

# طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن عدم قطعیت در وضعیت کیفیت محصولات بازگشتی و حل آن با الگوریتم کاهش سناریو Lp-Shape

محمد رضا فتحی

(نویسنده مسئول) استادیار گروه مدیریت صنعتی و مالی، دانشکده مدیریت و حسابداری، پردیس فارابی دانشگاه تهران، قم، ایران \*

علی بنائی

کارشناس ارشد مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، پردیس فارابی دانشگاه تهران، قم، ایران، banaei.ali<sup>1</sup>@ut.ac.ir

مهدی نصرالهی

استادیار گروه مدیریت صنعتی، دانشکده علوم اجتماعی دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران، m.nasrollahi@soc.ikiu.ac.ir

## چکیده

طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته یکی از اساسی ترین تصمیمات استراتژیکی می باشد که طراحی مناسب آن باعث ایجاد یک ساختار مطلوب می گردد. یکی از اساسی ترین مشکلات طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته عدم قطعیت در وضعیت کیفیت محصولات بازگشتی است که از دلایل پیدایش این مشکل می توان به فقدان اطلاعات قطعی و دقیق و همچنین پویایی و پیچیدگی اجزای زنجیره اشاره کرد. این پژوهش در فضای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته برای محصولات بادوام می باشد که این محصولات در کوتاه مدت خراب شدنی نبوده و امکان استفاده مجدد از قطعات در تولید محصولات جدید، بازیافت یا فروش در بازار ثانویه را دارا می باشد. هدف اصلی از انجام این پژوهش به کارگیری مدل برنامه ریزی تصادفی و حداکثرسازی سود مورد انتظار برای تمام سناریوهای وضعیت کیفیت شناخته شده است که در آن تابع هدف، ترکیبی از درآمد حاصل از فروش محصولات و مواد بازیافت شده و اجزای بازیابی شده به علاوه هزینه های ثابت مراکز، فرآیندها، تدارکات و حمل و نقل می باشد. با توجه به پیچیده بودن مدل، مسئله از الگوریتم Lp-shape و CPLEX استفاده شده است و جهت حل از نرم افزار GAMS استفاده شده است. براساس نتایج حاصل از پژوهش پاسخ موجهای که توسط CPLEX برای مسئله های آزمون C<sup>3</sup> تا C<sup>6</sup> معرفی می شود، به طور قابل توجهی دور از پاسخ های بهینه ای است که از روش L-Shape حاصل می شود.

**واژگان کلیدی:** زنجیره تأمین، طراحی شبکه زنجیره تأمین، عدم قطعیت، کیفیت.

تأمین برای محصولات بادوام که با طراحی ساختاری ماژولار و طول عمر بالایشان (مانند کامپیوترها و لوازم خانگی بزرگ) توصیف می شوند، مسئله ای پیچیده است. این دسته از محصولات را می توان به اجزای تشکیل دهنده ای آن (یعنی قطعات و همچنین مواد خام که در فهرست مواد اولیه<sup>1</sup> جا دارند)، تجزیه کرد. در نتیجه زنجیره تأمین چنین محصولاتی شامل انواع امکانات بازیافت اجزای مختلف، در فهرست مواد اولیه معکوس محصولات بادوام می باشد. گفته می شود که در موضوعات مرتبط با طراحی شبکه زنجیره های تأمین حلقه بسته

## ۱. مقدمه

بسیاری از صاحب نظران در دنیای رقابتی امروز معتقدند که رقابت از سطح شرکت ها به رقابت میان زنجیره تأمین آنها کشیده شده است و برخورداری از یک زنجیره تأمین کارا و چالاک، یک مزیت رقابتی بسیار و تعیین کننده در عرصه رقابت محسوب می شود. در این راستا بسیاری از صاحب نظران بر این باورند که با کشیده شدن رقابت از سطح شرکت ها به سطح زنجیره تأمین آنها، کیفیت و مدیریت کیفیت محصول نیز باید از سطح شرکت ها به سطح زنجیره تأمین آنها گسترش داده شود زیرا همانطور که یک کالا از یک عضو زنجیره تأمین به عضو دیگر آن در جریان است، کیفیت آن نیز می تواند توسط سایر شرکت هایی که در تملک ما نیستند، تحت تاثیر قرار گرفته و تضعیف و یا تقویت شود. طراحی یک شبکه زنجیره

<sup>1</sup> Bill of Material

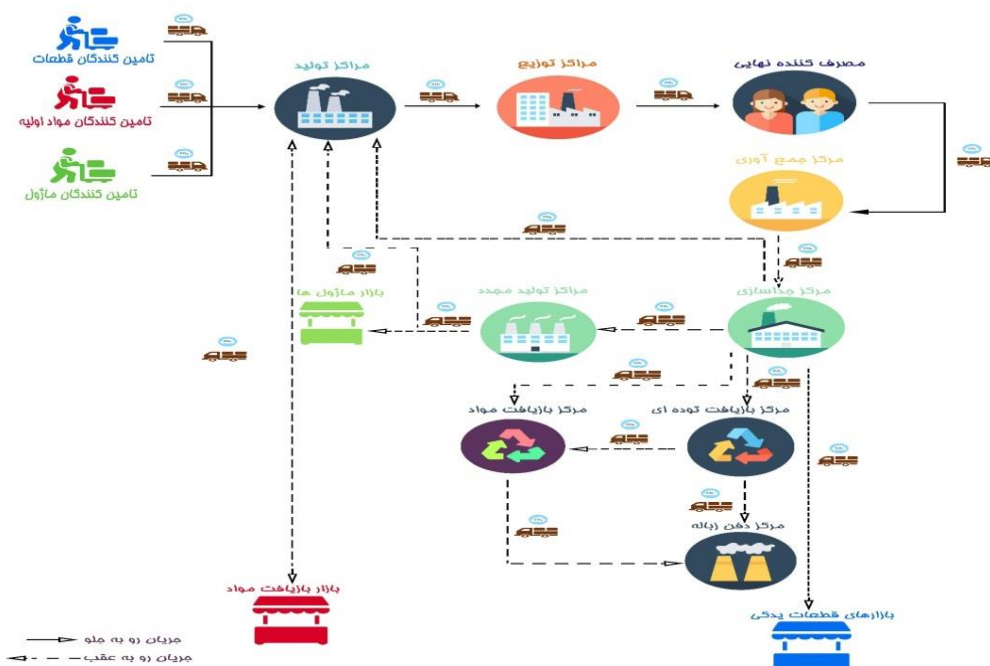
\* (Corresponding author) reza.fathi@ut.ac.ir

بازسازی و بازیافت به منظور پردازش بیشتر ارسال می‌شوند. همچنین، توده‌های دارای مواد یا اجزاء مخلوط در مراکز بازیابی توده‌ای جهت جداسازی مواد خام ارزشمند از تکه‌های قراضه مانند تکه‌های قطعات الکترونیکی مورد پردازش قرار می‌گیرند. پس از مرحله‌ی بازیافت توده‌ای، بازیافت مواد و عملیات دفع یا سوزاندن در مکان‌های دفع انجام می‌شود. مرحله‌ی بازیافت مواد به منظور بازیابی مواد خام صورت می‌گیرد. پسماندهای فاقد ارزش، یعنی ضایعات این فرآیند، می‌بایست به شکل بی‌خطری در مراکز دفع، امحا و یا دفع شوند. هدف نهایی بازسازی ماژول-ها، بهره‌برداری اجزاء و بازیافت مواد خام به دو شکل است: ۱. انتقال به مراکز ساخت برای توسعه محصول دارای برند جدید و ۲. فروش در بازارهای بالقوه‌ی ثانویه. با توصیفی که صورت گرفت ساختار مفهومی زنجیره تأمین حلقه بسته به صورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است.

و زنجیره‌های تأمین معکوس، اکثر پژوهش‌ها، در طراحی شبکه‌هایشان، به تعداد محدودی از فعالیت‌های بازیابی

توجه کمی دارند. به عنوان مثال تولید مجدد و بازیافت مواد. برای پاسخگویی به این مشکل، گزینه‌های بازیابی متعددی برای جریان بازگشتی در 'OEM در مدل پیشنهادی این پژوهش گنجانده شده است. این گزینه‌ها قابلیت در نظر گرفتن مونتاژهای اولیه در تولید محصولات بادوام معمول را فراهم می‌سازند. سطح بالای عدم قطعیت، به عنوان خاصیت سیستم‌های مختلف بازیابی محصول به شمار می‌رود. مزیت آشکار زنجیره‌های تأمین حلقه بسته بر زنجیره‌های سنتی تأمین رو به جلو را باید در شرایط عدم قطعیت در کیفیت محصولات از کار افتاده جست‌وجو کرد. البته این مسئله باعث افزایش پیچیدگی طراحی شبکه‌ی زنجیره تأمین حلقه بسته، در موارد مربوط به محصولات دسته دوم بادوام، می‌گردد. هدف از این پژوهش، طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن عدم قطعیت در وضعیت کیفیت محصولات بازگشتی می‌باشد. در مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، یک سازمان، کانالی مقرر و پایرجای رو به جلو را راه اندازی می‌کند که در آن، شبکه‌ی رو به جلو شامل، تأمین‌کنندگان مواد اولیه، مراکز ساخت، مراکز توزیع و مراکز مشتری نهایی می‌شود. گرایش سازمان عموماً به پذیرش رویه‌هایی است که طی آن بازیابی مناسب برای نیل به هدف بازیافت جهت‌مند که توسط تصمیم‌گیرندگان تعیین می‌شود و نیز احیاء ارزش اقتصادی از اجزای استفاده شده، صورت می‌گیرد. از این رو، هدف پژوهش مسئله بسط شبکه روبه جلوی موجود جهت آماده‌کردن امکانات بازیابی و در نتیجه آن تعدیل و هماهنگ‌کردن جریان‌های فیزیکی رو به جلو و بازگشتی در شبکه زنجیره تأمین بسط یافته می‌باشد. شبکه معکوس متشکل از مراکز جمع‌آوری، جداسازی، بازسازی، بازیافت توده‌ای، بازیافت مواد و مراکز دفع است که به این مجموعه، امکانات بازیابی گفته می‌شود. محصولات بادوام بازگشتی‌ای که از مشتری نهایی دریافت می‌شوند، از طریق مراکز جمع‌آوری به مراکز جداسازی انتقال داده می‌شوند. در توصیف مسئله، وضعیت کیفیت یک محصول بادوام بازگشتی، به شکل قابلیت ماژول‌ها و اجزا برای بازسازی و بهره‌برداری یا استفاده‌ی مجدد از آن همراه با پسماند برای بازیافت، تعریف می‌شود. در مراکز جداسازی، جریان معکوس بازرسی شده، به اجزاء مختلف طبق لیست معکوس مواد اولیه تجزیه می‌شود. سپس ماژول‌های قابل بازیابی و مواد قابل بازیافت به مراکز

