

اندازه‌گیری کارایی فنی، کارایی زیست محیطی و کارایی انرژی در تأسیسات آب‌شیرین‌کن به روش تحلیل پوششی داده‌ها

کارشناسی ارشد اقتصاد انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات،

تهران، ایران

مریم هوشنگی * ID

استاد دانشکده اقتصاد، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران

علی امامی‌میبدی ID

چکیده

امروزه تعداد قابل توجهی از کشورهای جهان با کمبود منابع آب شیرین مواجه هستند. در مناطق استراتژیک جهان نظیر خاورمیانه کمبود مفرط آب، زمینه افزایش بروز اختلافات و منازعات را حول محور آب فراهم آورده است. از همین رو در سالهای اخیر در ایران از سوی کارشناسان و تصمیم‌گیران، گرایش به بهره‌گیری از تکنولوژی شیرین‌سازی آب‌های شور دریا نشان داده شده است. در این مطالعه به اندازه‌گیری کارایی فنی و کارایی زیست محیطی کارخانه آب‌شیرین‌کن به روش اسمز معکوس واقع در منطقه ویژه اقتصادی پارس جنوبی طی سال‌های ۱۳۸۷ الی ۱۳۹۵ با به‌کارگیری روش تحلیل پوششی داده‌ها پرداخته شده و با استفاده از شاخص کارایی انرژی کل عوامل، کارایی انرژی محاسبه شده است. نتایج نشان داده که متوسط کارایی فنی در واحد مورد مطالعه تحت فرض بازده ثابت و متغیر نسبت به مقیاس به ترتیب برابر ۹۰/۸ و ۹۸/۴ درصد بوده است. همچنین ناکارایی مقیاس بیشترین تأثیر را بر روی ناکارایی فنی تحت فرض CRS داشته است که بیانگر ناکارایی تولید در مقیاس بهینه برای بنگاه مورد نظر است. همچنین در محاسبه کارایی زیست محیطی، کارایی کارخانه آب‌شیرین‌کن مورد مطالعه برای کل دوره فعالیتش رقمی معادل ۹۰ درصد بوده است. علاوه بر آن با استفاده از شاخص کارایی انرژی کل عوامل، میانگین کارایی انرژی ۹۱ درصد برآورد شده است. بر اساس نتایج با افزایش دما در فصول گرم سال کارایی انرژی کاهش چشمگیری داشته است.

واژگان کلیدی: کارایی فنی، کارایی زیست محیطی، کارایی انرژی، تحلیل پوششی داده‌ها، اسمز معکوس.

طبقه‌بندی JEL: Q۲۵، P۲۸، P۱۸.

* نویسنده مسئول: m.m.houshangi@gmail.com

۱. مقدمه

آب و تأمین آن از جمله موضوعات تازه‌ای است که چالش‌های عمده‌ای را پیش روی ساکنین زمین در قرن حاضر قرار داده است. با اهمیت یافتن مسائل زیست محیطی در دهه‌های اخیر جنبه‌های مختلف موضوعات آن به طور عمومی یا موردی وارد حوزه مطالعات امنیت بین‌المللی کشورها شده است که منابع آب از مهم‌ترین آنها به شمار می‌رود. کمبود منابع آب شیرین، در دسترس نبودن بخش زیادی از این منابع، آلوده شدن این منابع به صورت فزاینده و افزایش مصرف این منابع به دلیل افزایش جمعیت، سبب شده است که شمار قابل توجهی از کشورها با کمبود منابع آب شیرین مواجه شوند. در مناطق استراتژیک جهان نظیر خاورمیانه کمبود مفرط آب، زمینه افزایش بروز اختلافات و منازعات را حول محور آب فراهم آورده است. منازعاتی که قبلاً نیز مسئله آب در آن مؤثر بوده است^۱. در این میان ایران نیز از خطرات احتمالی ناشی از کمبود آب شرب مستثنی نیست، از همین رو کارشناسان و تصمیم‌گیران متخصص امر گرایش بیشتری به بهره‌گیری از تکنولوژی شیرین‌سازی آب‌های شور دریا در سال‌های اخیر نشان داده‌اند، گرچه کشورهای همسایه عرب حاشیه خلیج فارس قدمت طولانی‌تری در به‌کارگیری از این تکنولوژی دارند. از این رو شیرین‌سازی آب دریا تبدیل به یک منبع عظیم برای تولید آب جهت مصارف کشاورزی، صنعتی و خانگی در بسیاری از مناطق جنوبی ایران گردیده است.

فرآیندهای نفوذ از غشا و فرآیندهای یونی از روش‌های نوین تصفیه آب بوده که هم‌اکنون توسط کشورهای دارای منابع آب شیرین محدود مورد استقبال قرار گرفته است. روش اسمز معکوس، موفق‌ترین و متداول‌ترین این روش‌هاست که امروزه به عنوان پرکاربردترین شیوه‌های تصفیه آب برای حجم بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. از طرفی مصرف بالای انرژی الکتریکی در سیستم اسمز معکوس برای راهبری سیستم با استفاده از فشار و دمای مناسب در آب تغذیه جهت دستیابی به حداکثر ریکاوری به همراه حفظ و ارتقای کیفیت آب تولیدی، انرژی را به مهم‌ترین و اصلی‌ترین نهاد تولید آب شیرین در این روش بدل نموده است. از این رو برآورد میزان کارایی فنی و کارایی انرژی با توجه به رشد فزاینده آن خصوصاً در تکنولوژی اسمز معکوس پراهمیت جلوه می‌کند. از طرفی در

همه واحدهای نمک زدایی صرف نظر از اینکه از چه فناوری برای شیرین سازی استفاده می‌شود، مسئله پساب شور خروجی، مسئله مهم زیست محیطی است. این شور آب می‌تواند داغ باشد و یا حتی سرشار از مواد شیمیایی ضد رسوب و خوردگی باشد^۱. تأثیر مهم دیگر مربوط به گازهای گلخانه‌ای منتشر شده حین تولید برق و یا تأمین حرارت است. بر اساس مطالعات انجام شده طی این فرآیند گازهایی همچون دی‌اکسید گوگرد، دی‌اکسید نیتروژن، ذرات معلق جامد و دی‌اکسید کربن منتشر می‌شوند. از این رو برآورد کارایی زیست محیطی در این صنعت روبه رشد، لازم و حیاطی به نظر می‌رسد.

هدف کلی در این تحقیق ارائه راه حلی مناسب برای افزایش کارایی انرژی در کارخانه‌های آب شیرین کن وابسته به انرژی فسیلی برای روبرویی با بحران کم آبی در کشور بخصوص در مناطق جنوبی بوده است. همچنین برآورد کارایی محیط زیستی و ارائه راهکارهایی جهت کاهش زیان‌های ناشی از شیرین سازی آب دریا از دیگر اهداف این پژوهش می‌باشد. جهت دستیابی به اهداف این تحقیق، در بخش دوم مروری بر مطالعات پیشین بیان شده و در بخش سوم و چهارم به ارائه مبانی نظری و روش تحقیق و یافته‌های تحقیق پرداخته شده و در نهایت نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات در بخش پنجم مطرح گردیده است.

۲. مطالعات انجام شده

در زمینه کارایی و زیست کارایی در صنعت آب شیرین کن‌ها تحقیقات بسیار اندک و محدودی وجود دارد که در ادامه به آنها اشاره می‌کنیم.

رو و سی^۲ (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای با عنوان «کارایی انرژی کل عوامل در صنعت تولید شکر در چین» کارایی انرژی کل عوامل در صنعت تولید شکر در چین را با استفاده از داده‌های فصلی مربوط به سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۰۲ ارزیابی کردند. برای به دست آوردن TFEE از روش تحلیل پوششی داده‌های اصلاح شده استفاده کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در طی فصل‌های خرد کردن، متوسط TFEE، ۰/۵۷ است. TFEE مربوط به کارخانه‌های شکر با مالکیت خارجی بیشتر از TFEE مربوط به کارخانه‌های شکر با مالکیت خصوصی و دولتی است. مالکیت خصوصی، اندازه بزرگ، مواد اولیه، بهره‌وری امن، میزان بهبودی کل و همچنین

۱. خزان و همکاران (۱۳۹۲)

پیشرفت‌های فنی می‌تواند به طور قابل توجهی TFEE را بهبود ببخشد.

هونما و هو^۱ (۲۰۱۴) در تحقیقی با عنوان «کارایی انرژی کل عوامل در سطح صنعت در کشورهای توسعه یافته: با تمرکز بر ژاپن»، کارایی نهاده انرژی کشور ژاپن را با بهره‌گیری از روش تحلیل پوششی داده‌ها با سایر کشورها مقایسه می‌کند. در این مطالعه کارایی انرژی کل عوامل در ارتباط با صنایع ۱۴ کشور توسعه یافته طی سال‌های ۱۹۹۵ الی ۲۰۰۵ مورد ارزیابی قرار گرفته است. ورودی‌ها شامل نیروی کار، سرمایه، انرژی و نهاده‌های واسطه‌ای غیر انرژی و تنها خروجی ارزش افزوده است. نتایج نشان می‌دهد که ژاپن می‌تواند در استفاده بهینه و نگهداشت انرژی موفق‌تر عمل کند چرا که کارایی کل عامل انرژی در این کشور از ۰/۹۸۶ در سال ۱۹۹۵ به ۰/۹۲۷ در سال ۲۰۰۵ کاهش یافته است. لذا ژاپن می‌تواند با الگوبرداری از معیارهای کشورهای نظیر انگلستان، آلمان و ایالات متحده در جهت بهبود صنایع ناکارآمد خود و به کارگیری فناوری‌های حفاظت از انرژی در راستای افزایش کارایی انرژی صنایع خود گام بردارد.

