پژوهش‌های مدیریت در ایران
دوره ۲۵، شماره ۳، پاییز ۱٤۰۰، صص ۱۹۳-۲۱٦
نوع مقاله: پژوهشی

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

آزاده امید[1]، عادل آذر [2*]، محمود دهقان نیری[3]، عباس مقبل باعرض[4]

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

ارسال: ۱۳۹۹/۱۲/۱٦ پذیرش: ۱٤۰۰/۰۳/۲۳

چکیده

از آنجا که منابع در هر منطقه جغرافیایی محدود است، رویکرد منطقی آن است که این منابع صرف کسب‌وکارهای کارآ شود. طی سال‌های اخیر، کلان شهر تهران به‌دلیل شرایط جوّی و موقعیت جغرافیایی در شرایط بحرانی زیست محیطی قرار دارد؛ بنابراین، سنجش کارآیی زیست محیطی صنایع فعال در این شهر در کنار ارزیابی کارآیی عملیاتی حائز اهمیت است. برای مقایسه عملکرد صنایع و سنجش کارآیی کل متشکل از کارآیی عملیاتی و کارآیی زیست محیطی می‌توان از تکنیک تحلیل پوششی داده‌ای شبکه‌ای استفاده نمود. پیدایش تکنیک تحلیل پوششی داده‌ای شبکه‌ای برای سنجش همزمان کارآیی چندین زیرفرآیند به‌عنوان پیشرفتی در مدل استاندارد تحلیل پوششی داده‌ها به حساب می‌آید که در پی یافتن همزمان کارآیی کل و کارآیی زیرفرآیندها طی یک مدل ریاضی چندهدفه است. مدل ارائه شده در این پژوهش با حداقل‌سازی فاصله از کارآیی مستقل، سعی در بهینه‌سازی مدل چندهدفه با استفاده از رویکردی خطی دارد. به‌طوری 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، کارآیی زیست محیطی، بهینه‌سازی چندهدفه، صنایع تولیدی تهران

---

* نویسندهٔ مسئول مقاله: E-mail: azara@modares.ac.ir

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؛ به‌طوری که 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[2] و همکارآن(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, ٤]. در سال ۱۹۸٤، بنکر، چارنز و کوپر[4] با تغییر در مدل پایه‌ای، مدل جدیدی را

عرضه کردند که به‌اختصار 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, ٦].

تحلیل پوششی داده‌ای شبکه‌ای با رویکرد نگرش در داخل ساختار شبکه‌ای و اندازه‌گیری کارآیی زیرفرآیندها به‌وجود 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 کارآیی است. از آنجا که تابع کارآیی که برابر با نسبت موزون خروجی‌ها به ورودی‌هاست، تابعی کسری و غیرخطی است و نیز مسئله سنجش کارآیی 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 کارآیی یک ساختار شبکه‌ای دو مرحله‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد، انجام دادند و نشان دادند که مدل‌های خطی‌ای که در تحلیل پوششی داده‌ای شبکه‌ای به‌کار 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[۵] دست پیدا می‌کند و در جواب بهینه محلی[٦] 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 به‌طور کلی کارآ گردد؛ در غیر این‌صورت نمی‌توان تنها با استفاده از نتایج مدل غیرخطی به‌طور حتم در مورد کارآ بودن یک واحد تصمیم‌گیری نتیجه‌گیری کرد [۹].

در یک تقسیم‌بندی دیگر که توسط سوتیروس[۷] و همکاران در سال ۲۰۱۹ ارائه شده

است، این‌طور بیان می‌شود که به‌طور کلی دو رویکرد برای سنجش کارآیی جزئی و کارآیی کلی وجود دارد که تحت عنوان رویکرد "سنجش کارآیی مستقل[8]" و رویکرد جامع[9]" نامگذاری می‌شود [۱۱]. رویکرد کارآیی مستقل ارتباط مابین زیرفرآیندها و کارآیی کل را نادیده می‌گیرد که این امر می‌تواند کارآیی 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[10] و همکاران در همان سال بیان کردند که در رویکرد جامع دو پارادایم کلی وجود دارد که تحت عنوان پارادایم‌های "مشارکتی[11]" و "غیرمشارکتی[12]" 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[13] در نظر گرفته می‌شود و در الویت اول قرار گرفته و کارآیی آن سنجیده می‌شود. سپس کارآیی زیرفرآیند بعدی که به عنوان پیرو[14] در نظر گرفته می‌شود، با این فرض که کارآیی زیرفرآیند رهبر ثابت بماند، اندازه‌گیری می‌شود[۱۳]. در رویکرد مشارکتی، برعکس رویکرد غیرمشارکتی، کارآیی کل و کارآیی زیرفرآیندها به‌طور همزمان و با شناسایی ارتباطات میان آن‌ها بهینه می‌شود. به‌طور کلی در پارادایم مشارکتی، برای سنجش ارتباط مابین کارآیی کل و کارآیی زیرفرآیندها دو رویکرد وجود دارد: رویکرد ترکیب کارآیی[15] و رویکرد تجزیه کارآیی[16]. در رویکرد تجزیه کارآیی، کارآیی کلی سیستم ابتدا اندازه‌گیری می‌شود و سپس کارآیی زیرفرآیندها اندازه‌گیری می‌شود. در حالی که رویکرد ترکیب کارآیی، به‌طور معکوس عمل می‌کند؛ بدین صورت که ابتدا کارآیی زیرفرآیندها اندازه‌گیری می‌شود و سپس کارآیی کل در پی آن ارزیابی می‌شود. رویکرد تجزیه کارآیی روش‌های بسیاری را در بر می‌گیرد که پرکاربردترین آن‌ها شامل رویکرد تجمیع[17] [۱۴], [۱۵], [۱۶], [۱۷] و رویکرد مضربی[18] [۱۸], [۱۹] می‌شود.

