

دسترسی در سایت <http://jnrm.srbiau.ac.ir>

سال یازدهم، شماره پنجاه و هفتم، آذر و دی ۱۴۰۴

شماره شاپا: ۲۵۸۸-۵۸۸۸



پژوهش‌های نوین در ریاضی



دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

ارزیابی زنجیره تامین پایدار بر اساس کارایی انرژی، اقتصادی و محیطی: کاربردی از صنعت برق

مژگان پورعلیزاده

گروه ریاضی، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۳۱

چکیده

مصرف انرژی بیش از حد و انتشار گازهای گلخانه‌ای، گرم شدن زمین، باران اسیدی، فرسایش خاک و آلودگی‌های محیطی را ایجاد کرده است که سبب کاهش منابع انرژی و افت کارایی نیروگاه‌ها می‌شود به طوریکه عدم پایداری و ثبات را در فعالیت‌های اقتصادی تولید می‌کند. از اینرو وجود یک خط مشی مناسب برای جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش انتشارات آلاینده یک نقش اساسی را در پایداری و کارایی عملکرد بخش‌های صنعتی ایفا می‌نماید. صنایع نیروگاهی و انرژی یکی از مهمترین زیر ساختار اساسی در صنعت برق هر کشور می‌باشند. بنابراین بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش آلودگی دو مسئله اساسی در فعالیت‌های صنعتی بشمار می‌آیند. مدیریت منابع، رشد اقتصادی و حفظ محیط موضوعات اساسی جهت پایداری فعالیت‌های صنعتی می‌باشند. هدف این مطالعه ارتباط بین سه کارایی انرژی، اقتصادی و محیطی بر اساس ظرفیت‌های بخش‌های زنجیره تامین برای مینیم کردن مصرف منابع و تاثیرات منفی محیطی و ماکزیمم کردن خروجی‌های اقتصادی می‌باشد. مدل‌های ارائه شده با در نظر گرفتن مرز متا، خروجی‌های نامطلوب، ابر کارایی و اندازه‌های متغیرهای کمکی، کارایی‌های انرژی، اقتصادی و محیطی را محاسبه می‌کند. نتایج ارائه شده کارایی بالای مصرف انرژی را در فعالیت‌های صنعتی نشان می‌دهد به طوریکه زنجیره‌های تامین ظرفیت‌های مناسب برای رشد اقتصادی را دارند. با این وجود آنها نیاز به مدیریت بیشتر مصرف منابع و ظرفیت‌های اساسی برای مهار تلفات برق دارند.

واژه‌های کلیدی: مرز متا، ابر کارایی، کارایی منابع، کارایی اقتصادی، کارایی محیطی، تاثیرات محیطی

۱. مقدمه

تغییرات آب و هوا و شرایط بحرانی آب و هوایی تاثیر مستقیمی بر عملکرد تولید انرژی در بخش‌های انرژی و نیروگاهی دارد. افزایش بیش از حد مصرف انرژی و بکارگیری ظرفیت‌ها و تولید انرژی بیشتر سبب افزایش گازهای گلخانه‌ای و انتشار آلودگی می‌شود. بنابر این مدیریت مصرف منابع، رشد اقتصادی و حفظ محیط از انتشارات آلوده و مضر موضوعات اساسی جهت پایداری عملکرد بخش‌های انرژی، نیروگاهی و شبکه‌های انتقال و توزیع انرژی می‌باشند. در این مقاله مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها را جهت محاسبه سه فاکتور مصرف انرژی، رشد اقتصادی و تاثیرات مضر محیطی ارایه شده است. مدل Meta-US-SBM مرز متا و خروجی‌های نامطلوب را همراه با سوپر کارایی در مدل SBM در نظر می‌گیرد. اندازه کارایی مصرف منابع توانایی نسبی بخش‌های زنجیره تامین را جهت بکارگیری منابع بر اساس سه جنبه مصرف منابع، رشد اقتصادی و تاثیرات محیطی به منظور پایداری عملکرد صنعت برق محاسبه می‌نماید بطوریکه مدل تحلیل پوششی ورودی محور را ایجاد می‌کند. بطور مشابه کارایی اقتصادی یک زنجیره تامین جهت مقایسه توانایی نسبی بخش‌های زنجیره تامین برای ماکزیمم کردن رشد اقتصادی نشان می‌دهد در حالیکه واحدهای تصمیم‌گیرنده سه جنبه کنترل مصرف منابع، رشد اقتصادی بالا و کاهش تاثیرات منفی محیطی را جهت پایداری سیستم بکار م‌برند. سرانجام کارایی محیطی ظرفیت بخش‌های یک زنجیره تامین را جهت مهار تلفات انرژی و کنترل گازهای گلخانه‌ای ارزیابی می‌نماید و سه فاکتور پایداری برای زنجیره تامین در نظر گرفته می‌شود. به منظور محاسبه کارایی انرژی و منابع مینیمم میانگین نسبی ورودی‌های استفاده شده را روی مرز متا در مدل سوپر کارایی در حضور خروجی‌های مطلوب و نامطلوب محاسبه می‌نماید. ناحیه‌های متفاوت بر اساس منابع جغرافیایی و تاریخی احتمالا مدهای پیشرفت متفاوتی را از نقطه نظر انرژی، اقتصادی و محیطی ایجاد می‌نمایند بطوریکه تفاوت‌هایی را در پیشرفت ناحیه‌ها فراهم می‌نمایند. روش مرز متا تکنولوژی غیر متجانس را در میان زنجیره‌های تامین شامل می‌نماید بطوریکه کارایی بخش‌های زنجیره تامین را نسبت به سایر زنجیره‌های تامین ارزیابی می‌کند حتی اگر آنها متعلق به گروه‌های متفاوتی از نظر سطح بالای انرژی و تکنولوژی‌های پیشرفته باشند. بعلاوه بخش‌های زنجیره تامین بوسیله مدل‌های ارایه شده بر اساس امتیاز سوپر کارایی و فاکتورهای منابع، اقتصادی و جنبه‌های محیطی تحت خروجی نامطلوب روی مرز کارا رتبه‌بندی می‌شوند در این حالت زنجیره‌های تامین در ناحیه‌های متفاوت بر اساس ظرفیت منابع خودشان و یک بردی از تکنولوژی‌های پیشرفته برای حفظ محیط از انتشارات آلاینده بدون توجه به اینکه متعلق به کدام گروه هستند ارزیابی می‌شوند. این مطالعه یک مرز جدید یا متا مرز را برای محاسبه سوپر کارایی و رتبه‌بندی بخش‌های زنجیره تامین ساخته است. مدل‌های ارایه شده روش تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) را برای مدل (SBM) در حضور خروجی‌های نامطلوب بکار می‌برند.

این مقاله از بخش‌های زیر تشکیل شده است. بخش دو شامل پیشینه پژوهش و چگونگی بکارگیری روش تحلیل پوششی داده‌ها روی ارزیابی مدل‌های ارائه شده برای محاسبه کارایی منابع، کارایی اقتصادی و کارایی محیطی می‌باشد. بخش بعدی به معرفی مدل Meta-US-SBM جهت محاسبه سه زیر کارایی انرژی، اقتصادی و محیطی در حضور ورودی‌ها، خروجی‌های مطلوب و نامطلوب و اندازه‌های میانی اختصاص شده است. در بخش چهارم یک حالت مطالعه برای نمایش کاربردی مدل در صنعت برق ایران ارائه شده است. سرانجام در بخش پنجم نتایج مدل ارایه می‌شود.

۲. پیشینه تحقیق

زیر بخش‌های زیر خلاصه‌ای از چندین مطالعات روی پایداری زنجیره تامین بر اساس جنبه‌های انرژی، اقتصادی و محیطی را بیان می‌کند.

۲-۱. زیر کارایی های انرژی، اقتصادی و محیطی

تاثیرات منفی محیطی و محدودیت‌های منابع سبب بروز آلودگی‌های محیطی شده است در این حالت بکارگیری پایدار منابع و موضوعات اکولوژی حائز اهمیت است. Wang و همکارانش [1] کارایی انرژی و محیطی را ارایه کردند همچنین Wang و همکارانش [2] نشان دادند که پیشرفت‌های اقتصادی گسترده در سال‌های اخیر با مدیریت پایدار منابع و کاهش آلودگی‌ها

ناسازگار است. مدل‌های تحلیل پوششی شعاعی مغیرهای کمکی قیدها را در مسئله در نظر نمی‌گیرند. مدل SBM ارایه شده بوسیله Tone [3] روی اندازه بعضی از زیرکارایی‌های منابع، اقتصادی و محیطی متمرکز شده است. Zhang و همکارانش [4] مدل SBM را برای ارزیابی کارایی ۳۰ استان در چین استفاده نمودند. Hu و Wang [5] فاکتور کل کارایی انرژی را ارایه کردند بطوریکه نه تنها شامل مصرف انرژی است بلکه ورودی‌های غیر انرژی را در سیستم اندازه به صورت یکی از تحقیقات اکولوژی در نظر می‌گیرد. بعضی از محققین مانند Wang و همکارانش [6] و Bi و همکارانش [7] کارایی انرژی را به صورت نسبت ورودی انرژی هدف به ورودی انرژی واقعی معرفی نمودند که سایر محققین کارایی انرژی را بصورت ورودی انرژی هدف در مدل تحلیل پوششی داده‌های غیرمحموری پیشنهاد نمودند. Huang و همکارانش [8] یک چهارچوب کلی را برای اندازه‌گیری زیر کارایی‌ها نشان دادند بطوریکه تمامی جنبه‌ها فرض شدن که ثابت باشند. بعنوان مثال کارایی اقتصادی در اندازه‌گیری توانایی DMU در ماکزیمم کردن خروجی اقتصادی بکار برده می‌شود وقتیکه مجموعه ورودی‌ها و خروجی‌های نامطلوب در یک سطح یکسان باشند.

۲-۲. مدیریت زنجیره تامین

Rao و همکارانش [9] بیان کردند که مدیریت زنجیره تامین سبز (GSCM) نقش مهمی را در ارتقای کارایی و سیاست‌های لازم بین شرکاء، مینیمم کردن تلفات انرژی و کاهش تاثیرات محیطی ایفا می‌نماید. فاکتورهای قابل توجه‌ای جهت اجرا عملیات مدیریت اجرای سبز توسط Hu و همکارانش [10] در جنبه‌های صنایع الکتریکی و الکترونیکی تایوان نسبت به جهت اتحادیه اروپا بررسی و جستجو شد. Chiou و همکارانش [11] روی اجرای محیطی و تاثیرات عملیات سبز بر زنجیره تامین تاکید نمودند بطوریکه پذیرفتن اجرای عملیات محیطی تاثیر قابل توجه‌ای روی کاهش مضرات محیطی خواهد داشت. همچنین زنجیره تامین سبز خواهد بود، اگر تامین‌کنندگان نیازمندی‌های سازمان‌ها و مشترکین را بپذیرند.

Pouralizadeh و همکارانش [12] یک مدل تحلیل پوششی داده‌ها را برای ارزیابی پایداری زنجیره تامین الکتریسیته در حضور خروجی‌های نامطلوب ارایه کردند. آنها یک رنجیره تامین الکتریسیته را با پنج مرحله و بر اساس پانزده بخش در ناحیه‌های متفاوت ایران طرح‌ریزی نمودند. همچنین فرض دسترس‌پذیری ضعیف در فعالیت‌های صنعتی پذیرفته شده است. مدل ارایه شده قادر است نوع و اندازه ورودی‌ها را جهت کنترل خروجی‌های نامطلوب معین نماید. Pouralizadeh [13] یک مدل جدید DEA را جهت بهبود پایداری زنجیره تامین الکتریسیته در حضور فاکتورهای دو نقشی و خروجی‌های نامطلوب ارایه نمود. مدل ارایه شده تعیین می‌کند که آیا افزایش ورودی تحت دسترس‌پذیری مدیریتی جهت ابداع تکنولوژی جدید میتواند خروجی‌های نامطلوب را در بخش‌های زنجیره تامین کاهش دهد و یا اینکه افزایش ورودی جهت سرمایه‌گذاری تاثیر قابل توجه‌ای در کاهش خروجی‌های نامطلوب ندارد.

