



Designing an algorithm based on network data envelopment analysis with desirable and undesirable indicators for the evaluation of the Iranian power industry

Mostafa Radsar

Ph.D. Candidate of Operations Research, Department of Industrial Management, Kish International Campus, University of Tehran, Kish, Iran. E-mail: mostafa.radsar@ut.ac.ir

Aliyeh Kazemi*

*Corresponding Author, Associate Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Management, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: aliyehkazemi@ut.ac.ir

Mohammadreza Mehregan

Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Management, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: Mehregan@ut.ac.ir

Seyed Hossein Razavi Hajiagha

Assistant Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Management, Khatam University, Tehran, Iran. E-mail: h.razavi@khatam.ac.ir

Abstract

Objective: Energy saving regarding its high share in energy consumption of industries has a significant impact on the growth and development of countries. This study aims to evaluate the performance of Iran's electricity generation, transmission, and distribution processes.

Methods: By using a network data envelopment analysis (DEA) model, the overall efficiency scores, and efficiency scores of production, transmission, and distribution processes are calculated. The network structure considers the main and surplus inputs (fuel consumption costs, internal consumption, transmission substation capacity, power transmission lines length, transformers capacity, low and medium voltage network length), intermediate sizes (net power generation, gross power generation, and delivered energy), desirable (nominal power, actual power, and delivered energy) and undesirable outputs (environmental pollutants, and energy losses).

Results: An algorithm based on a multi-objective programming model is presented to evaluate network performance and simultaneously to evaluate processes efficiency. The proposed algorithm is used to evaluate 16 electricity areas in Iran.

Conclusion: The results showed that Tehran, Khorasan, Khuzestan, and Zanjan are the most efficient areas.

Keywords: Performance evaluation, Power industry, Network DEA, Production, transmission and distribution processes.

Citation: Radsar, Mostafa; Kazemi, Aliyeh; Mehregan, Mohammadreza & Razavi Hajiagha, Seyed Hossein (2021). Designing an algorithm based on network data envelopment analysis with desirable and undesirable indicators for the evaluation of the Iranian power industry. *Industrial Management Journal*, 13(1), 1-26. (in Persian)

طراحی یک الگوریتم بر پایه تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای با شاخص‌های خوب و بد به منظور ارزیابی صنعت برق ایران

مصطفی رادسر

دانشجوی دکتری تحقیق در عملیات، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت (پردیس کیش)، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mostafa.radsar@ut.ac.ir

عالیه کاظمی*

* نویسنده مسئول، دانشیار گروه مدیریت صنعتی، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: aliyehkazemi@ut.ac.ir

محمدرضا مهرگان

استاد گروه مدیریت صنعتی، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mehregan@ut.ac.ir

سیدحسین رضوی حاجی‌آقا

استادیار گروه مدیریت، گروه مدیریت، دانشکده مدیریت و مالی، دانشگاه خاتم، تهران، ایران. رایانامه: h.razavi@khatam.ac.ir

چکیده

هدف: اهمیت دادن به بحث صرفه‌جویی انرژی با توجه به سهم بالای مصرف انرژی در صنایع، تأثیر به سزایی در رشد و پیشرفت کشورها دارد. هدف از این پژوهش، ارزیابی عملکرد فرایندهای تولید، انتقال و توزیع نواحی برق ایران است.

روش: با بکارگیری مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای نمرات کارایی کل و نمرات فرایندهای تولید، انتقال و توزیع برق محاسبه شده است. در ساختار شبکه‌ای، داده‌های اصلی و داده‌های مازاد (هزینه سوخت مصرفی، مصرف داخلی، ظرفیت پست‌های انتقال، طول خطوط انتقال برق، ظرفیت ترانسفورماتورها و طول شبکه فشار ضعیف و متوسط)، اندازه‌های میانی (تولید ویژه، تولید ناویژه و انرژی تحویلی)، ستادهای خوب (قدرت نامی، قدرت عملی و انرژی تحویلی) و ستادهای بد (گازهای آلاینده زیست محیطی و تلفات انرژی) در نظر گرفته شده است.

یافته‌ها: الگوریتمی بر پایه برنامه‌ریزی چندهدفه برای ارزیابی کارایی شبکه و به طور همزمان ارزیابی کارایی فرایندها ارائه شده است. با بکارگیری الگوریتم ارائه شده نواحی ۱۶ گانه صنعت برق ایران ارزیابی شده‌اند.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد نواحی برق تهران، خراسان، خوزستان و زنجان بیشترین کارایی را دارند.

کلیدواژه‌ها: ارزیابی عملکرد، صنعت برق، تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای، فرایندهای تولید، انتقال و توزیع.

استناد: رادسر، مصطفی؛ کاظمی، عالیه؛ مهرگان، محمدرضا؛ رضوی حاجی‌آقا، سیدحسین (۱۴۰۰). طراحی یک الگوریتم بر پایه تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای با شاخص‌های خوب و بد به منظور ارزیابی صنعت برق ایران. مدیریت صنعتی، ۱۳(۱)، ۱-۲۶.

مدیریت صنعتی، ۱۴۰۰، دوره ۱۳، شماره ۱، صص. ۱-۲۶

DOI: 10.22059/imj.2021.298553.1007721

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۰۸، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۹

© دانشکده مدیریت دانشگاه تهران

مقدمه

میزان مصرف انرژی یکی از شاخص‌های مهم و مستقیم برای ارزیابی توسعه کشورها است. افزایش قیمت انرژی، بحران اتمام منابع تجدیدناپذیر انرژی مانند سوخت‌های فسیلی، افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی، افزایش گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر، گرم شدن کره زمین و تغییر آب‌وهوای مرتبط با آن و به کارگیری وسیع انسان از سوخت‌های فسیلی و آلودگی‌های ناشی از آن مواردی است که توجه به منابع انرژی را اجتناب‌ناپذیر می‌کند (یاری، ۱۳۹۴).

در دید کلی یک سیستم قدرت الکتریکی به هم پیوسته و پیچیده شامل سه قسمت اصلی نیروگاه‌های تولید قدرت، خطوط انتقال و سیستم‌های توزیع انرژی می‌باشد (سویوشی و گوتو^۱، ۲۰۱۲). نیروگاه، مجموعه‌ای از تأسیسات صنعتی است که برای تولید انرژی الکتریکی به کار گرفته می‌شود. نیروگاه‌ها بسته به نوع تکنولوژی به کار رفته در آن‌ها و منابع انرژی در دسترس متفاوت هستند. وظیفه اصلی یک نیروگاه، تبدیل انرژی از دیگر شکل‌های آن مانند انرژی شیمیایی، انرژی هسته‌ای و انرژی پتانسیل گرانشی به انرژی الکتریکی است. فرایند جابجایی توان الکتریکی را انتقال انرژی الکتریکی می‌نامند. این فرایند معمولاً شامل انتقال انرژی الکتریکی از مولد یا تولیدکننده به پست‌های توزیع نزدیک شهرها یا مراکز تجمع صنایع می‌باشد. همچنین تحویل انرژی الکتریکی به مصرف‌کننده‌ها در محدوده انتقال انرژی الکتریکی است. انتقال انرژی الکتریکی موجب می‌شود تا بدون پذیرفتن هزینه حمل سوخت‌های تولید الکتریکی و همچنین آلودگی تولید شده ناشی از آن‌ها در نیروگاه‌های نزدیک شهرها یا مراکز تجمع صنایع، از انتقال انرژی الکتریکی بهره بگیریم. در واقع در بسیاری از موارد انتقال منابع انرژی مانند باد یا آب سدها غیرممکن است و تنها راه ممکن انتقال انرژی الکتریکی است (مهری بابادی، ۱۳۹۶). حال آنکه در بسیاری موارد انتقال منابع انرژی مانند باد یا آب سدها غیرممکن است و تنها راه ممکن انتقال انرژی الکتریکی است. گام توزیع یکی از گام‌های انتهایی تحویل انرژی الکتریکی به مصرف‌کننده‌هاست (گوتو و تیسوتسو^۲، ۲۰۰۸). این بخش به طور کلی شامل خطوط ولتاژ متوسط (کمتر از ۲۰ کیلو ولت)، پست‌های ترانسفورمری و خطوط ولتاژ پایین (کمتر از ۱۰۰۰ ولت) می‌شود. سیستم توزیع بخشی از سیستم قدرت است که پست‌های توزیع را به تجهیزات برق در محل مصرف کننده متصل می‌کند. معمولاً خطوط توزیع اولیه در محدوده ۰/۴ کیلوولت تا ۲۰ کیلوولت بوده و بار را در مناطق جغرافیایی تعریف شده تأمین می‌کند. در واقع انرژی تولیدشده در نیروگاه‌ها از طریق خطوط انتقال و فوق توزیع به محل مصرف می‌رسند.

با توجه به ساختار کلی سیستم‌های قدرت صنعت برق ایران، هر یک از شرکت‌های برق منطقه‌ای از چند واحد تولید نیروگاهی، برق تولید شده را دریافت و سپس به چند شرکت توزیع جهت انتقال به مشتریان نهایی ارسال می‌کنند. در نظر گرفتن اجزای تشکیل دهنده صنعت برق در قالب یک زنجیره تأمین که از گام تولید تا توزیع را در بر گرفته، موضوعی است که در جهت ارزیابی عملکرد با هدف شناخت وضع موجود، تدوین راهبردها، برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت در صنعت برق ایران دارای اهمیت فراوانی است.

¹ Sueyoshi & Goto

² Goto & Tsutsui

تاکنون پژوهش‌های زیادی در مورد ارزیابی عملکرد گام‌های تولید، انتقال و توزیع برق صورت گرفته است. برخی از مطالعات صورت گرفته در حوزه ارزیابی شرکت‌های فعال در صنعت برق در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. مطالعات پیشین در زمینه اندازه‌گیری کارایی شرکت‌های صنعت برق به روش DEA

پژوهشگر	داده‌ها	ستاده‌ها	مدل تحلیل پوششی داده‌ها
هاتوری، جاماسب و پلیت ^۱ (۲۰۰۳)	مخارج عملیاتی، مخارج سرمایه‌ای	انرژی تحویلی به مشترکان، تعداد مشترکان، انرژی تحویلی، اندازه شبکه	محاسبه کارایی با مدل‌های ایستا یا تک‌دوره‌ای با فرض بازده به مقیاس ثابت و متغیر
فیلیپینی، هروآتینگ و زوریک ^۲ (۲۰۰۴)	هزینه نیروی کار و هزینه سرمایه	انرژی تحویلی	کارایی هزینه شرکت‌های توزیع برق کشور اسلوونی تابع هزینه محاسبه شده است.
هس و کالمن ^۳ (۲۰۰۷)	اندازه شبکه و تعداد کارکنان	مجموع انرژی فروخته شده و تعداد مشترکین	کارایی فنی شرکت‌های توزیع برق کشور آلمان بررسی شده است.
روماس-ریل، توار، آیوتی، آلمیدا و پینتو ^۴ (۲۰۰۹)	تعداد کارکنان، ظرفیت ترانسفورماتورها، اندازه شبکه	انرژی تحویلی به مشترکین صنعتی و غیرصنعتی و تعداد مشترکین.	تعیین متوسط رشد سالانه و کارایی فنی این شرکت‌ها تعیین شده است.
پرز-ریز و توار ^۵ (۲۰۰۹)	تلفات شبکه برق، تعداد پست‌های برق، طول خطوط شبکه و تعداد کارکنان	مقدار انرژی تحویلی، تعداد مشترکین	رابطه میان تجدید ساختار صنعت برق و کارایی این صنعت را بررسی گردید.
سجادی، عمرانی، ماکویی و شاهاناقی ^۶ (۲۰۱۱)	طول خط شبکه، ظرفیت ترانس‌ها و تعداد کارکنان	فروش برق و تعداد مشترکان	نمرات کارایی شرکت‌های توزیع برق ایران با مدل‌های داده‌محور و ستاده‌محور مبتنی بر سنجش‌های کمکی با فرض بازده به مقیاس متغیر محاسبه شده است.
سویوشی و گوتو (۲۰۱۲)	سرمایه تولید، انتقال و توزیع برق، هزینه‌های عملیاتی و تعداد کارکنان	مجموع برق فروخته شده و تعداد مشترکین	کارایی این سه بخش در دو دوره زمانی قبل و بعد از خصوصی‌سازی معین و مقایسه شد.
آزاده، متولی، زرین و خائفی ^۷ (۲۰۱۵)	طول شبکه، ظرفیت انتقال و تعداد کارکنان	تعداد مشتریان، فروش نهایی برق	با بکارگیری روش تحلیل پوششی داده‌های تصادفی در بازه زمانی ۱۰ ساله کارایی واحدهای توزیع بررسی شد.
عمرانی، قاری‌زاده و شفیعی ^۸ (۲۰۱۵)	ظرفیت ترانسفورماتورها، تعداد ترانسفورماتورها، تعداد کارکنان، طول خطوط شبکه.	انرژی تحویلی، انرژی تحویلی به بخش خانگی، صنعتی و مشتریان دیگر، تعداد مشتریان خانگی، صنعتی و بخش‌های دیگر	رویکردهای تحلیل مؤلفه اصلی، تئوری چانه‌زنی و تحلیل پوششی داده‌ها را با هدف افزایش قدرت حل مسأله و دستیابی به نتایج واقعی‌تر با هم ترکیب نمودند.
خلیلی دامغانی و شه‌میر ^۹ (۲۰۱۵)	هزینه سوخت مصرفی (نفت، نفت، گازو گاز طبیعی)، انرژی دریافتی از شرکت‌های نزدیک	مقدار گاز SO_2 ، CO_2 ، NO_2 در پایان گام اول، انرژی تحویلی در پایان گام توزیع، فروش انرژی به مصرف کنندگان صنعتی، انرژی تحویلی به شرکت‌های دیگر	۱- دو گام تولید و توزیع را مد نظر دارد. ۲- دارای ستاده بد میانی است. ۳- داده‌های نامعین را مد نظر دارد. ۴- با ستاده بد مانند داده رفتار شده است.