<sup>۱</sup> Original Equipment Manufacturer



شکل ۲. شبکه زنجیره تأمین پیشنهادی مورد مطالعه برای شرکت ماشین لباسشویی حایر

### ۲. مبانی نظری تحقیق

مدیریت کیفیت جامع و مدیریت زنجیره تأمین نقش فزاینده ای را در سال‌های اخیر در تقویت قدرت رقابتی سازمان‌ها بازی کرده اند. در بازار رقابتی امروز تولید کالاهای باکیفیت به تنهایی کافی نیست و چالش‌های جدید بیشتر متمرکز بر تحویل کالا در زمان و مکان مناسب است و رقابت میان کسب و کارها در عرصه بین المللی نه تنها میان سازمان‌ها بلکه بیشتر میان زنجیره تأمین آن هاست [۱]. در این راستا کیفیت به عنوان یک متغیر استراتژیک توجه بسیاری از صاحب نظران را به خود جلب کرده است به طوری که اکثر صاحب نظران بر این باورند که با کشیده شدن رقابت از سطح شرکت‌ها به سطح زنجیره تأمین آن‌ها، کیفیت و مدیریت کیفیت نیز می‌بایستی از سطح شرکت‌ها به سطح زنجیره تأمین آن‌ها منتقل شود زیرا همان طور که یک کالا از یک عضو زنجیره تأمین به عضو دیگر آن در جریان است، کیفیت آن نیز می‌تواند توسط تک‌تک اعضای زنجیره تحت تأثیر قرار بگیرد و بنابراین می‌بایستی به برنامه‌های سنتی مدیریت کیفیت که درون سازمانی عمل می‌کنند، از منظر و دیدگاه زنجیره تأمین نگریسته شود چرا که مدیریت زنجیره تأمین با ایجاد ارتباط موثر میان شرکای زنجیره تأمین، فرصت و بستری را برای آن‌ها فراهم می‌آورد که قادر خواهند بود در زمینه بهبود کیفی محصولات و خدمات با یکدیگر همکاری و مشارکت موثرتری داشته باشند و با نهادینه نمودن کیفیت در سطح زنجیره تأمین، کیفیت و عملکرد زنجیره تأمین و همینطور کیفیت محصول نهایی را بالا

برده و با اغنای هر چه بیشتر مشتریان، کسب مزیت رقابتی نمود [۲]. کوئی و دیگران [۱] نیز معتقدند که با شیفت پیدا کردن مبنای رقابت از سطح شرکت به سطح زنجیره تأمین، مدیریت فعالیت‌های داخلی شرکت بدون در نظر گرفتن زنجیره تأمین شرکت امکان‌پذیر نیست و تمرکز پارادایم مبتنی بر کیفیت از حالت سنتی شرکت محور به حالت مبتنی بر زنجیره تأمین منتقل شده است. همچنین کوئی و دیگران [۱] بر این باورند که مدیریت موفق زنجیره تأمین به این بستگی دارد که کیفیت و تکنولوژی به چه خوبی در چارچوب زیرسیستم‌های فنی و اجتماعی زنجیره تأمین تعریف شوند. زیرا زیرسیستم‌های اجتماعی و فنی زنجیره تأمین به ترتیب در تعامل با متغیرهای مختلف موجود در حوزه مدیریت کیفیت و مدیریت تکنولوژی شکل می‌گیرند. بنابراین تنها زمانی سازمانها قادر خواهند بود به سمت تعالی در زنجیره تأمین حرکت کنند که قادر به شناسایی آن دسته از متغیرهای مدیریت کیفیت و مدیریت تکنولوژی که در تعامل با زنجیره تأمین هستند، باشند و آن متغیرها را در زنجیره تأمین خود مدیریت نمایند.

### ۳. پیشینه پژوهش

کوشکی و مشایخی [۳] در تحقیقی به ارزیابی شبکه زنجیره تأمین در حوزه داروسازی با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ای شبکه‌ای پرداختند. در این مقاله، برای نخستین بار، روش‌های شبکه‌ای برای دستیابی به بیشترین میزان بهره‌وری در زنجیره‌های تأمین، که به صورت یک سیستم چندمرحله‌ای در نظر

سازی هزینه طراحی شده است و جهت اطمینان یافتن از سطح بالای عملکرد شبکه زنجیره تامین در صورت وقوع اختلال از شاخص استواری با رویکرد مدل سازی مبتنی بر سناریو استفاده شده است. مدل های پایای مبتنی بر برنامه ریزی محدودیت اعتبار و ترکیب جدید استوار-محدودیت اعتبار ارائه گردید و با استفاده از داده های واقعی یک پروژه ملی صنعتی مورد ارزیابی قرار گرفتند نتایج نشان می دهد ترکیب جدید استوار پیشنهاد شده با متوسط هزینه مطلوب و حداقل انحراف استاندارد، استواری مدل و اثربخشی آن را ارتقا داده است. سوبولان و همکاران<sup>۲</sup> [۸] یک مدل چند سطحی، چند محصولی و چند هدفه برای صنایع زنجیره تامین حلقه بسته باتری توسعه دادند توابع هدف شامل حداکثر کردن مجموع باتری های برگشتی حجم کل انعطاف پذیری (براساس ماهیت مدل) و حداقل کردن هزینه کل می باشند علاوه بر این برای حل مدل چند هدفه از روش برنامه ریزی آرمانی فازی آرمانی استفاده نموده اند. شی و همکاران<sup>۳</sup> [۹] یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط چندهدفه به منظور طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته توسعه دادند. علاوه بر این، توابع هدف مسئله شامل حداقل کردن هزینه کل انتشار گاز CO<sub>2</sub> و حداکثر کردن میزان پاسخگویی شبکه است نوآوری اصلی آن ها در بهبود الگوریتم ژنتیک چندهدفه براساس چارچوب NSGA II جهت حل مسئله ی چند هدفه و ارائه جواب های پارو است. عزیز و جعفری [۱۰]، یک مدل یکپارچه مکان یابی تسهیلات چند-هدفه، چند سطحی و چند محصولی با در نظر گرفتن مسائل و اثرات زیست محیطی و انتخاب تامین کنندگان براساس ارزیابی عملکرد برای طراحی یک شبکه ی زنجیره تامین حلقه بسته ارائه دادند. مدل پیشنهادی آنها با در نظر گرفتن سه تابع هدف حداقل نمودن هزینه های تولید، استقرار و هزینه های جریان مواد، حداقل نمودن اثرات زیست محیطی محصول و حداکثر نمودن عملکرد تامین کنندگان مواد اولیه و نیز عدم قطعیت در برخی از پارامترها مانند تقاضا و برگشتی ارائه شد و سپس با استفاده از روش دقیق محدودیت افسیلون در حالت عدم قطعیت حل گردید. یاری و همکاران [۱۱] در پژوهش خود موضوع طراحی شبکه زنجیره تامین برای سنگ های زینتی را با در نظر گرفتن دو معیار مهم رقابت و اختلال، بررسی کردند. در این پژوهش، هدف آنان در مدل سازی، مقابله با ریسک های احتمالی اختلال و در نظر گرفتن شرایط رقابتی بازار بود. آن ها با

گرفته می شوند، معرفی شده است. مدل های پیشنهادی با نگاه به ساختار درونی زنجیره تامین ارتباط بین مراحل سازنده آن را لحاظ کرده اند. چنین دیدگاهی مفاهیم مدیریتی را در جهت بهبود کارایی زنجیره تامین و نیز بهره وری هر عضو آن ارایه می دهد. موسی زاده و همکارانش [۴] یک مدل برنامه ریزی خطی دو هدفه عدد صحیح مختلط برای طراحی شبکه زنجیره تامین دارویی توسعه دادند. این مدل کمک می کند تا چندین تصمیم در مورد مسائل استراتژیک مانند افتتاح مراکز تولید دارویی و مراکز توزیع محلی و بومی گرفته شود. هدف آن، مینیمم سازی همزمان هزینه های کل و تقاضاهای برآورده نشده است. همچنین برای اعتباردهی به مدل پیشنهادی یک مورد واقعی مورد مطالعه قرار گرفت که طراحی شبکه زنجیره تامین آموکسی سیلین ۵۰۰ در کشور ایران بود. سرانجام توسط دو رویکرد بهینه سازی  $\epsilon$ -constraint, TH approach آنالیز شد. نصرالهی و همکاران [۵] یک مدل برنامه ریزی ریاضی برای انتخاب و تخصیص سفارشات تامین کنندگان در شبکه زنجیره تامین ارایه دادند. در این پژوهش انتخاب تامین کنندگان سبز تجهیزات نیروگاه های زیست توده و نحوه تخصیص تقاضا به آن ها به عنوان یکی از کلیدی ترین تصمیمات راهبردی زنجیره تامین مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از یک مدل برنامه ریزی ریاضی چند هدفه، میزان تخصیص تقاضا به هر تامین کننده مشخص می گردد. روش پیشنهادی برای انتخاب تامین کنندگان سبز تجهیزات نیروگاه زیست توده شیراز مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصله بیانگر کارایی مدل پیشنهادی برای انتخاب تامین کنندگان سبز تجهیزات نیروگاه زیست توده است. چن و همکاران<sup>۱</sup> [۶] مسئله ی طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته ای را که مربوط به صنایع انرژی خورشیدی است، مطالعه می کنند که شامل دو تابع هدف حداقل کردن هزینه ی کل و میزان کل انتشار گاز CO<sub>2</sub> در شبکه است. از ویژگی های مدل، در نظر گرفتن گسترش ظرفیت و استقرار تکنولوژی بر روی تسهیلات موجود و بالقوه است همچنین برای حل مدل چند هدفه از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات چند هدفه استفاده شده است. ارشدی خمسه و همکاران [۷] در مقاله ای به ترکیب برنامه ریزی استوار با محدودیت اعتبار برای شبکه زنجیره تامین حلقه بسته پاسخگو-پایا تحت عدم قطعیت و اختلالات پرداختند. این شبکه با اهداف ماکزیمم سازی پاسخگویی و پایایی و مینیمم

<sup>۲</sup> Subulan et al<sup>۳</sup> Shi et al<sup>۱</sup> Chen et al

نظر گرفته شده است. مسئله با استفاده برنامه ریزی عدد صحیح آمیخته مدل شده و از رویکرد دو مرحله ای احتمالی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدل پیشنهادی استفاده شده است. در پایان تحلیل حساسیت بر روی مدل پیشنهادی صورت گرفته و پیشنهادهایی به منظور استفاده از این مدل در دنیای واقعی ارائه شده است.

