Economic Modeling
sanad.iau.ir/journal/eco
Volume 18, Issue 66, Summer 2024, 1-23.

Rriginal Article

Identifying the most productive scale size in the green supply chain using Data Envelopment Analysis

Amir Gholm Abri*

DOI

Received:
22/07/2024

Accepted:
14/10/2024

Keywords:
Most Productive Scale Size, Decision Making Unit, Network DEA

JEL Classification:
C02, D24, L61

Abstract

Today, focusing on improving the performance of supply chains is the only way to gain competitive advantages in the global business market. Data envelopment analysis method as a mathematical programming method is one of the important methods for measuring and evaluating the efficiency of decision making units. In this article, we define the unit under evaluation with the largest scale of productivity in the structure of the green supply chain and explain how to calculate it using data envelopment analysis. For this purpose, using the BCC multiple model of the complete supply chain, a unit with the most productive scale size determined. After identifying the units with the most productive scale size, for the units that do not apply in this condition, the closest unit with the most productive scale is introduced as a model. Finding the closest unit with the most productive scale is important because normal units can reach them with minimal changes. The statistical population of this applied research is 42 cement companies listed on the stock exchange. In the first step, the definition and identification of a unit with the most productive scale size of these companies, whose corresponding chain of each of them has four stages of supplier, producer, distributor and customer, was prioritized. In the next step, the closest unit with the most productive scale size was introduced as a model for normal units. In conclusion, the results of model execution and its analysis will be presented.

* Associate Professor of Applied Mathematics, Firuzkuh Branch, Islamic Azad University, Firuzkuh, Iran (Corresponding Author), amirgholamabri@gmail.com

How to Cite: Gholam Abri, A. (2024).Identifying the most productive scale size in the green supply chain using Data Envelopment Analysis. *Economic Modeling*, 18 (66): 1-23.

1. Literature Review

Today, in the competitive environment that exists, manufacturing and service companies and organizations need to measure and evaluate the performance in their supply chain for productivity and in order to survive. The purpose of the supply chain is to deliver a high-level product to the final customer, with the lowest cost and time and with value from all aspects of product manufacturing. The complete supply chain is a network that includes four parts: supplier, producer, distributor and customer. One of the most important concepts supply chain is determining return to scale of decision making units. Return to scale is an economic and important concept in data coverage analysis that shows the maximum increase in output per increase in input. The important and basic point is that the detection of returns to scale can provide appropriate information about the development or limitation of the units under evaluation. One of the important concepts that comes from the concept of efficiency to scale is the introduction and identification of units with the largest scale of productivity. Therefore, in this study, the researcher tries to define the unit under evaluation with the largest scale of productivity in the structure of the green supply chain in the complete supply chain and to explain how to calculate it using data coverage analysis. In the following, after identifying the units with the highest scale of productivity, for the units that do not apply in these conditions, the nearest unit with the highest scale of productivity should be introduced as a model.

2. Methodology

In this research, the network data envelopment analysis method was utilized to identify most productive scale size. In the next step, the closest unit with the most productive scale size was introduced as a model for normal units.

3. Analysis and Discussion

In this study, we will introduce and identify most productive scale size by using the efficiency to scale calculation. In the second step, after identifying the most productive scale size, for the units that do not apply in this condition, the closest unit with the highest productivity scale is introduced as a model. For this purpose, using the BCC multiple model of the complete supply chain, a unit with the most productive scale size determined. After identifying the units with the most productive scale size, for the units that do not apply in this condition, the closest unit with the most productive scale is introduced as a model. Finding the closest unit with the most productive scale is important because normal units can reach them with minimal changes.

4. Results

Today, evaluating and improving the performance of the production system and entire chains is the only possible way to compete in the global business market. Data envelopment analysis technique as a mathematical programming method is a non-

parametric method for measuring the efficiency of production systems and decision-making units with homogeneous input and output. Determining the type of return to scale helps managers to make more accurate predictions regarding the expansion or limitation of the decision-making unit. One of the important concepts that comes from the concept of efficiency to scale is the introduction and identification of most productivity scale size. Therefore, in this study, the researcher first defined the unit under evaluation with the largest scale of productivity in the structure of the green supply chain and explained how to calculate it using data coverage analysis. In the following, after identifying most productivity scale size, for the units that do not apply in this condition, the closest unit with the highest productivity scale was introduced as a model. To show the application of the proposed method, the real data of 42 cement companies present in the stock exchange in 2018 with inputs, outputs and intermediate data were used. As seen, the above companies have a four-stage supply chain structure. After evaluating these companies, it was observed that 18 units were recognized as units with the highest productivity scale. In addition, for the remaining 24 units, the best unit with the highest productivity scale was introduced as a model.

Funding
There is no funding support.

Declaration of Competing Interest
The author declares no conflicts of interest relevant to the content of this article.

Acknowledgments
We extend our gratitude to the journal members and anonymous reviewers for their invaluable contributions to improving the quality of this article.

مدلسازی اقتصادی
Economic Modeling
sanad.iau.ir/journal/eco
دوره ۱۸، شماره ٦٦، تابستان ۱٤۰۳، صفحه‌های ۱ تا ۲۳.

پژوهشی

شناسایی واحدهای با بیشترین مقیاس بهره‌وری در زنجیره تأمین سبز با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها

امیرغلام ابری*

DOI

تاریخ دریافت:
۱٤۰۳/۰٥/۰۱
تاریخ پذیرش:
۱٤۰۳/۰۷/۲۳

واژگان کلیدی:
واحدی با بیشترین مقیاس بهره وری، واحد تحت ارزیابی، تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای، زنجیره تأمین سبز

طبقه‌بندی JEL:
C02, D24, L61

چکیده

امروزه تمرکز بر بهبود عملکرد زنجیره‌های تأمین، تنها مسیر دستیابی به مزایای رقابتی در بازار جهانی کسب‌وکار است. روش تحلیل پوششی داده‌ها بعنوان یک روش برنامه‌ریزی ریاضی، یکی از روش‌های مهم برای اندازه‌گیری و ارزیابی کارایی واحدهای تصمیم‌گیری است. در این مقاله واحد تحت ارزیابی با بیشترین مقیاس بهره وری را در ساختار زنجیرهٔ تأمین سبز تعریف نموده و نحوه محاسبه آن را با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها بیان می نیم. برای این منظور، با استفاده از مدل مضربی BCC زنجیرهٔ تأمین کامل، واحدی با بیشترین مقیاس بهره‌وری تعیین می‌شود. پس از شناسایی واحدهای با بیشترین مقیاس بهره‌وری، جهت واحدهایی که در این شرایط صدق نمی‌کند نزدیک‌ترین واحد با بیشترین مقیاس بهره‌وری به‌عنوان الگو معرفی می‌شود. یافتن نزدیک‌ترین واحد با بیشترین مقیاس بهره‌وری از آن جهت دارای اهمیت است که واحدهای عادی می‌توانند با کمترین تغییرات به آنها برسند. جامعه آماری این تحقیق کاربردی از نظر هدف، ٤۲ شرکت سیمان حاضر در بورس اوراق بهادار است. در گام اول تعریف و شناسایی واحدی با بیشترین مقیاس بهره‌وری این شرکت‌ها که زنجیرهٔ متناظر هر یک از آنها دارای چهار مرحله تأمین‌کننده، تولیدکننده، توزیع‌کننده و مشتری است، در اولویت قرار گرفت. درگام بعدی معرفی نزدیک‌ترین واحد با بیشترین مقیاس بهره‌وری به‌عنوان الگو جهت واحدهای عادی ادامه یافت. در خاتمه، نتایج اجرای مدل و تحلیل‌های آن نشان داده خواهد شد.

* دانشیار، گروه ریاضی، واحد فیروزکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزکوه، ایران (نویسنده مسئول)، amirgholamabri@gmail.com

۱. ادبیات موضوع

امروزه در فضای رقابتی که وجود دارد، شرکت‌ها و سازمان‌های تولیدی و خدماتی برای بهره‌وری و به‌منظور بقا و دوام پایدار نیازمند سنجش و ارزیابی عملکرد در زنجیرهٔ تأمین خود هستند. هدف زنجیرهٔ تأمین تحویل یک محصول سطح بالا به مشتری نهایی، با کمترین هزینه و زمان و با ارزش از تمام جهات ساخت محصول است.

در سال‌های اخیر، بهره‌وری در افکار و باورهای ذهنی شرکت‌ها و سازمان‌های مختلف نقشی مهم و حیاتی دارد. از طرفی کاربردهای زنجیرهٔ تأمین در علوم مختلف مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. زنجیرهٔ تأمین کامل، شبکه‌ای شامل چهار بخش تأمین‌کننده، تولیدکننده، توزیع‌کننده و مشتری است. ساختار زنجیرهٔ تأمین از نظر اندازه و پیچیدگی، از یک زنجیرهٔ ساده که نشان‌دهنده تصمیم‌گیری مستقل است تا رفتارها و تعاملات شرکت‌های پیچیده باهم متفاوت است.

نکته مهمی که وجود دارد این است که سنجش و ارزیابی عملکرد مناسب زنجیرهٔ تأمین باید طوری طراحی شود که ویژگی‌های شبکه‌ای زنجیره و تعاملات آن را مد نظر قرار دهد. به‌طور کلی هرچه زنجیرهٔ تأمین بزرگ‌تر و پیچیده‌تر باشد، ارزیابی آن مشکل‌تر و چالش برانگیزتر خواهد بود.