¹ Hattori, Jamasb & Pollitt

² Filippini, Hrovatinc & Zoric

³ Hess & Cullmann

⁴ Ramos-Real, Tovar, Iootty, Almeida & Pinto

⁵ Perez-Reyes & Tovar

⁶ Sadjadi, Omrani, , Makui & Shahanaghi

⁷ Azadeh, Motevali H., Zarrin & Khaefi

⁸ Omrani, Gharizadeh B. & Shafiei K.

⁹ Khalili-Damghani & Shahmir

با مدل تحلیل پوششی داده‌های موزون با وزن‌های کنترل شده نمرات کارایی ستاده‌های بد آلاینده هوا را ارزیابی نمودند. ستاده‌های بد را از بزرگترین مقدار هر داده کسر کرده است.	انرژی تحویلی	ظرفیت ژنراتورهای شبکه و حرارت کل برای تولید برق	کوک، دو و ژو ^۱ (۲۰۱۷)
مدل ابرکارایی در تحلیل پوششی داده‌ها	مقدار برق تولیدی برای فروش، حداکثر بار قدرت، کل سود	کل دارایی‌ها	لی، شینی، میانبین و جینچائو ^۲ (۲۰۱۹)
کارایی فنی این شرکت‌ها در بازه زمانی ۸ ساله بررسی شده است.	انرژی تحویلی و تعداد مشترکین	طول خطوط، ظرفیت ترانسفورماتورها و تعداد کارکنان	سخنور، صادقی، عصار، یآوری و مهرگان (۱۳۹۱)
با ترکیب دو رویکرد تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای و تحلیل پنجره، کارایی نواحی تولید و انتقال نیرو در صنعت برق ایران در طی زمان و در مراحل تولید و انتقال برق محاسبه شده است.	قدرت نامی، قدرت عملی، حداکثر بار تولید در پیک همزمان، تولید ناویژه نیروگاه‌ها، تولید ویژه، راندمان و بازده حرارتی	مصرف داخلی نیروگاه، سوخت مصرفی، ظرفیت پست‌های انتقال، ظرفیت پست‌های فوق توزیع، طول خطوط انتقال، طول خطوط فوق توزیع	شفیعی نیک‌آبادی، یاکیده، اویسی عمران (۱۳۹۶)
بکارگیری مدل شبکه SBM برای ارزیابی کارایی سه گامی	انتشار CO ₂ ، فروش به صنایع بزرگ، فروش به مشتریان کوچک، مقدار تلفات	نیروی کار، ظرفیت نیروگاه، سوخت مصرفی، طول خط، برق خریداری شده، ظرفیت ترانسفورماتور	ممی پور و نجف زاده (۱۳۹۷)
مدل ریاضی پیشنهاد گردیده است که شامل دو مرحله تولید و انتقال برق است. در مدل پیشنهادی در پایان مرحله تولید متغیرهای خروجی در نظر گرفته شدند که دیگر وارد مرحله بعدی تولید نمی‌شوند. در مرحله دوم نیز علاوه بر ورودی‌های دریافتی از مرحله تولید، متغیرهای ورودی دیگری در نظر گرفته شدند که از مرحله قبل وارد مدل نمی‌شوند.	حداکثر بار تولیدی، تولید ویژه، تولید ناویژه، راندمان، قدرت نامی نیروگاه، قدرت عملی نیروگاه، انرژی تحویلی	مصارف داخلی نیروگاه‌ها، سوخت مصرفی، حداکثر بار تولیدی، تولید ویژه، تولید ناویژه، ظرفیت پست‌های انتقال نیرو و طول خطوط انتقال نیرو	شفیعی نیک‌آبادی، یاکیده، اویسی عمران (۱۳۹۷)
ساختار سه گامی با داده‌های اصلی، داده‌های مازاد ^۳ ، اندازه‌های میانی، ستاده‌های خوب میانی و نهایی و ستاده‌های بد میانی و نهایی	قدرت نامی و قدرت عملی (شفیعی نیک‌آبادی، یاکیده، اویسی عمران ۱۳۹۶؛ خلیلی و شهیمیر، ۲۰۱۵) انرژی تحویلی (روماس-ریل، توار، آیوتی، آلمیدا و پینتو ۲۰۰۹)، حداکثر بار غیر همزمان (نظر خبرگان) گازهای آلاینده زیست محیطی (خلیلی و شهیمیر، ۲۰۱۵) تلفات انرژی (شفیعی نیک‌آبادی، یاکیده، اویسی عمران ۱۳۹۶؛ خلیلی و شهیمیر، ۲۰۱۵)، تلفات انرژی (نظر خبرگان)	هزینه سوخت مصرفی (شفیعی نیک-آبادی، یاکیده، اویسی عمران ۱۳۹۶؛ خلیلی و شهیمیر، ۲۰۱۵)، مصرف داخلی (شفیعی نیک‌آبادی، یاکیده، اویسی عمران ۱۳۹۶)، ظرفیت پست‌های انتقال (سخنور، صادقی، عصار، یآوری و مهرگان ۱۳۹۱)، طول خطوط انتقال برق (سخنور، صادقی، عصار، یآوری و مهرگان ۱۳۹۱)، ظرفیت ترانسفورماتورها (روماس-ریل، توار، آیوتی، آلمیدا و پینتو ۲۰۰۹)، طول شبکه فشار ضعیف و متوسط (خلیلی و شهیمیر، ۲۰۱۵)	مدل پیشنهادی

در پژوهش‌های پیشین عملکرد نیروگاه‌ها (باروس^۴، ۲۰۱۳؛ شکوری، نبئی و علی‌اکبری‌ثانی^۵، ۲۰۱۴)، شرکت‌های انتقال (لی^۱، ۲۰۱۵؛ بیسلی^۲، ۱۹۹۵) و شرکت‌های توزیع برق (عمرانی، قاری‌زاده و شفیع، ۲۰۱۵؛ گویا، دیاس، آنتونس،

^۱ Cook, Du & Zhu

^۲ Lei, Xinyi, Mianbin & Jinchao

^۳ ورودی‌های گام دوم و سوم که از خارج وارد می‌شوند و خروجی گام قبل نیستند.

^۴ Barros

^۵ Shakouri G., Nabaee & Aliakbarisani

بوسینه‌ها و ایناسیو^۳، ۲۰۱۵؛ سجادی، عمرانی، ماکوئی و شاهناقی، ۲۰۱۱؛ خدابخشی^۴، ۲۰۱۰؛ کوسمانن^۵، ۲۰۱۲؛ یوژی و ژانگنا^۶، ۲۰۱۲؛ سویوشی و گوتو، ۲۰۱۲؛ سخنور، صادقی، عصار، یآوری و مهرگان، ۱۳۹۱) به صورت جداگانه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و کاربرد رویکرد یکپارچه و جامع در صنعت برق سابقه چندانی ندارد. مرور ادبیات پژوهش نشان می‌دهد پژوهشی که به بررسی عملکرد یکپارچه گام‌های تولید (نیروگاه‌ها)، انتقال برق (شرکت‌های برق منطقه‌ای) و توزیع (شرکت‌های توزیع برق) بپردازد، انجام نشده است. مدل ارائه شده در پژوهش حاضر با در نظر گرفتن انواع داده‌های اصلی^۷، مازاد، اندازه‌های میانی^۸، ستاده‌های خوب و بد^۹ در هر یک از گام‌های تولید، انتقال و توزیع برق و با بکارگیری روش پیشنهادی تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای به ارزیابی کارایی شرکت‌های برق منطقه‌ای می‌پردازد. آنچه تاکنون در پژوهش‌های گذشته انجام نشده است.

در ادامه، ادبیات موضوع مرور می‌شود. سپس روش شناختی پژوهش و مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای با ستاده بد در بخش سوم ارائه می‌شود. به منظور ارزیابی عملکرد در صنعت برق مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای به کار گرفته می‌شود و در بخش آخر نتیجه گیری و پیشنهادها ارائه شده است.

پیشینه پژوهش

تحلیل پوششی داده یک روش ناپارامتری بر پایه برنامه‌ریزی ریاضی برای ارزیابی عملکرد مجموعه‌ای از واحدهای تصمیم‌گیری (DMU) با داده‌ها و ستاده‌های چندگانه است. فارل (۱۹۵۷) نخستین بار روش‌های غیر پارامتری را برای تعیین کارایی مطرح کرد. کار او در سال ۱۹۸۷ توسط چارنز، کوپر و رودز تعمیم یافت و تحت عنوان تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) مطرح گردید و منجر به ارائه روش CCR شد. در روش CCR کارایی چند داده-یک ستاده فارل به حالت کلی چند داده - چند ستاده تعمیم داده شد. در سال ۱۹۸۴ روش BCC توسط بنکر، چارنز و کوپر منتشر شد. به این نوع مدل‌ها در ادبیات تحلیل پوششی داده‌ها مدل‌های سنتی گفته می‌شود. در مدل‌های سنتی تحلیل پوششی داده‌ها، واحدهای تصمیم‌گیری به عنوان جعبه سیاه در نظر گرفته می‌شوند و به فعالیت و ساختار درونی آنها توجه نمی‌شود (کائو و هوانگ^{۱۰}، ۲۰۰۸). در یک واحد تصمیم‌گیری داده‌ها ممکن است از چندین فرآیند عبور کنند تا به ستاده تبدیل شوند. به عنوان مثال در یک شبکه دو گامی در گام اول داده‌ها تبدیل به یکسری شاخص می‌شود و این شاخص‌ها در گام بعد به عنوان داده گام دوم تبدیل به ستاده‌های سیستم خواهند شد، به این شاخص‌ها که در یک گام از فرآیند به

¹ Lee

² Beasley

³ Gouveia, Dias, Antunes, Boucinha & Inácio

⁴ Khodabakhshi

⁵ Kuosmanen

⁶ Yuzhi & Zhangna

⁷ Original inputs

⁸ Intermediate index

⁹ Desirable and undesirable outputs

¹⁰ Kao & Hwang

عنوان داده و در گام بعد به عنوان ستاده در نظر گرفته می‌شوند، شاخص‌های میانی گفته می‌شود (فیر و گروسکوپ^۱، ۲۰۰۰).

پژوهش‌های زیادی در مورد تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای صورت گرفته است. در این بخش برخی از مطالعات مشابه در حوزه تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای مرور شده است.

اولین مطالعه‌ای که ساختار داخلی سیستم را بررسی نموده است، توسط چانز و همکاران در سال ۱۹۸۶ انجام شده است. در این مطالعه فرایند جذب نیرو به دو بخش آگهی استخدام و سپس عقد قرارداد تفکیک و به‌عنوان دو گام فرایند جذب نیرو در نظر گرفته شده است (چانز و همکاران^۲، ۱۹۸۶). از زمان مطرح شدن ساختار شبکه‌ای توسط چانز و همکاران در سال ۱۹۸۶، صدها مقاله با مبحث تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای منتشر شده است. برخی از این مقاله‌ها به ارائه مدل‌های اندازه‌گیری کارایی تحت شرایط خاص، برخی به بررسی خواص مدل‌های معین و برخی دیگر به مطالعه کاربرد مدل‌های موجود برای حل مسایل دنیای واقعی پرداخته‌اند. همچنین اولین مطالعه در زمینه بررسی مدل‌های شبکه‌ای چند گامی توسط فیر و گروسکوپ مطرح شده است (فیر و گروسکوپ، ۲۰۰۰). از آن زمان تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه سیستم‌های دو گامی و چند گامی صورت گرفته است که نتیجه آن چاپ مقالات بسیار در نشریات معتبر است.

در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی به ارائه مدل‌های DEA جهت ارزیابی کارایی‌های کلی و جزئی سیستم‌های دو گامی پرداخته‌اند. در بررسی مطالعات سیستم‌های دو گامی دو رویکرد کلی مدل‌های حاصل‌ضربی و پوششی دیده می‌شود. در بررسی مطالعات رویکرد اول و تحت فرض بازده به مقیاس ثابت، فیر و ویتاکر^۳ (۱۹۹۵) مدلی را مبتنی بر رویکردی مرز کارا برای ارزیابی ۱۳۷ کارخانه لبنیات‌سازی در ایالت متحده آمریکا ارائه کردند. آن‌ها دریافتند که دقت این مدل دو گامی از مدل‌های سنتی DEA بیشتر است. لیانگ، کوک و ژو^۴ (۲۰۰۸)، یک مدل شبکه‌ای دو گامی با تمرکز بر مفاهیم تئوری بازی‌ها ارائه نمودند. مدل ارائه شده به وسیله آنها یک مدل‌های برنامه‌ریزی خطی است و به خلاف مدل‌های برنامه‌ریزی غیرخطی پیچیدگی محاسباتی کمتر و جواب بهینه مطلق جهت تجزیه کارایی کل سیستم به کارایی زیرسیستم‌ها را ارائه می‌دهد. کائو و هوانگ (۲۰۰۸)، مدل‌های سنتی DEA را با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از روابط بین دو زیر فرایند از یک فرایند کلی، اصلاح نمودند. در این چارچوب کارایی کل می‌تواند به کارایی زیر فرایندها تجزیه شود. بر اساس ساختار این مدل، این ایده می‌تواند برای سیستم‌های چند گامی که به طور متوالی به یکدیگر مرتبط هستند، نیز به کار گرفته شود. چن، کوک، لی و ژو^۵ (۲۰۰۹)، مدل رابطه‌ای تحت هر دو فرض بازده به مقیاس ثابت و متغیر ارائه نمودند که کارایی کل از مجموع وزن‌های کارایی‌های دو گام به دست می‌آید. کوک، ژو، بی و یانگ (۲۰۱۰) نشان دادند که مدل‌های رابطه‌ای و مدل‌های متمرکز معادل مدل مرز کارا هستند. دو، لیانگ، چن، کوک و

¹ Färe & Grosskopf

² Charnes et al.