#### ۴. مدل سازی وضعیت کیفیت تصادفی جریان معکوس

وضعیت کیفیت بازگشتی‌ها، در واقع تحت تاثیر تغییراتی است که در طول عمر محصولات بادوام رخ می‌دهد. در بسیاری از موارد، به خاطر نرخ زوال و استفاده در طی چرخه عمر طولانی چنین محصولاتی، پیش‌بینی تعداد دقیق اجزاء قابل بازیابی یک محصول بادوام غیر ممکن می‌شود. بلکه، وضعیت کیفیت را تنها می‌توان پس از امتیازدهی قطعات بازگشتی در مراکز جداسازی آشکار ساخت. در این پژوهش، وضعیت کیفیت تصادفی به صورت قابلیت هر جزء در لیست معکوس مواد اولیه تعریف شده و در قالب سناریوهای مجزا با توزیع احتمال برنولی مدل‌سازی شده است.  $P$  و  $M$  به ترتیب بیانگر مجموعه اجزاء و ماژول‌ها در محصولات بادوام برند جدید هستند همچنین  $\gamma_p$ ،  $\delta_m$  و  $\beta$  به ترتیب تعداد اجزاء قابل استفاده  $p$ ، تعداد ماژول‌های قابل بازسازی  $m$  و میزان پسماند در محصول بادوام بازگشتی هستند. حال بردار کیفیت تصادفی  $\xi$  و به صورت:

$$\xi = \{\gamma_p | \forall p \in P; \delta_m | \forall m \in M; \beta\}$$

شوند. همچنین هر سناریو خاص وضعیت کیفیت تصادفی توسط  $\beta(\xi_q)$ ،  $\delta_m(\xi_q)$ ،  $\gamma_p(\xi_q)$  بیان می‌شود. هر سناریوی خاص  $q$  در ارتباط با یک احتمال غیر منفی  $\pi_q$  است به گونه‌ای که  $\sum_{q \in Q} \pi_q = 1$ . هنگامی که فرایند امتیازدهی انجام در مراکز جداسازی انجام شد، مناسب بودن یا عدم مناسب بودن اجزاء و ماژول‌ها برای فرایند بازیابی مشخص می‌شود. به عنوان مثال، به یک ماشین لباس‌شویی دو قلو اشاره می‌کنیم که، هر یک از محفظه‌های آن ۳/۵ کیلوگرم وزن دارد. هر واحدی می‌تواند مستقلاً کاربردی با احتمال  $\hat{p}$  و یا معیوب با احتمال  $\hat{q}$  باشد. از این رو خروجی فرآیند نمره دهی برای ماشین لباس‌شویی از توزیع برنولی پیروی می‌کند. به همین ترتیب، وضعیت کیفیت دیگر اجزاء در فهرست معکوس مواد اولیه، یک متغیر تصادفی مستقل است که از توزیع برنولی پیروی می‌کند. برای تمام سناریو(ها) بردار(های) کیفیت تصادفی، یعنی  $\xi_q$ ، یک تابع شاخص برای هر واحد  $j$  جزء  $p$  و تابع شاخص دیگری برای هر واحد  $k$  ماژول  $m$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

توجه به شرایط مسئله، از روش‌های فرا ابتکاری نظیر الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات و بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی جهت حل مدل و اعتبارسنجی آن استفاده کردند. نتایج حاصل از پژوهش بیانگر آن بود که بروز اختلال، تصمیمات مکان‌یابی استقرار مراکز تولیدی و توزیعی، قیمت محصولات و سود اجزای زنجیره تأمین را تحت تاثیر قرار می‌دهد. حسنی و همکاران [۱۲] یک مدل بهینه‌سازی جامع جهت حداکثر کردن سود کل یک زنجیره تأمین جهانی حلقه بسته تحت شرایط عدم قطعیت که مربوط به تجهیزات پزشکی است ارائه می‌دهند عدم قطعیت موجود در شبکه از طریق روش بهینه‌سازی استوار بر تسمیس و سیم کنترل شده است علاوه بر این به دلیل جهانی بودن شبکه مسائل مالی و مقررات بین‌المللی همچون نرخ ارز، نرخ مالیات و تعرفه‌ی واردات در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی شبکه در حضور فرض‌هایی همچون چند محصولی، چند سطحی، چند دوره‌ای و محدودیت عمر انبارداری انجام شده - است. برای حل مدل هم از الگوریتم ممتیک توسعه یافته که از روش جست و جوی همسایگی متغیر هم بهره می‌برد استفاده نموده‌اند. ژن و همکاران<sup>۱</sup> [۱۳] در پژوهش خود، طراحی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته که از مسیرهای رو به جلو و معکوس شروع شده و به عدم قطعیت در تقاضای محصولات جدید و بازگشتی منجر می‌شود را بهبود بخشیدند. آن‌ها برای حل عدم اطمینان در تصمیم‌گیری یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط تصادفی دو مرحله‌ای را برای تعیین مکان‌های توزیع و ظرفیت مربوطه و جریان‌های جدید و بازگشتی محصول در شبکه زنجیره تأمین برای به حداقل رساندن هزینه‌های مورد انتظار عملیات و کل طرح فرموله کردند. علاوه بر این، یک الگوریتم جست و جوی تابو در مقیاس بزرگ را توسعه دادند. همچنین آن‌ها با آنالیز حساسیت، تاثیر موجودی و حمل و نقل محصولات بازگشتی را مورد مطالعه قرار داده و چندین آزمایش محاسباتی برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی انجام دادند. قمی اوپلی و همکاران [۱۴] در مقاله ای به طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت شرایط اختلال و عدم قطعیت با در نظر گرفتن کیفیت و استراتژی تاب آوری پرداختند. هدف از این مسئله کمینه کردن هزینه‌های زنجیره با توجه به تصمیمات مکان‌یابی، میزان جریان بین سطوح و فروش از دست رفته می‌باشد. اختلال در تأمین کنندگان به صورت سناریوهای مختلف و به صورت جزئی در

<sup>۱</sup> Zhen et al

$$I(m^k) = \begin{cases} 1 & \text{اگر واحد } k \text{ در یک حالت تابع باشد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

چنین تصمیمات جریان رو به جلو نیز در میان تصمیمات مرحله اول اتخاذ می‌شوند. به همین ترتیب، از آنجا که مقدار محصولات بازگشتی قطعی است، جریان معکوس از مصرف-کنندگان نهایی تا مکان جمع‌آوری و جریان مراکز جمع‌آوری به جداسازی نیز مشمول تصمیمات مرحله اول می‌شوند. در آخر، فارغ از وضعیت کیفیت بازگشتی‌ها، این محصولات دارای مواد خام ارزشمندی هستند که می‌توانند در مراکز بازیافت مواد بازیابی شوند. در نتیجه، جریان مواد بازیافت‌پذیر از مراکز جداسازی تا مکان‌های بازیافت مواد به عنوان یک متغیر تصمیم مرحله اول به شمار می‌رود. هنگامی که محصولات بازگشتی در مراکز جداسازی امتیازدهی می‌شوند، اطلاعات کاملی از تعداد ماژول‌ها و اجزای قابل بازیابی و همچنین میزان پسماندها در اختیار فرد یا گروه تصمیم‌گیرنده قرار می‌گیرد. در نتیجه، جریان‌های پسماند در کانال معکوس به عنوان تصمیمات مرحله دوم شناخته می‌شوند (فعالیت‌های بازگشتی). جریان‌های فیزیکی از تأمین‌کننده‌های مختلف تا مراکز ساخت نیز، به خاطر تاثیر حالات کیفیت غیرقطعی بر روی آنان، از جمله تصمیمات مرحله دوم به شمار می‌روند.

#### ۱.۵. مفروضات مسئله

- در فرآیند امتیازدهی، شرایط خوب اجزاء با احتمال کاربردپذیری  $\hat{p}$  و حالت ضعیف و کمتر مطلوب با احتمال شکست  $1 - \hat{p} = \hat{q}$  بیان می‌شود.
- احتمال کاربردپذیری هر جزء (ماژول یا قطعه) در تمام بخش‌های بازگشتی یکسان است.
- وضعیت بخش‌های بازگشتی متفاوت مستقل از هم بوده و به‌طور یکسانی توزیع شده‌اند.
- کالاهای بادوام، همگن هستند.
- افق طرح‌ریزی در چرخه‌ی عمر کالاهای بادوام در نظر گرفته می‌شود.
- تقاضا قطعی است و باید به‌طور کامل نیاز مناطقی که مصرف‌کننده‌ی نهایی استقرار دارد برطرف شود در حالی که تقاضاهای مشخص اجزای استفاده شده، ماژول‌های بازسازی شده و مواد خام بازیافت شده در بازارهای ثانویه می‌توانند تا حدودی برطرف شوند.
- نرخ بازگشتی از قبل مشخص است.
- ظرفیت‌های تمام مراکز در زنجیره تأمین حلقه بسته محدود و ثابت است. به علاوه، بازگشایی هر نوع

$$I(p^j) = \begin{cases} 1 & \text{اگر واحد } j \text{ در یک حالت تابع باشد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

این کار به ما اجازه می‌دهد به ترتیب تعداد جزء قابل استفاده‌ی مجدد  $p$  را به صورت  $\gamma_{pq} = \sum_{j=1}^{n^p} I(p^j)$  و تعداد تعداد ماژول‌های قابل بازسازی  $m$  را به صورت  $\delta_{mq} = \sum_{k=1}^{n^m} I(m^k)$  در نظر بگیریم. به عنوان مثال، در مورد ماشین لباسشویی دو قلو، یک خروجی محتمل از فرآیند امتیازدهی می‌تواند به صورت یک محفظه‌ی کاملاً کاربردپذیر و یک محفظه‌ی معیوب باشد. لذا برای این جزء خاص،  $\gamma$  برابر با ۱ خواهد بود. از سوی دیگر، تابع شاخص واحد معیوب امتیاز صفر را برای احتمال  $\hat{p}$  دریافت می‌کند. واحد معیوب به عنوان پسماند به شمار رفته و گزینه‌ی قابل اعتماد برای بازیابی این واحد فرآیند بازیافت توده‌ای خواهد بود. در این رابطه،  $\beta$  با (افزایش) میزان واحد متناظر افزایش می‌یابد یعنی  $\beta$  برابر با ۳/۵ کیلوگرم است. به عبارت دیگر تمام واحدهایی که پس از عملیات امتیازدهی، معیوب تشخیص داده می‌شوند، پسماند به حساب می‌آیند و  $\beta$  برابر با مجموع وزن مجموع آن‌ها خواهد بود. رهیافت تولید سناریو که در بالا توصیف شد منجر به  $2^n$  سناریو برای یک محصول بادوام می‌شود که از  $n$  جزء مختلف تشکیل شده است.

#### ۵. مدل‌سازی برنامه‌ریزی تصادفی

با رهیافت تولید سناریویی که برای وضعیت کیفیت تصادفی توصیف شد، می‌توان مسئله را در قالب برنامه‌ریزی تصادفی همراه با بازگشت مدل‌سازی کرد. در یک مدل عمومی برنامه‌ریزی تصادفی، تصمیمات مرحله اول هنگامی اتخاذ می‌شوند که فرد تصمیم‌گیرنده اطلاعات کافی درباره خروجی پارامترهای غیرقطعی ندارند، در حالی که، تصمیمات مرحله دوم پس از آشکار شدن عدم قطعیت گرفته می‌شوند. به بیان دیگر، تصمیمات مرحله دوم مربوط به هنگامی است که اطلاعات کاملی نسبت به پارامترهای غیرقطعی وجود داشته باشد. در این پژوهش در مرحله اول، محل جمع‌آوری، جداسازی، بازسازی، بازیافت توده‌ای، بازیافت مواد و دفع در شبکه معکوس باید پیش از کسب اطلاعات کامل از وضعیت کیفیت بازگشتی‌ها تعیین شود. بنابراین، تصمیمات صفر و یکی حوزه مکان‌یابی تسهیلات، جزء تصمیمات مرحله اول هستند. علاوه بر این، از آنجا که تقاضا قطعی است، عدم قطعیت وضعیت کیفیت محصولات بازگشتی بر تصمیمات راجع به محصولات بادوام دارای برند جدید که از مراکز ساخت تا مصرف‌کننده نهایی از طریق مراکز توزیع ارسال می‌شوند، تاثیری ندارد. بنابراین،

- مرکزی در شبکه‌ی معکوس توام با صرف هزینه‌ی ثابت بازگشایی می‌باشد.
- به خاطر محدودیت‌های الزام شده از سوی دولت، لیست مواد اولیه می‌بایست نسبت قابل توجهی از جریان معکوس را برای اهداف بازیابی کسب کند.
- تمام قیمت‌ها و هزینه‌های تدارکات، فرآیندها و حمل و نقل قطعی هستند.

