

ارائه‌ی الگوی مبتنی بر سنجه‌های کمکی شبکه‌ی برای ارزیابی عملکرد زنجیره‌ی تأمین (مورد مطالعه: زنجیره‌ی تأمین صنعت برق ایران)

Original Article

اکرم اویسی عمران (دانشجوی دکتری)

محسن شفیعی نیک‌آبادی* (استادیار)

دانشکده‌ی اقتصاد و مدیریت، دانشگاه سمنان

مقصود امیری (استاد)

دانشکده‌ی حسابداری و مدیریت، دانشگاه علامه طباطبائی

کیخسرو یاکیده (استادیار)

دانشکده‌ی مدیریت و اقتصاد، دانشگاه گیلان

در این مطالعه عملکرد زنجیره‌ی تأمین صنعت برق ایران با ساختاری متوالی - موازی ارزیابی شده است. زنجیره‌ی تأمین صنعت برق ایران شامل نواحی شانزده‌گانه‌ی تولید و انتقال و توزیع برق است که به صورت متوالی با یکدیگر مرتبط هستند. واحدهای نیروگاهی و شرکت‌های توزیع برق نیز با ساختار موازی و مستقل در محاسبه‌ی نمرات کارایی لحاظ شده‌اند. نحوه‌ی توسعه‌ی محدودیت‌ها برای ارزیابی واحدهای موازی با استفاده از ضریب ثابت لاتدا در مدل مبتنی بر سنجه‌ی کمکی شبکه‌ی، تعیین منشأ ناکارایی کل و فرایندهای سه‌گانه، در نظر گرفتن انواع ورودی‌ها، اندازه‌های میانی، خروجی‌های مطلوب و نامطلوب میانی و نهایی و در نظر گرفتن مورد مطالعه‌ی واقعی در سطح صنعت برق ایران از جمله ویژگی‌های الگوی پیشنهادی است که در پیشینه‌ی موضوع سابقه‌ی ندارد. نتایج اجرای مدل حاکی از این امر است که درصد واحدهای کارا در محاسبه‌ی کارایی کل سیستم فرایندهای سه‌گانه‌ی تولید به ترتیب برابر با ۱۲/۵، ۲۵/۳۱، ۲۵/۳۱، ۲۵ درصد است.

واژگان کلیدی: ارزیابی عملکرد زنجیره‌ی تأمین، تحلیل پوششی داده‌های

شبکه‌ی، مدل مبتنی بر سنجه‌های کمکی، ساختارهای متوالی و موازی، زنجیره‌ی تأمین صنعت برق.

akramoveysi@semnan.ac.ir

shafiei@semnan.ac.ir

amiri@atu.ac.ir

yakideh@Guilan.ac.ir

۱. مقدمه

رو به پایین با تأمین‌کنندگان و مشتریان برای ارسال بالاترین میزان ارزش مشتری با کمترین هزینه در زنجیره‌ی تأمین به عنوان یک کل است.^[۱] مدیریت زنجیره‌ی تأمین شامل رویکردهای متنوعی می‌شود که برای یکپارچه‌سازی مؤثر تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان و توزیع‌کنندگان برای انجام عملیات تدارک مواد اولیه و تبدیل آن‌ها به کالاهای واسطه و توزیع محصولات به مشتریان به میزان درست در مکان‌های صحیح و در زمان درست برای دست‌یابی به سطح خدمت مناسب با کم‌ترین هزینه استفاده می‌شود.^[۲]

فرایندهای سه‌گانه‌ی تولید و عرضه‌ی برق، انتقال برق از جایگاه‌های تولید تا جایگاه مصرف و تغییر ولتاژ آن، توزیع برق بین مشتریان به صورت فرایندهای متوالی در زنجیره‌ی تأمین صنعت برق انجام می‌گیرد. بدیهی است که هدایت حجم وسیع فعالیت در بخش‌های سه‌گانه‌ی زنجیره‌ی تأمین صنعت برق در گستره‌ی پهناور کشور

مدیریت زنجیره‌ی تأمین یک رویکرد یکپارچه برای مدیریت صحیح و مناسب جریان مواد، کالا، اطلاعات، جریان پولی و توانایی پاسخ‌گویی سریع به شرایط محیطی است. مدیریت زنجیره‌ی تأمین هماهنگی تولید، موجودی، مکان‌یابی و انتقال میان اعضای زنجیره است به منظور دست‌یابی به بهترین ترکیب پاسخ‌گویی و کارایی برای بازاری که خدمت به آن ارائه می‌شود.^[۱]

زنجیره‌ی تأمین مشتمل بر تمام فعالیت‌های مرتبط با جریان و تبدیل کالاها از مرحله‌ی ماده‌ی خام (استخراج) تا تحویل به مصرف‌کننده‌ی نهایی و نیز جریان‌های اطلاعاتی مرتبط با آن‌هاست. مدیریت زنجیره‌ی تأمین مدیریت روابط رو به بالا و

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۵/۲، اصلاحیه ۱۳۹۶/۱۲/۵، پذیرش ۱۳۹۶/۱۲/۲۳

DOI:10.24200/J65.2019.7240.1772

هدف کلیدی این مطالعه یکپارچه‌سازی تحلیل مرزی تصادفی^۵ و مرز هزینه‌ی تحلیل پوششی داده‌ها برای وارد کردن ناهمگنی و محیط تصادفی شرکت‌های توزیع در محاسبات بود. بر این اساس روش جدید داده‌های پوششی ناپارامتریک تصادفی^۶ در این مطالعه توسعه داده شده است. نتایج این مطالعه به صورت خلاصه در چهار مورد بیان شده است: ۱. موارد تصادفی به شیوه‌ی احتمالاتی در این روش مدل‌سازی شده است، ۲. ناهمگنی و محیط شرکت‌های توزیع در محاسبات وارد شده است، ۳. از آزمون‌های آماری و فواصل اطمینان در این روش نیز استفاده شده است ۴. نهایتاً ترکیبی از مفروضات روش‌های پایه در این روش وجود دارد.^[۷]

سیوشی و گوتو (۲۰۱۲)، رویکرد ترکیبی تحلیل پوششی داده‌ها و تحلیل پوششی داده‌های مبتنی بر تشخیص را برای ارزیابی تغییرات تجاری بعد از آزادسازی تجارت سال ۲۰۰۵ در صنعت برق ژاپن به کار بردند؛ در این مطالعه سه بخش تولید، انتقال و توزیع در شرکت‌های برق به عنوان یک سیستم یکپارچه و با استفاده از مدل ورودی‌گری تحلیل پوششی داده‌ها و تحت شرایط مکمل لنگی قوی^۷ به دو گروه کارا و ناکارا تفکیک شدند. سپس با استفاده از تحلیل پوششی داده‌های تحلیل تشخیصی هر دو گروه کارا و ناکارا رتبه‌بندی و نمرات کارایی نهایی آن‌ها مشخص شد. نهایتاً با استفاده از آزمون رتبه کروسکال - والیس بر مبنای نمرات رتبه‌بندی واحدهای تصمیم‌گیرنده به استنباط آماری دست یافته‌اند.^[۸] باروس (۲۰۱۳) با کاربرد متغیرهای خروجی مطلوب و نامطلوب به صورت هم‌زمان در یک مدل به ارزیابی عملکرد نیروگاه‌های تولید حرارتی کشور پرتغال پرداخته است. به منظور رتبه‌بندی و محاسبه‌ی بهره‌وری کل واحدهای تصمیم‌گیرنده از مدل مرزی فاصله در بازه‌ی زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۰ استفاده شده است. در این مطالعه برای تلفیق خروجی‌های نامطلوب همراه با متغیرهای همگن و ناهمگن در محاسبه‌ی تغییرات کارایی فنی استفاده شده است.^[۹] شکوری و همکاران (۲۰۱۴)، با توجه به اثرات مخرب زیست‌محیطی سوخت‌های فسیلی، دستورالعملی برای استفاده از سوخت‌های هسته‌یی در مقابل سوخت‌های فسیلی ارائه کردند. در این مطالعه، ابتدا با استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری کمی به مقایسه‌ی صنعت برق با دو نوع سوخت فسیلی و هسته‌یی پرداخته شده است. در این مطالعه، با استفاده از رویکرد ترکیبی تحلیل پوششی داده‌ها و روش وزن‌های تجمعی ساده^۸ به ارزیابی عملکرد نیروگاه‌های تولید برق با سوخت فسیلی و با قابلیت جذب و ذخیره‌ی کربن و سوخت‌های هسته‌یی پرداخته شده است. نتایج حاکی از این امر است که نیروگاه‌های تولید برق با سوخت فسیلی و با قابلیت جذب و ذخیره‌ی کربن نسبت به نیروگاه‌های تولید برق با سوخت‌های هسته‌یی نمرات کارایی بیشتری دارند.^[۱۰] دو و همکاران (۲۰۱۵)، به بررسی ساختارهای شبکه‌یی متوالی متشکل از واحدهای تصمیم‌گیرنده‌ی ناهمگن موازی با ارتباطات یا متغیرهای میانی پرداخته شده است. اعتبار این مدل با استفاده از موارد متفاوت بررسی شده است. در یکی از موارد مورد بررسی، شرکت‌های فعال در صنعت برق که دارای ساختار شبکه‌یی متشکل از واحدهای وظیفه‌یی تولید، انتقال و توزیع با اتصالات میانی و ساختار موازی است، به عنوان واحدهای تصمیم‌گیرنده مورد بررسی قرار گرفته است. برای استخراج نمرات کارایی تجمعی یا کل سیستم از متوسط وزن نسبت‌های کارایی تمام واحدهای فرعی موازی موجود در سیستم استفاده می‌شود. این وزن‌ها نیز بیان‌گر اهمیت نسبی هر یک از واحدهای فرعی موازی موجود در سیستم است.^[۱۱] عمرانی و همکاران (۲۰۱۵)، با استفاده از نظریه‌ی بازی چانه‌زنی، تحلیل مؤلفه‌ی اصلی و تحلیل پوششی داده‌ها به بررسی عملکرد شرکت‌های توزیع ایران پرداختند. تحلیل مؤلفه‌ی اصلی همراه با تحلیل پوششی داده‌ها برای کاهش تعداد متغیرهای ورودی و خروجی به کار رفته است. نظریه‌ی بازی چانه‌زنی برای انجام عمل تشخیص بین واحدهای تصمیم‌گیرنده استفاده شده است. نتایج مطالعه حاکی از این است که این رویکرد ترکیبی برای ارزیابی عملکرد شرکت‌های توزیع برق در یک محیط

ایران نیازمند سیاست‌گذاری منسجم و نگرش یکپارچه به بخش‌های تولید، انتقال و توزیع است. به دلیل نقش پر اهمیت فرایندهای تولید، انتقال و توزیع در ساختار صنعت برق و لزوم سنجش کارایی در سطح این صنعت، تحقیق حاضر به دنبال این مطلب است که ساختار واقعی واحدهای تصمیم‌گیرنده^۱ فعال در بخش‌های مختلف صنعت برق ایران چیست و از بین روش‌های موجود مدل تصمیم‌گیری ریاضی برمبنای تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌یی^۲ روش مناسب ارزیابی عملکرد این ساختار کدام است؟

در بخش‌های بعدی این مطالعه، به ترتیب مروری بر پیشینه‌ی تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌یی و روش‌شناسی تحقیق مورد مطالعه و نتیجه‌گیری قرار گرفت و پیشنهادها برای مطالعات آتی ارائه خواهد شد.

۲. مروری بر پیشینه‌ی تحقیق

۲.۱.۲. مروری بر ادبیات کاربرد تحلیل پوششی داده‌ها در صنعت برق

از میان صنایع راهبردی هر کشور، صنعت برق به دلیل نقش زیربنایی و ارتباط آن با سایر عوامل مؤثر بر رشد اقتصادی، صنعتی پویا و تأثیرگذار محسوب می‌شود. برق مهم‌ترین و پرکاربردترین نوع انرژی در جوامع مدرن محسوب می‌شود که به موازات توسعه‌ی اقتصادی و افزایش سطح زندگی، تقاضا برای آن افزایش می‌یابد.^[۱]

پژوهش‌های متعددی در زمینه‌ی ارزیابی عملکرد فرایندهای مختلف صنعت برق صورت گرفته است.^[۲-۱۵] اما بر اساس مرور پیشینه ارزیابی عملکرد در صنعت برق ایران و جهان، پژوهش خاصی که به بررسی عملکرد فرایندهای سه‌گانه‌ی تولید (نیروگاه‌ها)، انتقال (شرکت‌های برق منطقه‌یی)، و توزیع برق (شرکت‌های توزیع) با ترکیبی از ساختارهای شبکه‌یی متوالی و موازی بپردازد، به چشم نمی‌خورد.

