

## یک مدل بهینه‌سازی فازی-استوار برای طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته تحت شرایط برنامه‌ریزی امکانی محدودیت شانس

ثمین تدارک<sup>۱</sup>، حسن خادمی زارع<sup>۲\*</sup>، حسن حسینی نسب<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۳. استاد گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

### خلاصه

مسئله زیست‌محیطی یکی از مسائل مهم در جهان امروز است. در سال‌های اخیر به مدیریت زنجیره تأمین سبز حلقه بسته توجه بسیاری شده است و نتایج حاصل از آن برای مدیران یک مسئله مهم محسوب می‌شود. در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته برای بهینه‌سازی ریاضی و طراحی زنجیره تأمین سبز حلقه بسته شامل مراکز تولید و بازیابی، مرکز توزیع، مراکز بازرسی، مرکز ضایعات و مشتری ارائه شده است، که علاوه بر کاهش هزینه‌های سیستم شامل هزینه ثابت استقرار کارخانه و مراکز توزیع، هزینه متغیر تولید محصول با تکنولوژی‌های متفاوت و هزینه حمل‌ونقل با در نظر گرفتن نرخ مالیات کربن، میزان کربن ناشی از تولید، حمل‌ونقل و استقرار حداقل می‌شود. نظر به اینکه در مسائل دنیای واقعی پارامترها دارای عدم قطعیت هستند، عدم قطعیت موجود در پارامترهای هزینه تولید، هزینه فرایندهای بازیابی، توزیع، بازرسی و ضایعات، میزان انتشار کربن ناشی از تولیدات، حمل‌ونقل و استقرار، ظرفیت تسهیلات و میزان تقاضا در مدل بررسی شده است و برای برخورد با عدم قطعیت پارامترها، از رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استوار استفاده می‌شود. برای به دست آوردن جواب بهینه مسئله نیز از نرم‌افزار گمز استفاده شده است و در پایان تجزیه و تحلیلی بر پارامترهای سطح اطمینان در حالت امکانی، وزن ضرایب و مقدار جریمه تابع هدف در مدل فازی استوار مسئله انجام شده است. نتایج عددی، نشان می‌دهند که مدل ارائه شده قادر به کنترل عدم قطعیت می‌باشد، به همین دلیل قیمت پایدار به سیستم تحمیل شده است. همچنین مقدار تابع هدف در حالت امکانی نسبت به حالت فازی استوار ۵ درصد کاهش قیمت داشته است.

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۸/۲/۹

پذیرش ۱۳۹۸/۹/۲۸

کلمات کلیدی:

زنجیره تأمین سبز حلقه بسته

نرخ مالیات کربن

محدودیت شانس

رویکرد فازی-استوار

عدم قطعیت

### ۱- مقدمه

فرایندها با تهیه مواد اولیه آغاز می‌شود و با کسب رضایت مشتریان به پایان می‌رسد. در چندین سال گذشته با توجه به آلودگی محیط‌زیست و فشار مشتری، مسائلی مانند لجستیک معکوس، تولید سبز، بازسازی و مدیریت زباله به‌عنوان بخش‌های مهمی از مدیریت زنجیره تأمین سبز (GSCM) مورد توجه در پژوهش‌های دانشگاهی و صنعت قرار گرفته است. به دلیل فضای رقابتی زنجیره تأمین برای تصمیم‌گیری در

در دنیای امروز، بسیاری از شرکت‌ها سعی در بهبود فرایندهای کسب‌وکار خود دارند و شرکت‌ها به‌منظور برآورده کردن انتظارات مشتری‌ها و رضایت آن‌ها و موفقیت در محیط‌های رقابتی توسعه می‌یابند. به همین دلیل مدیریت زنجیره تأمین یکی از موضوعات جالب و مهم بین پژوهشگران دانشگاهی و مدیران صنعت است [۱]. این

\* نویسنده مسئول: حسن خادمی زارع

تلفن: ۰۳۵۱-۸۱۲۲۴۲۳؛ پست الکترونیکی: [hkhademiz@yazd.ac.ir](mailto:hkhademiz@yazd.ac.ir)

هزینه کل و تأخیر در یک شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته طراحی کردند. وانگ و همکاران [۸] از رویکرد تئوری بازی برای تجزیه و تحلیل اثرات هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم ناشی از طرح تجارت کربن در رقابت‌پذیری و مشارکت تأمین شرکت‌ها استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که از منظر هزینه مستقیم، یک شرکت با کاهش شدت انتشار کربن به یک حد مشخص، می‌تواند سهم بازار خود را با افزایش مقدار محصول خروجی و از طریق مزیت رقابتی انتشار کربن افزایش دهد و از منظر هزینه غیرمستقیم، تأمین‌کنندگان شرکای تجاری با مقادیر کم انتشار کربن را انتخاب خواهند.

نورجانی و همکارانش [۹] یک مدل MILP تک‌دوره‌ای و تک‌محصولی برای ارزیابی و بهینه‌سازی عملکرد زنجیره تأمین سبز در یک شبکه حلقه بسته ارائه کردند.

محتشمی و همکارانش [۱۰] یک مدل NLP به‌منظور طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه کردند که برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و مصرف انرژی از سیستم صف در قسمت حمل‌ونقل استفاده کرده‌اند.

ژن و همکارانش [۱۱] یک شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته‌ی پایدار با استفاده از مدل برنامه‌ریزی تصادفی و روش آزادسازی لاگرانژ ارائه دادند.

ماستوموتو و همکاران [۱۲] بخش‌های مختلف تولید و بازیابی را در زنجیره تأمین سبز خودرو بررسی کردند. همچنین دانش در مورد محصول موردنظر مشتریان و استراتژی قیمت محصول که در کشور ژاپن و آمریکا در تصمیم‌گیری برای خرید تأثیرگذار است را به همراه عامل کربن به‌عنوان شاخص زیست‌محیطی تعیین کردند.

رضا صادقی‌راد و نسیم نهاوندی [۱۳] یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه قطعی MILP به‌منظور یکپارچه‌سازی مشکلات زنجیره تأمین سبز حلقه بسته و با در نظر گرفتن تخفیف طراحی کردند.

طلایی و همکاران [۱۴] یک مدل MILP برای طراحی شبکه محل/ تخصیص تأسیسات یک مدل پیشنهادی طراحی کردند. در مدل پیشنهادی، انتشار CO<sub>2</sub> به‌وسیله ساختن تأسیسات شبکه، فرایندهای تولیدی مختلف و حمل‌ونقل خودرو صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است که مدل‌های سنتی به‌تنهایی قادر به اعمال دقت و قطعیت هستند. و زمانی که نتوان عدم قطعیت را در مدل لحاظ کرد، مدل واقعی نخواهد بود. از این‌رو در شرایطی که تصمیم‌گیری تحت ریسک است نمی‌توان در مورد برخی پارامترها مانند تقاضا با اطمینان صحبت نمود و لازم است این مقادیر به‌صورت احتمالی عنوان شوند. شایان‌ذکر است که دلیل اینکه مفاهیم احتمالی به‌خوبی نمی‌توانند عدم قطعیت را در نظر گیرند از این‌رو از نظریه مجموعه‌های فازی برای بیان عدم قطعیت استفاده می‌کنیم.

### ۱-۳- طراحی زنجیره تأمین در شرایط غیرقطعی

گویندان و همکاران [۱۵] یک مدل چندمرحله‌ای MILP برای شرکت مونتاژ جواهرافشان را تحت شرایط عدم قطعیت توسعه دادند. اهداف موردنظر آن‌ها به حداقل رساندن هزینه کل، به حداکثر رساندن

بسیاری از مسائل با مشکل کمبود اطلاعات و یا غیردقیق بودن اطلاعات موجود مواجه هستیم، بنابراین در مدل‌هایی که برای برنامه‌ریزی آن ارائه می‌شود باید این مسئله را مدنظر داشت. بر این اساس برای واقعی‌تر شدن مدل می‌توان فرض کرد برخی پارامترها (مانند تقاضا و هزینه) دارای عدم قطعیت از نوع فازی (عدم قطعیت شناختی) می‌باشند. رویکردی که در سال‌های اخیر برای مقابله با عدم قطعیت شناختی مورد استفاده قرار گرفته، بهینه‌سازی استوار می‌باشد که این روش به بهینه‌سازی در بدترین حالت می‌پردازد. رویکرد استوار برای حل مسائل بهینه‌سازی از اوایل سال ۱۹۷۰ پیشنهاد شد و اخیراً به‌طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته و پیشنهاد شده است. دو محقق به نام‌های داگلاس خوزه الم و رینالدو مورابیتو دو دلیل را برای استفاده از بهینه‌سازی استوار ذکر کرده‌اند:

۱. بهینه‌سازی استوار نسبت به رویکرد احتمالی از لحاظ حل مدل دارای سهولت بیشتری است.

۲. با توجه به اینکه برای داده‌های تحت عدم قطعیت شناختی نیازی به دانش واضحی نداریم، می‌توان از داده‌های تاریخی و تجربه‌های تصمیم‌گیران در بعضی موارد برای استنتاج بازه‌ی دارای عدم قطعیت استفاده کرد [۲].

همچنین دلایل برتری برنامه‌ریزی استوار امکانی نسبت به برنامه‌ریزی امکانی به شرح زیر می‌باشد:

۳. در بهینه‌سازی استوار جواب نهایی دارای استواری بهینه بودن و استواری شدنی بودن است.

۴. در بهینه‌سازی استوار سطح اطمینان ارضای محدودیت‌ها توسط خود مدل تعیین می‌شود و مقدار آن بهینه است.

۵. توجه به انحرافات تابع هدف به‌واسطه عدم قطعیت پارامترها موجب جلوگیری از هزینه‌های سنگین و جبران‌ناپذیری برای مدیران و سازمان می‌گردد. در صورتی که در برنامه‌ریزی امکانی به موارد مذکور توجه چندانی نمی‌شود [۳].