از بین روش‌های مختلف ارزیابی، تجزیه و تحلیل پوششی داده‌ها[۱] یک روش مناسب برای اندازه‌گیری کارایی و عملکرد واحدهای تصمیم‌گیرنده[۲] است. این روش غیرپارامتریک با ارائه مدل‌های مختلف قادر است واحدهای تصمیم گیرنده‌ای که با مصرف چندین ورودی، چندین خروجی تولید می‌نمایند را ارزیابی نماید. تحلیل پوششی داده‌ها تکنیک بسیار مهمی در ادبیات مدیریت زنجیره تأمین است.

روش‌های تحلیل پوششی داده‌های کلاسیک که توسط فارل[۳] (۱۹۵۷) ابداع و به‌وسیله چارنز[٤] و همکاران (۱۹۷۸) جامعیت بخشیده شد، هیچ نظریه‌ای در ارتباط با فعالیت داخلی واحدهای تصمیم‌گیرنده نداشته و آنها را به‌عنوان یک جعبه سیاه[۵] درنظر می‌گیرند و محاسبات خود را به ورودی‌های اولیه و خروجی‌های نهایی محدود کرده و از فرآیندهای داخلی غفلت می‌ورزند. این دیدگاه که فعالیت‌ها و محصولات میانی زنجیرهٔ تأمین را در نظر نمی‌گیرد، مناسب فرآیند تولید ساده بوده و در سیستم شبکه‌ای پیچیده کاربرد لازم را ندارد. لذا به منظور بر طرف نمودن این مشکل مدل‌های مختلفی تحت عنوان تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای ارائه گردید. ساختار زنجیرهٔ تأمین یکی از مهمترین و کاربردی‌ترین حالت‌های تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای می‌باشد. تهیهٔ برنامه‌ریزی شدهٔ مواد اولیه، طراحی و تولید محصولات مناسب، توزیع و حمل‌ونقل بهینهٔ آنها و درنهایت ارائه خدمات به مشتریان و رضایت آن‌ها در قالب مدیریت زنجیرهٔ تأمین، مورد توجه بسیاری قرار دارد.

در مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای به محصولات میانی و ارتباطات داخلی واحدهای تصمیم گیرنده توجه می‌شود و با در نظرگرفتن بخش‌های داخلی یک واحد ارزیابی کارایی انجام می‌شود.

---

[۱] Data Envelopment Analysis (DEA)
[۲] Decision Making Units(DMU)
[۳] Farrell
[٤] Charnes
[۵] Black Box

تحلیل پوششی داده‌ها به ارزیابی عملکرد واحدهای تصمیم‌گیری می‌پردازد. یکی از مفاهیم مهم در این علم تعیین بازده به مقیاس واحدهای تصمیم‌گیرنده است. بازده به مقیاس یک مفهوم اقتصادی و مهم در تحلیل پوششی داده‌هاست که میزان حداکثر افزایش خروجی به ازای افزایش ورودی را نشان می‌دهد. نکته مهم و اساسی این است که تشخیص بازده به مقیاس می‌تواند در مورد توسعه یا تحدید واحدهای تحت ارزیابی اطلاعات مناسبی را ارائه کند. یکی از مفاهیم مهمی که از مفهوم بازده به مقیاس به‌دست می‌آید، معرفی و شناسایی واحدهای با بیشترین مقیاس بهره‌وری است.

لذا در این مطالعه، محقق سعی بر این دارد که در زنجیرهٔ تأمین کامل، واحد تحت ارزیابی با بیشترین مقیاس بهره‌وری را در ساختار زنجیرهٔ تأمین سبز تعریف کرده و نحوه محاسبه آن را با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها بیان کند. در ادامه پس از شناسایی واحدهای با بیشترین مقیاس بهره‌وری، جهت واحدهایی که در این شرایط صدق نمی‌کند نزدیکترین واحد با بیشترین مقیاس بهره‌وری به‌عنوان الگو معرفی شود.

همان‌طور که می‌دانیم پژوهش‌های زیادی در ارتباط با تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای (مرحله‌ای) و همچنین محاسبه بازده به مقیاس در جعبه سیاه انجام گردیده، که اهمیت استفاده از آن را در سنجش کارایی واحدهای تصمیم‌گیری در صنایع مختلف نشان می‌دهد، ولی براساس پژوهش‌های انجام شده تاکنون هیچ‌گونه پژوهشی در خصوص محاسبه بازده به مقیاس در زنجیره تأمین کامل انجام نشده است.

یکی از اولین پژوهش‌ها در خصوص ساختار شبکه و زنجیرهٔ تأمین توسط فار و گروسکوف[۱] (۱۹۹۷) و (۲۰۰۰) در حدود بیست‌وسه سال پیش ارائه شد. آنها برای ساختار کلی شبکه، در ابتدا یک مجموعهٔ امکان تولید[۲] را با توجه به اصول استاندارد اولیه در حالت بازده به مقیاس متغیر، در نظر گرفتند و سپس مجموعهٔ امکان تولید زنجیرهٔ تأمین را با ترکیب کردن مجموعه‌های امکان تولید قسمت‌های داخلی آن ایجاد کردند.

در هر حال برای سنجش کارایی زنجیرهٔ تأمین، باید هم خواص شبکه‌ای این زنجیره را درنظر گرفت و هم روابط بین تأمین کننده مواد و قطعات، تولیدکننده، توزیع کننده و مشتری نهایی را لحاظ نمود. در نظر گرفتن این ملاحظات سبب شد که سارانگا و موزر[۳] (۲۰۱۰) و چن و یان[٤] (۲۰۱۱)، مدل‌های گوناگون با ساختارهای متفاوت زنجیرهٔ تأمین را ارائه نمایند. برای مثال چن و یان برای ارزیابی عملکرد زنجیره تأمین دو مرحله‌ای، سه مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای را تحت مکانیسم‌های سازمانی متمرکز و غیرمتمرکز و ترکیبی ارائه دادند. آنها ارتباط کارایی مکانیسم سازمانی و نیز کارایی کل با کارایی بخشی و اتلاف منبع درونی را بررسی کردند. توانا و همکاران[٥] (۲۰۱۳) با ارائه مدل اندازه‌گیری مبتنی‌بر اپسیلون شبکه‌ای[٦]، عملکرد زنجیرهٔ تأمین را مورد بررسی قرار داده و تغییرات همزمان در ورودی‌ها و خروجی‌ها به‌صورت شعاعی و غیرشعاعی را در شبکه، ارزیابی نمودند. میرهدایتیان و همکاران[۷] (۲۰۱٤) مدیریت زنجیرهٔ تأمین سبز[۸] را روشی برای بهبود عملکرد محیط زیست توصیف کرده و عنوان نمودند که شرکت‌ها

[۱] Fare and Grosskoof
[۲] Production Possibility Set (PPS).
[۳] Saranga and Moser
[٤] Chen and Yan
[٥] Tavana et al.
[٦] Network Epsilon – Based Measure (NEBM)
[۷] Mirhedayatian et al.
[۸] Green Supply Chain Management(GSCM)

تحت فشار ذینفعان، نیروها و مقررات باید عملکرد مدیریت زنجیرهٔ تأمین سبز را بهبود بخشند. آنها به این نکته اشاره کردند که این امر با رویه‌هایی از قبیل خرید سبز، طراحی سبز، بازیابی محصول و همکاری با مشتریان و عرضه‌کنندگان انجام می‌شود و درنتیجه با ارتقای مدیریت زنجیرهٔ تأمین سبز در شرکت‌ها عملکرد اقتصادی و عملکرد محیطی آنها افزایش می‌یابد. ازاین‌رو، ارزیابی مدیریت زنجیرهٔ تأمین سبز برای هر شرکتی بسیار مهم است. در این مقاله مدلی جدید از شبکه تحلیل پوششی داده‌های برای ارزیابی مدیریت زنجیرهٔ تأمین سبز ارائه گردیده است.

شفیعی و همکاران[۱] (۲۰۱٤) پس از بررسی ابزارهای مختلف برای ارزیابی عملکرد زنجیره تأمین به یک رویکرد جدید با تکیه بر تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای و روش کارت امتیازی متوازن[۲] دست یافتند. در این روش، ابتدا ترکیب روش کارت امتیازی متوازن و روش دی‌متل[۳] برای ساختار شبکه‌ای استفاده گردید. سپس ساختار این شبکه، در قالب تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای بیان و ارزیابی در این ساختار انجام گرفت. درواقع مقاله آنها یک چارچوب کلی برای ارزیابی عملکرد زنجیره تأمین با استفاده از ترکیب مدل روش کارت امتیازی متوازن و تحلیل پوششی داده‌ها ارائه نموده است.

گریگرودیس و همکاران[٤] (۲۰۱٤) در مقاله خود تحت عنوان الگوریتم بازگشتی[٥] : یک الگوریتم بازگشتی مبتنی‌بر تحلیل پوششی داده‌ها برای طراحی بهینه شبکه‌های زنجیره تأمین زیست توده روش مختلفی از طراحی شبکه زنجیره تأمین را معرفی کردند. طراحی بهینه شبکه زنجیره تأمین با هدف کاهش هزینه‌های کلی انجام شد و درنتیجه توانست مزایای متعددی برای شرکت‌ها و مشتریان ارائه نماید.

خداکرمی و همکاران[٦](۲۰۱۵) در زمینه پایداری مدیریت زنجیرهٔ تأمین براساس توسعهٔ مدل دو مرحله‌ای، ارزیابی ۲۷ شرکت ایرانی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند.

