

## زنجیره تأمین زیست محیطی فازی

حدیث معینی نیا

گروه ریاضی، دانشگاه سمنان، سمنان

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۶

نوع مقاله: علمی-پژوهشی

### چکیده

امروزه رقابت‌های سنگین در زنجیره‌های تأمین باعث بروز نگرانی‌های فراوان زیست محیطی شده است. از این رو، نگرانی‌های مصرف‌کنندگان و فشار آن‌ها باعث وضع قوانین مختلف توسط دولت‌ها شده است. در نتیجه شرکت‌ها ملزم به کاهش تأثیرات بد زیست محیطی محصولات و فرایندهایشان شده‌اند. طراحی شبکه زنجیره تأمین به عنوان مهم‌ترین تصمیم‌گیری استراتژیک در مدیریت زنجیره تأمین نقش کلیدی در عملکرد کلی زیست محیطی و اقتصادی زنجیره تأمین دارد به طور کلی، طراحی شبکه زنجیره تأمین شامل تعیین مکان، تعداد و ظرفیت امکانات شبکه و جریان مواد جمع شده بین آن‌ها است. مدیریت زنجیره تأمین زیست محیطی یا سبز می‌تواند به عنوان هماهنگی جنبه‌های زیست محیطی در مدیریت زنجیره تأمین تعریف شود که پوشش زنجیره تأمین مستقیم و معکوس را از طراحی محصول تا مدیریت عمر محصول بر عهده دارد. هدف نهایی این است که محیط را در سراسر زنجیره عرضه به خصوص تصمیمات راهبردی، در نظر بگیریم. در این فصل یک مدل برنامه ریزی ریاضی فازی چندهدفه برای طراحی یک زنجیره عرضه زیست محیطی با عدم قطعیت در داده‌های ورودی این مسأله ارائه می‌شود و از یک روش مبتنی بر ارزیابی چرخه عمر (مبتنی بر  $LCA$ ) برای ارزیابی و اندازه‌گیری تأثیرات محیطی مختلف، برای طراحی شبکه زنجیره تأمین استفاده می‌شود.

Mathematics Subject Classification (2010): 62H25; 03E72, Email: hadis.moini.1372@gmail.com.

عبارات و کلمات کلیدی: زنجیره تأمین، فازی، حلقه بسته

۱۳۹۹ (انجمن سیستم‌های فازی ایران)

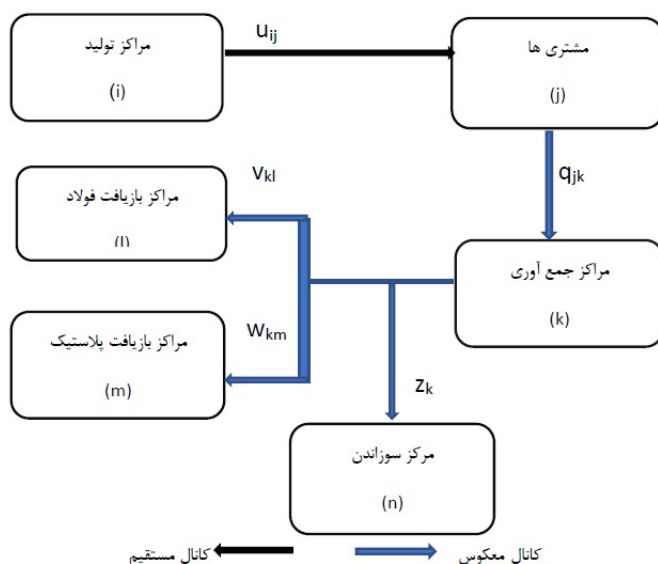
## ۱ تشریح مسئله

شبکه زنجیره تأمین در این فصل به یک مورد واقعی صنعتی متکی است. این مورد یک تولیدکننده سوزن و سرنگ پزشکی تک کاربره ایرانی است که تقریباً ۷۰ درصد از تقاضای داخلی را تأمین می‌کند و اخیراً سفارشات قابل توجهی را از دو کشور همسایه دریافت کرده است. در حال حاضر، یک کارخانه با حدود ۶۰۰ میلیون ظرفیت تولید در هر سال وجود دارد. به طور مشخص، سوزن و سرنگ یکبار مصرف پزشکی اثرات قابل توجهی بر محیط زیست دارند به ویژه در مرحله *EOL* (End of Life). به گزارش سازمان بهداشت جهانی سالانه در سرتاسر جهان حدود ۱۶ میلیارد تزریق به عمل می‌آید و تخمین شده که با استفاده مجدد از سوزن‌ها و سرنگ‌های بدون استریل سالانه ۸ تا ۱۶ میلیون انسان به هیپاتیت *B*، ۲۳ تا ۴۷ میلیون به هیپاتیت *C* و ۸۰۰۰۰ تا ۱۶۰۰۰۰ انسان به عفونت‌های ویروس ایدز (*HIV*) مبتلا می‌شوند بنابراین، مدیریت *EOL* سوزن و سرنگ پزشکی به عنوان ضایعات بالقوه عفونی بسیار حیاتی است. به منظور کاهش بار ناشی از بیماری‌های مرتبط با زباله‌های عفونی، به ویژه تیز (به عنوان مثال، سوزن و سرنگ‌ها) سازمان بهداشت جهانی یک مقاله سیاستی ارائه داده است که استراتژی سازمان را در میان مدت و بلند مدت بیان می‌کند. در این مقاله سازمان بهداشت جهانی برای پشتیبانی از کشورهای در حال توسعه و اجرای طرح ملی، سیاست‌ها و قوانینی برای مدیریت زباله‌های بهداشتی ایجاد کرده است. برای جلوگیری از خطرات فوق‌الذکر جعبه‌های ایمنی برای جمع‌آوری و نگهداری سوزن و سرنگ‌های عفونی پس از فرآیند تزریق برای اولین بار مورد استفاده قرار می‌گیرند. پس از آن، برای مقابله با اثرات مخرب سوزن و سرنگ‌های استفاده شده سه گزینه *EOL* در دسترس هستند: (۱) روش‌های سوزاندن، مانند سوزاندن سیمان و کوره دوار، (۲) روش‌های غیر سوزاندن، مانند اتوکلاو بخار با دفن زباله‌های بهداشتی و ضد عفونی مایکروویو و (۳) بازیافت. (اتوکلاو<sup>۱</sup> وسیله‌ای برای استریل ابزار پزشکی و آزمایشگاهی در فشار و دمای بالا و با استفاده از بخار آب است. اتوکلاوها در کاربردهای پزشکی برای انجام استریلیزاسیون و در صنایع شیمیایی برای به عمل آمدن پوشش‌ها و ولکانش لاستیک و سنتز هیدروترمال مورد استفاده قرار می‌گیرند.) سوزاندن یکی از گزینه‌هایی است که اغلب برای مقابله با سوزن و سرنگ پزشکی *EOL* استفاده شده است. با وجود هزینه

<sup>۱</sup>Autoclave

کم، استفاده راحت و توانایی بازیابی انرژی، گزینه‌ی سوزاندن اثرات منفی قابل توجهی بر محیط زیست دارد مانند آلودگی هوا و همچنین در میان منابع قوی انتشار گازهای گلخانه‌ای [۱۱] قرار دارد. یکی دیگر از گزینه‌ها در مرحله *EOL* برای سوزن و سرنگ پزشکی، روش‌های غیر سوزاندن است (به عنوان مثال، اتوکلاو بخار و ضدعفونی میکروویو) که همچنین می‌تواند به بهبود انرژی با کارایی‌های مختلف منجر شود. به طور کلی، در مدیریت زباله‌های پزشکی بازیافت، مطابق با مقررات و پتانسیل خطرات زیادی که دارد به عنوان فعالیت‌های ممنوع شناخته شده است [۲۹] با این حال، اخیراً امکان بازیافت سوزن و سرنگ پزشکی در هند تحت نظارت سازمان بهداشت جهانی مورد بررسی قرار گرفته است نتیجه نشان می‌دهد که این گزینه نیز می‌تواند برای سوزن و سرنگ پزشکی *EOL* با استفاده از راه حل‌هایی برای ضدعفونی مورد استفاده قرار گیرد به طور خاص در این مطالعه، بر دو گزینه برای محصولات در مرحله *EOL* با توجه به زمینه مورد مطالعه متمرکز شده‌ایم: (۱) سوزاندن و (۲) بازیافت. ساختار یکپارچه یک شبکه زنجیره تأمین چند هدفه شامل هر دو شبکه جلو و عقب برای یک محصول در شکل (۳.۲۰.۱) نشان داده شده است.

