

پژوهش‌های مدیریت در ایران

دوره ۲۵، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۰، صص ۱۹۳-۲۱۶

نوع مقاله: پژوهشی

## ارائه یک مدل تحلیل پوششی داده‌ای شبکه‌ای برای مقایسه کارایی زیست محیطی صنایع فعال در شهر تهران

آزاده امید<sup>۱</sup>، عادل آذر<sup>۲\*</sup>، محمود دهقان نیری<sup>۳</sup>، عباس مقبل باعرض<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۴- دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۲

ارسال: ۱۳۹۹/۱۲/۱۶

### چکیده

از آنجا که منابع در هر منطقه جغرافیایی محدود است، رویکرد منطقی آن است که این منابع صرف کسب و کارهای کارآ شود. طی سال‌های اخیر، کلان شهر تهران به دلیل شرایط جوی و موقعیت جغرافیایی در شرایط بحرانی زیست محیطی قرار دارد؛ بنابراین، سنجش کارایی زیست محیطی صنایع فعال در این شهر در کنار ارزیابی کارایی عملیاتی حائز اهمیت است. برای مقایسه عملکرد صنایع و سنجش کارایی کل متشکل از کارایی عملیاتی و کارایی زیست محیطی می‌توان از تکنیک تحلیل پوششی داده‌ای شبکه‌ای استفاده نمود. پیدایش تکنیک تحلیل پوششی داده‌ای شبکه‌ای برای سنجش همزمان کارایی چندین زیرفرآیند به عنوان پیشرفتی در مدل استاندارد تحلیل پوششی داده‌ها به حساب می‌آید که در پی یافتن همزمان کارایی کل و کارایی زیرفرآیندها طی یک مدل ریاضی چندهدفه است. مدل ارائه شده در این پژوهش با حداقل‌سازی فاصله از کارایی مستقل، سعی در بهینه‌سازی مدل چندهدفه با استفاده از رویکردی خطی دارد. به طوری که مقایسه نتایج عددی نشانگر برتری این مدل نسبت به مدل‌های موجود در ادبیات در دستیابی به مجموعه جواب پارتو است.

**کلیدواژه‌ها:** تحلیل پوششی داده‌ای شبکه‌ای، کارایی زیست محیطی، بهینه‌سازی چندهدفه، صنایع تولیدی تهران

## ۱- مقدمه

صنایع تولیدی چرخ‌دنده‌های اقتصاد به‌شمار می‌آیند و تولید کارآ همواره یکی از اهداف اصلی مدیران صنایع بوده است. شهر تهران یکی از پیشگامان صنعت کشور محسوب می‌شود و فعالیت صنایع بزرگ تولیدی در آن، باعث تبدیل این شهر به قطب صنعتی کشور شده است. با توجه به محدود بودن منابع موجود در این شهر، اختصاص این منابع به صنایع با بهره‌وری بالاتر، باعث رشد و شکوفایی صنعت این مرز و بوم، با سرعت بالاتری خواهد شد. بنابراین شناسایی صنایع تولیدی کارآ می‌تواند کمک شایانی به سیاست‌گذاران در راستای بالابردن تولید ناخالص ملی و رشد اقتصادی باشد. از طرف دیگر، با صنعتی شدن کلان شهرها و بحرانی شدن وضعیت محیط زیست، توجه به تولید سبز، بیش از پیش حائز اهمیت شده است؛ به‌طوری‌که کارآیی زیست محیطی صنایع تولیدی، اهمیت برابر و یا حتی بالاتر از کارآیی صنعتی پیدا کرده است. در این راستا، سیاست‌گذاران حوزه اقتصادی نیاز دارند تا برای اتخاذ تصمیمات کاربردی، هم کارآیی صنعتی و هم کارآیی زیست محیطی صنایع تولیدی را مورد بررسی قرار دهند که این امر در تضاد با نگرش مطرح در دهه‌های پیشین است، زیرا که نگرش‌های سنتی تنها بر کارآیی صنعتی تمرکز داشته است. برای سنجش و مقایسه کارآیی عملیاتی و زیست محیطی صنایع مختلف، این پژوهش بکارگیری تکنیک تحلیل پوششی داده‌ای شبکه‌ای را پیشنهاد می‌دهد؛ به‌طوری‌که با ارائه روش بهبود یافته برای تحلیل پوششی داده‌ای شبکه‌ای، تلاش دارد تا کارآیی ساختار شبکه‌ای متشکل از زیرفرآیندهای عملیاتی و زیست محیطی را به‌طور هم‌زمان و صحیح، اندازه‌گیری کند.

## ۲- مرور ادبیات

انتشار مدل پایه‌ای تحلیل پوششی داده‌ها تحت عنوان مدل  $CCR^1$  توسط چارنز<sup>۲</sup> و همکاران (۱۹۷۸) به‌عنوان نقطه ظهور این تکنیک شناخته می‌شود [۱]. در مدل  $DEA^3$  وزن‌های تخصیصی به هر یک از ورودی‌ها و خروجی‌ها از طریق حل یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی به‌دست می‌آید [۲] و این اوزان طوری تعیین می‌شوند که کارآیی واحد تحت بررسی حداکثر گردد [۳، ۴]. در سال ۱۹۸۴، بنکر، چارنز و کوپر<sup>۴</sup> با تغییر در مدل پایه‌ای، مدل جدیدی را

عرضه کردند که به اختصار از نام پدیدآورندگان به مدل BCC معروف شد. تفاوت این دو مدل در نوع بازده به مقیاس آن‌هاست. مدل CCR دارای بازده به مقیاس ثابت و مدل BCC دارای بازده به مقیاس متغیر است [۵، ۶].

تحلیل پوششی داده‌ای شبکه‌ای با رویکرد نگرش در داخل ساختار شبکه‌ای و اندازه‌گیری کارایی زیرفرآیندها به وجود آمد [۷] و همچنان مدل‌های ارائه شده در این حوزه در حال گسترش و بهبود است [۸]. برای دسته‌بندی تکنیک‌های ارائه شده در رابطه با تحلیل پوششی داده‌ای شبکه‌ای و شناسایی سیر تحولی آن و نیز بررسی نقاط قوت و ضعف هر یک از مدل‌ها می‌توان آن‌ها را به چندین روش دسته‌بندی نمود. یک روش برای دسته‌بندی مدل‌های ارائه شده در تحلیل پوششی داده‌ای شبکه‌ای، تقسیم‌بندی براساس خطی و یا غیرخطی بودن تکنیک بهینه‌سازی برای سنجش کارایی است. از آنجا که تابع کارایی که برابر با نسبت موزون خروجی‌ها به ورودی‌هاست، تابعی کسری و غیرخطی است و نیز مسئله سنجش کارایی یک ساختار شبکه‌ای مسئله‌ای چند هدفه است، دو رویکرد برای بهینه‌سازی وجود دارد. رویکرد اول استفاده از روش‌های ریاضی برای تبدیل توابع هدف غیرخطی به فرم خطی است و رویکرد دوم، بهینه‌سازی را با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی غیرخطی انجام خواهد کرد. مهدیلو و همکاران مقایسه‌ای میان مدل‌های خطی و غیرخطی که برای سنجش کارایی یک ساختار شبکه‌ای دو مرحله‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد، انجام دادند و نشان دادند که مدل‌های خطی‌ای که در تحلیل پوششی داده‌ای شبکه‌ای به کار می‌روند، از لحاظ محاسباتی، بسیار کارآتر از مدل‌های غیرخطی هستند [۹]. همچنین در این مطالعه ذکر شده است که مدل خطی به جواب بهینه کلی<sup>۵</sup> دست پیدا می‌کند و در جواب بهینه محلی<sup>۶</sup> محدود نمی‌شود، در حالی که در مدل‌های غیرخطی ممکن است جواب بهینه محلی حاصل گردد [۱۰]. همچنین این پژوهش بیان می‌دارد که یک واحد تصمیم‌گیری تنها در صورتی با مدل غیرخطی کارآ خواهد بود که با مدل خطی نیز به طور کلی کارآ گردد؛ در غیر این صورت نمی‌توان تنها با استفاده از نتایج مدل غیرخطی به طور حتم در مورد کارآ بودن یک واحد تصمیم‌گیری نتیجه‌گیری کرد [۹].

در یک تقسیم‌بندی دیگر که توسط سوتیروس<sup>۷</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۹ ارائه شده