³ Färe & Whittaker

⁴ Liang, Cook & Zhu

⁵ Chen, Cook, Li & Zhu

ژو^۱ (۲۰۱۱)، بر اساس تئوری چانه‌زنی نش، هر گام را به عنوان یک بازیگر در نظر گرفته و مدل بازی ارائه نمودند که کارایی کل و کارایی هر یک از گام‌ها را محاسبه می‌کند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد زمانی که تنها یک متغیر میانی بین دو گام وجود داشته باشد، این مدل نتایجی معادل مدل‌های DEA استاندارد ارائه می‌دهد که به‌طور مجزا برای هر گام به کار گرفته شود. در مطالعه دیگری ژو، سان، یانگ، لیو و ما^۲ (۲۰۱۳) مدل بازی چانه‌زنی نش را با هدف دستیابی به تجزیه منصفانه کارایی بین گام‌ها با وجود ثابت ماندن کارایی کل سیستم ارائه نمودند. حداقل نمرات کارایی برای دو گام به عنوان نقطه شکست به کار گرفته شده و تجزیه چانه‌زنی برای محاسبه کارایی کل نیز متعاقباً به دست آمده است. علاوه بر این کائو (۲۰۱۶) به مقایسه دو رویکرد ضربی و جمعی در مدل‌های DEA شبکه‌ای پرداخت. دیسپوتیس، کروناکوس و سوتیروس^۳ (۲۰۱۶) با استفاده از یک رویکرد ارتباط ضعیف^۴ به ارائه یک مدل دو گامی ساده برای ارزیابی کارایی واحدهای تصمیم‌گیری پرداختند. خوینی، فوکویاما، اسلامی و یانگ^۵ (۲۰۱۹) با بررسی مفهوم اثر تغییرات^۶ به بررسی این موضوع در تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای دو گامی پرداختند که اگر محصولات میانی با افزایش ورودی‌ها مرحله اول افزایش یابند، محصولات خروجی چه تغییری می‌کنند. با وجود ساختار مشابه، مدل‌های متفاوت با رویکرد و دیدگاه‌های مختلف برای یک ساختار خاص به وسیله محققان مختلف ارائه شده است (لیم و ژو^۷، ۲۰۱۹؛ کائو، ۲۰۱۹؛ پیکانی، محمدی و امروزنژاد^۸، ۲۰۲۱).

رویکرد ضربی در ساختارهای شبکه‌ای با ستاده بد میانی و خصوصاً نهایی نیز به کار رفته است. سیفورد و ژو^۹ (۲۰۰۲) نشان دادند که مدل‌های استاندارد DEA با توجه به دو اصل خطی بودن و تحدب مدل‌های DEA می‌توانند جهت بهبود عملکرد واحدهای ناکارا با افزایش ستاده خوب و کاهش ستاده بد به کار روند. همچنین، این روش در زمان نیاز به افزایش برخی از داده‌ها در جهت بهبود عملکرد نیز کاربرد دارد.

کدرستمی و امیرتیموری^{۱۰} (۲۰۰۵)، مدل چند گامی با ستاده بد نهایی را ارائه نمودند و ستاده‌های بد با علامت منفی در محاسبات وزن‌های مجازی به کار گرفته شده است. ونگ، هوانگ، وو و لیو^{۱۱} (۲۰۱۴) بر مبنای کار چن، کوک، لی و ژو (۲۰۰۹) چارچوب DEA دو گامی جمعی با ستاده بد نهایی ارائه نمودند که برای تحلیل کارایی‌های بانک‌های تجاری چین به کار رفته است. ارزیابی کارایی دو گام اصلی گردآوری سپرده و کسب درآمد با هدف شناسایی منبع ناکارایی کل سیستم بانکی صورت گرفته است. نتایج نشان داد که مدل دو گامی در مقایسه با رویکرد سنتی DEA برای

¹ Du, Liang, Chen, Cook & Zhu

² Zhou, Sun, Yang, Liu & Ma

³ Despotis, Koronakos & Sotiros

⁴ Weak-link

⁵ Khoveyni, Fukuyama, Eslami & Yang

⁶ Variations effect

⁷ Lim & Zhu

⁸ Peykani, Mohammadi & Emrouznejad

⁹ Seiford & Zhu

¹⁰ Kordrostami & Amirteimoori

¹¹ Wang, Huang, Wu & Liu

شناسایی منبع ناکارایی کل سیستم موفق عمل نموده و منبع ناکارایی سیستم بانکی چین در گام تولید سپرده شناسایی شد.

در بررسی مطالعات رویکرد دوم که رویکرد پوششی است، فیر و گروسکوف (۲۰۰۰) مجموعه امکان تولید و نتیجتاً مدل‌های پوششی را برای ساختار سیستم‌های شبکه‌ای ارائه نمودند. در واقع ساختارهای عمومی مدل‌های شبکه‌ای در بسیاری از مؤسسات و شرایط گوناگون قابل کاربرد هستند. چن و ژو^۱ (۲۰۰۴)، مدل کارایی پوششی را جهت مرز کارایی فرایندهای تولیدی دو گامی مرتبط با یکدیگر که ستاده گام اول به عنوان داده گام دوم است، را ارائه نمودند. مجموعه‌ای از شرکت‌های فعال در صنعت بانکداری به عنوان مبنای مطالعه در نظر گرفته شد. نتایج این مطالعه توصیف اثر غیرمستقیم فناوری اطلاعات بر عملکرد شرکت‌ها، شناسایی مرز کارایی حاصل از ارزش افزوده گام‌های سرمایه‌گذاری فناوری اطلاعات و تولید سود و در پایان تعیین برترین شرکت‌هایی که دارای عملکرد الگو در این زمینه هستند، در نظر گرفته شد. چن و یان^۲ (۲۰۱۱)، مدل DEA شبکه‌ای را جهت ارزیابی کارایی عملکرد زنجیره تأمین ارائه نمودند. در این مطالعه سه مدل DEA شبکه‌ای متفاوت برای سیستم‌های سازمانی دارای تمرکز، عدم تمرکز و ترکیبی بررسی و ارائه شد. به ترتیب، تحلیل کارایی شامل بررسی ارتباط بین زنجیره تأمین و عرضه، و ارتباط بین سه مکانیسم سازمانی گوناگون بود. ائتلاف منابع درونی زنجیره تأمین نیز بررسی شده است.

تونه و تیسوتسویی^۳ (۲۰۰۹)، مدل DEA شبکه‌ای بر مبنای متغیرهای کمکی جهت ارزیابی کارایی کلی و گام‌های دوگانه فرایندهای دو گامی گوناگون ارائه نمودند. این مدل توانایی ارزیابی کارایی سیستم را به صورت منطقی تری نسبت به مدل‌های دیگر دارد؛ زیرا اهمیت زیرسیستم‌ها را در محاسبات مربوط به ارزیابی کارایی وارد محاسبات می‌کند. کوک، ژو، بی و یانگ^۴ (۲۰۱۰) نشان دادند که مدل‌های رابطه‌ای و مدل‌های متمرکز معادل مدل مرز کارا هستند؛ همچنین مدل‌های پوششی را به عنوان دوگان مدل‌های حاصل ضربی نشان دادند، البته ارتباط این دو مدل چندان واضح به نظر نمی‌رسد.

رویکرد پوششی در ساختارهای شبکه‌ای با ستاده بد میانی و خصوصاً نهایی نیز به کار رفته است. فوکویاما و وبر^۵ (۲۰۱۰)، کارایی بانک‌های ژاپنی را با ساختار شبکه‌ای بر مبنای متغیرهای کمکی با ستاده بد نهایی ارزیابی کردند. همچنین مدل حاصل ضربی را به عنوان دوگان مدل پوششی ارائه نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ساختار دو گامی در مقایسه با ساختار تک گامی در شناسایی منابع ناکارایی سیستم بانکی کارایی بیشتری دارد. لوزانو، گوئیرز و مورو^۶ (۲۰۱۳)، مدل DEA شبکه‌ای بر مبنای تابع فاصله‌ای با ستاده‌های خوب و بد نهایی ارائه نمودند. این مدل برای مدل‌سازی و الگوبرداری عملکرد فرودگاه‌های اسپانیا در سال ۲۰۰۸ به کار گرفته شد و نتایج آن با فرایند یک گامی تابع فاصله‌ای مقایسه گردید. نتایج این مقایسه حاکی از آن است که تابع فاصله‌ای شبکه‌ای نسبت به همتای تک گامی خود

¹ Chen & Zhu

² Chen & Yan

³ Tone & Tsutsui

⁴ Cook, Zhu, Bi & Yang

⁵ Fukuyama & Weber

⁶ Lozano, Gutierrez & Moreno

ناکارایی‌ها را بیشتر آشکار نموده و نتایج معتبرتری ارائه می‌کند. چن، چانگ، یو و سو^۱ (۲۰۱۲) نیز مدل چند فعالیتی مبتنی بر ساختار شبکه‌ای جهت ارزیابی تأسیسات کوره‌ای در تابوان ارائه نمودند. کارایی‌های مربوط به گام‌های تصفیه ضایعات و تولید برق به‌عنوان یک ساختار یکپارچه ارزیابی شدند. مقبولی، امیرتیموری و کردرستمی^۲ (۲۰۱۴) مدلی متمرکز را در دو حالت با ستاده بد میانی و نهایی بررسی کردند. چن، سانگ و زو^۳ (۲۰۱۵) به ارزیابی کارایی محیطی برای مناطق کشور چین با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها با خروجی بد پرداختند. یانگ، فوکویاما و سانگ^۴ (۲۰۱۹) به تخمین بهره‌برداری ظرفیت^۵ در صنایع کارخانه‌ای چین با استفاده از یک مجموعه امکان تولید با خروجی بد پرداختند. پیائو، لیا و تینگ^۶ (۲۰۱۹) با تمایز بین امکان‌پذیری ضعیف و قوی برای خروجی بد، مدلی برای ارزیابی کارایی محیطی ارائه و آن را در کشور چین مورد استفاده قرار دادند. سیهانی پارشکوه، کردرستمی، امیرتیموری و قانع‌کنفی^۷ (۲۰۲۰) تعریف دیگری برای امکان‌پذیری ضعیف در برخورد با خروجی نامطلوب ارائه دادند.

در این مقاله یک مدل جدید تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای ارائه می‌شود. ساختار شبکه‌ای ارائه شده شامل مجموعه کاملی از داده‌های اصلی، داده مازاد، اندازه‌ها میانی، ستاده‌های بد میانی و نهایی و ستاده‌های خوب میانی و نهایی در یک فرآیند سه گامی است و با به کارگیری آن می‌توان کارایی فرآیندهای سه گانه و کلی را ارزیابی کرد. مدل پیشنهادی براساس مطالعات صورت گرفته و با توجه به تفاوت‌های اساسی مورد مطالعه در صنعت برق ایران ارائه شده است. ساختار شبکه‌ای صنعت برق ایران یک شبکه رابطه‌ای است و به کارگیری مدل‌های قبلی که یک ساختار کلی برای شبکه را در نظر می‌گیرند مناسب نیست. این ساختار در سه گام شامل داده‌های اصلی، داده مازاد، اندازه‌ها میانی، ستاده بد میانی و نهایی و سرانجام ستاده خوب میانی و نهایی است و می‌توان کارایی هر گام را با به کارگیری از نسبت ستاده وزن‌دار شده آن گام به داده وزن‌دار شده آن گام فرمول‌بندی کرد و کارایی کل را با به کارگیری یک مدل برنامه‌ریزی سه هدفه محاسبه نمود. طراحی مدلی سه گامی سه هدفه با هدف ارزیابی کارایی گام‌های تولید، انتقال و توزیع با توجه به فرآیند انجام شده در هر گام برای صنعت برق ایران از جنبه‌های نوآوری پژوهش حاضر است.