با استفاده از شبکه جلو توسط مراکز تولید محصولات جدید تولید شده و در میان مشتریان توزیع می‌شود در شبکه معکوس، محصولات *EOL* از طریق مراکز جمع‌آوری/جداسازی به مراکز بازیافت و زباله حمل می‌شوند. تمام تقاضاهای مشتریان باید برآورده شوند و تمام محصولات بازگشتی از مشتری‌ها باید به مراکز جمع‌آوری فرستاده شوند همچنین، درصد پیش‌بینی شده از تقاضای هر مشتری به عنوان محصول بازگشتی از مشتری مربوطه محسوب می‌شود. همان طور که قبلاً ذکر شد این شبکه زنجیره تأمین با انگیزه یکبار مصرف بودن سوزن و سرنگ پزشکی طراحی شده است اما می‌تواند از سایر دستگاه‌های پزشکی به ویژه دسته بندی‌های تیز [۲۹] و دیگر محصولات قابل بازیافت مانند کاغذ [۲۰] با برخی تغییرات کم پشتیبانی کند. عدم دسترسی یا ناتمام بودن داده‌ها در طراحی شبکه‌های دنیای واقعی یک چالش مهم است که سطح بالایی از عدم اطمینان در چنین مسائلی را تحمیل می‌کند. عدم دسترسی به داده‌های تاریخی و ماهیت مبهم پارامترها استفاده از توزیع احتمال در این موارد را غیرممکن می‌کند [۲۱] حتی اگر داده‌های تاریخی وجود داشته باشند در آینده رفتار پارامترها لزوماً منطبق بر الگوی تاریخی و افق استراتژیک از طراحی شبکه نیست لذا برای مقابله با این چالش پارامترهای مبهم با اعداد فازی



شکل ۱: تصویری از شبکه زنجیره تأمین یکپارچه مرتبط.

توصیف شده و توزیع امکان بر اساس داده‌های ناکافی در حال حاضر و دانش تصمیم گیرندگان برآورد می‌شوند [۲۸، ۱۳]. مسائل اصلی که باید در این زنجیره تأمین یکپارچه در شرایط عدم قطعیت مورد توجه قرار گیرد شامل تعیین تعداد و مکان مراکز تولید و جمع‌آوری و همچنین گزینه‌های *EOL* و مقادیر جریان مواد بین تسهیلات مختلف با توجه به دو تابع هدف متضاد: (۱) به حداقل رساندن هزینه کل و (۲) به حداقل رساندن کل تأثیرات زیست محیطی می‌باشد بنابراین، بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین، مستلزم یک تعامل مناسب بین این دو هدف است. برای اندازه‌گیری و مدل‌سازی هدف دوم از روش ارزیابی اثرات زیست محیطی مبتنی بر *LCA* به نام شاخص زیست محیطی ۹۹ استفاده شده است [۸]. *LCA* یک ابزار محبوب برای ارزیابی اثرات زیست محیطی است و به طور گسترده‌ای توسط محققان و متخصصان در دو دهه گذشته مورد استفاده قرار گرفته است. به ویژه آن‌که، *LCA* یک روش است که قادر به اندازه‌گیری عملکردها، فرایندها و فعالیت‌های زیست محیطی و اثرات بالقوه آن در طول کل دوره حیات محصول، می‌باشد [۲۴]. با این حال، فرآیند *LCA* دارای هزینه زیاد، وقت‌گیر و پیچیده است که

معمولاً نیاز به تخصص مدیریت زیست محیطی دارد علاوه بر این، نتایج  $LCA$  ساده نیست و نیاز به وزن و تفسیر دارد [۵، ۸]. شاخص زیست محیطی ۹۹ یک روش آسیب گرا مبتنی بر  $LCA$  است که مسائل مذکور را حل کرده است. شاخص زیست محیطی ۹۹ می‌تواند نتایج  $LCA$  را به واحدهای به راحتی قابل فهم و کاربر پسند به نام شاخص‌های زیست محیطی تبدیل کند. شاخص‌های زیست محیطی اعدادی هستند که کل بار اقتصادی یک فرآیند یا محصول را بیان می‌کنند. به کمک شاخص‌های زیست محیطی طراحان می‌توانند طرح‌های پیشنهادی متناوب را با توجه به اثرات کلی محیطی با یکدیگر مقایسه کنند. این روش شامل سه دسته آسیب است: (۱) سلامت انسان، (۲) کیفیت اکوسیستم و (۳) منابع [۸].

## ۱.۱ مدل بندی مسئله

شاخص‌ها، پارامترها و متغیرهای مورد استفاده برای مدل بندی مسأله طراحی شبکه زنجیره تأمین زیست محیطی ( $ESCOND$ ) در زیر شرح داده شده است.

### شاخص‌ها

- $i$  شاخص مکان‌های کانیدیا برای مراکز تولید  $i = 1, \dots, I$ .
- $j$  شاخص مکان ثابت مشتری  $j = 1, \dots, J$ .
- $k$  شاخص مکان‌های کانیدیا برای مراکز جمع آوری  $k = 1, \dots, K$ .
- $l$  شاخص مراکز بازیافت فولاد  $l = 1, \dots, L$ .
- $m$  شاخص مراکز بازیافت پلاستیک  $m = 1, \dots, M$ .
- $n$  شاخص مراکز سوزاندن  $n = 1, \dots, N$ .

### پارامترها

- $\tilde{d}_j$  تقاضا مشتری  $j$ .
- $\tilde{w}_j$  نرخ بازگشت از مشتری  $j$ .
- $\tilde{f}_i$  هزینه ثابت باز کردن مرکز تولید  $i$ .
- $\tilde{g}_k$  هزینه ثابت باز کردن مرکز جمع آوری  $k$ .
- $\tilde{c}_{ij}$  هزینه حمل و نقل در هر واحد محصول از مرکز تولید  $i$  به مشتری  $j$ .

- $\tilde{a}_{ij}$  هزینهی حمل و نقل برای هر محصول مورد استفاده از مشتری  $j$  به مرکز جمع آوری  $i$ .
- $\tilde{b}_{kl}$  هزینهی حمل و نقل برای بخش فولادی هر واحد محصول مورد استفاده از واحد جمع آوری  $k$  به مرکز بازیافت فولاد  $l$ .
- $\tilde{h}_{km}$  هزینهی حمل و نقل برای بخش پلاستیکی هر واحد محصول مورد استفاده از مرکز جمع آوری  $k$  به مرکز بازیافت پلاستیک  $m$ .
- $\tilde{o}_{kn}$  هزینهی حمل و نقل برای هر واحد محصول مورد استفاده از مرکز جمع آوری  $k$  به مرکز سوزاندن  $n$ .
- $\tilde{p}_i$  هزینهی ساخت هر واحد محصول در مرکز تولید  $i$ .
- $\tilde{\varphi}_k$  هزینهی پردازش برای هر واحد محصول مورد استفاده در مرکز جمع آوری  $k$ .
- $\tilde{\beta}_l$  هزینهی پردازش برای بخش فولادی هر واحد محصول مورد استفاده در مرکز بازیافت فولاد  $l$ .
- $\tilde{t}_m$  هزینهی پردازش برای بخش پلاستیکی هر واحد محصول مورد استفاده در مرکز بازیافت پلاستیک  $m$ .
- $\tilde{\theta}_n$  هزینهی پردازش برای هر واحد محصول مورد استفاده در مرکز سوزاندن  $n$ .
- $\tilde{\pi}_i$  حداکثر ظرفیت مرکز تولید  $i$ .
- $\tilde{\eta}_k$  حداکثر ظرفیت مرکز جمع آوری  $k$ .
- $\tilde{\delta}_l$  حداکثر ظرفیت مرکز بازیافت فولاد  $l$ .
- $\tilde{\zeta}_m$  حداکثر ظرفیت مرکز بازیافت پلاستیک  $m$ .
- $\tilde{\xi}_n$  حداکثر ظرفیت مرکز سوزاندن  $n$ .
- $e_i^{pro}$  تأثیرات زیست محیطی برای تولید یک واحد محصول.
- $e_{ij}^{tpc}$  تأثیرات زیست محیطی حمل یک واحد محصول از مرکز تولید  $i$  به مشتری  $j$ .
- $e_{jk}^{tcc}$  تأثیرات زیست محیطی حمل و نقل یک واحد محصول از مشتری  $j$  به مرکز جمع آوری  $k$ .
- $e_{kn}^{tci}$  تأثیرات زیست محیطی حمل و نقل یک واحد از محصولات از مرکز جمع آوری  $k$  به

مرکز سوزاندن  $n$ .

تأثیرات زیست محیطی حمل و نقل بخش فولاد هر واحد محصول استفاده شده، از  $ei_{kl}^{tcs}$

مرکز جمع آوری  $k$  به مرکز بازیافت فولاد  $l$ .

تأثیرات زیست محیطی حمل و نقل برای بخش پلاستیکی هر واحد محصول استفاده شده، از  $ei_{km}^{tcp}$

شده، از مرکز جمع آوری  $k$  به مرکز بازیافت پلاستیک  $m$ .

تأثیرات زیست محیطی برای نگهداری هر واحد محصول استفاده شده در مراکز جمع آوری،  $ei^{col}$

آوری.

تأثیرات زیست محیطی از سوختن یک واحد محصول استفاده شده.  $ei^{inc}$

تأثیرات زیست محیطی بازیافت بخش فولاد یک واحد از محصول استفاده شده.  $ei^{src}$

تأثیرات زیست محیطی بازیافت بخش پلاستیکی یک واحد از محصول استفاده شده.  $ei^{prc}$

### متغیرهای تصمیم‌گیری

مقدار محصولات حمل شده از مرکز تولید  $i$  به مشتری  $j$ .  $w_{ij}$

مقدار محصولات حمل شده از مشتری  $j$  به مرکز جمع آوری  $k$ .  $q_{jk}$

مقدار قطعات فولادی، محصولات حمل شده از مرکز جمع آوری  $k$  به مرکز بازیافت  $l$ .  $v_{kl}$

فولاد  $l$ .

