



Evaluation of Continuous Two-stage Structures: A New Multi-objective Network Data Envelopment Analysis (MO-NDEA) Approach

Reza Soleymani Damaneh

Assistant Prof., Department of Management, Faculty of Economic and Administrative Sciences, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran. E-mail: r.soleymani@vru.ac.ir

Abstract

Objective: Traditional DEA models cannot determine the source of inefficiency for structures with more than one stage (network structures). Continuous two-stage structures are one of the most applicable and basic network structures, and one of their main challenges is determining the relationship between the total efficiency and the efficiency of the stage and also determining the optimum amount of intermediate variables. The available models in solving the challenges and calculating the efficiency have or are not applicable for all two-stage structures. The purpose of this study is developing a multi-objective network DEA model that doesn't have the weaknesses of the previous model.

Methods: In this study, it is attempted to develop a multi-objective model with a composition approach that considers the efficiency of the stages simultaneously, and also to interpret the results geometrically and compare it with the available models. The presented model was developed to multi-optimal and VRS conditions.

Results: In all the models, efficiencies are between zero to one and a unit is network efficient only and only when it is efficient in both stages.

Conclusion: The presented model was used in an applicable example to evaluate the sustainability of 17 supply chains and the results showed that the model does a realistic evaluation in comparison to the traditional models. In the end, the model priority over the literature review models was mentioned with examples.

Keywords: Network DEA, Performance evaluation, Two-stage structures, Multi-objective models, Efficiency.

Citation: 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)

Industrial Management Journal, 2019, Vol. 11, No.3, pp. 487-516

DOI: 10.22059/imj.2019.280013.1007585

Received: November 01, 2018; Accepted: April 29, 2019

© Faculty of Management, University of Tehran

ارزیابی ساختارهای دومرحله‌ای متوالی: رویکرد تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای چندهدفه (MO-NDEA)

رضا سلیمانی دامنه

استادیار، گروه مدیریت، دانشکده علوم اداری و اقتصاد دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان، ایران. رایانامه: r.soleymani@vru.ac.ir

چکیده

هدف: مدل‌های اولیه تحلیل پوششی داده‌ها در مواجهه با ساختارهای با بیش از یک مرحله (شبکه‌ای) نمی‌توانند منبع ناکارایی را به خوبی مشخص کنند. ساختارهای شبکه‌ای دو مرحله‌ای متوالی، یکی از ساختارهای شبکه‌ای مبنا و پرکاربرد است. چالش اصلی بررسی این ساختار، ارتباط بین کارایی کل و کارایی مراحل و تعیین مقدار بهینه متغیرهای میانی است. مدل‌های موجود در حل این چالش‌ها و محاسبه کارایی‌ها یا همراه با خطا هستند یا امکان توسعه به انواع ساختارهای دومرحله‌ای را ندارند. هدف این مقاله، توسعه یک مدل چندهدفه تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای است که ضعف‌های مدل‌های موجود را ندارد.

روش: در این مقاله تلاش شده است که با رویکرد ترکیب، مدل چندهدفه‌ای که هم‌زمان کارایی مراحل را مدنظر قرار می‌دهد توسعه داده شده و به بیان تعبیر هندسی و مقایسه آن با مدل‌های موجود پرداخته شود. مدل ارائه‌شده برای شرایط جواب بهینه چندانکه و بازده به مقیاس متغیر نیز تعمیم داده شده است.

یافته‌ها: در تمامی مدل‌های توسعه داده‌شده در مقاله، کارایی‌هایی که برای مراحل و کل محاسبه شده است، بین صفر تا ۱ به دست آمده است، فقط در صورتی یک واحد کارایی شبکه‌ای می‌شود که در هر دومرحله کارا باشد.

نتیجه‌گیری: از مدل ارائه‌شده در مثالی کاربردی برای ارزیابی پایداری ۱۷ زنجیره تأمین استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل موجود در مقایسه با مدل‌های سنتی و شبکه‌ای، ارزیابی واقع‌بینانه‌تری انجام می‌دهد. در نهایت با مثال‌هایی برتری مدل در مقایسه با مدل‌های ادبیات پژوهش نشان داده شد.

کلیدواژه‌ها: تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای، ارزیابی عملکرد، ساختارهای دومرحله‌ای، مدل‌های چندهدفه، کارایی.

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

مدیریت صنعتی، ۱۳۹۸، دوره ۱۱، شماره ۳، صص. ۴۸۷-۵۱۶

DOI:10.22059/imj.2019.280013.1007585

دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۱۰، پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۰۹

© دانشکده مدیریت دانشگاه تهران

مقدمه

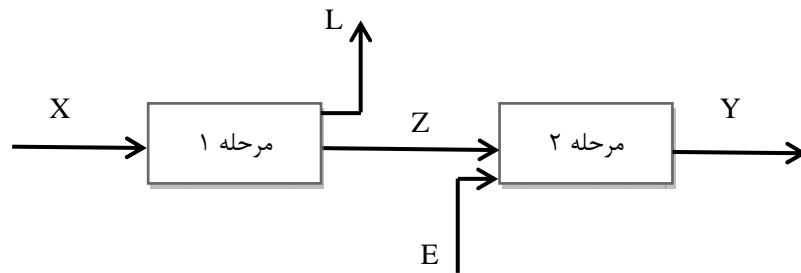
نخستین بار، چارنز، کوپر و رودز^۱ (۱۹۷۸)، تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) را به‌عنوان یک ابزار ریاضی برای اندازه‌گیری کارایی و بهره‌وری واحدهای تصمیم‌گیرنده (DMUها) معرفی کردند. به این روش به دلیل در نظر گرفتن ورودی‌ها و خروجی‌های چندگانه و عدم نیاز به تخمین پارامترها، توجه شد و در زمینه تئوری و کاربرد آن در سازمان‌های مختلف حجم شایان توجهی از مقاله‌ها ارائه شده است (امروزنژاد و یانگ^۲، ۲۰۱۸). نتایج مدل‌های DEA نشان می‌دهد که هر واحد در مقایسه با سایر واحدها در تبدیل ورودی‌ها به خروجی‌ها چگونه عمل می‌کند. مبحث مهمی که پس از ارزیابی به‌وسیله DEA برای واحدهای ناکارا مطرح می‌شود این است که چه عواملی موجب عدم کارایی می‌شوند. پژوهشگران اولیه تلاش‌هایی برای تجزیه کارایی واحدها انجام دادند، برای مثال بنکر، چارنز و کوپر^۳ (۱۹۸۴) کارایی یک واحد را به کارایی مقیاس و کارایی تکنیکی تقسیم کردند. بیرنس، فار و گراسکوپف^۴ (۱۹۸۴) اثر تراکم کارایی تکنیکی را شناسایی کردند و کائو^۵ (۱۹۹۵) کارایی کلی یک واحد را به میانگین هندسی موزون کارایی ورودی‌های فردی تقسیم کرد. اگر چه این تلاش‌ها جزئیات بیشتری درباره کارایی واحدها ارائه می‌دهد، اما به‌جای ارائه تصویر واضحی از فرایندهای داخلی واحد، روی خود مدل‌های DEA تمرکز کردند. به‌طور کلی نادیده‌گرفتن ساختار داخلی واحدها توسط مدل‌های DEA اولیه باعث می‌شد که نتوانند اطلاعاتی درباره منبع ناکارایی داخلی ارائه دهند.

فار و گراسکوپف^۶ (۱۹۹۶ و ۲۰۰۰) با بررسی فرایند تولید چندمرحله‌ای فار و ویتاکر^۷ (۱۹۹۵)، یک مدل چندمرحله‌ای با متغیرهای میانی توسعه دادند که تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای (NDEA) نامیده شد. این رویکرد برای واحدهایی به کار می‌رود که از شبکه‌ای از واحدهای فرعی تشکیل شده و خروجی یک واحد فرعی ورودی به واحد دیگر است. پس از آن پژوهشگران مختلف به توسعه مدل‌های شبکه‌ای در محیط‌های گوناگون پرداختند. مدل‌های شبکه‌ای برای شبیه‌سازی ساختار داخلی سیستم و ارزیابی هم‌زمان کارایی کل و کارایی زیرواحدها توانا هستند. به دلیل اینکه مدل‌های سنتی هر واحد را به‌عنوان جعبه سیاه تک‌فرایندی در تبدیل ورودی‌های اولیه به خروجی‌های نهایی در نظر می‌گیرند، کارایی واحد با ساختار چندمرحله‌ای را بیشتر از عملکرد واقعی آن نشان می‌دهند، در حالی که مدل‌های شبکه‌ای کارایی چنین سیستمی را واقع‌بینانه‌تر نشان می‌دهند و تعداد واحدهای کمتری کارا می‌شوند. در مدل‌های سنتی بعضی متغیرها (مانند سپرده‌ها در ارزیابی بانک) را نمی‌توان فقط ورودی یا خروجی محض در نظر گرفت ولی در مدل‌های شبکه‌ای این متغیرها به‌عنوان میانی در نظر گرفته می‌شوند، بنابراین فاقد این ضعف هستند.

یکی از ساختارهای شبکه‌ای مورد توجه و مبنای تئوری و کاربرد که بررسی آن یکی از پنج روند پژوهشی اخیر DEA بوده است، فرایند دومرحله‌ای متوالی است (لیم و ژو^۸، ۲۰۱۸ و امروزنژاد و یانگ^۲، ۲۰۱۸). شکل ۱ این ساختار را با ورودی و خروجی مازاد نشان می‌دهد که بخشی از خروجی‌های مرحله نخست به‌عنوان ورودی به مرحله دوم وارد می‌شوند (متغیرهای میانی).

1. Charnes, Cooper & Rhodes
3. Banker, Charnes & Cooper
5. Kao
7. Fare & Whittaker

2. Emrouznejad & Yang
4. Brin, Fare & Grosskopf
6. Färe & Grosskopf
8. Lim & Zhu



شکل ۱. ساختار دومرحله‌ای متوالی

برای این ساختار مدل‌های متنوعی ارائه شده است، اما هیچ یک نتوانستند تمامی چالش‌های ارزیابی چنین ساختاری را برطرف کنند. بنابراین پرسش اصلی پژوهش این است که مدل مناسب برای ارزیابی این ساختار که فاقد ضعف‌های مدل‌های موجود باشد و بتواند چالش‌های بررسی آن را حل کند، کدام است؟ در این پژوهش تلاش می‌شود با توجه هم‌زمان به مراحل، برای این ساختار، مدلی دوهدفه ارائه شده و سپس با وزن‌های بهینه به‌دست‌آمده، کارایی مراحل و کل محاسبه شود.

تحلیل پوششی داده‌ها

سازمان‌ها به دنبال این هستند که از ورودی‌های خود حداکثر خروجی‌های ممکن را به دست آورند. تابع تولید، حداکثر خروجی ممکن از یک مجموعه ورودی را نشان می‌دهد. اما تخمین تابع تولید به راحتی امکان‌پذیر نیست و روش‌های پارامتری فقط برای چند ورودی و یک خروجی مناسب هستند و محاسبه پارامترهای آنها آسان نیست. فارل^۱ (۱۹۵۷) برای نخستین بار روش غیرپارامتری را که فقط برای یک ورودی و یک خروجی مناسب بود، ارائه کرد. چارنز و همکاران (۱۹۷۸) با توسعه مدل فارل به ورودی‌ها و خروجی‌های چندگانه، نخستین مدل تحلیل پوششی داده‌ها را ارائه کردند. در مدل آنها وزن‌های بهینه به گونه‌ای به دست می‌آید که کارایی (مجموع موزون خروجی‌ها به مجموع موزون ورودی‌ها) واحد تحت بررسی حداکثر شود و کارایی هیچ واحدی از ۱ بیشتر نشود. مدل ۱، مدل آنها را نشان می‌دهد که با تبدیل‌های چارنز - کوپر از حالت کسری به خطی خروجی محور یا ورودی محور قابل تبدیل است.

$$\max \frac{\sum_{r=1}^R u_r y_{ro}}{\sum_{i=1}^I v_i x_{io}} \quad \text{مدل (۱)}$$

s. t.

$$\frac{\sum_{r=1}^R u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^I v_i x_{ij}} \leq 1, \quad j = 1, \dots, n$$

$$v_i, u_r \geq 0$$

پس از آن در مدل‌های DEA از جمله مدل بازده به مقیاس متغیر (BCC)، مدل جمعی، مدل راسل و مدل SBM^۲

توسعه‌های زیادی اتفاق افتاد و از آنها در کاربردهای گوناگون استفاده شد (امروزنژاد، پارکر و تاواتس^۱، ۲۰۰۸). بسیاری از کاربردها و واحدها، ساختاری با بیش از یک مرحله دارند و به مدل‌هایی نیاز دارند که علاوه بر کارایی کلی، کارایی مراحل را نیز محاسبه کند و منشأ عدم کارایی آنها را نشان دهد. اما مدل‌های اولیه به دلیل دیدگاه جعبه سیاه از ارزیابی چنین ساختارهایی ناتوان هستند.