در ادامه به شرح چندین تحقیق که مرتبط با طراحی زنجیره تأمین بوده پرداخته می‌شود و در قسمت بعد به سابقه تحقیق مواردی که عدم قطعیت را در نظر گرفتند به‌طور مختصر اشاره می‌نماییم.

### ۱-۲- شبکه زنجیره تأمین

ملیک و همکاران [۴] یک شبکه زنجیره تأمین با توجه به تصمیمات استراتژیکی و سیاسی مربوط به حمل‌ونقل و ظرفیت تسهیلات و جریان بین تسهیلات یک مسئله حیاتی در چرخه اقتصاد است طراحی کردند. اوستر و همکارانش [۵] مسائل سیاسی، اجتماعی، اقتصادی در لجستیک معکوس را بررسی کردند و یک مدل MILP چند محصولی و تک‌دوره‌ای به‌منظور حداقل سازی هزینه کل طراحی کردند. والیدی و همکاران [۶] یک مدل مؤثر را برای توزیع زنجیره تأمین سبز پایدار دو سطحی توسعه داد. آن‌ها میزان دی‌اکسید کربن منتشر شده از حمل‌ونقل را در یک مدل چندهدفه مورد بررسی قرار داده و مسئله مسیریابی را با توجه به انواع جاده‌ها و وسایل نقلیه مطرح می‌کنند. پیشوایی و ترابی [۷] یک مدل MILP چندهدفه به‌منظور حداقل سازی

یوچانگ تسائو و همکاران [۲۸] یک زنجیره تأمین پایدار سه هدفه تحت عدم قطعیت طراحی کردند و از روش فازی-تصادفی دو مرحله‌ای استفاده کردند.

علی پاپی و همکاران [۲۹] یک مدل چند دوره‌ای MILP برای زنجیره عرضه نفت خام در شرایط عدم قطعیت با استفاده از رویکرد استوار امکانی به منظور حداکثر سازی سود حاصل از تولید و فروش نفت خام طراحی کردند.

مجتبی فرخ و همکاران [۳۰] یک مدل غیرخطی برای شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در شرایط عدم قطعیت ترکیبی با استفاده از مفاهیم برنامه‌ریزی با محدودیت‌های اعتبار و میانگین انحراف مطلق و با رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی-فازی-استوار طراحی کردند.

محمد سعید جبل عاملی و همکاران [۳۱] یک مدل چندهدفه در شرایط عدم قطعیت برای سیستم لجستیک امداد با استفاده از رویکرد فازی تعاملی ارائه کردند.

محدثه کلانتری و میر سامان پیشوایی [۳] یک مدل MILP چندهدفه برای زنجیره تأمین دارو به منظور کاهش هزینه‌های لجستیک و افزایش سطح رضایت از انتخاب تأمین‌کنندگان با رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استوار طراحی کردند.

مهدی علینقیان و مریم راه‌افروز [۳۲] یک مدل چندهدفه MINLP برای مکانیابی لجستیک امداد با استفاده از محدودیت شانس پایدار به منظور مقاوم‌سازی مراکز توزیع امداد و با رویکرد برنامه‌ریزی امکانی طراحی کردند و با روش lp-metric مدل را حل کردند.

زارعیان جهرمی و همکاران [۳۳] یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار مدل بهینه‌سازی ارائه کردند [۸].

جاوید قهرمانی و همکاران [۳۴] یک مدل تخصیص و مکانیابی MINLP به منظور طراحی زنجیره تأمین سبز حلقه بسته طراحی کردند و عدم قطعیت را با برنامه‌ریزی ریاضی فازی استوار در نظر گرفتند و با الگوریتم بهینه‌سازی وال مدل را حل کردند.

گورکم امیرحسین اقلو و علی اکیکی [۳۵] یک مدل به منظور انتخاب تأمین‌کننده با توجه به میزان تخفیف در زنجیره تأمین ارائه کردند. همچنین تأمین‌کنندگان را با الگوریتم‌های تکرارشونده مکانیابی پویا کردند.

در این مقاله یک مدل چند محصولی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته طراحی شده است و علاوه بر تصمیم‌گیری در مورد تخصیص مکانیابی، انتخاب یک حالت حمل‌ونقل برای انتقال محصولات در زنجیره و انتخاب تجهیزات تولیدی به‌عنوان یک تصمیم مهم در این مقاله در نظر گرفته شده است. از این‌رو، محدودیت‌ها و متغیرهای جدیدی به مدل اضافه می‌گردد. همچنین انتشار کربن ناشی از حمل‌ونقل و فرایند تولید و استقرار تسهیلات به‌عنوان یک مسئله زیست‌محیطی در نظر گرفته شده است که با استفاده از نرخ مالیات کربن، که امروزه بحث مهمی برای کنترل انتشار کربن در بسیاری از

عملکرد تأمین‌کنندگان قطعات و به حداقل رساندن انتشار کربن مربوط به حمل‌ونقل است. عادل آذر و همکاران [۱۶] مدل چندهدفه استوار-فازی را برای انتخاب‌کنندگان قطعات در شرکت ایران خودرو بررسی کردند. آن‌ها در تحقیق خود بیان کردند که برخی از پارامترهای مدل به‌صورت متغیر تصادفی است که در بازه‌ی متقارن نوسان می‌کند. پیشوایی و همکاران [۱۷] یک مدل برنامه‌ریزی امکانی استوار برای طراحی شبکه‌ی زنجیره تأمین با در نظر گرفتن مسئولیت اجتماعی ارائه کردند. آن‌ها یک رویکرد جدید برای برنامه‌ریزی استوار پیشنهاد کردند و مدل خود را تحت رویکردهای مختلف برنامه‌ریزی امکانی استوار اجرا و عملکرد این رویکردها را با یکدیگر مقایسه کردند. زهیری و همکاران [۱۸] یک مدل جدید برنامه‌ریزی امکانی استوار برای تخصیص و مکانیابی مراکز پیوند اعضا تحت عدم قطعیت برخی از داده‌ها ارائه کرده‌اند. آن‌ها از حداقل سازی هزینه‌های کل جهت بالا بردن تأثیر طراحی شبکه‌ی موردنظرشان استفاده کرده‌اند؛ و کارایی مدل خود را براساس زنجیره تأمین پیوند اعضای ایران بررسی کرده‌اند. آیهز و همکاران [۱۹] یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای برای یک شبکه لجستیک معکوس را با در نظر گرفتن عدم قطعیت مقدار بازگشت، ضریب پیوستگی و هزینه حمل‌ونقل به‌منظور به حداقل رساندن هزینه کل و به حداکثر رساندن سود ارائه کردند.

سلما و همکاران [۲۰] یک مدل MILP عمومی برای شبکه CLSC چندمنظوره با توجه به عدم قطعیت تقاضای محصول پیشنهاد کردند. رضانی و همکارانش [۲۱] یک مدل MILP به‌منظور حداکثر سازی سود یک شبکه حلقه بسته طراحی کردند. این مدل یک مدل چند محصولی و چندمرحله‌ای با تقاضای غیرقطعی و نرخ بازگشت بود. آن‌ها از الگوریتم آزادسازی سناریو در مدل پیشنهادی استفاده کردند.

زبالوس و همکارانش [۲۲] یک مدل MILP تصادفی که چند دوره‌ای و چند محصولی بود را با در نظر گرفتن عرضه و تقاضای غیرقطعی طراحی کردند.

سبولان و همکارانش [۲۳] یک مدل چندهدفه و چندمرحله‌ای و چند محصولی MILP را با حداقل سازی هزینه کل ارائه کردند و از مدل برنامه‌ریزی فازی استفاده کردند.

یو و وانگ [۲۴] یک مدل بهینه‌سازی دو معیاره را برای شبکه‌های متمرکز زنجیره تأمین زیست‌محیطی طراحی کرده و آن را با استفاده از روش  $\epsilon$ -constraint احتمالات فازی ارائه کردند. وانگ و هسو [۲۵] نیز رویکرد احتمالی فازی را برای مدل‌سازی مسئله تخصیص حلقه بسته با استفاده از تابع هدف مربوط به حمل‌ونقل، عملیات، کمبود و هزینه اضافی مورد استفاده قرار داد. پینتو وارا و همکاران [۲۶] برنامه‌ریزی خطی متقارن فازی برای توابع دو هدفه که برای برنامه‌ریزی زنجیره تأمین استفاده می‌شود را اعمال کردند.

صفایی و همکاران [۲۷] یک CLSC برای شبکه بازیافت مقوا را تحت عدم اطمینان تقاضا برای به حداکثر رساندن سود کلی فرموله کردند. آن‌ها از رویکرد بهینه‌سازی استوار در مدل پیشنهاد شده MILP برای مقابله با عدم اطمینان استفاده کردند.

محصولات قابل بازیافت به مراکز تولید و بازیابی و محصولات غیرقابل بازیافت به مراکز ضایعات ارسال می‌شود. در این مسئله علاوه بر اهداف اقتصادی، جنبه‌های زیست‌محیطی مانند نوع تکنولوژی و روش حمل‌ونقل را در نظر می‌گیرد. همچنین در این مقاله فرض می‌شود که عوامل زیر منبع اصلی انتشار کربن دی‌اکسید در مدل هستند:

- ۱- روش‌های حمل‌ونقل، وزن و سرعت پارامترهای مهم در میزان انتشار کربن هستند.
- ۲- تکنولوژی؛ بسته به تکنولوژی به کار گرفته شده در فرایند تولید میزان انتشار کربن متفاوت است.

