

طراحی مدل ریاضی تخصیص بهینه در زنجیره تأمین سبز دو مرحله‌ای با استفاده از تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای (NDEA) و مدارهای الکتریکی

حسین محبی*، عادل آذر**، عباسعلی حیدری***، آمنه خدیور****

تاریخ ارسال: ۹۴/۴/۲۹ - تاریخ پذیرش: ۹۴/۹/۱۹

چکیده

امروزه اغلب زنجیره‌های تأمین، با توجه بیشتر به حفاظت از محیط زیست به‌عنوان مزیت رقابتی، به سمت کسب و کار سبز در حرکتند. در این میان، طراحی یک زنجیره تأمین سبز دو مرحله‌ای با تخصیص بهینه یک تأمین‌کننده سبز به یک تولیدکننده سبز بر اساس ماکزیمم کارایی و در نظر گرفتن فرآیندها و محصولات درونی میان این دو سطح، می‌تواند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد؛ زیرا، عملکرد اقتصادی و زیست‌محیطی زنجیره تأمین را افزایش خواهد داد. یکی از روش‌های مورد استفاده برای ارزیابی کارایی در مدیریت زنجیره تأمین سبز، تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) است. روش‌های سنتی DEA در ارزیابی کارایی زنجیره تأمین و سیستم‌های چند مرحله‌ای به درستی عمل نمی‌کنند؛ زیرا، هر واحد تصمیم‌گیرنده را مانند جعبه سیاه در نظر می‌گیرند و از ساختارهای دورنی آن غفلت می‌ورزند. لذا به‌منظور رفع این نقص، یک روش تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای دو مرحله‌ای مبتنی بر مفاهیم مهندسی برق ارائه خواهد شد که قادر است کل ورودی‌ها، محصولات میانی و خروجی‌های مطلوب و نامطلوب میان تأمین‌کننده و تولیدکننده در زنجیره تأمین سبز را جهت تخصیص بهینه واحدهای تأمین به تولید براساس ماکزیمم کارایی در نظر بگیرد. از مزیت‌های عمده این مدل پیشنهادی: حل فقط یک مدل برنامه‌ریزی خطی به‌جای حل چندین مدل، ثابت در تعداد متغیرها و محدودیت‌های مدل پیشنهادی، حتی اگر تعداد ورودی‌ها، میانجی‌ها و خروجی‌های مسئله تغییر کند و همگرایی سریعتر به سمت جواب بهینه در مقایسه با دیگر روش‌های مرسوم می‌باشد. مدل پیشنهادی همراه با یک مثال کاربردی تشریح و اعتبار آن تأیید گردیده است.

واژگان کلیدی: زنجیره تأمین سبز دو مرحله‌ای، کارایی، تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای، مدارهای الکتریکی.

* استادیار گروه مدیریت صنعتی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه مپید.

** استاد گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، (نویسنده مسئول).

Azara@modares.ac.ir

*** دانشیار گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه یزد.

**** دانشیار گروه مدیریت، دانشکده علوم اجتماعی و اقتصاد، دانشگاه الزهرا.

مقدمه

در دنیای رقابت کنونی، هیچ شرکت مستقلی توانایی واکنش به موقع و سریع به محرک‌های خارجی را ندارد (امیری و جهانی، ۱۳۸۹). بنابراین، در سال‌های اخیر، فشارهای محیطی و تسریع قوانین جهت اخذ استانداردهای زیست‌محیطی باعث شده است زنجیره تأمین سبز^۱ و مدیریت مناسب آن به عنوان یک عامل کلیدی جهت حضور موفق در بازارهای رقابتی مطرح شود (میرغفوری و همکاران، ۱۳۹۳). از آنجایی که فعالیتهای حوزه تأمین و تولید، نقش بسزایی در میزان سودآوری و پایداری زنجیره تأمین دارند، برنامه‌ریزی یکپارچه و همزمان تأمین و تولید از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود (آذر و حسینی، ۱۳۹۳). لذا، ارزیابی کارایی توأمان تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان جهت تخصیص بیهنه آنها به یکدیگر در زنجیره تأمین سبز دو مرحله‌ای یک موضوع مهم در این حوزه است. در دهه‌های گذشته، تحلیل پوششی داده‌ها بعنوان یک رویکرد غیرپارامتریک برای ارزیابی عملکرد واحدهای تصمیم‌گیرنده مشابه مطرح شده است. اما، مدل‌های کلاسیک این روش در ارزیابی کارایی فرآیندهای چند مرحله‌ای و زیرفرآیندهای مختلف در یک سازمان ناتوان هستند (الف و همکاران، ۱۳۹۱). مدل‌های تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای^۲ که توسط فارل و گرسکوپف در سال ۲۰۰۰ معرفی شدند، این مشکل را برطرف نموده و کارایی فرآیندهای چند مرحله‌ای و ساختارهای شبکه‌ای را به خوبی محاسبه می‌کنند (لويس و سکستون، ۲۰۰۳). تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای علاوه بر عوامل قابل کنترل و مطلوب، عوامل غیرقابل کنترل، نامطلوب و عواملی که ماهیت دوگانه^۳ (همزمان نقش ورودی و خروجی) دارند را نیز مورد توجه قرار می‌دهد (میرهدایتیان و همکاران، ۲۰۱۴). در ارزیابی تحلیل کارایی، اغلب فرض بر آن است که تمام خروجی‌ها "خوب" هستند، درحالی‌که همیشه این‌طور نیست. برای مثال، پارامتری مانند آلاینده‌های صنعتی جزء خروجی نامطلوب محسوب شده و باید به منظور بهبود کارایی کاهش یابد.

-
1. Green Supply Chain
 2. Network Data Envelopment Analysis
 3. Dual –Role Factors

هدف این پژوهش ارائه مدل برنامه‌ریزی خطی جدید به منظور حل تخصیص بهینه تأمین - کنندگان به تولیدکنندگان جهت طراحی زنجیره تأمین سبز دو مرحله‌ای براساس ماکزیمم کارایی است. مدل پیشنهادی بر مبنای مفاهیم تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای است که از مدارها و روابط اثبات شده مهندسی برق منتج می‌گردد. زیرا، استفاده از علم مهندسی برق در این پژوهش کمک می‌نماید تا فرآیندها و عناصر درونی و میانی سیستم‌های چندمرحله‌ای به درستی شناسایی و تجزیه و تحلیل شوند.

مبانی نظری پژوهش

مدیریت زنجیره تأمین سبز

در راستای استفاده از قوانین سبز در زنجیره تأمین، مفهومی جدید در سال ۱۹۹۶ توسط انجمن پژوهش صنعتی دانشگاه میشیگان معرفی شد که به آن مدیریت زنجیره تأمین سبز گفتند (برزین پور و تاکی، ۱۳۹۳). مدیریت زنجیره تأمین سبز، یکپارچه‌کننده مدیریت زنجیره تأمین با الزامات زیست محیطی در تمام مراحل طراحی محصول، انتخاب و تأمین مواد اولیه، تولید و ساخت، فرایندهای توزیع و انتقال، تحویل به مشتری و بالاخره پس از مصرف، مدیریت بازیافت و مصرف مجدد به منظور بیشینه کردن میزان بهره‌وری در مصرف انرژی و منابع همراه با بهبود عملکرد کل زنجیره تأمین است (الف و همکاران، ۱۳۹۰). مدیریت زنجیره تأمین سبز به دنبال تغییر مدل زنجیره خطی سنتی از تأمین کنندگان به کاربر است و سعی دارد اقتصاد بازیافت را به مدیریت زنجیره تأمین ملحق نماید (نیک‌نژاد، ۱۳۹۰). معیارهای انتخاب تأمین کننده، تولید کننده و فروشنده در زنجیره سبز و سنتی از اساس متفاوت هستند. در زنجیره‌های سنتی، استاندارد غالب، قیمت می‌باشد. اما در زنجیره سبز، هدف زیست محیطی بخشی از معیارهای انتخاب تأمین کننده است (جوآنی و همکاران، ۲۰۰۹). در نظر گرفتن این ضوابط زیست محیطی جهت تخصیص تأمین - کنندگان به تولیدکنندگان موجب می‌شود تنها تعداد معدودی از تأمین کنندگان سبز، واجد معیارهای تعریف شده جهت تخصیص به تولید کنندگان سبز باشند.

