تحقیقات اقتصادی / دوره ۵۳، شمارهٔ ۲، تابستان ۹۷/ ص ۴۶۳-۴۳۷

ارزیابی سه بخشی کارایی زیست‌محیطی صنعت برق ایران: رهیافت تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای

سیاب ممی‌پور*[1]، بهنام نجف‌زاده[2]

۱. استادیار دانشکده اقتصاد، دانشگاه خوارزمی، تهران، s.mamipoor@khu.ac.ir

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، رشته مهندسی سیستم‌های اقتصادی – اجتماعی، دانشکده اقتصاد دانشگاه خوارزمی، تهران، behnamnajafzadeh@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۰۵

چکیده

برای توسعه‌ی گسترده صنعت برق در کشور علاوه بر بهبود عملکرد فنی و اقتصادی نیاز به افزایش کارایی زیست محیطی از طریق کاهش انتشار آلاینده‌ها و مقدار تلفات است. بنابراین حضور ستاده‌های نامطلوب در کنار ستاده‌های مطلوب نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد صنعت برق خواهد داشت. رهیافت تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) به طور گسترده در ارزیابی کارایی صنعت برق مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مدل‌های DEA سنتی، کارایی نسبی واحدهای تصمیم‌گیرنده با استفاده از چند ورودی و خروجی محاسبه می‌شود، اما عیب بزرگ این مدل‌ها نادیده گرفتن ساختار درونی یا پیوندهای میان بخش‌های مختلف یک سازمان یا فرآیند تولیدی است. مدل‌های شبکه‌ای ضمن برطرف کردن این عیب بزرگ، وابستگی بین اجزا را در نظر گرفته و ناکارایی را با دقت بیشتری برآورد می‌کنند. در این تحقیق با استفاده از ترکیب مدل غیرشعاعی SBM و ساختار شبکه سه بخشی به ارزیابی کارایی زیست‌محیطی ۱۵ شرکت برق منطقه‌ای ایران در بازه‌ی زمانی ۱۳۹۳-۱۳۸۹ پرداخته شده است. شبکه برق در کشور از سه بخش تولید، انتقال و توزیع تشکیل شده که با استفاده از دو واسطه برق تولید شده و برق منتقل شده به هم وابسته هستند و کارایی سراسری برق توسط آن‌ها تعیین می‌شود. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که بخش تولید بیشتر از دو بخش دیگر بر کارایی کل اثر می‌گذارد و نمرات کارایی شرکت‌ها را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. شرکت خوزستان بالاترین کارایی و شرکت غرب بدترین عملکرد را در کل شبکه برق داشته‌اند. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند موجب شناخت درست‌تر موقعیت کلی شرکت‌های برق و سیاست‌گذاری مناسب برای بهبودعملکردآن‌ها را فراهم آورد.

طبقه‌بندی JEL: Q57،C61،C67،Q53،Q43

واژه‌های کلیدی: کارایی زیست‌محیطی، ستاده مطلوب و نامطلوب، تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای (NDEA)، مدل مازاد مبنای (SBM)، شرکت برق منطقه‌ای

---

*. نویسنده‌ی مسئول، شماره‌ی تماس: ۰۹۱۴۱۲۸۱۱۴۹

۱- مقدمه

افزایش کارایی و بهره‌وری در تمامی صنایع راهی مطمئن برای دستیابی به رشد اقتصادی بالاتر با منابع یکسان است. صنعت برق به‌عنوان صنعت زیربنایی در فرآیند توسعه‌ی اقتصادی کشور و ایجاد زیرساخت‌های توسعه نقشی ارزنده و اساسی دارد و بسترهای لازم را برای پویایی و رشد کشور در زمینه‌های گوناگون اقتصادی، صنعتی، فرهنگی و اجتماعی فراهم می‌کند. ازاین‌رو، حرکت مستمر کشور در مسیر توسعه‌ی اقتصادی و ارتقاء سطح رفاه اجتماعی، تلاش مداومی را در افزایش ظرفیت‌های سه بخش تشکیل دهنده‌ی آن یعنی تولید، انتقال و توزیع انرژی برق و افزایش کارایی و بهره‌وری هر بخش طلب می‌کند (عمرانی و همکاران، ۱۳۹۲).

هر سه بخش شبکه برق به دلیل سرمایه‌بر بودن حائز اهمیت هستند. در ایران باوجود اینکه انواع نیروگاه‌ها شامل آبی، تجدیدپذیر، گرمایی و هسته‌ای برای تولید برق به کار برده می‌شوند، اما سهم بزرگی از تولید برق بر عهده‌ی نیروگاه‌های حرارتی می‌باشد. (حیدری، ۱۳۷۹). موضوع حائز اهمیت در بخش تولید برق تولید انتشار آلاینده‌های نامطلوب مانند SO_2 و CO_2 است که در بیشتر مطالعات سعی در کاهش آن برای افزایش کارایی و کیفیت محیط‌زیست دارند. بخش توزیع برق در حکم حلقه اتصالی میان مصرف‌کنندگان و صنعت برق، وظیفه‌ی فروش برق به مشترکان، نگهداری از شبکه‌های توزیع و توسعه‌ی آنها و ایجاد هماهنگی با بخش‌های بالادستی صنعت برق یعنی انتقال و تولید را عهده‌دار است. موضوع مهم در مورد شرکت‌های توزیع، تلفات توزیع برق می‌باشد که همانند انتشار آلاینده‌ها به‌عنوان یک عامل نامطلوب، دربحث کارایی شرکت‌های توزیع به شمار می‌رود و تدوین طرح ملی کاهش تلفات در شرکت توانیر، نشان از اهمیت آن در نزد مدیران صنعت برق کشور دارد (رضایی، ۱۳۹۲).

تحلیل پوششی داده‌ها[1] (DEA)، یک تکنیک برنامه‌ریزی ناپارامتریک برای ارزیابی کارایی نسبی یک مجموعه از واحدهای تصمیم گیرنده‌ی همگن[2] (DMU) با چند ورودی و چند خروجی است. از زمانی که مدل CCR[3] توسط چارنز و همکاران (۱۹۷۸) معرفی شده کاربرد گسترده‌ای یافته است و پژوهشگران بسیاری از آن استفاده کرده‌اند. هم اکنون این الگوریتم در بسیاری از حوزه‌ها همانند مدارس، بیمارستان‌ها، بانک‌ها و ...

1. Data Envelopment Analysis
2. Decision Making Units
3. Charnes-Cooper-Rhodes

کاربرد دارد (کوپر و همکاران[1]، ۲۰۰۴ و کوک و سیفورد[2]، ۲۰۰۹). مهم‌ترین توسعه‌ی CCR، عدم وابستگی به روابط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها، تابع هزینه و تابع تولید مرز کارایی است (سانگ و همکاران[3]، ۲۰۱۴؛ امیرتیموری و همکاران[4]، ۲۰۱۵). مدل‌های DEA سنتی[5]، کارایی را با استفاده از مقادیر ورودی و خروجی محاسبه می‌کنند اما ارتباط بین فرآیندهای گوناگون تولید را نادیده می‌گیرند. به‌تازگی با پیشرفت اقتصاد و مدیریت نیاز به مدل‌های کارایی کامل‌تر و جدیدتر احساس می‌شود، لذا با جزئی کردن کارایی تک مرحله‌ای (جعبه سیاه[6]) مدل‌های مؤثرتری برای اندازه‌گیری ناکارایی DMUها مورد سنجش قرار می‌گیرد. به منظور بررسی ورودی‌ها و خروجی‌ها از ابتدای فرآیند تولید تا محصول نهایی، الگوی DEA شبکه‌ای[7] معرفی می‌شود. (لوفگرن و تمبور[8]، ۱۹۹۹؛ کوک و همکاران[9]، ۲۰۱۰؛ پردای و همکاران[10]، ۲۰۱۱). مدل‌های شبکه‌ای گوناگونی برای ارزیابی دقیق‌تر کارایی اقتصادی و زیست‌محیطی پیشنهاد شده است (فاره و همکاران[11]، ۱۹۸۹؛ هوا و همکاران[12]، ۲۰۰۷)، بنابراین سوال اصلی در تحقیق حاضر این است که کارایی زیست‌محیطی صنعت برق به تفکیک تولید، انتقال و توزیع چگونه می‌باشد و ناکارایی شرکت‌های برق منطقه‌ای در کدام بخش از فرآیند تولید، انتقال و توزیع اتفاق افتاده است. بدین منظور در این تحقیق تلاش شده است از مدل‌های شبکه‌ای در حوزه‌ی انرژی همانند مطالعات تن و تسوتسی[13] (۲۰۰۹)، تن و تسوتسی (۲۰۱۰) و فوکویوما و میردهقان[14] (۲۰۱۲) برای ارزیابی کارایی زیست‌محیطی شبکه‌ای در صنعت برق کشور استفاده شود. شایان ذکر است که بیشتر مطالعات داخلی انجام گرفته در مورد محاسبه‌ی کارایی در صنعت برق به صورت تک مرحله‌ای (بخش تولید) بوده و مطالعات کمی که به صورت شبکه‌ای انجام شده است، کارایی فنی را مورد

1. Cooper et al.
2. Cook and Seiford
3. Song et al.
4. Amirteimoori et al.
5. Traditional DEA
6. Black box
7. Network DEA
8. Löhgren and Tambour
9. Cook et al.
10. Paradi et al.
11. Färe et al.
12. Hua et al.
13. Tone and Tsutsui
14. Fukuyama and Mirdehghan

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

مطالعه قرار داده‌اند و ستاده‌ی نامطلوب یا تلفات انجام گرفته در فرآیند تولید، انتقال و توزیع را در نظر نگرفته‌اند. در این تحقیق تلاش شده است کارایی زیست‌محیطی صنعت برق به صورت شبکه‌ای مورد مطالعه و ارزیابی قرار گیرد. در ادامه چارچوب مقاله به این صورت تنظیم شده است: در بخش دوم، به بیان ادبیات تحقیق (شامل مبانی نظری و مطالعات تجربی) پرداخته و بخش سوم، به بیان روش تحقیق و الگوی شبکه‌ای مورد استفاده اختصاص دارد. در بخش چهارم، ابتدا به معرفی داده‌های مورد استفاده پرداخته و سپس نتایج و تحلیل‌های تحقیق بیان شده و سرانجام در بخش پایانی به جمع‌بندی و ارائه‌ی پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی پرداخته می‌شود.

۲- مروری بر ادبیات تحقیق

هنگامی یک بنگاه کاملاً کارا است که امکان کاهش یک نهاده و یا افزایش یک ستاده بدون افزایش حداقل یک نهاده و یا کاهش حداقل یک ستاده دیگر در آن بنگاه وجود نداشته باشد (کوپمنز، ۱۹۵۱). تعریف فوق مرتبط با کارایی فنی است که ستاده ی نامطلوب را شامل نمی‌شود. دو مدل عمده در این زمینه، مدل‌های DEA ناپارامتریک CCR و BCC می‌باشند که الگوهای خطی برای حل مسائل کارایی در حالت چند نهاده و چند ستاده هستند و به ترتیب از نوع تکنولوژی بازدهی به مقیاس ثابت و متغیر هستند. در این روش با به‌کارگیری مجموعه‌ای از نقاط که توسط برنامه‌ریزی خطی تعیین شده‌اند، یک منحنی مرزی کارا ایجاد می‌شود. روش برنامه‌ریزی خطی با یک سری بهینه‌سازی، مشخص می‌کند که آیا DMU مدنظر روی خط کارایی قرار گرفته است یا خارج از آن قرار دارد. هدف اصلی تحلیل پوششی داده‌ها، تعیین کارایی یک سیستم یا واحد تصمیم‌گیری از طریق فرایند تبدیل ورودی‌ها به خروجی‌ها است. واحدی که دارای کارایی مساوی یک باشد، واحد کارا نام دارد و دیگر واحدها که کارایی بین صفر و یک دارند، واحدهای ناکارا شناخته می‌شوند.