ژو^۲ (۲۰۱۲) در تحقیقی با عنوان «کارایی انرژی و انتشار CO_2 در تولید برق با رویکرد تابع راهنمای مسافت غیر شعاعی» با استفاده از تابع مسافت غیر شعاعی به بررسی کارایی انرژی و انتشار دی‌اکسید کربن در تولید برق می‌پردازد. در این تحقیق ابتدا به معرفی تکنولوژی‌های تولید شده محیط زیستی برای کشورهای که دارا و فاقد تأسیسات CHP^3 پرداخته شده و در ادامه تابع غیر شعاعی مسافت و شاخص‌های متعدد برای اندازه‌گیری کارایی انرژی و نشر دی‌اکسید کربن پیشنهاد شده است و عنوان می‌شود که تابع راهنمای مسافت از طریق حل یک سری از داده‌ها به روش تحلیل پوششی داده‌ها قابل تخمین است. در نهایت نتایج نشان دادند که کشورهای عضو سازمان همکاری و توسعه اقتصادی کارایی انرژی و دی‌اکسید کربن بهتری در تولید برق نسبت به کشورهای غیر عضو دارند اما این اختلاف خیلی قابل ملاحظه نیست.

وانگ و همکاران^۴ (۲۰۱۲) در پژوهشی تحت عنوان «کارایی انرژی کل عوامل منطقه‌ای: بررسی تجربی صنعت چین» با به کارگیری شاخص TFEE کارایی انرژی در صنایع ۳۰ استان چین طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۹ مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که

1. S. Honma and JL. Hu
2. Zhou
3. Combined Heat and Power
4. Wang

امکان افزایش کارایی انرژی به ویژه در استان‌های غربی چین که مقدار مصرف انرژی بالایی دارند، وجود دارد. همچنین دو عامل سرمایه‌گذاری ناکافی در فناوری و عدم دستیابی به بهترین مقیاس تولید مهمترین عوامل در عدم ارتقای کارایی انرژی این کشور شناخته شدند.

سانزو^۱ (۲۰۱۱) در تحقیقی با عنوان «کارایی انرژی در کارخانه‌های تصفیه آب در اسپانیا به روش تحلیل پوششی داده‌ها غیر شعاعی» به اندازه‌گیری کارایی انرژی بواسطه روش فوق در ۱۷۷ کارخانه تصفیه آب می‌پردازند. محقق در این راستا ورودی را انرژی مساحت زیر کشت محصولات کشاورزی به عنوان نماینده انرژی زیست توده و تنها خروجی را تولید ناخالص داخلی واقعی در دوره زمانی ۱۹۹۵ الی ۲۰۰۲ با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها محاسبه کرده‌اند. رتبه‌بندی شاخص TFEI نشان می‌دهد که ناحیه مرکزی چین بدترین رتبه را داشته در حالیکه بیشتر از نیمی از مصرف انرژی در این ناحیه صورت گرفته است. همچنین نتایج حاصل از محاسبه این شاخص نشان می‌دهد که به جز ناحیه غرب در تمامی نواحی بهبود کارایی انرژی وجود داشته است. در پایان نیز نتایج مبین این است که با رشد اقتصادی کارایی انرژی افزایش می‌یابد.

ابوت^۲ (۲۰۰۶) در مطالعه‌ای با عنوان «کارایی و بهره‌وری در صنعت عرضه برق در استرالیا با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها و شاخص مالم کوئست» به ارزیابی بهره‌وری کل عوامل تولید صنعت برق استرالیا طی دوره زمانی ۱۹۹۹-۱۹۶۹ پرداخته است. محقق با استفاده از یک ستاده عرضه برق و چهار نهاد سرمایه، نیروی کار، سوخت و سایر مواد و خدمات و در نظر گرفتن دیدگاه ستاده محور به ارزیابی بهره‌وری پرداخته است. نتایج حاکی از آن است که با در نظر گرفتن فرض بازده ثابت به مقیاس کارایی فنی در تمام ایالات بجز تاسمانی افزایش یافته است. اما در صورتی که فرض بازده متغیر نسبت به مقیاس اعمال گردد، کارایی در تمام ایالات بجز وسترن که کاهش ناچیزی داشته است، تقریباً ثابت بوده است.

وانینسکی^۳ (۲۰۰۶) در تحقیقی تحت عنوان «کارایی تولید برق در ایالات متحده با استفاده از روش DEA» به ارزیابی کارایی تولید برق ایالات متحده در دوره زمانی ۲۰۰۴-۱۹۹۱ می‌پردازد. هزینه‌های عملیاتی و اتلاف انرژی بر حسب درصد به عنوان

1. Hernández-Sancho
2. Abbott
3. Vaninsky

متغیرهای ورودی در نظر گرفته شده‌اند. هزینه عملیاتی ترکیبی از هزینه‌های نیروی کار، سوخت، مواد و غیره به عنوان درصدی از درآمد حاصل از خرده فروشی برق می‌باشد. در این تحقیق از روش نهاده محور و فرض بازده متغیر نسبت به مقیاس جهت ارزیابی کارایی تولید برق استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که کاهش کارایی به سطح ۹۸/۶۱ درصد می‌باشد، اما از سال ۲۰۰۰-۱۹۹۴ کارایی در بالاترین سطح یعنی در حدود ۱۰۰ درصد ثابت باقی مانده است و سپس به شدت نزول کرده است به طوری که در سال ۲۰۰۴ به سطح ۹۴/۶۱ درصد رسیده است.

جایدیری (۱۳۹۳) در تحقیقی با عنوان «اندازه‌گیری زیست کارایی در پالایشگاه‌های نفت ایران بوسیله تحلیل پوششی داده‌ها» با در نظر گرفتن خوراک، انرژی مصرفی، تعداد پرسنل و درجه پیچیدگی به عنوان ورودی مدل و نسبت مجموع محصولات سبک به سنگین به عنوان خروجی مطلوب و انتشار گازهای CO_2 ، N_2O و SO_2 به عنوان خروجی نامطلوب برای خروجی مدل تلاش در جهت اندازه‌گیری زیست کارایی کرده است. محقق با رویکرد ستاده محور و با استفاده از نرم‌افزار win4deap مدل خود را پیش می‌برد. نتایج نشان می‌دهد که پالایشگاه بندرعباس کارترین پالایشگاه نفت طی دوره ۸۸-۱۳۸۲ بوده است و نرخ رشد زیست کارایی در این دوره مثبت بوده است. نتایج رگرسیون توییت نشان می‌دهد که سوخت‌های نفت کوره و نفت گاز اثر منفی بر زیست کارایی دارند و گاز طبیعی و گازهای پالایشگاهی اثر مثبت بر زیست کارایی دارند.

ناصرزاده (۱۳۸۹) در تحقیقی با عنوان «اندازه‌گیری زیست کارایی نیروگاه‌های حرارتی کشور با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها» و به کارگیری رویکرد ستاده محور به اندازه‌گیری زیست کارایی می‌پردازد. در این تحقیق ۴۰ نیروگاه برق حرارتی ایران بین سال‌های ۸۶-۱۳۸۲ مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نرم‌افزار win4deap نشان داد که زیست کارایی نیروگاه‌های حرارتی در این دوره کاهش یافته است و نتایج نرم‌افزار Eviews نشان داد که بین سوخت و زیست کارایی رابطه معناداری وجود دارد.

آنچه پس از واکاوی و بررسی پژوهش‌های پیشین قابل توجه است کمبود تحقیقات جامع در حیطه انواع کارایی‌ها بالاخص کارایی انرژی در صنعت آب‌شیرین‌کن‌ها می‌باشد. علی‌رغم انرژی‌بر بودن و رشد چشم‌گیر آن در اقصی نقاط جهان با توجه به تشدید بحران جهانی آب مطالعات اندکی در این زمینه انجام شده است. در ادامه این مطالعه با معرفی

اجمالی این تکنولوژی در حیطه انرژی و مباحث مربوط به محیط زیست سعی شده نقاط ضعف و قوت آن بیان شود.

۳. مبانی نظری و روش تحقیق

۳-۱. صنعت آب شیرین کن^۱

آب شیرین کن‌ها بعنوان یک گزینه ضروری برای غلبه بر معضل کمبود آب شیرین در آینده مطرح هستند. آب شیرین کن‌های چنداثره، چندمرحله‌ای و اسمز معکوس بعنوان سه فرآیند شناخته شده در این زمینه به حساب می‌آیند که از میان آن‌ها اسمز معکوس بیشترین موارد استفاده را داشته است.^۲ در روش اسمز معکوس، فشار اعمال شده به آب شور، باعث خروج آب خالص یا کم نمک از یک غشاء نفوذپذیر می‌شود. در واقع غشاء آب را از خود عبور می‌دهد ولی برای مواد دیگر نفوذناپذیر است.^۳ اسمز معکوس تکنیکی برای جداسازی تحت فشار بر اساس استفاده از خاصیت پلیمرهای خاصی بنام پلیمرهای نیمه‌نفوذپذیر است که این مواد برای آب نفوذپذیرند ولی برای مواد محلول در آن نفوذپذیری خیلی پایینی دارند. فلسفه حاکم بر آب شیرین کن اسمز معکوس، اعمال یک فشار خالص به طرف آب تغذیه غشاء اسمز معکوس، برای عبور دادن آب شور به سمت غشاء، جهت گرفتن نمک آن می‌باشد.