تاج بخش و حصینی[۷] (۲۰۱۵) روشی برای ارزیابی روش‌های پایداری شبکه‌های زنجیره تأمین ارائه نمودند. روش پایداری خواستار متعادل‌سازی نیازهای اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی است. این مقاله به ارزیابی عملکردهای زنجیره تأمین می‌پردازد که بازده اقتصادی را حداکثر، تأثیرات زیست محیطی را حداقل و انتظارات اجتماعی را برآورده نماید. توانا و همکاران[۸] (۲۰۱٦) یک روش تحلیل پوششی داده‌های دو مرحله‌ای را برای ارزیابی عملکرد زنجیرهٔ تأمین سه مرحله‌ای شامل تأمین‌کننده، تولیدکننده و توزیع‌کننده، ارائه نمودند. مدل ارائه شده می‌تواند به‌راحتی آنالیز جامع زنجیره‌های تأمین چند سطحی را انجام دهد.

یوسفی و همکاران[۹] (۲۰۱۷) در تحقیق خود یک مدل ترکیبی از تجزیه و تحلیل پوششی داده‌ها و برنامه‌ریزی آرمانی[۱۰] در ساختار شبکه ارائه نمودند تا به‌واسطه آن راه‌حل‌های بهبود و واحدهای رتبه‌بندی زنجیره تأمین را ارائه

---

[۱] Shafiee et al.
[۲] Balance Score Card (BSC)
[۳] De Matel
[٤] Grigoroudis et al.
[٥] Recursive Data Envelopment Analysis (RDEA)
[٦] Khodakarami et al.
[۷] Tajbakhsh and Hassini
[۸] Tavana et al.
[۹] Yousefi et al.
[۱۰] Goal Programming (GP)

دهند. از نتیجه این مقاله می‌توان برای ارزیابی و رتبه‌بندی انواع زنجیره‌های تأمین با ساختار شبکه‌های مختلف استفاده نمود.

فتحی و فرضی‌پور سائن[۱](۲۰۱۸) استفاده از یک مدل واقع‌گرایانه و عملی برای ارزیابی زنجیره‌های تأمین پایدار را یک چالش پیچیده برای تصمیم یرندگان عنوان کردند. در این مقاله، برای اولین بار، یک مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای جهت‌دار در ارزیابی پایداری زنجیره‌های تأمین توزیعی پیشنهاد شد. آنها توسط مدل مذکور پایداری شعب یک شرکت حمل‌ونقل ایرانی را ارزیابی نموده و همچنین زنجیره‌های توزیع را رتبه‌بندی کرده و راه‌حل‌های بهبود را پیشنهاد کردند.

روند مطالعات محاسبه کارایی زنجیرهٔ تأمین سبز ادامه یافت و درنهایت توسلی و فرضی‌پور سائن[۲] (۲۰۱۵) در مقاله خود به این نکته اشاره داشتند که در بسیاری از برنامه‌های زندگی واقعی همه ورودی‌ها و یا خروجی‌ها قطعی نیستند و برخی ممکن است تصادفی باشند. در این مقاله با ارائه یک مدل تحلیل پوششی داده‌های تصادفی پیشنهادی، کلیه تأمین‌کنندگان براساس نمره کارآیی آنها به دو گروه کارآمد و ناکارآمد طبقه‌بندی می‌شوند. نتایج این تحقیق نشان-دهنده دقت بالای پیش‌بینی توسط مدل پیشنهادی است.

همان‌طور که اشاره گردید محاسبه کارایی زنجیرهٔ تأمین سبز در حالتها و شرایط متفاوت مطرح و توسعه یافت.

اما موضوعی که کمتر مورد توجه محققین قرار گرفت تعیین بازده به مقیاس زنجیرهٔ تأمین سبز و نتایج مهم آن اعم از معرفی وشناسایی واحدهای با بیشترین مقیاس بهره‌وری است.

در این راستا اولین کار توسط بنکر و ترال[۳] (۱۹۹۲) ارائه گردید. آنها با اشاره به اینکه با تعمیم اندازه‌گیری بازده به مقیاس از یک عدد به یک بازه می‌توان مفهوم را به دامنه‌های تحلیل پوششی داده‌ها با ورودی‌های مختلف و خروجی‌های متعدد گسترش داد رویکرد جدید کلیدی را بیان نمودند بدین صورت که تقسیم یک مرز بهینه شامل سه قسمت است که به ترتیب به بازده به مقیاس افزایشی، ثابت و کاهشی مربوط می‌شود. در این مقاله، آنها یک چارچوب دقیق را ایجاد کردند تا امکان وجود چندین راه‌حل بهینه فراهم شود. برای این منظور، آنها همچنین تعریفی از بازده به مقیاس در نظر گرفتند که برای موقعیت‌های ورودی و خروجی چندگانه کاربرد دارد.

ژانگ و یانگ[۴] (۲۰۱۵) مقاله‌ای برای محاسبه بازده به مقیاس شبکه‌ای در دو مرحله ارائه نمودند. آنها با بیان اینکه تجزیه و تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای یک روش غیرپارامتری برای تعیین بازده به مقیاس واحدهای تصمیم‌گیری با ساختارهای چند مرحله‌ای است، با استفاده از تکنیک‌های تحلیل پوششی داده‌های شبکه، روند تولید دو مرحله‌ای را بررسی کردند. آنها شرایط لازم و کافی برای تشخیص وضعیت بازده به مقیاس[۵] هر مرحله در چارچوب مدل‌های تحلیل پوششی داده‌های شبکه را بررسی و این بررسی منجر به کشف یک روش جدید برای محاسبه مقدار متغیر ورودی اولیه و روابط شد.

---

[۱] Fathi and Farzipoor Saen
[۲] Tavassoli and Farzipoor Saen
[۳] Banker and Thrall
[۴] Zhang and Yang
[۵] Return to Scale (RTS)

در انتها به این موضوع اشاره شده است که اگر چه مطالعه و بحث بر روی سیستم تولید با فرآیند دو مرحله‌ای، تمرکز شده، اما می‌توان کاربرد یافتن بازده به مقیاس و درادامه یافتن واحدهای با بیشترین مقیاس بهره‌وری را به ساختارهای چندمرحله‌ای نیز گسترش داد که موضوع مقاله حاضراست.

علیرضایی و همکاران[۱] (۲۰۱۸) در پژوهش خود یکی از مهمترین مشکلات برای تنظیم یک مدل آنالیز پوششی داده‌ها تحت عنوان شناسایی بازده مناسب به مقیاس برای داده‌ها را بررسی کردند. در این مقاله، یک روش غیر آماری جدید و هدفمند برای شناسایی بازده به مقیاس تکنولوژیکی داده‌ها معرفی شده است. رویکرد پیشنهادی آنها روش زاویه[۲] نامیده می‌شود. آنها برای آزمون اعتبارسنجی روش پیشنهادی، ٦ مورد ورودی/ یک مورد خروجی را بررسی کردند. همچنین، این روش را با استفاده از داده‌های دنیای واقعی یک بانک بزرگ کانادایی آزمایش کردند.

وانگ و همکاران[۳] (۲۰۱۷) در این مقاله با بازده متغیر به مقیاس و یک مدل غیر شعاعی ، به‌طور کامل عملکرد انرژی را از نظر آلایندگی و انتشار گاز CO2 بررسی نمودند. سه نتیجه‌گیری اصلی حاصل شد:

۱. این عملکرد با سطح اقتصادی اعضاء متفاوت است.
۲. اعضای درحال توسعه پتانسیل کاهش بیشتری در مصرف انرژی و انتشار CO2 داشتند.
۳. کاهش انرژی و شدت انتشار CO2 و سهم ارزش‌افزوده صنعتی در کل تولید ناخالص داخلی ممکن است به‌طور موثری عملکرد انرژی و انتشار CO2 را بهبود بخشد. چزوسکی و همکاران[٤] (۲۰۲۰) در مقاله خود به ارزیابی مقرون به صرفه بودن سیاست‌های زیست‌محیطی در سطح شهر تحت سناریوهای مختلف با استفاده از بازده به مقیاس پرداختند. آنها عوامل محیطی در چهار بعد هوا، خاک، آلودگی آب و یکنواختی زیست-محیطی را برآورد کردند.در هر حال با توجه به تحقیقات انجام شده مشخص گردید تاکنون هیچ‌گونه پژوهشی در خصوص محاسبه وشناسایی واحدهای با بیشترین مقیاس بهره‌وری زنجیرۀ تأمین کامل(چهارمرحله‌ای) انجام نشده است.

در این مقاله، کاربرد تحلیل پوششی داده‌ها برای یافتن واحدی با بیشترین مقیاس بهره‌وری را در ساختار زنجیرۀ تأمین سبز تعریف نموده و نحوه محاسبه آن را بیان می‌کنیم. برای این منظور، با استفاده از مدل مضربی BCC زنجیرۀ تأمین کامل، واحدی با بیشترین مقیاس بهره‌وری تعیین می‌شود.

پس از شناسایی واحدهای با بیشترین مقیاس بهره‌وری، برای واحدهایی که در این شرایط صدق نمی‌کند نزدیک-ترین واحد با بیشترین مقیاس بهره‌وری به‌عنوان الگو معرفی می‌شود. یافتن نزدیک‌ترین واحد با بیشترین مقیاس بهره-وری از آن جهت دارای اهمیت است که این واحدها می‌توانند با کم‌ترین تغییرات به آنها برسند.