مسئله تخصیص

برنامه‌ریزی خطی دارای اشکال ویژه‌ای است که یکی از متداول‌ترین آن‌ها مسئله تخصیص است که هارولد کوهن از دانشگاه برین ماور در سال ۱۹۵۵ روش حل ویژه‌ای برای آن ارائه داد (آذر، ۱۳۸۳). مسئله تخصیص عبارت است از حل بهینه مسئله تخصیص n شغل به n فرد با صرف بیشترین سود یا کمترین هزینه که با C_{ij} نشان داده می‌شود (هیلر و همکاران، ۲۰۰۲). مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح این مسئله بصورت زیر می‌باشد (آذر، ۱۳۸۳):

$$\text{Min (Max) } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} x_{ij} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\text{st: } \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, n$$

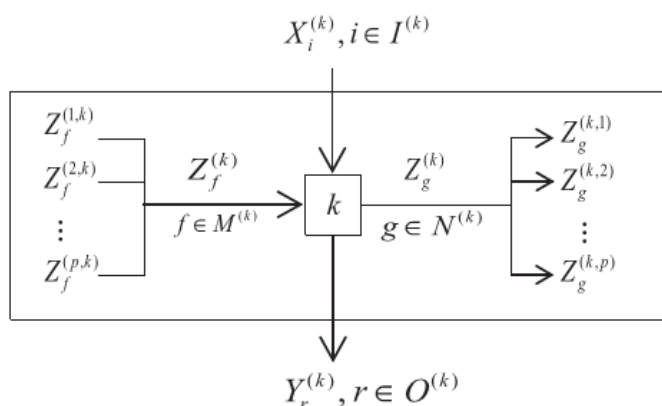
$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \text{for } j = 1, 2, \dots, n$$

$$x_{ij} = 0 \text{ or } 1$$

اگر $x_{ij} = 1$ یعنی شغل i ام به فرد j ام واگذار شود و در غیر این صورت: $x_{ij} = 0$

تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای

برای محاسبه کارایی سیستم‌های پیچیده با ساختارهای شبکه‌ای، مدل‌های تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای مورد نیاز است. در دنیای واقعی واحدهای تصمیم‌گیری وجود دارند که در آنها فرآیند تولید را می‌توان به صورت یک فرآیند دو مرحله‌ای یا چند مرحله‌ای در نظر گرفت. مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها با واحدهای تصمیم‌گیری به مانند جعبه سیاه رفتار می‌کنند. یعنی ورودی‌ها برای تولید خروجی‌ها به کار می‌روند، بدون اینکه توجهی به ارتباطات بخش‌های داخلی واحدها شود. شکل ۱ ساختار داخلی یک واحد تصمیم‌گیری در مدل شبکه‌ای را نشان می‌دهد (کائو، ۲۰۱۴).



شکل ۱. ساختار درونی یک واحد تصمیم‌گیری

شکل فوق، سیستمی متشکل از p فرآیند است که $X_{ij}^{(k)}$ و $Y_{rj}^{(k)}$ را به عنوان i امین ورودی تأمین شده از خارج، $i \in I^{(k)}$ نشان می‌دهد، به طوری که $I^{(k)}$ مجموعه ورودی‌های بیرونی مورد استفاده توسط فرآیند k است و r امین خروجی نهایی سیستم، $r \in O^{(k)}$ به طوری که $O^{(k)}$ مجموعه خروجی‌های نهایی تولید شده توسط فرآیند k ، $k=1, \dots, p$ - به ترتیب از i امین DMU است. مجموع $X_{ij}^{(k)}$ و $Y_{rj}^{(k)}$ برای تمامی فرآیندهای p ، به ترتیب برابر است با ورودی سیستم، X_{ij} و خروجی سیستم، Y_{rj} ، به عبارتی: $\sum_{k=1}^p X_{ij}^{(k)} = X_{ij}$ و $\sum_{k=1}^p Y_{rj}^{(k)} = Y_{rj}$. همچنین، $Z_{fj}^{(a,k)}$ امین محصول میانی تولید شده توسط فرآیند a را نشان می‌دهد، $f \in M^{(k)}$ ، به طوری که $M^{(k)}$ مجموعه محصولات میانی مورد استفاده توسط فرآیند k است. $Z_{gj}^{(k,b)}$ امین محصول میانی استفاده شده توسط فرآیند b را نشان دهد، $g \in N^{(k)}$ ، به طوری که $N^{(k)}$ مجموعه محصولات میانی تولید شده توسط فرآیند k است. مشابه با محصول میانی f تولید شده توسط فرآیندهای مختلف برای فرآیند k می‌توان به صورت مجموع $\sum_{a=1}^p Z_{fj}^{(a,k)} = Z_{fj}^{(k)}$ در نظر گرفت. همین‌طور، مشابه با محصول میانی g تولید شده توسط فرآیندهای مختلف برای فرآیند k می‌توان به صورت مجموع $\sum_{b=1}^p Z_{gj}^{(b,k)} = Z_{gj}^{(k)}$ در نظر گرفت (کائو، ۲۰۱۴).

با در نظر گرفتن کلی‌ترین حالت به طوری که فناوری تمامی فرآیندهای مجاز، متفاوت باشند، مجموعه احتمال تولید با ساختار شبکه کلی شکل ۱ به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود (یانگ و لیو، ۲۰۱۲):

$$\begin{aligned}
 T = \{(x, y, z) \mid & \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(k)} X_{ij}^{(k)} \leq x_i, i \\
 & \in I^{(k)}, \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(k)} Y_{rj}^{(k)} \geq y_r, r \\
 & \in O^{(k)}, \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(k)} Z_{fj}^{(k)} \leq z_f, f \\
 & \in M^{(k)}, \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(k)} Z_{gj}^{(k)} \geq z_g, g \in N^{(k)}, \lambda_j^{(k)} \geq 0, j \\
 & = 1, \dots, n, k = 1, \dots, p
 \end{aligned}$$

رابطه ۲)

مدل ورودی محور برای سنجش کارایی سیستم می‌تواند به صورت رابطه ۳ باشد:

$$\begin{aligned}
 \min. \theta & \\
 s. t. \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(k)} X_{ij}^{(k)} + s_i^{- (k)} &= \theta X_{i0}^{(k)}, i \in I^{(k)}, k = 1, \dots, p \\
 \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(k)} Y_{rj}^{(k)} - s_r^{+ (k)} &= Y_{r0}^{(k)}, r \in O^{(k)}, k = 1, \dots, p \\
 \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(k)} Z_{fj}^{(k)} + s_f^{o (k)} &= Z_{f0}^{(k)}, f \in M^{(k)}, k = 1, \dots, p \\
 \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(k)} Z_{gj}^{(k)} - s_g^{o (k)} &= Z_{g0}^{(k)}, g \in N^{(k)}, k = 1, \dots, p \\
 s_i^{- (k)}, s_r^{+ (k)}, s_f^{o (k)}, s_g^{o (k)}, \lambda_j^{(k)} &\geq 0, i \in I^{(k)}, r \in O^{(k)}, f \in M^{(k)}, g \\
 &\in N^{(k)}, j = 1, \dots, n, k = 1, \dots, p,
 \end{aligned}$$

رابطه ۳)

به طوری که از عدد غیر ارشمیدسی ε در تابع هدف برای ساده‌تر شدن عبارت چشم‌پوشی شده است (فارل و گرسکوپف، ۲۰۰۰).

برای سنجش کارایی خروجی محور، θ از شرط اول حذف می‌شود و متغیر ϕ به $Y_{r0}^{(k)}$ در شرط دوم اضافه می‌شود، با تغییر تابع هدف به $\max \phi$ امتیاز کارایی $1/\phi$ می‌شود. هنگامی که بازده به مقیاس هر فرآیند متغیر باشد، آنگاه تحدب شرط $\sum_{j=1}^n \lambda_j^{(k)}$ ، $k = 1, \dots, p$ اضافه می‌شود. کارایی فرآیند k ، $\theta^{(k)}$ ، با تغییر تابع هدف در مدل (۳) به $\min \sum_{k=1}^p \theta^{(k)}$ بدست می‌آید در صورتی که عبارت سمت راست از شرط اول با $\theta^{(k)} X_{i0}^{(k)}$ جایگزین شود (فارل و گرسکویف، ۲۰۰۰).

راه دیگر محاسبه کارایی سیستم، پیدا کردن ضرایب u ، v ، w و \hat{w} است که موجب تولید حداکثر کارایی تحت شرایطی که مجموع خروجی‌ها کوچکتر و یا برابر با ورودی همه فرآیندهاست، می‌شود (طبق رابطه ۴) (چن و همکاران، ۲۰۱۳):

$$E_0^S = \max. \sum_{r=1}^s u_r Y_{r0} / \sum_{i=1}^m v_i X_{i0} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

$$s.t. \sum_{r \in O^{(k)}} u_r^{(k)} Y_{rj}^{(k)} + \sum_{g \in N^{(k)}} \hat{w}_g^{(k)} Z_{gj}^{(k)} - \sum_{i \in I^{(k)}} v_i^{(k)} X_{ij}^{(k)} - \sum_{f \in M^{(k)}} w_f^{(k)} Z_{fj}^{(k)} \leq 0, j = 1, \dots, n, k = 1, \dots, p$$

$$u_r^{(k)}, v_i^{(k)}, w_f^{(k)}, \hat{w}_g^{(k)} \geq 0, r \in O^{(k)}, i \in I^{(k)}, f \in M^{(k)}, g \in N^{(k)}, k = 1, \dots, p$$

فرم کسری تابع هدف را می‌توان با مساوی قرار دادن مخارج برابر با یک، به عنوان شرط، و استفاده از صورت کسر به عنوان تابع هدف، به صورت خطی درآورد. مدل خطی شده، مکمل مدل (۳) است.