تحلیل پوششی داده‌های دومرحله‌ای

ساختار داخلی واحدها نخستین بار در پژوهش‌های فار و پریمونت^۲ (۱۹۸۴ و ۱۹۹۳)، فار و ویتاگر (۱۹۹۵) و فار و گراسکوپف (۱۹۹۶) بررسی شد، اما فار و گراسکوپف (۲۰۰۰) اصطلاح DEA شبکه‌ای را مطرح کردند. پس از آن حجم زیادی از پژوهش‌ها در سطح تئوری و کاربردی به چاپ رسید. سابقه بررسی ساختارهای دومرحله‌ای به کار سیفورد و ژو^۳ (۱۹۹۹) بر می‌گردد که برای فرایند تولید بانک دو مرحله بازاریابی و سودآوری را در نظر گرفتند. اما علی‌رغم بررسی ساختار داخلی، نتوانستند از مدل مناسبی که ارتباط بین کارایی کل و کارایی مراحل را نشان دهد، استفاده کنند. به‌طور کلی یکی از بحث‌های ساختارهای دومرحله‌ای نحوه ارتباط کارایی کل و کارایی مراحل است. کائو و هوانگ^۴ (۲۰۰۸) کارایی کل را به صورت حاصل ضرب کارایی دو مرحله تعریف کردند. در مدل آنها اولویت با کارایی کل است و با به دست آمدن وزن‌های بهینه‌ای که کارایی کل را حداکثر می‌کند کارایی مراحل به دست می‌آید. مدل ۲، مدل آنها را برای ساختاری بدون ورودی و خروجی مازاد نشان می‌دهد.

$$\max \frac{\sum_{r=1}^R u_r y_{ro}}{\sum_{i=1}^I v_i x_{io}} \quad \text{مدل ۲}$$

S. t.

$$\frac{\sum_{r=1}^R u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^I v_i x_{ij}} \leq 1, \quad j = 1, \dots, n$$

$$\frac{\sum_{r=1}^R u_r y_{rj}}{\sum_{d=1}^D w_d z_{dj}} \leq 1, \quad j = 1, \dots, n$$

$$\frac{\sum_{d=1}^D w_d z_{dj}}{\sum_{i=1}^I v_i x_{ij}} \leq 1, \quad j = 1, \dots, n$$

$$v_i, w_d, u_r \geq 0$$

مدل ۲ که در واقع توسعه‌ای بر مدل ۱ بود، با تبدیل‌های چارنز و کوپر به مدل خطی ورودی‌محور و خروجی‌محور

1. Emrouznejad, Parker & Tavates
3. Seiford & Zhu

2. Fare & Primont
4. Kao & Hwang

تبدیل می‌شود. آنها از این مدل برای ارزیابی شرکت‌های بیمه استفاده کردند. چن، کوک و ژو^۱ (۲۰۱۰) با بیان اینکه در ثانویه مدل کائو و هوانگ (۲۰۰۸) تصویر واحد تحت بررسی کارا نیست، مدلی را ارائه کردند که همان نمره‌های کارایی را می‌داد اما این ایراد را نداشت. تن و تسوتسوی^۲ (۲۰۰۹) بر مبنای دوال مدل خطی کائو و هوانگ (۲۰۰۸)، یک مدل NDEA مبتنی بر متغیرهای کمبود ارائه کردند که به دلیل در نظر نگرفتن متغیرهای کمبود میانی، ارزیابی ناقصی ارائه می‌کرد. چن، کوک، لی و ژو^۳ (۲۰۰۹) با بیان اینکه مدل کائو و هوانگ (۲۰۰۸) فقط برای شرایط بازده به مقیاس ثابت (CRS) است، مدلی جمعی پیشنهاد کردند که در آن کارایی کل میانگین وزنی کارایی دو مرحله است. لیم و ژو (۲۰۱۳) و انگ و چن^۴ (۲۰۱۶) برای خطی کردن و حل مدل جمعی، دو روش برنامه‌ریزی پارامتریک پیشنهاد کردند. ژانگ و چن^۵ (۲۰۱۸) اثبات کردند که دو روش با یکدیگر برابرند و برای یافتن جواب‌های بهینه از پارامترهای یکسانی استفاده می‌کنند. در این مدل‌های جمعی، متغیرهای میانی هم به عنوان خروجی و هم به عنوان ورودی سیستم در نظر گرفته شدند. دسپوتیس، کروناکوس و ساتیروس^۶ (۲۰۱۶) بیان کردند که مدل ضربی کائو و هوانگ (۲۰۰۸) و مدل جمعی چن و همکاران (۲۰۰۹)، دارای رویکرد تجزیه هستند، یعنی اولویت آنها کارایی کل است و از تجزیه آن کارایی مراحل به دست می‌آید. این رویکرد در محاسبه کارایی دارای خطا و اریب است. آنها با رویکرد ترکیب، مدلی چندهدفه ارائه کردند که هم‌زمان کارایی کل و مراحل را حداکثر می‌کند. مدل ۳، مدل نهایی آنها را نشان می‌دهد.

$$\max \sum_{r=1}^R u_r y_{ro} - \sum_{i=1}^I v_i x_{io} \quad \text{مدل ۳}$$

s.t.

$$\sum_{d=1}^D w_d z_{do} = 1$$

$$\sum_{r=1}^R u_r y_{ro} - \sum_{d=1}^D w_d z_{dj} \leq 0, \quad j = 1, \dots, n$$

$$\sum_{d=1}^D w_d z_{dj} - \sum_{i=1}^I v_i x_{ij} \leq 0, \quad j = 1, \dots, n$$

$$u_r, v_i, w_d \geq 0$$

در واقع در این مدل مرحله نخست خروجی محور و مرحله دوم ورودی محور است، به بیان دیگر هر یک با دیدگاه خود مقدار متغیرهای میانی را که محل تعارض بین دو مرحله است بهینه کرده و مستقل و جداگانه عمل می‌کنند، بنابراین مقدار بهینه میانی‌ها برای شبکه مشخص نمی‌شود. همچنین این مدل مانند شکل ۱ برای ساختارهای با ورودی و خروجی مازاد قابل توسعه نیست. کائو و هوانگ (۲۰۱۰) و کائو (۲۰۱۴ الف) مدل ضربی و کوک، ژو، بی و یانگ^۷ (۲۰۱۰) مدل جمعی را برای ساختارهای با ورودی و خروجی مازاد تعمیم دادند اما همچنان ایرادهای قبلی وجود دارد. لیانگ، کوک و ژو^۸ (۲۰۰۸) و دیو، لیانگ، چن، کوک و ژو^۹ (۲۰۱۱) برای تجزیه کارایی، مراحل رویکرد تئوری بازی‌ها را به کار بردند و برای تحلیل کارایی شبکه، دو رویکرد غیرهمکارانه و همکارانه را توسعه دادند. رضوی، شهریاری

1. Chen, Cook & Zhu

3. Chen, Cook, Li & Zhu

5. Zhang & Chen

7. Cook, Zhu, Bi & Yang

9. Du, Liang, Chen, Cook, Zhu

2. Tone & Tsutsui

4. Ang & Chen

6. Despotis, Koronakos & Sotiros

8. Liang, Cook & Zhu

و احمدپور (۱۳۹۴) با تعریف ساختاری دومرحله‌ای برای عملکرد نوآورانه شرکت‌های دانش‌بنیان، برای ارزیابی ۳۸ شرکت تولیدکننده نرم‌افزار از رویکرد تئوری بازی‌های تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای استفاده کردند. لی، چن، کوک، ژانگ و ژو^۱ (۲۰۱۸) با بیان اینکه در مدل‌های شبکه‌ای دومرحله‌ای غیرهمکارانه (رهبر - پیرو) به شناسایی مرحله رهبر نیاز است و در دنیای واقعی این مرحله به راحتی قابل تشخیص نیست، با توسعه کار دسپوتیس و همکاران (۲۰۱۶) برای شناسایی مرحله رهبر یک راه حل پاره‌تو ارائه کردند و نشان دادند که جواب بهینه با مقایسه تفاوت نمره برای حد بالا و پایین دو مرحله مشخص می‌شود و با دو مثال تجربی از صنعت بیمه و خودرو، نحوه عملکرد مدل خود در شناسایی مرحله رهبر را نشان دادند. ساتیروس، کوروتوکاس و دسپوتیس^۲ (۲۰۱۸) با بررسی پارادایم‌ها و رویکردهای موجود در مدل‌های چندمرحله‌ای متوالی، برای انواع فرایندهای دومرحله‌ای مدل‌هایی ارائه کردند. ما، کی و دنگ^۳ (۲۰۱۷) ساختار داخلی یک سیستم دومرحله‌ای متوالی - موازی را شبیه‌سازی کرده و هم‌زمان برای تخمین و تجزیه کارایی سیستم از دو رویکرد DEA جمعی و مضربی استفاده کردند و نشان دادند که مدل آنها درباره کارایی سازوکار تبدیل، اطلاعات بیشتری می‌دهد. لیم و ژو (۲۰۱۸) بیان کردند که در DEA استاندارد، مدل مضربی و پوششی به دلیل دوآل بودن برابر هستند و علی‌رغم رویکرد متفاوت، جواب یکسانی می‌دهند، اما در مدل‌های شبکه‌ای تطابق حالت مضربی و پوششی مدل‌ها مشخص نیست. بنابراین با تمرکز روی این مبحث و با تعریف مجموعه امکان‌های تولید (PPS)^۴ برای ساختارهای دومرحله‌ای متوالی، روشی را برای تطابق اولیه - ثانویه آنها پیشنهاد کردند. فوکویاما و ماتوسک^۵ (۲۰۱۷) با مدل‌سازی عملکرد بانک به دو مرحله جمع‌آوری فاند و سرمایه‌گذاری / وام‌دهی یک مدل شبکه‌ای دومرحله‌ای جدید ارائه کردند. لی و ورتینگتون^۶ (۲۰۱۶) برای ارزیابی کیفیت پژوهش در استرالیا، یک ساختار دومرحله‌ای برای دانشگاه‌های استرالیا در نظر گرفته و برای آن یک مدل شبکه‌ای توسعه دادند. یافته‌های آنها نشان داد که مدل‌های DEA اولیه کارایی پژوهشی دانشگاه‌های استرالیا را بیشتر از واقعیت تخمین می‌زنند. میردهقان و فوکویاما^۷ (۲۰۱۶) با مثال‌های عددی نشان دادند که بعضی از مدل‌های شبکه‌ای با نظریه کارایی پاره تو - کوپمن ناسازگار هستند و یک روش NDEA دومرحله‌ای که هم نمره‌های کارایی کلی و هم کارایی بخش‌های آن را می‌دهد، ارائه کردند. آنها با مثال‌های عددی مدل خود را که توسعه‌ای بر مبنای مدل راسل و SBM است، تشریح کردند. زارعی (۱۳۹۵) و شهریاری و لاهیجی (۱۳۹۶) با استفاده از مدل SBM تن و تسوتسوی (۲۰۰۹)، به ارزیابی دومرحله‌ای شعب بانک‌های استان گیلان و سیستم ملی نوآوری پرداختند. لی، ژو و ژوانگ^۸ (۲۰۱۷) به تحلیل کارایی آتش‌نشانی‌های آمریکا با رویکرد DEA دومرحله‌ای پرداختند. کوک و همکاران (۲۰۱۰) بررسی‌های DEA مرتبط با سیستم دومرحله‌ای را مرور کرده و در چهار دسته مدل‌های استاندارد، تجزیه کارایی، شبکه‌ای و تئوری بازی‌ها تقسیم‌بندی کردند. هالکوس، تزمس و کورتزیدیس^۹ (۲۰۱۴) و کائو (۲۰۱۴) توسعه‌های بعدی در مدل‌های دومرحله‌ای را بررسی کردند. ان و همکاران^{۱۰} (۲۰۱۷) و ژانگ و چن (۲۰۱۸) پژوهش‌های اخیر را مرور کردند.

1. Li, Chen, Cook, Zhang & Zhu
3. Ma, Qi, & Deng
5. Fukuyama & Matusek
7. Mirdehghan & Fukuyama
9. Halkos, Tzeremes & Kourtzidis

2. Sotiros, Koronakos & Despotis
4. Production Possibility Set
6. Lee & Worthington
8. Li, Zhu & Zhuang
10. An, Chen, Xiong, Wu & Liang

مدل‌های پژوهش

برای ساختن مدل فرض می‌کنیم n واحد تصمیم‌گیرنده با ساختار شکل ۱ وجود دارد. جدول ۱ متغیرهای مدل را نشان می‌دهد.

جدول ۱. متغیرهای مدل

متغیر	شرح
X_{ij}	ورودی ($1, \dots, I$) نام مرحله ۱ واحد ($1, \dots, n$) زام
v_i	وزن آمین ورودی مرحله ۱
L_{hj}	خروجی مازاد ($1, \dots, H$) نام، مرحله ۱ واحد زام
ζ_h	وزن آمین خروجی مازاد مرحله ۱
Z_{dj}	متغیر میانی ($1, \dots, D$) نام، واحد زام
ω_d^1	وزن آمین متغیر میانی برای مرحله نخست
ω_d^2	وزن آمین متغیر میانی برای مرحله دوم
E_{gj}	ورودی مازاد ($1, \dots, G$) نام، مرحله ۲ واحد زام
ρ_g	وزن آمین ورودی مازاد مرحله ۲
Y_{rj}	خروجی ($1, \dots, R$) نام، مرحله ۲ واحد زام
μ_r	وزن آمین خروجی مرحله ۲ واحد زام

برای ساختار شکل ۱ می‌توان با توجه هم‌زمان به دو مرحله، مدلی دوهدفه به صورت مدل ۴ نوشت.

$$\max \frac{\sum_{h=1}^H \zeta_h L_{ho} + \sum_{d=1}^D \omega_d^1 Z_{do}}{\sum_{i=1}^I v_i X_{io}} \quad \text{مدل (۴)}$$

$$\max \frac{\sum_{r=1}^R \mu_r Y_{ro}}{\sum_{d=1}^D \omega_d^2 Z_{do} + \sum_{g=1}^G \rho_g E_{go}}$$

s.t.

$$\frac{\sum_{h=1}^H \zeta_h L_{hj} + \sum_{d=1}^D \omega_d^1 Z_{dj}}{\sum_{i=1}^I v_i X_{ij}} \leq 1$$

$$\frac{\sum_{r=1}^R \mu_r Y_{rj}}{\sum_{d=1}^D \omega_d^2 Z_{dj} + \sum_{g=1}^G \rho_g E_{gj}} \leq 1$$

$$v_i, \zeta_h, \omega_d^1, \omega_d^2, \rho_g, \mu_r \geq 0$$

تابع هدف اولی کارایی مرحله نخست و تابع هدف دومی کارایی مرحله دوم واحد مورد بررسی را حداکثر می‌کند. محدودیت اولی و دومی تضمین می‌کند که وزن‌های بهینه به‌گونه‌ای حاصل شود که به‌ترتیب کارایی مرحله نخست و مرحله دوم هیچ واحدی از ۱ بیشتر نشود و هر یک نماینده n محدودیت به تعداد واحدهای تصمیم‌گیرنده هستند. با استفاده از تبدیل‌های چارنر و کوپر می‌توان آن را به‌صورت مدل ۵ نوشت:

$$\max \sum_{h=1}^H \zeta_h L_{ho} + \sum_{d=1}^D \omega_d^1 Z_{do} \tag{مدل ۵}$$

$$\min \sum_{d=1}^D \omega_d^2 Z_{do} + \sum_{g=1}^G \rho_g E_{go}$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^I v_i X_{io} = 1$$

$$\sum_{r=1}^R \mu_r Y_{ro} = 1$$

$$\sum_{h=1}^H \zeta_h L_{hj} + \sum_{d=1}^D \omega_d^1 Z_{dj} - \sum_{i=1}^I v_i X_{ij} \leq 0$$

$$\sum_{r=1}^R \mu_r Y_{rj} - \sum_{d=1}^D \omega_d^2 Z_{dj} - \sum_{g=1}^G \rho_g E_{gj} \leq 0$$

$$v_i, \zeta_h, \omega_d^1, \omega_d^2, \rho_g, \mu_r \geq 0$$

با توجه به اینکه دو تابع هدف مدل ۵ با یکدیگر ناسازگار و متناقض نیستند و یک جواب بهینه که هم‌زمان آنها را بهینه کند وجود دارد، با وزن‌دهی به مراحل، می‌توان دو تابع هدف را به یک تابع تبدیل کرد. t وزن مرحله نخست و ۱-t وزن مرحله دوم را نشان می‌دهد.