ادامه این مقاله شامل بخش‌های: مروری بر مفاهیم پایه، ارائه مدل‌هایی مناسب برای محاسبه واحدهای با بیشترین مقیاس بهره‌وری در ساختار شبکه زنجیره تأمین، ارائه مثالی کاربردی در زمینه صنعت سیمان با ساختار مدل‌های پیشنهاد شده، است و در خاتمه نتایج حاصل از اجرای مدل بحث و بررسی می‌شود.

---

[۱] Alirezaee et al.
[۲] Angles
[۳] Wang et al.
[۴] Czyzewski et al.

۲. مفاهیم پایه

مجموعه امکان تولید به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$T = \{(X,Y)$ {خروجی Y بتواند توسط ورودی X تولید شود

مشاهده می‌شود که مجموعه امکان تولید T زمانی مشخص می‌شود که تابع تولید شناخته شده باشد. فرض کنید n واحد تصمیم‌گیرنده موجود است که $X_j = (x_{1j},...,x_{mj})^t$ ، $Y_j = (y_{1j},...,y_{sj})^t$ به‌ترتیب بردارهای ورودی و خروجی DMU_j است و $X_j \geq 0$ ، $X_j \neq 0$ ، $Y_j \geq 0$ ، $Y_j \neq 0$.

درحالت کلی تابع تولید در دسترس نیست. لذا با پذیرفتن اصول شمول مشاهدات، تحدب، امکان‌پذیری و کمینهٔ درون‌یابی، مجموعه امکان تولید به‌صورت ذیل تعریف خواهد شد:

$$T_v = \left\{ \binom{X}{Y} \middle| X \geq \sum_{j=1}^{n} \lambda_j X_j \ , \ Y \leq \sum_{j=1}^{n} \lambda_j Y_j \ , \ \sum_{j=1}^{n} \lambda_j = 1 \ , \ \lambda_j \geq 0 \ , \ j = 1,2,...,n \right\} \quad (۱)$$

حال فرض کنید واحد تحت ارزیابی DMU_o در T_v است.

برای ارزیابی DMU_o، مدل ذیل که دارای ماهیت ورودی است، باید حل شود.

(۲)

$$\begin{aligned} &\text{Min } \theta, \\ &\text{s.t:} \\ &\binom{\theta X_o}{Y_o} \in T_v. \\ &\text{Min } \theta, \\ &\text{s.t:} \\ &\sum_{j=1}^{n} \lambda_j x_{ij} \leq \theta x_{io} , \qquad i = 1,2,...,m \\ &\sum_{j=1}^{n} \lambda_j y_{ij} \geq y_{ro} , \qquad r = 1,2,...,s \\ &\sum_{j=1}^{n} \lambda_j = 1, \\ &\lambda_j \geq 0 . \qquad j = 1,2,...,n \end{aligned}$$

مدل (۲) به مدل BCC در ماهیت ورودی معروف است که توسط بنکر و همکاران[۱] (۱۹۸٤) معرفی گردید. بدیهی است DMU_o کارای قوی یا پاراتوکارا است اگر و فقط اگر $\theta^* = 1$ و در هر جواب بهینهٔ مدل (۲)، مقدار همهٔ متغیرهای کمکی برابر صفر باشد.

تعریف ۱- واحدی با بیشترین مقیاس بهره‌وری[۲] در جعبه سیاه: به‌منظور تعریف واحدی با بیشترین مقیاس بهره‌وری در جعبه سیاه فرض کنیم $(x_o , y_o) \in T_v$ باشد، در آن‌صورت مفاهیم ذیل معادلند:

الف) (x_o , y_o) یک واحد با بیشترین مقیاس بهره‌وری است.

ب) $(x_o , y_o) \in \partial T_v$ و بازده به مقیاس آن ثابت است.

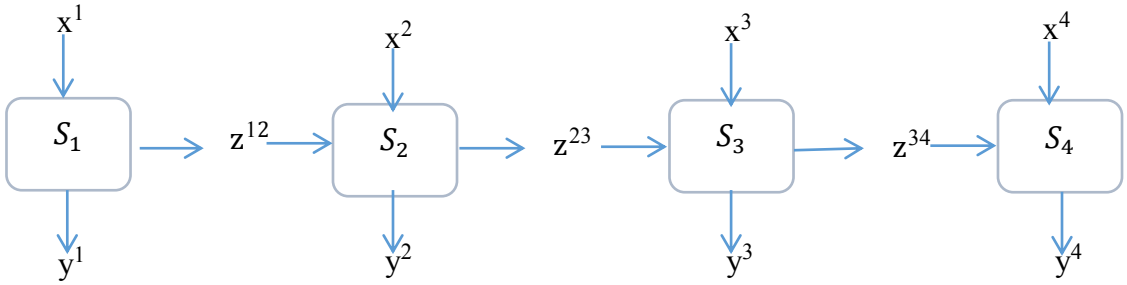
---

[۱] Banker et al.
[۲] Most Product Scale Size(MPSS)

۳. روش‌شناسی

در این بخش دو هدف مهم در الویت قرار دارند. ابتدا با استفاده از محاسبه بازده به مقیاس به معرفی و شناسایی واحدهایی با بیشترین مقیاس بهره‌وری می‌پردازیم. در گام دوم پس از شناسایی واحدهای با بیشترین مقیاس بهره‌وری، برای واحدهایی که در این شرایط صدق نمی‌کند نزدیک‌ترین واحد با بیشترین مقیاس بهره‌وری به‌عنوان الگو معرفی می‌شود.

برای تعریف واحدی با بیشترین مقیاس بهره‌وری در زنجیره تأمین سبز ابتدا شبکه ذیل را در نظر می‌گیریم:



شکل ۱. زنجیره تأمین چهار مرحله‌ای

در زنجیره تأمین کامل فوق:

- S_1، S_2، S_3 و S_4 نشان‌دهندهٔ به‌ترتیب تأمین‌کننده، تولیدکننده، توزیع‌کننده و مشتری هستند.
- $X^f = (x_{ij}^f \ , \ i = 1,2, \dots, m)$ بازای $f = 1,2,3,4$ بردار ورودی DMU_j، شامل ورودی‌های مستقل به مرحله S_f می‌باشد.
- $Z^{k_1k_2} = \left(z_{lj}^{k_1k_2} \ , \ l=1,2,\dots,p\right)$ به‌ازای $k_1= 1,2,3$ و $k_2 = 2,3,4$ داده میانی از مرحله S_{k_1} به S_{k_2} واحد j ام است یا به‌عبارت دیگر بردار خروجی مرحلهٔ S_{k_1} واحد j ام، بردار ورودی مرحلهٔ S_{k_1+1} آن واحد نیز خواهند بود.
- $Y^{k_3} = \left(y_{rj}^{k_3} \ , \ r =1,2,\dots,s\right)$ بازای $k_3= 1,2,3,4$ بردار خروجی مرحله S_{k_3} می‌باشد.

در ادامه فرض کنیم DMU_o یک زنجیرهٔ تأمین با ساختار در نظر گرفته شده مطابق شکل (۱) باشد. این زنجیره را می توان به‌صورت ذیل در نظر گرفت:

$$\left(\underbrace{(x_o^1 \ , y_o^1 \ , z_o^{12})}_{\text{بردار ورودی و خروجی در مرحله (۱)}} \ , \ \underbrace{(x_o^2 \ , z_o^{12} , y_o^2 \ , z_o^{23})}_{\text{بردار ورودی و خروجی در مرحله (۲)}} \ , \ \underbrace{(x_o^3 \ , z_o^{23} , y_o^3 \ , z_o^{34})}_{\text{بردار ورودی و خروجی در مرحله (۳)}} \ , \ \underbrace{(x_o^4 \ , z_o^{34} , y_o^4)}_{\text{بردار ورودی و خروجی در مرحله (۴)}} \right)$$

می‌خواهیم بذای معرفی واحدی با بیشترین مقیاس بهره‌وری در شبکه از تعریف (۱- ب) استفاده نماییم:

$(x_o \ , y_o) \in \Im \ T_v$ و بازده به مقیاس آن ثابت است. لذا مدل BCC دارای ماهیت ورودی جهت زنجیره تأمین فوق در نظر گرفته می‌شود:

(۳)

$$
\begin{aligned}
&\text{Min } \theta,\\
&\text{s.t:}\\
&\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^1\ x_{ij}^1 \le \theta\, x_{io}^1, && i = 1,2,\dots,m_1\\
&\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^1\ z_{lj}^{12} = \sum_{j=1}^{n} \lambda_j^2\, z_{lj}^{12}, && l = 1,2,\dots,p_1\\
&\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^1\ y_{rj}^1 \ge y_{ro}^1, && r = 1,2,\dots,s_1\\
&\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^2\ x_{ij}^2 \le \theta\, x_{io}^2, && i = 1,2,\dots,m_2\\
&\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^2\ z_{lj}^{23} = \sum_{j=1}^{n} \lambda_j^3\ z_{lj}^{23}, && l = 1,2,\dots,p_2\\
&\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^2\ y_{rj}^2 \ge y_{ro}^2, && r = 1,2,\dots,s_2\\
&\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^3\ x_{ij}^3 \le \theta\, x_{io}^3, && i = 1,2,\dots,m_3\\
&\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^3\ z_{lj}^{34} = \sum_{j=1}^{n} \lambda_j^4\ z_{lj}^{34}, && l = 1,2,\dots,p_3\\
&\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^3\ y_{rj}^3 \ge y_{ro}^3, && r = 1,2,\dots,s_3\\
&\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^4\ x_{ij}^4 \le \theta\, x_{io}^4, && i = 1,2,\dots,m_4\\
&\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^4\ y_{rj}^4 \ge y_{ro}^4, && r = 1,2,\dots,s_4\\
&\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^1 = 1, \quad \sum_{j=1}^{n} \lambda_j^2 = 1, \quad \sum_{j=1}^{n} \lambda_j^3 = 1, \quad \sum_{j=1}^{n} \lambda_j^4 = 1,\\
&\lambda_j^1, \lambda_j^2, \lambda_j^3, \lambda_j^4 \ge 0, \quad j = 1,2,\dots,n, \ \theta \text{ free.}
\end{aligned}
$$

که در آن:

۱) به‌ازای $f = 1,2,3,4$ قیود $\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^f\, x_{ij}^f \le \theta\, x_{io}^f, i = 1,2,\dots,m$ متناظر ورودی‌های مستقل مرحله S_f نوشته شده است.

