مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، سال هجدهم، شماره چهارم (پیاپی ۷۱)،زمستان ۰۰، ص ص ۷۱-۵۳
شاپا ۷۲۸۶-۲۲۵۱

طراحی یک شبکه زنجیره‌ی‌تأمین سبز چند محصولی چند دوره‌ای در حالت استوار

حمزه امین‌طهماسبی[1*]، محمد دستوره[2]

۱- استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی شرق، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی فومن، دانشگاه تهران، فومن، ایران

رسید مقاله: ۱۵ مهر ۱۳۹۸

پذیرش مقاله: ۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۰

چکیده

یکی از تصمیمات استراتژیک در زنجیره‌ی تأمین، طراحی کارای شبکه است که تأثیر فراوانی بر کاهش هزینه‌ها و افزایش سطح رضایت‌مندی مشتریان دارد و منجر به اداره موفق شبکه می‌شود. همچنین طراحی کارای شبکه‌های سبز باعث کاهش آلودگی‌های ناشی از انتشار گاز کربن می‌شود. از سویی سرعت بالای تغییرات در محیط کسب‌وکار بر عدم‌قطعیت و ابهام موجود در زنجیره افزوده است. به‌منظور کاهش ریسک و عدم قطعیت حاکم بر پارامترها، استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی ریاضی با سطح استواری بالای بهینگی ضروری است. در این پژوهش یک مدل چندهدفه، چند محصولی و چند دوره‌ای در حالت عدم قطعیت ارایه می‌شود. تابع هدف اول کمینه‌کردن هزینه‌های حمل‌ونقل و تابع هدف دوم کمینه‌کردن میزان انتشار کربن را دنبال می‌کند. در این مدل، هم میزان انتشار کربن در هر بار حمل‌ونقل بین کارخانه و محل توزیع و هم میزان انتشار کربن خود کارخانه‌ها و محل‌های توزیع لحاظ شده است. در محدودیت‌ها نیز یک حد آستانه برای میزان انتشار کربن قرار گرفته است به‌گونه‌ای که اگر میزان انتشار کربن بیشتر از حد آستانه باشد، اجرای پروژه میسر نیست. سپس از رویکرد بهینه‌سازی استوار جهت مدل‌سازی عدم قطعیت موجود استفاده می‌شود. در پایان نتایج مدل بهینه استوار با نتایج مدل قطعی مقایسه می‌شوند.

کلمات کلیدی: طراحی شبکه زنجیره‌تأمین، زنجیره‌تأمین سبز، بهینه‌سازی استوار، چند محصولی، چند دوره‌ای.

۱ مقدمه

با رقابت شدید در بازارهای امروزی و تغییرات سریع ترجیحات مشتری و همچنین توسعه سریع فناوری و جهانی‌سازی، سازمان‌ها مجبورند به‌جای بنگاه‌های مستقل و منفرد، به‌عنوان اعضای یک زنجیره تأمین عمل کنند. موفقیت یک زنجیره تأمین به هماهنگی یکپارچه همه بنگاه‌ها برای شکل دادن به ساختار یک شبکه مؤثر بستگی دارد. یک شبکه کارآمد منجر به انجام عملیات مقرون‌به‌صرفه در سراسر زنجیره می‌شود و واکنش به نیازهای

* عهده‌دار مکاتبات

آدرس الکترونیکی: amintahmasbi@guilan.ac.ir

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.6.5]

[DOI: 10.52547/jamlu.18.4.53]

مشتری را تسریع می‌کند [۱]. یک زنجیره‌تأمین شامل مجموعه‌ای از تأمین‌کنندگان، تسهیلات، محصولات، مشتریان و روش‌های اداره کردن خرید، موجودی و توزیع می‌شود که مواد خام توسط تأمین‌کنندگان تأمین‌شده و محصولات نهایی توسط مشتری مصرف می‌شوند. اداره یک زنجیره‌تأمین موفق، بستگی به چگونگی طراحی شبکه دارد [۲].

مساله طراحی شبکه یکی از جامع‌ترین مسایل تصمیم‌گیری استراتژیک است که به بهینه‌سازی برای عملیات بلندمدت کارآمد کل زنجیره‌تأمین نیاز دارد. طراحی شبکه، تعداد، موقعیت، ظرفیت و انواع کارخانه‌ها، انبارها و مراکز توزیع مورداستفاده را مشخص می‌نماید. همچنین کانال‌های توزیع و مقدار مواد و اقلام برای مصرف، تولید و حرکت از تولیدکننده به مشتریان را تعیین می‌کند. مسایل طراحی شبکه زنجیره‌ی تأمین طیف وسیعی از محدوده فرمول‌بندی را، از نوع تک‌محصولی ساده به چندمحصولی پیچیده و از مدل‌های خطی قطعی به مدل‌های تصادفی غیرخطی پیچیده تحت پوشش قرار می‌دهد [۳]. مساله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین می‌تواند در دسته مسایل تولید، توزیع و تخصیص مکان‌یابی تسهیلات قرار گیرد. مساله طراحی شبکه معمولاً در دو بخش شامل سطوح تاکتیکی و استراتژیک مطرح است [۴]. در سطح استراتژیک، برنامه‌ریزی زنجیره‌تأمین شامل تصمیم‌گیری پیکربندی شبکه نظیر تعداد، موقعیت، ظرفیت و فناوری تسهیلات است. در سطح تاکتیکی، برنامه‌ریزی زنجیره‌تأمین شامل مقادیر کل و جریان مواد برای خرید، پردازش و توزیع محصولات می‌شود [۵].

یکی از مباحث مهمی که در چند سال اخیر در حوضه‌ی زنجیره‌تأمین مورد بررسی قرار گرفته است، زنجیره‌تأمین سبز و مباحث مربوط به میزان انتشار کربن است. انتشار کربن از اصلی‌ترین عوامل ایجادکننده گرمایش کره زمین محسوب می‌شود. ازآنجاکه فرض بر این است که صنعت از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر میزان انتشارات کربن است، فرآیند آن‌ها و زنجیره‌های تأمین به‌طور فزاینده در معرض سیاست‌های مختلف کربن قرار می‌گیرند [۶].

با توجه به تقاضاهای بازار و هزینه‌های موجود، یکی دیگر از مباحثی که مورد توجه قرار می‌گیرد مسایل مربوط به عدم اطمینان است. معمولاً شرایط عدم اطمینان در هر سه جنبه مساله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین، یعنی ریسک طرف تقاضا، ریسک طرف عرضه و ریسک طرف پردازش در نظر گرفته می‌شوند [۷]. تکنیک‌های زیادی برای کنترل عدم قطعیت در شرایط عدم اطمینان و روش‌های مختلفی به‌منظور کاهش، تعیین مقدار و حل مسایل عدم قطعیت وجود دارد. برنامه‌ریزی پویا، تئوری مجموعه فازی و برنامه‌ریزی تصادفی ازجمله این روش‌ها هستند. برای اداره مسایل بهینه‌سازی بر اساس عدم قطعیت و مسایل بهینه‌سازی با پارامترهای دارای اغتشاش، چندین تکنیک پیشنهاد شده است. رایج‌ترین رویکرد بهینه‌سازی استوار است که توجهات زیادی را در سال‌های اخیر به خود معطوف کرده است [۸].

این پژوهش به بررسی اهمیت طراحی شبکه‌های زنجیره‌تأمین سبز استوار و تأثیر آن بر کارایی شرکت‌ها در صنعت پرداخته است. استراتژی طراحی شبکه‌های زنجیره‌تأمین سبز در مورد تصمیمات، تعداد، محل و ظرفیت

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.6.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.4.53]

امکانات در سطوح مختلف مانند (کارخانه و انبار) و جریان مواد خام و کالاهای آماده‌شده در شبکه تدارکات است.

