

## مدل بهینه‌سازی چندهدفه استوار در طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار

حسین زارعیان جهرمی<sup>۱</sup>، محمد صابر فلاح نژاد<sup>۲\*</sup>، احمد صادقیه<sup>۲</sup>، احمد احمدی یزدی<sup>۴</sup>

۱. کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه علم و هنر، تهران

۲. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد

۳. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد

۴. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد

### خلاصه

در سال‌های اخیر به دلیل قوانین دولتی، مسائل زیست‌محیطی، گسترش مفهوم مسئولیت‌پذیری اجتماعی و تقاضاهای مشتری، لجستیک معکوس مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. علاوه بر این، کاهش منابع طبیعی و ذخایر مواد اولیه همراه با افزایش هزینه‌های تولید محصولات و مشکلات ناشی از دفن زباله‌های صنعتی و کالاهای مصرفی سبب گردیده تا چرخه محصولات تولیدی از نقطه تولیدی تا بازیابی نهایی آن‌ها مورد توجه قرار گیرد. این موضوع سبب پیدایش مفاهیم نوینی همچون زنجیره تأمین یکپارچه، حلقه بسته و پایدار طی دهه گذشته شده است. این مقاله یک طراحی پایدار برای شبکه لجستیک حلقه بسته چند محصولی چند سطحی تحت شرایط عدم قطعیت پارامترها ارائه می‌دهد. از این رو، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه در حالی که تابع هدف آن شامل سود و اثرات زیست‌محیطی و اجتماعی می‌باشد گسترش داده شده است. ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح قطعی برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته گسترش داده شده است. سپس، هم‌تای استوار مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح با استفاده از توسعه‌های اخیر تئوری بهینه‌سازی استوار، ارائه شده است. در نهایت، برای ارزیابی پایداری جواب‌های به دست آمده از مدل جدید بهینه‌سازی استوار، آنها با جواب‌هایی که از مدل قطعی برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح تحت مسائل آزمون مختلف تولید شده است مقایسه شده‌اند.

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۲/۷/۳۰

پذیرش ۱۳۹۳/۶/۴

کلمات کلیدی:

طراحی شبکه زنجیره تأمین

لجستیک معکوس

عدم قطعیت

بهینه‌سازی استوار

### ۱- مقدمه

محصولات تولیدی و حمایت از مصرف‌کنندگان، محققان توجه ویژه‌ای را به دو مقوله طراحی زنجیره برگشتی و حلقه بسته<sup>۲</sup> منظور داشته‌اند. هدف اولیه از طرح موضوع استفاده دوباره از کالاهای معیوب و یا مستعمل با فرآیند بازیابی، جلوگیری از اتلاف بیشتر منابع، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و حصول سودآوری که در کنار ملاحظات اجتماعی<sup>۳</sup> و تجاری دیگر مطرح است، می‌باشد. از سوی دیگر توجه به جریان محصولات برگشتی و مدیریت

اهمیت تغییرات عمده در محیط کسب و کار و همچنین بازار رقابتی کنونی مانند تقاضای مورد نیاز مشتریان و همچنین هزینه‌های حمل و نقل منجر به ایجاد موضوع طراحی شبکه زنجیره تأمین بایانات و پایدار شده است. امروزه به دلیل اهمیت یافتن معیارهای زیست‌محیطی و تلاش سازمان‌ها به منظور استفاده مؤثر و کارا از

\* نویسنده مسئول. محمدصابر فلاح‌نژاد

تلفن: ۰۳۵۱-۵۲۵۸۲۲۵؛ پست الکترونیکی: fallahnezhad@yazd.ac.ir

2. Closed Loop and Reverse Supply Chain

3. Social Considerations

محیط زیست با هدف دستیابی به یک آینده پایدار، اقدامات خود را در سطوح مختلف جامعه بر روی تغییر شرایط فعالیت‌های صنعتی و الگوهای مصرف در سراسر جهان متمرکز ساخته است. در توسعه پایدار، ملاحظات اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی به‌طور همزمان در نظر گرفته می‌شود. این موضوعات نشان‌دهنده اهمیت رشته‌های متنوعی مانند محیط زیست، اقتصاد و جامعه‌شناسی در چشم‌انداز توسعه پایدار است.

مدل پیشنهادی در این مقاله از سه تابع هدف، با در نظر گرفتن اثرات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی به‌منظور دستیابی به یک زنجیره تأمین پایدار تشکیل شده است. به‌منظور تحقق بخشیدن به این موضوع، اثرات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی حاصل از احداث زنجیره مذکور به‌ترتیب با سه تابع هدف سود، مسئولیت-پذیری اجتماعی و میزان انتشار کربن مورد بررسی و مدل‌سازی قرار گرفته است و به نوعی نقطه قوت این مقاله می‌باشد. اهمیت این موضوع از آنجایی است که در ادبیات موضوعی کمتر به‌طور همزمان این ملاحظات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی در مدل‌سازی مورد توجه قرار گرفته است و اکثر مطالعات صورت گرفته به‌صورت تک هدفه ارائه شده‌اند. نکته دیگری که باعث متفاوت شدن این مقاله از نقطه نظر نوآوری با کارهای مشابه در این زمینه شده است، در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت و استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار<sup>۵</sup> (بر اساس رویکرد جعبه‌ای بن‌تال و نمیروفسکی [۶])، در طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته چندهدفه است.

در ادامه و در بخش دوم به مروری جامع بر ادبیات مدل‌های طراحی زنجیره تأمین در دسته‌بندی‌های مختلف آن شامل طراحی زنجیره تأمین رو به جلو، معکوس، یکپارچه، چندهدفه، غیر قطعی و پایدار پرداخته شده است. در بخش سوم ابتدا رویکردهای بهینه‌سازی استوار و نحوه نوشتن هم‌تای استوار مسائل ارائه شده است. سپس مدل‌سازی ریاضی مسأله در دو حالت قطعی و استوار، برای یک زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن شرایط چندهدفه، چند محصولی، چندسطحی و پایدار انجام شده است. در بخش چهارم پس از ارائه نتایج محاسباتی مدل به وسیله نرم‌افزار GAMS، با تعریف معیارهایی به مقایسه و ارزیابی مدل استوار و قطعی پرداخته می‌شود. در ادامه این بخش تحلیل حساسیت بر روی برخی از پارامترهای مدل انجام شده است. در نهایت و در بخش پنجم نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات برای ادامه تحقیقات آتی آورده شده است.

## ۲- مرور ادبیات

در سال‌های اخیر با توجه به اهمیت و جایگاه مسأله طراحی شبکه زنجیره تأمین، این حوزه مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. ملو و همکاران [۲] و کلیبی و همکاران [۷] مطالعه‌ای مروری و جامع در زمینه مدل‌سازی مسائل مربوط به طراحی شبکه‌های

ضایعات و بازیافت نیز می‌تواند بر موفقیت سازمان‌ها با توجه به قوانین و انتظارات مشتریان تأثیرگذار باشد. در این میان شرکت‌هایی نظیر کداک، زیراکس و اچ‌پی در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی در این حوزه نموده‌اند و موفقیت‌های بسیاری را در این زمینه کسب کرده‌اند.

طراحی و ایجاد شبکه‌های زنجیره تأمین یک تصمیم استراتژیک است که اثر آن برای چندین سال باقی خواهد ماند. از سوی دیگر، از آنجا که احداث و تعطیلی تسهیلات بسیار گران‌قیمت و زمان‌بر است، ایجاد تغییر در تصمیم‌گیری محل تسهیلات با توجه به نوسان پارامترها در زمان کوتاه غیرممکن است [۱]. تصمیمات اساسی مربوط به طراحی شبکه زنجیره تأمین و پیکربندی آن عبارتند از [۲]:

- تعداد تسهیلات به چه میزان و محل آن کجا باید باشد؟
  - هر تسهیل کدامیک از محصولات را باید تولید کند؟
  - میزان جریان محصولات بین تسهیلات به چه میزان است؟
- مفهوم طراحی زنجیره تأمین در لجستیک معکوس<sup>۱</sup> با مفاهیمی همچون بازیافت، چرخه مجدد و یا استفاده مجدد از محصولات ارائه می‌شود. به طور کلی طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس شامل تعیین تعداد، مکان و ظرفیت‌های مراکز جمع‌آوری، بازیابی و دفع موجودی ذخیره شده در هر سایت و همچنین مقدار جریان بین هر جفت از تسهیلات می‌باشد. با توجه به بررسی‌های انجام شده، یکی از مواردی که تأثیر بسیاری بر مدل‌سازی شبکه لجستیک معکوس دارد، در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت است [۳]. در لجستیک معکوس، پارامترهایی مثل ظرفیت مراکز، تقاضا، هزینه و کیفیت می‌توانند غیرقطعی باشند. بنابراین، طراحی زنجیره تأمینی که در برابر عدم قطعیت<sup>۲</sup> داده‌ها مقاوم باشد اهمیت بسزایی خواهد داشت. بررسی‌های جامع و جدید انجام شده در حوزه مکان‌یابی تسهیلات<sup>۳</sup> و مدیریت زنجیره تأمین نشان می‌دهد که بسیاری از مدل‌های مورد بررسی تحت شرایط قطعیت داده‌ها طراحی شده‌اند و درصد کمی از آن‌ها (حدود ۸۲٪ در برابر ۱۸٪) تحت شرایط عدم قطعیت می‌باشند [۲].

مفهوم دیگری که در سال‌های اخیر در طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین به یک موضوع تحقیقاتی جذاب، با ارزش عملی قابل توجهی مورد توجه محققان قرار گرفته است، موضوع مسئولیت‌پذیری اجتماعی شرکت‌ها<sup>۴</sup> (CSR) است. امروزه ضرورت و اهمیت مسئولیت‌پذیری و اثرات اجتماعی شرکت‌ها باعث شده که مدیران و برنامه‌ریزان سازمان‌ها تأکید ویژه‌ای بر عناصر این موضوع در مأموریت‌ها، چشم‌اندازها و استراتژی‌های سازمان خود داشته باشند [۴]. مسئولیت‌پذیری اجتماعی شرکت‌ها به عنوان تأثیر فعالیت‌های شرکت‌ها در گروه‌های مختلف اجتماعی، از جمله حفاظت از محیط‌زیست، حقوق کارکنان، ایمنی محل کار، شرایط مناسب برای کارکنان، و غیره تعریف شده است [۵]. مجمع جهانی توسعه و

1. Reverse Logistics
2. Uncertainty
3. Facility location
4. Corporate Social Responsibility

زنجیره تأمین داشته‌اند.

## ۲-۲- طراحی زنجیره تأمین تحت شرایط عدم قطعیت

در لجستیک معکوس، پارامترهایی مثل ظرفیت مراکز، تقاضا، هزینه و کیفیت می‌توانند غیرقطعی باشند. بنابراین، طراحی زنجیره تأمینی که در برابر عدم قطعیت داده‌ها مقاوم باشد اهمیت بسزایی خواهد داشت.

در بسیاری از مطالعات انجام شده به منظور برخورد با عدم قطعیت پارامترهای مسئله از رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی<sup>۷</sup> استفاده شده است که می‌توان به تحقیقات (ال-سید و همکاران [۱۴]؛ پیشوایی و همکاران [۱۵]) اشاره نمود. سالما و همکاران [۱۶] مدل افلیسچمن را به یک شبکه لجستیک چند محصولی ظرفیت‌دار با در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت برای پارامترهای تقاضا و نرخ بازگشت توسعه دادند. با توجه به پیچیدگی‌های مدل‌های تصادفی و همچنین عدم وجود اطلاع از تابع توزیع متغیرهای تصادفی روش برنامه‌ریزی احتمالی کارآمدی خود را از دست می‌دهد. با توجه به این موضوع، پیشوایی و همکاران [۱] یک رویکرد بهینه‌سازی استوار جهت برخورد با عدم قطعیت داده‌های ورودی در مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پیشنهاد داده‌اند. در این روش ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط ارائه شده است. سپس همتای استوار مسئله بر اساس رویکرد استوار بازه‌ای جهت برخورد با نوسانات داده‌های ورودی نشان داده شده است. یکی دیگر از روش‌های برخورد با عدم قطعیت استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی فازی<sup>۸</sup> است. پیشوایی و ترابی [۱۷]؛ کین و جی [۱۸] از این رویکرد در مدل‌سازی مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین پیشنهادی خود استفاده کرده‌اند.

## ۲-۳- طراحی زنجیره تأمین چندهدفه

به‌طور کلی اکثر مطالعات صورت گرفته در این زمینه به صورت تک هدفه در نظر گرفته شده است که در بیشتر آنها تابع هدف بصورت حداقل‌سازی هزینه‌های کل شامل هزینه‌های ثابت احداث، هزینه‌های عملیاتی و هزینه‌های حمل‌ونقل می‌باشد [۱]. پیشوایی و همکاران در مدل پیشنهادی خود یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط همراه با توابع هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها و حداکثرسازی میزان پاسخگویی ارائه کرده‌اند. آن‌ها به منظور دستیابی به مجموعه جواب‌های مسلط از یک الگوریتم چندهدفه ممتیک<sup>۹</sup> کارآمد استفاده کرده‌اند. الگوریتم پیشنهادی آنها از یک استراتژی جدید جستجوی پویا با به‌کارگیری سه جستجوی محلی مختلف استفاده می‌کند. رضانی و همکاران [۱۹] در مقاله خود یک مدل احتمالی چندهدفه برای مسئله طراحی شبکه لجستیک یکپارچه تحت شرایط عدم قطعیت ارائه کرده‌اند. سطوح تصمیم‌گیری در شبکه رو به جلو شامل تأمین‌کنندگان، مراکز تولید و مراکز توزیع و در شبکه معکوس

## ۲-۱- طراحی زنجیره تأمین معکوس و حلقه بسته

با توجه به مطالعات صورت گرفته در ادبیات موضوع مربوط به مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس و حلقه بسته، مدل‌سازی بر اساس برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط<sup>۱</sup> یک روش پرکاربرد در این زمینه است. سیر توسعه مدل‌سازی مسئله طراحی از شبکه‌های ساده بدون ظرفیت آغاز، و به سمت شبکه‌های پیچیده، دارای ظرفیت و غیرقطعی پیشرفت داشته است (پیشوایی و همکاران [۱]، افلیسچمن و همکاران [۸]) یک بررسی جامع در استفاده از مدل‌سازی ریاضی برای مدیریت لجستیک معکوس ارائه نموده‌اند. جایارامن و همکاران [۹] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط در مسئله طراحی شبکه لجستیک معکوس، تحت یک سیستم سفارش کششی<sup>۲</sup> براساس تقاضای مشتریان برای محصولات بازبایی شده، ارائه کرده‌اند. هدف از مدل ارائه شده، حداقل رساندن هزینه‌های کل است. در این مدل فرآیند تولید مجدد محصولات مرجوعی مورد بررسی قرار گرفته است. جایارامن و همکاران [۱۰] مدل قبلی خود را برای یک شبکه زنجیره تأمین معکوس تک محصولی و دو سطحی مربوط به تولید مواد سمی گسترش داده‌اند. آنها برای حل مسئله پیشنهادی خود در ابعاد بزرگ از یک روش ابتکاری استفاده نموده‌اند. در طول دهه گذشته، بسیاری از مدل‌های طراحی شبکه لجستیک معکوس به‌صورت زنجیره تأمین حلقه بسته توسعه داده شده‌اند. اوستر و همکاران [۱۱] یک شبکه حلقه بسته را طراحی کردند که در آن، فقط مراکز برگشت و احیا در لجستیک معکوس مکانیابی می‌شوند اما جریان مستقیم و معکوس همزمان بهینه می‌گردند. در این مقاله، یک روش حل دقیق بر مبنای روش تجزیه بندرز<sup>۳</sup> ارائه شده است. وانگ و همکاران [۱۲] یک مدل غیرخطی برای مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه نموده‌اند. در این مدل از رویکرد درخت فراگیر<sup>۴</sup> جهت مدل‌سازی مسئله استفاده شده است. در این مدل مکان‌های بالقوه تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و مراکز دفع با توجه به حداقل کردن تابع هدف هزینه مشخص گردیده است. با توجه به پیچیدگی ابعاد مسئله از رویکرد الگوریتم ژنتیک<sup>۵</sup> جهت حل سریع‌تر مسئله به عنوان یک روش فرا ابتکاری استفاده شده است. پیشوایی و همکاران [۱۳] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای به حداقل رساندن هزینه‌های حمل و نقل و هزینه‌های ثابت احداث در شبکه لجستیک معکوس چند مرحله‌ای با استفاده از الگوریتم شبیه-سازی تبرییدی<sup>۶</sup> ارائه کرده‌اند.