اگر ورودی $X_c^{(k)}$ از فرآیند k همان محصول میانی، $Z_c^{(k)}$ باشد، پس باید $v_c^{(k)}$ (یا $w_c^{(k)}$) ضرایب یکسان در فرمول بالا داشته باشند. همین مفهوم در مورد خروجی نیز به کار می‌رود. کارایی فرآیند k نسبت تجمیع خروجی به ورودی است (طبق رابطه ۵) (چن و همکاران، ۲۰۱۳):

رابطه (۵)

$$E_0^{(k)} = \left(\sum_{r \in O^{(k)}} u_r^{(k)} Y_{r0}^{(k)} + \sum_{g \in N^{(k)}} \widehat{w}_g^{(k)} Z_{g0}^{(k)} \right) / \left(\sum_{i \in I^{(k)}} v_i^{(k)} X_{i0}^{(k)} + \sum_{f \in M^{(k)}} w_f^{(k)} Z_{fj}^{(k)} \right)$$

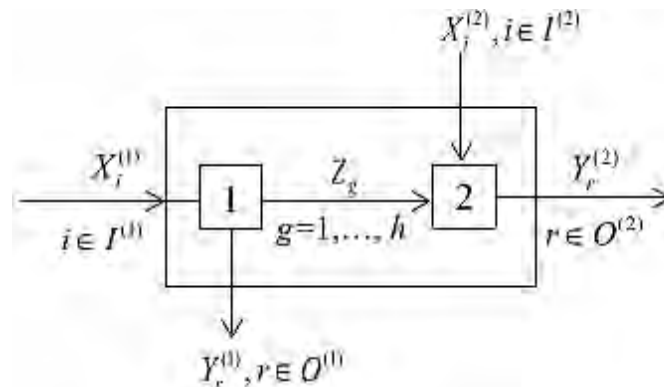
انواع ساختار سیستم‌های شبکه‌ای

سیستم‌هایی شبکه‌ای، ساختارهای مختلفی دارند. هر مدل سنجش کارایی در تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای با یک ساختار در ارتباط است. کاربرد NDEA در مسائل دنیای واقعی تاکنون منجر به ارائه مدل‌هایی برای ساختارهایی از جمله: سری^۱، موازی^۲، دو مرحله‌ای پایه^۳، دو مرحله‌ای کلی^۴، ترکیبی^۵، سلسله‌مراتبی^۶ و دینامیک^۷ شده است (کائو، ۲۰۱۴). با توجه به اینکه این پژوهش بر روی زنجیره تأمین سبز دو مرحله‌ای مطالعه می‌کند، ساختار دو مرحله‌ای کلی در ادامه توضیح داده می‌شود.

ساختار دو مرحله‌ای کلی

این نوع ساختار که به فراوانی در مقالات دیده می‌شود، یک ساختار پایه دو مرحله‌ای است که برای اولین بار جهت سنجش کارایی نیروهای ارتش آمریکا توسط چارنس و همکاران در سال ۱۹۸۶ بررسی شد. ساختار دو مرحله‌ای کلی که در شکل ۲ نشان داده شده است، به هر دو مرحله اجازه مصرف ورودی‌های بیرونی که از خارج تأمین می‌شوند را برای تولید محصول نهایی می‌دهد (پرماچاندر و همکاران، ۲۰۱۲):

1. Series
2. Parallel
3. Basic Two-Stage
4. General Two-Stage
5. Mixed
6. Hierarchical
7. Dynamic



شکل ۲. ساختار دو مرحله‌ای کلی

مفاهیم مدارهای الکتریکی

اتصالات درونی دو یا چند عنصر ساده الکترونیکی یک مدار یا یک شبکه الکتریکی به وجود می‌آورد. اگر شبکه حداقل دارای یک مسیر بسته باشد آن را یک مدار الکتریکی می‌نامند (نیلسون و ریدل، ۲۰۱۱).

در این پژوهش از برخی مفاهیم موجود در مدارهای الکتریکی بطور خاص استفاده می‌گردد که در ادامه بطور مختصر به توضیح آنها پرداخته می‌شود:

قانون اهم

قانون اهم که به نام کاشف آن جرج اهم نام‌گذاری شده است، بیان می‌کند که نسبت اختلاف پتانسیل (یا افت ولتاژ) بین دو سر یک‌هادی (و مقاومت) به جریان عبور کننده از آن به شرطی که دما ثابت بماند، مقدار ثابتی برابر با $R=V/I$ است که در آن V ولتاژ؛ بر حسب ولت و I جریان؛ بر حسب آمپر است. این معادله منجر به یک ثابت نسبی R بر حسب اهم می‌شود که مقاومت الکتریکی آن عنصر نامیده می‌شود (نیلسون و ریدل، ۲۰۱۱).

قانون‌های مداری کیرشهف

قانون‌های مداری کیرشهف، شامل دو بخش است (کوه و دسور، ۱۳۹۰):

۱) قانون جریان کیرشهف^۱: جمع جبری جریان‌هایی که به یک گره وارد می‌شود یا از آن خارج می‌شوند، صفر است. این قانون به قانون KCL نیز معروف است.

۲) قانون ولتاژ کیرشهف^۲: در هر حلقه یا هر مدار بسته، مجموع جبری اختلاف پتانسیل در عنصرهای مدار، صفر است. به این قانون KVL گفته می‌شود.

مدار تقسیم‌کننده ولتاژ

مدار تقسیم‌کننده ولتاژ از ترکیب یک منبع ولتاژ و مقاومت‌های سری تشکیل شده است. برای بدست آوردن ولتاژ هر یک از مقاومت‌ها از رابطه ۶ استفاده می‌شود (درف و سووبودا، ۲۰۱۴):

$$V_i = \frac{R_i}{\sum_j R_j} V_S \quad \text{رابطه ۶}$$

طبق معادله فوق، در یک مدار تقسیم‌کننده ولتاژ، بیشترین ولتاژ مربوط به مقاومتی است که دارای مقدار مقاومت بیشتری باشد. در شکل ۳ مدار تقسیم‌کننده ولتاژ نشان داده شده است.



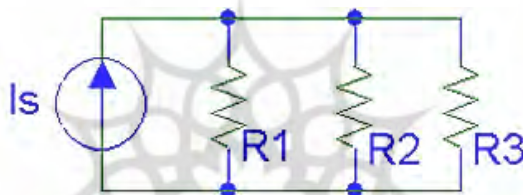
1. Kirchoff's Current Law
1. Kirchoff's Voltage Law

مدار تقسیم‌کننده جریان

مدار تقسیم‌کننده جریان از ترکیب یک منبع جریان و مقاومت‌های موازی تشکیل شده است. برای بدست آوردن جریان هر یک از مقاومت‌ها از رابطه ۷ استفاده می‌شود (درف و سووودا، ۲۰۱۴):

$$I_i = \frac{I_s}{R_i} \left(\sum_j 1/R_j \right)^{-1} \quad \text{رابطه ۷}$$

طبق معادله فوق، در یک مدار تقسیم‌کننده جریان، بیشترین جریان از مقاومتی عبور می‌کند که دارای مقدار مقاومت کمتری باشد. در شکل ۴ مدار تقسیم‌کننده جریان نشان داده شده است.



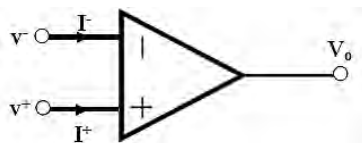
شکل ۴. مدار تقسیم‌کننده جریان

آپ‌امپ^۱

تقویت‌کننده‌های عملیاتی یا آپ‌امپ‌ها عناصری سه سر با مقاومت ورودی بالا، مقاومت خروجی پایین و بهره ولتاژ بزرگ می‌باشند که نکات زیر بین ترمینال‌های آن برقرار است (درف و سووودا، ۲۰۱۴):

- جریان وارد شونده به هر سر ورودی آپ‌امپ ایده‌آل برابر صفر است.
- اختلاف پتانسیل میان سرهای ورودی آپ‌امپ ایده‌آل برابر صفر است.
- جریان خروجی آپ‌امپ صفر نمی‌باشد.

یک آپ‌امپ ایده‌آل در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. آپ‌امپ ایده‌آل

• مروری بر مطالعات انجام شده

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، تاکنون مسئله تخصیص تأمین‌کننده به تولیدکننده بر اساس NDEA در هیچ نوع زنجیره تأمین مشاهده نگردیده است. بنابراین، پژوهش حاضر هم از حیث نوع مسئله و هم از حیث روش حل این مسئله که استفاده از تکنیک مدارهای الکتریکی است در نوع خود بدیع می‌باشد^۱. از این رو، مرور اجمالی خواهیم داشت بر استفاده از رویکرد NDEA در مطالعات مختلف صورت گرفته:

تحقیقات اولیه در مورد تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای به مطالعات تحقیقاتی فار و ویتاگر (۱۹۹۵) برمی‌گردد. این ایده اولیه توسط محققان دیگری مورد بررسی و پیگیری قرار گرفت. برای اولین بار، فارل و گرسکوپف (۲۰۰۰) مقاله‌ای تحت عنوان «تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای» را ارائه نمودند که در آن اهمیت تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای خاطر نشان شده بود. کاستلی و همکاران (۲۰۰۱) مقاله‌ای تحت عنوان «مدل‌های تحت تحلیل پوششی داده‌ها برای ارزیابی کارایی واحدهای معین و وابسته» ارائه کردند. در این پژوهش، مسئله ارزیابی کارایی مجموعه زیرواحدهای تصمیم‌گیری معین و به هم‌وابسته که واحدهای تصمیم‌گیری بزرگتری می‌سازند، مورد بررسی قرار گرفت. لويس و سکستون (۲۰۰۳) روش تحلیل پوششی داده‌های دو مرحله‌ای را برای اندازه‌گیری کارایی واحدهایی که در دو مرحله تولید می‌کنند، ارائه کردند. سپس در سال ۲۰۰۴، مقاله‌ای تحت عنوان «تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای: تحلیل کارایی سازمان‌ها با ساختار درونی پیچیده» را ارائه نمودند؛ مدل پیشنهادی آنها در این مقاله واحدهایی شامل یک شبکه از زیرواحدهای مرتبط می‌باشد که در آن برخی از زیرواحدها، منابعی را برای دیگر زیرواحدها تولید و برخی دیگر از منابع تولید

۱- خاتمی و همکاران (۱۳۹۰) استفاده از تکنیک مدارهای الکتریکی را در مسئله کوتاهترین مسیر؛ آذر و همکاران (۱۳۹۶) استفاده از تکنیک مدارهای الکتریکی را در مسئله تخصیص با ورودی‌ها و خروجی‌های چندگانه ناهمگن بکار بردند.