۲) به‌ازای $k_1 = 1,2,3$ و $k_2 = 2,3,4$ قیود $\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^{k_1}\, z_{lj}^{k_1 k_2} \ge \sum_{j=1}^{n} \lambda_j^{k_2}\, z_{lj}^{k_1 k_2}, l = 1,2,\dots,p$ متناظر خروجی مرحله S_{k_1} واحد j ام نوشته شده و نشان‌دهنده آن است که ترکیب محدب این خروجی‌ها به عنوان ورودی‌های مرحله S_{k_2} باید کمتر یا مساوی تولید مرحله S_{k_1} باشند.

۳) به‌ازای $k_3 = 1,2,3,4$ قیود $\sum_{j=1}^{n} y_j^{k_3}\ y_{rj}^{k_3} \ge y_{ro}^{k_3}, r = 1,2,\dots,s$ متناظر خروجی مرحله S_{k_3} نوشته شده است.

با استفاده از مدل (۳) دوآل مدل BCC زنجیرهٔ تأمین کامل (فرم مضربی زنجیرهٔ تأمین) به‌صورت ذیل معرفی می‌شود:

(٤)

$$\text{Max} \quad Z = \sum_{r=1}^{s_1} u_{r1}\, y_{ro}^{1} + \sum_{r=1}^{s_2} u_{r2}\, y_{ro}^{2} + \sum_{r=1}^{s_3} u_{r3}\, y_{ro}^{3} + \sum_{r=1}^{s_4} u_{r4}\, y_{ro}^{4} + u_{o1} + u_{o2} + u_{o3} + u_{o4},$$

s.t:

$$-\sum_{i=1}^{m_1} v_{i1}\, x_{ij}^{1} + \sum_{l=1}^{p_1} w_{l1}\, z_{lj}^{12} + \sum_{r=1}^{s_1} u_{r1}\, y_{rj}^{1} + u_{o1} \le 0, \qquad j = 1,2,\ldots,n$$

$$-\sum_{l=1}^{p_1} w_{l1}\, z_{lj}^{12} - \sum_{i=1}^{m_2} v_{i2}\, x_{ij}^{2} + \sum_{l=1}^{p_2} w_{l2}\, z_{lj}^{23} + \sum_{r=1}^{s_2} u_{r2}\, y_{rj}^{2} + u_{o2} \le 0, \qquad j = 1,2,\ldots,n$$

$$-\sum_{l=1}^{p_2} w_{l2}\, z_{lj}^{23} - \sum_{i=1}^{m_3} v_{i3}\, x_{ij}^{3} + \sum_{l=1}^{p_3} w_{l3}\, z_{lj}^{34} + \sum_{r=1}^{s_3} u_{r3}\, y_{rj}^{3} + u_{o3} \le 0, \qquad j = 1,2,\ldots,n$$

$$-\sum_{l=1}^{p_3} w_{l3}\, z_{lj}^{34} - \sum_{i=1}^{m_4} v_{i4}\, x_{ij}^{4} + \sum_{r=1}^{s_4} u_{r4}\, y_{rj}^{4} + u_{o4} \le 0, \qquad j = 1,2,\ldots,n$$

$$\sum_{i=1}^{m_1} v_{i1}\, x_{io}^{1} + \sum_{i=1}^{m_2} v_{i2}\, x_{io}^{2} + \sum_{i=1}^{m_3} v_{i3}\, x_{io}^{3} + \sum_{i=1}^{m_4} v_{i4}\, x_{io}^{4} = 1,$$

$$v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, v_{i4} \ge 0,$$

$$u_{r1}, u_{r2}, u_{r3}, u_{r4} \ge 0,$$

$$w_{l1}, w_{l2}, w_{l3} \text{ free},$$

$$u_{o1}, u_{o2}, u_{o3}, u_{o4} \text{ free}.$$

۱-۳. واحدی با بیشترین مقیاس بهره‌وری در زنجیره تأمین

فرض کنیم DMU_o یک زنجیره تأمین با ساختار و شکل (۱) باشد. در آن‌صورت تابع هدف مدل (٤) به‌صورت ذیل در نظر گرفته می‌شود:

$$Z = \sum_{r=1}^{s_1} u_{r1}\, y_{ro}^{1} + \sum_{r=1}^{s_2} u_{r2}\, y_{ro}^{2} + \sum_{r=1}^{s_3} u_{r3}\, y_{ro}^{3} + \sum_{r=1}^{s_4} u_{r4}\, y_{ro}^{4} + u_{o1} + u_{o2} + u_{o3} + u_{o4}$$

سپس قرار داده می‌شود:

$$E = \sum_{r=1}^{s_1} u_{r1}\, y_{ro}^{1} + \sum_{r=1}^{s_2} u_{r2}\, y_{ro}^{2} + \sum_{r=1}^{s_3} u_{r3}\, y_{ro}^{3} + \sum_{r=1}^{s_4} u_{r4}\, y_{ro}^{4}$$

$$U_o = u_{o1} + u_{o2} + u_{o3} + u_{o4}$$

یعنی:

$$Z = E^{*} + U_o$$

در آن‌صورت برای آنکه DMU_o یک واحدی با بیشترین مقیاس بهره‌وری باشد باید در ارزیابی DMU_o با مدل (٤) داشته باشیم:

الف) $Z^{*}=1$

ب) $U_o^{*}=0$

شرط (الف) تضمین می‌کند $DMU_o \in \partial T_v$ است.

شرط (ب) هم تضمین می‌کند بازده به مقیاس DMU_o ثابت است. غلام ابری و همکاران[۱] (۲۰۲٤).

بنابراین جمع‌بندی دو شرط (الف) و (ب) عبارتست از:

$$Z^* = E^* = 1$$

۲-۳. تصویر یک زنجیره تأمین دلخواه به بهترین واحد با بیشترین مقیاس بهره‌وری

همان‌طور که می‌دانیم بهترین واحدی با بیشترین مقیاس بهره‌وری، نزدیک‌ترین آنها به واحد تحت ارزیابی است. زیرا با کمترین تغییرات امکان رسیدن به آن میسر می‌شود.

حال برای آنکه DMU_o دلخواه که دارای ساختار زنجیره تأمین است و واحدی با بیشترین مقیاس بهره‌وری نمی‌باشد را به نزدیک‌ترین واحدی با بیشترین مقیاس بهره‌وری تصویر نماییم الگوریتم ذیل را به‌کار می‌بریم:

ابتدا مدل (٤) را برای ارزیابی DMU_o به‌کار می‌بریم و سپس تابع هدف مدل را به‌صورت $Z^* = E^* + U_o^*$ در نظر می‌گیریم.

الف) اگر $U_o^* = 0$ باشد (با توجه به اینکه فرض شده DMU_o ، واحدی با بیشترین مقیاس بهره‌وری نیست) پس $Z^* < 1$ است. حال برای آنکه به مرز T_v منتقل شویم مدل (۳) را حل می نماییم. نقطه تصویر ذیل که از جواب بهینه مدل (۳) به‌دست آید یک واحدی با بیشترین مقیاس بهره‌وری است.

$$\left(\frac{\theta^* x_o^1 - S_1^{-*}}{\sum_{j=1}^n \lambda_j^{1*}}, \frac{\theta^* x_o^2 - S_2^{-*}}{\sum_{j=1}^n \lambda_j^{2*}}, \frac{\theta^* x_o^3 - S_3^{-*}}{\sum_{j=1}^n \lambda_j^{3*}}, \frac{\theta^* x_o^4 - S_4^{-*}}{\sum_{j=1}^n \lambda_j^{4*}}, \frac{y_o^1 + S_1^{+*}}{\sum_{j=1}^n \lambda_j^{1*}}, \frac{y_o^2 + S_2^{+*}}{\sum_{j=1}^n \lambda_j^{2*}}, \frac{y_o^3 + S_3^{+*}}{\sum_{j=1}^n \lambda_j^{3*}}, \frac{y_o^4 + S_4^{+*}}{\sum_{j=1}^n \lambda_j^{4*}}\right)$$

ب) اگر $U_o^* > 0$ باشد (زنجیره دارای بازده به مقیاس صعودی باشد) برای آنکه زنجیره DMU_o را به نزدیک‌ترین واحدی با بیشترین مقیاس بهره‌وری تصویر نماییم، ابتدا مدل ذیل را حل می‌کنیم:

(۵)

$$\begin{aligned}
&\text{Min } \theta,\\
&\text{s.t:}\\
&\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^1 \; x_{ij}^1 \le \theta \, x_{io}^1, && i = 1,2,\ldots,m_1\\
&\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^1 \; z_{lj}^{12} = \sum_{j=1}^{n} \lambda_j^2 \, z_{lj}^{12}, && l = 1,2,\ldots,p_1\\
&\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^1 \; y_{rj}^1 \ge y_{ro}^1, && r = 1,2,\ldots,s_1\\
&\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^2 \; x_{ij}^2 \le \theta \, x_{io}^2, && i = 1,2,\ldots,m_2\\
&\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^2 \; z_{lj}^{23} = \sum_{j=1}^{n} \lambda_j^3 \, z_{lj}^{23}, && l = 1,2,\ldots,p_2
\end{aligned}$$

[۱] Gholam Abri et al.

