Factor Energy Efficiency (TFEE) Evaluation on Thermal Power Industry with DEA, Malmquist and Multiple Regression Techniques", *Energies*, 10, 1039, pp. 1-14.

Tser-Yieth, Chen; Tsai-LienYeh and Yi-TingLee(2013), "Comparison of Power Plants Efficiency Among 73 Countries", Hindawi Publishing Corporation, *Journal of Energy*, Vol. 2013, pp.1-8.