شده، توسط دیگر زیر واحدها مصرف می‌شوند. آنها مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای را برای ماهیت خروجی و ورودی فرموله نمودند. کاستلی و همکاران (۲۰۰۴) مقاله‌ای به منظور ارزیابی کارایی واحدهای سازمان یافته و سلسله مراتبی ارائه نمودند. در همین سال، چن و زو مدلی را بر اساس NDEA در زنجیره تأمین ارائه نمودند که قادر بود به طور همزمان کارایی دو مرحله را در یک بار اجرای مدل بدست آورد. لیانگ و همکاران (۲۰۰۶)، برای ساختار دو مرحله‌ای کلی که در شکل ۲ نشان داده شد، با خریدار و فروشنده در زنجیره‌ی تأمین به شکل دو فرآیند برخورد کردند و یک مدل مجموع کارایی برای ماکزیم کردن میانگین کارایی دو فرآیند هنگامی که رابطه‌ی مشترک دارند، ارائه دادند. فانگ و ژانگ (۲۰۰۸) مدلی مشابه با مدل لیانگ پیشنهاد دادند که به برخی از ورودی‌ها اجازه می‌داد تا میان دو فرآیند اختصاص یابند. مقاله «تجزیه کارایی در تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای: یک مدل واقعی» توسط کائو (۲۰۰۹) ارائه گردید. در این مقاله هر سیستم شبکه‌ای با استفاده از فرآیندهای مجازی به یک سیستم سری تبدیل می‌شود که هر مرحله از این سیستم سری شامل ساختار موازی است؛ بدین ترتیب براساس ساختارهای سری و موازی، کارایی سیستم تولید به کارایی‌های مراحل سری و ناکارایی‌های هر مرحله این سری، به مجموع ناکارایی‌های فرآیندهای جزء که به صورت موازی به همدیگر متصل شده‌اند، تقسیم می‌شود. کوک و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی و اندازه‌گیری عملکرد ساختارهای دو مرحله‌ای توسط DEA پرداختند و دیدگاه‌های خود را برای تحقیقات آتی ارائه دادند. همچنین، آنها در همان سال با استفاده از تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای به تجزیه کارایی فرآیندهای چند مرحله‌ای واحدهای تصمیم‌گیری در زنجیره تأمین که توسط روش‌های سنتی قابل اجرا نبود پرداختند. چن و یان (۲۰۱۱) از این روش برای طراحی و ارزیابی عملیات زنجیره تأمین چند خودروسازی استفاده کردند. شاخص‌های انتخاب شده در این پژوهش صرفاً از نوع مالی و از سطح عملیاتی بود. چو و همکاران (۲۰۱۲) به ارائه یک مدل برای محاسبه کارایی زنجیره تأمین دو مرحله‌ای که در آن ورودی و خروجی نامطلوب و غیرقابل کنترل وجود داشت، پرداختند. این مدل شکل تغییر یافته مدل چن و زو بود. لوزانو و همکاران (۲۰۱۳) یک رویکرد NDEA برای حل مشکل

مدل‌سازی و ارزیابی مقایسه‌ای عملکرد فرودگاه‌ها با توجه به خروجی‌های نادقیق و نامطلوب ارائه دادند. آنها نشان دادند که رویکرد شبکه‌ای پیشنهاد شده برای فرآیندهای چند مرحله‌ای قدرت افتراق بیشتری از نقطه مقابل خود یعنی فرآیندهای تک مرحله‌ای دارد، همچنین کشف ناکارآمدی بیشتر و فراهم آوردن نتایج معتبرتر از خصوصیات این رویکرد است. میرهدایتیان و همکاران (۲۰۱۴) مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای را برای ارزیابی عملکرد ۱۰ زنجیره تأمین سبز در ایران بکار گرفتند. آنها با در نظر گرفتن فرآیندهای میانی و ورودی و خروجی - های مطلوب و نامطلوب و نیز داده‌های غیرقطعی، مدل NDEA خود را بر مبنای منطق فازی در زنجیره تأمین سبز ارائه دادند. خداکرمی و همکاران (۲۰۱۵) مدل تحلیل پوششی داده‌های دو مرحله‌ای مجزایی را توسعه دادند. آنها مدل پیشنهادی خود را به منظور ارزیابی ثبات و پایداری در مدیریت زنجیره تأمین بکار بردند. توانا و همکاران (۲۰۱۶) یک مدل تحلیل پوششی داده‌های دو مرحله‌ای برای اندازه‌گیری عملکرد زنجیره تأمین سه سطحی ارائه دادند. مدل پیشنهادی آنها می‌تواند هم برای فرض بازدهی متغیر نسبت به مقیاس و هم بازدهی ثابت نسبت به مقیاس استفاده شود.

روش پژوهش

روش‌شناسی این پژوهش بر مبنای شناسایی، تعریف و تبیین یک مدل برنامه‌ریزی خطی جدید به منظور طراحی زنجیره تأمین سبز دو مرحله‌ای بر اساس ماکزیمم کارایی و نیز توسعه دانش کاربردی در این زمینه است که برای گردآوری اطلاعات پژوهش از روش کتابخانه‌ای استفاده شده است. در ادامه، نحوه به‌دست آمدن مدل برنامه‌ریزی خطی پیشنهادی با استفاده از قوانین حاکم بر مدارهای الکتریکی تشریح می‌شود.

مراحل انجام پژوهش

این پژوهش در طی دو مرحله انجام شده است:

در مرحله آغازین با توجه به هدف پژوهش و امکان دسترسی به اطلاعات، هر یک از سطوح تأمین و تولید به عنوان یک "زیر واحد تصمیم‌گیری"^۱ و نیز کل زنجیره تأمین سبز دو مرحله ای به عنوان "واحد تصمیم‌گیری" در نظر گرفته می‌شوند. سپس، فرآیندها و روابط درونی، محصولات میانی، ورودی و خروجی‌های کمی و کیفی؛ قابل کنترل و غیرقابل کنترل؛ مطلوب و نامطلوب به منظور ارزیابی کارایی هر یک از این سطوح جهت تخصیص بهینه تأمین‌کنندگان به تولیدکنندگان شناسایی و بررسی می‌شوند. در این مرحله به منظور ارزیابی و کمی کردن داده‌های کیفی از طیف لیکرت استفاده شده است.

در مرحله دوم، بر اساس مفاهیم تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای به تحلیل توأمان هر دو زیر واحد تصمیم‌گیری در قالب یک واحد تصمیم‌گیری دو مرحله‌ای پرداخته می‌شود. همچنین، بر اساس مفهوم توان الکتریکی که می‌توان آن را با مفهوم کارایی در تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای معادل در نظر گرفت، تابع هدف مدل پیشنهادی بدین طریق بدست می‌آید که^۲: به ازای هر ورودی به تأمین‌کننده، X_i^S معادل آن را به شکل یک عنصر مقاومتی مانند R_i^S ، به ازای هر ورودی به تولیدکننده، X_j^P معادل آن را به شکل یک عنصر مقاومتی مانند R_j^P ، به ازای هر خروجی میانی از تأمین‌کننده، Z_j^S معادل آن را به شکل یک عنصر مقاومتی مانند $R_j'^S$ ، به ازای هر ورودی میانی به تولیدکننده، Z_j^P معادل آن را به شکل یک عنصر مقاومتی مانند $R_j'^P$ ، به ازای هر خروجی مطلوب از تأمین‌کننده، $Y_{D_0}^S$ معادل آن را به شکل یک عنصر مقاومتی مانند $R_{D_0}^S$ ، به ازای هر خروجی مطلوب از تولیدکننده، $Y_{D_m}^P$ معادل آن را به شکل یک عنصر مقاومتی مانند $R_{D_m}^P$ ، به ازای هر خروجی نامطلوب از تأمین‌کننده، $Y_{UD_t}^S$ معادل آن را به شکل یک عنصر مقاومتی مانند $R_{UD_t}^S$ و به ازای هر خروجی

1. Decision Making Sub-Unit

۲. در اینجا به دلیل حجم زیاد روابط و مدارهای الکتریکی مورد استفاده برای استنتاج مدل پیشنهادی، از آوردن آنها صرف نظر شده است.