زمانی که آب شور با پمپ‌های پرفشار و در دبی مورد نیاز بسمت مدول‌های غشائی رانده می‌شود، نیاز به مصرف انرژی است. فشار مورد نیاز در آب شیرین کن اسمز معکوس، مرتبط با مقدار نمک آب شور، ساختار سیستم و شرایط عملکرد آن مانند فشار رانش و ریکواری مورد نیاز (نسبت آب شیرین شده به آب شور ورودی) می‌باشد. با به کارگیری اختلاف فشار در طرفین غشاء، آب از آن عبور کرده و املاح موجود از آن جدا می‌شوند. بنابراین برای غلبه بر این فشار (فشار اسمزی) نیاز به فشار بالایی است، که این فشار برای آب‌های لب شور ۱۵-۲۵ بار و برای آب دریا ۸۰-۴۰ بار می‌باشد. مراحل شیرین سازی آب شامل مراحل آماده‌سازی اولیه آب، پمپاژ آب، ریکواری انرژی آب تغلیظ شده و آماده‌سازی نهایی می‌باشد.^۴

1. Desalination
2. Ch Li (2013)
3. C. Liu (2011)
4. Tchanche (2010)

بر اساس اطلاعاتی که از آژانس انرژی اتمی در سال ۲۰۰۶ منتشر نمود میزان حرارت و برق مصرفی مخصوص برای سه آب شیرین کن MSF، MED و RO مطابق جدول (۱) است. همانطور که مشاهده می شود آب شیرین کن مکانیکی RO دارای مصرف انرژی الکتریکی بیشتری به ازای تولید یک مقدار مشخص آب شیرین می باشد.

جدول ۱. مقایسه برق مصرفی آب شیرین کن ها

آب شیرین کن	حرارت مصرفی مخصوص (کیلووات ساعت حرارتی بر متر مکعب)	برق مصرفی مخصوص (کیلووات ساعت الکتریکی بر متر مکعب)
MSF	۱۰۰	۳
MED	۵۰	۳
RO	۰	۴/۵ - ۳/۵

۲-۳. دفع پساب شور آب شیرین کن ها

در همه واحدهای نمک زدایی صرف نظر از اینکه از چه فناوری برای شیرین سازی استفاده می شود، مسئله پساب شور خروجی، مسئله مهم زیست محیطی است. این شور آب می تواند داغ و یا حتی سرشار از مواد شیمیایی ضد رسوب و خوردگی باشد. غلظت بالای نمک شور آب حتی باعث تغییر در غلظت نمک دریاها می شود و به خصوص در مورد گونه هایی که در اعماق اقیانوس ها زندگی می کنند. چنانچه پساب شور در نواحی سرزمینی دفع شود باعث وارد آمدن آسیب جدی به محیط زیست به ویژه سفره های آب زیرزمینی، رودخانه ها و دریاچه ها می شود.

چگونگی تخلیه آب شور پسماند از مسائل مهم در برنامه نمک زدایی بشمار می رود. طراح باید سیستم را طوری طراحی کند که تخلیه مواد پسمانده در آب خسارتی به محیط وارد نکند. در پسماندها کلیه نمک های جدا شده از آب لب شور اولیه به همراه مواد دیگری که اغلب زیان بخش هستند وجود دارد. دفع شور آب غلیظ از فاکتورهای مهم اقتصادی است و همواره تحت تأثیر عوامل مختلفی از قبیل ویژگی های محل کارخانه، نزدیکی به محل دفع پسماند، موافقت عمومی و نوع روش دفع پسماند می باشد. بر اساس این محدودیت ها هزینه دفع پسماند غلیظ در حدود ۵ تا ۳۳ درصد از هزینه آب خواهد بود. روش هایی از قبیل برگشت آب شور به جریان آب ورودی یا به انشعاب فرعی دیگر،

توزیع در سطح آب تزریق به چاه‌های عمیق، استفاده از برکه‌های تبخیر، استفاده از مکانیزم تبخیر به منظور تبدیل پسماند مایع به پسماند جامد، از جمله روش‌هایی است که به منظور دفع شور آب غلیظ در کارخانه نمک‌زدایی استفاده می‌شود.^۱

۳-۳. کارایی^۲

کارایی عبارت است از دستیابی یک واحد اقتصادی به سطح تولید بهینه یا میزان دسترسی یک بنگاه به سطح مطلوب تولید با توجه به نهاده‌هایی که در دسترس وجود دارند.^۳ کارایی بیانگر این مفهوم است که یک سازمان به چه میزان از منابع خود در راستای تولید، برای بهترین عملکرد در مقطعی از زمان استفاده کرده است. بنابراین کارایی معیار عملکرد یک سیستم سازمانی است که بر میزان منابع (ورودی‌ها) استوار شده است. به عبارت دیگر، کارایی میزان مصرف منابع برای تولید مقدار معینی محصول است.^۴

اندازه‌گیری کارایی به شیوه‌های نوین، از مطالعه فارل^۵ (۱۹۵۷) آغاز شد. او کارایی هر بنگاه را به دو جزء کارایی فنی و کارایی تخصیصی^۶ تجزیه کرده است و ایده خود را با استفاده از نگرش نهاده‌محور و فرض بازدهی ثابت نسبت به مقیاس^۷ برای اندازه‌گیری کارایی بخش کشاورزی ایالات متحده به کارا برده است.^۸

برای بنگاه‌هایی که تنها از دو عامل تولید X_1 و X_2 برای تولید یک محصول Y استفاده می‌کنند منحنی هم‌مقداری^۹ کاملاً کارا بوسیله منحنی AA با فرض بازده ثابت به مقیاس تولید در تصویر ۱ نشان داده شده است این منحنی ترکیبات مختلفی از عوامل تولید که مشخصی از محصول را (در اینجا یک واحد محصول) عرضه می‌نماید، نشان می‌دهد. اگر نقطه P نمایانگر یکی از بنگاه‌ها باشد، کارایی فنی این بنگاه به صورت نسبت OR/OP تعریف می‌شود. یک تولیدکننده به لحاظ فنی کاملاً کارا است اگر تولید بر روی مجموعه

۱. منتظری و همکاران (۱۳۹۱)

2. Efficiency

۳. امامی میبدی (۱۳۷۹)

۴. مهرگان (۱۳۸۳)

5. Farrell

6. Allocative Efficiency

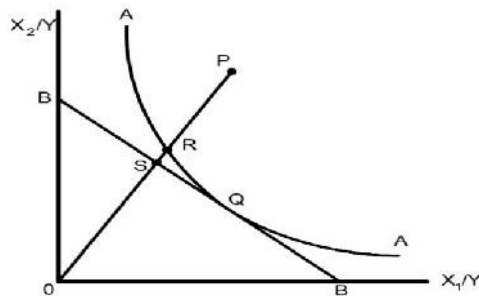
7. Constant Return to Scale

۸. فلاحی و احمدی (۱۳۸۴)

9. Isoquant Curve

هم‌مقداری تولید (AA) منطبق باشد. این امر توانایی بنگاه را برای به دست آوردن حداکثر محصول از مجموعه عوامل تولید مشخص را منعکس می‌کند. در نمودار ۱ قیمت عوامل تولید به وسیله خط هزینه یکسان BB نشان داده شده است، کارایی تخصیصی (قیمتی) یک بنگاه که در P تولید می‌کند، بصورت نسبت OS/OR تعریف می‌شود. به عبارتی زمانی بنگاه از نظر تخصیصی کاملاً کاراست که بر روی خط هزینه یکسان قرار گیرد. به‌طور کلی کارایی فنی نشان‌دهنده میزان توانایی یک بنگاه برای حداکثر کردن تولید با توجه به عوامل تولید مشخص و کارایی تخصیصی نشان‌دهنده توانایی بنگاه برای استفاده از ترکیب بهینه عوامل تولید با توجه به قیمت آن می‌باشد. همچنین از حاصل ضرب کارایی فنی و کارایی تخصیصی می‌توان کارایی اقتصادی^۱ را بر حسب تعریف فارل برای بنگاه P به صورت $OS/OR \times OR/OP = OS/OP$ به دست آورد.^۲

نمودار ۱. توصیف انواع کارایی به روش فارل



به‌طور کلی کارایی فنی نشان‌دهنده میزان توانایی یک بنگاه برای حداکثر کردن تولید با توجه به عوامل تولید مشخص و کارایی تخصیصی نشان‌دهنده توانایی بنگاه برای استفاده از ترکیب بهینه عوامل تولید با توجه به قیمت آن می‌باشد. زمانی بنگاه P دارای کارایی اقتصادی است که خود را از وضعیت P به Q برساند. امتیاز عمده اندازه‌گیری کارایی به روش فارل این است که مستقل از واحد اندازه‌گیری است، یعنی تغییر در واحدهای