مقدار قطعات پلاستیکی، محصولات حمل شده از مرکز جمع آوری  $k$  به مرکز بازیافت  $m$ .  $w_{km}$

پلاستیک  $m$ .

مقدار محصولات حمل شده از مرکز جمع آوری  $k$  به مرکز سوزاندن  $n$ .  $z_{kn}$

۱ است اگر یک مرکز تولید در محل  $i$  باز شود در غیر این صورت ۰ است.  $x_i$

۱ است اگر مرکز جمع آوری در محل  $k$  باز شود در غیر این صورت ۰ است.  $y_k$

لازم به ذکر است نمادهایی که با تیلد ( $\sim$ ) نشان داده شده‌اند ضریب‌های فازی است این پارامترها با توزیع احتمال مناسب سنجیده می‌شوند. با توجه به نماد گذاری بالا مسأله مربوط به آن می‌تواند به صورت زیر مدل بندی شود.

$$\begin{aligned}
 \text{Min } w_\lambda &= \sum_i \bar{f}_i x_i + \sum_k \bar{g}_k y_k + \sum_i \sum_j (\bar{P}_i + \bar{C}_{ij}) u_{ij} \\
 &+ \sum_j \sum_k (\bar{\varphi}_k + \bar{a}_{jk}) q_{jk} + \sum_k \sum_l (\bar{\beta}_l + \bar{b}_{kl}) v_{kl} \\
 &+ \sum_k \sum_m (\bar{t}_m + \bar{h}_{km}) w_{km} + \sum_k \sum_n (\bar{\theta}_n + \bar{o}_{kn}) z_{kn}
 \end{aligned} \tag{۱}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Min } w_\gamma &= \sum_i \sum_j (e_i^{pro} + e_i^{tpc}) u_{ij} \\
 &+ \sum_j \sum_k (e_i^{col} + e_i^{tcc}) q_{jk} + \sum_k \sum_n (e_i^{inc} + e_i^{tci}) z_{kn} \\
 &+ \sum_k \sum_l (e_i^{src} + e_i^{tcs}) v_{kl} + \sum_k \sum_m (e_i^{prc} + e_i^{tcp}) w_{km}
 \end{aligned} \tag{۲}$$

$$\text{s.t. : } \sum_i u_{ij} \geq \bar{d}_j, \quad \forall j, \tag{۳}$$

$$\sum_k q_{jk} \geq \bar{d}_j \bar{w}_j, \quad \forall j, \tag{۴}$$

$$\sum_j q_{jk} = \sum_m w_{km} + \sum_n z_{kn}, \quad \forall k, \tag{۵}$$

$$\sum_m w_{km} = \sum_l v_{kl}, \quad \forall k, \tag{۶}$$

$$\sum_i u_{ij} \leq x_i \bar{\pi}_j, \quad \forall i, \tag{۷}$$

$$\sum_j q_{jk} \leq y_k \bar{\eta}_k, \quad \forall k, \tag{۸}$$

$$\sum_k v_{kl} \leq \bar{\delta}_l, \quad \forall l, \tag{۹}$$

$$\sum_k w_{km} \leq \bar{\zeta}_m, \quad \forall m, \tag{۱۰}$$

$$\sum_k z_{kn} \leq \bar{\xi}_n, \quad \forall n, \tag{۱۱}$$

$$x_i, y_k \in \{0, 1\}, \quad \forall i, k, \tag{۱۲}$$

$$u_{ij}, q_{jk}, v_{kl}, w_{km}, z_{kn} \geq 0, \quad \forall i, j, k, l, m, n. \tag{۱۳}$$

همان طور که اشاره شد، دو تابع هدف مهم و متضاد در مدل بندی مسأله ESCND در نظر گرفته شده است:

۱. هدف اول: به حداقل رساندن هزینه کل

هزینه کل طراحی شبکه زنجیره تأمین شامل هزینه‌های ثابت تسهیلات، هزینه‌های متغیر



پردازش و حمل و نقل جریان‌های بین امکانات شبکه است. قابل توجه است که هزینه‌های حمل و نقل بین تسهیلات با ضرب کردن هزینه یک واحد حمل و نقل در هر واحد فاصله (یعنی یک کیلومتر) محاسبه می‌شود.

۰۲. هدف دوم: به حداقل رساندن تأثیرات کلی زیست محیطی

همان طور که ذکر شد، روش شاخص زیست محیطی ۹۹ برای تخمین تأثیرات کلی محیط زیست از پیکربندی شبکه‌های زنجیره تأمین مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای استفاده از این روش، ابتدا باید مرز سیستم، واحد عملیاتی و هدف استفاده از شاخص زیست محیطی تعریف شود در اینجا، مرز سیستم مورد مطالعه را می‌توان به عنوان مرز در اطراف شبکه زنجیره تأمین شکل (۱) تعیین کرد و واحد عملیاتی چنین شبکه زنجیره تأمین می‌تواند به عنوان تحقق تقاضای مشتری توسط تولید و توزیع محصولات در شبکه جلو و مدیریت ایمن محصولات *EOL* از طریق شبکه معکوس تعریف گردد. همچنین هدف استفاده از شاخص زیست محیطی برآورد تأثیرات زیست محیطی در طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین مختلف است.

در مرحله دوم، چرخه عمر باید تعریف شود در مسائل مربوط به *ESCND* مراحل چرخه عمر عبارتند از: (۱) تولید (*pro*)، (۲) حمل و نقل از مراکز تولید به مشتریان (*tpc*)، (۳) حمل و نقل از مشتریان به مراکز جمع آوری (*tcc*)، (۴) بررسی محصولات مورد استفاده در مراکز جمع آوری (*col*)، مانند بازرسی و مرتب سازی، (۵) حمل و نقل از مراکز جمع آوری به مراکز سوزاندن (*tci*)، (۶) سوزاندن محصولات مصرف شده (*inc*)، (۷) حمل و نقل از مراکز جمع آوری به مراکز بازیافت فولاد (*tcs*)، (۸) بازیافت فولاد (*src*)، (۹) حمل و نقل از مراکز جمع آوری به مراکز بازیافت پلاستیک (*tcp*) و (۱۰) بازیافت پلاستیک (*prc*). لازم به ذکر است که مرحله استفاده مناطق مشتری از مراحل چرخه عمر حذف شده است زیرا بر متغیرهای تصمیم مدل تأثیر نمی‌گذارد و بنابراین بر پیکربندی کلی شبکه زنجیره تأمین مربوطه تأثیر نخواهد گذاشت.

در مرحله سوم، مواد و فرآیندها از طریق مراحل چرخه عمر باید اندازه گیری شوند.

سپس در مرحله چهارم، محاسبه نهایی انجام می‌شود به صورت:

۰۱. پیدا کردن شاخص زیست محیطی مربوط به محصول مورد نظر،

۰۲. ضرب این مقادیر با مقدار موجودی محصول،

### ۳. اضافه کردن نتایج شرکت‌های کمکی؛

به عنوان مثال برای احتراق فولاد، مقدار فولاد (کیلوگرم) باید ضرب در شاخص زیست محیطی مربوطه، یعنی ۳۲- (میلی لیتر در هر کیلوگرم) شود و سپس برای محاسبه نهایی تأثیرات زیست محیطی مرحله سوزاندن ( $ei^{inc}$ ) نتایج بخش‌های فولاد و پلاستیک (به عنوان مثال  $PP$  و  $PVC$ ) باید با هم جمع شوند. با توجه به متغیرهای تصمیم مدل، مقادیر تأثیرات زیست محیطی ( $ei : s$ ) برای هر واحد محصول محاسبه می‌شود. روش شاخص زیست محیطی ۹۹ سه دیدگاه متفاوت را ارائه می‌دهد (۱) سلسله مراتبی، (۲) فردگرایی و (۳) تساوی گرایی. در این مطالعه نسخه میانگین سلسله مراتبی برای محاسبه مقدارهای شاخص زیست محیطی استفاده می‌شود. در نسخه میانگین سلسله مراتبی سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم و کاهش منابع به ترتیب ۴۰٪، ۴۰٪ و ۲۰٪ در محاسبه مقدار شاخص زیست محیطی ۹۹ با یکدیگر همکاری می‌کنند. بر اساس توصیفات فوق، تابع هدف دوم به صورت (۳.۲) تعریف می‌شود.

محدودیت‌های (۳.۳) و (۳.۴) اطمینان می‌دهند که تقاضای تمام مشتریان برآورده شده و تمام محصولات مصرف شده از مشتریان جمع آوری می‌شوند.