Pouralizadeh [14] دو مدل برای مدیریت انتشارات آلوده و کاهش منابع تلف شده برای ارزیابی پایداری زنجیره تامین الکتریسیته ارایه نمود. Pouralizadeh [15] یک مدل جهت تخمین ماکزیمم سود حاشیه‌ای خروجی مطلوب ارایه نمود. مدل ارایه شده تخمین ماکزیمم سود حاشیه‌ای جهت بخش‌های زنجیره تامین را بر اساس انرژی تلف شده و تلفات برق محاسبه می‌نماید. همچنین جهت‌های بهینه بخش‌های کارای روی مرز را معین می‌نماید.

۲.۳ محاسبه ابرکارایی از طریق مدل SBM در حضور خروجی‌های نامطلوب روی مرز متا (Meta-US-SBM)

$$B_n = (b_{1n}, b_{2n}, \dots, b_{jn})^T > 0, Y_n = (y_{1n}, y_{2n}, \dots, y_{sn})^T > 0, X_n = (x_{1n}, x_{2n}, \dots, x_{mn})^T > 0$$

بردارهای ستونی ورودی‌ها و خروجی‌های مطلوب و نامطلوب n امین واحد تصمیم‌گیرنده (DMU) باشند فرض کنید N تعداد واحدهای تصمیم‌گیرنده باشند بطوریکه در داخل H گروه که $(H > 1)$ بر حسب ساختار مشترک با موقعیت‌های جغرافیایی و

تاریخی متفاوت از نظر منابع، صنعت و تکنولوژی تقسیم‌بندی شده‌اند. هر گروه شامل N_h واحد تصمیم‌گیرنده است بطوریکه

$$\sum_{h=1}^H N_h = N$$

هر DMU با مصرف M ورودی R خروجی مطلوب و J خروجی نامطلوب را تولید می‌کند.

$$P^{meta} = \left\{ (x, y, b) : \sum_{h=1}^H \sum_{n=1}^{N_h} \xi_n^h x_{nh} \leq x_h; \sum_{h=1}^H \sum_{n=1}^{N_h} \xi_n^h y_{nh} \leq y_h; \sum_{h=1}^H \sum_{n=1}^{N_h} \xi_n^h b_{nh} \leq b_h; \xi_n^h \geq 0; n=1, \dots, N_h; h=1, \dots, H \right\} \quad (1)$$

ξ_n^h وزن n امین DMU در h امین گروه است و مجموعه امکان تولید مرز متا بصورت $\{P^1 \cup P^2 \dots \cup P^H\}$ معرفی می‌شود. مرز متا از اجتماع مجموعه امکان تولید تعداد H دسته از واحدهای تصمیم‌گیرنده مورد ارزیابی تشکیل می‌شود. مرز متا تاثیر غیرمتجانس بودن واحدهای تصمیم‌گیری را در ارزیابی کارایی پوشش می‌دهد همچنین x_{mko} ، m امین ورودی از o امین واحد تصمیم‌گیرنده مورد ارزیابی را از k امین گروه نشان می‌دهد. s_{mko}^x متغیر کمکی مربوط به m امین قید ورودی در واحد مورد ارزیابی o متعلق به k امین گروه از واحدهای تصمیم‌گیرنده را نشان می‌دهد. در مدل (1) η_{ko}^{Meta} کارایی مصرف منابع واحد تصمیم‌گیرنده o در k امین دسته از DMU ها را نسبت به مرز متا تحت مدل SBM در حضور خروجی‌های نامطلوب محاسبه می‌نماید. بعلاوه واحدهای تصمیم‌گیرنده در مدل تحت مرز متا رتبه‌بندی می‌شوند. متغیرهای کمکی متناظر با قیدهای ورودی، خروجی مطلوب و نامطلوب بصورت $s_{mko}^x, s_{rko}^y, s_{jko}^b$ نمایش داده شده است. بطوریکه s_{mko}^x متغیر کمکی m امین قید ورودی واحد تصمیم‌گیرنده o از k امین دسته از DMU ها با N_k واحد تصمیم‌گیرنده نسبت به مرز متا است همچنین s_{jko}^b, s_{rko}^y متغیر کمکی r امین خروجی مطلوب و j خروجی نامطلوب واحد تصمیم‌گیرنده o از k امین دسته از DMU ها با N_k واحد تصمیم‌گیرنده را نشان می‌دهد. متغیرهای کمکی قیدهای ورودی، خروجی‌های مطلوب و نامطلوب تغییرات همزمان ورودی و خروجی‌های واحد تحت ارزیابی را در یک مدل بدون محور نشان می‌دهند. در این حالت کارایی مصرف منابع DMU ها بر اساس مینیمم مقدار میانگین نسبت افزایش ورودی واحد مورد ارزیابی نسبت به مرز متا محاسبه می‌شود. امتیاز کارایی منابع رتبه‌بندی تمامی واحدهای تصمیم‌گیرنده را صرفاً بر حسب مصرف منابع ایجاد می‌کند.

$$\delta_{ko}^{Meta*} = \min \left(1 + \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{s_{mko}^x}{x_{mko}} \right)$$

$$s.t \quad x_{mko} - \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^h x_{mhn} + s_{mko}^x \geq 0 \quad m=1, \dots, M, \quad k \in (1, \dots, H)$$

$$\sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^h y_{rhn} - y_{rko} + s_{rko}^y \geq 0 \quad r=1, \dots, R, \quad k \in (1, \dots, H) \quad (2)$$

$$b_{jko} - \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^h b_{jhn} + s_{jko}^b \geq 0 \quad j=1, \dots, J, \quad k \in (1, \dots, H)$$

$$\xi_n^h \geq 0, s_{mko}^x \geq 0, \quad m=1, \dots, M, \quad r=1, \dots, R, \quad j=1, \dots, J$$

مدل (3) کارایی اقتصادی DMU_0 بر اساس مدل SBM روی مرز متا را در حضور خروجی‌های نامطلوب محاسبه می‌کند. کارایی اقتصادی جهت مقایسه توانایی نسبی DMU ها به منظور ماکزیمم کردن خروجی‌های اقتصادی بکار می‌رود. بعلاوه متغیرهای کمکی متناظر قیدهای ورودی منابع، محصولات اقتصادی و مضرات و انتشارات محیطی صفر نیستند و مسئله از نوع بدون محور می‌باشد. تابع هدف مدل (3) مینیمم عکس مقدار میانگین نسبت کاهش خروجی‌های اقتصادی واحد مورد ارزیابی 0 را نسبت به مرز متا به عنوان کارایی رشد اقتصادی محاسبه می‌کند.

(3)

$$\delta_{ko}^{Meta*} = \min \frac{1}{1 - \frac{1}{R} \left(\sum_{r=1}^R \frac{s_{rko}^y}{y_{jko}} \right)}$$

$$s.t \quad x_{mko} - \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^h x_{mhn} + s_{mko}^x \geq 0 \quad m=1, \dots, M, \quad k \in (1, \dots, H)$$

$$\sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^h y_{rhn} - y_{rko} + s_{rko}^y \geq 0 \quad r=1, \dots, R, \quad k \in (1, \dots, H)$$

$$b_{jko} - \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^h b_{jhn} + s_{jko}^b \geq 0 \quad j=1, \dots, J, \quad k \in (1, \dots, H)$$

$$\xi_n^h \geq 0, \quad s_{mko}^x \geq 0, \quad m=1, \dots, M, \quad r=1, \dots, R, \quad j=1, \dots, J$$

مدل SBM برای محاسبه ابرکارایی اقتصادی تحت خروجی‌های نامطلوب از مرز متا استفاده می‌کند. همچنین DMU ها بر اساس روش Meta-US-SBM در محاسبه کارایی‌های منابع، اقتصادی رتبه‌بندی می‌شوند. بطور مشابه کارایی محیطی توانایی نسبی DMU ها جهت مینیمم کردن خروجی‌های نامطلوب با در نظر گرفتن مرز متا محاسبه می‌کند. مدل (4) کارایی محیطی DMU_0 را بر اساس مدل SBM روی مرز متا در حضور خروجی‌های نامطلوب محاسبه می‌کند همچنین در این حالت واحدهای تصمیم‌گیرنده بر اساس توانایی کاهش گازهای گلخانه‌ای و مهار تلفات انرژی رتبه‌بندی می‌شوند. تابع هدف مدل (4) مینیمم عکس مقدار میانگین نسبت کاهش خروجی‌های نامطلوب واحد مورد ارزیابی 0 را تحت مرز متا به عنوان کارایی محیطی محاسبه می‌کند.

$$\theta_{ko}^{Meta*} = \min \frac{1}{1 - \frac{1}{J} \left(\sum_{j=1}^J \frac{s_{jko}^y}{b_{jko}} \right)}$$

$$s.t \quad x_{mko} - \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^h x_{mhn} + s_{mko}^x \geq 0 \quad m=1, \dots, M, \quad k \in (1, \dots, H)$$

$$\sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^h y_{rhn} - y_{rko} + s_{rko}^y \geq 0 \quad r=1, \dots, R, \quad k \in (1, \dots, H)$$

$$b_{jko} - \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^h b_{jhn} + s_{jko}^b \geq 0 \quad j=1, \dots, J, \quad k \in (1, \dots, H)$$

$$\xi_n^h \geq 0, \quad s_{mko}^x \geq 0, \quad m=1, \dots, M, \quad r=1, \dots, R, \quad j=1, \dots, J$$

(4)

۳. مدل‌سازی زنجیره تامین

یک زنجیره تامین را با پنج مرحله و پانزده بخش در نظر بگیرید بطوریکه شامل دو ارسال‌کننده سوخت، سه نیروگاه، دو کمپانی انتقال، چهار کمپانی توزیع و چهار مصرف‌کننده برق باشد هر بخش جهت تولید خروجی از ورودی‌ها و فاکتورهای دو نقشی استفاده می‌کند همچنین اندازه‌های میانی از هر بخش در هر مرحله به بخش دیگر به مرحله مجاور ارسال می‌گردد. فرض کنید g_c, g_d, g_t, g_m, g_s بترتیب تعداد بخش‌های ارسال‌کننده سوخت مورد نیاز نیروگاه‌ها، تعداد نیروگاه‌ها، تعداد کمپانی‌های برق منطقه‌ای، تعداد شرکت‌های توزیع برق و تعداد مشترکین در بخش‌های خانگی، عمومی، کشاورزی و صنعتی باشند و همچنین فرض کنید $b_{jn}^h, y_{rn}^h, x_{mn}^h$ نشان‌دهنده m امین ورودی ($m = 1, \dots, M$) و r امین خروجی مطلوب ($r = 1, \dots, R$) و z امین خروجی نامطلوب ($j = 1, \dots, J$) از g امین بخش ($g = 1, \dots, G$) در n امین زنجیره تامین ($N = 1, \dots, n$) باشد. همچنین $v_{pj}^{(g, g')}$ نشان‌دهنده p امین اندازه میانی ارسال شده از بخش g به بخش g' در z امین زنجیره تامین باشد. بعلاوه $s_p^{(g, g')}$ متغیرهای کمکی اندازه‌های میانی خارج شده از g امین بخش زنجیره تامین و وارد شده به g' امین بخش تعریف می‌شوند.