خدابخشی (۲۰۱۰)، در مطالعه‌ی رویکردهای برنامه‌ریزی احتمالات محدود شده را برای توسعه‌ی مدل خروجی‌گری ابرکارایی مبتنی بر تحلیل پوششی داده‌های تصادفی به کار برده است. همچنین معادلات قطعی و برنامه‌ی غیرخطی این مدل نیز توسعه داده شده است. مدل خروجی‌گری ابرکارایی یکی از مدل‌های سنتی تحلیل پوششی داده‌هاست که موارد کاربرد فراوانی داشته است. اما در مواردی که با داده‌های مبهم سروکار داریم، جایگزین کردن داده‌های قطعی با متغیرهای تصادفی، منتج به ایجاد تحلیل پوششی داده‌های تصادفی خواهد شد.^[۱۵] سجادی و همکاران (۲۰۱۱)، در مطالعه‌ی با استفاده از تحلیل پوششی داده‌های استوار تعاملی^۳ با هدف تعیین مقدار هدف متغیرهای ورودی و خروجی شرکت‌های توزیع برق ایران را مورد ارزیابی قرار دادند. به منظور جستجوی مرز پوششی در این مطالعه تحلیل پوششی داده‌ها با رویکرد برنامه‌ریزی خطی چندهدفه روش گام^۴ ترکیب شده است. این رویکرد ترکیبی توانایی مواجه با عدم قطعیت داده‌ها را داراست و می‌تواند مقادیر هدف متغیرهای ورودی و خروجی را مطابق با ترجیحات تصمیم‌گیرندگان فراهم نماید.^[۱۶] یوزی و ژانگتا در سال ۲۰۱۲ با در نظر گرفتن ساختار شبکه‌یی سیستم قدرت به بررسی اثر بخشی این سیستم با تحلیل پوششی داده‌ها پرداختند. آن‌ها به مطالعه‌ی ویژگی‌های متغیرهای ورودی و خروجی پرداختند به گونه‌یی که بتوانند ارزیابی عینی را با دید اقتصادی در بین شرکت‌های توزیع چین انجام دهند. ساختار قدرت بر اساس یک سیستم ولتاژ به بخش‌های انتقال، توزیع و سیستم مشتریان تفکیک شده است. در این مطالعه مدل تحلیل پوششی داده‌ها بدون اسپیلون^۵ برای ارزیابی اثر بخشی شرکت‌های توزیع ارائه کردند.^[۱۷] کوسمان (۲۰۱۲)، در مطالعه‌ی با استفاده از برآورد مرز هزینه به تصمیم‌گیرندگان فنلاندی در توسعه و سیاست‌گذاری بخش توزیع برق نتایج ارزشمندی را ارائه کرد.

ورودی و در نظر گرفتن علامت منفی برای متغیر خروجی دو رویکرد رایج در نحوه‌ی برخورد با خروجی نامطلوب است. [۲۳-۲۴]

۳.۲. شکاف تحقیق

در دنیای واقعی، بسیاری از سیستم‌ها از فرایندهایی با ساختار متوالی، موازی یا ترکیبی تشکیل شده‌اند. بنابراین، NDEA نسبت به DEA سنتی کاربردها و مزیت‌های بسیاری در ارزیابی عملکرد واحدهای تصمیم‌گیرنده‌ی دنیای واقعی داراست. از سویی دیگر، هرچند مطالعات زیادی به بررسی و سنجش کارایی صنعت برق در ایران و سایر کشورها با استفاده از مدل DEA پرداخته‌اند، بررسی جدیدترین منابع و مطالعات محققان نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های شبکه‌ی با ساختار ترکیبی سه‌مرحله‌ی در سنجش کارایی صنعت برق در پژوهش‌های پیشین سابقه‌ی چندانی ندارد؛ بنابراین در این مطالعه، با توجه به مزیت‌های NDEA در تعیین منشأ ناکارایی یک سیستم، با هدف بررسی عملکرد و شناسایی منشأ ناکارایی صنعت برق ایران از NDEA استفاده می‌شود. ساختار صنعت برق ایران دارای سه فرایند متوالی تولید، انتقال و توزیع برق است. از طرفی واحدهای نیروگاهی در فرایند تولید و شرکت‌های توزیع برق در فرایند توزیع برق به صورت موازی با یکدیگر فعالیت دارند. در نتیجه، ساختار این صنعت ترکیبی از فرایندهای متوالی و موازی است که با ماهیت NDEA تطابق فراوانی دارد؛ از این رو، در این پژوهش، مدلی با ساختار متوالی - موازی پیشنهاد می‌شود که مجموعه‌ی کاملی از انواع ورودی‌ها، اندازه‌های میانی و خروجی‌های مطلوب و نامطلوب را داراست. این مجموعه‌ی کامل را می‌توان یکی از جنبه‌های نوآوری تحقیق حاضر دانست. از جمله نوآوری‌ها و ویژگی‌های مدل پیشنهادی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- مدل پیشنهادی سه فرایند متوالی تولید، انتقال و توزیع برق را به طور هم‌زمان ارزیابی کرده است.
- در نظر گرفتن ساختار متوالی فرایندهای سه‌گانه همراه با ساختارهای موازی موجود در فرایندهای تولید و توزیع برق از جمله ویژگی‌های برجسته‌ی این مطالعه محسوب می‌شود.
- واحدهای تصمیم‌گیرنده دارای ساختار همگنی هستند؛ اما تعداد واحدهای موازی در واحدهای تصمیم‌گیرنده با هم برابر نیستند.
- در نظر گرفتن انواع ورودی‌ها، اندازه‌های میانی، خروجی‌های مطلوب و نامطلوب میانی و نهایی یکی دیگر از مواردی است که در مدل پیشنهادی لحاظ شده است.
- مطالعه‌ی موردی واقعی که از داده‌های واقعی سه بخش تولید، انتقال و توزیع در صنعت برق استفاده شده است.

۳. روش شناسی تحقیق

۱.۳. مدل پیشنهادی تحقیق

در این مطالعه، n واحد تصمیم‌گیرنده DMU_j ($j = 1, 2, \dots, n$) دارای سه فرایند متوالی مفروض است. فرایند اول با مصرف ورودی‌های X_{ij} ($i = 1, 2, \dots, I$) اندازه‌های میانی Z_{pj} ($p = 1, 2, \dots, P$) و خروجی‌های مطلوب y_{gj} ($g = 1, 2, \dots, G$) را تولید می‌کند. فرایند دوم علاوه بر ورودی‌های دریافتی از فرایند اول

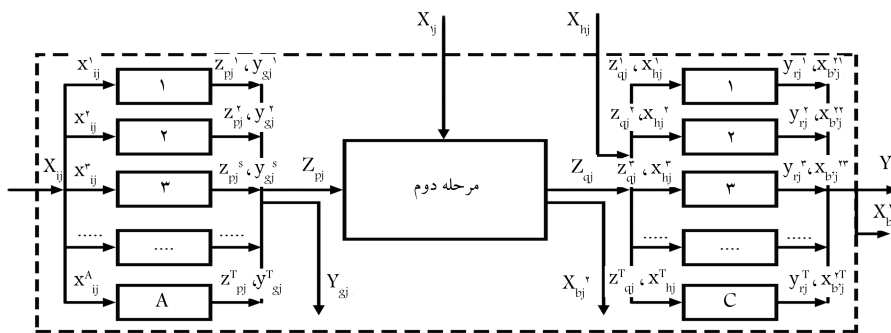
رقابتی دارای توانایی‌های بسیاری است. [۱۲] خیلیلی دامغانی و شهیر (۲۰۱۵)، در مطالعه‌ی شرکت‌های تولید و توزیع را در قالب چهارده ناحیه در سطح کشور و در بازه‌ی زمانی سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۳ در قالب یک مدل دو مرحله‌ی مورد مطالعه قرار دادند. مدل پیشنهادی این مطالعه توانایی محاسبه‌ی کارایی و ناکارایی واحدهای تصمیم‌گیرنده‌ی اصلی و واحدهای فرعی تشکیل‌دهنده‌ی هر مرحله را داراست. این مدل خروجی نامطلوب در پایان مرحله‌ی اول یا خروجی نامطلوب میانی و عدم قطعیت در داده‌ها را از طریق داده‌های فاصله‌ی مدل‌سازی کرده است. نمرات کارایی خوش‌بینانه و بدبینانه برای واحدهای تحت ارزیابی در قالب یک مدل با خروجی نامطلوب و عدم قطعیت در داده‌ها محاسبه شده است. نهایتاً با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس واحدهای تصمیم‌گیرنده‌ی اصلی و فرعی در مراحل اول و دوم رتبه‌بندی شده است. [۱۳] گواویا و همکاران (۲۰۱۵)، الگویابی شرکت‌های توزیع برق را با هدف بهینه‌سازی هزینه‌ها، افزایش رضایت مشتریان، بهبود تصویر شرکت، پیشینه‌سازی سود و دستیابی به مزیت رقابتی مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه فعالیت‌های نگهداری و تعمیر قطعی برق در شرکت‌های توزیع برق کشور پرتغال و با استفاده از روش ارزش‌محور تحلیل پوششی داده‌ها (ترکیبی از تحلیل پوششی داده‌ها و تصمیم‌گیری چندمعیاره) مورد ارزیابی قرار گرفته است. در واقع، در مقایسه با تحلیل پوششی داده‌های سنتی، تحلیل پوششی داده‌های ارزش‌محور برای پشتیبانی از تصمیمات مدیریتی برای اخذ سیاست‌های آتی مناسب‌تر است. [۱۴]

۲.۲. مروری بر پیشینه‌ی مدل‌های تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ی

تحلیل پوششی داده‌ها که نخستین بار توسط چارلز و همکاران (۱۹۷۸) معرفی شده است، [۱۵] DEA رویکردی برای شناسایی بهترین عملکرد واحدهای تصمیم‌گیرنده‌ی است که ورودی‌هایی چندگانه را به منظور تولید خروجی‌های چندگانه مصرف می‌کنند. در DEA سنتی، واحد تصمیم‌گیرنده به صورت یک کل در نظر گرفته و ساختار درونی واحد تصمیم‌گیرنده نادیده گرفته می‌شود.

در حالی که ساختار درونی واحدهای تصمیم‌گیرنده در تعیین نمرات کارایی و منشأ ناکارایی هر یک از واحدهای تصمیم‌گیرنده تأثیر فراوانی دارند. اولین مطالعه‌ی که ساختار داخلی سیستم را بررسی کرده است، توسط چارلز و همکاران در سال ۱۹۸۶ انجام شده است. [۱۶] در این مطالعه فرایند جذب نیرو به دو بخش آگهی استخدام و سپس عقد قرارداد تفکیک و به عنوان دو مرحله فرایند جذب نیرو در نظر گرفته شده است. از زمان مطرح شدن ساختار شبکه‌ی توسط چارلز و همکاران در سال ۱۹۸۶، صدها مقاله با مبحث تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ی منتشر شده است. برخی از این مقاله‌ها به ارائه‌ی مدل‌های اندازه‌گیری کارایی در شرایط خاص، برخی به بررسی خواص مدل‌های معین و برخی دیگر به مطالعه‌ی کاربرد مدل‌های موجود برای حل مسائل دنیای واقعی پرداخته‌اند. همچنین اولین مطالعه در زمینه بررسی مدل‌های شبکه‌ی چندمرحله‌ی توسط فیر و گروسفک در سال ۲۰۰۰ مطرح شده است. [۱۷] از آن زمان تا کنون مطالعات بسیاری در زمینه‌ی سیستم‌های دومرحله‌ی و چندمرحله‌ی صورت گرفته است که نتیجه‌ی آن چاپ مقالات بسیار در نشریات معتبر است.