## ۲.۵. اندیس‌ها

p	مجموعه قطعات
o	مجموعه تأمین‌کنندگان قطعات
a	مجموعه مواد خام
w	مجموعه تأمین‌کنندگان مواد خام
m	مجموعه ماژول‌ها
d	مجموعه تأمین‌کنندگان ماژول
g	مجموعه مراکز تولید
j	مجموعه مراکز توزیع
e	مجموعه ناحیه‌های کاربر/ مصرف کننده نهایی
c	مجموعه مراکز جمع‌آوری
i	مجموعه مراکز جداسازی
r	مجموعه مراکز بازسازی/ تولید مجدد
b	مجموعه مراکز بازیافت توده‌ای
t	مجموعه مراکز بازیافت مواد
k	مجموعه مراکز دفع
q	مجموعه سناریوهای وضعیت کیفیت
z	مجموعه بازارهای ثانویه برای مواد بازیافت شده
x	مجموعه بازارهای ثانویه برای قطعات یدکی
y	مجموعه بازارهای ثانویه برای ماژول‌ها

## ۳.۵. پارامترها

$cg_g$	هزینه تولید واحد محصول در مرکز تولید g
$cj_j$	هزینه‌ی توزیع واحد محصول در مرکز توزیع j
$cc_c$	هزینه پردازش به ازای واحد محصول بازگشتی در مرکز جمع‌آوری c
$ci_i$	هزینه پردازش به ازای هر واحد محصول بازگشتی در مرکز جداسازی i
$cb_b$	هزینه پردازش به ازای کیلوگرم باقی مانده‌ها در مرکز بازیافت b
$ct_{ta}$	هزینه بازیافت به ازای کیلوگرم ماده a در مرکز بازیافت مواد t
$cag_g$	ظرفیت مرکز تولید g
$caj_j$	ظرفیت مرکز توزیع j
$cac_c$	ظرفیت مرکز جمع‌آوری c
$cai_i$	ظرفیت مرکز جداسازی i
$ck_k$	هزینه دفع در مرکز دفع k
$cab_b$	ظرفیت مرکز بازیافت توده b
$cak_k$	ظرفیت مرکز دفع k
$cat_{ta}$	ظرفیت مرکز بازیافت مواد t برای مواد خام a

ظرفیت مرکز تولید مجدد $r$ برای ماژول $m$	$car_{rm}$
ظرفیت تأمین کننده مواد خام $w$ برای مواد خام $a$	$caw_{wa}$
ظرفیت تأمین کننده ماژول $d$ برای ماژول $m$	$cax_{dm}$
ظرفیت تأمین کننده قطعه‌ی $o$ برای قطعه‌ی $p$	$cao_{op}$
هزینه تولید مجدد به ازای واحد ماژول $m$ در مرکز تولید مجدد $r$	$cr_{rm}$
هزینه تأمین واحد کیلوگرم ماده‌ی $a$ که توسط تأمین کننده مواد $w$ تهیه می‌شود	$cw_{wa}$
هزینه تأمین واحد ماژول $m$ که توسط تأمین کننده ماژول $d$ تهیه می‌شود	$cx_{dm}$
هزینه تأمین واحد قطعه $p$ که توسط تأمین کننده قطعه‌ی $o$ تهیه می‌شود	$co_{op}$
تقاضای ماده $a$ در بازار مواد بازیافت شده $z$	$dz_{za}$
تقاضای محصول جدید در ناحیه مصرف کننده نهایی $e$	$de_e$
تقاضای قطعه یدکی $p$ در بازار یدکی $x$	$ds_{xp}$
تقاضای ماژول $m$ در بازار ثانویه $y$	$dy_{ym}$
هزینه ثابت راه‌اندازی مرکز جداسازی $i$	$fi_i$
هزینه ثابت راه‌اندازی مرکز بازیافت توده‌ای $b$	$fb_b$
هزینه ثابت راه‌اندازی مرکز جمع‌آوری $c$	$fc_c$
هزینه ثابت راه‌اندازی مرکز دفع $k$	$fk_k$
هزینه ثابت راه‌اندازی مرکز بازیافت مواد $t$	$ft_t$
هزینه ثابت راه‌اندازی مرکز تولید مجدد $r$	$fr_r$
قیمت واحد ماده $a$ در بازارهای مواد بازیافتی $z$	$Pz_a$
قیمت واحد محصول جدید ناحیه مصرف کننده نهایی $e$	$Pe_e$
قیمت واحد دریافت محصول بازگشتی	$Pa$
قیمت واحد قطعه‌ی $p$ در بازارهای قطعات یدکی	$Ps_p$
قیمت ماژول $m$ در بازارهای ثانویه $y$	$Py_m$
هزینه‌ی حمل هر کیلوگرم ضایعات از مرکز بازیافت توده‌ای $b$ به مرکز دفع $k$	$rk_{bk}$
هزینه‌ی حمل هر کیلوگرم ماده بازیافت پذیر $a$ از مرکز بازیافت توده‌ای $b$ به بازیافت مواد $t$	$rt_{bta}$
هزینه‌ی حمل هر کیلوگرم ماده $a$ تأمین کننده مواد $w$ به مرکز تولید $g$	$rg_{wga}$
هزینه‌ی حمل هر کیلوگرم ضایعات از مرکز بازیافت مواد $t$ به مرکز دفع $k$	$sk_{tk}$
هزینه‌ی حمل هر واحد ماژول $m$ از تأمین کننده ماژول $d$ به مرکز تولید $g$	$sg_{dgm}$
هزینه‌ی حمل هر واحد محصول بازگشتی از مرکز جمع‌آوری $c$ به مرکز جداسازی $i$	$ti_{ci}$
هزینه‌ی حمل هر کیلوگرم باقی مانده از مرکز جداسازی $i$ به مرکز بازیافت توده‌ای $b$	$tb_{ib}$
هزینه‌ی حمل هر واحد محصول بازگشتی از مصرف کننده نهایی $e$ به مرکز جمع‌آوری $c$	$tc_{ec}$
هزینه‌ی حمل هر کیلوگرم ماده بازیافت شده $a$ از مرکز بازیافت $t$ به بازار مواد بازیافت شده $z$	$tz_{tza}$
هزینه‌ی حمل هر کیلوگرم ماده بازیافت شده $a$ از مرکز جداسازی $i$ به مرکز بازیافت مواد $t$	$tt_{ita}$
هزینه‌ی حمل هر واحد قطعه $p$ از تأمین کننده قطعه‌ی $o$ به مرکز تولید $g$	$tg_{ogp}$
هزینه‌ی حمل هر واحد محصول جدید از مرکز ساخت $g$ به مرکز توزیع $j$	$tj_{gj}$
هزینه‌ی حمل هر واحد محصول جدید از مرکز توزیع $j$ به مصرف کننده نهایی	$te_{je}$
هزینه‌ی حمل هر واحد ماژول $m$ از مرکز جداسازی $i$ به مرکز تولید مجدد $r$	$tr_{irm}$
هزینه‌ی حمل هر واحد قطعه $p$ از مرکز جداسازی $i$ به بازار (قطعات) یدکی $x$	$ts_{ixp}$
هزینه‌ی حمل هر کیلوگرم ماده بازیافت شده $a$ از مرکز بازیافت مواد $t$ به مراکز تولید $g$	$tu_{tga}$
هزینه‌ی حمل هر واحد ماژول $m$ از مراکز تولید مجدد $r$ به بازار ثانویه $y$	$ty_{rym}$



هزینه‌ی حمل هر واحد ماژول $m$ از مراکز تولید مجدد $r$ به مرکز تولید $g$	$tx_{rgm}$
هزینه‌ی حمل هر واحد قطعه $p$ از مرکز جداسازی $i$ به مرکز تولید $g$	$tZigp$
میزان ماده قابل بازیافت $a$ در محصول بازگشتی حمل شده از مراکز جداسازی به مراکز بازیافت مواد	$\alpha_a$
میزان باقی مانده‌ها در محصول بازگشتی حمل شده از مراکز جداسازی به مراکز بازیافت توده‌ای طی سناریوی $q$	$\beta_q$
تعداد ماژول قابل بازسازی $m$ در محصول بازگشتی حمل شده از مراکز جداسازی به مراکز تولید مجدد طی سناریوی $q$	$\delta_{mq}$
نسبت ماده قابل بازیافت $a$ حمل شده از مراکز بازیافت توده‌ای به مراکز بازیافت مواد	$\eta_a$
تعداد قطعه قابل استفاده‌ی مجدد $p$ در محصول بازگشتی حمل شده از مراکز جداسازی به بازارهای ثانویه و مراکز تولید طی سناریوی $q$	$\gamma_{pq}$
هدف قانونی پوشش جریان بازگشتی	$\lambda$
حجم ماده $a$ به ازای هر واحد محصول	$\mu_a$
تعداد ماژول $m$ به ازای هر واحد محصول	$\omega_m$
تعداد قطعه $p$ در هر واحد از محصول	$\phi_p$
نرخ بازگشت	$\psi$
نسبت ماده غیر قابل بازیافت $a$ حمل و نقل شده از مراکز بازیافت ماده و بازیافت توده‌ای به مراکز دفع	$\tau_a$

## ۴.۵. متغیرهای تصمیم‌گیری

مقدار محصولات حمل شده از مرکز تولید $g$ به مرکز توزیع $j$	$XJ_{gj}$
مقدار محصولات حمل شده از مرکز توزیع $j$ به ناحیه‌ی مصرف‌کننده نهایی $e$	$XE_{je}$
مقدار بازگشتی‌های حمل شده از ناحیه مصرف‌کننده نهایی $e$ به مرکز جمع‌آوری $c$	$XC_{ec}$
مقدار بازگشتی‌های حمل شده از مرکز جمع‌آوری $c$ به مرکز جداسازی $i$	$XI_{ci}$
مقدار ماده بازگشتی $a$ حمل شده از مرکز جداسازی $i$ به مرکز بازیافت مواد $t$	$XT_{ita}$
متغیر دودویی‌ای که اگر مرکز جداسازی $i$ برقرار باشد برابر است با یک و در غیر این صورت برابر است با صفر	$YI_i$
متغیر دودویی‌ای که اگر مرکز جمع‌آوری $c$ برقرار باشد برابر است با یک و در غیر این صورت برابر است با صفر	$YC_c$
متغیر دودویی‌ای که اگر مرکز دفع $k$ برقرار باشد برابر است با یک و در غیر این صورت برابر است با صفر	$YK_k$
متغیر دودویی‌ای که اگر مرکز بازیافت مواد $t$ برقرار باشد برابر است با یک و در غیر این صورت برابر است با صفر	$YT_t$
متغیر دودویی‌ای که اگر مرکز تولید مجدد $r$ برقرار باشد برابر است با یک و در غیر این صورت برابر است با صفر	$YR_r$
متغیر دودویی‌ای که اگر مرکز بازیافت توده‌ای $b$ برقرار باشد برابر است با یک و در غیر این صورت برابر است با صفر	$YB_b$

کیفیت شناخته شده است. تابع هدف، ترکیبی از درآمد حاصل از فروش محصولات برند جدید و مواد بازیافت شده و اجزای بازیابی شده به علاوه هزینه‌های ثابت مراکز، فرآیندها، تدارکات و حمل و نقل می‌باشد.