است، این‌طور بیان می‌شود که به‌طور کلی دو رویکرد برای سنجش کارایی جزئی و کارایی کلی وجود دارد که تحت عنوان رویکرد "سنجش کارایی مستقل"<sup>۸</sup> و رویکرد جامع<sup>۹</sup> نامگذاری می‌شود [۱۱]. رویکرد کارایی مستقل ارتباط مابین زیرفرآیندها و کارایی کل را نادیده می‌گیرد که این امر می‌تواند کارایی کل یک واحد تصمیم‌گیرنده را مقدار واحد نتیجه دهد؛ در حالی که زیرفرآیندهای آن ناکارآ هستند. به عبارت دیگر، می‌توانیم واحدهای تصمیم‌گیرنده‌ای داشته باشیم که به‌طور کلی کارآ هستند، در حالی که زیرفرآیندهای ناکارآ دارند [۱۲]. بالعکس در رویکرد جامع، ارتباط بین زیرفرآیندها و شبکه کلی لحاظ می‌شود؛ همچنین سوتیروس<sup>۱۰</sup> و همکاران در همان سال بیان کردند که در رویکرد جامع دو پارادایم کلی وجود دارد که تحت عنوان پارادایم‌های "مشارکتی"<sup>۱۱</sup> و "غیرمشارکتی"<sup>۱۲</sup> نامگذاری شده است. تفاوت اصلی این دو پارادایم همان‌طور که از نام آن‌ها نیز برمی‌آید، در میزان مشارکتی است که در هر رویکرد نهادینه شده است. در رویکرد غیرمشارکتی یک زیرفرآیند به عنوان زیرفرآیند رهبر<sup>۱۳</sup> در نظر گرفته می‌شود و در الویت اول قرار گرفته و کارایی آن سنجیده می‌شود. سپس کارایی زیرفرآیند بعدی که به عنوان پیرو<sup>۱۴</sup> در نظر گرفته می‌شود، با این فرض که کارایی زیرفرآیند رهبر ثابت بماند، اندازه‌گیری می‌شود [۱۳]. در رویکرد مشارکتی، برعکس رویکرد غیرمشارکتی، کارایی کل و کارایی زیرفرآیندها به‌طور همزمان و با شناسایی ارتباطات میان آن‌ها بهینه می‌شود. به‌طور کلی در پارادایم مشارکتی، برای سنجش ارتباط مابین کارایی کل و کارایی زیرفرآیندها دو رویکرد وجود دارد: رویکرد ترکیب کارایی<sup>۱۵</sup> و رویکرد تجزیه کارایی<sup>۱۶</sup>. در رویکرد تجزیه کارایی، کارایی کلی سیستم ابتدا اندازه‌گیری می‌شود و سپس کارایی زیرفرآیندها اندازه‌گیری می‌شود. در حالی که رویکرد ترکیب کارایی، به‌طور معکوس عمل می‌کند؛ بدین صورت که ابتدا کارایی زیرفرآیندها اندازه‌گیری می‌شود و سپس کارایی کل در پی آن ارزیابی می‌شود. رویکرد تجزیه کارایی روش‌های بسیاری را در بر می‌گیرد که پرکاربردترین آن‌ها شامل رویکرد تجمیع<sup>۱۷</sup> [۱۴]، [۱۵]، [۱۶]، [۱۷] و رویکرد مضربی<sup>۱۸</sup> [۱۸]، [۱۹] می‌شود.

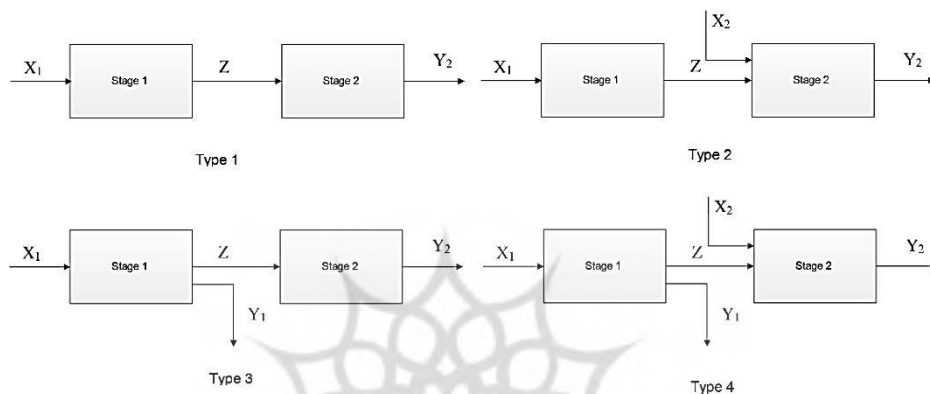
اگرچه تاکنون مدل‌های بسیاری برای سنجش کارایی شبکه‌ای با دارا بودن انواع و اقسام ساختارهای شبکه‌ای ارائه شده است، اما هر یک از این مدل‌های ارائه شده دارای معایبی

است که نتیجتاً لزوم استفاده از یک رویکرد جامع را برای سنجش کارآیی یک ساختار شبکه‌ای کلی دو چندان می‌کند. به بیان واضح‌تر، رویکردهای اولیه برای سنجش کارآیی شبکه‌ای دارای این نقص بوده‌اند که تنها برای زیرفرآیندهایی که تمامی خروجی زیرفرآیند اول، ورودی زیرفرآیند دوم است، قابلیت استفاده دارد. کوروناکس<sup>۱۹</sup> بیان می‌دارد که رویکردهای تجزیه کارآیی به روش تجمیع و تخریب، کارآیی زیرفرآیندهای غیریکتا دارند. به عبارت دیگر، این روش‌ها در سنجش کارآیی زیرفرآیندها به‌طور یکتا عاجز هستند [۲۰]. همچنین نشان داده می‌شود که روش تجمیع برای سنجش کارآیی یک شبکه، یک رویکرد جانبدارانه است و الویت بیشتری به زیرفرآیند دوم می‌دهد. از طرف دیگر، اصلی‌ترین محدودیت رویکرد تجزیه به روش مضربی آن است که به‌طور مستقیم نمی‌تواند برای حالت بازده به مقیاس متغیر به‌کار گرفته شود. این به این دلیل است که اضافه شدن متغیر اضافی آزاد در علامت، مدل ریاضی را به یک مدل غیرخطی تبدیل می‌کند. همچنین رویکرد ترکیب کارآیی اگرچه می‌تواند عیب‌های ذکر شده را پوشش دهد، اما برای سنجش کارآیی یک ساختار شبکه‌ای جامع ناتوان است و یا به مدل‌های غیرخطی ختم خواهد شد. [۲۱]

### ۳- مدل‌سازی

براساس جمع‌بندی ارائه شده در بخش مرور ادبیات، لزوم گسترش یک مدل جامع براساس رویکرد ترکیب کارآیی برای سنجش کارآیی یک شبکه دارای ورودی‌ها و خروجی‌های مازاد مشخص می‌شود؛ به‌طوری که رویکرد پیشنهادی باید قادر باشد مسئله را به‌طور خطی حل کرده و به مجموعه جواب پارتو دست یابد. به‌علاوه، مدل ارائه شده باید مسئله را به‌صورت غیرجانبدارانه حل کرده و نیز قابلیت آن را داشته باشد که در صورت نیاز، تصمیم‌گیرنده بتواند اهمیت بیشتر و یا کمتر به یک زیرفرآیند تخصیص دهد. لزوم تأکید بر نکته آخر از آن جهت است که در شرایطی که مدل ارائه شده برای سنجش کارآیی عملیاتی و زیست محیطی مورد استفاده قرار بگیرد و شرایط منطقه طوری ایجاب کند که لزوم تخصیص اهمیت بیشتر به زیرفرآیند زیست محیطی مطرح باشد، بتوان این شرایط را در مدل پیاده کرد. به‌طور کلی ساختار شبکه‌ای دو مرحله‌ای به چهار دسته کلی تقسیم می‌شود که

دسته‌بندی آن را می‌توان در شکل زیر مشاهده نمود [۲۲]. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نوع چهارم فرم کلی ساختار شبکه‌ای دو مرحله‌ای است که هم دارای خروجی‌های مازاد و هم ورودی‌های مازاد است.



شکل ۱: چهار نوع ساختار شبکه‌ای دو مرحله‌ای سری

این پژوهش تلاش دارد تا مدلی جامع برای سنجش کارایی یک ساختار شبکه‌ای دو مرحله‌ای کلی ارائه دهد، بنابراین اگر ساختار نوع ۴ در شکل ۱ را به‌عنوان شبکه دو مرحله‌ای کلی دارای ورودی‌ها و خروجی‌های مازاد فرض کنیم و نیز اندیس‌های ذیل را برای هریک از پارامترهای مدل فرض کنیم، خواهیم داشت:

$$i \in I = \{1, \dots, d\} : \text{اندیس نمایانگر واحد تصمیم‌گیرنده}$$

$$i \in I : \text{نشانگر واحد تصمیم‌گیرنده مورد ارزیابی}$$

$$DMU_i : \text{بردار نشانگر ورودی‌های خارجی زیرفرآیند اول} \quad X_{1i} = (x_{1ij}, j = 1, \dots, r_1)$$

$$DMU_i : \text{بردار نشانگر ورودی‌های خارجی زیرفرآیند دوم} \quad X_{2i} = (x_{2ij}, j = 1, \dots, r_2)$$

$$DMU_i : \text{بردار نشانگر متغیرهای میانی برای} \quad Z_i = (z_{il}, l = 1, \dots, t)$$

$$DMU_i : \text{بردار نشانگر خروجی‌های خارجی زیرفرآیند اول} \quad Y_{1i} = (y_{1ik}, k = 1, \dots, s_1)$$

DMU<sub>i</sub>

$$DMU_i : \text{بردار نشانگر خروجی‌های خارجی زیرفرآیند دوم} \quad Y_{2i} = (y_{2ik}, k = 1, \dots, s_2)$$

DMU<sub>i</sub>

$$v_{1i} = (u_{1ij}, j_1 = 1, \dots, r_1) \quad \text{DMU}_i$$

$$v_{2i} = (u_{2ij}, j_2 = 1, \dots, r_2) \quad \text{DMU}_i$$

$$\omega_i = (\omega_{il}, l = 1, \dots, t) \quad \text{DMU}_i$$

$$u_{1i} = (v_{1ik_1}, k_1 = 1, \dots, s_1) \quad \text{DMU}_i$$

$$u_{2i} = (v_{2ik_2}, k_2 = 1, \dots, s_2) \quad \text{DMU}_i$$

$e_{1i}$ : کارایی جزئی زیرفرآیند اول واحد تصمیم‌گیرنده  $i$  ام

$e_{2i}$ : کارایی جزئی زیرفرآیند دوم واحد تصمیم‌گیرنده  $i$  ام

$E_i$ : کارایی کل واحد تصمیم‌گیرنده  $i$  ام

از آنجا که در تکنیک تحلیل پوششی داده‌ای استاندارد، کارایی به صورت نسبت موزون خروجی‌ها به ورودی‌ها تعریف می‌گردد. برای یک ساختار دو مرحله‌ای مطابق شکل ۲، چنانچه فرض شود که تعداد  $d$  واحد تصمیم‌گیرنده وجود دارد ( $i = 1, \dots, d$ )، در این صورت کارایی جزئی زیرفرآیندها به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$e_{1i} = \max \frac{\sum_{l=1}^{t} \omega_{il} z_{il} + \sum_{k_1=1}^{s_1} u_{1ik_1} y_{1ik_1} - m_i}{\sum_{j_1=1}^{r_1} v_{1ij_1} x_{1ij_1} + \sum_{k_2=1}^{s_2} u_{2ik_2} y_{2ik_2}} \quad (1)$$

$$e_{2i} = \max \frac{\sum_{j_2=1}^{r_2} v_{2ij_2} x_{2ij_2} + \sum_{l=1}^{t} \omega_{il} z_{il} + n_i}{\sum_{j_1=1}^{r_1} v_{1ij_1} x_{1ij_1} + \sum_{k_2=1}^{s_2} u_{2ik_2} y_{2ik_2}}$$

در این پژوهش، مدل‌سازی برای حالت کلی بازده به مقیاس متغیر<sup>۲۰</sup> صورت می‌گیرد. در مدل بالا متغیرهای  $m$  و  $n$  آزاد در علامت هستند و چنانچه این پارامترها از مدل حذف شوند، مدل به حالت بازده به مقیاس ثابت یا همان مدل CCR تبدیل می‌شود.