۳-۱. روش محاسبه کارایی مصرف منابع (انرژی)، اقتصادی و محیطی زنجیره تامین

در این بخش مدل‌های SBM جهت محاسبه کارایی‌های مصرف منابع، رشد اقتصادی و تاثیرات محیطی برای بخش‌های زنجیره تامین تحت ورودی، خروجی‌های مطلوب و نامطلوب و اندازه‌های میانی ارایه می‌شود. فاکتورهای تولید از g امین بخش در n امین زنجیره تامین بصورت زیر تعریف می‌شوند.

$$X_n^g = (x_{1n}^g, x_{2n}^g, \dots, x_{Mn}^g)^T > 0$$

$$g = 1, \dots, G$$

$$n = 1, \dots, N$$

$$Y_n^g = (y_{1n}^g, y_{jn}^g, \dots, y_{Rn}^g)^T > 0$$

$$g = 1, \dots, G$$

$$n = 1, \dots, N$$

$$B_n^g = (b_{1j}^g, b_{2j}^g, \dots, b_{jn}^g)^T > 0$$

$$, g = 1, \dots, G \quad n = 1, \dots, N$$

$$V_n^{(g, g')} = (v_{1n}^{(g, g')}, v_{2n}^{(g, g')}, \dots, v_{Pn}^{(g, g')})^T > 0$$

$$n = 1, \dots, N, \quad g' = 1, \dots, G, \quad g = 1, \dots, G$$

$$s_{mko}^{gx} : \text{متغیر کمکی } m \text{ امین ورودی از } g \text{ امین بخش در } O \text{ امین زنجیره تامین از } k \text{ امین گروه } m = 1, \dots, M, \quad g = 1, \dots, G$$

$$, n = 1, \dots, N \quad k = 1, \dots, N_k$$

$$s_{rko}^{gy} : \text{متغیر کمکی } r \text{ امین ورودی از } g \text{ امین بخش در } O \text{ امین زنجیره تامین از } k \text{ امین گروه } r = 1, \dots, R, \quad g = 1, \dots, G$$

$$, n = 1, \dots, N \quad k = 1, \dots, N_k$$

$$s_{jko}^{gb} : \text{متغیر کمکی } j \text{ امین خروجی نامطلوب از } g \text{ امین بخش در } O \text{ امین زنجیره تامین از } k \text{ امین گروه } g = 1, \dots, G$$

$$, n = 1, \dots, N \quad k = 1, \dots, N_k \quad j = 1, \dots, J$$

$$s_{mko}^{-gx} : \text{متغیر کمکی مازاد } m \text{ امین ورودی از } g \text{ امین بخش در } O \text{ امین زنجیره تامین از } k \text{ امین گروه } g = 1, \dots, G$$

$$, n = 1, \dots, N \quad k = 1, \dots, N_k \quad m = 1, \dots, M$$

s_{rko}^{+gy} : متغیر کمکی کمبود r امین خروجی مطلوب از g امین بخش در O امین زنجیره تامین از k امین گروه $g = 1, \dots, G$,
 $r = 1, \dots, R \quad k = 1, \dots, N_k, n = 1, \dots, N$

s_{jko}^{-gb} : متغیر کمکی مازاد j امین خروجی نامطلوب از g امین بخش در O امین زنجیره تامین از k امین گروه $g = 1, \dots, G$,
 $j = 1, \dots, J \quad k = 1, \dots, N_k, n = 1, \dots, N$

$s_{pn}^{(g,g')} \geq 0$: متغیر کمکی p امین اندازه میانی ارسال شده از g امین بخش به g' بخش در n امین زنجیره تامین
 $g' = 1, \dots, G, \quad p = 1, \dots, P, n = 1, \dots, N \quad g = 1, \dots, G$

\mathcal{E} : یک مقدار غیرارشمیدسی کوچک

$\xi^g = (\xi_1^g, \xi_2^g, \dots, \xi_n^g)^T$: یک بردار ستونی از مجهولات

مدل (5) کارایی مصرف منابع O امین زنجیره تامین در k امین گروه از زنجیره‌های تامین با تعداد G بخش، $g = 1, \dots, G$ محاسبه می‌کند. زنجیره‌های تامین بر حسب ساختار مشترک با موقعیت‌های جغرافیایی و تاریخی متفاوت از نظر منابع، صنعت و تکنولوژی به تعداد H گروه که $(h = 1, \dots, H)$ تقسیم‌بندی شده‌اند و N_k تعداد واحدهای تصمیم‌گیرنده را در k امین گروه از زنجیره‌های تامین نشان می‌دهد بطوریکه $k \in (1, \dots, H)$.

اولین دسته قیود متناظر با ورودی‌های O امین زنجیره تامین تحت ارزیابی در k امین گروه از زنجیره‌های تامین با تعداد N_k واحد تصمیم‌گیرنده در G بخش برای $g = 1, \dots, G$ می‌باشد. دومین و سومین دسته از قیود خروجی‌های مطلوب و نامطلوب O امین واحد تصمیم‌گیرنده موجود در k امین گروه از زنجیره‌های تامین از g امین بخش نشان می‌دهد. بعلاوه جهت رتبه‌بندی زنجیره‌های تامین ترکیبات محدب سایر DMU های متعلق به k امین گروه به غیر از زنجیره تامین O در قیدهای ورودی و خروجی‌ها منظور می‌شود. قیدهای متعلق به اندازه‌های میانی بصورت چهارمین، پنجمین، ششمین و هفتمین دسته قیود معرفی می‌شوند این دسته قیود متناظر با اندازه‌های میانی خارج شده از g امین بخش و وارد شده به g' بخش زنجیره تامین می‌باشند. تابع هدف مدل (5) مینیمم میانگین وزن شده از میانگین نسبت افزایش ورودی‌های O امین زنجیره تامین تحت ارزیابی در k امین گروه از زنجیره‌های تامین با تعداد N_k واحد تصمیم‌گیرنده در g امین بخش برای $g = 1, \dots, G$ محاسبه می‌کند.

$$\begin{aligned} \phi_{ko}^{Meta^*} &= \min \sum_{g=1}^G \omega^g \left(1 + \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{s_{mko}^x}{x_{mko}^x} \right) \\ s.t. \quad x_{mko}^g - \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^h g x_{mgn}^h + s_{mko}^{xg} &\geq 0 & m=1, \dots, M, \quad h=1, \dots, H, \quad g=1, \dots, G, \quad k \in (1, \dots, H) \\ \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^h g y_{rgn}^h - y_{rko}^g + s_{rko}^{yg} &\geq 0 & r=1, \dots, R, \quad h=1, \dots, H, \quad g=1, \dots, G \\ b_{jko}^g - \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^h g b_{jgn}^h + s_{jko}^{bg} &\geq 0 & j=1, \dots, J, \quad h=1, \dots, H, \quad g=1, \dots, G \\ \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^h g v_{phn}^{(g,g')} + s_p^{(g,g')} &= \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^h v_{phn}^{(g,g')} & g=1, \dots, g_s, \quad p=1, \dots, P_s, \quad g'=1, \dots, g_m, \quad h=1, \dots, H \\ \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^g v_{pgn}^{(g,g')} + s_p^{(g,g')} &= \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^h v_{pgn}^{(g,g')} & g=g_s+1, \dots, g_m, \quad p=1, \dots, P_m, \quad g'=g_m+1, \dots, g_t, \quad h=1, \dots, H \\ \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^g v_{pcn}^{(g,g')} + s_p^{(g,g')} &= \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^h v_{pcn}^{(g,g')} & g=g_m+1, \dots, g_t, \quad p=1, \dots, P_t, \quad g'=1, \dots, h_t, \quad h=1, \dots, H \\ \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^g v_{pcn}^{(g,g')} + s_p^{(g,g')} &= \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^h v_{pcn}^{(g,g')} & g=g_t+1, \dots, g_d, \quad p=1, \dots, P_d, \quad g'=1, \dots, g_c, \quad h=1, \dots, A, \quad h=1, \dots, H \end{aligned} \tag{5}$$

$$m=1, \dots, M, \quad r=1, \dots, R, \quad j=1, \dots, J, \quad \xi_n^h \geq 0, \quad s_{mko}^x \geq 0$$

حال فرض کنید، s_{mko}^{-xg} ، s_{rko}^{+yg} ، s_{jko}^{-bg} متغیرهای کمکی مازاد ورودی و خروجی‌های نامطلوب و کمبود خروجی تعریف شوند تابع هدف مدل (5) کارایی منابع را تحت متغیرهای کمکی قیدهای ورودی محاسبه می‌کند. با استفاده از متغیرهای کمکی مازاد ورودی می‌توان کارایی منابع را برای هر یک از بخش‌های زنجیره تامین بدست آورد.

$$\theta_{ko}^g = 1 + \frac{1}{M} \left(\sum_{m=1}^M \frac{s_{mko}^{xg} - s_{mko}^{-xg}}{x_{mko}^g} \right) \quad (6)$$

مقدار کارایی منابع را برای 0 امین زنجیره تامین تحت ملاحظه در k گروه از زنجیره‌های تامین و در g امین بخش از زنجیره تامین محاسبه می‌کند. بعلاوه میانگین وزن شده از کارایی منابع بخش‌های زنجیره تامین، کارایی منابع کل زنجیره تامین را تخمین می‌زند. همچنین زنجیره‌های تامین بر اساس کارایی مصرف منابع رتبه‌بندی می‌شوند.

شایان ذکر است که در مدل Meta-US-SBM کارایی گروه‌های متفاوت زنجیره‌های تامین روی مرز متا محاسبه می‌شود در این صورت کارایی واحدهای تصمیم‌گیرنده با موقعیت‌های جغرافیایی و تاریخی متفاوت از نظر منابع، صنعت و تکنولوژی و متعلق به گروه‌های متفاوت روی مرز متا اندازه‌گیری می‌شود.