محدودیت‌های (۳.۵) و (۳.۶) تعادل جریان در مراکز جمع آوری را تضمین می‌کنند. از آنجا که دو مدل  $EOL$  در مدل پیشنهادی در نظر گرفته می‌شود، محصولات مورد استفاده جمع آوری شده در مراکز جمع آوری باید به مراکز سوزاندن و یا جدا شدن به قطعات پلاستیکی و فولادی ارسال شوند و سپس به مراکز بازیافت فرستاده شوند. بنابراین تعداد قطعات پلاستیکی و فولادی که به مراکز بازیافت ارسال می‌شوند باید برابر باشند (۳.۶) زیرا آن‌ها از یک محصول جدا می‌شوند. محدودیت‌های (۳.۷) تا (۳.۱۱) محدودیت ظرفیت مراکز تولید، جمع آوری، بازیافت فولاد، بازیافت پلاستیک و ظرفیت مراکز سوزاندن هستند. همچنین محدودیت‌های (۳.۷) و (۳.۸) ممنوعیت انتقال واحدهایی از محصولات جدید و استفاده شده را به ترتیب از/ به مراکز تولید و جمع آوری که باز نمی‌شوند را تضمین می‌کنند.

محدودیت‌های (۳.۱۲) و (۳.۱۳) مربوط به دودویی و غیرمنفی بودن متغیرهای تصمیم مربوطه است.

## ۲ روش حل پیشنهادی

عدم قطعیت را می‌توان به عنوان: (۱) انعطاف پذیری در محدودیت‌ها و اهداف و (۲) عدم قطعیت در داده‌ها طبقه بندی کرد [۳]. برای حل انعطاف پذیری در محدودیت‌ها و توابع هدف از مدل‌های برنامه ریزی ریاضی انعطاف پذیر استفاده می‌شود [۴، ۱۸]. عدم قطعیت در داده‌ها می‌تواند به دو دسته تقسیم شود: (۱) تصادفی که از ماهیت تصادفی پارامترها می‌آید و معمولاً روش‌های برنامه ریزی تصادفی برای مدل سازی این نوع عدم قطعیت استفاده می‌شوند (۲) عدم قطعیت شناختی که از ابهام در داده‌های تصادفی با آن روبرو می‌شویم و منجر به روش‌های برنامه ریزی امکانی برای رسیدگی به این نوع از عدم قطعیت می‌شود [۲۳، ۱۸].

با توجه به توصیفات فوق و از آنجایی که با پارامترهای مبهم در مسأله *ESCND* روبرو هستیم از رویکرد برنامه ریزی امکانی برای رسیدگی به پارامترهای نامعلوم در مدل پیشنهادی استفاده می‌کنیم. در این رویکرد هر پارامتر ناشناخته دارای توزیع امکان مربوطه می‌باشد. توزیع امکانی نشان دهنده درجه امکان وقوع مقادیر ممکن برای هر پارامتر نامشخص است و عمدتاً بر اساس داده‌های موجود و همچنین دانش کارشناس تعیین می‌شود بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیشنهادی یک مدل برنامه ریزی امکانی چندهدفه آمیخته با عدد صحیح (*MOPMIP*) است برای حل این مدل *MOPMIP* یک رویکرد دو مرحله‌ای پیشنهاد شده است که در مرحله اول از روش خیمنز و همکاران [۱۱] برای تبدیل مدل پیشنهادی *MOPMIP* به یک مدل قطعی کمکی معادل استفاده شده است و در مرحله دوم، یک نسخه اصلاح شده از روش  $\epsilon$ -قیدی پیشنهاد شده است برای پیدا کردن جواب توافقی نهایی.

## ۳ مدل قطعی کمکی معادل

تعدادی از روش‌ها در مقالات برای حل مدل‌های برنامه ریزی امکانی پیشنهاد شده‌اند [۱۱، ۱۳، ۱۶]. روش خیمنز و همکاران [۱۱] بر اساس مفاهیم قوی ریاضی یعنی بازه مورد انتظار و مقدار مورد انتظار از اعداد فازی، تشکیل شده است و همچنین این روش برای حل مسائل خطی فازی کارآیی محاسباتی مختلف دارد

زیرا می‌تواند خطی بودن آن را حفظ کند و تعداد توابع هدف و محدودیت‌ها را افزایش ندهد. با توجه به روش خیمنز و همکاران [۱۱] گفته شده در تعاریف اولیه مدل برنامه ریزی امکانی پیشنهادی *ESCOND* را می‌توان به مدل قطعی کمکی معادل زیر تبدیل کرد.

توابع هدف :

$$\begin{aligned}
 \text{Min } w_1 = & \sum_i \left( \frac{f_i^{pes} + \gamma f_i^{mos} + f_i^{opt}}{\varphi} \right) x_i + \sum_k \left( \frac{g_k^{pes} + \gamma g_k^{mos} + g_k^{opt}}{\varphi} \right) y_k \\
 & + \sum_i \sum_j \left( \frac{p_i^{pes} + \gamma p_i^{mos} + p_i^{opt} + c_{ij}^{pes} + \gamma c_{ij}^{mos} + c_{ij}^{opt}}{\varphi} \right) u_{ij} \\
 & + \sum_j \sum_k \left( \frac{\varphi_k^{pes} + \gamma \varphi_k^{mos} + \varphi_k^{opt} + a_{jk}^{pes} + \gamma a_{jk}^{mos} + a_{jk}^{opt}}{\varphi} \right) q_{jk} \\
 & + \sum_k \sum_l \left( \frac{\beta_l^{pes} + \gamma \beta_l^{mos} + \beta_l^{opt} + b_{kl}^{pes} + \gamma b_{kl}^{mos} + b_{kl}^{opt}}{\varphi} \right) v_{kl} \\
 & + \sum_k \sum_m \left( \frac{t_m^{pes} + \gamma t_m^{mos} + t_m^{opt} + h_{km}^{pes} + \gamma h_{km}^{mos} + h_{km}^{opt}}{\varphi} \right) w_{km} \\
 & + \sum_k \sum_n \left( \frac{\theta_n^{pes} + \gamma \theta_n^{mos} + \theta_n^{opt} + o_{kn}^{pes} + \gamma o_{kn}^{mos} + o_{kn}^{opt}}{\varphi} \right) z_{kn}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Min } w_2 = & \sum_i \sum_j (e_i^{pro} + e_{ij}^{tpc}) u_{ij} + \sum_j \sum_k (e_i^{col} + e_{jk}^{tcc}) q_{jk} \\
 & + \sum_k \sum_n (e_i^{inc} + e_{kn}^{tci}) z_{kn} + \sum_k \sum_l (e_i^{src} + e_{kl}^{tcs}) v_{kl} \\
 & + \sum_k \sum_m (e_i^{prc} + e_{km}^{tcp}) w_{km}
 \end{aligned}$$

و مجموعه قیود:

$$\begin{aligned}
 s.t. : \quad & \sum_i u_{ij} \geq \left[ \alpha \left( \frac{d_j^{mos} + d_j^{opt}}{\gamma} \right) + (1 - \alpha) \left( \frac{d_j^{pes} + d_j^{mos}}{\gamma} \right) \right], \forall j, \\
 & \sum_k q_{jk} \geq \left[ \alpha \left( \frac{d_j^{mos} + d_j^{opt}}{\gamma} \right) + (1 - \alpha) \left( \frac{d_j^{pes} + d_j^{mos}}{\gamma} \right) \right] \\
 & \quad \times \left[ \alpha \left( \frac{w_j^{mos} + w_j^{opt}}{\gamma} \right) + (1 - \alpha) \left( \frac{w_j^{pes} + w_j^{mos}}{\gamma} \right) \right], \forall j, \\
 & \sum_j q_{jk} = \sum_m w_{km} + \sum_n z_{kn}, \forall k, \\
 & \sum_m w_{km} = \sum_l v_{kl}, \forall k, \\
 & \sum_i u_{ij} \leq x_i \left[ \alpha \left( \frac{\pi_i^{pes} + \pi_i^{mos}}{\gamma} \right) + (1 - \alpha) \left( \frac{\pi_i^{mos} + \pi_i^{opt}}{\gamma} \right) \right], \forall i, \\
 & \sum_j q_{jk} \leq y_k \left[ \alpha \left( \frac{\eta_k^{pes} + \eta_k^{mos}}{\gamma} \right) + (1 - \alpha) \left( \frac{\eta_k^{mos} + \eta_k^{opt}}{\gamma} \right) \right], \forall k, \\
 & \sum_k v_{kl} \leq \left[ \alpha \left( \frac{\delta_l^{pes} + \delta_l^{mos}}{\gamma} \right) + (1 - \alpha) \left( \frac{\delta_l^{mos} + \delta_l^{opt}}{\gamma} \right) \right], \forall l, \\
 & \sum_k w_{km} \leq \left[ \alpha \left( \frac{\zeta_m^{pes} + \zeta_m^{mos}}{\gamma} \right) + (1 - \alpha) \left( \frac{\zeta_m^{mos} + \zeta_m^{opt}}{\gamma} \right) \right], \forall m, \\
 & \sum_k z_{kn} \leq \left[ \alpha \left( \frac{\xi_n^{pes} + \xi_n^{mos}}{\gamma} \right) + (1 - \alpha) \left( \frac{\xi_n^{mos} + \xi_n^{opt}}{\gamma} \right) \right], \forall n, \\
 & x_i, y_k \in \{0, 1\}, \quad \forall i, k, \\
 & u_{ij}, q_{jk}, v_{kl}, w_{km}, z_{kn} \geq 0, \quad \forall i, j, k, l, m, n.
 \end{aligned}$$

#### ۴ رویکرد حل فازی تعاملی

برای حل مدل‌های برنامه ریزی چند هدفه (*MOP*) چندین روش در مقالات توسعه یافته وجود دارد. روش‌های برنامه ریزی فازی به دلیل توانایی که در اندازه‌گیری و تنظیم میزان رضایت‌مندی هر تابع هدف دارند از جمله روش‌های بسیار مورد استفاده در این زمینه هستند. در رویکردهای برنامه ریزی فازی برای

مدل‌های  $MOP$  از روش‌های ساده و اولیه مانند زیمرمن [۳۰]، ساکاوا<sup>۲</sup> و همکاران [۲۵] و لای<sup>۳</sup> و هوانگ<sup>۴</sup> [۱۴] به روش‌های پیشرفته تری نظیر سلیم و اوژکاراخان<sup>۵</sup> [۲۶]، ترابی و حسینی<sup>۶</sup> [۲۷] و لی<sup>۷</sup> و همکاران [۱۵] می‌توان اشاره کرد.