در رویکرد ترکیب<sup>۲۱</sup> ابتدا کارایی زیرفرآیندها بهینه می‌شود و سپس کارایی کل اندازه‌گیری می‌شود، بنابراین هدف بهینه کردن هر دو تابع هدف مدل بالا به طور همزمان است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود هر دو تابع هدف در مدل بالا کسری و غیرخطی هستند،

بنابراین برای یافتن جواب بهینه مدل بالا باید از جستجوی غیرخطی استفاده نمود. اما بهینه‌سازی خطی دارای مزایای بسیاری است که شامل سهولت استفاده و دستیابی به مجموعه جواب پارتو با کارآیی بالاتر می‌شود. همچنین مهدیلو و همکاران در سال ۲۰۱۸ بیان کردند که مدل‌های خطی پیچیدگی‌های محاسباتی و نیز خطاهای اندازه‌گیری مدل‌های غیرخطی را ندارد، علاوه بر اینکه همان‌طور که اشاره شد، مدل‌های خطی برعکس مدل‌های غیرخطی که ممکن است به جواب‌های بهینه محلی برسند، به جواب بهینه سراسری دست خواهند یافت [۹]. براساس مزیت‌های اشاره شده برای بهینه‌سازی خطی، در این پژوهش تلاش بر استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی خطی برای حل مدل بالاست. برای این منظور از تغییر متغیر چارنز و کوپر<sup>۲۲</sup> برای تبدیل تابع هدف کسری به خطی استفاده می‌شود و قیدهای زیر به مسئله اضافه می‌گردد [۲۳].

$$\sum_{j_1=1}^{j_1=r_1} v_{1j_1} x_{1j_1} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{k_2=1}^{k_2=s_2} u_{2k_2} y_{2k_2} = 1$$

با اضافه کردن دو قید بالا به مدل اولیه، مدل کسری به صورت زیر تبدیل خواهد شد:

$$e_{1i} = \max \left( \sum_{l=1}^{l=t} \omega_{il} z_{il} + \sum_{k_1=1}^{k_1=s_1} u_{1k_1} y_{1k_1} - m_i \right) \quad (3)$$

$$e_{2i} = \min \left( \sum_{j_2=1}^{j_2=r_2} v_{2j_2} x_{2j_2} + \sum_{l=1}^{l=t} \omega_{il} z_{il} + n_i \right)$$

همان‌طور که در مدل‌های قبلی موجود در ادبیات متعارف است، وزن‌های تخصیصی به متغیرهای میانی ثابت است و این وزن‌ها در شرایطی که متغیر میانی به عنوان خروجی یک زیرفرآیند و یا ورودی یک زیرفرآیند دیگر باشد، مقدار ثابتی خواهد داشت و بدون تغییر باقی می‌ماند. بنابراین همان‌طور که در مدل بالا مشاهده می‌شود، مدل دو هدفه غیرخطی اولیه به یک مدل دو هدفه خطی تبدیل شده است به طوری که عبارت  $\sum_{l=1}^{l=t} \omega_{il} z_{il}$  در یکی از



توابع هدف باید ماکزیمم شود و در دیگری باید مینیمم شود.

همان‌گونه که دیسپاتیس<sup>۳۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۶ بیان کردند، اصلی‌ترین ضعف رویکرد تخریب که توسط کائو و هوآنگ<sup>۳۴</sup> در سال ۲۰۰۸ ارائه شد و کارایی کل را به صورت حاصل ضرب کارایی زیرفرآیندها در نظر می‌گرفت [۲۴]، آن است که تجزیه کارایی کل به کارایی زیرفرآیندها منحصر به فرد نیست [۲۵]. بدین صورت که ممکن است واحد تصمیم‌گیرنده‌ای با کارایی کل ثابت، دارای دو مقدار عددی برای کارایی زیرفرآیندها باشد. دلیل اصلی وقوع این مسئله نیز به خاطر عدم وجود عبارت  $WZ_j$  هم در تابع هدف و هم در قیدهای نرمال‌سازی شده است. بنابراین با داشتن کارایی کل ثابت، کارایی زیرفرآیندها می‌تواند متغیر باشد؛ برای جلوگیری از رخداد این امر، این مطالعه سعی دارد تا هر دو تابع هدف در مدل ۳ را به طور همزمان بهینه سازد تا بتواند از مزیت منحصر بودن مجموعه جواب در تحلیل کارایی بهره ببرد. بهترین پیشنهاد برای دستیابی به این امر استفاده از روشی است که میزان فاصله از مقدار بهینه هر تابع هدف را مینیمم کند. در این راستا این پژوهش پیشنهاد می‌دهد تا ابتدا در فاز اول، هر تابع هدف به صورت مستقل بهینه شود تا میزان ایده‌آل یا بهینه پاسخ اندازه‌گیری شود؛ سپس، در فاز دوم، دو تابع هدف به طور همزمان بهینه شود، به طوری که میزان فاصله از مقدار بهینه اندازه‌گیری شده برای هر تابع هدف در فاز اول کمینه شود.

فاز اول: در فاز اول، برای اندازه‌گیری مقدار بهینه برای هر تابع هدف، لازم است تا هر زیرفرآیند به طور مستقل در نظر گرفته شود، بنابراین ابتدا در فاز اول دو مدل خطی مجزای زیر بهینه می‌شوند:

$$e_{1i}^{max} = \max \left( \sum_{l=1}^{l=t} \omega_{il} z_{il} + \sum_{k_1=1}^{k_1=s_1} u_{1ik_1} y_{1ik_1} - m_i \right)$$

$$S.T: \sum_{j_1=1}^{j_1=r_1} v_{1ij_1} x_{1ij_1} = 1 \quad (4)$$

$$\sum_{l=1}^{l=t} \omega_{il} z_{il} + \sum_{k_1=1}^{k_1=s_1} u_{1ik_1} y_{1ik_1} - \sum_{j_1=1}^{j_1=r_1} v_{1ij_1} x_{1ij_1} \leq 0$$



for  $i = 1, \dots, d$

$$\omega_{il}, u_{ik}, v_{ij} \geq \varepsilon$$

$m_i$  unrestricted in sign

$$e_i^{min} = \min \left( \sum_{j=1}^{j=r} v_{ij} x_{ij} + \sum_{l=1}^{l=t} \omega_{il} z_{il} + n_i \right)$$

$$S.T: \sum_{k=1}^{k=s} u_{ik} y_{ik} = 1$$

$$\sum_{k=1}^{k=s} u_{ik} y_{ik} - \sum_{j=1}^{j=r} v_{ij} x_{ij} - \sum_{l=1}^{l=t} \omega_{il} z_{il} \leq 0 \quad (5)$$

for  $i = 1, \dots, d$

$$v_{ij}, \omega_{il}, u_{ik} \geq \varepsilon$$

$n_i$  unrestricted in sign

در مدل‌های بالا  $\varepsilon$  یک مقدار کوچک است و برای برآوردن اطمینان از این شرط که تأثیر تمامی پارامترهای ورودی، میانی و خروجی در نظر گرفته می‌شود و هیچ یک ضریب صفر نخواهند داشت، در مدل اضافه شده است. مدل (۴) مقدار بهینه کارآیی زیرفرآیند اول را اندازه‌گیری می‌کند و مدل (۵) مقدار بهینه کارآیی زیرفرآیند دوم. همان‌طور که در بالا مشاهده می‌شود، توابع هدف دو مدل با هم در تضاد هستند. به‌عنوان مثال، مجموع موزون متغیرهای میانی در مدل (۴) باید ماکزیمم شود، در حالی که همین مقدار در مدل (۵) باید مینیمم شود. در چنین شرایطی که توابع هدف با یکدیگر در تضاد هستند، بهینه‌سازی تنها با در نظر گرفتن یک تابع هدف باعث انحراف تابع هدف دیگر از مقدار بهینه خود می‌شود؛ بنابراین هیچ جواب بهینه تنهایی نمی‌تواند بهینه بودن همزمان هر دو تابع هدف را نتیجه دهد [۲۶]. در این حالت، باید روشی مورد استفاده قرار بگیرد تا باعث ایجاد توافق میان توابع هدف شود و هر دو را به‌طور همزمان بهینه کند [۲۷]. روش پیشنهادی این مطالعه، روش معیار جامع است که در پی مینیمم‌سازی مجموع انحراف توابع هدف از مقدار بهینه خود است. همچنین با ترکیب این رویکرد با روش وزن‌دهی می‌توان تمایلات تصمیم‌گیرندگان را نیز در فرآیند بهینه‌سازی لحاظ نمود.