۲ پیشینه تحقیق

در چند سال گذشته شبکه زنجیره‌تأمین سبز با توجه به مقررات زیست‌محیطی، آگاهی‌های اجتماعی و فشار مشتریان با توجهات بسیار زیادی از سوی دانشمندان روبه‌رو شده است. صادقی و همکاران [۹] یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چند محصولی، چندهدفه ارایه دادند که اهداف آن شامل به حداقل رساندن هزینه‌های احداث و حمل‌ونقل و انتشار گازهای گلخانه‌ای و به حداکثر رساندن میزان رضایت مشتریان است. حسین و همکاران [۱۰] یک چارچوب جامع از مسایل زیست‌محیطی، مسئولیت‌های اجتماعی، ایمنی عمومی و روابط مشتری را برای عملکرد زنجیره تأمین سبز در صنعت ارایه کردند. زو و همکاران [۱۱] رابطه بین طراحی محصول، طراحی زنجیره‌تأمین و مرحله قیمت و توسعه ساختارهای عرضه چندگانه را مورد بررسی قرار دادند. ماتوموتو و همکاران [۱۲] طراحی شبکه زنجیره‌تأمین سبز را در صنعت خودروسازی و بازار تولید قطعات خودرو بررسی کرده و نتیجه گرفتند که دانش محصول مشتریان، استراتژی قیمت و در نظر گرفتن میزان انتشار کربن به‌عنوان یک شاخص محیطی، تأثیرات مهمی در قصد خرید مردم خواهد داشت.

گویندان و همکاران [۱۳] با استفاده از یک روش فراابتکاری استوار و چند محصولی، یک مدل زنجیره تأمین سبز را با تقاضای تصادفی ایجاد کردند. کائو و همکاران یک روش دومرحله‌ای از مدل MINLP برای به‌دست‌آوردن راه‌حل‌های دقیق در مدل‌های زنجیره تأمین سبز ارایه دادند. یاوری و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۹ یک مدل برنامه‌ریزی خطی مخلوط عدد صحیح MILP را به‌طور هم‌زمان برای به حداقل رساندن هزینه‌های حمل‌ونقل و احداث و آلاینده‌های محیط‌زیست در نظر گرفتند. آن‌ها یک مدل MILP استوار نیز برای مسایل تحت عدم اطمینان ارایه دادند. با توجه به نوع مساله که یک مساله NP-hard است، برای حل مدل از روش اکتشافی YAG استفاده کردند که طبق نتایج به‌دست‌آمده مدل استوار در مقایسه با مدل قطعی از کیفیت بهتری برخوردار بوده و بسیار مطمئن‌تر است.

لوژن و همکاران [۱۵] یک مدل بهینه‌سازی دوهدفه تحت عدم اطمینان برای انتشار گاز کربن و کل هزینه‌های عملیاتی ارایه دادند. ایشان یک روش مبتنی بر سناریو برای تقاضاهای نامشخص در مدل بهینه‌سازی اتخاذ کردند و برای حل مدل از روش لاگرانژ بهره بردند. گویندان و همکارانش [۱۶] برای مواجه با مساله زنجیره تأمین سبز یک مدل چند دوره‌ای، چند محصولی و دوهدفه ارایه دادند که اهداف آن به‌صورت به حداقل رساندن کل هزینه‌ها و به حداقل رساندن میزان انتشار گازهای محیطی از طریق تصمیم‌گیری در مورد مکان تأسیسات، هزینه حمل‌ونقل و مانده موجودی است. با توجه به پیچیدگی مساله و در نظر گرفتن مفروضاتی ازجمله، چند محصولی بودن، چند دوره‌ای بودن و چندهدفه بودن، برای حل مدل از الگوریتم تجزیه باند شتاب استفاده کردند که درنتیجه موجب کاهش ۱۳ درصدی هزینه‌ها و مقدار قابل‌توجهی آلودگی‌های ناشی از انتشار گازها گردید.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.6.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.4.53]

امین طهماسبی و همکاران [۱۷] یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط تک‌هدفه ارایه کردند که هم‌زمان علاوه بر طراحی زنجیره تأمین چندسطحی، مساله مکان‌یابی تسهیلات را نیز در نظر می‌گیرد. در مدل ایشان اهداف کمینه‌سازی هزینه‌های بخش تهیه و تولید اجزای محصولات، نگهداری و ارسال محصولات به مراکز توزیع، ارسال به مناطق مشتریان و هزینه استقرار کارخانه‌ها و مراکز توزیع در نظر گرفته شده است. منصوری و همکاران [۱۸] به بررسی مساله طراحی عملکرد اجتماعی زنجیره تأمین سبز تحت شرایط عدم قطعیت پرداختند. برای این منظور ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی فازی چندهدفه طراحی شده است که شامل به حداقل رساندن هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی و به حداکثر رساندن عملکرد اجتماعی شرکتی زنجیره تأمین سبز می‌باشد. سپس به منظور حل این مدل، از روش حل فازی تعاملی استفاده کردند.

مرادی و همکاران [۱۹] یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی غیرخطی، عدد صحیح آمیخته با رویکرد بهینه‌سازی استوار توسعه دادند. در این مدل دو رویکرد استوار، یکی به‌شدت محافظه‌کارانه و دیگری با درجه محافظه‌کاری قابل‌کنترل، ارایه دادند. آذر و همکاران [۲۰] یک مدلی با رویکرد استوار و یک مدل یکپارچه سه مرحله‌ی برای تطابق با عدم قطعیت در زنجیره‌تأمین را مورد بررسی قرار دادند که در مرحله‌ی اول فاکتورهای کلیدی در انتخاب تأمین‌کننده شناسایی شدند. در مرحله بعد با تحلیل سلسله مراتبی فازی تأمین‌کنندگان، با توجه به این شاخص‌های شناسایی‌شده، تأمین‌کنندگانی را که حداقل نمره قابل‌قبول کسب کردند؛ وارد مدل استوار و احتمالی دومرحله‌ای عدد صحیح چند دوره‌ای- چند محصولی برای تخصیص کوتاه‌مدت تقاضای دارای عدم قطعیت به محصولات شدند. در قسمت نتایج نشان دادند که مدل حاصل از قدرت بالایی برخوردار بوده و منجر به تطابق با تقاضای دارای عدم قطعیت می‌شود.

شاهمرادی و همکاران [۲۱] یک مدل استوار بهبودیافته برای مدل میانگین انحراف مطلق ارایه دادند. آن‌ها با معرفی مجموعه عدم قطعیت همبسته، همتای استوار مدل میانگین انحراف مطلق تحت این مجموع عدم قطعیت را ارایه دادند که برای نسخه بهبودیافته استوار آن از رویکرد برتسیماس و سیم استفاده شده است. با بررسی عملکرد دو مدل میانگین انحراف مطلق بهبودیافته و همبسته مشاهده می‌گردد که وقتی بین ضرایب غیرقطعی همبستگی قابل توجهی وجود داشته باشد، مدل استوار همبسته در مقایسه با مدل استوار بهبودیافته جواب‌های بهتری خواهد داشت.

گویندان و همکاران [۲۲] به بررسی زنجیره‌تأمین معکوس حلقه بسته برای انتخاب تأمین‌کننده‌های دوره‌ای و تخصیص سفارش در یک مدل چند محصولی و چندهدفه پرداختند. توابع هدف مدل ایشان، حداقل کردن هزینه‌ها و حداقل کردن مقدار کمبود بود و برای برخورد با عدم قطعیت‌های در نظر گرفته شده در پارامترها و تبدیل مدل چندهدفه به مدل تک‌هدفه از روش‌های فازی استفاده کردند. محبی‌زاده‌گشتی و همکاران [۲۳] یک مدل برنامه‌ریزی خطی چند دوره‌ای، چند محصولی و چندهدفه را برای طراحی و پیکربندی شبکه زنجیره‌تأمین گوشت سبز مورد بررسی قرار دادند؛ که اهداف آن شامل به حداقل رساندن هزینه کل، به حداقل رساندن کل انتشار دی‌اکسید کربن آزادشده از حمل‌ونقل و به حداکثر رساندن کل ظرفیت استفاده از امکانات بود. آن‌ها برای

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.6.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.4.53]

حل مدل ارایه‌شده از روش محدودیت اپسیلن استفاده کرده و مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه پارتو را به دست آوردند.