## ۵.۵. توابع هدف و محدودیت‌ها

در مدل برنامه‌ریزی تصادفی روابط (۱) تا (۳۳)، هدف حداکثرسازی سود مورد انتظار برای تمام سناریوهای وضعیت

$$\begin{aligned}
\text{Max} \quad & \sum_{j \in J} \sum_{e \in E} P e_e X e_{j e} - \sum_{g \in G} \sum_{j \in J} (c g_g + t j_{g j}) X J_{g j} - \sum_{j \in J} \sum_{e \in E} (c j_j + t e_{j e}) X e_{j e} \\
& - \sum_{e \in E} \sum_{c \in C} (C C_c + t c_{e c}) X C_{e c} - \sum_{c \in C} \sum_{i \in I} (P a + c i_i + t i_{c i}) X i_{c i} \\
& - \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \sum_{a \in A} (c t_{t a} + t t_{i t a}) X T_{i t a} - \sum_{c \in C} f c_c Y C_c - \sum_{i \in I} f i_i Y I_i - \sum_{r \in R} f r_r Y R_r \\
& - \sum_{b \in B} f b_b Y B_b - \sum_{t \in T} f t_t Y T_t - \sum_{k \in K} f k_k Y K_k \\
& + \sum_{q \in Q} \pi_q Q (X J_{g j} \cdot X E_{j e} \cdot X C_{e c} \cdot X I_{c i} \cdot X T_{i t a} \cdot Y C_c \cdot Y I_i \cdot Y B_b \cdot Y R_r \cdot Y T_t \cdot Y K_k \cdot \xi_q) \quad (1)
\end{aligned}$$

محدودیت‌های (۲) و (۳) تعادل جریان در هر مرکز توزیع و ارضای تقاضا در هر ناحیه مصرف‌کننده نهایی را تضمین می‌کند.

$$s. t. \sum_{g \in G} X J_{g j} = \sum_{e \in E} X E_{j e} \quad \forall j \in J \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} X E_{j e} = d e_e \quad \forall e \in E \quad (3)$$

محدودیت (۴) از این که محصولات بازگشتی در مراکز جمع‌آوری گردآورده می‌شوند، اطمینان حاصل می‌کند.

$$\sum_{c \in C} X C_{e c} = \Psi d e_e \quad \forall e \in E \quad (4)$$

محدودیت (۵) این امر که جریان کلی به مراکز جداسازی، یعنی بازگشتی‌های حاصله، نمی‌توانند از کل مقدار محصولات بازگشتی موجود در مراکز جمع‌آوری بیشتر باشند را تضمین می‌کند.

$$\sum_{e \in E} X C_{e c} \geq \sum_{i \in I} X I_{c i} \quad \forall c \in C \quad (5)$$

محدودیت (۶) بیان می‌کند که فهرست مواد اولیه، نسبت قابل توجهی از جریان معکوس را برای اهداف بازیابی، حاصل می‌کند. این محدودیت منعکس‌کننده نگرانی‌های محیط زیستی ناشی از آثار مخرب رهاسازی محصولات بادوام در محیط است.

$$\sum_{c \in C} \sum_{i \in I} X I_{c i} \geq \lambda \sum_{e \in E} \sum_{c \in C} X C_{e c} \quad (6)$$

محدودیت (۷) نشان می‌دهد که جریان کلی خروجی از مراکز جداسازی به تمام مراکز بازیافت برابر است با جریان ورودی از تمام مراکز جمع‌آوری به هر مرکز جداسازی، ضربدر ضریب جرم قابل بازیافت  $\alpha_a$ .

$$\sum_{c \in C} \alpha_a X I_{c i} = \sum_{t \in T} X T_{i t a} \quad \forall i \in I. \quad \forall a \in A \quad (7)$$

محدودیت‌های (۸) تا (۱۱) محدودیت‌های ظرفیت هستند.

$$\sum_{j \in J} X J_{g j} \leq c a g_g \quad \forall g \in G \quad (8)$$

$$\sum_{g \in G} X J_{g j} \leq c a j_j \quad \forall j \in J \quad (9)$$

$$\sum_{e \in E} X C_{e c} \leq c a c_c Y C_c \quad \forall c \in C \quad (10)$$

$$\sum_{c \in C} X I_{c i} \leq c a i_i Y I_i \quad \forall i \in I \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
Max \quad & \sum_{r \in R} \sum_{y \in Y} \sum_{m \in M} P y_m Q Y_{rymq} + \sum_{i \in I} \sum_{x \in X} \sum_{p \in P} P s_p Q S_{ixpq} + \sum_{t \in T} \sum_{z \in Z} \sum_{a \in A} P z_a Q Z_{tzaq} \\
& - \sum_{o \in O} \sum_{g \in G} \sum_{p \in P} (c o_{op} + t g_{ogp}) Q G_{ogpq} - \sum_{w \in W} \sum_{g \in G} \sum_{a \in A} (c w_{wa} + r g_{wga}) N G_{wgaq} \\
& - \sum_{d \in D} \sum_{g \in G} \sum_{m \in M} (c x_{dm} + s g_{dgm}) D G_{dgmq} - \sum_{i \in I} \sum_{r \in R} \sum_{m \in M} (c r_{rm} + t r_{irm}) Q R_{irmq} \\
& - \sum_{i \in I} \sum_{b \in B} (c b_b + t b_{ib}) Q B_{ibq} - \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{a \in A} (c t_{ta} + r t_{bta}) N I_{btaq} \\
& - \sum_{b \in B} \sum_{k \in K} (c k_k + r k_{bk}) N K_{bkq} - \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{a \in A} (c k_k + s k_{tk}) T K_{tkaq} - \sum_{b \in B} c r B R_{bq} \\
& - \sum_{i \in I} \sum_{x \in X} \sum_{p \in P} t s_{ixp} Q S_{ixpq} - \sum_{r \in R} \sum_{y \in Y} \sum_{m \in M} t y_{rym} Q Y_{rymq} - \sum_{t \in T} \sum_{z \in Z} \sum_{a \in A} t z_{tza} Q Z_{tzaq} \\
& - \sum_{i \in I} \sum_{g \in G} \sum_{p \in P} t z_{igp} Q Z_{igpq} - \sum_{r \in R} \sum_{g \in G} \sum_{m \in M} t x_{rgm} Q X_{rgmq} \\
& - \sum_{t \in T} \sum_{g \in G} \sum_{a \in A} t u_{tga} Q U_{tgaq} \quad (12)
\end{aligned}$$

محدودیت‌های (۱۳) تا (۱۵) از این که جریان کلی خروجی از هر مرکز تولید، با جریان کلی ورودی به این مرکز از سوی تأمین‌کننده‌ها و کانال‌های معکوس، برابر است، اطمینان حاصل می‌کند.

$$s. t. \quad \sum_{o \in O} Q G_{ogpq} + \sum_{i \in I} Q Z_{igpq} = \phi_p \sum_{j \in J} X J_{gj} \quad \forall g \in G. \quad \forall p \in P. \quad \forall q \in Q \quad (13)$$

$$\sum_{w \in W} N G_{wgaq} + \sum_{t \in T} Q U_{tgaq} = \mu_a \sum_{j \in J} X J_{gj} \quad \forall g \in G. \quad \forall a \in A. \quad \forall q \in Q \quad (14)$$

$$\sum_{d \in D} D G_{dgmq} + \sum_{r \in R} Q X_{rgmq} = \omega_m \sum_{j \in J} X J_{gj} \quad \forall g \in G. \quad \forall m \in M. \quad \forall q \in Q \quad (15)$$

محدودیت‌های (۱۶) تا (۱۹) ثبات جریان در هر مرکز بازسازی را تضمین می‌کند.

$$\sum_{c \in C} \gamma_{pq} X I_{ci} = \sum_{g \in G} Q Z_{igpq} + \sum_{x \in X} Q S_{ixpq} \quad \forall i \in I. \quad \forall p \in P. \quad \forall q \in Q \quad (16)$$

$$\sum_{i \in I} Q S_{ixpq} \leq d s_{xp} \quad \forall x \in X. \quad \forall p \in P. \quad \forall q \in Q \quad (17)$$

$$\sum_{c \in C} \beta_q X I_{ci} = \sum_{b \in B} Q B_{ibq} \quad \forall i \in I. \quad \forall q \in Q \quad (18)$$

$$\sum_{c \in C} \delta_{mq} X I_{ci} = \sum_{r \in R} Q R_{irmq} \quad \forall i \in I. \quad \forall m \in M. \quad \forall q \in Q \quad (19)$$

محدودیت‌های (۲۰) و (۲۱) از حفظ جریان در هر تسهیلات تولید مجدد اطمینان حاصل می‌کند.

$$\sum_{i \in I} Q R_{irmq} = \sum_{y \in Y} Q Y_{rymq} + \sum_{g \in G} Q X_{rgmq} \quad \forall r \in R. \quad \forall m \in M. \quad \forall q \in Q \quad (20)$$

$$\sum_{r \in R} Q Y_{rymq} \leq d y_{ym} \quad \forall y \in Y. \quad \forall m \in M. \quad \forall q \in Q \quad (21)$$

محدودیت‌های (۲۲) و (۲۳) بیانگر ثبات جریان در هر مرکز بازیافت توده‌ای است.

$$\sum_{i \in I} \eta_a Q B_{ibq} = \sum_{t \in T} N I_{btaq} \quad \forall b \in B. \quad \forall a \in A. \quad \forall q \in Q \quad (22)$$

$$\sum_{i \in I} Q B_{ibq} = \sum_{t \in T} \sum_{a \in A} N T_{btaq} + \sum_{k \in K} N K_{bkq} \quad \forall b \in B. \quad \forall q \in Q \quad (23)$$

محدودیت‌های (۲۴) تا (۲۵) محدودیت‌های حفظ جریان در هر مرکز بازیافت مواد است.

$$\sum_{i \in I} \tau_a X T_{ita} + \sum_{b \in B} \tau_a N T_{btaq} = \sum_{k \in K} T K_{tkas} \quad \forall t \in T. \forall a \in A. \forall q \in Q \quad (24)$$

$$\sum_{t \in T} Q Z_{tzaq} \leq d z_{za} \quad \forall z \in Z. \forall a \in A. \forall q \in Q \quad (25)$$

$$\sum_{i \in I} X T_{ita} + \sum_{b \in B} N T_{btaq} = \sum_{g \in G} Q U_{tgaq} + \sum_{z \in Z} Q Z_{tzaq} + \sum_{k \in K} T K_{tkas} \quad \forall t \in T. \forall a \in A. \forall q \in Q \quad (26)$$

محدودیت‌های (۲۷) تا (۳۳) محدودیت‌های ظرفیت را بر روی امکانات زنجیره تأمین تحمیل می‌کنند.

$$\sum_{g \in G} Q G_{ogpq} \leq c a o_{op} \quad \forall o \in O. \forall p \in P. \forall q \in Q \quad (27)$$

$$\sum_{g \in G} N G_{wgaq} \leq c a w_{wa} \quad \forall w \in W. \forall a \in A. \forall q \in Q \quad (28)$$

$$\sum_{g \in G} D G_{dgmq} \leq c a x_{dm} \quad \forall d \in D. \forall m \in M. \forall q \in Q \quad (29)$$

$$\sum_{i \in I} Q R_{irmq} \leq c a r_{rm} Y R_r \quad \forall r \in R. \forall m \in M. \forall q \in Q \quad (30)$$

$$\sum_{i \in I} Q B_{ibq} \leq c a b_b Y B_b \quad \forall b \in B. \forall q \in Q \quad (31)$$

$$\sum_{i \in I} X T_{ita} + \sum_{b \in B} N T_{btaq} \leq c a t_{ta} Y T_t \quad \forall t \in T. \forall a \in A. \forall q \in Q \quad (32)$$

$$\sum_{b \in B} N K_{bkq} + \sum_{t \in T} \sum_{a \in A} T K_{tkas} \leq c a k_k Y K_k \quad \forall k \in K. \forall q \in Q \quad (33)$$

همچنین محدودیت‌های (۱۷)، (۲۱) و (۲۵) بیانگر ارضای نسبی تقاضای اجزای بازیابی شده و مواد بازیافت شده در بازارهای ثانویه می‌باشد.