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

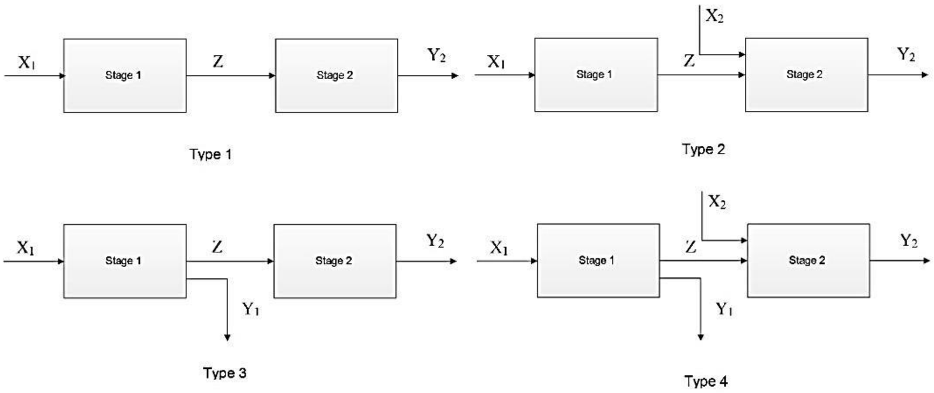
است که نتیجتاً لزوم استفاده از یک رویکرد جامع را برای سنجش کارآیی یک ساختار شبکه‌ای کلی دو چندان می‌کند. به بیان واضح‌تر، رویکردهای اولیه برای سنجش کارآیی شبکه‌ای دارای این نقص بوده‌اند که تنها برای زیرفرآیندهایی که تمامی خروجی زیرفرآیند اول، ورودی زیرفرآیند دوم است، قابلیت استفاده دارد. کوروناکس[۱۹] بیان می‌دارد که رویکردهای تجزیه کارآیی به روش تجمیع و تضریب، کارآیی زیرفرآیندهای غیریکتا دارند. به‌عبارت 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 کارآیی یک ساختار شبکه‌ای دومرحله‌ای کلی ارائه دهد، بنابراین اگر ساختار نوع ٤ در شکل ۱ را به‌عنوان شبکه دومرحله‌ای کلی دارای ورودی‌ها و خروجی‌های مازاد فرض کنیم و نیز اندیس‌های ذیل را برای هریک از پارامترهای مدل فرض کنیم، خواهیم داشت:

$i \in I = \{۱, \ldots, d\}$: اندیس نمایانگر واحد تصمیم‌گیرنده

$i_. \in I$: نشانگر واحد تصمیم‌گیرنده مورد ارزیابی

$X_{۱_i} = (x_{۱_{ij_۱}}, j_۱ = ۱, \ldots, r_۱)$: بردار نشانگر ورودی‌های خارجی زیرفرآیند اول DMU_i

$X_{۲_i} = (x_{۲_{ij_۲}}, j_۲ = ۱, \ldots, r_۲)$: بردار نشانگر ورودی‌های خارجی زیرفرآیند دوم DMU_i

$Z_i = (z_{il}, l = ۱, \ldots, t)$: بردار نشانگر متغیرهای میانی برای DMU_i

$Y_{۱_i} = (y_{۱_{ik_۱}}, k_۱ = ۱, \ldots, s_۱)$: بردار نشانگر خروجی‌های خارجی زیرفرآیند اول DMU_i

$Y_{۲_i} = (y_{۲_{ik_۲}}, k_۲ = ۱, \ldots, s_۲)$: بردار نشانگر خروجی‌های خارجی زیرفرآیند دوم DMU_i

$v_{1_i} = (u_{1_{ij_1}}, j_1 = 1, \dots, r_1)$: بردار نشانگر اوزان ورودی خارجی زیرفرآیند اول DMUi

$v_{2_i} = (u_{2_{ij_2}}, j_2 = 1, \dots, r_2)$: بردار نشانگر اوزان ورودی خارجی زیرفرآیند دوم DMUi

$\omega_i = (\omega_{il}, l = 1, \dots, t)$: بردار نشانگر اوزان متغیر میانی برای DMUi

$u_{1_i} = (v_{1_{ik_1}}, k_1 = 1, \dots, s_1)$: بردار نشانگر اوزان خروجی خارجی زیرفرآیند اول DMUi