ایراد مفهوم سنتی کارایی، نادیده گرفتن ارتباط بین فرآیندهای گوناگون تولید در سیستم‌های پیچیده است. ممکن است در یک DMU یک بخش نسبت به سایر بخش‌ها وضعیت نامناسبی داشته و عملکرد کلی آن DMU را تحت تأثیر قرار دهد. در تعریف

جدید یک واحد زمانی کارا شناخته می‌شود که در همه‌ی مراحل به‌صورت مستقل کارا باشد. (چن و یان[1]، ۲۰۱۱).

در بسیاری از سیستم‌های با ساختار چند بخشی، ستاده‌های بخش اول همان نهاده‌های بخش دوم، ستاده‌های بخش دوم همان نهاده‌های بخش سوم و به همین ترتیب ستاده‌های بخش N-1ام همان نهاده بخش Nام هستند. به ستاده‌های هر مرحله که نهاده مرحله‌ی بعدی نیز محسوب می‌شوند محصولات واسطه[2] گفته می‌شود. این الگوی تودرتو به جای در نظر گرفتن تنها یک فرآیند کلی، زیر فرآیندهای مختلف را با نهاده‌ها و ستاده‌های مختص به خود و محصولات واسطه‌ای را که در این سیستم تولید و مصرف می‌شوند در نظر می‌گیرد. به این نوع از الگوهای DEA، الگوی DEA شبکه‌ای[3] (NDEA) گفته می‌شود.

مزیت عمده‌ی الگوی NDEA، توجه به عملکرد چند بخش یا فرآیندهای جزئی در قالب یک سیستم است. در حقیقت نسبت به مدل‌های تک مرحله‌ای و ایستا، لحاظ کردن اثرات متقابل بین بخش‌های جزئی یک سازمان با شرایط پیچیده فعلی سازمان‌ها منطبق‌تر است. به طور خلاصه NDEA یک تکنیک و ابزار مفید برای سنجش عملکرد سازمانی است، زیرا از روشی حرفه‌ای منطبق با پیچیدگی سازمان‌های امروزی استفاده می‌کند (آوکیران و مک کریستال[4]، ۲۰۱۲).

اولین بار فاره و همکاران (۱۹۹۳)، مدل‌های DEA شبکه‌ای را معرفی کرده و سپس این مدل توسط سایر محققان گسترش یافته است. لویس و سکستون[5] (۲۰۰۴)، یک مدل شبکه‌ای چند مرحله‌ای پیشنهاد کرده‌اند که گسترش یافته مدل دو مرحله‌ای سکستون و لویس (۲۰۰۳) بوده است. مطالعه، آن‌ها یک مدل DEA را برای هر بخش به صورت مستقل ارزیابی می‌کند. این مطالعات به دلیل شعاعی بودن و نادیده گرفتن مازادهای نهاده‌ها و کمبود ستاده‌ها، با فرآیند واقعی تولید ناسازگار می‌باشد، زیرا فرض چنین مدل‌هایی تغییر متناسب نهاده‌ها و ستاده‌ها است. تن و تسوتسی (۲۰۰۹) یک مدل شبکه‌ای مازاد مبنا[6] (NSBM-DEA) را برای ارزیابی کارایی نهاده‌ها و ستاده‌های

1. Chen and Yan
2. Intermediate
3. Network DEA
4. Avkiran and McCrystal
5. Lewis and Sexton
6. Network Slacks Based Measure approach

یک سیستم که غیرمتناسب با هم تغییر می‌کنند معرفی نموده‌اند. در تحقیق آن‌ها متغیرهای کمکی[1] (اسلک‌ها) مختلف با تقسیم بر تعداد مشاهدات DMUهای مربوطه تعدیل شده و می‌توانند با یکدیگر مقایسه شوند. مدل مازادمبنا[2] (SBM)، اولین بار توسط تن (۲۰۰۰) معرفی شده است. در سنجش کارایی، مدل مازاد مبنا به‌طورمستقیم با مازاد نهاده‌ها[3] و کمبود ستاده‌ها[4] در ارتباط است. متغیرهای کمکی همچنین می‌توانند توسط بردارهای جهت‌دار یا برد متغیرهای مربوطه نیز تعدیل شوند (کائو، ۲۰۱۴). در بیش‌تر مطالعات تجربی مدل‌های کارایی شبکه‌ای، ستاده نامطلوب نادیده گرفته شده است، در صورتی که همانند مدل‌های کارایی تک مرحله‌ای جزء لاینفک فرآیند تولید محسوب شده و نادیده گرفتن آن موجب اریب نتایج می‌شود (هوانگ و همکاران[5]، ۲۰۱۴).

در جدول (۱)، مطالعات تجربی انجام گرفته در مورد محاسبه و اندازه‌گیری کارایی فنی و زیست‌محیطی در صنعت برق آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در مطالعات خارجی از رویکردهای متفاوتی اعم از یک مرحله و چندمرحله‌ای (شبکه‌ای) برای سنجش کارایی در صنعت برق استفاده شده است. با توجه به وجود روابط درونی و تنگاتنگ بین بخش‌های مختلف صنعت برق (تولید، انتقال و توزیع)، مطالعاتی همانند تن و تسوتسی (۲۰۰۹)، تن و تسوتسی (۲۰۱۰) و فوکویوما و میردهقان (۲۰۱۲)، از ویژگی منحصر بفردی برخوردار هستند. بیشتر مطالعات مزبور نتیجه گرفته‌اند که مدل‌های شبکه‌ای نسبت به مدل‌های سنتی (تک‌مرحله‌ای) از دقت بالاتری برخوردار است.

در مطالعات داخلی عموماً کارایی صنعت برق به صورت کلی (یک بخش خاص) محاسبه و ارزیابی شده است. تعدادی از مطالعات به ارزیابی کارایی بخش تولید برق پرداخته (همانند مطالعات آماده و رضایی، ۱۳۹۰؛ سیفی و همکاران، ۱۳۹۲؛ ممی‌پور و نجف‌زاده، ۱۳۹۵) و تعدادی نیز مختص بخش توزیع برق (همانند مطالعات سخنور و همکاران، ۱۳۹۰؛ رضایی، ۱۳۹۲) هستند. از معدود مطالعاتی که به ارزیابی کارایی شبکه‌ای (چند بخشی) برق پرداخته‌اند، می‌توان به مطالعه‌ی عمرانی و همکاران

1. Slacks
2. Slack Based Measure approach
3. Inputs Excess
4. Output Shortfalls
5. Huang et al.

(۱۳۹۲) و سلیمی و کرامتی (۱۳۹۴) اشاره کرد، که به‌دلیل تناسب موضوعی با تحقیق حاضر به اختصار به این مطالعات اشاره می‌شود.

عمرانی و همکاران (۱۳۹۲)، با استفاده از ساختار شعاعی مدل‌های شبکه‌ای، به محاسبه‌ی کارایی ۱۶ شرکت برق ایران در بین سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۸۶ پرداخته‌اند. شبکه‌ی مورد استفاده‌ی آن‌ها از دو سیستم برق منطقه‌ای و توزیع تشکیل شده و برق منطقه‌ای، خود، شامل انواع نیروگاه‌ها و شرکت‌های انتقال و فوق توزیع است. قدرت اسمی و هزینه‌ی سوخت مصرفی به‌عنوان نهاده نیروگاه‌ها - ظرفیت ایستگاه‌ها، طول خطوط انتقال و دریافت انرژی از شرکت‌های همجوار و واردات انرژی برق به‌عنوان نهاده‌ی شرکت‌های انتقال و فوق توزیع- طول خطوط توزیع و نیروی انسانی شرکت‌های توزیع به‌عنوان نهاده شرکت‌های توزیع- انرژی تولیدی و انرژی تحویلی به شرکت‌های توزیع به‌عنوان ستاده واسطه - ارسال انرژی به شرکت‌های همجوار و صادرات انرژی برق به‌عنوان ستاده شرکت‌های انتقال و فوق توزیع و انرژی کل فروخته شده و تعداد مشتریان به‌عنوان ستاده‌ی شرکت‌های توزیع در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار متوسط کارایی شرکت‌های برق برابر با ۰/۸۴۱ است و شرکت‌های برق فارس، خراسان، سمنان و گیلان به ترتیب رتبه‌های برتر را به خود اختصاص می‌دهند.

سلیمی و کرامتی (۱۳۹۴)، ابتدا با استفاده از سه مدل به ارزیابی کارایی شبکه سه جزئی (تولید – انتقال - فوق توزیع) ۱۶ شرکت برق منطقه‌ای کشور طی دوره‌ی ۱۳۹۲-۱۳۸۵ پرداخته و سپس با استفاده از رگرسیون چندگانه اعتبار سه مدل خود را سنجیده‌اند. آن‌ها از مقدار سوخت مصرفی، ظرفیت نامی نصب شده، طول خطوط انتقال، ظرفیت پست‌های انتقال، طول خطوط فوق توزیع و ظرفیت پست‌های فوق توزیع به‌عنوان نهاده‌ها، از انرژی ارسالی به شرکت‌های همجوار و برون مرزی در سطح ولتاژ انتقال و انرژی فروخته شده به شرکت‌های توزیع برق و شرکت‌های صنعتی در سطح ولتاژ فوق توزیع به‌عنوان ستاده‌ها و از تولید ویژه شرکت‌های برق منطقه‌ای و انرژی تحویلی به فوق توزیع به‌عنوان محصولات واسطه استفاده کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که میانگین کارایی ۱۶ شرکت برق از سال ۱۳۸۵ تا سال ۱۳۹۰ کاهش و از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۲ افزایش یافته است. شرکت‌های برق منطقه‌ای تهران، گیلان و خراسان، بالاترین کارایی و شرکت‌های برق سیستان و بلوچستان و مازندران پایین‌ترین کارایی را دارا هستند. همچنین نتایج تجزیه‌ی کارایی نشان می‌دهد که مراحل انتقال و فوق توزیع بیشترین تأثیر را در کارایی کل شرکت‌های برق منطقه‌ای ایران داشته‌اند.