محدودیت‌های مرحله اول تشکیل شده است. این مساله مدل‌سازی مجدد مدل اصلی می‌باشد که با کمک الگوریتم برش<sup>۱</sup> صفحه حل می‌شود؛ بدین صورت که در هر تکرار، هر زمان که حل امکان پذیر باشد، یک برش بهینگی مرتبط با مجموعه سناریوها به مساله اصلی افزوده می‌شود. در غیر این صورت تعدادی از برش-های میسر متناظر با سناریوهای میسر افزوده می‌شوند. حل مساله اصلی و مقدار مورد انتظار پاسخ‌های مسائل بازگشتی، به ترتیب کران‌های بالا و پایین مساله اصلی را به ما ارائه می‌کنند. زمانی که یک حل بهینه پیدا شود و یا شکاف بهینگی ارضا شود، فرایند حل مسئله پایان می‌یابد. در ادامه، ابتدا مدل‌سازی مجدد روش L-Shape کلاسیک ارائه می‌شود، سپس الگوریتم ارتقایی، جهت افزایش سرعت الگوریتم L-Shape کلاسیک ارائه می‌شود.

## ۶. روش حل

مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط تصادفی دو هدفه یک مسئله بهینه‌سازی در مقیاس بزرگ است. این امر به طور خاص ناشی از وجود چندین متغیر تصمیم‌گیری صفر و یکی متناظر با محل مراکز در شبکه زنجیره تأمین معکوس، فهرست مواد اولیه محصولات بازگشتی و تعداد بالای مسائل کاهش یافته‌ی بازگشتی می‌باشد. در این مسئله جهت بدست آوردن جواب بهینه می‌توان از الگوریتم L-Shape استفاده کرد. در روش L-Shape کلاسیک، مسئله اولیه، به دو مسئله اصلی و مجموعه‌ای از زیرمسئله‌های اصلی که با هر سناریوی تصادفی تعریف شده در مدل اولیه در ارتباط است، تجزیه می‌شود. مسئله اصلی از متغیرهای مرحله اول، یک متغیر مصنوعی و مجموعه‌ای از

<sup>۱</sup> Cutting plane algorithm

شده است. این ماشین لباسشویی از ۱۰ قطعه (در محفظه و بدنه)، ۲ ماژول (در موتور) و ۳ نوع ماده خام (فولاد) تشکیل شده است. تعداد هر یک از قطعات و مقدار هر یک از مواد خام در جدول (۱) ذکر شده است.

## ۷. یافته ها

به منظور تست مدل پیشنهادی در عمل، شبکه بازبایی ماشین لباسشویی طبق آنچه در مدل پیشنهادی ذکر شد، در نظر گرفته

جدول ۱. اجزای ماشین لباسشویی مورد مطالعه

شرح	عناصر تشکیل دهنده
$\phi_p$	محفظه شستشوی: ۱ (۳,۵ کیلوگرم)، پوشش: ۱ (۲,۵ کیلوگرم)، تعادل: ۱ (۲,۵ کیلوگرم)، چارچوب: ۱ (۱۱,۵ کیلوگرم)، چگالنده: ۱ (۰,۵ کیلوگرم)، شیلنگ: ۱ (۱ کیلوگرم)، قطعات کوچک الکتریکی: ۱ (۱ کیلوگرم)، سیم برق: ۱ (۱ کیلوگرم) انتقال دهنده: ۱ (۱ کیلوگرم)، برد PCB: ۱ (۰,۵ کیلوگرم)
$\omega_m$	موتور: ۱ (۵ کیلوگرم)، کلاچ: ۱ (۴ کیلوگرم)
$\mu_a$	پلاستیک: ۳ کیلوگرم، فولاد: ۲ کیلوگرم، مس: ۱ کیلوگرم

جدول ۲- مقادیر پارامترهای مدل

شرح	مقدار	شرح	مقدار
$cg_g$	۴	$cj_z$	۱
$cc_c$	۱	$ci_i$	۲
$cr_{rm}$	۳	$cb_b$	۲
$ct_{ta}$	۲	$ck_k$	۲
$\eta_a$	۰,۳	$\tau_a$	۰,۲
$Pa$	۲۰۰	$\lambda$	۰,۷
$de_e$	{۶۰۰, ۶۰۱, ۰۰۰, ۱۲۰۰}	$ds_{xp}$	{۳۰, ۳۱,۰۰۰, ۱۰۰}
$dy_{ym}$	{۳۰, ۳۱,۰۰۰, ۱۰۰}	$Pe_e$	Uniform(۷۰۰, ۱۳۰۰)
$fc_c$	Uniform(۴۰۰,۰۰۰, ۶۰۰,۰۰۰)	$fi_j$	Uniform(۴۰۰,۰۰۰, ۶۰۰,۰۰۰)
$fr_r$	Uniform(۷۰۰,۰۰۰, ۹۰۰,۰۰۰)	$fb_b$	Uniform(۴۰۰,۰۰۰, ۶۰۰,۰۰۰)
$ft_t$	Uniform(۴۰۰,۰۰۰, ۶۰۰,۰۰۰)	$fk_k$	Uniform(۲۰۰,۰۰۰, ۴۰۰,۰۰۰)

شده با ملاحظه یک مقدار مثبت کوچک به عنوان کران پایین  $X^0$  حل شد؛ این کار تضمین کننده تولید یک نقطه موجه اولیه است. جدول (۳) نتایج محاسباتی مجموعه‌های کاهش یافته ۵۰۰ سناریویی را نشان می‌دهند. این جدول همچنین آمارهای محاسباتی CPLEX که شامل زمان پردازش (به ثانیه) و نیز مقدار تابع هدف بدست آمده توسط CPLEX، در محدوده زمانی اختصاص یافته را گزارش می‌کند. ستون آخر تحت عنوان شکاف تفاضل نسبی مقادیر تابع هدف بدست آمده توسط الگوریتم L-Shape پیشنهادی و CPLEX را نشان می‌دهد و برای هر یک از مثال‌های آزمون در محدوده‌های زمانی اختصاص یافته، با استفاده از فرمول زیر محاسبه شده است.

مسائل مذکور در نرم افزار GAMS پیاده سازی شده و توسط یک کامپیوتر با Core i3 CPU با کش ۳,۶۰ GHz و حافظه ۴,۰۰ GB و با سیستم عامل ویندوز ۱۰ bit ۶۴ مورد پردازش قرار گرفت. به منظور ارزیابی بازدهی محاسباتی روش L-Shape پیشنهادی، یک میزان انحراف از بهینگی  $\epsilon/\%$  همراه با محدودیت زمان تعریف شد که به عنوان معیار توقف الگوریتم بکار برده شد. به طور دقیق‌تر، فرایند حل مسئله هنگامی پایان می‌یابد که میزان انحراف بهینگی به کمتر از ۵٪ برسد و یا زمان حل مسئله از ۳۶۰۰ ثانیه تجاوز کند. به منظور ایجاد نقطه شروع  $(X^0, Y^0)$ ، بدین صورت عمل شد که نقطه  $Y^0$  در آغاز فرایند حل، برای تمام متغیرهای دوگانه مرحله اول بر روی ۰/۵ ثابت فرض شد. همچنین، برای اخذ مقدار مناسب نقطه‌ی  $X^0$ ، زیرمسئله حاصل

که  $V_{2qp}$  و  $CPX_{2qp}$  به ترتیب بیان کننده حل بهینه مدل توسط الگوریتم L-Shape پیشنهادی و حل آن توسط CPLEX در مجموعه‌های کاهش یافته سناریوها می‌باشند.

$$Gap = 100 \times |(V2qp - CPX2qp)| / V2qp$$

جدول ۳- نتایج عددی کلاس های مسئله برای  $q = 500$

کلاس	مدل L-Shape پیشنهادی			CPLEX	
	زمان حل (ثانیه)	تعداد تکرار	مقدار تابع هدف	زمان حل (ثانیه)	مقدار تابع هدف
C1	۳۱۸	۲۰	۲۳.۵۹۱.۵۰۰	$18000 \geq$	۲۳.۵۲۴.۲۰۰
	۲۵۰	۱۳	۲۶.۷۴۱.۸۰۰	$18000 \geq$	۲۶.۳۶۰.۵۰۰
	۲۶۰	۱۸	۲۴.۵۸۴.۶۰۰	$18000 \geq$	۲۴.۲۶۰.۶۰۰
	۲۴۳	۱۶	۲۳.۹۲۳.۲۰۰	$18000 \geq$	۲۳.۸۳۴.۲۰۰
	۱۸۹	۱۶	۲۶.۷۲۳.۸۰۰	$18000 \geq$	۲۵.۹۳۸.۸۰۰
C2	۳۸۹	۲۲	۳۶.۲۱۴.۲۰۰	$18000 \geq$	۳۵.۸۵۰.۳۰۰
	۵۲۱	۲۸	۳۴.۲۶۶.۸۰۰	$18000 \geq$	۳۴.۱۰۳.۲۰۰
	۲۶۹	۱۶	۳۶.۲۴۴.۵۰۰	$18000 \geq$	۳۴.۹۸۴.۸۰۰
	۲۷۴	۱۹	۳۴.۷۵۲.۶۰۰	$18000 \geq$	۳۴.۱۹۸.۳۰۰
	۴۶۱	۲۳	۳۶.۸۹۶.۴۰۰	$18000 \geq$	۳۵.۷۲۱.۹۰۰
C3	۸۵۴	۳۰	۴۲.۳۲۵.۸۰۰	$18000 \geq$	۵۰.۸۹۷.۵۰۰
	۶۴۱	۳۱	۴۱.۱۶۲.۹۰۰	$18000 \geq$	۳۰.۱۵۰.۱۰۰
	۹۷۵	۳۷	۴۴.۲۸۵.۶۰۰	$18000 \geq$	۶۰.۸۵۳.۰۰۰
	۷۲۱	۲۸	۴۳.۱۳۴.۲۰۰	$18000 \geq$	۴۰.۸۲۹.۳۰۰
	۶۲۴	۲۴	۴۴.۶۱۳.۶۰۰	$18000 \geq$	۵۰.۱۸۱.۹۰۰
C4	۱۱۶۷	۳۲	۵۲.۸۱۳.۲۰۰	$18000 \geq$	۱۱.۳۴۶.۳۰۰
	۱۲۳۸	۲۵	۵۵.۳۸۹.۵۰۰	$18000 \geq$	۱۴.۷۱۶.۰۰۰
	۸۲۶	۲۴	۵۸.۹۵۱.۶۰۰	$18000 \geq$	۱۹.۶۷۴.۵۰۰
	۷۶۱	۲۲	۵۷.۱۹۲.۴۰۰	$18000 \geq$	۱۶.۱۹۶.۳۰۰
	۹۳۸	۱۹	۵۴.۸۱۳.۵۰۰	$18000 \geq$	۱۷.۲۶۳.۴۰۰
C5	۲۶۵۴	۳۹	۶۶.۷۸۴.۵۰۰	$18000 \geq$	۱۲.۵۲۰.۷۰۰
	۲۸۴۹	۴۰	۶۱.۶۸۰.۷۰۰	$18000 \geq$	۱۰.۶۲۵.۸۰۰
	۲۳۶۴	۳۲	۶۳.۵۴۱.۲۰۰	$18000 \geq$	۱۲.۳۸۵.۶۰۰
	۲۸۵۷	۳۳	۵۸.۸۳۳.۹۰۰	$18000 \geq$	۵.۱۹۲.۹۰۰
	۲۴۵۹	۳۶	۶۰.۸۶۷.۶۰۰	$18000 \geq$	۱۰.۳۹۲.۲۰۰
C6	۲۹۲۸	۴۲	۷۱.۳۴۸.۲۰۰	$18000 \geq$	۱۰.۰۵۰.۶۰۰
	۳۱۴۰	۴۷	۷۳.۵۸۹.۶۰۰	$18000 \geq$	۱۱.۸۵۲.۴۰۰
	۳۰۶۸	۴۹	۶۹.۹۱۸.۳۰۰	$18000 \geq$	۷.۳۵۹.۸۰۰
	۳۰۰۸	۵۱	۷۰.۳۶۷.۵۰۰	$18000 \geq$	۵.۷۴۶.۶۰۰
	۳۱۸۶	۴۶	۷۲.۳۴۸.۹۰۰	$18000 \geq$	۴.۸۳۵.۳۰۰