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^2 \; y_{rj}^2 \geq y_{ro}^2, \qquad r = 1,2,\ldots,s_2$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^3 \; x_{ij}^3 \leq \theta \, x_{io}^3, \qquad i = 1,2,\ldots,m_3$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^3 \; z_{lj}^{34} = \sum_{j=1}^{n} \lambda_j^4 \; z_{lj}^{34}, \qquad l = 1,2,\ldots,p_3$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^3 \; y_{rj}^3 \geq y_{ro}^3, \qquad r = 1,2,\ldots,s_3$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^4 \; x_{ij}^4 \leq \theta \, x_{io}^4, \qquad i = 1,2,\ldots,m_4$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^4 \; y_{rj}^4 \geq y_{ro}^4, \qquad r = 1,2,\ldots,s_4$$

$$\lambda_j^1, \; \lambda_j^2, \; \lambda_j^3, \; \lambda_j^4 \geq 0, \qquad j = 1,2,\ldots,n, \; \theta \text{ free.}$$

در این‌حالت θ^* و بردارهای λ_j^{*1} ، λ_j^{*2} ، λ_j^{*3} ، λ_j^{*4} محاسبه می‌شوند.

سپس برای اینکه به نزدیک‌ترین واحد با بیشترین مقیاس بهره‌وری برسیم مدل ذیل حل می‌شود:

(٦)

$$Min \sum_{j=1}^{n} \lambda_j^1 + \sum_{j=1}^{n} \lambda_j^2 + \sum_{j=1}^{n} \lambda_j^3 + \sum_{j=1}^{n} \lambda_j^4$$

s.t:

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^1 \; x_{ij}^1 \leq \theta \, x_{io}^1, \qquad i = 1,2,\ldots,m_1$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^1 \; z_{lj}^{12} = \sum_{j=1}^{n} \lambda_j^2 \; z_{lj}^{12}, \qquad l = 1,2,\ldots,p_1$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^1 \; y_{rj}^1 \geq y_{ro}^1, \qquad r = 1,2,\ldots,s_1$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^2 \; x_{ij}^2 \leq \theta \, x_{io}^2, \qquad i = 1,2,\ldots,m_2$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^2 \; z_{lj}^{23} = \sum_{j=1}^{n} \lambda_j^3 \; z_{lj}^{23}, \qquad l = 1,2,\ldots,p_2$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^2 \; y_{rj}^2 \geq y_{ro}^2, \qquad r = 1,2,\ldots,s_2$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^3 \; x_{ij}^3 \leq \theta \, x_{io}^3, \qquad i = 1,2,\ldots,m_3$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^3 \; z_{lj}^{34} = \sum_{j=1}^{n} \lambda_j^4 \; z_{lj}^{34}, \qquad l = 1,2,\ldots,p_3$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^3 \; y_{rj}^3 \geq y_{ro}^3, \qquad r = 1,2,\ldots,s_3$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^4 \; x_{ij}^4 \le \theta \, x_{io}^4, \qquad i = 1,2,...,m_4$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^4 \; y_{rj}^4 \ge y_{ro}^4, \qquad r = 1,2,...,s_4$$

$$\theta = \theta^*$$

$$\lambda_j^1 , \lambda_j^2 , \lambda_j^3 , \lambda_j^4 \ge 0 , \quad j = 1,2,...,n , \; \theta \text{ free.}$$

متغیرهای این مسئله فقط بردارهای $\lambda_j^1 , \lambda_j^2 , \lambda_j^3 , \lambda_j^4$ هستند.

ج) اگر $U_o^* < 0$ باشد (زنجیره دارای بازده به مقیاس نزولی باشد) برای آنکه زنجیره DMU_o را به نزدیکترین واحد با بیشترین مقیاس بهره‌وری تصویر نماییم، ابتدا مدل (۵) حل خواهد شد.

سپس برای اینکه به نزدیک‌ترین واحد با بیشترین مقیاس بهره‌وری برسیم مدل ذیل حل می‌شود:

(۷)

$$Max \sum_{j=1}^{n} \lambda_j^1 + \sum_{j=1}^{n} \lambda_j^2 + \sum_{j=1}^{n} \lambda_j^3 + \sum_{j=1}^{n} \lambda_j^4$$

s.t:

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^1 \; x_{ij}^1 \le \theta \, x_{io}^1 , \qquad i = 1,2,...,m_1$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^1 \; z_{lj}^{12} = \sum_{j=1}^{n} \lambda_j^2 \; z_{lj}^{12}, \qquad l = 1,2,...,p_1$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^1 \; y_{rj}^1 \ge y_{ro}^1 , \qquad r = 1,2,...,s_1$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^2 \; x_{ij}^2 \le \theta \, x_{io}^2, \qquad i = 1,2,...,m_2$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^2 \; z_{lj}^{23} = \sum_{j=1}^{n} \lambda_j^3 \; z_{lj}^{23}, \qquad l = 1,2,...,p_2$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^2 \; y_{rj}^2 \ge y_{ro}^2, \qquad r = 1,2,...,s_2$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^3 \; x_{ij}^3 \le \theta \, x_{io}^3, \qquad i = 1,2,...,m_3$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^3 \; z_{lj}^{34} = \sum_{j=1}^{n} \lambda_j^4 \; z_{lj}^{34} , \qquad l = 1,2,...,p_3$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^3 \; y_{rj}^3 \ge y_{ro}^3, \qquad r = 1,2,...,s_3$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^4 \; x_{ij}^4 \le \theta \, x_{io}^4, \qquad i = 1,2,...,m_4$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j^4 \; y_{rj}^4 \ge y_{ro}^4, \qquad r = 1,2,...,s_4$$

$$\theta = \theta^*$$

$$\lambda_j^1 , \lambda_j^2 , \lambda_j^3 , \lambda_j^4 \ge 0 , \quad j = 1,2,...,n , \; \theta \text{ free.}$$

متغیرهای این مسئله فقط بردارهای λ_j^1 , λ_j^2 , λ_j^3 , λ_j^4 هستند.

درواقع مختصات نقطه تصویر از حل مدل‌های (٦) و (۷) در حالت $U_o^* > 0$ و $U_o^* < 0$ به‌دست می‌آید.

٤. مطالعه موردی

مدیریت زنجیرهٔ تأمین سبز، یک موضوع حیاتی در سازمان‌هاست که مدیران برای ارزیابی عملکرد، نیاز به طراحی مدل‌های مناسب در این زمینه دارند. در این تحقیق، برای تعیین واحدی با بیشترین مقیاس بهره‌وری زنجیره تعداد ٤۲ شرکت از شرکت‌های فعال در صنعت سیمان در نظر گرفته شده‌است. به‌منظور آزمون مدل ارائه شده، از داده‌های واقعی صنعت سیمان حاضر در بورس اوراق بهادار در سال ۱۳۹۸، استفاده شده است (درویش متولی و همکاران، ۱۳۹۸). مدل ارائه شده قادر است واحدی با بیشترین مقیاس بهره‌وری زنجیره تأمین متناظر این صنعت را محاسبه نماید. بر همین اساس شاخص‌های مد نظر در جدول ۱ بیان شده است که شامل شاخص‌های مالی، اقتصادی و تولیدی است.

جدول ۱. معرفی شاخص‌ها و تعاریف آنها برای واحد تصمیم گیرندهٔ j ام در ورودی‌های مستقل و خروجی‌ها و داده‌های میانی

عنوان شاخص‌ها	دسته‌بندی شاخص‌ها	نمادها	
کیفیت تأمین‌کنندگان به‌لحاظ پایداری در عرضه مواد معدنی و لوازم مصرفی	ورودی‌های اولیه زنجیره تأمین	x_{1j}^1	X_{ij}^1
هزینه آموزش سبز و پایداری جهت رعایت مسائل مربوطه در طول زنجیره		x_{2j}^1	
مجموع سرمایه‌گذاری اولیه در بهره‌برداری از معادن و فرآیند کارخانه		x_{3j}^1	
مجموع هزینه خرید مواد معدنی ، شیمیایی و لوازم مصرفی دیگر		x_{4j}^1	
مجموع هزینه پرداختی بابت برداشت از معادن به پیمانکاران		x_{5j}^1	
مجموع هزینه حمل‌ونقل پرداختی		x_{6j}^1	
مجموع هزینه‌های مالی		x_{7j}^1	
مجموع هزینه حقوق و دستمزد پرداختی		x_{8j}^1	
تأثیر عملکرد کارخانه بر ایجاد آثار مخرب زیست‌محیطی در برداشت از معادن	خروجی‌های مرحله اول	y_{1j}^1	Y_{rj}^1
مجموع ذخایر معدنی در اختیار		y_{2j}^1	
مجموع تناژ مواد اولیه شیمیایی و معدنی افزودنی در فرآیند تولید	داده‌های میانی(خروجی مرحله اول و ورودی مرحله دوم)	z_{1j}^{12}	Z_{lj}^{12}
مجموع مواد اولیه معدنی دپو شده برای استفاده در فصل سرما		z_{2j}^{12}	
کیفیت ارائه برنامه آموزشی برای تأمین‌کنندگان و کارکنان در راستای تولید پایدار و TQM		z_{3j}^{12}	
مجموع هزینه تحقیق و توسعه		z_{4j}^{12}	
ظرفیت واقعی صنعت		z_{5j}^{12}	
انعطاف‌پذیری تأمین‌کنندگان	ورودی‌های مستقل مرحله دوم	x_{1j}^2	X_{ij}^2
بهبود روابط در طول زنجیره تأمین		x_{2j}^2	
مجموع هزینه در راستای افزایش قابلیت اطمینان در زنجیره تأمین		x_{3j}^2	
توجه به اصول استانداردهای قانونی و ضوابط دولتی در طول زنجیره		x_{4j}^2	