تا بدینجا، توابع هدف به‌طور جداگانه بهینه شده‌اند، اما از آنجا که این توابع به یکدیگر وابسته هستند، این مقدار بهینه مجزا کارآیی ندارد و باید روشی بکار گرفته شود که هر دو تابع هدف را به‌طور همزمان بهینه کند. برای رسیدن به این هدف روش معیار جامع وزنی<sup>۲۰</sup> به دلیل سهولت بکارگیری و کارآیی آن در دستیابی به مجموعه جواب پارتو بکار گرفته می‌شود [۲۷]. اگر بهترین جواب برای کارآیی زیرفرآیند اول و دوم را به ترتیب با  $e_1^{max}$  و  $e_2^{min}$  نشان دهیم، مسئله بهینه‌سازی دو هدفه بالا به صورت زیر به یک مسئله تک هدفه تبدیل می‌شود:

$$f_1 = \frac{e_1^{max} - e_1}{e_1^{max}} \quad (6)$$

$$f_2 = \frac{e_2 - e_2^{min}}{e_2^{min}}$$

$$\min(\alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2) \quad (7)$$

در معادله بالا  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  توسط تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود و می‌تواند هر مقداری مابین صفر تا یک را اتخاذ کند با این شرط که مجموع مقادیر هر دو برابر با یک شود. ضرایب  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  برای نشان دادن میزان اهمیت تخصیص داده شده به هر زیرفرآیند استفاده می‌شود و هنگامی که  $\alpha_1$  بزرگتر از  $\alpha_2$  باشد، اهمیت بیشتری به زیرفرآیند اول داده می‌شود و بالعکس. بنابراین تابع هدف با مقدار بسیار اندک اهمیت، مقدار زیادی اختلاف از مقدار بهینه خود خواهد داشت و همچنین تأثیر اندکی بر جواب بهینه کلی برای مسئله برنامه‌ریزی دو هدفه خواهد داشت. استفاده از این ضرایب آزادی عمل بیشتری به تصمیم‌گیرنده می‌دهد تا بتواند اولویت‌ها و نقطه نظرات خود را در ارزیابی کارآیی وارد نمایند.

رویکرد پیشنهاد شده در این پژوهش براساس رویکرد ترکیب کارآیی است، بنابراین ابتدا ضرایب بهینه برای اوزان مربوط به متغیرهای ورودی، میانی و خروجی تعیین می‌شود و سپس بر اساس این اوزان بهینه اندازه‌گیری شده، کارآیی کلی ارزیابی می‌شود. برای سنجش کارآیی کل یک واحد تصمیم‌گیرنده طبق شکل ۲ می‌توان از فرمول زیر استفاده نمود.

$$E_i = \frac{\sum_{k_1=1}^{k_1=S_1} u^*_{ik_1} y_{ik_1} + \sum_{k_2=1}^{k_2=S_2} u^*_{ik_2} y_{ik_2} + \sum_{l=1}^{l=t} \omega^*_{il} Z_{il}}{\sum_{j_1=1}^{j_1=r_1} v^*_{ij_1} x_{ij_1} + \sum_{j_2=1}^{j_2=r_2} v^*_{ij_2} x_{ij_2} + \sum_{l=1}^{l=t} \omega^*_{il} Z_{il}} \quad (8)$$

معادله بالا ازین حقیقت حاصل می‌شود که کارآیی کلی یک سیستم برابر با نسبت مجموع موزون خروجی‌هایی که سیستم را ترک می‌کنند به ورودی‌هایی است که وارد سیستم می‌شوند. در مدل (۸) اوزان  $(u^*_1, u^*_2, \omega^*, v^*_1, v^*_2)$  و وزن‌های بهینه‌ای هستند که با استفاده از حل مسئله بهینه‌سازی چند هدفه بدست آمده‌اند.

توجه به این نکته الزامی است که در مدل ارائه شده در این تحقیق، هیچگونه اولویتی به هیچ یک از زیرفرآیندها داده نمی‌شود و این مدل دارای این مزیت است که همه زیرفرآیندها را با اولویت یکسان در نظر می‌گیرد و بنابراین نسبت به هیچ‌کدام از زیرفرآیندهای اول و یا دوم جانبداری ندارد، در صورتی که در بسیاری از مدل‌های موجود در ادبیات از جمله رویکرد تجمیع، رفتار جانبدارانه مشاهده می‌شود.

#### ۴- اعتبارسنجی رویکرد پیشنهادی

برای سنجش اعتبار و درستی مدل ارائه شده از داده‌های موجود در ادبیات استفاده می‌شود و نتایج به‌دست آمده از مدل پیشنهادی با نتایج به‌دست آمده از ادبیات مقایسه می‌شود تا بتوان نقاط قوت و ضعف مدل پیشنهادی را شناسایی نمود. از آنجا که مدل پیشنهادی این پژوهش قابلیت وزن‌دهی به زیرفرآیندها را دارد، از داده‌های موجود در مقاله دیسپاتیس و کروناکس<sup>۲۶</sup> [۲۲] استفاده می‌شود که برای اجتناب از طولانی شدن متن در اینجا تکرار نمی‌شود. بعد از مدل‌سازی به وسیله روش پیشنهادی در نرم‌افزار گمز و ورود داده‌ها و اجرای مدل، نتایج به‌صورت جدول زیر به‌دست می‌آید. در جدول زیر نتایج مدل پیشنهادی (ستون چهارم تا ششم) به انضمام نتایج حاصل از روش پیشنهادی توسط دیسپاتیس و همکاران [۲۲] (ستون هفتم تا نهم) و نیز روش پیشنهادی توسط کائو<sup>۲۷</sup> [۲۸] (ستون دهم تا سیزدهم) مشاهده می‌شود:

جدول ۱: نتایج حاصل از مدل پیشنهادی در مقایسه با [۲۲] و [۲۸]