1. Economic Efficiency

۲. امامی‌مبیدی (۱۳۷۹)

اندازه‌گیری، میزان اندازه‌گیری کارایی را تغییر نمی‌دهد.^۱

۱-۳-۳. اندازه‌گیری کارایی فنی به روش تحلیل پوششی داده‌ها

به دلیل مشکلات عملی در اندازه‌گیری و محدودیت‌هایی که در روش فارل (بازده ثابت نسبت به مقیاس) مطرح بود، این روش کاربرد عملی زیادی نیافت و تا سال‌ها مسکوت ماند تا اینکه در سال ۱۹۷۸، سه متخصص تحقیق در عملیات، چارنز^۲، کوپر^۳ و رودز^۴، تحقیقی ارائه نمودند که طی آن از طریق برنامه‌ریزی خطی، اندازه‌گیری عملی کارایی را معرفی کردند که توانایی اندازه‌گیری کارایی با چندین نهاد و ستانده را داشت. این روش اندازه‌گیری کارایی بدلیل قابلیت‌های فراوان مانند استفاده همزمان از چندین نهاد و ستانده با مقیاس‌های اندازه‌گیری متفاوت، ارائه الگوی مرجع برای بنگاه‌های ناکار، امکان تفکیک کارایی فنی کل به کارایی فنی خالص (مدیریتی) و کارایی مقیاس و عدم نیاز به پیش فرض در مورد نوع تابع تولید، بطور گسترده‌ای مورد توجه محققان است.^۵

برای ساختن مدل فرض می‌کنیم n واحد وجود دارد و هدف ارزیابی کارایی واحد تحت بررسی (واحد صفر) که ورودی‌های x_1, x_2, \dots, x_m را برای تولید خروجی‌های y_1, y_2, \dots, y_s مصرف می‌کند است. در صورتی که وزن‌های تخصیص داده شده به خروجی‌ها با u_1, u_2, \dots, u_s و وزن داده شده به ورودی‌ها با v_1, v_2, \dots, v_m نشان داده شود، آنگاه متغیرهای مسئله فوق وزن‌ها بوده و جواب مسئله مناسب‌ترین مقادیر را برای وزن‌های واحد صفر ارائه و کارایی آن را اندازه‌گیری می‌کند که مدل ریاضی آن به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} \max z_r &= \sum_{r=1}^s u_r y_r, \\ \text{st: } \sum_{i=1}^m v_i x_i &= 1 \\ \sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} &\leq 0 \quad (j=1, 2, 3, \dots, n) \quad u_r, v_i \geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

۱. امامی میبدی (۱۳۷۹)

2. Charnes
3. Cooper
4. Rhodes

۵. امامی میبدی (۱۳۷۹)

اگر متغیر متناظر با محدودیت اول و دوم در مسئله ثانویه به ترتیب با z و y بیان شود، مدل پوششی به صورت زیر به دست می آید:

$$\begin{aligned} \min y, = \\ \text{st: } \sum_{j=1}^n y_{rj} \geq y_r, \quad (r=1, 2, \dots, s) \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq x_i, \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad z \geq 0 \quad (j=1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (2)$$

در سال ۱۹۸۴ با در نظر گرفتن فرض بازده متغیر نسبت به مقیاس توسط بانکر، چارنز و کوپر اندازه گیری کارایی فنی با روش تحلیل پوششی داده ها بسط یافت و به مدل BCC شهرت پیدا کرد. برای به دست آوردن مدل BCC کافی است که قید تحدد $\sum_{j=1}^n z_j = 0$ به مدل ۲ اضافه شود تا مدل با فرض بازده ثابت به مدلی با فرض بازده متغیر تبدیل گردد. در این حالت کارایی فنی کل به دو جزء کارایی فنی خالص (کارایی مدیریتی)^۱ و کارایی مقیاس قابل تفکیک است.

کارایی مقیاس \times کارایی فنی خالص (کارایی مدیریتی) = کارایی فنی کل

منحنی تولید یکسان و تابع تولید مرزی ناپارامتریک که بصورت خط شکسته برای بنگاه های کارا به دست می آید، ممکن است در اندازه گیری مشکلاتی بصورت نهاده مازاد^۲ یا ستانده مازاد^۳ ایجاد نماید. در روش تحلیل پوششی داده ها این مشکل با استفاده از مدل زیر که مدل دو مرحله ای تحلیل پوششی داده هاست برطرف می شود.^۴

$$\begin{aligned} \min y, = - \left(\sum_{i=1}^m S_i^- + \sum_{r=1}^s S_r^+ \right) \\ \text{st: } \sum_{j=1}^n y_{rj} - S_r^+ = x_i, \quad (r=1, 2, \dots, s) \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} + S_i^- = x_i, \quad (i=1, 2, \dots, m) \\ \sum_{j=1}^n z_j = 1 \quad z \geq \quad \text{آزاد در علامت: } (j=1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (3)$$

۱. کارایی مدیریتی (کارایی فنی خالص) یا همان کارایی فنی تحت فرض بازده ی متغیر نسبت به مقیاس

2. Input slack

3. Output slack

که S_r^+ و S_i^- به ترتیب نشان‌دهنده ورودی مازاد و خروجی مازاد است. باید توجه داشت یک واحد زمانی کارا است، اگر و تنها اگر $\ast = 1$ و برای تمامی $S_r^{\ast} = 0$ و $S_i^{-\ast} = 0$ باشد، و اگر برای یک واحد $\ast = 1$ و برای بعضی $S_i^{-\ast} \neq 0$ باشد آنگاه واحد تحت بررسی واحدی با کارایی ضعیف می‌باشد.^۱

۳-۴. خروجی‌های نامطلوب

چند روش مختلف برای وارد کردن خروجی‌های نامطلوب در مدل وجود دارد. ساده‌ترین روش این است که، با کالای نامطلوب به عنوان یک ورودی رفتار شود. توجیه انجام این کار در بسیاری از تکنولوژی‌ها مشاهده شبا‌هت رابطه بین آلودگی و خروجی با رابطه ورودی و خروجی می‌باشد. مثلاً، بیشتر خروجی‌ها تنها می‌توانند با نیروی کار بیشتر (یک ورودی مرسوم) و آلودگی بیشتر، تولید شوند. آتکینسون و دورفمن^۲ به خروجی بد برچسب «تعویض‌کننده تکنولوژی»^۳ را داده‌اند. اما همانند روش مرسوم خروجی بد را به عنوان یک نهاده وارد مدل کرده‌اند. اگر خروجی بد را به عنوان نهاده در نظر بگیریم در تعریف زیست‌کارایی به سادگی می‌توان، اصطلاح کارایی ورودی‌محور را استفاده کرد که بطور متناظر برای کالای بد به عنوان زیست‌کارایی تعریف می‌شود.

اما روش دوم این است که خروجی بد را به عنوان یک ستانده در نظر بگیریم. یعنی مقدار بیشتری از کالاهای خوب، مطلوب است اما مقدار بیشتر کالاهای بد نامطلوب است. اما اگر کالای بد را معکوس کنیم، کالای بد می‌تواند در این حالت به عنوان کالای خوب در نظر گرفته شود. مثلاً اگر B کالای بد باشد، می‌توان آن را بصورت $y_j = \frac{1}{b}$ (و نام‌گذاری آن به عنوان z امین خروجی) به عنوان یک کالای خوب در نظر گرفته شود. اگر مقدار کالاهای بد معکوس شوند، از این‌رو زیست‌کارایی مبتنی بر کارایی خروجی‌محور اندازه‌گیری می‌شود که بصورت معکوس کردن خروجی‌های بد تعریف می‌شود.^۴

۳-۴-۱. روش DEA خروجی‌محور با ستانده نامطلوب

اگر y_{rj}^g نشان‌دهنده خروجی مطلوب (خوب) و y_{rj}^b خروجی نامطلوب (بد) باشد، افزایش

۱. مهرگان (۱۳۸۳)

2. Atkinson and Dorfman (2005)
3. Technology Shifter
4. Gary and Tole (2008)

y_{rj}^g و کاهش y_{rj}^b برای بهبود عملکرد مدنظر است. با این وجود در مدل‌های پوششی خروجی محور با بازده به مقیاس متغیر، هر دو خروجی y_{rj}^g و y_{rj}^b به منظور بهبود عملکرد، افزایش داده می‌شوند. در اینجا به منظور افزایش خروجی مطلوب و کاهش خروجی نامطلوب، ابتدا خروجی نامطلوب را (-۱) ضرب کرده و مقدار t_r را به تمامی خروجی‌های نامطلوب منفی اضافه می‌کنیم تا مقدار آن‌ها مثبت شوند، به گونه‌ای که $(y_{rj}^{-b} = -y_{rj}^b + t_r > 0)$ گردد.