در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی به ارائه‌ی مدل‌های DEA برای ارزیابی کارایی‌های کلی و جزئی سیستم‌های دومرحله‌ی و چندمرحله‌ی پرداخته‌اند. [۱۸-۲۳] در زمینه‌ی ارزیابی عملکرد ساختارهای شبکه‌ی با خروجی نامطلوب میانی و خصوصاً نهایی نیز مطالعاتی صورت گرفته است. کاهش خروجی نامطلوب مانند



شکل ۱. سیستم با سه فرایند دارای ساختارهای متوالی و موازی.

$$Z_j^{(d,d+1)} = \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(d)} Z_j \quad (j = 1, 2, \dots, n)$$

$$Z_j^{(d,d+1)} = \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(d+1)} Z_j \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

از طرفی، در تعریف محدودیت‌های مربوط به فرایندهای $d + 1$ و d نقش‌های خروجی و ورودی این اندازه‌های میانی با دو مجموعه امکان تولید ورودی و خروجی تعریف می‌شود.

$$Z_j^d \geq \sum_{j=1}^n \lambda_j^d Z_j^d \quad (j = 1, 2, \dots, n), (d = 1, 2, 3) \quad (4)$$

$$Z_j^d \leq \sum_{j=1}^n \lambda_j^{d+1} Z_j^d \quad (j = 1, 2, \dots, n), (d = 1, 2, 3) \quad (5)$$

در مدل محاسبه‌ی کارایی کل و مراحل سه‌گانه، تعداد دسته محدودیت‌ها به تعداد ورودی‌ها، اندازه‌های میانی، خروجی‌های مطلوب و نامطلوب است. تعداد پارامترهای λ به تعداد مراحل، تعداد متغیرهای مازاد S نیز بر حسب ماهیت ورودی‌ها، اندازه‌های میانی، خروجی‌های مطلوب و نامطلوب موجود در هر دسته محدودیت است.

۲.۳. محاسبه‌ی نمرات کارایی کل سیستم

با فرض بازده به مقیاس متغیر، مدل تحلیل پوششی داده‌های مبتنی بر سنجش‌های کمکی^۹ بدون گرایش را به صورت رابطه‌ی (۶-۱) می‌نویسیم.^[۳۸] تابع هدف مدل مجموعه امکان تولید نسبت ورودی‌های به خروجی‌های سیستم را کمینه می‌سازد.

$$\begin{aligned} \rho_0 = & \text{Min}(w_1[\lambda - \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (S_i^- / X_{i0}^-)] \\ & + w_2[\lambda - \frac{1}{L+P+B} \sum_{l=1}^L (S_l^- / X_{l0}^-) \\ & + \sum_{p=1}^P (S_p^- / Z_{p0}^-) + \sum_{b=1}^B (S_b^- / X_{b0}^+)] \\ & + W_r[\lambda - \frac{1}{H+Q+B'} \sum_h^H (S_h^- / X_{h0}^-) \\ & + \sum_q^Q (S_q^- / Z_{q0}^-) + \sum_{l=b}^{B'} (S_{b'}^- / X_{b'0}^+)] \\ & / w_1[\lambda + \frac{1}{G+P} \sum_{g=1}^G (S_g^+ / Y_{g0}^+) + \sum_{p=1}^P (S_p^+ / Z_{p0}^+)] \\ & + w_2[\lambda + \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q (S_q^+ / Z_{q0}^+)] \\ & + w_r[\lambda + \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R (S_r^+ / Y_{r0}^+)] \end{aligned} \quad (6-1)$$

دارای ورودی‌های مازاد X_{lj} , $(l = 1, 2, \dots, L)$ است که از فرایند قبل تولید نمی‌شوند. خروجی‌های این فرایند شامل اندازه‌های میانی Z_{qj} , $(q = 1, 2, \dots, Q)$ و خروجی‌های نامطلوب X_{bj}^r , $(b = 1, 2, \dots, B)$ است. نهایتاً فرایند سوم به غیر از ورودی‌های مرحله‌ی قبلی ورودی‌های مازاد X_{hj} , $(h = 1, 2, \dots, H)$ را دریافت کرده و خروجی‌های نامطلوب $X_{b'j}^r$, $(b = 1, 2, \dots, B')$ و خروجی‌های مطلوب Y_{rj} , $(r = 1, 2, \dots, R)$ را تولید می‌کند.

در شکل ۱ ساختار کلی سیستم با سه فرایند دارای ارتباط متوالی نشان داده شده است. در این سیستم، فرایند اول از a : $(a = 1, 2, \dots, A)$ واحد تصمیم‌گیرنده دارای ساختار موازی تشکیل شده است. فرایند دوم فاقد واحدهای داخلی است و فرایند سوم نیز دارای c : $(c = 1, 2, \dots, C)$ واحد تصمیم‌گیرنده با ساختار است. همچنین در فرایندهای اول و سوم ورودی‌های کل فرایند بین واحدهای تصمیم‌گیرنده موازی درون فرایندها تفکیک و خروجی‌های فرایندها نیز از مجموع خروجی‌های واحدهای موازی درون فرایندها حاصل می‌شود.

با فرض وجود سیستم‌های فرعی دارای تعداد نابرابر واحدهای وظیفه‌ی موازی در بین واحدهای تصمیم‌گیرنده، محدودیت‌های مرتبط با واحدهای وظیفه‌ی بر اساس واحد تصمیم‌گیرنده‌ی که دارای بیشترین تعداد واحدهای وظیفه‌ی است، تعیین خواهد شد.

$$A_1 \neq \dots \neq A_j, \quad A = \text{Max} A_j, \quad a = 1, 2, \dots, A$$

$$M_1 \neq \dots \neq M_j, \quad M = \text{Max} M_j, \quad m = 1, 2, \dots, M$$

مفروضات اصلی مدل نیز به این صورت است که $\rho_j^1, \rho_j^2, \rho_j^3$ به ترتیب نمرات کارایی کل، فرایند اول، فرایند دوم و فرایند سوم در نظر گرفته می‌شود. سیستم با فرایندهای سه‌گانه با ورودی‌های مازاد در فرایندهای دوم و سوم، اندازه‌های میانی، خروجی‌های نامطلوب نهایی و میانی و خروجی‌های مطلوب میانی و نهایی در شکل ۱ نشان داده شده است. مجموعه‌ی امکان تولید برای هر ورودی‌ها و خروجی‌های فرایند d ام سیستم را می‌توان به صورت روابط ۱ و ۲ تعریف کرد.

$$X_j^d \geq \sum_{j=1}^n \lambda_j^d X_j^d \quad (j = 1, 2, \dots, n), (d = 1, 2, 3) \quad (1)$$

$$Y_j^d \leq \sum_{j=1}^n \lambda_j^d Y_j^d \quad (j = 1, 2, \dots, n), (d = 1, 2, 3) \quad (2)$$

اندازه‌های میانی، سنجه‌هایی هستند که در ارزیابی نمرات کارایی فرایندها دارای نقش دوگانه‌ی ورودی و خروجی هستند. بنابراین در سنجش نمرات کارایی فرایندها باید به این نکته توجه کرد. در حالی که مجموعه امکان تولید اندازه‌های میانی فرایندهای $d + 1$ را به صورت رابطه‌ی ۳ تعریف می‌کنند.^[۳۸]

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^+ Z_{pj} - S_p^+ = Z_{p^0}, \quad p = 1, 2, \dots, P,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^+ X_{lj} + S_l^- = X_{l^0}, \quad l = 1, 2, \dots, L,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^+ Z_{pj} + S_p^- = Z_{p^0}, \quad p = 1, 2, \dots, P,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^+ Y_{bj} + S_b^- = Y_{b^0}, \quad b = 1, 2, \dots, B,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^+ Z_{qj} - S_q^+ = Z_{q^0}, \quad q = 1, 2, \dots, Q,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^+ X_{hj} + S_h^- = X_{h^0}, \quad h = 1, 2, \dots, H,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^+ Z_{qj} + S_q^- = Z_{q^0}, \quad q = 1, 2, \dots, Q,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^+ Y_{rj} - S_r^+ = Y_{r^0}, \quad r = 1, 2, \dots, R,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^+ Y_{b'j} + S_{b'}^- = Y_{b'^0}, \quad b' = 1, 2, \dots, B',$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^+ Z_{pj} Z_{p^0}, \quad p = 1, 2, \dots, P,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^+ Z_{pj} = Z_{p^0}, \quad p = 1, 2, \dots, P,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^+ Z_{qj} = Z_{q^0}, \quad q = 1, 2, \dots, Q,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^+ Z_{qj} = Z_{q^0}, \quad q = 1, 2, \dots, Q,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^+ = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^+ = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^+ = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

(۶-۲)

$$\lambda_j^+, \lambda_j^-, \lambda_j^+, S_i^-, S_g^+, S_p^-, S_p^+, S_l^-, S_b^-, S_h^-, S_r^+, S_{b'}^-, S_q^-, S_q^+,$$

$$w_d \geq 0$$

تابع هدف رابطه‌ی (۶-۱) بیان‌گر یک رابطه‌ی غیرخطی است که بر اساس رابطه‌ی ۷ می‌توان این مدل را خطی کرد.

$$\alpha = 1/w_1 [1 + \frac{1}{G+P} \sum_{g=1}^G (S_g^+/Y_{g^0}) + \sum_{p=1}^P (S_p^+/Z_{p^0})]$$

$$+ w_2 [1 + \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q (S_q^+/Z_{q^0})]$$

$$+ w_3 [1 + \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R (S_r^+/Y_{r^0})]$$

جدول ۱. معرفی نمادهای موجود در روابط ریاضی تحقیق.

فرایند اول	فرایند دوم	فرایند سوم
X_{ij} : ورودی i ام واحد زام	X_{ij} : ورودی i ام واحد زام	X_{ij} : ورودی i ام واحد زام
Z_{pj} : خروجی p ام واحد زام	Z_{qj} : خروجی q ام واحد زام	-
Y_{gj} : خروجی g ام واحد زام	-	Y_{rj} : خروجی r ام واحد زام
-	X_{bj}^+ : خروجی b ام واحد زام	X_{bj}^+ : خروجی b ام واحد زام
λ_j^+ : ضریب پوششی واحد زام	λ_j^+ : ضریب پوششی واحد زام	λ_j^+ : ضریب پوششی واحد زام
S_i^- : متغیر کمکی ورودی i ام	S_i^- : متغیر کمکی ورودی i ام	S_i^- : متغیر کمکی ورودی i ام
S_g^+ : متغیر کمکی خروجی g ام	-	S_r^+ : متغیر کمکی خروجی r ام
S_p^+ : متغیر کمکی اندازه میانی p ام	S_q^+ : متغیر کمکی اندازه میانی q ام	-
S_p^- : متغیر کمکی اندازه میانی p ام	S_p^- : متغیر کمکی اندازه میانی p ام	S_q^- : متغیر کمکی اندازه میانی q ام
$S_{b'}^-$: متغیر کمکی خروجی نامطلوب b' ام	$S_{b'}^-$: متغیر کمکی خروجی نامطلوب b' ام	$S_{b'}^-$: متغیر کمکی خروجی نامطلوب b' ام
w_1 : وزن فرایند اول در تابع هدف	w_2 : وزن فرایند دوم در تابع هدف	w_3 : وزن فرایند سوم در تابع هدف

ضرایب و متغیرهای موجود در مدل تابع هدف (۶-۱) و سایر مدل‌های موجود را می‌توان به صورت جدول ۱ خلاصه کرد. دسته محدودیت‌های اول تا نهم بیان‌گر مجموعه امکان تولید ورودی‌ها، اندازه‌های میانی و خروجی‌های مطلوب و نامطلوب فرایند‌های سه‌گانه سیستم هستند. در واقع، دسته محدودیت‌های اول تا سوم با مجموعه امکان تولید ورودی‌ها و خروجی‌های فرایند اول سیستم مرتبطاند. دسته محدودیت‌های چهارم تا هشتم شامل مجموعه امکان تولید ورودی‌ها، خروجی مطلوب و نامطلوب فرایند دوم هستند. نهایتاً دسته محدودیت‌های نهم تا دوازدهم نیز بیان‌گر مجموعه امکان تولید ورودی‌ها، خروجی مطلوب و نامطلوب فرایند سوم هستند. دسته محدودیت آخر هم بیان‌گر فرض بازده به مقیاس متغیر برای هر سه فرایند سیستم است.