### ۱-۲- مفروضات مدل

- ۱- مدل طراحی شده برای زنجیره تأمین سبز حلقه بسته یک مدل تک هدفه و چند محصولی است.
- ۲- مکان‌های بالقوه‌ای برای مراکز تولید، مراکز توزیع و مراکز جمع‌آوری و بازرسی در نظر گرفته شده‌است.
- ۳- برای تطابق بیشتر با محیط صنعتی واقعی بعضی از پارامترهای مدل از جمله ظرفیت کارخانه‌ها و مراکز توزیع، مراکز جمع‌آوری و بازرسی، تقاضا، میزان انتشار کربن ناشی از تولید، حمل‌ونقل و استقرار و هزینه‌های متغیر تولید غیرقطعی در نظر گرفته شده‌است. با توجه به فرضیات فوق تصمیمات مهمی برای تعیین مکان تسهیلات در شبکه، تخصیص مشتریان به تسهیلات، تعیین روش حمل‌ونقل، ظرفیت تسهیلات، میزان تولید محصولات در مراکز تولید و جریان بین تسهیلات در این مقاله در نظر گرفته می‌شود این مقاله مربوط به کارخانه تولید کمر بند ایمنی خودرو می‌باشد که برای صنایع مشابه هم کاربرد دارد.

### ۲-۲- اندیس‌ها

- I: مکان‌های کاندید مراکز تولید و بازیابی  
 J: مکان‌های کاندید مراکز توزیع  
 K: مکان‌های کاندید مراکز جمع‌آوری و بازرسی  
 D: مراکز ثابت ضایعات  
 C: مناطق ثابت بازار  
 I: سطح ظرفیت مراکز تولید و بازیابی  
 Q: سطح ظرفیت مراکز توزیع  
 R: سطح ظرفیت مراکز جمع‌آوری و بازرسی  
 h: انواع تکنولوژی  
 V: روش‌های حمل‌ونقل  
 P: انواع محصولات

### ۳-۲- پارامترها

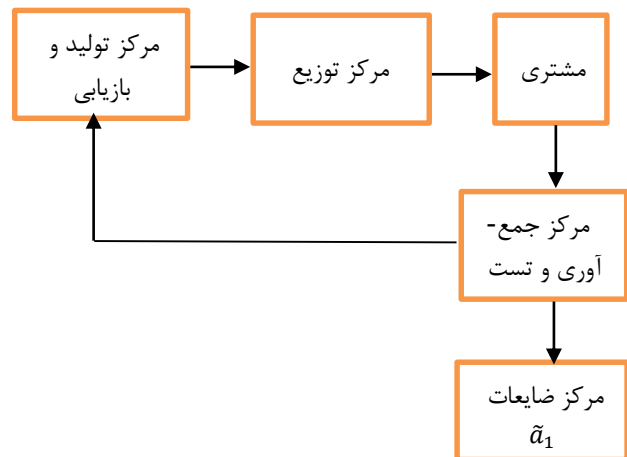
- هزینه ثابت استقرار مراکز تولید و بازیابی در مکان  $i$  با سطح ظرفیت  $I$  و تکنولوژی  $h$   $f_{ih}^1$   
 هزینه ثابت استقرار مراکز توزیع در مکان  $j$  با سطح ظرفیت  $Q$   $f_j^{pq}$   
 هزینه ثابت استقرار مراکز جمع‌آوری و بازرسی در مکان  $k$  با سطح ظرفیت  $r$   $f_k^{rr}$

کشورها می‌باشد، میزان کربن منتشر شده را حداقل می‌کنیم. در این مقاله ابتدا کالاها از کارخانه به مراکز توزیع و پخش ارسال می‌گردد و سپس از مراکز توزیع به دست خرده‌فروشان یا مشتریان می‌رسد. در صورتی که کالا مشکل داشته باشد به مرکز تست و بازرسی ارسال می‌گردد و اگر در آنجا تشخیص داده شد که محصول به کلی معیوب است و جای بازیابی ندارد به مراکز ضایعات انتقال داده می‌شود در غیر این صورت به مراکز تولید و بازیابی مجدد ارسال می‌شود. در نهایت به منظور بهینه‌سازی میزان انتشار کربن و تخصیص مکان یک مدل ارائه می‌شود.

ساختار مقاله به این صورت سازمان‌دهی شده است که در بخش دوم مسئله موردنظر به همراه متغیرها و پارامترهای مربوط به آن تشریح می‌شود و در بخش سوم مدل ریاضی مسئله بر اساس رویکرد محدودیت شانس توسعه داده می‌شود. در بخش چهارم تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از حل مدل ارائه می‌شود و در نهایت در بخش پنجم نتیجه‌گیری و جهت‌های تحقیقات آتی تشریح می‌شود.

### ۲- تعریف مسئله

در شکل شماره (۱) مراحل تصمیم‌گیری و تعریف مسئله ارائه شده است.



شکل (۱): زنجیره تأمین حلقه بسته

در شکل (۱) مدل‌سازی مفهومی شبکه زنجیره تأمین سبز ارائه شده است. در شبکه لجستیک چندمرحله‌ای و چند محصولی با تقاضای غیرقطعی را طراحی می‌کنیم. این مدل شامل چهار سطح با جریان رو به جلو (مراکز تولید/بازیابی - مراکز توزیع - مشتری/بازار) و سه سطح با جریان معکوس (مشتری - مراکز جمع‌آوری - مراکز ضایعات) می‌باشد. در جریان مستقیم محصولات نهایی از مراکز تولید از طریق مراکز توزیع به منظور تأمین نیاز مشتری به بازارها ارسال می‌شود. در جریان برگشت به عقب محصولات بازگشتی از مشتریان در صورت نقص محصول به مراکز جمع‌آوری برای تست و بازرسی ارسال می‌شود. پس از بازرسی کیفیت محصولات بازگشتی، آن‌ها را به دودسته قابل بازیافت و غیرقابل بازیافت (ضایعات) تقسیم می‌کنند.

میزان انتشار کربن برای حمل واحد محصول p از مرکز جمع‌آوری k به مرکز بازیابی i با استفاده از روش حمل‌ونقل v	$\widetilde{p\bar{c}}_{pkiv}$	هزینه تولید یک واحد محصول p در مرکز تولید i با تکنولوژی h	$\widetilde{p\bar{c}}_{pih}$
میزان انتشار کربن برای حمل واحد محصول p از مرکز جمع‌آوری k به مرکز ضایعات d با استفاده از روش حمل‌ونقل v	$\widetilde{p\bar{c}}'_{pkdv}$	هزینه فرایند بازیابی هر واحد محصول p در مرکز بازیابی i	$\widetilde{R\bar{C}}_{pi}$
ظرفیت مرکز تولید i برای تولید یک واحد محصول p	$\widetilde{c\bar{a}p}_{pi}$	هزینه فرایند توزیع هر واحد محصول p در مرکز توزیع j	$\widetilde{D\bar{C}}_{pj}$
ظرفیت مرکز جمع‌آوری k برای هر واحد محصول p	$\widetilde{c\bar{a}p}'_{pk}$	هزینه فرایند جمع‌آوری و بازرسی هر واحد محصول p در مرکز جمع‌آوری k	$\widetilde{C\bar{C}}_{pk}$
ظرفیت مرکز توزیع j برای هر واحد محصول p	$\widetilde{c\bar{a}p}''_{pj}$	هزینه فرایند ضایعات هر واحد محصول p در مرکز ضایعات d	$\widetilde{d\bar{i}sc}_{pd}$
ظرفیت مرکز ضایعات d برای هر واحد محصول p	$\widetilde{c\bar{a}p}'''_{pd}$	هزینه حمل‌ونقل هر واحد محصول p برای انتقال کالا از مرکز تولید i به مرکز توزیع j با روش v	$\widetilde{V\bar{C}}_{pijv}$
میزان تقاضای منطقه بازار c برای هر واحد محصول p	$\widetilde{dem}_{pc}$	هزینه حمل‌ونقل هر واحد محصول p برای انتقال کالا از مرکز توزیع j به منطقه بازار c با روش v	$\widetilde{V\bar{C}}'_{pjcv}$
میانگین درصدی از محصولات p که از مناطق بازار بازگردانده می‌شود	$\gamma_{pc}$	هزینه حمل‌ونقل هر واحد محصول p برای انتقال کالا از مرکز توزیع j به منطقه بازار c بازرسی	$\widetilde{V\bar{C}}''_{pckv}$
میانگین درصدی از محصولات p بازگردانده شده از مناطق بازار که غیرقابل بازیافت هستند.	$\varphi_{pc}$	هزینه حمل‌ونقل هر واحد محصول p برای انتقال کالا از مرکز جمع‌آوری و بازرسی k به مرکز بازیابی i با روش v	$\widetilde{V\bar{C}}'''_{pkiv}$
<b>۲-۴- متغیرهای تصمیم‌گیری</b>			
مقدار محصول p که در مرکز تولید و بازیابی i با تکنولوژی h تولید می‌شود	$PR_{pih}$	هزینه حمل‌ونقل هر واحد محصول p برای انتقال کالا از مرکز جمع‌آوری و بازرسی k به مرکز ضایعات d با روش v	$\widetilde{V\bar{C}}''''_{pkdv}$
مقدار محصول p که از مرکز تولید و بازیابی i به مرکز توزیع j با روش حمل‌ونقل v انتقال می‌یابد	$HP_{pijv}$	میزان انتشار کربن برای استقرار مراکز تولید i با سطح ظرفیت l و تکنولوژی h	$\widetilde{ex}^l_{ih}$
مقدار محصول p که از مرکز توزیع j به مناطق مشتري c با روش حمل‌ونقل v انتقال می‌یابد	$HP'_{pjcv}$	میزان انتشار کربن برای استقرار مراکز توزیع j با سطح ظرفیت q	$\widetilde{ex}^q_j$
مقدار محصول p که از مناطق تقاضا c به مرکز جمع‌آوری k با روش حمل‌ونقل v انتقال می‌یابد	$HBP_{pckv}$	میزان انتشار کربن برای استقرار مراکز جمع‌آوری و بازرسی k با سطح ظرفیت r	$\widetilde{ex}^r_k$
مقدار محصول غیرقابل بازیافت p که از مرکز جمع‌آوری k به مرکز ضایعات d با روش حمل‌ونقل v انتقال می‌یابد	$HBP'_{pkdv}$	نرخ مالیات کربن	$\delta$
مقدار محصول قابل بازیافت p که از مرکز جمع‌آوری k به مرکز تولید و بازیابی i با روش حمل‌ونقل v انتقال می‌یابد	$HBP''_{pkiv}$	میزان انتشار کربن برای تولید هر واحد محصول p در مرکز تولید i با تکنولوژی h	$\widetilde{e\bar{c}}_{pih}$
متغیر باینری است که در صورت احداث مرکز تولید و بازیابی در مکان i با سطح ظرفیت l و تکنولوژی h مقدار ۱ می‌گیرد و در غیر این صورت مقدار ۰ می‌گیرد	$x^l_{ih}$	میزان انتشار کربن برای بازیابی هر واحد محصول p در مرکز تولید و بازیابی i با تکنولوژی h	$\widetilde{r\bar{e}c}_{pih}$
متغیر باینری است که در صورت احداث مرکز توزیع در مکان j با سطح ظرفیت q مقدار ۱ می‌گیرد و در غیر این صورت مقدار ۰ می‌گیرد	$y^q_j$	میزان انتشار کربن برای حمل واحد محصول p از مرکز تولید i به مرکز توزیع j با استفاده از روش حمل‌ونقل v	$\widetilde{t\bar{e}c}_{pijv}$
متغیر باینری است که در صورت احداث مرکز جمع‌آوری و بازرسی در مکان k با سطح ظرفیت r مقدار ۱ می‌گیرد و در غیر این صورت مقدار ۰ می‌گیرد.	$y^r_k$	میزان انتشار کربن برای حمل واحد محصول p از مرکز توزیع j به منطقه تقاضا c با استفاده از روش حمل‌ونقل v	$\widetilde{t\bar{e}c}'_{pjcv}$
		میزان انتشار کربن برای حمل واحد محصول p از منطقه بازار c به مرکز جمع‌آوری k با استفاده از روش حمل‌ونقل v	$\widetilde{t\bar{e}c}''_{pckv}$