کارایی رشد اقتصادی 0 امین زنجیره تامین تحت ارزیابی در k امین گروه از زنجیره‌های تامین با تعداد N_k واحد تصمیم‌گیرنده در g امین بخش برای $g = 1, \dots, G$ توسط مدل (7) محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} \psi_{ko}^{Meta^*} = \min \sum_{g=1}^G \omega^g & \left(\frac{1}{1 - \frac{1}{R} \left(\sum_{r=1}^R \frac{s_{rko}^{yg}}{y_{rko}^g} \right)} \right) \\ st \quad x_{mko}^g - \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } c=k}^{N_k} \xi_n^{hg} x_{mgn}^h + s_{mko}^{xg} & \geq 0 \quad m=1, \dots, M, h=1, \dots, H, g=1, \dots, G \\ \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^{hg} y_{rgn}^{hg} - y_{rko}^g + s_{rko}^{yg} & \geq 0 \quad r=1, \dots, R, h=1, \dots, H, g=1, \dots, G \\ b_{jko}^g - \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^{hg} b_{jgn}^{hg} + s_{jko}^{bg} & \geq 0 \quad j=1, \dots, J, h=1, \dots, H, g=1, \dots, G \\ \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^{hg} v_{p hn}^{(g, g')} + s_p^{(g, g')} & = \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^{hg} v_{p hn}^{(g, g')} \quad g=1, \dots, g_s, p=1, \dots, P_s, g'=1, \dots, g_m, h=1, \dots, H \\ \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^{hg} v_{p gn}^{(g, g')} + s_p^{(g, g')} & = \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^{hg} v_{p gn}^{(g, g')} \quad g=g_s+1, \dots, g_m, p=1, \dots, P_m, g'=g_m+1, \dots, g_t, h=1, \dots, H \\ \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^{hg} v_{p cn}^{(g, g')} + s_p^{(g, g')} & = \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^{hg} v_{p cn}^{(g, g')} \quad g=g_m+1, \dots, g_t, p=1, \dots, P_t, g'=1, \dots, h_l, h=1, \dots, H \\ \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^{hg} v_{p cn}^{(g, g')} + s_p^{(g, g')} & = \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq o \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^{hg} v_{p cn}^{(g, g')} \quad g=g_t+1, \dots, g_d, p=1, \dots, P_d, g'=1, \dots, g_c, 1, \dots, A_t, h=1, \dots, H \\ m=1, \dots, M, r=1, \dots, R, j=1, \dots, J, \xi_n^{hg} & \geq 0, s_{mko}^{xg} \geq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

تابع هدف مدل (7) مینیمم میانگین وزن شده‌ای از میانگین نسبت عکس کاهش خروجی‌های مطلوب 0 امین زنجیره تامین تحت ارزیابی در k امین گروه از زنجیره‌های تامین با تعداد N_k واحد تصمیم‌گیرنده در g امین بخش برای $g = 1, \dots, G$ محاسبه می‌کند. بطور مشابه δ_{ko}^g کارایی اقتصادی g امین بخش از زنجیره تامین برای 0 امین زنجیره تامین تحت ملاحظه در k امین گروه از زنجیره‌های تامین محاسبه می‌کند.

$$\delta_{ko}^g = \frac{1}{1 - \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \left(\frac{s_{rko}^{yg} - s_{rko}^{+yg}}{y_{rko}^g} \right)} \quad (8)$$

میانگین وزن شده از کارایی محیطی پانزده بخش زنجیره تامین و کارایی کل زنجیره تامین بوسیله مدل (9) محاسبه می‌شود. تابع هدف مدل (9) مینیمم میانگین وزن شده‌ای از میانگین نسبت عکس کاهش خروجی‌های نامطلوب 0 امین زنجیره تامین تحت ارزیابی در k امین گروه از زنجیره‌های تامین با تعداد N_k واحد تصمیم‌گیرنده در g امین بخش برای $g = 1, \dots, G$ محاسبه می‌کند.

$$\rho_{ko}^{Meta^*} = \min \sum_{g=1}^G \omega^g \left(\frac{1}{1 - \frac{1}{R} \left(\sum_{r=1}^R \frac{s_{rko}^{bg}}{b_{jko}^g} \right)} \right)$$

$$st \quad x_{mko}^g - \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq 0 \text{ if } c=k}^{N_k} \xi_n^{hg} x_{mgn}^h + s_{mko}^{xg} \geq 0 \quad m=1, \dots, M, h=1, \dots, H, g=1, \dots, G$$

$$\sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq 0 \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^{hg} y_{rgn}^{hg} - y_{rko}^{rg} + s_{rko}^{yg} \geq 0 \quad r=1, \dots, R, h=1, \dots, H, g=1, \dots, G$$

$$b_{jko}^g - \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq 0 \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^{hg} b_{jgn}^{hg} + s_{jko}^{bg} \geq 0 \quad j=1, \dots, J, h=1, \dots, H, g=1, \dots, G$$

$$\sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq 0 \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^{hg} v_{phn}^{(g, g')} + s_p^{(g, g')} = \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq 0 \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^{hg} v_{phn}^{(g, g')} \quad g=1, \dots, g_s, p=1, \dots, P_s, g'=1, \dots, g_m, h=1, \dots, H$$

$$\sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq 0 \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^{hg} v_{pgn}^{(g, g')} + s_p^{(g, g')} = \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq 0 \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^{hg} v_{pgn}^{(g, g')} \quad g = g_s + 1, \dots, g_m, p=1, \dots, P_m, g' = g_m + 1, \dots, g_t, h=1, \dots, H$$

$$\sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq 0 \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^{hg} v_{pcn}^{(g, g')} + s_p^{(g, g')} = \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq 0 \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^{hg} v_{pcn}^{(g, g')} \quad g = g_m + 1, \dots, g_t, p=1, \dots, P_t, g'=1, \dots, h_l, h=1, \dots, H$$

$$\sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq 0 \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^{hg} v_{pcn}^{(g, g')} + s_p^{(g, g')} = \sum_{h=1}^H \sum_{n=1, n \neq 0 \text{ if } h=k}^{N_k} \xi_n^{hg} v_{pcn}^{(g, g')} \quad g = g_t + 1, \dots, g_d, p=1, \dots, P_d, g'=1, \dots, g_c, 1, \dots, A_t, h=1, \dots, H$$

$$m=1, \dots, M, r=1, \dots, R, j=1, \dots, J, \xi_n^h \geq 0, s_{mko}^x \geq 0 \quad (9)$$

η_{ko}^g کارایی محیطی g امین بخش از زنجیره تامین برای 0 امین زنجیره تامین تحت ملاحظه در k امین گروه از زنجیره‌های تامین محاسبه می‌کند.

در این صورت η_{ko}^g توانایی نسبی g امین بخش از 0 امین زنجیره تامین را در حفظ محیط و مهار انرژی تلف شده اندازه می‌گیرد. مدل Meta-US-SBM با در نظر گرفتن مرز متا روش SBM را در حضور خروجی‌های نامطلوب جهت رتبه‌بندی زنجیره تامین بکار می‌برد.

$$\eta_{ko}^g = \frac{1}{1 - \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \left(\frac{s_{jko}^{bg} - s_{jko}^{-bg}}{b_{jko}^g} \right)} \quad (10)$$

۴. کاربردی از مدل Meta-US-SBM در زنجیره تامین

در این بخش کاربرد مدل‌های ارائه شده جهت تخمین سه کارایی منابع، اقتصادی و محیطی زنجیره تامین برای تحلیل صنعت برق ایران ارائه می‌شود و همچنین مجموعه داده‌های مدل اعم از ورودی‌ها و خروجی‌های مطلوب و نامطلوب و اندازه‌های میانی معرفی می‌شوند و سرانجام نتایج حاصل از اجرای مدل مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

۴-۱. مجموعه داده‌ها در زنجیره تامین

در مثال کاربردی، زنجیره تامین در صنعت برق شامل پنج مرحله اصلی می‌باشد که هر مرحله شامل مجموعه‌ای از بخش‌هاست که توسط اندازه‌های میانی به بخش‌های مرحله بعدی متصل می‌شوند. پنج مرحله زنجیره تامین از ارسال‌کنندگان سوخت، ژنراتورهای برق (نیروگاه‌های برق)، شبکه انتقال، ظرفیت‌های توزیع و مصرف‌کنندگان پایانی تشکیل می‌شود. هر زنجیره تامین شامل دو ارسال‌کننده سوخت مانند نفت، گازوئیل، نفت کوره (کمپانی‌های نفت) و گاز (کمپانی‌های گاز) که تامین‌کنندگان سوخت مورد نیاز نیروگاه‌ها (محصولات میانی) می‌باشند به طوری که تامین‌کنندگان سوخت یک ورودی (سرمایه) و یک ورودی بصورت نیروی انسانی استفاده می‌کنند و یک خروجی مطلوب بصورت نفت و گاز فروخته شده به سایر کمپانی‌ها را تولید می‌کنند. خروجی مطلوب میادین نفتی و گازی بصورت تفاضل میانگین ظرفیت تولید روزانه از مقادیر نفت و گاز ارسال شده به نیروگاه‌ها محاسبه می‌شود. در بخش نیروگاهی جهت استفاده از ظرفیت کل نیروگاه‌های موجود در ده زنجیره تامین برق حداقل سه نیروگاه برای هر تامین‌کننده در نظر گرفته شده است بطوریکه هر نیروگاه شامل مجموعه‌ای از نیروگاه‌ها با تکنولوژی‌های متفاوت می‌باشد لذا تولیدکنندگان برق (نیروگاه‌ها) شامل حداقل سه نیروگاه با تکنولوژی‌های حرارتی، سیکل ترکیبی، گازی، برق آبی، بادی و خورشیدی می‌باشند که از دو نوع ورودی سوخت و نیروی کار برای تولید الکتریسیته استفاده می‌نمایند.

نیروگاه‌ها برق تولید شده را به کمپانی‌های برق منطقه‌ای می‌فروشند و همچنین برای افزایش ظرفیت خودشان با جایگزین نمودن نیروگاه‌های موجود با نیروگاه‌های کارا تر اقدام به ساخت نیروگاه‌های جدید می‌نمایند بطوریکه خروجی مطلوب نیروگاه‌ها مقدار الکتریسیته تولید شده و ارسال شده به کمپانی‌های برق منطقه‌ای در نظر گرفته می‌شود. کمپانی‌های توزیع برق، جریان الکتریسیته دریافت شده از کمپانی‌های برق منطقه‌ای را به مصرف‌کنندگان توزیع می‌کنند و آنها از دو نوع ورودی بصورت ظرفیت و طول خطوط توزیع برق استفاده می‌نمایند بطوریکه یک خروجی مطلوب پایانی به عنوان جریان الکتریسیته ارسال شده به مشترکین برق را تولید می‌نمایند و سرانجام مشترکین جریان برق به بخش‌های خانگی، عمومی، کشاورزی و صنعتی دسته‌بندی می‌شوند به طوری که آنها از یک ورودی بصورت میانگین هزینه سوخت مصرفی همراه با یارانه سوخت استفاده می‌نمایند همچنین فروش جریان برق به مشترکین بصورت یک خروجی مطلوب در نظر گرفته شده است. پارامترهای بکار برده شده در مدل زنجیره تامین بصورت زیر تعریف می‌شوند.

g_s - شمارنده کمپانی‌های تامین‌کننده سوخت ($g(s) = 1, 2$)

$x_{1n}^{h(g)}$ - ظرفیت تولید سالانه از $h(s)$ کمپانی نفت (هزار بشکه) و گاز (میلیون متر مکعب) در n امین زنجیره تامین
 $y_{1j}^{g(s)}$ - نفت (هزار بشکه) و گاز (میلیون متر مکعب) فروخته شده از $g(s)$ امین کمپانی نفت و گاز به سایر کمپانی‌ها (غیر

از نیروگاه‌ها) در n امین زنجیره تامین

$g(m)$ - شمارنده نیروگاه‌ها ($g(m) = 3, 4, 5$)

$x_{1n}^{g(m)}$ - ظرفیت نامی سالانه از $g(m)$ امین نیروگاه در n امین زنجیره تامین (میلیون کیلو وات ساعت)

$x_{2n}^{g(m)}$ - تعداد کارکنان نیروگاه از $g(m)$ امین نیروگاه در n امین زنجیره تامین

$y_{1n}^{g(m)}$ - کل الکتریسیته ارسال شده به کمپانی‌های انتقال از $g(m)$ امین نیروگاه در n امین زنجیره تامین

$b_{1n}^{g(s)}$ - نفت (هزار بشکه) و گاز (میلیون متر مکعب) سوزانده شده (گاز فلرینگ) از $g(s)$ امین کمپانی نفت و گاز در n امین

زنجیره تامین

$b_{1n}^{g(m)}$ - انتشار گاز NO_x منو اکسید نیتروژن از $g(m)$ امین نیروگاه در n امین زنجیره تامین (میلیون کیلو وات ساعت/هزار کیلوگرم)