نامطلوب از تولیدکننده، Y_{UDk}^p ، معادل آن را به شکل یک عنصر مقاومتی مانند R_{UDk}^p در مدارهای الکتریکی با مقدار اهم برابر با هر یک از آن عوامل در نظر می‌گیریم. سپس هر یک از عناصر مقاومتی R_i^s ، R_r^p ، $R_j^{p'}$ و R_{UDt}^s و R_{UDk}^p جداگانه یک بار با مقامت‌های هم‌سطر خود و بار دیگر با مقامت‌های هم‌ستون خود موازی شده و توسط یک منبع جریان ثابت تحریک می‌شود (تشکیل مدار تقسیم جریان). همچنین، هر یک از عناصر مقاومتی $R_j^{s'}$ ، $R_{D_o}^s$ و $R_{D_m}^p$ جداگانه یک بار با مقامت‌های هم‌سطر خود و بار دیگر با مقامت‌های هم‌ستون خود سری شده و توسط یک منبع ولتاژ ثابت تحریک می‌گردد (تشکیل مدار تقسیم ولتاژ). آنگاه با استفاده از قوانین اهم، KVL و KCL و غیره مقدار جریان هر یک از مقامت‌های R_i^s ، R_r^p ، $R_j^{p'}$ و R_{UDt}^s و R_{UDk}^p بر حسب آمپر و مقدار ولتاژ هر یک از مقامت‌های $R_j^{s'}$ ، $R_{D_o}^s$ و $R_{D_m}^p$ بر حسب ولت محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از مدارهای آپ‌امپ، مجموع ولتاژهای هر مقاومت در هر دو مدار تقسیم ولتاژ سطری و ستونی و نیز مجموع جریان‌های هر مقاومت در هر دو مدار تقسیم جریان سطری و ستونی محاسبه می‌گردد. طبق رابطه توان الکتریکی $P = VI$ ، موقعی که جریان و ولتاژ دارای بیشترین مقدار باشند، توان نیز دارای بیشترین مقدار خود خواهد بود. در یک مدار تقسیم‌کننده جریان، بیشترین جریان از مقاومتی عبور می‌کند که دارای مقدار مقاومت (برحسب اهم) کمتری و یا به عبارتی دارای مقدار ورودی یا خروجی نامطلوب کمتری در مسئله اصلی باشد. همچنین، در یک مدار تقسیم‌کننده ولتاژ، بیشترین ولتاژ مربوط به مقاومتی است که دارای مقدار مقاومت (برحسب اهم) بیشتری و یا به عبارتی دارای مقدار خروجی مطلوب بیشتری در مسئله اصلی باشد.

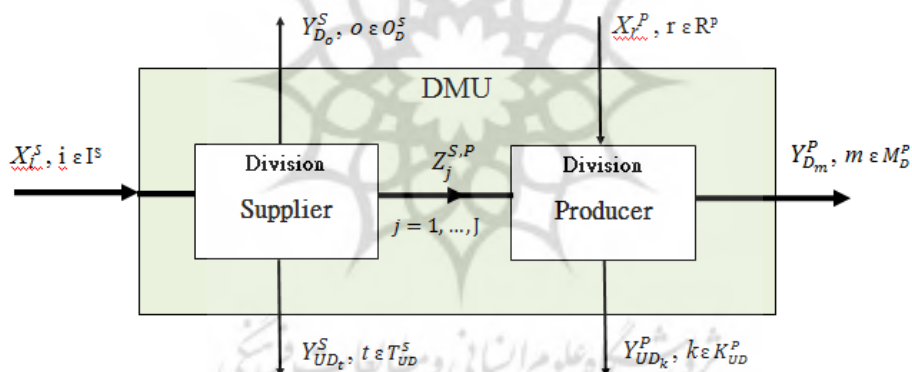
طبق رابطه کارایی در NDEA که از نسبت خروجی به ورودی بدست می‌آید، موقعی می‌توان گفت یک واحد تصمیم‌گیری بطور قطع دارای بیشترین کارایی نسبت به دیگر واحدهاست که خروجی‌های مطلوب آن واحد و نیز خروجی‌های میانی زیرواحدها دارای بیشترین مقدار و ورودی‌ها و خروجی‌های نامطلوب آن واحد و نیز ورودی‌های میانی زیرواحدها دارای کمترین مقدار نسبت به دیگر واحدها باشد. بنابراین، با ماکزیمم کردن تابع هدف مسئله تخصیص خطی که با معادلات حاصل از تشکیل مدار تقسیم جریان، تقسیم ولتاژ

و مدارهای آپ‌امپ بدست می‌آید، می‌توان به حل بهینه تخصیص تأمین‌کنندگان به تولیدکنندگان جهت طراحی زنجیره تأمین سبز دو مرحله‌ای با ماکزیمم کارایی دست یافت.

مدل برنامه‌ریزی خطی پیشنهادی

ساختار درونی واحدهای تصمیم‌گیرنده (DMU) می‌تواند دو مرحله‌ای باشد، به طوری که مرحله اول با مصرف ورودی‌هایش، خروجی تولید کند و خروجی‌هایش به عنوان تولیدات میانی DMU، ورودی‌های عضو بعدی قرار گیرد و در نهایت عضو دوم DMU، خروجی را تولید می‌کند (صانعی و ممی‌زاده، ۱۳۹۱).

با توجه به مطالعات پیشین، فرض کنید قصد تشکیل N زنجیره تأمین سبز دو مرحله‌ای شامل تأمین‌کننده و تولیدکننده را مطابق با شکل ۶ داریم:



شکل ۶. ساختار دو مرحله‌ای زنجیره تأمین سبز

در شکل فوق، علامت‌های مدل عبارتند از:

i: علامت ورودی در تأمین‌کننده ($i=1,2,\dots,I$)؛

o: علامت خروجی مطلوب در تأمین‌کننده ($o=1,2,\dots,O$)؛

t: علامت خروجی نامطلوب در تأمین‌کننده ($t=1,2,\dots,T$)؛

۱. چه ورودی قابل کنترل و چه غیرقابل کنترل باشد، در تأمین‌کننده علامت‌شان یکسان است.

j : علامت میانجی ($j=1,2,\dots,J$)؛

r : علامت ورودی در تولید کننده ($r=1,2,\dots,R$)؛^۱

m : علامت خروجی مطلوب در تولید کننده ($m=1,2,\dots,M$)؛

k : علامت خروجی نامطلوب در تولید کننده ($k=1,2,\dots,K$)؛

n : علامت زنجیره تأمین سبز ($n=1,2,\dots,N$)؛

s : علامت تأمین کننده ($s=1,2,\dots,N$)؛

p : علامت تولید کننده ($p=1,2,\dots,N$).

پارامترهای مدل عبارتند از:

X_i^s : مقدار i امین ورودی به s امین تأمین کننده؛

X_r^p : مقدار r امین ورودی به p امین تولید کننده؛

$Z_j^{s,p}$: مقدار j امین میانجی از s امین تأمین کننده به p امین تولید کننده؛

$Y_{D_o}^s$: مقدار O امین خروجی مطلوب از s امین تأمین کننده؛

$Y_{D_m}^p$: مقدار m امین خروجی مطلوب از p امین تولید کننده؛

$Y_{UD_t}^s$: مقدار t امین خروجی نامطلوب از s امین تأمین کننده؛

$Y_{UD_k}^p$: مقدار k امین خروجی نامطلوب از p امین تولید کننده؛

متغیرهای مدل عبارتند از:

w_{sp} : اگر s امین تأمین کننده به p امین تولید کننده واگذار شود مقدار آن یک و در غیر

این صورت مقدار آن صفر خواهد شد.

حال با توجه به روش انجام پژوهش، مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح پیشنهادی برای

تخصیص بهینه N تأمین کننده به N تولید کننده بر اساس ماکزیمم کارایی جهت طراحی N

زنجیره تأمین سبز دومرحله‌ای با در نظر گرفتن $I+R$ ورودی، J میانجی، $O+M$ خروجی مطلوب

و $T+K$ خروجی نامطلوب، مطابق است با رابطه ۸:

۱- هم برای ورودی‌های قابل کنترل در تولید کننده و هم ورودی‌های غیرقابل کنترل، علامت ورودی یکسان در نظر گرفته می‌شود.

Max Z =

رابطه ۸)

$$\begin{aligned}
& \sum_{s=1}^N \sum_{p=1}^N \left(\sum_{i=1}^I \frac{1}{X_{spi}^s} \left[\left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{X_{sni}^s} \right)^{-1} + \left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{X_{npi}^s} \right)^{-1} \right] \right. \\
& \quad + \sum_{o=1}^O Y_{Dspo}^s \left[\left(\sum_{n=1}^N Y_{Dсно}^s \right)^{-1} + \left(\sum_{n=1}^N Y_{Dnpo}^s \right)^{-1} \right] \\
& \quad + \sum_{t=1}^T \frac{1}{Y_{UDspt}^s} \left[\frac{1}{\sum_{n=1}^N (Y_{UDsnt}^s)^{-1}} + \frac{1}{\sum_{n=1}^N (Y_{UDnpt}^s)^{-1}} \right] \\
& \quad + \sum_{j=1}^J \left[\frac{1}{Z_{spj}^{s,p}} \left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{Z_{npj}^{s,p}} \right)^{-1} + Z_{spj}^{s,p} \left(\sum_{n=1}^N Z_{snj}^{s,p} \right)^{-1} \right] \\
& \quad + \sum_{r=1}^R \frac{1}{X_{spr}^p} \left[\left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{X_{snr}^p} \right)^{-1} + \left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{X_{npr}^p} \right)^{-1} \right] \\
& \quad + \sum_{m=1}^M Y_{Dspm}^p \left[\left(\sum_{n=1}^N Y_{Dsnm}^p \right)^{-1} + \left(\sum_{n=1}^N Y_{Dnpm}^p \right)^{-1} \right] \\
& \quad \left. + \sum_{k=1}^K \frac{1}{Y_{UDspk}^p} \left[\frac{1}{\sum_{n=1}^N (Y_{UDsnk}^p)^{-1}} + \frac{1}{\sum_{n=1}^N (Y_{UDnpk}^p)^{-1}} \right] \right) w_{sp}
\end{aligned}$$

St:

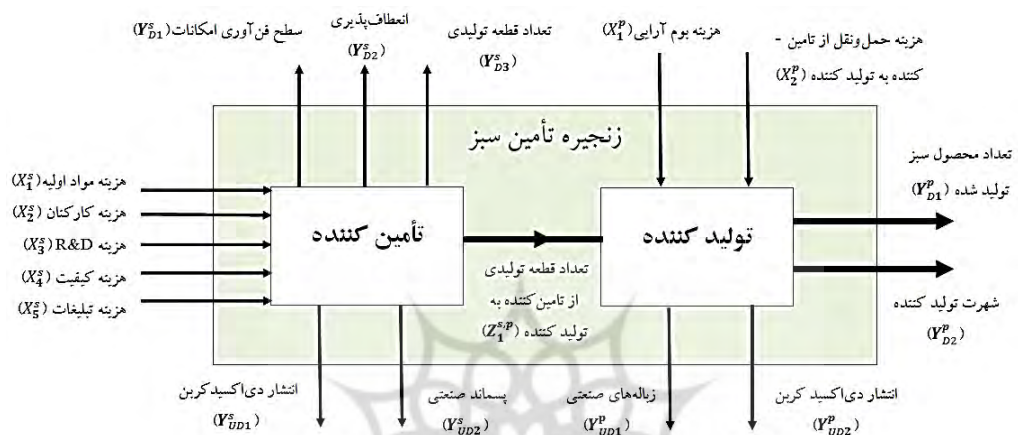
$$\sum_{p=1}^N w_{sp} = 1 \quad \text{for } s = 1, 2, \dots, N$$

$$\sum_{s=1}^N w_{sp} = 1 \quad \text{for } p = 1, 2, \dots, N$$

$$w_{sp} = 0 \text{ or } 1$$

مثال کاربردی

در این بخش جهت کاربرد مدل پیشنهادی در دنیای واقعی، مثالی کاربردی از زنجیره تأمین سبز دومرحله‌ای با ۱۷ پارامتر مطابق با شکل ۷ طراحی شده و داده‌ها و اطلاعات پارامترها از مقالات کوک و همکاران (۲۰۱۰) و میرهدایتیان و همکاران (۲۰۱۴) جمع‌آوری شده است.



شکل ۷. مثالی از زنجیره تأمین سبز دو مرحله‌ای

حال، فرض کنید ۳ تأمین کننده مشابه و برابر از نظر تعداد ورودی، محصول میانی و خروجی ولی با داده‌های متفاوت قرار است به ۳ تولیدکننده مشابه و برابر از نظر تعداد ورودی، محصول میانی و خروجی ولی با داده‌های متفاوت جهت تشکیل زنجیره تأمین سبز مطابق با شکل فوق، تخصیص یابد. جدول ۱، مقدار پارامترهای مربوط به هر یک از ۳ تأمین کننده در صورتی که هر کدام از آنها با تولیدکننده شماره ۱ تشکیل زنجیره تأمین سبز بدهد را نشان می‌دهد.

جدول ۱. داده‌های مربوط به تأمین‌کنندگان در صورت تخصیص به تولیدکننده شماره ۱، در دوره زمانی یک ساله

تأمین‌کننده	ورودی‌ها					میانجی	خروجی‌های مطلوب			خروجی‌های نامطلوب	
	X_1^s (\$)	X_2^s (\$)	X_3^s (\$)	X_4^s (\$)	X_5^s (\$)	$Z_1^{s,p}$ (قطعه)	Y_{D1}^s (کیفی)	Y_{D2}^s (کیفی)	Y_{D3}^s (قطعه)	Y_{UD1}^s (تن)	Y_{UD2}^s (هزار لیتر)
1	۲۹۰۰۰	۸۵۰۰	۷۵۰۰	۵۵۰۰	۷۹۰۰۰	۳۲۵۰۰۰	۵	۷	۱۱۵۰۰۰	۴۳۰۰۰	۱۶۳۰
2	۳۰۰۰۰	۹۵۰۰	۹۰۰۰	۶۲۰۰	۶۶۰۰۰	۳۵۰۰۰۰	۷	۹	۱۱۳۵۰۰	۳۸۵۰۰	۱۲۵۰
3	۳۱۰۰۰	۹۲۰۰	۸۵۰۰	۵۸۰۰	۷۴۵۰۰	۳۴۰۰۰۰	۷	۵	۱۲۲۰۰۰	۴۵۷۰۰	۱۳۹۰

جدول ۲، مقدار پارامترهای تولیدکننده شماره ۱ در صورت تخصیص به هر یک از ۳ تأمین‌کننده را نشان می‌دهد.

جدول ۲. داده‌های تولیدکننده شماره ۱ در صورت تخصیص به تأمین‌کنندگان مختلف در دوره زمانی یک ساله

تأمین‌کننده	تولیدکننده ۱						
	ورودی‌ها		میانجی	خروجی‌های مطلوب		خروجی‌های نامطلوب	
	X_1^p (\$)	X_2^p (\$)	$Z_1^{s,p}$ (قطعه)	Y_{D1}^p (محصول)	Y_{D3}^p (کیفی)	Y_{UD1}^p (تن)	Y_{UD2}^p (تن)
1	۱۳۰۰۰	۶۵۰۰۰	۳۲۵۰۰۰	۲۱۵۵۰۰	۶	۳۳۰۰۰	۴۰۲۰۰
2	۲۱۰۰۰	۷۲۰۰۰	۳۵۰۰۰۰	۲۰۹۰۰۰	۷	۳۴۵۰۰	۴۳۵۰۰
3	۱۵۵۰۰	۶۱۰۰۰	۳۴۰۰۰۰	۲۰۲۰۰۰	۵	۲۵۷۰۰	۳۹۰۰۰

جدول ۳، مقدار پارامترهای مربوط به هر یک از ۳ تأمین‌کننده در صورتی که هر کدام از آنها با تولیدکننده شماره ۲ تشکیل زنجیره تأمین سبز بدهد را نشان می‌دهد.

جدول ۳. داده‌های مربوط به تأمین‌کنندگان در صورت تخصیص به تولیدکننده شماره ۲، در دوره زمانی یک ساله

تأمین‌کننده	ورودی‌ها					میانجی	خروجی‌های مطلوب			خروجی‌های نامطلوب	
	X_1^s (\$)	X_2^s (\$)	X_3^s (\$)	X_4^s (\$)	X_5^s (\$)	$Z_1^{s,p}$ (قطعه)	Y_{D1}^s (کیفی)	Y_{D2}^s (کیفی)	Y_{D3}^s (قطعه)	Y_{UD1}^s (تن)	Y_{UD2}^s (هزار لیتر)
1	۲۶۰۰۰	۶۳۰۰	۵۵۰۰	۵۰۰۰	۶۸۰۰۰	۳۰۰۰۰۰	۵	۶	۱۴۵۰۰۰	۴۳۰۰۰	۱۴۶۰
2	۲۸۰۰۰	۷۰۰۰	۷۵۰۰	۴۸۰۰	۷۲۵۰۰	۳۰۸۰۰۰	۷	۷	۱۳۳۰۰۰	۳۸۵۰۰	۱۵۰۰
3	۳۰۵۰۰	۸۲۰۰	۶۵۰۰	۴۵۵۰	۷۰۵۰۰	۳۱۴۵۰۰	۶	۸	۱۴۶۰۰۰	۴۵۷۰۰	۱۲۵۰

جدول ۴، مقدار پارامترهای تولیدکننده شماره ۲ در صورت تخصیص به هر یک از ۳ تأمین کننده را نشان می دهد.

جدول ۴. داده های تولیدکننده شماره ۲ در صورت تخصیص به تأمین کنندگان مختلف در دوره زمانی یک ساله

تأمین کننده	تولید کننده ۲						
	ورودی ها		میانجی	خروجی های مطلوب		خروجی های نامطلوب	
	X_1^p (\$)	X_2^p (\$)	$Z_1^{s,p}$ (قطعه)	Y_{D1}^p (محصول)	Y_{D3}^p (کیفی)	Y_{UD1}^p (تن)	Y_{UD2}^p (تن)
1	۲۲۰۰۰	۵۵۰۰۰	۳۰۰۰۰	۲۲۰۵۰۰	۴	۳۷۰۰۰	۳۰۵۰۰
2	۱۹۵۰۰	۵۲۰۰۰	۳۰۸۰۰۰	۲۱۷۰۰۰	۶	۳۱۰۰۰	۳۳۵۰۰
3	۲۰۰۰۰	۶۰۵۰۰	۳۱۴۵۰۰	۲۱۰۰۰۰	۷	۳۳۴۰۰	۳۲۰۰۰

مقدار پارامترهای مربوط به هر یک از ۳ تأمین کننده در صورتی که هر کدام از آنها با تولیدکننده شماره ۳، تشکیل زنجیره تأمین سبز بدهد در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵. داده های مربوط به تأمین کنندگان در صورت تخصیص به تولیدکننده شماره ۳، در دوره زمانی یک ساله

تأمین کننده	ورودی ها					خروجی های مطلوب			خروجی های نامطلوب		
	X_1^s (\$)	X_2^s (\$)	X_3^s (\$)	X_4^s (\$)	X_5^s (\$)	$Z_1^{s,p}$ (قطعه)	Y_{D1}^s (کیفی)	Y_{D2}^s (کیفی)	Y_{D3}^s (قطعه)	Y_{UD1}^s (تن)	Y_{UD2}^s (هزار لیتر)
1	۳۳۸۰۰	۷۲۰۰	۸۵۰۰	۳۵۰۰	۸۲۰۰۰	۳۰۵۰۰۰	۷	۷	۱۲۲۰۰۰	۴۱۰۰۰	۱۱۲۰
2	۳۲۰۰۰	۸۴۰۰	۷۰۰۰	۴۲۰۰	۷۷۰۰۰	۳۳۰۰۰۰	۶	۸	۱۸۵۰۰	۴۲۵۰۰	۱۰۰۰
3	۳۴۵۰۰	۷۵۰۰	۸۰۰۰	۴۰۰۰	۷۹۰۰۰	۳۲۰۰۰۰	۷	۸	۱۲۸۰۰۰	۴۰۲۰۰	۱۰۵۰

جدول ۶، مقدار پارامترهای تولیدکننده شماره ۳ در صورت تخصیص به هر یک از ۳ تأمین کننده را نشان می دهد.