مقدار t_r را بطور مثال از رابطه $t_r = \text{Max}\{y_{rj}^b\} + 1$ می‌توان به دست آورد. سایر خروجی‌های مطلوب را به همان صورت قبل می‌توان وارد مدل کرد.^۱

$$\text{Max } Z = h$$

$$\text{st: } \sum_{j=1}^n Y_{rj}^g \geq h Y_r^g$$

$$\sum_{j=1}^n Y_{rj}^{-b} \geq h Y_r^{-b}$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} \leq X_i \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n j = 1 \quad j \geq 0 \quad (j=1, 2, \dots, n)$$

۳-۵. کارایی کل عامل انرژی بر اساس تحلیل پوششی داده‌ها

تاکنون دو شاخص شدت انرژی و کارایی انرژی از شاخص‌های مطرح در برآورد میزان عملکرد نهاد انرژی بوده‌اند که به دلیل آنکه تنها نهاد انرژی را برای تولید خروجی در برآورد خود مدنظر قرار می‌دهند مورد نقد بسیار هستند. این در حالیست که در سال‌های اخیر شاخص جدید با عنوان شاخص کارایی کل عامل تولید (TFEE)^۲ توسط هو و وانگ معرفی شده است که ایرادات شاخص‌های قبلی را نداشته و همه نهاد‌های موجود برای تولید ستاده مورد نظر را برای برآورد کارایی نهاد انرژی مدنظر قرار می‌دهد اعم از نیروی کار، سرمایه و غیره و ایرادات وارده بر کارایی انرژی عامل جزئی مرسوم را با مورد توجه

۱. مهرگان (۱۳۸۳)

قرار دادن اثرات جانشینی بین عامل انرژی و سایر عوامل را برطرف می‌کند.^۱ هو و وانگ (۲۰۰۶) شاخص TFEE را به صورت نسبت تارگت به میزان واقعی نهادهی انرژی تعریف و با فرض بازده ثابت به مقیاس (CRSDEA) از آن استفاده کردند. مدل DEA با فرض بازدهی ثابت به مقیاس برای تمامی واحدهای تصمیم‌گیری که در مقیاس بهینه عمل می‌کنند شناخته شده است. اگر چه فاکتورهایی نظیر رقابت ناقص و محدودیت‌های مالی باعث شوند واحد تصمیم‌گیری در مقیاس بهینه عمل نکند.^۲ اگر این احتمال برود که اندازه واحدهای مورد بررسی توانایی آنها را در ایجاد تولیدکارا تحت تأثیر قرار دهد نیز فرض CRS فرضی نامناسب خواهد بود. مدل مورد نظر در این تحقیق به شکل زیر است: برای هر یک از N واحد تصمیم‌گیر K نهاده و M ستانده وجود دارد. برای واحد تصمیم‌گیر i ام نهاده‌ها و ستانده‌ها به ترتیب با بردار ستونی x_i و y_i نشان داده شده‌اند. مدل VRS نهاده‌گرا مسئله برنامه‌ریزی خطی زیر را برای DMU_i به شکل زیر حل می‌کند:

Min

$$st: \sum_{j=1}^N Y_j - s^+ = \cdot$$

$$\sum_{j=1}^N x_j + s^- = x \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^N j = 1$$

$$j \geq 0 \quad (j=1, 2, \dots, N)$$

که در آن مقدار عددی \cdot ، برداری $1 \times N$ از ثابت‌ها که مجموعه‌ای محدب از ستانده‌ها و نهاده‌های مشاهده شده را تشکیل می‌دهد و s اسلک غیرشعاعی را بیان می‌کند. مقدار کارایی فنی واحد i ام را نشان می‌دهد $(1 - \cdot)$ تنظیمات شعاعی می‌باشد. واحد i ام کارا ترین نقطه روی مرز می‌باشد و اسلک آن صفر است، اگر $\cdot = 1$ باشد. اگر $\cdot = 1$ و اسلک آن بزرگتر از صفر باشد، کارایی ضعیف است. اگر $\cdot < 1$ باشد بیانگر این است که واحد ناکاراست.

۱. شهابی (۱۳۹۴)

۲. همان

تارگت نهاده انرژی (TEI)^۱ در این مطالعه اختلاف میزان نهاده واقعی انرژی (AEI)^۲ و تنظیمات کل (TA)^۳ می‌باشد و حداقل سطح نهاده انرژی جهت رسیدن به سطح کارای انرژی به عنوان هدف می‌باشد. شاخص TFEE واحد i ام در دوره t به صورت زیر به دست می‌آید.^۴

$$TFEE(i,t) = \frac{TEI(i,t)}{AEI(i,t)} = \frac{AEI(i,t) - TA(i,t)}{AEI(i,t)} \quad (۶)$$

طبق مدل بالا مقدار تنظیمات کل کمتر از صفر نمی‌باشد. تنظیمات کل صفر نشان می‌دهد که میزان واقعی نهاده انرژی درست میزان تارگت نهاده انرژی می‌باشد، بنابراین شاخص TFEE برابر ۱ بوده و مصرف انرژی بهینه می‌باشد. اگر میزان تنظیمات کل بزرگتر از صفر باشد شاخص مورد نظر کمتر از یک خواهد بود و دلالت بر نهاده انرژی اضافی دارد که می‌توان بدون کاهش سطح تولید آن را کاهش داد. بنابراین شاخص TFEE معمولاً بین صفر و یک می‌باشد.

این پژوهش از نوع تجربی است و برای برآورد کارایی فنی از روش DEA با جهت گیری خروجی محور استفاده شده است. به دلیل قراردادهای کارگری و چسبندگی دستمزدها، اخراج و تعدیل نیروی کار با مشکلاتی مواجه است و در صورت نیاز به تعدیل سرمایه نیز نمی‌توان این تعدیل را به سرعت ایجاد کرد. پس بخاطر انعطاف ناپذیری در کاهش دادن نهاده‌ها، جهت گیری خروجی محور انتخاب شده است تا بتوان با همان نهاده‌های موجود ارزش افزوده بیشتری بوجود آورد. و در ادامه برای برآورد کارایی انرژی با استفاده از شاخص TFEE رویکرد ورودی محور استفاده شد. در این پژوهش یک واحد کارخانه آب‌شیرین کن اسمز معکوس واقع در منطقه ویژه اقتصادی در طول ۹ سال فعالیت مورد بررسی قرار گرفته است. و فعالیت مذکور بصورت ماهانه و در مجموع ۱۰۸ ماه، مد نظر قرار گرفت. ظرفیت قرارداد تولید آب ۱۰,۰۰۰ مترمکعب در شبانه‌روز می‌باشد و ظرفیت احداث ۱۲,۵۰۰ مترمکعب در شبانه‌روز است. در این مطالعه فعالیت واحد آب‌شیرین کن در هر ماه به عنوان یک واحد تصمیم گیرنده در نظر گرفته شده است، که چهار نهاده انرژی

-
1. Target Energy Input
 2. Actual Energy Input
 3. Total Adjustments
 4. Hu and Wang (2006) and Wang (2012)

برق، نیروی انسانی، مواد شیمیایی (کلر، سدیم متابی سولفیت، انتی اسکالانت، اسید سولفوریک، سود)، تعمیر، نگهداری و تعویض ممبران‌ها و تجهیزات، را برای تولید آب شیرین به عنوان ستاده مورد استفاده می‌دهند. بنابراین متغیرهای تحقیق شامل موارد زیر می‌باشد.

انرژی برق: اسمز معکوس فرآیندی است که از نظر انرژی بسیار پر مصرف می‌باشد. از آنجا که ۴۴٪ از هزینه‌های سرمایه‌گذاری در یک واحد اسمز معکوس شامل هزینه‌های انرژی الکتریکی می‌شود، این نهاد یکی از مهم‌ترین متغیرهای مورد نظر در این مطالعه می‌باشد. میزان انرژی مورد استفاده در هر ماه با واحد کیلووات بر ساعت وارد مدل شده است.

مواد شیمیایی: مواد شیمیایی که شامل کلر، سدیم متابی سولفیت، انتی اسکالانت، اسید سولفوریک، سود می‌شوند از دیگر نهاده‌های مهم در صنعت آب شیرین کن است که در دو مرحله پیش تصفیه^۱ و پس تصفیه^۲ به منظور یک عامل ضد عفونی کننده وارد چرخه شیرین سازی می‌شوند. این نهاد با واحد ریال بر متر مکعب در مدل استفاده شده است.

تعمیر و تعویض ممبران‌ها و ماشین آلات: در سیستم اسمز معکوس، غشاء مهم‌ترین و حساس‌ترین قسمت دستگاه می‌باشد. همچنین غشاء به علت تماس مداوم با مواد شیمیایی افزوده شده به آب، بایستی مقاوم بوده و با مواد بازدارنده و ضد رسوب گذار و زیست کش‌ها^۳ واکنش ندهد. لذا این عامل نیز یکی از متغیرهای مهم در صنعت آب شیرین کن به روش RO می‌باشد که با واحد ریال بر متر مکعب وارد مدل مورد مطالعه شده است.

نیروی کار: منظور از نیروی کار در این مطالعه تعداد نیروی انسانی است که بر حسب نفر می‌باشد.

آب شیرین: آب شیرین تنها خروجی مطلوب این تأسیسات می‌باشد که بر حسب متر مکعب محاسبه گردیده است. (ستاده مطلوب)

پساب شور: یکی از مهم‌ترین خروجی‌های نامطلوب در این تکنولوژی پساب شور است که با واحد متر مکعب اندازه‌گیری شده است. (ستاده نامطلوب)

دی اکسید کربن (CO_2): خروجی مهم دیگر گازهای گلخانه‌ای منتشر شده حین تولید برق و یا تأمین حرارت است. میزان انتشار CO_2 بر حسب گرم بر کیلووات ساعت به مدل اضافه شده است. (ستاده نامطلوب)

-
1. Pretreatment
 2. Post Treatment
 3. Biocides

برای اندازه گیری کارایی با تحلیل پوششی داده ها از نرم افزار win4deap استفاده شد.