شرافتی و همکاران [۲۴] یک مساله جدید طراحی شبکه زنجیره‌تأمین برای پوشش سه بعد پایداری یعنی اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی معرفی کردند. ایشان به توسعه پایدار از طریق اعمال مکانیسم‌های مناسب تنظیم کربن پرداختند و یک رویکرد عدم قطعیت جدید را برای در نظر گرفتن پارامترهای نامشخص انتشار پیشنهاد دادند. دیابت و همکاران [۲۵] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چند محصولی، چند دوره‌ای و تک‌هدفه را با اهداف کسب سود از کاهش مقدار هزینه‌های عملیاتی و افزایش میزان درآمدهای عملیاتی توسعه دادند.

جوزدانی و همکاران [۲۶] یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندمحصولی، چندهدفه را برای بررسی زنجیره‌تأمین مواد غذایی فاسدشدنی مورد بررسی قرار دادند. اهداف مدنظر کاهش هزینه‌های عملیاتی، هزینه‌های انتشار گاز کربن و هزینه‌های اجتماعی با در نظر گرفتن عدم قطعیت برای طول عمر مواد فاسدشدنی بود. رحیمی منش و همکاران [۲۷] یک مدل بهینه‌سازی ریاضی برای زنجیره تأمین چند محصولی با امکان وقوع اختلال در تأمین‌کننده در شرایط تحریم را ارایه داده و نتایج آن را در صنایع تعمیراتی پالایشگاهی بررسی کردند.

ذرات و همکاران [۲۸] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دو هدفه را برای طراحی یک زنجیره تامین سبز با در نظر گرفتن همزمان جریان‌های رو به جلو و معکوس، مکان‌یابی موجودی-مسیریابی با برداشت و تحویل همزمان، زمان‌بندی وسایل نقلیه و پنجره زمانی ارایه کردند. در مدل ایشان، مدیریت تولید و توزیع محصولات فاسد شدنی مدنظر قرار گرفته و هدف آن به حداقل رساندن هزینه های کل و تقاضاهای از دست رفته بود. قهرمانی نهر و همکاران [۲۹] یک مدل دو هدفه، چندمحصولی و چند دوره‌ای برای شبکه زنجیره‌تأمین سبز حلقه بسته با در نظر گرفتن کمبود و تخفیف ارایه دادند. در این مدل برای برخورد با عدم قطعیت‌های موجود در پارامترها از رویکرد بهینه‌سازی بنتال و نیمروفسکی استفاده گردیده است. همچنین برای حل مدل چندهدفه از سه روش، معیار جامع، بهینه‌سازی انفرادی و روش مجموع وزنی استفاده گردیده است.

به‌طورکلی نوآوری‌های این مقاله به شرح زیر است: (۱) در اکثر مقالات، هزینه احداث تنها برای کارخانه‌ها یا مراکز توزیع در نظر گرفته شده است و معمولاً در حالت تک دوره‌ای، تک‌محصولی موردبحث قرار گرفته است درحالی‌که در این مقاله هر دو هزینه احداث کارخانه و مراکز توزیع در حالت چند دوره‌ای و چند محصولی در نظر گرفته شده است. (۲) در تابع هدف مربوط به هزینه‌های انتشار کربن در این مقاله به‌طور هم‌زمان هم میزان انتشار ناشی از حمل‌ونقل، هم میزان انتشار ناشی از محل توزیع و هم میزان انتشار خود کارخانه در نظر گرفته شده است. (۳) در این مقاله حد توقف برای میزان انتشار کربن در نظر گرفته شده است به‌طوری‌که اگر میزان انتشار کربن از حد تعیین‌شده عبور کند، اجراشدن کار ممکن نیست و متوقف می‌شود. (۴) بحث عدم قطعیت جزء جدایی‌ناپذیری از مسایل دنیای واقعی است. لذا حل مساله و ارایه جواب‌های با دقت بالا با استفاده از رویکرد استوار برتسیماس و سیم نیز برای مقابله با عدم قطعیت موجود انجام شده است.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.6.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.4.53]

۳ بیان مساله

هدف از طراحی شبکه زنجیره‌تأمین برای هر صنعت یا کسب‌وکاری دستیابی به یک چارچوب مطلوب طراحی است که دربرگیرنده عواملی از قبیل تولید، بازار، فرایند، تکنولوژی، هزینه، فاکتورها و محیط خارجی و اثرات آن‌ها با مدنظر قرار دادن سناریوهای طراحی‌شده برای به تصویر کشیدن آینده‌های محتمل کسب‌وکار مربوطه است. هیچ‌گاه دو زنجیره‌تأمین نمی‌توانند طراحی مشابهی داشته باشند زیرا در طراحی شبکه، باید به عوامل و فاکتورهای زیادی که مختص کسب‌وکار مربوطه است توجه کرد مثلاً این‌که کسب‌وکار موردنظر در سطح ملی، منطقه‌ای و یا جهانی است و یا این‌که شیوه مکان‌یابی و استقرار تجهیزات و تسهیلات از نظر دسترسی بهتر به منابع اولیه و مشتریان چگونه باید باشد. پس با در نظر گرفتن کلیه عوامل تأثیرگذار، هر شبکه تأمینی طراحی متفاوتی خواهد داشت. طراحی شبکه زنجیره‌تأمین نه‌تنها یک چارچوب عملیاتی برای کمک به مدیریت کسب‌وکار فراهم می‌کند بلکه با دیدی استراتژیک سعی دارد ساختاری را مورد بررسی قرار دهد که بتواند تأثیرات محیط خارجی، وابستگی بین فرایندها و ارزیابی دقیق فرصت‌هایی با سودآوری زیاد را مدنظر قرار دهد.

در این مقاله یک مدل زنجیره‌تأمین چندمحصولی، چند دوره‌ای سبز، شامل: تأمین‌کنندگان، مکان‌های کاندید برای محل کارخانه‌ها و مراکز توزیع، نقاط تقاضا که به دو دسته تقسیم می‌شوند: دسته اول نقاط تقاضایی که تنها از یک توزیع‌کننده تأمین می‌شوند و دسته دوم نقاط تقاضایی که می‌توانند از چندین توزیع‌کننده کالا دریافت کنند، انواع خط تولید و مواد خام تشکیل شده است. تقاضا در این زنجیره به‌صورت غیرقطعی است. مدل ارایه‌شده شامل دو تابع هدف است که تابع هدف اول به کمینه‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل و احداث پرداخته و تابع هدف دوم میزان انتشار گاز کربن ناشی از حمل‌ونقل کالا، میزان انتشار خود کارخانه‌ها و میزان انتشار مراکز توزیع را کمینه می‌سازد.

٤ مدل ریاضی

موارد ذیل در این مدل فرض شده‌اند:

- ✓ کارخانه‌ها تنها می‌توانند از تأمین‌کننده مواد اولیه دریافت کنند.
- ✓ تمام مقادیر مربوط به تقاضاها غیرقطعی است.
- ✓ چند محصول و چند دوره برنامه‌ریزی وجود دارد.
- ✓ هر توزیع‌کننده تنها می‌تواند از کارخانه محصول دریافت کند.
- ✓ همه تقاضاهای مشتریان باید تأمین گردد.
- ✓ اهداف تابع هدف کمینه کردن هزینه‌ها است.

نمادگذاری‌های ذیل برای فرموله نمودن مدل استفاده شده است:

- **اندیس‌ها**

M مجموع محل کارخانه‌ی موجود و کاندید شده.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.6.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.4.53]

D مجموع محل مکان‌های کاندید برای توزیع‌کننده.

N مجموع نقاط تقاضا.

N_a مجموع نقاط تقاضا که باید از یک توزیع‌کننده تأمین شود.