$$\max t \left(\sum_{h=1}^H \zeta_h L_{ho} + \sum_{d=1}^D \omega_d^1 Z_{do} \right) - (1-t) \left(\sum_{d=1}^D \omega_d^2 Z_{do} + \sum_{g=1}^G \rho_g E_{go} \right) \tag{مدل ۶}$$

s.t.

$$(1) \sum_{i=1}^I v_i X_{io} = 1$$

$$(2) \sum_{r=1}^R \mu_r Y_{ro} = 1$$

$$(3) \sum_{h=1}^H \zeta_h L_{hj} + \sum_{d=1}^D \omega_d^1 Z_{dj} - \sum_{i=1}^I v_i X_{ij} \leq 0$$

$$(4) \sum_{r=1}^R \mu_r Y_{rj} - \sum_{d=1}^D \omega_d^2 Z_{dj} - \sum_{g=1}^G \rho_g E_{gj} \leq 0$$

$$v_i, \zeta_h, \omega_d^1, \omega_d^2, \rho_g, \mu_r \geq 0$$

تابع هدف مدل ۶ هر دو تابع هدف مدل ۵ را همزمان بهینه می‌کند. یعنی اگر هر یک از اهداف مدل ۵ جداگانه حل شود، همان جوابی را می‌دهد که مدل ۶ می‌دهد. مدل ۶ با ثابت نگه داشتن مقدار متغیرهای میانی، مرحله نخست را با دیدگاه ورودی محور و مرحله دوم را با رویکرد خروجی محور کارا می‌کند. بدین ترتیب هر دو مرحله و کل ساختار کارا می‌شوند. این مدل وزن بهینه ورودی‌ها، میانی‌ها و خروجی‌ها را نشان می‌دهد که با استفاده از آنها کارایی کل و مراحل به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

کارایی مرحله نخست:

$$\frac{\sum_{h=1}^H \zeta_h^* L_{ho} + \sum_{d=1}^D \omega_d^{1*} Z_{do}}{\sum_{i=1}^I \nu_i^* X_{io}} = \sum_{h=1}^H \zeta_h^* L_{ho} + \sum_{d=1}^D \omega_d^{1*} Z_{do} \quad \text{رابطه (۱)}$$

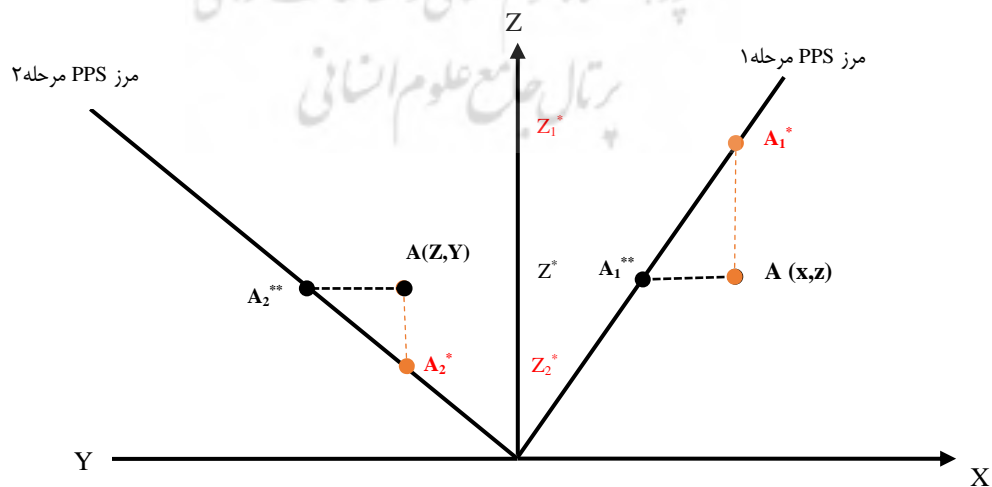
کارایی مرحله دوم:

$$\frac{\sum_{r=1}^R \mu_r^* Y_{ro}}{\sum_{d=1}^D \omega_d^{2*} Z_{do} + \sum_{g=1}^G \rho_g^* E_{go}} = \frac{1}{\sum_{d=1}^D \omega_d^{2*} Z_{do} + \sum_{g=1}^G \rho_g^* E_{go}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

کارایی کل:

$$\frac{\sum_{h=1}^H \zeta_h^* L_{ho} + \sum_{d=1}^D \omega_d^{1*} Z_{do}}{\sum_{i=1}^I \nu_i^* X_{io}} \cdot \frac{\sum_{r=1}^R \mu_r^* Y_{ro}}{\sum_{d=1}^D \omega_d^{2*} Z_{do} + \sum_{g=1}^G \rho_g^* E_{go}} = \frac{\sum_{h=1}^H \zeta_h^* L_{ho} + \sum_{d=1}^D \omega_d^{1*} Z_{do}}{\sum_{d=1}^D \omega_d^{2*} Z_{do} + \sum_{i=1}^n \rho_g^* E_{go}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

شکل ۲ تفسیر هندسی مدل پژوهش را در مقایسه با مدل چندهدفه دسپوتیس و همکاران (۲۰۱۶) برای ساختار بدون ورودی و خروجی مازاد نشان می‌دهد.



شکل ۲. تعبیر هندسی مدل

واحد $A(X, Z, Y)$ را تصور کنید، نقطه A_1^* و A_2^* تصویر این واحد روی مرز مرحله اول و دوم و نحوه رسیدن به این نقاط بهینه را در مدل دسپوتیس و همکاران (۲۰۱۶) نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است مقدار بهینه متغیر میانی برای مرحله اول (Z_1^*) و مرحله دوم (Z_2^*) متفاوت است، بنابراین این مدل در حل تعارض بین دو مرحله در تعیین مقدار بهینه متغیرهای میانی ناموفق است. نقاط A_1^{**} و A_2^{**} تصویر واحد مورد بررسی روی مرز دو مرحله را در مدل پژوهش نشان می‌دهد. مرحله اول برای رسیدن به این نقطه باید از ورودی‌های خود بکاهد (ورودی محور) و مرحله دوم برای رسیدن به نقطه بهینه باید خروجی‌های خود را زیاد کند (خروجی محور). مقدار بهینه متغیرهای میانی (Z^*) در هر دو مرحله یکسان و برابر با مقدار فعلی است. علاوه بر این، مدل چندهدفه دسپوتیس و همکاران (۲۰۱۶) فقط برای ساختار دومرحله‌ای بدون ورودی و خروجی مازاد قابل استفاده است، در حالی که مدل ارائه شده برای هر نوع ساختار دومرحله‌ای کاربرد دارد.

قضیه ۱: جواب بهینه تابع هدف مدل، تک تک مراحل را نیز بهینه می‌کند. به بیان دیگر در جواب بهینه نه تنها

$$\left(\sum_{h=1}^H \zeta_h L_{ho} + \sum_{d=1}^D \omega_d^1 Z_{do} \right) - \left(\sum_{d=1}^D \omega_d^2 Z_{do} + \sum_{g=1}^G \rho_g E_{go} \right) \geq \left(\sum_{h=1}^H \zeta_h L_{ho} + \sum_{d=1}^D \omega_d^1 Z_{do} \right) - \left(\sum_{d=1}^D \omega_d^2 Z_{do} + \sum_{g=1}^G \rho_g E_{go} \right)$$

بلکه

$$\sum_{h=1}^H \zeta_h L_{ho} + \sum_{d=1}^D \omega_d^1 Z_{do} \geq \sum_{h=1}^H \zeta_h L_{ho} + \sum_{d=1}^D \omega_d^1 Z_{do}$$

$$\left(\sum_{d=1}^D \omega_d^2 Z_{do} + \sum_{g=1}^G \rho_g E_{go} \right) \leq \left(\sum_{d=1}^D \omega_d^2 Z_{do} + \sum_{g=1}^G \rho_g E_{go} \right)$$

اثبات: فرض خلف قضیه ۱، سه حالت دارد.

فرض خلف (۱)

$$\sum_{h=1}^H \zeta_h L_{ho} + \sum_{d=1}^D \omega_d^1 Z_{do} < \sum_{h=1}^H \zeta_h L_{ho} + \sum_{d=1}^D \omega_d^1 Z_{do}$$

$$\left(\sum_{d=1}^D \omega_d^2 Z_{do} + \sum_{g=1}^G \rho_g E_{go} \right) > \left(\sum_{d=1}^D \omega_d^2 Z_{do} + \sum_{g=1}^G \rho_g E_{go} \right)$$

در این صورت

$$\left(\sum_{h=1}^H \zeta_h L_{ho} + \sum_{d=1}^D \omega_d^1 Z_{do} \right) - \left(\sum_{d=1}^D \omega_d^2 Z_{do} + \sum_{g=1}^G \rho_g E_{go} \right) < \left(\sum_{h=1}^H \zeta_h L_{ho} + \sum_{d=1}^D \omega_d^1 Z_{do} \right) - \left(\sum_{d=1}^D \omega_d^2 Z_{do} + \sum_{g=1}^G \rho_g E_{go} \right)$$

می‌شود و نمی‌تواند جواب بهینه باشد، بنابراین این فرض خلف باطل است.

$$\begin{aligned} \sum_{h=1}^H \zeta_h * L_{ho} + \sum_{d=1}^D \omega_d^1 * Z_{do} &> \sum_{h=1}^H \zeta_h L_{ho} + \sum_{d=1}^D \omega_d^1 Z_{do} \\ \left(\sum_{d=1}^D \omega_d^2 * Z_{do} + \sum_{g=1}^G \rho_g * E_{go} \right) &> \left(\sum_{d=1}^D \omega_d^2 Z_{do} + \sum_{g=1}^G \rho_g E_{go} \right) \end{aligned} \quad \text{فرض خلف ۲}$$

اگر $(v_i^*, \zeta_h^*, \omega_d^1, \omega_d^2, \rho_g^*, \mu_r^*)$ جواب بهینه مدل و $(v_i, \zeta_h, \omega_d^1, \omega_d^2, \rho_g, \mu_r)$ یک جواب موجه برای مدل با شرایط فرض خلف ۲ باشد، در این صورت $(v_i^*, \zeta_h^*, \omega_d^1, \omega_d^2, \rho_g, \mu_r)$ یک جواب موجه برای مدل است که مقدار تابع هدف آن از جواب بهینه فرض خلف بیشتر است:

$$\begin{aligned} \left(\sum_{h=1}^H \zeta_h * L_{ho} + \sum_{d=1}^D \omega_d^1 * Z_{do} \right) - \left(\sum_{d=1}^D \omega_d^2 Z_{do} + \sum_{g=1}^G \rho_g E_{go} \right) \\ > \left(\sum_{h=1}^H \zeta_h * L_{ho} + \sum_{d=1}^D \omega_d^1 * Z_{do} \right) - \left(\sum_{d=1}^D \omega_d^2 * Z_{do} + \sum_{g=1}^G \rho_g * E_{go} \right) \end{aligned}$$

بنابراین فرض خلف ۲ نیز باطل است.

$$\begin{aligned} \sum_{h=1}^H \zeta_h * L_{ho} + \sum_{d=1}^D \omega_d^1 * Z_{do} &< \sum_{h=1}^H \zeta_h L_{ho} + \sum_{d=1}^D \omega_d^1 Z_{do} \\ \left(\sum_{d=1}^D \omega_d^2 * Z_{do} + \sum_{g=1}^G \rho_g * E_{go} \right) &< \left(\sum_{d=1}^D \omega_d^2 Z_{do} + \sum_{g=1}^G \rho_g E_{go} \right) \end{aligned} \quad \text{فرض خلف ۳}$$

همانند فرض خلف ۲، می‌توان نشان داد این حالت نیز رد می‌شود که به دلیل تشابه با حالت قبل بیان نمی‌شود. بنابراین با رد هر سه فرض خلف، قضیه ۱ ثابت می‌شود.

قضیه ۲: کارایی کل و مراحل بین ۰ تا ۱ است.

اثبات: با توجه به محدودیت ۳ و ۴ که برای تمام واحدها از جمله واحد مورد بررسی نوشته می‌شود، کارایی دو مرحله از ۱ کمتر می‌شود. کارایی کل نیز که حاصل تقسیم یک عدد کمتر از ۱ بر یک عدد بزرگ‌تر از ۱ است، به‌طور قطع کمتر از ۱ می‌شود. همچنین با توجه به مثبت بودن تمامی متغیرها و وزن‌های آنها، مقادیر کارایی‌ها از صفر بیشتر می‌شوند.

قضیه ۳: یک واحد کارایی کل است اگر و فقط اگر در هر دو مرحله کارا باشد.

فقط در صورتی کارایی کل ۱ می‌شود که صورت و مخرج ۱ باشد، یعنی دو مرحله کارا باشند که در این صورت تابع هدف صفر می‌شود. بنابراین یک واحد کارایی کل است اگر تابع هدف مدل برای آن صفر شود. در صورت نبودن این ویژگی در مدل، ممکن است واحدی کارا نشان داده شود در حالی که همه اجزا و مراحل آن کارا نیستند.