در اینجا، ما یک راه حل فازی را بر اساس روش  $\varepsilon$ -قیدی پیشنهاد کرده‌ایم. روش  $\varepsilon$ -قیدی یک تصویر مناسب از تمام مجموعه جواب‌های بهینه پرتو برای تصمیم‌گیرنده ارائه می‌دهد و سپس تصمیم‌گیرنده می‌تواند بهترین جواب را انتخاب کند. بنابراین، تمام جواب‌ها مشخص شده و تصمیم‌گیرنده می‌تواند تصمیم نهایی را با اطمینان بیشتر با توجه به اطلاعات موجود تعیین کند. دو مورد مهم در روش  $\varepsilon$ -قیدی وجود دارد که باید در هنگام استفاده از این روش مورد توجه قرار گیرد: (۱) محدوده هر تابع هدف باید بر روی مجموعه کارا تعیین شود و (۲) مقدار اپسیلون ( $s$ )، باید در محدوده هر تابع هدف به طور سیستماتیک، برای تولید جواب‌های بهینه پرتو متفاوت عوض بشود. معمولاً جدول نهایی برای مشخص کردن مقادیر بردار بهینه و ندیر هر تابع هدف استفاده می‌شود با این وجود، محدوده به دست آمده از این روش ممکن است شامل جواب‌های کارای ضعیف نیز باشد [۱۷] برای جلوگیری از این مشکل و ارائه یک ابزار مناسب برای تصمیم‌گیرنده برای تغییر و تنظیم مقدار اپسیلون‌ها با توجه به سطح رضایت مندی از هر تابع هدف یک رویکرد حل فازی تعاملی بر اساس روش  $\varepsilon$ -قیدی پیشنهاد شده است مراحل روش پیشنهادی را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد.

مرحله ۱: مدل  $MOPMIP$  با استفاده از روش خیمنز و همکاران به یک مدل قطعی کمکی معادل تبدیل شده است [۱۱] برای این منظور ابتدا توابع هدف مبهم با استفاده از مقدار مورد انتظار از پارامترهای مبهم تبدیل به توابع هدف قطعی می‌شوند و در مرحله دوم، حداقل درجه شدنی بودن بردار تصمیم (یعنی  $\alpha$ ) تعیین می‌شود و سپس محدودیت‌های فازی به حالت قطعی تبدیل می‌شوند (بخش ۳.۵).

مرحله ۲: محدوده هر تابع هدف روی مجموعه کارا با محاسبه جواب‌های  $\alpha$ -بهینه و  $\alpha$ -ندیر برای هر تابع هدف تعیین می‌شود. برای محاسبه جواب‌های  $\alpha$ -بهینه به عنوان مثال  $(w_1^{\alpha-optimal}, x_1^{\alpha-optimal})$  و  $(w_p^{\alpha-optimal}, x_p^{\alpha-optimal})$  مدل قطعی معادل باید برای هر تابع

<sup>2</sup>Sakawa

<sup>3</sup>Lai

<sup>4</sup>Hwang

<sup>5</sup>Selim and ozkarahan

<sup>6</sup>Torabi and hassini

<sup>7</sup>Li

هدف جداگانه حل شود و سپس جواب  $\alpha$ -ندیر برای هر تابع هدف می‌تواند به صورت زیر محاسبه شود.

$$w_{\gamma}^{\alpha-nadir} = \min \left\{ w_{\gamma} \mid w_{\gamma} \leq w_{\gamma}^{\alpha-optimal} \ \& \ x \in F(x) \right\}$$

$$w_{\gamma}^{\alpha-nadir} = \min \left\{ w_{\gamma} \mid w_{\gamma} \leq w_{\gamma}^{\alpha-optimal} \ \& \ x \in F(x) \right\}$$

$F(x)$  ناحیه شدنی را برای محدودیت‌های مدل قطعی کمکی معادل نشان می‌دهد.  
مرحله ۳: تعیین یک تابع عضویت خطی برای هر تابع هدف به شرح زیر است:

$$\mu_{\gamma}(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } w_{\gamma} < w_{\gamma}^{\alpha-optimal} \\ \frac{w_{\gamma}^{\alpha-nadir} - w_{\gamma}}{w_{\gamma}^{\alpha-nadir} - w_{\gamma}^{\alpha-optimal}}, & \text{if } w_{\gamma}^{\alpha-optimal} \leq w_{\gamma} \leq w_{\gamma}^{\alpha-nadir} \\ 0, & \text{if } w_{\gamma} > w_{\gamma}^{\alpha-nadir} \end{cases}$$

$$\mu_{\gamma}(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } w_{\gamma} < w_{\gamma}^{\alpha-optimal} \\ \frac{w_{\gamma}^{\alpha-nadir} - w_{\gamma}}{w_{\gamma}^{\alpha-nadir} - w_{\gamma}^{\alpha-optimal}}, & \text{if } w_{\gamma}^{\alpha-optimal} \leq w_{\gamma} \leq w_{\gamma}^{\alpha-nadir} \\ 0, & \text{if } w_{\gamma} > w_{\gamma}^{\alpha-nadir} \end{cases}$$

مرحله ۴: مدل قطعی چند هدفه معادل را به یک مدل تک هدفه بر اساس روش  $\varepsilon$ -قیدی به صورت زیر تبدیل کنید.

$$\text{Max } \mu_{\gamma}(x)$$

$$\text{s.t. } \mu_{\gamma}(x) \geq \varepsilon,$$

$$x \in F(x),$$

$$\varepsilon \in [0, 1],$$

در مسئله برنامه ریزی بالا درجه رضایت مندی از عملکرد تابع هدف دوم مدل پیشنهادی، در تابع هدف و درجه رضایت مندی از تابع هدف اول مدل پیشنهادی، به عنوان محدودیت جانبی استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که هیچ قید و شرطی در انتخاب درجه رضایت مندی از هر هدف برای استفاده به عنوان

محدودیت جانبی یا تابع هدف وجود ندارد.

مرحله ۵:  $\varepsilon$  به طور سیستماتیک برای تولید جواب‌های بهینه پرتو متفاوت روی کل مجموعه کارا تغییر می‌کند. در روش  $\varepsilon$ -قیدی،  $\varepsilon$  در محدوده تابع هدف متناظر انتخاب می‌شود. برای این منظور معمولاً محدوده‌ی تابع هدف به قسمت‌های مساوی تقسیم می‌شود و نقاط شبکه به عنوان مقدار اپسیلون استفاده می‌شوند با این حال، از آنجا که در روش جواب پیشنهادی، درجه رضایت مندی از هر تابع هدف مورد استفاده قرار می‌گیرد تصمیم‌گیرنده می‌تواند به سادگی محدوده بین  $0$  و  $1$  را تقسیم کرده و از نقاط شبکه به عنوان مقدار اپسیلون (به عنوان مثال برای  $10^0$  بخش مساوی  $11$  نقطه شبکه‌ای وجود دارد:  $(0, 0.1, 0.2, \dots, 1)$ ) برای به دست آوردن محدوده‌ایی از تعادل (یعنی هیچ تفاوت معناداری بین درجه‌های رضایت مندی اهداف وجود ندارد) و عدم تعادل (یعنی تفاوت قابل توجهی بین درجه‌های رضایت مندی از اهداف وجود دارد) جواب‌های کارا استفاده کند.

مرحله ۶: اگر تصمیم‌گیرنده به یکی از جواب‌های تولید شده راضی باشد در همین مرحله متوقف شده و جواب مورد نظر را به عنوان تصمیم نهایی انتخاب می‌کند در غیر این صورت بخش‌های مورد نظر را انتخاب کرده (به عنوان مثال بخش بین  $0.6$  تا  $0.7$ ) و به مرحله ۵ می‌رود تا مقدار  $\varepsilon$  را در محدوده جدید (بخش انتخاب شده) برای تولید جواب‌های جدید بهینه پرتو تغییر دهد همچنین در بعضی موارد، ممکن است تصمیم‌گیرنده خواستار تغییر مقدار  $\alpha$  باشد اگر مقدار  $\alpha$  تغییر کند باید الگوریتم را از مرحله ۱ راه اندازی مجدد کند.

## ۵ نتایج عددی

در این بخش، اعتبار مدل *ESCOND* توسعه یافته و همچنین سودمندی روش پیشنهادی را از طریق بررسی یک مثال واقع‌گرایانه ارزیابی می‌کنیم.