N_b مجموع نقاط تقاضا که می‌تواند از چندین توزیع‌کننده تأمین شود.

I مجموع انواع خط تولید.

J مجموع انواع مواد خام.

K مجموع تأمین‌کننده.

L مجموع محصول تولیدشده.

T مجموع دوره‌های زمانی.

- **پارامترها**

C_m^t هزینه احداث کارخانه در محل کاندید شده m در دوره t.

C_d^t هزینه احداث توزیع‌کننده در محل کاندید شده D در دوره t.

u_{im}^t هزینه راه‌اندازی خط تولید نوع i در محل کاندید شده m در دوره t.

d_{jkm}^t هزینه حمل‌ونقل هر واحد ماده اولیه j از تبأمین‌کننده k به کارخانه m در دوره t.

f_{lmd}^t هزینه حمل‌ونقل هر واحد محصول L از کارخانه m به توزیع‌کننده D در دوره t.

f_{ldn}^t هزینه حمل‌ونقل هر واحد محصول L از توزیع‌کننده D به نقطه تقاضای n در دوره t.

OO_{ld}^t تقاضا برای محصول تولیدشده L در توزیع‌کننده D در دوره t.

aa_{lim} هزینه عملیات هر واحد محصول تولیدشده L در زمان معمول در خط تولید i در کارخانه m.

bb_{lim} هزینه عملیات هر واحد محصول تولیدشده L در زمان اضافه‌کاری در خط تولید i در کارخانه m.

$o_{\ln}^t$ تقاضا برای محصول تولیدشده L در نقطه تقاضای n در دوره t.

b_{jl} مقدار ماده اولیه j برای تولید یک‌تن محصول L.

a_{jk}^t حداکثر مقدار ماده اولیه j که می‌تواند از تأمین‌کننده k در دوره t تأمین شود.

$w_{\lim}$ میزان تولید محصول تولیدشده L در خط تولید i در کارخانه m.

V_i^t کل ظرفیت تولید خط i در دوره t.

r_i^t ظرفیت تولید معمول خط i در دوره t.

co_{jkm}^t کل انتشار کربن ماده اولیه‌ی j از تأمین‌کننده K به کارخانه m به در دوره t.

co_{lmd}^t کل انتشار کربن محصول L از کارخانه m به توزیع‌کننده d در دوره t.

co_{ldn}^t کل انتشار کربن محصول L از توزیع‌کننده d به نقطه تقاضای n در دوره t.

X_{km} فاصله تأمین‌کننده k تا کارخانه m.

X_{md} فاصله کارخانه m تا توزیع‌کننده d.

X_{dn} فاصله توزیع‌کننده d تا محل تقاضای n.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.6.5]

[DOI: 10.52547/jamlu.18.4.53]

EE_m^t میزان انتشار از کارخانه m در دوره t.

EE_d^t میزان انتشار از توزیع‌کننده d در دوره t.

cap حداکثر ظرفیت انتشار کربن.

$M1, M2, M3$ اعداد بزرگ.

- **متغیرها**

Q_m^t اگر کارخانه در محل m در دوره t احداث شود، صفر در غیراین صورت ۱،

u_d^t اگر توزیع‌کننده در محل D در دوره t احداث شود، صفر در غیراین صورت ۱،

h_{dm}^t اگر توزیع‌کننده D به کارخانه m در دوره t اختصاص داده شود، صفر در غیراین صورت ۱،

L_{dn}^t اگر نقطه تقاضای n به توزیع‌کننده D در دوره t اختصاص داده شود، صفر در غیراین صورت ۱،

z_{im}^t تعداد خطوط نوع i در کارخانه m در دوره t

R_{jkm}^t مقدار مواد اولیه j از تأمین‌کننده k به کارخانه m در دوره t

P_{lmd}^t مقدار محصول تولیدشده L از کارخانه m به توزیع‌کننده d در دوره t

P_{ldn}^t مقدار محصول تولیدشده L از توزیع‌کننده d به نقطه تقاضای n در دوره t

G_{lm}^t مقدار محصول تولیدشده L در کارخانه m در دوره t

H_{lim}^t کل ساعت تولید محصول L تولیدشده در خط i در کارخانه m در دوره t

A_{lim}^t ساعت تولید معمول محصول L در خط تولید i در کارخانه m در دوره t

$B_{\lim}^t$ ساعت اضافه‌کاری برای تولید محصول L در خط i در کارخانه m در دوره t

مدل به‌صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط[۱] و با نشانه‌گذاری فوق فرموله شده است:

$$F_1 = \text{Min} \sum_{t\in T} \Big(\sum_{m\in M} C_m^t Q_m^t + \sum_{d\in D} c_d^t u_d^t + \sum_{i\in I}\sum_{m\in M} u_{im}^t z_{im}^t + \sum_{l\in L}\sum_{i\in I}\sum_{m\in M} (aa_{\lim} A_{\lim}^t + bb_{\lim} B_{\lim}^t) + \sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{m\in M} d_{jkm}^t R_{jkm}^t X_{km} + \sum_{l\in L}\sum_{m\in M}\sum_{d\in D} F_{lmd}^t P_{lmd}^t X_{md} + \sum_{l\in L}\sum_{d\in D}\sum_{n\in N} F_{ldn}^t P_{ldn}^t X_{dn} \Big) \quad (۱)$$

$$F_2 = \min \sum_{t\in T} \Big(\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{m\in M} co_{jkm}^t R_{jkm}^t X_{km} + \sum_{l\in L}\sum_{m\in M}\sum_{d\in D} co_{lmd}^t P_{lmd}^t X_{md} + \sum_{l\in L}\sum_{d\in D}\sum_{n\in N} co_{ldn}^t P_{ldn}^t X_{dn} + \sum_{m\in M} EE_m^t Q_m^t + \sum_{d\in D} EE_d^t U_d^t \quad (۲)$$

$s.t.$

$$\sum_{m\in M} Q_m^t \le 2 \qquad Q_1^t = 1,\ t\in T \quad , \quad (۳)$$

$$\sum_{d\in d} p_{ldn}^t = 1 \qquad t\in T,\ l\in L,\ n\in N\ , \quad (۴)$$

$$u_d^{t-1} \le u_d^t \qquad t\in T, d\in D, \quad (۵)$$

$$\sum_{d\in D} L_{dn}^t = 1 \qquad t\in T, n\in N_a, \quad (۶)$$

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.6.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.4.53]

$$\sum_{d\in D} L_{dn}^{t} \le ۲ \qquad t\in T, n\in N_b, \qquad (۷)$$

$$L_{dn}^{t} \le u_{d}^{t} \qquad t\in T, d\in D, n\in N, \qquad (۸)$$

$$Q_{m}^{t-۱} \le Q_{m}^{t} \qquad t\in T, m\in M, \qquad (۹)$$

$$z_{mi}^{t} \le M_{۱} Q_{m}^{t} \qquad t\in T, m\in M, i\in I, \qquad (۱۰)$$

$$Z_{im}^{t-۱} \le Z_{im}^{t} \qquad t\in T, m\in M, i\in I, \qquad (۱۱)$$

$$R_{jkm}^{t} \le a_{jk}^{t} Q_{m}^{t} \qquad t\in T, m\in M, j\in J, k\in K, \qquad (۱۲)$$

$$\sum_{l\in L} b_{jl} G_{lm}^{t} \le \sum_{k\in K} R_{jkm}^{t} \qquad t\in T, m\in M, j\in J, \qquad (۱۳)$$

$$G_{lm}^{t} \le \sum_{i\in I} w_{\mathrm{lim}} H_{\mathrm{lim}}^{t} \qquad t\in T, m\in M, l\in L, \qquad (۱۴)$$

$$H_{\mathrm{lim}}^{t} \le M_{۲} w_{\mathrm{lim}} \qquad t\in T, m\in M, l\in L, i\in I, \qquad (۱۵)$$