در صورتی که مدل ۶ دارای جواب چندگانه باشد و جواب بهینه تابع هدف آن ψ^* باشد، اگر مرحله نخست دارای اولویت باشد، می‌توان برای تعیین کارایی مرحله اول می‌توان از مدل ۷ استفاده کرد و سپس با استفاده از وزن بهینه

به‌دست‌آمده از مدل ۷ کارایی مرحله دوم $\frac{1}{\sum_{d=1}^D \omega_d^* Z_{do} + \sum_{g=1}^G \rho_g^* E_{go}}$ می‌شود.

$$\max \sum_{h=1}^H \varsigma_h^* L_{ho} + \sum_{d=1}^D \omega_d^* Z_{do} \quad \text{مدل ۷}$$

S. t

$$t \left(\sum_{h=1}^H \varsigma_h L_{ho} + \sum_{d=1}^D \omega_d^1 Z_{do} \right) - (1-t) \left(\sum_{d=1}^D \omega_d^2 Z_{do} + \sum_{g=1}^G \rho_g E_{go} \right) = \psi^* \quad \text{محدودیت ۱}$$

$$\sum_{i=1}^I v_i X_{io} = 1 \quad \text{محدودیت ۲}$$

$$\sum_{r=1}^R \mu_r Y_{ro} = 1 \quad \text{محدودیت ۳}$$

$$\sum_{h=1}^H \varsigma_h L_{hj} + \sum_{d=1}^D \omega_d^1 Z_{dj} - \sum_{i=1}^I v_i X_{ij} \leq 0 \quad \text{محدودیت ۴}$$

$$\sum_{r=1}^R \mu_r Y_{rj} - \sum_{d=1}^D \omega_d^2 Z_{dj} - \sum_{g=1}^G \rho_g E_{gj} \leq 0 \quad \text{محدودیت ۵}$$

$$v_i, \varsigma_h, \omega_d^1, \omega_d^2, \rho_g, \mu_r \geq 0$$

اگر اولویت با مرحله دوم باشد، ابتدا کارایی مرحله دوم با مدل ۸ به دست می‌آید و سپس با وزن بهینه از مدل ۸

کارایی مرحله اول $\sum_{h=1}^H \varsigma_h^* L_{ho} + \sum_{d=1}^D \omega_d^* Z_{do}$ می‌شود.

$$\min \sum_{d=1}^D \omega_d^2 Z_{do} + \sum_{g=1}^G \rho_g^* E_{go} \quad \text{مدل ۸}$$

S. t

$$t \left(\sum_{h=1}^H \varsigma_h L_{ho} + \sum_{d=1}^D \omega_d^1 Z_{do} \right) - (1-t) \left(\sum_{d=1}^D \omega_d^2 Z_{do} + \sum_{g=1}^G \rho_g E_{go} \right) = \psi^* \quad \text{محدودیت ۱}$$

$$\sum_{i=1}^I v_i X_{io} = 1 \quad \text{محدودیت ۲}$$

$$\sum_{r=1}^R \mu_r Y_{ro} = 1 \quad \text{محدودیت ۳}$$

$$\sum_{h=1}^H \varsigma_h L_{hj} + \sum_{d=1}^D \omega_d^1 Z_{dj} - \sum_{i=1}^I v_i X_{ij} \leq 0 \quad \text{محدودیت ۴}$$

$$\sum_{r=1}^R \mu_r Y_{rj} - \sum_{d=1}^D \omega_d^2 Z_{dj} - \sum_{g=1}^G \rho_g E_{gj} \leq 0 \quad \text{محدودیت ۵}$$

$$v_i, \varsigma_h, \omega_d^1, \omega_d^2, \rho_g, \mu_r \geq 0$$

مدل ۶ با فرض بازده به مقیاس ثابت (CRS) است، در صورتی که بازده به مقیاس متغیر (VRS) باشد مدل به این

صورت می‌شود:

$$\max t \left(\sum_{h=1}^H \varsigma_h L_{ho} + \sum_{d=1}^D \omega_d^1 Z_{do} - U_1 \right) - (1-t) \left(\sum_{d=1}^D \omega_d^2 Z_{do} + \sum_{g=1}^G \rho_g E_{go} - U_2 \right) \quad (9)$$

S. t

$$\sum_{i=1}^I v_i X_{io} = 1 \quad \text{محدودیت ۱}$$

$$\sum_{r=1}^R \mu_r Y_{ro} = 1 \quad \text{محدودیت ۲}$$

$$\sum_{h=1}^H \varsigma_h L_{hj} + \sum_{d=1}^D \omega_d^1 Z_{dj} - \sum_{i=1}^I v_i X_{ij} - U_1 \leq 0 \quad \text{محدودیت ۳}$$

$$\sum_{r=1}^R \mu_r Y_{rj} - \sum_{d=1}^D \omega_d^2 Z_{dj} - \sum_{g=1}^G \rho_g E_{gj} + U_2 \leq 0 \quad \text{محدودیت ۴}$$

$$v_i, \varsigma_h, \omega_d^1, \omega_d^2, \rho_g, \mu_r \geq 0$$

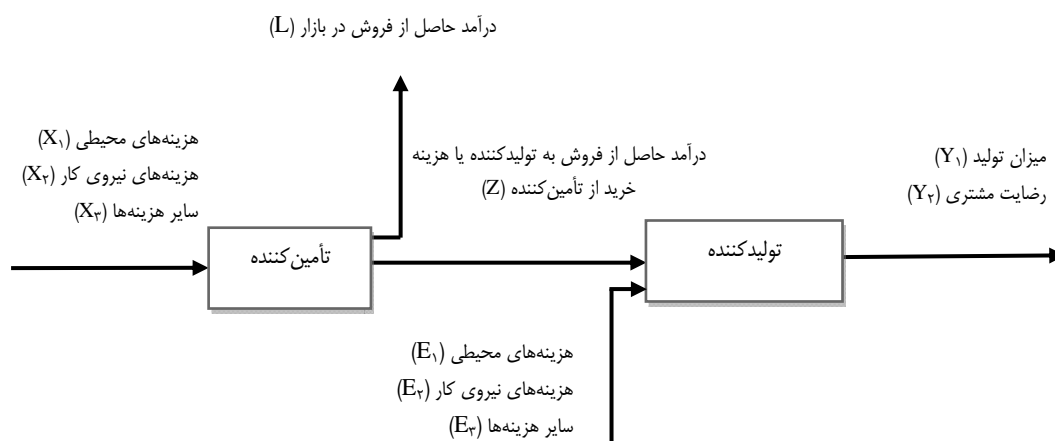
$$U_1, U_2 \text{ free}$$

همانند مدل‌های ۷ و ۸ می‌توان برای حالت بهینه چندگانه مدل ۹ نیز مدل نوشت. علاوه بر مدل ۶ در مدل‌های ۷،

۸ و ۹ نیز خاصیت‌های گفته شده وجود دارد.

پژوهش کاربردی

بر اساس گفته واکر^۱ (۱۹۸۸)، روش پژوهش در عملیات از نوع تحلیلی ریاضی است، یعنی از طریق توسعه روابط ریاضی، مدل‌های خود را تعریف و اثبات می‌کنند و از مثال عددی فقط برای نشان دادن محاسبه‌های آنان استفاده می‌کنند، نه برای اثبات تئوری‌ها. در این پژوهش نیز بعد از توسعه و اثبات ریاضی مدل در بخش قبلی، مثالی عددی و کاربردی بیان می‌شود و از مدل ارائه شده برای ارزیابی پایداری زنجیره تأمین شرکت‌های تولید رب گوجه زیرمجموعه دلپذیر استفاده شد. بدین منظور از داده‌های مقاله شکری، یوسفی، شهبان پور و فرضی پور^۲ (۲۰۱۷) استفاده شد. این مثال کاربردی به دو دلیل انتخاب شد. نخست برای اینکه بتوان چالش متغیرهای میانی در تعیین کارایی مراحل و برتری رویکرد مدل در مقایسه با سایر مدل‌ها را در این زمینه به‌خوبی نشان داد، زنجیره تأمین انتخاب شد. زیرا در زنجیره، دو مرحله (تأمین کننده و تولیدکننده) مجزا با مدیریت متفاوت بوده و هر یک به‌دنبال بهینه کردن متغیر میانی از دیدگاه خود هستند و با آن بهتر می‌توان به مقایسه مدل‌ها پرداخت. دوم به‌دلیل اینکه امروزه بر پایداری برای حفظ دسترسی به منابع و کاهش خطرهای زیست‌محیطی تأکید زیادی شده و ارزیابی آن با تحلیل پوششی داده‌ها از کاربردهای متفاوت و جدید DEA است. شکل ۳ ساختار دومرحله‌ای مطالعه کاربردی را نشان می‌دهد.



شکل ۳. ساختار دومرحله‌ای پایداری زنجیره تأمین

متغیر میانی در این کاربرد قیمت فروش تأمین کننده به تولید کننده بوده که محل تعارض است، زیرا تأمین کننده به دنبال بیشتر کردن آن و تولید کننده به دنبال کاهش آن است و در نتیجه تعیین مقدار بهینه آن مهم است. مدل‌های پژوهش با حفظ متغیرهای میانی در سطح فعلی به دنبال ارزیابی و کارا کردن این ساختار هستند. جدول ۲ نتایج تحلیل داده‌ها با مدل ۶ را با وزن یکسان برای مراحل، با استفاده از نرم‌افزار لینگو نشان می‌دهد.

جدول ۲. نتایج تحلیل داده‌ها

واحد	کارایی مرحله ۱	رتبه	کارایی مرحله ۲	رتبه	کارایی کل
۱	۰/۴۴۸۱	۱۳	۰/۹۹۴۹	۴	۰/۴۴۵۸
۲	۰/۵۱۲۳	۱۰	۰/۹۰۱۱	۷	۰/۴۶۱۷
۳	۰/۴۲۸۶	۱۴	۰/۸۹۹۵	۸	۰/۳۸۵۵
۴	۰/۴۰۹۲	۱۵	۰/۸۶۷۹	۱۵	۰/۳۵۵۲
۵	۰/۵۹۸۶	۶	۱	۱	۰/۵۹۸۶
۶	۰/۳۹۶۱	۱۶	۰/۸۸۷۰	۱۲	۰/۳۵۱۴
۷	۱	۱	۱	۱	۱
۸	۰/۴۹۱۱	۱۱	۰/۸۸۵۹	۱۳	۰/۴۳۵۱
۹	۰/۷۰۷۱	۲	۰/۸۹۵۷	۱۰	۰/۶۳۳۴
۱۰	۰/۵۱۶۹	۹	۰/۸۹۶۷	۹	۰/۴۶۳۵
۱۱	۰/۶۲۰۳	۴	۰/۷۸۳۱	۱۶	۰/۴۸۵۸
۱۲	۰/۶۸۸۹	۳	۰/۷۷۷۶	۱۷	۰/۵۳۵۷
۱۳	۰/۵۷۶۹	۸	۰/۹۱۰۴	۶	۰/۵۲۵۲
۱۴	۰/۳۰۶۵	۱۷	۱	۱	۰/۳۰۶۵
۱۵	۰/۴۵۰۲	۱۲	۰/۹۵۷۴	۵	۰/۴۳۱۰
۱۶	۰/۵۹۷۲	۷	۰/۸۸۷۷	۱۱	۰/۵۳۰۲
۱۷	۰/۶۱۱۱	۵	۰/۸۷۹۸	۱۴	۰/۵۳۷۷

با توجه به جدول ۲ فقط واحد ۷ کارا شد و هیچ واحد دیگری هم‌زمان در دو مرحله کارا عمل نکرده است. واحد ۵ و ۱۴ در مرحله دوم کارا و در مرحله اول ناکارا هستند و سایر واحدها در هر دو مرحله ناکارا شده‌اند. برای هر واحد ناکارا منبع ناکارایی مشخص است، برای مثال واحد ۱۷ با نمره ۰/۵۴ ناکارا شده که ۰/۶۱ این ناکارایی مربوط به مرحله ۱ و ضعیف عمل کردن تأمین‌کننده و ۰/۸۸ آن ناشی از ناکارایی تولیدکننده است، بنابراین در مرحله اول ضعیف‌تر از مرحله دوم عمل کرده است. این واحد می‌تواند با حفظ خروجی‌های مرحله اول خود (از جمله متغیر میانی) در سطح فعلی، ورودی‌های خود را به ۰/۶۱ مقدار فعلی کاهش دهد تا مرحله اول کارا شود. همچنین می‌تواند خروجی‌های مرحله دوم خود را با حفظ ورودی‌های این مرحله (از جمله متغیر میانی) در سطح فعلی، به $1/14 \left(\frac{1}{.88}\right)$ برابر مقدار فعلی برساند، در این صورت مرحله دوم نیز کارا می‌شود. بنابراین کل زنجیره تأمین با حفظ سطح فعلی متغیر میانی کارا می‌شود. به همین ترتیب سایر واحدها نیز می‌توانند کارا شوند. واحد ۷، ۹ و ۵ به ترتیب بالاترین کارایی و واحدهای ۱۴، ۶ و ۴ به ترتیب پایین‌ترین نمره‌های کارایی را به دست آورند. علی‌رغم اینکه واحد ۱۴ در مرحله دوم کارا است اما به دلیل عملکرد بسیار ضعیف در مرحله اول در مجموع پایین‌ترین نمره کارایی را به دست آورد، بنابراین برای بهبود وضعیت خود باید روی مرحله اول تمرکز کند.

جدول ۲، با فرض بازده به مقیاس ثابت (CRS) است. جدول ۳، نتایج محاسبه کارایی را تحت شرایط بازده به مقیاس متغیر (VRS) با مدل ۹ پژوهش نشان می‌دهد.

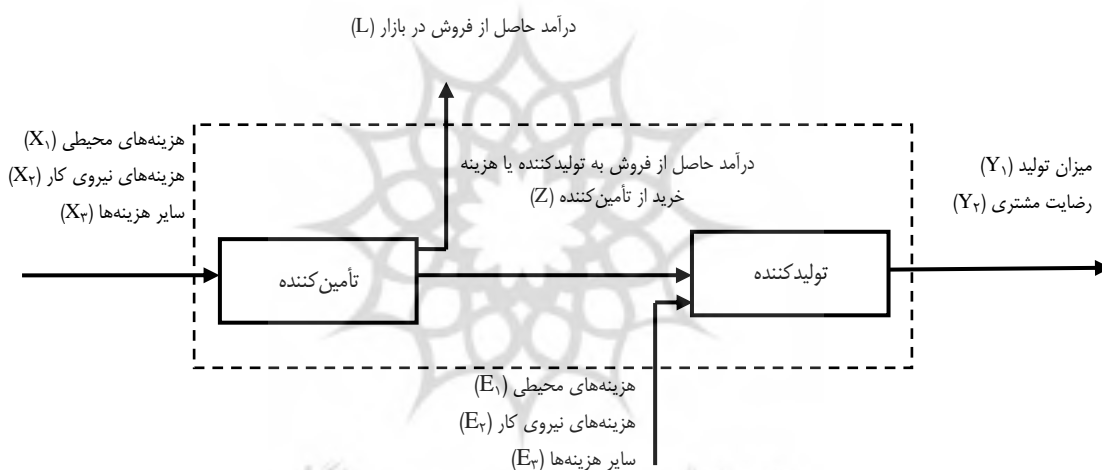
جدول ۳. نتایج تحلیل داده‌ها تحت شرایط VRS