$u_{2_i} = (v_{2_{ik_2}}, k_2 = 1, \dots, s_2)$: بردار نشانگر اوزان خروجی خارجی زیرفرآیند دوم DMUi

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

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

E_i: کارآیی کل واحد تصمیم گیرنده i ام

از آنجا که در تکنیک تحلیل پوششی داده‌ای استاندارد، کارآیی به‌صورت 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 این‌صورت کارآیی جزئی زیرفرآیندها به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

$$e_{1i} = max \frac{\sum_{l=1}^{l=t} \omega_{il} z_{il} + \sum_{k_1=1}^{k_1=s_1} u_{1_{ik_1}} y_{1_{ik_1}} - m_i}{\sum_{j_1=1}^{j_1=r_1} v_{1_{ij_1}} x_{1_{ij_1}}}$$
$$e_{2i} = max \frac{\sum_{k_2=1}^{k_2=s_2} u_{2_{ik_2}} y_{2_{ik_2}}}{\sum_{j_2=1}^{j_2=r_2} v_{2_{ij_2}} x_{2_{ij_2}} + \sum_{l=1}^{l=t} \omega_{il} z_{il} + n_i} \quad (1)$$

در این پژوهش، مدل‌سازی برای حالت کلی بازده به مقیاس متغیر[20] 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[21] ابتدا کارآیی زیرفرآیندها بهینه می‌شود و سپس کارآیی کل اندازه‌گیری می‌شود، بنابراین هدف بهینه کردن هر دو تابع هدف مدل بالا به‌طور 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 همکارآن 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[۲۲] برای تبدیل تابع هدف کسری به خطی استفاده می‌شود و قیدهای زیر به مسئله اضافه می‌گردد [۲۳].

$$\sum_{j_1=1}^{j_1=r_1} v_{1ij_1} x_{1ij_1} = 1$$
$$\sum_{k_2=1}^{k_2=s_2} u_{2ik_2} y_{2ik_2} = 1 \qquad (۲)$$

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

$$e_{1i} = \max\left(\sum_{l=1}^{l=t} \omega_{il} z_{il} + \sum_{k_1=1}^{k_1=s_1} u_{1ik_1} y_{1ik_1} - m_i\right)$$
$$e_{2i} = \min\left(\sum_{j_2=1}^{j_2=r_2} v_{2ij_2} x_{2ij_2} + \sum_{l=1}^{l=t} \omega_{il} z_{il} + n_i\right) \qquad (۳)$$

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 به‌عنوان 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 به‌طوری 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[۲۳] و همکاران در سال ۲۰۱٦ بیان کردند، اصلی‌ترین ضعف رویکرد تضریب که توسط کائو و هوآنگ[۲٤] در سال ۲۰۰۸ ارائه شد و کارآیی کل را به‌صورت حاصل ضرب کارآیی زیرفرآیندها در نظر می‌گرفت [۲٤]، آن است که تجزیه کارآیی کل به کارآیی زیرفرآیندها منحصربه‌فرد نیست [۲۵]. بدین صورت که ممکن است واحد تصمیم‌گیرنده‌ای با کارآیی کل ثابت، دارای دو مقدار عددی برای کارآیی 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 کارآیی کل ثابت، کارآیی زیرفرآیندها می‌تواند متغیر باشد؛ برای جلوگیری از رخداد این امر، این مطالعه سعی دارد تا هر دو تابع هدف در مدل ۳ را به‌طور همزمان بهینه سازد تا بتواند از مزیت منحصر بودن مجموعه جواب در تحلیل کارآیی 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 به‌صورت مستقل بهینه شود تا میزان ایده‌آل یا بهینه پاسخ اندازه‌گیری شود؛ سپس، در فاز دوم، دو تابع هدف به‌طور همزمان بهینه شود، به‌طوری 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 به‌طور مستقل در نظر گرفته شود، بنابراین ابتدا در فاز اول دو مدل خطی مجزای زیر بهینه می‌شوند:

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

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

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

$$for\ i = ۱, \dots, d$$
$$\omega_{il}, u_{۱\,ik_۱}, v_{۱\,ij_۱} \geq \varepsilon$$
$$m_i\ unrestricted\ in\ sign$$

$$e_{۲i}^{min} = \min\left(\sum_{j_۲=۱}^{j_۲=r_۲} v_{۲\,ij_۲} x_{۲\,ij_۲} + \sum_{l=۱}^{l=t} \omega_{il} z_{il} + n_i\right)$$
$$S.T: \sum_{k_۲=۱}^{k_۲=s_۲} u_{۲\,ik_۲} y_{۲\,ik_۲} = ۱ \qquad (۵)$$
$$\sum_{k_۲=۱}^{k_۲=s_۲} u_{۲\,ik_۲} y_{۲\,ik_۲} - \sum_{j_۲=۱}^{j_۲=r_۲} v_{۲\,ij_۲} x_{۲\,ij_۲} - \sum_{l=۱}^{l=t} \omega_{il} z_{il} \leq ۰$$
$$for\ i = ۱, \dots, d$$
$$v_{۲\,ij_۲}, \omega_{il}, u_{۲\,ik_۲} \geq \varepsilon$$
$$n_i\ unrestricted\ in\ sign$$