$b_{2n}^{g(m)}$ - انتشار گاز SO_x منو اکسید نیتروژن از $g(m)$ امین نیروگاه در n امین زنجیره تامین (میلیون کیلو وات ساعت/هزار کیلوگرم)
 $b_{3n}^{g(m)}$ - انتشار گاز CO_2 منو اکسید نیتروژن از $g(m)$ امین نیروگاه در n امین زنجیره تامین (میلیون کیلو وات ساعت/هزار کیلوگرم)
 $g(t)$ - شمارنده شرکت‌های برق منطقه‌ای $(g(t) = 6, 7)$

$x_{1n}^{g(t)}$ - ظرفیت خطوط انتقال جریان الکتریسیته از $g(t)$ شرکت برق منطقه‌ای در n امین زنجیره تامین (مگاوات آمپر)
 $x_{2n}^{g(t)}$ - طول خطوط انتقال جریان الکتریسیته از $g(t)$ کمپانی برق منطقه‌ای در n امین زنجیره تامین (کیلومتر مدار)
 $y_{1n}^{g(t)}$ - کل الکتریسیته ارسال شده جهت توزیع به کمپانی‌های توزیع برق از $g(t)$ در n امین زنجیره تامین
 $b_{1n}^{g(t)}$ - تلفات جریان الکتریسیته ناشی از انتقال از $g(t)$ امین شرکت برق منطقه‌ای در n امین زنجیره تامین (میلیون کیلو وات ساعت)
 $g(d)$ - شمارنده شرکت‌های توزیع برق $(g(d) = 8, 9, 10, 11)$

$x_{1n}^{g(d)}$ - ظرفیت خطوط توزیع جریان الکتریسیته از $g(d)$ امین کمپانی‌های توزیع برق در n امین زنجیره تامین (مگا ولت آمپر)
 $x_{2n}^{g(d)}$ - طول خطوط توزیع جریان الکتریسیته از $g(d)$ کمپانی‌های توزیع برق در n امین زنجیره تامین (کیلومتر)
 $y_{1n}^{g(d)}$ - تعداد کنترل‌های نصب شده کمپانی‌های توزیع از $g(d)$ کمپانی توزیع در n امین زنجیره تامین
 $b_{1n}^{g(d)}$ - درصد تلفات جریان الکتریسیته شرکت‌های توزیع از $g(d)$ کمپانی توزیع در n امین زنجیره تامین
 $g(c)$ - شمارنده مصرف‌کنندگان جریان برق الکتریسیته $(g(c) = 12, 13, 14, 15)$

$x_{1n}^{g(c)}$ - میانگین هزینه سوخت مصرفی با یارانه سوخت جهت تولید جریان الکتریسیته از $g(c)$ بخش مصرف‌کننده در n امین زنجیره تامین (ریال)

$y_{1n}^{g(c)}$ - فروش جریان الکتریسیته به مشترکان در بخش‌های متفاوت از $g(c)$ بخش مصرف‌کننده در n امین زنجیره تامین (میلیون کیلو وات ساعت)

$b_{2n}^{g(c)}$ - میزان خاموشی یا قطع برق در بخش‌های متفاوت از $g(c)$ بخش مصرف‌کننده در n امین زنجیره تامین (دقیقه /سال)
 $V_{pn}^{(g, g')}$ - اندازه میانی از g به بخش g'

مجموعه داده‌های مدل از وب سایت توانیر کمپانی صنعت برق ایران [15] در سال ۲۰۱۵ جمع‌آوری شده است. مقدار انتشارات گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها در نیروگاه‌ها در جریان تولید الکتریسیته بر اساس نوع و مقدار سوخت مصرفی نیروگاه‌ها به صورت خروجی‌های نامطلوب محاسبه می‌شوند. تمامی داده‌ها در دو میدان نفتی و گازی (ارسال‌کننده‌های سوخت) نیروگاه‌های برق (تولیدکنندگان) کمپانی‌های برق منطقه‌ای (انتقال‌دهندگان برق) کمپانی‌های توزیع (بخش‌کنندگان) و مشترکین برق (خانگی، عمومی، کشاورزی و صنعتی) در وب سایت توانیر موجود است همچنین یک ورودی تامین‌کنندگان سوخت از آمار میدان‌های نفتی و گازی در صنعت انرژی ایران بدست آمده است و خروجی مطلوب بصورت تفاوت بین میانگین تولید سالانه نفت و گاز و مقادیر ارسال شده به نیروگاه‌ها محاسبه شده است..

اطلاعات مربوط به مقدار و نوع سوخت نیروگاه‌ها از کمپانی توانیر در صنعت برق ایران جمع‌آوری شده است و بصورت اندازه میانی از میدان‌های نفت و گاز به نیروگاه‌ها معرفی شده است. ظرفیت نامی آنها بصورت ظرفیت و تعداد کارکنان نیروگاه‌ها بصورت ورودی انتخاب شده‌اند. همچنین آمار خروجی مطلوب تولیدکنندگان برق از مقدار کل الکتریسیته تولید شده و ارسال شده به کمپانی‌های انتقال برق محاسبه می‌شود. داده‌های ورودی و خروجی مطلوب کمپانی‌های برق منطقه‌ای از بخش انتقال صنعت برق جمع‌آوری شده است تمامی داده‌های کمپانی توزیع از بخش توزیع وب سایت کمپانی توانیر صنعت برق بدست آمده است همچنین ورودی‌های چهار بخش مشترکین برق بصورت میانگین هزینه مصرفی سوخت و یارانه سوخت جهت تولید برق از کمپانی توانیر جمع‌آوری شده و خروجی مطلوب بصورت فروش جریان الکتریسیته در بخش‌های خانگی، عمومی، کشاورزی و صنعتی بوسیله اندازه‌های میانی ارسال شده از کمپانی‌های توزیع برق به چهار مشترکین برق و بر اساس آمار درصد برق مصرفی چهار بخش مصرف‌کنندگان از وب سایت توزیع کمپانی توانیر محاسبه شده است.

بعلاوه اندازه‌های میانی از ارسال‌کنندگان سوخت به نیروگاه‌ها مقادیر سوخت مورد نیاز نیروگاه‌ها جهت تولید برق می‌باشند و اندازه‌های میانی از نیروگاه‌ها به خطوط انتقال و از خطوط انتقال به خطوط توزیع جریان برق از وب سایت کمپانی توانیر صنعت برق بدست آمده است.

۴-۲. نتایج و تحلیل داده‌ها

در این بخش نتایج بدست آمده از اجرای مدل آرایه می‌شود. جدول‌های ۱ متغیرهای کمکی متناظر با قیدهای ورودی، خروجی-های مطلوب و نامطلوب و متغیرهای کمکی مازاد ورودی و کمبود خروجی مطلوب و مازاد خروجی نامطلوب را برای پانزده بخش زنجیره تامین شماره ۱ نشان می‌دهد.

Table 1. The slack variables of 15 divisions from supply chain 1

Division	Slack variables of input				Slack variables of desirable outputs		Slack variables of undesirable outputs	
	S_{1o}^{xg}	S_{2o}^{xg}	S_{1o}^{-xg}	S_{2o}^{-xg}	S_{1o}^{yg}	S_{1o}^{+yg}	S_{1o}^{bg}	\bar{S}_{1o}^{bg}
Oil field	6902.508	0	0	464.111	0	5358.571	0	0
Gas field	0	0	0	895.433	0	0	0	0
Power plant 1	0	207.713	0	0	0	87.224	0	0.00002,0,0.53
Power plant 2	403.523	0	0	1060.358	0	71.092	0	0,0,0
Power plant 3	0	0	12546.111	0	0	0	198.789,0,0	0,0,0
Transmitter 1	0	0	0	2365.470	5631.918	4114.957	0	79.515
Transmitter 2	0	108.7190	36314.837	6993.224	11489.511	4077.594	0	65.594
Distributor 1	0	0	0	0	8042.658	3328.788	0	1.400
Distributor 2	0	0	0	0	6429.813	2110.959	0	0
Distributor 3	0	0	407.216	0	3942.343	3240.406	0	0
Distributor 4	48.125	0	0	1146.980	1689.575	7472.799	0	1.183
Customer1	0	0	68.565	0	0, 5821.286	0, 421.763	0	22.485
Customer2	0	0	53.618	0	0, 3081.857	0, 9350.192	0	15.538
Customer3	0	0	53.696	0	0, 2568.214	0, 2360.053	0	0
Customer4	0	0	137.252	0	0, 5650.072	0, 7034.963	0	0

متغیرهای کمکی متناظر با قیدهای ورودی‌ها، خروجی‌های مطلوب و نامطلوب بصورت S_{jo}^{bg} , S_{ro}^{yg} , S_{mo}^{xg} در نظر گرفته شده‌اند. در حالیکه متغیرهای S_{jo}^{-bg} و S_{ro}^{+yg} , S_{mo}^{-xg} متغیرهای کمکی مازاد ورودی، متغیرهای کمکی کمبود خروجی‌های مطلوب و متغیرهای کمکی مازاد خروجی‌های نامطلوب تعریف شده‌اند. در واقع مقدار متغیر کمکی متناظر با قیدهای ورودی فاصله واحد تصمیم‌گیرنده مورد ارزیابی را تا مرز جدید ساخته شده توسط سایر واحدهای تصمیم‌گیرنده نشان می‌دهد. بعلاوه بخش‌های زنجیره تامین بر اساس سه زیر کارایی اقتصادی، انرژی و محیطی رتبه‌بندی می‌شوند.

بر اساس جدول شماره یک، متغیرهای کمکی قیدهای ورودی میدان نفتی و اولین نیروگاه برق زنجیره تامین شماره یک نتایج قابل قبولی را جهت کنترل مصرف انرژی در میان پانزده بخش بدست آوردند. در حالیکه بر طبق مقادیر متغیرهای کمکی مازاد ورودی دومین خط انتقال قابلیت و ظرفیت‌های لازم جهت کنترل بیش از حد مصرف منابع را ندارد. بطوریکه کنترل لازم جهت مصرف ظرفیت و طول خطوط انتقال را ندارد. بر طبق جدول شماره ۲ سرعت رشد اقتصادی دومین خط انتقال زنجیره تامین شماره یک سبب افزایش هزینه‌های مصرف انرژی و آلودگی‌های محیطی می‌شود. بنابراین دومین خط انتقال زنجیره تامین شماره یک رشد اقتصادی بالایی را در هزینه‌های زیادی از مصرف انرژی و آلودگی‌های محیطی بدست آورده است. به عبارت دیگر این بخش انتقال کارایی اقتصادی قابل توجهی را بر اساس کارایی سیار پایینی از مصرف انرژی و کارایی نسبتاً پایین

محیطی کسب کرده است. اولین خط انتقال زنجیره تامین شماره یک علاوه بر اینکه خروجی های اقتصادی قابل ملاحظه ای را بر اساس مصرف بالایی از انرژی تولید می کند، انرژی نسبتا بالایی را بر اساس تلفات برق از دست می دهد.

Table 2. The score of source, economic and environmental efficiency of supply chain 1

	Supplier 1 (Division 1)	Supplier 2 Division 2	Manufacturer 1 Division 3	Manufacturer 2 Division 4	Manufacturer 3 Division 5	Transmitter 1 Division 6	Transmitter 2 Division 7
Resource Efficiency θ_o^h	1.0872629	0.813451	1.1038565	0.874729	0.625713	0.863163	0.180137
Economic Efficiency δ_o^h	0.6266963	1	0.9879384	0.981596	1	1.368645	2.817713
Environmental Efficiency η_o^h	1	1	0.9999	1	1.000937	0.688049	0.845072

جدول شماره ۳ مقادیر سه زیر کارایی منابع، اقتصادی و محیطی را برای چهار بخش توزیع برق و چهار مشترک بخش خانگی، عمومی، کشاورزی و صنعتی نشان می دهد و دومین خط توزیع برق زنجیره تامین شماره یک دارای سه زیر کارایی متعادل می باشد بطوریکه کارایی اقتصادی قابل توجه ای را بر اساس کنترل مصرف منابع و حفظ محیط از آلودگی های محیطی بدست آورده است در حالیکه میدان نفتی، دومین خط توزیع برق و بخش عمومی مشترکین برق خروجی اقتصادی پایینی را تحت کنترل مصرف انرژی و مدیریت تلفات برق بدست آورده است.