واحد	کارایی مرحله ۱	کارایی مقیاس مرحله ۱	کارایی مرحله ۲	کارایی مقیاس مرحله ۲	کارایی کل	مقیاس کل کارایی
۱	۰/۵۴۵۵	۰/۸۲۱۴	۱	۰/۹۹۴۹	۰/۵۴۵۴	۰/۸۱۷۴
۲	۰/۶۱۱۱	۰/۸۳۸۳	۰/۹۰۷۵	۰/۹۹۲۹	۰/۵۵۴۶	۰/۸۳۲۵
۳	۰/۴۲۸۶	۱	۰/۹۰۶۹	۰/۹۹۱۸	۰/۳۸۸۷	۰/۹۹۱۸
۴	۰/۴۵۸۳	۰/۸۹۲۹	۰/۸۹۴۴	۰/۹۷۰۴	۰/۴۰۹۹	۰/۸۶۶۵
۵	۰/۸۷۷۶	۰/۶۸۲۱	۱	۱	۰/۸۷۷۶	۰/۶۸۲۱
۶	۰/۴۷۸۳	۰/۸۲۸۱	۰/۸۸۹۳	۰/۹۹۷۴	۰/۴۲۵۳	۰/۸۲۶۲
۷	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۸	۰/۹۹۹۹	۰/۴۹۱۱	۰/۸۹۲۳	۰/۹۹۲۸	۰/۸۹۲۳	۰/۴۸۷۶
۹	۱	۰/۷۰۷۱	۰/۸۹۶۲	۰/۹۹۹۴	۰/۸۹۶۲	۰/۷۰۶۸
۱۰	۰/۵۷۸۹	۰/۸۹۲۹	۰/۸۹۶۷	۱	۰/۵۱۹۲	۰/۸۹۲۷
۱۱	۰/۸۰۴۵	۰/۷۷۱۰	۰/۸۸۸۹	۰/۸۸۰۹	۰/۷۱۵۱	۰/۶۷۹۳
۱۲	۰/۷۳۳۳	۰/۹۳۹۴	۰/۸۳۶۲	۰/۹۲۹۹	۰/۶۱۳۲	۰/۸۷۳۶
۱۳	۰/۹۹۹۹	۰/۵۷۷۰	۰/۹۱۱۴	۰/۹۹۸۹	۰/۹۱۱۴	۰/۵۷۶۳
۱۴	۰/۳۷۹۳	۰/۸۰۸۱	۱	۱	۰/۳۷۹۳	۰/۸۰۸۱
۱۵	۰/۵۷۱۴	۰/۷۸۷۹	۰/۹۶۱۵	۰/۹۹۵۷	۰/۵۴۹۴	۰/۷۸۴۵
۱۶	۰/۶۸۷۵	۰/۸۶۸۷	۱	۰/۸۸۷۷	۰/۶۸۷۵	۰/۷۷۱۲
۱۷	۰/۶۱۱۱	۱	۰/۸۹۰۳	۰/۹۸۸۲	۰/۵۴۴۱	۰/۹۸۸۲

نمره‌های کارایی مراحل و کل تحت شرایط VRS، به دلیل حذف اصل بازده به مقیاس ثابت و کوچک‌تر شدن مجموعه امکان‌های تولید (PPS)، از نمره‌های کارایی CRS بالاتر شده است. همانند CRS، در اینجا نیز فقط واحد ۷ در هر دو مرحله کارا شده، بنابراین کارایی کل است. همچنین واحد ۹ در مرحله اول و واحدهای ۱، ۵، ۱۴ و ۱۶ در مرحله دوم کارا شده‌اند. در کنار کارایی VRS، کارایی مقیاس هر مرحله و کل محاسبه شده است. کارایی مقیاس از مقایسه نمره‌های کارایی در شرایط CRS و VRS به دست می‌آید.

برتری‌های مدل پژوهش

مدل‌های سنتی فقط ورودی‌ها و خروجی‌های کلی را بدون توجه به ساختار داخلی در نظر گرفته و دیدگاه جعبه سیاه دارند. شکل ۴ این رویکرد مدل‌های سنتی تحلیل پوششی داده‌ها در مواجهه با ساختارهای شبکه‌ای دومرحله‌ای را نشان می‌دهد که فرایند داخل خط‌چین را بررسی نمی‌کنند.



شکل ۴. دیدگاه جعبه سیاه مدل‌های سنتی

جدول ۴ نتایج حاصل از تحلیل داده‌های مثال کاربردی را با مدل پژوهش و مدل سنتی تحلیل پوششی داده‌ها برای شرایط CRS و VRS نشان می‌دهد. همان‌طور که در قسمت CRS جدول ۴ دیده می‌شود واحد ۳ در رویکرد جعبه سیاه کارا شده است، در حالی که در هر دو مرحله ناکارا است. واحدهای ۵ و ۱۴ نیز کارا نشان داده شده‌اند، در حالی که در مرحله نخست ناکارا هستند. همچنین در قسمت VRS نیز واحدهای ۳، ۵، ۸، ۹، ۱۳، ۱۴ و ۱۶ با مدل‌های سنتی کارا نشان داده شده‌اند، در حالی که در مراحل ناکارا هستند. دلیل این ضعف، در نظر نگرفتن متغیرهای میانی و نحوه تبدیل ورودی‌ها به خروجی‌ها است که باعث می‌شود واحدی کارا نشان داده شود، در حالی که در همه مراحل و فرایندهای خود کارا نیست (کائو و هوانگ، ۲۰۱۰ و کائو، ۲۰۰۹). اما با مدل پژوهش فقط واحد ۷ کارا شده که در هر دو مرحله کارا است. مدل‌های دیدگاه جعبه سیاه حتی در مقایسه عملکرد واحدها با یکدیگر نیز دارای خطا هستند. ۱۶ واحد از ۱۷ واحد در دو مدل دارای رتبه متفاوتی هستند، بنابراین ممکن است واحدی که در مدل سنتی عملکرد بهتری از واحد دیگر نشان

داده است، در واقع عملکرد بدتری داشته باشد (مانند واحد ۱ و ۲) و به دلیل ضعف مدل‌های سنتی بهتر نشان داده شده است. این ضعف در واحدهای ۳ و ۱۴ ملموس‌تر دیده می‌شود. این دو واحد که در مدل پژوهش جزء عملکردهای بد هستند، در مدل سنتی رتبه نخست داشته و جزء عملکردهای خوب هستند. با مدل سنتی VRS، کارایی ۸ واحد ۱ شده است، یعنی این مدل نتوانسته به خوبی بین واحدها تفکیک ایجاد کرده و آنها را رتبه‌بندی کند، در حالی که با مدل VRS پژوهش فقط یک واحد کارا شده است.

جدول ۴. مقایسه نتایج تحلیل داده‌ها با مدل پژوهش و مدل‌های سنتی

VRS				CRS				واحد
رتبه	کارایی (مدل پژوهش)	رتبه	کارایی (رویکرد جعبه سیاه)	رتبه	کارایی (مدل پژوهش)	رتبه	کارایی (رویکرد جعبه سیاه)	
۱۱	۰/۵۴۵۴	۱۲	۰/۷۵	۱۱	۰/۴۴۵۸	۱۰	۰/۶۶	۱
۹	۰/۵۵۴۶	۱۵	۰/۶۴	۹	۰/۴۶۱۷	۱۵	۰/۵۴	۲
۱۶	۰/۳۸۸۷	۱	۱	۱۴	۰/۳۸۵۵	۱	۱	۳
۱۵	۰/۴۰۹۹	۹	۰/۹۵	۱۵	۰/۳۵۵۲	۵	۰/۸۹	۴
۵	۰/۸۷۷۶	۱	۱	۳	۰/۵۹۸۶	۱	۱	۵
۱۴	۰/۴۲۵۳	۱۴	۰/۶۸	۱۶	۰/۳۵۱۴	۱۳	۰/۵۷	۶
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۷
۴	۰/۸۹۲۳	۱	۱	۱۱	۰/۴۳۵۱	۱۶	۰/۵۱	۸
۳	۰/۸۹۶۲	۱	۱	۲	۰/۶۳۳۴	۸	۰/۷۱	۹
۱۳	۰/۵۱۹۲	۱۶	۰/۶۳	۹	۰/۴۶۳۵	۱۳	۰/۵۷	۱۰
۶	۰/۷۱۵۱	۱۰	۰/۷۷	۸	۰/۴۸۵۸	۱۱	۰/۶۲	۱۱
۸	۰/۶۱۳۲	۱۳	۰/۷۳	۴	۰/۵۳۵۷	۱۲	۰/۶۰	۱۲
۲	۰/۹۱۱۴	۱	۱	۶	۰/۵۲۵۲	۸	۰/۷۱	۱۳
۱۷	۰/۳۷۹۳	۱	۱	۱۷	۰/۳۰۶۵	۱	۱	۱۴
۱۰	۰/۵۴۹۴	۱۷	۰/۵۷	۱۳	۰/۴۳۱۰	۱۷	۰/۴۸	۱۵
۷	۰/۶۸۷۵	۱	۱	۶	۰/۵۳۰۲	۶	۰/۸۷	۱۶
۱۲	۰/۵۴۴۱	۱۰	۰/۷۷	۴	۰/۵۳۷۷	۷	۰/۷۶	۱۷

کائو و هوانگ (۲۰۰۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱) و کائو (۲۰۱۴ الف) مدل‌های مضرری را برای ارزیابی ساختارهای دومرحله‌ای توسعه دادند. جدول ۵ نمره‌های کارایی مثال کاربردی را با مدل کائو (۲۰۱۴ الف) نشان می‌دهد. در این پژوهش کاربردی، درآمد فروش تأمین‌کننده به تولیدکننده یا هزینه خرید تولیدکننده از تأمین‌کننده متغیر میانی است که بین دو مرحله ارتباط برقرار می‌کند و تعیین بهینه آن برای رسیدن به کارایی بسیار مهم است، زیرا افزایش آن به نفع تأمین‌کننده و به ضرر تولیدکننده و کاهش آن به نفع تولیدکننده و ضرر تأمین‌کننده است.

جدول ۵. نتایج تحلیل داده‌ها با مدل کائو (۲۰۱۴ الف)

واحد	کارایی مرحله ۱	کارایی مرحله ۲	کارایی کل
۱	۰/۴۲۳۳	۰/۶۵۶۲	۰/۶۵۵۷
۲	۰/۵۰۶۱	۰/۵۳۸۴	۰/۵۳۸۱
۳	۰/۴۱۰۶	۰/۸۹۹۴	۰/۸۹۸۲
۴	۰/۳۹۲۳	۰/۸۵۱۶	۰/۸۵۰۷
۵	۰/۴۳۳۱	۰/۸۹۹۴	۰/۸۹۸۵
۶	۰/۳۹۲۷	۰/۵۶۹۰	۰/۵۶۸۵
۷	۱	۱	۱
۸	۰/۴۹۰۸	۰/۳۴۰۱	۰/۴۴۹۶
۹	۰/۶۵۵۴	۰/۸۰۹۴	۰/۶۴۳۰
۱۰	۰/۴۷۴۴	۰/۵۲۹۴	۰/۵۲۹۱
۱۱	۰/۶۱۳۷	۰/۵۴۹۹	۰/۵۸۳۵
۱۲	۰/۶۱۷۵	۰/۷۳۷۳	۰/۵۹۳۱
۱۳	۰/۵۷۶۶	۰/۴۶۸۶	۰/۵۵۰۶
۱۴	۰/۳۰۵۵	۱	۰/۹۹۸۱
۱۵	۰/۴۵۰۲	۰/۷۶۸۸	۰/۴۴۴۶
۱۶	۰/۵۸۰۵	۰/۸۶۷۹	۰/۸۶۷۴
۱۷	۰/۵۰۸۸	۰/۶۵۹۳	۰/۶۵۹۰

در مدل کائو (۲۰۱۴ الف) مقدار بهینه برای زنجیره تأمین مشخص نیست. به بیان دیگر این مدل، درآمد فروش بهینه برای تأمین‌کننده را متفاوت از هزینه خرید بهینه برای تولیدکننده به دست می‌آورد. جدول ۶ مقدار بهینه آن را برای دو مرحله نشان می‌دهد.

جدول ۶. مقدار بهینه متغیرمیانی در مدل کائو (۲۰۱۴ الف)

واحد	درآمد فروش بهینه برای تأمین‌کننده	هزینه خرید بهینه برای تولیدکننده	میزان اختلاف
۱	۱۲۹۹	۱۲۹۹	۰
۲	۱۵۴۷	۱۵۴۷	۰
۳	۱۱۳۶	۸۳۴	۳۱۲
۴	۱۰۸۰	۹۰۰	۱۸۰
۵	۱۳۱۲	۱۰۸۰	۲۳۲
۶	۱۴۲۳	۱۴۲۳	۰
۷	۹۹۰	۹۹۰	۰
۸	۲۵۲۰	۱۶۶۷	۸۵۳
۹	۱۶۵۰	۱۲۴۴	۴۰۶
۱۰	۱۶۷۹	۱۵۴۷	۱۳۲
۱۱	۱۷۱۰	۱۴۱۹	۲۹۱
۱۲	۱۳۵۰	۱۳۳۶	۱۴
۱۳	۲۱۴۵	۱۴۰۴	۷۴۱
۱۴	۸۰۰	۸۰۰	۰
۱۵	۱۷۳۳	۱۷۳۲	۰
۱۶	۱۰۳۸	۹۲۸	۱۱۰
۱۷	۱۵۱۴	۱۲۵۷	۲۵۷

همان‌طور که مشخص است در ۱۱ زنجیره تأمین از ۱۷ زنجیره (۶۵ درصد)، بین مقدار بهینه درآمد فروش برای تأمین‌کننده و مقدار بهینه هزینه خرید تولیدکننده تفاوت وجود دارد، در حالی که این مقدار باید مساوی بوده و اختلافی نداشته باشند. برای مثال در زنجیره تأمین سومی درآمد بهینه برای تأمین‌کننده ۱۱۳۶ است و هم‌زمان هزینه خرید بهینه برای تولیدکننده ۸۲۴ است یعنی ۳۱۲ تا اختلاف، بنابراین مشخص نیست که این واحد برای کارا شدن باید به سمت کدام مقدار حرکت کند و مقدار متغیر میانی را به چند برساند. دلیل آن این است که در مدل کائو (۲۰۱۴ الف) هر مرحله جداگانه این متغیر را بهینه می‌کند و برای آن رویکرد یکسانی وجود ندارد. همچنین با توجه به اینکه نمره‌های کارایی هر مرحله با مقایسه مقدار فعلی متغیرها از جمله متغیر میانی با مقدار بهینه آنها به دست آمده و مقدار بهینه متغیر میانی به‌درستی تعیین نشده است، نمره‌های کارایی نیز دارای خطا و اریب هستند. مدل پژوهش با ثابت نگه داشتن مقدار متغیرهای میانی در سطح فعلی (یکسان برای دو مرحله)، هر مرحله را کارا می‌کند.

در حالی که یکی از مزیت‌های مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها، ارائه الگوی کارا برای واحدهای ناکارا است، اما الگوی معرفی شده به‌وسیله مدل کائو (۲۰۱۴ الف) و کائو و هوانگ (۲۰۰۸ و ۲۰۱۰) خود در مراحل ناکار است. اگر الگوی مدل آنها ارزیابی شود، در هر دو مرحله کارا نمی‌شود. جدول ۷ کارایی مراحل را به‌صورت جداگانه و کارایی کل کائو (۲۰۱۴ الف) را برای الگوی هر یک از واحدها نشان می‌دهد.