1. Mix Integer Programming
2. Pull System
3. Benders decomposition technique
4. Spanning tree Approach
5. Genetic Algorithm
6. Simulated Annealing

7. Stochastic Programming  
8. Fuzzy Programming  
9. Memetic Multi-Objective

محیطی پایان عمر لاستیک‌های استفاده شده و اندازه‌گیری مسئولیت‌های اجتماعی به منظور بررسی اثرات اجتماعی و تابع هدف سود به منظور بررسی اثرات اقتصادی استفاده شده کرده‌اند. در این مقاله از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی<sup>۱</sup> برای محاسبه تأثیرات اجتماعی اجتماعی و همچنین الگوریتم ژنتیک چند هدفه برای پیدا کردن جواب‌های بهینه پارتو<sup>۲</sup> استفاده شده است. پیشوایی و همکاران [۵] در مدل دو هدفه پیشنهادی خود برای یک زنجیره تأمین رو به جلو، حداقل‌سازی هزینه‌ها و حداکثرسازی اثرات اجتماعی را مورد بررسی قرار داده‌اند. به منظور حل مدل یک روش جدید ترکیبی براساس رویکرد بهینه‌سازی استوار و برنامه‌ریزی احتمالی ارائه شده است. بشیری و شرافتی [۲۷] رویکرد جدیدی برای طراحی زنجیره تأمین دو هدفه حلقه بسته ارائه دادند. غفاری نسب و همکاران [۲۸] مسأله طراحی زنجیره تأمین استوار را با فرض وجود تقاضای تصادفی بررسی کردند.

با توجه به مطالعات صورت گرفته در این بخش، اکثر تحقیقات در زمینه مسأله طراحی شبکه زنجیره تأمین بصورت تک هدفه می‌باشد. موضوع دیگری که در ادبیات موضوع به آن پرداخته شده، عدم قطعیت پارامترهای مدل می‌باشد که بیشتر از رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی و فازی جهت برخورد با آن استفاده شده است. در اکثر تحقیقات صورت گرفته در این زمینه تعداد محدودی از سطوح زنجیره تأمین مورد بررسی قرار گرفته و مدل جامعی که بیشتر سطوح را شامل شود کمتر وجود دارد. با توجه به موارد فوق، در این مقاله به منظور لحاظ نمودن این موضوعات به طور همزمان، یک مدل ریاضی برای مسأله طراحی شبکه زنجیره تأمین ارائه شده است که:

- این مدل به صورت یک شبکه حلقه بسته طراحی شده است، بطوریکه شامل چهار سطح (تأمین، تولید، توزیع و مشتریان دسته اول) در شبکه رو به جلو و شش سطح (مراکز جمع‌آوری و بازرسی، مراکز تعمیر، مراکز دفع، مراکز بازیافت، مراکز توزیع مجدد و مشتریان دسته دوم) در شبکه برگشتی می‌باشد.
- استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار بمنظور برخورد با عدم قطعیت داده‌ها
- به منظور برخورد با اهداف چندگانه مدل از تکنیک پیشرفت هدف<sup>۳</sup> استفاده شده است.
- مدل به گونه‌ای طراحی شده است که ملاحظات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را به طور همزمان بهینه گردد. به عبارتی دیگر موضوع طراحی زنجیره تأمین پایدار مورد توجه قرار گرفته شده است. بهینه‌سازی سه تابع هدف سود، مسئولیت‌پذیری اجتماعی و میزان انتشار کربن در

شامل مراکز جمع‌آوری و مراکز دفع می‌باشد. توابع هدف استفاده شده در مدل به صورت حداکثر رساندن سود، پاسخگویی به مشتری و کیفیت در نظر گرفته شده است. اوزکار و همکاران [۲۰] در مقاله خود ویژگی‌های اصلی ایجاد زنجیره تأمین حلقه بسته از جمله فرآیندهای بازیابی محصولات را بررسی کرده‌اند. آنها پس از تعریف سطوح شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته از جمله مشتریان، مراکز جمع‌آوری، مراکز تولید، مراکز بازیابی و مراکز توزیع، یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه با اهداف حداکثرسازی سطح رضایت از تجارت، حداکثرسازی درجه رضایت مشتریان و در نهایت حداکثرسازی سود کل را ارائه کرده‌اند.

## ۲-۴- طراحی زنجیره تأمین پایدار و سبز

شاخص میزان انتشار کربن به عنوان شاخصی پرکاربرد و معتبر برای تعیین اثرات زیست محیطی به صورت کمی می‌باشد و در حال حاضر توسط محققان مختلف برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی فعالیت‌های زنجیره تأمین استفاده می‌شود.

در مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه ارائه شده توسط پاکسوی و همکاران [۲۱] به حداقل رساندن هزینه و میزان انتشار دی‌اکسید کربن در لجستیک رو به جلو و همچنین حداقل کردن هزینه‌های زنجیره تنها در لجستیک معکوس مورد ارزیابی قرار گرفته است. کانان و همکاران [۲۲] در مدل پیشنهادی خود میزان انتشار کربن را به عنوان متغیر تصمیم‌گیری در نظر گرفته‌اند. در این پژوهش، شبکه لجستیک معکوس مربوط به صنعت پلاستیک به صورت یک مسأله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط مدل‌سازی شده است. پیشوایی و همکاران [۲۳] در مدل پیشنهادی خود برای یک زنجیره تأمین معکوس بازیافت کاغذ، اثرات زیست‌محیطی حاصل از احداث تسهیلات و حمل و نقل محصولات را در کنار تابع هدف هزینه‌های کل توسعه داده‌اند. آنها برای برخورد با عدم قطعیت پارامترها در مدل خود از رویکرد برنامه‌ریزی فازی استفاده کرده‌اند. امین و ژانگ [۲۴] یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته که شامل مراکز تولید، مراکز جمع‌آوری و بازار تقاضا که به صورت چند محصولی است را تحت شرایط عدم قطعیت توسعه داده‌اند. برای این هدف، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط پیشنهاد شده است که هزینه‌های کل را حداقل می‌نماید. علاوه بر این یک تابع زیست محیطی با در نظر گرفتن عوامل محیطی به صورت وزنی به مسأله اضافه شده است.

اخیراً مفاهیم زنجیره تأمین پایدار و مسئولیت‌پذیری اجتماعی موضوع دیگری است که محققان این حوزه در مسأله طراحی شبکه زنجیره تأمین به آن پرداخته‌اند. میل [۲۵۹] معیارهای دستیابی به زنجیره تأمین پایدار که به طور همزمان ملاحظات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را در بر گیرد، مورد بررسی قرار داده است. دهقانیان و منصور [۲۶] به منظور ایجاد یک شبکه پایدار بازیابی لاستیک، که در آن اثرات اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی بطور همزمان در نظر گرفته شود، از تحلیل چرخه عمر به منظور بررسی اثرات زیست

1. Analytical Hierarchy Process (AHP)

2. Pareto-Optimal solution

3. Goal Attainment technique

منتشر کرده است [۴]. در این مقاله سعی شده است آن دسته از اقدامات و اثرات اجتماعی انتخاب شوند که بیشترین ارتباط را با مسائل طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین داشته باشد. علاوه بر این، تعریف آن دسته از اقدامات و اثرات اجتماعی که می‌توانند به سادگی اندازه‌گیری شوند و در مدل ریاضی مورد استفاده قرار گیرند، با اهمیت‌تر و کاربردی‌تر می‌باشد. این اقدامات کمی و یا بعبارتی اثرات قابل اندازه‌گیری عبارتند از:

۱. تعداد روزهای از دست رفته ناشی از خسارت کار

۲. تعداد فرصت‌های شغلی ایجاد شده

معیار سنجش اول نشان‌دهنده آسیب‌دیدگی کارگران حین انجام کار است. معیار سنجش دوم، هر دو شرایط کار و توسعه جامعه را به منظور ایجاد فرصت‌های شغلی بیشتر، افزایش عدالت کاری و همچنین تسریع توسعه جامعه در بر می‌گیرد.

این دو معیار در مدل‌سازی مسأله تحت تأثیر تغییر ظرفیت هر یک از تسهیلات قرار گرفته‌اند. از آنجایی که کار کردن با یک بردار هدف مطلوب‌تر از چند بردار است، این دو معیار به کمک دو فاکتور وزنی نرمالایز شده، به صورت یکپارچه در آمده است و به عنوان تابع هدف مسئولیت‌پذیری اجتماعی در مدل‌سازی مسأله در نظر گرفته شده است.

### ۳-۳- مدل مفهومی

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، در مدل طراحی شده و در شبکه رو به جلو، تأمین‌کنندگان مسئولیت تهیه مواد اولیه را بر عهده دارند. محصولات در مراکز تولید ساخته شده و سپس از طریق شبکه‌های توزیع‌کنندگان به دست مشتریان بازار دسته اول می‌رسند. در جریان بازگشت محصولات، محصولات برگشتی بعد از جمع‌آوری و بازرسی، به دو گروه محصولات قابل جداسازی و غیر قابل جداسازی تقسیم می‌شوند. محصولاتی که قابل تفکیک به قطعات هستند، به مراکز جداسازی فرستاده می‌شوند و در آنجا به قطعات تبدیل می‌گردند. قطعات به دو دسته قابل بازیابی و غیرقابل بازیابی تقسیم می‌شوند. قطعات غیرقابل بازیابی به مراکز دفع منتقل شده و به صورت ایمن دفع و قطعات قابل بازیابی به مراکز بازرسی، تمیزکاری و مرتب‌سازی فرستاده می‌شوند. در این مراکز پس از بازرسی و تمیزکاری محصولات در گروه‌های قابل تعمیر، قابل تولید مجدد و قابل بازیافت مرتب و طبقه‌بندی می‌شوند. در فرآیند تولید مجدد، بر اساس میزان ظرفیت مراکز تولید، قطعاتی که قابل استفاده مجدد هستند بعد از بازرسی، تمیزکاری و مرتب‌سازی به کارخانه‌ها فرستاده می‌شوند و پس از ترکیب با قطعات دیگر به محصولات جدید تبدیل می‌شوند و به چرخه توزیع باز می‌گردند. در فرآیند بازیافت، قطعات جداسازی شده قابل بازیافت بر اساس ظرفیت مراکز بازیافت به منظور تولید مواد خام به صورت مستقیم از مراکز جمع‌آوری و بعد از بازرسی به مراکز بازیافت منتقل می‌شوند.

یک زنجیره تأمین حلقه بسته تحت شرایط عدم قطعیت و استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار موضوعی است که در این مقاله به منظور توسعه مدل‌های موجود، مورد بررسی قرار گرفته شده است.

### ۳- بیان مسأله

#### ۳-۱- رویکرد بهینه‌سازی استوار

رویکرد جدیدی که در سال‌های اخیر برای مقابله با عدم قطعیت داده‌ها مطرح شده است، بهینه‌سازی استوار می‌باشد. در این رویکرد به دنبال جواب‌های نزدیک به بهینه‌ای هستیم که با احتمال بالایی موجه باشند. به عبارت دیگر با کمی صرف نظر کردن از مقدار تابع هدف، موجه بودن<sup>۱</sup> جواب بدست آمده را تضمین می‌کنیم [۶].

در این رویکرد فرض بر این است که هر کدام از پارامترهای غیرقطعی در یک مجموعه عدم قطعیت بازه‌ای تغییر می‌کنند، که فرم کلی آن به صورت زیر است. فرض کنید پارامتر  $c$  یکی از متغیرهای غیرقطعی باشد.

$$\forall c \in U_{box}^c \mid U_{box}^c = \{c \in \mathcal{R}^n : |c_t - \bar{c}_t| \leq \rho_c G_t^c, t = 1, \dots, n_c\} \quad (1)$$

در این مجموعه  $c_t$  پارامتر غیر قطعی مورد نظر،  $\bar{c}_t$  مقدار اسمی آن،  $\rho > 0$  سطح عدم قطعیت و  $G_t^c$  مقیاس عدم قطعیت می‌باشد. بن‌تال و نمیروفسکی ثابت کردند که اگر برای هر یک از پارامترهای غیرقطعی در محدودیت (۱)، نقاط غایی<sup>۲</sup> آن را جایگزین کنیم آنگاه این محدودیت باید بدترین شرایط برقرار شود. با توجه به توضیحات فوق همتای استوار برای محدودیت  $cx \leq b$  به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۹].

$$\sum_t (\bar{c}_t x_t + \eta_t) \leq b \quad (2)$$

$$\rho_c G_t^c x_t \leq \eta_t \quad \forall t \in \{1, \dots, n_c\}$$

$$\rho_c G_t^c x_t \geq -\eta_t \quad \forall t \in \{1, \dots, n_c\}$$

#### ۳-۲- اندازه‌گیری اثرات اجتماعی

به طور کلی، اندازه‌گیری شاخص مسئولیت‌پذیری اجتماعی شرکت‌ها (CSR)، به دلیل دامنه گسترده و ماهیت پیچیده مسائل اجتماعی و زیست محیطی بسیار دشوار است.

برای دستیابی به یک چارچوب استاندارد و همچنین جهت ارتقا این مفهوم، سازمان بین‌المللی استاندارد (ISO)، راهنمای بین‌المللی استاندارد در حوزه مسئولیت اجتماعی تحت عنوان ISO26000

1. Feasibility
2. Extreme Points

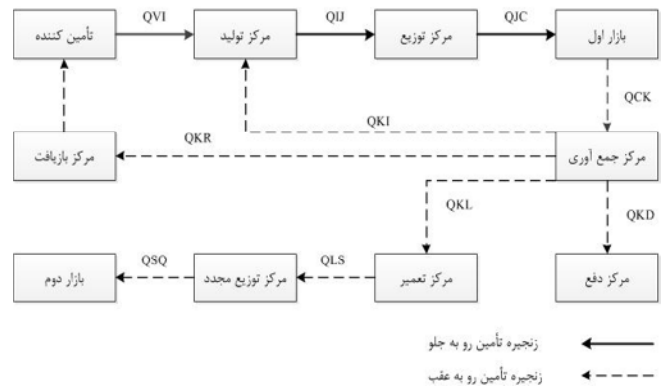
- مقادیر هزینه‌های عملیاتی در هر یک از تسهیلات، به عنوان مثال هزینه ثابت احداث، تهیه مواد، تولید، توزیع، تست و بازرسی، تعمیر، تولید و توزیع مجدد و بازیافت مشخص است.
- هزینه‌های توزیع و توزیع مجدد شامل هزینه نگهداری در این مراکز نیز می‌گردد.
- جریان محصولات فقط بین تسهیلات متوالی متفاوت وجود دارد و جریان محصول بین تسهیلات مشابه امکان‌پذیر نیست.