Table 3. The score of source, economic and environmental efficiency of supply chain 1

	Distributor 1 Division 8	Distributor 2 Division 9	Distributor 3 Division 10	Distributor 4 Division 11	Customer 1 Division 12	Customer 2 Division 13	Customer 3 Division 13	Customer 4 Division 15
Sources Efficiency θ_o^h	1	1	0.89296	0.983884	0.9755125	0.975512	0.975513	0.975513
Economic Efficiency δ_o^h	2.416089	3.045914	1.21662	0.226097	1.86488395	0.495793	1.042238	0.890825
Environmental Efficiency η_o^h	0.906198	1	1	1	0.969932128	0.92872	1	1

Table 4. The slack variables of 15 divisions from supply chain 2

Division	Slack variables of input				Slack variables of desirable outputs		Slack variables of undesirable outputs	
	S_{1o}^{xg}	S_{2o}^{xg}	S_{1o}^{-xg}	S_{2o}^{-xg}	S_{1o}^{yg}	S_{1o}^{+yg}	S_{1o}^{bg}	\bar{S}_{1o}^{bg}
Oil field	5343.336	710.098	0	464.111	1237.973	0	118.593	0
Gas field	0	0	8091.204	559.128	4008.241	0	0	117.518
Power plant 1	0	171.041	0	0	0	0	0	0.00002,0,0.53
Power plant 2	0	747.665	770.280	0	0	335.473	0,0,0	0,0,0
Power plant 3	3214.932	0	12546.111	0	0	0	90.352,0,0	0,0,0
Transmitter 1	0	0	0	0	12002.850	11583.289	0	79.515
Transmitter 2	0	0	0	920.820	6285.340	2222.246	0	65.594
Distributor 1	0	0	0	18516.42	8401.995	5165.397	0	1.400
Distributor 2	0	802.930	207.575	0	4399.738	890.764	0	0

Distributor 3	0	2541.002	0	0	2483.737	6980.706	0.669	0
					8401.995	1272.118	0.122	1.183
Distributor 4	0	0	3808.839	38726.89				
Customer1	194.261	0	0	0	339090, 5632.678	0, 10325.938	137.678	
Customer2	151.912	0	0	0	343650, 3762.051	0, 6246.718	0	8.139
Customer3	152.134	0	0	0	26555.92, 2060.136	0, 2515.757	0	13.305
Customer4	388.868	0	0	0	10573.55, 3401.5	0, 7956.818	0	0.294

جدول ۴ متغیرهای کمکی قیدهای ورودی، خروجی‌های مطلوب و نامطلوب و همچنین متغیرهای کمکی مازاد ورودی و کمبود خروجی را برای پانزده بخش زنجیره تامین شماره ۲ نشان می‌دهد. بعلاوه مقادیر سه زیرکارایی منابع، اقتصادی و محیطی بخش‌های زنجیره تامین ۲ در جدول‌های ۵ و ۶ محاسبه شده است.

Table 5. The score of source, economic and environmental efficiency of supply chain 2

	Supplier 1 (Division 1)	Supplier 2 Division 2	Manufacturer 1 Division 3	Manufacturer 2 Division 4	Manufacturer 3 Division 5	Transmitter 1 Division 6	Transmitter 2 Division 7
Resource Efficiency θ_o^h	1.144337	0.688453	1.0570517	1.257508	0.72228634	1	0.806831
Economic Efficiency δ_o^h	1.08459	1.735881	1	0.952245	1	1.036221	2.828368
Environmental Efficiency η_o^h	1.224011	0.746246	1	1	1.000059	0.824582	0.720387

میدان نفتی زنجیره تامین شماره ۲ دارای سه کارایی منابع، اقتصادی و محیطی نسبتاً بالایی است در حالیکه میدان نفتی زنجیره تامین شماره ۱ رونق اقتصادی پایینی را بر اساس کنترل مصرف منابع و حفظ محیط از انتشارات آلاینده بدست آورده است. بر اساس مقادیر سه کارایی در جدول شماره ۵ میدان گازی زنجیره تامین شماره ۲ رشد اقتصادی بالایی را بر اساس هزینه‌های بالایی از مصرف بیش از حد انرژی و تخلیه گاز فلرینگ به محیط زیست بدست آورده است. همچنین اولین و دومین نیروگاه از سه کارایی نسبتاً خوبی برخوردار هستند در حالیکه سومین نیروگاه منابع انرژی زیادی را تحت رونق اقتصادی نسبتاً خوب و مدیریت انتشارات گازهای گلخانه‌ای مصرف می‌کند. دو بخش انتقال برق با تلفات انرژی قابل ملاحظه‌ای روبرو شده اند در حالیکه دومین خط انتقال رشد اقتصادی قابل توجهی را بر اساس هزینه زیادی از مصرف بیش از حد انرژی و تلفات برق ایجاد نمودند.

Table 6. The score of source, economic and environmental efficiency of supply chain 2

	Distributor 1 Division 8	Distributor 2 Division 9	Distributor 3 Division 10	Distributor 4 Division 11	Customer 1 Division 12	Customer 2 Division 13	Customer 3 Division 13	Customer 4 Division 15
Sources Efficiency θ_o^h	0.820883	0.954905	1.114448	0.277048	1.138758	1.138758	1.138758	1.138758
Economic Efficiency δ_o^h	1.626591	4.939267	0.355801	6.604694	0.751694	0.834161	1.043254	0.86265
Environmental Efficiency η_o^h	0.889153	1	1.090884	0.884183	1.237199	0.959293	0.442303	0.942627

چهار خط توزیع برق زنجیره تامین شماره ۲ نتایج متمایزی را برای سه زیر کارایی بدست آوردند بطوریکه اولین، دومین و چهارمین خط توزیع کارایی اقتصادی بسیار قابل توجهی را کسب نمودند اما سومین خط انتقال در عرصه رونق اقتصادی دچار رکود شده است زیرا با بکارگیری منابع محدود انرژی خروجی اقتصادی بسیار پایینی را در فعالیتهای اقتصادی تولید می کند. شایان ذکر است که چهارمین خط توزیع توانسته ماکزیمم رشد اقتصادی و توزیع جریان به مشترکین برق را بر اساس بکارگیری بیش از حد ظرفیتها و طول خطوط انتقال بدست آورد بطوریکه این شبکه توزیع با تلفات برق قابل ملاحظه ای روبرو شده است لذا نیازمند تکنولوژی های لازم جهت مهار تلفات انرژی می باشد. سرانجام مشترکین بخش کشاورزی رشد اقتصادی قابل ملاحظه ای را بر اساس فروش جریان برق در میان بخش های دیگر بدست آورده اند در حالیکه زمان های زیادی را تحت قطعی برق نسبت به سایر بخش ها می گذرانند.

بطور مشابه جدول شماره ۷ متغیرهای کمکی قیدهای ورودی، خروجی های مطلوب و نامطلوب و همچنین متغیرهای کمکی مازاد ورودی و کمبود خروجی را برای پانزده بخش زنجیره تامین شماره ۳ نشان می دهد. همچنین جدول های شماره ۸ و ۹ مقادیر کارایی منابع، اقتصادی و محیطی پانزده بخش زنجیره تامین شماره ۳ را نشان می دهد. میدان نفتی زنجیره تامین شماره ۳ با مصرف بیش از حد انرژی قابلیت رشد اقتصادی بالایی را ندارد در حالیکه توانایی مهار انتشارات گازهای گلخانه ای را دارد. سومین بخش نیروگاهی با توجه به مصرف انرژی کمتر رشد اقتصادی بسیار پایینی را بر اساس انتشارات گازهای گلخانه ای منوکسید نیتروژن و منوکسید گوگرد بدست آورده است. بعلاوه دومین بخش انتقال برق نتایج قابل قبولی را در مدیریت مصرف برق نشان داده است بطوریکه نسبت به سایر بخش ها از ظرفیتهای طول خطوط کمتری استفاده می کند در حالیکه با رشد اقتصادی پایینی مواجه شده است. به عبارت دیگر این بخش انتقال برق خروجی اقتصادی پایینی را تحت کنترل مصرف انرژی و مدیریت تلفات برق بدست آورده است.

Table7. The slack variables of 15 divisions from supply chain 3

Division	Slack variables of input				Slack variables of desirable outputs				Slack variables of undesirable outputs	
	S_{1o}^{xg}	S_{2o}^{xg}	S_{1o}^{-xg}	S_{2o}^{-xg}	S_{1o}^{yg}	S_{1o}^{+yg}	S_{1o}^{bg}	\bar{S}_{1o}^{bg}		
Oil field	0	0	28350.557	0	0	6132.912	0	0		
Gas field	1953.611	0	0	1156.728	0	0	0	7.785		
Power plant 1	2795.308	0	0	1388.370	0	0	335.406,4028.71,0	0,0,0		
Power plant 2	0	0	495.006	0	0	0	44.008, 528.598,0	0,0,0		
Power plant 3	985.361	0	970.086	0	0	3836.598	0,0,0	121.431,1781200,0		
Transmitter 1	0	0	0	1885.979	9445.777	11961.999	0	0.080		
Transmitter 2	0	212.925	0	0	1246.873	1713.887	9.021	0		
Distributor 1	0	0	0	0	3376.511	3442.189	0	0.053		
Distributor 2	0	0	0	0	6612.044	6598.895	0	1.130		
Distributor 3	0	0	0	0	2833.733	2835.821	0	0		
Distributor 4	0	0	0	0	8156.241	4992.832	0	0.629		
Customer1	0	0	330.873	0	0, 5756.875	0,129660	0	44.690		
Customer2	0	0	258.742	0	0, 3144.278	0, 77326.164	0	0		
Customer3	0	0	259.120	0	0, 2662.994	0, 2519.314	0	0		
Customer4	0	0	662.336	0	0, 5447.499	0, 5719.542	0	0.024		

Table 8. The score of source, economic and environmental efficiency of supply chain 3

	Supplier 1 (Division 1)	Supplier 2 Division 2	Manufacturer 1 Division 3	Manufacturer 2 Division 4	Manufacturer 3 Division 5	Transmitter 1 Division 6	Transmitter 2 Division 7
Resource Efficiency θ_o^h	0.781246	0.951306	0.900949	0.963534	1.00372	1	1.07323
Economic Efficiency δ_o^h	0.806754	1	1	1	0.655229	0.789649	0.727512
Environmental Efficiency η_o^h	1	0.947464	1	1	0.840834	0.999728	1.302645

چهار بخش شبکه توزیع برق زنجیره تامین شماره ۳ رشد اقتصادی نسبتاً خوبی را بر طبق کنترل مصرف ظرفیت و طول خطوط توزیع بدست آوردند در حالیکه توانایی لازم جهت مهار تلفات برق را دارند. همچنین چهارمین چهارمین شبکه توزیع با مدیریت مصرف انرژی نه تنها رشد اقتصادی قابل ملاحظه‌ای را نسبت به سایر خطوط توزیع جهت توزیع جریان الکتریسیته به مشترکین برق ایجاد کرده است بلکه دارای ظرفیت‌ها و تکنولوژی‌های لازم برای مهار تلفات انرژی را دارد.

