Industrial Management Journal
Print ISSN: 2008-5885
Online ISSN: 2423-5369

Developing an Analytical-Mathematical Model for Evaluating the Efficiency of the Power Production, Transmission, and Distribution Companies in the Electric Power Industry of Iran: An Network Data Envelopment Analysis (NDEA) Approach with Undesirable Outputs

Mohammad Reza Khosravi
Ph.D. Candidate, Department of Business Management, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran. E-mail: m.khosravi@gilrec.co.ir

Kambiz Shahroodi*
*Corresponding Author, Associate Prof., Department of Business Management, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran. E-mail: shahroudi@iaurasht.ac.ir

Alireza Amirteimoori
Prof., Department of Mathematics, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran. E-mail: ateimoori@iaurasht.ac.ir

Narges Delafrooz
Assistant Prof., Department of Business Management, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran. E-mail: delafrooz.n@iaurasht.ac.ir

Abstract

Objective: The electric power industry is one of the vital arteries contributing to the growth and development of countries and the electricity access index is one of the main components of assessing the industrial competitiveness in each country. Given the importance of this strategic industry, this study sought to develop an analytical-mathematical model for evaluating the efficiency of the power production, transmission, and distribution companies in the electric power industry of Iran.

Methods: In this study, the network data envelopment analysis (NDEA) approach with undesirable outputs was used. Additionally, a model was developed to evaluate the efficiency of the power production, transmission, and distribution companies in the electric power industry of Iran.

Results: By solving the mathematical model used in this study, the efficiency of 43 governmental power plants, 16 regional electricity companies, and 39 power distribution companies in Iran were evaluated. The findings demonstrated that the average efficiency of the power production, transmission, and distribution

companies in the Iranian electric power industry stands at 0.83, 0.6, and 0.71, respectively.

Conclusion: The results of this study indicated that the efficiency of the power transmission companies in the electric power industry of Iran is lower than those of the power production and distribution companies. The study also identified the main reason for the inefficiency of the power production, transmission, and distribution companies of Iran's electricity industry.

Keywords: Performance evaluation; Efficiency, Network data envelopment analysis (NDEA) approach; Undesirable outputs; Electric power industry of Iran

Citation: Khosravi, Mohammad Reza; Shahroodi, Kambiz; Amirteimoori, Alireza & Delafrooz, Narges (2022). Developing an Analytical-mathematical Model for Evaluating the Efficiency of the Power Production, Transmission, and Distribution Companies in the Electric Power Industry of Iran: An Network Data Envelopment Analysis (NDEA) Approach with Undesirable Outputs. *Industrial Management Journal*, 14(2), 220-249. (*in Persian*)

Industrial Management Journal, 2021, Vol. 14, No 2, pp. 220-249
Published by University of Tehran, Faculty of Management
https://doi.org/10.22059/IMJ.2022.339078.1007925
Article Type: Research Paper
© Authors
Received: January 24, 2022
Received in revised form: March 07, 2022
Accepted: April 14, 2022
Published online: July 20, 2022

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

مدیریت صنعتی
شاپا چاپی: ۲۰۰۸-۵۸۸۵
شاپا الکترونیکی: ۲۴۲۳-۵۳۶۹

طراحی مدل تحلیلی ـ ریاضی به‌منظور سنجش کارایی زنجیره تولید، انتقال و توزیع صنعت برق ایران: رویکرد تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای با خروجی نامطلوب

محمدرضا خسروی
دانشجوی دکتری، گروه مدیریت بازرگانی، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران. رایانامه: m.khosravi@gilrec.co.ir

کامبیز شاهرودی *
* نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مدیریت بازرگانی، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران. رایانامه: shahroudi@iaurasht.ac.ir

علیرضا امیرتیموری
استاد، گروه ریاضی، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران. رایانامه: ateimoori@iaurasht.ac.ir

نرگس دل‌افروز
استادیار، گروه مدیریت بازرگانی، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران. رایانامه: delafrooz.n@iaurasht.ac.ir

چکیده

هدف: صنعت برق یکی از شاهرگ‌های حیاتی توسعه کشورها محسوب می‌شود و شاخص دسترسی به برق، جزء اصلی‌ترین مؤلفه‌های ارزیابی میزان رقابت‌پذیری صنعتی در هر کشور است. با توجه به اهمیت این صنعت استراتژیک، هدف از این مطالعه، طراحی یک مدل تحلیلی ـ ریاضی، به‌منظور سنجش کارایی زنجیره تولید، انتقال و توزیع صنعت برق ایران است.

روش: روش استفاده‌شده در این مطالعه، به‌کارگیری مدل‌های شبکه‌ای تحلیل پوششی داده‌ها با حضور خروجی‌های نامطلوب است. بر مبنای این روش، مدلی ارائه شد تا از طریق آن بتوان کارایی بخش‌های سه‌گانه تولید، انتقال و توزیع زنجیره صنعت برق ایران را محاسبه کرد.

یافته‌ها: از طریق حل مدل ریاضی این مطالعه، میزان کارایی ۴۳ نیروگاه دولتی، ۱۶ شرکت برق منطقه‌ای و ۳۹ شرکت توزیع در ساختار صنعت برق ایران محاسبه شد. بر اساس یافته‌ها، میانگین کارایی بخش‌های تولید، انتقال و توزیع، به‌ترتیب ۰/۸۳، ۰/۶۴ و ۰/۷۱ است.

نتیجه‌گیری: نتایج کلی بیانگر آن است که در زنجیره صنعت برق ایران، میزان کارایی بخش انتقال از کارایی دو بخش تولید و توزیع پایین‌تر است. از جمله نتایج دیگر این مطالعه، شناسایی دلیل اصلی ناکارایی بخش‌های تولید، انتقال و توزیع صنعت برق ایران است.

کلیدواژه‌ها: ارزیابی عملکرد، کارایی، تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای، خروجی نامطلوب، صنعت برق ایران.

استناد: خسروی، محمدرضا؛ شاهرودی، کامبیز؛ امیرتیموری، علیرضا و دل‌افروز، نرگس (۱۴۰۱). طراحی مدل تحلیلی ـ ریاضی به‌منظور سنجش کارایی زنجیره تولید، انتقال و توزیع صنعت برق ایران: رویکرد تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای با خروجی نامطلوب. *مدیریت صنعتی*، ۱۴(۲)، ۲۲۰ – ۲۴۹.

مدیریت صنعتی، ۱۴۰۱، دوره ۱۴، شماره ۲، صص. ۲۲۰- ۲۴۹
ناشر: دانشکدهٔ مدیریت دانشگاه تهران
نوع مقاله: علمی پژوهشی
© نویسندگان
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۴
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۵
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۴/۲۹
doi: https://doi.org/10.22059/IMJ.2022.339078.1007925

مقدمه

انرژی به‌عنوان یکی از نهاده‌های اصلی تابع تولید در کنار سرمایه و نیروی کار از جایگاه ویژه‌ای در فرایند تولید و توسعه اقتصادی کشورها برخوردار است (داسیلوا، کاستا، آن و لوپز[1]، ۲۰۱۹ ؛ توسلی، کتابی و قندهاری[2]، ۲۰۲۰). بدین جهت، مطالعات در حوزه‌های روند تحولات سیستم انرژی، بررسی نوسانات مصرف انرژی، صرفه‌جویی در مصرف و همچنین کاهش شدت انرژی یا افزایش کارایی انرژی از جمله مواردی است که اهمیت خاصی در مطالعات اقتصادی دارد (بی، سانگ، جو و لیانگ[3]، ۲۰۱۴ ؛ موشین، حنیف، تقی‌زاده، عباس و اقبال[4]، ۲۰۲۱). از میان انواع اشکال انرژی، انرژی الکتریکی گونه‌ای از انرژی است که دارای کاربردهای منحصر به‌فردی بوده و می‌تواند در برخی زمینه‌ها جایگزین منابع مختلف انرژی باشد (توسلی، فرامرزی و فرضی پور صائن[5]، ۲۰۱۵). به بیان دیگر، انرژی الکتریکی پیش‌نیازی مهم در حوزه‌های اقتصادی و اجتماعی و رفاهی در کلیه جوامع و کشورها اعم از توسعه‌یافته یا درحال توسعه، محسوب می‌شود. به‌ویژه در کشورهای درحال توسعه یا کمتر توسعه‌یافته، در دسترس بودن برق با کیفیت، استاندارد و با قابلیت اطمینان بالا، همراه با قیمت‌های معقول، نقش بسزایی در رشد و توسعه اقتصادی و اجتماعی دارد (خسروی، شاهرودی، امیرتیموری و دل‌افروز، ۱۴۰۰). اهمیت انرژی الکتریکی و نقش آن در توسعه و رفاه کشورها تا جایی است که دولت‌ها این صنعت را به‌عنوان یکی از صنایع زیرساخت قلمداد کرده و به‌طور ویژه بر آن نظارت می‌نمایند. این صنعت به‌دلیل نقش زیربنایی و ارتباط زیادی که با کلیه عوامل مؤثر بر رشد اقتصادی دارد، صنعتی پویا و تأثیرگذار است (توسلی و همکاران، ۲۰۲۰).

عملکرد صنعت برق از جنبه‌های مختلف می‌تواند توسط شبکه‌های چندگانه‌ای مدل‌سازی شود؛ به‌نحوی که شناخت و فهم هر یک از این شبکه‌ها می‌تواند تأثیر مستقیمی بر شناخت و درک عملکرد صنعت برق از منظرهای گوناگون داشته باشد. در این مطالعه، عملکرد صنعت برق از دو بُعد «شبکه فیزیکی» و «شبکه تجاری یا بازرگانی» بررسی می‌شود. از دیدگاه «شبکه فیزیکی»، صنعت برق به سه بخش «تولید»، «انتقال» و «توزیع» تقسیم می‌شود (سوشی و گوتو[6]، ۲۰۱۷؛ مونتکو ایران، ۱۳۹۲: ۵۷). بخش تولید شامل نیروگاه‌های برق است که معمولاً به دور از مناطق پرجمعیت ساخته می‌شوند. بخش انتقال شامل شرکت‌های برق منطقه‌ای است که مالک شبکه انتقال برق بوده و انرژی الکتریکی را در فواصل دور جابه‌جا کرده و از نیروگاه‌ها به مشترکان عمده یا شبکه توزیع تحویل می‌دهند و در نهایت بخش توزیع شامل شرکت‌های توزیع نیروی برق می‌باشند که این شرکت‌ها نیز مالک شبکه توزیع برق هستند و پس از کاهش ولتاژ در پست‌ها، انرژی الکتریکی را تا مشترکان نهایی می‌رسانند (مونتکو ایران، ۱۳۹۲: ۵۷). از دیدگاه «شبکه تجاری یا بازرگانی»، برق کالایی قابل مبادله مانند دیگر کالاها است که می‌تواند داد و ستد شود؛ اما از دیدگاه ساختار فیزیکی، مبادله برق به‌طور کامل با داد و ستد دیگر کالاها متفاوت است. به بیان دیگر، بهره‌برداری از صنعت برق به‌دلیل دوگانگی بین کسب‌وکار برق و ساختار فیزیکی آن بسیار مشکل است. تفاوت اساسی این است که ذخیره‌سازی برق در مقیاس

1. Dasilva, Costa, Ahn & Lopes
2. Tavassoli, Ketabi & Ghandehari
3. Bi, Song, Zhou & Liang
4. Mohsin, Hanif, Taghizadeh-Hesary, Abbas & Iqbal
5. Tavassoli, Faramarzi & Farzipoor Saen
6. Sueyoshi & Goto

انبوه از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نیست و به این دلیل، برق فقط می‌تواند به‌صورت لحظه‌ای مبادله شود. این موضوع اثر زیادی بر نحوه مدیریت برق به‌عنوان یک کالای قابل تجارت داشته و در مقایسه با سایر کالاها، قیود زیادی بر سر راه قیمت کنونی و آینده آن به‌وجود می‌آورد. از این رو، نحوه کارایی و عملکرد بخش‌های سه‌گانه شبکه فیزیکی برق و نوع تعامل آنها با یکدیگر موضوع مهمی است که به‌طور یکپارچه و جامع کمتر به آن پرداخته شده است.

یکی از روش‌هایی که می‌توان از طریق آن کارایی زنجیره صنعت برق را مدل‌سازی و برآورد نمود، روش تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)[1] است. تحلیل پوششی داده‌ها یکی از روش‌های ناپارامتریک ارزیابی کارایی و از جمله پرکاربردترین این روشها در زمینه‌های کنترل، مدیریت و تصمیم‌گیری محسوب می‌شود (تان، وانکه، آنتونس و امروزنژاد[2]، ۲۰۲۱). به‌دلیل ماهیت چندمرحله‌ای زنجیره تولید، انتقال و توزیع صنعت برق ایران و از آنجایی که در مدل‌های پایه‌ای تحلیل پوششی داده‌ها، فرایندهای داخلی واحدهای تصمیم گیرنده نادیده گرفته می‌شوند (وو، یین، سان، چو و لیانگ[3]، ۲۰۱۶؛ لی، چن، لیانگ و شی[4]، ۲۰۱۲)، لذا در این مطالعه از مدل‌های شبکه‌ای تحلیل پوششی داده‌ها برای مدل‌سازی کارایی زنجیره صنعت برق ایران استفاده شده است.

مسئله مهم دیگری که می‌بایست در مدل‌سازی برای سنجش کارایی صنعت برق ایران به آن توجه ویژه‌ای نمود، موضوع خروجی‌های نامطلوب است. موضوع تلفات برق به‌عنوان یکی از مصادیق خروجی‌های نامطلوب در فرایند تولید، انتقال و توزیع برق، از مسائل مهم و مورد توجه صنعت برق در سال‌های اخیر است. با توجه به این که فرایند تولید، انتقال و توزیع انرژی برق همواره با درصدی تلفات انرژی همراه است، بنابراین اندازه‌گیری کارایی صنعت برق بدون درنظرگرفتن این خروجی‌های نامطلوب از اعتبار کافی برخوردار نیست (خدادادی‌پور، هادی ونچه، بهزادی و رستمی مال‌خلیفه[5]، ۲۰۲۱). بر اساس گزارش‌ها، تلفات برق در شبکه‌های انتقال و توزیع با جایگاه فنی صنعت برق ایران نسبت به جهان هم‌خوانی ندارد و رقمی نزدیک به ۱۰ میلیارد دلار زیان ثابت و متغیر به کشور وارد می‌کند (مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۱۳۹۴). با توجه به موارد فوق اهمیت سنجش کارایی در زنجیره صنعت برق ایران بیشتر مشخص می‌شود. لذا در این مطالعه برای نخستین بار، در قالب یک فرایند سه مرحله‌ای، مدلی تحلیلی ـ ریاضی برای سنجش کارایی شرکت‌های تولید برق، شرکت‌های برق منطقه‌ای و شرکت‌های توزیع نیروی برق که وظیفه تولید، انتقال و توزیع نیروی برق را در ساختار صنعت برق ایران برعهده دارند، ارائه می‌شود.