### پارامترها و متغیرهای تصمیم‌گیری

نمادهای به کار گرفته شده در مدل‌سازی ریاضی شبکه لجستیک حلقه بسته ارائه شده در بخش قبل به همراه تعاریف آنها در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول (۱): پارامترها و متغیرهای تصمیم‌گیری

شاخص‌ها	
مجموعه مکان‌های ثابت برای تأمین‌کنندگان	$v \in V$
مجموعه مکان‌های ثابت برای بازار اول	$c \in C$
مجموعه مکان‌های ثابت برای بازار دوم	$q \in Q$
مجموعه مکان‌های ثابت برای مراکز دفع	$d \in D$
مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز تولید جهت احداث	$i \in I$
مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز توزیع جهت احداث	$j \in J$
مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز جمع‌آوری و بازرسی جهت احداث	$k \in K$
مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز تعمیر جهت احداث	$l \in L$
مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز توزیع مجدد جهت احداث	$s \in S$
مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز بازیافت جهت احداث	$r \in R$
مجموعه محصولات	$p \in P$
مجموعه مواد اولیه	$e \in E$
مجموعه سطوح ظرفیت برای مکان‌های بالقوه	$h \in H$
پارامترها	
قیمت فروش محصول $p$ در بازار اول $c$	$Pr_{c,p}$
قیمت فروش محصول $p$ در بازار دوم $q$	$Pr_{q,p}$
میزان تقاضا برای محصول $p$ در بازار اول $c$	$DE_{c,p}$
میزان تقاضا برای محصول $p$ در بازار دوم $q$	$DDE_{q,p}$
هزینه ثابت احداث مرکز تولید $i$ با سطح ظرفیت $h$	$FX_{i,h}$
هزینه ثابت احداث مرکز توزیع $j$ با سطح ظرفیت $h$	$FY_{j,h}$
هزینه ثابت احداث مرکز جمع‌آوری و بازرسی $k$ با سطح ظرفیت $h$	$FH_{k,h}$
هزینه ثابت احداث مرکز تعمیر $l$ با سطح ظرفیت $h$	$FW_{l,h}$
هزینه ثابت احداث مرکز توزیع مجدد $s$ با سطح ظرفیت $h$	$FO_{s,h}$



شکل (۱): مدل پیشنهادی زنجیره تأمین حلقه بسته

در فرآیند تعمیر، محصولات قابل تعمیر از مراکز جمع‌آوری و بعد از بازرسی و بر اساس ظرفیت مراکز تعمیر به این مراکز منتقل می‌شوند. در این مراکز قطعات معیوب و دارای نقص محصول مرجوعی دارای قابلیت بازیابی، رفع نقص می‌گردند و یا با قطعات سالم جایگزین می‌شوند تا کارکرد دوباره آنها ادامه یابد. محصولات تعمیر شده سپس به مراکز توزیع مجدد که مستقل از مراکز توزیع هستند منتقل می‌شود. از طریق شبکه توزیع مجدد محصولات تعمیر شده به بازار محصولات دسته دوم فرستاده می‌شوند.

### فرضیات مسأله

فرضیات در نظر گرفته شده برای مدل پیشنهادی به شرح زیر است:

- مدل به صورت چندسطحی و چند محصولی می‌باشد.
- مکان و تعداد منطقه مشتریان دسته اول و دوم، تأمین‌کنندگان و مراکز دفع ثابت و مشخص است.
- کیفیت محصولات تعمیر شده برای فروش در بازار دسته دوم متفاوت از محصولات جدید است؛ از این رو قیمت فروش آنها نیز متفاوت در نظر گرفته شده است.
- مکان‌های مراکز بالقوه تولید، توزیع، جمع‌آوری، تعمیر، توزیع مجدد و بازیافت مشخص است.
- مراکز بازرسی، جداسازی و مرتب‌سازی در مرکز جمع‌آوری در نظر گرفته شده است.
- مراکز تولید و تولید مجدد به صورت ترکیبی در یک محل در نظر گرفته شده است.
- تعداد تسهیلات قابل احداث و همچنین ظرفیت آنها مشخص است.
- برای هر یک از مراکز قابل احداث، سه سطح ظرفیت در نظر گرفته شده است. تغییر مقادیر پارامترهای تعداد فرصت‌های شغلی ایجاد شده و تعداد روزهای از دست رفته به سبب آسیب‌پذیری بر اساس تغییر سطوح ظرفیت هر یک از تسهیلات در نظر گرفته شده است.
- تقاضا، هزینه‌های عملیاتی و هزینه‌های حمل و نقل بین تسهیلات به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است.

نرخ بازیافت در مراکز بازیافت	RS	هزینه ثابت احداث مرکز بازیافت $r$ با سطح ظرفیت $h$	$FU_{r,h}$
نرخ دفع در مراکز دفع	RD	هزینه تهیه هر واحد مواد اولیه $e$ از تأمین‌کننده $v$	$SC_{v,e}$
نرخ تعمیر در مراکز تعمیر	RR	هزینه تولید هر واحد محصول $p$ در مرکز تولید $i$	$MC_{i,p}$
فاکتور وزنی نرمالیزه شده برای تعداد کل فرصت‌های شغلی ایجاد شده در تسهیلات	$\theta_{JO}$	هزینه تولید مجدد هر واحد محصول $p$ در مرکز تولید $i$	$RMC_{i,p}$
فاکتور وزنی نرمالیزه شده برای تعداد کل روزهای کاری از دست رفته به سبب آسیب‌دیدگی کاری در تسهیلات	$\theta_{LD}$	هزینه توزیع و نگهداری هر واحد محصول $p$ در مرکز توزیع $j$	$DC_{j,p}$
تعداد فرصت شغلی ایجاد شده در صورت احداث مرکز تولید $i$ با سطح کیفیت $h$	$JOI_{i,h}$	هزینه بازرسی و تست هر واحد محصول $p$ در مرکز جمع‌آوری $j$	$CC_{k,p}$
تعداد فرصت شغلی ایجاد شده در صورت احداث مرکز توزیع $j$ با سطح کیفیت $h$	$JOJ_{j,h}$	هزینه دفع هر واحد محصول $p$ در مرکز دفع $d$	$DPC_{d,p}$
تعداد فرصت شغلی ایجاد شده در صورت احداث مرکز جمع‌آوری $k$ با سطح کیفیت $h$	$JOK_{k,h}$	هزینه تعمیر هر واحد محصول $p$ در مرکز تعمیر $l$	$RPC_{l,p}$
تعداد فرصت شغلی ایجاد شده در صورت احداث مرکز تعمیر $l$ با سطح کیفیت $h$	$JOL_{l,h}$	هزینه توزیع مجدد هر واحد محصول $p$ در مرکز توزیع مجدد $s$	$RDC_{s,p}$
تعداد فرصت شغلی ایجاد شده در صورت احداث مرکز تولید $i$ با سطح کیفیت $h$	$JOS_{s,h}$	هزینه بازیافت هر واحد محصول $p$ در مرکز بازیافت $r$	$RC_{r,p}$
تعداد فرصت شغلی ایجاد شده در صورت احداث مرکز بازیافت $r$ با سطح کیفیت $h$	$JOR_{r,h}$	هزینه حمل و خرید هر واحد مواد اولیه $e$ از تأمین‌کننده $v$ به مرکز تولید $i$	$TVI_{v,i,e}$
متوسط روزهای کاری از دست رفته به سبب آسیب-دیدگی کاری در صورت احداث مرکز تولید $i$ با سطح کیفیت $h$	$LDI_{i,h}$	هزینه حمل هر واحد محصول $p$ از مرکز تولید $i$ به مرکز توزیع $j$	$TIJ_{i,j,p}$
متوسط روزهای کاری از دست رفته به سبب آسیب-دیدگی کاری در صورت احداث مرکز تعمیر $l$ با سطح کیفیت $h$	$LDL_{l,h}$	هزینه حمل هر واحد محصول $p$ از مرکز تولید $i$ به بازار اول $c$	$TJC_{j,c,p}$
متوسط روزهای کاری از دست رفته به سبب آسیب-دیدگی کاری در صورت احداث مرکز بازیافت $r$ با سطح کیفیت $h$	$LDR_{r,h}$	هزینه حمل هر واحد محصول استفاده شده $p$ از بازار اول $c$ به مرکز جمع‌آوری $k$	$TCK_{c,k,p}$
میزان انتشار کربن به ازای حمل هر واحد مواد اولیه $e$ از تأمین‌کننده $v$ به مرکز تولید $i$	$ETVI_{v,i,e}$	هزینه حمل هر واحد محصول استفاده شده $p$ از مرکز جمع‌آوری $k$ به مرکز تولید $i$ جهت تولید مجدد	$TKI_{k,i,p}$
میزان انتشار کربن به ازای حمل هر واحد محصول $p$ از مرکز تولید $i$ به مرکز توزیع $j$	$ETIJ_{i,j,p}$	هزینه حمل هر واحد محصول استفاده شده $p$ از مرکز جمع‌آوری $k$ به مرکز تعمیر $l$ جهت تعمیر	$TKD_{k,d,p}$
میزان انتشار کربن به ازای حمل هر واحد محصول $p$ از مرکز توزیع $j$ به بازار اول $c$	$ETJC_{j,c,p}$	هزینه حمل هر واحد محصول استفاده شده $p$ از مرکز جمع‌آوری $k$ به مرکز تعمیر $l$ جهت تعمیر	$TKL_{k,l,p}$
میزان انتشار کربن به ازای حمل هر واحد محصول استفاده شده $p$ از بازار اول $c$ به مرکز جمع‌آوری $k$	$ETCK_{c,k,p}$	هزینه حمل هر واحد محصول استفاده شده $p$ از مرکز جمع‌آوری $k$ به مرکز بازیافت $r$ جهت بازیافت	$TKR_{k,r,p}$
میزان انتشار کربن به ازای حمل هر واحد محصول استفاده شده $p$ از مرکز جمع‌آوری $k$ به مرکز تولید $i$ جهت تولید مجدد	$ETKI_{k,i,p}$	هزینه حمل هر واحد محصول تعمیر شده $p$ از مرکز تعمیر $l$ به مرکز توزیع مجدد $s$	$TLS_{l,s,p}$
میزان انتشار کربن به ازای حمل هر واحد محصول استفاده شده $p$ از مرکز جمع‌آوری $k$ به مرکز دفع $d$ جهت دفع	$ETKD_{k,d,p}$	هزینه حمل هر واحد محصول تعمیر شده $p$ از مرکز توزیع مجدد $s$ به بازار دوم $q$	$TSQ_{s,q,p}$
میزان انتشار کربن به ازای حمل هر واحد محصول استفاده شده $p$ از مرکز جمع‌آوری $k$ به مرکز تعمیر $l$ جهت تعمیر	$ETKL_{k,l,p}$	هزینه حمل هر واحد ماده اولیه بازیافت شده $e$ از مرکز بازیافت $r$ به تأمین‌کننده $v$	$TRV_{r,v,e}$
میزان انتشار کربن به ازای حمل هر واحد محصول استفاده شده $p$ از مرکز جمع‌آوری $k$ به مرکز بازیافت $r$ جهت بازیافت	$ETKR_{k,r,p}$	ماکزیمم ظرفیت تأمین‌کننده $v$	$CapV_v$
		ماکزیمم ظرفیت مرکز تولید $i$ با سطح ظرفیت $h$	$CapI_{i,h}$
		ماکزیمم ظرفیت مرکز توزیع $j$ با سطح ظرفیت $h$	$CapJ_{j,h}$
		ماکزیمم ظرفیت مرکز جمع‌آوری $k$ با سطح ظرفیت $h$	$CapK_{k,h}$
		ماکزیمم ظرفیت مرکز تعمیر $l$ با سطح ظرفیت $h$	$CapL_{l,h}$
		ماکزیمم ظرفیت مرکز توزیع مجدد $s$ با سطح ظرفیت $h$	$CapS_{s,h}$
		ماکزیمم ظرفیت مرکز بازیافت $r$ با سطح ظرفیت $h$	$CapR_{r,h}$
		نرخ بازگشت محصولات استفاده شده از بازار اول به مراکز جمع‌آوری	RT
		نرخ تولید مجدد در مراکز تولید	RM

اگر مرکز توزیع $j$ با سطح ظرفیت $h$ احداث شود ۱، در غیر این صورت صفر	$Y_{j,h}$
اگر مرکز جمع‌آوری $k$ با سطح ظرفیت $h$ احداث شود ۱، در غیر این صورت صفر	$T_{k,h}$
اگر مرکز تعمیر $l$ با سطح ظرفیت $h$ احداث شود ۱، در غیر این صورت صفر	$W_{l,h}$
اگر مرکز توزیع مجدد $s$ با سطح ظرفیت $h$ احداث شود ۱، در غیر این صورت صفر	$O_{s,h}$
اگر مرکز بازیافت $r$ با سطح ظرفیت $h$ احداث شود ۱، در غیر این صورت صفر	$U_{r,h}$

۳-۴- مدل‌سازی ریاضی

در این بخش ابتدا توابع هدف مدل ارائه شده است. مدل پیشنهادی شامل سه تابع هدف اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی می‌باشد. در ادامه محدودیت‌های مدل آورده شده است.

$$\text{Max } W_1 = \left( \sum_j \sum_c \sum_p \text{Pr}_{jp} \times \text{QJC}_{jcp} + \sum_s \sum_q \sum_p \text{Pr}_{sqp} \times \text{QSQ}_{sqp} \right) - \left( \sum_i \sum_h \text{FX}_{ih} \times X_{ih} + \sum_j \sum_h \text{FY}_{jh} \times Y_{jh} + \sum_k \sum_h \text{FH}_{kh} \times T_{kh} + \sum_l \sum_h \text{FW}_{lh} \times W_{lh} + \sum_s \sum_h \text{FO}_{sh} \times O_{sh} + \sum_r \sum_h \text{FU}_{rh} \times U_{rh} \right) - \left( \sum_i \sum_c \sum_v \text{TVI}_{vic} \times \text{QVI}_{vic} + \sum_i \sum_j \sum_p \text{TII}_{ijp} \times \text{QUI}_{ijp} + \sum_j \sum_c \sum_p \text{TJC}_{jcp} \times \text{QJC}_{jcp} + \sum_c \sum_k \sum_p \text{TCK}_{ckp} \times \text{QCK}_{ckp} + \sum_k \sum_i \sum_p \text{TKI}_{kip} \times \text{QKI}_{kip} + \sum_k \sum_d \sum_p \text{TKD}_{kdp} \times \text{QKD}_{kdp} + \sum_k \sum_l \sum_p \text{TKL}_{klp} \times \text{QKL}_{klp} + \sum_k \sum_r \sum_p \text{TKR}_{krp} \times \text{QKR}_{krp} + \sum_l \sum_s \sum_p \text{TLS}_{lsp} \times \text{QLS}_{lsp} + \sum_s \sum_q \sum_p \text{TSQ}_{sqp} \times \text{QSQ}_{sqp} + \sum_r \sum_v \sum_c \text{TRV}_{rvc} \times \text{QRV}_{rvc} \right) - \left( \sum_v \sum_i \sum_c \text{SC}_{vc} \times \text{QVI}_{vic} + \sum_i \sum_j \sum_p \text{MC}_{ip} \times \text{QUI}_{ijp} + \sum_j \sum_c \sum_p \text{DC}_{jcp} \times \text{QJC}_{jcp} + \sum_c \sum_k \sum_p \text{CC}_{kp} \times \text{QCK}_{ckp} + \sum_k \sum_i \sum_p \text{RMC}_{kip} \times \text{QKI}_{kip} + \sum_k \sum_d \sum_p \text{DPC}_{kdp} \times \text{QKD}_{kdp} + \sum_k \sum_l \sum_p \text{RPC}_{klp} \times \text{QKL}_{klp} + \sum_k \sum_r \sum_p \text{RC}_{krp} \times \text{QKR}_{krp} + \sum_l \sum_s \sum_p \text{RDC}_{lsp} \times \text{QLS}_{lsp} \right) - \left( \sum_i \sum_h \text{JOI}_{ih} \times X_{ih} + \sum_j \sum_h \text{JOJ}_{jh} \times Y_{jh} + \sum_k \sum_h \text{JOK}_{kh} \times T_{kh} + \sum_l \sum_h \text{JOL}_{lh} \times W_{lh} + \sum_s \sum_h \text{JOS}_{sh} \times O_{sh} + \sum_r \sum_h \text{JOR}_{rh} \times U_{rh} \right) - \theta_{LD} \left( \sum_i \sum_h \text{LDI}_{ih} \times X_{ih} + \sum_l \sum_h \text{LDL}_{lh} \times W_{lh} + \sum_r \sum_h \text{LDR}_{rh} \times U_{rh} \right) \quad (3)$$

$$\text{Max } W_2 = \theta_{JO} \left( \sum_i \sum_h \text{JOI}_{ih} \times X_{ih} + \sum_j \sum_h \text{JOJ}_{jh} \times Y_{jh} + \sum_k \sum_h \text{JOK}_{kh} \times T_{kh} + \sum_l \sum_h \text{JOL}_{lh} \times W_{lh} + \sum_s \sum_h \text{JOS}_{sh} \times O_{sh} + \sum_r \sum_h \text{JOR}_{rh} \times U_{rh} \right) - \theta_{LD} \left( \sum_i \sum_h \text{LDI}_{ih} \times X_{ih} + \sum_l \sum_h \text{LDL}_{lh} \times W_{lh} + \sum_r \sum_h \text{LDR}_{rh} \times U_{rh} \right) \quad (4)$$