جدول ۷. کارایی الگوی واحدهای ناکارای مدل کائو (۲۰۱۴ الف)

واحد	کارایی مرحله ۱	کارایی مرحله ۲	کارایی کل
۱	۰/۷۲	۱	۱
۲	۰/۹۵	۱	۱
۳	۰/۴۹	۱	۱
۴	۰/۵۰	۱	۱
۵	۰/۶۹	۱	۱
۶	۰/۶۸	۱	۱
۷	۱	۱	۱
۸	۱	۰/۶۹	۱
۹	۱	۰/۷۲	۱
۱۰	۰/۹۸	۱	۱
۱۱	۱	۰/۸۱	۱
۱۲	۱	۰/۹۳	۱
۱۳	۱	۰/۸۱	۱
۱۴	۰/۳۱	۱	۱
۱۵	۱	۱	۱
۱۶	۰/۷۲	۱	۱
۱۷	۰/۹۳	۱	۱

الگوی معرفی شده فقط در واحد ۷ و ۱۵ کارا است و در سایر موارد علی‌رغم اینکه مدل کائو (۲۰۱۴ الف) آن را کارایی کل نشان می‌دهد، کارا نیستند. در ۱۰ واحد مرحله نخست و در ۵ واحد مرحله دوم کارا نیست که نشان می‌دهد حتی اگر واحدی متغیرهای خود را به مقادیر بهینه تعیین شده به وسیله مدل‌های کائو برساند باز هم در هر دو مرحله کارا نمی‌شود. همچنین، این مورد نشان می‌دهد که ممکن است مدل کائو واحدی را کارا نشان دهد، ولی به‌طور لزوم در مراحل کارا نباشد. دلیل این ضعف این است که در مدل آنها هدف کارایی کل است و از تجزیه آن کارایی مراحل به دست می‌آید، بنابراین به‌طور لزوم مراحل کارا نمی‌شوند. اما در مدل پژوهش، همان‌گونه که در قضیه ۱ و ۲ اثبات شد، از کارا شدن مراحل، کارایی کل حاصل می‌شود و فقط در صورتی واحدی کارا نشان داده می‌شود که در مراحل نیز کارا باشد. جدول ۸ مقادیر فعلی و بهینه حاصل از مدل کائو (۲۰۱۴ الف) و مدل پژوهش را برای واحد ۲ نشان می‌دهد.

جدول ۸. تفاوت الگوی مدل پژوهش و مدل کائو (۲۰۱۴ الف)

	کارایی ۲	کارایی ۱	Y2	Y1	E3	E2	E1	L	Z	X3	X2	X1	
مقدار فعلی	۰/۹	۰/۵۱	۷	۲۰۹۳۰۰	۲۲	۲۸	۲۵	۲۳	۸۳۰	۴۹	۱۸	۲۳	
بهینه کائو	۱	۰/۹۵	۱۳	۳۸۸۹۰۶	۲۲	۲۸	۲۵	۴۲/۷	۱۵۴۷	۴۹	۱۸	۲۳	
بهینه مدل	۱	۱	۷/۷۷	۲۳۲۲۷۲	۲۲	۲۸	۲۵	۲۳	۸۳۰	۲۵/۱	۹/۲	۱۱/۸	

واحد ۲ از جمله واحدهایی بود که میزان بهینه متغیر میانی آن در مدل کائو برای دو مرحله یکسان است، اما حتی اگر این واحد مقادیر خود را مطابق مدل کائو بهینه کند. با وجود اینکه وضعیت کارایی آن بهبود پیدا می‌کند و از ۰/۵۱ به ۰/۹۵ می‌رسد، اما باز نیز در مرحله اول ناکارا است. در مدل کائو باید درآمد فروش (هزینه خرید) از ۸۳۰ به ۱۵۴۷ برسد، یعنی ۱/۹ برابر شود که به‌طور قطع به دلیل افزایش هزینه‌های خود با مقاومت تولیدکننده مواجه می‌شود، اما در مدل پژوهش درآمد فروش (هزینه خرید) در سطح فعلی ثابت نگه داشته می‌شود و تأمین‌کننده با کاهش ورودی‌های خود و تولیدکننده با افزایش خروجی‌ها، خود را بهینه و کارا می‌کنند.

نکته دیگر در رابطه با نتایج تحلیل داده‌ها با مدل کائو (۲۰۱۴ الف) این است که نمره‌های کارایی کل و مراحل تفکیک معناداری ندارد. جدول ۹ نتایج آزمون LSD که یکی از آزمون‌های تعقیبی ANOVA است را برای مقایسه نمره‌های کارایی مدل کائو (۲۰۱۴ الف) نشان می‌دهد.

جدول ۹. نتایج آزمون LSD برای مدل کائو (۲۰۱۴ الف)

%95 Confidence Interval	Sig.	Std. Error	Mean Difference (I-J)	(J) Stage	(I) Stage
۰/۲۹۴۵	۰/۰۰۸	۰/۰۶۱۷۸	۰/۱۷۰۳۶*	کارایی ۱	کارایی کل
۰/۰۹۹۷۰	۰/۶۹۳	۰/۰۶۱۷۸	-۰/۰۲۴۵۲	کارایی ۲	
-۰/۰۴۶۱	۰/۰۰۸	۰/۰۶۱۷۸	-۰/۱۷۰۳۶*	کارایی کل	کارایی ۱
-۰/۰۷۰۶	۰/۰۰۳	۰/۰۶۱۷۸	-۰/۱۹۴۸۹*	کارایی ۲	
۰/۱۴۸۷	۰/۶۹۳	۰/۰۶۱۷۸	۰/۰۲۴۵۲	کارایی کل	کارایی ۲
۰/۳۱۹۱	۰/۰۰۳	۰/۰۶۱۷۸	۰/۱۹۴۸۹*	کارایی ۱	

* معنادار در سطح اطمینان ۹۵ درصد

همان‌طور که مشخص است نمره‌های کارایی مرحله دوم و کل اختلاف معناداری ندارند. این ایراد در مثال عددی کائو (۲۰۱۴ الف) که از این رویکرد استفاده کرده است، نیز دیده می‌شود. بنابراین در مدل آنها چالش ارتباط بین کارایی کل و کارایی مراحل به‌درستی حل نشده و تعاریف و تفکیک کارایی‌ها به‌درستی انجام نشده است و هر دو مرحله در تعیین کارایی کل نقش ندارند. در حالی که یکی از مزیت‌های مدل‌های شبکه‌ای تفکیک ناکارایی کل ساختار به ناکارایی مراحل است تا منشأ عدم کارایی به‌درستی مشخص شود.

جدول ۱۰ نمره‌های کارایی پایداری ۱۷ زنجیره تأمین را با مدل جمعی کوک و همکاران (۲۰۱۰) در شرایط CRS و VRS نشان می‌دهد.

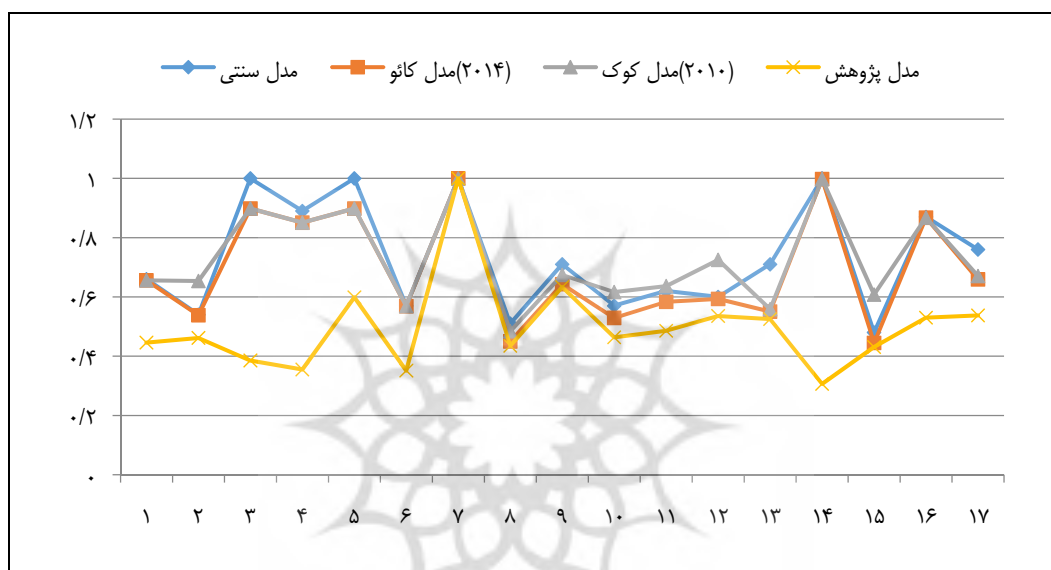
جدول ۱۰. نمره‌های کارایی مدل کوک و همکاران (۲۰۱۰)

VRS			CRS			واحد
کارایی کل	کارایی ۲	کارایی ۱	کارایی کل	کارایی ۲	کارایی ۱	
۰/۸۹۷۲	۰/۹۵۷۶	۰/۷۷۷۶	۰/۶۵۵۹	۰/۶۵۶۲	۰/۴۲۳۳	۱
۰/۸۸۴۷	۰/۹۰۷۵	۰/۸۳۸۳	۰/۶۵۳۷	۰/۸۴۶۳	۰/۵۱۲۳	۲
۰/۹۰۶۹	۰/۹۰۶۸	۰/۹۴۹۰	۰/۸۹۸۳	۰/۸۹۹۴	۰/۴۱۰۶	۳
۰/۸۸۶۷	۰/۸۹۰۳	۰/۸۷۱۸	۰/۸۵۰۸	۰/۸۵۱۶	۰/۳۹۲۳	۴
۰/۹۹۱۱	۱	۰/۹۵۱۹	۰/۸۹۸۶	۰/۸۹۹۴	۰/۴۳۳۱	۵
۰/۸۶۷۴	۰/۸۸۶۷	۰/۸۲۸۱	۰/۵۶۸۷	۰/۵۶۹۰	۰/۳۹۲۷	۶
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۷
۰/۹۷۵۷	۰/۸۹۲۱	۱	۰/۴۸۴۱	۰/۷۸۵۹	۰/۴۴۰۳	۸
۰/۹۷۶۳	۰/۸۹۱۹	۱	۰/۶۷۴۳	۰/۸۵۰۳	۰/۶۴۱۱	۹
۰/۸۷۷۳	۰/۸۹۶۷	۰/۸۵۳۵	۰/۶۱۶۵	۰/۸۰۸۱	۰/۴۷۹۵	۱۰
۰/۹۲۶۹	۰/۷۷۶۱	۰/۹۷۶۱	۰/۶۳۶۶	۰/۷۴۹۱	۰/۵۴۹۷	۱۱
۰/۸۶۹۰	۰/۸۳۶۱	۰/۹۳۹۲	۰/۷۲۵۱	۰/۷۷۷۵	۰/۶۸۸۹	۱۲
۰/۹۸۰۶	۰/۹۱۱۳	۱	۰/۵۵۸۶	۰/۸۵۰۹	۰/۵۱۳۵	۱۳
۰/۹۹۹۷	۱	۰/۷۵۱۸	۰/۹۹۸۱	۱	۰/۳۰۵۵	۱۴
۰/۸۸۱۸	۰/۹۲۹۱	۰/۷۸۷۷	۰/۶۰۷۷	۰/۹۵۵۷	۰/۴۵۰۱	۱۵
۰/۹۹۹۸	۰/۹۹۹۹	۰/۸۱۹۱	۰/۸۶۷۵	۰/۸۶۷۹	۰/۵۸۰۵	۱۶
۰/۸۹۷۶	۰/۸۹۰۳	۰/۹۰۳۰	۰/۶۷۰۵	۰/۸۵۷۱	۰/۵۱۲۳	۱۷

اما نمره‌های کارایی حاصل از این مدل نیز دارای خطا هستند و نمی‌توانند مبنا قرار گیرند. زیرا اولاً در این مدل، مقادیر بهینه متغیرها از جمله متغیر میانی مشخص نیست، بنابراین برای واحد ناکارا مشخص نیست که چگونه باید به سمت کارا شدن حرکت کند و از طرف دیگر معلوم نیست که این نمره‌های کارایی از مقایسه وضعیت فعلی واحد با کدام وضعیت مطلوب (الگو) به دست آمده است. ثانیاً متغیرهای میانی هم به‌عنوان ورودی و هم خروجی کل در نظر گرفته شده‌اند و وزن و اهمیت آنها برای هر دو مرحله یکسان فرض شده است، بنابراین نقش آنها به‌خوبی تبیین نشده و

اهمیت متغیر میانی برای تأمین‌کننده و تولیدکننده یکسان نیست. وزن یکسان برای متغیر میانی در کاربردهایی که دو مرحله متعلق به یک سازمان باشد، مانند مرحله جمع‌آوری سپرده و سودآوری با متغیر میانی سپرده در ارزیابی بانک، می‌تواند مبنای صحیحی داشته باشد، زیرا به هر حال وزن آن برای سازمان مقدار مشخصی دارد. اما در کاربردهایی مانند زنجیره تأمین که دو مرحله (تأمین‌کننده و تولیدکننده) مستقل هستند، اهمیت و وزن متفاوت متغیر میانی برای دو مرحله مناسب‌تر است.

شکل ۵ تفاوت نمره‌های کارایی مدل پژوهش و مدل‌های دیدگاه جعبه سیاه، مدل کائو (۲۰۱۴ الف) و مدل کوک و همکاران (۲۰۱۰) در شرایط CRS را نشان می‌دهد.



شکل ۵. مقایسه نمره‌های کارایی مدل پژوهش و سایر مدل‌ها (CRS)

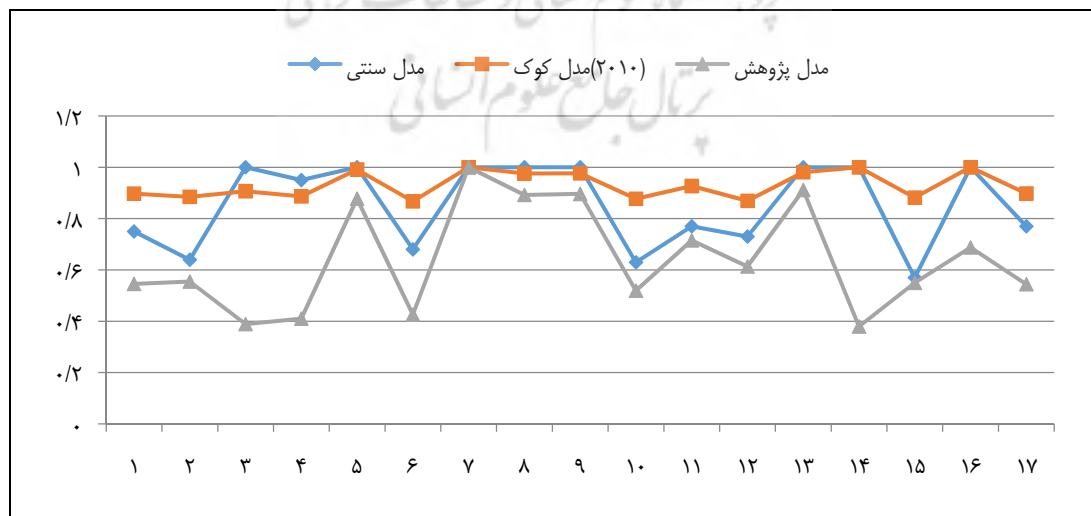
همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، نمودار نمره‌های کارایی مدل‌های دیگر نزدیک یکدیگر قرار داشته و بین آنها تفاوت زیادی وجود ندارد. یعنی نمره‌های مدل‌های کائو (۲۰۱۴ الف) و کوک (۲۰۱۰) با نمره‌های کارایی رویکرد جعبه سیاه مدل‌های سنتی تفاوت معناداری ندارد. اما نمودار کارایی مدل پژوهش با فاصله معناداری پایین‌تر از بقیه قرار دارد. نمودار کارایی سایر مدل‌ها، برای همه واحدها، به‌جز واحد ۷ که برابرند، بالاتر از نمودار کارایی مدل پژوهش قرار گرفته است. به‌طور کلی یکی از ضعف‌های مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها اختصاص وزن‌های خوش‌بینانه برای محاسبه کارایی هر واحد است. مقایسه نتایج تحلیل داده‌های مدل پژوهش با مدل‌های ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که مدل پژوهش در این زمینه ضعف کمتری دارد و نمره‌های کارایی ۱۶ واحد از مدل‌های دیگر کمتر است. کائو (۲۰۰۹) و لیو، لو، لو و لین^۱ (۲۰۱۳) بیان کردند که در شرایط برابر مدلی که قدرت تمایز بیشتری بین واحدها داشته باشد و نمره‌های کارایی را کمتر محاسبه کند مدل بهتری است، زیرا توانسته است ناکارایی را بهتر نشان دهد. جدول ۱۱ نتیجه آزمون LSD را برای مقایسه نمره‌های کارایی مدل با سایر مدل‌ها در شرایط CRS نشان می‌دهد.