Table 9. The score of source, economic and environmental efficiency of supply chain 3

	Distributor 1 Division 8	Distributor 2 Division 9	Distributor 3 Division 10	Distributor 4 Division 11	Customer 1 Division 12	Customer 2 Division 13	Customer 3 Division 13	Customer 4 Division 15
Sources Efficiency θ_o^h	1	1	1	1	0.763662	0.763663	0.763663	0.763662
Economic Efficiency δ_o^h	0.98092	1.001993	0.999264	1.633589	0.085025	0.078147	1.027725	0.975639
Environmental Efficiency η_o^h	0.995791	0.908576	1	0.927941	0.941769	1	1	0.994185

در چهار بخش مشترکین برق زنجیره تامین شماره ۳ بخش کشاورزی بیشترین رشد اقتصادی را در زمینه فروش جریان الکتریسیته و تعداد مشترکین برق کسب نموده است در حالیکه هر چهار بخش مصرف‌کننده از سوبسیدهای برق بطور یکسان استفاده می‌کنند. جدول شماره ۱۰ متغیرهای کمکی قیدهای ورودی و خروجی مطلوب و نامطلوب و متغیرهای مازاد ورودی و کمبود خروجی زنجیره تامین برق شماره ۴ را نشان می‌دهد.

Table10. The slack variables of 15 divisions from supply chain 4

Division	Slack variables of input				Slack variables of desirable outputs	Slack variables of undesirable outputs		
	S_{1o}^{xg}	S_{2o}^{xg}	S_{1o}^{-xg}	S_{2o}^{-xg}	S_{1o}^{yg}	S_{1o}^{+yg}	S_{1o}^{bg}	\bar{S}_{1o}^{bg}
Oil field	0	0	0	0	0	4454.635	0	613.461
Gas field	0	0	5642.486	323.206	0	1320.391	0	28.607
Power plant 1	0	0	0	541.432	0	0	0	41520.89,0,2619700
Power plant 2	0	0	392.656	1379.975	282.601	0	0,0,0	118.697,0,0
Power plant 3	0	525.748	0	541.432	0	462.414	0,0,0	169.786,0,111320
Transmitter 1	0	0	0	1806.411	8184.263	8184.263	0	0

Transmitter 2	0	0	0	143.766	3568.855	3681.283	0	7.241
Distributer 1	0	0	0	0	1017.739	3205.943	0	1.368
Distributer 2	0	0	1555.295	0	8184.263	2938.954	0	0
Distributer 3	0	0	0	0	2498.199	2234.616	0	0.003
Distributer 4	0	0	0	7270.374	713.771	2934.394	0	1.183
Customer1	0	0	154.558	0	0, 5586.517	0, 5754.824	0	67.679
Customer2	0	0	120.864	0	243.364, 2964.112	0, 107610	0	0.391
Customer3	0	0	121.041	0	0, 1762.968	0, 2765.519	0	0
Customer4	0	0	309.391	0	8.969, 3878.059	0, 5523.598	0	1.284

بر اساس جدول شماره ۱۰ میدان نفتی زنجیره تامین شماره ۴ علاوه بر اینکه خروجی‌های اقتصادی را تحت مصرف مناسب انرژی تولید می‌کند در حالیکه این میدان نفتی مقادیر زیادی گاز فلرینگ را به محیط منتشر می‌کند که سبب آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شود. بطور مشابه میدان گازی زنجیره تامین شماره ۴ با بکارگیری مازاد ورودی‌های ظرفیت و نیروی کار انسانی رشد اقتصادی بسیار پایینی را تجربه کرده است. همچنین دومین نیروگاه زنجیره تامین ۴ رشد اقتصادی خوبی را بر اساس بکارگیری بیشتر ظرفیت نامی نیروگاه ایجاد کرده است در حالیکه این نیروگاه دارای انتشارات مازاد گاز منوکسید نیتروژن (NO_x) است لذا جهت حفظ محیط از آلودگی‌های مضر نیاز دارد که انتشارات گاز گلخانه‌ای را کاهش دهد. در واقع نیروگاه شماره ۲ رشد اقتصادی بالایی را بر اساس هزینه مصرف بیش از حد انرژی و آلودگی‌های محیطی بدست آورده است. بر طبق جدول شماره ۱۱ اولین و دومین خطوط انتقال دارای سه کارایی متعادل می‌باشند.

Table 11. The score of source and environmental efficiency of supply chain 4

	Supplier 1 (Division 1)	Supplier 2 Division 2	Manufacturer 1 Division 3	Manufacturer 2 Division 4	Manufacturer 3 Division 5	Transmitter 1 Division 6	Transmitter 2 Division 7
Resource Efficiency θ_o^h	1	0.671439	0.882297	0.660808	0.990198	0.919114	0.967974
Economic Efficiency δ_o^h	0.83964	0.717326	1	1.303122	0.835812	1	0.96946
Environmental Efficiency η_o^h	0.55204	0.96354	0.944034	0.998559	0.998519	1	0.937046

Table 12. The score of source, economic and environmental efficiency of supply chain 4

	Distributor1 Division 8	Distributor 2 Division 9	Distributor 3 Division 10	Distributor 4 Division 11	Customer 1 Division 12	Customer 2 Division 13	Customer 3 Division 13	Customer 4 Division 15
Sources Efficiency θ_o^h	1	0.755072	1	0.799847	0.944801	0.944801	0.944801	0.944801
Economic Efficiency δ_o^h	0.317454	2.784749	1.117954	0.243243	0.98516	0.053619	0.778613	0.825032
Environmental Efficiency η_o^h	0.90650	1	0.999625	0.859718	0.91148	0.997854	1	0.840889

بر طبق جدول شماره ۱۲ دومین خط توزیع برق، رشد اقتصادی بالایی را بر اساس مصرف قابل ملاحظه‌ای از ظرفیت و طول خطوط توزیع فراهم کرده است در حالیکه چهارمین خط توزیع مقدار انرژی بسیار پایینی را تحت هزینه بالایی از مصرف انرژی به مشترکین برق ارسال می‌کند در حالیکه تلفات برق کمتری را نسب به سایر خطوط توزیع دارد. سرانجام مشترک خانگی زنجیره تامین ۴ بهترین نتایج کارایی را در بین سایر مشترکین بدست آورده است بطوریکه این بخش خانگی دارای سه کارایی مواد، اقتصادی و محیطی متعادل می‌باشد.

جدول شماره ۱۳ متغیرهای کمکی قیدهای ورودی و خروجی مطلوب و نامطلوب و متغیرهای مازاد ورودی و کمبود خروجی زنجیره تامین برق شماره ۵ را نشان می‌دهد.

Table13. The slack variables of 15 divisions from supply chain 5

Division	Slack variables of input				Slack variables of desirable outputs	Slack variables of undesirable outputs		
	S_{1o}^{xg}	S_{2o}^{xg}	S_{1o}^{-xg}	S_{2o}^{-xg}	S_{1o}^{yg}	S_{1o}^{+yg}	S_{1o}^{bg}	\bar{S}_{1o}^{bg}
Oil field	0	0	0	0	0	0	0	301.212
Gas field	0	0	0	595.501	0	8467.118	0	0
Power plant 1	0	0	0	8.285	0	3503.159	0	583.073,8744200,0
Power plant 2	2167.757	0	0	994.347	0	0	0,0,0	66031,0, 42067000
Power plant 3	0	0	0	1110.448	0	0	0,0,0	3096.354,0,2117100
Transmitter 1	0	0	0	78.997	10539.239	3982.629	0	0
Transmitter 2	0	0	34215.553	7529.515	3772.184	11481.720	0	13.609
Distributor 1	0	545.761	7741.001	0	2640.529	1546.800	0	2.246
Distributor 2	0	0	617.835	0	7377.467	5583.931	0	0
Distributor 3	0	0	428.561	0	3916.208	2600.085	0	0
Distributor 4	0	0	0	201.714	3221.485	6703.280	0	4.044
Customer1	0	0	45.112	0	0, 5712.127	0, 5932.635	0	0
Customer2	0	0	35.278	0	16900.302, 2981.929	0, 8705.050	0	0
Customer3	0	0	35.329	0	0, 2146.713	989.841, 2795.909	0	0
Customer4	0	0	90.305	0	0, 5758.798	0, 5492.170	0	0

میدان نفتی زنجیره تامین شماره ۵ توانایی نسبتاً کمی را جهت مهار انتشارات گاز فلر دارد لذا با توجه به اینکه از مدیریت مصرف انرژی و رشد اقتصادی برخوردار است بایستی در مهار انرژی تلف شده و برگشت گاز فلر به چرخه گاز مهارت‌های مورد نیاز را کسب کند. همچنین میدان گازی تحت استفاده مازاد نیروی کار انسانی رشد اقتصادی بسیار ضعیفی دارد. اولین نیروگاه زنجیره تامین شماره ۵ مدیریت لازم جهت کنترل مصرف انرژی را دارد در حالیکه رشد اقتصادی بسیار پایینی را تجربه می‌کند با انتشارات مازاد گازهای گلخانه‌ای منوکسید نیتروژن و منوکسید گوگرد روبرو می‌شود. همچنین سومین نیروگاه با بکارگیری مقادیر زیادی از ظرفیت انرژی با رشد اقتصادی نسبتاً بالایی روبرو نشده است در حالیکه با انتشارات مازاد گازهای گلخانه‌ای منوکسید نیتروژن و دی اکسید کربن روبرو می‌شود.

اولین خط انتقال زنجیره تامین شماره ۵ خروجی‌های اقتصادی بسیار قابل توجه‌ای را بصورت جریان الکتریسیته منتقل شده به شبکه‌های توزیع تولید می‌کند بطوریکه رشد اقتصادی قابل توجه‌ای را همراه با مدیریت کنترل انرژی و مهار تلفات انرژی بدست می‌آورد. در حالیکه دومین خط انتقال با نتایج بسیار ضعیفی روبرو شده است بطوریکه رشد اقتصادی بسیار پایینی را بر اساس مصرف بیش از حد انرژی تجربه کرده است همچنین این خط انتقال نیاز به مهارت‌های بیشتری جهت مهار تلفات برق دارد.

اولین خط توزیع زنجیره تامین شماره ۵ رشد اقتصادی بالایی را بر اساس مصرف بیش از حد انرژی و تلفات برق بدست آورده است. به عبارت دیگر این خط توزیع رشد اقتصادی قابل توجهی را تحت بکارگیری ظرفیت و طول خطوط کسب نموده در حالیکه نیازمند توانایی‌های لازم جهت مهار تلفات برق است.