جهت بازیافت	
میزان انتشار کربن به ازای حمل هر واحد محصول تعمیر شده $p$ از مرکز تعمیر $l$ به مرکز توزیع مجدد $s$	$\text{ETLS}_{l,s,p}$
میزان انتشار کربن به ازای حمل هر واحد محصول تعمیر شده $p$ از مرکز توزیع مجدد $s$ به بازار دوم $q$	$\text{ETSQ}_{s,q,p}$
میزان انتشار کربن به ازای حمل هر واحد ماده اولیه بازیافت شده $e$ از مرکز بازیافت $r$ به تأمین‌کننده $v$	$\text{ETRV}_{r,v,e}$
میزان انتشار کربن به ازای تولید هر واحد محصول $p$ در مرکز تولید $i$	$\text{EM}_{i,p}$
میزان انتشار کربن به ازای تولید مجدد هر واحد محصول $p$ در مرکز تولید $i$	$\text{ERM}_{i,p}$
میزان انتشار کربن به ازای تعمیر هر واحد محصول $p$ در مرکز تعمیر $l$	$\text{ERP}_{l,p}$
میزان انتشار کربن به ازای بازیافت هر واحد محصول $p$ در مرکز بازیافت $r$	$\text{ERC}_{r,p}$
ماکزیمم تعداد مراکز تولید جهت احداث	$\text{NX}$
ماکزیمم تعداد مراکز توزیع جهت احداث	$\text{NY}$
ماکزیمم تعداد مراکز جمع‌آوری و بازرسی جهت احداث	$\text{NH}$
ماکزیمم تعداد مراکز تعمیر جهت احداث	$\text{NW}$
ماکزیمم تعداد مراکز توزیع مجدد جهت احداث	$\text{NO}$
ماکزیمم تعداد مراکز بازیافت جهت احداث	$\text{NU}$

متغیرهای تصمیم‌گیری

تعداد ماده اولیه حمل شده $e$ از تأمین‌کننده $v$ به مرکز تولید $i$	$\text{QVI}_{v,i,e}$
تعداد محصول حمل شده $p$ از مرکز تولید $i$ به مرکز توزیع $j$	$\text{QIJ}_{i,j,p}$
تعداد محصول حمل شده $p$ از مرکز توزیع $j$ به بازار اول $c$	$\text{QJC}_{j,c,p}$
تعداد محصول حمل شده $p$ از بازار اول $c$ به مرکز جمع‌آوری $k$	$\text{QCK}_{c,k,p}$
تعداد محصول حمل شده $p$ از مرکز جمع‌آوری $k$ به مرکز تولید $i$ جهت تولید مجدد	$\text{QKI}_{k,i,p}$
تعداد محصول حمل شده $p$ از مرکز جمع‌آوری $k$ به مرکز دفع $d$ جهت دفع	$\text{QKD}_{k,d,p}$
تعداد محصول حمل شده $p$ از مرکز جمع‌آوری $k$ به مرکز تعمیر $l$ جهت تعمیر	$\text{QKL}_{k,l,p}$
تعداد محصول حمل شده $p$ از مرکز جمع‌آوری $k$ به مرکز بازیافت $r$ جهت بازیافت	$\text{QKR}_{k,r,p}$
تعداد محصول حمل شده $p$ از مرکز تعمیر $l$ به مرکز توزیع مجدد $s$	$\text{QLS}_{l,s,p}$
تعداد محصول حمل شده $p$ از مرکز توزیع مجدد $s$ به بازار دوم $q$	$\text{QSQ}_{s,q,p}$
تعداد ماده اولیه حمل شده $e$ از مرکز بازیافت $r$ به تأمین‌کننده $v$	$\text{QRV}_{r,v,e}$
اگر مرکز تولید $i$ با سطح ظرفیت $h$ احداث شود ۱، در غیر این صورت صفر	$X_{i,h}$



$$\sum_r QKR_{krp} = \sum_c QCK_{ckp} \times RS \quad (12)$$

$$\forall k \in K, p \in P$$

$$\sum_i QKI_{kip} = \sum_c QCK_{ckp} \times RM \quad (13)$$

$$\forall k \in K, p \in P$$

$$\sum_c QCK_{ckp} = \sum_d QKD_{kdp} + \sum_i QKI_{kip} + \quad (14)$$

$$\sum_l QKL_{klp} + \sum_r QKR_{krp} \quad \forall k \in K, p \in P$$

$$\sum_k QKL_{klp} = \sum_s QLS_{lsp} \quad l \in L, p \in P \quad (15)$$

$$\sum_l QLS_{lsp} = \sum_q QSQ_{sqp} \quad s \in S, p \in P \quad (16)$$

$$\sum_s QSQ_{sqp} \geq DDE_{qp} \quad q \in Q, p \in P \quad (17)$$

$$\sum_k \sum_p QKR_{krp} = \sum_v \sum_e QRV_{rve} \quad r \in R \quad (18)$$

محدودیت (۶) نشان می‌دهد که برای هر محصول، مجموع جریان‌های ورودی به هر مرکز تولید از طرف تمامی تأمین‌کنندگان و مراکز جمع‌آوری برابر با جریان خروجی از آن مرکز می‌باشد. محدودیت (۷) تضمین می‌کند که برای هر محصول، مجموع جریان‌های ورودی به هر مرکز توزیع از طرف تمامی مراکز تولید برابر با مجموع جریان‌های خارج شونده از این مراکز توزیع است. محدودیت (۸) تضمین می‌کند که تقاضای همه مشتریان در مناطق بازار دسته اول ارضا می‌گردد. محدودیت (۹) نشان دهنده رابطه تقاضای مشتریان در مناطق بازار دسته اول با محصولات بازگشتی از سوی مشتریان به مراکز جمع‌آوری است. محدودیت (۱۰) نشان می‌دهد که برای هر محصول، جریان‌های خروجی از مراکز جمع‌آوری به تمام مراکز دفع برابر با جریان‌های ورودی به هر مرکز جمع‌آوری از طرف تمامی مشتریان مناطق بازار دسته اول، ضرب در نسبت دفع است. محدودیت (۱۱) نشان می‌دهد که برای هر محصول، جریان‌های خروجی از مراکز جمع‌آوری از طرف تمامی مشتریان مناطق بازار دسته اول، ضرب در نسبت تعمیر است. محدودیت (۱۲) نشان می‌دهد که برای هر محصول، جریان‌های خروجی از مراکز جمع‌آوری به هر مرکز جمع‌آوری از طرف تمامی مشتریان مناطق بازار دسته اول، ضرب در نسبت باز یافت است. محدودیت (۱۳) نشان می‌دهد که برای هر محصول، جریان‌های خروجی از مراکز جمع‌آوری به هر مرکز جمع‌آوری از طرف تمامی مشتریان مناطق بازار دسته اول، ضرب در نسبت تعمیر است. محدودیت (۱۴) نشان می‌دهد که برای هر محصول، جریان‌های ورودی به هر مرکز جمع‌آوری از طرف تمامی مشتریان مناطق بازار دسته اول، ضرب در نسبت تعمیر است. محدودیت (۱۵) تضمین می‌کند

$$\begin{aligned} \text{Max } W_3 = & \sum_v \sum_i \sum_e \text{ETVI}_{vie} \times \text{QVI}_{vie} + \\ & \sum_i \sum_j \sum_p (\text{ETI}_{ijp} + \text{EM}_{ip}) \times \text{QIJ}_{ijp} + \\ & \sum_j \sum_c \sum_p \text{ETJC}_{jcp} \times \text{QJC}_{jcp} + \sum_c \sum_k \sum_p \text{ETCK}_{ckp} \times \text{QCK}_{ckp} + \\ & \sum_k \sum_i \sum_p (\text{ETKI}_{kip} + \text{ERM}_{ip}) \times \text{QKI}_{kip} + \\ & \sum_k \sum_d \sum_p \text{ETKD}_{kdp} \times \text{QKD}_{kdp} + \sum_r \sum_v \sum_e \text{ETRV}_{rve} \times \text{QRV}_{rve} + \\ & \sum_k \sum_l \sum_p (\text{ETKL}_{klp} + \text{ERP}_{lp}) \times \text{QKL}_{klp} + \\ & \sum_k \sum_r \sum_p (\text{ETKR}_{krp} + \text{ERC}_{rp}) \times \text{QKR}_{krp} + \\ & \sum_i \sum_s \sum_p \text{ETLS}_{isp} \times \text{QLS}_{isp} + \sum_s \sum_q \sum_p \text{ETSQ}_{sqp} \times \text{QSQ}_{sqp} \end{aligned} \quad (5)$$

تابع هدف اول حداکثر رساندن سود حاصل از احداث تسهیلات به صورت درآمد کل منهای کل هزینه‌های زنجیره را نشان می‌دهد. پراتز اول درآمد حاصل از فروش محصولات در بازارهای دسته اول و دوم را نشان می‌دهد. هزینه‌های شبکه زنجیره تأمین طراحی شده از سه بخش هزینه‌های ثابت احداث مراکز، هزینه‌های حمل و نقل بین مراکز و هزینه‌های عملیاتی در هر یک از مراکز تشکیل شده است. پراتز دوم نشان‌دهنده هزینه‌های ثابت احداث تسهیلات تولید، توزیع، جمع‌آوری، تعمیر، توزیع مجدد و باز یافت می‌باشد. پراتز سوم هزینه‌های حمل و نقل بین هر یک از تسهیلات را نشان می‌دهد. پراتز چهارم شامل هزینه‌های عملیاتی زنجیره تأمین می‌شود. این هزینه‌ها، هزینه تأمین مواد اولیه، هزینه‌های تولید و تولید مجدد محصولات در مراکز تولید، هزینه‌های عملیاتی در مراکز توزیع و توزیع مجدد، هزینه بازرسی برای محصولات بازگردانده شده در مراکز جمع‌آوری، هزینه‌های دفع، هزینه‌های تعمیر و هزینه‌های مربوط به باز یافت را در بر می‌گیرد. تابع هدف دوم بیان کننده حداکثرسازی اثرات اجتماعی شبکه زنجیره تأمین متشکل از حداکثرسازی فرصت‌های شغلی ایجاد شده و حداقل کردن میانگین تعداد کل روزهای از دست رفته ناشی از آسیب‌دیدگی در محیط کار می‌باشد. تابع هدف سوم حداقل‌سازی اثرات زیست محیطی بر اساس شاخص میزان انتشار کربن حاصل از حمل و نقل محصولات در بین هر یک از مراکز و همچنین کربن تولید شده از فرآیندهای تولید، تولید مجدد، تعمیر و باز یافت را نشان می‌دهد.

محدودیت‌های تعادل جریان‌های ورودی و خروجی به تسهیلات

$$\sum_j \sum_p \text{QIJ}_{ijp} = \sum_v \sum_e \text{QVI}_{vie} + \sum_k \sum_p \text{QKI}_{kip} \quad (6)$$

$$\forall i \in I$$

$$\sum_i \text{QIJ}_{ijp} = \sum_c \text{QJC}_{jcp} \quad \forall j \in J, p \in P \quad (7)$$

$$\sum_j \text{QJC}_{jcp} \geq DE_{cp} \quad \forall c \in C, p \in P \quad (8)$$

$$\sum_k \text{QCK}_{ckp} = DE_{cp} \times RT \quad \forall c \in C, p \in P \quad (9)$$

$$\sum_d \text{QKD}_{kdp} = \sum_c \text{QCK}_{ckp} \times RD \quad (10)$$

$$\forall k \in K, p \in P$$

$$\sum_l \text{QKL}_{klp} = \sum_c \text{QCK}_{ckp} \times RR \quad (11)$$

$$\forall k \in K, p \in P$$

$$\sum_h Y_{jh} \leq 1 \quad \forall j \in J \quad (27)$$

$$\sum_h T_{kh} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (28)$$

$$\sum_h W_{lh} \leq 1 \quad \forall l \in L \quad (29)$$

$$\sum_h O_{sh} \leq 1 \quad \forall s \in S \quad (30)$$

$$\sum_h U_{rh} \leq 1 \quad \forall r \in R \quad (31)$$

محدودیت‌های (۲۶) الی (۳۱)، به ترتیب تضمین می‌کنند که مراکز تولید، توزیع، جمع‌آوری، تعمیر، توزیع مجدد و بازیافت حداکثر با یک سطح ظرفیت احداث می‌شوند.

محدودیت‌های ماکزیمم تعداد تسهیلات

$$\sum_i \sum_h X_{ih} \leq NX \quad \forall i \in I \quad (32)$$

$$\sum_j \sum_h Y_{jh} \leq NY \quad \forall j \in J \quad (33)$$

$$\sum_k \sum_h T_{kh} \leq NH \quad \forall k \in K \quad (34)$$

$$\sum_l \sum_h W_{lh} \leq NW \quad \forall l \in L \quad (35)$$

$$\sum_s \sum_h O_{sh} \leq NO \quad \forall s \in S \quad (36)$$

$$\sum_r \sum_h U_{rh} \leq NU \quad \forall r \in R \quad (37)$$

محدودیت‌های (۳۲) الی (۳۷)، به ترتیب ماکزیمم تعداد مراکز تولید، توزیع، جمع‌آوری، تعمیر، توزیع مجدد و بازیافت که پتانسیل احداث را دارا می‌باشند، محدود می‌کنند.

$$X_{ih}, Y_{jh}, T_{kh}, W_{lh}, O_{sh}, U_{rh} \in \{0, 1\} \quad (38)$$

$$QVI_{vie}, QIJ_{ijp}, QJC_{jcp}, QCK_{ckp}, QKI_{kip}, QKD_{kdp}, QKL_{klp}, QKR_{krp}, QLS_{lsp}, QSQ_{sqp}, QRV_{rve} \geq 0, Int \quad (39)$$

محدودیت‌های (۳۸) و (۳۹) به ترتیب مربوط به صفر و یک و نامنفی و صحیح بودن متغیرهای تصمیم‌گیری مدل می‌باشند.