در مدل‌های بالا ε 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 (٤) مقدار بهینه کارآیی زیرفرآیند اول را اندازه‌گیری می‌کند و مدل (٥) 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 (٤) باید ماکزیمم شود، در حالی که همین مقدار در مدل (٥) 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 [٢٦]. در این حالت، باید روشی مورد استفاده قرار بگیرد تا باعث ایجاد توافق میان توابع هدف شود و هردو را به‌طور همزمان بهینه کند [٢٧]. روش پیشنهادی این مطالعه، روش معیار جامع است که درپی 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[۲۵] به‌دلیل 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 به‌ترتیب با e_1^{max} و e_2^{min} نشان دهیم، مسئله بهینه‌سازی دو هدفه بالا به‌صورت زیر به یک مسئله تک هدفه تبدیل می‌شود:

$$f_1 = \frac{e_1^{max} - e_1}{e_1^{max}} \qquad (6)$$
$$f_2 = \frac{e_2 - e_2^{min}}{e_2^{min}}$$

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

در معادله بالا α_1 و α_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 α_1 و α_2 برای نشان دادن میزان اهمیت تخصیص داده شده به هر زیرفرآیند استفاده می‌شود و هنگامی که α_1 بزرگ‌تر از α_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.

$$E_i = \frac{\sum_{k_1=1}^{k_1=s_1} u^*_{1ik_1} y_{1ik_1} + \sum_{k_2=1}^{k_2=s_2} u^*_{2ik_2} y_{2ik_2} + \sum_{l=1}^{l=t} \omega^*_{il} z_{il}}{\sum_{j_1=1}^{j_1=r_1} v^*_{1ij_1} x_{1ij_1} + \sum_{j_2=1}^{j_2=r_2} v^*_{2ij_2} x_{2ij_2} + \sum_{l=1}^{l=t} \omega^*_{il} z_{il}} \quad (8)$$

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 $u^*_1, u^*_2, \omega^*, v^*_1$ و v^*_2 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[۲۶][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 همکارآن [۲۲] (ستون هفتم تا نهم) و نیز روش پیشنهادی توسط کائو[۲۷] [۲۸] (ستون دهم تا سیزدهم) مشاهده می‌شود:

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

	کارآیی مستقل		نتایج حاصل از مدل پیشنهادی			نتایج حاصل از Despotic, ۲۰۱۶b			نتایج حاصل از Kao, ۲۰۱٤a		
DMU	e_i^{1}	e_i^{2}	e_1	e_2	E_{total}	e_D^{1}	e_D^{2}	E_D	e_K^{1}	e_K^{2}	E_K
۱	۰,۷۳٤	۰,۷۳۳	۰,٤٦۷	۰,۷۲۰	۰,٦۱٤	۰,٦۷٥	۰,٦۷٤	۰,۷۳۳	۰,٦۸۸	۰,٦۱٦	۰,٦۲٥
۲	۱,۰۰۰	۰,٤۷٥	۰,۹٦۳	۰,٤٦۹	۰,٦۲۷	۰,۹۷۹	۰,٤٦٥	۰,٤۷۳	۰,۹٥۷	۰,٤۷٥	۰,٤۸۰
۳	۰,۷٦۱	۱,۰۰۰	۰,۷۰۲	۱,۰۰۰	۰,۸٥۱	۰,۷۳۱	۰,۹٦۱	۰,۷۹۹	۰,٦۳۸	۰,۸٤۷	۰,۸٤۷
٤	۰,۸۹٤	۰,٤۲۷	۰,۸۲٥	۰,۳٥۸	۰,٤۸۱	۰,۷۷۹	۰,۳۷۲	۰,۳۷۲	۰,۳۸٦	۰,۳۹۷	۰,۳۸٦
٥	۰,٦۹۱	۱,۰۰۰	۰,۳۸۷	۰,۸۸۷	۰,٦٥۲	۰,٥۷۲	۰,۸۲۷	۰,٦۳۱	۰,۳۸۷	۱,۰۰۰	۰,٥۷۷
٦	۱,۰۰۰	۰,٦۷۱	۰,۸٦۱	۰,٦۰۰	۰,٦۹۸	۱,۰۰۰	۰,٦۷۱	۰,۹٥۱	۱,۰۰۰	۰,٥٦٤	۱,۰۰۰
۷	۰,۸۸۱	۰,٦۳۲	۰,۸۰۲	۰,٦۳۱	۰,٦۹۷	۰,۸٤۷	۰,٦۰۷	۰,٦۱۲	۰,۸۰۲	۰,٦۳۲	۰,٥۸۱
۸	۰,٥٥۰	۰,۹۸۰	۰,٥٤۲	۰,۸٦۳	۰,۷۱٤	۰,٥۰۱	۰,۸۹۳	۰,٥۷۸	۰,٥٤۲	۰,۸٥۲	۰,٦٦٤
۹	۰,۸٦٦	۰,۷٥٦	۰,۸۲٦	۰,٦۳٦	۰,۷۱۰	۰,۸۲۷	۰,۷۲۲	۰,۷۲٥	۰,۷۲۲	۰,۷٥۰	۰,٦٤٤
۱۰	۱,۰۰۰	۰,٦۳۲	۱,۰۰۰	۰,٦۱٥	۰,۷٦۲	۱,۰۰۰	۰,٦۳۲	۰,۹۰۹	۱,۰۰۰	۰,٤۸۲	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	۰,۸٦۹	۱,۰۰۰	۰,۸۱۷	۰,۸۹۹	۰,۹٦۸	۰,۸٤۱	۰,۸٤۱	۱,۰۰۰	۰,۸۱۸	۰,۸٤۳
۱٤	۰,٦٦۹	۰,۹۳٤	۰,٦۳٤	۰,۹۱۷	۰,۷۸۱	۰,٦٦۹	۰,۹۳٤	۰,٦٦۹	۰,٦۱٤	۰,۷۹۳	۰,۷۹۲
۱٥	۰,٤۲۲	۱,۰۰۰	۰,٤۱۱	۱,۰۰۰	۰,۷۰٦	۰,٤۱۳	۰,۹۸۰	۰,٦۲۸	۰,۳٦۲	۰,۸٦۱	۰,۷۳۰
۱٦	۰,۹۸۱	۰,۷٦٦	۰,٤۲۷	۰,٤۹۸	۰,٤۷٥	۰,۷٥۳	۰,٥۸۷	۰,٦۳۲	۰,٦۰۳	۰,٤۹۳	۰,٦۰۳
۱۷	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	۰,۸٦۳	۱,۰۰۰	۰,۹۳۲	۰,۹۳٤	۰,۹۳٤	۰,۹۳۸	۰,۹٤۰	۰,۹۳۰	۰,۸۹۱
۱۸	۱,۰۰۰	۰,٥۱۹	۱,۰۰۰	۰,٥۱۹	۰,٦۸۳	۱,۰۰۰	۰,٥۱۹	۰,٥٥٤	۱,۰۰۰	۰,۳۲۸	۱,۰۰۰
۱۹	۱,۰۰۰	۰,٥۱۰	۱,۰۰۰	۰,٤۹۰	۰,٦٥۷	۰,۹۷٦	۰,٤۹۷	۰,٤۹۷	۰,۸۷۹	۰,٥۱۰	۰,٥۰۳
۲۰	۰,۷٦۸	۱,۰۰۰	۰,٦٤۱	۱,۰۰۰	۰,۸۲۱	۰,۷۱۱	۰,۹۲٦	۰,۷٥٥	۰,٦٦۸	۱,۰۰۰	۰,۷۳۷
۲۱	۱,۰۰۰	۰,۷۸۷	۱,۰۰۰	۰,٦۹۹	۰,۸۲۳	۰,۹۹۷	۰,۷۸٥	۰,۷۸٥	۱,۰۰۰	۰,۷۸٤	۰,۷۸٤
۲۲	۰,۹٥۹	۱,۰۰۰	۰,٤٦٦	۰,۸۸۷	۰,٦۸۹	۰,۸۰۳	۰,۸۳۷	۰,۸۲٦	۰,٦۳٥	۰,۹٥۲	۰,۷۰٦
۲۳	۰,۸۲٦	۰,۷۲٦	۰,۸۲٥	۰,۷۱٤	۰,۷٦۰	۰,۸۱۷	۰,۷۱۹	۰,۷۳۷	۰,۸۰۹	۰,۷۱۹	۰,٦۸۹
۲٤	۱,۰۰۰	۰,۹۰٤	۱,۰۰۰	۰,۸٥٥	۰,۹۲۲	۰,۹٦۰	۰,۸٦۷	۰,۹٥۷	۰,۹۳۳	۰,۸٤٥	۰,۹۳۳
۲٥	۰,٦٦۱	۱,۰۰۰	۰,٦٥۰	۱,۰۰۰	۰,۸۲٥	۰,٦٦۱	۱,۰۰۰	۰,۷٦٦	۰,٥٦٤	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰
۲٦	۰,۹٤٥	۰,۲٤۳	۰,٦۸۷	۰,۱۷۲	۰,۲٤۷	۰,۹۱۹	۰,۲۳٦	۰,۲٦۹	۰,٥٥٥	۰,۲۱٥	۰,٥٥٥
۲۷	۱,۰۰۰	۰,۳۷۹	۱,۰۰۰	۰,۳٦۹	۰,٥٤۰	۱,۰۰۰	۰,۳۷۹	۰,۷۹۰	۱,۰۰۰	۰,۲۸۱	۱,۰۰۰
۲۸	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	۰,۹۲۹	۰,۸۲٥	۰,۸۷۲	۰,۹۰۳	۰,۹۰۳	۰,۹۱٤	۰,۷۳۹	۰,۹۷۱	۰,۸۸۲