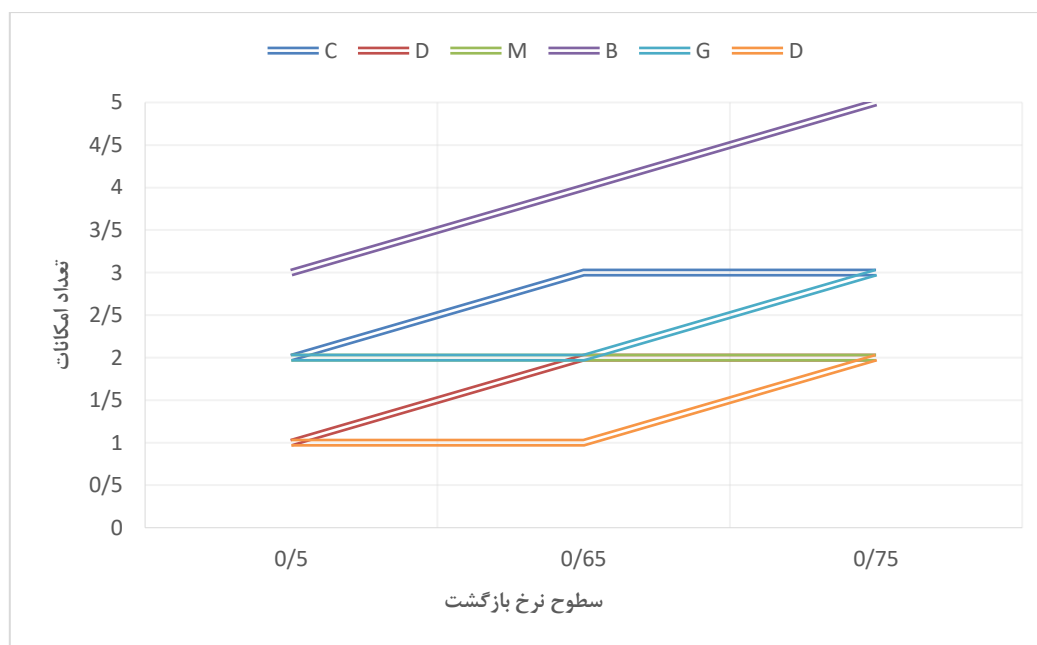
یافته، برای یک نرم‌افزار تجاری، به‌خودی خود بسیار مشکل است. این مشاهدات رهیافت حل بهینه مسئله را تقویت می‌کند. بر خلاف CPLEX که در ۵ ساعت زمان پردازش، قادر به یافتن پاسخ‌های با کیفیت مناسب نیست، الگوریتم L-Shape پیشنهادی به راحتی می‌تواند از پس مسائل دارای مقیاس واقعی برآید، چنان‌که میانگین زمان پردازش این روش در رده‌های  $C_1$  و  $C_2$  کمتر از ۴۰۰ ثانیه بوده و این امر مزیت استراتژی‌های بهینه‌سازی الگوریتمی را تایید می‌کند. البته توجه داشته باشید که در مورد حل مسائل با مقیاس بزرگ‌تر (کلاس‌های  $C_6$  و  $C_7$ ) مشاهده می‌شود که زمان حل مسئله به طور میانگین ۷۹/۱٪ نسبت به ۴ رده دیگر افزایش می‌یابد. با این وجود، تمام مثال‌های آزمون، در زمان تخصیص یافته با رویه‌ی تجزیه پیشنهاد شده، قابل حل می‌باشد.

همچنین واریانس ۰،۷٪ در میان تمام مناطق مصرف‌کنندگان نهایی توزیع یافته است. سپس این توزیع نرمال با استفاده از توزیع مجزای سه نقطه‌ای (نسبت بالا، متوسط و پایین) و روش مربعی گاوسی<sup>۱</sup> تخمین زده می‌شوند. نقطه میانگین، نرخ بازگشت ۰/۶۵ است که به عنوان مورد پایه‌ای در نظر گرفته می‌شود. مورد های پایین و بالا نیز به منظور بهینگی و با استفاده از الگوریتم حل پیشنهاد شده حل می‌شوند.

با توجه به نتایج گزارش شده در جدول (۳)، روش L-Shape پیشنهادی، تمام ۳۰ مثال آزمون بهینگی را در مدت زمان قابل قبولی حل می‌کند، در حالی که CPLEX تنها قادر به یافتن پاسخ قابل قبول برای هر یک از آنها در زمان اختصاص یافته است. به بیان دیگر، با مشاهده‌ی گپ میانگین بزرگی که میان مقادیر تابع هدف دو روش (که در ستون آخر ذکر شده) وجود دارد، پاسخ موجه‌ای که توسط CPLEX برای مساله‌های آزمون  $C_2$  تا  $C_6$  معرفی می‌شود، به طور قابل توجهی دور از پاسخ‌های بهینه‌ای است که از روش L-Shape حاصل می‌شود. این امر را می‌توان این گونه توضیح داد که مسئله هم‌ارز معینی که CPLEX تلاش به حل آن دارد، شامل تعداد بسیار زیادی از مسائل رجوعی مرتبط با سناریوهای وضعیت کیفیت می‌شود. از این رو، حل مدلی توصیف شده، حتی با تعداد سناریوهای کاهش

### ۱،۷. تحلیل حساسیت

در این تحقیق مقدار محصولات بازگشتی در معرض تغییر است. از این رو، تحلیل حساسیت پاسخ‌ها نسبت به تغییرات نسبت بازگشت، یعنی  $\Psi$ ، برای مثال آزمون کلاس  $C_2$  مورد تحلیل قرار گرفته که در جدول (۴) به آن اشاره شد. بدین منظور فرض می‌شود که نرخ بازگشت به صورت نرمال و با میانگین ۰/۶۵ و



شکل ۲. تاثیر سطوح مختلف نرخ بازگشت بر روی پیکربندی زنجیره تأمین حلقه بسته

<sup>۱</sup> Gaussian quadrature

توجه قرار گرفت، عده‌ای از محققین مدل سازی‌های برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای را گسترش دادند. جزئیات این مطالعات را می‌توان در آثار لیستش<sup>۲</sup> [۱۸]، پیشوایی و همکاران<sup>۳</sup> [۱۹]، فونسکا و همکاران<sup>۴</sup> [۲۰]، کاردوسو و همکاران<sup>۵</sup> [۲۱] و زبالوس و همکاران<sup>۶</sup> [۲۲] یافت. تحلیل ادبیات فوق این مشاهدات را نشان می‌دهد: ۱. شبکه‌های لجستیک بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند؛ ۲. تعداد سناریوها بسیار کم است (مثلاً ۱۲ سناریو در پژوهش) و ۳. با توجه به حجم مسئله، حل بهینه به کمک نرم افزارهای تجاری انجام شده است. لازم به ذکر است که مطالعه‌ی صورت گرفته توسط لیستس<sup>۲</sup> [۱۸] یک مورد استثنائی در میان مطالعات است چرا که در این کار الگوریتم L-Shape عدد صحیح<sup>۸</sup> به عنوان رهیافت حل مسئله ابداع شد؛ هر چند که الگوریتم وی تنها برای حالت‌هایی با تعداد سناریوهای اندک مناسب بود. همان طور که پیش از این ذکر شد، تنها چند مورد از مطالعات اخیر عدم قطعیت را در بازگشت وضعیت کیفیت مورد بررسی قرار دادند. زبالوس و همکاران به یک مسئله طراحی شبکه‌ی زنجیره تأمین حلقه بسته تصادفی توجه کردند که حل آن بر اساس استفاده از یک نرم‌افزار تجاری انجام شد. چن و همکاران [۱۶] نرخ بازیابی را به‌عنوان یک معیار اندازه‌گیری برای بیان وضعیت کیفیت محصولات از کار افتاده در نظر گرفتند که بر اساس آن، محققان مذکور نرخ بازیابی تصادفی را به عنوان مجموعه‌ای از سناریوها برای یک طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در نظر گرفتند که شامل امکانات و تسهیلات جمع-آوری و تولید مجدد در کانال معکوس می‌شود. در پژوهش حاضر به بررسی وضعیت کیفی جریان معکوس با توجه به فهرست معکوس مواد اولیه در چاقوب کالاهای ماژولار پرداخته شد. رویکرد این پژوهش با آنچه زبالوس و همکاران [۱۵] و چن و همکاران [۱۶] دارند در موارد ذیل متفاوت است: ۱. وضعیت‌های کیفیت را لحاظ در دسترس بودن اجزا در فهرست معکوس مواد اولیه‌ی یک کالای بادوام (از یکدیگر) متمایز می‌کند، ۲. شامل انواع مختلفی از گزینه‌های قابل قبول بازیابی در مونتاژهای فرعی یک کالای بادوام می‌شود، ۳. انتخاب فرآیند بازیابی برای هر جزء بستگی به وضعیت کیفیت دارد.

همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، وقتی که ۵۰۰ سناریو مورد توجه قرار می‌گیرد، بالا بودن سطح نسبت بازگشت، باعث افزایشی در تعداد انواع امکاناتی می‌شود که در شبکه بازگشت تاسیس می‌شوند و این باعث هزینه‌های اضافی برای تاسیس می‌شود. این امر همچنین افزایش هزینه‌های حمل و نقل و پردازش را در زنجیره‌های معکوس در پی دارد. از سوی دیگر پایین بودن سطح نسبت بازگشت، تأثیری معکوس بر روی پیکربندی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته داشته و منجر به کاهش امکانات فعال در کانال معکوس می‌شود. بررسی نتایج مثال ۱۰۰۰ سناریویی حاکی از مشاهدات مشابه است، بدین مفهوم که سطح جریان معکوس نقش کلیدی در سودآوری زنجیره تأمین حلقه بسته از نظر تغییر هزینه کلی طراحی شبکه ایفا می‌کند. به بیان دقیق‌تر، سودی که سازنده تجهیزات اصلی می‌برد، در مقدار پایین نرخ بازگشت به ترتیب ۵,۲۷٪ و ۱۴,۵۱٪ بیشتر از مقدار پایه (۰,۶۵) و مقدار بالایی (۰,۷۵) است که در سناریوی‌های ۵۰۰ تایی وجود دارد. در مورد مجموعه ۱۰۰۰ سناریویی، افزایش مقدار تابع سود به طور ملایمی بیشتر از مجموعه‌های دارای سناریوهای کمتر است.