$$s.t. : \sum_{j=1}^n \lambda_j^+ X_{ij} + S_i^- = X_{i^0}, \quad i = 1, 2, \dots, I,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^+ Y_{gj} - S_g^+ = Y_{g^0}, \quad g = 1, 2, \dots, G,$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{pj} &= Z_{p^0} \alpha, \quad p = 1, 2, \dots, P, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^2 Z_{qj} &= Z_{q^0} \alpha, \quad q = 1, 2, \dots, Q, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^r Z_{qj} &= Z_{q^0} \alpha, \quad q = 1, 2, \dots, Q, \\ w_1 [\alpha + \frac{1}{G+P} \sum_{g=1}^G (S_g^+ / Y_{g^0}) + \sum_{p=1}^P (S_p^+ / Z_{p^0})] \\ + w_2 [\alpha + \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q (S_q^+ / Z_{q^0})] &= 1 \\ + w_3 [\alpha + \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R (S_r^+ / Y_{r^0})] \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 &= \alpha, \quad j = 1, 2, \dots, n, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^2 &= \alpha, \quad j = 1, 2, \dots, n, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^r &= \alpha, \quad j = 1, 2, \dots, n, \\ \sum_{d=1}^r w_d &= 1 \\ \lambda_j^1, \lambda_j^2, \lambda_j^r, S_i^-, S_g^+, S_p^-, S_p^+, S_l^-, S_b^-, S_h^-, S_r^+, S_{b'}^-, S_q^-, S_q^+, \\ w_d, \alpha &\geq 0 \end{aligned} \quad (A)$$

تابع هدف مدل ۸ مجموع موزون حاصل ضرب یک به علاوه معکوس تعداد ورودی‌های سیستم در نسبت متغیر کمکی مربوط به ورودی مورد ارزیابی را کمینه می‌سازد. همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، هر کدام از فرایندهای سه‌گانه دارای ساختارهای خاص خود هستند. با فرض وجود $a : (a = 1, 2, \dots, A)$ واحد تصمیم‌گیرنده‌ی دارای ساختار موازی در فرایند اول و $c : (c = 1, 2, \dots, c)$ واحد تصمیم‌گیرنده‌ی موازی در فرایند سوم، برای هر واحد تصمیم‌گیرنده $(j = 1, 2, \dots, n)$ ورودی‌ها و خروجی‌های هر فرایند از مجموع ورودی‌ها و خروجی‌های واحدهای تصمیم‌گیرنده‌ی فعال در هر فرایند حاصل می‌شود. کاتو (۲۰۰۹) برای محاسبه‌ی کارایی واحدهای موازی، دسته محدودیت‌های مربوط به فرایندهای موازی را در مدل مضربی بر اساس مجموعه ورودی‌ها و خروجی‌های واحدهای مورد مطالعه بسط داده است.^{[۲۶] [۲۵]} در این مطالعه با توجه به ثابت بودن ضریب پوششی λ برای هر سه مرحله، دسته محدودیت‌های مربوط به فرایندهای اول و سوم سیستم برحسب واحد زام بسط داده می‌شود.

بسط فرایندها:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 X_{ij} + S_i^- &= X_{i^0} \alpha \\ \rightarrow \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 \sum_{a=1}^A x_{ij}^a + \sum_{a=1}^A s_i^{-a} - \sum_{a=1}^A x_{i^0}^a \alpha &= 0 \\ \Rightarrow \sum_{a=1}^A (\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 x_{ij}^a - x_{i^0}^a \alpha + s_i^{-a}) &= 0 \\ \rightarrow \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 x_{ij}^a - x_{i^0}^a \alpha + s_i^{-a} &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

ورودی‌ها و خروجی‌های فرایند سوم همانند فرایند اول سیستم از مجموع ورودی‌ها و

$$\begin{aligned} S_i^- \alpha &= S_i^-, \quad S_l^- \alpha = S_l^-, \quad S_h^- \alpha = S_h^-, \\ S_q^- \alpha &= S_q^-, \quad S_p^- \alpha = S_p^-, \quad S_b^- \alpha = S_b^-, \quad S_{b'}^- \alpha = S_{b'}^-, \\ S_p^+ \alpha &= S_p^+, \quad S_q^+ \alpha = S_q^+, \quad S_g^+ \alpha = S_g^+, \quad S_r^+ \alpha = S_r^+, \\ \lambda_j^1 \alpha &= \lambda_j^1, \quad \lambda_j^2 \alpha = \lambda_j^2, \quad \lambda_j^r \alpha = \lambda_j^r, \\ \alpha &> 0, \end{aligned} \quad (V)$$

در رابطه‌ی ۷ مقدار یک بر روی مخرج را برابر α در نظر می‌گیریم و دسته محدودیت‌های مدل را نیز در میزان α ضرب می‌کنیم و متغیرهای مازاد و λ ‌های جدید را بر اساس رابطه‌ی ۷ بازنویسی می‌کنیم.

حال با توجه به مقادیر جدید متغیرهای کمکی حاصل از رابطه‌ی ۷ می‌توان مدل خطی محاسبه‌ی کارایی کل سیستم را به صورت مدل ۸ نوشت.

$$\begin{aligned} \rho &= \text{Min}(w_1 [\alpha - \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (S_i^- X_{i^0})] \\ + w_2 [\alpha - \frac{1}{L+P+B} \sum_{l=1}^L (S_l^- + X_{l^0}) + \sum_{p=1}^P (S_p^- / Z_{p^0}) \\ + \sum_{b=1}^B (S_b^- / X_{b^0})] \\ + w_3 [\alpha - \frac{1}{H+Q+B'} \sum_{h=1}^H (S_h^- / X_{h^0}) + \sum_{q=1}^Q (S_q^- / Z_{q^0}) \\ + \sum_{b'=1}^{B'} (S_{b'}^- / X_{b'^0})]) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{s.t.} : \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 X_{ij} + S_i^- &= X_{i^0} \alpha, \quad i = 1, 2, \dots, I, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Y_{gj} - S_g^+ &= Y_{g^0} \alpha, \quad g = 1, 2, \dots, G, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{pj} - S_p^+ &= Z_{p^0} \alpha, \quad p = 1, 2, \dots, P, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 X_{lj} + S_l^- &= X_{l^0} \alpha, \quad l = 1, 2, \dots, L, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{pj} + S_p^- &= Z_{p^0} \alpha, \quad p = 1, 2, \dots, P, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Y_{bj} + S_b^- &= Y_{b^0} \alpha, \quad b = 1, 2, \dots, B, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{qj} - S_q^+ &= Z_{q^0} \alpha, \quad q = 1, 2, \dots, Q, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 X_{hj} + S_h^- &= X_{h^0} \alpha, \quad h = 1, 2, \dots, H, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{qj} + S_q^- &= Z_{q^0} \alpha, \quad q = 1, 2, \dots, Q, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Y_{rj} - S_r^+ &= Y_{r^0} \alpha, \quad r = 1, 2, \dots, R, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Y_{b'j} + S_{b'}^- &= Y_{b'^0} \alpha, \quad b' = 1, 2, \dots, B', \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{pj} &= Z_{p^0} \alpha, \quad p = 1, 2, \dots, P, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \lambda_j^r z_{qj}^c - z_q^c \alpha + s_q^{c-} &= 0, \quad q = 1, 2, \dots, Q, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^r y_{b'j}^c - y_{b'}^c \alpha + s_{b'}^{c-} &= 0, \quad b' = 1, 2, \dots, B', \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^r y_{rj}^c - y_r^c \alpha - s_r^{c+} &= 0, \quad r = 1, 2, \dots, R, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 z_{pj}^a - z_p^a \alpha &= 0, \quad p = 1, 2, \dots, P, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{pj} - Z_p \alpha &= 0, \quad p = 1, 2, \dots, P, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{qj} - Z_q \alpha &= 0, \quad q = 1, 2, \dots, Q, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^r z_{qj}^c - z_q^c \alpha &= 0, \quad q = 1, 2, \dots, Q, \\ w_1 [\alpha + \frac{1}{G+P} \sum_{g=1}^G (S_g^+ / Y_{g^*}) + \sum_{p=1}^P (S_p^+ / Z_{p^*})] \\ w_2 [\alpha + \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q (S_q^+ / Z_{q^*})] + w_3 [\alpha + \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \\ (S_r^+ / Y_{r^*})] &= 1 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 &= \alpha, \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j^2 = \alpha, \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j^r = \alpha \quad (j = 1, 2, \dots, n) \\ \sum_{d=1}^r w_d &= 1 \\ \lambda_j^1, \lambda_j^2, \lambda_j^r, s_i^{a-}, s_g^{a+}, s_p^{a+}, s_l^-, s_b^-, s_p^-, s_q^+, s_h^-, s_{b'}^-, s_q^-, \\ s_r^{c+}, w_d, \alpha &\geq 0 \end{aligned} \quad (11)$$

۳.۳. محاسبه‌ی نمرات کارایی فرایند اول

پیشینه‌ی ارزش نمرات کارایی فرایند اول سیستم مانند نمرات کارایی کل سیستم قابل محاسبه است. تابع هدف مدل ورودی‌های فرایند اول سیستم را کمینه می‌سازد. محدودیت‌های این مدل همانند دسته محدودیت‌های مدل محاسبه‌ی نمرات کارایی کل سیستم است؛ از این رو، از نوشتن مجدد آن خودداری می‌شود و فقط دسته محدودیت مربوط به خطی کردن تابع هدف و تابع هدف، در قالب مدل ۱۲ نوشته می‌شود.

$$\begin{aligned} \rho_i^* &= \text{Min}(\alpha - \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (S_i^- / X_{i^*})) \\ s.t. : \rho_i^* &= (w_1 [\alpha - \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (S_i^- / X_{i^*})] \\ &+ w_2 [\alpha - \frac{1}{L+P+B} \sum_{l=1}^L (S_l^- / X_{l^*}) \\ &+ \sum_{p=1}^P (S_p^- / Z_{p^*}) + \sum_{b=1}^B (S_b^- / X_{b^*}^t)]) \\ &+ w_3 [\alpha - \frac{1}{H+Q+B'} \sum_h (S_h^- / X_{h^*}) \\ &+ \sum_q (S_q^- / Z_{q^*}) + \sum_{l=b}^{B'} (S_{b'}^- / X_{b'}^t)]) \\ s.t. : \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 x_{ij}^a - x_i^a \alpha + s_i^{a-} &= 0, \quad i = 1, 2, \dots, I, \end{aligned}$$

خروجی‌های واحدهای دارای ساختار موازی موجود در فرایند سوم حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 x_{ij}^a - x_i^a \alpha + s_i^{a-} &= 0, \quad i = 1, 2, \dots, I, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 y_{gj}^a - y_g^a \alpha - s_g^{a+} &= 0, \quad g = 1, 2, \dots, G, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 z_{pj}^a - z_p^a \alpha - s_p^{a+} &= 0, \quad p = 1, 2, \dots, P, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 z_{pj}^a - z_p^a \alpha &= 0, \quad p = 1, 2, \dots, P, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 x_{hj}^c - x_h^c \alpha + s_h^{c-} &= 0, \quad h = 1, 2, \dots, H, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 z_{qj}^c - z_q^c \alpha + s_q^{c-} &= 0, \quad q = 1, 2, \dots, Q, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 y_{b'j}^c - y_{b'}^c \alpha + s_{b'}^{c-} &= 0, \quad b' = 1, 2, \dots, B', \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 y_{rj}^c - y_r^c \alpha - s_r^{c+} &= 0, \quad r = 1, 2, \dots, R, \end{aligned} \quad (10)$$

بنابراین مدل کارایی کل سیستم با ملاحظه‌ی ساختارهای موازی فرایندهای اول و سوم را می‌توان به صورت مدل ۱۱ نوشت:

$$\begin{aligned} \rho_i^* &= \text{Min}(w_1 [\alpha - \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (S_i^- / X_{i^*})] \\ &+ w_2 [\alpha - \frac{1}{L+P+B} \sum_{l=1}^L (S_l^- / X_{l^*}) + \\ &\sum_{p=1}^P (S_p^- / Z_{p^*}) + \sum_{b=1}^B (S_b^- / X_{b^*}^t)]) \\ &+ w_3 [\alpha - \frac{1}{H+Q+B'} \sum_h (S_h^- / X_{h^*}) \\ &+ \sum_q (S_q^- / Z_{q^*}) + \sum_{l=b}^{B'} (S_{b'}^- / X_{b'}^t)]) \\ s.t. : \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 x_{ij}^a - x_i^a \alpha + s_i^{a-} &= 0, \quad i = 1, 2, \dots, I, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 y_{gj}^a - y_g^a \alpha - s_g^{a+} &= 0, \quad g = 1, 2, \dots, G, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 z_{pj}^a - z_p^a \alpha - s_p^{a+} &= 0, \quad p = 1, 2, \dots, P, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 x_{lj} - X_l \alpha + s_l^- &= 0, \quad l = 1, 2, \dots, L, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{pj} - Z_p \alpha + s_p^- &= 0, \quad p = 1, 2, \dots, P, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Y_{bj} - Y_b \alpha + S_b^- &= 0, \quad b = 1, 2, \dots, B, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{qj} - Z_q \alpha - s_q^+ &= 0, \quad q = 1, 2, \dots, Q, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 x_{hj}^c - x_h^c \alpha + s_h^{c-} &= 0, \quad h = 1, 2, \dots, H, \end{aligned}$$

تابع هدف، نیز بیانگر دسته محدودیت مربوط به خطی کردن تابع هدف است که بر اساس خروجی‌های مطلوب فرایند اول سیستم نوشته شده است.