DMU	کارآیی مستقل		نتایج حاصل از مدل پیشنهادی			نتایج حاصل از Despotic, ۲۰۱۶b			نتایج حاصل از Kao, ۲۰۱۴a		
	$e_1^1$	$e_1^2$	$e_1$	$e_2$	$E_{total}$	$e_D^1$	$e_D^2$	$E_D$	$e_K^1$	$e_K^2$	$E_K$
۱	۰٫۷۳۴	۰٫۷۳۳	۰٫۴۶۷	۰٫۷۲۰	۰٫۶۱۴	۰٫۶۷۵	۰٫۶۷۴	۰٫۷۳۳	۰٫۶۸۸	۰٫۶۱۶	۰٫۶۲۵
۲	۱٫۰۰۰	۰٫۴۷۵	۰٫۹۶۳	۰٫۴۶۹	۰٫۶۲۷	۰٫۹۷۹	۰٫۴۶۵	۰٫۴۷۳	۰٫۹۵۷	۰٫۴۷۵	۰٫۴۸۰
۳	۰٫۷۶۱	۱٫۰۰۰	۰٫۷۰۲	۱٫۰۰۰	۰٫۸۵۱	۰٫۷۳۱	۰٫۹۶۱	۰٫۷۹۹	۰٫۶۳۸	۰٫۸۴۷	۰٫۸۴۷
۴	۰٫۸۹۴	۰٫۴۲۷	۰٫۸۲۵	۰٫۳۵۸	۰٫۴۸۱	۰٫۷۷۹	۰٫۳۷۲	۰٫۳۷۲	۰٫۳۸۶	۰٫۳۹۷	۰٫۳۸۶
۵	۰٫۶۹۱	۱٫۰۰۰	۰٫۳۸۷	۰٫۸۸۷	۰٫۶۵۲	۰٫۵۷۲	۰٫۸۲۷	۰٫۶۳۱	۰٫۳۸۷	۱٫۰۰۰	۰٫۵۷۷
۶	۱٫۰۰۰	۰٫۶۷۱	۰٫۸۶۱	۰٫۶۰۰	۰٫۶۹۸	۱٫۰۰۰	۰٫۶۷۱	۰٫۹۵۱	۱٫۰۰۰	۰٫۵۶۴	۱٫۰۰۰
۷	۰٫۸۸۱	۰٫۶۳۲	۰٫۸۰۲	۰٫۶۳۱	۰٫۶۹۷	۰٫۸۴۷	۰٫۶۰۷	۰٫۶۱۲	۰٫۸۰۲	۰٫۶۳۲	۰٫۵۸۱
۸	۰٫۵۵۰	۰٫۹۸۰	۰٫۵۴۲	۰٫۸۶۳	۰٫۷۱۴	۰٫۵۰۱	۰٫۸۹۳	۰٫۵۷۸	۰٫۵۴۲	۰٫۸۵۲	۰٫۶۶۴
۹	۰٫۸۶۶	۰٫۷۵۶	۰٫۸۲۶	۰٫۶۳۶	۰٫۷۱۰	۰٫۸۲۷	۰٫۷۳۲	۰٫۷۲۵	۰٫۷۲۲	۰٫۷۵۰	۰٫۶۴۴
۱۰	۱٫۰۰۰	۰٫۶۳۲	۱٫۰۰۰	۰٫۶۱۵	۰٫۶۶۲	۱٫۰۰۰	۰٫۶۳۲	۰٫۹۰۹	۱٫۰۰۰	۰٫۴۸۲	۱٫۰۰۰
۱۱	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰
۱۲	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰
۱۳	۱٫۰۰۰	۰٫۸۶۹	۱٫۰۰۰	۰٫۸۱۷	۰٫۸۹۹	۰٫۹۶۸	۰٫۸۴۱	۰٫۸۴۱	۱٫۰۰۰	۰٫۸۱۸	۰٫۸۴۳
۱۴	۰٫۶۶۹	۰٫۹۳۴	۰٫۶۳۴	۰٫۹۱۷	۰٫۷۸۱	۰٫۶۶۹	۰٫۹۳۴	۰٫۶۶۹	۰٫۶۱۴	۰٫۷۹۳	۰٫۷۹۲
۱۵	۰٫۴۲۲	۱٫۰۰۰	۰٫۴۱۱	۱٫۰۰۰	۰٫۷۰۶	۰٫۴۱۳	۰٫۹۸۰	۰٫۶۲۸	۰٫۳۶۲	۰٫۸۶۱	۰٫۷۳۰
۱۶	۰٫۹۸۱	۰٫۷۶۶	۰٫۴۲۷	۰٫۴۹۸	۰٫۴۷۵	۰٫۷۵۳	۰٫۵۸۷	۰٫۶۳۲	۰٫۶۰۳	۰٫۴۹۳	۰٫۶۰۳
۱۷	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۰٫۸۶۳	۱٫۰۰۰	۰٫۹۳۲	۰٫۹۳۴	۰٫۹۳۴	۰٫۹۳۸	۰٫۹۴۰	۰٫۹۳۰	۰٫۸۹۱
۱۸	۱٫۰۰۰	۰٫۵۱۹	۱٫۰۰۰	۰٫۵۱۹	۰٫۶۸۳	۱٫۰۰۰	۰٫۵۱۹	۰٫۵۵۴	۱٫۰۰۰	۰٫۳۲۸	۱٫۰۰۰
۱۹	۱٫۰۰۰	۰٫۵۱۰	۱٫۰۰۰	۰٫۴۹۰	۰٫۶۵۷	۰٫۹۷۶	۰٫۴۹۷	۰٫۴۹۷	۰٫۸۷۹	۰٫۵۱۰	۰٫۵۰۳
۲۰	۰٫۷۶۸	۱٫۰۰۰	۰٫۶۴۱	۱٫۰۰۰	۰٫۸۲۱	۰٫۷۱۱	۰٫۹۲۶	۰٫۷۵۵	۰٫۶۶۸	۱٫۰۰۰	۰٫۷۳۷
۲۱	۱٫۰۰۰	۰٫۷۸۷	۱٫۰۰۰	۰٫۶۹۹	۰٫۸۲۳	۰٫۹۹۷	۰٫۷۸۵	۰٫۷۸۵	۱٫۰۰۰	۰٫۷۸۴	۰٫۷۸۴
۲۲	۰٫۹۵۹	۱٫۰۰۰	۰٫۴۶۶	۰٫۸۸۷	۰٫۶۸۹	۰٫۸۰۳	۰٫۸۳۷	۰٫۸۲۶	۰٫۶۳۵	۰٫۹۵۲	۰٫۷۰۶
۲۳	۰٫۸۲۶	۰٫۷۲۶	۰٫۸۲۵	۰٫۷۱۴	۰٫۶۷۰	۰٫۸۱۷	۰٫۷۱۹	۰٫۷۳۷	۰٫۸۰۹	۰٫۷۱۹	۰٫۶۸۹
۲۴	۱٫۰۰۰	۰٫۹۰۴	۱٫۰۰۰	۰٫۸۵۵	۰٫۹۲۲	۰٫۹۶۰	۰٫۸۶۷	۰٫۹۵۷	۰٫۹۳۳	۰٫۸۴۵	۰٫۹۳۳
۲۵	۰٫۶۶۱	۱٫۰۰۰	۰٫۶۵۰	۱٫۰۰۰	۰٫۸۲۵	۰٫۶۶۱	۱٫۰۰۰	۰٫۷۶۶	۰٫۵۶۴	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰
۲۶	۰٫۹۴۵	۰٫۲۴۳	۰٫۶۸۷	۰٫۱۷۲	۰٫۲۴۷	۰٫۹۱۹	۰٫۲۳۶	۰٫۲۶۹	۰٫۵۵۵	۰٫۲۱۵	۰٫۵۵۵
۲۷	۱٫۰۰۰	۰٫۳۷۹	۱٫۰۰۰	۰٫۳۶۹	۰٫۵۴۰	۱٫۰۰۰	۰٫۳۷۹	۰٫۷۹۰	۱٫۰۰۰	۰٫۲۸۱	۱٫۰۰۰
۲۸	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۰٫۹۲۹	۰٫۸۲۵	۰٫۸۷۲	۰٫۹۰۳	۰٫۹۰۳	۰٫۹۱۴	۰٫۷۳۹	۰٫۹۷۱	۰٫۸۸۲



DMU	کارآیی مستقل		نتایج حاصل از مدل پیشنهادی			نتایج حاصل از Despotic, ۲۰۱۶b			نتایج حاصل از Kao, ۲۰۱۴a		
	$e_1^1$	$e_1^2$	$e_1$	$e_2$	$E_{total}$	$e_D^1$	$e_D^2$	$E_D$	$e_K^1$	$e_K^2$	$E_K$
۲۹	۱,۰۰۰	۰,۳۷۶	۱,۰۰۰	۰,۳۰۲	۰,۴۶۴	۱,۰۰۰	۰,۳۷۶	۰,۹۸۱	۱,۰۰۰	۰,۳۴۷	۱,۰۰۰
۳۰	۰,۶۲۵	۰,۶۸۱	۰,۴۶۰	۰,۴۰۶	۰,۴۲۱	۰,۵۵۴	۰,۶۰۵	۰,۶۰۲	۰,۴۷۵	۰,۶۷۳	۰,۴۴۸

معیار بهینگی در مدل دیسپاتیس و همکاران، ماکزیمم کردن کمترین مقدار کارآیی برای زیرفرآیندها است. به عبارت دیگر، در متدولوژی دیسپاتیس و همکاران تلاش بر آن است که کوچکترین مقدار کارآیی زیرفرآیندها ماکزیمم شود در حالی که در مدل کائو و همکاران، معیار بهینگی ماکزیمم کردن کارآیی کل است. در مدل پیشنهادی در این مقاله که تحت عنوان معیار جامع نامگذاری شده است، معیار بهینگی کمینه کردن انحراف از کارآیی مستقل برای زیرفرآیندهاست. از آنجا که تکنیک معیار جامع و تکنیک ارائه شده توسط دیسپاتیس<sup>۲۸</sup> در سال ۲۰۱۶ هر دو کارآیی یک ساختار شبکه‌ای را با استفاده از رویکرد ترکیب کارآیی<sup>۲۹</sup> اندازه‌گیری می‌کنند و ابتدا کارآیی زیرفرآیندها را بهینه می‌کنند، این دو مدل مشابهت ساختاری دارند که این مشابهت باعث یکسان بودن قیدهای مسئله و در نتیجه دستیابی به ناحیه موجه یکسان می‌شود. تفاوت میان مدل پیشنهادی این پژوهش و مدل دیسپاتیس آن است که مدل ارائه شده توسط پژوهشگر، خطی است و از مزیت‌های سادگی و دقت بالاتر بهره‌مند است.

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، مقدار کارآیی جزئی مستقل برای هر زیرفرآیند مقدار ایده‌آل کارآیی است و مدل برنامه‌ریزی چندهدفه ارائه شده در این مطالعه کارآیی را به روشی اندازه‌گیری می‌کند که میزان فاصله از این مقدار بهینه مینیمم گردد. با دقت و تمرکز در جدول شماره یک مشاهده می‌شود که نتایج ارزیابی شده برای کارآیی زیرفرآیندها همگی کوچکتر و یا مساوی مقدار ایده‌آل کارآیی جزئی تعیین شده است که این خود مهر تأییدی بر صحت مدل بهینه‌سازی چند هدفه پیشنهادی در این مطالعه است. به‌علاوه، مدل پیشنهادی توسط این پژوهش کارآیی کل را تنها در حالتی برابر واحد ارزیابی می‌کند که کارآیی همه زیرفرآیندها نیز مقدار واحد را دارا باشد، در حالی که طبق نتایج بالا مدل کائو می‌تواند واحدهای تصمیم‌گیری کارآ در شرایطی که زیرفرآیندهایش ناکارآ است، داشته باشد.

## ۵- مطالعه موردی

ساختار شبکه‌ای مدنظر در این پژوهش T یک ساختار شبکه‌ای متشکل از دو زیرفرآیند است که زیرفرآیند اول "زیرفرآیند زیست محیطی" نامیده می‌شود و این زیرفرآیند دارای سه ورودی شامل ضریب آلاینده‌گی هوا، ضریب آلاینده‌گی آب و ضریب آلاینده‌گی خاک می‌شود و این ورودی‌ها را برای تولید محصول به‌کار می‌گیرد که این محصولات تولیدی همزمان هم خروجی‌های زیرفرآیند اول هستند و هم ورودی‌های زیرفرآیند دوم و به همین دلیل به آن متغیر میانی گفته می‌شود. به‌علاوه، بودجه‌ای که هر صنعت در جهت حفظ محیط زیست صرف می‌کند، به‌عنوان خروجی مازاد زیرفرآیند اول در نظر گرفته می‌شود که سیستم را ترک می‌کند. زیرفرآیند دوم که به‌عنوان "زیرفرآیند عملیاتی" نام‌گذاری می‌شود، محصولات تولیدی را به‌عنوان ورودی دریافت می‌کند که این پارامتر همان متغیر میانی است؛ علاوه بر آن، زیرفرآیند دوم سه ورودی مازاد خارج از سیستم را داراست که هزینه‌های عملیاتی، هزینه‌های پرسنل و مالیات را شامل می‌شود که این سه ورودی به‌طور مستقل وارد زیرفرآیند دوم می‌شوند. این دو نوع ورودی باعث تولیدی خروجی‌های زیرفرآیند دوم می‌شود که پارامتری به‌عنوان درآمد را شامل می‌شود. هدف اصلی این مطالعه، رتبه‌بندی صنایع فعال در شهر تهران براساس هر دو فاکتور کارایی زیست محیطی و کارایی صنعتی است و روش مورد استفاده همان روش معیار جامع است که برای نخستین بار در این پژوهش معرفی شده است. داده‌های مورد استفاده در این مطالعه، در جدول زیر جمع‌آوری شده است.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی  
پرتال جامع علوم انسانی