جدول ۶. داده های تولیدکننده شماره ۳ در صورت تخصیص به تأمین کنندگان مختلف در دوره زمانی یک ساله

تأمین کننده	تولید کننده ۳						
	ورودی ها		میانجی	خروجی های مطلوب		خروجی های نامطلوب	
	X_1^p (\$)	X_2^p (\$)	$Z_1^{s,p}$ (قطعه)	Y_{D1}^p (محصول)	Y_{D3}^p (کیفی)	Y_{UD1}^p (تن)	Y_{UD2}^p (تن)

1	۱۶۰۰۰	۶۹۰۰۰	۳۰۵۰۰۰	۲۴۵۰۰۰	۸	۲۸۰۰۰	۳۷۰۰۰
2	۱۴۵۰۰	۷۰۰۰۰	۳۳۰۰۰۰	۲۲۹۰۰۰	۸	۳۰۵۰۰	۴۰۵۰۰
3	۱۷۵۰۰	۶۷۰۰۰	۳۲۰۰۰۰	۲۳۲۵۰۰	۴	۲۹۰۰۰	۳۸۵۰۰

حال، پس از جای گذاری اعداد جداول فوق در مدل پیشنهادی (رابطه ۸)، مدل برنامه-ریزی خطی عدد صحیح پیشنهادی جهت تخصیص بهینه ۳ تأمین کننده به ۳ تولید کننده با تابع هدف ماکزیمم کارایی طبق رابطه ۹ بدست می آید:

رابطه ۹)

$$\begin{aligned} \text{Max } Z = & 3.673w_{11} + 3.355w_{12} + 4.844w_{13} + 3.756w_{21} \\ & + 2.468w_{22} + 3.433w_{23} + 2.592w_{31} \\ & + 4.680w_{32} + 3.478w_{33} \end{aligned}$$

st:

$$\begin{aligned} w_{11} + w_{12} + w_{13} &= 1 \\ w_{21} + w_{22} + w_{23} &= 1 \\ w_{31} + w_{32} + w_{33} &= 1 \\ w_{11} + w_{21} + w_{31} &= 1 \\ w_{12} + w_{22} + w_{32} &= 1 \\ w_{13} + w_{23} + w_{33} &= 1 \\ w_{ij} &= 0 \text{ or } 1 \end{aligned}$$

با حل مدل فوق، تخصیص بهینه یک به یک تأمین کنندگان به تولید کنندگان طبق جدول ۷ خواهد بود:

جدول ۷. تخصیص بهینه

Solution		
Supplier 1	Assigned to	Producer 3
Supplier 2		Producer 1
Supplier 3		Producer 2

اعتبارسنجی مدل

یکی از روش‌های اعتبارسنجی مدل‌های کمی، مقایسه مدل ریاضی پیشنهادی با مدل‌های ریاضی معتبر و مرسوم در همان زمینه خاص می‌باشد.

در این بخش برای ارزیابی اعتبار مدل برنامه‌ریزی خطی پیشنهادی، ابتدا با استفاده از نرم-افزار MATLAB، مدل برنامه‌ریزی خطی پیشنهادی، مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای

ارائه شده در مقاله لوزانو (۲۰۱۳) و مدل برنامه‌ریزی خطی تخصیص با تابع هدف ماکزیمم برنامه‌نویسی گردید. سپس، مسائل کاربردی متعددی با داده‌ها و ابعاد مختلف، شبیه‌سازی و با استفاده از مدل پیشنهادی حل شد. سرانجام، تمام این مسائل، ابتدا با مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای لوزانو و بعد با مدل برنامه‌ریزی خطی تخصیص با تابع هدف ماکزیمم حل گردید. حال برای بررسی اعتبار مدل پیشنهادی و مقایسه زمان محاسبات (Time CPU) مدل پیشنهادی با مدل مرسوم (ترکیب مدل لوزانو و مدل تخصیص)، نتایج حل برخی از این نوع مسائل کاربردی در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸. مقایسه نتایج حل مسائل با مدل پیشنهادی و مدل مرسوم

اندازه مسئله	تعداد ورودی‌ها، میانجی‌ها، خروجی‌های مطلوب و خروجی‌های نامطلوب تأمین‌کننده و تولیدکننده									میانگین مدت زمان حل مسئله (ثانیه)	جواب نهایی مسئله
	K	M	R	J	T	O	I	N×N			
مقایسه جواب مدل پیشنهادی با مدل مرسوم	مدل مرسوم	مدل پیشنهادی									
جواب‌های بهینه و یکسان	۰/۲۵۸	۰/۰۱۱	۱	۲	۱	۱	۲	۲	۳	۲×۲	
جواب‌های بهینه و یکسان	۰/۷۷۲	۰/۰۲۴	۲	۲	۲	۱	۲	۳	۵	۳×۳	
جواب‌های بهینه و یکسان	۱/۵۴۷	۰/۰۵۵	۲	۴	۳	۲	۱	۲	۴	۴×۴	
جواب‌های بهینه و یکسان	۲/۷۸۵	۰/۰۸۳	۱	۳	۳	۳	۲	۴	۴	۵×۵	
جواب‌های بهینه و یکسان	۴/۰۴۶	۰/۱۶۹	۳	۳	۵	۲	۲	۵	۶	۷×۷	
جواب‌های بهینه و یکسان	۷/۴۲۱	۰/۳۰۳	۳	۴	۵	۱	۳	۶	۸	۹×۹	
جواب‌های بهینه و یکسان	۹/۸۷۳	۰/۳۸۴	۵	۴	۴	۲	۲	۵	۷	۱۰×۱۰	
جواب‌های بهینه و یکسان	۱۴/۰۰۸	۰/۵۷۷	۴	۵	۶	۲	۳	۱۰	۱۱	۱۳×۱۳	
جواب‌های بهینه و یکسان	۲۰/۱۴۷	۰/۸۸۹	۶	۸	۱۰	۳	۴	۱۲	۱۲	۱۵×۱۵	
جواب‌های بهینه و یکسان	۳۵/۷۵۲	۱/۵۵۴	۹	۱۳	۱۷	۴	۴	۱۳	۱۵	۲۰×۲۰	
جواب‌های بهینه و یکسان	۵۷/۸۳۴	۲/۶۳۷	۵	۲۰	۲۲	۳	۵	۱۷	۱۸	۲۵×۲۵	
جواب‌های بهینه و یکسان	۹۱/۱۲۶	۴/۴۰۷	۱۰	۱۵	۲۰	۴	۶	۲۱	۲۳	۳۰×۳۰	

مطابق با نتایج جدول فوق، اعتبار و صحت مدل پیشنهادی پژوهش تأیید می‌شود.

نتیجه‌گیری

در طراحی زنجیره تأمین سبز دو مرحله‌ای علاوه بر توجه به مسائل زیست محیطی و تصمیم‌گیری استراتژیک در راستای ساختار دهی کارآتر و اثربخش‌تر به زنجیره تأمین، انتخاب دقیق و تخصیص کارآمد تأمین‌کننده به تولیدکننده نیز امری ضروری در فضای رقابتی و عملیاتی شرکت‌ها می‌باشد.

در این پژوهش، مدل ریاضی جدیدی بر اساس ترکیب مفاهیم تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای و مدارهای الکتریکی ارائه شد که برای تخصیص بهینه تأمین‌کننده سبز به تولیدکننده سبز به ازای ورودی‌ها، میانجی‌ها و خروجی‌های مطلوب و نامطلوب جهت تشکیل زنجیره تأمین سبز دو مرحله‌ای با ماکزیمم کارایی بکار رفت. مدل پیشنهادی برای حل بیش از ۳۵ مسئله کاربردی در ابعاد مختلف استفاده شد که در تمامی این مسائل، تخصیص بهینه بر اساس ماکزیمم کارایی صورت گرفت. از جمله مزیت‌های عمده این مدل پیشنهادی: ثابت ماندن تعداد متغیرها و محدودیت‌های مدل پیشنهادی، حتی اگر تعداد ورودی‌ها، میانجی‌ها و خروجی‌های مسئله تغییر کند، کاهش محسوس زمان محاسبات مدل پیشنهادی و همگرایی سریعتر به سمت جواب بهینه به خصوص در مسائلی با ابعاد بزرگ است، زیرا برای حل این نوع مسائل به روش‌های مرسوم، ابتدا باید کارایی هر زنجیره تأمین سبزی که از ترکیب یک به یک تأمین‌کننده‌ها به تولیدکننده‌ها بدست می‌آید، توسط چندین مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای سنجیده شود. سپس، مدل برنامه‌ریزی خطی تخصیص با تابع هدف ماکزیمم را به منظور تخصیص بهینه یک به یک تأمین‌کننده‌ها به تولیدکننده‌ها تشکیل داد و آن را حل نمود؛ در حالی که در پژوهش حاضر برای حل این نوع مسائل، فقط از یک مدل برنامه‌ریزی خطی که دقت و اعتبار آن مورد تأیید قرار گرفت به منظور یافتن جواب بهینه استفاده شده است.