پیشینه پژوهش

در بخش پیشینه پژوهش، ابتدا پیشینه نظری پژوهش شامل تشریح مفاهیم و مدل‌های سنجش کارایی با استفاده از تکنینک تحلیل پوششی داده‌ها بررسی می‌شود. در بخش دوم، پیشینه تجربی پژوهش، شامل مطالعات مرتبط با سنجش کارایی صنعت برق در ایران و جهان به‌روش تحلیل پوششی داده‌ها مرور می‌شود.

1. Data Envelopment Analysis
2. Tan, Wanke, Antunes & Emrouznejad
3. Wu, Yin, Sun, Chu & Liang
4. Li, Chen, Liang & Xie
5. Khodadadipour, Hadi-Vencheh, Behzadi, & Rostamy-malkhalifeh

پیشینه نظری پژوهش

نخستین بار فارل[1] در سال ۱۹۵۷ به تعیین کارایی به‌روش غیرپارامتری پرداخت. پس از آن چارنز، کوپر و رودز[2] (۱۹۷۸) با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی، روش ناپارامتریک فارل را برای سیستمی با ورودی‌ها و خروجی‌های چندگانه تعمیم دادند و عنوان «تحلیل پوششی داده‌ها»[3] از این زمان، به مجموعه مدل‌های توسعه یافته برنامه‌ریزی ریاضی در این زمینه اطلاق گردید. مدل چارنز، کوپر و رودز که در آن بازده به مقیاس، ثابت فرض می‌شود به‌نام مدل CCR معروف شد و پس از آن بنکر، چارنز و کوپر[4] (۱۹۸۴) روش CCR را برای حالت‌های بازده به مقیاس متغیر تعمیم دادند که مدل پیشنهادی آنها به BCC معروف شد. تحلیل پوششی داده‌ها روشی مبتنی بر رویکرد بهینه‌سازی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی است و برای ارزیابی نسبی واحدهای تصمیم‌گیرنده (DMU)[5] که وظایف یکسانی را انجام می‌دهند، به‌کار می‌رود (سوشی و گوتو، ۲۰۱۷؛ هاوسل، سوواری و ستودورای[6]، ۲۰۲۰). از لحاظ ریاضی، DEA نوعی متدولوژی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی است که کارایی هر واحد تصمیم‌گیرنده را بر اساس ناحیهٔ امکان تولید که به‌وسیلهٔ همهٔ DMU ها تعیین می‌شود، محاسبه می‌کند و مزیت شایان توجه آن، بی‌نیازبودنش به تعیین مشخصات پارامتریک (همچون تابع تولید) برای به‌دست آوردن امتیازهای کارایی است (سیریوپولوس و زیوکیدیس[7]، ۲۰۱۰).

مدل‌های سنتی تحلیل پوششی داده‌ها تنها از یک فرایند برای ارزیابی کارایی حاصل از چندین ورودی و خروجی استفاده می‌کنند. این مدل‌ها در ارزیابی زیرفرایندها یا فرایندهای داخلی سازمان ناتوان هستند و سنجش کارایی را به ورودی‌های اولیه و خروجی‌های نهایی محدود می‌کنند. بنابراین نتایج ارزیابی عملکرد بر مبنای چنین مدل‌هایی ممکن است مانع دستیابی به اطلاعات مدیریتی با ارزشی شود. از طرفی از آنجایی که در راستای اندازه‌گیری کارایی واحدهای تصمیم‌گیرنده با این شیوه، فرایندهای داخلی آن در نظرگرفته نمی‌شود یا به عبارتی دیگر واحدهای تصمیم‌گیرنده را به‌عنوان «جعبه سیاه» در نظر می‌گیرد، نه تنها ارزیابی دقیقی از کارایی سازمان ارائه نمی‌دهد، بلکه در صورت ناکارا شدن زنجیره تأمین نمی‌توان مشخص کرد که کدام یک از اعضای زنجیره باعث ایجاد ناکارایی شده است (منزلی، دانشیان، توحیدی، صناعی و رضویان[8]، ۲۰۲۰، لی و همکاران، ۲۰۱۲).

به‌منظور برطرف نمودن این مشکل، فار و گراسکف[9] (۲۰۰۰) بر اساس تحقیق نیشی میزو و هالتن (۱۹۷۸) در مطالعه خود ضمن اشاره به ضعف مدل‌های سنتی تحلیل پوششی داده‌ها، به معرفی «تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای»[10] و تشریح اهمیت آن در تحلیل دقیق‌تر کارایی واحدهای تصمیم‌گیرنده پرداختند. این مدل، یک واحد تصمیم‌گیرنده را با تمامی زیرواحدها و ارتباطات موجود در آن به‌صورت ساختار شبکه‌ای در نظر می‌گیرد. در این مدل

1. Farell
2. Charnes, Cooper &Rhodes
3. Data Envelopment Analysis
4. Banker, Charnes & Cooper
5. Decision Making Units
6. Hafsal, Suvvari & Sethu Durai
7. Siriopoulos & Tziogkidis
8. Monzeli, Daneshian, Tohidi, Sanei, & Razavian
9. Fare & Grosskopf
10. Network DEA

فرض می‌شود که سیستم تحت ارزیابی، شامل چندین واحد تصمیم‌گیرنده مشابه هم باشد که هر واحد خود شامل چندین زیرواحد به هم مرتبط است (صالح‌زاده و همکاران، ۱۳۹۰).

پس از معرفی مدل‌های تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای، مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده و مدل‌های مختلفی با کاربردهای گوناگون در صنایع مختلف برای آن ارائه گردید. شهریاری و لاهیجی (۱۳۹۶) مدل‌های تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای را از دو دیدگاه طبقه‌بندی کردند. اولین دیدگاه، طبقه‌بندی مدل‌های شبکه‌ای بر اساس ساختار شبکه و نوع فرایند واحدهای تصمیم‌گیرنده است. مدل‌های شبکه‌ای در این دیدگاه به سه ساختار «سری»، «موازی» و «ترکیبی» تقسیم می‌شوند. همچنین در دیدگاه دوم، مدل‌های تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای بر اساس روش محاسبه کارایی شبکه به مدل‌های مضربی و پوششی تقسیم شده‌اند. در یک طبقه‌بندی جامع دیگر، کائو[1] (۲۰۱۴) ساختارهای شبکه‌ای را به پنج دسته «سری»، «موازی»، «ترکیبی»، «سلسله مراتبی» و «پویا» تقسیم‌بندی کرد. در این مطالعه، با استفاده یک ساختار سری شبکه‌ای، به مدل‌سازی و ارزیابی کارایی زنجیره صنعت برق ایران پرداخته خواهد شد. ساختار سری به تعدادی از فرایندهای متوالی متصل به‌هم اشاره دارد، که در آن هر فرایند ورودی‌های برون‌زا و محصولات واسطه‌ای تولید شده توسط فرایندهای قبلی را مصرف و خروجی‌های برون‌زا و محصولات واسطه‌ای تولید شده برای فرایندهای بعدی را تولید می‌کند. (حسن زاده، ۱۳۹۶) اگرچه یک سیستم سری می‌تواند فرایندهای زیادی داشته باشد، اما بزرگ‌ترین سیستمی که در ادبیات موضوع بررسی شده است تنها دارای پنج فرایند می‌باشد. در این راستا، پارک و پارک[2] (۲۰۰۹) یک سیستم چند دوره‌ای بدون محصولات واسطه‌ای را مطالعه نمودند. مدل آنها یک مدل اندازه‌گیری فاصله سیستم سنتی می‌باشد و برای اندازه‌گیری عملکرد ۲۰ واحد عملیاتی خدمات تلویزیون در کره جنوبی برای دوره ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۱ استفاده شده است. وی، یان و پنگ[3] (۲۰۱۱) یک سیستم پایه چندمرحله‌ای را بدون محصولات واسطه‌ای مورد بررسی قرار دادند. هدف مدل آنها یافتن مینیمم مجموع پارامترهای فاصله مرتبط با همه فرایندها از دو جهت ورودی و خروجی می‌باشد. آنها نشان دادند که سیستم کاراست اگر و فقط اگر همه فرایندها به‌صورت مستقل کارا باشند.

متئوس[4] (۲۰۱۳) مدیریت ریسک و کارایی مدیریتی ۱۵ بانک را با یک مدل اندازه‌گیری مبتنی بر متغیرهای کمکی[5] در چین مطالعه نمودند. این سیستم به سه فرایند تقسیم شده است که در آن وام‌های غیرقابل بازگشت، ورودی‌های سومین فرایند می‌باشند. سوتسوی و گوتو (۲۰۰۹) از یک مدل SBM موزون برای مطالعه عملکرد ۹۰ شرکت برق در آمریکا استفاده نمودند. در این سیستم پنج فرایند تولید، انتقال، توزیع، فروش و مدیریت عمومی مورد بررسی قرار گرفت و وزن‌ها نشان‌دهنده سهم هزینه هر یک از سطوح می‌باشد. چن، لیانگ و ژو[6] (۲۰۰۹) نشان دادند که مدل پارامتری فاصله فرایند تحت شرایط بازده به مقیاس ثابت معادل این مدل می‌باشد. از آنجایی‌که دوگان مدل مضربی

1. Kao
2. Park & Park
3. Wei, Yan & Pang
4. Matthews
5. Slacks-Based Measure (SBM) Model
6. Chen, Liang & Zhu

کائو و هوانگ[1] (۲۰۰۸) واحدهای ناکارا را به‌درستی بر روی مرز کارا تصویر نمی‌کنند، لیم و ژو[2] (۲۰۱۵) در تکمیل کار آنها نشان دادند که بدون استفاده از تبدیلات چن و همکاران (۲۰۱۰) می‌توان با استفاده از دوگان مدل کائو و هوانگ (۲۰۰۸) علاوه بر تعیین کارایی کل و بخش‌ها، مرز کارا را نیز مشخص نمود.

به‌منظور اندازه‌گیری کارایی مقیاس، کائو و هوانگ (۲۰۱۱) از مدل BCC ورودی‌محور برای اندازه‌گیری کارایی مقیاس اولین فرایند و از مدل خروجی‌محور برای اندازه‌گیری کارایی دومین فرایند استفاده کردند و کارایی سیستم را به‌صورت ضرب کارایی تکنیکی و مقیاس تفکیک نمودند. تغییرات در عملکرد سیستم پایه دو مرحله‌ای در دو دوره زمانی با استفاده از مدل رابطه‌ای نیز توسط کائو و هوانگ (۲۰۱۴) مورد مطالعه قرار گرفته است. آنها نشان دادند که شاخص بهره‌وری مالم کوئیست، سیستمی متشکل از ضرب شاخص‌های دو فرایند می‌باشد. ساتیروس، کوروتوکاس و دسپوتیس[3] (۲۰۱۸) با بررسی پارادایم‌ها و رویکردهای موجود در مدل‌های چندمرحله‌ای متوالی، برای انواع فرایندهای دومرحله‌ای مدل‌هایی ارائه کردند. ما، کی و دنگ[4] (۲۰۱۷) ساختار داخلی یک سیستم دومرحله‌ای متوالی – موازی را شبیه‌سازی کرده و هم‌زمان برای تخمین و تجزیه کارایی سیستم از دو رویکرد تحلیل پوششی داده‌های جمعی و مضربی استفاده کردند (سلیمانی دامنه، ۱۳۹۸).

مدل‌های کلاسیک تحلیل پوششی داده‌ها بر این اساس و مبنا استوار است که کاهش میزان ورودی‌ها و افزایش خروجی‌ها، به افزایش کارایی و بهبود عملکرد واحد تحت بررسی منجر می‌شود؛ اما باید به این نکته توجه کرد که لزوماً نگرش کاهش ورودی‌ها و افزایش خروجی‌ها در تمامی مسائل صحیح نیست، زیرا این امکان وجود دارد که برخی از ورودی‌ها و خروجی‌های مسئله موردنظر، نامطلوب باشند (پیکانی و محمدی، ۱۳۹۸). در فرایندهای تولید هدف اصلی سیستم همواره افزایش هم‌زمان خروجی‌های مطلوب و کاهش خروجی‌های نامطلوب است. اما در فرایند تولید واقعی، بیشتر سازمان‌ها قادر نیستند هم‌زمان با کاهش خروجی‌های نامطلوب، خروجی‌های مطلوب خود را نیز افزایش دهند یا حتی ثابت نگه دارند. معمولاً با کاهش خروجی‌های نامطلوب خروجی‌های مطلوب نیز به همان مقدار کاهش پیدا می‌کند که این حالت را دسترسی‌پذیری ضعیف می‌نامند (منزلی و همکاران، ۲۰۲۰).

مطالعه در زمینه خروجی‌های نامطلوب ابتدا توسط کپمن در سال ۱۹۵۱ و سپس توسط فار و همکاران (۱۹۸۹) آغاز گردید. به‌طور کلی تحقیقات انجام شده در این زمینه را می‌توان به دو دسته روش مستقیم و روش‌های غیرمستقیم طبقه‌بندی کرد. رویکرد مستقیم که توسط چامبرز، چانگ و فار[5] (۱۹۹۶) ارایه و سپس توسط چانگ، فار و گراسکف[6] (۱۹۹۷) گسترش داده شد، فرض دسترسی‌پذیری ضعیف خروجی‌های نامطلوب را جایگزین فرض دسترسی پذیری قوی خروجی‌های نامطلوب کرده است. روش غیرمستقیم که توسط سیفورد و ژو[7] (۲۰۰۲) با تغییراتی در مدل ارائه شده توسط

1. Kao & Hwang
2. Lim & Zhu
3. Sotiros, Koronakos & Despotis
4. Ma, Qi & Deng
5. Chambers, Chung & Fare
6. Chung, Fare & Grosskopf
7. Seiford & Zhu

چارنز و همکاران (۱۹۷۸) پیشنهاد شد، خود به دو گروه طبقه‌بندی می‌شود. در گروه اول عوامل نامطلوب به‌عنوان ورودی در نظر گرفته شده و در رویکرد دوم مبتنی بر فرض دسترسی‌پذیری ضعیف شپارد[1] (۱۹۷۰)، رفتار خروجی نامطلوب را مانند خروجی درنظر می‌گیرد، سپس با به‌کارگیری تابع فاصله برای هر رویکرد، مدل جهت‌داری ارائه می‌شود و با به‌کاربردن مدل‌های پایه‌ای تحلیل پوششی داده‌ها مقدار کارایی محاسبه می‌شود (محمدی‌نژاد رشتی، امیرتیموری، کردرستمی و حسین‌زاده لطفی، ۱۴۰۰).