عنوان شاخص‌ها	دسته‌بندی شاخص‌ها	نمادها	
مجموع هزینه پرداخت انرژی		x_{5j}^{2}	
میران برق مصرفی در یک سال بر حسب کیلو وات ساعت		x_{6j}^{2}	
میزان گاز مصرفی در یک سال بر حسب متر مکعب در تن		x_{7j}^{2}	
میزان انرژی سوختی مازوت مصرفی در یک سال بر حسب لیتر به تن		x_{8j}^{2}	
مجموع ذرات غبار تولید شده (mg/m3)	خروجی‌های مرحله دوم	y_{1j}^{2}	Y_{rj}^{2}
میانگین سالیانه گازهای گلخانه ی از نوع NOX منتشر شده (mg/m3)		y_{2j}^{2}	
میانگین سالیانه گازهای گلخانه‌ای از نوع CO منتشر شده (mg/m3)		y_{3j}^{2}	
میانگین سالیانه گازهای گلخانه‌ای از نوع SO2 منتشر شده (mg/m3)		y_{4j}^{2}	
تاثیر مجموع نفوذ آب مصرفی و فاضلاب در آب‌های زیرزمینی		y_{5j}^{2}	
مجموع تناژ تولیدی کلینکرکارخانه	داده‌های میانی(خروجی مرحله دوم و ورودی مرحله سوم)	z_{1j}^{23}	Z_{lj}^{23}
مجموع تناژ تولیدی سیمان کارخانه		z_{2j}^{23}	
تدارکات معکوس	ورودی‌های مستقل مرحله سوم	x_{1j}^{3}	X_{ij}^{3}
تلاش در راستای استفاده از فناوری‌های پیشرفته و مواد اولیه جایگزین		x_{2j}^{3}	
مجموع هزینه بازاریابی		x_{3j}^{3}	
هزینه طراحی سازگاری با محیطزیست		x_{4j}^{3}	
تعداد پاکت سیمان مصرف شده در طی یکسال از نوع pp		x_{5j}^{3}	
مجموع ارزش ریالی دارایی‌ها و موجودی نگهداری شده آماده برای فروش	خروجی مرحله سوم	y_{1j}^{3}	Y_{rj}^{3}
مجموع تناژ فروش سیمان پاکتی و فله در بازار داخلی و صادرات	داده‌های میانی(خروجی مرحله سوم و ورودی مرحله چهارم)	z_{1j}^{34}	Z_{lj}^{34}
مجموع تناژ کلینکر فروش رفته		z_{2j}^{34}	
بهای تمام شده محصول		z_{3j}^{34}	
پیاده سازی اصول کیفیت زندگی کاری و رفاه اجتماعی برای پرسنل	ورودی‌های مستقل مرحله چهارم	x_{1j}^{4}	X_{ij}^{4}
اثرگذاری کارخانه در منطقه فعالیت		x_{2j}^{4}	
پاسخگویی اجتماعی		x_{3j}^{4}	
مجموع دارایی‌ها	خروجی‌های نهایی	y_{1j}^{4}	Y_{rj}^{4}
رقابت پذیری و جهانی سازی برند کارخانه		y_{2j}^{4}	
نگرش فرهنگی به احداث فضای سبز		y_{3j}^{4}	
مجموع درآمد حاصل از فروش محصولات		y_{4j}^{4}	
مجموع سود حاصل شده		y_{5j}^{4}	
نرخ رشد سالیانه براساس عملکرد		y_{6j}^{4}	
بازده دارایی‌ها ROA		y_{7j}^{4}	
بازده حساب صاحبان سهام		y_{8j}^{4}	
رضایت مندی مشتریان		y_{9j}^{4}	

طبق جداول فوق شاخص‌ها براساس نظر کارشناسان و مدیران تعریف شد. در ادامه توسط نرم‌افزار گمز مدل (٤) را اجرا کرده و کارایی کل زنجیره محاسبه گردید. نتایج در جدول۲ نشان داده شده است:

جدول ۲. تعیین واحدی با بیشترین مقیاس بهره‌وری زنجیره تأمین

نام شرکت		Z	u_{01}	u_{02}	u_{03}	u_{04}	U_0	MPSS نزدیک‌ترین
ساباد	DMU1	۱.۰۰۰۰۰۰۰	۰	۰	+	۰	۰	خودش
سابیک	DMU2	۱.۰۰۰۰۰۰۰	+	۰	۰	۰	۰	خودش
ساراب	DMU3	۰.۹۹۸۱۸٤۷	–	۰	۰	–	–	DMU11
ساربیل	DMU4	۰.۹۹۸٦۰۷۷	۰	۰	+	–	–	DMU11
ساروم	DMU5	۱.۰۰۰۰۰۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	خودش
ساوه	DMU6	۱.۰۰۰۰۰۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	خودش
سباقر	DMU7	۱.۰۰۰۰۰۰۰	۰	۰	۰	–	–	DMU36
سبجنو	DMU8	۰.۹۹۷۸۷۷۱	۰	۰	–	۰	۰	DMU15
سبزوا	DMU9	۰.۹۹۹۳۰۷۲	–	۰	۰	۰	۰	DMU15
سبهان	DMU10	۰.۹۹۸۰۹۸٤	–	۰	۰	۰	۰	DMU17
سپاها	DMU11	۱.۰۰۰۰۰۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	خودش
ستران	DMU12	۱.۰۰۰۰۰۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	خودش
سجام	DMU13	۰.۹۹٦٦٤۱۳	۰	+	+	۰	۰	DMU18
سخاش	DMU14	۰.۹۹۹٦۲۹۸	۰	۰	۰	–	–	DMU12
سخرم	DMU15	۱.۰۰۰۰۰۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	خودش
سخزر	DMU16	۰.۹۹۹۹۲٦۷	۰	۰	۰	–	–	DMU11
سخواف	DMU17	۱.۰۰۰۰۰۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	خودش
سخوز	DMU18	۱.۰۰۰۰۰۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	خودش
سدشت	DMU19	۱.۰۰۰۰۰۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	خودش
سدور	DMU20	۰.۹۹۸٦۰۷٤	۰	۰	+	–	+	DMU5
سرود	DMU21	۰.۹۹۹٦۷۱۱	۰	۰	+	۰	۰	DMU15
سشرق	DMU22	۰.۹۹۸۰۰۹۳	۰	۰	+	۰	۰	DMU17
سشمال	DMU23	۱.۰۰۰۰۰۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	خودش
سصفها	DMU24	۱.۰۰۰۰۰۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	خودش
سصوفی	DMU25	۰.۹۹۸۱۰٤۷	–	۰	+	–	–	DMU11
سغرب	DMU26	۰.۹۹٤۸۷۹۸	۰	۰	+	–	–	DMU11
سفار	DMU27	۱.۰۰۰۰۰۰۰	۰	۰	۰	–	–	DMU12
سفارس	DMU28	۰.۹۹۸۷۷۱۱	–	۰	+	۰	۰	DMU15
سفاروم	DMU29	۱.۰۰۰۰۰۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	خودش
سفانو	DMU30	۰.۹۹۸۹٦٦۷	–	۰	–	–	–	DMU12
سفیروز	DMU31	۱.۰۰۰۰۰۰۰	۰	۰	۰	–	۰	خودش

MPSS نزدیک‌ترین	U_0	u_{04}	u_{03}	u_{02}	u_{01}	Z	نام شرکت	
DMU11	−	−	+	۰	−	۰.۹۹۹۰۵٦۲	DMU32	سقاین
DMU11	−	−	+	۰	۰	۰.۹۹۹۰۱۷۵	DMU33	سکارون
DMU6	−	−	+	−	۰	۰.۹۹۷٦۱۵۳	DMU34	سکرد
DMU15	۰	+	۰	۰	۰	۰.۹۹۹۰۳۲۷	DMU35	سکرما
خودش	۰	۰	۰	۰	۰	۱.۰۰۰۰۰۰۰	DMU36	سلار
خودش	۰	۰	۰	۰	۰	۱.۰۰۰۰۰۰۰	DMU37	سمازن
DMU18	۰	۰	۰	۰	−	۰.۹۹۸۷۰۳۹	DMU38	سمتاز
خودش	۰	۰	۰	۰	۰	۱.۰۰۰۰۰۰۰	DMU39	سنیر
خودش	۰	۰	۰	۰	۰	۱.۰۰۰۰۰۰۰	DMU40	سهرمز
DMU11	−	−	۰	۰	−	۰.۹۹۹۵۳۱۵	DMU41	سهگمت
DMU5	+	۰	۰	۰	+	۰.۹۹۹۰۸۱۳	DMU42	سیلام

همان‌طور که در جدول ۲ ملاحظه می‌شود ستون سوم نشان‌دهنده میزان کارایی کل زنجیره تامین است که از حل مدل (٤) به‌دست آمده است.