جدول ۱. مطالعات تجربی داخلی و خارجی در خصوص سنجش کارایی در صنعت برق

محققان (سال و دوه زمانی)	موضوع	نتیجه
آماده و رضایی (۱۳۹۰) دوره: ۱۳۸۸-۱۳۸۳	اندازه‌گیری کارایی زیست‌محیطی بااستفاده از مدل کارایی سراسری ستاده مطلوب و نامطلوب تفکیک‌ناپذیر سراسری در بخش تولید شرکت‌های برق منطقه‌ای	شرکت برق منطقه‌ای آذربایجان و خراسان، از نظر کارایی فنی و کارایی زیست محیطی عملکرد ضعیفی دارند. همچنین شرکت برق منطقه‌ای خوزستان برخلاف کارایی فنی بالا، از کارایی زیست محیطی اندکی برخوردار است
سیفی و همکاران (۱۳۹۲) دوره: ۱۳۸۴ -۱۳۸۷	محاسبه‌ی کارایی زیست محیطی ۶ نیروگاه حرارتی تولید برق استان‌های خراسان جنوبی، رضوی و شمالی با استفاده از توابع فاصله هایپربولیک	کارایی زیست محیطی نیروگاه‌ها به‌طور متوسط ۹۳/۸۱ درصد و قیمت سایه‌ای هر کیلوگرم اکسید نیتروژن ۱/۱۲ ریال است
رضایی (۱۳۹۲) دوره: ۱۳۸۷-۱۳۹۰	کارایی و بهره‌وری ۳۸ شرکت توزیع برق کشور با استفاده از مدل مازاد مبنا (SBM) و مدل‌های ابرکارایی	شرکت‌های توزیع برق تبریز، اهواز و خراسان جنوبی بهترین عملکرد را داشته‌اند. وجود تفاوت معناداری بین مقادیر اَبرکارایی قبل و بعد از لحاظ کردن تلفات است. میزان تلفات، چگالی شبکه و ضریب بار ترانسفورماتور از عوامل مهم و اثرگذار روی اَبرکارایی هستند.
ممی‌پور و نجف‌زاده (۱۳۹۵) دوره: ۱۳۸۹-۱۳۹۳	ارزیابی کارایی زیست‌محیطی شرکت‌های برق منطقه‌ای: مقایسه مدل‌های شعاعی و غیرشعاعی	شرکت‌های برق منطقه‌ای کرمان و خوزستان بالاترین کارایی و شرکت‌های برق منطقه‌ای فارس و سیستان و بلوچستان پایین ترین کارایی را دارند و بعد از آزادسازی قیمت حامل‌های انرژی، استراتژی‌ها و رویکردهای متفاوتی توسط شرکت‌های برق منطقه‌ای اتخاذ شده است.
نموتو و گوتو[1] (۲۰۰۳) دوره: ۱۹۹۵-۱۹۸۱	ارزیابی کارایی پویا شرکت‌های برق ژاپن	نهاده‌های متغیر (سوخت مصرفی و نیروی کار) در وضعیت کارا قرار دارند و ناکارایی مربوط به نهاده‌های شبه ثابت (ظرفیت نصب شده، طول خطوط انتقال و ظرفیت ترانسفورماتور توزیع) است.
تن و تسوتسی (۲۰۰۹) سال ۱۹۹۴	محاسبه‌ی کارایی ۱۰ شرکت برق آمریکا با استفاده از تحلیل پوششی شبکه‌ای سه مرحله‌ای و مدل SBM نهاده محور	مدل‌های شبکه‌ای به دلیل در نظر گرفتن ساختار درونی و اثرات بخش‌های مختلف روی همدیگر، مزیت نسبی بر مدل‌های سنتی داشته و از دقت بالاتری برخوردار است

1. Nemoto and Goto

محققان (سال و دوه زمانی)	موضوع	نتیجه
وان گیمولر[1] (۲۰۰۹) دوره: ۲۰۰۰-۲۰۰۶	محاسبه‌ی کارایی ۵۰ شرکت بزرگ انتقال برق آمریکا با استفاده از مدل پویا	مدل‌های پویا دقیق‌تر و شباهت بیشتری با فضای واقعی تولید دارند
تن و تسوتسی(۲۰۱۰) دوره: ۱۹۹۰-۱۹۹۶	محاسبه‌ی کارایی ۵۰ شرکت برق (۴۱ شرکت برق آمریکا و ۹ شرکت برق ژاپن) با استفاده از تحلیل پوششی داده‌های پویا (مدل غیرشعاعی SBM)	آن‌ها با مقایسه‌ی نتایج مدل پویا با ایستا به قدرت مدل‌های پویا در ارزیابی کارایی در بلندمدت اشاره کرده‌اند.
چن و همکاران[2] (۲۰۱۲) سال: ۲۰۰۶	محاسبه‌ی کارایی زیست محیطی نیروگاه‌های تولید برق از مواد زائد برای تایوان	آن‌ها از یک شبکه دو مرحله‌ای استفاده کرده‌اند که مرحله‌ی اول، جمع‌آوری مواد زائد و مرحله‌ی دوم، تولید برق از طریق سوزاندن پسماندها است. نتیجه گرفته‌اند کارایی مرحله‌ی اول پایین‌تر از کارایی مرحله‌ی دوم است.
ژی و همکاران[3] (۲۰۱۲) دوره: ۲۰۰۲ - ۲۰۰۹	ارزیابی کارایی زیست محیطی ۳۰ شرکت برق چین با استفاده از شبکه دو مرحله‌ای	نوع نیروگاه اثر معناداری بر کارایی دارد و با توجه به وضعیت عرضه و تقاضای برق امکان وجود شکاف گسترده‌ای در نمرات کارایی شرکت‌ها وجود دارد
فوکویوما و میردهقان (۲۰۱۲) سال ۲۰۱۲	طراحی مدل شبکه‌ای استاندارد برای ارزیابی کارایی	با توجه به عیب مدل تن و تسوتسی (۲۰۰۹) مبنی بر وجود چند جواب بهینه در مدل برنامه‌ریزی هر بخش یک مدل شبکه‌ای SBM جدید پیشنهاد کرده‌اند که اجزا و نهاده‌ها و ستاده‌ها در آن دقیقاً مشابه با مدل تن و تسوتسی است و وضعیت کارایی را بدون بررسی تمام نقاط بهینه مشخص می‌کند

همان‌طورکه از مرور شواهد تجربی موضوع مورد بررسی ملاحظه می‌شود، در مورد ارزیابی کارایی شبکه‌ای در حوزه‌ی صنعت برق، مقالاتی به زبان لاتین موجود است، ولی در حوزه‌ی مطالعاتی این تحقیق (یعنی، کارایی زیست محیطی شبکه برق یا کارایی شبکه‌ای در حضور ستاده‌های نامطلوب) تحقیقات اندکی انجام گرفته است، بنابراین پژوهش حاضر هم به لحاظ موضوعی و هم به لحاظ کشور مورد بررسی حائز اهمیت است. با توجه به بررسی‌های انجام شده، در مطالعات داخلی نیز کارایی شبکه‌ی برق با در نظر گرفتن ستاده نامطلوب (وجود تلفات در کلیه بخش‌های سازمان امری غیرقابل

1.Von Geymueller
2. Chen et al.
3. Xie et al.

انکار است) تا به حال مطالعه‌ای انجام نگرفته است. همچنین از دید مدیریتی، تحقیق حاضر ماهیت فرآیندی را در صنعت برق کشور مورد توجه قرار داده و فرآیند تأمین برق از بخش تولید تا توزیع آن و تحویل به مشتری، ارزیابی و در مدل کارایی لحاظ شده است. ازاین‌رو، نتایج این تحقیق می‌تواند در شناسایی و اصلاح بخش‌های کارآمد و ناکارامد صنعت برق کشور نقش مؤثری داشته باشد.

۳- روش تحقیق

۳-۱- نمونه و معرفی پایگاه داده‌ها

تحقیق حاضر از نظر نوع، یک تحقیق کاربردی است و یک مطالعه موردی برای ارزیابی کارایی زیست‌محیطی شرکت‌های برق منطقه‌ای ایران به‌شمار می‌رود. هدف اصلی این تحقیق ارزیابی کارایی شبکه‌ای (تولید، انتقال و توزیع) ۱۵ شرکت برق منطقه‌ای کشور[۱] در بازه‌ی زمانی ۱۳۹۳-۱۳۸۹ است[۲]. علت انتخاب این بازه‌ی زمانی آزادسازی قیمت‌های حامل‌های انرژی در سال ۱۳۸۹ است. در این تحقیق شرکت برق منطقه‌ای سمنان و شرکت آب و برق کیش نیز به دلیل عدم دسترسی کامل به داده‌ها حذف شده‌اند. با توجه به اینکه فرآیند تحویل برق به مصرف کنندگان ماهیت چندمرحله‌ای دارد و نیز مدل‌های مرسوم DEA، فرآیندهای داخلی DMUها را در نظر نمی‌گیرند، در این تحقیق از مدل شبکه‌ای تحلیل پوششی داده‌ها (NDEA) برای سنجش کارایی کلی و کارایی فرایندهای داخلی شرکت‌های برق منطقه‌ای استفاده شده است. هر شرکت برق منطقه‌ای خود شامل سه بخش می‌باشد: ۱- تولید ۲- انتقال ۳- توزیع.

ساختار کلی شبکه برق در شکل ۱ نشان داده شده است.

- بخش تولید برق شامل سه نهاده‌ی سوخت مصرفی (شامل گازوئیل، گاز و نفت کوره)[۳]، ظرفیت نصب شده‌ی نیروگاه‌ها به‌عنوان متغیر جایگزین سرمایه و نیروی کار و یک ستاده نامطلوب به نام انتشار کربن دی اکسید است.

---

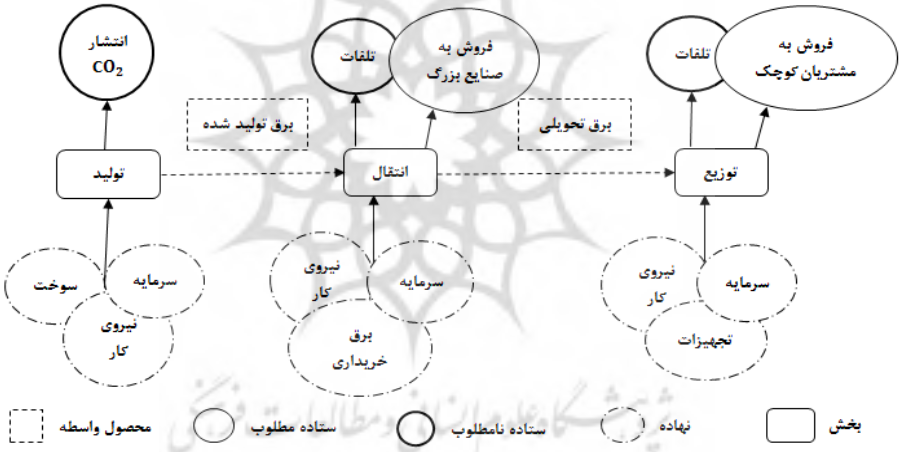
۱. شرکت‌های برق منطقه‌ای عبارتند از: آذربایجان، اصفهان، باختر، تهران، خراسان، خوزستان، زنجان، سیستان و بلوچستان، غرب، فارس، کرمان، گیلان، مازندران، هرمزگان و یزد

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

۳. انواع سوخت‌های مصرفی باتوجه به ارزش‌حرارتی سالانه گزارش شده در آمار تفصیلی صنعت برق هم واحد (میلیارد کیلوکالری) شده‌اند.

- بخش انتقال شامل سه نهاده‌ی نیروی کار، طول خطوط انتقال و فوق توزیع[۱] به‌عنوان متغیر جایگزین سرمایه و برق خریداری شده (خرید برق از شرکت‌های همجوار و برون مرزی)، یک ستاده‌ی مطلوب فروش برق به صنایع بزرگ در سطح ولتاژ انتقال و فوق توزیع و یک ستاده نامطلوب مقدار تلفات برق منتقل شده است.