پیشینه تجربی پژوهش

سوشی، یوآن و گوتو[2] (۲۰۱۶) در بررسی خود نشان دادند از میان ۴۰۷ مطالعه‌ای که از سال ۱۹۸۰ تا سال ۲۰۱۶ درخصوص کاربرد مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها در صنایع مرتبط با انرژی انجام شده، در مجموع ۳۲۵ مطالعه (حدود ۸۰ درصد) به موضوعات کارایی انرژی اختصاص داشته و از این میان، تعداد ۱۸۵ مطالعه به موضوع سنجش کارایی شرکت‌های صنعت برق به‌وسیله مدل‌های DEA پرداخته‌اند. نتایج مقاله یادشده بیانگر این است که از میان ۱۸۵ مطالعه صورت‌گرفته در صنعت برق، ۹۷ مطالعه بخش تولید، ۶۱ مطالعه شبکه‌های انتقال و توزیع و ۲۷ مطالعه سایر بخش‌های صنعت برق جهان را مورد بررسی قرار داده‌اند. خسروی و شاهرودی (۱۳۹۳) نیز در مطالعه خود با بررسی بیش از ۶۰ مقاله در حوزه سنجش کارایی صنعت برق جهان به‌روش تحلیل پوششی داده‌ها نشان دادند که به‌جز معدود موارد، نظیر مطالعه گوتو و سوتسی[3] (۲۰۰۸) که دو بخش انتقال و توزیع را بررسی کرده‌اند، عمده مطالعه‌ها، به بررسی بخش‌های سه‌گانه صنعت برق به‌صورت مجزا پرداخته‌اند.

سلیمی و کرامتی (۱۳۹۴) با استفاده از رویکرد سه مرحله‌ای DEA، به بررسی کارایی ۱۶ شرکت برق منطقه‌ای ایران در فاصله زمانی سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۲ پرداختند. رویکرد سه مرحله‌ای مورد بررسی در این مطالعه، شامل بخش‌های تولید، انتقال و فوق‌توزیع بود. در واقع اگر چه در این مطالعه، از رویکرد سه‌مرحله‌ای برای سنجش کارایی شرکت‌ها استفاده شده؛ اما سنجش کارایی صرفاً به ۱۶ شرکت برق منطقه‌ای (بخش انتقال نیرو در صنعت برق) محدود شده است. این در حالی است که در ساختار صنعت برق ایران، ۹۵ شرکت با عناوین مختلف شامل ۳۵ شرکت مدیریت تولید برق، ۱۶ شرکت برق منطقه‌ای، ۳۳ شرکت توزیع نیروی برق استانی به‌علاوه ۶ شرکت توزیع نیروی برق کلان‌شهرهای کشور نقش‌آفرینی می‌کنند که در مطالعه سلیمی و کرامتی مغفول مانده‌اند.

شفیعی نیک‌آبادی، یاکیده و اویسی عمران (۱۳۹۶) نیز در مطالعه دیگری بخش‌های تولید و انتقال نیروی برق ایران را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه نیز بخش‌های تولید و انتقال صرفاً به شرکت‌های برق منطقه‌ای محدود گردیده و عملاً کارایی ۱۶ شرکت برق منطقه‌ای بررسی شده است. نکته‌ای که در این مطالعه مغفول مانده این است که مدل مورد بررسی و تعداد شرکت‌های بررسی شده با ساختار صنعت برق مطابقت ندارد. این انتقاد به مطالعه خلیلی دامغانی و شهمیر[4] (۲۰۱۵) نیز وارد است. آنها نیز در مطالعه خود فرایند دو مرحله‌ای تولید و انتقال نیروی برق را مورد

1. Shephard
2. Sueyoshi, Yuan & Goto
3. Goto & Tsutsui
4. Khalili-Damghani & Shahmir

بررسی قرار دادند؛ اما عملاً کارایی ۱۴ ناحیه تولید و انتقال برق را در فاصله زمانی سال‌های ۲۰۰۶ لغایت ۲۰۱۲ مورد بررسی قرار داده‌اند.

رادسر، کاظمی، مهرگان و رضوی حاجی آقا (۱۴۰۰) نیز با به‌کارگیری مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای نمرات کارایی کل و نمرات کارایی فرایندهای تولید، انتقال و توزیع برق ایران را محاسبه نمودند. این مطالعه نیز اگر چه ادعای سنجش کارایی هر سه بخش تولید، انتقال و توزیع نیروی برق ایران را داشته و از متغیرهای ورودی و خروجی مربوط به این بخش‌ها نیز استفاده نموده است، اما محاسبات کارایی آن به ۱۶ ناحیه برق محدود شده است و در واقع مدل تحلیلی این مطالعه، عملاً با ساختار موجود صنعت برق ایران مغایرت دارد. به این دلیل که ساختار صنعت برق ایران متشکل از سه گروه شرکت شامل شرکت‌های تولید (نیروگاه‌های برق)، انتقال (شرکت‌های برق منطقه‌ای) و توزیع (شرکت‌های توزیع نیروی برق) است و مدل‌سازی سه‌مرحله‌ای برای سنجش کارایی فرایند تولید، انتقال و توزیع برق ایران می‌بایست به محاسبه کارایی هر سه گروه شرکت‌های یادشده منجر شود که در مطالعه رادسر و همکاران (۱۴۰۰)، این موضوع محقق نشده است.

همچنین در مطالعه توسلی و همکاران (۲۰۲۰) نیز علی‌رغم اینکه مدلی سه مرحله‌ای برای سنجش کارایی بخش‌های تولید، انتقال و توزیع نیروی برق ایران به‌کمک تکنیک تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای ارائه شده است، اما اجرای مدل و نمرات کارایی شرکت‌ها صرفاً به ۱۶ ناحیه انتقال برق محدود گردیده است و کارایی فرایند تولید و توزیع در این مطالعه سنجش و ارائه نشده است.

به‌منظور حل این مشکل و با توجه به اهمیت هر سه بخش تولید، انتقال و توزیع در ساختار صنعت برق ایران، مدل‌سازی به‌منظور سنجش کارایی هر سه بخش یادشده در این مطالعه مورد توجه قرار گرفت و نوآوری این تحقیق در سنجش کارایی هر سه بخش با توجه به نابرابری تعداد واحدهای تصمیم گیرنده در هر بخش است. به بیان دیگر در دنیای واقعی و بر اساس ساختار صنعت برق ایران، تعداد واحدهای بخش تولید (نیروگاه‌ها) و تعداد واحدهای بخش انتقال (شرکت‌های برق منطقه‌ای) و تعداد واحدهای بخش توزیع (شرکت‌های توزیع نیروی برق) با هم برابر نیستند و مدل‌سازی و محاسبه کارایی چنین ساختار شبکه‌ای با تعداد واحدهای نابرابر، جنبه نوآوری و دانش‌افزایی این مطالعه را نشان می‌دهد و از این حیث، مطالعه حاضر با مطالعات پیشینی که در این بخش به آنها اشاره شد، متمایز می‌باشد. در این مطالعه ضمن بررسی مراحل سه‌گانه فرایند تولید، انتقال و توزیع در ساختار صنعت برق ایران، متغیرهای مازاد و اضافه‌ای که در هر مرحله از فرایند وارد سیستم می‌شوند نیز در مدل ارائه شده مورد توجه قرار گرفته و در هر مرحله، با توجه به نوع فعالیت بخش‌های سه‌گانه فرایند صنعت برق، متغیر خروجی که از سیستم خارج می‌شود و متغیرهایی که به‌عنوان خروجی وارد مرحله بعدی می‌شوند (متغیرهای میانی) نیز درنظر گرفته شده و در نهایت، با توجه به اهمیت موضوع کاهش تلفات برق در حفظ امنیت و پایایی شبکه برق کشور و سنجش کارایی شرکت‌های صنعت برق ایران، متغیر تلفات برق در شبکه‌های انتقال و توزیع به‌عنوان یک خروجی نامطلوب شرکت‌های برق منطقه‌ای و شرکت‌های توزیع نیروی برق، در مدل مورد بررسی، لحاظ گردیده است. با توجه به توضیحات فوق، در جدول ۱ خلاصه‌ای از مطالعات مرتبط گذشته و رویکرد آنها در حل مسئله کارایی صنعت برق ارائه می‌گردد:

جدول ۱. خلاصه مطالعات پیشین در زمینه ارزیابی کارایی صنعت برق به‌روش DEA

نام محقق	کشور	متغیرهای ورودی	متغیرهای خروجی	بخش مورد بررسی			نوع رویکرد DEA			نوع داده‌ها		خروجی نامطلوب	متغیر مازاد
				تولید	انتقال	توزیع	مدل پایه	دو مرحله‌ای	سه مرحله‌ای	قطعی	فازی		
خدادادی پور و همکاران (۲۰۲۱)	آنگولا	– ظرفیت تولید برق – تعداد کارکنان	– تولید CO_2 – میزان آلودگی آب – میزان آلودگی هوا – تولید انرژی	✓	–	–	✓	–	–		✓	✓	–
موشین و همکاران (۲۰۲۱)	۴۸ کشور جهان	– تعداد کارکنان – میزان مصرف انرژی	– تولید CO_2 – تولید ناخالص داخلی	✓	✓	✓	✓	–	–	✓	–	✓	–
سوشی و همکاران (۲۰۲۰)	چین	– ظرفیت تولید – تعداد کارکنان – میزان انرژی برق	– تولید CO_2 – تولید انرژی	✓	–	–	✓	–	–	✓	–	✓	–
فلاحی و همکاران (۲۰۱۹)	ایران	– طول خطوط – ظرفیت ترانسها – تعداد کارکنان	– فروش برق – تعداد مشترک – مساحت تحت پوشش	–	–	✓	✓	–	–	✓	–	–	–
سیفرد، کالمن و هیرش‌هاسن (۲۰۱۶)	آلمان	– میزان سرمایه‌گذاری – تعداد کارکنان – مصرف سوخت	- تولید CO_2 – تولید انرژی	✓	–	–	✓	–	–	✓	–	✓	–
مولارکی و همکاران (۲۰۱۵)	ایرلند	– تعداد کارکنان – طول خط شبکه – ظرفیت ترانس‌ها	– مصرف خالص و ناخالص انرژی – تعداد مشترکان – مساحت تحت پوشش	–	–	✓	✓	–	–	✓	–	–	–
رادسر و همکاران (۱۴۰۰)	ایران	– هزینه سوخت – مصرف داخلی – ظرفیت – طول خطوط انتقال – طول شبکه فشار ضعیف و متوسط	– قدرت عملی – انرژی تحویلی – حداکثر بار هم‌زمان – گازهای آلاینده زیست محیطی	✓	✓	✓	–	–	✓	✓	–	✓	✓
شفیعی نیک‌آبادی، یاکیده و اویسی عمران (۱۳۹۶)	ایران	– مصارف داخلی – سوخت مصرفی – حداکثر بار تولیدی – ظرفیت پست‌های انتقال نیرو – طول خطوط انتقال نیرو	– حداکثر بار تولیدی – تولید ویژه – تولید ناویژه – راندمان – قدرت عملی – انرژی تحویلی	✓	✓	✓	–	–	✓	✓	–	–	–

نام محقق	کشور	متغیرهای ورودی	متغیرهای خروجی	بخش مورد بررسی			نوع رویکرد DEA			نوع داده‌ها		خروجی نامطلوب	متغیر مازاد
				تولید	انتقال	توزیع	مدل پایه	دو مرحله‌ای	سه مرحله‌ای	قطعی	فازی		
مطالعه حاضر (۱۴۰۰)	ایران	**بخش تولید:** – قدرت نامی – ارزش حرارتی – سوخت مصرفی – مصارف داخلی **بخش انتقال:** – تعداد کارکنان – طول خطوط – ظرفیت پست‌ها – دریافت انرژی **بخش توزیع:** – تعداد کارکنان – ظرفیت ترانس – طول شبکه توزیع	**بخش تولید:** – تولید ویژه – بازده حرارتی – راندمان **بخش انتقال:** – ارسال انرژی – تحویل به توزیع – تلفات انتقال **بخش توزیع:** – مساحت تحت پوشش – فروش برق – تلفات توزیع	✓	✓	✓	–	–	✓	✓	–	✓	✓

روش‌شناسی پژوهش

در بخش روش‌شناسی پژوهش، ابتدا متغیرهای ورودی و خروجی مدل و نحوه انتخاب آنها تشریح می‌شود. پس از آن مدل تحلیلی زنجیره صنعت برق ایران شامل سه فرایند تولید، انتقال و توزیع به‌همراه نوع ارتباط میان متغیرهای ورودی و خروجی هر بخش ارائه می‌شود. در ادامه با اشاره به مفروضات مدل ریاضی مطالعه، مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای در حضور خروجی‌های نامطلوب برای سنجش کارایی بخش‌های سه‌گانه تولید، انتقال و توزیع صنعت برق ایران تشریح خواهد شد.