۵-۲- فرمول ریاضی مسئله

بر اساس مفروضات، پارامترها و متغیرهای تصمیم، مدل ریاضی مسئله به صورت زیر خواهد بود:

$$\sum_q y_j^q \leq 1 \quad \forall j \quad (3)$$

$$\sum_r y_k^r \leq 1 \quad \forall k \quad (4)$$

محدودیت‌های ظرفیت:

$$RP_{pih} \leq \sum_l x_{ih}^l \times \widehat{cap}_{lu} \quad \forall p,i,h \quad (5)$$

$$\sum_i \sum_v HP_{pijv} \leq \sum_q \widehat{cap}_{qj} \times y_j^q \quad \forall p,j \quad (6)$$

$$\sum_c \sum_v HBP_{pckv} \leq \sum_r y_k^r \times \widehat{cap}_{rk} \quad \forall p,k \quad (7)$$

$$\sum_k \sum_v HBP'_{pkdv} \leq \widehat{cap}_d \quad \forall p,d \quad (8)$$

محدودیت‌های تقاضا:

$$\sum_j \sum_v HP'_{pjcv} \geq \widehat{dem}_{pc} \quad \forall p,c \quad (9)$$

محدودیت‌های جریان:

$$\sum_h PR_{pih} = \sum_j \sum_v HP_{pijv} \quad \forall p,i \quad (10)$$

$$\sum_i HP_{pijv} \geq \sum_c HP'_{pjcv} \quad \forall p,j,v \quad (11)$$

$$\sum_k HBP_{pckv} \geq \lambda_{pc} \sum_j HP'_{pjcv} \quad \forall p,c,v \quad (12)$$

$$\sum_d HBP'_{pkdv} \geq \sum_c HBP_{pckv} \times \varphi_{pk} \quad \forall p,k,v \quad (13)$$

$$\sum_i HBP''_{pkiv} \geq (1 - \varphi_{pk}) \sum_c HBP_{pckv} \quad (14)$$

$$\forall p,k,v \quad PR_{pih}, HP_{pijv}, HP'_{pjcv}, HBP_{pckv}, HBP'_{pkdv}, HBP''_{pkiv} \in Z \quad (15)$$

$$x_{ih}^l, y_j^q, y_k^r \in \{0,1\} \quad (16)$$

تابع هدف (۱) مسئله هزینه کل را در سراسر زنجیره تأمین کمینه می‌نماید که شامل هزینه استقرار مراکز تولید و بازاریابی، هزینه ایجاد مراکز توزیع، هزینه ایجاد مراکز جمع‌آوری و بازرسی، هزینه تولید، هزینه حمل‌ونقل محصول از کارخانه‌ها به مراکز توزیع، هزینه حمل‌ونقل از مراکز توزیع به مشتریان، هزینه حمل‌ونقل از مناطق تقاضا به مراکز جمع‌آوری و بازرسی، هزینه حمل‌ونقل از مراکز جمع‌آوری به مراکز ثابت ضایعات و کارخانه‌ها به منظور بازاریابی محصول و هزینه انتشار کربن ناشی از تولید محصول، استقرار مراکز تولید و بازاریابی مراکز توزیع و مراکز جمع‌آوری و بازرسی و حمل‌ونقل محصولات بین کارخانه‌ها، مراکز توزیع، مراکز جمع‌آوری و مراکز ضایعات و مشتریان است. محدودیت‌های (۲) و (۳) و (۴) به ترتیب تضمین می‌کنند که بیشتر از یک کارخانه، مرکز توزیع و مرکز جمع‌آوری و بازرسی را نمی‌توان در یک محل داوطلب ایجاد کرد. محدودیت‌های (۵) تا (۸)

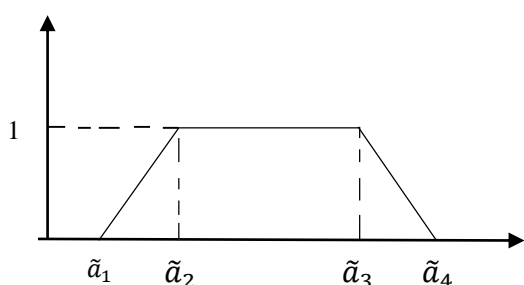
$$\begin{aligned} \min z = & \sum_i \sum_h \sum_l f_{ih}^l \times x_{ih}^l + \sum_j \sum_q f_j^q \times y_j^q \\ & + \sum_k \sum_r f_k^r \times y_k^r + \sum_p \sum_i \sum_h \widehat{PC}_{PIH} \times pR_{pih} \\ & + \sum_p \sum_k \sum_i \sum_v \widehat{RC}_{PI} \times HBP''_{PKIV} \\ & + \sum_p \sum_j \sum_c \sum_v \widehat{DC}_{PJ} \times HP'_{PJCv} \\ & + \sum_p \sum_c \sum_k \sum_v \widehat{CC}_{PK} \times HBP_{PCKv} \\ & + \sum_p \sum_k \sum_l \sum_v \widehat{DISC}_{PD} \times HBP'_{pdkv} \\ & + \sum_p \sum_i \sum_j \sum_v VC_{pijv} \times HP_{pijv} \\ & + \sum_p \sum_j \sum_c \sum_v VC'_{pjcv} \times HP'_{pjcv} \\ & + \sum_p \sum_c \sum_k \sum_v VC''_{pckv} \times HBP_{pckv} \\ & + \sum_p \sum_k \sum_i \sum_v VC'''_{pkiv} \times HBP''_{pkiv} \\ & + \sum_p \sum_k \sum_d \sum_v VC''''_{pkdv} \\ & \times HBP'_{pkdv} + \delta [ \sum_i \sum_h \sum_l \widehat{ex}_i^l \times x_{ih}^l \\ & + \sum_j \sum_q \widehat{ex}_j^q \times y_j^q + \sum_k \sum_r \widehat{ex}_k^r \\ & \times y_k^r + \sum_p \sum_i \sum_h \widehat{ec}_{pih} \times pR_{pih} \\ & + \sum_p \sum_k \sum_i \sum_h \sum_v \widehat{rec}_{pih} \\ & \times HBP''_{pkiv} \\ & + \sum_p \sum_i \sum_j \sum_v \widehat{tec}_{pijv} \times HP_{pijv} \\ & + \sum_p \sum_j \sum_c \sum_v \widehat{tec}'_{pjcv} \times HP'_{pjcv} \\ & + \sum_p \sum_c \sum_k \sum_v \widehat{tec}''_{pckv} \times HBP_{pckv} \\ & + \sum_p \sum_k \sum_i \sum_v \widehat{bec}_{pkiv} \times HBP''_{pkiv} \\ & + \sum_p \sum_k \sum_d \sum_v \widehat{bec}'_{pkdv} \times HBP'_{pkdv} \end{aligned} \quad (1)$$

محدودیت‌های تخصیص:

$$\sum_l \sum_h x_{ih}^l \leq 1 \quad \forall i \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Bx &= d \\ Sx &\leq Ny \\ Y &\in \{0,1\} \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

فرض کنید بردار  $f$  (هزینه ثابت) یک پارامتر قطعی است و بردارهای  $c$  (هزینه‌های متغیر) و  $d$  (تقاضای) و ماتریس ضرایب  $N$  (ظرفیت تسهیلات) پارامترهای نامشخص مسئله هستند. برای ساختن مدل پایه برنامه‌نویسی فازی محدودیت شانس، از عامل "مقدار قابل انتظار" برای مدل‌سازی پارامترهای غیرقطعی تابع هدف و از مقیاس  $Nec$  برای مدل‌سازی محدودیت‌های شانس استفاده کردیم. مقیاس NEC را می‌توان به‌طور مستقیم برای تبدیل محدودیت‌های شانس فازی به معادلات قطعی معادل آن‌ها استفاده کرد. در این مقاله از توزیع فازی دوزنقه‌ای در مدل استفاده شده است، زیرا می‌تواند چهار نقطه حساس  $(\tilde{a} = \tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \tilde{a}_3, \tilde{a}_4)$  را تعریف کند [۷].