- بخش توزیع شامل سه نهاده‌ی نیروی کار، ظرفیت ترانسفورماتور توزیع و موجودی شبکه توزیع (طول شبکه فشار متوسط + طول شبکه فشار ضعیف) به‌عنوان متغیرهای جایگزین سرمایه، ستاده‌ی مطلوب فروش به مشتریان کوچک و یک ستاده نامطلوب به نام مقدار تلفات است. دو محصول واسطه استفاده شده در این سیستم، برق تولید شده توسط نیروگاه‌ها و برق تحویلی به شرکت‌های توزیع است که اولی واسطه بین بخش تولید و انتقال (ستاده بخش تولید و نهاده بخش انتقال) و دومی واسطه بین بخش انتقال و توزیع (ستاده بخش انتقال و نهاده بخش توزیع) می‌باشد.



شکل ۱. ساختار شبکه‌ای شرکت‌های برق منطقه‌ای ایران

در جدول (۱)، خلاصه‌ی اطلاعات متغیرهای به کار برده شده در تحقیق به همراه واحد آنها آمده شده است. ستون اول، این جدول به ترتیب نشان دهنده بخش‌های تولید، انتقال و توزیع می‌باشد و ستون دوم، نام متغیر (نهاده - ستاده مطلوب - ستاده نامطلوب -واسطه) را نشان می‌دهد. ستون سوم، نماد متغیر معرفی شده در ستون دوم

۱. ظرفیت خطوط انتقال ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلو ولت و ظرفیت خطوط فوق توزیع ۶۶، ۶۳ و ۱۳۲ کیلو ولت است.

را نشان می‌دهد و ستون چهارم، بیانگر نوع متغیر و واحد استفاده شده است. ستون پنجم تا هشتم، بیانگر ویژگی‌های آماری متغیرهای مربوطه است.

جدول ۱. خلاصه‌ی آمار توصیفی نهاده‌ها و ستاده‌های شبکه سه بخشی شرکت‌های برق منطقه‌ای (۷۵ مشاهده)

بخش	متغیر	نماد	نوع متغیر (واحد اندازه‌گیری)	میانگین	انحراف معیار	بیشینه	کمینه
تولید (k=1)	نهاده	X_1^1	نیروی کار (نفر)	۰۴/۵۹۴	۶۲/۴۵۲	۲۱۷۸	۶۰
		X_2^1	ظرفیت نیروگاه (مگاوات)	۷۰/۲۳۱۶	۷۷/۱۷۴۲	۹۴۷۸	۳۵۹
		X_3^1	سوخت مصرفی (میلیارد کیلوکالری)	۶۷/۲۴۵۸۵	۱۶/۱۸۱۰۴	۰۴/۹۴۷۱۱	۸۰/۴۱۲
	ستاده نامطلوب	B^1	انتشار co_2 (هزار تن)	۷۷۸۶	۰۱/۵۳۶۷	۳۵/۲۶۷۴۲	۵۸/۱۲۵
انتقال (k=2)	نهاده	X_1^2	نیروی کار (نفر)	۶۱۶	۹۶/۳۳۹	۱۵۱۹	۱۰۵
		X_2^2	طول خطوط (کیلومتر مدار)	۵۶/۷۶۶۵	۳۹/۲۹۵۰	۰۴/۱۴۵۲۹	۹۰/۲۴۸۸
		X_3^2	برق خریداری شده (میلیون کیلووات ساعت)	۴۸۹۵	۳۷۵۷	۱۴۷۲۴	۵۲۵
	ستاده مطلوب	Y^2	فروش به صنایع بزرگ (میلیون کیلووات ساعت)	۲۲۸۶	۶۲/۲۰۶۲	۷۶۸۳	۱۸۰
	ستاده نامطلوب	B^2	مقدار تلفات (میلیون کیلووات ساعت)	۶۳/۵۳۸	۵۶/۳۲۶	۴۶/۱۳۵۹	۱۳۹
توزیع (k=3)	نهاده	X_1^3	نیروی کار (نفر)	۳۱/۱۱۶۰	۸۵/۷۸۷	۳۶۲۸	۳۴۹
		X_2^3	ظرفیت ترانسفورماتور (مگاولت آمپر)	۰۵/۶۲۹۹	۶۹/۴۶۶۰	۴۰/۲۲۴۱۲	۱۶۱۷
		X_3^3	طول شبکه توزیع (کیلومتر)	۲۱/۴۵۶۴۳	۰۵/۱۹۰۱۲	۰۸/۸۰۹۶۲	۱۶۴۸۵
	ستاده مطلوب	Y^3	فروش به مشتریان کوچک (میلیون کیلووات ساعت)	۲۹/۱۰۶۳۱	۷۸۴/۷۷۱۳	۱۱/۳۷۵۳۴	۳۱۰۷
	ستاده نامطلوب	B^3	مقدار تلفات (میلیون کیلووات ساعت)	۴۷/۱۷۹۵	۱۷/۱۵۵۳	۶۰۴۲	۲۲/۶۶
تولید - انتقال	واسطه ۱-۲	$Z^{(1,2)}$	برق تولیدی (میلیون کیلووات ساعت)	۱۲/۱۰۶۸۹	۶۹/۸۱۸۹	۴۳۴۲۸	۱۴۸
انتقال - توزیع	واسطه ۲-۳	$Z^{(2,3)}$	برق تحویلی به شرکت‌های توزیع (میلیون کیلووات ساعت)	۱۲۴۲۷	۱۸/۹۰۸۲	۴۲۱۹۳	۳۸۳۲

منبع: محاسبات تحقیق

تمامی متغیرهای استفاده شده به جز مقدار انتشار کربن دی اکسید، از سایت آماری شرکت توانیر[1] به‌دست آمده است. برای محاسبه‌ی مقدار انتشار کربن دی اکسید هر شرکت، از شاخص انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای بخش نیروگاهی کشور که در ترازنامه‌ی انرژی گزارش شده و بر مبنای مقدار برق تولیدی شرکت‌های تولید می‌باشد، کمک گرفته شده است.

۳-۲- مدل مازاد مبنای شبکه‌ای (NSBM)

فرض می‌کنیم که n واحد تصمیم‌گیرنده ($j=1, \ldots, n$) وجود دارد و هر واحد تصمیم‌گیرنده شامل k بخش ($k=1, \ldots, K$) است. m، r و q، به‌ترتیب تعداد نهاده‌ها، ستاده‌های مطلوب و ستاده‌های نامطلوب و Y^k ،X^k و B^k به‌ترتیب بیانگر ماتریس نهاده، ماتریس ستاده مطلوب و ماتریس ستاده نامطلوب بخش k می‌باشد. $t_{(k,h)}$، بیانگر تعداد محصولات واسطه بین بخش‌های k و h است (ستاده بخش k و نهاده بخش h). $Z^{(k,h)}$ نیز ماتریس محصولات واسطه بین بخش‌های k و h است.

بنابراین با بیان متغیرهای فوق مجموعه امکان تولید به صورت زیر معرفی می‌شود:

$$T^k = (X^k, Y^k, B^k, Z^{(k,h)}) \qquad (۱)$$

به طوری که $X^k = (X_1^k, \ldots, X_n^k) \in R^{m_k \times n}$ ، $Y^k = (Y_1^k, \ldots, Y_n^k) \in R^{r_k \times n}$ و $(B_1^k, \ldots, B_n^k) \in R^{q_k \times n}$ $Z^{(k,h)} = (z_1^{(k,h)}, \ldots, z_n^{(k,h)}) \in R^{t_{(k,h)} \times n}$ است.

بر طبق نظریه‌ی تولید T^k، یک مجموعه کراندار و بسته فرض می‌شود، به این معنا که مقدار محدودی نهاده تنها مقدار محدودی ستاده تولید می‌کند. هم‌چنین نهاده‌ها و ستاده‌ها قابلیت دستیابی ضعیف دارند (ژی و همکاران، ۲۰۱۲)، یعنی اگر رابطه‌ی (۱) به‌عنوان مجموعه امکان تولید در نظر گرفته شود و $X^k X^{\acute{k}} >$ ، $B^k B^{\acute{k}} >$ (یا $Y^{\acute{k}} Y^k <$) باشد، آنگاه $(T^k X^k, Y^k, B^{\acute{k}}, Z^{(k,h)}) \in$، $(T^k X^{\acute{k}}, Y^k, B^k, Z^{(k,h)}) \in$ [یا $T^k X^k, Y^{\acute{k}}, B^k$ ، $(Z^{(k,h)}) \in$] خواهد بود.

تکنولوژی تولید از نوع بازده ثابت به مقیاس فرض می‌شود. مدل‌های غیرشعاعی[2]، با توجه به نقش اسلک‌ها و دانستن این واقعیت که متغیرهای نهاده ستاده در بیشتر

1. www.amar.tavanir.org.ir

۲. در حالت کلی، مدل‌های اندازه‌گیری کارایی به دو گروه مدل‌های شعاعی و غیرشعاعی تقسیم می‌شوند. در مدل‌های شعاعی نهاده‌ها و ستاده‌ها متناسب با هم تغییر می‌کنند، مثلا اگر دو نهاده‌ی X1 و X2 در نظر گرفته شود هر دو به یک مقدار (θ) کاهش می‌یابند. در مدل‌های غیرشعاعی برخلاف مدل‌های شعاعی، نهاده‌ها و ستاده‌ها متناسب با هم تغییر نمی‌کنند، بنابراین با توجه به شرایط واقعی تولید مدل‌های غیرشعاعی قدرت تشخیص بالاتری دارند (ژو و همکاران، ۲۰۰۸).

سازمان‌ها نامتناسب با هم تغییر می‌یابند، برای ارزیابی کارایی مناسب‌ترند. (تن، ۲۰۰۱). مزیت نوع خاصی از مدل‌های غیرشعاعی یعنی مدل مازاد مبنا (SBM) که در این تحقیق استفاده می‌شود، پایداری نسبت به واحدهای انتخاب شده‌ی[1] می‌باشد. در حقیقت نمرات کارایی، مستقل از نوع واحد انتخاب شده برای هر متغیر است (تن و تسوتسی، ۲۰۰۹). با توجه به هدف مورد نظر و سیاست مربوطه که در واقع با استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی خطی همزمان در پی کمینه کردن نهاده‌ها (و ستاده نامطلوب) و بیشینه کردن ستاده‌های مطلوب است، از یک مدل بی‌ماهیت استفاده می‌شود. بی‌ماهیت بودن تابع هدف، تضمینی برای در نظر گرفتن همزمان اسلک‌های هر دو ماهیت نهاده‌محور و ستاده‌محور است، زیرا در بسیاری از صنایع هر دو هدف دنبال می‌شود. هر سه فرض فوق که به آنها اشاره شده است، (یعنی غیرشعاعی، پایداری نسبت به واحدهای انتخاب شده و بی‌ماهیت بودن مدل) به دلیل نزدیک شدن مرز کارایی به فضای واقعی تولید، منظور می‌شود (آوکیران و مک کریستال، ۲۰۱۲).