تعیین متغیرهای ورودی و خروجی زنجیره صنعت برق ایران

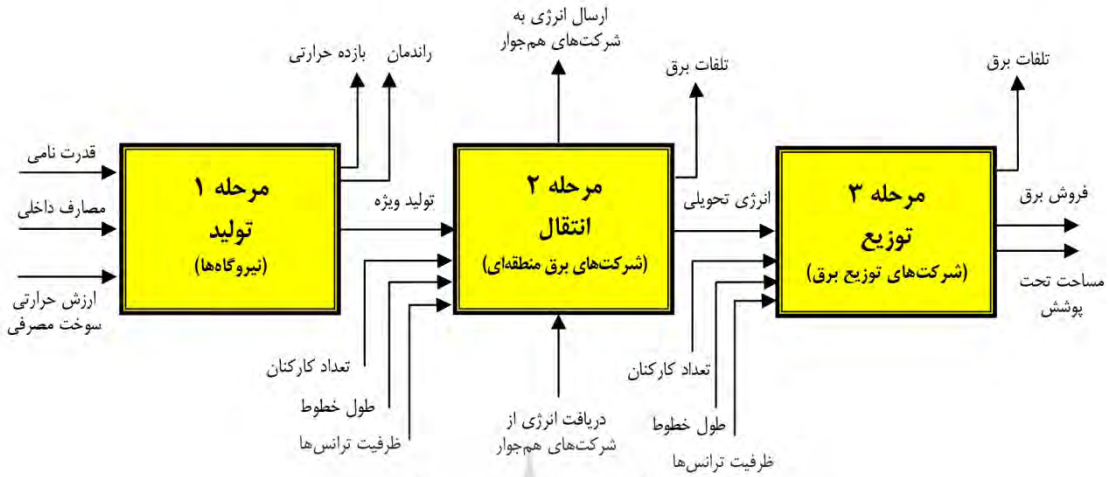
به‌منظور انتخاب متغیرهای ورودی و خروجی مطلوب و نامطلوب در این مطالعه، ابتدا بیش از ۱۰۰ عنوان مطالعه در زمینه ارزیابی کارایی شرکت‌های صنعت برق در بخش‌های تولید، انتقال و توزیع در کشورهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفته و مهم‌ترین متغیرهای ورودی و خروجی شرکت‌های صنعت برق که در مطالعات قبلی دارای بیشترین فراوانی بوده‌اند شناسایی شدند. در گام دوم، به‌منظور استفاده از نظرات متخصصان و کارشناسان ارشد صنعت برق، متغیرهای مهم مشخص شده در بخش قبلی به تفکیک سه بخش تولید، انتقال و توزیع در اختیار متخصصان صنعت برق قرار گرفت و آنها میزان موافقت یا مخالفت خود را با متغیر پیشنهادی اعلام نمودند و متغیرهایی که دارای بیشترین میزان موافقت با آنها از سوی خبرکان اعلام شد انتخاب شدند. در گام سوم به‌منظور بررسی امکان دسترسی به داده‌های مورد نیاز این مطالعه (جهت تعیین متغیرهای ورودی و خروجی)، محقق با مطالعه گزارش‌های آماری مندرج در سالنامه آماری صنعت

برق ایران به بررسی امکان دسترسی به داده‌های آماری مربوط به متغیرهـای ورودی و خروجـی پرداخـت. در نهایـت بـا جمع‌بندی موارد سه‌گانه فوق‌الذکر متغیرهای ورودی و خروجی مؤثر بر عملکرد شرکت‌های تولید، انتقال و توزیـع نیـروی برق که به‌عنوان بازیگران بازار برق در این مطالعه نقش دارند، به شرح جدول ۲ تعیین گردیدند:

جدول ۲. معرفی متغیرهای ورودی و خروجی تحقیق

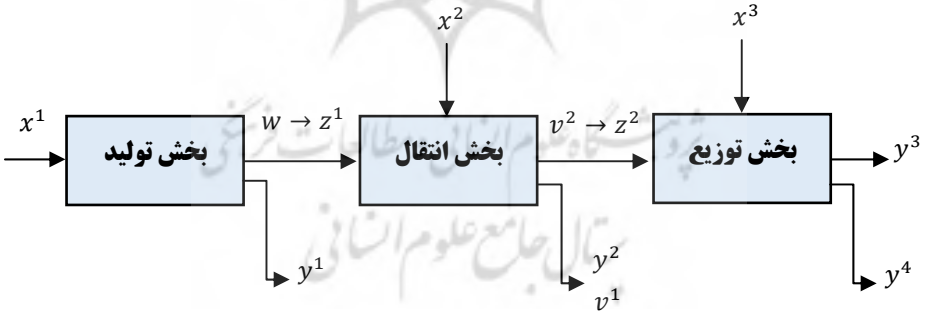
ردیف	نام مرحله	عنوان متغیر	نوع متغیر	واحد سنجش	تعریف متغیر
۱	تولید	قدرت نامی (ظرفیت نصب شده)	ورودی	مگاوات	قدرت نامی یک دستگاه تولید برق از طرف سازنده بر روی پلاک مشخصات آن نوشته شده است.
۲		ارزش حرارتی سوخت مصرفی	ورودی	کیلوکالری بر کیلووات ساعت	مقدار انـرژی حرارتـی کـه از سـوختن یـک واحـد سوخت حاصل می‌شود.
۳		مصارف داخلی	ورودی	میلیون کیلووات ساعت	مقدار انرژی الکتریکی که توسط تجهیزات کمکی و جنبی یک واحد تولی برق مصرف می‌شود.
۴		تولید ویژه	خروجی میانی	میلیون کیلووات ساعت	از تولید انرژی برق ناویژه منهـای مصـرف داخلـی نیروگاه‌ها در یک دوره معین
۵		بازده حرارتی	خروجی نهایی	کیلوکالری بر کیلووات ساعت	مقدار خالص انرژی تولیدی بـه مقـدار کـل انـرژی ورودی
۶		راندمان	خروجی نهایی	درصد	تقسیم انرژی حرارتی یـک کیلـووات سـاعت بـرق (۸۶۰) بر انرژی حرارتی مصرفی ضرب در ۱۰۰
۷	انتقال	تعداد کارکنان بخش انتقال	ورودی	نفر	تعداد منـابع انسـانی شـاغل در شـرکت‌هـای بـرق منطقه‌ای ایران
۸		طول خطوط انتقال و فوق‌توزیع	ورودی	کیلومترمدار	عبارتست از میانگین طول واقعی هادی یک مدار از پست مبدا تا پست مقصد
۹		ظرفیت ترانسفورماتورها	ورودی	مگاولت آمپر	ظرفیت نامی ایستگاه برق بر اساس مجموع قـدرت ظاهری ترانسفورماتورهای نصب شده در آن
۱۰		دریافت انرژی از شرکت‌های هم‌جوار	ورودی	میلیون کیلووات ساعت	میزان انرژی دریافتی از شرکت‌هـای هـم‌جـوار بـر اساس نمودار تبادلات انرژی
۱۱		ارسال انرژی به شرکت‌های هم‌جوار	خروجی میانی	میلیون کیلووات ساعت	میزان انرژی ارسالی به شرکت‌هـای هـم‌جـوار بـر اساس نمودار تبادلات انرژی
۱۲		تحویل انرژی به شرکت توزیع	خروجی میانی	میلیون کیلووات ساعت	میزان انرژی تحویلی به شرکت‌های توزیع نیـروی برق
۱۳		تلفات بخش انتقال	خروجی‌نامطوب	درصد	تلفاتی است که در تجهیزات و خطـوط انتقـال در یک شبکه یا سیستم معین پدیدار می‌شود
۱۴	توزیع	تعداد کارکنان بخش توزیع	ورودی	نفر	تعداد منابع انسانی شـاغل در شـرکت‌هـای توزیـع نیروی برق ایران
۱۵		ظرفیت ترانسفورماتورهای توزیع	ورودی	مگاولت آمپر	ظرفیت نامی پست‌های زمینی و هوایی بـر اسـاس مجموع قدرت ترانسفورماتورهای نصب شده
۱۶		طول شبکه توزیع	ورودی	کیلومتر	خطـوط و پسـت‌هـای هـوایی و زمینـی متوسـط و ضعیف برای توزیع انرژی برق در محدوده معین
۱۷		مساحت تحت پوشش	خروجی نهایی	کیلومترمربع	میزان مساحت تحت پوشش توزیع نیروی بـرق در حوزه محل ماموریت
۱۸		فروش انرژی برق	خروجی نهایی	میلیون کیلووات ساعت	فروش برق به مشترکان که بر اسـاس تعرفـه‌هـای تعیین شده توسط وزارت نیرو انجام می‌گیرد.
۱۹		تلفات بخش توزیع	خروجی‌نامطوب	درصد	تلفات انرژی است که در تجهیزات و خطوط توزیـع در یک شبکه یا سیستم معین پدیدار می‌شود.

با توجه به شناسایی متغیرهای ورودی و خروجی و همچنین با توجه به نوع تعامل بازیگران بازار برق ایران در زنجیره صنعت برق ایران، مدل تحلیلی مطالعه حاضر به‌صورت شکل ۱ ارائه می‌گردد:



شکل ۱. مدل تحلیلی مطالعه – فرایند سه مرحله‌ای زنجیره صنعت برق ایران

با توجه به مدل تحلیلی زنجیره صنعت برق ایران، مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای با حضور خروجی‌های نامطلوب به‌صورت شکل ۲ ارائه می‌شود:



شکل ۲. مدل سه مرحله‌ای زنجیره تولید، انتقال و توزیع صنعت برق ایران

معرفی متغیرها، پارامترها و اندیس‌ها

برای اندازه‌گیری کارایی نسبی یک واحد تصمیم‌گیرنده در میان n واحد تصمیم‌گیرنده که همگی چندین ورودی را مصرف می‌کنند تا خروجی‌های مشابه تولید نمایند، پارامترها، اندیس‌ها، متغیرهای تصمیم و وزن‌هایی به شرح جدول ۳ درنظر گرفته می‌شوند:

جدول ۳. معرفی و تعریف متغیرها، پارامترها، اندیس‌ها و وزن‌های مربوط به مدل مطالعه

متغیر / پارامتر	تعریف
J_1	تعداد واحدهای تصمیم‌گیرنده مرحله تولید (نیروگاه‌ها) $J_1 = \{1,\ldots,43\}$
J_2	تعداد واحدهای تصمیم‌گیرنده مرحله انتقال (شرکت‌های برق منطقه‌ای) $J_2 = \{1,\ldots,16\}$
J_3	تعداد واحدهای تصمیم‌گیرنده مرحله توزیع (شرکت‌های توزیع نیروی برق) $J_3 = \{1,\ldots,39\}$
I	تعداد ورودی‌های مرحله تولید
T	تعداد ورودی‌های مازاد مرحله انتقال
M	تعداد ورودی‌های میانی مرحله انتقال که خروجی مرحله تولید هستند
R	تعداد ورودی‌های مازاد مرحله توزیع
G	تعداد ورودی‌های میانی مرحله توزیع که خروجی مرحله انتقال هستند
x_{ij}	مقدار ورودی i ام واحد j ام مرحله تولید
w_{kj}	مقدار خروجی میانی k ام واحد j ام که از مرحله تولید وارد مرحله انتقال می‌شود.
$y_{qj}^{(1)}$	مقدار خروجی نهایی q ام واحد j ام مرحله تولید که به‌عنوان خروجی نهایی از سیستم خارج می‌شود.
$x_{tj}^{(2)}$	مقدار ورودی مازاد t ام واحد j ام مرحله انتقال؛ ورودی‌هایی جدیدی که از خارج وارد سیستم می‌شوند.
$z_{kj}^{(1)}$	مقدار ورودی k ام واحد j ام مرحله انتقال؛ ورودی‌هایی که به‌عنوان خروجی مرحله تولید، وارد سیستم می‌شوند.
$v_{fj}^{(1)}$	مقدار خروجی نهایی f ام واحد j ام مرحله انتقال؛ خروجی‌هایی که در مرحله انتقال از سیستم خارج می‌شوند.
$v_{pj}^{(2)}$	مقدار خروجی p ام واحد j ام مرحله انتقال؛ خروجی‌های میانی که به‌عنوان ورودی وارد مرحله توزیع می‌شوند.
$y_{mj}^{(2)}$	مقدار خروجی نامطلوب m ام واحد j ام مرحله انتقال
$x_{rj}^{(3)}$	مقدار ورودی مازاد r ام واحد j ام مرحله توزیع؛ ورودی‌های جدیدی که در مرحله توزیع، از خارج وارد سیستم می‌شوند.
$z_{pj}^{(2)}$	مقدار ورودی p ام واحد j ام مرحله توزیع؛ ورودی‌هایی که به‌عنوان خروجی مرحله انتقال، وارد سیستم می‌شوند.
$y_{hj}^{(3)}$	مقدار خروجی نهایی h ام واحد j ام مرحله توزیع؛ خروجی‌هایی که در مرحله توزیع از سیستم خارج می‌شوند.
$y_{gj}^{(4)}$	مقدار خروجی نامطلوب g ام واحد j ام مرحله توزیع
$\lambda_j, \mu_j, \rho_t, \rho_r$	متغیرهای مربوط به واحد مجازی ترکیبی
α_j $j\in J_2$	پارامتر مربوط به تعیین سهم ورودی مرحله انتقال
β_j $j\in J_3$	پارامتر مربوط به تعیین سهم ورودی مرحله توزیع

با توجه به مدل تحلیلی ارائه شده، فرم غیرخطی مدل سه‌مرحله‌ای در حضور محصولات میانی و خروجی‌های نامطلوب به‌منظور سنجش کارایی بخش‌های تولید، انتقال و توزیع صنعت برق ایران تحت فرض بازده به مقیاس متغیر به‌صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$E^* = Min\left[\frac{1}{I}\sum_{i=1}^{I}\theta_i + \frac{1}{T+M}\left(\sum_{t=1}^{T}\delta_t + \sum_{m=1}^{M}\gamma_m\right) + \frac{1}{R+G}\left(\sum_{r=1}^{R}\varphi_r + \sum_{g=1}^{G}\eta_g\right)\right] \quad \text{رابطه ۱)}$$

S.t:

$$\sum_{j\in J_1}\lambda_j^{(1)}x_{ij}^{(1)} \le \theta x_{io}^{(1)}$$

$$\sum_{j\in J_1}\lambda_j^{(1)}w_{kj} \ge w_{ko}$$

$$\sum_{j\in J_1}\lambda_j^{(1)}y_{qj}^{(1)} \ge y_{qo}^{(1)}$$

$$\sum_{j\in J_1}\lambda_j^{(1)} = 1$$

$$\sum_{j\in J_2}\xi_j^{(2)}x_{tj}^{(2)} \le \delta x_{to}^{(2)}$$

$$\sum_{j\in J_2}\phi_j^{(2)}\xi_j^{(2)}z_{nj}^{(1)} \le z_{no}^{(1)}$$

$$\sum_{j\in J_2}\phi_j^{(2)}\xi_j^{(2)}v_{fj}^{(1)} \ge v_{fo}^{(1)}$$

$$\sum_{j\in J_2}\phi_j^{(2)}\xi_j^{(2)}v_{pj}^{(2)} \ge v_{po}^{(2)}$$

$$\sum_{j\in J_2}\phi_j^{(2)}\xi_j^{(2)}y_{mj}^{(2)} = \gamma_m y_{mo}^{(2)}$$

$$\sum_{j\in J_2}\xi_j^{(2)} = 1$$

$$\sum_{j\in J_3}\xi_j^{(3)}x_{rj}^{(3)} \le \varphi_r x_{ro}^{(3)}$$

$$\sum_{j\in J_3}\phi_j^{(3)}\xi_j^{(3)}z_{pj}^{(2)} \le z_{po}^{2}$$

$$\sum_{j\in J_3}\phi_j^{(3)}\xi_j^{(3)}y_{hj}^{(3)} \ge y_{ho}^{(3)}$$

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

$$\sum_{j\in J_3} \phi_j^{(3)} \xi_j^{(3)} y_{gj}^{(4)} = \eta_g y_{go}^{(4)}$$

$$\sum_{j\in J_3} \xi_j^{(3)} = 1$$

$$\sum_{j\in J_3} z_{kj}^{(1)} = \sum_{j\in J_3} w_{kj}$$

$$\sum_{j\in J_3} z_{pj}^{(2)} = \sum_{j\in J_3} v_{pj}^{(2)}$$

$$0 \le \theta_i, \delta_t, \gamma_m, \varphi_r, \eta_g, \phi_j \le 1 \quad \forall i,j,t,m,r,g$$

$$\lambda_j^{(1)}, z_{kj}^{(1)} \ge 0 \quad \forall k,j \in J_1$$

$$\lambda_j^{(2)}, \mu_j^{(2)}, z_{pj}^{(2)}, \xi_j^{(2)} \ge 0 \quad \forall p,j \in J_2$$

$$\lambda_j^{(3)}, \mu_j^{(3)}, \xi_j^{(3)} \ge 0 \quad \forall j \in J_3$$

با توجه به نقش حائز اهمیت منابع (ورودی‌ها) در صنعت برق ایران، تابع هدف مدل، با هدف کاهش میزان ورودی‌ها و خروجی‌های نامطلوب نوشته شده است. درخصوص قیود و محدودیت‌های مدل نیز باید گفت که این مسئله، شامل ۴ دسته قید می‌باشد که در ادامه هر کدام از آنها تشریح می‌شود:

دسته اول قیود مربوط به بخش تولید (نیروگاه‌های تولید برق) را نشان می‌دهند. قید ۱ به‌صورت $\sum \lambda x \le \theta_x$ مربوط به ورودی بخش تولید می‌باشد. قید ۲ به‌صورت $\sum \lambda w \ge w$ مربوط به خروجی بخش تولید است که به‌عنوان ورودی بخش انتقال نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. قید ۳ به‌صورت $\sum \lambda y \ge y$ مربوط به خروجی‌های نهایی بخش تولید است که در مرحله تولید از سیستم خارج می‌شوند و در نهایت قید ۴ به‌صورت $\sum \lambda = 1$ نیز به‌دلیل برقراری شرط بازده به مقیاس متغیر درنظر گرفته شده است.