جدول ۲: داده‌های واقعی

واحد تصمیم‌گیری	ورودی‌های مرحله اول			خروجی‌های مرحله اول	متغیر میانی	ورودی‌های مرحله دوم	خروجی‌های مرحله دوم		
	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$Y_1$	$Z$	$X_{21}$	$X_{22}$	$X_{23}$	$Y_2$
	ضریب آلاینده‌ی هوا	ضریب آلاینده‌ی آب	ضریب آلاینده‌ی خاک	هزینه‌های زیست‌محیطی	ارزش محصولات تولیدی	هزینه‌های عملیاتی	هزینه پرسنل	مالیات	درآمد
صنایع حسابداری	۲۰,۱۳	۹,۰۱	۳۳,۴۹	۲۱۲۵۰	۳۹۰۹۶۸	۹۶۶	۳۷۷۴	۸۵۲۳۶	۴۵۳۳۳۱
صنایع اتومبیل	۸,۴۴	۱۶,۳۱	۲۱,۰۸	۶۱۸۳۵	۲۱۱۴۴۹	۲۳۲	۳۸۲	۳۲۰۴۰	۲۲۱۳۸۸
صنعت چرم	۰,۸۷	۰,۵۶	۲۴,۱۲	۲۱۵۶	۱۱۴۹۴	۴۰۳۹	۱۳۵۳۳	۵۶۲۴۱	۱۷۱۰۵۷
صنایع فلزی	۳,۱۸	۲۴,۲	۳,۶۶	۴۲۰۸	۱۵۶۹۶	۱۲۸۰	۱۵۲	۷۵۰۰	۴۱۵۳۲
صنایع نفتی	۱,۸۲	۱۷,۷۹	۴۲,۱۳	۶۹۸۵	۴۰۶۹۱۹	۱۵۹۰	۸۷۰۷	۱۱۴۰۲	۴۳۵۶۹
تولید مبلمان	۰,۱۵	۱۶,۳۰	۸,۷۴	۱۹۸۹	۱۰۳۶۵	۱۰۳۲	۹۸۶	۰	۹۶۵۲۳
صنایع غذایی	۷,۴۵	۳۴,۲	۱۵,۹۸	۳۶۸۴	۴۵۷۷۹	۲۶۲۳	۸۸۵۱	۱۱۴۵۶	۲۱۴۰۹۲
موسسه آموزشی	۲,۲	۱۲,۲۴	۲۶,۵۴	۷۵۳۳۱	۲۶۷۲۵	۳۹۲	۲۴۴۹	۵۰۳۰	۱۴۸۰۲
صنایع شیمیایی	۳,۱۶	۱۹,۶۵	۱۲,۶۱	۱۰۵۴	۵۲۶۴	۳۱۷	۱۴۷۶	۴۲	۶۴۹۷
تولید کننده روغن	۶,۴۷	۲۳,۱۴	۸,۳۶	۷۴۸۹	۷۸۶۹۲	۴۴۲	۳۷۹	۲۵۰۰	۹۸۶۱
صنایع الکتریکی	۱۹,۴۱	۰,۵۲	۳۷,۱۴	۳۶۴۲	۳۷۱۱	۵۱۳	۶۱۱۳	۱۰۴۵	۶۷۳۱
صنعت دامداری	۴,۱۹	۶,۲۱	۶,۵۰	۶۹۳۷	۵۹۳۸	۲۱۱	۵۰۵۱	۱۸۹۱	۱۰۸۲۱
صنایع دارویی	۱,۰۸	۱۳,۴۱	۶,۹۴	۵۶۲	۱۹۳۵۵	۵۳۱۰	۲۶۷	۴۲۰۰	۲۶۸۴۵
تولید کود و آفت کش	۵,۶۴	۴۲,۱۳	۲۱,۱۳	۸۴۲۱	۴۹۴۸	۷۰۳۰	۴۵۲	۹۵۶	۲۳۱۹
صنایع هتلداری	۱,۸	۱۲,۴۱	۱۸,۴۶	۵۷۹۰	۲۰۳۲۱۴	۸۴۶	۱۰۰۱	۰	۱۷۶۵۸
صنایع نساجی	۵,۲۸	۶۹,۵۰	۱۰,۲۱	۵۴۲۱	۴۱۴۸۹	۵۶۳	۱۶۷۷	۹۸۱۷	۳۸۹۰۲
صنایع آرایشی	۹,۴	۲۸,۳۱	۷,۸۶	۳۶۵۱۲	۶۵۴۴۶	۳۱۰۰	۶۶۹۸	۱۵۴۰	۹۹۳۸۱
صنعت تولید کاغذ	۸,۱۴	۱۴,۳۱	۲,۹۱	۳۱۵۶	۲۵۶۱	۲۸۴۷	۶۲۳	۷۹	۱۲۴۷۵
صنایع سیمان	۰,۸۷	۱۲,۶	۸,۱۲	۴۱۲	۲۹۷۶	۱۸۹۱	۶۹۲	۱۰۵۲	۵۳۶۴
صنعت پلاستیک	۱,۳۲	۸,۴۱	۱۴,۳۲	۱۲۳۶	۲۵۰۱۴	۳۵۱	۱۲۵۷	۴۵۰۰	۳۱۵۶۸



نتایج حاصل از اجرای مدل در نرم‌افزار گمز و با استفاده از داده‌های واقعی مربوط به ۲۰ صنعت فعال در کلان‌شهر تهران در جدول زیر قابل مشاهده است. در این جدول ستون‌های دوم و سوم به ترتیب مقدار ایده آل کارآیی زیرفرآیندها را نشان می‌دهد که این نتایج با استفاده از رویکرد مستقل اندازه‌گیری شده است. ستون‌های ۴ و ۵ نتایج سنجش کارآیی توامان برای زیرفرآیندهای اول و دوم را با استفاده از مدل پیشنهادی نشان می‌دهد و ستون ۶ کارآیی کل را نشان می‌دهد و توجه به این نکته ضروری است که این نتایج در حالتی اندازه‌گیری شده است که فرض می‌شود زیرفرآیند زیست محیطی و زیرفرآیند صنعتی میزان اهمیت یکسان در سنجش کارآیی دارند. این در حالی است که گاهی در دنیای واقعی و بر اساس سیاست و مصلحت جامعه، نیاز است تا به یک زیرفرآیند اهمیت بیشتری تخصیص داده شود. در این شرایط ضرایب  $\alpha$  می‌تواند میزان اهمیت تخصیص داده شده به هر زیرفرآیند را نشان دهد. در جدول زیر، ستون‌های هفت تا نهم کارآیی را در شرایطی اندازه‌گیری می‌کند که اهمیت بیشتری به زیرفرآیند زیست محیطی تخصیص داده شده است، در حالی که در مقابل، ستون‌های دهم تا دوازدهم کارآیی را در شرایطی اندازه‌گیری می‌کند که ارجحیت بیشتری به زیرفرآیند عملیاتی داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضرایب  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  میزان اهمیت تخصیص داده شده به هر زیرفرآیند را نشان می‌دهد که این میزان اهمیت بر اساس نظر تصمیم‌گیرنده تخصیص داده می‌شود و قابل تغییر است.

جدول ۳: نتایج سنجش کارآیی برای داده‌های حقیقی

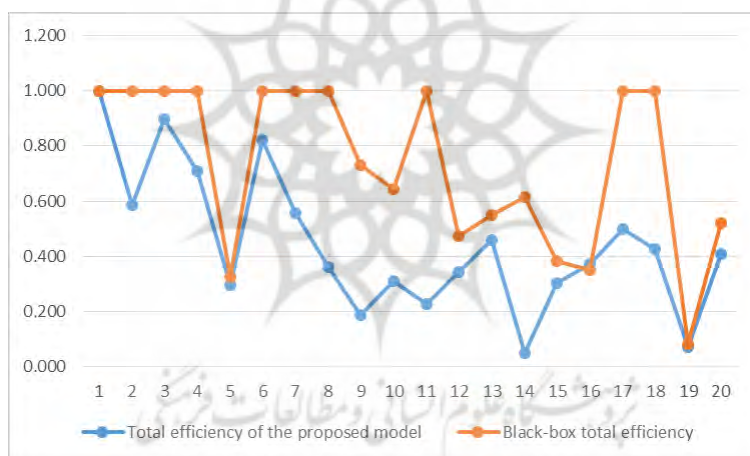
واحد تصمیم‌گیری	کارآیی مستقل مرحله اول	کارآیی مستقل مرحله دوم	$\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$			$\alpha_1 = 0.9$ $\alpha_2 = 0.1$			$\alpha_1 = 0.1$ $\alpha_2 = 0.9$		
			کارآیی مرحله اول	کارآیی مرحله دوم	کارآیی کل	کارآیی مرحله اول	کارآیی مرحله دوم	کارآیی کل	کارآیی مرحله اول	کارآیی مرحله دوم	کارآیی کل
۱	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰
۲	۰,۹۷۳	۰,۴۵۷	۰,۹۱۰	۰,۴۴۴	۰,۵۸۷	۰,۹۱۰	۰,۴۴۴	۰,۵۸۷	۰,۸۴۷	۰,۴۵۶	۰,۵۸۷
۳	۰,۹۰۲	۱,۰۰۰	۰,۸۰۸	۰,۹۸۹	۰,۸۹۹	۰,۹۰۲	۰,۶۹۰	۰,۷۷۷	۰,۷۹۴	۱,۰۰۰	۰,۸۹۷
۴	۰,۴۳۲	۱,۰۰۰	۰,۴۲۱	۱,۰۰۰	۰,۷۱۱	۰,۴۲۱	۱,۰۰۰	۰,۷۱۱	۰,۴۲۱	۱,۰۰۰	۰,۷۱۱