در نهایت برای بهینه‌سازی کارایی کل سیستم تولید از مدل NSBM ذیل استفاده می‌کنیم:

$$\rho_0^* = \text{Min} \frac{\sum_{k=1}^{K} W^{k-}\left[1-\frac{1}{m_k}\left(\sum_{i=1}^{m_k}\frac{s_i^{k-}}{x_{io}^k}\right)\right]}{\sum_{k=1}^{K} W^{k+}\left[1+\frac{1}{r_k+q_k}\left(\sum_{r=1}^{r_k}\frac{s_r^{k+}}{y_{ro}^k}+\sum_{q=1}^{q_k}\frac{s_q^{kb}}{b_{qo}^k}\right)\right]} \qquad (۲)$$

$$x_o^k = X^k\lambda^k + s^{k-} \quad (k=1, \dots, K), \qquad (۱-۲)$$

$$y_o^k = Y^k\lambda^k - s^{k+} \quad (k=1, \dots, K), \qquad (۲-۲)$$

$$b_o^k = B^k\lambda^k + s^{kb} \quad (k=1, \dots, K), \qquad (۳-۲)$$

$$Z^{(k,h)}\lambda^h(\forall(k,h)) = Z^{(k,h)}\lambda^k \qquad (۴-۲)$$

$$\lambda^k \geq 0,\ s^{k-} \geq 0,\ s^{k+} \geq 0,\ s^{kb} \geq 0 \quad (\forall k), \qquad (۳)$$

در مدل فوق λ^k بردار شدت بخش k با ویژگی $\lambda^k \geq 0)\lambda^k = (\lambda_1^k, \dots, \lambda_n^k)^T \in R^n$ و s^{k-} ، s^{k+} و s^{kb} به ترتیب مقادیر مازاد نهاده‌ها، کمبود ستاده‌های مطلوب و مازاد ستاده‌های نامطلوب هستند. W^{k-} و W^{k+} نیز در مدل (۲) به ترتیب بیانگر وزن نسبی یا

1. units-invariant

اهمیت بخش k در صورت کسر (ماهیت نهاده محور) و مخرج کسر (ماهیت ستاده محور) می‌باشند که به صورت برون‌زا تعیین می‌شوند و بایستی در رابطه‌های زیر صدق نمایند:

$$\sum_{k=1}^{K} W^{k-} = 1 \quad , \quad W^{k-} \geq . \ (\forall k) \qquad (۴)$$

$$\sum_{k=1}^{K} W^{k+} = 1 \quad , \quad W^{k+} \geq . \ (\forall k) \qquad (۵)$$

مدل (۲)، یک مدل غیرخطی است که با استفاده از تبدیل چارنز-کوپر[1] (۱۹۶۲) به مدل خطی (۵) تبدیل می‌شود:

$$\tau_0^* = \text{Min}\left[\varphi - \sum_{k=1}^{K} W^{k-}\left(\frac{1}{m_k}\left(\sum_{i=1}^{m_k}\frac{s_i^{k-}}{x_{io}^k}\right)\right)\right] \qquad (۵)$$

$$\varphi x_o^k = X^k \Lambda^k + S^{k-} \quad (k=1, \dots, K), \qquad (۵\text{-}۱)$$

$$\varphi y_o^k = Y^k \Lambda^k - S^{k+} \quad (k=1, \dots, K), \qquad (۵\text{-}۲)$$

$$\varphi b_o^k = B^k \Lambda^k + S^{kb} \quad (k=1, \dots, K), \qquad (۵\text{-}۳)$$

$$Z^{(k,h)}\lambda^h \ , (\forall (k,h) \qquad = Z^{(k,h)}\lambda^k \qquad (۵\text{-}۴)$$

$$\varphi + \sum_{k=1}^{K} W^{k+}\left(\frac{1}{r_k+q_k}\left(\sum_{r=1}^{r_k}\frac{s_r^{k+}}{y_{ro}^k} + \sum_{q=1}^{q_k}\frac{s_q^{kb}}{b_{qo}^k}\right)\right) = 1 \qquad (۵\text{-}۵)$$

$$\varphi \geq 0, \Lambda^k \geq 0, S^{k-} \geq 0, S^{k+} \geq 0 \ , \ S^{kb} \geq 0 \quad (\forall k) \qquad (۶)$$

با فرض این که جواب بهینه مدل(۵) برابر با (φ^* ، S^{kb*}، S^{k+*}، S^{k-*}، Λ^{k*}) باشد جواب بهینه مدل (۲) برابر خواهد بود با:

$$\rho_0^* = \tau_0^* \ , \lambda^* = \Lambda^*/\varphi^* \ , s^{k-*} = S^{k-*}/\varphi^*, s^{k+*} = S^{k+*}/\varphi^* \ , s^{kb*} = S^{kb*}/\varphi^* \qquad (۷)$$

با استفاده از مقادیر بهینه مازادها و کمبودهای استفاده شده (s_i^{k-*} ، s_r^{k+*} و s_q^{kb*}) در مدل (۲)، مقدار کارایی هر بخش با استفاده از رابطه‌ی (۸) به‌دست می‌آید:

$$\rho_k = \frac{1 - \frac{1}{m_k}\left(\sum_{i=1}^{m_k}\frac{s_i^{k-*}}{x_{io}^k}\right)}{1 + \frac{1}{r_k + q_k}\left(\sum_{r=1}^{r_k}\frac{s_r^{k+*}}{y_{ro}^k} + \sum_{q=1}^{q_k}\frac{s_q^{kb*}}{b_{qo}^k}\right)} \qquad (۸)$$

1. Charnes–Cooper

در رابطه‌ی (۸)، ρ_k نمره‌ی کارایی بخش k است و در صورتی کارا است که برابر با ۱ باشد. به طور مشابه، کارایی کل سیستم در صورتی کارا است که کارایی تمام بخش‌ها ($k=1, \ldots, K$) برابر با ۱ باشد. رابطه‌ی (۸)، بیانگر بی‌ماهیت بودن کارایی هر بخش می‌باشد به این معنا که صورت کسر نشان دهنده‌ی ماهیت نهاده محور بخش kام و مخرج رابطه‌ی (۸)، بیانگر ماهیت ستاده محور بخش kام است. در محاسبه‌ی کارایی کل سیستم (رابطه‌ی (۲))، صورت کسر برابر با میانگین وزنی ماهیت نهاده محور بخش‌ها و مخرج کسر نیز برابر با میانگین وزنی ماهیت ستاده محور k بخش است، بنابراین همان‌طورکه در مفاهیم کارایی شبکه‌ای مطرح شده، کارایی کل تحت تأثیر کارایی هر بخش است و تأثیر نمره کارایی هر بخش در کارایی کل به‌وسیله رابطه‌ی (۲) در مدل اعمال می‌شود. روابط (۲-۱)، (۲-۲) و (۲-۳)، به‌ترتیب اختصاص به نهاده‌ها، ستاده‌های مطلوب و ستاده‌های نامطلوب بخش k دارد. رابطه‌ی (۲-۴)، فعل و انفعال و پیوستگی بین بخش‌های مختلف سیستم را نشان می‌دهد. مطابق با مبانی نظری مدل کارایی شبکه‌ای که پیشتر به آن اشاره شده، تفاوت مدل سنتی کارایی با مدل شبکه‌ای در ارتباط بین بخش‌ها است که توسط قید (۲-۴) این ارتباط به مدل معرفی شده است. به بیانی دیگر نقطه ی کلیدی، مدل شبکه‌ای رابطه‌ی (۲-۴) است و در صورت حذف این قید از مسئله، کارایی شبکه‌ای به یک مدل تک بخشی ختم می‌شود. رابطه‌ی (۳) نیز برای تضمین نامنفی بودن متغیرهای مازاد، کمبود و شدت اعمال می‌شود.

۴- نتایج حاصل از مدل تحقیق

در جدول (۲) میانگین نمرات کارایی شبکه‌ای ۱۵ شرکت برق منطقه‌ای تحقیق در بازه‌ی زمانی ۱۳۹۳-۱۳۸۹ گزارش شده است[۱]. ستون اول، شماره‌ی شرکت‌ها، ستون دوم، نام شرکت‌ها، ستون سوم، کارایی بخش تولید، ستون چهارم، کارایی بخش انتقال، ستون پنجم، کارایی بخش توزیع و ستون ششم کارایی کل شبکه برق را نشان می‌دهد[۲].

---

۱. بنا به مطالعه تن و تسوتسی (۲۰۰۹) با توجه به اهمیت بیشتر بخش‌های تولید و توزیع وزن اختصاص داده شده به هر بخش به قرار زیر است:

$W^{1-}= W^{1+}=0/4 \quad , \quad W^{2-}= W^{2+}=0/2 \quad , \quad W^{3-}= W^{3+}=0/4$

۲. اعداد داخل پرانتز در کنار کارایی کل در ستون آخر، بیانگر رتبه‌ی کارایی هر شرکت برق منطقه‌ای می‌باشند.

همان‌طورکه پیشتر نیز مطرح شده، کارایی هر بخش توسط رابطه‌ی (۸) و کارایی کل سیستم با استفاده از رابطه‌ی (۲) محاسبه شده است.

بر طبق جدول (۲)، در بخش تولید برق تنها شرکت برق منطقه‌ای کارا، شرکت کرمان است. علاوه بر شرکت کرمان، شرکت خوزستان نیز جزو شرکت‌های با کارایی بالا محسوب می‌شود و شرکت‌های سیستان و بلوچستان و غرب کم‌ترین کارایی را دارند. در بخش انتقال، پنج شرکت اصفهان، تهران، خراسان، خوزستان و کرمان، کارا بوده و شرکت‌های سیستان و بلوچستان و مازندران بدترین عملکرد را داشته‌اند. در بخش توزیع نیز سه شرکت تهران، خوزستان و زنجان، با نمره‌ی کارایی یک، بهترین عملکرد را داشته و شرکت سیستان و بلوچستان بدترین عملکرد را دارا بوده است. بخش‌های انتقال و توزیع در شبکه برق کشور به طور متوسط عملکرد مشابهی داشته‌اند، با این حال بخش تولید با میانگین کارایی ۰/۵۰۹، ضعیف‌ترین بخش محسوب می‌شود. افزون بر این در بخش تولید تنها یک مقدار کارا وجود دارد، در حالی‌که در دو بخش انتقال و توزیع به ترتیب ۵ و ۳ شرکت کارا موجود است.

در ستون آخر جدول (۲)، یعنی کارایی کل، هیچ شرکت کارایی یافت نمی‌شود که این مورد براساس مطالبی که در قسمت مبانی نظری مطرح شده، مطابق انتظار است (تن و تسوتسی، ۲۰۰۹؛ سانگ و همکاران، ۲۰۱۴؛ اوهساتو و تاکاهاشی، ۲۰۱۵). شرکت‌های خوزستان، هرمزگان و اصفهان، بهترین عملکردها را در کل شبکه برق و شرکت‌های سیستان و بلوچستان و غرب کم‌ترین کارایی را در بین شرکت‌ها داشته‌اند.