دسته دوم قیود، مربوط به بخش انتقال (شرکت‌های برق منطقه‌ای) هستند. قید ۵ به‌صورت $\sum(\lambda+\mu)\, x^{(2)} \le \delta x$ ورودی مازادی است که از خارج سیستم در بخش دوم به بخش انتقال وارد می‌شود. قید ۶ به‌صورت $\sum \lambda z^{(1)} \le z$ مربوط به خروجی بخش تولید است که به‌عنوان ورودی بخش انتقال تحت عنوان $Z^{(1)}$ مورد استفاده قرار می‌گیرد. قید ۷ به‌صورت $\sum \lambda v^{(1)} \ge v^{(1)}$ مربوط به خروجی نهایی مطلوب بخش انتقال است که از سیستم خارج می‌شود. همچنین قید۸ به‌صورت $\sum \lambda v^{(2)} \ge v^{(2)}$ مربوط به خروجی مطلوب بخش انتقال است که به‌عنوان ورودی در بخش توزیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نهایت قید ۹ به‌صورت $\sum \lambda y^{(2)} = y$ مربوط به خروجی نهایی نامطلوب بخش انتقال است و به‌دلیل استفاده از فرض دسترسی‌پذیری ضعیف (کاسمانن[1]، ۲۰۰۵ ؛ شفارد[2]، ۱۹۷۰) برای خروجی‌های مطلوب و

1. Kuosmanen
2. Shephard

نامطلوب، این قید به‌صورت تساوی درنظر گرفته شده است. همچنین قید ۱۰ به‌صورت $\sum(\lambda+\mu)=1$ به‌دلیل برقراری شرط بازده به مقیاس متغیر درنظرگرفته شده است.

دسته سوم قیود، به بخش توزیع (شرکت‌های توزیع نیروی برق) مربوط هستند. قید ۱۱ به‌صورت $\sum(\lambda+\mu)\,x\le\varphi x$ مربوط به ورودی بخش توزیع است. قید ۱۲ به‌صورت $\sum\lambda z\le z^{(2)}$ همان خروجی‌های بخش انتقال هستند که تحت عنوان $Z^{(2)}$ به‌عنوان ورودی بخش توزیع درنظر گرفته شده است. قید ۱۳ به‌صورت $\sum\lambda y^{(3)}\ge y^{(3)}$ مربوط به خروجی نهایی مطلوب بخش توزیع است و همچنین قید ۱۴ به‌صورت $\sum\lambda y^{(4)}=y^{(4)}$ مربوط به خروجی نامطلوب بخش توزیع است و به‌دلیل استفاده از فرض دسترسی پذیری شفارد، به‌صورت قید تساوی در مدل لحاظ شده است. در نهایت قید ۱۵ به‌صورت $\sum(\lambda+\mu)=1$ نیز به‌دلیل برقراری شرط بازده به مقیاس متغیر درنظرگرفته شده است.

دسته چهارم، قیود عمومی سیستم را نشان می‌دهد. قید ۱۶ به‌صورت $\sum z^{(1)}=\sum w$ تضمین می‌کند که مجموع ورودی‌های بخش انتقال برق با مجموع خروجی‌های بخش تولید برق یکسان است و قید ۱۷ به‌صورت $\sum z^{(2)}=\sum v^{(2)}$ تضمین می‌کند که مجموع ورودی‌های بخش توزیع و مجموع خروجی‌های بخش انتقال یکسان است.

مدل غیرخطی رابطه ۱ با استفاده از تغییر متغیر کسمانن (۲۰۰۵) به‌صورت $\lambda_j^{(2)}+\mu_j^{(2)}=\xi_j^{(2)}$ و $\lambda_j^{(3)}+\mu_j^{(3)}=\xi_j^{(3)}$ که $\phi_j^{(2)}\xi_j^{(2)}=\lambda_j^{(2)}$ و $\phi_j^{(3)}\xi_j^{(3)}=\lambda_j^{(3)}$ و $\left(1-\phi_j^{(2)}\right)\xi_j^{(2)}=\mu_j^{(2)}$ و $\left(1-\phi_j^{(3)}\right)\xi_j^{(3)}=\mu_j^{(3)}$ تعریف شده، به فرم خطی تبدیل می‌شود. با توجه توضیحات فوق‌الذکر تابع هدف و محدودیت‌های مدل این مطالعه به‌صورت زیر ارائه می‌شوند:

رابطه ۲)
$$E^*=Min\left[\frac{1}{I}\sum_{i=1}^{I}\theta_i+\frac{1}{T+M}\left(\sum_{t=1}^{T}\delta_t+\sum_{m=1}^{M}\gamma_m\right)+\frac{1}{R+G}\left(\sum_{r=1}^{R}\varphi_r+\sum_{g=1}^{G}\eta_g\right)\right]$$

محدودیت‌های بخش تولید:

قید ۱)
$$\sum_{j\in J_1}\lambda_j^{(1)}x_{ij}\le\theta_i x_{io}^{(1)},\quad i=1,\dots,I,$$

قید ۲)
$$\sum_{j\in J_1}\lambda_j^{(1)}w_{kj}\ge w_{ko},\quad k=1,\dots,K,$$

قید ۳)
$$\sum_{j\in J_1}\lambda_j^{(1)}y_{qj}^{(1)}\ge y_{qo}^{(1)},\quad q=1,\dots,Q,$$

قید ۴)
$$\sum_{j\in J_1}\lambda_j^{(1)}=1$$

محدودیت‌های بخش انتقال:

قید ۵)
$$\sum_{j\in J_2}\left(\lambda_j^{(2)}+\mu_j^{(2)}\right)x_{tj}^{(2)}\le\delta_t x_{to}^{(2)},\quad t=1,\dots,T,$$

قید ۶) $$\sum_{j\in J_2}\lambda_j^{(2)}z_{nj}^{(1)}\le z_{no}^{(1)},\quad n=1,\dots,N,$$

قید ۷) $$\sum_{j\in J_2}\lambda_j^{(2)}v_{fj}^{(1)}\ge v_{fo}^{(1)},\quad f=1,\dots,F,$$

قید ۸) $$\sum_{j\in J_2}\lambda_j^{(2)}v_{pj}^{(2)}\ge v_{po}^{(2)},\quad p=1,\dots,P,$$

قید ۹) $$\sum_{j\in J_2}\lambda_j^{(2)}y_{mj}^{(2)}=\gamma_m y_{mo}^{(2)},\quad m=1,\dots,M,$$

قید ۱۰) $$\sum_{j\in J_2}(\lambda_j^{(2)}+\mu_j^{(2)})=1$$

محدودیت‌های بخش توزیع:

قید ۱۱) $$\sum_{j\in J_3}(\lambda_j^{(3)}+\mu_j^{(3)})x_{rj}^{(3)}\le\varphi_r x_{ro}^{(3)},\quad r=1,\dots,R,$$

قید ۱۲) $$\sum_{j\in J_3}\lambda_j^{(3)}z_{pj}^{(2)}\le z_{po}^{2},\quad p=1,\dots,P,$$

قید ۱۳) $$\sum_{j\in J_3}\lambda_j^{(3)}y_{hj}^{(3)}\ge y_{ho}^{(3)},\quad h=1,\dots,H,$$

قید ۱۴) $$\sum_{j\in J_3}\lambda_j^{(3)}y_{gj}^{(4)}=\eta_g y_{go}^{(4)},\quad g=1,\dots,G,$$

قید ۱۵) $$\sum_{j\in J_3}(\lambda_j^{(3)}+\mu_j^{(3)})=1$$

محدودیت‌های عمومی:

قید ۱۶) $$\sum_{j\in J_3}z_{kj}^{(1)}=\sum_{j\in J_3}w_{kj},\quad k=1,\dots,K,$$

قید ۱۷) $$\sum_{j\in J_3}z_{pj}^{(2)}=\sum_{j\in J_3}v_{pj}^{(2)},\quad p=1,\dots,P,$$

$$0\le\theta_i,\delta_t,\gamma_m,\varphi_r,\eta_g\le 1\ \ \forall i,t,m,r,g$$

$$\lambda_j^{(1)},z_{kj}^{(1)}\ge 0\ \ \forall k,j\in J_1$$

$$\lambda_j^{(2)},\mu_j^{(2)},z_{pj}^{(2)}\ge 0\ \ \forall p,j\in J_2$$

$$\lambda_j^{(3)},\mu_j^{(3)}\ge 0\ \ \forall j\in J_3$$

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

برای تعیین میزان و سهم خروجی‌های میانی مراحل تولید و انتقال، از رابطه‌های ۳ و ۴ به شرح ذیل استفاده می‌کنیم. رابطه ۳ مشخص می‌کند که متغیر z_{kj}^{1} (خروجی‌ای که از مرحله تولید وارد مرحله انتقال می‌شود)، چه سهمی از متغیر خروجی w_{kj} را به خود اختصاص می‌دهد. همچنین به‌کمک رابطه ۴ می‌توان مشخص کرد که متغیر z_{pj}^{2} (خروجی‌ای که از مرحله انتقال وارد مرحله توزیع می‌شود) چه سهمی از متغیر خروجی v_{pj}^{2} را به خود اختصاص می‌دهد.

رابطه ۳)
$$\underset{j\in J_2}{z_{kj}^{1}} = \underset{j\in J_2}{\alpha_j}\left(\sum_{j\in J_1} w_{kj}\right) \quad k=1,\dots,K$$

$$\sum_{j\in J_2}\alpha_j = 1$$

رابطه ۴)
$$\underset{j\in J_3}{z_{pj}^{2}} = \underset{j\in J_3}{\beta_j}\left(\sum_{j\in J_2} v_{pj}^{2}\right) \quad p=1,\dots,P$$

$$\sum_{j\in J_3}\beta_j = 1$$

و در نهایت، به‌کمک مدل اندازه بزرگی، پارامترهای α_j و β_j برای تعیین سهم ورودی مرحله انتقال و توزیع از خروجی‌های میانی از طریق رابطه ۵ و رابطه ۶ برآورد می‌شود:

رابطه ۵)
$$MS_j = Max\sum_{t=1}^{T}\rho_t x_{tj}^{(2)}$$
$$s.t.$$
$$\sum_{i=1}^{I}\rho_t x_{tj}^{(2)} \le 1, j\in J_2$$
$$\rho_t, \ge 0 \quad t=1,\dots,T$$
$$\Rightarrow \quad \alpha_j = \frac{MS_j}{\sum_{j\in J_2} MS_j}\left(\sum_{j\in J_2}\alpha_j = 1\right)$$

رابطه ۶)
$$MS_j = Max\sum_{r=1}^{R}\rho_r x_{rj}^{(3)}$$
$$s.t.$$
$$\sum_{r=1}^{R}\rho_r x_{rj}^{(3)} \le 1, j\in J_3$$
$$\rho_r \ge 0 \quad r=1,\dots,R$$
$$\Rightarrow \quad \beta_j = \frac{MS_j}{\sum_{j\in J_3} MS_j}\left(\sum_{j\in J_3}\beta_j = 1\right)$$

برای اثبات شدنی بودن مدل، قضیه ۱ به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

قضیه ۱. مدل خطی ۲ شدنی است.

اثبات. فرض کنید:

$$\lambda_0^{(1)} = 1\,, \lambda_j^{(1)} = 0 \;\; \forall\, j \neq 0$$
$$\lambda_0^{(2)} = 1\,, \lambda_j^{(2)} = 0 \;\; \forall\, j \neq 0$$
$$\mu_j^{(2)} = 0 \;\; \forall\, j$$

$$\lambda_0^{(3)} = 1 , \lambda_j^{(3)} = 0 \ \ \forall j \neq 0$$

$$\mu_j^{(3)} = 0 \ \ \forall j$$

$$\theta_0 = \delta_0 = \gamma_0 = \varphi_0 = \eta_0 = 1 \ , \qquad E_0 = 1$$

این یک جواب شدنی برای مسئله می‌باشد.