### ۳-۵- ارائه هم‌تای استوار مدل

همانگونه که در ابتدای این بخش توضیح داده شد، بهینه‌سازی استوار مدل‌سازی را در بدترین شرایط و بدون نیاز به تابع توزیع برای پارامترهای غیرقطعی در نظر می‌گیرد. در مدل زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه شده، پارامترهای مربوط به هزینه‌های حمل و نقل بین تسهیلات، هزینه‌های عملیاتی در هر یک از تسهیلات شامل هزینه تأمین مواد اولیه، هزینه‌های تولید و تولید مجدد محصولات در مراکز تولید، هزینه‌های عملیاتی در مراکز توزیع و توزیع مجدد، هزینه بازرسی برای محصولات بازگردانده شده در مراکز جمع‌آوری، هزینه‌های دفع، هزینه‌های تعمیر و هزینه‌های مربوط به بازیافت و

که برای هر محصول، مجموع جریان‌های ورودی به هر مرکز تعمیر از طرف تمامی مراکز جمع‌آوری برابر با مجموع جریان‌های خارج شونده از این مراکز تعمیر است. محدودیت (۱۶) تضمین می‌کند که برای هر محصول، مجموع جریان‌های ورودی به هر مرکز توزیع مجدد از طرف تمامی مراکز تعمیر برابر با مجموع جریان‌های خارج شونده از این مراکز توزیع مجدد است. محدودیت (۱۷) تضمین می‌کند که تقاضای همه مشتریان در مناطق بازار دسته دوم ارضا می‌گردد. محدودیت (۱۸) تضمین می‌کند که برای هر ماده اولیه، مجموع جریان‌های ورودی به هر مرکز بازیافت از طرف تمامی مراکز جمع‌آوری برابر با مجموع جریان‌های خارج شونده از این مراکز بازیافت است.

محدودیت‌های ظرفیت

$$\sum_e \sum_i QVI_{vie} \leq CapV_v \quad \forall v \in V \quad (19)$$

$$\sum_j \sum_p QIJ_{ijp} \leq \sum_h CapI_{ih} \times X_{ih} \quad \forall i \in I \quad (20)$$

$$\sum_c \sum_p QJC_{jcp} \leq \sum_h CapJ_{jh} \times Y_{jh} \quad \forall j \in J \quad (21)$$

$$\sum_c \sum_p QCK_{ckp} \leq \sum_h CapK_{kh} \times T_{kh} \quad \forall k \in K \quad (22)$$

$$\sum_k \sum_p QKL_{klp} \leq \sum_h CapL_{lh} \times W_{lh} \quad \forall l \in L \quad (23)$$

$$\sum_l \sum_p QLS_{lsp} \leq \sum_h CapL_{sh} \times W_{sh} \quad \forall s \in S \quad (24)$$

$$\sum_k \sum_p QKR_{krp} \leq \sum_h CapR_{rh} \times U_{rh} \quad \forall r \in R \quad (25)$$

محدودیت (۱۹) تضمین می‌کند که برای هر ماده اولیه، مجموع جریان‌های خروجی از هر تأمین‌کننده به تمامی مراکز تولید، از ظرفیت تأمین‌کننده تجاوز نمی‌کند. محدودیت (۲۰) تضمین می‌کند که برای هر محصول، مجموع جریان‌های خروجی از هر مرکز تولید به تمامی مراکز توزیع، از ظرفیت مراکز تولید تجاوز نمی‌کند. محدودیت (۲۱) تضمین می‌کند که برای هر محصول، مجموع جریان‌های خروجی از هر مرکز توزیع به تمامی مناطق مشتریان دسته اول، از ظرفیت مرکز توزیع تجاوز نمی‌کند. محدودیت (۲۲) تضمین می‌کند که مجموع جریان‌های ورودی به مراکز جمع‌آوری از سوی تمامی مشتریان بازار دسته اول، از ظرفیت مراکز جمع‌آوری تجاوز نمی‌کند. محدودیت (۲۳) تضمین می‌کند که مجموع جریان‌های ورودی به مراکز تعمیر از سوی تمامی مراکز جمع‌آوری، از ظرفیت مراکز تعمیر تجاوز نمی‌کند. محدودیت (۲۴) تضمین می‌کند که مجموع جریان‌های ورودی به مراکز توزیع مجدد از سوی تمامی مراکز جمع‌آوری، از ظرفیت مراکز توزیع مجدد تجاوز نمی‌کند. محدودیت (۲۵) تضمین می‌کند که مجموع جریان‌های ورودی به مراکز بازیافت از سوی مراکز جمع‌آوری از ظرفیت مراکز بازیافت تجاوز نمی‌کند.

محدودیت‌های سطح ظرفیت تسهیلات

$$\sum_h X_{ih} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (26)$$

$$\begin{aligned} & \sum_v \sum_c \sum_e ETVI_{vie} \times QVI_{vie} + \\ & \sum_i \sum_j \sum_p (ETIJ_{ijp} + EM_{ip}) \times QUI_{ijp} + \\ & \sum_j \sum_c \sum_p ETJC_{jcp} \times QJC_{jcp} + \\ & \sum_c \sum_k \sum_p ETCK_{ckp} \times QCK_{ckp} + \\ & \sum_k \sum_l \sum_p (ETKI_{klp} + ERM_{lp}) \times QKI_{klp} + \\ & \sum_k \sum_d \sum_p ETKD_{kdp} \times QKD_{kdp} + \\ & \sum_k \sum_l \sum_p (ETKL_{klp} + ERP_{lp}) \times QKL_{klp} + \\ & \sum_k \sum_r \sum_p (ETKR_{krp} + ERC_{rp}) \times QKR_{krp} + \\ & \sum_l \sum_s \sum_p ETLS_{lsp} \times QLS_{lsp} + \sum_s \sum_q \sum_p ETSQ_{sqp} \times QSQ_{sqp} + \\ & \sum_r \sum_v \sum_e ETRV_{rve} \times QRV_{rve} - \alpha_3 Z \leq A_3 \end{aligned} \quad (43)$$

(6), (7)

(10) - (16)

(18) - (37)

$$\sum_j QJC_{jcp} \geq \overline{DE}_{cp} + \rho_{DE} G_{cp}^{DE} \quad \forall c \in C, p \in P \quad (44)$$

$$\sum_k QCK_{ckp} \geq \overline{DE}_{cp} + \rho_{DE} G_{cp}^{DE} \quad \forall c \in C, p \in P \quad (45)$$

$$\sum_s QSQ_{sqp} \geq \overline{DDE}_{cp} + \rho_{DDE} G_{cp}^{DDE} \quad \forall q \in Q, p \in P \quad (46)$$

$$\rho_{Pr} G_{cp}^{Pr} QJC_{jcp} \leq \eta_{cp}^{Pr}, \rho_{Pr} G_{cp}^{Pr} QJC_{jcp} \geq -\eta_{cp}^{Pr} \quad (47)$$

$$\rho_{Pr} G_{cp}^{Pr} QSQ_{sqp} \leq \eta_{cp}^{Pr}, \rho_{Pr} G_{cp}^{Pr} QSQ_{sqp} \geq -\eta_{cp}^{Pr} \quad (48)$$

$$\rho_{TVI} G_{vie}^{TVI} QVI_{vie} \leq \eta_{vie}^{TVI}, \rho_{TVI} G_{vie}^{TVI} QVI_{vie} \geq -\eta_{vie}^{TVI} \quad (49)$$

$$\rho_{SC} G_{ve}^{SC} QVI_{vie} \leq \eta_{vie}^{SC}, \rho_{SC} G_{ve}^{SC} QVI_{vie} \geq -\eta_{vie}^{SC} \quad (50)$$

$$\rho_{III} G_{ijp}^{III} QUI_{ijp} \leq \eta_{ijp}^{III}, \rho_{III} G_{ijp}^{III} QUI_{ijp} \geq -\eta_{ijp}^{III} \quad (51)$$

$$\rho_{MC} G_{ip}^{MC} QUI_{ijp} \leq \eta_{ip}^{MC}, \rho_{MC} G_{ip}^{MC} QUI_{ijp} \geq -\eta_{ip}^{MC} \quad (52)$$

$$\rho_{TIC} G_{jcp}^{TIC} QJC_{jcp} \leq \eta_{jcp}^{TIC}, \rho_{TIC} G_{jcp}^{TIC} QJC_{jcp} \geq -\eta_{jcp}^{TIC} \quad (53)$$

$$\rho_{DC} G_{jcp}^{DC} QJC_{jcp} \leq \eta_{jcp}^{DC}, \rho_{DC} G_{jcp}^{DC} QJC_{jcp} \geq -\eta_{jcp}^{DC} \quad (54)$$

$$\rho_{TCK} G_{ckp}^{TCK} QCK_{ckp} \leq \eta_{ckp}^{TCK}, \rho_{TCK} G_{ckp}^{TCK} QCK_{ckp} \geq -\eta_{ckp}^{TCK} \quad (55)$$

$$\rho_{CC} G_{ckp}^{CC} QCK_{ckp} \leq \eta_{ckp}^{CC}, \rho_{CC} G_{ckp}^{CC} QCK_{ckp} \geq -\eta_{ckp}^{CC} \quad (56)$$

$$\rho_{TKI} G_{klp}^{TKI} QKI_{klp} \leq \eta_{klp}^{TKI}, \rho_{TKI} G_{klp}^{TKI} QKI_{klp} \geq -\eta_{klp}^{TKI} \quad (57)$$

$$\rho_{RMC} G_{ip}^{RMC} QKI_{klp} \leq \eta_{ip}^{RMC}, \rho_{RMC} G_{ip}^{RMC} QKI_{klp} \geq -\eta_{ip}^{RMC} \quad (58)$$

$$\rho_{TKI} G_{klp}^{TKI} QKI_{klp} \leq \eta_{klp}^{TKI}, \rho_{TKI} G_{klp}^{TKI} QKI_{klp} \geq -\eta_{klp}^{TKI} \quad (59)$$

$$\rho_{RMC} G_{ip}^{RMC} QKI_{klp} \leq \eta_{ip}^{RMC}, \rho_{RMC} G_{ip}^{RMC} QKI_{klp} \geq -\eta_{ip}^{RMC} \quad (60)$$

$$\rho_{TKI} G_{klp}^{TKI} QKI_{klp} \leq \eta_{klp}^{TKI}, \rho_{TKI} G_{klp}^{TKI} QKI_{klp} \geq -\eta_{klp}^{TKI} \quad (61)$$

$$\rho_{RMC} G_{ip}^{RMC} QKI_{klp} \leq \eta_{ip}^{RMC}, \rho_{RMC} G_{ip}^{RMC} QKI_{klp} \geq -\eta_{ip}^{RMC} \quad (62)$$

$$\rho_{TKI} G_{klp}^{TKI} QKI_{klp} \leq \eta_{klp}^{TKI}, \rho_{TKI} G_{klp}^{TKI} QKI_{klp} \geq -\eta_{klp}^{TKI} \quad (63)$$

$$\rho_{RMC} G_{ip}^{RMC} QKI_{klp} \leq \eta_{ip}^{RMC}, \rho_{RMC} G_{ip}^{RMC} QKI_{klp} \geq -\eta_{ip}^{RMC} \quad (64)$$

همچنین تقاضای مشتریان بازار محصولات دسته اول و دوم به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است. این پارامترها متغیرهای تصادفی هستند که به صورت مستقل در یک بازه بسته تغییر می‌کنند.

همانطور که در بخش قبل مشاهده شد، مدل پیشنهادی یک مسأله چندهدفه است که از سه تابع هدف اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی به منظور دستیابی به یک شبکه پایدار تشکیل شده است. برای حل این مدل، ابتدا مسأله به کمک تکنیک پیشرفت هدف به حالت تک هدفه تبدیل شده است.

$$\max Z \quad (40)$$

st:

$$\left( \sum_j \sum_c \sum_p (\overline{Pr}_{cp} \times QJC_{jcp} + \eta_{cp}^{Pr}) + \sum_s \sum_q \sum_p (\overline{Pr}_{sqp} \times QSQ_{sqp} + \eta_{sqp}^{Pr}) \right) -$$

$$\left( \sum_i \sum_h FX_{ih} \times X_{ih} + \sum_j \sum_h FY_{jh} \times Y_{jh} + \sum_k \sum_h FH_{kh} \times T_{kh} + \sum_l \sum_h FW_{lh} \times W_{lh} + \sum_s \sum_h FO_{sh} \times O_{sh} + \sum_r \sum_h FU_{rh} \times U_{rh} \right) -$$

$$\left( \sum_v \sum_i \sum_e (\overline{TVI}_{vie} + \overline{SC}_{ve}) \times QVI_{vie} + \eta_{vie}^{TVI} + \eta_{ve}^{SC} + \sum_i \sum_j \sum_p (\overline{TII}_{ijp} + \overline{MC}_{ip}) \times QUI_{ijp} + \eta_{ijp}^{TII} + \eta_{ip}^{MC} + \sum_j \sum_c \sum_p (\overline{TJC}_{jcp} + \overline{DC}_{jp}) \times QJC_{jcp} + \eta_{jcp}^{TJC} + \eta_{jp}^{DC} + \sum_c \sum_k \sum_p (\overline{TCK}_{ckp} + \overline{CC}_{kp}) \times QCK_{ckp} + \eta_{ckp}^{TCK} + \eta_{kp}^{CC} \right) +$$

$$\left( \sum_k \sum_l \sum_p (\overline{TKI}_{klp} + \overline{RMC}_{lp}) \times QKI_{klp} + \eta_{klp}^{TKI} + \eta_{lp}^{RMC} + \sum_k \sum_d \sum_p (\overline{TKD}_{kdp} + \overline{DPC}_{dp}) \times QKD_{kdp} + \eta_{kdp}^{TKD} + \eta_{dp}^{DPC} + \sum_k \sum_l \sum_p (\overline{TKL}_{klp} + \overline{RPC}_{lp}) \times QKL_{klp} + \eta_{klp}^{TKL} + \eta_{lp}^{RPC} \right) +$$

$$\left( \sum_k \sum_r \sum_p (\overline{TKR}_{krp} + \overline{RC}_{rp}) \times QKR_{krp} + \eta_{krp}^{TKR} + \eta_{rp}^{RC} + \sum_l \sum_s \sum_p (\overline{TLS}_{lsp} + \overline{RDC}_{sp}) \times QLS_{lsp} + \eta_{lsp}^{TIS} + \eta_{sp}^{RDC} + \sum_s \sum_q \sum_p (\overline{TSQ}_{sqp} \times QSQ_{sqp} + \eta_{sqp}^{TSQ}) + \sum_r \sum_v \sum_e (\overline{TRV}_{rve} \times QRV_{rve} + \eta_{rve}^{TRV}) \right) +$$

$$\left( \sum_i \sum_h JOI_{ih} \times X_{ih} + \sum_j \sum_h JOJ_{jh} \times Y_{jh} + \sum_k \sum_h JOK_{kh} \times T_{kh} + \sum_l \sum_h JOL_{lh} \times W_{lh} + \sum_s \sum_h JOS_{sh} \times O_{sh} + \sum_r \sum_h JOR_{rh} \times U_{rh} \right) -$$

$$\left( \sum_i \sum_h LDI_{ih} \times X_{ih} + \sum_l \sum_h LDL_{lh} \times W_{lh} + \sum_r \sum_h LDR_{rh} \times U_{rh} \right) + \alpha_2 Z \leq A_2$$

$$\theta_{JO} \left( \sum_i \sum_h JOI_{ih} \times X_{ih} + \sum_j \sum_h JOJ_{jh} \times Y_{jh} + \sum_k \sum_h JOK_{kh} \times T_{kh} + \sum_l \sum_h JOL_{lh} \times W_{lh} + \sum_s \sum_h JOS_{sh} \times O_{sh} + \sum_r \sum_h JOR_{rh} \times U_{rh} \right) -$$

$$\theta_{LD} \left( \sum_i \sum_h LDI_{ih} \times X_{ih} + \sum_l \sum_h LDL_{lh} \times W_{lh} + \sum_r \sum_h LDR_{rh} \times U_{rh} \right) + \alpha_2 Z \leq A_2 \quad (42)$$

جهت حل مدل از نرم‌افزار GAMS 23.6 و یک رایانه شخصی با مشخصات Intel Core i7, (4GB RAM) استفاده شده است. نتایج بدست آمده از حل مدل برای هر یک از توابع هدف سود، مسئولیت‌پذیری اجتماعی و انتشار کربن تحت داده‌های اسمی در جدول ۳ آورده شده است.