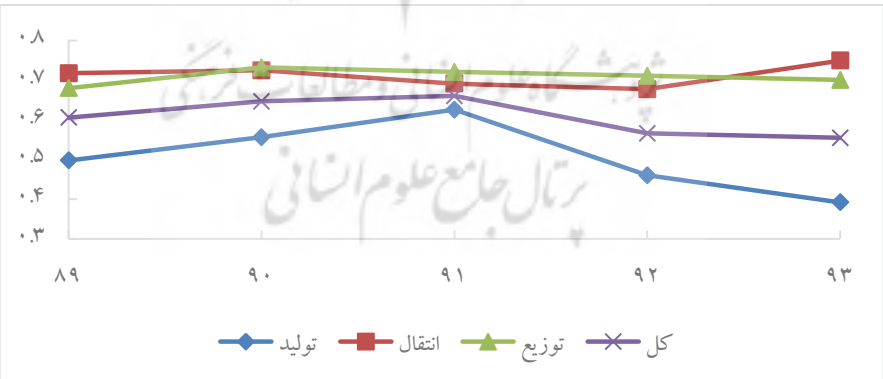
در نمودار (۱)، میانگین کارایی سه بخش تشکیل دهنده‌ی شبکه‌ی برق و همچنین کارایی کل در هر سال نشان داده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، نمودار کارایی بخش انتقال و توزیع، تقریباً مسطح است و تغییر محسوسی در روند آن در طی دوره‌ی مورد بررسی دیده نمی‌شود، در حالی که تغییرات بخش تولید ملموس‌تر بوده و نمودار کارایی کل با نمودار بخش تولید تشابه بیشتری داشته است، به طوری که هر دو از سال ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۱ افزایش یافته و در سال ۱۳۹۱ به بیشترین مقدار خود رسیده و پس از آن کاهش داشته‌اند.

جدول ۲. میانگین نمرات کارایی ۱۵ شرکت برق منطقه‌ای ایران در بازه‌ی زمانی ۱۳۹۳-۱۳۸۹

شماره	شرکت برق منطقه‌ای	تولید	انتقال	توزیع	کل
۱	آذربایجان	۰/۳۴۹	۰/۴۳۳	۰/۴۸۱	۰/۴۰۳ (۱۱)*
۲	اصفهان	۰/۶۹۵	۱/۰۰۰	۰/۹۵۵	۰/۸۶۱ (۳)
۳	باختر	۰/۳۵۶	۰/۵۰۵	۰/۵۷۵	۰/۴۵۲ (۱۰)
۴	تهران	۰/۶۱۴	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۸۲۴ (۴)
۵	خراسان	۰/۵۰۹	۱/۰۰۰	۰/۷۳۵	۰/۶۷۸ (۷)
۶	خوزستان	۰/۹۲۳	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۹۶۵ (۱)
۷	زنجان	۰/۳۵۷	۰/۶۹۳	۱/۰۰۰	۰/۵۸۲ (۹)
۸	سیستان و بلوچستان	۰/۱۴۳	۰/۳۰۳	۰/۳۹۸	۰/۲۶۱ (۱۴)
۹	غرب	۰/۰۹۸	۰/۴۰۸	۰/۴۱۹	۰/۲۵۹ (۱۵)
۱۰	فارس	۰/۵۳۹	۰/۷۳۷	۰/۷۰۲	۰/۶۲۷ (۸)
۱۱	کرمان	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۶۰۲	۰/۸۱۴ (۵)
۱۲	گیلان	۰/۲۶۷	۰/۴۱۸	۰/۴۷۸	۰/۳۴۸ (۱۲)
۱۳	مازندران	۰/۲۴۶	۰/۳۶۴	۰/۴۷۸	۰/۳۴۵ (۱۳)
۱۴	هرمزگان	۰/۸۹۲	۰/۹۳۸	۰/۸۵۰	۰/۸۷۴ (۲)
۱۵	یزد	۰/۶۴۸	۰/۸۸۱	۰/۹۶۰	۰/۸۰۶ (۶)
میانگین		۰/۵۰۹	۰/۷۱۲	۰/۷۰۹	۰/۶۰۷

* اعداد داخل پرانتز بیانگر رتبه‌ی کارایی کل هر شرکت است.

منبع: محاسبات تحقیق



نمودار ۱. میانگین نمرات کارایی کل شبکه برق و بخش‌های تشکیل دهنده‌ی آن در بازه‌ی زمانی ۱۳۹۳-۱۳۸۹

در جدول (۳) تفاوت نمودار تولید با دو بخش انتقال و توزیع توسط آزمون ویلکاکسون[1] نیز مورد بررسی قرار گرفته است[2]. نتایج آزمون ویلکاکسون در هر سال نشان می‌دهد با توجه به سطوح معناداری، به جز سال ۱۳۹۱، در سال‌های دیگر روند کارایی بخش تولید با بخش انتقال و توزیع، تفاوت معناداری دارد که نمودار (۱) آن را تأیید می‌کند. همچنین در سال ۱۳۹۱ که نمودارهای تولید و انتقال و توزیع به هم نزدیک و فشرده هستند، طبق آزمون ویلکاکسون تفاوت معناداری بین روند کارایی سه بخش دیده نمی‌شود.

جدول ۳. آزمون رتبه‌ای ویلکاکسون بین نمرات کارایی تولید و بخش‌های انتقال و توزیع

سال	انتقال	توزیع
۸۹	۱۹۱/۲**	۸۱۷/۱*
۹۰	۶۸۵/۲***	۴۷۲/۲**
۹۱	۷۴۷/۰	۲۲۴/۱
۹۲	۵۱۳/۲**	۶۴۲/۲***
۹۳	۲۵۶/۳***	۶۴۲/۲***

فرض صفر برابری میانگین نمرات کارایی تولید با نمرات بخش‌های انتقال و توزیع است.
***، ** و * به ترتیب نشان دهنده سطوح معناداری ۱٪ ، ۵٪ و ۱۰٪ است.
منبع: محاسبات تحقیق

در جدول (۴) با استفاده از آزمون اسپیرمن[3]، همبستگی مقادیر کارایی کل با کارایی هر بخش مورد بررسی قرار گرفته است[4]. همان طور که مشخص است، در هر

1. Wilcoxon Test

۲. آزمون ویلکاکسون، یکی از آزمون‌های ناپارامتریک آماری است که برای ارزیابی همانندی دو نمونه با مقیاس رتبه‌ای به کار می‌رود. در این تحقیق به دلیل ارتباط بخش تولید با دو بخش انتقال و توزیع و ماهیت رتبه‌ای نمرات کارایی از این آزمون استفاده شده است.

3. Spearman Test

۴. ضریب همبستگی اسپیرمن، که به ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن معروف است، یک ضریب همبستگی براساس رتبه (نمرات یا داده‌ها) می‌باشد که میزان همبستگی بین دو متغیر در سطح ترتیبی را اندازه‌گیری می‌کند. ضریب همبستگی اسپیرمن که معادل ناپارامتری ضریب همبستگی پیرسون است، فقط همبستگی میان رتبه‌های دو متغیر در جامعه‌های با حجم نمونه کم را نشان می‌دهد. در این تحقیق نیز مقدار همبستگی بین رتبه‌های کارایی کل و کارایی بخش‌های سه‌گانه مورد آزمون قرار گرفته است. برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد آزمون‌های رتبه‌ای ویلکاکسون و اسپیرمن به مطالعه‌ی بونینی و همکاران (۲۰۱۴) مراجعه شود.

سال، کارایی کل، با کارایی بخش تولید بیشترین همبستگی و با بخش توزیع کم‌ترین همبستگی را دارد، بنابراین بخش تولید برق نسبت به سایر بخش‌ها کارایی کل را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد و با توجه به پایین تر بودن نمرات بخش تولید نسبت به سایر بخش‌ها امکان بهبود بیشتری در آن از طریق افزایش کارایی وجود دارد. به طور مثال، در جدول (۲) دلیل عمده ناکارایی به‌دست آمده در بیشتر شرکت‌ها، ناکارایی بخش تولید [۱] و در شرکت‌های تهران و خوزستان علت ناکارایی فقط عملکرد نامطلوب بخش تولید است. تنها در مورد شرکت کرمان این موضوع صدق نمی‌کند، زیرا در بخش تولید و انتقال کارا است و فقط در بخش توزیع ناکارا می‌باشد.

جدول ۴. ضریب همبستگی اسپیرمن بین نمرات کارایی کل و بخش‌های تشکیل دهنده

سال	تولید	انتقال	توزیع
۸۹	۰/۸۷۷۶	۰/۸۰۷۸	۰/۷۶۷۰
۹۰	۰/۹۲۸۳	۰/۹۰۶۵	۰/۸۶۲۰
۹۱	۰/۹۲۸۸	۰/۸۵۱۶	۰/۸۵۵۵
۹۲	۰/۸۹۹۶	۰/۸۶۶۸	۰/۷۶۳۸
۹۳	۰/۹۷۴۹	۰/۸۵۶۱	۰/۸۰۳۸

منبع: محاسبات تحقیق

در جدول (۵)، مقادیر متغیرهای کمکی نهاده‌ها و ستاده‌های استفاده شده در هر بخش به تفکیک بیان شده است[۲]. این متغیرها میزان کاهش لازم در نهاده‌ها و ستاده‌های نامطلوب و افزایش در ستاده‌های مطلوب را برای رسیدن به وضعیت کارا نشان می‌دهند. مقادیر صفر نشان دهنده‌ی وضعیت کارا در مورد آن نهاده و یا ستاده است و همان‌طور که مشخص است تمام شرکت‌هایی که طبق جدول (۲) کارا شده‌اند، دارای متغیرهای کمکی صفر هستند. تعداد متغیرهای کمکی با مقدار صفر در بخش

۱. به جز شرکت‌های کرمان و هرمزگان، بخش تولید کمترین کارایی را در بین بخش‌ها دارد.

۲. متغیرهای کمکی همان مقادیر بهینه s^{k-*}، s^{k+*} و s^{kb*} هستند که از حل مسئله برنامه‌ریزی خطی (۵) و روابط (۵-۱) تا (۵-۵) به‌دست می‌آیند به این صورت که رابطه (۵-۱) برای محاسبه‌ی متغیر کمکی نهاده‌ها در هر بخش، رابطه (۵-۲) برای محاسبه‌ی متغیر کمکی ستاده‌های مطلوب و رابطه‌ی (۵-۳) برای محاسبه‌ی متغیر کمکی ستاده نامطلوب به‌کار می‌رود.

تولید بسیار کم‌تر از بخش‌های انتقال و توزیع را تأیید می‌کند، کـه ایـن نتیجـه عملکـرد ضعیف‌تر بخش تولید نسبت به بخـش‌هـای انتقـال و توزیـع اسـت. مقـادیر غیرصـفر در متغیرهای کمکی نیز نشان‌دهنده‌ی ناکارایی آن نهاده و یا ستاده است. به‌عنوان مثـال در بخش توزیع، شرکت آذربایجـان از نظـر فـروش بـرق بـه مشـتریان عملکـرد مناسـب و بهینه‌ای داشته اما از نظر استفاده از نهاده‌ها و تولیـد سـتاده‌ی نـامطلوب، ناکـارا بـوده و می‌بایست به طور متوسط برای فروش مقدار ثابتی برق، به اندازه‌ی ۱۴۸۷/۵۷ نفر نیروی کـار، ۱۱۵۰/۰۲ مگاولـت آمپـر ترانسـفورماتور و ۲۵۲۱۹/۱۱ کیلـومتر شـبکه توزیـع صرفه‌جویی کند و ۸۶۲/۵۳ میلیون کیلووات ساعت تلفات کم‌تری داشـته باشـد تـا کـارا شود. همچنین در شرکتی مانند شرکت گیلان در بخش انتقال با توجـه بـه صـفر بـودن مازادهای نهاده‌های طول خطوط و برق خریداری شده برای قرار گرفتن در وضعیت کـارا می‌بایست با حفظ سطح آن‌ها به اندازه‌ی ۵۵۷ میلیون کیلووات ساعت فروش بیشتر بـه صنایع بزرگ، ۱۴۱/۳۲ نفر کاهش در نیـروی کـار و ۱۰۳/۹۵ میلیـون کیلـووات سـاعت تلفات کم‌تری داشته باشد.