۴.۳. محاسبه‌ی نمرات کارایی واحدهای موازی فرایند اول

پس از محاسبه‌ی ضرایب متغیرهای ورودی، اندازه‌های میانی و خروجی‌های مطلوب فرایند اول سیستم، نمرات کارایی واحدهای موازی فعال در فرایند اول با استفاده از رابطه‌ی ۱۳ محاسبه می‌شود.

$$\rho_i^{1a*} = [1 - \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (s_i^{a-*} / x_i^a)] / [1 + \frac{1}{G} \sum_{g=1}^G (s_g^{a+*} / y_g^a)] + [1 + \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P (s_p^{a+*} / z_p^a)] \quad (13)$$

۵.۳. محاسبه‌ی نمرات کارایی فرایند دوم

بیشینه‌ی ارزش نمرات کارایی فرایند دوم سیستم مانند نمرات کارایی کل سیستم و فرایند اول را می‌توان محاسبه کرد. تابع هدف سنجش کارایی فرایند دوم سیستم، در قالب رابطه‌ی ۱-۱۴ ورودی‌ها و خروجی نامطلوب حاصل از فعالیت فرایند دوم سیستم را کمینه می‌سازد. اگر $\rho_i^2 = 1$ باشد، آنگاه فرایند دوم واحد تصمیم‌گیرنده تحت ارزیابی کارا خواهد بود.

$$\rho_i^2 = \text{Min}[\alpha - \frac{1}{L+P+B} \sum_{l=1}^L (S_l^- / X_{l0}^i)] + \sum_{p=1}^P (S_p^- / Z_{p0}^i) + \sum_{b=1}^B (S_b^- / X_{b0}^i) \quad (14-1)$$

دسته محدودیت‌های مشترک همان دسته محدودیت‌های مدل ۱۲ هستند. تنها محدودیت مربوط به خطی کردن تابع هدف است که با دسته محدودیت‌های مدل ۱۲ تفاوت دارد.

$$\alpha + \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q (S_q^+ / Z_{q0}^i) = 1 \quad (14-2)$$

رابطه‌ی (۱۴-۲) نیز بیانگر دسته محدودیت مربوط به خطی کردن تابع هدف است که بر اساس خروجی مطلوب فرایند دوم سیستم نوشته شده است.

۶.۳. محاسبه‌ی نمرات کارایی فرایند سوم

بیشینه‌ی ارزش نمرات کارایی فرایند سوم سیستم مانند نمرات کارایی کل سیستم، فرایندهای اول و دوم قابل محاسبه است. تابع هدف مدل (۱-۱۵) ورودی‌ها و خروجی نامطلوب فرایند سوم سیستم را کمینه می‌سازد.

$$\rho_i^3 = \text{Min} \alpha - \frac{1}{H+Q+B'} \times \sum_h^H (S_h^- / X_{h0}^i) + \sum_q^Q (S_q^- / Z_{q0}^i) + \sum_{l=b}^{B'} (S_{b'}^- / X_{b'0}^i) \quad (15-1)$$

ρ_i^{3*} بیانگر نمره‌ی کارایی فرایند سوم واحدهای تصمیم‌گیرنده است. اگر $\rho_i^3 = 1$ باشد، آنگاه فرایند سوم واحد تصمیم‌گیرنده تحت ارزیابی کارا خواهد بود.

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 y_{gj}^a - y_g^a \alpha - s_g^{a+} &= 0, & g = 1, 2, \dots, G, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 z_{pj}^a - z_p^a \alpha - s_p^{a+} &= 0, & p = 1, 2, \dots, P, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 X_{lj} - X_l \alpha + S_l^- &= 0, & l = 1, 2, \dots, L, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{pj} - Z_p \alpha + S_p^- &= 0, & p = 1, 2, \dots, P, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Y_{bj} - Y_b \alpha + S_b^- &= 0, & b = 1, 2, \dots, B, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{qj} - Z_q \alpha - S_q^+ &= 0, & q = 1, 2, \dots, Q, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^r x_{hj}^c - x_h^c \alpha + s_h^{c-} &= 0, & h = 1, 2, \dots, H, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^r z_{qj}^c - z_q^c \alpha + s_q^{c-} &= 0, & q = 1, 2, \dots, Q, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^r y_{b'j}^c - y_{b'}^c \alpha + s_{b'}^{c-} &= 0, & b' = 1, 2, \dots, B, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^r y_{rj}^c - y_r^c \alpha - s_r^{c+} &= 0, & r = 1, 2, \dots, R, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 z_{pj}^a - z_p^a \alpha &= 0, & p = 1, 2, \dots, P, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{pj} - Z_p \alpha &= 0, & p = 1, 2, \dots, P, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{qj} - Z_q \alpha &= 0, & q = 1, 2, \dots, Q, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^r z_{qj}^c - z_q^c \alpha &= 0, & q = 1, 2, \dots, Q, \\ (\alpha + \frac{1}{G+P} \sum_{g=1}^G (S_g^+ / Y_{g0}^i) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{p=1}^P (S_p^+ / Z_{p0}^i) &= 1 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 &= \alpha, \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j^r = \alpha, \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j^r = \alpha \quad (j = 1, 2, \dots, n) \\ \sum_{d=1}^r w_d &= 1 \\ \lambda_j^1, \lambda_j^r, \lambda_j^r, s_i^{a-}, s_g^{a+}, s_p^{a+}, S_l^-, S_b^-, S_p^-, S_q^+, s_h^{c-}, s_{b'}^{c-}, s_q^{c-}, s_r^{c+}, w_d, \alpha &\geq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

مدل ۱۲، بیانگر رابطه‌ی محاسبه‌ی کارایی فرایند اول سیستم است. ρ_i^{1*} بیانگر نمره‌ی کارایی فرایند اول واحدهای تصمیم‌گیرنده است. اگر $\rho_i^1 = 1$ باشد، آنگاه فرایند اول واحد تصمیم‌گیرنده تحت ارزیابی کارا خواهد بود.

دسته محدودیت اول مقدار تابع هدف مدل ۱۱ را برابر مقدار بهینه‌ی نمرات کارایی کل سیستم قرار می‌دهد. همچنین دسته محدودیت مرتبط با خطی کردن

صدق می‌کند. به عبارت دیگر تابع هدف، دسته محدودیت‌های اول، دوم، سوم، دوازدهم و سیزدهم مدل به صورت رابطه‌ی ۱۸ می‌شود و سایر دسته محدودیت‌های مدل هم برابر صفر می‌شود.

$$\begin{aligned} \rho_0 &= w_1 [\alpha - \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (S_i^- / X_{i^0})] + 0 + 0 = 1 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 x_{ij}^a + s_i^- &= x_{i^0}^a \alpha \rightarrow x_{i^0}^a = x_{i^0}^a \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 y_{gj}^a - s_g^+ &= y_{g^0}^a \alpha \rightarrow y_{g^0}^a = y_{g^0}^a \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 z_{pj}^a - s_p^+ &= z_{p^0}^a \alpha \rightarrow z_{p^0}^a = z_{p^0}^a \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 z_{pj}^a - z_{p^0}^a \alpha &= 0 \rightarrow z_{p^0}^a = z_{p^0}^a \\ w_1 (\alpha + \frac{1}{G+P} \sum_{g=1}^G (S_g^+ / Y_{g^0}) + \sum_{p=1}^P (S_p^+ / Z_{p^0})) + 0 &= 1 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 &= \alpha = 1 \rightarrow \lambda_j^1 = \alpha = 1 \\ \sum_{d=1}^r w_d &= 1 \rightarrow w_1 = 1 \end{aligned} \quad (18)$$

بدیهی است بدون در نظر گرفتن ارزش مقداری ورودی‌ها، اندازه‌های میانی و خروجی‌های مطلوب و نامطلوب مدل، همواره یک جواب موجه برای مدل ۱۱ وجود خواهد داشت که آن را با مقدار $\rho_0 = 1$ نشان می‌دهیم. بنابراین مدل ۱۱ همواره شدنی است.

قضیه ۲: مدل ۱۲ همواره شدنی است.

اثبات: فرض می‌شود تمام ضرایب متغیرهای موجود در مدل ۱۲ برابر صفر است و کارایی فرایند اول، ضریب پوششی فرایند اول و وزن تخصیص یافته به فرایند اول، ضریب ثابت و کارایی کل سیستم برابر با یک $w_1 = \rho_0 = \lambda_0^1 = 1$ است.

$$\begin{aligned} \rho_0^* &= \rho_0 = \lambda_0^1 = 1 \\ \alpha &= w_1 = 1 \\ w_2 &= w_3 = 0 \\ \lambda_j^1 &= 0, \quad (j \neq 0), \\ \lambda_j^2 &= \lambda_j^3 = 0, \quad (j = 1, 2, \dots, n), \\ S_i^- &= S_g^+ = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, I), (g = 1, 2, \dots, G), \\ S_l^- &= S_b^- = 0, \quad (l = 1, 2, \dots, L), (b = 1, 2, \dots, B), \\ S_h^- &= S_r^+ = S_{b'}^- = 0, \quad (h = 1, 2, \dots, H), (r = 1, 2, \dots, R), \\ &\quad (b' = 1, 2, \dots, B'), \end{aligned} \quad (19)$$

با فرض مثبت بودن تمام ورودی‌ها، اندازه‌های میانی و خروجی‌ها، رابطه‌ی ۱۹ یک جواب موجه برای مدل ۱۲ محسوب می‌شود.

$$\begin{aligned} \rho_0^1 &= [\alpha - \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (S_i^- / X_{i^0})] = 1 \\ \rho_0^* &= w_1 [\alpha - \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (S_i^- / X_{i^0})] + 0 + 0 = 1 \end{aligned}$$

رابطه‌ی (۲-۱۵) نیز بیان‌گر دسته محدودیت مربوط به خطی کردن تابع هدف است که بر اساس خروجی‌های مطلوب فرایند اول سیستم نوشته شده است. سایر دسته محدودیت همان دسته محدودیت‌های مدل ۱۲ است که از نوشتن آن‌ها خودداری می‌شود.

$$\alpha + \frac{1}{R+Q} \sum_{r=1}^R (S_r^+ / Y_{r^0}) + \sum_{q=1}^Q (S_q^+ / Z_{q^0}) = 1 \quad (15-2)$$

۷.۳. محاسبه‌ی نمرات کارایی واحدهای موازی فرایند سوم

پس از محاسبه‌ی ضرایب متغیرهای ورودی‌ها، خروجی‌های مطلوب و نامطلوب فرایند سوم سیستم، نمرات کارایی واحدهای موازی فعال در فرایند سوم با استفاده از رابطه‌ی ۱۶ محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} \rho_j^{rc*} &= [1 - \frac{1}{Q+H+B'} \sum_{q=1}^Q (s_q^{c-*} / z_{q^c}^c) + \\ &\quad \sum_{h=1}^H (s_h^{c-*} / x_{h^c}^c) + \sum_{b=1}^{B'} (s_{b'}^{c-*} / y_{b'}^c)] \\ &\quad / [1 + \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R (s_r^{c+*} / y_{r^c}^c)] \quad (c = 1, 2, \dots, C), \\ &\quad (j = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (16)$$

۸.۳. اثبات شدنی بودن مدل‌های محاسبه‌ی کارایی فرایندها و سیستم

تطابق مدل مفهومی ارائه شده با ساختار صنعت برق توسط دو نفر از خیرگان صنعت برق با سابقه‌ی کاری بالای ده سال تأیید شده است. در نتیجه مدل ریاضی ارائه شده بر اساس ساختار موجود در واحدهای تصمیم‌گیرنده‌ی صنعت برق از روایی برخوردار است.

قضیه ۱: مدل ۱۱ همواره شدنی است.