نتایج حاصل از Kao, ۲۰۱٤a			نتایج حاصل از Despotic, ۲۰۱٦b			نتایج حاصل از مدل پیشنهادی			کارآیی مستقل		
E_K	$e_K^۲$	$e_K^۱$	E_D	$e_D^۲$	$e_D^۱$	E_{total}	$e_۲$	$e_۱$	$e_i^۲$	$e_i^۱$	DMU
۱,۰۰۰	۰,۳٤۷	۱,۰۰۰	۰,۹۸۱	۰,۳۷٦	۱,۰۰۰	۰,٤٦٤	۰,۳۰۲	۱,۰۰۰	۰,۳۷٦	۱,۰۰۰	۲۹
۰,٤٤۸	۰,٦۷۳	۰,٤۷٥	۰,٦۰۲	۰,٦۰٥	۰,٥٥٤	۰,٤۲۱	۰,٤۰٦	۰,٤٦۰	۰,٦۸۱	۰,٦۲٥	۳۰

معیار بهینگی در مدل دیسپاتیس و همکاران، ماکزیمم کردن کمترین مقدار کارآیی برای زیرفرآیندها است. به عبارت دیگر، در متدولوژی دیسپاتیس و همکارآن 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[۲۸] در سال ۲۰۱٦ هر دو کارآیی یک ساختار شبکه‌ای را با استفاده از رویکرد ترکیب کارآیی[۲۹] 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 پژوهشT یک ساختار شبکه‌ای متشکل از دو زیرفرآیند است که زیرفرآیند اول "زیرفرآیند زیست محیطی" نامیده می‌شود و این زیرفرآیند دارای سه ورودی شامل ضریب آلایندگی هوا، ضریب آلایندگی آب و ضریب آلایندگی 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 کارآیی زیست محیطی و کارآیی 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.

جدول ۲: داده‌های واقعی

واحد تصمیم گیری	ورودی‌های مرحله اول			خروجی‌های مرحله اول	متغیر میانی	ورودی‌های مرحله دوم	خروجی‌های مرحله دوم		
	X_1^1	X_1^2	X_1^3	Y_1	Z	X_2^1	X_2^2	X_2^3	Y_2
	ضریب آلایندگی هوا	ضریب آلایندگی آب	ضریب آلایندگی خاک	هزینه‌های زیست محیطی	ارزش محصولات تولیدی	هزینه‌های عملیاتی	هزینه پرسنل	مالیات	درآمد
صنایع حسابداری	۲۰,۱۳	۹,۰۱	۳۳,۴۹	۲۱۲۵۵	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	۷۵۲۳۱	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	۸,۳۱	۷۴۸۹	۷۸۶۹۲	۴۴۲	۲۷۹	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 به‌ترتیب مقدار ایده آل کارآیی زیرفرآیندها را نشان می‌دهد که این نتایج با استفاده از رویکرد مستقل اندازه‌گیری شده است. ستون‌های ٤ و ٥ نتایج سنجش کارآیی توامان برای زیرفرآیندهای اول و دوم را با استفاده از مدل پیشنهادی نشان می‌دهد و ستون ٦ 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 α 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 α_1 و α_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 تفییر است.

جدول ۳: نتایج سنجش کارآیی برای داده‌های حقیقی

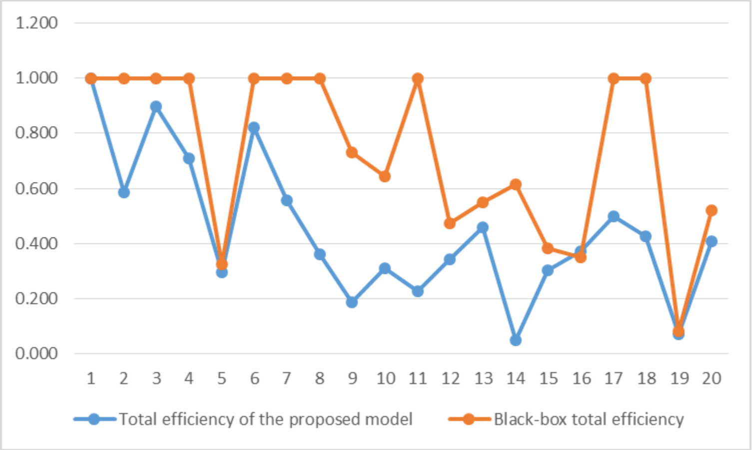
واحد تصمیم‌گیری	کارآیی مستقل مرحله اول	کارآیی مستقل مرحله دوم	$\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$			$\alpha_1 = 0.9$ $\alpha_2 = 0.1$			$\alpha_1 = 0.1$ $\alpha_2 = 0.9$		
			کارآیی مرحله اول	کارآیی مرحله دوم	کارآیی کل	کارآیی مرحله اول	کارآیی مرحله دوم	کارآیی کل	کارآیی مرحله اول	کارآیی مرحله دوم	کارآیی کل
۱	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	۰,٤٥۷	۰,۹۱۰	۰,٤٤٤	۰,٥۸۷	۰,۹۱۰	۰,٤٤٤	۰,٥۸۷	۰,۸٤۷	۰,٤٥٦	۰,٥۸۷
۳	۰,۹۰۲	۱,۰۰۰	۰,۸۰۸	۰,۹۸۹	۰,۸۹۹	۰,۹۰۲	۰,٦۹۰	۰,۷۷۷	۰,۷۹٤	۱,۰۰۰	۰,۸۹۷
٤	۰,٤۳۲	۱,۰۰۰	۰,٤۲۱	۱,۰۰۰	۰,۷۱۱	۰,٤۲۱	۱,۰۰۰	۰,۷۱۱	۰,٤۲۱	۱,۰۰۰	۰,۷۱۱