یافته‌های پژوهش

با اجرای مدل برنامه‌ریزی خطی برای بخش‌های سه‌گانه زنجیره صنعت برق ایران، کارایی واحدهای تحت بررسی در هر مرحله محاسبه می‌شود. بر این اساس، در جدول ۴ نمره کارایی بخش تولید (نیروگاه‌های تولید برق) ارائه می‌شود:

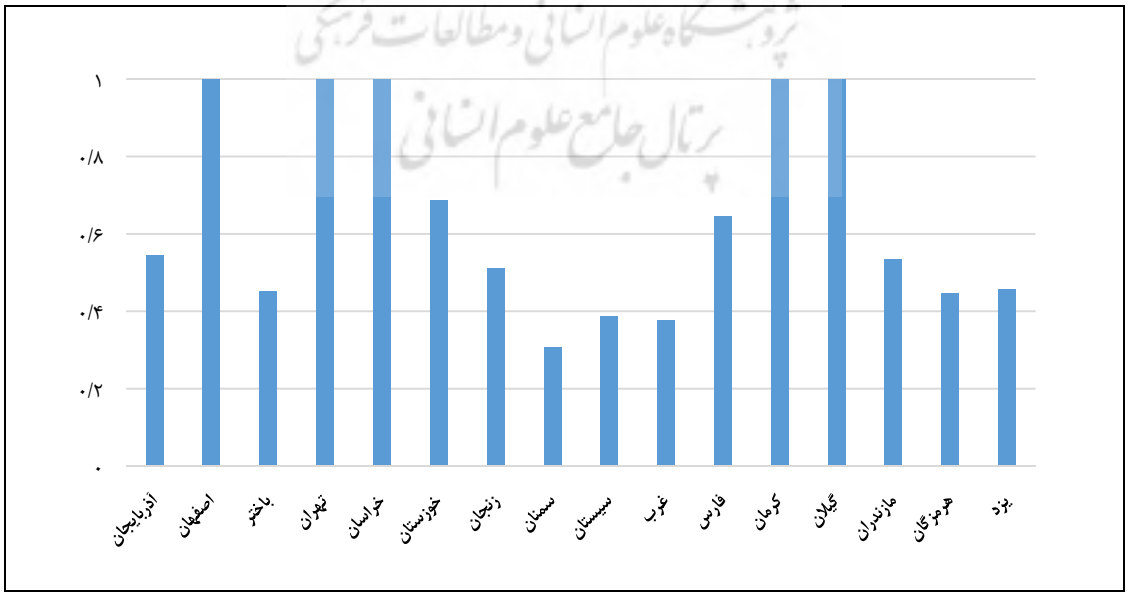
جدول ٤. محاسبه کارایی واحدهای تحت بررسی زنجیره صنعت برق ایران (بخش تولید)

ردیف	نام نیروگاه	نمره کارایی	ردیف	نام نیروگاه	نمره کارایی
۱	سهند	۰/۷۸	۲۳	افق ماهشهر	۰/۷۲
۲	اصفهان (اسلام آباد)	۰/۵۷	۲۴	بسطامی شاهرود	۰/۷۱
۳	شازند	۰/۸۲	۲۵	زاهدان	۰/۶۸
۴	شهید مفتح همدان	۰/۹۳	۲۶	کنارک چابهار	۰/۶۴
۵	بعثت	۰/۶۵	۲۷	بمپور	۱
۶	طرشت (واحد بخار)	۱	۲۸	سراوان	۱
۷	شهیدرجائی	۱	۲۹	اسلام آباد غرب	۱
۸	رامین اهواز	۱	۳۰	کنگان	۱
۹	ایرانشهر بخاری	۰/۷۳	۳۱	بوشهر	۱
۱۰	بیستون	۱	۳۲	شیراز	۰/۶۰
۱۱	زرند	۰/۸۲	۳۳	لوشان (واحد گاز)	۰/۶۷
۱۲	لوشان (واحد بخار)	۰/۶۱	۳۴	دولتی بهشهر	۱
۱۳	شهید سلیمی (نکا)	۰/۶۸	۳۵	خلیج فارس	۱
۱۴	بندرعباس	۰/۵۷	۳۶	گازی بندرعباس	۰/۶۶
۱۵	صوفیان	۰/۶۷	۳۷	ایسین	۰/۷۱
۱۶	ارومیه	۰/۷۲	۳۸	یزد (واحد گاز)	۰/۶۷
۱۷	هسا	۰/۵۴	۳۹	سیکل ترکیبی شهیدرجائی	۱
۱۸	درود	۱	۴۰	سیکل ترکیبی شیروان	۰/۹۰
۱۹	ری	۱	۴۱	سیکل ترکیبی کرمان	۱
۲۰	طرشت (واحد گاز)	۱	۴۲	سیکل ترکیبی شهیدسلیمی	۱
۲۱	قائن	۱	۴۳	سیکل ترکیبی یزد	۱
۲۲	شهید کاوه	۰/۸۸			

به‌طور کلی در اولین مرحله از زنجیره تولید، انتقال و توزیع صنعت برق ایران، میانگین کارایی ۰/۸۳ با انحراف معیار ۰/۱۶ و دامنه تغییرات ۰/۴۵ می‌باشد. در مجموع، تعداد ۱۹ نیروگاه از مجموع ۴۳ نیروگاه تحت بررسی در زنجیره تولید، انتقال و توزیع صنعت برق ایران کارا هستند که معادل ۴۴ درصد کل نیروگاه‌ها می‌باشد. همچنین تعداد ۲۴ نیروگاه از مجموع ۴۳ نیروگاه تحت بررسی ناکارا هستند که معادل ۵۶ درصد کل نیروگاه‌ها می‌باشد. در جدول ۵ نمره کارایی بخش انتقال (شرکت‌های برق منطقه‌ای ایران) ارائه می‌شود:

جدول ۵. محاسبه کارایی واحدهای تحت بررسی زنجیره صنعت برق ایران (بخش انتقال)

ردیف	نام شرکت	نمره کارایی	ردیف	نام شرکت	نمره کارایی
۱	برق منطقه‌ای آذربایجان	۰/۵۴	۹	برق منطقه ای سیستان و بلوچستان	۰/۳۸
۲	برق منطقه‌ای اصفهان	۱	۱۰	برق منطقه‌ای غرب	۰/۳۷
۳	برق منطقه‌ای باختر	۰/۴۵	۱۱	برق منطقه‌ای فارس	۰/۶۴
۴	برق منطقه‌ای تهران	۱	۱۲	برق منطقه‌ای کرمان	۱
۵	برق منطقه‌ای خراسان	۱	۱۳	برق منطقه‌ای گیلان	۱
۶	برق منطقه‌ای خوزستان	۰/۶۸	۱۴	برق منطقه‌ای مازندران	۰/۵۳
۷	برق منطقه‌ای زنجان	۰/۵۱	۱۵	برق منطقه‌ای هرمزگان	۰/۴۴
۸	برق منطقه‌ای سمنان	۰/۳۰	۱۶	برق منطقه‌ای یزد	۰/۴۵



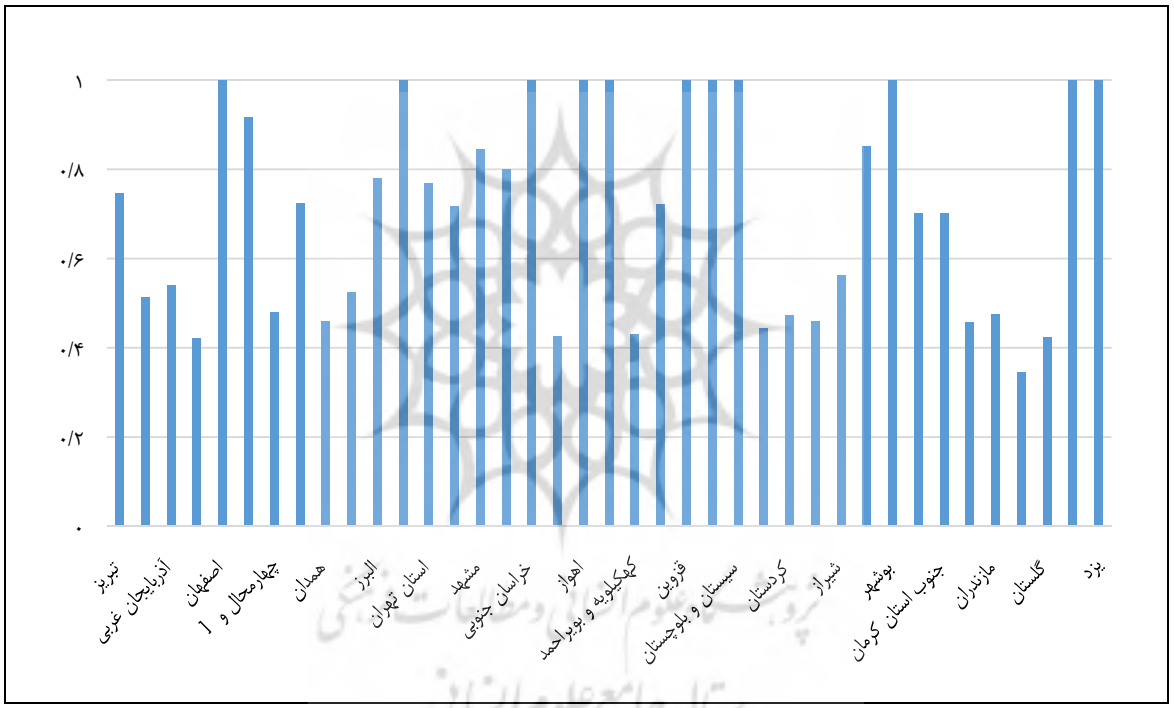
شکل ۳. نمرات کارایی شرکت‌های برق منطقه‌ای (مرحله انتقال)

نتایج نشان می‌دهد که شرکت‌های برق منطقه‌ای اصفهان، تهران، خراسان، کرمان و گیلان دارای کارایی واحد (۱) می‌باشند. درمیان شرکت‌های ناکارا، شرکت برق منطقه‌ای خوزستان با کارایی ۰/۶۸ بیشترین میزان کارایی را به خود اختصاص داده و کمترین نمره کارایی مربوط به شرکت برق منطقه‌ای سمنان (۰/۳۰) بوده و پس از آن شرکت‌های برق منطقه‌ای غرب و سیستان و بلوچستان با نمره کارایی ۰/۳۷ و ۰/۳۸ در رتبه‌های کمترین کارایی قرار می‌گیرند. به‌طور کلی در دومین مرحله از زنجیره صنعت برق ایران، میانگین کارایی ۰/۶۴ با انحراف معیار ۰/۲۶ و دامنه تغییرات ۰/۶۹ می‌باشد. در مجموع، تعداد ۵ شرکت برق منطقه‌ای از مجموع ۱۶ شرکت تحت بررسی در زنجیره تولید، انتقال و توزیع صنعت برق ایران کارا هستند که معادل ۳۱ درصد کل شرکت‌های این گروه می‌باشد. همچنین تعداد ۱۱ شرکت برق منطقه‌ای از مجموع ۱۶ شرکت تحت بررسی ناکارا هستند که معادل ۶۹ درصد کل شرکت‌های مرحله انتقال است. در جدول ۶ نمره کارایی بخش توزیع (شرکت‌های توزیع نیروی برق ایران) ارائه می‌شود:

جدول ٦. محاسبه کارایی واحدهای تحت بررسی زنجیره صنعت برق ایران (بخش توزیع)

ردیف	نام شرکت توزیع	نمره کارایی	ردیف	نام شرکت توزیع	نمره کارایی
۱	شرکت توزیع تبریز	۰/۷۴	۲۱	شرکت توزیع کهکیلویه و بویراحمد	۰/۴۳
۲	شرکت توزیع آذربایجان شرقی	۰/۵۱	۲۲	شرکت توزیع زنجان	۰/۷۲
۳	شرکت توزیع آذربایجان غربی	۰/۵۴	۲۳	شرکت توزیع قزوین	۱
۴	شرکت توزیع اردبیل	۰/۴۲	۲۴	شرکت توزیع سمنان	۱
۵	شرکت توزیع اصفهان	۱	۲۵	شرکت توزیع سیستان و بلوچستان	۱
۶	شرکت توزیع شهرستان اصفهان	۰/۹۱	۲۶	شرکت توزیع استان کرمانشاه	۰/۴۴
۷	شرکت توزیع چهارمحال و بختیاری	۰/۴۷	۲۷	شرکت توزیع برق کردستان	۰/۴۷
۸	شرکت توزیع مرکزی	۰/۷۲	۲۸	شرکت توزیع استان ایلام	۰/۴۵
۹	شرکت توزیع همدان	۰/۴۶	۲۹	شرکت توزیع شیراز	۰/۵۶
۱۰	شرکت توزیع لرستان	۰/۵۲	۳۰	شرکت توزیع برق فارس	۰/۸۵
۱۱	شرکت توزیع البرز	۰/۷۸	۳۱	شرکت توزیع استان بوشهر	۱
۱۲	شرکت توزیع تهران بزرگ	۱	۳۲	شرکت توزیع شمال استان کرمان	۰/۷۰
۱۳	شرکت توزیع استان تهران	۰/۷۶	۳۳	شرکت توزیع جنوب استان کرمان	۰/۷۰
۱۴	شرکت توزیع قم	۰/۷۱	۳۴	شرکت توزیع گیلان	۰/۴۵
۱۵	شرکت توزیع مشهد	۰/۸۴	۳۵	شرکت توزیع مازندران	۰/۴۷
۱۶	شرکت توزیع خراسان رضوی	۰/۸۰	۳۶	شرکت توزیع غرب استان مازندران	۰/۳۴
۱۷	شرکت توزیع خراسان جنوبی	۱	۳۷	شرکت توزیع گلستان	۰/۴۲
۱۸	شرکت توزیع خراسان شمالی	۰/۴۲	۳۸	شرکت توزیع هرمزگان	۱
۱۹	شرکت توزیع اهواز	۱	۳۹	شرکت توزیع استان یزد	۱
۲۰	شرکت توزیع خوزستان	۱			

نتایج حاصل از حل مدل تحقیق در بخش توزیع نشان می‌دهد که شرکت‌های توزیع استان اصفهان، تهران بـزرگ، استان خراسان جنوبی، شهرستان اهواز، استان خوزستان، استان قزوین، استان سمنان، استان سیستان و بلوچستان، استان بوشهر، استان هرمزگان و شرکت توزیع استان یزد دارای کارایی واحد ۱ می‌باشند. به‌طور کلی در سومین مرحله از زنجیره تولید، انتقال و توزیع صنعت برق ایران، میانگین کارایی ۰/۷۱ با انحراف معیار ۰/۲۳ و دامنه تغییرات ۰/۶۵ مـی‌باشـد. در مجموع، تعداد ۱۱ شرکت توزیع نیروی برق از مجموع ۳۹ شرکت تحت بررسی در زنجیره تولید، انتقال و توزیـع صـنعت برق ایران کارا هستند که معادل ۲۸ درصد کل شرکت‌های این گروه است. همچنین تعداد ۲۸ شرکت توزیع نیروی بـرق از مجموع ۳۹ شرکت تحت بررسی ناکارا هستند که معادل ۷۲ درصد کل شرکت‌های مرحله توزیع می‌باشد. در جـدول ۷ خلاصه شاخص‌های کارایی به تفکیک مراحل و کل زنجیره صنعت برق ارائه می‌شود:



شکل ٤. نمرات کارایی شرکت‌های توزیع نیروی برق (مرحله توزیع)

جدول ۷. خلاصه شاخص‌های کارایی به تفکیک مراحل و کل زنجیره صنعت برق

ردیف	نام مرحله	میانگین	انحراف معیار	دامنه تغییرات	واحدهای کارا		واحدهای ناکارا	
					تعداد	درصد	تعداد	درصد
۱	تولید	۰/۸۳	۰/۱۶	۰/۴۵	۱۹	۴۴	۲۴	۵۶
۲	انتقال	۰/۶۴	۰/۲۶	۰/۶۹	۵	۳۱	۱۱	۶۹
۳	توزیع	۰/۷۱	۰/۲۳	۰/۶۵	۱۱	۲۸	۲۸	۷۲
۴	کل صنعت برق	۰/۷۵	۰/۲۲	۰/۶۹	۳۵	۳۶	۶۳	۶۴

همان گونه که در جدول فوق مشاهده می‌شود، نتایج بیانگر این است که متوسط کارایی در بخش‌های تولید، انتقال و توزیع صنعت برق ایران به‌ترتیب ۰/۸۳، ۰/۶۴ و ۰/۷۱ می‌باشد. به بیان دیگر، بخش تولید (نیروگاه‌ها) زنجیره صنعت برق ایران بیشترین کارایی و بخش انتقال (شرکت‌های برق منطقه‌ای) کمترین کارایی را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین میانگین کارایی در کل زنجیره صنعت برق ایران ۰/۷۵ محاسبه شده است. تعداد واحدهای کارا در کل زنجیره تولید، انتقال و توزیع برق ایران در دوره زمانی ارزیابی، ۳۵ واحد و درصد واحدهای کارا ۳۶ درصد می‌باشد. همچنین تعداد واحدهای ناکارا در کل زنجیره مذکور ۶۳ واحد و درصد واحدهای ناکارا نیز ۶۴ درصد است

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این تحقیق با هدف طراحی یک مدل تحلیلی ـ ریاضی برای سنجش کارایی زنجیره تولید، انتقال و توزیع صنعت برق ایران صورت پذیرفته و از رویکرد تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای با خروجی نامطلوب برای مدل‌سازی کارایی سنجی استفاده شده است.