اثبات: فرض می‌شود تمام ضرایب متغیرهای موجود در مدل ۱۱ برابر صفر است و $w_1 = \rho_0 = \lambda_0^1 = \alpha = 1$ مقدار کارایی کل سیستم، وزن فرایند اول، ضریب ثابت و ضریب پوششی فرایند اول برای واحد تحت ارزیابی برابر یک است.

$$\begin{aligned} \rho_0 &= \lambda_0^1 = 1 \\ \alpha &= w_1 = 1 \\ w_2 &= w_3 = 0 \\ \lambda_j^1 &= 0, \quad (j \neq 0), \\ \lambda_j^2 &= \lambda_j^3 = 0, \quad (j = 1, 2, \dots, n), \\ s_i^{a-} &= s_g^{a+} = s_p^{a+} = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, I), (g = 1, 2, \dots, G), \\ &\quad (p = 1, 2, \dots, P), \\ S_l^- &= S_b^- = S_p^- = S_q^+ = 0, \quad (l = 1, 2, \dots, L), (b = 1, 2, \dots, B), \\ &\quad (q = 1, 2, \dots, Q) \\ s_h^{c-} &= s_{b'}^{c-} = s_q^{c-} = s_r^{c+} = 0, \quad (h = 1, 2, \dots, H), (r = 1, 2, \dots, R), \\ &\quad (b' = 1, 2, \dots, B'), \end{aligned} \quad (17)$$

با فرض مثبت بودن تمام ورودی‌ها، اندازه‌های میانی و خروجی‌ها، رابطه‌ی ۱۷ یک جواب موجه برای مدل ۱۱ محسوب می‌شود و در تمام دسته محدودیت‌های مدل

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{pj} - Z_{p^*} \alpha + S_p^- &= 0 \rightarrow Z_{p^*} = Z_p, = \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{qj} - Z_{q^*} \alpha - S_q^+ &= 0 \rightarrow Z_{q^*} = Z_q, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{pj} - Z_{p^*} \alpha &= 0 \rightarrow Z_{p^*} = Z_p, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{qj} - Z_{q^*} \alpha &= 0 \rightarrow Z_{q^*} = Z_q, \\ \alpha + \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q (S_q^+ / Z_{q^*}) &= 1 \rightarrow \alpha = 1 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 &= \alpha = 1 \rightarrow \lambda_j^1 = \alpha = 1 \\ \sum_{d=1}^r w_d &= 1 \rightarrow w_r = 1 \end{aligned} \quad (22)$$

بدیهی است بدون در نظر گرفتن ارزش مقداری ورودی‌ها، اندازه‌های میانی و خروجی‌های مطلوب و نامطلوب مدل، همواره یک جواب موجه برای مدل ۱۴ وجود خواهد داشت که آن را با مقدار ρ^1 نشان می‌دهیم. بنابراین مدل ۱۴ همواره شدنی است. **قضیه ۴:** مدل ۱۵ همواره شدنی است. **اثبات:** فرض می‌شود تمام ضرایب متغیرهای موجود در مدل ۱۵ برابر صفر است و مقدار کارایی، ضریب پوششی فرایند سوم و ضریب ثابت برابر با $\rho^* = \rho^r = \lambda^r = W_r = \alpha = 1$ است.

$$\begin{aligned} \rho^* &= \rho^r = \lambda^r = 1 \\ \alpha &= w_r = 1 \\ w_1 &= w_r = 0 \\ \lambda_j^r &= 0, \quad (j \neq r) \\ \lambda_j^1 &= \lambda_j^r = 0, \quad (j = 1, 2, \dots, n) \\ S_i^- &= S_g^+ = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, I), (g = 1, 2, \dots, G), \\ S_l^- &= S_b^- = 0, \quad (l = 1, 2, \dots, L), (b = 1, 2, \dots, B), \\ S_h^- &= S_r^+ = S_{b'}^- = 0, \quad (h = 1, 2, \dots, H), (r = 1, 2, \dots, R), \\ &\quad (b' = 1, 2, \dots, B'), \end{aligned} \quad (23)$$

با فرض مثبت بودن تمام ورودی‌ها، اندازه‌های میانی و خروجی‌ها، رابطه‌ی ۲۳ یک جواب موجه برای مدل ۱۵ محسوب می‌شود. این رابطه در تمام دسته محدودیت‌های مدل ۱۵ صدق می‌کند.

$$\begin{aligned} \rho^r &= \alpha - \frac{1}{H + Q + B'} \\ &\quad * \sum_h^H (S_h^- / X_{h^*}) + \sum_q^Q (S_q^- / Z_{q^*}) + \sum_{l=b}^{B'} (S_{b'}^- / X_{b'^*}) = 1 \\ \rho^* &= 0 + 0 + w_r [\alpha - \frac{1}{H + Q + B'} \\ &\quad \sum_h^H (S_h^- / X_{h^*}) + \sum_q^Q (S_q^- / Z_{q^*}) + \sum_{l=b}^{B'} (S_{b'}^- / X_{b'^*})] = 1 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 x_{hj}^c - x_{h^*}^c \alpha + s_h^- &= 0 \rightarrow x_{h^*}^c = x_h^c = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 x_{ij}^a + s_i^- &= x_i^a \alpha \rightarrow x_i^a = x_i^a, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 y_{gj}^a - s_g^+ &= y_g^a \alpha \rightarrow y_g^a = y_g^a, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 z_{pj}^a - s_p^+ &= z_p^a \alpha \rightarrow z_p^a = z_p^a, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 z_{pj}^a - z_p^a \alpha &= 0 \rightarrow z_p^a = z_p^a, \\ w_1 (\alpha + \frac{1}{G + P} \sum_{g=1}^G (S_g^+ / Y_{g^*}) + \sum_{p=1}^P (S_p^+ / Z_{p^*})) &+ 0 = 1 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 &= \alpha = 1 \rightarrow \lambda_j^1 = \alpha = 1 \\ \sum_{d=1}^r w_d &= 1 \rightarrow w_1 = 1 \end{aligned} \quad (20)$$

با توجه به روابط ۱۹ و ۲۰ و بدون در نظر گرفتن ارزش مقداری ورودی‌ها، اندازه‌های میانی و خروجی‌های مطلوب و نامطلوب مدل، همواره یک جواب موجه برای مدل ۱۴ وجود خواهد داشت که آن را با مقدار ρ^1 نشان می‌دهیم. بنابراین مدل ۱۴ همواره شدنی است. **قضیه ۳:** مدل ۱۴ همواره شدنی است. **اثبات:** فرض می‌شود تمام ضرایب متغیرهای موجود در مدل ۱۴ برابر صفر است و مقدار کارایی کل و فرایند دوم، ضریب پوششی فرایند دوم و وزن تخصیص یافته به فرایند اول برابر با $\rho^* = \rho^1 = \lambda^1 = W_r = \alpha = 1$ است.

$$\begin{aligned} \rho^* &= \rho^1 = \lambda^1 = 1 \\ \alpha &= w_r = 1 \\ w_1 &= w_r = 0 \\ \lambda_j^1 &= 0, \quad (j \neq 1), \\ \lambda_j^1 &= \lambda_j^r = 1, \quad (j = 1, 2, \dots, n), \\ S_i^- &= S_g^+ = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, I), (g = 1, 2, \dots, G), \\ S_l^- &= S_b^- = 0, \quad (l = 1, 2, \dots, L), (b = 1, 2, \dots, B), \\ S_h^- &= S_r^+ = S_{b'}^- = 0, \quad (h = 1, 2, \dots, H), (r = 1, 2, \dots, R), \\ &\quad (b' = 1, 2, \dots, B), \end{aligned} \quad (21)$$

با فرض مثبت بودن تمام ورودی‌ها، اندازه‌های میانی و خروجی‌ها، رابطه‌ی ۲۱ یک جواب موجه برای مدل ۱۴ محسوب می‌شود.

$$\begin{aligned} \rho^1 &= \alpha - \frac{1}{L + P + B} \sum_{l=1}^L (S_l^- / X_{l^*}) \\ &\quad + \sum_{p=1}^P (S_p^- / Z_{p^*}) + \sum_{b=1}^B (S_b^- / X_{b^*}) = \alpha = 1 \\ \rho^* &= 0 + w_r [\alpha - \frac{1}{L + P + B} \sum_{l=1}^L (S_l^- / X_{l^*}) \\ &\quad + \sum_{p=1}^P (S_p^- / Z_{p^*}) + \sum_{b=1}^B (S_b^- / X_{b^*})] + 0 = 1 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 X_{lj} - X_{l^*} \alpha + S_l^- &= 0 \rightarrow X_{l^*} = X_l, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Y_{bj} - Y_{b^*} \alpha + S_b^- &= 0 \rightarrow Y_{b^*} = Y_b, \end{aligned}$$

جدول ۲. ورودی‌ها و خروجی‌های مراحل تولید و انتقال برق.

فرایند	ورودی‌ها	اندازه‌های میانی	
		مطلوب	خروجی‌های نامطلوب
تولید	مصارف داخلی نیروگاه‌ها	قدرت نامی نیروگاه‌ها	-
انتقال	طول خطوط انتقال و فوق توزیع	انرژی تحویلی	تلفات انرژی
توزیع	ظرفیت ترانسفورماتورها	-	تلفات انرژی انرژی تحویلی

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق از گزارش‌های سالانه‌ی فرایندهای تولید، انتقال و توزیع استخراج شده است. گزارش‌های سالانه‌ی منتشر شده توسط وزارت نیرو در سایت توانیر در دسترس است.

تعداد واحدهای موازی در فرایندهای تولید، انتقال و توزیع به ترتیب برابر با ۱۲، ۱ و ۴ است.

نهایتاً با استفاده از مدل‌های ۱۲۷، ۱۴ و ۱۵ نمرات کارایی کل، کارایی فرایند اول، دوم و سوم با استفاده از نرم‌افزار GAMS محاسبه و نتایج آن در جدول ۳ خلاصه شده است. همچنین نمرات کارایی واحدهای موازی موجود در فرایندهای تولید و توزیع نیز با استفاده از روابط ۱۳ و ۱۶ محاسبه و در جدول ۴ خلاصه شده است.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، الگویی برای ارزیابی عملکرد زنجیره‌ی تأمین با ساختاری مرکب از فرایندهای متوالی و موازی ارائه شده است. مدل ارائه شده در ارزیابی نمرات کارایی زنجیره‌ی تأمین صنعت برق ایران مورد استفاده قرار گرفته است.

در الگوی پیشنهادی از ویژگی‌های خاص زنجیره‌ی تأمین صنعت برق ایران از سه فرایند متوالی استفاده شده است. زنجیره‌ی تأمین صنعت برق ایران از سه فرایند متوالی تولید، انتقال و توزیع برق تشکیل شده است. واحدهای تصمیم‌گیرنده‌ی زنجیره‌ی تأمین صنعت برق با توجه به وجود ۱۶ شرکت برق منطقه‌ی ۱۶ ناحیه‌ی تولید، انتقال و توزیع در نظر گرفته شده است. در حالی که تولید و توزیع برق در نتیجه‌ی فعالیت انواع مختلفی از واحدهای نیروگاهی و شرکت‌های توزیع برق حاصل می‌شود که به صورت مستقل و با ساختار موازی در کنار یکدیگر فعال‌اند.

فلسفه‌ی به وجود آمدن مدل‌های شبکه‌ی تحلیل پوششی داده‌ها، نادیده گرفتن مراحل و فرایندهای داخلی در درون DMUهاست. در واقع مدل‌های مرسوم DEA، هر شرکت یک DMU در نظر گرفته می‌شود و محاسبات به ورودی‌های اولیه و خروجی‌های نهایی محدود می‌شود.

با توجه به نتایج پژوهش حاضر و مقایسه‌ی کارایی کل و فرایندهای سه‌گانه‌ی واحدهای تحت ارزیابی، می‌توان منشأ ناکارایی هر یک از مناطق شانزده‌گانه را تعیین

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^r y_{bj}^c - y_{b_0}^c \alpha + s_{b_0}^{-c} = 0 \rightarrow y_{b_0}^c - y_{b_0}^c = 0$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^r z_{qj}^c - z_{q_0}^c \alpha = 0 \rightarrow z_{q_0}^c - z_{q_0}^c = 0$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^r y_{rj}^c - y_{r_0}^c \alpha - s_{r_0}^{+c} = 0 \rightarrow y_{r_0}^c - y_{r_0}^c = 0$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^r z_{qj}^c - z_{q_0}^c \alpha = 0 \rightarrow z_{q_0}^c - z_{q_0}^c = 0$$

$$\alpha + \frac{1}{R+Q} \sum_{r=1}^R (S_r^+ / Y_{r_0}^c) + \sum_{q=1}^Q (S_q^+ / Z_{q_0}^c) = \alpha = 1$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^r = \alpha = 1 \rightarrow \lambda_0^r = \alpha = 1$$

$$\sum_{d=1}^r w_d = 1 \rightarrow w_r = 1 \quad (24)$$

بدیهی است بدون در نظر گرفتن ارزش مقداری ورودی‌ها، اندازه‌های میانی و خروجی‌های مطلوب و نامطلوب مدل، همواره یک جواب موجه برای مدل ۱۵ وجود خواهد داشت که آن را با مقدار ρ^2 نشان می‌دهیم. بنابراین مدل ۱۵ همواره شدنی است.