واحد تصمیم‌گیری	کارایی مستقل مرحله اول	کارایی مستقل مرحله دوم	$\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$			$\alpha_1 = 0.9$ $\alpha_2 = 0.1$			$\alpha_1 = 0.1$ $\alpha_2 = 0.9$		
			کارایی مرحله اول	کارایی مرحله دوم	کارایی کل	کارایی مرحله اول	کارایی مرحله دوم	کارایی کل	کارایی مرحله اول	کارایی مرحله دوم	کارایی کل
۵	۰,۲۸۲	۰,۲۲۱	۰,۲۸۰	۰,۱۷۴	۰,۲۹۷	۰,۲۸۰	۰,۱۷۴	۰,۲۹۷	۰,۱۱۲	۰,۱۹۸	۰,۱۸۴
۶	۰,۹۱۰	۱,۰۰۰	۰,۶۴۵	۱,۰۰۰	۰,۸۲۳	۰,۶۴۵	۱,۰۰۰	۰,۸۲۳	۰,۶۴۵	۱,۰۰۰	۰,۸۲۳
۷	۰,۲۵۸	۰,۸۱۱	۰,۲۵۴	۰,۸۰۱	۰,۵۵۸	۰,۲۵۴	۰,۸۰۱	۰,۵۵۸	۰,۲۲۶	۰,۸۱۱	۰,۵۴۹
۸	۱,۰۰۰	۰,۲۵۵	۱,۰۰۰	۰,۲۱۹	۰,۳۶۰	۱,۰۰۰	۰,۲۱۹	۰,۳۶۰	۱,۰۰۰	۰,۲۱۹	۰,۳۶۰
۹	۰,۰۵۲	۰,۲۱۸	۰,۰۴۴	۰,۲۱۷	۰,۱۸۶	۰,۰۴۴	۰,۲۱۷	۰,۱۸۶	۰,۰۲۷	۰,۲۱۷	۰,۱۸۳
۱۰	۰,۸۲۸	۰,۲۹۸	۰,۸۰۰	۰,۲۰۹	۰,۳۱۱	۰,۸۳۴	۰,۲۰۸	۰,۳۱۵	۰,۲۲۷	۰,۲۳۷	۰,۲۳۵
۱۱	۱,۰۰۰	۰,۱۸۸	۱,۰۰۰	۰,۱۲۸	۰,۲۲۶	۱,۰۰۰	۰,۱۲۸	۰,۲۲۶	۰,۱۶۴	۰,۱۲۹	۰,۱۳۳
۱۲	۰,۳۵۱	۰,۴۶۳	۰,۳۴۳	۰,۳۴۴	۰,۳۴۴	۰,۳۴۳	۰,۳۴۴	۰,۳۴۴	۰,۱۳۸	۰,۳۵۷	۰,۲۹۹
۱۳	۰,۲۵۲	۰,۶۵۴	۰,۲۵۴	۰,۵۷۷	۰,۴۵۹	۰,۲۵۴	۰,۵۷۷	۰,۴۵۹	۰,۲۵۲	۰,۵۷۷	۰,۴۵۸
۱۴	۰,۱۲۷	۰,۰۵۲	۰,۱۲۶	۰,۰۴۷	۰,۰۵۰	۰,۱۲۷	۰,۰۴۷	۰,۰۵۰	۰,۰۴۰	۰,۰۴۷	۰,۰۴۶
۱۵	۱,۰۰۰	۰,۲۲۳	۰,۹۳۷	۰,۱۸۶	۰,۳۰۴	۱,۰۰۰	۰,۱۸۴	۰,۳۱۱	۰,۰۱۱	۰,۲۲۳	۰,۱۸۴
۱۶	۰,۳۸۲	۰,۴۴۸	۰,۳۶۷	۰,۳۷۱	۰,۳۷۰	۰,۳۶۷	۰,۳۷۱	۰,۳۷۰	۰,۳۵۱	۰,۳۷۲	۰,۳۶۶
۱۷	۱,۰۰۰	۰,۳۳۵	۱,۰۰۰	۰,۳۳۲	۰,۴۹۸	۱,۰۰۰	۰,۳۳۲	۰,۴۹۸	۱,۰۰۰	۰,۳۳۲	۰,۴۹۸
۱۸	۰,۲۳۳	۰,۵۳۶	۰,۲۳۳	۰,۵۳۰	۰,۴۲۷	۰,۲۳۳	۰,۵۳۰	۰,۴۲۷	۰,۱۵۱	۰,۵۳۳	۰,۴۰۰
۱۹	۰,۱۴۵	۰,۱۸۶	۰,۰۴۳	۰,۰۷۳	۰,۰۷۱	۰,۰۴۶	۰,۰۷۳	۰,۰۷۱	۰,۰۳۶	۰,۰۷۳	۰,۰۷۱
۲۰	۰,۱۸۹	۰,۶۰۷	۰,۱۷۷	۰,۵۳۲	۰,۴۰۹	۰,۱۷۷	۰,۵۳۲	۰,۴۰۹	۰,۱۷۲	۰,۵۳۳	۰,۴۰۷

از نتایج جدول بالا مشاهده می‌شود که هنگامی که هر زیرفرآیند به‌طور مستقل در نظر گرفته می‌شود، تعداد واحدهای کارآ بیشتر از هنگامی است که دو تابع هدف به‌طور همزمان بهینه می‌شوند. به عبارت دیگر، مدل بهینه‌سازی چند هدفه ارائه شده به فرم معیار جامع، قدرت تمیز را بالا می‌برد. به‌طور جزئی‌تر، برای زیرفرآیند زیست محیطی، واحدهای شماره یک، هشت، یازده، پانزده و هفده در حالتی که این واحدها به‌طور مستقل در نظر گرفته می‌شوند، به‌عنوان واحدهای کارآ ارزیابی شده‌اند؛ در حالی که تعداد این واحدهای کارآ در

حالت بهینه‌سازی توامان به تعداد چهار واحد کاهش پیدا می‌کند. رخدادی مشابه برای زیرفرآیند صنعتی پیش می‌آید و تعداد واحدهای کارآ از تعداد چهار واحد در حالت مستقل به تعداد سه واحد در حالت بهینه‌سازی چند هدفه کاهش می‌یابد. برای مقایسه کارایی کل، کارایی کل در حالت جعبه سیاه<sup>۲</sup> که ساختار داخلی زیرفرآیندها را در نظر نمی‌گیرد با کارایی کل در ساختار شبکه‌ای مقایسه می‌شود و نتایج این مقایسه را می‌توان در شکل زیر مشاهده نمود. مشاهده می‌شود که در حالت جعبه سیاه تقریباً نیمی از واحدها کارآ ارزیابی شده‌اند. این نشان می‌دهد که اگر ساختار درونی شبکه در نظر گرفته نشود، نتایج نادرستی به دست خواهد آمد. همچنین مشاهده می‌شود که قدرت تمایز مدل چندهدفه بسیار بالاتر از مدل تحلیل پوششی داده‌ای در فرم جعبه سیاه و استاندارد است.



شکل ۲: مقایسه کارایی کل با رویکرد DEA سنتی و روش پیشنهادی

## ۶- نتیجه‌گیری عملی

با توجه به معضل آلودگی که طی دهه‌های اخیر کلان شهر تهران را درگیر خود کرده است و تلاش همه جانبه‌ای را برای مرتفع ساختن این معضل نیازمند است، رتبه‌بندی صنایع از بعد

زیست محیطی اهمیت پیدا کرده است. در این راستا، نتایج کارآیی در جدول شماره ۳ نشان می‌دهد که صنایع مرتبط با فعالیتهای حسابداری، صنایع الکتریکی، صنایع آرایشی و بهداشتی و صنایع آموزشی به‌عنوان صنایع سبز شناسایی می‌شوند. از طرف دیگر، نتایج نشان می‌دهد که صنایع فلزی، تولیدکنندگان میلمان منزل و حسابداری به‌عنوان صنایع کارآ از بعد تولید صنعتی و سودآوری شناسایی می‌شوند. در کل نیز صنایع مرتبط با حسابداری به‌عنوان صنعت کارآ کلی شناسایی شده است، در مقابل صنعت تولید کود و آفتکش‌ها به عنوان صنعت ناکارآ شناسایی شده‌اند.