### ۱.۵ مثال عددی

شرکت تولیدکننده دارای ۱۳ مشتری داخلی و دو مشتری خارجی از دو کشور همسایه است. این شرکت تنها مسئول جمع‌آوری محصولات مصرف شده از مشتریان داخلی است بنابراین، نرخ بازگشت از مشتریان خارجی برابر با صفر است. برای برآورد توزیع امکان پارامترهای مبهم، ابتدا داده‌های هدف جمع‌آوری شده و سپس در جلسه اجماع، کارشناسان و مدیران شرکت، سه ارزش برجسته (به عنوان مثال، به احتمال زیاد، بدبین‌ترین و خوشبینانه‌ترین مقادیر) از پارامترهای فازی مثلثی [۱۳] را با توجه به داده‌های موجود و دانش خود تعیین می‌کنند. داده‌های فازی برای تقاضا و نرخ بازگشت از مشتری در جدول (۳.۱) نشان داده شده



است. لازم به ذکر است که تقاضای نشان داده شده در جدول (۳.۱) تقاضای کل بیش از سه سال است.

جدول ۱: اطلاعات تقاضا ( $\bar{d}_j$ ) و نرخ بازگشت ( $\bar{w}_j$ )

مشتری	تقاضا (میلیون‌ها)	نرخ بازگشت
(۱) مشهد	(۲۳۴, ۲۵۴, ۲۹۲)	(۰,۶۵, ۰,۷۵, ۰,۸۵)
(۲) یزد	(۲۵۹, ۳۳۰, ۳۹۰)	(۰,۶۵, ۰,۷۵, ۰,۸۵)
(۳) شیراز	(۱۱۲, ۱۲۴, ۱۳۸)	(۰,۶۵, ۰,۷۵, ۰,۸۵)
(۴) ارومیه	(۱۰۱, ۱۰۸, ۱۳۳)	(۰,۵۵, ۰,۶۵, ۰,۷۵)
(۵) اردبیل	(۹۸, ۱۱۰, ۱۲۷)	(۰,۵۵, ۰,۶۵, ۰,۷۵)
(۶) رشت	(۲۱۰, ۲۶۳, ۲۷۵)	(۰,۶۵, ۰,۷۵, ۰,۸۵)
(۷) کرمانشاه	(۵۲, ۶۳, ۷۵)	(۰,۵۵, ۰,۶۵, ۰,۷۵)
(۸) کرج	(۸۴, ۹۳, ۱۱۰)	(۰,۷, ۰,۸, ۰,۹)
(۹) زنجان	(۱۰۰, ۱۱۸, ۱۳۱)	(۰,۶۵, ۰,۷۵, ۰,۸۵)
(۱۰) همدان	(۳۷, ۴۲, ۵۲)	(۰,۶۵, ۰,۷۵, ۰,۸۵)
(۱۱) قزوین	(۱۹۸, ۲۱۱, ۲۲۸)	(۰,۶۵, ۰,۷۵, ۰,۸۵)
(۱۲) اصفهان	(۲۵۵, ۲۸۵, ۳۰۵)	(۰,۷, ۰,۸, ۰,۹)
(۱۳) تهران	(۲۱۵, ۲۴۰, ۲۷۰)	(۰,۷, ۰,۸, ۰,۹)
(۱۴) خارجی ۱	(۳۲۰, ۳۴۴, ۳۶۰)	(۰, ۰, ۰)
(۱۵) خارجی ۲	(۲۰۰, ۲۱۵, ۲۳۰)	(۰, ۰, ۰)

جدول ۲: اطلاعات هزینه ثابت ( $f_i$ ) و ظرفیت ( $\bar{\pi}_i$ ) برای مراکز تولید

مکان	هزینه ثابت (میلیون ریال)	ظرفیت (میلیون‌ها)
(۱) ورامین	(۱۳۳۰۰۰, ۱۴۵۰۰۰, ۱۵۳۰۰۰)	(۱۹۰۰, ۲۰۰۰, ۲۱۰۰)
(۲) ساوه	(۱۳۵۰۰۰, ۱۴۷۰۰۰, ۱۵۴۰۰۰)	(۱۹۰۰, ۲۰۰۰, ۲۱۰۰)
(۳) سمنان	(۱۳۶۰۰۰, ۱۴۸۰۰۰, ۱۵۵۰۰۰)	(۲۰۰۰, ۲۱۰۰, ۲۲۰۰)
(۴) قم	(۱۳۰۰۰۰, ۱۴۰۰۰۰, ۱۵۰۰۰۰)	(۱۶۵۰, ۱۸۰۰, ۱۹۵۰)
(۵) اراک	(۱۳۵۰۰۰, ۱۴۷۰۰۰, ۱۵۴۰۰۰)	(۱۹۰۰, ۲۰۰۰, ۲۱۰۰)
(۶) زنجان	(۱۳۵۰۰۰, ۱۴۰۰۰, ۱۵۴۰۰۰)	(۱۹۰۰, ۲۰۰۰, ۲۱۰۰)
(۷) قزوین	(۱۳۶۰۰۰, ۱۴۸۰۰۰, ۱۵۵۰۰۰)	(۱۹۰۰, ۲۰۰۰, ۲۱۰۰)
(۸) آشتیان (کارخانه فعلی)	(۰, ۰, ۰)	(۱۶۵۰, ۱۸۰۰, ۱۹۵۰)

مدیران شرکت هفت مکان را برای باز کردن مراکز تولید جدید در نظر می‌گیرند همچنین، از آنجایی که شرکت قبلاً یک کارخانه را با حدود ۶۰۰ میلیون ظرفیت تولید در هر سال باز کرده است یک مکان دیگر به مکان‌های بالقوه افزوده می‌شود در این صورت، هزینه ثابت برای باز کردن این مرکز صفر می‌باشد و متغیر دودویی مربوطه همیشه برابر با ۱ است (به عنوان مثال  $x_8 = 1$ ). در شبکه معکوس ۱۱ مکان کاندید برای مراکز جمع‌آوری و ۴ مرکز بازیافت فولاد و پلاستیک و سه مرکز سوزاندن برای محصولات EOL در نظر گرفته شده‌اند. هزینه‌های ثابت باز کردن مراکز تولید و جمع‌آوری و همچنین ظرفیت‌های مربوطه در جداول (۳.۲) و (۳.۳) ارائه شده است.

جدول ۳: اطلاعات هزینه ثابت ( $\bar{g}_k$ ) و ظرفیت ( $\bar{\eta}_k$ ) برای مراکز جمع آوری

مکان	هزینه ثابت (میلیون ریال)	ظرفیت (میلیون‌ها)
(۱) ورامین	(۱۷۰۰۰, ۱۷۴۰۰, ۱۷۸۰۰)	(۲۴۰۰, ۲۴۵۰, ۲۵۰۰)
(۲) ساوه	(۱۷۵۰۰, ۱۷۹۰۰, ۱۸۳۰۰)	(۲۴۰۰, ۲۴۵۰, ۲۵۰۰)
(۳) سمنان	(۱۷۰۰۰, ۱۷۴۰۰, ۱۷۸۰۰)	(۲۵۰۰, ۲۵۵۰, ۲۶۰۰)
(۴) شاهرود	(۱۶۸۰۰, ۱۷۲۰۰, ۱۷۴۰۰)	(۲۵۰۰, ۲۵۵۰, ۲۶۰۰)
(۵) اراک	(۱۷۸۰۰, ۱۸۳۰۰, ۱۸۸۰۰)	(۲۲۰۰, ۲۲۵۰, ۲۳۰۰)
(۶) زنجان	(۱۷۶۰۰, ۱۸۱۰۰, ۱۸۶۰۰)	(۲۳۰۰, ۲۳۵۰, ۲۴۰۰)
(۷) ابهر	(۱۷۴۰۰, ۱۷۸۰۰, ۱۸۲۰۰)	(۲۲۰۰, ۲۲۵۰, ۲۳۰۰)
(۸) ارومیه	(۱۷۶۰۰, ۱۸۰۰۰, ۱۸۶۰۰)	(۲۰۰۰, ۲۰۵۰, ۲۱۰۰)
(۹) نجف آباد	(۱۷۲۰۰, ۱۷۵۰۰, ۱۷۸۰۰)	(۲۲۰۰, ۲۲۵۰, ۲۳۰۰)
(۱۰) آبیک	(۱۷۵۰۰, ۱۷۹۰۰, ۱۸۳۰۰)	(۲۱۰۰, ۲۱۵۰, ۲۲۰۰)
(۱۱) سلفچگان	(۱۷۳۰۰, ۱۷۷۰۰, ۱۸۱۰۰)	(۲۲۵۰, ۲۳۰۰, ۲۳۵۰)

لازم به ذکر است که تمام داده‌های پولی در واحد پول ایران، ریال ارائه شده و ظرفیت‌های گزارش شده در جداول (۳.۲) و (۳.۳) ظرفیت‌های انبوه بیش از سه سال است.

سایر پارامترهای مبهم نیز با تعیین سه مقیاس برجسته همان طور که در بالا توضیح داده شده است، تخمین زده می‌شوند. با توجه به محدودیت فضایی، ارزش جزئیات از دیگر پارامترهایی است که در افق سه ساله این مطالعه ارائه نشده است.