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
٥	۰,۲۸۲	۰,۲۲۱	۰,۲۸۰	۰,۱۷٤	۰,۲۹۷	۰,۲۸۰	۰,۱۷٤	۰,۲۹۷	۰,۱۱۲	۰,۱۹۸	۰,۱۸٤
٦	۰,۹۱۰	۱,۰۰۰	۰,٦٤٥	۱,۰۰۰	۰,۸۲۳	۰,٦٤٥	۱,۰۰۰	۰,۸۲۳	۰,٦٤٥	۱,۰۰۰	۰,۸۲۳
۷	۰,۲٥۸	۰,۸۱۱	۰,۲٥٤	۰,۸۰۱	۰,٥٥۸	۰,۲٥٤	۰,۸۰۱	۰,٥٥۸	۰,۲۲٦	۰,۸۱۱	۰,٥٤۹
۸	۱,۰۰۰	۰,۲٥٥	۱,۰۰۰	۰,۲۱۹	۰,۳٦۰	۱,۰۰۰	۰,۲۱۹	۰,۳٦۰	۱,۰۰۰	۰,۲۱۹	۰,۳٦۰
۹	۰,۰٥۲	۰,۲۱۸	۰,۰٤٤	۰,۲۱۷	۰,۱۸٦	۰,۰٤٤	۰,۲۱۷	۰,۱۸٦	۰,۰۲۷	۰,۲۱۷	۰,۱۸۳
۱۰	۰,۸۳۸	۰,۲۹۸	۰,۸۰۰	۰,۲۰۹	۰,۳۱۱	۰,۸۳٤	۰,۲۰۸	۰,۳۱٥	۰,۲۲۷	۰,۲۳۷	۰,۲۳٥
۱۱	۱,۰۰۰	۰,۱۸۸	۱,۰۰۰	۰,۱۲۸	۰,۲۲٦	۱,۰۰۰	۰,۱۲۸	۰,۲۲٦	۰,۱٦٤	۰,۱۲۹	۰,۱۳۳
۱۲	۰,۳٥۱	۰,٤٦۳	۰,۳٤۳	۰,۳٤٤	۰,۳٤٤	۰,۳٤۳	۰,۳٤٤	۰,۳٤٤	۰,۱۳۸	۰,۳٥۷	۰,۲۹۹
۱۳	۰,۲٥۲	۰,٦٥٤	۰,۲٥٤	۰,٥۷۷	۰,٤٥۹	۰,۲٥٤	۰,٥۷۷	۰,٤٥۹	۰,۲٥۲	۰,٥۷۷	۰,٤٥۸
۱٤	۰,۱۲۷	۰,۰٥۲	۰,۱۲٦	۰,۰٤۷	۰,۰٥۰	۰,۱۲۷	۰,۰٤۷	۰,۰٥۰	۰,۰٤۰	۰,۰٤۷	۰,۰٤٦
۱٥	۱,۰۰۰	۰,۲۲۳	۰,۹۳۷	۰,۱۸٦	۰,۳۰٤	۱,۰۰۰	۰,۱۸٤	۰,۳۱۱	۰,۰۱۱	۰,۲۲۳	۰,۱۸٤
۱٦	۰,۳۸۲	۰,٤٤۸	۰,۳٦۷	۰,۳۷۱	۰,۳۷۰	۰,۳٦۷	۰,۳۷۱	۰,۳۷۰	۰,۳٥۱	۰,۳۷۲	۰,۳٦٦
۱۷	۱,۰۰۰	۰,۳۳٥	۱,۰۰۰	۰,۳۳۲	۰,٤۹۸	۱,۰۰۰	۰,۳۳۲	۰,٤۹۸	۱,۰۰۰	۰,۳۳۲	۰,٤۹۸
۱۸	۰,۲۳۳	۰,٥۳٦	۰,۲۳۳	۰,٥۳۰	۰,٤۲۷	۰,۲۳۳	۰,٥۳۰	۰,٤۲۷	۰,۱٥۱	۰,٥۳۳	۰,٤۰۰
۱۹	۰,۱٤٥	۰,۱۸٦	۰,۰٤۳	۰,۰۷۳	۰,۰۷۱	۰,۰٤٦	۰,۰۷۳	۰,۰۷۱	۰,۰۳٦	۰,۰۷۳	۰,۰۷۱
۲۰	۰,۱۸۹	۰,٦۰۷	۰,۱۷۷	۰,٥۳۲	۰,٤۰۹	۰,۱۷۷	۰,٥۳۲	۰,٤۰۹	۰,۱۷۲	۰,٥۳۳	۰,٤۰۷