با توجه به این که مدل مـورد اسـتفاده از نـوع واسـطه‌ی آزاد[1] اسـت، مـی‌تـوان بـا استفاده از مقادیر هدف‌گذاری شـده محصـولات واسـطه در رابطـه‌ی (۵-۴)، از مـدل ۵، کارایی هر یک را محاسبه و در صورت عدم کارا بـودن راهکـار مناسـب را بـرای نزدیـک شدن به شرایط کـارا ارائـه داد[2] (تـن و تسوتسـی، ۲۰۰۹). جـدول (۶)، نسـبت مقـادیر هدف‌گذاری شده‌ی واسطه‌ها در مدل ۵ به داده‌های مشاهده شـده‌ی آن‌هـا را بـرای هـر شرکت نشان می‌دهد[3]. با تحلیل هر نسبت، راهکار مناسب برای کارا شدن هـر محصـول واسطه فراهم می‌شود.

1. Free link

۲. هنگامی که در مدل از واسطه‌های آزاد استفاده می‌شود، ضمن حفظ پیوستگی مدل، واسطه‌ها به‌طور اختیاری تعیین می‌شوند، بنابراین در جواب بهینه مسئله برنامه‌ریزی خطی ممکن است که جریان ارتباطی بین بخش‌ها افزایش یا کاهش یابد. در نقطه‌ی مقابل در مدل‌هایی که از واسطه‌های ثابت استفاده می‌کنند، فعالیت‌های واسطه، ثابت و غیراختیاری هستند. از این مدل‌ها هنگامی که محصولات واسطه تحت کنترل کامل DMUها است، استفاده می‌شود. برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد انواع واسطه‌ها، به مطالعه‌ی تن و تسوتسی (۲۰۰۹) رجوع شود.

۳. مقدار این نسبت برابر است با : $\frac{Z^{(k,h)}\lambda^{k}}{z_o^{(k,h)}} = \frac{Z^{(k,h)}\lambda^{h}}{z_o^{(k,h)}}$. در رابطه مذکور، صورت هر دو کسر بیانگر مقدار هدف‌گذاری شده (رابطه (۲-۴)) است که با حل مدل برنامه‌ریزی خطی (۲) به‌دست می‌آید. مخرج کسر نیز همان مقادیر مشاهده شده‌ی واسطه‌ها هستند.

جدول ۵. مقادیر متغیرهای کمکی نهاده‌ها و ستاده‌ها در مدل شبکه سه بخشی برق

شرکت	تولید				انتقال					توزیع				
	X_1^1	X_2^1	X_3^1	B^1	X_1^2	X_2^2	X_3^2	Y^2	B^2	X_1^3	X_2^3	X_3^3	Y^3	B^3
۱	۳۳۹/۲۷	۹۹۱/۲۵	۱۱۴۷۶/۶۹	۴۶۲۸/۱۶	۱۶۱/۶۱	۶۱۹/۷۸	۰/۰۰	۱۸۳۲/۹۷	۵۸/۳۳	۱۴۸۷/۵۷	۱۱۵۰/۰۲	۲۵۲۱۹/۱۱	۰/۰۰	۸۶۲/۵۳
۲	۳۰۹/۹۲	۸۳/۳۴	۷۵۰/۹۸	۵۸۴/۳۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۴۵/۸۹	۲۳۵/۲۴	۵۲۶/۱۰	۶۰/۳۲	۶۰/۳۲
۳	۳۵۱/۱۰	۷۸۷/۴۳	۱۲۰۹۲/۲۱	۶۲۱۳/۸۰	۱۳۴/۳۷	۳۸۸۶/۴۱	۸۰۹۴/۶۹	۰/۰۰	۲۰۲/۹۱	۳۱۳/۵۰	۱۵۳۵/۱۵	۱۵۷۷۷/۳۰	۳۰۴/۰۷	۶۸۵/۰۳
۴	۹۵۳/۰۲	۴۵۲/۱۱	۱۱۳۷۰/۸۱	۴۴۳۴/۶۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۵	۵۳۵/۸۸	۶۲۴/۳۲	۷۰۴۸/۱۸	۳۱۲۸/۷۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۴۴۱/۸۱	۲۱۰/۴۱	۲۰۱۰۷/۸۰	۳۰۸/۸۷	۳۰۸/۸۱
۶	۱۸/۸۷	۰/۰۰	۵۰۲/۲۷	۸۵۲/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۷	۳۱/۱۰	۳۷۷/۳۰	۱۱۶۶/۲۱	۴۵۵/۲۱	۸۳/۳۷	۰/۰۰	۲۷۵۶/۵۸	۷۴۲/۴۰	۰/۵۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۸	۲۹۴/۹۱	۷۵۸/۰۸	۷۸۱۰/۶۲	۲۱۹۰/۱۳	۲۵۶/۵۸	۵۲۷۵/۰۴	۳۹۹/۸۱	۵۲۳/۷۵	۶۵/۷۱	۳۹۳/۶۳	۵۰۲/۰۱	۱۷۸۷۵/۸۲	۰/۰۰	۷۱۱/۷۹
۹	۳۶۰/۸۸	۱۳۷۵/۵۴	۱۴۳۶۴/۹۶	۵۰۵۳/۳۲	۱۸۸/۸۴	۵۰۹۹/۱۴	۹۰۳/۵۳	۴۴۸/۳۱	۱۱۰/۶۸	۳۱۲/۷۵	۱۴۸۱/۹۵	۱۹۹۲۰/۳۳	۰/۰۰	۶۷۱/۰۶
۱۰	۱۹۲/۸۲	۷۱۰/۳۵	۶۳۰۱/۳۳	۱۵۴۸/۹۶	۱۶۴/۹۷	۳۱۷۲/۱۹	۰/۰۰	۳۴۵/۷۳	۱۸۹/۸۰	۵۸/۳۸	۲۵۹۷/۴۹	۹۹۷۲/۱۶	۱۷۹/۴۸	۸۱۵/۹۱
۱۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۲۷/۵۷	۶۱۲/۸۵	۱۴۶۷۵/۸۴	۷۷۲/۳۷	۷۷۲/۵۲
۱۲	۳۰۷/۲۰	۴۷۰/۱۸	۷۴۸۷/۵۷	۲۱۶۸/۷۷	۱۴۱/۳۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۵۵۷/۰۰	۱۰۳/۹۵	۲۹۵/۸۰	۸۶۹/۰۴	۱۰۷۳۷/۴۳	۰/۰۰	۲۸۱/۴۸
۱۳	۳۴۰/۶۸	۱۱۱۴/۵۱	۱۷۶۲۱/۵۸	۷۰۲۷/۰۳	۲۰۴/۷۷	۱۱۰۳/۷۸	۰/۰۰	۱۶۸۷/۵۵	۵۲/۶۴	۵۲۴/۰۷	۲۵۰۴/۹۰	۱۳۶۳۲/۴۸	۰/۰۰	۹۶۷/۴۲
۱۴	۰/۰۸	۱۴۸/۲۶	۲۸۰۹/۵۷	۱۰۸۶/۶۳	۸/۷۱	۲۷۱/۹۷	۶۴/۴۸	۰/۰۰	۳۶/۳۳	۴۴/۸۱	۱۲۰/۸۹	۰/۰۰	۲۶۷/۰۷	۲۶۵/۴۸
۱۵	۸۲/۵۵	۲۴۹/۱۳	۱۹۲۲/۴۵	۴۰۲/۹۷	۲۷/۷۸	۳۵۵/۴۴	۴۵۶/۲۴	۰/۰۰	۲/۸۲	۱۸/۸۳	۴۶/۴۶	۶۳۲/۰۵	۰/۰۰	۱/۳۵

منبع: محاسبات تحقیق

جدول ۶. نسبت مقادیر هدف‌گذاری شده بر مشاهده شده محصولات واسطه

شرکت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
$Z^{(1,2)}$	۰/۶۹۲۶	۱	۰/۶۱۹	۱	۱	۱	۰/۹۴۰۴	۰/۴۵۰۲	۰/۲۲۵۸	۰/۹۲۸۸	۱	۰/۵۱۱۶	۰/۴۲۸۲	۰/۹۳۶۶	۰/۸۷۵
$Z^{(2,3)}$	۰/۹۳۲	۱	۰/۹۶۴۶	۱	۱	۱	۱	۰/۸۴۲۲	۰/۸۸۷۸	۰/۹۶۰۲	۱	۰/۹۳۸۴	۰/۹۰۳۲	۱/۰۰۰۲	۰/۹۹۹۶

منبع: محاسبات تحقیق

به‌طور مثال، واسطه $Z^{(1,2)}$ در بیشتر شرکت‌ها کوچک‌تر از یک است که نشان‌دهنده‌ی واسطه‌ی اضافی می‌باشد، به این معنا که برق تولید شده از نیروگاه‌ها برای شرکت‌های انتقال می‌بایست وضعیت بهتری داشته باشد، زیرا شرکت‌های انتقال با برق تولید شده کم‌تری نیز می‌توانند همان مقدار برق تحویلی به شرکت‌های توزیع بدهند و یا به صنایع بزرگ بفروشند. از سوی دیگر در مواردی که نسبت اشاره شده بیشتر از یک باشد (به طور مثال $Z^{(2,3)}$ شرکت ۱۴ در جدول (۶)) نشان دهنده‌ی کمبود واسطه است، به این معنا که با حفظ سطح نهاده‌های موجود، امکان انتقال برق بیشتری نیز هست. مقدار ۱ در جدول (۶) نشان‌دهنده‌ی کارا بودن آن واسطه برای شرکت مورد نظر است. ناکارایی واسطه‌ها و ارتباطات درونی بین بخش‌ها سبب متفاوت شدن نتایج مدل‌های شبکه‌ای با مدل‌های کارایی سنتی می‌شود.