شکل (۲): پارامتر فازی  $\tilde{a}$

$$\text{Min } E[Z] = E[f]y + E[\tilde{c}]x$$

**Subject to:**

$$\begin{aligned} Nec \{ Ax \geq \tilde{d} \} &\geq \alpha_m && \forall m \in M \\ Nec \{ Bx = \tilde{d} \} &\geq \alpha_m && \forall m \in M \\ Nec \{ Sx \leq \tilde{N}y \} &\geq \alpha_m && \forall m \in M \\ Y &\in \{0,1\} \\ x &\geq 0 \end{aligned} \quad (18)$$

از آنجایی که تابع هدف و محدودیت‌ها دارای پارامترهای غیرقطعی هستند و با توزیع‌های فازی در نظر گرفته شده‌اند و با توجه به این‌که محدودیت‌ها با پارامترهای غیرقطعی باید با سطح برآورده شدن حداقل  $\alpha_i$  تشکیل شوند، مدل قطعی را می‌توان به‌صورت زیر تعریف کرد:

**Objective function**

$$\text{Min } E[Z] = fy + \left( \frac{c(1)+c(2)+c(3)+c(4)}{4} \right) x$$

**Subject to:**

$$\begin{aligned} Ax &\geq (1-\alpha_m) d_{(3)} + \alpha_m d_{(4)} \\ Bx &\leq \left( \frac{\alpha_m}{2} \right) d_{(3)} + \left( 1 - \frac{\alpha_m}{2} \right) d_{(4)} \\ Bx &\geq \left( \frac{\alpha_m}{2} \right) d_{(2)} + \left( 1 - \frac{\alpha_m}{2} \right) d_{(1)} \\ Sx &\leq [(1-\alpha_m) N_{(2)} + \alpha_m N_{(1)}] Y \\ Y &\in \{0,1\} \\ x &\geq 0 \end{aligned} \quad (19)$$

با توجه به مطالب گفته شده، مدل معادل قطعی مدل ارائه شده در بخش دوم به‌صورت زیر خواهد بود:

به ترتیب ظرفیت مراکز تولید و بازیابی، مراکز توزیع، مراکز جمع‌آوری و مراکز ضایعات را تعیین می‌کنند. محدودیت (۹) تضمین می‌کند میزان تقاضا تقاضا برابر است با مقدار محصولی که از مرکز توزیع به مناطق تقاضا ارسال می‌شود. محدودیت‌های (۱۰) تا (۱۴) به ترتیب بیان می‌کنند که مقدار محصولی که تولید می‌شود در مراکز تولید به مرکز توزیع ارسال می‌شود، سپس مقدار ارسال شده به مراکز توزیع به مناطق بازار ارسال می‌گردد و در مناطق تقاضا درصدی از محصولات معیوب به مراکز بازرسی ارسال می‌گردد و در آنجا محصولات غیرقابل بازیافت به مراکز ضایعات ارسال شده و محصولات قابل بازیافت به مراکز تولید و بازیابی ارسال می‌گردد. محدودیت‌های (۱۵) و (۱۶) حدود متغیرهای تصمیم مسئله را تعیین می‌کنند.

### ۳- مدل‌های غیرقطعی

در این بخش مدل‌سازی در حالت امکانی و استوار امکانی شرح داده می‌شود.

#### ۳-۱- مدل برنامه‌ریزی امکانی محدودیت شانس

برخی از پارامترهای مدل ریاضی ارائه شده در بخش قبل دارای عدم قطعیت هستند. تا کنون رویکردهای متعددی برای مواجهه با عدم قطعیت و ریسک در مسائل بهینه‌سازی ریاضی توسعه داده شده است که از آن جمله می‌توان بهینه‌سازی تصادفی، بهینه‌سازی فازی، بهینه‌سازی استوار و رویکردهای ترکیبی را نام برد. در مدل‌های برنامه‌ریزی فازی از ضرایب اطمینان فازی و توابع عضویت برای بیان عدم قطعیت یا کمبود دانش در مورد پارامترها استفاده می‌شود و به دو دسته برنامه‌ریزی امکانی و برنامه‌ریزی منعطف تقسیم‌بندی می‌شود. در برنامه‌ریزی امکانی کمبود دانش در مورد مقادیر دقیق پارامترهای مدل با توابع توزیع امکانی با استفاده از داده‌های هدف موجود و دانش تصمیم‌گیرنده مدل‌سازی می‌شود. در برنامه‌ریزی منعطف نیز برای مهار عدم قطعیت از مقدار انعطاف‌پذیر توابع هدف و محدودیت‌ها استفاده می‌شود و مدل‌سازی براساس مجموعه‌های فازی و یا اولویت خواهد بود [۳۶-۳۷]. در این مقاله، از برنامه‌ریزی امکانی محدودیت‌های شانس برای برخورد با عدم قطعیت پارامترهای مختلف مسئله استفاده شده است. روش محدودیت شانس یکی از روش‌های اصلی حل مسائل بهینه‌سازی تحت عدم قطعیت‌های مختلف است که بر اساس آن طراح مدل اطمینان می‌یابد که احتمال برآورده شدن یک محدودیت خاص بالاتر از سطح مشخصی است. به‌عبارت‌دیگر، بر اساس آن فضا شدنی مسئله محدود می‌شود تا سطح اطمینان جواب بالا باشد. مسئله بهینه‌سازی زیر را در نظر بگیرید:

**Objective function**

$$\text{Min } Z = fy + cx$$

**Subject to:**

$$Ax \geq d$$

(17)

$$\sum_c \sum_v HBP_{pckv} \leq \sum_k y_k^r \left[ \alpha_3 * cap'_{kr(1)} + (1 - \alpha_3) * cap'_{kr(2)} \right] \quad \forall p,k \quad (26)$$

$$\sum_k \sum_v HBP_{pkdv} \leq \left[ \alpha_4 * cap'''_{d(1)} + (1 - \alpha_4) * cap'''_{d(2)} \right] \quad \forall p,d \quad (27)$$

$$\sum_j \sum_v HP'_{pjcv} \geq \left[ (1 - \alpha_5) * dem_{pc(3)} + \alpha_5 * dem_{pc(4)} \right] \quad \forall p,c \quad (28)$$

$$\sum_h PR_{pjh} = \sum_j \sum_v HP_{pijv} \quad \forall p,i \quad (29)$$

$$\sum_i HP_{pijv} \geq \sum_c HP'_{pjcv} \quad \forall p,j,v \quad (30)$$

$$\sum_k HBP_{pckv} \geq \lambda_{pc} \sum_j HP'_{pjcv} \quad \forall p,c,v \quad (31)$$

$$\sum_d HBP_{pkdv} \geq \sum_c HBP_{pckv} \times \varphi_{pk} \quad \forall p,k,v \quad (32)$$

$$\sum_i HBP''_{pkiv} \geq (1 - \varphi_{pk}) \sum_c HBP_{pckv} \quad (33)$$

$$PR_{pjh}, HP_{pijv}, HP'_{pjcv}, HBP_{pckv}, HBP'_{pkdv}, HBP''_{pkiv} \in Z \quad (34)$$

$$x_{ih}^l, y_j^q, y_k^r \in \{0,1\} \quad (35)$$

۳-۲- مدل استوار فازی

مشابه مدل امکانی محدودیت شانس، اولین بخش در تابع هدف مقدار مورد انتظار Z است. بخش دوم تابع هدف، تفاضل مقادیر حداکثر و حداقل ممکن Z براساس توزیع دوزنقه‌ای است. این روش ارزش مطلوب برای سطوح اطمینان را پیدا می‌کند و سطوح اطمینان به‌عنوان یک متغیر در نظر گرفته می‌شود. در این مدل ضریب  $\gamma$  بیانگر میزان اهمیت تفاضل مقادیر حداقل و حداکثر تابع هدف است و می‌تواند در بازه مقادیر [0,1] اختیار کند. بنابراین وجود این بخش در تابع هدف منجر به کمینه شدن حداکثر انحراف مقادیر حداکثر و حداقل بهینه مورد انتظار Z می‌شود. شایان ذکر است که این بخش استواری بهینگی جواب مسئله را کنترل می‌کند.

بخش سوم اضافه شده به تابع هدف، بیانگر سطح اطمینان هر محدودیت تصادفی است که در آن به‌عنوان جریمه انحراف مقادیر محدودیت با پارامترهای غیرقطعی است. تفاوت بین بدترین مقدار پارامتر غیرقطعی و مقدار استفاده شده در محدودیت تصادفی را نشان می‌دهد. بنابراین با استفاده از این قسمت، شرط استواری شدنی جواب‌ها برقرار خواهد شد. لازم به ذکر است که در مدل استوار امکانی ذکر شده، عبارت  $\gamma(Z_{max} - Z_{min})$  حداکثر میزان انحراف بالاترین و پایین‌ترین مقدار بهینه مورد انتظار تابع هدف را کمینه می‌کند، اما برخی موارد تصمیم‌گیرنده فقط نسبت به یکی از این دو مقدار انحراف حساسیت نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال در مدل‌های مکانیابی، ممکن است حداقل مقدار  $Z_{min}$  برای تصمیم‌گیرنده اهمیت نداشته باشد.