به‌علاوه ستونهای ٤،٥،٦،٧ به‌ترتیب نشان‌دهنده بازده به مقیاس مراحل ۱،۲،۳،٤ است. ستون ۸ ام نمایشگر بازده به مقیاس کل زنجیره تامین است. برای تعیین واحدهایی با بیشترین مقیاس بهره‌وری به ستون سوم (تابع هدف کل) و ستون ۸ ام (بازده به مقیاس کل) رجوع می‌کنیم. همان‌طور که ملاحظه می‌شود واحدهای۱۱،۱۲،۱۵،۱۷،۱،۲،۳،۵،٦،۱۸،۱۹،۲۳،۲٤،۲۹،۳۱،۳٦،۳۷،۳۹،٤۰، به‌عنوان تعیین واحدهایی با بیشترین مقیاس بهره‌وری معرفی می‌شوند و مابقی واحدها به‌عنوان واحدهای عادی تلقی می‌شوند. درستون نهم جدول ۲ برای واحدهای عادی، نزدیک‌ترین واحد با بیشترین مقیاس بهره‌وری (واحد الگو) مشخص شده است. برخی از این واحدها ناکارا بوده و برخی از آنها با آنکه کارا هستند دارای بازده به مقیاس غیرثابت هستند.

۵. نتیجه‌گیری

در عصر حاضر ارزیابی و سپس بهبود عملکرد سیستم‌های تولیدی و در کل زنجیره‌های تأمین، به‌عنوان تنها راه ممکن جهت رقابت در بازار جهانی کسب‌وکار مطرح است. تکنیک تحلیل پوششی داده‌ها به‌عنوان یک روش برنامه‌ریزی ریاضی، روشی ناپارامتریک برای اندازه‌گیری کارایی نسبی سیستم‌های تولیدی و واحدهای تصمیم‌گیرنده با چندین ورودی و خروجی همگن است. تعیین نوع بازده به مقیاس به مدیران کمک می‌کند که پیش‌بینی‌های دقیقتری در رابطه با توسیع یا تحدید واحد تصمیم‌گیرنده داشته باشند. یکی از مفاهیم مهمی که از مفهوم بازده به مقیاس به‌دست می‌آید، معرفی و شناسایی واحدهای با بیشترین مقیاس بهره‌وری است.

لذا در این مقاله محقق ابتدا واحد تحت ارزیابی با بیشترین مقیاس بهره‌وری را در ساختار زنجیرهٔ تأمین سبز تعریف و نحوه محاسبه آن را با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها بیان کرد. در ادامه پس از شناسایی واحدهای با

بیشترین مقیاس بهره‌وری، برای واحدهایی که در این شرایط صدق نمی‌کند نزدیک‌ترین واحد با بیشترین مقیاس بهره‌وری به‌عنوان الگو معرفی شد.

برای نشان دادن کاربرد روش پیشنهادی ، داده‌های واقعی ٤۲ شرکت سیمانی حاضر در بورس اوراق بهادار در سال ۱۳۹۸ با ورودی‌ها ، خروجی‌ها و داده‌های میانی به کار گرفته شد. همان‌طور که ملاحظه شد شرکت‌های فوق دارای ساختار زنجیره تامین چهار مرحله‌ای هستند. پس از ارزیابی این شرکت‌ها ملاحظه شد که ۱۸ واحد به‌عنوان واحدهایی با بیشترین مقیاس بهره‌وری شناخته شدند. به‌علاوه برای ۲٤ واحد باقیمانده، بهترین واحد با بیشترین مقیاس بهره‌وری به‌عنوان الگو معرفی شدند.

حامی مالی

این مقاله حامی مالی ندارد.

تعارض منافع

تعارض منافع وجود ندارد.

سپاسگزاری

نویسنده از تمامی اعضای فصلنامه و نیز داوران ناشناس که در بهبود کیفیت مقاله کمک کردند، تشکر می‌کند.

ORCID

Amir Gholm Abri https://orcid.org/0000-0003-1981-9756

منابع

- درویش متولی، محمد حسین، حسین زاده لطفی، فرهاد، شجاع، نقی و غلام ابری، امیر(۱۳۹۸). محاسبه کارایی زنجیره تـامین پایدار در صنعت سیمان (کاربرد مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای). *مدلسازی اقتصادی*،۱۳(٤٦)،۱۰۰-۷۳.

- Alirezaee, M., Hajinezhad, E,. Paradi, J.C (2018). Objective identification of technological returns to scale for data envelopment analysis models. *European Journal of Operational Research*, *266*, 678–688.
- Banker, R.D., Charnes, A., and Cooper, W.W. (1984). Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, *30*(9), pp. 1078-1092.
- Banker, R.D., Thrall, R.M. (1992). Estimation of returns to scale using Data Envelopment Analysis. *European Journal of Operational Research 62*, pp. 74–84.
- Charnes, A., Cooper, W.W., Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of DMUs. *European Journal of Operational Research* 2, pp. 429–444.
- Chen, C., Yan, H. (2011). Network DEA model for supply chain performance evaluation. *European Journal of Operational Research*, *213*(1), pp. 147-155.
- Czyzewski, B., Smedzik-Ambrozy, K., Mrowczynska-Kaminska, A. (2020). Impact of environmental policy on eco-efficiency in country districts in Poland: How does the decreasing return to scale change perspectives?. *Environmental Impact Assessment Review*,*84*,106431.
- Darvish Motevally,M. H.,Hosseinzadeh Lotfi,F.,, Shoja, N., Gholam Abri,A.(2019).Calculating the sustainable supply chain performance in the cement industry (application of network data envelopment analysis model) .*Economic Modeling*,*13* (46),73-100 (in Persian).
- Fare, R., Grosskopf, and S. (1997).Intertemporal production frontiers: with dynamic DEA. *Journal of the Operational Research Society*, *48*(6), pp. 656-656.
- Fare, R., Grosskopf, S. (2000). Network DEA. *Socio-Economic Planning Sciences*, *34*(1), pp. 35-49.
- Farrell, M (1957). The measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal Statistics Society*, *120*(3), 253-281.
- Fathi, A., Farzipoor Saen, R. (2018). A novel bidirectional network data envelopment analysis model for evaluating sustainability of distributive supply chains of transport companies. *Journal of Cleaner Production*, *184*, 696-708.
- Grigoroudis, E., Petridis, K., Arabatzis, G. (2014). RDEA: A recursive DEA based algorithm for the optimal design of biomass supply chain networks. *Renewable Energy*, *71*, 113-122.
- Khodakarami, M., Shabani, A., Saen, R. F., & Azadi, M. (2015). Developing distinctive two-stage data envelopment analysis models: An application in evaluating the sustainability of supply chain management. *Measurement*, *70*, 62-74.
- Mirhedayatian, S.M., Azadi, M., Saen, R.F. (2014). A novel network data envelopment analysis model for evaluating green supply chain management. *International Journal of Production Economics*, *147*, 544-554.
- Saranga, H., Moser, R. (2010). Performance evaluation of purchasing and supply management using value chain DEA approach. *European Journal of Operational research*, *207* (1), pp. 197-205.
- Shafiee, M., Lotfi, F.H., Saleh, H. (2014). Supply chain performance evaluation with data envelopment analysis and balanced scorecard approach. *Applied Mathematical Modelling*, *38* (21-22), 5092-5112.
- Sharafeddin. R, Gholam Abri. A, Fallah. C, Hosseinzadeh Lotfi. F. (2024). Mathematical model for estimation of return to scale in four-level green supply chain by using data envelopment analysis. *International Journal of Engineering*, Vol. *37* No. 04, 608-624.
- Tajbakhsh, A., Hassini, E. (2015). A data envelopment analysis approach to evaluate sustainability in supply chain networks. *Journal of Cleaner Production*, *105*, 74-85.

- Tavana, M., Kaviani, M.A., Di Caprio, D., Rahpeyma, B. (2016). A two-stage data envelopment analysis model for measuring performance in three-level supply chains. *Measurement, 78*, 322-333.
- Tavana, M., Mirzagoltabar, H., Mirhedayatian, S.M., Saen, R.F., Azadi, M. (2013). A new network epsilon-based DEA model for supply chain performance evaluation. *Computers & Industrial Engineering*, *66*(2), 501-513.
- Tavassoli, M., Farzipoor Saen, R. (2019). Predicting group membership of sustainable suppliers via data envelopment analysis and discriminant analysis. *Sustainable Production and Consumption*, *18*, pp. 41-52.
- Wang, Zh., He, W., Wang, B. (2017). Performance and reduction potential of energy and CO2 emissions among the APEC's members with considering the return to scale. *Energy*, *138*, 552-562.
- Yousefi, S., Soltani, R., Farzipoor Saen, R., Pishvaee, M. S. (2017). A robust fuzzy possibilistic programming for a new network GP-DEA model to evaluate sustainable supply chains. *Journal of Cleaner Production*, *166*, 537-549.
- Zhang, Q., Yang, Zh. (2015). Returns to scale of two-stage production process. *Computers & Industrial Engineering*, *90*, 259–268.