$$\sum_{l\in L} H_{\mathrm{lim}}^{t} \le v_{i}^{t} Z_{im}^{t} \qquad t\in T, m\in M, i\in I, \qquad (۱۶)$$

$$\sum_{l\in L} A_{\mathrm{lim}}^{t} \le r_{i}^{t} Z_{im}^{t} \qquad t\in T, m\in M, i\in I, \qquad (۱۷)$$

$$H_{\mathrm{lim}}^{t} \le A_{\mathrm{lim}}^{t} + B_{\mathrm{lim}}^{t} \qquad t\in T, m\in M, l\in L, i\in I, \qquad (۱۸)$$

$$\sum_{n\in N} o_{\mathrm{ln}}^{t} P_{ldn}^{t} \le \sum_{m\in M} oo_{ld}^{t} P_{lmd}^{t} \qquad t\in T, l\in L, d\in D, \qquad (۱۹)$$

$$\sum_{d\in D} h_{md}^{t} \le ۲ \qquad t\in T, m\in M, \qquad (۲۰)$$

$$\sum_{l\in L}\sum_{m\in M} G_{lm}^{t} \ge \sum_{l\in L}\sum_{m\in M} P_{lmd}^{t} \qquad t\in T, d\in D, \qquad (۲۱)$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{m\in M} co_{jkm}^{t} R_{jkm}^{t} X_{km} + \sum_{l\in L}\sum_{m\in M}\sum_{d\in D} co_{lmd}^{t} P_{lmd}^{t} X_{md} + \sum_{l\in L}\sum_{d\in D}\sum_{n\in N} co_{ldn}^{t} P_{ldn}^{t} X_{dn} +$$
$$\sum_{m\in M} EE_{m}^{t} Q_{m}^{t} + \sum_{d\in D} EE_{d}^{t} U_{d}^{t} \le cap, \qquad (۲۲)$$

$$Q_{m}^{t}, u_{d}^{t}, h_{md}^{t}, L_{dn}^{t} \in \{۰,۱\},\ Z_{im}^{t} \ \text{integer}, \qquad (۲۳)$$

$$R_{jkm}^{t}, P_{lmd}^{t}, P_{ldn}^{t}, X_{lmm'}^{t}, G_{lm}^{t}, H_{\mathrm{lim}}^{t}, A_{\mathrm{lim}}^{t}, B_{\mathrm{lim}}^{t}, co_{jkm}^{t}, co_{lmd}^{t}, co_{ldn}^{t}, X_{km}, X_{md}, X_{dn}, EE_{m}^{t}, EE_{d}^{t} \ge ۰. \qquad (۲۴)$$

- **تشریح توابع هدف و محدودیت‌ها**

تابع هدف اول مساله شامل حداقل کردن کل هزینه‌های احداث کارخانه و محل توزیع و هزینه‌های مربوط به راه‌اندازی خط تولید در حالت معمول و اضافه‌کاری و هزینه‌های مرتبط با حمل‌ونقل از تأمین‌کننده به کارخانه و از کارخانه به مراکز توزیع و همچنین از مراکز توزیع به محل تقاضا است. تابع هدف دوم شامل به حداقل رساندن میزان انتشار گاز کربن در هر بار حمل‌ونقل از تأمین‌کننده به کارخانه و از کارخانه به مراکز توزیع و از مراکز توزیع به نقاط تقاضا و همچنین شامل میزان انتشار کربن خود کارخانه است.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.6.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.4.53]

محدودیت (۳)، سیاست حفظ دو مکان کاندیدشده برای کارخانه را نشان می‌دهد. محدودیت (۴) بیان می‌کند که تقاضای مشتری برای هر محصول باید تأمین گردد. محدودیت (۵) نشان می‌دهد که اگر یک توزیع‌کننده در محل D در دوره t باز شود این توزیع‌کننده در دوره‌های بعدی نیز کار خود را ادامه می‌دهد.

محدودیت (۶) به این صورت است که نقطه تقاضای n_a تنها از یک توزیع‌کننده خدمت دریافت می‌کند. محدودیت (۷) نیز نشان‌دهنده این است که نقطه تقاضای n_b از تمام توزیع‌کننده‌ها خدمت دریافت می‌کند. محدودیت (۸) بیان می‌کند نقطه تقاضا تنها می‌تواند به یک تابع عملیاتی اختصاص داده شود. محدودیت (۹) نشان می‌دهد که اگر یک کارخانه در محل m در دوره t باز شود این توزیع‌کننده در دوره‌های بعدی نیز کار خود را ادامه می‌دهد.

در محدودیت (۱۰) خطوط جدید تولید را می‌توان در کارخانه m اضافه کرد اگر این کارخانه عملیاتی باشد. درحالی‌که محدودیت (۱۱)، اطمینان می‌دهد که خط تولید در دوره‌های بعدی عملیاتی خواهد شد. محدودیت (۱۲) تضمین می‌کند که ماده اولیه تنها از تأمین‌کنندگان به کارخانه‌ها رود و مقدار حمل‌شده نمی‌تواند بیش از موجودی تأمین‌کننده باشد. محدودیت (۱۳) تضمین می‌کند که مقدار ماده اولیه‌ای که از تأمین‌کنندگان به یک کارخانه حمل می‌شود باید برای محصولات تولیدی کافی باشد.

در محدودیت (۱۴) مقدار هر محصول نهایی در کارخانه در خطوط تولید در یک دوره، نمی‌تواند بیشتر از کل ظرفیت تعیین‌شده باشد. محدودیت (۱۵) بیان‌کننده این موضوع است که اگر یک خط تولید در یک کارخانه نمی‌تواند تولید یک محصول را به پایان برساند، کل ساعت تولید محصول باید صفر شود. محدودیت (۱۶) نشان می‌دهد که کل ساعت تولید برای تمام محصولات در یک کارخانه در یک دوره معین نمی‌تواند از کل ظرفیت تعیین‌شده برای خط تولید بیشتر باشد. محدودیت (۱۷)، مشابه محدودیت چهاردهم است با این تفاوت که فقط برای ساعت معمول تولید در نظر گرفته‌شده است.

محدودیت (۱۸) کل ساعت تولید را برابر با مجموع ساعت‌های تولید معمول به‌اضافه‌ی ساعات اضافه‌کاری قرار می‌دهد. محدودیت (۱۹) تعادل را بیان می‌کند به‌طوری‌که کل خروجی محصول از توزیع‌کننده D برای مشتریان نباید از مقدار واردشده برای توزیع‌کننده از کارخانه‌ها تجاوز کند. محدودیت (۲۰) نشان‌دهنده دریافت خدمت توزیع‌کننده از تمامی مکان‌های کاندید برای کارخانه‌ها است. محدودیت (۲۱) بیان می‌کند که مقدار تولید کارخانه بیشتر از مقدار تقاضای توزیع‌کننده می‌باشد. محدودیت (۲۲) نشان می‌دهد که میزان انتشار کل گازها باید کمتر از مقدار مجاز باشد. محدودیت (۲۳) و (۲۴) نیز نوع متغیرها را نشان می‌دهند.

۵ روش حل

۵-۱ بهینه‌سازی استوار

بهینه‌سازی استوار یکی از رویکردهایی است که در سال‌های اخیر برای مقابله با عدم اطمینان توسعه داده‌شده است. در این رویکرد مدل‌ساز به دنبال جواب‌های نزدیک به بهینه‌ای است که با احتمال بالایی موجه باشند.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.6.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.4.53]

هنگامی‌که در مساله برنامه‌ریزی ریاضی برخی پارامترهای تابع هدف غیرقطعی هستند، به دست آوردن مقدار بهینه آسان نیست. همچنین اگر محدودیت‌ها دارای پارامترهای غیرقطعی باشند، هنگام تحقق برخی از مقادیر واقعی پارامترها، ممکن است که این محدودیت‌ها برآورده نشوند. بهینه‌سازی استوار روشی برای برخورد با عدم قطعیت پارامترهای غیرقطعی مسائل بهینه‌سازی است که اخیراً توسعه‌یافته است.