۴. یافته های تحقیق

۴-۱. متوسط کارایی فنی آب شیرین کن

همانطور که از جدول (۲) خلاصه شده کارایی در طی سال های ۸۷ تا ۹۵ استخراج می شود، بجز سال های اول و آخر مورد مطالعه که عدم کارایی فنی تحت فرض CRS بدلیل عدم کارایی در مدیریت بوده است، در باقی سال ها عدم کارایی فنی بدلیل عدم کارایی در مقیاس بوده است. از طرفی در تمامی این سال ها (از ۸۸ تا ۹۴) در وضعیت بازده کاهنده نسبت به مقیاس (drs)، یعنی در قسمت صعودی هزینه متوسط بلندمدت فعالیت می کند و با افزایش سطح خروجی خود می تواند به مقیاس بهینه رسیده و دارای کارایی مقیاس و در نهایت کارایی فنی صددرصد تحت فرض CRS گردد. کمترین میزان کارایی در این میان تحت فرض CRS مربوط به سال ۹۱ می باشد با ۸۲/۴ درصد کارایی فنی و به ترتیب ۹۹/۳ درصد و ۸۳/۵ درصد کارایی مدیریتی و کارایی مقیاس. به عبارت دیگر عدم کارایی فنی در این سال ناشی از ناکارایی مدیریتی و ناکارایی مقیاس بوده است. چنانچه در این بازه زمانی فعالیت واحد مورد مطالعه ۰/۷ درصد در ستانده خود افزایش ایجاد کند می تواند بر روی مرز کارا تحت فرض VRS قرار گیرد.

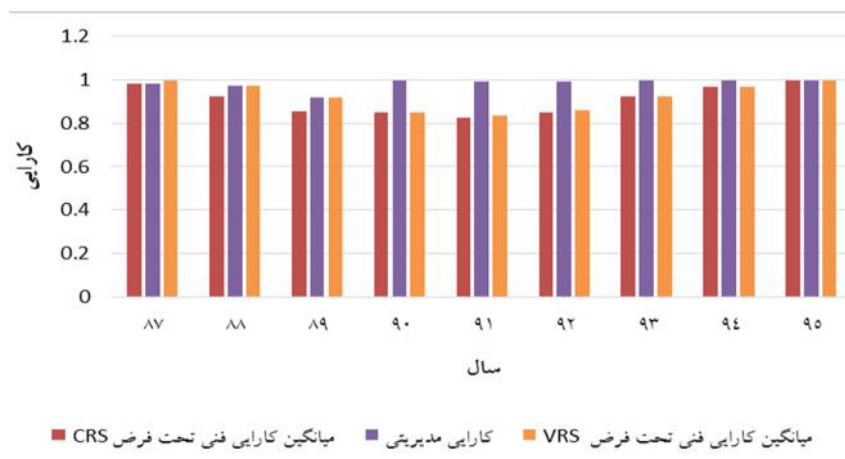
جدول ۲. مقادیر کارایی فنی و مقیاس آب شیرین کن مورد نظر طی سال های ۱۳۹۵-۱۳۸۷

سال	تحت فرض VRS		تحت فرض CRS
	نوع بازده	کارایی مقیاس	کارایی فنی خالص (کارایی مدیریتی)
۱۳۸۷	ثابت	۱	۰/۹۸۱
۱۳۸۸	کاهشی	۰/۹۷۳	۰/۹۷۴
۱۳۸۹	کاهشی	۰/۹۲	۰/۹۱۹
۱۳۹۰	کاهشی	۰/۸۵۱	۰/۹۹۹
۱۳۹۱	کاهشی	۰/۸۳۵	۰/۹۹۳
۱۳۹۲	کاهشی	۰/۸۶۲	۰/۹۹۵
۱۳۹۳	کاهشی	۰/۹۲۴	۰/۹۹۷
۱۳۹۴	کاهشی	۰/۹۷	۰/۹۹۹
۱۳۹۵	ثابت	۱	۰/۹۹۹
میانگین		۰/۹۲۶	۰/۹۸۴

منبع: نتایج تحقیق

جهت اثبات این نکته که کدامیک از انواع ناکارایی (ناکارایی مدیریت و ناکارایی مقیاس) بیشترین تأثیر را در ناکارایی فنی تحت فرض بازده ثابت نسبت به مقیاس داشته است از نمودار ۲، استفاده شده است. در این نمودار میانگین کارایی فنی، کارایی مدیریت و کارایی مقیاس برای واحد آب‌شیرین‌کن مورد مطالعه در خلال سال‌های ۱۳۸۷-۱۳۹۵ و برای هر سال به صورت جداگانه نمایش داده شده است. بر طبق نمودار به طور متوسط در ۷۰ درصد مواقع عدم کارایی فنی تحت فرض بازده ثابت به مقیاس ناشی از عدم کارایی مقیاس بوده است و تنها ۳۰ درصد ناشی از ناکارایی مدیریتی می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ناکارایی مقیاس بیشترین تأثیر را بر ناکارایی فنی تحت فرض CRS داشته است و این بدان معناست که واحد مورد بررسی در اغلب مواقع به تولید در مقیاس بهینه اهمیت چندانی داده نشده است.

نمودار ۲. متوسط کارایی آب‌شیرین‌کن مورد نظر طی سال‌های مورد مطالعه



۲-۴. اندازه‌گیری زیست کارایی آب‌شیرین‌کن مورد مطالعه با استفاده از روش DEA بعد از جمع‌آوری داده‌ها با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها با رویکرد ستانده‌محور و نرم‌افزار win4deap زیست کارایی آب‌شیرین‌کن محاسبه شد که نتایج این محاسبات در جدول ۳ آمده و لازم به ذکر است که برای اندازه‌گیری زیست کارایی داده‌های ماهانه به کار رفته است. مقدار زیست کارایی محاسبه شده توسط نرم‌افزار همانند کارایی فنی،

عددی مثبت اما بین صفر و یک است. هرچه مقدار زیست کارایی به یک نزدیک تر باشد، فعالیت بنگاه از نظر محیط زیستی کارا تر بوده است، یعنی آلودگی کمتری ایجاد می کند.

جدول ۳. محاسبه زیست کارایی برای سال های ۱۳۸۷ ال ۱۳۹۵

سال فصل	سال	سال	سال	سال	سال	سال	سال	سال	سال
بهار	۱	۰/۹۴۵	۰/۹۳۲	۰/۸۶۸	۰/۸۶۸	۰/۸۶۸	۰/۸۶۶	۰/۹۰۸	۰/۹۷۸
تابستان	۱	۰/۹۰۲	۰/۷۴۲	۰/۶۷۴	۰/۶۴۵	۰/۷۳۹	۰/۸۶۳	۰/۹۸۴	۰/۹۸۶
پاییز	۰/۹۹۹	۰/۹۶۷	۰/۸۶۸	۰/۸۲۹	۰/۹۹۳	۰/۷۵۹	۰/۹۱۲	۰/۹۹۵	۰/۹۹۵
زمستان	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
میانگین	۰/۹۹۹	۰/۹۵۳	۰/۸۸۵	۰/۸۴۲	۰/۸۷۶	۰/۸۴۱	۰/۹۲	۰/۹۸۹	۰/۷۶۸

منبع: نتایج تحقیق

با توجه به جدول ۳، بنگاه در سال های ۱۳۸۷ و ۱۳۹۴ به ترتیب با زیست کارایی ۹۹/۹ و ۹۸/۹ درصد، کارا ترین عملکرد را در زمینه محیط زیستی داشته است. و سال ۹۵ با ۷۶/۸ درصد نا کارا ترین عملکرد زیست محیطی بنگاه را نشان می دهد.

نمودار ۳. روند تغییرات زیست کارایی طی سال های ۱۳۸۷ ال ۱۳۹۵



همانطور که در نمودار ۳ نشان داده شده، آب شیرین کن مورد مطالعه در ابتدا در سال ۱۳۸۷ فعالیت خود را با کارایی زیستی معادل ۹۹/۹ درصد آغاز کرده است و پس از آن

با یک روند نزولی در کارایی زیستی اش تا سال ۱۳۹۰ با کارایی معادل ۸۴/۲ درصد روبرو بوده است. پس از طی کردن یک روند نوسانی کاهشی و افزایشی به حداکثر میزان کارایی خود در سال ۹۴ با رقمی معادل ۹۸/۹ درصد رسید و در انتها در سال ۱۳۹۵ به کمترین میزان کارایی خود در طی سال‌های فعالیتش با رقمی معادل ۷۶/۸ درصد رسیده است.

بطور کلی، میانگین کلی زیست کارایی کارخانه آب‌شیرین‌کن مورد مطالعه برای کل دوره فعالیتش رقمی معادل ۹۰ درصد بوده، یعنی اگر بنگاه کارا عمل کند (کارایی صد در صد)، می‌تواند ۱۰ درصد میزان آلودگی را کاهش دهد و از آسیب رساندن به محیط زیست جلوگیری کند.