در این مرحله برای هر یک از توابع هدف دو بردار جواب، یکی بردار جواب قطعی و دیگری بردار جواب استوار حاصل شده است. حال باید برای حالت‌های مختلف، عملکرد این دو بردار را با هم مقایسه شوند. بدین منظور ابتدا پارامترهای غیر قطعی مسأله شامل تقاضا، هزینه‌های عملیاتی مربوط به هر یک از تسهیلات و همچنین هزینه‌های حمل و نقل بین تسهیلات را به صورت تصادفی و بر اساس داده‌های اسمی جدول تولید می‌شوند. لازم به ذکر است که بازه‌های تولید شده جهت انجام آزمایش‌ها، بازه‌هایی متقارن در اطراف داده‌های اسمی هستند، که شعاع همسایگی آنها همان  $\rho G$  است. در این بازه‌های متقارن، اعداد به صورت یکنواخت تولید می‌شوند. در واقع حل هر یک از مدل‌ها یک آزمایش است که باید برای معیارهایی که در ادامه آورده شده است، با یکدیگر مقایسه شوند.

برای ارزیابی دو مدل در حالت‌های قطعی و استوار فرض شده است که سطح عدم قطعیت پارامترهای غیرقطعی تقاضا، هزینه‌های عملیاتی مربوط به هر یک از تسهیلات و همچنین هزینه‌های حمل و نقل بین تسهیلات با یکدیگر برابر هستند. در هر یک از سطوح عدم قطعیت سه آزمایش تکرار شده است. نتایج مربوط به این آزمایش‌ها بطور کامل در جدول ۴ ارائه شده است. جدول شماره ۴ مقادیر مربوط به هر یک از توابع هدف در دو حالت قطعی و استوار را در هر تکرار آزمایش نمایش می‌دهد.

جدول شماره ۵ نتایج حاصل از تکرار آزمایش‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به مقالات پیشوایی و همکاران [۱] و وحدانی و همکاران [۳۰] برای مقایسه دو مدل قطعی و هم‌تای استوار آن از دو معیار میانگین و انحراف استاندارد استفاده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده در جدول شماره ۵ میانگین توابع هدف سود و مسئولیت‌پذیری اجتماعی در حالت استوار در اکثر آزمایش‌ها کمتر از حالت قطعی است. در حالی که در مورد تابع هدف انتشار کربن در تمامی موارد، میانگین مربوط به حالت استوار بیشتر از حالت قطعی است. معیار دیگری که عملکرد دو مدل پیشنهادی بر اساس آن مقایسه شده است، انحراف استاندارد می‌باشد. در تمامی آزمایش‌های انجام گرفته انحراف استاندارد توابع هدف در حالت استوار کمتر از حالت قطعی است. با توجه به جداول شماره ۴ و ۵ بر اساس معیار میانگین در اکثر موارد مدل قطعی نسبت به حالت استوار از کیفیت بهتری برخوردار است. دلیل این امر نیز مدل‌سازی هم‌تای استوار در بدترین شرایط است. از طرفی دیگر کیفیت مدل استوار نسبت به حالت قطعی بر اساس معیار انحراف استاندارد بسیار بهتر می‌باشد.

$$\rho_{TKD} G_{kdp}^{TKD} QKD_{kdp} \leq \eta_{kdp}^{TKD}, \rho_{TKD} G_{kdp}^{TKD} QKD_{kdp} \geq -\eta_{kdp}^{TKD} \quad (59)$$

$$\forall d \in D, k \in K, p \in P$$

$$\rho_{DPC} G_{dp}^{DPC} QKD_{kdp} \leq \eta_{kdp}^{DPC}, \rho_{DPC} G_{dp}^{DPC} QKD_{kdp} \geq -\eta_{kdp}^{DPC} \quad (60)$$

$$\forall d \in D, k \in K, p \in P$$

$$\rho_{TKL} G_{klp}^{TKL} QKL_{kdp} \leq \eta_{kdp}^{TKL}, \rho_{TKL} G_{klp}^{TKL} QKL_{kdp} \geq -\eta_{kdp}^{TKL} \quad (61)$$

$$\forall l \in L, k \in K, p \in P$$

$$\rho_{RPC} G_{lp}^{RPC} QKL_{kdp} \leq \eta_{lp}^{RPC}, \rho_{RPC} G_{lp}^{RPC} QKL_{kdp} \geq -\eta_{lp}^{RPC} \quad (62)$$

$$\forall l \in L, k \in K, p \in P$$

$$\rho_{TKR} G_{krp}^{TKR} QKR_{kdp} \leq \eta_{kdp}^{TKR}, \rho_{TKR} G_{krp}^{TKR} QKR_{kdp} \geq -\eta_{kdp}^{TKR} \quad (63)$$

$$\forall r \in R, k \in K, p \in P$$

$$\rho_{RC} G_{rp}^{RC} QKR_{kdp} \leq \eta_{rp}^{RC}, \rho_{RC} G_{rp}^{RC} QKR_{kdp} \geq -\eta_{rp}^{RC} \quad (64)$$

$$\forall r \in R, k \in K, p \in P$$

$$\rho_{TILS} G_{lsp}^{TILS} QLS_{sp} \leq \eta_{lsp}^{TILS}, \rho_{TILS} G_{lsp}^{TILS} QLS_{sp} \geq -\eta_{lsp}^{TILS} \quad (65)$$

$$\forall l \in L, s \in S, p \in P$$

$$\rho_{RDC} G_{sp}^{RDC} QLS_{sp} \leq \eta_{sp}^{RDC}, \rho_{RDC} G_{sp}^{RDC} QLS_{sp} \geq -\eta_{sp}^{RDC} \quad (66)$$

$$\forall l \in L, s \in S, p \in P$$

$$\rho_{TSQ} G_{spp}^{TSQ} QSQ_{spp} \leq \eta_{spp}^{TSQ}, \rho_{TSQ} G_{spp}^{TSQ} QSQ_{spp} \geq -\eta_{spp}^{TSQ} \quad (67)$$

$$\forall q \in Q, s \in S, p \in P$$

$$\rho_{TRV} G_{rve}^{TRV} QRV_{rve} \leq \eta_{rve}^{TRV}, \rho_{TRV} G_{rve}^{TRV} QRV_{rve} \geq -\eta_{rve}^{TRV} \quad (68)$$

$$\forall r \in R, v \in V, e \in E$$

(38), (39)

$\eta \geq 0$

## ۴- تجزیه و تحلیل عددی

### ۴-۱- طراحی آزمایش‌ها

در این بخش به منظور بررسی کارایی و ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی و همچنین رویکرد استوار پنج سناریو طراحی شده است. اندازه آزمایش‌های طراحی شده و یا به عبارتی اندازه مسأله در هر یک از این آزمایش‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

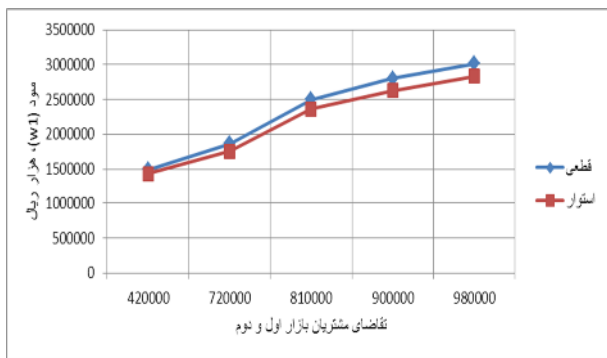
جدول (۲): ابعاد مسأله در سناریوهای طراحی شده

شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵
تعداد مراکز تأمین	۵	۵	۵	۵	۵
تعداد مراکز تولید	۱۰	۱۳	۱۵	۱۸	۲۰
تعداد مراکز توزیع	۸	۹	۱۰	۱۳	۱۵
تعداد بازار اول	۵	۵	۵	۵	۵
تعداد مراکز جمع‌آوری	۵	۷	۸	۱۰	۱۲
تعداد مراکز تعمیر	۷	۹	۱۰	۱۲	۱۳
تعداد مراکز دفع	۲	۲	۲	۲	۲
تعداد مراکز توزیع مجدد	۵	۷	۸	۹	۱۰
تعداد مراکز بازیافت	۵	۶	۸	۹	۱۰
تعداد بازار دوم	۳	۳	۳	۳	۳
تعداد مواد اولیه	۲	۲	۲	۲	۲
تعداد محصولات	۲	۲	۲	۲	۲
تعداد سطوح ظرفیت	۳	۳	۳	۳	۳
ماکزیمم تعداد تسهیلات	۵	۶	۸	۹	۱۰

۴-۲- تحلیل حساسیت

در این بخش تحلیل حساسیت در دو حالت تأثیر افزایش پارامتر تقاضا به عنوان یکی از پارامترهای اساسی مدل بر روی مقادیر تک تک توابع هدف و همچنین تأثیر افزایش سطح عدم قطعیت بر روی مقادیر توابع هدف مورد بررسی قرار گرفته شده که نتایج مربوط به هر کدام به صورت شماتیک نمایش داده شده است.

بطور کلی پارامتر تقاضا در مسائل طراحی زنجیره تأمین نقش اساسی را ایفا می‌کند. از این رو روند تغییرات توابع هدف مدل ارائه شده با افزایش تقاضای مشتریان بازارهای اول و دوم در حالت قطعی و استوار بررسی شده است. شکل شماره ۲ روند تغییرات تابع هدف سود را در برابر افزایش تقاضای مشتریان بازارهای اول و دوم نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش میانگین تقاضای مشتریان میزان تابع هدف سود روند افزایشی دارد.

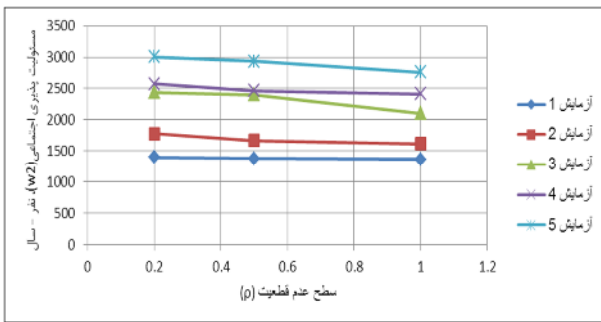


شکل (۲): روند تغییرات سود نسبت به افزایش تقاضا

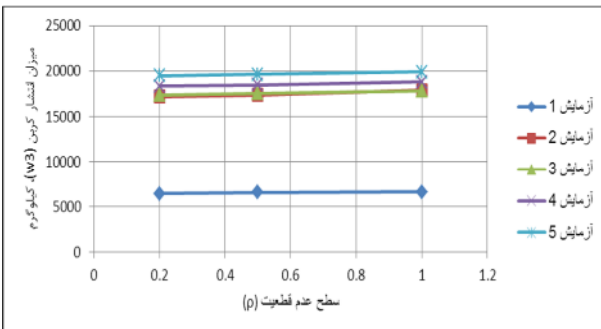
شکل‌های شماره ۳ و ۴ نیز به ترتیب روند تغییرات تابع هدف مسئولیت‌پذیری اجتماعی و انتشار کربن را در برابر افزایش تقاضای مشتریان بازارهای اول و دوم نشان می‌دهند. در این دو مورد نیز میزان تغییرات هر دو تابع هدف روند افزایشی دارد. مقادیر مربوط به تابع هدف مسئولیت‌پذیری اجتماعی در دو حالت قطعی و استوار به یکدیگر نزدیک هستند در حالی که در دو تابع هدف سود و انتشار کربن میزان اختلاف در دو حالت قطعی و استوار قابل ملاحظه است. نکته دیگر اینکه همانطور که گفته شده مقادیر توابع هدف در حالت قطعی نسبت به حالت استوار از کیفیت بهتری برخوردار هستند که این موضوع در شکل‌های شماره ۲ و ۳ با توجه به پایین‌تر قرار گرفتن نمودار مربوط به مدل استوار نسبت به مدل قطعی و در شکل ۴ با توجه به بالاتر بودن نمودار استوار قابل مشاهده است.