نخستین گام در حوزه بهینه‌سازی استوار را سویستر [۳۰] برداشت. وی راه‌حلی پیشنهاد داد که در قالب یک مدل برنامه‌ریزی خطی، جوابی تولید می‌کرد که برای همه داده‌های متعلق به یک مجموعه محدب موجه بود. مدل یادشده، جواب‌هایی می‌دهد که در قبال بهینگی مساله اسمی به‌منظور اطمینان از استواری، به‌شدت محافظ کارانه است. درواقع این مساله یکی از نخستین مسایل بهینه‌سازی استوار است. پس‌ازاین گام‌های مهم دیگری به‌طور مستقل برای توسعه تئوری بهینه‌سازی استوار برداشته شد که ازجمله می‌توان به مالوی و همکاران [۳۱]، بن‌تال و نیمروسکی [۳۲] و برتسیماس و سیم [۳۳] اشاره کرد. در این تحقیق از رویکرد برتسیماس و سیم [۳۳] برای استوارسازی استفاده می‌شود؛ زیرا از یک‌سو این تحقیق از نوع عدد صحیح مختلط است که با این رویکرد هم‌خوانی دارد و از سوی دیگر، استوارسازی با استفاده از این رویکرد به خطی شدن مدل استوار نهایی منجر می‌شود و مانند برخی از رویکردها غیرخطی نخواهد بود. ازاین‌رو در ادامه به توضیحی در این خصوص پرداخته می‌شود.

۵-۲ رویکرد برتسیماس و سیم برای بهینه‌سازی استوار

مدل بهینه‌سازی خطی زیر را در نظر بگیرید:

$$\text{Max } c'x \qquad (۲۵)$$

$$s.t.$$

$$Ax \le b \qquad (۲۶)$$

$$l \le x \le u \qquad (۲۷)$$

در فرمول‌بندی مدل فوق، فرض می‌شود که عدم قطعیت داده‌ها فقط روی عناصر ماتریس A اثر می‌گذارد. این فرض بدون از دست دادن عمومیت این‌که بردار C تابع هدف قطعی باشد، گرفته‌شده است. یک سطر خاص i از ماتریس A را در نظر بگیرید و J_i را مجموعه ضرایب متغیرهای غیرقطعی در سطر i در نظر بگیرید هرکدام از a_{ij} که $j \in J_i$ باشد را می‌توان به شکل یک متغیر تصادفی مستقل و متقارن $\tilde{a}_{ij}$ مدل کرد که در بازه $[a_{ij} - \tilde{a}_{ij}, a_{ij} + \tilde{a}_{ij}]$ مقدار می‌گیرد. برای هر $\tilde{a}_{ij}$ یک متغیر تصادفی به شکل $\eta_{ij} = \frac{\tilde{a}_{ij} - a_{ij}}{\tilde{a}_{ij}}$ که از یک توزیع نامعلوم اما متقارن در بازه (۱و۱-) پیروی می‌کند؛ تعریف می‌شود. برای هر محدودیت iام مقدار Γ_i که الزاماً عددی صحیح نیست معرفی می‌شود که در بازه $[0, |J_i|]$ قرار می‌گیرد. نقش پارامتر Γ_i تنظیم مقدار استواری مدل پیشنهادشده در مقابل سطح محافظه‌کاری جواب می‌باشد. به نظر می‌رسد کمتر احتمال دارد که همه $\tilde{a}_{ij}$ هم‌زمان تغییر کنند. بنابراین در همه حالاتی که حداکثر $\lfloor \Gamma_i \rfloor$ تا از این ضرایب مجاز به تغییر می‌باشند و یک

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.6.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.4.53]

ضریب (a_{it}) حداکثر به‌اندازه $(\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor)a_{it}$ تغییر می‌کند، جواب باید موجه باقی بماند؛ بنابراین Γ_i سطح حفاظت برای محدودیت iام نامیده می‌شود و رویکرد ارایه‌شده توسط برتسیماس و سیم به‌صورت زیر می‌باشد.

$$Max\, c'x \qquad (۲۸)$$

$$s.t.$$

$$\sum_j a_{ij}x_j + \sum_j \max_{\{s_i | s_i \subset J_i, |s_i| = \Gamma_i\}} \{\sum_{j \in s_i} \tilde{a}_{ij} y_j + (\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor)\tilde{a}_{it} y_t\} \le b_i \qquad \forall i \qquad (۲۹)$$

$$-y_j \le x_j \le y_j \qquad \forall j \qquad (۳۰)$$

$$l \le x \le u \qquad (۳۱)$$

$$y_j \ge ۰ \qquad \forall j \qquad (۳۲)$$

که مدل خطی شده آن به‌صورت زیر می‌باشد:

$$Max\, c'x \qquad (۳۳)$$

$$s.t.$$

$$\sum_j a_{ij}x_j + Z_i\Gamma_i + \sum_{j \in J_i} P_{ij} \le b_i \qquad \forall i \qquad (۳۴)$$

$$Z_i + P_{ij} > \tilde{a}_{ij} y_j \qquad \forall i, j \in J_i \qquad (۳۵)$$

$$-y_j \le x_j \le y_j \qquad \forall j \qquad (۳۶)$$

$$l \le x \le u \qquad (۳۷)$$

$$P_{ij} \ge ۰, y_j \ge ۰, z_j \ge ۰ \qquad \forall i, j \in J_i \qquad (۳۸)$$

متغیرهای اضافه‌شده در مدل استوار (Z_i, y_i, w_{ij}, Z_0) برای تنظیم استواری جواب و اعمال سطوح حفاظت در مدل آورده شده‌اند و به‌عنوان رابط بین محدودیت‌ها می‌باشند.

۵-۳ همتای استوار مدل پیشنهادی

در بررسی مدل‌های واقعی به‌ندرت می‌توان با مدلی مواجه شد که در آن متغیری با ماهیت غیرقطعی وجود نداشته باشد. اگر برای حل مدل‌های برنامه‌ریزی خطی دارای عدم قطعیت، از داده‌های قطعی استفاده شود ممکن است منجر به غیرموجه شدن جواب به‌دست‌آمده شود. در مدل ارایه‌شده در این مقاله، دو پارامتر نرخ تقاضای توزیع‌کننده و نقطه تقاضا غیرقطعی می‌باشد. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت و موجه ماندن جواب، از رویکرد برنامه‌ریزی خطی استوار برتسیماس و سیم استفاده می‌شود. مقادیر تقاضا به‌طور مستقل از هم در یک بازه به‌صورت احتمالی با توزیع نامشخص ولی متقارن با میانگینی برابر میانگین اسمی‌شان مقدار می‌گیرند. در این پژوهش مقدار پارامتر تقاضای در محل توزیع به‌صورت عدم قطعیت در نظر گرفته شده است که همتای استوار مدل پیشنهادی به‌صورت زیر می‌باشد:

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.6.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.4.53]

$$F_1 = \text{Min} \sum_{t\in T} \Big(\sum_{m\in M} C_m^t Q_m^t + \sum_{d\in D} c_d^t u_d^t + \sum_{i\in I}\sum_{m\in M} u_{im}^t z_{im}^t + \sum_{l\in L}\sum_{i\in I}\sum_{m\in M} (aa_{\text{lim}} A_{\text{lim}}^t + bb_{\text{lim}} B_{\text{lim}}^t) + \sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{m\in M} d_{jkm}^t R_{jkm}^t X_{km} + \sum_{l\in L}\sum_{m\in M}\sum_{d\in D} F_{lmd}^t P_{lmd}^t X_{md} + \sum_{l\in L}\sum_{d\in D}\sum_{n\in N} F_{ldn}^t P_{ldn}^t X_{dn} \quad (۳۹)$$

$$F_2 = \min \sum_t \Big(\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{m\in M} co_{jkm}^t R_{jkm}^t X_{km} + \sum_{l\in L}\sum_{m\in M}\sum_{d\in D} co_{lmd}^t P_{lmd}^t X_{md} + \sum_{l\in L}\sum_{d\in D}\sum_{n\in N} co_{ldn}^t P_{ldn}^t X_{dn} + \sum_{m\in M} EE_m^t Q_m^t + \sum_{d\in D} EE_d^t U_d^t \Big) \quad (۴۰)$$