## ۷- جمع‌بندی

تحلیل پوششی داده‌ای شبکه‌ای به عنوان مدلی برای ارتقاء مدل استاندارد تحلیل پوششی داده‌ها ارائه شده است که به کمک آن می‌توان به سیستم داخلی شبکه توجه نمود و کارآیی زیرفرآیندها را نیز در کنار کارآیی کل مورد ارزیابی قرار داد. با استفاده از این سیستم و در نظر گرفتن عملکرد سازمان‌ها در دو بعد صنعتی و زیست محیطی می‌توان از یک ساختار شبکه‌ای دو زیرفرآیندی برای سنجش همزمان این دو عملکرد بهره‌مند شد. به‌طوری که یک زیرفرآیند بر عملکرد صنعتی سازمان تمرکز نموده و زیرفرآیند دیگر بر عملکرد زیست محیطی. با این ساختار می‌توان سازمان‌های تولیدی را که در زمینه‌های مختلف مشغول به فعالیت هستند، به‌عنوان واحدهای تصمیم‌گیری در نظر گرفت و با بکارگیری تکنیک تحلیل پوششی داده‌ای شبکه‌ای، میزان عملکرد این سازمان‌ها در بعد صنعتی و بالخصوص زیست محیطی را با یکدیگر مقایسه نمود. تکنیک‌های ارائه شده برای تحلیل پوششی داده‌ای شبکه‌ای تلاش دارند تا کارآیی زیرفرآیندها و کارآیی کل را به‌طور همزمان برای واحدهای تصمیم‌گیری ارزیابی نمایند. اما از آنجا که سنجش همزمان این دو کارآیی باعث ایجاد یک مدل ریاضی چندهدفه می‌شود، نیاز به یک متدولوژی برای حل این مدل چندهدفه است. تکنیک ارائه شده توسط این پژوهش قادر است تا بر ضعف‌های موجود در مدل‌های پیشین فائق آید و کارآیی هر مرحله و نیز کارآیی کل را به‌طور غیرجانبدارانه و توسط حل یک مدل ریاضی خطی اندازه‌گیری کند.

برای تحقیقات آتی، می‌توان با در دست داشتن داده‌های مربوط به تعداد بیشتری از

صنایع، مقایسه‌ای جامع‌تر صورت داد، به طوری که نتایج، طیف وسیع‌تری از صنایع را در بر گیرد تا بر این اساس بتوان سیاست‌گذاری صحیحی در مورد نحوه فعالیت صنایع در کلان شهر تهران در پیش گرفت. در رابطه با تکنیک تحلیل پوششی داده‌ای شبکه‌ای می‌توان در پژوهش‌های آتی مدل را برای ساختارهای شبکه‌ای پیچیده‌تر گسترش داد. همچنین ایجاد تعامل بین فرم مضربی و فرم پوششی و گسترش مدل برای سنجش کارآیی در شرایط وجود داده‌های مجهول، داده‌های کیفی و داده‌های غیردقیق می‌تواند زمینه‌هایی برای تحقیقات پیش رو باشد.

#### ۸- پی‌نوشت‌ها

۱. Charnes, Cooper and Rhodes (CCR)
۲. Charnes
۳. Data Envelopment Analysis (DEA)
۴. Banker, Charnes and Cooper (BCC)
۵. Global optimum solution
۶. Local optimum solution
۷. Sotiros
۸. Independent efficiency assessment
۹. Holistic approach
۱۰. Sotiros
۱۱. Cooperative paradigm
۱۲. Non-cooperative paradigm
۱۳. Leader
۱۴. Follower
۱۵. Efficiency composition approach
۱۶. Efficiency decomposition approach
۱۷. Additive
۱۸. Multiplicative
۱۹. Koronakos
۲۰. Variable Return to Scale (VRS)
۲۱. Composition approach
۲۲. Charnes and Cooper transformation
۲۳. Despotis
۲۴. Kao and Hwang
۲۵. The weighted comprehensive criterion method (WCCM)
۲۶. Despotis and Koronakos
۲۷. Kao



- ۲۸. Despotis
- ۲۹. Efficiency composition
- ۳۰. Black-box

## ۹- منابع

- [۱] Charnes, A., W.W. Cooper, and E. Rhodes, *Measuring the efficiency of decision making units*. European journal of operational research, ۱۹۷۸. ۲(۶): p. ۴۴۴-۴۲۹
- [۲] Ahmadi, P., *Robust Fuzzy Performance based budgeting model an approach to managing the budget allocation risk-Case Study: Tarbiat Modares University*. Management Research in Iran, ۲۰۱۴. ۱۷(۴): p. ۹۵-۶۵
- [۳] Afsharian, M., H. Ahn, and S.G. Harms, *A Review of Approaches Applying a Common Set of Weights: The Perspective of Centralized Management*. European Journal of Operational Research, ۲۰۲۱.
- [۴] Azizi, H., *Efficiency assessment in data envelopment analysis using efficient and inefficient frontiers*. Management Research in Iran, ۲۰۱۲. ۱۶(۳): p. ۱۷۳-۱۵۳
- [۵] Banker, R.D., A. Charnes, and W.W. Cooper, *Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis*. Management science, ۱۹۸۴. ۳۰(۹): p. ۱۰۹۲-۱۰۷۸
- [۶] Fasihi, B., H. Azizi, and Z. Gholizadeh Gazvar, *Data envelopment analysis with missing data*. Modern Research in Decision Making, ۲۰۲۱. ۶(۱): p. ۲۲۹-۲۰۱
- [۷] Cook, W.D., L. Liang, and J. Zhu, *Measuring performance of two-stage network structures by DEA: A review and future perspective*. Omega, ۲۰۱۰. ۳۸(۶): p. ۴۳۰-۴۲۳
- [۸] Mousavi, S.R. and S.E. Najafi, *Evaluation of EFQM model Projects Using the Two-Stage Model of Data Envelopment Analysis-the Game Theory Approach (Case study: ۳۹ hospitals)*. Modern Research in Decision Making, ۲۰۱۹. ۴(۱): p. ۱۹۵-۱۶۷
- [۹] Mahdilo, M., et al., *Integrated data envelopment analysis: Linear vs. nonlinear*

- model*. European Journal of Operational Research, ۲۰۱۸, ۲۶۸(۱): p. ۲۶۷-۲۵۵
- [۱۰] Peykani, P., et al., *Data envelopment analysis and robust optimization: A review*. Expert Systems, ۲۰۲۰, ۳۷(۴): p. e.۱۲۵۳۴
- [۱۱] Sotiros, D., G. Koronakos, and D.K. Despotis, *Dominance at the divisional efficiencies level in network DEA: The case of two-stage processes*. Omega, ۲۰۱۹, ۸۵: p. ۱۵۵-۱۴۴
- [۱۲] Kao, C., *Network data envelopment analysis: A review*. European journal of operational research, ۲۰۱۴, ۲۳۹(۱): p. ۱۶-۱
- [۱۳] Liang, L., W.D. Cook, and J. Zhu, *DEA models for two-stage processes: Game approach and efficiency decomposition*. Naval Research Logistics (NRL), ۲۰۰۸, ۵۵(۷): p. ۶۵۳-۶۴۳
- [۱۴] Chen, Y., et al., *Additive efficiency decomposition in two-stage DEA*. European journal of operational research, ۲۰۰۹, ۱۹۶(۳): p. ۱۱۷۶-۱۱۷۰
- [۱۵] Guo, C., et al., *Decomposition weights and overall efficiency in two-stage additive network DEA*. European Journal of Operational Research, ۲۰۱۷, ۲۵۷(۳): p. ۹۰۶-۸۹۶
- [۱۶] Cook, W.D., et al., *Network DEA: Additive efficiency decomposition*. European journal of operational research, ۲۰۱۰, ۲۰۷(۲): p. ۱۱۲۹-۱۱۲۲
- [۱۷] Ang, S. and C.-M. Chen, *Pitfalls of decomposition weights in the additive multi-stage DEA model*. Omega, ۲۰۱۶, ۵۸: p. ۱۵۳-۱۳۹
- [۱۸] Kao, C. and S.-N. Hwang, *Efficiency decomposition in two-stage data envelopment analysis: An application to non-life insurance companies in Taiwan*. European journal of operational research, ۲۰۰۸, ۱۸۵(۱): p. ۴۲۹-۴۱۸
- [۱۹] Kao, C. and S.-N. Hwang, *Decomposition of technical and scale efficiencies in two-stage production systems*. European Journal of Operational Research, ۲۰۱۱, ۲۱۱(۳): p. ۵۱۹-۵۱۵
- [۲۰] Yin, P., et al., *A DEA-based two-stage network approach for hotel performance*

- analysis: An internal cooperation perspective. Omega, ۲۰۲۰. ۹۳: p. ۱۰۲۰۳۵
- [۲۱] Koronakos, G., A taxonomy and review of the network data envelopment analysis literature. Machine Learning Paradigms, ۲۰۱۹: p. ۳۱۱-۲۵۵
- [۲۲] Despotis, D.K., G. Koronakos, and D. Sotiros, The “weak-link” approach to network DEA for two-stage processes. European Journal of Operational Research, ۲۰۱۶. ۲۵۴(۲): p. ۴۹۲-۴۸۱
- [۲۳] Charnes, A. and W.W. Cooper, Programming with linear fractional functionals. Naval Research logistics quarterly, ۱۹۶۲. ۹(۳-۴): p. ۱۸۶-۱۸۱
- [۲۴] Hwang, S.-N. and T.-L. Kao, Using two-stage DEA to measure managerial efficiency change of non-life insurance companies in Taiwan. International Journal of Management and Decision Making, ۲۰۰۸. ۹(۴): p. ۴۰۱-۳۷۷
- [۲۵] Despotis, D.K., G. Koronakos, and D. Sotiros, Composition versus decomposition in two-stage network DEA: a reverse approach. Journal of Productivity Analysis, ۲۰۱۶. ۴۵(۱): p. ۸۷-۷۱
- [۲۶] Deb, K., Multi-objective optimization, in Search methodologies ۲۰۱۴, Springer. p. ۴۴۹-۴۰۳
- [۲۷] Marler, R.T. and J.S. Arora, Survey of multi-objective optimization methods for engineering. Structural and multidisciplinary optimization, ۲۰۰۴. ۲۶(۶): p. ۳۶۹-۳۹۵
- [۲۸] Kao, C., Efficiency decomposition for general multi-stage systems in data envelopment analysis. European Journal of Operational Research, ۲۰۱۴. ۲۳۲(۱): p. ۱۲۴-۱۱۷