## ۲,۷. مقایسه با سایر پژوهش‌ها

تاکنون تلاش‌های بسیاری برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته و زنجیره تأمین معکوس صورت گرفته است که در چارچوب بازیابی محصولات، مسائل متنوعی از بازیافت زباله‌ها مانند فروش و شن (مصالح) تا بازیافت-های مختلف محصولات پیچیده‌تر ارائه شده است. در اکثر مطالعات، ملاحظات عدم قطعیت محدود به مقدار و تقاضای محصولات بازگشتی می‌باشد. با نگاه به تعداد اندکی از استثنائات [۱۵] و [۱۶] می‌توان دریافت که اثر عدم قطعیت کیفیت محصولات بازگشتی بر روی زنجیره‌های تأمین حلقه بسته، علی-رغم تأثیر اساسی آن، توجه اندکی به خود جلب کرده است. رایج-ترین رهیافت که تلاش آشکاری برای ترکیب عدم قطعیت در پارامترهای طراحی دارد، رهیافت بهینه‌سازی تصادفی است. پس از کار بنیادین سلما و همکاران<sup>۱</sup> [۱۷] که در آن مسئله طراحی شبکه تحت تقاضا و مقدار محصولات بازگشتی غیرقطعی مورد

<sup>۶</sup> Zeballos et al

<sup>۷</sup> Listes

<sup>۸</sup> integer L-shaped algorithm

<sup>۱</sup> Salema et al

<sup>۲</sup> Listes

<sup>۳</sup> Pishvae et al

<sup>۴</sup> Fonseca et al

<sup>۵</sup> Cardoso et al



## ۸. نتیجه گیری

پس از بررسی کلیه پژوهش‌های صورت گرفته مشخص گردید که در بیشتر پژوهش‌ها یا زنجیره تأمین روبه جلو و یا رو به عقب بوده است ولی در این تحقیق زنجیره تأمین حلقه بسته مورد بررسی قرار گرفت. در این مسئله عدم قطعیت در مورد کیفیت محصولات بازگشتی مورد بررسی قرار گرفت. این مدل به گونه‌ای طراحی شده است که شامل چهار سطح (تأمین‌کننده، تولید-کننده، توزیع‌کننده و مشتری نهایی) در شبکه رو به جلو و هشت سطح (مراکز جمع‌آوری و جداسازی، تولید مجدد، بازیافت توده-ای، بازیافت مواد و دفع و بازار قطعات یدکی و بازار بازیافت مواد) در شبکه رو به عقب می‌باشند. مدل ارائه شده در این پایان‌نامه یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای می‌باشد که هدف آن حداکثرسازی سود مورد انتظار برای تمام سناریوهای وضعیت کیفیت شناخته شده است. تابع هدف، ترکیبی از درآمد حاصل از فروش محصولات برند جدید و مواد بازیافت شده و اجزای بازیابی شده به علاوه هزینه‌های ثابت مراکز، فرایندها، تدارکات و حمل و نقل می‌باشد. این مدل با استفاده از نرم افزار L-Shape و الگوریتم کاهش سناریو حل گردید و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه گردید. از جمله محدودیت‌های این تحقیق می‌توان به عدم دسترسی به برخی از داده‌های خام پارامترها و عدم تفکیک برخی از قطعات بازگشتی جهت بازیافت و تعیین کیفیت آن‌ها اشاره کرد. همچنین در ادامه پیشنهادات اجرایی حاصل از این تحقیق عبارتند از:

۱. شرکت‌های تولیدی مشابه می‌توانند با استفاده از این چنین مدل برآورد صحیحی از پارامترهای کمی زنجیره تأمین داشته باشند و حتی با تحلیل اقتصادی، پیاده‌سازی شبکه زنجیره تأمین را امکان‌سنجی نمایند.
۲. مدل ارائه شده در این مطالعه قابلیت بکارگیری برای طیف وسیعی از محصولات و شرایط گوناگون را دارند. تولیدکنندگان براساس نوع محصولات تولیدی و نیز نیازهای بازار می‌توانند مدل را انتخاب کنند.
۳. از آن جایی که این پژوهش به طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پرداخته است، پیشنهاد می‌گردد که مدیران با توجه به نتایج بدست آمده از سناریوهای مختلف و براساس پارامترهای متغیرهای اقتصادی به بازطراحی شبکه زنجیره تأمین جهت بهینه‌سازی وضعیت موجود خود بپردازند.

## منابع

- [۱] Kuei C, Madu C.N, Lin C (۲۰۰۸). Implementing supply chain quality management, Total Quality Management; Vol. ۱۹ (۱۱): ۱۱۲۷-۱۱۴۱.
- [۲] Robinson C.J, Malhotra M.K (۲۰۰۵). Defining the concept of supply chain quality management and its relevance to academic and industrial practice. International Journal of Production Economics; ۹۶: ۳۱۵-۳۲۷.
- [۳] کوشکی، فرشته و مشایخی نظام‌آبادی، المیرا (۱۳۹۷)، یک روش تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای برای ارزیابی زنجیره‌های تأمین و کاربرد آن در داروسازی، نشریه مهندسی و مدیریت کیفیت، ۱۸(۱)، صص ۳۷-۴۸.
- [۴] Mousazadeh, M., Torabi, S. A., & Zahiri, B. (۲۰۱۵). A robust possibilistic programming approach for pharmaceutical supply chain network design. Computers & Chemical Engineering, ۸۲, ۱۱۵-۱۲۸.
- [۵] نصراللهی، میثم، حکیمی اصل، مهدی، حکیمی اصل، علیرضا و کرامتی، عباس (۱۳۹۶). ارایه یک مدل تلفیقی برنامه‌ریزی ریاضی برای انتخاب و تخصیص سفارشات تأمین‌کنندگان سبز نیروگاه زیست توده، نشریه مهندسی و مدیریت کیفیت، ۷(۱)، صص ۱-۱۵.
- [۶] Chen, Y. W., Wang, L. C., Wang, A., & Chen, T. L. (۲۰۱۷). A particle swarm approach for optimizing a multi-stage closed loop supply chain for the solar cell industry. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, ۴۳, ۱۱۱-۱۲۳.
- [۷] ارشدی‌خمس، علیرضا، حمیدیه، علیرضا و نادری، بهمن (۱۳۹۵). ترکیب جدید برنامه‌ریزی استوار با محدودیت اعتبار برای شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پاسخگو-پایا تحت عدم قطعیت و اختلالات، نشریه مهندسی و مدیریت کیفیت، ۶(۴)، صص ۲۱۳-۲۲۷.
- [۸] Subulan, K., Taşan, A. S., & Baykasoğlu, A. (۲۰۱۵). Designing an environmentally conscious tire closed-loop supply chain network with multiple recovery options using interactive fuzzy goal programming. Applied Mathematical Modelling, ۳۹(۹), ۲۶۶۱-۲۷۰۲.
- [۹] Shi, J., Liu, Z., Tang, L., & Xiong, J. (۲۰۱۷). Multi-objective optimization for a closed-loop network design problem using an improved

- [۱۸] Listes, O. (۲۰۰۷). A generic stochastic model for supply-and-return network design. *Computers & Operations Research*, ۳۴(۲), ۴۱۷-۴۴۲.
- [۱۹] Pishvae, M. S., Jolai, F., & Razmi, J. (۲۰۰۹). A stochastic optimization model for integrated forward/reverse logistics network design. *Journal of Manufacturing Systems*, ۲۸(۴), ۱۰۷-۱۱۴.
- [۲۰] Fonseca, M. C., García-Sánchez, Á., Ortega-Mier, M., & Saldanha-da-Gama, F. (۲۰۱۰). A stochastic bi-objective location model for strategic reverse logistics. *Top*, ۱۸(۱), ۱۵۸-۱۸۴.
- [۲۱] Cardoso, S. R., Barbosa-Póvoa, A. P. F., & Relvas, S. (۲۰۱۳). Design and planning of supply chains with integration of reverse logistics activities under demand uncertainty. *European Journal of Operational Research*, ۲۲۶(۳), ۴۳۶-۴۵۱.
- [۲۲] Zeballos, L. J., Méndez, C. A., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q. (۲۰۱۴). Multi-period design and planning of closed-loop supply chains with uncertain supply and demand. *Computers & Chemical Engineering*, ۶۶, ۱۵۱-۱۶۴.
- genetic algorithm. *Applied Mathematical Modelling*, ۴۵, ۱۴-۳۰.
- [۱۰] عزیزی، محمد رضا و جعفری، حمیدرضا (۱۳۹۵). ارزیابی مدل ریاضی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار با در نظر گرفتن معیارهای انتخاب تأمین کننده در شرایط عدم قطعیت، کنفرانس بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت پایدار، اصفهان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان.
- [۱۱] یاری، میلاد، پیشوایی، میرسامان و جبارزاده، آرمین (۱۳۹۵). طراحی زنجیره تأمین رقابتی با در نظر گرفتن اختلال در تأمین (مطالعه موردی: زنجیره تأمین سنگهای تزئینی). فصلنامه علمی-پژوهشی مطالعات مدیریت صنعتی، ۱۶(۴۸)، صص ۵۳-۳۱.
- [۱۲] Hasani, A., Zegordi, S. H., & Nikbakhsh, E. (۲۰۱۵). Robust closed-loop global supply chain network design under uncertainty: the case of the medical device industry. *International Journal of Production Research*, ۵۳(۵), ۱۵۹۶-۱۶۲۴.
- [۱۳] Zhen, L., Wu, Y., Wang, S., Hu, Y., & Yi, W. (۲۰۱۸). Capacitated closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Advanced Engineering Informatics*, ۳۸, ۳۰۶-۳۱۵.
- [۱۴] قمی اوپلی، مرتضی، جلالی نائینی، سید غلامرضا، توکلی مقدم، رضا و جبارزاده، آرمین (۱۳۹۵). طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت شرایط اختلال و عدم قطعیت با در نظر گرفتن کیفیت و استراتژی تاب آوری، نشریه مهندسی و مدیریت کیفیت، ۶(۲)، صص ۱۳۳-۱۴۵.
- [۱۵] Zeballos, L. J., Gomes, M. I., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q. (۲۰۱۲). Addressing the uncertain quality and quantity of returns in closed-loop supply chains. *Computers & Chemical Engineering*, ۴۷, ۲۳۷-۲۴۷.
- [۱۶] Chen, W., Kucukyazici, B., Verter, V., & Sáenz, M. J. (۲۰۱۵). Supply chain design for unlocking the value of remanufacturing under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, ۲۴۷(۳), ۸۰۴-۸۱۹.
- [۱۷] Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q. (۲۰۰۷). An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty. *European Journal of Operational Research*, ۱۷۹(۳), ۱۰۶۳-۱۰۷۷.