$s.t.$

$$\sum_{n\in N} O_{\ln}^t P_{\ln d}^t - \sum_{m\in M} OO_{ld}^t P_{lmd}^t + \Gamma_{ld}^t Z_{ld}^t + \sum_{m\in M} W_{lmd}^t \le ۰ \qquad \forall t,l,d \quad (۴۱)$$

$$Z_{ld}^t + w_{lmd}^t \ge \hat{o}\hat{o}_{ld}^t P_{lmd}^t \qquad \forall t,l,m,d \quad (۴۲)$$

$$\text{Eqs(۳-۲۴)} \quad (۴۳)$$

$$Z_{ld}^t, W_{lmd}^t \ge ۰. \quad (۴۴)$$

٦ نتایج عددی

به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل ارایه‌شده، مساله‌ای با ۳ تأمین‌کننده، ۶ نقطه تقاضا، ۲ خط تولید، ۳ توزیع‌کننده و ۴ دوره در نظر گرفته‌شده است. پارامترهای این مدل به‌صورت تصادفی ایجادشده است. در این قسمت هدف حل مساله به‌صورت قطعی و استوار هست. برای حل مدل با استفاده از لپ تاپ ASUS (با پردازنده i7 و رم 12) و با استفاده از حل‌کننده CPLEX و با به‌کارگیری نرم‌افزار GAMS صورت می‌پذیرد. در جدول ۱ حدود داده‌های اسمی پارامترها در تولید مساله نمونه مشاهده می‌شود.

جدول ۱. داده‌های اسمی پارامترها در تولید مساله نمونه

ردیف	نام پارامتر	حدود داده
۱	C_m^t	U≈ (۵۰۰,۷۰۰)
۲	C_d^t	U≈ (۱۰۰,۲۰۰)
۳	u_{im}^t	U≈ (۵۰,۷۰)
۴	d_{jkm}^t	U≈ (۱۵,۲۰)
۵	f_{lmd}^t	U≈ (۱۰,۱۵)
۶	f_{ldn}^t	U≈ (۱۶,۲۵)
۷	oo_{ld}^t	U≈ (۱۵,۲۰)
۸	aa_{lim}	U≈ (۸,۱۰)
۹	bb_{lim}	U≈ (۸,۱۰)
۱۰	o_{ln}^t	U≈ (۱,۲)

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.6.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.4.53]

۱۱	b_{jl}	U≈ (۱۰۰,۱۲۰)
۱۲	a_{jk}^{t}	U≈ (۱۰,۲۰)
۱۳	w_{lim}	U≈ (۱۰,۲۰)
۱۴	v_{i}^{t}	U≈ (۱۲۰,۱۵۰)
۱۵	r_{i}^{t}	U≈ (۹۰,۱۰۰)
۱۶	co_{jkm}^{t}	U≈ (۱۰,۱۲)
۱۷	co_{lmd}^{t}	U≈ (۱۰,۱۵)
۱۸	co_{ldn}^{t}	U≈ (۱۰,۱۲)
۱۹	x_{km}	U≈ (۱۲,۱۳)
۲۰	x_{md}	U≈ (۱۳, ۱۸)
۲۱	x_{dn}	U≈ (۱۰, ۱۴)
۲۲	ee_{m}^{t}	U≈ (۱۵,۲۰)
۲۳	ee_{d}^{t}	U≈ (۱۵,۱۷)
۲۴	$O_{\ln}^{t}$	U≈ (۵,۱۵)
۲۵	OO_{ld}^{t}	U≈ (۱,۱۰)
۲۶	$\hat{o}\hat{o}_{ld}^{t}$	$۰/۲OO_{ld}^{t}$

در جدول ۲، مقایسه توابع اهداف در حالات قطعی و استوار نسبت به سطح محافظ‌کارانه در ۴ دوره مختلف که برای هر دوره ۵ سطح محافظ کاری در نظر گرفته شده است، مشاهده می‌گردد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش سطح محافظه‌کاری در هر دوره میزان هریک از توابع اهداف، کمینه‌سازی هزینه‌ها و کمینه‌سازی میزان انتشار گاز کربن در هردو حالت قطعی و استوار افزایش می‌یابد به‌طوری‌که مقادیر هرکدام از توابع اهداف چه کمینه‌سازی هزینه و چه کمینه‌سازی میزان انتشار کربن در حالت استوار افزایش چشم‌گیرتری نسبت به حالت قطعیت دارد.

جدول ۲. نتایج محاسباتی توابع اهداف در رویکرد استوار

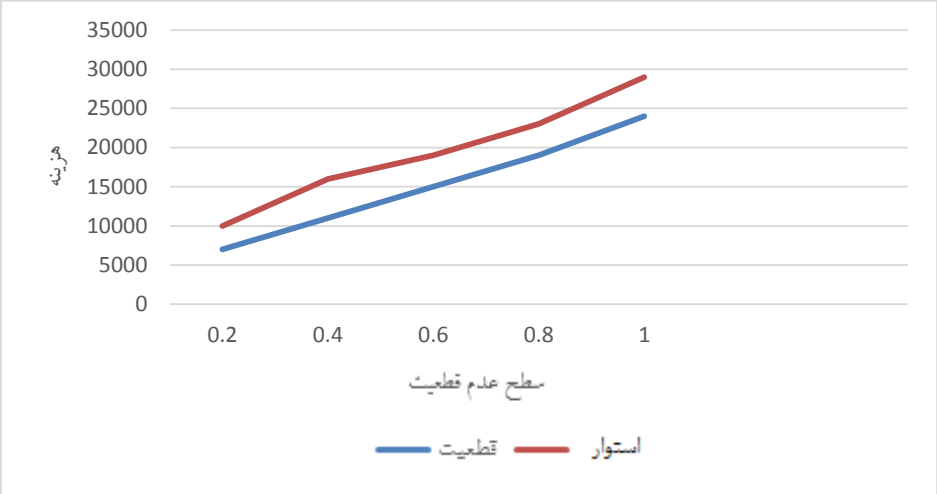
دوره	۷	تابع هدف ۱ (قطعی)	تابع هدف ۲ (قطعی)	تابع هدف ۱ (استوار)	تابع هدف ۲ (استوار)
۱	۰/۲	۲۷۳۸۹/۱۱۸	۱۶۹۶۸/۶۲۱	۳۵۲۱۱/۱۲۳	۲۰۱۵۲/۳۱۸
۱	۰/۴	۳۱۳۵۴/۱۲۵	۱۸۳۵۲/۱۴۸	۳۹۲۵۴/۲۹۵	۲۳۷۸۶/۹۱۴
۱	۰/۶	۳۴۱۲۰/۵۲۰	۲۱۰۶۵/۱۲۳	۴۳۱۱۷/۳۲۵	۲۶۷۵۲/۳۲۱
۱	۰/۸	۳۹۹۶۵/۵۲۱	۲۴۳۵۲/۲۱۵	۴۷۵۰۱/۳۲۶	۲۷۹۵۵/۳۲۱
۱	۰.۹	۴۴۵۹۳/۲۷۳	۲۷۰۳۵/۶۱۳	۵۱۲۳۵/۵۲۳	۳۰۱۲۲/۱۲۳
۲	۰/۲	۵۰۰۷۲/۵۹۱	۲۹۹۳۲/۴۳۱	۵۴۲۳۱/۲۱۱	۳۴۲۳۱/۲۹۶
۲	۰/۴	۵۴۱۲۳/۲۱۰	۳۲۱۹۳/۲۱۳	۵۷۶۳۲/۲۱۴	۳۷۵۱۲/۱۱۲
۲	۰/۶	۵۷۱۳۰/۲۱۱	۳۵۱۰۹/۹۴۳	۶۰۳۲۰/۹۵۲	۴۰۱۲۳/۹۶۱
۲	۰/۸	۶۰۱۲۲/۳۶۵	۳۹۱۲۵/۲۱۵	۶۳۹۳۲/۳۲۰	۴۴۹۳۲/۱۲۳
۲	۰/۹	۶۷۲۳۰/۰۱۲	۴۳۵۲۶/۲۵۵	۶۹۲۵۰/۱۹۱	۴۹۱۲۳/۶۵۲