۳-۴. متوسط کارایی انرژی کل عوامل در کارخانه آب‌شیرین‌کن طی ۱۳۸۷ الی ۱۳۹۵ از آنجا که نهاده انرژی در صنعت آب‌شیرین‌کن مهم‌ترین و پرهزینه‌ترین نهاده می‌باشد لذا بررسی کارایی نهاده انرژی در تولید آب شیرین با اهمیت جلوه می‌کند. در این راستا با بهره‌گیری از مدل کارایی انرژی کل عوامل و در نظر گرفتن همه عوامل تولید کارایی این عامل مهم برآورد شد. مقادیر بالاتر به معنی کارایی بالاتر و مقادیر پایین‌تر به معنی کارایی کمتر هستند. آنچه که از جدول نتایج بر می‌آید کاهش میزان کارایی انرژی در فصول گرم‌تر سال‌هاست. به این معنی که با افزایش دما میزان کارایی انرژی کاهش یافته و در فصل تابستان به کمترین میزان خود در سال می‌رسد و رفته رفته با کاهش دما کارایی انرژی افزایش یافته و در فصل زمستان صددرصد می‌شود.

می‌توان نتیجه گرفت که دما عامل تعیین‌کننده‌ای برای عملکرد نهاده انرژی در این صنعت است. این نشان‌دهنده ارتباط معکوس و معنادار بین کارایی انرژی و تغییرات دما در این صنعت می‌باشد. به طور کلی در اثر تغییر آب و هوا، ظرفیت تولید برق نیروگاه‌ها کاهش خواهد یافت که این تنها ناشی از تاثیر پدیده تغییر آب و هوا بر بازدهی نیروگاه‌ها است. علاوه بر این از آنجا که طراحی نیروگاه‌های گازی بر پایه متوسط دمای هوای ۱۵ درجه سانتیگراد می‌باشد که با افزایش دمای هوای محیط، بازدهی آنها نیز کاهش می‌یابد، می‌توان دلیل کاهش کارایی در فصول تابستان با افزایش دما را بابت کاهش توان به کارگیری از نیروی برق دانست.

جدول ۴. کارایی انرژی در کارخانه آب شیرین کن در خلال سال‌های ۱۳۸۷ الی ۱۳۹۵

فصل (میانگین ماه‌های هر فصل به عنوان واحدهای تصمیم‌گیرنده)	کارایی انرژی کل عوامل (TFEE)
بهار ۱۳۸۷	۱
تابستان ۱۳۸۷	۰/۶۸
پاییز ۱۳۸۷	۰/۹۸
زمستان ۱۳۸۷	۱
بهار ۱۳۸۸	۰/۹۰
تابستان ۱۳۸۸	۰/۶۱
پاییز ۱۳۸۸	۰/۹۵
زمستان ۱۳۸۸	۱
بهار ۱۳۸۹	۰/۸۴
تابستان ۱۳۸۹	۰/۵۵
پاییز ۱۳۸۹	۰/۸۶
زمستان ۱۳۸۹	۱
بهار ۱۳۹۰	۰/۹۹
تابستان ۱۳۹۰	۰/۹۹
پاییز ۱۳۹۰	۰/۹۹
زمستان ۱۳۹۰	۱
بهار ۱۳۹۱	۰/۹۲
تابستان ۱۳۹۱	۰/۸۹
پاییز ۱۳۹۱	۰/۹۶
زمستان ۱۳۹۱	۱
بهار ۱۳۹۲	۰/۹۴
تابستان ۱۳۹۲	۰/۸۳
پاییز ۱۳۹۲	۰/۹۲
زمستان ۱۳۹۲	۱
بهار ۱۳۹۳	۰/۹۶
تابستان ۱۳۹۳	۰/۸۶
پاییز ۱۳۹۳	۰/۹۸
زمستان ۱۳۹۳	۱
بهار ۱۳۹۴	۰/۹۷
تابستان ۱۳۹۴	۰/۸۱
پاییز ۱۳۹۴	۰/۹۸
زمستان ۱۳۹۴	۱
بهار ۱۳۹۵	۰/۸۷
تابستان ۱۳۹۵	۰/۶۴
پاییز ۱۳۹۵	۰/۹۳
زمستان ۱۳۹۵	۱
میانگین	۰/۹۱

منبع: نتایج تحقیق

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج به دست آمده حاکی از آن است که، متوسط کارایی فنی در واحد مورد مطالعه در خلال سال‌های فعالیتش تحت فرض بازده ثابت و متغیر نسبت به مقیاس به ترتیب برابر $۹۰/۸$ و $۹۸/۴$ درصد بوده است. یعنی در صورتی که به‌طور متوسط بنگاه مورد نظر بدون تغییر در نهاده‌های خود، مقدار آب تولیدی خود را $۱/۶$ درصد افزایش دهد می‌تواند به مرز کارایی تحت فرض VRS برسد و چنانچه به‌طور متوسط $۹/۲$ درصد بر میزان تولید آب شیرین خود بی‌افزاید علاوه بر قرار گرفتن بر روی مرز کارایی به تولید در مقیاس بهینه نیز دست خواهد یافت.

میانگین کارایی مدیریتی و مقیاس در خلال سال‌های $۱۳۸۷-۱۳۹۵$ نشان می‌دهد که در تمام سال‌های مورد بررسی، مقادیر کارایی مقیاس کمتر از مقادیر کارایی مدیریتی بوده است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ناکارایی مقیاس بیشترین تأثیر را بر روی ناکارایی فنی تحت فرض CRS داشته است و نشان از تولید در مقیاس غیربهینه برای بنگاه مورد نظر دارد.

بالاترین نرخ زیست کارایی با $۹۹/۹$ درصد مربوط به سال ۱۳۸۷ و پایین‌ترین آن با $۷۶/۸$ درصد مربوط به سال ۱۳۹۵ بود. بطور کلی، میانگین کلی زیست کارایی کارخانه آب‌شیرین کن مورد مطالعه برای کل دوره فعالیتش رقمی معادل ۹۰ درصد بوده، یعنی اگر بنگاه کارا عمل کند (کارایی صد در صد)، می‌تواند ۱۰ درصد میزان آلودگی را کاهش دهد و از آسیب رساندن به محیط زیست جلوگیری کند.

از آنجا که در بیشتر سال‌های مورد مطالعه میانگین کارایی مقیاس کمتر از میانگین کارایی مدیریتی بوده است می‌توان نتیجه گرفت که ناکارایی مقیاس بیشترین تأثیر را بر روی ناکارایی فنی تحت فرض CRS داشته است. این بدان معنی است که بنگاه مورد بررسی به تولید در مقیاس بهینه چندان اهمیتی نمی‌دهند. توصیه می‌شود که بنگاه در شرایط بازدهی صعودی نسبت به مقیاس (irs) و بازدهی نزولی نسبت به مقیاس (drs)، سطح فعالیت خود را به ترتیب کاهش و یا افزایش دهد تا بدین ترتیب به سمت قسمت هزینه متوسط بلند مدت (مقیاس بهینه) حرکت کند.

بعضی از ماه‌های مورد مطالعه در این صنعت تحت فرض بازده متغیر نسبت به مقیاس دارای کارایی فنی واحد می‌باشند. از همین رو از این ماه‌ها می‌توان به عنوان مرجع یاد کرد

که برای خود به تنهایی و یا برای خود و سایر ماه‌ها مرجع محسوب گردند. استفاده از ضرایب به دست آمده از ماه‌هایی که مرجع شده‌اند برای ماه‌هایی که بنگاه در آن ناکارا عمل کرده است، می‌تواند بنگاه را به سمت کارایی هدایت کند.

بر اساس نتایج زیست کارایی میانگین کل زیست کارایی کارخانه ۹۰ درصد بوده است، یعنی اگر بنگاه در تمام ماه‌ها کارایی صد درصد داشته باشد، می‌تواند به میزان ۱۰ درصد تولید آب شیرین را با استفاده از منابع کمتر و آلودگی کمتر افزایش دهد.

نتایج حاصل از شاخص TFE نشان داد که میانگین کارایی انرژی در کل دوره مورد مطالعه تقریباً ۹۰ درصد می‌باشد و کارایی انرژی در فصول زمستان صد درصد بوده و با افزایش دما در فصول بهار و تابستان کارایی انرژی رفته رفته کاهش یافته و به کمترین میزان خود در ماه‌های تیر و مرداد رسیده است که بیانگر رابطه معکوس و معنادار بین کارایی نهاده انرژی و دماست.

بررسی‌های اقتصادی این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش دما در فصول گرم سال کارایی انرژی برق کاهش چشمگیری داشته و با کاهش دما بطور تدریجی کارایی انرژی افزایش یافته و در نهایت در زمستان به کارایی صد درصد می‌رسد. این بدان معناست که توانایی تولید مولد با افزایش دما کاهش می‌یابد ولی در دمای پایین محیط اثر منفی دمای بالاتر کمتر است، لذا با توجه به تأثیر به سزای دما بر کارایی انرژی برق در اقلیم گرم و خشک، خنک کاری سالن مولد بسیار حائز اهمیت می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده در ارزیابی‌های اقتصادی این سیستم به نظر می‌رسد در بررسی‌های فنی می‌بایست اثر دمای محیط بر میزان تولید و مصرف برق و حرارت در نظر گرفته شود و با توجه به آن ارزیابی صورت گیرد و در صورت نیاز از پشتیبان برای تولید برق و یا حرارت استفاده شود.