۵- جمع بندی و ارائه‌ی پیشنهادات

مدل‌های کلاسیک DEA، یک سیستم و یا فرآیند تولیدی را تنها در یک مرحله و به‌عنوان جعبه سیاه در نظر می‌گیرند و با استفاده از هر تعداد نهاده و ستاده مورد نظر به ارزیابی آن سیستم و یا فرآیند می‌پردازند. در فضای واقعی تولید هر سیستم متشکل از چند بخش می‌باشد، که این اجزاء با یکدیگر وابستگی دارند به این معنا که ستاده یک جزء می‌تواند نهاده‌ی یک یا چند جزء دیگر باشد. مدل‌های سنتی DEA، قابلیت در نظر گرفتن این پیوندها و وابستگی‌ها را ندارند و در نتیجه مقدار کارایی برآورد شده از آن‌ها برای اتخاذ سیاست‌ها و تصمیم‌گیری‌های کلان مدیریتی مناسب نیست. مدل‌های DEA شبکه‌ای با تفکیک جعبه‌ی سیاه به بخش‌های جزئی‌تر، روابط درونی حاکم بر این بخش‌ها را در نظر گرفته و با یک دید سیستماتیک به سنجش عملکرد واحدهای تصمیم‌گیرنده می‌پردازند. در این تحقیق با تجزیه شرکت‌های برق منطقه‌ای ایران کارایی آن‌ها در حضور ستاده‌های نامطلوب در بازه‌ی زمانی ۱۳۹۳-۱۳۸۹ مورد ارزیابی و رتبه‌بندی قرار گرفته است. شبکه‌ی برق ایران از سه بخش تولید، انتقال و توزیع تشکیل شده است، که کارایی سراسری توسط عملکرد این سه بخش محاسبه می‌شود. دو واسطه این سه بخش را با یکدیگر مرتبط می‌کند، واسطه‌ی اول برق تولید شده در نیروگاه‌ها به‌عنوان ستاده بخش تولید و نهاده بخش انتقال و واسطه‌ی دوم برق تحویلی به شرکت‌های توزیع به‌عنوان ستاده‌ی بخش انتقال و نهاده‌ی بخش توزیع در نظر گرفته

شده است. برای سنجش ساختار شبکه اشاره شده از مدل غیرشعاعی SBM در نظر گرفتن ستاده‌ی نامطلوب به‌دلیل قابلیت انعطاف‌پذیری مناسب استفاده شده است. نتایج حاصل از مدل NSBM نشان می‌دهند که هیچ شرکت کارایی در شبکه‌ی برق کشور موجود نیست و کارایی کل صنعت برق بیشتر تحت تأثیر بخش تولید می‌باشد و عمده ناکارایی موجود از این قسمت ناشی می‌شود. با رتبه‌بندی نمرات کارایی کل، شرکت‌های برق منطقه‌ای خوزستان، هرمزگان و اصفهان بالاترین کارایی‌ها و شرکت‌های سیستان و بلوچستان و غرب کم‌ترین کارایی را در بین شرکت‌ها داشته‌اند.

با توجه به نقش بخش تولید در کارایی کل شبکه برق و ناکارایی بالاتر، فرصت بیشتری برای بهبود عملکرد آن وجود دارد، بنابراین بخش تولید نیاز به سیاست‌گذاری و سرمایه‌گذاری قابل توجهی دارد. همچنین شرکت‌هایی مانند تهران، خوزستان و کرمان که در کل بازه‌ی زمانی تنها در یک بخش ناکارا بوده‌اند، می‌بایست توجه خود را معطوف به آن بخش مورد نظر کنند تا با کاهش همزمان نهاده‌ها (ستاده‌های نامطلوب) و افزایش ستاده‌های مطلوب بخش ناکارا، ضمن کارا کردن آن بخش، به کارا شدن شبکه برق خود نیز کمک کرده باشند.

فهرست منابع

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

۲. حیدری، کیومرث (۱۳۷۹). ارزیابی کارایی نیروگاه‌های برق حرارتی با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی.

۳. رضایی، علی (۱۳۹۲). تحلیل کارایی و بهره‌وری شرکت‌های توزیع برق ایران: رویکرد مدل مازاد مبنا (SBM)، *فصلنامه‌ی تحقیقات مدل‌سازی اقتصادی*، شماره‌ی ۱۳، صفحات ۱۱۹-۱۴۶.

۴. سخنور، محمد، صادقی، حسین، عصاری، عباس، یاوری، کاظم و مهرگان، نادر (۱۳۹۰). استفاده از تحلیل پوششی داده‌های پنجره‌ای برای تحلیل ساختار و روندکارایی شرکت‌های توزیع برق ایران، *پژوهش‌های رشد و توسعه‌ی اقتصادی*، سال اول، شماره‌ی ۴، صفحات ۱۸۲-۱۴۵.

۵. سلیمی، مهرداد و کرامتی، محمدعلی (۱۳۹۴). ارزیابی و تجزیه کارایی فنی شرکت‌های برق منطقه ای ایران با رویکرد سه مرحله ای تحلیل پوششی داده‌ها، *کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران*، سال چهارم، شماره‌ی ۸، صفحات ۴۸-۳۷.

۶. سیفی، احمد و سلیمی‌فر، مصطفی و فنودی، هانیه (۱۳۹۲). اندازه‌گیری کارایی زیست محیطی: بررسی موردی نیروگاه‌های حرارتی تولید برق در استان‌های خراسان جنوبی، رضوی و شمالی، *اقتصاد انرژی ایران*، سال دوم، شماره‌ی ۷، صفحات ۴۱-۱.

۷. عمرانی، هاشم و قاری‌زاده بیرق، رامین و سلیمان‌پور، مقصود (۱۳۹۲). طراحی سیستم ارزیابی عملکرد و رتبه بندی شرکت‌های برق منطقه‌ای ایران با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای، بیست و هشتمین کنفرانس بین المللی برق.

۸. متفکرآزاد، محمدعلی، پورعبادالهان کویچ، محسن، فلاحی، فیروز، رنجپور، رضا و سجودی، سکینه (۱۳۹۳). محاسبه‌ی کارایی فنی نیروگاه‌های حرارتی کشور و بررسی عوامل مؤثر بر آن: کاربرد روش تصادفی ناپارامتریک پوششی داده‌ها، *فصلنامه‌ی تحقیقات اقتصادی*، دوره‌ی چهل و نهم، شماره‌ی ۱، صفحات ۱۱۳-۹۳.

۹. ممی‌پور، سیاب و نجف‌زاده، بهنام (۱۳۹۵)، ارزیابی کارایی زیست‌محیطی شرکت‌های برق منطقه‌ای: مقایسه‌ی مدل‌های شعاعی و غیرشعاعی، *فصلنامه‌ی نظریه‌های کاربردی اقتصاد*، سال سوم، شماره‌ی ۳، صفحات ۱۷۸-۱۵۳.

10. Amirteimoori, A.R., Shahroodi, K., & Shaker Mahmoodkiani, F. (2015). Network Data Envelopment Analysis: Application to Gas Companies in Iran, *International Journal of Applied Operational Research*, 5, 1-16.
11. Avkiran, N.K., & McCrystal, A. (2012).Sensitivity analysis of network DEA: NSBM versus NRAM, *Applied Mathematics and Computation*, 218, 11226–11239.
12. Bonnini, s., Corain, L., Marozzi, M., & Salmaso, L. (2014). Nonparametric Hypothesis Testing: Rank and Permutation Methods with Applications in R. Wiley Series in Probability and Statistics.
13. Charnes, A., Cooper, W.W. (1962). Programming with linear fractional functionals. *Naval Res Logist Quart*, 9(3–4), 181–186.
14. Charnes, A., Cooper, W.W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 2, 429–444.
15. Chen, P.C., Chang, C.C., Yu, M.M., & Hsu, S.H. (2012). Performance measurement for incineration plants using multi-activity network data envelopment analysis: The case of Taiwan. *Journal of Environmental Management*, 93, 95–103.

16. Chen, C., & Yan, H. (2011). Network DEA model for supply chain performance evaluation. *European Journal of Operational Research*, 213 (1), 147–155.
17. Cook, W.D., & Seiford, L.M. (2009). Data envelopment analysis (DEA)—thirty years on. *European Journal of Operational Research*, 192, 1–17.
18. Cook, W.D., Liang, L., & Zhu, J. (2010). Measuring performance of two-stage network structures by DEA: a review and future perspective. *Omega*, 38, 423–430.
19. Cooper, W.W., Seiford, L.M., & Zhu, J. (Eds.) (2004). Handbook on data envelopment analysis (pp. 1–39). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
20. Färe, R., Grosskopf, S., Lovell, C.A.K., & Pasurka, C. (1989). Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable: a nonparametric approach. *The Review of Economics and Statistics*, 71(1), 90–98.
21. Färe, R., Grosskopf, S., Lovell, C.A.K., & Yaisawarng, S. (1993). Derivation of shadow prices for undesirable outputs: a distance function approach, *The Review of Economics and Statistics*, 75(2), 374–380.
22. Fukuyama, H., & Mirdehghan, S.M. (2012). Identifying the efficiency status in network DEA, *European Journal of Operational Research*, 220, 85–92.
23. Hua, Z., Bian., Y., & Liang, L. (2007). Eco-efficiency analysis of paper mills along the Huai River. *Omega*, 35, 578–587.
24. Huang, J., Chen, J., & Yin, Z. (2014). A Network DEA Model with Super Efficiency and Undesirable Outputs: An Application to Bank Efficiency in China, Mathematical Problems in Engineering, Hindawi Publishing Corporation.
25. Huang, C.W., Chiu., Y.H., Fang., W.T., & Shen, N. (2014). Assessing the performance of Taiwan's environmental protection system with a non-radial network DEA approach, *Energy Policy*, 74, 547–556.
26. Kao, C. (2014). Network data envelopment analysis: A review. *European Journal of Operational Research*, 239, 1–16.
27. Lewis, L., & Sexton, T.R. (2004). Network DEA: efficiency analysis of organizations with complex internal structure, *Computers and Operations Research*, 31(9), 1365–1410.
28. Löhgren, M., & Tambour, M. (1999). Productivity and customer satisfaction in Swedish pharmacies: a DEA network model. *European Journal of Operational Research*, 115, 449–458.
29. Nemoto, J., & Goto, M. (2003). Measurement of dynamic efficiency in production: An application of data envelopment analysis to Japanese electric utilities. *Journal of Productivity Analysis*, 19, 191–210.

30. Ohsato, S., & Takahashi, M. (2015). Management Efficiency in Japanese Regional Banks: A Network DEA, Procedia, *Social and Behavioral Sciences*, 172, 511 – 518.
31. Paradi, J.C., Rouatt., S., & Zhu, H. (2011). Two-stage evaluation of bank branch efficiency using data envelopment analysis.*Omega*, 39, 99–109.
32. Sexton, T.R., & Lewis, H.F. (2003). Two-stage DEA: an application to major league baseball, *Journal of Productivity Analysis*, 19(2-3), 227–249.
33. Song, M., Wang., S., & Liu, W. (2014). A two-stage DEA approach for environmental efficiency measurement, *Environmental Monitoring Assessment*, 186, 5.
34. Tone, K. (2000). A slack-based measure of efficiency in data envelopment analysis, *European Journal of Operational Research*, 130, 498-509.
35. Tone, K. (2001). A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operation Research*, 130, 498–509.
36. Tone, K. (2002). A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 143(1), 32–41.
37. Tone, K., & Tsutsui, M. (2009). Network DEA: a slacks-based measure approach, *European Journal of Operational Research*, 197, 243–252.
38. Tone, K., & Tsutsui, M. (2010). Dynamic DEA: a slacks-based measure approach, *Omega*, 38 , 145–156.
39. Tone, K., & Tsutsui, M. (2014). Dynamic DEA with network structure: A slacks-based measure approach, *Omega*, 42, 124–131.
40. Tsutsui, M., & Goto, M. (2009). A multi-division efficiency evaluation of U.S. electric power companies using a weighted slacks-based measure. *Socio-Economic Planning Sciences*, 43(3), 201–208.
41. Von Geymueller, P. (2009). Static versus dynamic DEA in electricity regulation: The case of US transmission system operators. *Central European Journal of Operations Research*, 17, 397–413.
42. Xie, B.C., Fan, Y., & Qu, Q.Q. (2012). Does generation form influence environmental efficiency performance? An analysis of China's power system. *Applied Energy*, 96, 261–271.