۴. یافته‌های تحقیق

در این مطالعه به بررسی عملکرد فرایندهای سه‌گانه تولید، انتقال و توزیع در صنعت برق ایران پرداخته می‌شود. در مرحله‌ی تولید انواع نیروگاه‌های بخاری، گازی، چرخه‌ی ترکیبی، برق‌آبی، اتمی و دیزلی و برق بادی و انرژی‌های نو با فرایندهای مختلف تولیدی فعالیت دارند. از بین نیروگاه‌های فعال در صنعت برق، سه نوع نیروگاه بخاری، گازی و چرخه‌ی ترکیبی معادل ۹۳/۹ درصد از تولید کل کشور در سال ۱۳۹۴ را به خود اختصاص داده‌اند. تعداد کل این واحدهای نیروگاهی در دو بخش دولتی و خصوصی برابر با ۸۷ نیروگاه است. در بخش انتقال برق در سطح کشور ۱۶ واحد به عنوان شرکت‌های برق منطقه‌ی مشغول فعالیت هستند که از یک طرف با واحدهای نیروگاهی در ارتباط‌اند و از طرف دیگر با شرکت‌های توزیع در ارتباط هستند و به عنوان واسطه انرژی تولیدی در بخش نیروگاهی را به بخش توزیع برق منتقل می‌کنند. در بخش توزیع ۳۹ شرکت در واحدهای مختلف و در قالب شرکت‌های توزیع برق مشغول فعالیت هستند.

بنابراین در این مطالعه با توجه به تعداد شرکت‌های برق منطقه‌ی ۱۶ نواحی شانزده‌گانه تولید، انتقال و توزیع برق به عنوان واحدهای تصمیم‌گیرنده در نظر گرفته می‌شود. هر یک از این واحدها، سیستمی با فرایندهای سه‌گانه‌ی تولید، انتقال و توزیع هستند که در فرایند تولید، واحدهای نیروگاهی و در فرایند توزیع برق، شرکت‌های توزیع برق با ساختاری موازی قرار دارند.

برای ارزیابی کارایی به متغیرهایی نیاز است که بتوانند نتیجه‌ی درستی از عملکرد واحدهای تصمیم‌گیرنده ارائه دهند. در حقیقت، انتخاب متغیرهای ورودی و خروجی یکی از مهم‌ترین گام‌ها در ارزیابی کارایی نیروگاه‌ها، شرکت‌های برق منطقه‌ی و شرکت‌های توزیع به روش تحلیل پوششی داده‌هاست. در این مطالعه با استفاده از متغیرهای مورد استفاده در مطالعات قبلی ارزیابی کارایی شرکت‌های فعال در بخش‌های مختلف صنعت برق، امکان دسترسی به داده‌ها و استفاده از نظرات متخصصان و کارشناسان ارشد صنعت برق، متغیرهای ورودی و خروجی فرایندهای سه‌گانه در قالب جدول ۲ انتخاب شده است.

جدول ۳. نمرات کارایی کل و فرایندهای سه‌گانه.

کارایی فرایند سوم	کارایی فرایند دوم	کارایی فرایند اول	کارایی کل	واحدهای تصمیم‌گیرنده
۰٫۹۸۳	۰٫۹۸۵	۱٫۰۰۰	۰٫۹۸۹	آذربایجان
۰٫۹۹۰	۰٫۹۸۱	۰٫۹۲۷	۰٫۹۶۹	اصفهان
۰٫۹۸۶	۰٫۹۷۹	۰٫۹۱۲	۰٫۹۵۹	باختر
۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	تهران
۰٫۹۸۰	۰٫۹۸۴	۰٫۹۷۱	۰٫۹۷۸	خراسان
۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۰٫۹۳۹	۰٫۹۷۹	خوزستان
۰٫۹۸۹	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۰٫۹۹۶	زنجان
۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	سمنان
۰٫۹۹۷	۰٫۹۸۵	۰٫۹۸۸	۰٫۹۹۰	سیستان و بلوچستان
۰٫۹۷۶	۰٫۹۸۴	۰٫۹۶۱	۰٫۹۴۷	غرب
۰٫۹۸۶	۰٫۹۷۴	۱٫۰۰۰	۰٫۹۸۷	فارس
۰٫۹۹۰	۰٫۹۷۸	۰٫۹۹۰	۰٫۹۸۸	کرمان
۰٫۹۹۵	۰٫۹۹۷	۰٫۹۷۲	۰٫۹۸۷	گیلان
۰٫۹۷۵	۰٫۹۹۲	۰٫۹۸۰	۰٫۹۸۲	مازندران
۰٫۹۹۷	۰٫۹۸۷	۰٫۹۵۴	۰٫۹۷۹	هرمزگان
۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۰٫۹۹۸	۰٫۹۹۹	یزد

جدول ۴. نمرات کارایی نیروگاه‌ها و شرکت‌های توزیع برق.

نمرات کارایی	نام شرکت توزیع	نمرات کارایی	نام نیروگاه	نمرات کارایی	نام نیروگاه
۱٫۰۰۶۲	A1.s1	۰٫۹۹۹۱	A7.d45	۰٫۹۹۹۸	A1.d1
۱٫۰۰۵۶	A1.s2	۰٫۹۹۹۹	A8.d46	۰٫۹۹۹۸	A1.d2
۱٫۰۰۴۷	A1.s3	۱٫۰۰۰۰	A9.d47	۰٫۹۹۷۰	A1.d3
۱٫۰۰۴۰	A1.s4	۰٫۹۹۹۳	A9.d48	۰٫۹۹۹۸	A1.d4
۱٫۰۰۳۷	A2.s5	۰٫۹۹۹۷	A9.d49	۰٫۹۹۵۸	A1.d5
۱٫۰۰۲۰	A2.s6	۰٫۹۹۹۹	A9.d50	۰٫۹۹۹۸	A1.d6
۱٫۰۰۲۶	A2.s7	۰٫۹۹۹۹	A9.d51	۰٫۹۹۹۵	A1.d7
۱٫۰۰۰۰	A3.s8	۰٫۹۹۸۶	A10.d52	۰٫۹۹۶۳	A1.d8
۱٫۰۰۰۰	A3.s9	۰٫۹۸۶۸	A10.d53	۰٫۹۹۹۴	A2.d9
۱٫۰۰۰۰	A3.s10	۰٫۹۹۸۵	A10.d54	۰٫۸۰۹۵	A2.d10
۱٫۰۰۰۰	A4.s11	۰٫۹۹۹۰	A10.d55	۰٫۹۹۹۷	A2.d11
۱٫۰۰۴۹	A4.s12	۰٫۹۹۷۸	A11.d56	۰٫۹۹۸۳	A2.d12
۱٫۰۰۶۰	A4.s13	۰٫۹۹۸۶	A11.d57	۰٫۹۹۹۴	A2.d13
۱٫۰۰۸۲	A4.s14	۰٫۹۹۳۹	A11.d58	۰٫۹۹۹۰	0A2.d14
۱٫۰۰۴۴	A5.s15	۰٫۹۹۹۸	A11.d59	۱٫۰۰۰۰	A3.d15
۱٫۰۰۰۰	A5.s16	۰٫۹۹۹۸	A11.d60	۱٫۰۰۰۰	A3.d16
۱٫۰۰۰۰	A5.s17	۰٫۹۹۹۸	A11.d61	۰٫۹۹۸۶	A3.d17
۱٫۰۰۰۰	A5.s18	۰٫۹۹۹۶	A11.d62	۱٫۰۰۰۰	A4.d18
۱٫۰۰۴۴	A6.s19	۰٫۹۹۹۹	A11.d63	۰٫۹۹۹۹	A4.d19
۱٫۰۰۲۷	A6.s20	۰٫۹۹۹۸	A11.d64	۱٫۰۰۰۰	A4.d20
۱٫۰۰۰۰	A6.s21	۰٫۹۹۲۰	A12.d65	۰٫۹۹۹۹	A4.d21
۱٫۰۰۰۳	A7.s22	۰٫۹۹۹۷	A12.d66	۱٫۰۰۰۰	A4.d22
۱٫۰۰۲۹	A7.s23	۰٫۹۹۸۴	A12.d67	۱٫۰۰۰۰	A4.d23
۱٫۰۰۰۰	A8.s24	۰٫۹۹۱۹	A12.d68	۰٫۹۹۹۹	A4.d24

ادامه‌ی جدول ۴.

نام نیروگاه	نمرات کارایی	نام نیروگاه	نمرات کارایی	نام شرکت توزیع	نمرات کارایی
A۴.d۲۵	۱,۰۰۰۰	A۱۳.d۶۹	۱,۰۰۰۰	A۹.s۲۵	۱,۰۰۰۰۴
A۴.d۲۶	۱,۰۰۰۰	A۱۳.d۷۰	۰,۹۹۹۹	A۱۰.s۲۶	۱,۰۰۰۴۵
A۴.d۲۷	۱,۰۰۰۰	A۱۳.d۷۱	۱,۰۰۰۰	A۱۰.s۲۷	۱,۰۰۰۵۲
A۴.d۲۸	۱,۰۰۰۰	A۱۳.d۷۲	۱,۰۰۰۰	A۱۰.s۲۸	۱,۰۰۰۳۹
A۵.d۲۹	۰,۹۸۶۹	A۱۴.d۷۳	۱,۰۰۰۰	A۱۱.s۲۹	۱,۰۰۰۲۷
A۵.d۳۰	۰,۹۸۸۵	A۱۴.d۷۴	۱,۰۰۰۰	A۱۱.s۳۰	۱,۰۰۰۲۲
A۵.d۳۱	۰,۹۹۹۰	A۱۴.d۷۵	۰,۹۹۹۹	A۱۱.s۳۱	۱,۰۰۰۴۴
A۵.d۳۲	۰,۹۹۹۰	A۱۴.d۷۶	۰,۹۹۹۳	A۱۲.s۳۲	۱,۰۰۰۲۳
A۵.d۳۳	۰,۹۹۸۴	A۱۵.d۷۷	۰,۹۹۹۶	A۱۲.s۳۳	۱,۰۰۰۱۹
A۵.d۳۴	۰,۹۹۳۰	A۱۵.d۷۸	۰,۹۹۰۶	A۱۳.s۳۴	۱,۰۰۰۰۰
A۵.d۳۵	۰,۹۹۳۴	A۱۵.d۷۹	۰,۹۹۹۵	A۱۴.s۳۵	۱,۰۰۰۴۳
A۵.d۳۶	۰,۹۹۵۰	A۱۶.d۸۰	۰,۹۹۹۷	A۱۴.s۳۶	۱,۰۰۰۳۵
A۵.d۳۷	۰,۹۹۸۹	A۱۶.d۸۱	۰,۹۹۷۶	A۱۴.s۳۷	۱,۰۰۰۵۲
A۵.d۳۸	۰,۹۷۰۸	A۱۶.d۸۲	۰,۹۹۹۸	A۱۵.s۳۸	۱,۰۰۰۰۰
A۵.d۳۹	۰,۹۹۷۳	A۱۶.d۸۳	۰,۹۹۷۲	A۱۶.s۳۹	۱,۰۰۰۰۰
A۵.d۴۰	۰,۹۹۹۱	A۱۶.d۸۴	۰,۹۹۹۴		
A۶.d۴۱	۰,۹۹۹۹	A۱۶.d۸۵	۰,۹۹۱۲		
A۶.d۴۲	۰,۹۹۹۸	A۱۶.d۸۶	۰,۹۹۹۷		
A۶.d۴۳	۰,۹۹۹۶	A۱۶.d۸۷	۰,۹۹۹۷		
A۶.d۴۴	۰,۹۹۹۸				

محسوب می‌شود. در حالی که فرایند تولید ناحیه‌ی یزد کارا نیست و نمره‌ی کارایی برابر ۹۸ درصد دارد؛ بنابراین ناکارایی کل ناحیه‌ی یزد را می‌توان به ناکارا بودن فرایند تولید نسبت داد.