$$\begin{aligned} MinE[Z] = & \sum_i \sum_h \sum_l f_{ih}^l \times x_{ih}^l + \sum_j \sum_q f_j^q \times y_j^q + \sum_k \sum_r f_k^r \times y_k^r + \sum_p \sum_i \sum_h \left( \frac{PCPIH(1)+PCPIH(2)+PCPIH(3)+PCPIH(4)}{4} \right) \times PR_{pjh} + \sum_p \sum_k \sum_i \sum_v \left( \frac{PCPI(1)+PCPI(2)+PCPI(3)+PCPI(4)}{4} \right) \times HBP''_{pkiv} + \sum_p \sum_j \sum_c \sum_v \left( \frac{DCPJ(1)+DCPJ(2)+DCPJ(3)+DCPJ(4)}{4} \right) \times HP'_{pjcv} + \sum_p \sum_c \sum_k \sum_v \left( \frac{CCPK(1)+CCPK(2)+CCPK(3)+CCPK(4)}{4} \right) \times HBP_{pckv} + \sum_p \sum_k \sum_i \sum_v \left( \frac{DISCPd(1)+DISCPd(2)+DISCPd(3)+DISCPd(4)}{4} \right) \times HBP'_{pdkv} + \sum_p \sum_i \sum_j \sum_v VC_{pijv} \times HP_{pijv} + \sum_p \sum_j \sum_c \sum_v VC'_{pjcv} \times HP'_{pjcv} + \sum_p \sum_c \sum_k \sum_v VC''_{pckv} \times HBP_{pckv} + \sum_p \sum_k \sum_i \sum_v VC'''_{pkiv} \times HBP''_{pkiv} + \sum_p \sum_k \sum_d \sum_v VC''''_{pkdv} \times HBP'_{pkdv} + \delta \left[ \sum_i \sum_h \sum_l \left( \frac{ex_{ih(1)}^l + ex_{ih(2)}^l + ex_{ih(3)}^l + ex_{ih(4)}^l}{4} \right) x_{ih}^l + \sum_j \sum_q \left( \frac{ex_{j(1)}^q + ex_{j(2)}^q + ex_{j(3)}^q + ex_{j(4)}^q}{4} \right) y_j^q + \sum_k \sum_r \left( \frac{ex_{k(1)}^r + ex_{k(2)}^r + ex_{k(3)}^r + ex_{k(4)}^r}{4} \right) y_k^r + \sum_p \sum_i \sum_h \left( \frac{ec_{pjh(1)} + ec_{pjh(2)} + ec_{pjh(3)} + ec_{pjh(4)}}{4} \right) \times pR_{pjh} + \sum_p \sum_k \sum_i \sum_h \sum_v \left( \frac{rec_{pjh(1)} + rec_{pjh(2)} + rec_{pjh(3)} + rec_{pjh(4)}}{4} \right) \times HBP''_{pkiv} + \sum_p \sum_i \sum_j \sum_v \left( \frac{tec_{pijv(1)} + tec_{pijv(2)} + tec_{pijv(3)} + tec_{pijv(4)}}{4} \right) \times HP_{pijv} + \sum_p \sum_j \sum_c \sum_v \left( \frac{tec'_{pjcv(1)} + tec'_{pjcv(2)} + tec'_{pjcv(3)} + tec'_{pjcv(4)}}{4} \right) \times HP'_{pjcv} + \sum_p \sum_c \sum_k \sum_v \left( \frac{tec''_{pckv(1)} + tec''_{pckv(2)} + tec''_{pckv(3)} + tec''_{pckv(4)}}{4} \right) \times HBP_{pckv} + \sum_p \sum_k \sum_i \sum_v \left( \frac{bec_{pkiv(1)} + bec_{pkiv(2)} + bec_{pkiv(3)} + bec_{pkiv(4)}}{4} \right) \times HBP''_{pkiv} + \sum_p \sum_k \sum_d \sum_v \left( \frac{bec'_{pkdv(1)} + bec'_{pkdv(2)} + bec'_{pkdv(3)} + bec'_{pkdv(4)}}{4} \right) \times HBP'_{pkdv} \end{aligned} \quad (20)$$

$$S.t: \sum_l \sum_h x_{ih}^l \leq 1 \quad \forall i \quad (21)$$

$$\sum_j y_j^q \leq 1 \quad \forall j \quad (22)$$

$$\sum_k y_k^r \leq 1 \quad \forall k \quad (23)$$

$$PR_{pjh} \leq \sum_i x_{ih}^l \left[ \alpha_1 * cap_{li(1)} + (1 - \alpha_1) * cap_{li(2)} \right] \quad \forall p,i,h \quad (24)$$

$$\sum_i \sum_v HP_{pijv} \leq \sum_q y_j^q \left[ \alpha_2 * cap''_{jq(1)} + (1 - \alpha_2) * cap''_{jq(2)} \right] \quad \forall p,j \quad (25)$$



$$\begin{aligned}
 & +\delta_1 \left[ \sum_l \left( x_{ih}^l (cap_{li(2)} - cap_{li(1)}) \right) \right. \\
 & \quad \left. + w_{ihl} (cap_{li(1)} - cap_{li(2)}) \right] \\
 & +\delta_2 \left[ \sum_q \left( y_j^q (cap''_{jq(2)} - cap''_{jq(1)}) \right) \right. \\
 & \quad \left. + \beta_{jq} (cap''_{jq(1)} - cap''_{jq(2)}) \right] \\
 & +\delta_3 \left[ \sum_r \left( y_k^r (cap'_{kr(2)} - cap'_{kr(1)}) \right) \right. \\
 & \quad \left. + \vartheta_{kr} (cap'_{kr(1)} - cap'_{kr(2)}) \right] \\
 & +\delta_4 \left[ (1 - \alpha_4) * cap'''_{d(2)} \right. \\
 & \quad \left. + \alpha_4 * cap'''_{d(1)} - cap'''_{d(1)} \right] \\
 & +\delta_5 \left[ dem_{pc(4)} - (1 - \alpha_5) * dem_{pc(3)} \right. \\
 & \quad \left. - \alpha_5 * dem_{pc(4)} \right] \\
 & Z_{max} = f_4 * x + c_4 * y
 \end{aligned}$$

محدودیت‌های خطی شده:

$$\begin{aligned}
 PR_{pih} & \leq \sum_l (w_{ihl} * cap_{li(1)} - (x_{ihl} - w_{ihl}) * cap_{li(2)}) \quad \forall p,i,h \\
 \sum_i \sum_v HP_{pijv} & \leq \sum_q \left[ \beta_{jq} * cap''_{jq(1)} \right. \\
 & \quad \left. - (y_{jq} - \beta_{jq}) * cap''_{jq(2)} \right] \quad \forall p,j \\
 \sum_c \sum_v HBP_{pckv} & \leq \sum_r \left[ \vartheta_{kr} * cap'_{kr(1)} \right. \\
 & \quad \left. - (y'_{kr} - \vartheta_{kr}) * cap'_{kr(2)} \right] \quad \forall p,k \\
 \sum_k \sum_v HBP_{pkdv} & \leq \left[ \alpha_4 * cap'''_{d(1)} \right. \\
 & \quad \left. + (1 - \alpha_4) * cap'''_{d(2)} \right] \quad \forall p,d \\
 \sum_j \sum_v HP'_{pjcv} & \geq \left[ (1 - \alpha_5) * dem_{pc(3)} \right. \\
 & \quad \left. + \alpha_5 * dem_{pc(4)} \right] \quad \forall p,c
 \end{aligned}$$

سایر محدودیت‌ها به شکل قبل می‌باشند

#### ۴- تجزیه و تحلیل

در این بخش نتایج عددی حاصل از حل مدل بر اساس احداث سه کارخانه چندمحصولی ارائه می‌شود. شایان ذکر است که برای حل مدل از نرم‌افزار گمز استفاده شده است. سه توزیع‌کننده اصلی در شهرهای مختلف در نظر گرفته شده است. محصولات از طریق وسایل نقلیه با هزینه متفاوت انتقال می‌یابند. میزان انتشار کربن ناشی از حمل‌ونقل، تولید و استقرار به صورت تصادفی مقداردهی شده‌اند و میزان نرخ مالیات کربن ۰٫۳۵۸ در نظر گرفته شده است. مقدار به‌دست‌آمده برای تابع هدف ۱۰۰۶۱۰۷۶۳۳۲۶۶ واحد پولی است.

نمودار (۳) نیز مقایسه مقدار تابع هدف حاصل از حل مسئله را با در نظر گرفتن مقادیر مختلف  $\alpha_i$  را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با افزایش مقادیر  $\alpha_i$  دامنه محدودیت‌ها کوچک‌تر خواهد شد و در نتیجه مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که مقادیر  $\alpha_i$  به ازای  $i$  یکسان در نظر گرفته شده است.

$$\begin{aligned}
 & \min E[Z] + \gamma(Z_{max} - Z_{min}) \\
 & \quad + \delta(d_{(4)} - (1 - \alpha)d_{(3)} - \alpha d_{(4)}) \\
 & \quad + \varphi[(\beta N_{(1)} + (1 - \beta)N_{(2)} - N_{(1)})y] \\
 \text{s.t} \quad & Ax \geq (1 - \alpha)d_{(3)} + \alpha d_{(4)} \\
 & Bx \leq \left(\frac{\alpha_m}{2}\right) d_{(3)} + \left(1 - \frac{\alpha_m}{2}\right) d_{(4)} \\
 & Bx \geq \left(\frac{\alpha_m}{2}\right) d_{(2)} + \left(1 - \frac{\alpha_m}{2}\right) d_{(1)} \\
 & Sx \leq [\beta N_{(1)} + (1 - \beta)N_{(2)}]y \\
 & Tx \leq 1 \\
 & y \in \{0,1\} . x \geq 0 . 0.5 \leq \alpha, \beta \leq 1
 \end{aligned} \tag{۳۶}$$

زمانی که ضرایب فنی غیرقطعی در نظر گرفته می‌شود، باعث می‌شود که محدودیت شانس و تابع هدف در مدل استوار امکانی غیرخطی شود. به‌منظور جلوگیری از پیچیدگی مدل و خطی سازی مدل با استفاده از روش گاپتی و همکاران [۳۸] یک متغیر جدید و چند محدودیت به مدل اضافه می‌نماییم. همچنین طرف راست محدودیت ۲۴-۲۶ را با استفاده از روش پیشوایی و همکاران [۱۷] خطی سازی می‌نماییم.