جدول ۱۱. نتایج آزمون LSD برای مقایسه مدل‌ها (شرایط CRS)

% 95 Confidence Interval		Sig.	Std. Error	Mean Difference (I-J)	(J) Model	(I) Model
Upper Bound	Lower Bound					
-.۱۶۳۷	-.۰۷۴۰	۰/۴۵۴	۰/۰۵۹۵۱	۰/۰۴۴۸۴	کائو (۲۰۱۴ الف)	جعبه سیاه
-.۱۲۶۲	-.۱۱۱۵	۰/۹۰۲	۰/۰۵۹۵۱	۰/۰۰۷۳۵	کوک (۲۰۱۰)	
۰/۳۵۴۶	۰/۱۱۶۸	۰/۰۰۰	۰/۰۵۹۵۱	۰/۲۳۵۷۴*	مدل پژوهش	
-.۰۷۴۰	-.۱۶۳۷	۰/۴۵۴	۰/۰۵۹۵۱	-.۰۴۴۸۴	جعبه سیاه	کائو (۲۰۱۴ الف)
-.۸۱۴	-.۱۵۶۳	۰/۵۳۱	۰/۰۵۹۵۱	-.۰۳۷۴۸	کوک (۲۰۱۰)	
۰/۳۰۹۸	۰/۰۷۲۰	۰/۰۰۲	۰/۰۵۹۵۱	۰/۱۹۰۹۰*	مدل پژوهش	
-.۱۱۱۵	-.۱۲۶۲	۰/۹۰۲	۰/۰۵۹۵۱	-.۰۰۷۳۵	جعبه سیاه	کوک (۲۰۱۰)
۰/۱۵۶۳	-.۰۸۱۴	۰/۵۳۱	۰/۰۵۹۵۱	۰/۰۳۷۴۸	کائو (۲۰۱۴ الف)	
۰/۳۴۷۲	۰/۱۰۹۴	۰/۰۰۰	۰/۰۵۹۵۱	۰/۲۲۸۳۹*	مدل پژوهش	
-.۱۱۶۸	-.۰۳۵۴۶	۰/۰۰۰	۰/۰۵۹۵۱	-.۰۲۳۵۷۴*	جعبه سیاه	مدل پژوهش
-.۰۷۲۰	-.۰۳۰۹۸	۰/۰۰۲	۰/۰۵۹۵۱	-.۰۱۰۹۰*	کائو (۲۰۱۴ الف)	
-.۱۰۹۴	-.۰۳۴۷۲	۰/۰۰۰	۰/۰۵۹۵۱	-.۰۲۲۸۳۹*	کوک (۲۰۱۰)	

* معنادار در سطح اطمینان ۹۵ درصد

همان‌طور که مشخص است نمره‌های کارایی مدل‌های کائو (۲۰۱۴ الف)، کوک (۲۰۱۰) و مدل‌های سنتی اختلاف معناداری ندارد، اما اختلاف نمره‌های کارایی مدل پژوهش با سایر مدل‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار است. همچنین با توجه به دو ستون آخر که حد بالا و پایین تفاوت نمره‌های کارایی را نشان می‌دهد، نمره‌های کارایی مدل کمتر از سایر مدل‌ها است، بنابراین قدرت تمایز آن بیشتر است. شکل ۶ و جدول ۱۲ نتایج مقایسه تحلیل داده‌های مثال کاربردی با مدل پژوهش، مدل سنتی و مدل کوک و همکاران (۲۰۱۰) در شرایط VRS را نشان می‌دهد.



شکل ۶. مقایسه نمره‌های کارایی مدل پژوهش و سایر مدل‌ها (VRS)

جدول ۱۲. نتایج آزمون LSD برای مقایسه مدل‌ها (شرایط VRS)

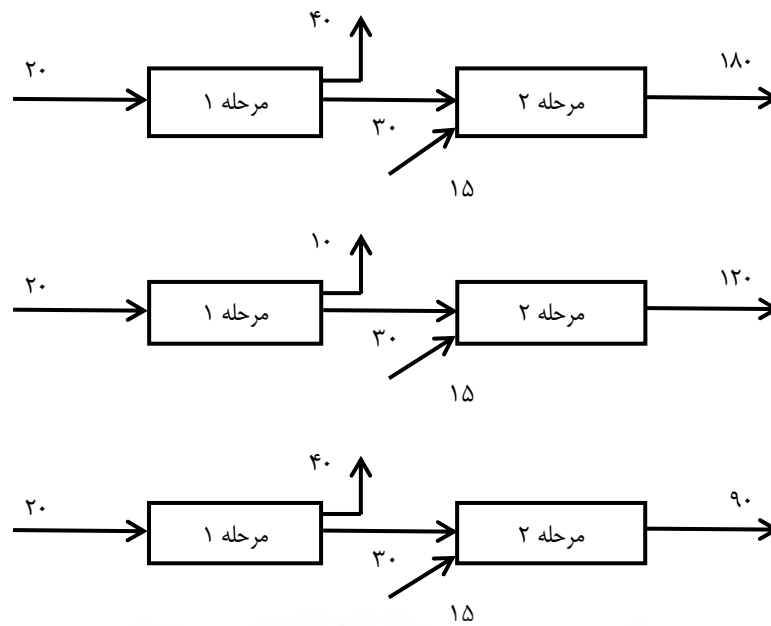
95% Confidence Interval		Sig.	Std. Error	Mean Difference (I-J)	(J) Model	(I) Model
Upper Bound	Lower Bound					
-.۰۲۸۴	-.۰۱۸۴۷	۰/۱۴۷	۰/۰۵۳۰۲	-.۰/۰۷۸۱۵	کوک (۲۰۱۰)	جعبه سیاه
۰/۳۱۷۲	۰/۱۰۴۰	۰/۰۰۰	۰/۰۵۳۰۲	۰/۲۱۰۶۳*	مدل پژوهش	
۰/۱۸۴۷	-.۰/۰۲۸۴	۰/۱۴۷	۰/۰۵۳۰۲	۰/۰۷۸۱۵	جعبه سیاه	کوک (۲۰۱۰)
۰/۳۹۵۴	۰/۱۸۲۱	۰/۰۰۰	۰/۰۵۳۰۲	۰/۲۸۸۷۹*	مدل پژوهش	
-.۰/۱۰۴۰	-.۰/۳۱۷۲	۰/۰۰۰	۰/۰۵۳۰۲	-.۰/۲۱۰۶۳*	جعبه سیاه	مدل پژوهش
-.۰/۱۸۲۱	-.۰/۳۹۵۴	۰/۰۰۰	۰/۰۵۳۰۲	-.۰/۲۸۸۷۹*	کوک (۲۰۱۰)	

در اینجا نیز برای مقایسه مدل‌ها در شرایط CRS دو نکته وجود دارد. یکی اینکه نمره‌های کارایی مدل‌های دیگر، از جمله مدل سنتی با یکدیگر تفاوت معناداری ندارد و دیگری اینکه نمره‌های کارایی مدل با اختلاف معناداری کمتر از بقیه هستند. یکی دیگر از مدل‌های مضربی ادبیات پژوهش برای ارزیابی ساختارهای دومرحله‌ای، مدل چندهدفه دسپوتیس و همکاران (۲۰۱۶) است. علی‌رغم اینکه این مدل برخی ضعف‌های مطرح‌شده برای سایر مدل‌ها را ندارد، اما دو ایراد اساسی دارد. یکی اینکه فقط برای ساختارهای دومرحله‌ای بدون ورودی و خروجی مازاد قابل استفاده است و مثال کاربردی مقاله را نمی‌توان با آن حل کرد و دیگر اینکه مقدار بهینه متغیر میانی را برای دو مرحله متفاوت می‌دهد.

نتیجه‌گیری

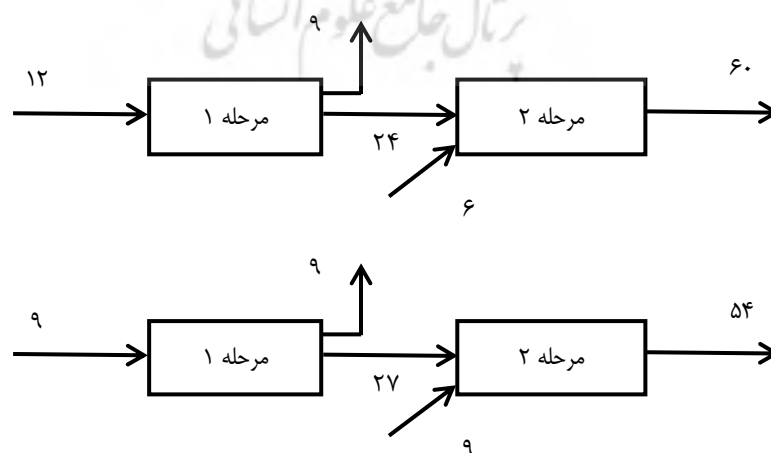
در این پژوهش با نقد مدل‌های سنتی تحلیل پوششی داده‌ها و مدل‌های شبکه‌ای موجود، برای ارزیابی ساختارهای دومرحله‌ای مدلی چندهدفه ارائه شد که از وزن‌های به‌دست‌آمده از مدل، برای محاسبه کارایی کل و کارایی مراحل استفاده می‌شود. در حالی که مدل کائو و هوانگ (۲۰۰۸)، چن و همکاران (۲۰۱۰) و کائو (۲۰۱۴ الف) قابل توسعه به شرایط بازده به مقیاس متغیر نیستند، مدل پژوهش برای شرایط بازده به مقیاس متغیر نیز توسعه داده شد. نحوه محاسبه کارایی‌ها توسط مدل با مثالی کاربردی بیان شد و در قالب این مثال، برتری و مزیت مدل‌های پژوهش بر مدل‌های قبلی با استفاده از نمودارها، جداول و آزمون‌های آماری ذکر شد. در ادامه ایرادهای که مدل‌های ادبیات پژوهش دارند و مدل‌های پژوهش فاقد آن هستند، با ذکر مثال بیان می‌شود.

مدل‌های سنتی فقط ورودی‌ها و خروجی‌های کلی را بدون توجه به ساختار داخلی در نظر گرفته و دیدگاه جعبه سیاه دارند، بنابراین همان‌گونه که در مثال کاربردی دیده شد، میزان ناکارایی را کمتر نشان می‌دهند. رویکرد دیگر در ارزیابی ساختارهای دو مرحله‌ای مدل‌های استاندارد هستند (ژو، ۲۰۰۰؛ هو و اه، ۲۰۰۸؛ لو، ۲۰۱۰؛ تسولاس، ۲۰۱۳). در این دسته مدل‌ها، برای هر مرحله و ساختار کلی، سه مدل جداگانه و مستقل استفاده می‌شود، اما برخلاف مدل پژوهش نتوانستند بین کارایی کل و کارایی مراحل ارتباط برقرار کنند و ممکن است در رویکرد آنها واحدی کارا شود اما در هر دو مرحله کارا نباشد. مدل‌های شبکه‌ای توسعه‌داده‌شده در ادبیات پژوهش هم نتوانستند تمامی چالش‌های ارزیابی ساختارهای دومرحله‌ای را حل کنند. مثال ۱ را در نظر بگیرید.



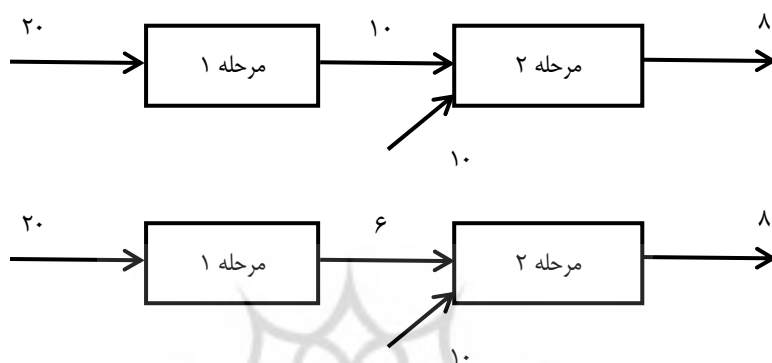
شکل ۷. ساختار و داده‌های مثال ۱

مرحله نخست واحد اولی، ۴۰ خروجی دارد، در حالی که مرحله نخست واحد دومی با ورودی‌های مشابه ۱۰ خروجی دارد. مدل کاتو و هوانگ (۲۰۱۰) و کاتو (۲۰۱۴) مقدار کارایی مرحله نخست واحد دومی را $0/67$ و مقدار بهینه خروجی مازاد این مرحله را ۱۵ می‌دهند، در حالی که مشخص است مقدار بهینه خروجی ۴۰ است. همچنین این مدل‌ها کارایی مرحله دوم واحد سومی را ۱ می‌دهند یعنی آن را کارا نشان می‌دهد، در حالی که مشخص است کارا نیست، زیرا مرحله دوم واحدی اولی با همین ورودی‌ها، خروجی‌های بیشتری تولید کرده است. مدل پژوهش کارایی مرحله نخست واحد دومی را $0/25$ و مقدار بهینه خروجی آن را ۴۰ و کارایی مرحله دوم واحد سومی را $0/5$ و مقدار بهینه خروجی آن را ۱۸۰ می‌دهد. مدل غیرشعاعی تن و تسوتسوی (۲۰۰۹) نیز در بعضی ساختارها ارزیابی صحیحی انجام نمی‌دهد. داده‌های مثال ۲ را در نظر بگیرید.