Table 14. The score of source, economic and environmental efficiency of supply chain 5

	Supplier 1 (Division 1)	Supplier 2 Division 2	Manufacturer 1 Division 3	Manufacturer 2 Division 4	Manufacturer 3 Division 5	Transmitter 1 Division 6	Transmitter 2 Division 7
Resource Efficiency θ_o^h	1	0.787321	0.995828	0.975046	0.72308	0.994796	0.170399
Economic Efficiency δ_o^h	1	0.18563	0.584272	1	1	2.646298	0.328538
Environmental Efficiency η_o^h	0.76342	1	0.975594	0.805885	0.985016	1	0.896175

Table 15. The score of source, economic and environmental efficiency of supply chain 5

	Distributor 1 Division 8	Distributor 2 Division 9	Distributor 3 Division 10	Distributor 4 Division 11	Customer 1 Division 12	Customer 2 Division 13	Customer 3 Division 13	Customer 4 Division 15
Sources Efficiency θ_o^h	0.572565	0.827131	0.885656	0.992161	0.967777	0.967777	0.967777	0.967777
Economic Efficiency δ_o^h	1.70709	1.321196	1.506184	0.480584	0.962831	1.006279	0.752545	1.048547
Environmental Efficiency η_o^h	0.873934	1	1	0.748414	1	1	1	1

دومین و سومین خط توزیع زنجیره تامین شماره ۵ رشد اقتصادی قابل توجهی را بر اساس مهار تلفات برق و مصرف انرژی نه چندان زیاد بدست آورده است در حالیکه چهارمین خط توزیع برق با مدیریت مصرف انرژی خروجی‌های اقتصادی بسیار پایینی را تحت تلفات نسبتاً بالای برق کسب نموده است. در واقع این خط توزیع بر خلاف سه خط توزیع دیگر از پایداری ضعیفی در فعالیت اقتصادی برخوردار است. بنابر این باید بتواند با بکارگیری مناسب انرژی در جهت افزایش رشد اقتصادی تکنولوژی‌های لازم جهت مهار تلفات انرژی را بدست آورد. سرانجام سه بخش مشترکین خانگی، عمومی و صنعتی نتایج مشابهی را بدست آوردند بطوریکه بخش مشترکین صنعتی برق رشد اقتصادی بالایی را تحت کنترل و مدیریت قطعی برق و مصرف مناسب انرژی بدست آورده است در حالیکه بخش کشاورزی رشد اقتصادی نسبتاً پایینی را نسبت به سایر بخش‌ها تجربه می‌کند بطوریکه مدیریت مصرف انرژی و کنترل قطعی برق این بخش مشابه سایر بخش‌ها می‌باشد.

Table 16. The score of eco- efficiency and source, economic and environmental efficiency in supply chains

DMU	Sources Efficiency θ_o	Ranking	Economic Efficiency δ_o	Ranking	Environmental Efficiency η_o	Ranking
1	0.776723	1	1.137321	2	0.857020	2
2	0.862726	4	1.425218	1	0.827392	4
3	0.789581	2	0.706183	5	0.876509	1
4	0.788236	3	0.785443	3	0.811295	5
5	0.748942	5	0.784608	4	0.831197	3
Average	0.7932416		0.9677546		0.8406826	

سرانجام جدول شماره ۱۶ سه کارایی منابع، اقتصادی و محیطی پنج زنجیره تامین را نشان می‌دهد. همچنین ستون‌های ۳، ۵ و ۷ رتبه‌بندی پنج زنجیره تامین را بر اساس سه کارایی منابع، اقتصادی و محیطی نشان می‌دهد. بر طبق مقدار میانگین سه زیرکارایی میانگین کارایی اقتصادی بالاتر از میانگین کارایی منابع و محیطی می‌باشد کارایی نسبتاً پایین انرژی و محیطی در زنجیره تامین شماره ۱ و ۲ بیانگر این مطلب هستند که رشد بالای اقتصادی هزینه زیادی را بصورت مصرف انرژی و آلودگی محیطی تحمیل کرده است.

۳-۴. ارزیابی پایداری زنجیره تامین

زنجیره‌های تامین بر اساس تفاوت در ناحیه جغرافیایی و منابع انرژی مدل‌های پیشرفت متفاوت را دنبال می‌کنند بطوریکه پراکندگی در پیشرفت‌های ناحیه‌ای را ایجاد می‌کند. بطور کلی بر اساس نتایج بدست آمده از مدل Meta-US-SBM زنجیره-های تامین به سه دسته بصورت زیر تقسیم می‌شوند.

۱. بخش‌های زنجیره تامین که سه زیرکارایی نسبتاً بالایی دارند. میدان نفتی، اولین و دومین نیروگاه زنجیره تامین شماره ۲ سه زیرکارایی منابع، اقتصادی و محیطی بالایی کسب نمودند.

۲. بخش‌های زنجیره تامین که خروجی اقتصادی بالا را بر اساس مصرف انرژی بالا و تخریب محیطی قابل توجهی کسب نمودند. میدان گازی زنجیره تامین شماره ۲ رشد اقتصادی بالایی را بر اساس مصرف بیش از حد منابع انرژی و تخریب محیطی بوسیله تخلیه انتشارات مضر و آلاینده‌های سمی بدست آورده است. همچنین دومین خط انتقال رشد اقتصادی قابل توجهی را بر اساس هزینه نسبتاً زیادی از مصرف بیش از حد انرژی و مقدار قابل توجهی از تلفات برق ایجاد نمودند. چهارمین خط توزیع رشد اقتصادی بسار قابل توجهی را تحت مصرف بیش از حد انرژی و تلفات برق بدست آورده است. در واقع رشد اقتصادی دومین خط انتقال هزینه‌های محیطی قابل توجهی را بصورت تخریب محیط پراداخته است در حالیکه چهارمین خط توزیع زنجیره تامین شماره ۲ خروجی‌های اقتصادی بسیار بالایی را بر اساس مصرف بیش از حد انرژی کسب نموده است.

۳. بخش‌های زنجیره تامین که کارایی انرژی نسبتاً بالایی را بدست آوردند و در بین سه کارایی انرژی، اقتصادی و محیطی دارای کارایی انرژی پیشرو می‌باشند. از این‌رو آن‌ها بایستی روی پیشرفت‌های اقتصادی و حفظ محیط متمرکز شوند. بعنوان مثال سومین بخش نیروگاهی رشد اقتصادی بسیار پایینی را بر اساس کارایی بالایی از مصرف انرژی انتشارات قابل توجهی از گازهای گلخانه‌ای روبرو شده است. بطور مشابه دومین خط انتقال زنجیره تامین شماره ۳ خروجی‌های اقتصادی پایینی را تحت کنترل مصرف انرژی بدست آوردند بطوریکه این خط انتقال کارایی بسیار بالای انرژی را تحت رشد اقتصادی پایینی و تلفات برق بدست آورده است.

۵. نتایج

کاهش مصرف انرژی و انتشارات آلوده، بکارگیری منابع بهینه و طراحی محصولات پاک، تمامی جنبه‌های ابداع تکنولوژی پیشرفته جهت ارتقای کارایی اقتصادی و محیطی و فرایندهای پایدار می‌باشند. بخش‌های انرژی و نیروگاهی سوخت‌های فسیلی زیادی را در تولید برق بکار می‌برند و گازهای آلوده زیادی را منتشر می‌کنند. بنا براین بخش‌های زنجیره تامین علاوه بر اینکه رشد اقتصادی مطلوبی را در فعالیتهای اقتصادی تولید کنند، بایستی توانایی لازم در حفظ محیط از آلودگی‌ها و کنترل مصرف انرژی بدست آورند. این مطالعه یک مدل تحلیل پوششی داده‌ها را جهت بهبود زنجیره‌های تامین پایدار در صنعت برق ارائه می‌کند. مدل ارائه شده Meta-US-SBM نامیده می‌شود که سه زیرکارایی انرژی، اقتصادی و محیطی، پانزده بخش و ده زنجیره تامین را محاسبه می‌کند. بر اساس نتایج بدست آمده از سه زیرکارایی خط‌مشی مدیریتی میدان گازی و خط انتقال یک زنجیره تامین بایستی روی کنترل مصرف منابع و حفظ محیط از آلودگی‌ها معطوف شود به جای آنکه صرفاً روی رشد اقتصادی حاصل از فروش انرژی تمرکز شود. دومین خط انتقال یک زنجیره تامین حجم زیادی از انرژی را جهت افزایش رشد اقتصادی بکار برده است در حالیکه کارایی انرژی پایینی دارد. بطور مشابه چهارمین خط توزیع یک زنجیره تامین نیز انرژی بالایی را برای افزایش راندمان اقتصادی بکار برده است در حالیکه امتیاز کارایی پایین انرژی را کسب نموده است. از طرفی زنجیره‌های تامینی وجود دارند که در دسته زنجیره‌های تامین با حق تقدم انرژی گروه‌بندی شده‌اند بطوریکه از کارایی انرژی نسبتاً بالایی برخوردار هستند بنابراین این زنجیره‌های تامین باید روی رشد اقتصادی و حفظ محیط متمکز شوند. سرانجام مشترکین صنعتی یک زنجیره تامین رشد اقتصادی قابل توجهی را جهت فروش برق و تعداد مشترکین بدشت آورده است.

منابع:

- [1]. Wang, K., Yu, S., Zhang, W., 2013. China's regional energy and environmental efficiency: a DEA window analysis based dynamic evaluation. *Math. Comput. Modell.* 58 (5-6), 1117–1127.
- [2]. Wang, S.H., Song, M.L., 2014. Review of hidden carbon emissions, trade, and labor income share in China, 2001–2011. *Energ Policy* 74, 395–405.
- [3]. Tone, K., 2001. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *Eur. J. Oper. Res.* 130 (3), 498–509. WBCSD, 2000. *Eco-Efficiency: Creating More Value with Less Impact*. World Business Council for Sustainable Development, Geneva.
- [4]. Zhang, J., Zeng, W., Shi, H., 2016. Regional environmental efficiency in China: analysis based on a regional slack-based measure with environmental undesirable outputs. *Ecol. Indic.* 71, 218–228.
- [5]. Hu, J.L., Wang, S.C., 2006. Total-factor energy efficiency of regions in China. *Energy policy* 34 (17), 3206–3217.
- [6]. Wang, K.L., Yang, B.C., Yang, L., 2012. The measurement and convergence of China's total-factor energy efficiency under the environmental constraints. *Chinese Journal of Management* 9 (7), 1071–1077 in Chinese.
- [7]. Bi, G.B., Song, W., Zhou, P., et al., 2014. Does environmental regulation affect energy efficiency in China's thermal power generation? Empirical evidence from a slacks based DEA mode. *Energy Policy* 66 (C), 537–546.
- [8]. Huang, J., Xia, J., Yu, Y., Zhang, N., 2018, Composite eco-efficiency indicators for China based on data envelopment analysis. *Ecological Indicators*. 85 (2018), 674–697.
- [9]. Rao, P., & Holt, D. (2005). Do green supply chains lead to competitiveness and economic performance? *International Journal of Operations & Production Management*, 25(9), 898–916.
- [10]. Hu, A. H., & Hsu, C. W. (2010). Critical factors for implementing green supply chain management practice: An empirical study of electrical and electronics industries in Taiwan. *Management Research Review*, 33(6), 586–608.
- [11]. Chiou, T.Y., Chan, H.K., Lettice, F., Chung, S.H., 2011. The influence of greening the suppliers and green innovation on environmental performance and competitive advantage in Taiwan. *Transport Res E-Log* 47 (6), 822–836.
- [12]. Pouralizadeh M, Amirteimoori A, Riccardi R, et al. (2020) Supply chain performance evaluation in the presence of undesirable outputs: A case on power industry. *AIMS Energy* 8: 48–80.
- [13]. Pouralizadeh M, (2020) A DEA model to sustainability improvement of the electricity supply chain in presence dual-role factors and undesirable outputs: A case on power industry. *AIMS Energy* 8(4): 580–614.
- [14]. Pouralizadeh, M (2021) Sustainability Assessment of Electricity Supply Chain via Resource Waste Reduction and Pollution Emissions Management: A Case Study of the Power Industry. *Smart and Sustainable Manufacturing Systems* 5(1): 290-309.
- [15]. Pouralizadeh, M. (2024). Marginal profit maximization estimation of supply chains by waste energy: A case study of the power industry. *RIARO operation research*, 58 (2024), 3143-3169. <https://doi.org/10.1051/ro/2024103>
- [16]. Iran Power Generation and Transmission Company, “Detailed Statistics of Iran's Power Industry Electricity Transmission” (in Persian), Iran Power Generation and Transmission Company, 2015. <https://web.archive.org/web/20210514014836/http://amar.tavanir.org.ir/>