روش شناسی تحقیق

فرض می‌شود n واحد تصمیم‌گیرنده $DMU_j, (j=1, 2, \dots, n)$ دارای m داده $X_{ij}, (i=1, 2, \dots, m)$ در گام اول هستند که ستاده‌های Z_{pj}, Y_{gj}, Y_{bj} را تولید می‌کنند. بخشی از ستاده‌های گام اول به عنوان داده گام دوم $Z_{pj}, (p=1, 2, \dots, P)$ وارد گام دوم فرایند شده و بخش دیگر به عنوان ستاده‌های خوب و بد میانی $Y_{gj}, Y_{bj}, (g=1, 2, \dots, G), (b=1, 2, \dots, B)$ از سیستم خارج می‌شود. گام دوم علاوه بر متغیرهای دریافتی از گام

¹ Chen, Chang, Yu & Hsu

² Maghbouli, Amirteimoori & Kordrostami

³ Chen, Song & Xu,

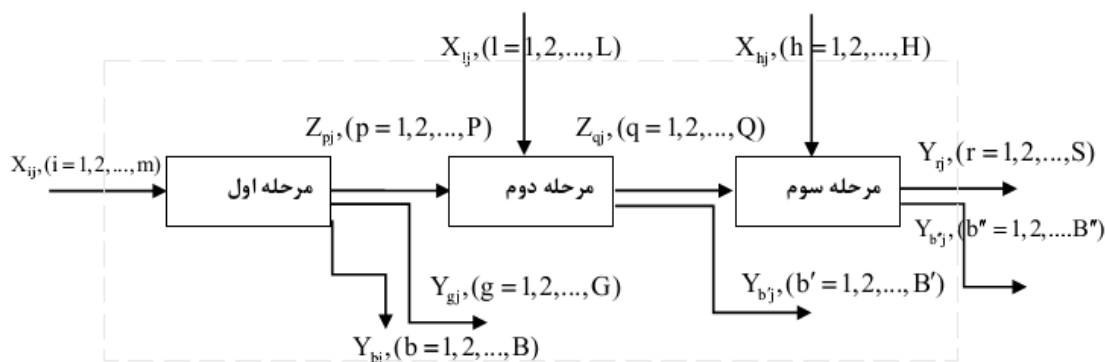
⁴ Yang, Fukuyama & Song

⁵ Capacity utilization

⁶ Piao, Lia & Ting,

⁷ Seihani Parashkouh, Kordrostami, Amirteimoori, & Ghane-Kanafi

اول دارای داده‌های دیگری است که از گام قبل وارد فرایند تولید نمی‌شوند و به صورت $X_{lj}, (l=1,2,...,L)$ نمایش داده می‌شود. در پایان گام دوم دو نوع ستاده خوب و بد تولید می‌شود که ستاده خوب $Z_{qj}, (q=1,2,...,Q)$ به عنوان داده وارد گام سوم شده و ستاده بد $Y_{bj'}, (b'=1,2,...,B')$ نیز از سیستم خارج می‌شود. گام سوم علاوه بر داده‌های دریافتی از گام قبل، دارای داده‌هایی است که از گام قبل وارد فرایند نمی‌شوند و به صورت $X_{hj}, (h=1,2,...,H)$ نمایش داده می‌شود. در پایان گام سوم ستاده‌های نهایی خوب $Y_{rj}, (r=1,2,...,S)$ و بد $Y_{bj''), (b''=1,2,...,B'')$ تولید می‌شوند. نمای کلی این سیستم تولید سه گامی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: ساختار زنجیره تأمین سه گامی متوالی با ستاده خوب و بد میانی و نهایی

قابل ذکر است برای ارزیابی کارایی با خروجی بد، دیدگاه‌های مختلفی ارائه شده است. سه دیدگاه در این حوزه معروف است. دیدگاه اول توسط هایل و ویمن^۱ (۲۰۰۱)، سویوشی و گوتو (۲۰۱۲) ارائه شده است و خروجی‌های بد به عنوان ورودی در نظر گرفته می‌شود. دیدگاه دوم توسط سیفورد و ژو (۲۰۰۲) ارائه شده است و با فرض بازده به مقیاس متغیر و انتقال داده‌های خروجی‌های بد، کارایی ارزیابی می‌شود. دیدگاه سوم توسط کاسمن و پودنسکی^۲ (۲۰۰۹) ارائه شد و با استفاده از اصول تولید و ساختن یک مجموعه امکان تولید با خروجی بد اقدام به ارزیابی کارایی با خروجی بد نمودند. در تحقیق حاضر از دیدگاه اول برای محاسبه کارایی با خروجی بد استفاده شده و خروجی بد به عنوان ورودی در نظر گرفته شده است و از نسبت وزن دار خروجی (خوب) به وزن دار ورودی (شامل خروجی بد) استفاده شده است.

محاسبه کارایی کل سیستم

تفکیک کارایی‌ها در یک سیستم چند گامی، وابسته به این که کارایی گام‌ها را چگونه وارد تابع هدف نماییم، می‌تواند به دو مدل تجمعی^۳ و یا حاصل ضربی^۴ تفکیک شود. در یک مدل تجمعی، تابع هدف از متوسط موزون نمرات کارایی فرایندها تشکیل می‌شود و در یک مدل حاصل ضربی، تابع هدف تنها از نمرات کارایی فرایندهای سیستم حاصل می‌شود (خلیلی و شهیر، ۲۰۱۵). در مقاله حاضر از مدلی چندهدفه برای محاسبه کارایی در شبکه مورد نظر به کار گرفته شده

¹ Hailu & Veeman

² Kuosmanen & Poidinovski

³ Additive multi-stage models

⁴ Multiplicative multi-stage models

است. کارایی در مدل‌های داده محور به مفهوم نسبت مجموع موزون ستاده‌ها به داده‌ها است. بنابراین با توجه به این تعریف می‌توان کارایی گام‌های سه گانه فوق را به صورت زیر تعریف نمود:

$$E_0^1 = \frac{\sum_{p=1}^P w_p Z_{pj} + \sum_{g=1}^G u_g Y_{gj}}{\sum_{i=1}^m v_i X_{ij} + \sum_{b=1}^B \eta_b Y_{bj}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$E_0^2 = \frac{\sum_{q=1}^Q w_q Z_{qj}}{\sum_{p=1}^P w_p Z_{pj} + \sum_{l=1}^L v_l X_{lj} + \sum_{b'=1}^{B'} \eta_{b'} Y_{b'j}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$E_0^3 = \frac{\sum_{r=1}^R u_r Y_{rj}}{\sum_{q=1}^Q w_q Z_{qj} + \sum_{h=1}^H v_h X_{hj} + \sum_{b^*=1}^{B^*} \eta_{b^*} Y_{b^*j}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

متغیرهای به کارگرفته شده در جدول ۲ معرفی شده اند.

جدول ۲- معرفی متغیرها و پارامترهای مدل

متغیر/پارامتر	تعاریف
X_{ij}	آمین داده اصلی فرایند اول زآمین واحد تصمیم گیرنده
Y_{bj}	آمین ستاده بد فرایند اول زآمین واحد تصمیم گیرنده که از سیستم خارج می گردد.
Z_{pj}	آمین ستاده فرایند اول از زآمین واحد تصمیم گیرنده که به عنوان اندازه میانی وارد فرایند دوم سیستم می گردد.
Y_{gj}	آمین ستاده خوب فرایند اول از زآمین واحد تصمیم گیرنده که از سیستم خارج می گردد.
v_i	متغیر مضربی آمین داده اصلی فرایند اول
η_b	متغیر مضربی آمین ستاده بد فرایند اول
u_g	متغیر مضربی آمین ستاده فرایند اول که به عنوان اندازه میانی وارد فرایند سیستم می گردد.
w_p	متغیر مضربی آمین ستاده خوب فرایند اول که به عنوان اندازه میانی وارد فرایند دوم می گردد.
X_{lj}	آمین داده اصلی فرایند دوم مربوط به زآمین واحد تصمیم گیرنده
$Y_{b'j}$	آمین ستاده بد فرایند دوم مربوط به زآمین واحد تصمیم گیرنده که از سیستم خارج می گردد.
Z_{qj}	آمین ستاده فرایند دوم از زآمین واحد تصمیم گیرنده که به عنوان اندازه میانی وارد فرایند سوم سیستم می گردد.
v_l	متغیر مضربی آمین داده اصلی فرایند دوم
$\eta_{b'}$	متغیر مضربی آمین ستاده بد فرایند دوم
w_q	متغیر مضربی آمین ستاده خوب فرایند دوم که به عنوان اندازه میانی وارد فرایند سوم سیستم می گردد.
X_{hj}	آمین داده اصلی فرایند سوم زآمین واحد تصمیم گیرنده
Y_{b^*j}	آمین ستاده بد فرایند سوم از زآمین واحد تصمیم گیرنده که از سیستم خارج می گردد.
Y_{rj}	آمین ستاده خوب فرایند سوم از زآمین واحد تصمیم گیرنده که از سیستم خارج می گردد.
v_h	متغیر مضربی آمین داده اصلی فرایند سوم
η_{b^*}	متغیر مضربی آمین ستاده بد فرایند سوم
u_r	متغیر مضربی آمین ستاده فرایند سوم که از سیستم خارج می گردد.

می‌خواهیم به طور همزمان کارایی هر سه گام یعنی E^1, E^2, E^3 حداکثر شود. مدل DEA به صورت زیر خواهد بود:

$$Max \frac{\sum_{p=1}^P w_p Z_{p0} + \sum_{g=1}^G u_g Y_{g0}}{\sum_{i=1}^m v_i X_{i0} + \sum_{b=1}^B \eta_b Y_{b0}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$Max \frac{\sum_{q=1}^Q w_q Z_{q0}}{\sum_{p=1}^P w_p Z_{p0} + \sum_{l=1}^L v_l X_{l0} + \sum_{b'=1}^{B'} \eta_{b'} Y_{b'0}} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$Max \frac{\sum_{r=1}^R u_r Y_{r0}}{\sum_{q=1}^Q w_q Z_{q0} + \sum_{h=1}^H v_h X_{h0} + \sum_{b''=1}^{B''} \eta_{b''} Y_{b''0}} \quad \text{رابطه (۶)}$$

S.t :

$$\frac{\sum_{p=1}^P w_p Z_{pj} + \sum_{g=1}^G u_g Y_{gj}}{\sum_{i=1}^m v_i X_{ij} + \sum_{b=1}^B \eta_b Y_{bj}} \leq 1 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\frac{\sum_{q=1}^Q w_q Z_{qj}}{\sum_{p=1}^P w_p Z_{pj} + \sum_{l=1}^L v_l X_{lj} + \sum_{b'=1}^{B'} \eta_{b'} Y_{b'j}} \leq 1 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$\frac{\sum_{r=1}^R u_r Y_{rj}}{\sum_{q=1}^Q w_q Z_{qj} + \sum_{h=1}^H v_h X_{hj} + \sum_{b''=1}^{B''} \eta_{b''} Y_{b''j}} \leq 1 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$v_h \geq 0 \quad h = 1, 2, \dots, H, \quad v_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad v_l \geq 0 \quad l = 1, 2, \dots, L, \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$u_r \geq 0 \quad r = 1, 2, \dots, R, \quad u_g \geq 0 \quad g = 1, 2, \dots, G, \quad \eta_b \geq 0 \quad b = 1, 2, \dots, B,$$

$$w_p \geq 0 \quad p = 1, 2, \dots, P, \quad w_q \geq 0 \quad q = 1, 2, \dots, Q, \quad \eta_{b'} \geq 0 \quad b' = 1, 2, \dots, B',$$

$$\eta_{b''} \geq 0 \quad b'' = 1, 2, \dots, B''$$

در مدل فوق با در نظر گرفتن کارایی گام‌ها کوچکتر مساوی با یک به ماکزیمم کردن آن‌ها می‌پردازیم. مدل فوق یک مدل سه هدفه غیرخطی است. به منظور خطی‌سازی این مدل چندهدفه می‌توان از نمره کارایی گام‌ها بهره گرفت. نخست مدل‌های با توابع هدف (۱۱)، (۱۴) و (۱۷) که به ترتیب کارایی گام‌های ۱ تا ۳ را نتیجه می‌دهند به صورت زیر محاسبه می‌شود:

کارایی گام (۱):

$$E_0^{*1} = Max \frac{\sum_{p=1}^P w_p Z_{p0} + \sum_{g=1}^G u_g Y_{g0}}{\sum_{i=1}^I v_i X_{i0} + \sum_{b=1}^B \eta_b Y_{b0}} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

s.t :

$$\frac{\sum_{p=1}^P w_p Z_{pj} + \sum_{g=1}^G u_g Y_{gj}}{\sum_{i=1}^I v_i X_{ij} + \sum_{b=1}^B \eta_b Y_{bj}} \leq 1 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$v_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad u_g \geq 0 \quad g = 1, 2, \dots, G, \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$\eta_b \geq 0 \quad b = 1, 2, \dots, B \quad w_p \geq 0 \quad p = 1, 2, \dots, P$$

کارایی گام (۲)

$$E_0^{*2} = \text{Max} \frac{\sum_{q=1}^Q w_q Z_{q0}}{\sum_{p=1}^P w_p Z_{p0} + \sum_{l=1}^L v_l X_{l0} + \sum_{b'=1}^{B'} \eta_{b'} Y_{b'0}} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

s.t :

$$\frac{\sum_{q=1}^Q w_q Z_{qj}}{(\sum_{p=1}^P w_p Z_{pj} + \sum_{l=1}^L v_l X_{lj} + \sum_{b'=1}^{B'} \eta_{b'} Y_{b'j})} \leq 1 \quad j = 1, \dots, n \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$v_l \geq 0 \quad l = 1, 2, \dots, L, \quad w_p \geq 0 \quad p = 1, 2, \dots, P, \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$w_q \geq 0 \quad q = 1, 2, \dots, Q, \quad \eta_{b'} \geq 0 \quad b' = 1, 2, \dots, B'$$

کارایی گام (۳)

$$E_0^{*3} = \text{Max} \frac{\sum_{r=1}^R u_r Y_{r0}}{\sum_{q=1}^Q w_q Z_{q0} + \sum_{h=1}^H v_h X_{h0} + \sum_{b''=1}^{B''} \eta_{b''} Y_{b''0}} \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

St :

$$\frac{\sum_{r=1}^R u_r Y_{rj}}{(\sum_{q=1}^Q w_q Z_{qj} + \sum_{h=1}^H v_h X_{hj} + \sum_{b''=1}^{B''} \eta_{b''} Y_{b''j})} \leq 1 \quad j = 1, \dots, n \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$v_h \geq 0 \quad h = 1, 2, \dots, H, \quad u_r \geq 0 \quad r = 1, 2, \dots, R, \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$w_q \geq 0 \quad q = 1, 2, \dots, Q, \quad \eta_{b''} \geq 0 \quad b'' = 1, 2, \dots, B''$$

مدل‌های ذکرشده در بالا غیرخطی می‌باشند و می‌توان با بکارگیری تبدیلات چارنز و کوپر (۱۹۶۲) آن‌ها را تبدیل به مدل خطی نمود. در این پژوهش برای محاسبات از فرم خطی این مدل‌ها بهره گرفته می‌شود.