#### ۳-۳- ضرب یک متغیر صفر و یک در یک متغیر پیوسته

اگر  $\beta$  یک متغیر پیوسته و  $y$  یک متغیر صفر و یک باشد برای خطی سازی حاصل ضرب این دو متغیر یک متغیر کمکی  $r$  به‌گونه‌ای تعریف می‌کنیم که داشته باشیم:

$$r = \beta * y \tag{۳۷}$$

برای خطی سازی مدل به ازای هر محدودیت غیرخطی سه محدودیت به‌صورت زیر به مدل اضافه می‌گردد [۳۵].

$$r \leq M * y \tag{۳۸}$$

$$r \leq \beta \tag{۳۹}$$

$$r \geq \beta - M(1 - y) \tag{۴۰}$$

سه محدودیت اضافه شده به مدل تضمین می‌کنند که اگر  $y$  صفر باشد، متغیر کمکی  $r$  مساوی صفر خواهد بود. در غیر این صورت، اگر  $y$  مساوی یک باشد، متغیر کمکی  $r$  مساوی  $\beta$  خواهد بود همچنین  $M$  یک عدد بزرگ است. محدودیت‌های مذکور با استفاده از روش گاپتی و همکاران [۳۶] خطی شده‌اند.

مدل استوار امکانی خطی شده به‌صورت زیر خواهد شد:

$$\begin{aligned}
 & \min E[Z] + \gamma(Z_{max} - E[Z]) \\
 & \quad + \delta(d_{(4)} - (1 - \alpha)d_{(3)} - \alpha d_{(4)}) \\
 & \quad + \varphi[(rN_{(1)} + (y - r)N_{(2)} - yN_{(1)})] \\
 \text{s.t:} \quad & Ax \geq (1 - \alpha)d_{(3)} + \alpha d_{(4)} \\
 & Bx \leq \left(\frac{\alpha_m}{2}\right) d_{(3)} + \left(1 - \frac{\alpha_m}{2}\right) d_{(4)} \\
 & Bx \geq \left(\frac{\alpha_m}{2}\right) d_{(2)} + \left(1 - \frac{\alpha_m}{2}\right) d_{(1)} \\
 & Sx \leq [rN_{(1)} + (y - r)N_{(2)}] \\
 & Tx \leq 1 \\
 & y \in \{0,1\} . x \geq 0 . 0.5 \leq \alpha, \beta \leq 1
 \end{aligned} \tag{۴۱}$$

تابع هدف و محدودیت‌های خطی شده به شرح زیر است:

$$\min E[Z] + \gamma(Z_{max} - E[Z])$$

جدول (۲): تحلیل حساسیت بر پارامتر  $\delta_5$  (ضریب جریمه)

$\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4 = 100$					
$\gamma = 0.6$					
$\delta_5 = 100$		$\delta_5 = 1000$		$\delta_5 = 10000$	
Run time	0.353	Run time	0.297	Run time	0.497
E(Z)	$4.4812 \cdot 10^8$ *	E(Z)	$4.4812 \cdot 10^8$ *	E(Z)	$4.4812 \cdot 10^8$ *
$\alpha_1$	1	$\alpha_1$	1	$\alpha_1$	1
$\alpha_2$	1	$\alpha_2$	1	$\alpha_2$	1
$\alpha_3$	1	$\alpha_3$	1	$\alpha_3$	1
$\alpha_4$	1	$\alpha_4$	1	$\alpha_4$	1
$\alpha_5$	1	$\alpha_5$	1	$\alpha_5$	1

در جدول ۳ با تغییر در  $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ ، تابع هدف بدون تغییر باقی می‌ماند و نرخ تغییر در حداقل رضایتمندی ثابت باقی می‌ماند و برابر با ۱ است.

جدول (۳): تحلیل حساسیت بر پارامتر  $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ 

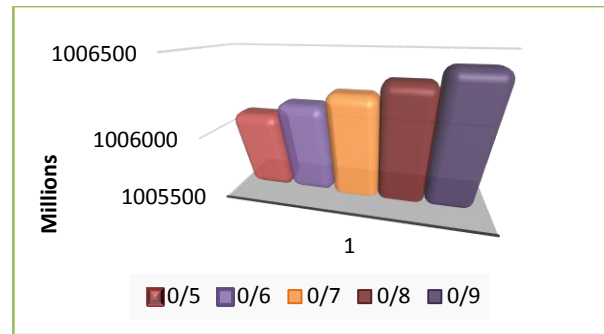
(ضریب جریمه)					
$\delta_5 = 100$					
$\gamma = 0.6$					
$\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4 = 100$		$\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4 = 1000$		$\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4 = 10000$	
Run time	0.353	Run time	0.197	Run time	0.199
E(Z)	$4.4812 \cdot 10^8$ *	E(Z)	$4.4812 \cdot 10^8$ *	E(Z)	$4.4812 \cdot 10^8$ *
$\alpha_1$	1	$\alpha_1$	1	$\alpha_1$	1
$\alpha_2$	1	$\alpha_2$	1	$\alpha_2$	1
$\alpha_3$	1	$\alpha_3$	1	$\alpha_3$	1
$\alpha_4$	1	$\alpha_4$	1	$\alpha_4$	1
$\alpha_5$	1	$\alpha_5$	1	$\alpha_5$	1

## ۵- نتیجه‌گیری

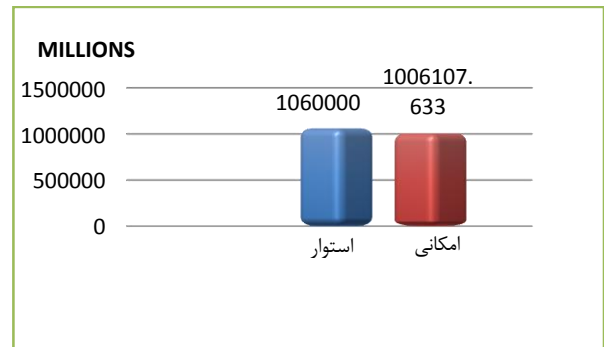
در این مقاله طراحی شبکه یک زنجیره تأمین سبز حلقه بسته با در نظر گرفتن پارامترهای زیست‌محیطی و عدم قطعیت پارامترها مورد توجه قرار گرفت. در این مدل کمینه سازی هزینه متغیر تولید محصول و هزینه حمل و نقل محصول با در نظر گرفتن پارامترهای انتشار کربن در سراسر زنجیره تأمین و تعیین مکان و ظرفیت بهینه هر کدام از تسهیلات میسر شد. برای برخورد با عدم قطعیت پارامترها، از رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استوار استفاده شد. نتایج حاصل از مدل می‌تواند به سازمان‌ها جهت اتخاذ تصمیم‌های مؤثرتر و آگاهانه‌تر در مواجهه با عدم قطعیت‌ها و طراحی یک زنجیره تأمین با در نظر گرفتن الزامات زیست‌محیطی کمک کند.

همچنین مقدار تابع هدف در یک حالت قطعی همیشه بهتر از حالت استوار است و هزینه‌های کمتری را در سیستم اعمال می‌کند. از سوی دیگر، هنگامی که این مدل در حالت استوار قرار دارد، به تصمیم‌گیرنده اطمینان می‌دهد که وضعیت نامشخصی وجود دارد که در هنگام اعمال در سیستم می‌تواند به افزایش هزینه‌ها منجر شود.

در نظر گرفتن اهداف اجتماعی، ترجیحات مشتری و تخفیف به منظور افزایش انگیزه خرید در مشتری می‌تواند به عنوان یک رویکرد برای تحقیقات آتی مطرح شود. کاربرد دیگر روش‌های برخورد با

شکل (۳): تغییرات تابع هدف نسبت به مقادیر  $\alpha_i$ 

در شکل (۴) مقدار تابع هدف مدل برنامه‌ریزی امکانی فازی تحت بیشترین سطح اطمینان  $\alpha = 0.9$  از مقدار تابع هدف مدل برنامه‌ریزی امکانی استوار تحت کمترین سطح جریمه  $\delta_i = 1$  کمتر خواهد شد.



شکل (۴): مقایسه تابع هدف دو مدل

همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، با افزایش  $\gamma$ ، مقدار تابع هدف به صورت صعودی افزایش می‌یابد و محدودیت‌ها کاملاً رضایت دارند و آلفا مقدار یک گرفته است.

جدول (۱): تحلیل حساسیت بر پارامتر  $\gamma$  (ضریب وزن)

$\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5 = 100$					
$\gamma = 0.3$		$\gamma = 0.6$		$\gamma = 0.9$	
Run time	0.412	Run time	0.353	Run time	0.297
E(Z)	$3.0933 \cdot 10^8$ *	E(Z)	$4.4812 \cdot 10^8$ *	E(Z)	$5.8691 \cdot 10^8$ *
$\alpha_1$	1	$\alpha_1$	1	$\alpha_1$	1
$\alpha_2$	1	$\alpha_2$	1	$\alpha_2$	1
$\alpha_3$	1	$\alpha_3$	1	$\alpha_3$	1
$\alpha_4$	1	$\alpha_4$	1	$\alpha_4$	1
$\alpha_5$	1	$\alpha_5$	1	$\alpha_5$	1

همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، با افزایش  $\delta_5$ ، در ارزش مقدار تابع هدف تغییر ایجاد نمی‌کند و حداقل سطوح رضایت شبیه جدول قبلی، به‌طور کامل ارائه شده است.