در این مطالعه در بخش تولید، وضعیت عملکردی ۴۳ نیروگاه دولتی شامل نیروگاه‌های بخاری، نیروگاه‌های گازی و نیروگاههای سیکل ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است. مجموع میزان قدرت نامی این نیروگاه‌ها، ۲۳,۰۰۸ مگاوات و مجموع تولید ویژه آنها ۱۰۰,۴۹۶,۸۲۶ میلیون کیلووات ساعت می‌باشد. همچنین متوسط راندمان این نیروگاه‌ها نیز ۳۱/۴ درصد برآورد گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که به‌طور کلی، کارایی بخش تولید نسبت به بخش‌های انتقال و توزیع در وضعیت بهتری قرار دارد.

همچنین در بخش انتقال، وضعیت عملکردی ۱۶ شرکت برق منطقه‌ای ایران مورد بررسی قرار گرفته است. مجموع طول خطوط انتقال و فوق‌توزیع شرکت‌های برق منطقه‌ای ایران، ۱۲۶,۱۷۹ کیلومترمدار و مجموع ظرفیت ترانسفورماتورهای انتقال و فوق‌توزیع این شرکت‌ها ۳۷۰,۴۴۷ مگاولت‌آمپر می‌باشد. همچنین متوسط تلفات برق در بخش انتقال نیز ۲/۱۸ درصد برآورد گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که به‌طور کلی، کارایی بخش انتقال نسبت به بخش‌های تولید و توزیع در وضعیت نامناسب‌تری قرار دارد.

در بخش توزیع نیز، وضعیت عملکردی ۳۹ شرکت توزیع نیروی برق ایران مورد بررسی قرار گرفته است. مجموع طول شبکه توزیع شرکت‌های توزیع، ۸۱۰,۲۸۷ کیلومترمدار و مجموع ظرفیت ترانسفورماتورهای این شرکت‌ها ۱۲۷,۶۳۱ مگاولت‌آمپر می‌باشد. همچنین متوسط تلفات برق در بخش توزیع نیز ۹/۹۰ درصد برآورد گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که به‌طور کلی، کارایی بخش توزیع پس از بخش تولید، در رتبه دوم قرار می‌گیرد.

میانگین کارایی کل زنجیره تولید، انتقال و توزیع صنعت برق ایران، ۰/۷۵ با انحراف معیار ۰/۲۲ و دامنه تغییرات ۰/۶۹ می‌باشد. در مجموع ۶۴ درصد واحدهای صنعت برق که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند، ناکارا بوده و ۳۶ درصد واحدها کارا می‌باشند. به‌طور کلی، بخش انتقال با میانگین کارایی ۰/۶۴ نسبت به دو بخش دیگر وضعیت نامناسب‌تری داشته و پس از آن بخش توزیع با میانگین کارایی ۰/۷۱ قرار می‌گیرد و بخش تولید نسبت به دو بخش دیگر با دارا بودن کارایی ۸۱ درصدی از وضعیت بهتری برخوردار است. نتایج به‌صورت کلی وضعیت مطلوبی را در زمینه

کارایی و زنجیره صنعت برق ایران نشان نمی‌دهد. بنابراین با توجه به افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و زمان‌بر بودن در پروژه‌های صنعت برق از یک سو و افزایش پیک مصرف در سال‌های آتی، پیشنهاد می‌شود نسبت به آسیب‌شناسی موضوع از سوی وزارت نیرو و شرکت توانیر اقدام گردد.

همچنین یافته‌های بخش تولید بیانگر این است که دلیل اصلی ناکارایی ۵۶ درصد از نیروگاه‌های تحت بررسی، میزان مازاد سوخت مصرفی آنان است. با توجه به اینکه عمده سوخت مصرفی نیروگاه‌های کشور، گاز می‌باشد، طی سالیان اخیر با افزایش مصرف گاز در بخش خانگی و تجاری در فصول سرد سال، میزان گاز تخصیص یافته به نیروگاه‌های حرارتی کاهش یافته و به‌منظور پیشگیری از ایجاد اختلال در روند برق‌رسانی در کشور، نیروگاه‌های کشور، مجبور به مصرف سوخت‌های جایگزین مایع شامل گازوئیل و مازوت می‌شوند که آنها نیز به نوبه خود آلودگی زیست محیطی بسیاری ایجاد می‌کنند. یافته دیگر این مطالعه در بخش تولید نشان می‌دهد که از جمله دلایل ناکارایی واحدهای نیروگاهی، کمبود خروجی راندمان آنها با توجه به میزان مصرف ورودی‌ها می‌باشد. میانگین راندمان واحدهای نیروگاهی تحت بررسی، ۳۱/۴ محاسبه شده است. با توجه به نتایج اشاره شده در بخش تولید پیشنهاد می‌شود:

- با توجه به اهمیت استفاده بهینه از منابع سوخت نیروگاهی، لازم است تا از طریق وزارت نیرو و شرکت مادرتخصصی تولید برق حرارتی، دلایل ازدیاد مصرف سوخت در نیروگاه‌ها مورد بررسی و مداقه قرار گیرد.
- برنامه‌ریزی در راستای ایجاد نیروگاه‌های چرخه ترکیبی با بازدهی بالا و آلایندگی کمتر با توجه به پیشرفت تکنولوژی و ساخت داخل تجهیزات این نوع نیروگاه‌ها
- برنامه‌ریزی و اجرای کامل برنامه تعمیرات واحدهای نیروگاهی و تبدیل واحدهای گازی سیکل باز به واحدهای سیکل ترکیبی
- از مدار خارج کردن واحدهای فرسوده و با راندمان پایین نیروگاه‌های کشور بدون ایجاد مشکل در تامین برق مصرفی
- تلاش در راستای افزایش بهره‌وری واحدهای نیروگاهی

یافته دیگر این تحقیق در بخش انتقال بیانگر تعداد زیاد واحدهای ناکارا در میان شرکت‌های برق منطقه‌ای ایران است. شرکت‌های برق منطقه‌ای به‌عنوان حلقه واسط زنجیره صنعت برق ایران، نقش حائز اهمیتی در ساختار صنعت برق دارند. وظیفه اصلی این شرکت‌ها، انتقال انرژی از مراکز تولید (نیروگاه‌ها) به مراکز مصرف می‌باشد. با توجه به این نقش مهم و اساسی، ناکارایی این شرکت‌ها، علمکرد صنعت برق در دو بخش تولید و توزیع را نیز تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. تحلیل چرایی ناکارایی این شرکت‌ها نشان می‌دهد که عمده شرکت‌های برق منطقه‌ای ناکارا، وضعیت نامناسبی در متغیر تلفات دارند. همچنین از دلایل دیگر ناکارایی این شرکت‌ها، دارا بودن مازاد متغیر ورودی تعداد کارکنان است.

با توجه به نتایج اشاره شده در بخش انتقال پیشنهاد می‌شود:

- کاهش پیک بار از طریق اجرای برنامه های مدیریت مصرف و تسریع در بهره‌برداری از پروژه‌های توسعه شبکه به‌عنوان گزینه‌های اجرایی و مؤثر کاهش تلفات مورد توجه وزارت نیرو، شرکت توانیر و شرکت‌های برق منطقه‌ای ایران قرار گیرد.

- بهره‌گیری از مولدهای مقیاس کوچک و حمایت از طرح‌های تولید پراکنده به‌عنوان راه‌کاری مؤثر در کاهش فشار از روی شبکه و کاهش تلفات مورد توجه بیشتر قرار گیرد.
- درخصوص ازدیاد نیروی انسانی در بخش انتقال، پیشنهاد می‌شود با واگذاری فعالیت‌ها به بخش خصوصی، ضمن چابک‌سازی ارائه خدمات، هسته تخصصی و کارشناسی این شرکت‌ها با تعداد کمتری از نیروی انسانی تشکیل گردیده و از افزایش نیروی انسانی در سطوح پایین‌تر از کارشناسی خودداری شود.

نتایج این مطالعه در بخش توزیع نیز بیانگر این است که عمده دلیل ناکارایی شرکت‌های توزیع نیروی برق به‌میزان تلفات برق در شبکه توزیع مربوط می‌شود. بررسی‌های قبلی وزارت نیرو نیز بیانگر این واقعیت بود که بخش اصلی تلفات شبکه برق کشور مربوط به بخش توزیع است. از آنجایی که تلفات توزیع انرژی الکتریکی هزینه اقتصادی و زیست‌محیطی زیادی به‌همراه دارد، لذا پیشنهاد می‌شود با بهره‌گیری از تجربیات کشورهای دیگر در کاهش تلفات و همچنین استفاده از تجارب گذشته شرکت‌های توزیع موفق در کاهش تلفات، نسبت به برنامه‌ریزی و تهیه سند جامع کاهش تلفات شرکت‌های توزیع اقدام گردد.

مقایسه نتایج مطالعه حاضر با پژوهش‌های پیشینی که با مدل‌های سه مرحله‌ای به ارزیابی کارایی فرایند تولید، انتقال و توزیع صنعت برق ایران بیانگر این است که مدل ارائه شده در این مطالعه به‌شکل مناسب‌تری توانسته ارزیابی کارایی بخش‌های سه‌گانه صنعت برق را نشان دهد. به‌عنوان نمونه در مطالعه رادسر و همکاران (۱۴۰۰)، اگر چه کارایی بخش‌های سه‌گانه مذکور محاسبه شده، اما ارزیابی این سه بخش، صرفاً به ۱۶ شرکت برق محدود شده است. این در حالی است که به‌کمک مدل ارائه شده در مطالعه حاضر، برای تمامی شرکت‌های بخش‌های سه‌گانه تولید، انتقال و توزیع، نمرات کارایی محاسبه شده و دلایل ناکارایی شرکت‌ها در هر بخش واکاوی شده است. همچنین در مطالعه اشاره شده، ۶۹ درصد واحدهای بخش‌های تولید و توزیع کارا بوده‌اند. این در حالی است که در مطالعه حاضر، درصد واحدهای کارای بخش‌های تولید و توزیع به‌ترتیب ۴۴ و ۲۸ درصد می‌باشد که خود بیانگر ارزیابی دقیق‌تر کارایی در مطالعه حاضر است. همچنین در مطالعه توسلی و همکاران (۲۰۲۰) کارایی بخش‌های تولید، انتقال و توزیع صرفاً برای ۱۶ شرکت برق منطقه‌ای محاسبه شده است. این در حالی است که در ساختار صنعت برق ایران، شرکت‌های برق منطقه‌ای مستقل بوده و عملاً در خصوص بخش‌های تولید (نیروگاه‌ها) و توزیع (شرکت‌های توزیع) مسئولیتی ندارند.

از آنجایی که صنعت برق صنعتی حساس و مخاطره‌آمیز و توأم با خطرات و حوادث ذاتی خاص خود بوده و یکی از مصادیق خروجی‌های نامطلوب در این صنعت، حوادث انسانی ناشی از فعالیت‌های تولید، انتقال و توزیع برق است، لذا به محققان آتی پیشنهاد می‌شود با استفاده از داده‌های مربوط به حوادث در فعالیت‌های صنعت برق، نسبت به ارزیابی کارایی شرکت‌های تولید، انتقال و توزیع اقدام نمایند. همچنین به محققان آتی پیشنهاد می‌شود عملکرد و رقابت‌پذیری شرکت‌های زنجیره صنعت برق ایران را با ترکیب شاخص‌های فنی، مالی، اقتصادی، انسانی و اجتماعی سنجش نمایند. همچنین استفاده از روش‌های ارزیابی مبتنی بر زمان جهت سنجش عملکرد زنجیره صنعت برق ایران طی دوره‌های زمانی مشخص نیز از سایر پیشنهاداتی است که به محققان آتی توصیه می‌شود.

منابع

آقایی، نازیلا (۱۳۹۶). رتبه‌بندی واحدهای تصمیم‌گیرنده با استفاده از کارایی متقاطع در حضور خروجی‌های نامطلوب و عدم قطعیت داده‌ها، *پژوهش‌های نوین در ریاضی*، ۳ (۱۱)، ۱۹-۳۰.

پیکانی، پژمان و محمدی، عمران (۱۳۹۸). ارزیابی عملکرد واحدهای تصمیم گیرنده با ساختار شبکه‌ای در حضور خروجی نامطلوب، *پژوهش‌های نوین در ریاضی*، ۵(۱۷)، ۱۵۷- ۱۶۶.