برای تجزیه و تحلیل عملکرد مدل پیشنهادی و روش حل تعاملی مدل با استفاده از نرم افزار بهینه ساز LINGO8.0 کد گذاری و حل شده است و تمام آزمایش‌ها بر روی رایانه دو هسته‌ای ۱٫۴۰ گیگاهرتز با ۳ گیگابایت رم انجام شده است.

از حداقل درجه شدنی بودن (یعنی  $\alpha - level$  به عنوان مثال، ۰٫۶، ۰٫۷، ۰٫۸، ۰٫۸ و ۱) برای آزمایش کارایی مدل استفاده می‌شود و برای هر  $\alpha$  شش جواب بهینه پرتو با کمک روش  $\epsilon$ -قیدی اصلاح شده، توصیف شده در بخش (۳.۶) تولید می‌شود. برای انجام روش  $\epsilon$ -قیدی اصلاح شده میزان رضایت مندی از تابع هدف هزینه به عنوان محدودیت جانبی مورد استفاده قرار می‌گیرد و میزان رضایت مندی از اهداف زیست محیطی در تابع هدف استفاده می‌شود. نتایج در جدول (۳.۴) گزارش شده است. همان طور که از جدول (۳.۴) دیده می‌شود زمانی که حداقل درجه شدنی بودن افزایش یابد مقدار هر دو تابع هدف افزایش می‌یابد به عبارت دیگر تصمیم، تصمیم گیرنده برای پاسخ به عدم قطعیت با سطح اطمینان بالاتر اثرات زیست محیطی و هزینه را نیز افزایش می‌دهد. نتیجه می‌تواند به سادگی با نیاز به صرف منابع بیشتر (مواد خام، محصولات، حمل و نقل و غیره) برای برآورده کردن تقاضا و بازگشت از مشتریان در سطوح بالاتر حداقل درجه شدنی بودن (یعنی  $\alpha$ ) توجیح کرد. همان طور که در بخش (۳.۶) ذکر شد مقدار حداقل درجه شدنی بودن ( $\alpha$ ) می‌تواند بر اساس عملکرد تصمیم گیرندگان در پایان هر تکرار (مرحله ۶) متفاوت

باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که دو هدف (به حداقل رساندن هزینه کل و به حداقل رساندن کلی تأثیرات زیست محیطی) در تعارض با یکدیگر هستند زیرا کاهش کلی تأثیرات زیست محیطی منجر به افزایش کل هزینه‌ها و بالعکس می‌شود. اولین تابع هدف ( $w_1$ ) تمایل به تمرکز شبکه زنجیره تأمین برای به حداقل رساندن هزینه‌های کلی دارد بنابراین، در درجه رضایت مندی بالاتر تعداد کمتری از مراکز تولید و جمع‌آوری باز می‌شود. به عنوان مثال وقتی  $\mu_1(x) = 1$  تنها دو مرکز تولید و یک مرکز جمع‌آوری باز می‌شود در حالی که شش مرکز تولید و ده مرکز جمع‌آوری زمانی که  $\mu_1(x)$  برابر با  $0.2$  است باز می‌شود از سوی دیگر، نتایج گزارش شده در جدول (۳.۴) نشان می‌دهد که تابع هدف دوم گرایش به شبکه غیر متمرکز دارد تا تأثیرات زیست محیطی را به حداقل برساند. تأثیرات زیست محیطی در شبکه‌های غیر متمرکز کاهش می‌یابد زیرا امکانات بیشتری در این مورد در مقایسه با ساختار متمرکز باز شده است و بنابراین مسیرهای بیشتری برای حمل و نقل محصولات از مبداها به مقصد در دسترس هستند. همان طور که نتایج جدول (۳.۴) نشان می‌دهد زمانی که تصمیم‌گیرنده به تابع هدف دوم اهمیت بیشتری می‌دهد، امکانات بیشتر یا امکانات با ظرفیت‌های بالاتر باز می‌شود.

آخرین ستون جدول (۳.۴) قیمت را برای حفاظت از محیط زیست نشان می‌دهد این قیمت با کم کردن حداقل هزینه‌های به دست آمده از طریق مدل بهینه‌سازی برای اولین تابع هدف (حداقل هزینه به دست آمده زمانی که  $\mu_1(x) = 1$ ) از مقدار تابع هدف اول در هر جواب بهینه پرتو مربوطه محاسبه می‌شود به عبارت دیگر، قیمت حفاظت از محیط زیست نشان دهنده‌ی پرداخت هزینه‌های اضافی برای حفظ محیط زیست در مقایسه با بهترین جواب هزینه بهینه است. واضح است که این قیمت زمانی که به تابع هدف دوم اهمیت بیشتری داده می‌شود افزایش می‌یابد. همان طور که در بخش (۳.۴) ذکر شد در آخرین مرحله از راه حل پیشنهادی، تصمیم‌گیرنده می‌تواند محدوده اپسیلون را در کل فرآیند تنظیم کند به همین ترتیب تصمیم‌گیرنده ممکن است با محدوده وسیعی در تکرارهای اولیه شروع به پوشش سریع تمام محدوده جواب‌های بهینه پرتو کند با این حال، در اواخر تکرار تصمیم‌گیرنده ممکن است علاقه مند به انتخاب جواب نهایی مرجح از طریق تنظیم خوب باشد بنابراین، در اواخر تکرار مناطق جالب (بخش) می‌تواند دقیق‌تر با استفاده از یک شبکه مترکم‌تر مورد بررسی قرار گیرد در مورد این مطالعه، در تکرار دوم تصمیم‌گیرنده محدوده بین  $0.7$  تا  $0.95$  را به عنوان منطقه مورد علاقه انتخاب می‌کند و  $0.9$  به عنوان حداقل درجه شدنی، ترجیح داده شده است. در تکرار دوم، جواب‌های جدید بهینه پرتو با استفاده از یک شبکه مترکم‌تر از  $0.7$  تا  $0.95$  تولید می‌شود که نتایج آن در جدول (۳.۵) گزارش شده است در نهایت، با توجه به ترجیحات شرکت، تصمیم‌گیرنده جواب را با  $\mu_1(x) = 0.85$  و  $\mu_2(x) = 0.694$  به عنوان جواب نهایی ترجیح می‌دهد. همان طور که از جدول (۳.۵) دیده می‌شود در این جواب دو مرکز تولید و پنج مرکز جمع‌آوری باید باز شود.

جدول ۴: خلاصه‌ای از نتایج با توجه به سطوح مختلف

$\alpha - level$	درجه رضایتمندی			مقدار تابع هدف		تعداد امکانات باز شده		
	$\mu(w_1)$	$\mu(w_2)$	$w_1$ (ریال)	$w_2$	زمان CPU (ثانیه)	مراکز تولید	مراکز جمع آوری	هزینه حفاظت از محیط زیست
۰.۶	۱	۰	$9.0588E + 11$	$3.5345E + 07$	۸	۲	۱	$0.0000E + 00$
	۰.۸	۰.۷۶۶	$1.1754E + 12$	$1.6836E + 07$	۳	۲	۶	$2.6957E + 11$
	۰.۶	۰.۹۲۲	$1.4067E + 12$	$1.2603E + 07$	۳	۲	۱۰	$5.0087E + 11$
	۰.۴	۰.۹۸۵	$1.6786E + 12$	$1.1548E + 07$	۳	۴	۱۰	$7.7271E + 11$
	۰.۲	۰.۹۹۸	$1.8627E + 12$	$1.1255E + 07$	۲	۶	۱۰	$1.0568E + 12$
۰.۷	۱	۰	$2.2537E + 12$	$1.1208E + 07$	۶	۸	۱۰	$1.3478E + 12$
	۰.۸	۰.۷۶۶	$9.1414E + 11$	$3.5722E + 07$	۸	۲	۱	$0.0000E + 00$
	۰.۶	۰.۹۴۱	$1.1834E + 12$	$1.7202E + 07$	۳	۲	۶	$2.6926E + 11$
	۰.۴	۰.۹۸۵	$1.6854E + 12$	$1.1916E + 07$	۲	۴	۱۰	$7.7124E + 11$
	۰.۲	۰.۹۹۸	$1.8694E + 12$	$1.1620E + 07$	۴	۶	۱۰	$1.0553E + 12$
۰.۸	۱	۰	$2.2604E + 12$	$1.1573E + 07$	۵	۸	۱۰	$1.3463E + 12$
	۰.۸	۰.۷۶۶	$9.2241E + 11$	$3.6099E + 07$	۵	۲	۱	$0.0000E + 00$
	۰.۶	۰.۹۴۴	$1.1914E + 12$	$1.7568E + 07$	۲	۲	۶	$2.6895E + 11$
	۰.۴	۰.۹۸۵	$1.6207E + 12$	$1.3363E + 07$	۳	۲	۱۰	$4.8826E + 11$
	۰.۲	۰.۹۹۸	$1.8922E + 12$	$1.2285E + 07$	۴	۴	۱۰	$7.6977E + 11$
۰.۹	۱	۰	$2.2627E + 12$	$1.1937E + 07$	۳	۶	۱۰	$1.0527E + 12$
	۰.۸	۰.۷۶۶	$9.3070E + 11$	$3.6498E + 07$	۱۱	۲	۱	$0.0000E + 00$
	۰.۶	۰.۹۴۴	$1.1994E + 12$	$1.7934E + 07$	۳	۲	۶	$2.6863E + 11$
	۰.۴	۰.۹۸۵	$1.6207E + 12$	$1.3773E + 07$	۴	۲	۱۰	$4.6964E + 11$
	۰.۲	۰.۹۹۷	$1.8829E + 12$	$1.2653E + 07$	۳	۴	۱۰	$7.6828E + 11$
۱	۱	۰	$2.2739E + 12$	$1.2302E + 07$	۵	۶	۱۰	$1.0552E + 12$
	۰.۸	۰.۷۶۷	$9.3901E + 11$	$3.6854E + 07$	۵	۲	۱	$0.0000E + 00$
	۰.۶	۰.۹۴۹	$1.2073E + 12$	$1.8300E + 07$	۳	۲	۱۰	$2.6832E + 11$
	۰.۴	۰.۹۸۵	$1.6246E + 12$	$1.4133E + 07$	۲	۲	۱۰	$4.8561E + 11$
	۰.۲	۰.۹۹۷	$1.7058E + 12$	$1.3022E + 07$	۲	۴	۱۰	$7.6678E + 11$
۰	۱	$2.2806E + 12$	$1.2666E + 07$	۴	۶	۱۰	$1.0506E + 12$	