در زمینه‌ی مدل‌های پیشنهادی با توجه به شرایط خاص زنجیره‌ی تأمین صنعت برق و با توجه به انواع ورودی‌ها، اندازه‌های میانی، خروجی‌های مطلوب و نامطلوب ارائه شده است و در صورت تغییر هر یک انواع فرایندها و داده‌ها مدل ارائه شده باید مجدداً بازنویسی شود. همچنین در صورت وجود تغییر ماهیت ورودی‌ها و اندازه‌های میانی از مطلوب به نامطلوب نیز مدل مجدداً باید بازنویسی و از نو نوشته شود. در پیشینه‌ی تحلیل پوششی داده‌ها روش‌های متفاوتی برای الگویابی برای بهبود کارایی واحدهای تصمیم‌گیرنده وجود دارد. در این تحقیق مدل‌های ریاضی‌ای برای تعیین واحدهای تصمیم‌گیرنده‌ی ناکارا و شناسایی منشأ ناکارایی آن‌ها ارائه شده است. ارائه‌ی روش‌های الگویابی برای سیستم با ساختار شبکه‌ی متوالی - موازی با هدف بهبود ناکارایی کل، فرایندهای سه‌گانه و واحدهای موازی فعال در فرایندهای اول و سوم به عنوان موضوعی برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود.

کرد. در این راستا می‌توان پیشنهادهای کاربردی زیر را با توجه به نتایج حاصل از تحقیق ارائه کرد.

به عنوان نمونه ناحیه‌ی آذربایجان دارای نمره‌ی کارایی کل و فرایندهای سه‌گانه‌ی تولید، انتقال و توزیع به ترتیب برابر با ۰,۹۸۹، ۱,۰۰۰، ۰,۹۸۵ و ۰,۹۸۳ است. بنابراین با توجه به نمره‌ی کارایی ۱۰۰ درصدی فرایند تولید، می‌توان ناکارایی ۲ درصدی کارایی کل این ناحیه را به ناکارایی شرکت برق منطقه‌ی و شرکت توزیع آذربایجان نسبت داد.

ناحیه‌ی زنجان دارای کارایی برابر ۹۹ درصد است. درباره‌ی ناحیه زنجان نیز با توجه به نمره‌ی کارایی ۱۰۰ درصد فرایند تولید و انتقال این ناحیه می‌توان به شرکت توزیع برق ناحیه‌ی زنجان نسبت داد؛ بنابراین با هدف بهبود کارایی ناحیه‌ی زنجان می‌توان به ارائه‌ی راهکارهایی برای بهبود وضعیت بخش توزیع برق ناحیه‌ی زنجان پرداخت.

بخش‌های انتقال و توزیع برق در ناحیه‌ی یزد دارای نمره‌ی کارایی برابر یک هستند. اما کارایی کل این ناحیه ۹۹ درصد بوده است و جزء واحدهای تصمیم‌گیرنده‌ی ناکارا

پانویس‌ها

1. decision making using (DMUs)
2. network data envelopment analysis (NDEA)

3. interactive robust data envelopment analysis (IRDEA)
4. step method (STEM)
5. stochastic frontier analysis (SFA)
6. stochastic nonparametric envelopment of data (StoNED)
7. DEA/SCSC (strong complementary slackness condition)

8. simple additive weighting (SAW)
9. slack based measure (SBM)

(References) منابع

1. Hugos, M., *Essentials of Supply Chain Management*, Second Edition, WILEY (2006).
2. Christofer, M., *Logistics and Supply Chain Management*, Fourth Edition, Prentice hall (2011).
3. Chandra, C. and Grabis, J., *Supply Chain Configuration Concepts: Solutions and Applications*, springer, part I (2007).
4. Yuzhi, Sh. and Zhangna. "Study of the input-output overall performance evaluation of electricity distribution based on DEA method", *Energy Procedia*, **16**, pp. 1517-25 (2012).
5. Khodabakhshi, M. "An output oriented super-efficiency measure in stochastic data envelopment analysis: considering iranian electricity distribution companies", *Computers & Industrial Engineering*, **58**, pp. 663-71 (2010).
6. Sadjadi, S.J., Omrani, H., Makui, A. and et al. "An interactive robust data envelopment analysis model for determining alternative targets in Iranian electricity distribution companies", *Expert Systems With Applications*, **38**, pp. 9830-39 (2011).
7. Kuosmanen, T. "Stochastic semi-nonparametric frontier estimation of electricity distribution networks: application of the StoNED method in the finnish regulatory model", *Energy Economics*, **34**, pp. 2189-99 (2012).
8. Sueyoshi, T. and Goto, M. "Efficiency-based rank assessment for electric power industry: a combined use of data envelopment analysis (DEA) and DEA-discriminant analysis (DA)", *Energy Economics*, **34**, pp. 634-44 (2012).
9. Barros, J. "Performance measurement of thermoelectric generating plants with undesirable outputs and random parameters", *Electrical Power and Energy Systems*, **46**, pp. 228-233 (2013).
10. Shakouri, G.H., Nabae, M. and Aliakbarisani, S. "A quantitative discussion on the assessment of power supply technologies: DEA (data envelopment analysis) and SAW (simple additive weighting) as complementary methods for the "Grammar"", *Energy*, **64**, pp 640-647 (2014).
11. Du, J., Chen, Y. and Huo, J. "DEA for non-homogenous parallel networks", *Omega*, **56**, pp. 122-132 (2015).
12. Omrani, H., Gharizadeh Beiragh, R. and Shafiei Kaleibari, S. "Performance assessment of Iranian electricity distribution companies by an integrated cooperative game data envelopment analysis principal component analysis approach", *Electrical Power and Energy Systems*, **64**, pp. 617-625 (2015).
13. Khalili-Damghani, K. and Shahmir, Z. "uncertain network data envelopment analysis with undesirable outputs to evaluate the efficiency of electricity power production and distribution processes", *Computers and Industrial Engineering*, **48**(3), pp. 131-150 (2015).
14. Gouveia, M. C., Dias, L.C., Antunes, C.H. and et al. "Benchmarking of maintenance and outage repair in an electricity distribution company using the Value-Based DEA method", *Omega*, **53**, pp. 104-114 (2015).
15. Charnes, A., Cooper, W.W. and Rhodes, E. "Measuring the efficiency of decision making units", *European Journal of Operational Research*, **2**, pp. 429-444 (1978).
16. Charnes, A., Cooper, W. W., Golany, B. and et al. "Two-phase data envelopment analysis approaches to policy evaluation and management of army recruiting activities: tradeoffs between joint services and army advertising", Research Report CCS #532, Center for Cybernetic Studies, University of Texas-Austin, Austin, TX (1986).
17. Färe, R. and Grosskopf, S. "Network DEA", *Socio-Economic Planning Sciences*, **34**, pp. 35-49 (2000).
18. Färe, R. "Measuring farrell efficiency for a firm with intermediate inputs", *Academia Economic*, **19**, pp. 329-40 (1991).
19. Färe, R. and Grosskopf, S. "Productivity and intermediate products: a frontier approach", *Econ Left*, **50**(1), pp. 65-70 (1996).
20. Kao, C. and Hwang, S. N. "Efficiency decomposition in two-stage data envelopment analysis: an application to non-life insurance companies in taiwan", *European Journal of Operational Research*, **185**, pp. 418-429 (2008).
21. Liang, L., Cook, W.D. and Zhu, J. "DEA models for two-stage processes: game approach and efficiency decomposition", *Naval Res Logistics (NRL)*, **55**(7), pp. 643-53 (2008).
22. Chen, Y., Cook, W.D., Li, N. and et al. "Additive efficiency decomposition in two-stage DEA", *European Journal of Operational Research*, **196**(3), pp. 1170-1176 (2009).
23. Cook, W.D., Zhu, J., Bi, G. and et al. "Network DEA: additive efficiency decomposition", *European Journal of Operational Research*, **207**, pp. 1122- 1129 (2010a).
24. Zhou, Z., Sun, L., Yang, W. and et al. "A bargaining game model for efficiency decomposition in the centralized model of two-stage systems", *Computers & Industrial Engineering*, **64** (1), pp. 103-8 (2013).
25. Azadeh, A., Motevali Haghghi, S., Zarrin, M. and et al. "Performance evaluation of Iranian electricity distribution units by using stochastic data envelopment analysis", *Electrical Power and Energy Systems*, (73), pp. 919-931 (2015).
26. Du, J.A., Liang, L.A., Chen, Y. and et al. "A bargaining game model for measuring performance of two-stage network structures", *European Journal of Operational Research*, **210**(2), pp. 390-397 (2011).
27. Kwon, H.B. and Lee, J. "Two-stage production modeling of large U.S. banks: a DEA-neural network approach", *Expert Systems with Applications*, **42**(19), pp. 6758-6766 (2015).
28. Despotis, D., Koronakos, K., Sotiros, G. and et al. "The "weak-link" approach to network DEA for two-stage processes", *European Journal of Operational Research*, **254**(2), pp. 481-492 (2016a).

29. Despotis, D., Koronakos, K.G. and Sotiros, D. "A network DEA approach for series multi-stage processes", *Omega*, **61**, pp. 35-48 (2016b).
30. Guo, C., Abbasi Shureshjani, R., Foroughi, A.A. and et al. "Decomposition weights and overall efficiency in two-stage additive network DEA", *European Journal of Operational Research*, **257**(3), pp. 896-906 (2016).
31. Ang, S. and Chen. "Pitfalls of decomposition weights in the additive multi-stage DEA model", *European Journal of Operational Research*, **204**(3), **58**, pp. 721-729 (2016).
32. Chen, C. C. "Measuring departmental and overall regional performance: applying the multi-activity DEA model to Taiwan's cities/ counties", *Omega*, **67**, pp. 60-80 (2017).
33. Seiford, L.M. and Zhu, J. "Modeling undesirable factors in efficiency evaluation", *European Journal of Operational Research*, **142**(1), pp. 16-20 (2002).
34. Kordrostami, S. and Amirteimoori, A. "Un-desirable factors in multi-component performance measurement", *Applied Mathematics and Computation*, **171**(2), pp. 721-9 (2005).
35. Wang, K., Huang, W., Wu, J. and et al. "Efficiency measures of the Chinese commercial banking system using an additive two-stage DEA", *Omega*, **44**(0), pp. 5-20 (2014).
36. Wu, J., Yin, P., Sun, J. and et al. "Evaluating the environmental efficiency of a two-stage system with undesired outputs by a DEA approach: an interest preference perspective", *European Journal of Operational Research*, **254**(3), pp. 1047-1062 (2016a).
37. Chen, Y. and Zhu, J. "Measuring information technology's indirect impact on firm performance", *Information Technology and Management*, **5**(1), pp. 9-22 (2004).
38. Tone, K. and Tsutsui, M. "Network DEA: a slack-based measure approach", *European Journal of Operational Research*, **197**(1), pp. 243-52 (2009).
39. Cook, D.W., Liang, L. and Zhu, J. "Measuring performance of two-stage network structures by DEA: A review and future perspective", *Omega*, **38**(6), pp. 423-430 (2010b).
40. Fukuyama, H. and Weber, W.L. "A slacks-based inefficiency measure for a two-stage system with bad outputs", *Omega*, **38**(5), pp. 398-409 (2010).
41. Chen, C. and Yan, H. "Network DEA model for supply chain performance evaluation", *European Journal of Operational Research*, **213**, pp. 147-55 (2011).
42. Chen, P.C., Chang, C.C., Yu, M.M. and et al. "Performance measurement for incineration plants using multi-activity network data envelopment analysis: the case of Taiwan", *Journal of Environmental Management*, **93**(1), pp. 95-103 (2012).
43. Lozano, S., Gutierrez, E. and Moreno, P. "Network DEA approach to airports performance assessment considering undesirable outputs", *Applied Mathematical Modelling*, **37**(4), pp. 1665-1676 (2013).
44. Maghbouli, M., Amirteimoori, A. and Kordrostami, S. "Two-stage network structures with undesirable outputs: a DEA based approach", *Measurement*, **48**(0), pp. 109-118 (2014).
45. Kao, C. "Efficiency decomposition in network data envelopment analysis: a relational model", *European Journal of Operational Research*, **192**(3), pp. 949-962 (2009a).
46. Kao, C. "Efficiency measurement for parallel production systems", *European, Journal of Operational Research*, **196**, pp. 1107-1112 (2009b).