منابع

- آذر، عادل؛ (۱۳۸۳). تحقیق در عملیات (مفاهیم و کاربردهای برنامه‌ریزی خطی)، چاپ سوم، تهران، مؤسسه نشر علوم نوین.
- آذر، عادل؛ حسینی، اکرم السادات؛ (۱۳۹۳). طراحی مدل برنامه‌ریزی تولید چندمحصولی در زنجیره تأمین براساس رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی (مطالعه موردی: گروه صنعتی برنز)، فصلنامه مطالعات مدیریت صنعتی، سال دوازدهم، شماره ۳۴، ص ۱۷-۱.
- آذر، عادل؛ محبی، حسین؛ خدیور، آمنه؛ حیدری، عباسعلی؛ (۱۳۹۶). مدل ریاضی جدیدی برای حل مسئله تخصیص با ورودی‌ها و خروجی‌های چندگانه ناهمگن، فصلنامه مدیریت صنعتی، سال نهم، شماره ۱، ص ۱۸-۱.
- الفت، لعیاء؛ بامدادصوفی، جهانیار؛ امیری، مقصود؛ ابراهیم‌پور ازبری، مصطفی؛ (۱۳۹۱). مدلی جهت ارزیابی عملکرد زنجیره تأمین با استفاده از مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای (مورد: زنجیره تأمین شرکت‌های داروسازی بورس اوراق بهادار تهران)، فصلنامه مطالعات مدیریت صنعتی، سال دهم، شماره ۲۶، ص ۲۶-۱.
- الفت، لعیاء؛ خاتمی فیروزآبادی، محمدعلی؛ خداوردی، روح‌اله؛ (۱۳۹۰). مقتضیات تحقق مدیریت زنجیره تأمین سبز در صنعت خودروسازی ایران، فصلنامه علوم مدیریت ایران، سال ششم، شماره ۲۱، ص ۱۴۰-۱۲۳.
- امیری، مقصود؛ جهانی، سمانه؛ (۱۳۸۹). به کارگیری یک روش IDEA/AHP برای ارزیابی و انتخاب تأمین کنندگان، فصلنامه مدیریت صنعتی، سال دوم، شماره ۵، ص ۱۸-۵.
- برزین‌پور، فرناز؛ تاکی، پیمان؛ (۱۳۹۳). طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز (دوستدار محیط زیست) دوکاناله با در نظر گرفتن انتخاب حالت حمل و نقل و محدودیت انتشار گازهای گلخانه‌ای، فصلنامه فناوری‌های نوین در مهندسی محیط زیست و منابع تجدیدپذیر، سال اول، شماره ۱، ص ۴۵-۵۶.
- خاتمی فیروزآبادی، محمدعلی؛ محبی، حسین؛ زارعی محمودآبادی، محمد؛ (۱۳۹۰). الگوریتمی جهت حل مسئله کوتاهترین مسیر مبتنی بر قوانین مدارهای الکتریکی، فصلنامه مطالعات مدیریت صنعتی، سال هشتم، شماره ۲۱، ص ۶۱-۳۹.

- صانعی، مسعود؛ ممی‌زاده چاتقیه، سمیه؛ (۱۳۹۱). راهکار DEA در ارزیابی کارایی زنجیره‌های تأمین تحت شرایط VRS، فصلنامه مدیریت، سال نهم، ص ۶۷-۷۳.
- کوه، ارنست؛ دسور، چارلز؛ ترجمه و تکمیل: پرویز جبه دار مارالانی؛ (۱۳۹۰). *نظریه اساسی مدارها و شبکه‌ها*، چاپ پانزدهم، تهران، مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران.
- میرغفوری، حبیب‌اله؛ صادقی آرانی، زهرا؛ عزیزی، فاطمه؛ (۱۳۹۳). *ارایه مدلی جهت انتخاب تأمین‌کننده سبز با رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره (مطالعه‌ی موردی: شرکت‌های منتخب کاشی و سرامیک استان یزد)*، فصلنامه پژوهش‌های محیط‌زیست، سال پنجم، شماره ۱۰، ص ۸۳-۹۶.
- ناجی عظیمی، زهرا؛ پویا، علیرضا؛ قربان‌پور، احمد؛ (۱۳۹۲). کاربرد الگوریتم ژنتیک جهت خوشه‌بندی فازی صنایع منطقه ویژه پارس جنوبی از حیث عمل به مدیریت زنجیره تأمین سبز، دهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع دانشگاه تهران، ص ۷-۱.
- نیک‌نژاد، مریم؛ (۱۳۹۰). زنجیره تأمین سبز (به همراه مطالعه موردی)، فصلنامه مدیریت زنجیره تأمین، سال سیزدهم، شماره ۳۴، ص ۲۷-۲۰.

Charnes, A., Cooper, W. W., Golany, B., Halek, R., Klopp, G., Schmitz, E., et al. (1986). Two-phase data envelopment analysis approaches to policy evaluation and management of army recruiting activities: Tradeoffs between joint services and army advertising. *Research Report Center for Cybernetic Studies*. University of Texas-Austin, Austin, TX.

Castelli, L., Pesenti, R. & Ukovich, W. (2001). DEA-like models for efficiency evaluations of specialized and interdependent units. *European Journal of Operational Research*, 132, 274-286.

Castelli, L., Pesenti, R. & Ukovich, W. (2004). DEA-like models for the efficiency evaluation of hierarchically structured units. *European Journal Of Operational Research*, 154, 456-476.

Chen, C. (2009). A network-DEA model with new efficiency measures to incorporate the dynamic effect in production networks. *European Journal of Operational Research*, 194, 687-699.

Chen, Y., Cook, W.D., Kao, C., & Zhu, J. (2013). Network DEA pitfalls: Divisional efficiency and frontier projection under general

network structures. *European Journal of Operational Research*, 226, 507-515.

Chen, C. & Yan, H. (2011). Network DEA model for supply chain performance evaluation. *European Journal of Operational Research*, 213, 147-155.

Chen, Y. & Zhu, J. (2004). Measuring information technology's indirect impact on firm performance. *Information Technology and management*, 12, 9-22.

Cook, W.D., Zhu, J., Bi, G. & Yang, F. (2010). Network DEA: Additive efficiency decomposition. *European Journal of Operational Research*, 207, 1122-1129.

Cook, W.D., Liang, L. & Zhu, J., (2010). Measuring performance of two-stage network structures by DEA: A review and future perspective. *Omega*, 38, 423-430, 2010.

Dorf, R.C. & Svoboda, J.A. (2014). *Introduction to Electric Circuits*. California: Vaibhav Goel.

Fang, L., & Zhang, C.Q. (2008). Resource allocation based on the DEA model. *Journal of the Operational Research Society*, 59, 1136-1141.

Fare, R., & Grosskopf, S. (2000). Network DEA. *Socio-economic planning science*, 34, 35-49.

Hiller, G., Liberman, B. & Frederick S. (2002). *Introduction to Operations Research*. Mc Graw. Hill.

Johnny, C., Maurice, K., Shalishali, B. & Tseng, D. (2009). Opportunities in green supply chain management. *The Coastal Business Journal*, 8, 55-69.

Kao, C. (2009). Efficiency decomposition in network data envelopment analysis: A relational model. *European Journal of Operation Research*, 192, 949-962.

Kao, C. (2014). Network data envelopment analysis: A review. *European Journal of Operation Research*, 239, 1-16.

Khodakarami, M., Shabani, A., Farzipoor Saen, R. & Azadi, M. (2015). Developing distinctive two-stage data envelopment analysis models: An application in evaluating the sustainability of supply chain management. *Measurement*, 70, 62–74.

Lewis, H. & Sexton, T. (2004). Network DEA: efficiency analysis of organizations with complex internal structure. *Computers & Operations Research*, 31, 1365-1410.

Lewis, H. & Sexton, T. (2003). Two-Stage DEA: An Application to Major League Baseball. *Journal of Productivity Analysis*, 19, 227-249.

Liang, L., Yang, F., Cook, W.D. & Zhu, J. (2006). DEA models for supply chain efficiency evaluation. *Annals of Operations Research*, 1451, 35–49.

Lozano, S., Gutierrez, E. & Salmeron, J.L. (2013). Network DEA approach to airports performance assessment considering undesirable outputs. *Applied Mathematical Modelling*, 37, 1665-1676.

Mirhedayatian, S.M., Azadi, M. & Farzipoor Saen, R. (2014). A novel network data envelopment analysis model for evaluating green supply chain management. *International Journal Production Economics*, 147, 544–554.

Nilsson, J. & Riedel, S. (2011). *Electric circuits*. New Jersey: Prentice Hall.

Premachandra, I. M., Zhu, J., Watson, J., & Galagedera, D. U. A. (2012). Best performing 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, 3302–3317.

Tavana, M., Kaviani, M. A., Caprio, D.D. & Rahpeyma, B. (2016). A two-stage data envelopment analysis model for measuring performance in three-level supply chains. *Measurement*, 78, 322–333.

Yang, C., & Liu, H.M. (2012). Managerial efficiency in Taiwan bank branches: A Network DEA. *Economic Modelling*, 29, 450–461.