در ادامه رویکرد زیر برای ارزیابی کارایی گام‌ها به کار گرفته شده است (معینی، کریمی و خرم^۱، ۲۰۱۵). مدل با تابع هدف (۲۰) را در نظر بگیرید.

$$\text{Max} (\sum_{p=1}^P w_p Z_{p0} + \sum_{g=1}^G u_g Y_{g0}) - E_0^{*1} (\sum_{i=1}^I v_i X_{i0} + \sum_{b=1}^B \eta_b Y_{b0}) \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

s.t :

$$\sum_{p=1}^P w_p Z_{pj} + \sum_{g=1}^G u_g Y_{gj} - \sum_{i=1}^I v_i X_{ij} - \sum_{b=1}^B \eta_b Y_{bj} \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

$$\sum_{p=1}^P w_p + \sum_{g=1}^G u_g + \sum_{i=1}^I v_i + \sum_{b=1}^B \eta_b = 1 \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

$$v_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad u_g \geq 0 \quad g = 1, 2, \dots, G, \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

$$\eta_b \geq 0 \quad b = 1, 2, \dots, B, \quad w_p \geq 0 \quad p = 1, 2, \dots, P$$

که در آن E_0^{*1} مقدار بهینه مدل با تابع هدف (۱۱) برای ارزیابی DMU_0 و قید $\sum_{p=1}^P w_p + \sum_{g=1}^G u_g + \sum_{i=1}^I v_i + \sum_{b=1}^B \eta_b = 1$ ، قید نرمال ساز است. اگر قید نرمال ساز در نظر گرفته نشود، مسئله جواب بهینه صفر را خواهد داشت. چون بردار بهینه صفر برای ضرب‌های مدل سبب یک جواب موجه بهینه برای

¹ Moeini, Karimi & Khorram

مدل می‌شود که در همه قیدها صدق می‌کند. برای رفع این مشکل قید نرمال‌ساز به کار گرفته می‌شود که جمع همه وزن‌ها ۱ و از صفر بودن وزن‌ها به طور همزمان جلوگیری می‌کند. همچنین قضیه زیر را داریم:

قضیه ۱: مقدار بهینه مدل با تابع هدف (۲۰) برابر صفر است.

اثبات: از آنجایی که E_0^{*1} مقدار بهینه مدل با تابع هدف (۱۱) با جواب‌های بهینه $(v_i^*, u_g^*, \eta_b^*, w_p^*)$ است. در اینصورت داریم:

$$\frac{\sum_{p=1}^P w_p^* Z_{p0} + \sum_{g=1}^G u_g^* Y_{g0}}{\sum_{i=1}^I v_i^* X_{i0} + \sum_{b=1}^B \eta_b^* Y_{b0}} = E_0^{*1}, \frac{\sum_{p=1}^P w_p^* Z_{pj} + \sum_{g=1}^G u_g^* Y_{gj}}{\sum_{i=1}^I v_i^* X_{ij} + \sum_{b=1}^B \eta_b^* Y_{bj}} \leq 1 \quad j=1,2,\dots,n; j \neq 0 \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

این روابط را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} \sum_{p=1}^P w_p^* Z_{p0} + \sum_{g=1}^G u_g^* Y_{g0} - E_0^{*1} (\sum_{i=1}^I v_i^* X_{i0} + \sum_{b=1}^B \eta_b^* Y_{b0}) &= 0 \\ (\sum_{p=1}^P w_p^* Z_{pj} + \sum_{g=1}^G u_g^* Y_{gj}) - (\sum_{i=1}^I v_i^* X_{ij} + \sum_{b=1}^B \eta_b^* Y_{bj}) &\leq 0 \quad j=1,2,\dots,n; j \neq 0 \end{aligned} \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

اگر $k = \frac{1}{\sum_{p=1}^P w_p^* + \sum_{g=1}^G u_g^* + \sum_{i=1}^I v_i^* + \sum_{b=1}^B \eta_b^*}$ باشد، $(kv_i^*, ku_g^*, k\eta_b^*, kw_p^*)$ یک جواب شدنی

برای مدل با تابع هدف (۲۰) با مقدار تابع هدف مساوی صفر است. مقدار تابع هدف این مدل با توجه به محدودیت مدل نامثبت و مسئله ماکزیمم‌سازی است. بنابراین نتیجه می‌گیریم که مقدار بهینه این مدل برابر با صفر است.

نتیجه ۱: از قضیه (۱) نتیجه می‌گیریم که مقدار بهینه مدل (۲۰) برابر صفر است. یعنی اگر $(v_i^*, u_g^*, \eta_b^*, w_p^*)$ جواب بهینه مدل (۲۰) است آنگاه:

$$\sum_{p=1}^P w_p^* Z_{p0} + \sum_{g=1}^G u_g^* Y_{g0} - E_0^{*1} (\sum_{i=1}^I v_i^* X_{i0} + \sum_{b=1}^B \eta_b^* Y_{b0}) = 0 \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

و می‌توان این معادله را به صورت زیر نوشت:

$$E_0^{*1} = \frac{\sum_{p=1}^P w_p^* Z_{p0} + \sum_{g=1}^G u_g^* Y_{g0}}{\sum_{i=1}^I v_i^* X_{i0} + \sum_{b=1}^B \eta_b^* Y_{b0}} \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

و این همان مقدار کارایی به دست آمده برای تابع هدف (۱۱) است. در واقع هر دو مدل (۱۱) و (۲۰) مقدار کارایی یکسان برای DMU_o ($o=1,\dots,n$) به دست می‌آورند. با این تفاوت که مدل (۲۰) برنامه‌ریزی خطی است. پس به جای حل مدل غیرخطی (۱۰) می‌توان مدل خطی (۲۰) را به کار گرفت و این اطمینان وجود دارد که جواب بهینه به دست آمده برای DMU_o ($o=1,\dots,n$) به وسیله مدل (۲۰) مقدار کارایی برای آن ارائه می‌نماید که با به کارگیری مدل (۱۰) به دست می‌آید. به طور مشابه می‌توان مدل‌های غیرخطی با توابع هدف (۱۴) و (۱۷) را با به کارگیری مقادیر بهینه تابع هدفشان تبدیل به مدل خطی نمود.

قابل ذکر است ارزیابی کارایی در شبکه می‌تواند به صورت مستقل انجام شود، یعنی می‌توان کارایی گام‌ها را با به کارگیری مدل‌های با اهداف (۱۱)، (۱۴) و (۱۷) محاسبه نمود و سپس با محاسبه میانگین کارایی گام‌ها به کارایی کل رسید.

اما این نوع ارزیابی ممکن است به ارزیابی نادرستی از کارایی بیانجامد، زیرا برای محاسبه کارایی هر گام بهترین حالت نسبت به آن گام در نظر گرفته می‌شود. در گام‌های میانی خروجی هر گام بخشی از ورودی گام بعد است. کارایی که نسبت خروجی به ورودی است و در یک گام هدف، ماکزیمم کردن جمع شاخص‌های وزن‌دار خروجی آن گام است؛ این در حالی است که در گام بعد هدف این است که جمع شاخص‌های وزن‌دار که تبدیل به ورودی شده است، مینیمم شود. برای رفع این مشکل، توافق اصلی در مسائل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای به کارگیری یک رویکرد مشترک برای ارزیابی کارایی با تابع هدف جدید می‌باشد. به عنوان نمونه کائو و وانگ (۲۰۰۸)، از رویکرد ضربی گام‌ها برای ایجاد تابع هدف مدل جدید و محاسبه کارایی گام‌ها و کارایی کل بهره بردند. چن، کوک، لی و زو^۱ (۲۰۰۹)، رویکرد جمعی را برای این کار به کار گرفتند. دیسپوتیس، کروناکوس و سوتیروس (۲۰۱۵)، از یک رویکرد دوهدفه برای ارائه مدلی به منظور محاسبه کارایی گام‌ها و کارایی کل شبکه‌ای دو گامی بهره بردند. همچنین دیسپوتیس، کروناکوس و سوتیروس (۲۰۱۶)، رویکرد لینک ضعیف^۲ را برای ساخت مدل جدید به منظور ارزیابی کارایی گام‌ها و کارایی کل در تحلیل پوششی داده‌ها به کار گرفتند.

بنابراین با توجه به مطالب بیان شده، مدلی جدید برای ارزیابی کارایی شبکه‌ای ارائه می‌شود. مدل ارائه شده یک مدل چندهدفه برنامه‌ریزی خطی به صورت زیر است:

$$\text{Max} (\sum_{p=1}^P w_p Z_{p0} + \sum_{g=1}^G u_g Y_{g0} - E_0^{*1} (\sum_{i=1}^m v_i X_{i0} + \sum_{b=1}^B \eta_b Y_{b0})) \quad \text{رابطه (۲۸)}$$

$$\text{Max} (\sum_{q=1}^Q w_q Z_{q0} - E_0^{*2} (\sum_{p=1}^P w_p Z_{p0} + \sum_{l=1}^L v_l X_{lj} + \sum_{b'=1}^{B'} \eta_{b'} Y_{b'0})) \quad \text{رابطه (۲۹)}$$

$$\text{Max} (\sum_{r=1}^R u_r Y_{r0} - E_0^{*3} (\sum_{q=1}^Q w_q Z_{q0} + \sum_{h=1}^H v_h X_{h0} + \sum_{b''=1}^{B''} \eta_{b''} Y_{b''0})) \quad \text{رابطه (۳۰)}$$

s.t :

$$(\sum_{p=1}^P w_p Z_{pj} + \sum_{g=1}^G u_g Y_{gj}) - (\sum_{i=1}^m v_i X_{ij} + \sum_{b=1}^B \eta_b Y_{bj}) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه (۳۱)}$$

$$\sum_{q=1}^Q w_q Z_{qj} - (\sum_{p=1}^P w_p Z_{pj} + \sum_{l=1}^L v_l X_{lj} + \sum_{b'=1}^{B'} \eta_{b'} Y_{b'j}) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه (۳۲)}$$

$$\sum_{r=1}^R u_r Y_{rj} - (\sum_{q=1}^Q w_q Z_{qj} + \sum_{h=1}^H v_h X_{hj} + \sum_{b''=1}^{B''} \eta_{b''} Y_{b''j}) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه (۳۳)}$$

$$\sum_{p=1}^P w_p + \sum_{g=1}^G u_g + \sum_{i=1}^m v_i + \sum_{b=1}^B \eta_b = 1 \quad \text{رابطه (۳۴)}$$

$$\sum_{q=1}^Q w_q + \sum_{p=1}^P w_p + \sum_{l=1}^L v_l + \sum_{b'=1}^{B'} \eta_{b'} = 1 \quad \text{رابطه (۳۵)}$$

$$\sum_{r=1}^R u_r + \sum_{q=1}^Q w_q + \sum_{h=1}^H v_h + \sum_{b''=1}^{B''} \eta_{b''} = 1 \quad \text{رابطه (۳۶)}$$

$$v_h \geq 0 \quad h = 1, 2, \dots, H, \quad v_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad v_l \geq 0 \quad l = 1, 2, \dots, L \quad \text{رابطه (۳۷)}$$

$$u_r \geq 0 \quad r = 1, 2, \dots, R, \quad u_g \geq 0 \quad g = 1, 2, \dots, G, \quad \eta_b \geq 0 \quad b = 1, 2, \dots, B$$

$$w_p \geq 0 \quad p = 1, 2, \dots, P, \quad w_q \geq 0 \quad q = 1, 2, \dots, Q, \quad \eta_{b'} \geq 0 \quad b' = 1, 2, \dots, B'$$

$$\eta_{b''} \geq 0 \quad b'' = 1, 2, \dots, B''$$

¹ Chen, Cook, Li & Zhu

² Weak-Link

که E_0^{*1} ، E_0^{*2} و E_0^{*3} به ترتیب کارایی گام‌های ۱ تا ۳ برای DMU_o است که به ترتیب به وسیله مدل‌های با توابع هدف (۱۱)، (۱۴) و (۱۷) به دست می‌آیند. همچنین محدودیت‌های (۳۴) تا (۳۶) قیدهای نرمال ساز برای جلوگیری از جواب بدیهی صفر برای مدل هستند.