جدول (۴): نتایج حل مسأله تحت آزمایش‌های طراحی شده

شماره آزمایش	سطح عدم قطعیت	مقادیر توابع هدف تحت آزمایش‌ها					
		استوار			قطعی		
		W3	W2	W1	W3	W2	W1
۱	۰/۲	۶۳۹۱	۱۳۹۷	۱۴۳۵۵۷۳	۴۸۶۸	۱۴۴۰	۱۴۹۷۷۹۰
		۶۳۲۶	۱۴۰۰	۱۴۳۶۶۱۱	۵۰۷۷	۱۴۲۱	۱۴۶۲۵۶۸
		۶۴۵۷	۱۳۸۹	۱۴۵۸۲۹۰	۴۹۹۲	۱۴۱۳	۱۴۵۳۸۰۸
		۶۵۳۷	۱۳۷۹	۱۳۸۹۱۲۹	۴۸۰۸	۱۴۶۹	۱۵۰۰۳۶۱
		۶۵۸۶	۱۳۷۳	۱۴۱۴۷۹۴	۵۰۳۶	۱۴۳۱	۱۴۰۸۱۳۵
	۱	۶۵۵۴	۱۳۷۷	۱۴۲۸۷۷۶	۵۰۶۸	۱۳۸۶	۱۴۰۶۲۲۲
		۶۶۱۰	۱۳۶۳	۱۳۷۷۹۱۶	۴۸۶۶	۱۴۴۰	۱۴۷۷۸۴۸
		۶۶۰۰	۱۳۶۴	۱۳۸۸۲۶۴	۴۸۷۷	۱۴۱۲	۱۴۳۰۶۷۵
		۶۶۳۶	۱۳۶۷	۱۳۵۲۲۲۹	۴۹۸۱	۱۴۶۰	۱۴۹۶۴۰۰
		۱۷۲۵۸	۱۷۷۵	۱۹۹۶۴۴۲	۱۳۲۱۵	۱۸۴۲	۱۹۰۸۲۲۰
۲	۰/۲	۱۷۱۹۲	۱۷۹۸	۱۹۱۶۵۷۹	۱۳۵۲۸	۱۸۷۱	۱۷۲۱۴۲۱
		۱۷۰۵۸	۱۷۵۹	۱۹۳۹۵۳۴	۱۳۳۴۲	۱۶۲۱	۱۷۷۷۴۶۵
		۱۷۴۱۱	۱۶۴۶	۱۸۸۴۶۷۶	۱۳۳۴۴	۱۸۰۴	۱۷۱۵۹۶۲
		۱۷۳۹۳	۱۶۵۳	۱۹۰۳۶۲۸	۱۳۹۴۷	۱۸۹۸	۱۹۸۰۵۶۲
		۱۷۳۲۳	۱۷۱۴	۱۸۳۱۹۵۰	۱۳۴۲۱	۱۶۹۳	۱۹۹۵۱۲۶
	۱	۱۷۸۸۵	۱۶۲۵	۱۷۳۳۳۵۸	۱۳۵۳۶	۱۶۱۳	۱۷۳۳۰۴۲
		۱۷۷۹۳	۱۶۰۴	۱۷۳۳۷۹۲	۱۳۷۳۱	۱۸۷۳	۱۹۸۲۳۶۹
		۱۷۹۳۵	۱۶۲۴	۱۸۰۷۶۵۵	۱۳۷۲۳	۱۷۴۷	۱۸۳۱۳۳۵
		۱۷۳۹۹	۲۴۲۶	۲۵۰۷۵۴۹	۱۳۵۹۱	۲۴۴۹	۲۴۴۹۸۲۷
		۱۷۳۹۴	۲۴۴۰	۲۵۲۰۱۸۲	۱۲۶۴۲	۲۱۲۹	۲۵۶۶۸۰۵
۳	۰/۲	۱۷۳۵۶	۲۴۴۱	۲۵۳۹۱۶۴	۱۲۷۷۷	۲۳۱۴	۲۵۷۵۹۴۴
		۱۷۵۰۵	۲۴۱۹	۲۵۰۵۴۴۱	۱۲۰۹۲	۲۵۹۶	۲۵۲۶۱۰۸
		۱۷۴۹۵	۲۴۲۲	۲۴۵۹۲۷۲	۱۳۱۰۳	۲۲۰۰	۲۴۹۷۵۵۱
		۱۷۶۸۲	۲۳۶۳	۲۴۸۹۰۶۵	۱۳۶۶۶	۲۲۳۱	۲۴۵۱۷۱۴
		۱۷۹۱۳	۲۱۹۱	۲۴۲۰۸۵۲	۱۲۴۸۳	۲۲۴۲	۲۵۰۵۶۲۰
	۱	۱۷۸۹۳	۲۰۵۵	۲۴۲۱۰۸۷	۱۳۹۸۲	۲۳۷۱	۲۴۷۵۴۶۰
		۱۷۷۴۱	۲۰۷۵	۲۳۹۳۱۴۲	۱۲۰۰۹	۲۴۵۸	۲۴۲۵۹۶۳
		۱۸۳۳۶	۲۵۸۹	۲۶۹۹۳۹۳	۱۳۸۳۶	۲۴۳۵	۲۹۳۲۰۲۷
		۱۸۳۲۳	۲۵۹۴	۲۷۰۳۳۶۸	۱۳۶۶۵	۲۴۴۱	۲۸۰۴۱۷۸
		۱۸۲۹۴	۲۵۴۳	۲۷۵۶۵۹۷	۱۳۵۷۴	۲۶۲۴	۲۹۴۶۵۸۷
۴	۰/۲	۱۸۳۵۹	۲۴۵۲	۲۶۴۹۷۷۹	۱۳۹۷۲	۲۴۷۵	۲۹۸۹۲۳۸
		۱۸۶۴۳	۲۴۶۵	۲۶۱۴۶۵۴	۱۴۰۱۱	۲۵۲۲	۲۸۲۸۱۷۶
		۱۸۴۱۵	۲۴۷۹	۲۶۲۳۶۲۶	۱۳۵۱۹	۲۶۸۴	۲۸۹۰۵۰۸
		۱۸۸۵۲	۲۴۰۲	۲۵۳۱۹۹۶	۱۳۶۳۲	۲۴۱۶	۲۸۸۹۵۵۸
		۱۸۸۲۸	۲۴۵۰	۲۵۸۶۲۶۸	۱۳۱۴۷	۲۶۰۳	۲۸۹۴۹۳۱
	۱	۱۸۶۸۳	۲۳۹۲	۲۵۲۵۸۲۸	۱۳۵۳۱	۲۴۰۷	۲۷۷۹۱۶۸
		۱۴۰۷۵	۳۰۰۱	۳۵۲۵۴۲۹	۱۶۲۳۶	۳۱۴۰	۳۳۴۳۴۸۹
		۱۵۹۳۴	۳۰۰۵	۳۵۸۱۳۹۳	۱۴۴۶۷	۳۴۶۰	۳۹۱۹۰۲۰
		۱۴۸۰۳	۳۰۰۸	۳۷۳۴۱۲۲	۱۸۸۶۹	۳۰۲۳	۳۹۲۵۹۷۳
		۱۶۶۸۳	۲۸۹۵	۳۲۲۷۵۳۸	۱۵۶۸۱	۳۰۰۲	۳۹۰۴۸۹۸
۵	۰/۲	۱۶۳۵۰	۲۹۲۱	۳۴۶۹۸۰۸	۱۴۴۶۳	۲۷۸۲	۳۴۰۱۰۹۹
		۱۷۱۴۴	۲۹۸۴	۳۵۱۹۰۷۷	۱۶۹۷۰	۲۷۵۳	۳۶۸۴۲۳۲
		۱۸۱۰۷	۲۷۳۵	۲۹۵۴۶۶۳	۱۵۹۶۲	۲۸۶۰	۳۵۱۸۳۳۴
		۱۹۵۱۱	۲۷۵۵	۳۰۶۲۱۷۸	۱۴۶۴۳	۳۰۹۶	۳۲۲۷۵۳۲
		۱۸۶۹۸	۲۷۸۲	۲۸۵۱۶۴۱	۱۸۲۵۰	۳۱۰۴	۳۱۰۶۴۴۱



شکل (۶): روند تغییرات مسئولیت پذیری اجتماعی نسبت به افزایش سطح عدم قطعیت

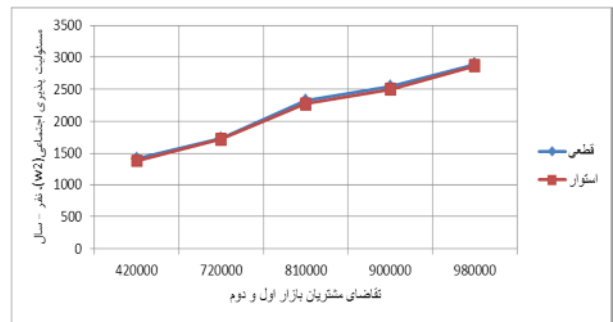


شکل (۷): روند تغییرات انتشار کربن نسبت به افزایش سطح عدم قطعیت

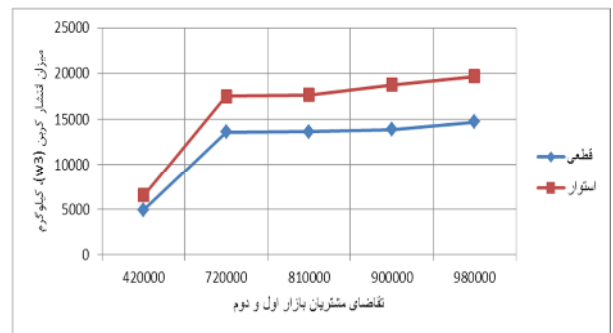
### ۵- نتیجه و جمع بندی

در این مقاله یک مدل بهینه‌سازی استوار چندهدفه برای مسأله طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه شده است. با توجه به مفهوم چند بعدی از پایداری، اهداف حداکثر سازی سود با توجه به درآمد و هزینه‌های کل زنجیره، حداقل رساندن اثرات زیست محیطی با توجه به شاخص انتشار کربن و حداکثرسازی اثرات اجتماعی با توجه به دو معیار تعداد فرصت‌های شغلی ایجاد شده و تعداد روزهای از دست رفته، در نظر گرفته شده‌اند. برای مقابله با موضوع عدم قطعیت پارامترها در مسأله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، از رویکرد بهینه‌سازی استوار بر اساس یکی از نظریه‌های اخیر ارائه شده توسط بن‌تال و میروفسکی پیشنهاد شده است. برخی از پارامترهای مدل مانند، تقاضای مشتریان بازار اول و دوم، هزینه‌های حمل و نقل بین تسهیلات و همچنین هزینه‌های عملیاتی مربوط به هر یک از تسهیلات، در یک بازه بسته دارای نوسان هستند. سپس، با توجه به پارامترهای غیرقطعی، همتای استوار مدل قطعی برای پیدا کردن جواب‌های استوار نوشته شده است.

در نهایت با طراحی پنج سناریو مختلف عملکرد مدل در دو حالت قطعی و استوار با توجه به معیارهای میانگین و انحراف استاندارد توابع هدف مورد بررسی قرار گرفته است. مدل مورد نظر مشخص می‌کند که کدام یک از مراکز بالقوه تولید، توزیع، جمع-آوری، تعمیر، توزیع مجدد و بازیافت احداث شوند و همچنین میزان محصولات حمل شده میان هر دو تسهیلات چه مقدار خواهد بود.

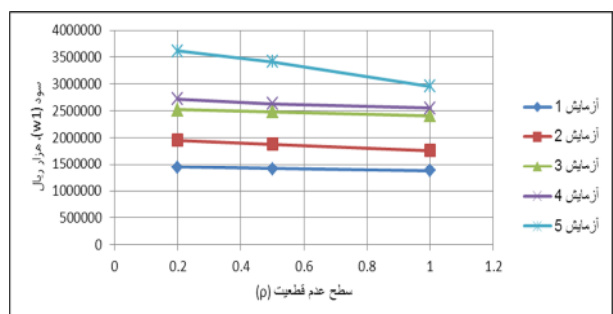


شکل (۳): روند تغییرات مسئولیت اجتماعی نسبت به افزایش تقاضا



شکل (۴): روند تغییرات انتشار کربن نسبت به افزایش تقاضا

در بخش دوم تحلیل حساسیت همانطور که در ابتدا بیان شد روند تغییرات هر یک از توابع هدف با توجه به افزایش سطح عدم قطعیت بررسی شده است. در شکل ۵ با افزایش سطح عدم قطعیت از ۰/۲ به ۱ میزان تابع هدف سود در هر یک آزمایش‌ها روند نزولی خفیفی دارد. این امر در شکل ۶ نیز قابل مشاهده است زیرا که با افزایش سطح عدم قطعیت تابع هدف مسئولیت‌پذیری اجتماعی نیز روند نزولی دارا می‌باشد. در مورد تابع هدف انتشار کربن با افزایش عدم قطعیت روند صعودی در شکل ۷ قابل مشاهده است. البته بطور کلی در هر سه شکل ۵، ۶ و ۷ با افزایش ابعاد مسأله در هر آزمایش مقادیر توابع هدف افزایش یافته است.



شکل (۵): روند تغییرات سود نسبت به افزایش سطح عدم قطعیت

- Der Laan E, Van Nunen JA, Van Wassenhove LN. (1997). Quantitative models for reverse logistics: a review. *European Journal of Operational Research*; 103:1-17.
- [9] Jayaraman V, Guide Jr V, Srivastava R. (1999). A closed-loop logistics model for remanufacturing. *Journal of the operational research society*. 497-508.
- [10] Jayaraman V, Patterson RA, Rolland E. (2003). The design of reverse distribution networks: models and solution procedures. *European Journal of Operational Research*; 150:1 28-4.
- [11] Üster H, Easwaran G, Akçali E, Çetinkaya S. (2007). Benders decomposition with alternative multiple cuts for a multi-product closed-loop supply chain network design model. *Naval Research Logistics (NRL)*; 54:890-907.
- [12] Wang F, Lai X, Shi N. (2011). A multi-objective optimization for green supply chain network design. *Decision Support Systems*; 51:26 2-9.
- [13] Pishvae MS, Kianfar K, Karimi B. (2010). Reverse logistics network design using simulated annealing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*; 47:2 69-81.
- [14] El-Sayed M, Afia N, El-Kharbotly A. (2010). A stochastic model for forward-reverse logistics network design under risk. *Computers & Industrial Engineering*; 58:423-31.
- [15] Pishvae MS, Farahani RZ, Dullaert W. (2010). A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design. *Computers & Operations Research*; 37:1-12.
- [16] Salema, A. P. Barbosa-Povoa, and A. Q. Novais, (2010). Simultaneous design and planning of supply chains with reverse flows: A generic modelling framework, *European Journal of Operational Research*; 203: 336-349.
- [17] Pishvae M, Torabi S, Razmi J. (2012). Credibility-based fuzzy mathematical programming model for green logistics design under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*; 62:6 24-32.
- [18] Qin Z. and Ji X. (2010). Logistics network design for product recovery in fuzzy environment, *European Journal of Operational Research*; 202: 479-490.
- [19] Ramezani M, Bashiri M, Tavakkoli-Moghaddam R. (2013). A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level. *Applied Mathematical Modelling*; 37:3 28-44.
- [20] Özkır V, Başlıgil H. (2012). Multi-objective optimization of closed-loop supply chains in uncertain environment. *Journal of Cleaner Production*.
- [21] Paksoy T, Özceylan E, Weber GW. (2010). A multi objective model for optimization of a green supply chain network. *AIP Conference Proceedings*; 311.
- [22] Kannan D, Diabat A, Alrefaei M, Govindan K, Yong G. (2012). A carbon footprint based reverse logistics network design model. *Resources, conservation and recycling*; 67:7, 5-9.
- [23] Pishvae MS, Razmi J. (2012). Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming. *Applied Mathematical Modelling*; 36:34 33-46.
- [24] Amin SH, Zhang G. (2013) A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied Mathematical Modelling*; 37:6 4165-4176.
- [25] Millet D. (2011). Designing a sustainable reverse
- نتایج حاصله پس از حل مدل حاکی از آن است که کیفیت مدلی قطعی بر اساس معیار میانگین توابع هدف در اکثر موارد بالاتر از مدل استوار است. بر اساس معیار انحراف استاندارد نتایج عکس این موضوع را نشان می‌دهند و کیفیت مدل استوار بسیار بیشتر از حالت قطعی می‌باشد. برخی از پیشنهادات آتی به منظور ادامه این مقاله به شرح زیر ارائه می‌شود:
- از آنجایی که حل مسأله طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته چندهدفه تحت شرایط عدم قطعیت از نوع مسائل NP-Hard است که در آن زمان حل مسأله به صورت نمایی و با توجه به ابعاد مسأله افزایش می‌یابد، بهتر است از یک الگوریتم ابتکاری و یا فرا ابتکاری به منظور کاهش زمان حل مسأله استفاده نمود و نتایج حاصل را با روش حل دقیق استفاده شده در این تحقیق مقایسه کرد.
  - مدل‌سازی مسأله بر اساس دیگر رویکردهای بهینه‌سازی استوار و مقایسه آن با رویکرد بازه‌ای جعبه‌ای بن‌تال و نیمروفسکی استفاده شده در این تحقیق و همچنین مدل‌سازی مسأله بر اساس روش‌های برنامه‌ریزی احتمالی که در آنها تابع توزیع پارامترها مشخص است و مقایسه با رویکرد بهینه‌سازی استوار.
  - در نظر گرفتن متغیرهای کمبود و همچنین مراکز مستقل انبار محصولات به منظور انطباق بیشتر مسأله با شرایط واقعی.
  - در نظر گرفتن معیارهای دیگر زیست محیطی و همچنین شاخص‌های ارزیابی اجتماعی در تشکیل توابع هدف
- ### مراجع
- [1] Pishvae MS, Rabbani M, Torabi SA. (2011). A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*; 35:637-49.
- [2] Melo MT, Nickel S, Saldanha-Da-Gama F. (2009). Facility location and supply chain management—A review. *European Journal of Operational Research*; 196:40 1-12.
- [3] Kara SS, Onut S. (2010). A two-stage stochastic and robust programming approach to strategic planning of a reverse supply network: The case of paper recycling. *Expert Systems with Applications*; 37:61 29-37.
- [4] Pishvae M, Razmi J, Torabi S. (2012). Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach. *Fuzzy Sets and Systems*; 206:1-20.
- [5] Pishvae, F. Jolai, and J. Razmi, (2012). A stochastic optimization model for integrated forward/reverse logistics network design, *Journal of Manufacturing Systems*; 28:107-114
- [6] Ben-Tal A, El Ghaoui L, Nemirovski A. (2009) *Robust optimization*: Princeton University Press.
- [7] Klibi W, Martel A, Guitouni A. (2010). The design of robust value-creating supply chain networks: a critical review. *European Journal of Operational Research*; 283:93-203.
- [8] Fleischmann M, Bloemhof-Ruwaard JM, Dekker R, Van