شکل ۸. ساختار و داده‌های مثال ۲

مرحله نخست واحد اولی با ورودی بیشتر، خروجی کمتری تولید کرده، ناکارا است، اما مدل تن و تسوتسوی (۲۰۰۹) این مرحله و کل واحد را کارایی قوی خروجی محور نشان می‌دهد. مدل پژوهش کارایی مرحله نخست واحد نخست را ۰/۷۵ می‌دهد که با توجه به داده‌های مثال منطقی است. مدل جمعی کوک و همکاران (۲۰۱۰)، پرمچاندرا، ژو، واستون و گالاگدرا^۱ (۲۰۱۲) و گوان و چن^۲ (۲۰۱۲) به این دلیل که متغیرهای میانی را هم به‌عنوان ورودی و هم خروجی سیستم در نظر می‌گیرند، نمره‌های کارایی را به‌درستی محاسبه نمی‌کنند. مثال ۳ را در نظر بگیرید.



شکل ۹. ساختار و داده‌های مثال ۳

مدل‌های جمعی ذکرشده کارایی مرحله نخست واحد دومی را ۱ و کل واحد را کارا نشان می‌دهند، در حالی که در مقایسه با همین مرحله در واحد نخست بدتر عمل کرده و نباید کارا شود. مدل ۶ پژوهش، کارایی آن را ۰/۶ و کل واحد را ناکارا نشان می‌دهد.

مدل‌های کائو و هوانگ (۲۰۰۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱)، کائو (۲۰۰۹ الف و ۲۰۱۴)، چن و همکاران (۲۰۰۹)، کوک و همکاران (۲۰۱۰) و تن و تسوتسوی (۲۰۰۹) دارای رویکرد تجزیه هستند. دسپوتیس، کروناکوس و ساتیروس (۲۰۱۶) با بیان اینکه این رویکرد دارای اشتباه در محاسبه کارایی است، با استفاده از رویکرد ترکیب تعیین وزن‌های بهینه مدلی چندهدفه ارائه کردند. اما مدل آنها دو ایراد اساسی دارد؛ نخست آنکه همان‌طور که در تفسیر هندسی مدل نشان داده شد، مقدار بهینه متغیرهای میانی برای دو مرحله متفاوت می‌شود و بنابراین نحوه کارا شدن کل ساختار و اینکه به‌سمت کدام مقدار بهینه باید حرکت کند، مشخص نیست. ایراد دیگر اینکه همانند مدل کائو و هوانگ (۲۰۰۸ و ۲۰۱۱)، کائو (۲۰۰۹) و چن و همکاران (۲۰۰۹)، فقط برای ساختار دومرحله‌ای بدون ورودی و خروجی مازاد قابل استفاده است، در حالی که در بسیاری از کاربردها از جمله مثال کاربردی مقاله، مراحل ممکن است ورودی و خروجی مختص خود را نیز داشته باشند، بنابراین نمی‌توان هیچ یک از مثال‌های بالا را با آنها حل کرد. مدل پژوهش حاضر بر رویکرد ترکیب مبتنی است، یعنی ابتدا کارایی مراحل محاسبه می‌شود، سپس با استفاده از کارایی مراحل، کارایی شبکه حساب می‌شود، اما هیچ یک از این ایرادها را ندارد و با ثابت نگه داشتن مقدار متغیرهای میانی، به‌دنبال کارا کردن مراحل و کل ساختار است.

در این پژوهش که برای یک ساختار دومرحله‌ای ارائه شد، مرحله نخست با رویکرد ورودی‌محور و مرحله دوم با رویکرد خروجی‌محور کارا شدند. در ساختارهای چندمرحله‌ای می‌توان با نظرخواهی از مدیران هر مرحله، نحوه کارا شدن آن مرحله یعنی حرکت ورودی‌محور یا خروجی‌محور را مشخص کرد و سپس با نوشتن توابع هدف هر یک از مراحل، برای آن یک مدل چندهدفه با حفظ متغیرهای میانی در سطح فعلی، ایجاد کرده و در نهایت با وزن‌دهی به مراحل آنها را تبدیل به یک تابع هدف کرد تا کارایی‌ها حاصل شود. مدل پژوهش ضعف‌ها و محدودیت‌هایی نیز دارد که برطرف کردن آنها می‌تواند زمینه‌ای برای پژوهش‌های آینده باشد. مدل‌های ارائه‌شده فقط می‌توانند داده‌های قطعی و مثبت را تحلیل کنند، در حالی که در بعضی از کاربردها داده‌ها ممکن است کیفی، غیرقطعی، احتمالی، فزایی، منفی و بازه‌ای باشند. بنابراین به تعمیم و توسعه مدل، به گونه‌ای که بتواند این داده‌ها را تحلیل کند، نیاز است. یکی از مباحث مدل‌های شبکه‌ای ارتباط بین مدل اولیه و ثانویه است، با توجه به اینکه مدل پژوهش مضربی است و مزیت‌های ثانویه آن بررسی نشده، پیشنهاد می‌شود در پژوهشی دیگر این ارتباط بررسی شود و مزیت‌ها نیز بیان و استفاده شوند. توسعه مدل به ساختارهای چندمرحله‌ای، موازی، ترکیبی و پویا از پیشنهادهای دیگر برای پژوهش‌های آینده است. از آنجا که به تحلیل حساسیت مدل‌های شبکه‌ای برخلاف مدل‌های سنتی کمتر پرداخته شده است، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی به این موضوع پرداخته شود.

منابع

- رضوی، سیدمصطفی؛ شهریار، سلطانعلی؛ احمدپور داریانی، محمود (۱۳۹۴). ارزیابی عملکرد نوآورانه شرکت‌های دانش‌نیان با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ای شبکه‌ای - رویکرد تئوری بازی. *مدیریت صنعتی*، ۷(۴)، ۷۲۱-۷۴۲.
- زارعی محمودآبادی، محمد (۱۳۹۵). ارزیابی چندسطحی کارایی در صنعت بانکداری (رویکرد SBM شبکه‌ای). *مدیریت صنعتی*، ۸(۳)، ۳۵۹-۳۸۰.
- شهریار، سلطانعلی؛ لاهیجی، ساین (۱۳۹۶). ارزیابی کارایی نظام ملی نوآوری با استفاده از تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای. *مدیریت صنعتی*، ۹(۳)، ۴۵۵-۴۷۴.

References

- An, Q., Chen, H., Xiong, B., Wu, J., & Liang, L. (2017). Target intermediate products setting in a two-stage system with fairness concern. *Omega*, 73, 49-59.
- Ang, S., & Chen, C.M. (2016). Pitfalls of decomposition weights in the additive multi-stage DEA model. *Omega*, 58, 139-153.
- Banker, R.D., Charnes, A., Cooper, W. W. (1984). Some models for estimating technical and scale efficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, 30(9), 1078-1092.
- Byrnes, P., Fare, R., Grosskopf, S. (1984). Measuring productive efficiency: An application to Illinois mines. *Management Science*, 30, 671-681.
- Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision-making units. *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429-444.

- Chen, Y., Cook, W. D., & Zhu, J. (2010). Deriving the DEA frontier for two-stage processes. *European Journal of Operational Research*, 202(1), 138-142.
- Chen, Y., Cook, W. D., Li, N., & Zhu, J. (2009). Additive efficiency decomposition in two-stage DEA. *European Journal of Operational Research*, 196(3), 1170-1176.
- Cook, W. D., Zhu, J., Bi, G. B., & Yang, F. (2010). Network DEA: Additive efficiency decomposition. *European Journal of Operational Research*, 207(2), 1122-1129.
- Despotis, K., D., Koronakos, G., Sotiros, D. (2016). Composition versus decomposition in two-stage network DEA: a reverse approach. *Journal of Productivity Analysis*, 45(1), 71-87.
- Despotis, K., Sotiros D., Koronakos G. (2016). A network DEA approach for series multi-stage processes. *Omega*, 61, 35-48.
- Du, J., Liang, L., Chen, Y., Cook, W. D., & Zhu, J. (2011). A bargaining game model for measuring performance of two-stage network structures. *European Journal of Operational Research*, 210(2), 390-397.
- Emrouznejad, A, Parker BR, Tavates, G. (2008). Evaluation of research in efficiency and productivity: a survey and analysis of the first 30 years of scholarly literature in DEA. *Socio-Economic Plan sciences*, 42(3), 151-158.
- Emrouznejad, A. & Yang, G. L. (2018). A survey and analysis of the first 40 years of scholarly literature in DEA: 1978-2016. *Socio-Economic Planning Sciences*, 61, 4-8.
- Färe, R., & Grosskopf, S. (1996). Productivity and intermediate products: A frontier approach. *Economics Letters*, 50(1), 65-70.
- Fare, R., & Grosskopf, S. (2000). Network DEA. *Socio-Economic Planning Sciences*, 34, 35-49.
- Färe, R., & Whittaker, G. (1995). An intermediate input model of dairy production using complex survey data. *Journal of Agricultural Economics*, 46(2), 201-213.
- Fare, R., Primont, D. (1984). Efficiency measures for multiplant firms. *Operations Research Letters*, 3, 257-260.
- Fare, R., Primont, D. (1993). Measuring the efficiency of multiunit banking: An activity analysis approach, *journal of Banking & Finance*, 17(2), 539-544.
- Farrell, M. J. (1957). The measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society*, 120(3), 253-290.
- Fukuyama, H., & Matousek, R. (2017). Modelling Bank Performance: A Network DEA Approach, *European Journal of Operational Research*, 259(2), 721-732.
- Guan, J. C., & Chen, K. H. (2012). Modeling the relative efficiency of national innovation systems. *Research Policy*, 41(1), 102-115.
- Halkos, G.E., Tzeremes, N.G., & Kourtzidis, S. A. (2014). A unified classification of two-stage DEA models. *Surveys in Operations Research and Management Science*, 19(1), 1-16.
- Ho, C. T. B., & Oh, K. B. (2008). Measuring online stockbroking performance. *Industrial Management and Data Systems*, 108(7), 988-1004.
- Kao, C. (1995). Some properties of Pareto efficiency under the framework of data envelopment analysis. *International Journal of Systems Science*, 26, 1549-1558.

- Kao, C. (2009). Efficiency decomposition in network data envelopment analysis: A relational model. *European Journal of Operational Research*, 192(3), 949-962.
- Kao, C. (2014a). Efficiency decomposition for general multi-stage systems in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 232(1), 117-124.
- Kao, C. (2014b). Network data envelopment analysis: A review. *European Journal of Operational Research*, 239(1), 1-16.
- 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. (2010). Efficiency measurement for network systems: IT impact on firm performance. *Decision Support Systems*, 48(3), 437-446.
- Kao, C., & Hwang, S. N. (2011). Decomposition of technical and scale efficiencies in two-stage production systems. *European Journal of Operational Research*, 211(3), 515-519.
- Lee, B. & Worthington, A.C. (2016). A network DEA quantity and quality-orientated production model: an application to Australian university research services. *Omega*, 60, 26-33.
- Li, F., Zhu, Q., & Zhuang, J. (2017). Analysis of fire protection efficiency in the United States: a Two-stage DEA-based approach. *OR Spectrum*, DOI: 10.1007/s00291-017-0490-2.
- Li, H., Chen, C., Cook, W. D., Zhang, J. & Zhu, J. (2018). Two-Stage network DEA: Who is the leader? *Omega*, 74, 15-19.
- Liang, L., Cook, W. D., & Zhu, J. (2008). DEA models for two-stage processes: Game approach and efficiency decomposition. *Naval Research Logistics*, 55(7), 643-653.
- Lim, S. & Zhu, J. (2018). Primal-dual correspondence and frontier projections in two-stage network DEA models. *Omega*, 1-13.
- Lim, S., & Zhu J. (2013). Integrated data envelopment analysis: Global vs local optimum. *European Journal of Operational Research*, 229(1), 276-278.
- Liu, J. S., Lu, L. Y., Lu, W. M. & Lin, B. j. (2013). A survey of DEA applications. *Omega*, 41, 893-902.
- Lo, S.F. (2010). Performance evaluation for sustainable business: A profitability and marketability framework. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 17(6), 311-319.
- Ma, J., Qi, Linan, Deng, L. (2017). Efficiency measurement and decomposition in hybrid two-stage DEA with additional inputs. *Exper Systems with Applications*, 79(3), 348-357.
- Mirdehghan, S.M. & Fukuyama, H. (2016). Pareto-Koopmans efficiency and network DEA. *Omega*, 61, 78-88.
- Premachandra, I. M., Zhu, J., Watson, J., & Galagedera, D. U. A. (2012). Bestperforming US mutual fund families from 1993 to 2008: Evidence from a novel two-stage DEA model for efficiency decomposition. *Journal of Banking and Finance*, 36(12), 3302-3317.
- Razavi, S. M., Shahriari, S., Ahmadpour, M. (2015). Evaluation of innovative Performance of Knowledge based Company by Network Data Envelopment Analysis- Game Theory Approach. *Journal of Industrial Management*, 7(4), 721-742. (in Persian)

- Seiford, L. M., & Zhu, J. (1999). Profitability and marketability of the top 55 US commercial banks. *Management Science*, 45(9), 1270-1288.
- Shahriari, S., Lahiji, S. (2017). Performance Evaluation of the National Innovation Systems by Network Data Envelopment Analysis. *Journal of Industrial Management*, 9(3), 455-474. (in Persian)
- Shokri, V., Yousefi, S., Shabanpour, H. & Farzipoor, S, R. (2017). How to evaluate sustainability of supply chains? A dynamic network DEA approach. *Industrial Management & Data Systems*, 117(9), 1866-1889.
- Sotiros, D., Koronakos, G. & Despotis D.k. (2018). Dominance at the divisional efficiencies level in network DEA: the case of two-stage processes, *Omega*, doi: 10.1016/j.omega.2018.06.007.
- Tone, K., & Tsutsui, M. (2009). Network DEA: A slacks-based measure approach. *European Journal of Operational Research*, 197, 243-252.
- Tsolas, I. E. (2013). Modeling profitability and stock market performance of listed construction firms on the Athens Exchange: Two-stage DEA approach. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(1), 111-119.
- Wacker, J. G. (1998). A definition of theory: research guidelines for different theory-building research methods in operations management. *Journal of Operations Management*, 16(4), 361-385.
- Zarei, M. (2016). Multilevel Measuring of Efficiency in Banking Industry (Network Slacks-Based Measure (NSBM) Approach). *Journal of Industrial Management*, 8(3), 359-380. (in Persian)
- Zhang, L., & Chen, Y. (2018). Equivalent solutions to additive two-stage network data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 264(3), 1189-1191.
- Zhu, J. (2000). Multi-factor performance measure model with an application to fortune 500 companies. *European Journal of Operational Research*, 123(1), 105-124.