مدل چند هدفه بالا را می‌توان با بکارگیری روش‌های چندهدفه تبدیل به مدل تک هدفه کرد. در اینجا روش وزن دار به کار گرفته شده است و مدل را به مدل تک هدفه با تابع هدف (۳۸) تبدیل می‌نماییم.

$$\text{رابطه (۳۸)} \quad \text{Max } \lambda_1 (\sum_{p=1}^P w_p Z_{p0} + \sum_{g=1}^G u_g Y_{g0} - E_0^{*1} (\sum_{i=1}^m v_i X_{i0} + \sum_{b=1}^B \eta_b Y_{b0})) +$$

$$\lambda_2 (\sum_{q=1}^Q w_q Z_{q0} - E_0^{*2} (\sum_{p=1}^P w_p Z_{p0} + \sum_{l=1}^L v_l X_{l0} + \sum_{b'=1}^{B'} \eta_{b'} Y_{b'0})) +$$

$$\lambda_3 (\sum_{r=1}^R u_r Y_{r0} - E_0^{*3} (\sum_{q=1}^Q w_q Z_{q0} + \sum_{h=1}^H v_h X_{h0} + \sum_{b''=1}^{B''} \eta_{b''} Y_{b''0}))$$

st :

$$\text{رابطه (۳۹)} \quad (\sum_{p=1}^P w_p Z_{pj} + \sum_{g=1}^G u_g Y_{gj}) - (\sum_{i=1}^m v_i X_{ij} + \sum_{b=1}^B \eta_b Y_{bj}) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$\text{رابطه (۴۰)} \quad \sum_{q=1}^Q w_q Z_{qj} - (\sum_{p=1}^P w_p Z_{pj} + \sum_{l=1}^L v_l X_{lj} + \sum_{b'=1}^{B'} \eta_{b'} Y_{b'j}) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$\text{رابطه (۴۱)} \quad \sum_{r=1}^R u_r Y_{rj} - (\sum_{q=1}^Q w_q Z_{qj} + \sum_{h=1}^H v_h X_{hj} + \sum_{b''=1}^{B''} \eta_{b''} Y_{b''j}) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$\text{رابطه (۴۲)} \quad \sum_{p=1}^P w_p + \sum_{g=1}^G u_g + \sum_{i=1}^m v_i + \sum_{b=1}^B \eta_b = 1$$

$$\text{رابطه (۴۳)} \quad \sum_{q=1}^Q w_q + \sum_{p=1}^P w_p + \sum_{l=1}^L v_l + \sum_{b'=1}^{B'} \eta_{b'} = 1$$

$$\text{رابطه (۴۴)} \quad \sum_{r=1}^R u_r + \sum_{q=1}^Q w_q + \sum_{h=1}^H v_h + \sum_{b''=1}^{B''} \eta_{b''} = 1$$

$$\text{رابطه (۴۵)} \quad v_h \geq 0 \quad h=1, 2, \dots, H, \quad v_i \geq 0 \quad i=1, 2, \dots, I, \quad v_l \geq 0 \quad l=1, 2, \dots, L$$

$$u_r \geq 0 \quad r=1, 2, \dots, R, \quad u_g \geq 0 \quad g=1, 2, \dots, G, \quad \eta_b \geq 0 \quad b=1, 2, \dots, B$$

$$w_p \geq 0 \quad p=1, 2, \dots, P, \quad w_q \geq 0 \quad q=1, 2, \dots, Q, \quad \eta_{b'} \geq 0 \quad b'=1, 2, \dots, B'$$

$$\eta_{b''} \geq 0 \quad b''=1, 2, \dots, B''$$

که در آن λ_1 ، λ_2 و λ_3 وزن‌های نامنفی برای اهداف اول تا سوم می‌باشند که توسط تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شوند و جمع آن‌ها برابر با ۱ است.

با حل مدل با تابع هدف (۳۸) کارایی گام‌ها را به دست می‌آوریم. همچنین با ضرب λ_i ($i=1, 2, 3$) در کارایی گام‌ها و جمع آن‌ها می‌توان کارایی شبکه را به صورت تجمعی محاسبه نمود. با توجه به مطالب بیان شده در این بخش به ارائه الگوریتمی برای محاسبه کارایی شبکه‌ای معرفی شده در شکل (۱) به صورت زیر می‌پردازیم:

الگوریتم (۱):

۱- با بکارگیری فرم‌های خطی مدل‌های با توابع هدف (۱۱)، (۱۴) و (۱۷) مقادیر E_0^{*1} ، E_0^{*2} و E_0^{*3} به دست می‌آید.

۲- مدل با تابع هدف (۳۸) با تعیین λ_1 ، λ_2 و λ_3 به وسیله تصمیم‌گیرنده را حل می‌کنیم و جواب بهینه $(v_i^*, v_l^*, v_h^*, w_p^*, w_q^*, \eta_b^*, \eta_{b'}^*, \eta_{b''}^*, u_g^*, u_r^*)$ را به دست می‌آوریم.

کارایی گام‌ها و کارایی کل (E^*) برای ارزیابی DMU_o به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E_0^{1*} = \frac{\sum_{p=1}^P w_p^* Z_{pj} + \sum_{g=1}^G u_g^* Y_{gj}}{\sum_{i=1}^m v_i^* X_{ij} + \sum_{b=1}^B \eta_b^* Y_{bj}} \quad \text{رابطه (۴۶)}$$

$$E_0^{2*} = \frac{\sum_{q=1}^Q w_q^* Z_{qj}}{\sum_{p=1}^P w_p^* Z_{pj} + \sum_{l=1}^L v_l^* X_{lj} + \sum_{b'=1}^{B'} \eta_{b'}^* Y_{b'j}} \quad \text{رابطه (۴۷)}$$

$$E_0^{3*} = \frac{\sum_{r=1}^R u_r^* Y_{rj}}{\sum_{q=1}^Q w_q^* Z_{qj} + \sum_{h=1}^H v_h^* X_{hj} + \sum_{b''=1}^{B''} \eta_{b''}^* Y_{b''j}} \quad \text{رابطه (۴۸)}$$

$$E^* = \lambda_1 \frac{\sum_{p=1}^P w_p^* Z_{pj} + \sum_{g=1}^G u_g^* Y_{gj}}{\sum_{i=1}^m v_i^* X_{ij} + \sum_{b=1}^B \eta_b^* Y_{bj}} + \lambda_2 \frac{\sum_{q=1}^Q w_q^* Z_{qj}}{\sum_{p=1}^P w_p^* Z_{pj} + \sum_{l=1}^L v_l^* X_{lj} + \sum_{b'=1}^{B'} \eta_{b'}^* Y_{b'j}} + \lambda_3 \frac{\sum_{r=1}^R u_r^* Y_{rj}}{\sum_{q=1}^Q w_q^* Z_{qj} + \sum_{h=1}^H v_h^* X_{hj} + \sum_{b''=1}^{B''} \eta_{b''}^* Y_{b''j}} \quad \text{رابطه (۴۹)}$$

در این الگوریتم نخست از فرم خطی مدل‌های با توابع هدف (۱۱)، (۱۴) و (۱۷) به کار گرفته می‌شود و مقادیر E_0^{*1} ، E_0^{*2} و E_0^{*3} به دست می‌آید. در گام بعد با حل مدل خطی با تابع هدف (۳۸)، کارایی گام‌ها و کارایی کل شبکه تحت بررسی به دست می‌آید و چون از مدل‌های خطی در این الگوریتم به کار گرفته می‌شود، این روش یک الگوریتم کارا با پیچیدگی محاسباتی پایینی است.

بیان یافته‌ها و نتایج

در بخش قبل به ارائه یک مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای پرداختیم. هدف از این بخش به کاربردن مدل ارائه شده در صنعت برق ایران می‌باشد. در این پژوهش سیستم قدرت الکتریکی^۱ در سطح صنعت برق ایران مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. در دید کلی یک سیستم قدرت الکتریکی به هم پیوسته و پیچیده شامل سه قسمت اصلی نیروگاه‌های تولید قدرت^۲، خطوط انتقال^۳ و سیستم‌های توزیع انرژی^۴ است. در این پژوهش با توجه به تعداد شرکت‌های برق منطقه‌ای، نواحی شانزده‌گانه تولید، انتقال و توزیع برق به‌عنوان واحدهای تصمیم‌گیرنده در نظر گرفته شده است. هر یک از این واحدها، سیستمی با فرایندهای سه‌گانه تولید، انتقال و توزیع هستند که در فرایند تولید، واحدهای نیروگاهی و در فرایند توزیع برق، شرکت‌های توزیع برق با ساختاری موازی قرار دارند. بر مبنای تعداد شرکت‌های برق منطقه‌ای، نواحی شانزده‌گانه تولید، انتقال و توزیع برق به‌عنوان واحدهای تصمیم‌گیرنده تعیین شده و عبارتند از شرکت‌های برق

1 Electric Power System

2 Generating Station

3 Transmission lines

4 Distribution Systems

منطقه‌ای: آذربایجان، اصفهان، باختر، تهران، خراسان، خوزستان، زنجان، سمنان، سیستان و بلوچستان، غرب، فارس، کرمان، گیلان، مازندران، هرمزگان و یزد.

بعد از تعیین واحدهای تصمیم‌گیرنده باید یک دسته متغیر به عنوان داده و ستاده انتخاب نماییم. در این پژوهش با بهره‌گیری از متغیرهای به کار گرفته شده در مطالعات قبلی ارزیابی کارایی شرکت‌های برق در جهان، امکان دسترسی و گردآوری داده‌ها در خصوص متغیرهای تحقیق و بکارگیری نظرات متخصصین و کارشناسان ارشد صنعت برق، داده‌ها و ستاده‌های فرایندهای تولید، انتقال و توزیع برق انتخاب شده است. این شاخص‌ها به تفکیک در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- داده‌ها، اندازه‌های میانی، ستاده‌های خوب و بد

داده‌ها	اندازه‌های میانی	ستاده‌های خوب	ستاده‌های بد
فرایند تولید	هزینه سوخت مصرفی (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۶؛ خلیلی و شهمیر، ۲۰۱۵)، مصرف داخلی (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۶)	تولید ناویژه ^۱ ، تولید ویژه ^۲ (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۶؛ خلیلی و شهمیر، ۲۰۱۵)	قدرت نامی ^۳ و قدرت عملی ^۴ (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۶؛ خلیلی و شهمیر، ۲۰۱۵)
فرایند انتقال	ظرفیت پست‌های انتقال (سخنور و همکاران، ۱۳۹۱) طول خطوط انتقال برق (سخنور و همکاران، ۱۳۹۱)	انرژی تحویلی (خلیلی و شهمیر، ۲۰۱۵؛ پرز و توار، ۲۰۰۹)	-
فرایند توزیع	ظرفیت ترانسفورماتورها (روماس و همکاران، ۲۰۰۹)، طول شبکه فشار ضعیف و متوسط (خلیلی و شهمیر، ۲۰۱۵)	-	انرژی تحویلی (روماس و همکاران، ۲۰۰۹)، حداکثر بار غیر همزمان ^۵ تلفات انرژی (نظر خبرگان)

پس از گردآوری اطلاعات داده‌ها مطابق با جدول ۴، اندازه‌های میانی، ستاده‌های خوب و بد، نمرات کارایی واحدهای تصمیم‌گیرنده و فرایندهای سه‌گانه درون سیستم با بکارگیری الگوریتم (۱) ارائه شده در بخش قبل محاسبه شده است. در اینجا به دلیل اینکه می‌خواهیم در کارایی کلی، کارایی هر سه گام به یک اندازه سهم داشته باشند مقدار $i (i=1, 2, 3)$ ها در مدل (۱۰) را برابر $\frac{1}{3}$ قرار می‌دهیم. مدل‌های برنامه ریزی خطی با بکارگیری نرم افزار لینگو ۱۱ اجرا شد. نمره کارایی گام‌ها و نمره کارایی کلی در جدول ۵ آمده است.

با توجه به جدول ۵، نواحی تهران، خراسان، خوزستان و زنجان در هر سه گام و در حالت کلی کارا می‌باشند. اما نواحی دیگر حداقل در یک گام ناکارا بوده‌اند و در نتیجه ناکارای کلی می‌باشند. نواحی هرمزگان و غرب دارای پایین‌ترین

۱ جمع انرژی تولیدی مولدهای برق یک نیروگاه که در طی یک دوره زمانی معین روی پایانه خروجی مولدها بر حسب کیلووات ساعت یا مگاوات ساعت اندازه‌گیری می‌شود.

۲ تولید انرژی برق ناویژه منهای مصرف داخلی نیروگاه‌ها در یک دوره معین و بر حسب کیلووات ساعت یا مگاوات ساعت محاسبه می‌شود.

۳ توان حقیقی هر مولد که از سوی کارخانه سازنده بر روی لوح مشخصات آن نوشته می‌شود.

۴ بیشترین توان قابل تولید از مولد برق یا نیروگاه با احتساب شرایط محل نصب همچون دمای محیط و ارتفاع محل نصب از سطح دریا است.

۵ عبارتست از مجموع حداکثر بار مناطق گوناگون شامل حداکثر بار همزمان وابسته به سیستم بهم پیوسته و حداکثر بار مناطق مجزا در یک دوره زمانی مشخص

نمره کارایی شبکه‌ای می‌باشند. نکته قابل توجه این است که برای نواحی ناکارا ممکن است ناحیه در یک گام کارا باشد اما به دلیل ناکارایی در گام‌های دیگر در کل ناکارا خواهد شد. در این ارزیابی تعداد ۴ ناحیه در هر سه گام کارا، تعداد ۳ ناحیه در دو گام کارا، تعداد ۶ ناحیه در یک گام کارا و تعداد ۳ ناحیه در هر سه گام ناکارا می‌باشند.

در فرآیند توزیع، ناحیه سیستان و بلوچستان، در فرآیند انتقال، ناحیه غرب و در فرآیند تولید، ناحیه سیستان و بلوچستان کمترین کارایی را دارند. به غیر از ناحیه سیستان و بلوچستان برای بقیه نواحی، نمره کارایی در فرآیند انتقال کمتر از دو فرآیند دیگر است. همچنین نمره کارایی کلی میانگین وزنی کارایی فرایندها است. به عنوان نمونه چنانچه کارایی ناحیه سیستان و بلوچستان در فرایندها در نظر گرفته شود، در دو فرآیند توزیع و تولید پایین‌ترین نمره کارایی را دارد ولی چون نمره کارایی در فرآیند انتقال از ۱۰ ناحیه بالاتر است، کارایی کلی این ناحیه که میانگین وزنی این فرایندها می‌باشد بالاتر از نواحی هرمزگان و غرب است. در شکل (۲) نمودار کارایی کلی نواحی آمده است.