در نهایت استان بوشهر با توجه به قرار گرفتن در منطقه فراخشک گرم از یک طرف و همجواری با خلیج فارس به نوعی بستر مناسبی جهت اجرایی نمودن آب شیرین کن‌ها با رویکرد انرژی‌های تجدیدپذیر است و دارای مقادیر قابل توجهی از انرژی خورشیدی و بادی می‌باشد و همچنین تکنولوژی مربوط به استحصال این انرژی‌ها، هزینه‌های ساخت و نگهداری را کاهش می‌دهد. از طرفی انرژی‌های تجدیدپذیر علاوه بر اینکه تنوع زیادی دارند دوستدار محیط زیست هم هستند. بنابراین به نظر می‌رسد با توجه به پتانسیل‌های بالقوه‌ای که در این منطقه وجود دارد حرکت به سمت تکنولوژی‌های دوستدار محیط

زیست و پاک هم از لحاظ محیط زیستی کارایی بیشتری خواهد داشت و هم از لحاظ مصرف انرژی کارایی بالاتر و هزینه کمتری خواهد داشت.

منابع

- امامی میبدی، علی (۱۳۷۹)، «اصول اندازه‌گیری کارایی و بهره‌وری»، تهران: مؤسسه مطالعات و پژوهش‌های بازرگانی.
- بزی، خدارحم و خسروی، سمیه و جوادی، معصومه و حسین‌نژاد، مجتبی (۱۳۸۹)، «بحران آب در خاورمیانه (چالش‌ها و راهکارها)»، کنگره بین‌المللی جغرافیدانان جهان اسلام. دوره چهارم. زاهدان. دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- جایدری، فرزانه و امامی میبدی، علی (۱۳۹۳)، «اندازه‌گیری زیست کارایی پالایشگاه‌های نفت ایران با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها»، پژوهش‌های اقتصادی (رشد و توسعه پایدار)، دوره ۱۴. شماره ۴.
- خزان، محمدمهدی و حسین پور، محمدحسین و بحرانی، ناصر (۱۳۹۲)، «تأثیر تغییرات دما و فشار و روشهای بهینه سازی آنها در فرآیند تصفیه آب به روش اسمز معکوس»، کنفرانس ملی مهندسی مکانیک ایران، شیراز، دانشگاه شیراز، موسسه بین‌المللی آموزشی و پژوهشی خوارزمی صفاشهر.
- شهابی، وحید (۱۳۹۴)، «تحلیل مقایسه‌ای کارایی انرژی صنایع بزرگ استان‌های ایران»، فصلنامه مطالعات اقتصاد کاربردی ایران، دوره ۴، شماره ۱۶.
- فلاحی، محمدعلی و احمدی، وحید (۱۳۸۴)، «ارزیابی شرکت‌های توزیع برق ایران»، مجله تحقیقات اقتصادی. شماره ۷۱، صفحات ۳۲۰-۲۹۵.
- منتظری، مهدی و بناکار، احمد و قبادیان، برات (۱۳۹۱)، «بررسی فاکتورهای مختلف بر هزینه نمک زدایی، همایش تخصصی نمک زدایی آبهای شور، لب شور و تصفیه پساب»، تهران، دانشگاه صنعت آب و برق
- مهرگان. محمدرضا، (۱۳۹۱)، «تحلیل پوششی داده‌ها مدل‌های کمی در ارزیابی عملکرد سازمان‌ها»، تهران: نشر کتاب دانشگاهی.

ناصرزاده، سمیه (۱۳۸۹)، ارزیابی زیست کارایی نیروگاه‌های حرارتی کشور با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه علامه طباطبائی.

References

- Abbott, Malcolm. (2006), "The productivity and efficiency of the Australian electricity supply industry." *Energy Economics*, No.28(4), pp. 444-454.
- Atkinson, Scott E., and Dorfman, Jeffrey H. (2005), "Bayesian measurement of productivity and efficiency in the presence of undesirable outputs: crediting electric utilities for reducing air pollution.", *Journal of Econometrics*, No.126(2), pp.445-468.
- Tchanche, B.F. and Lambrinos, Gr. And Frangoudakis, A. Papadakis, G. (2010), "Exergy analysis of microorganic Rankine power cycles for a small scale solar driven reverse osmosis desalination system", *Applied Energy*, No.87, pp. 1295–1306.
- Banker, Rajiv D and Morey, Richard C (1986), "Efficiency Analysis for Exogenously Fixed Inputs and Outputs.", *Operations research*, Vol. 34 No. 32(4), PP.513-521.
- Charnes, Abraham and Cooper, William W and Rhodes, Edwardo (1978), "Measuring the Efficiency of Decision Making Units", *European Journal of operational research* 2, No. 6, pp. 429-444.
- Coelli, Tim. (1996), "A Guide to Deap Version 2.1: A Data Envelopment Analysis (Computer) Program", Centre for Efficiency and Productivity Analysis, University of New England, Australia.
- Farrell, Michael James (1957), "The Measurement of Productive Efficiency.", *Journal of the Royal Statistical Society, Series A (General)* Vol. 120, No. 3, pp.253-290.
- Gary, Koop & Tole, Lise (2008), "What is The Environmental Performance of Firms Overseas? An Empirical Investigation of The Global Gold Mining Industry"; *J Prod Anal*, No. 30, pp. 129-143.
- Hernández-Sancho, F. and Molinos-Senante, M. and Sala-Garrido, R.(2011), "Energy Efficiency in Spanish Wastewater Treatment Plants: A Non-Radial Dea Approach." *Science of the Total Environment*, Vol. 409, No. 14, pp.2693-2699.
- Hernández-Sancho, Francesc and Ramón Sala-Garrido.(2009), "Technical Efficiency and Cost Analysis in Wastewater Treatment Processes: A Dea Approach." *Desalination* Vol. 249, No. 1, pp.230-234.
- Honma, S. and Hu, JL. (2014), "Industry-level total-factor energy efficiency in developed countries: A Japan-centered analysis.", *Applied energy*, NO.119, pp.67-78.

- Hu, J. L. and Chang, T. P. (2016), "Total-factor energy efficiency and its extensions: Introduction, computation and application", *In Data Envelopment Analysis*, Springer US, pp. 15-63.
- Hu, J. L. and Wang, S. C. (2006), "Total-factor energy efficiency of regions in China", *Energy policy*, No.31(17), pp.3206-3217.
- Liu, C. and Rainwater, K. and Song, L. (2011), "Energy analysis and efficiency assessment of reverse osmosis desalination process". *Desalination*, No.276, pp.352-358.
- Li, Ch. And Goswami, Y. and Stefanakos, E. (2013), "Solar assisted sea water desalination: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No.19, pp.136-163.
- Ru, L. and Si, W. (2015), "Total-factor energy efficiency in China's sugar manufacturing industry." *China Agricultural Economic Review*, Vol. 7, No.3, pp.360-373.
- Vaninsky, Alexander (2006), "Efficiency of electric power generation in the United States: analysis and forecast based on data envelopment analysis.", *Energy Economics*, No.28(3), pp.326-338.
- Wang, Z. H. and Zeng, H. L. and Wei, Y. M. and Zhang, Y. X. (2012), "Regional total factor energy efficiency: An empirical analysis of industrial sector in China.", *Apply Energy*, No. 97, pp.115-123.
- Zhou, Peng and Ang, B.W. and Wang, H. (2012), "Energy and CO₂ emission performance in electricity generation: a non-radial directional distance function approach.", *European Journal of Operational Research*, No. 22(3), pp.625-635.

Measuring Technical Efficiency, Environmental Efficiency and Energy Efficiency in Desalination Plant by Data Envelopment Analysis

Maryam Houshang *

Department of Energy Economics, Faculty of Environment and Energy, Islamic Azad University of Science and Research University, Tehran, Iran

Ali Emami Meibodi

Professor, Faculty of Economics, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran

Abstract

This study is carried out to measure the technical and environmental efficiencies of reverse osmosis desalination plant by Data Envelopment Analysis (DAE) approach in the South Pars Special Economic Zone during the nine years from 2007 to 2016. The energy efficiency is estimated by Total Factor Energy Efficiency Index. The results reveal that the technical efficiency of the plant throughout the years in operation averaged out at 90.8% and 98.4%, based upon the assumption of constant and variable returns to scale, respectively. Scale inefficiency proved to be the most decisive factor leading to technical efficiency under the assumption of CRS, implying the relative neglect of scale efficient production in this unit. Eco-efficiency is assessed by adding undesirable outputs to this model. The highest level of eco-efficiency (99.9%) was observed in the year 2008, while the year 2016 demonstrated the lowest figure in this regard, i.e., 76.8%. The average eco-efficiency of the desalination plant in question during the whole years in operation amounted to 90%. Finally, using the Total Factor Energy Efficiency Index the average of energy efficiency of the desalination plant is estimated at 91%. The results showed that the temperature is the most important factor in energy efficiency, whose increase would result in significant energy efficiency decrease.

Keywords: Technical Efficiency, Environmental Efficiency, Energy Efficiency, Data Envelopment Analysis, Reverse Osmosis.

JEL Classification: P18, P28, Q25.

* Corresponding Author: m.m.houshang@gmail.com