- review. *European Journal of Operational Research*; 196:40 1-12.
- [33] Kara SS, Onut S. (2010). A two-stage stochastic and robust programming approach to strategic planning of a reverse supply network: The case of paper recycling. *Expert Systems with Applications*; 37:61 29-37.
- [34] Pishvae M, Razmi J, Torabi S. (2012). Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach. *Fuzzy Sets and Systems*; 206:1-20.
- [35] Pishvae, F. Jolai, and J. Razmi, (2012). A stochastic optimization model for integrated forward/reverse logistics network design, *Journal of Manufacturing Systems*; 28:107-114
- [36] Ben-Tal A, El Ghaoui L, Nemirovski A. (2009) *Robust optimization*: Princeton University Press.
- [37] Klibi W, Martel A, Guitouni A. (2010). The design of robust value-creating supply chain networks: a critical review. *European Journal of Operational Research*; 283:93-203.
- [38] Fleischmann M, Bloemhof-Ruwaard JM, Dekker R, Van Der Laan E, Van Nunen JA, Van Wassenhove LN. (1997). Quantitative models for reverse logistics: a review. *European Journal of Operational Research*; 103:1-17.
- [39] Jayaraman V, Guide Jr V, Srivastava R. (1999). A closed-loop logistics model for remanufacturing. *Journal of the operational research society*. 497-508.
- logistics channel: the 18 generic structures framework. *Journal of Cleaner Production*; 19:588-97.
- [26] Dehghanian F, Mansour S. (2009,) Designing sustainable recovery network of end-of-life products using genetic algorithm. *Resources, conservation and recycling*. 53:559-70.
- [۲۷] بشیری م؛ شرافتی م؛ طراحی دو هدفه شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن معیارهای همبسته در محیط فازی، دوره ۱، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۲، صفحه ۲۵-۳۶، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع و سیستم‌های تولید.
- [۲۸] نادر غفاری نسب؛ مهدی غضنفری؛ ابراهیم تیموری، طراحی شبکه لجستیک هاب استوار با در نظر گرفتن تقاضاهای تصادفی برای شرکت‌های ارائه‌دهنده خدمات لجستیکی، دوره ۱، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۲، صفحه ۹۷-۱۰۷، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع و سیستم‌های تولید.
- [29] Feyzollahi, MJ, Modarres M. (2012) Robust Quadratic Assignment Problem with Uncertain Locations, *Iranian Journal of Operations Research*; 3:2 46-65
- [30] Vahdani B, Tavakkoli-Moghaddam R, Modarres M, Baboli A. (2012). Reliable design of a forward/reverse logistics network under uncertainty: A robust-M/M/c queuing model. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*; 48:11 52-68.
- [31] Pishvae MS, Rabbani M, Torabi SA. (2011). A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*; 35:637-49.
- [32] Melo MT, Nickel S, Saldanha-Da-Gama F. (2009). Facility location and supply chain management-A

جدول (۳): نتایج حل مسأله تحت داده‌های اسمی

شماره آزمایش	سطح عدم قطعیت	مقادیر توابع هدف تحت داده‌های اسمی					
		استوار			قطعی		
		W3	W2	W1	W3	W2	W1
۱	۰/۲	۶۴۰۷	۱۳۹۰	۱۴۸۰۵۸۷	۴۹۳۰	۱۴۱۴	۱۴۸۸۸۳۸
	۰/۵	۶۵۲۳	۱۳۸۲	۱۴۳۰۷۰۴			
	۱	۶۷۴۱	۱۳۷۰	۱۳۸۵۳۴۰			
۲	۰/۲	۱۷۲۹۸	۱۷۳۰	۱۷۵۶۷۵۰	۱۳۵۸۳	۱۷۳۶	۱۸۶۶۲۱۶
	۰/۵	۱۷۴۶۷	۱۷۲۵	۱۷۵۴۱۶۳			
	۱	۱۷۷۹۸	۱۷۰۳	۱۷۵۰۰۷۳			
۳	۰/۲	۱۷۴۸۸	۲۲۹۲	۲۳۷۱۲۶۰	۱۳۶۳۰	۲۳۲۰	۲۵۰۱۲۰۰
	۰/۵	۱۷۶۳۱	۲۲۸۰	۲۳۶۰۹۲۴			
	۱	۱۷۸۳۹	۲۲۵۰	۲۳۵۳۳۸۳			
۴	۰/۲	۱۸۶۵۹	۲۵۱۰	۲۶۵۹۵۹۶	۱۳۸۵۷	۲۵۴۳	۲۸۰۳۶۶۱
	۰/۵	۱۸۷۴۴	۲۵۰۱	۲۶۳۰۳۹۳			
	۱	۱۸۸۶۰	۲۴۸۲	۲۵۹۰۶۹۳			
۵	۰/۲	۱۹۵۰۶	۲۸۸۰	۲۸۶۴۶۶۷	۱۴۶۹۴	۲۸۸۹	۳۰۱۵۷۲۷
	۰/۵	۱۹۶۰۹	۲۸۷۱	۲۸۵۴۵۱۸			
	۱	۱۹۸۹۰	۲۸۵۶	۲۷۷۲۱۶۸			



جدول (۵): میانگین و انحراف استاندارد توابع هدف تحت آزمایش‌ها

میانگین توابع هدف تحت آزمایش‌ها												سطح عدم قطعیت	شماره آزمایش
انحراف معیار توابع هدف تحت آزمایش‌ها						میانگین توابع هدف تحت آزمایش‌ها							
قطعی			استوار			قطعی			استوار				
W3	W2	W1	W3	W2	W1	W3	W2	W1	W3	W2	W1		
۶۶	۶	۱۲۸۲۷	۱۰۵	۱۴	۲۳۲۸۰	۶۳۹۱	۱۳۹۵	۱۴۴۳۴۹۱	۴۹۷۹	۱۴۲۵	۱۴۷۱۳۸۹	۰/۲	
۲۵	۳	۲۰۱۰۸	۱۴۲	۴۲	۵۳۸۰۷	۶۵۵۹	۱۳۷۶	۱۴۱۰۹۰۰	۴۹۷۱	۱۴۲۹	۱۴۳۸۲۳۹	۰/۵	۱
۱۹	۲	۱۸۵۵۴	۶۳	۲۴	۳۳۸۸۵	۶۶۱۵	۱۳۶۵	۱۳۷۲۸۰۳	۴۹۰۸	۱۴۳۷	۱۴۶۸۳۰۸	۱	
۱۰۲	۲۰	۴۱۱۱۷	۱۵۷	۱۳۷	۹۵۸۸۵	۱۷۱۶۹	۱۷۷۷	۱۹۵۰۸۵۲	۱۳۳۶۲	۱۷۷۸	۱۸۰۲۳۸۵	۰/۲	
۴۶	۳۷	۳۷۱۴۱	۳۲۸	۱۰۳	۱۵۷۱۴۰	۱۷۳۷۶	۱۶۷۱	۱۸۷۳۴۱۸	۱۳۵۷۱	۱۷۹۸	۱۸۹۷۲۱۷	۰/۵	۲
۷۲	۱۲	۴۳۰۶۵	۱۱۰	۱۳۰	۱۲۵۵۹۰	۱۷۸۷۱	۱۶۱۸	۱۷۵۷۹۳۵	۱۳۶۶۳	۱۷۴۴	۱۸۴۸۹۱۵	۱	
۲۴	۸	۱۵۹۱۳	۵۱۳	۱۶۱	۷۰۳۲۴	۱۷۳۸۳	۲۴۳۶	۲۵۲۲۲۹۸	۱۳۰۰۳	۲۲۹۷	۲۵۳۰۸۵۹	۰/۲	
۱۰۵	۳۳	۲۳۴۰۷	۷۹۸	۲۲۰	۳۷۵۳۰	۱۷۵۶۱	۲۴۰۱	۲۴۸۴۵۹۳	۱۲۹۵۴	۲۳۴۲	۲۴۹۱۷۹۱	۰/۵	۳
۹۴	۷۳	۱۶۰۶۷	۱۰۳۰	۱۰۹	۴۰۲۱۸	۱۷۸۴۹	۲۱۰۷	۲۴۱۱۶۹۴	۱۲۸۲۵	۲۳۵۷	۲۴۶۹۰۱۴	۱	
۲۲	۲۸	۳۱۹۴۱	۱۳۳	۱۰۷	۷۸۳۵۶	۱۸۳۱۸	۲۵۷۵	۲۷۱۹۷۸۶	۱۳۶۹۲	۲۵۰۰	۲۸۹۴۲۶۴	۰/۲	
۱۵۰	۱۴	۱۸۲۴۹	۲۷۳	۱۱۰	۸۱۲۱۴	۱۸۴۷۲	۲۴۶۵	۲۶۲۹۳۵۳	۱۳۸۳۴	۲۵۶۰	۲۹۰۲۶۴۱	۰/۵	۴
۹۱	۳۱	۳۳۲۵۸	۲۵۶	۱۱۱	۶۵۳۵۲	۱۸۷۸۸	۲۴۱۵	۲۵۴۸۰۳۱	۱۳۴۳۷	۲۴۷۵	۲۸۵۴۵۴۶	۱	
۹۳۷	۴	۱۰۸۰۲۱	۲۲۶۲	۲۲۶	۳۳۴۳۰۸	۱۴۹۳۷	۳۰۰۵	۳۶۱۳۶۴۸	۱۶۴۹۱	۳۲۰۸	۳۷۲۹۴۹۴	۰/۲	
۳۹۹	۴۶	۱۶۲۲۷۴	۱۳۵۴	۱۳۶	۲۵۲۵۴۴	۱۶۷۲۶	۲۹۳۳	۳۴۱۴۴۷۴	۱۵۶۳۸	۲۸۴۶	۳۶۶۳۴۱۰	۰/۵	۵
۷۰۵	۲۴	۱۰۵۲۷۶	۱۸۲۵	۱۳۹	۲۱۱۶۹۳	۱۸۷۷۲	۲۷۵۷	۲۹۵۶۱۶۱	۱۶۲۸۵	۳۰۲۰	۳۲۸۴۱۰۲	۱	

reverse flows: A generic modelling framework, European Journal of Operational Research; 203: 336-349.

- [47] Pishvae M, Torabi S, Razmi J. (2012). Credibility-based fuzzy mathematical programming model for green logistics design under uncertainty. Computers & Industrial Engineering; 62:6 24-32.
- [48] Qin Z. and Ji X. (2010). Logistics network design for product recovery in fuzzy environment, European Journal of Operational Research; 202: 479-490.
- [49] Ramezani M, Bashiri M, Tavakkoli-Moghaddam R. (2013). A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level. Applied Mathematical Modelling; 37:3 28-44.
- [50] Özkır V, Başlıgil H. (2012). Multi-objective optimization of closed-loop supply chains in uncertain environment. Journal of Cleaner Production.
- [51] Paksoy T, Özceylan E, Weber GW. (2010). A multi objective model for optimization of a green supply chain network. AIP Conference Proceedings; 311.
- [52] Kannan D, Diabat A, Alrefaei M, Govindan K, Yong G. (2012). A carbon footprint based reverse logistics network design model. Resources, conservation and recycling; 67:7, 5-9.
- [53] Pishvae MS, Razmi J. (2012). Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming. Applied Mathematical

## مراجع

- [40] Jayaraman V, Patterson RA, Rolland E. (2003). The design of reverse distribution networks: models and solution procedures. European Journal of Operational Research; 150:1 28-4.
- [41] Üster H, Easwaran G, Akçali E, Çetinkaya S. (2007). Benders decomposition with alternative multiple cuts for a multi-product closed-loop supply chain network design model. Naval Research Logistics (NRL); 54:890-907.
- [42] Wang F, Lai X, Shi N. (2011). A multi-objective optimization for green supply chain network design. Decision Support Systems; 51:26 2-9.
- [43] Pishvae MS, Kianfar K, Karimi B. (2010). Reverse logistics network design using simulated annealing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology; 47:2 69-81.
- [44] El-Sayed M, Afia N, El-Kharbotly A. (2010). A stochastic model for forward-reverse logistics network design under risk. Computers & Industrial Engineering; 58:423-31.
- [45] Pishvae MS, Farahani RZ, Dullaert W. (2010). A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design. Computers & Operations Research; 37:1-12.
- [46] Salema, A. P. Barbosa-Povoa, and A. Q. Novais, (2010). Simultaneous design and planning of supply chains with

Modelling; 36:34 33-46.

- [54] Amin SH, Zhang G. (2013) A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied Mathematical Modelling*; 37:6 4165-4176.
- [55] Millet D. (2011). Designing a sustainable reverse logistics channel: the 18 generic structures framework. *Journal of Cleaner Production*; 19:588-97.
- [56] Dehghanian F, Mansour S. (2009,) Designing sustainable recovery network of end-of-life products using genetic algorithm. *Resources, conservation and recycling*.53:559-70.

[۵۷] بشیری م؛ شرافتی م؛ طراحی دو هدفه شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن معیارهای همبسته در محیط فازی، دوره ۱، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۲، صفحه ۲۵-۳۶، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع و سیستم‌های تولید.

[۵۸] نادر غفاری نسب؛ مهدی غضنفری؛ ابراهیم تیموری، طراحی شبکه لجستیک هاب استوار با در نظر گرفتن تقاضاهای تصادفی برای شرکت‌های ارائه‌دهنده خدمات لجستیکی، دوره ۱، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۲، صفحه ۹۷-۱۰۷، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع و سیستم‌های تولید.

- [59] Feyzollahi, MJ. Modarres M. (2012) Robust Quadratic Assignment Problem with Uncertain Locations, *Iranian Journal of Operations Research*; 3:2 46-65
- [60] Vahdani B, Tavakkoli-Moghaddam R, Modarres M, Baboli A. (2012). Reliable design of a forward/reverse logistics network under uncertainty: A robust-M/M/c queuing model. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*; 48:11 52-68.



## A Robust Multi Objective Optimization Model for Sustainable Closed-Loop Supply Chain Network Design

H. Zareian Jahromi<sup>1</sup>, M.S. Fallahnezhad<sup>2,\*</sup>, A. Sadeghieh<sup>2</sup>, A. Ahmadi Yazdi<sup>2</sup>

1. Department of Industrial Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran

2. Department of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

### ARTICLE INFO

#### *Article history:*

Received 22 October 2013

Accepted 26 August 2014

#### *Keywords:*

Supply Chain Network Design  
(SCND)

Reverse Logistics

Uncertainty

Robust Optimization (RO)

### ABSTRACT

Reverse logistic has attracted a lot of attention from researchers in recent years due to government regulations, environmental problems, extension of social responsibility and customer demands. In addition, the decline in the natural resources and raw materials combined with the increase in production costs and problems of dealing with trash of the industry and consumer products makes the cycle of consumption very interesting to researchers from the production point to the last stage of recycling. This subject gave way to newer concepts like integrated, closed-loop and stable supply chain in the past decade. This paper presents a robust design for a multi-product, multi-echelon, closed-loop logistic network model in an uncertain environment. To this aim, a multi-objective mathematical programming model is developed wherein its objective functions include profit, social and environmental impacts. First, a deterministic mixed-integer linear programming model is developed for designing a closed-loop supply chain network. Then, the robust counterpart of the proposed mixed-integer linear programming model is presented by using the recent extensions in robust optimization theory. Finally, to assess the robustness of the solutions obtained by the novel robust optimization model, they are compared to those generated by the deterministic mixed-integer linear programming model in a number of realizations under different test problems.

\* Corresponding author. Mohammad Saber Fallahnezhad  
Tel.: 0351-5258225; E-mail addresses: fallahnezhad@yazd.ac.ir