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 کارآیی کل، کارآیی کل در حالت جعبه سیاه[۳۰] که ساختار داخلی زیرفرآیندها را در نظر نمی‌گیرد با کارآیی 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 به‌دست 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 کارآیی 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 مبلمان منزل و حسابداری به‌عنوان صنایع کارآ از بعد تولید صنعتی و سودآوری شناسایی می‌شوند. در کل نیز صنایع مرتبط با حسابداری به‌عنوان صنعت کارآی 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 بالاخص 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، به‌طوری 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)
٤. Banker, Chernes and Cooper (BCC)
٥. Global optimum solution
٦. Local optimum solution
۷. Sotiros
۸. Independent efficiency assessment
۹. Holistic approach
۱۰. Sotiros
۱۱. Cooperative paradigm
۱۲. Non-cooperative paradigm
۱۳. Leader
۱٤. Follower
۱٥. Efficiency composition approach
۱٦. Efficiency decomposition approach
۱۷. Additive
۱۸. Multiplictive
۱۹. Koronakos
۲۰. Variable Return to Scale (VRS)
۲۱. Composition approach
۲۲. Charnes and Cooper transformation
۲۳. Despotis
۲٤. Kao and Hwang
۲٥. The weighted comprehensive criterion method (WCCM)
۲٦. 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(٦): p. .٤٤٤-٤۲۹

[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, ۲۰۱٤. ۱۷(٤): p. .۹٥-٦٥

[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

[٤] Azizi, H., *Efficiency assessment in data envelopment analysis using efficient and inefficient frontiers.* Management Research in Iran, ۲۰۱۲. ۱٦(۳): p. .۱۷۳-۱٥۳

[٥] Banker, R.D., A. Charnes, and W.W. Cooper, *Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis.* Management science, ۱۹۸٤. ۳۰(۹): p. .۱۰۹۲-۱۰۷۸

[٦] Fasihi, B., H. Azizi, and Z. Gholizadeh Gazvar, *Data envelopment analysis with missing data.* Modern Research in Decision Making, ۲۰۲۱. ٦(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(٦): p. .٤۳۰-٤۲۳

[۸] .۸Mousavi, 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: ۳۹hospitals).* Modern Research in Decision Making, ۲۰۱۹. ٤(۱): p. .۱۹٥-۱٦۷

[۹] Mahdiloo, M., et al., *Integrated data envelopment analysis: Linear vs. nonlinear*

model. European Journal of Operational Research, ۲۰۱۸. ۲٦۸(۱): p. .۲٦۷-۲٥٥

[۱۰] Peykani, P., et al., *Data envelopment analysis and robust optimization: A review*. Expert Systems, ۲۰۲۰. ۳۷(٤): p. e.۱۲٥۳٤

[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. ۸٥: p. .۱٥٥-۱٤٤

[۱۲] Kao, C., *Network data envelopment analysis: A review.* European journal of operational research, ۲۰۱٤. ۲۳۹(۱): p. .۱٦-۱

[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. ٥٥(۷): p. .٦٥۳-٦٤۳

[۱٤] Chen, Y., et al., *Additive efficiency decomposition in two-stage DEA.* European journal of operational research, ۲۰۰۹. ۱۹٦(۳): p. .۱۱۷٦-۱۱۷۰

[۱٥] Guo, C., et al., *Decomposition weights and overall efficiency in two-stage additive network DEA.* European Journal of Operational Research, ۲۰۱۷. ۲٥۷(۳): p. .۹۰٦-۸۹٦

[۱٦] 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, ۲۰۱٦. ٥۸: p. .۱٥۳-۱۳۹

[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. ۱۸٥(۱): p. .٤۲۹-٤۱۸

[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. .٥۱۹-٥۱٥

[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, ۲۰۱٦. ۲٥٤(۲): p. .٤۹۲-٤۸۱

[۲۳] Charnes, A. and W.W. Cooper, *Programming with linear fractional functionals.* Naval Research logistics quarterly, ۱۹٦۲. ۹(۳-٤): p. .۱۸٦-۱۸۱

[۲٤] 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(٤): p. .٤۰۱-۳۷۷

[۲٥] Despotis, D.K., G. Koronakos, and D .Sotiros, *Composition versus decomposition in two-stage network DEA: a reverse approach.* Journal of Productivity Analysis, ۲۰۱٦. ٤٥(۱): p. .۸۷-۷۱

[۲٦] Deb, K., *Multi-objective optimization*, in *Search methodologies*۲۰۱٤, Springer. p. .٤٤۹-٤۰۳

[۲۷] Marler, R.T. and J.S. Arora, *Survey of multi-objective optimization methods for engineering.* Structural and multidisciplinary optimization, ۲۰۰٤. ۲٦(٦): p. -۳٦۹ .۳۹٥

[۲۸] Kao, C., *Efficiency decomposition for general multi-stage systems in data envelopment analysis* .European Journal of Operational Research, ۲۰۱٤. ۲۳۲(۱): p. .۱۲٤-۱۱۷