جدول ۴- داده‌های مدل

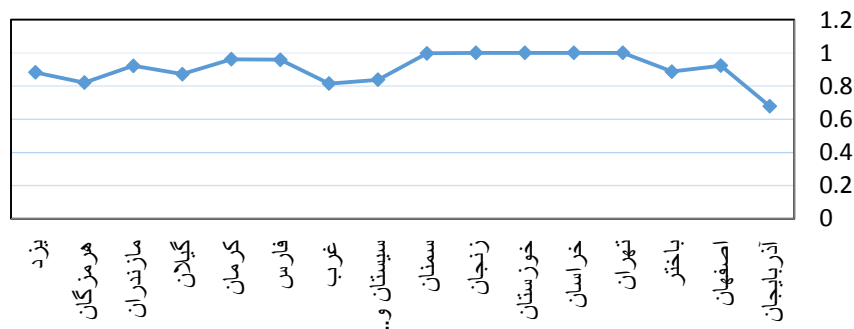
نواحی	هزینه سوخت مصرفی (R/M Wh)	مصرف داخلی (M Wh)	قدرت نامی (M W)	قدرت عملی (M W)	تولید ویژه (M Wh)	تولید ناویژه (M Wh)	گازهای آلاینده زیست محیطی (تن)	ظرفیت پست‌های انتقال (Kv)	طول خطوط انتقال (Km)	تلفات انرژی (M W)	انرژی تحویلی (M W)	ظرفیت ترانسفورماتورها (MW)	طول شبکه فشار ضعیف و متوسط (Km)	انرژی تحویلی (M W)	کثر بار غیر همزمان (M W)	تلفات انرژی (M W)
آذربایجان	۱/۴۳	۰/۶۱	۳۷۱۹	۲۸۶۶	۱۱۸۴	۱۰۲	۵۶۴	۱۱۵	۲۱۳۱	۱۱۸	۳۳۲۵	۶۸۹۵	۱۳۰۹۲	۳۵	۳	۱۵۰
اصفهان	۲/۵۰	۰/۶۰	۳۲۳۴	۳۵۶۷	۱۶۵۴	۳	۵۴۷	۱۶۴	۲۶۰۵	۱۷۷	۴۱۶۲	۳۲۴۲	۱۵۵۶۷	۵۵	۲	۱۸۴
باختر	۲/۶۳	۰/۰۳	۱۹۳۱	۲۲۸۴	۱۰۷۵	۰/۳	۶۴۶	۱۵۹	۳۰۱۴	۱۳۲	۳۱۳۸	۳۷۱۳	۱۴۹۴۲	۸	۲	۱۳۷
تهران	۴/۵۰	۱/۵۸	۸۷۸۶	۸۹۳۵	۴۶۵۹	۱/۵	۶۹۱	۴۲۶	۲۹۵۰	۳۶۴	۱۲۷۴۷	۱۲۰۰۵	۲۶۹۳۱	۵	۹	۵۹۸
خراسان	۲/۶۵	۱/۰۶	۶۰۱۴	۶۰۱۴	۲۸۲۷	۱/۴	۶۹۲	۱۸۹	۴۰۰۲	۲۰۱	۶۸۰۷	۶۸۱۵	۱۰۹۰۶	۳	۵	۲۸۸
خوزستان	۳/۹۶	۰/۵۶	۶۱۸۶	۶۱۸۶	۳۰۱۵	۱/۴	۸۲۲	۳۸۹	۳۶۰۰	۵۱۹	۱۲۹۳۴	۶۴۱۸	۲۸۴۹۲	۷۷	۳	۶۸۵
زنجان	۰/۰۷	۰/۱۰	۹۹۴	۹۹۴	۲۸۶	۱/۴	۸۴۶	۱۶۱	۲۱۱۲	۱۴۹	۴۴۲۶	۳۶۶۸	۱۱۹۴۰	۳۵	۲	۱۷۴
سمنان	۰/۰۶	۰/۰۴	۵۰۹	۵۰۹	۲۳۰	۱/۴	۹۰۳	۹۴	۱۱۳۵	۵۴	۱۶۶۸	۱۱۶۹	۴۸۰۴	۱۵	۰	۶۳
سیستان	۱/۱۰	۰/۳۱	۳۲	۳۰	۱/۹۶	۱/۴	۲۸	۱/۹۰	۱/۹۷	۲۶	۴	۱۰۵	۱/۹	۳۵	۱۸۵	۱۹۳

۱۶۷	۱	۲۷۲۷	۱۲۹۴ ۷	۴۸۲۳	۳۸۷۲	۱۴۶	۴۰۵۵	۱۲۱	۱۱۹ ۷	۹۳۱	۹۳۰	۲۱۷۵	۲۱۷۱			ستان و بلوچ ستان
/۴۰ ۴۷۰	/۹۷ ۶	/۵ ۷۷۹۸	/۲۱ ۲۳۰۳ ۴	/۰۵ ۱۱۸۹۴	/۷ ۵۱۷۳	/۸۷ ۲۳۳	/۳ ۴۷۹۲	/۰۱ ۲۳۷	/۴ ۱۳۹ ۵	/۶ ۲۰۳۰	/۱ ۲۰۳۰	/۸ ۴۱۷۶	/۳ ۳۹۴۹	۰/۴۱	۳/۵۵	غرب
/۶۱ ۷۳۶	/۸۰ ۷	/۱۷ ۱۲۵۵ ۸	/۱۵ ۵۷۶۹ ۷	/۵ ۱۱۰۱۲	/۷ ۱۶۳۴ ۵	/۹۴ ۵۳۴	/۴۳ ۱۰۶۳ ۱	/۱۲ ۶۴۴	/۲۴ ۱۲۳ ۰	/۵۶ ۵۸۰۹	/۱۸ ۵۸۰۷	/۰۱ ۱۱۰۱ ۰	/۸ ۱۱۳۰ ۲	۲/۳۷	۳/۳۲	فار س
/۵۵ ۴۶۳	/۸۰ ۴	/۱۲ ۹۰۴۶	/۵۳ ۴۶۴۵ ۹	/۶۲ ۱۰۷۴۹	/۴۵ ۱۲۳۶ ۹	/۲۰ ۴۵۸	/۷۱ ۹۲۶۸	/۷۲ ۳۵۹	/۲۵ ۱۴۰ ۳	/۴۹ ۴۱۱۸	/۸۹ ۴۱۱۷	/۱۹ ۶۸۳۳	/۲۴ ۷۴۶۰	۱/۰۴	۲/۶۲	کرما ن
/۸۱ ۴۱۳	/۸۸ ۶	/۹۸ ۶۱۰۳	/۳ ۲۹۶۴ ۴	/۲۱ ۱۰۲۶۷	/۸۵ ۸۵۱۱	/۹۷ ۳۸۵	/۴۲ ۴۶۲۰	/۴۱ ۳۳۰	/۸۶ ۱۵۹ ۳	/۵۴ ۵۰۱۰	/۲۱ ۵۰۰۹	/۲۵ ۹۰۳۲	/۸ ۸۴۳۵	۱/۳۲	۴/۹۴	گیلا ن
/۸۸ ۱۶۴ ۱	/۸۵ ۲۴	/۶۴ ۲۳۲۹ ۰	/۳ ۱۰۳۹ ۳۲	/۳۴ ۳۶۸۸۳	/۰۵ ۲۳۲۵ ۲	/۰۵ ۷۸۰	/۱ ۱۱۰۷ ۸	/۱۶ ۷۷۱	/۵۵ ۲۱۴ ۸	/۸۶ ۶۷۱۲	/۹۳ ۶۷۰۹	/۹۸ ۱۵۵۹ ۴	/۹۶ ۱۴۴۷ ۴	۲/۹۳	۵/۷۵	مازند ران
/۹۵ ۱۹۲ ۰	/۶۱ ۱۶	/۴۹ ۲۷۵۰ ۸	/۴ ۱۰۳۹ ۵۷	/۵۲ ۲۹۱۶۴	/۳۵ ۳۲۲۸ ۹	/۰۱ ۱۳۵ ۶	/۰۵ ۱۸۵۲ ۰	/۴۶ ۱۳۱ ۰	/۰۶ ۲۴۳ ۴	/۹۴ ۸۲۳۹	/۶۳ ۸۲۳۷	/۰۵ ۱۶۵	/۱۴۷۵ ۷	۲/۳۰	۱۲/۷۸	هرمز گان
/۸۹ ۲۶۳ ۹	/۸۵ ۳۲	/۱۴ ۴۱۹۷ ۶	/۸ ۱۷۴۹ ۶۰	/۲ ۵۲۵۶۶	۴۹۹۶ ۹	/۶۸ ۱۸۶ ۹	/۳۱ ۲۹۹۷ ۸	/۲۶ ۱۹۷ ۹	/۵۲ ۲۸۷ ۵	۲۰۰۰ ۰	/۸ ۱۹۹۹ ۲	/۰۵ ۴۱۹۶ ۴	/۵۶ ۳۹۹۷ ۰	۷/۲	۱۷/۷۹	یزد

جدول ۵- نمرات کارایی با در نظر گرفتن شاخص آلاینده‌های زیست محیطی

شرکت برق	کارایی فرایند توزیع	کارایی فرایند انتقال	کارایی فرایند تولید	کارایی کل
آذربایجان	۰/۷۵۷	۰/۸۷۲	۱	۰/۸۷۶
اصفهان	۱	۰/۷۶۹	۱	۰/۹۲۳
باختر	۱	۰/۷۳۰	۰/۹۳۱	۰/۸۸۷
تهران	۱	۱	۱	۱
خراسان	۱	۱	۱	۱
خوزستان	۱	۱	۱	۱
زنجان	۱	۱	۱	۱
سمنان	۱	۰/۹۹۴	۱	۰/۹۹۸
سیستان و بلوچستان	۰/۷۴۱	۰/۹۵۷	۰/۸۱۸	۰/۸۳۸
غرب	۰/۷۵۵	۰/۶۹۲	۱	۰/۸۱۵
فارس	۱	۰/۸۷۷	۱	۰/۹۵۹
کرمان	۱	۰/۸۸۶	۱	۰/۹۶۲
گیلان	۱	۰/۷۵۷	۰/۸۵۹	۰/۸۷۲
مازندران	۰/۸۹۴	۰/۸۷۷	۱	۰/۹۲۲
هرمزگان	۰/۷۶۱	۰/۸۲۰	۰/۸۷۲	۰/۸۲۱
یزد	۱	۰/۷۷۶	۰/۸۷۵	۰/۸۸۳

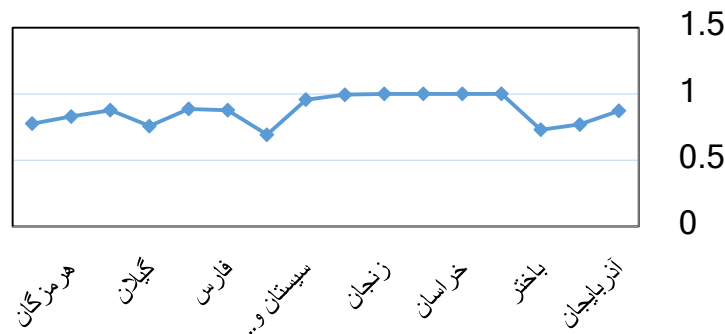
کارایی کل نواحی برق



شکل ۲: کارایی کلی نواحی ۱۶ گانه برق

چنانچه کارایی گام انتقال مورد نظر باشد، در مقایسه با دو فرایند تولید و توزیع، تعداد بیشتری از ناحیه‌ها ناکارا می‌باشند. مقدار ناکارایی تعداد زیادی از نواحی مربوط به فرایند انتقال است. نمودار کارایی نواحی در فرایند انتقال در شکل (۳) آمده است.

کارایی فرایند انتقال



شکل ۳: کارایی فرایند انتقال نواحی ۱۶ گانه برق

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف از بهینه‌سازی مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری انرژی، بهبود عملکرد سیکل‌های تولیدی، افزایش راندمان و کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی ناشی از تولید و مصرف بی‌رویه انرژی است. اهمیت دادن به بحث صرفه‌جویی انرژی با توجه به سهم بالای مصرف انرژی در صنایع، تأثیر به‌سزایی در رشد و پیشرفت کشورها خواهد داشت. در این مطالعه الگویی بر پایه تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای ارائه شده است که با توجه به ساختار شبکه‌ای که نواحی برق ایران دارند، بتوان به ارزیابی آنها پرداخت. مدل ارزیابی ارائه شده با در نظر گرفتن ساختار شبکه‌ای سه‌گامی متشکل از فرایندهای تولید، انتقال و توزیع و همچنین انواع داده‌های اصلی و مازاد، اندازه‌های میانی، ستادهای خوب و بد میانی و نهایی با به‌کارگیری الگوریتمی بر پایه برنامه‌ریزی چندهدفه مدل‌سازی گردید. همچنین شاخص‌های انتخاب شده برای

ارزیابی بر پایه شاخص‌های مصرف انرژی بود. در پایان پس از ارزیابی ۱۶ ناحیه، تعداد چهار ناحیه تهران، خراسان، خوزستان و زنجان به دلیل اینکه در هر سه فرآیند تولید، انتقال و توزیع کارا بودند، در کل نیز کارا شناخته شدند و نواحی دیگر به عنوان نواحی ناکارا ارزیابی شدند.

از تحلیل ارزیابی کارایی برای نواحی روشن شد، بیشترین منبع ناکارایی مربوط به فرآیند انتقال است؛ بنابراین توصیه می‌شود نواحی مختلف به منظور بهبود عملکرد خود به فرآیند توزیع توجه ویژه داشته باشند. به ویژه شاخص‌های ارزیابی در این گام باید مورد توجه قرار گیرند و مشکلات آن‌ها مرتفع شود. به عنوان نمونه این نواحی با بهبود ظرفیت ترانسفورماتورها، میزان انرژی تحویلی و یا تلفات انرژی خود می‌توانند عملکرد و کارایی خود را بالا ببرند.

با توجه به اینکه داده‌های موجود در این حوزه همانند دیگر داده‌های واقعی دارای عدم قطعیت است، بنابراین می‌توان مدل‌هایی را به حالت‌های فازی و احتمالی گسترش داد، یا اینکه به ارائه مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای پویا با توجه به پویایی صنعت برق پرداخت که به عنوان راهکاری برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌گردد.

منابع

- سخنور، محمد، صادقی، حسین، عصار، عباس، یآوری، کاظم و مهرگان، نادر (۱۳۹۱)، تعیین کارایی شرکت‌های توزیع برق ایران و عوامل مؤثر بر آن با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها و رویکرد دومرحله‌ای، *مجله تحقیقات اقتصادی*، ۲، ۳۹-۲۱.
- شفیعی نیک‌آبادی، محسن، یاکیده، کیخسرو و اویسی عمران، اکرم (۱۳۹۶)، ارائه مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای با تلفیقی از خروجی‌های مطلوب و نامطلوب میانی و نهایی، *نشریه تحقیق در عملیات و کاربردهای آن*، ۱۴(۱)، ۹۵-۱۱۶.
- شفیعی نیک‌آبادی، محسن، یاکیده، کیخسرو و اویسی عمران، اکرم (۱۳۹۶)، رویکردی ترکیبی از تحلیل پوششی داده‌ها با انواع خروجی‌ها و تحلیل پنجره در ارزیابی کارایی صنعت برق، *نشریه چشم‌انداز مدیریت صنعتی*، ۴(۴)، ۱۵۷-۱۸۰.
- ممی‌پور، سیاب، نجف زاده، بهنام (۱۳۹۷)، ارزیابی سه بخشی کارایی زیست محیطی صنعت برق ایران: رهیافت تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای. *مجله تحقیقات اقتصادی*، ۲(۲)، ۵۳-۲۱۷.
- مهری بابادی، رضا (۱۳۹۴)، تجهیزات پست خطوط انتقال و توزیع برق، سومین کنفرانس ملی رویکردهای نوین در مهندسی کامپیوتر و برق، رودسر، ایران.
- یاری، مرتضی (۱۳۹۴)، تحلیل انرژی-اقتصادی، انرژی-زیست محیطی و بهینه سازی یک سیکل تولید چندانگانه، رساله دکتری، دانشکده فنی و مهندسی. دانشگاه گیلان.

References

- Azadeh, A., Motevali Haghighi, S., Zarrin, M., Khaefi, S. (2015). Performance evaluation of Iranian electricity distribution units by using stochastic data envelopment analysis, *Electrical Power and Energy Systems*, 73, 919-931.
- Barros, J. (2013). Performance measurement of thermoelectric generating plants with undesirable outputs and random parameters, *Electrical Power and Energy Systems*, 46, 228-233.

- Beasley, J. (1995). Determining teaching and research efficiencies, *Journal of the Operational Research Society*, 46(4), 441–452.
- Charnes, A., Cooper, W.W., Golany, B., Halek, R., Klopp, G., Schmitz, E., et al. (1986). 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.
- Chen, C.C. (2017). Measuring departmental and overall regional performance: applying the multi-activity DEA model to Taiwan's cities/ counties, *Omega*, 67, 60-80.
- Chen, J., Song, M., Xu, L. (2015). Evaluation of environmental efficiency in China using data envelopment analysis. *Ecological Indicators*, 25(1), 577-583.
- 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(1), 95-103.
- Chen, Y., Zhu, J. (2004). Measuring information technology's indirect impact on firm performance, *Information Technology and Management*, 5(1), 9-22.
- Chen Y, Cook, W. D., Li, N., Zhu, J. (2009). Additive efficiency decomposition in two-stage DEA", *European Journal of Operational Research*, 196(3), 1170-6.
- Cook, W.D., Zhu, J., Bi, G., Yang, F. (2010). Network DEA: additive efficiency decomposition. *European Journal of Operational Research*, 207, 1122-1129
- Cook, W. D., Du, J., Zhu, J. (2017). Units invariant DEA when weight restrictions are present: ecological performance of US electricity industry, *Annual Operation Research*, 225(1-2): 323-346.
- Despotis, D.K., Koronakos, G., Sotiros, S. (2015). A multi-objective programming approach to network DEA with an application to the assessment of the academic research activity. *Procedia Computer Science*, 55, 370–379.
- Despotis, D.K., Koronakos, G., Sotiros, D. (2016). The “weak-link” approach to network DEA for two-stage processes. *European Journal of Operational Research*, 254(2), 481-492.
- Färe, R., Grosskopf, S. (2000). Network DEA. *Socio-Economic Planning Sciences*, 34, 35–49.
- Färe, R., Whittaker, G., (1995). An intermediate input model of dairy production using complex survey data, *Journal of Agricultural Economics*, 46, 201–213.
- Filippini, M., Hrovatinc, N., Zoric, J. (2004). Efficiency and regulation of the Slovenian electricity distribution companies. *Energy Policy*, 32: 335-445.
- Fukuyama, H., Weber W.L. (2010). A slacks-based inefficiency measure for a two-stage system with bad outputs, *Omega*, 38(5), 398–409.
- Gouveia, M.C., Dias, L.C., Antunes, C.H., Boucinha, J., Inácio, C.F. (2015). Benchmarking of maintenance and outage repair in an electricity distribution company using the value-Based DEA method, *Omega*, 53, 104–114.

- Goto M., Tsutsui M. (2008). Technical efficiency and impacts of deregulation: An analysis of three functions in US. electric power utilities during the period from 1992 through 2000. *Energy Economics*, 30, 15–38.
- Hailu, A., Veeman, TS. (2001). Alternative methods for environmentally adjusted productivity analysis, *Agricultural Economics*, 25(2-3), 211-218.
- Hattori, T., Jamasb, T., Pollitt, G.M. (2003). A comparison of UK and Japanese electricity distribution performance 1985-1998: lessons for incentive regulation. *CMI Working Paper* 03.
- Hess B., Cullmann A. (2007). Efficiency analysis of East and West German electricity distribution companies e Do the “Ossis” really beat the “Wessis”? *Utilities Policy*, 15, 206-14.
- Kao, C. (2016). Efficiency decomposition and aggregation in network data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 255, 778-786.
- Kao, C. (2019). Inefficiency identification for closed series production systems. *European Journal of Operational Research*, 275, 599–607.
- Kao, C., Hwang, S.N. (2008). Efficiency decomposition in two-stage data envelopment analysis: An application to non-life insurance companies in Taiwan. *European Journal of Operational Research*, 185(1), 418–429.
- Khalili- Damghani, K., Shahmir, S. (2015). Uncertain network data envelopment analysis with undesirable outputs to evaluate the efficiency of electricity power production and distribution processes, *Computers & Industrial Engineering*, (88), 131-150
- Khodabakhshi, M. (2010). An output oriented super-efficiency measure in stochastic data envelopment analysis: Considering Iranian electricity distribution companies. *Computers & Industrial Engineering*, 58, 663-71.
- Khoveyni, M., Fukuyama, H., Eslami, R., Yang, G.L. (2019). Variations effect of intermediate products on the second stage in two-stage processes. *Omega*, 85(1), 35–48.
- Kordrostami, S., Amirteimoori, A. (2005). Un-desirable factors in multi-component performance measurement, *Applied Mathematics and Computation*. 171(2), 721-729.
- Kuosmanen, T. (2012). Stochastic semi-nonparametric frontier estimation of electricity distribution networks: Application of the StoNED method in the Finnish regulatory model. *Energy Economics*, 34, 2189-99.
- Kuosmanen, T., Poidinovski, V. (2009). Weak disposability in nonparametric productivity analysis with undesirable outputs: Reply to Färe and Grosskopf, *American Journal of Agricultural Economics*, 91(2), 539-545.
- Lee, C., Y., (2015). Distinguishing Operational Performance in Power Production: A New Measure of Effectiveness by DEA, *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(6), 3160-3167.
- Lei, A., Xinyi, L., Mianbin, W., Jinchao, L. (2019). Research on power grid effective assets input-output evaluation based on super-efficient DEA model. *E3S Web of Conferences*, 118, 01054.

- Liang, L., Cook, W.D, Zhu, J. (2008). DEA models for two-stage processes: game approach and efficiency decomposition, *Naval Res Logistics (NRL)*, 55(7), 643-653.
- Lim, S., Zhu, J. (2019). Primal-dual correspondence and frontier projections in two-stage network DEA models. *Omega*, 83, 236-248.
- Lozano, S., Gutierrez, E., Moreno, P. (2013). Network DEA approach to airports performance assessment considering undesirable outputs. *Applied Mathematical Modelling*, 37(4), 1665-1676.
- Maghbouli, M., Amirteimoori, A., Kordrostami, S. (2014). Two-stage network structures with undesirable outputs: a DEA based approach. *Measurement*, 48: 109-118.
- Mamipour, S., Najafzadeh, B. (2018). Three-Stage Environmental Efficiency Evaluation of Iran's Power Industry: Network Data Envelopment Analysis Approach, *Journal of Economic Research*, 53, 191-217. (In Persian).
- Mehri-babadi, R., (2015), Power post equipment of transmission and distribution lines, Third National Conference on New Approaches in computer in Electrical Engineering. Rudsar, Iran. (In Persian).
- Moeini, M., Karimi, B., Khorram, E. (2015). A Cross-Efficiency Approach for Evaluating Decision Making Units in Presence of Undesirable Outputs. In: Le Thi, H., Pham Dinh, T., Nguyen, N. (eds) *Modelling, Computation and Optimization in Information Systems and Management Sciences. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 360, Springer, Cham.
- Omrani, H., Gharizadeh Beiragh, R., Shafiei Kaleibari, S. (2015). 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, 617-625.
- Pe'rez-Reyes, R., Tovar, B. (2009). Measuring efficiency and productivity change (PTF) in the Peruvian electricity distribution companies after reforms. *Energy Policy*, 37: 2249-61.
- Peykani, P., Mohammadi, E., Emrouznejad, A. (2021). An adjustable fuzzy chance-constrained network DEA approach with application to ranking investment firms. *Expert Systems with Applications*, 166, 113938.
- Piao, S.R., Lia, J., Ting, C.J. (2019). Assessing regional environmental efficiency in China with distinguishing weak and strong disposability of undesirable outputs. *Journal of Cleaner Production*, 227(1), 748-759.
- Ramos-Real, F.j., Tovar, B., Iooty, M., Almeida, E.F., Pinto, H.Q. (2009). The evolution and main determinants of productivity in Brazilian electricity distribution 1998–2005: An empirical analysis. *Energy Economics*, 31: 298-305.
- Sadjadi, S.J., Omrani, H., Makui, A., Shahanaghi, K. (2011). An interactive robust data envelopment analysis model for determining alternative targets in Iranian electricity distribution companies. *Expert Systems with Applications*, 38, 9830-39.
- Seiford, L.M., Zhu, J. (2002). Modeling undesirable factors in efficiency evaluation, *European Journal of Operational Research*, 142 (1), 16–20.

- Seihani Parashkouh, F., Kordrostami, S., Amirteimoori, A., Ghane-Kanafi, A. (2020), Modelling undesirable products in non-parametric performance analysis, *Journal of Modelling in Management*.
- Shafiei Nikabadi, M., Yakideh, K., Oveysi Omran, A. (2017). Presenting network data envelopment analysis models by a combination of desired and undesired intermediate and final outputs, *Journal of Operational Research and Its Applications*, 14(1), 95-116. (In Persian).
- Shafiei Nikabadi, M., Yakideh, K., Oveysi Omran, A. (2017). An Integrated Approach of DEA with a variety of Outputs and windows analysis for evaluating efficiency of the power industry. *Journal of Industrial Management Perspective*, 6(4), 157-180. (In Persian).
- Shakouri G., H., Nabaee, M., Aliakbarisani, S. (2014). 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, 640-647.
- Sokhanvar, S., Sadeghi, H., Assari, A., Yavari, K., Mehregan, N. (2012). Determinating the efficiency of electricity distribution companies of Iran and factors affecting it by using data envelopment analysis and two-stage approach. *Economic Growth and Development Research*, 1, 145-185. (In Persian).
- Sueyoshi, T., Goto, M. (2012a). Efficiency-based rank assessment for electric power industry: A combined use of Data Envelopment Analysis (DEA) and DEA-Discriminant Analysis (DA). *Energy Economics*, 34: 634-44.
- Sueyoshi, T., Goto, M. (2012b). Data envelopment analysis for environmental assessment Comparison between Public and Private Ownership in Petroleum Industry, *European Journal of Operational Research*, 216(3), 668-678.
- Sueyoshi, T., Goto, M. (2012c). Returns to scale and damages to scale under natural and managerial disposability: Strategy, efficiency and competitiveness of petroleum firms, *Energy Economics*, 34(3), 645-662.
- Tone, K., Tsutsui, M. (2009). Network DEA: A slack-based measure approach, *European Journal of Operational Research*, 197(1), 243-252.
- Wang, K., Huang, W., Wu, J., Liu, Y.N. (2014). Efficiency measures of the Chinese commercial banking system using an additive two-stage DEA, *Omega*, 44, 5-20.
- Yang, G.L., Fukuyama, H., Song, Y.Y. (2019). Estimating capacity utilization of Chinese manufacturing industries, *Socio-Economic Planning Sciences*, 67(1), 94-110.
- Yari, M., (2015), Exergy-economic, exergy-environmental analysis and optimization of a multiple production cycle, PhD dissertation, Faculty of Technology and Engineering, University of Guilan. (In Persian).
- Yuzhi, Sh., Zhangna, (2012). Study of the Input-Output Overall Performance Evaluation of Electricity Distribution Based on DEA Method. *Energy Procedia*, 16, 1517-25.
- Zhou, Z., Sun, L., Yang, W., Liu, W., Ma, C. (2013). A bargaining game model for efficiency decomposition in the centralized model of two-stage systems. *Computers & Industrial Engineering*, 64(1), 103-108.