حسن‌زاده، امیر (۱۳۹۶). *توسعه مدل تحلیل پوششی داده شبکه‌ای برای ارزیابی عملکرد زنجیره‌های تأمین بنگاه‌ها با سیستم تولید مستمر*. رساله دکتری، دانشکده مدیریت. دانشگاه تهران

خسروی، محمدرضا و شاهرودی، کامبیز (۱۳۹۳). کاربست مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای در سنجش کارایی بخش انتقال نیروی صنعت برق ایران، *نشریه مدیریت صنعتی*، ۶ (۲)، ۲۶۳-۲۸۲.

خسروی، محمدرضا؛ شاهرودی، کامبیز؛ امیرتیموری، علیرضا و دل افروز، نرگس (۱۴۰۰)، ارائه مدلی تلفیقی از دوسوتوانی سازمانی و تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای به منظور ارزیابی کارایی شرکت‌های برق منطقه‌ای ایران. *کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران*، ۱۰(۳)، ۶۲- ۷۴.

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

سلیمانی دامنه، رضا (۱۳۹۸). ارزیابی ساختارهای دومرحله‌ای متوالی: رویکرد تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای چندهدفه (MO-NDEA). *مدیریت صنعتی*، ۱۱(۳)، ۴۸۷-۵۱۶.

سلیمی، مهرداد و کرامتی، محمدعلی (۱۳۹۴). ارزیابی و تجزیه کارایی فنی شرکت‌های برق منطقه‌ای ایران با رویکرد سه مرحله‌ای تحلیل پوششی داده‌ها، *نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران*، ۴ (۸)، ۳۷-۴۸.

شرکت مهندسین مشاور مونتکو ایران (۱۳۹۲). *تجدید ساختار در صنعت برق*. تهران: انتشارات شیوه.

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*، ۶ (۴)، ۱۵۷-۱۸۰.

شفیعی نیک‌آبادی، محمدرضا؛ یاکیده، کیخسرو و اویسی عمران، اکرم (۱۳۹۶). ارائه مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای با تلفیقی از خروجی‌های مطلوب و نامطلوب میانی و نهایی. *مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن*، ۱ (۵۲)، ۹۵-۱۱۶.

شهریاری، سلطانعلی و لاهیجی، ساینا (۱۳۹۶). ارزیابی کارایی نظام ملی نوآوری با استفاده از تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای. *مدیریت صنعتی*، ۹ (۳)، ۴۵۵-۴۷۴.

صالح‌زاده، سیدجواد؛ حجازی، سیدرضا؛ ارکان، علی و حسینی، سیدمهران (۱۳۹۰)، ارائه روش تلفیقی اندازه‌گیری کارایی ساختارهای شبکه‌ای شامل دور و لینک تخصیصی. *مجله علمی ـ پژوهشی مدیریت تولید و عملیات*، (۱)، ۴۷- ۶۰.

محمدی نژادرشتی، هنگامه؛ امیرتیموری، علیرضا؛ کردرستمی، سهراب و حسین‌زاده لطفی، فرهاد (۱۴۰۰). تخصیص منابع و هدف‌گذاری مبتنی بر DEA با فرض دسترسی‌پذیری مدیریتی: ارزیابی و بهینه‌سازی طرح کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در خطوط هوایی بین‌المللی. *تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات*، ۶ (۳)، ۳۶۵-۳۸۱.

مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی (۱۳۹۴). *بحران برق در سال جاری و سال‌های آینده*. شماره گزارش: ۱۴۳۹۲، دفتر مطالعات انرژی، صنعت و معدن.

References

Aghayi, N. (2017). Ranking of Decision-Making Units based on Cross Efficiency by Undesirable Outputs and Uncertainity. *Journal of New Research in Mathematics*, 3 (11), 19-30. (*in Persian*)

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.

Banker, R.D., Charnes, A. & Cooper, W.W. (1984). Some Models for Estimating Technical and Scale Efficiencies in Data Envelopment Analysis. *Management Science*, 30: 1078-92.

Bi, G.B., Song, W., Zhou, P. & Liang, L. (2014) Does environmental regulation affect energy efficiency in China's thermal power generation? Empirical evidence from a slacks-based DEA model. *Energy Policy*, 66, 537-546.

Chambers, R. G., Chung, Y., Fare, R., (1996). Benefit and distance function. *Journal of Economic Theory*, 70 (2), 407-419.

Charnes, A., Cooper, W. W. & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision- making units. *European Journal of Operational Research*, 2: 429–44.

Chen Y, Liang L, Zhu J (2009) Equivalence in two-stage DEA approaches. *European Journal of Operational Research*, 193, 600-604.

Chung, Y. H., Fare, R., Grosskopf, S., (1997). Productivity and undesirable outputs a directional distance function approach. *Journal of Environmental Management*, 51 (3), 229-240.

Dasilva, A. V., Costa, M.A., Ahn, H. & Lopes, A.L.M. (2019). Performance benchmarking models for electricity transmission regulation: Caveats concerning the Brazilian case. *Utilities Policy*, 60, 1-10.

Fallahi, A., Fallahi, F., Sarhadi, H., Ghaderi, S.F. & Ebrahimi, R., (2019). Application of a robust data envelopment analysis model for performance evaluation of electricity distribution companies. *International Journal of Energy Sector Management*, 15 (4), 724-742.

Fare, R. & S. Grosskopf (2000). Network DEA. *Socio-Economic Planning Sciences*, 34(1): 35–49.

Fare, R., Grosskopf, S., Lovell, C. A. K. & Pasurka, C. (1989). Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable: a nonparametric approach. *The review of economics & statistics*, 71, 90–98.

Farell, M. (1957). The measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal Statistics Society*, Series A, 120 (3): 253-281.

Goto, M. & Tsutsui, M. (2008). Technical efficiency and impacts of deregulation: An analysis of three functions in U.S. electric power utilities during the period from 1992 through 2000. *Energy Economics*, 30, 15–38.

Hafsal, K., Suvvari, A. & Sethu Durai, S.R. (2020).Efficiency of Indian banks with non‐performing assets: evidence from two‐stage network DEA. *Future Business Journal*, 6 (1), 1-9.

Hasanzadeh, A. (2017). Developing model of Network DEA to Evaluate the Supply Chains Performance of Firms with Continuous Production System, PhD dissertation, Faculty of Management, University of Tehran. (*in Persian*)

Islamic Consultative Assembly Research Center (2016). *Electricity crisis this year and years to come*, Report No. 14392, Office of Energy, Industry and Mining Studies. (*in Persian*)

Kao, C. (2014). Efficiency decomposition for general multi-stage systems in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 232, 117–124.

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, 418–429.

Kao, C., Hwang, S. N. (2011). Decomposition of technical and scale efficiencies in two-stage production systems. *European Journal of Operational Research*, 211, 515–519.

Khalili-Damghani, K. & Shahmir, Z. (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.

Khodadadipour, M., Hadi-Vencheh, A., Behzadi, M.H. & Rostamy-malkhalifeh, M. (2021). Undesirable factors in stochastic DEA cross-efficiency evaluation: An application to thermal power plant energy efficiency, *Economic Analysis and Policy*, 9, 613-628.

Khosravi, M. R., & Shahroudi, K. (2014). The Use of Network Data Envelopment Analysis Approach for Evaluating the Efficiency of Power Transmission companies in the Electric Power Industry of Iran, *Journal of Industrial Management*, 6 (2), 263-282. (*in Persian*)

Khosravi, M. R., Shahroudi, K., Amirteymoori, A., & Delafrooz, N. (2021). Presenting an Integrated Model of Organizational Ambidexterity and Network Data Envelopment Analysis in order to Evaluate the Efficiency of regional electricity companies in Iran, *Iranian Electric Industry Journal Quality & Productivity*, 10(3), 62-74. (*in Persian*)

Khosravi, M.R., & Shahroodi, K. (2015). Applying Network Data Envelopment Analysis to Determine a Criterion for Benchmarking in Regional Electricity Companies of Iran. *International journal of Data Envelopment Analysis*, 3 (2), 709-722.

Kuosmanen, T. (2005). Weak disposability in nonparametric production analysis with undesirable outputs. *American Journal of Agricultural Economics*, 87(4), 1077-1082.

Li, Y., Chen, Y., Liang, L. & Xie, J. (2012). DEA models for extended two stage network structures. *Omega*, 40(5), 611–618.

Lim, S., Zhu, J. (2015). A note on two-stage network DEA model: frontier projection and duality, *European Journal of Operational Research*. 248 (1), 342-346.

Ma, J., Qi, Linan, Deng, L. (2017). Efficiency measurement and decomposition in hybrid twostage DEA with additional inputs. *Expert Systems with Applications*, 79(3), 348-357.

Matthews, K. (2013). Risk management and managerial efficiency in Chinese banks: A network DEA framework. *Omega*, 41, 207–215.

Mohamadinejadrashti, H., Amirteimoori, A., Kordrostami, S., Hosseinzadeh Lotfi, F. (2021). Resource allocation and target setting based on DEA with managerial disposability:

evaluation and optimization the greenhouse gas emissions reduction in international airlines. *Journal of Decisions and Operations Research*, 6 (3), 365-381. (*in Persian*)

Mohsin, M., Hanif, I., Taghizadeh-Hesary, F., Abbas, Q., & Iqbal, W. (2021). Nexus between energy efficiency and electricity reforms: A DEA-Based way forward for clean power development, *Energy Policy*, 149, 112052.

Monenco Iran Consulting Engineers (2014). *Electricity industry Restructuring in Iran*. Tehran: Shivah Publications. (*in Persian*)

Monzeli, A., Daneshian, B., Tohidi, G., Sanei, M., Razavian, S. (2020). Efficiency study with undesirable inputs and outputs in DEA. *Journal of fuzzy extension and applications*, 1(1), 78-84.

Mullarkey, Sh., Caulfield, B., McCormack, S., & Basu, B. (2015). A framework for establishing the technical efficiency of Electricity Distribution Counties (EDCs) using Data Envelopment Analysis, *Energy Conversion and Management*, 94, 112–123.

Munisamy S, Arabi B. (2015). Eco-efficiency change in power plants: using a slacks-based measure for the meta-frontier Malmquist–Luenberger productivity index. *Journal of Cleaner Production*, 105, 218–232.

Park, K. S., Park, K. (2009). Measurement of multiperiod aggregative efficiency. *European Journal of Operational Research*, 193, 567–580.

Peykani, P., & Mohammadi, E. (2019). Performance Measurement of Decision-Making Units with Network Structure in the Presence of Undesirable Output, *Jouranal of New Research in Mathematics*, 5 (17), 157-166. (*in Persian*)

Radser, M., Kazemi, A., Mehregan, M. R., & Razavi Haji1gha, H. (2021). Designing an Algorithm based on Network Data Envelopment Analysis with Desirable and Undesirable Indicators for the Evaluation of the Iranian Power Industry, *Journal of Industrial Management*, 13 (1), 1-26. (*in Persian*)

Salehzadeh, J., Hejazi, R., Arkan, A., & Hosseini, M. (2011), Proposing an Integrative Approach for Evaluatng of the Efficiency of Network Structures Including Tour and Allocation Link, *Journal of Production and Operations Management*, 1(2), 47-60. (*in Persian*)

Salimi, M. & Keramati, M. A. (2016). Evaluation and Analysis of Technical Efficiency of Regional Electricity Companies in Iran Using a Three-Step Data Envelopment Analysis, *Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity*, 4 (8), 37-48. (*in Persian*)

Seifert, S., Cullmann, A. & Hirschhausen, Ch.v. (2016). Technical efficiency and CO2 reduction potentials — An analysis of the German electricity and heat generating sector, *Energy Economics*, 56, 9-19.

Seiford, L. M., Zhu, J. (2002). Modeling undesirable factors inefficiency valuation. *European Journal of Operational Research*, 142 (1), 16-20.

Shafiei Nikabadi, M. R, Yakideh, K. and & Oveysi Omran, A. (2017). Presenting a Network Data Envelopment Analysis Model by a Combination of Desired And Undesired Intermediate and Final outputs, *Journal of Operational Research and its Applications*, 1(52), 95-116. (*in Persian*)

Shafiei Nikabadi, M., Yakideh, K., & Oveysi Omran, A. (2017). An Integrated Approach of Data Envelopment Analysis with a Variety of Outputs and Window Analysis for Evaluating the Efficiency of the Power Industry. *Journal of Industrial Management Perspective*, 6 (4), 157-180. (*in Persian*)

Shahriari, S., Lahiji, S. (2017). Performance Evaluation of the National Innovation Systems by Network Data Envelopment Analysis. *Industrial Management Journal*, 9(3), 455-474. (*in Persian*)

Shephard, R. W. (1970). *Theory of cost and production functions. In Theory of Cost and Production Functions.* Princeton University Press.

Siriopoulos, C. & Tziogkidis, P. (2010). How do Greek banking in stitutions react after significant events? A DEA approach. *Omega*, 38(5), 294–308.

Soleymani Damaneh, R. (2019). Evaluation of Continuous Two-stage Structures: A New Multi-objective Network Data Envelopment Analysis (MO-NDEA) Approach. *Industrial Management Journal*, 11(3), 487-516. (*in Persian*)

Sotiros, D., Koronakos, G. & Despotis D.k. (2018). Dominance at the divisional efficiencies level in network DEA: the case of two-stage processes, *Omega*, 84, 144-155.

Sueyoshi, T., & Goto, M. (2017). World trend in energy: an extension to DEA applied to energy and environment. *Economic Structures*, 6 (13), 1-23.

Sueyoshi, T., Qu, J., Li, A. & Xie, Ch., (2020). Understanding the efficiency evolution for the Chinese provincial power industry: A new approach for combining data envelopment analysis-discriminant analysis with an efficiency shift across periods. *Journal of Cleaner Production*, 277, 1-11.

Sueyoshi, T., Yuan, Y., & Goto, M. (2016). A Literature Study for DEA Applied to Energy and Environment, *Energy Economics*, 64: 104-124.

Tan, Y., Wanke, P., Antunes, J. & Emrouznejad, A. (2021). Unveiling endogeneity between competition and efficiency in Chinese banks: a two‐stage network DEA and regression analysis, *Annals of Operations Research*, 306, 131-171.

Tavassoli, M., Faramarzi, G.R., Farzipoor Saen, R. (2015). Ranking electricity distribution units using slacks-based measure, strong complementary slackness condition, and discriminant analysis. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 64:1214–1220.

Tavassoli, M., Ketabi, S. & Ghandehari, M. (2020). Developing a network DEA model for sustainability analysis of Iran's electricity distribution network, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 122, 1-13.

Wei, Q. L., Yan, H., Pang, L. Y. (2011). Composite network data envelopment analysis model. *International Journal of Information Technology and Decision Making*, 10, 613–633.

Wu, J., Yin, P., Sun, J., Chu, J., & Liang L. (2016). 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, 1047-1062.