- Journal of Cleaner Production*. 196: 1549-1565
- [14] Talaei, M., Moghaddam, B.F., Pishvae, M.S., Bozorgi-Amiri, A., Gholamnejad, S., (2016). "A robust fuzzy optimization model for carbon-efficient closed-loop supply chain network design problem: a numerical illustration in electronics industry", *International Journal of J. Cleaner Production*, 113: 662-673.
- [15] Govindan, K., Darbari, J.D., Agarwal, V., Jha, P.C., (2017). "Fuzzy multi-objective approach for optimal selection of suppliers and transportation decisions in an eco-efficient closed loop supply chain network", *International Journal of Cleaner Production*, 165: 1598-1619.
- [16] Rabieh M., Azar A., Modarres Yazdi M., Fetanat Fard Haghghi M. (2011) "Designing a multi-objective robust multi-sourcing mathematical model, An approach for reducing the risk of supply chain (Case study: Supply Chain of IRAN KHODRO Company)"; *Industrial Management's Perspective*, 1: 57-77, (in Persian).
- [17] Pishvae, M.S., Razmi, J., and Torabi, S., (2012). "Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach", *Fuzzy sets and systems*, 206: 1-20
- [18] Zahiri, B., Tavakkoli Moghaddam, R., Pishvae, M.S., (2014). "A robust possibilistic programming approach to multi-period location-allocation of organ transplant centers under uncertainty", *Computers & Industrial Engineering* 74: 139-148.
- [19] Ayvaz, B., Bolat, B., Aydın, N., (2015). "Stochastic reverse logistics network design for waste of electrical and electronic equipment", *Resources Conservation and Recycling*. 104: 391-404.
- [20] Salema, M.I.G., Barbosa-Povoa, A.P., Novais, A.Q., (2007). "An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty", *Europe Journal of Operation Research*, 179 (3): 1063-1077.
- [21] Ramezani, M., Bashiri, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., (2013). "A robust design for a closed-loop supply chain network under an uncertain environment", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(5-8): 825-843.
- [22] Zeballos, L.J., Mendez, C.A., Barbosa-Povoa, A.P., Novais, A.Q., (2014). "Multi-period design and planning of closed-loop supply chains with uncertain supply and demand", *Computers & Chemical Engineering*, 66: 151-164.
- [23] Subulan, K., Tas, an, A.S., Baykasoglu, A., (2015). "A fuzzy goal programming model to strategic planning problem of a lead/acid battery closed-loop supply chain", *Journal of Manufacturing System*, 37: 243-264.
- [24] Xu, J., Yao, L., Zhao, X., (2011). "A multi-objective chance constrained network optimal model with random fuzzy coefficients and its application to logistics distribution center location problem". *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 10: 255-285.
- [25] Wang, H.F., Hsu, H.W., (2012). "A possibilistic approach to the modeling and resolution of uncertain closed-loop logistics", *Fuzzy Optimization and*
- عدم قطعیت موجود در پارامترهای مدل نظیر برنامه‌ریزی تصادفی نیز می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد برای تحقیقات آتی در نظر گرفته شود.
- ### مراجع
- [1] Ramezani, M., Kimiagari, A.M., Karimi, B., Hejazi, T.H., (2014). "Closed-loop supply chain network design under a fuzzy environment", *Knowledge-Based Systems*, 59: 108-120.
- [2] Alem, D. J., Morabi, R., (2012). "Production planning in furniture settings via robust optimization", *Computers & Operations Research*, 39(2): 139-150.
- [۳] کلانتری، پیشوایی، (۱۳۹۵). "یک مدل برنامه‌ریزی استوار امکانی برای برنامه‌ریزی اصلی زنجیره تامین دارو"، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۴(۷): ۴۹-۶۷.
- [4] Melnyk, S.A., Narasimhan, R., Decampos, H.A., (2014). "Supply chain design: issues, challenges, 33 frameworks and solutions", *International Journal of Production Research*, 52 (7): 1887-1896.
- [5] 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*, 54 (8): 890-907
- [6] Validi, S., Bhattacharya, A., Byrne, P.J., (2015). "A solution method for a two-layer sustainable supply chain distribution model", *Computers & Operations Research*, 54: 204-217
- [7] Pishvae, M.S., Torabi, S.A., (2010). "A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty", *Fuzzy Sets and Systems*, 161(20): 2668-2683.
- [8] Wang, C., Wang, W., Huang, R., (2017). "Supply chain enterprise operations and government carbon tax decisions considering carbon emissions", *Journal of Cleaner Production*, 152: 271-280.
- [9] Nurjanni, K.P., Carvalho, M.S., Costa, L., (2017). "Green supply chain design: a mathematical modeling approach based on a multi-objective optimization model", *International Journal of Production Economic*, 183: 421-32.
- [10] Mohtashami, Z., Aghsami, A., Jolai, F. (2020). "A green closed loop supply chain design using queuing system for reducing environmental impact and energy consumption", *International Journal of Cleaner Production*, 242: 118452-118471.
- [11] Zhen, L., Huang, L., Wencheng W., (2019). "Green and Sustainable Closed-Loop Supply Chain Network Design under Uncertainty", *International Journal of Cleaner Production*, 227: 1195-1209.
- [12] Matsumoto, M., Chinen, K., Endo, H. (2018). "Remanufactured auto parts market in Japan: Historical review and factors affecting green purchasing behavior", *International Journal of Cleaner Production*, 172: 4494-4505.
- [13] Reza Sadeghi Rad, Nasim Nahavandi., (2018). "A novel multi-objective optimization model for integrated problem of green closed loop supply chain network design and quantity discount". *International*

- [۳۲] علینقیان، مهدی، ره افروز، مریم. (۱۳۹۶). "مدلسازی پایدار لجستیک امداد در شرایط وجود عدم قطعیت با استفاده از مدل امکانی محدودیت شانس"، نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید دانشگاه علم و صنعت ایران، ۲۸(۲): ۲۵۶-۲۷۰.
- [۳۳] زارعیان جهرمی، حسین، فلاح نژاد، محمد صابر، صادقیه، احمد، احمدی یزدی، احمد. (۱۳۹۳). "مدل بهینه سازی چند هدفه استوار در طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار"، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۲(۳): ۱۱۱-۹۳.
- [34] Ghahremani-Nahr, J., Kian, R., Sabet, E. (2019). "A robust fuzzy mathematical programming model for the closed-loop supply chain network design and a whale optimization solution algorithm", *Expert Systems with Applications*, 116: 454-471.
- [35] Emirhüseyinoğlu, G., Ekici, A., (2019). "Dynamic facility location with supplier selection under quantity discount", *Computers & Industrial Engineering*, 134: 64-74.
- [36] Pishvae, M.S., Rabbani, M., Torabi, S.A., (2011). "A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty", *Applied Mathematical Modelling* 35: 637-649.
- [37] Liu, B., Iwamura, K., (1998). "Chance constrained programming with fuzzy parameters", *Fuzzy Sets and Systems*, 94: 227-237.
- [38] Gupte, A., Ahmmed, S., Cheon, M.S., Dey, S., (2013). "Solving Mixed Integer Bilinear Problems Using MILP Formulation", *SIMA Journal on optimization*, 23(2): 721-744.
- Decision Making* 11: 177-208.
- [26] Pinto-Varela, T., Barbosa-Povoa, A.P.F.D., Novais, A.Q., (2011). "Bi-objective optimization approach to the design and planning of supply chains: Economic versus environmental performances", *Computers & Chemical Engineering* 35, 1454-1468.
- [27] Safaei, A.S., Roozbeh, A., Paydar, M.M., (2017). "A robust optimization model for the design of a cardboard closed-loop supply chain", *International Journal of Cleaner Production*, 166: 1154-1168.
- [28] Yu-Chung Tsao, Vo-Van Thanh, Jye-Chyi Lu, Vincent Yu., (2018). "Designing sustainable supply chain networks under uncertain environments: Fuzzy multi-objective programming", *International Journal of Cleaner Production*. 174: 1550-1565.
- [۲۹] پاپی، علی، پیشوایی، میرسامان، جبارزاده، آرمین، قادری، سید فرید، (۱۳۹۷). "برنامه ریزی بهینه استوار زنجیره عرضه نفت خام و توسعه بهینه میادین نفتی در شرایط عدم قطعیت: مطالعه موردی شرکت ملی نفت خیز جنوب ایران"، فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی، ۱۴(۵۸): ۲۷-۶۴.
- [۳۰] فرخ، مجتبی، آذر، عادل، جندقی، امیرعلی (۱۳۹۵). "توسعه رویکرد برنامه ریزی فازی استوار برای طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته"، چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱(۳): ۱۳۱-۱۶۰.
- [۳۱] جیل عاملی، محمد سعید، بزرگی امیری، علی، حیدری، مهدی، (۱۳۹۰). "ارائه مدل برنامه‌ریزی امکانی چند هدفه برای مسئله لجستیک امداد"، نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید دانشگاه علم و صنعت ایران، ۲۲(۱): ۶۶-۷۶.



## A Robust Fuzzy Optimization Model for Designing Close-Loop Green Supply Chain Network Under Possibility Chance Constraint Programming

S. Tadarok<sup>1</sup>, H. Khademi Zare<sup>2\*</sup>, H. Hosseini Nasab<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

### ARTICLE INFO

#### *Article history:*

Received 29 April 2019

Accepted 19 December 2019

#### *Keywords:*

Close-loop green supply chain  
Carbon tax rate  
Chance constraint  
Robust fuzzy approach  
Uncertainty

### ABSTRACT

Nowadays environmentalism has been become an important global issue. In recent years, the closed-loop green supply chain management has grown considerably and its result be important for managers. In this paper, we have proposed a mathematical optimization mixed-integer programming model for designing a single objective closed-loop green supply cahin network consisting of production and recovery centers, distribution centers, inspection centers,disposal centers and customers, which, in addition to reducing system costs includes the fixed cost of opening plant and distribution centers, the variable cost of product production with different technologies and shipping cost, taking into the carbon tax rate, the amount of carbon emitted by production, transportation and establishing. Due to in real-world issue the parameters are uncertain. Moreover, the model has been developed using a robust fuzzy programming approach to examine the effects of uncertainties of production cost, remanufacturing cost,distribution process cost, inspection process cost and disposal process cost, amount carbon emission, facility capacity and the demand rate on the network design. Gams software has been used to obtain an optimal solution to the problem. Sensitivity analysis is conducted to validate the model for some test problems such as certainty level in possibilistic model, coefficient weight and penalty value of the objective function in robust fuzzy model.The numerical results shows the proposed model is capable of controlling uncertainty and the robustness price is imposed on the system, therefore, the value of the objective function in a probability 5% is lower than the robust fuzzy possibilistic.

\* Corresponding author. H. Khademi Zare  
Tel.: 0351-8122423; E-mail address: hkhademiz@yazd.ac.ir