جدول ۵: خلاصه نتایج برای تکرار دوم

$\alpha - level$	درجه رضایتمندی			مقدار تابع هدف		تعداد امکانات باز شده		
	$\mu(w_1)$	$\mu(w_2)$	$w_1$ (ریال)	$w_2$	زمان CPU (ثانیه)	مراکز تولید	مراکز جمع آوری	هزینه حفاظت از محیط زیست
۰.۸	۰.۹۵	۰.۳۶۲	$9.98E + 11$	$2.80E + 07$	۴	۲	۳	$6.7158E + 10$
	۰.۸	۰.۵۸۶	$1.07E + 12$	$2.24E + 07$	۵	۲	۴	$1.3332E + 11$
	۰.۸۵	۰.۶۹۴	$1.13E + 12$	$1.98E + 07$	۳	۲	۵	$2.0128E + 11$
	۰.۸	۰.۷۶۷	$1.2073E + 12$	$1.8300E + 07$	۴	۲	۶	$2.6863E + 11$
	۰.۷۵	۰.۸۳۴	$1.27E + 12$	$1.64E + 07$	۳	۲	۶	$3.3579E + 11$
	۰.۷	۰.۸۸۷	$1.33E + 12$	$1.51E + 07$	۳	۲	۷	$4.0295E + 11$
	۰	۱	$2.2806E + 12$	$1.2666E + 07$	۴	۶	۱۰	$1.0506E + 12$

## مراجع

- [۱] معینی نیا، ح. (۱۳۹۸) طراحی شبکه زنجیره تامین سبز بسته، تحت عدم قطعیت، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سمنان.
- [2] AMIN, S.H. and ZHANG, G., "Closed-loop supply chain network configuration by a multi-objectiv mathematical model," *Int. J. Business Performance and Supply Chain Modelling*, 6 (2014) no. 1, 1-15.
- [3] BAZARA, M.S., JARVIS, J.J. and SHERALI, H.D., "Linear Programming and Network Flows", *John Wiley Sons, New York*, 2011.
- [4] BELLMAN, R.E. and ZADEH, L.A., "Decision making in fuzzy environment," *Int. J. Manag. Sci*, 17 (1970) 141-164.
- [5] CHIU, C.T., HSU, T.H. and YANG, W.F., "Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements," *Int. J. Resour. Conserve. Recycle*, 52 (2008) no. 3, 545-556.
- [6] DUBOIS, D., FARGIER, H. and FORTEMPS, P., "Fuzzy scheduling: Modelling flexible constraints vs. coping with incomplete knowledge," *Eur. J. Oper. Res.* 147 (2003) no. 2, 231-252.
- [7] Ehrgott, M., "Multicriteria Optimization", 2nd ed., *Springer, New York*, 2005.
- [8] GOEDKOOP, M. and SPRIENSMA, R., "The Eco-indicator 99, A damage oriented method for Life Cycle Impact assessment: methodology report (third edition)", *PRé Consultants, Amersfoort, Netherlands*, 2000.
- [9] HANSON, J.J. and HITCHCOCK R.W., "Towards Sustainable Design for Single-Use Medical Devices", in *31st Annual International Conference of the IEEE EMBS Minneapolis, Minnesota*, 2009.
- [10] HAURI, A.M., ARMSTRONG G.L. and HUTIN, Y.J.F., "The global burden of disease attributable to contaminated injections given in health care settings", *Int. J. STDAIDS*, 15 (2004) 7-16.

- ۱۲۸
- [11] JIMENEZ, M., ARENAS, M. and BILBAO, A. and RODRIGOEZ M.V., “Linear programming with fuzzy parameters: An interactive method resolution”, *Eur. J. Oper. Res.* 177 (2007) 1599-1609.
- [12] JIMENEZ, M., “Ranking fuzzy numbers through the comparison of its expected intervals”, *Int. J. Uncertain. Fuzziness Knowl. Based Syst.* 4 (1996) 379-388.
- [13] LAI, Y.J. and HWANG, C.L., “A New approach to some possibilistic linear programming problems”, *Int. J. Fuzzy Sets and Syst.* 49 (1992) 121-133.
- [14] LAI, Y.J. and HWANG, C.L., “Possibilistic linear programming for managing interest rate risk”, *Int. J. Fuzzy Sets and Syst.* 54 (1993) 135-146.
- [15] LI, X.Q., ZHANG, B. and LI, H., “Computing efficient solutions to fuzzy multiple objective linear programming problems”, *Int. J. Fuzzy Sets and Syst.* 157 (2006) 1328-1332.
- [16] LIANG, T.F., “Distribution planning decisions using interactive fuzzy multi-objective linear programming”, *Int. J. Fuzzy Sets and Syst.* 157 (2006) no. 10, 1303-1316.
- [17] MAVROTAS, G., “Effective implementation of the  $\varepsilon$ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems”, *Int. J. Appl. Math. Comput.* 213 (2009) no. 2, 455-465.
- [18] MULA, J., POLER, R. and GARCIA, J.P., “MRP with Flexible Constraints: Fuzzy Mathematical Programming Approach”, *Int. J. Fuzzy Sets and Syst.* 157 (2006) no. 1, 74-97.
- [19] NURJANNI, K.P., CARALHO, M.S. and LINO, A.A.F., “Green supply chain design with multi-objective optimization”, *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Bali, Indonesia.* (2014) 488-497.
- [20] PATI, R.K. and VRAT, P. and KUMAR, P., “A Goal programming model for paper recycling system”, *Omega*, 36 (2008) no. 3, 405-417.
- [21] PISHVAEE, M.S., RABBANI, M. and TORABI S.A., “A Robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty”, *Int. J. Appl. Math. Model.* 35 (2011) no. 2, 637-649.

- [22] PISHVAEE, M.S. and RAZMI, J., "Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming", *Applied Mathematical Modelling*, 36 (2012) 3433-3446.
- [23] PISHVAEE, M.S. and TORABI, S.A., "A Possibilistic Programming Approach for Closed-Loop Supply Chain Network Design Under Uncertainty", *Int. J.Fuzzy Sets and Syst.*, 161 (2010) no. 20,2668-2683.
- [24] REBITZERA, G., EKVALLB, T., FRISCHKNECHTC, R., HUNKELERD, D., NORRISE, G., RYDBERGF, T., SCHMIDTG, W., SUHH, S., WEIDEMAI, B.P. and PENNINGTONF, D.W., "Life cycleassessment Part 1: framework, goal and scopedefinition, inventory analysis and applications", *Int. J.Environment. International*. 30 (2004) no. 5,701-720.
- [25] SAKAWA, M., YANO, H. and YUMINE, T., "An Interactive fuzzy satisfying method for multi objective linear-programming problems and its application", *Int. J.IEETrans. Syst. Man Cybern. SMC*. 17 (1987) no. 4,654-661.
- [26] SELIM, H. and OZKARAHAN, I., "A supply chain distribution network design model: an interactive fuzzy goal programming-based solution approach", *Int. J. Advanced.Manufacturing. Technology*. 36 (2008) no. 3-4, 401-418.
- [27] TORABI, S.A. and HASSINI, E., "An Interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning.", *Int. J.Fuzzy Sets and Syst*. 159 (2008) no. 2,193-214.
- [28] ZADEH,L., "Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility", *Int. J.Fuzzy Sets and Syst*. 1 (1978) no. 1, 3-28.
- [29] ZHAO, W., VANDERVOET, E., HUPPES, G. and ZHANG, Y., "Comparative life cycle assessments of incineration and non-incineration treatments for medical waste", *Int. J. Life Cycle Assess*. 14 (2009) no. 2,114-121.
- [30] ZIMMERMANN, H.J., "Fuzzy programming and linear programming with several objective aunctions", *Int. J.Fuzzy Sets and Syst*. 1 (1978) no. 1,45-55.