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.6.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.4.53]

۳	۰/۲	۷۱۲۰۳/۲۱۴	۴۶۱۰۳/۲۵۰	۷۳۱۰۲/۱۲۳	۵۳۱۰۲/۲۳۱
۳	۰/۴	۷۶۰۰۱/۲۱۵	۵۰۱۲۳/۹۲۱	۷۷۲۵۲/۵۴۱	۵۶۱۲۳/۲۳۵
۳	۰/۶	۸۱۲۵۶/۲۱۹	۵۴۰۱۳/۳۲۱	۸۴۰۲۴/۲۳۱	۶۰۱۲۵/۲۱۰
۳	۰/۸	۸۶۲۰۱/۲۵۹	۵۹۱۲۵/۲۰۱	۸۹۳۲۰/۲۵۲	۶۴۱۲۰/۳۲۵
۳	۰/۹	۹۰۱۲۰/۱۱۰	۶۳۲۵۰/۵۲۰	۹۳۲۰۱/۳۲۱	۶۹۲۱۰/۳۲۵
۴	۰/۲	۹۳۲۰۱/۹۱۱	۶۸۲۱۱/۲۱۲	۹۵۲۱۰/۲۰۹	۷۳۲۱۲/۲۱۲
۴	۰/۴	۹۶۲۰۰/۱۲۹	۷۱۲۰۳/۳۲۰	۹۹۳۰۱/۱۹۲	۷۶۳۲۰/۲۹۳
۴	۰/۶	۱۰۰۹۶۳/۲۱	۷۵۲۳۰/۹۶۱	۱۰۳۵۶۵/۳۲	۷۹۳۲۲/۳۱۲
۴	۰/۸	۱۰۴۳۲۰/۱۲	۷۸۹۶۰/۱۲۱	۱۰۷۳۲۰/۱۶	۸۳۲۵۲/۱۲۵
۴	۰/۹	۱۰۷۲۳۰/۱۲	۸۲۳۰۰/۲۳۵	۱۱۲۶۳۲/۹۲	۸۶۷۵۲/۲۱۴

۷ تحلیل حساسیت

در این قسمت با توجه به اطلاعات قسمت قبلی، روی پارامترهای مساله تحلیل حساسیت انجام‌شده و نتایج آن به‌صورت نمودارهایی نشان داده‌شده است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود با افزایش سطح عدم قطعیت میزان تابع هزینه در هردو حالت قطعی و استوار افزایش می‌یابد اما شیب افزایش در حالت استوار نسبت به حالت قطعی بیشتر است. علت این است که هرچه سطح محافظه‌کارانه یا همان عدم قطعیت افزایش یابد اولاً هزینه‌ها به هزینه واقعی نزدیک می‌شوند و بنابراین باعث افزایش می‌گردد. دوما همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده گردید تابع هزینه‌ی استواری افزایش چشم‌گیرتری نسبت به تابع هزینه داده‌های قطعی دارد. در شکل ۲ نیز مشاهده می‌شود که با افزایش سطح عدم قطعیت، میزان انتشار گاز CO_2 در هردو حالت قطعی و استوار افزایش می‌یابد اما شیب افزایش در حالت استوار نسبت به حالت قطعی بیشتر است. درواقع بالا بردن سطح محافظه‌کاری باعث افزایش میزان تولید کالاها و درنتیجه باعث افزایش حمل‌ونقل و میزان انتشار گاز کربن می‌شود.

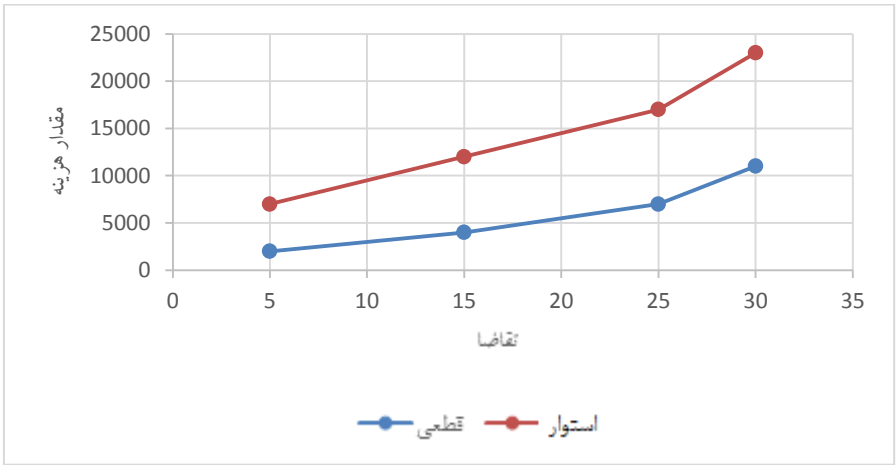


شکل ۱. مقایسه تابع هدف اول در حالت قطعی و استوار

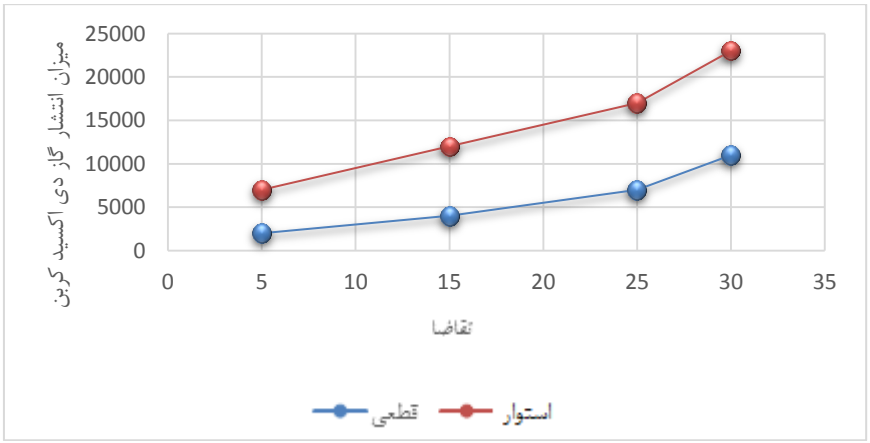
[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.6.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.4.53]



شکل ۲. مقایسه تابع هدف دوم در حالت قطعی و استوار



شکل ۳. مقایسه تابع هدف اول در حالت استوار و قطعی با تغییر متغیر تقاضا



شکل ٤. مقایسه تابع هدف دوم در حالت استوار و قطعی با تغییر متغیر تقاضا

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.6.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.4.53]

شکل ۳ افزایش میزان هزینه را در مقابل افزایش سطح تقاضا نشان می‌دهد. در اینجا در هر دو حالت قطعی و استوار با افزایش مقدار هزینه مواجهیم اما شیب افزایش در حالت استواری نسبت به حالت قطعی بیشتر است. علت آن است که با افزایش تقاضا میزان هزینه‌های حمل‌ونقل و درنتیجه کل هزینه محصول افزایش پیدا می‌یابد. شکل ۴ نیز نشان‌دهنده نسبت افزایش میزان تقاضا در برابر میزان انتشار گاز CO_2 است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش میزان تقاضا میزان انتشار گاز CO_2 در هر دو حالت استوار و قطعی افزایش می‌یابد اما شیب افزایش در حالت استوار بسیار بیشتر از حالت قطعیت است. درواقع ازآنجاکه با افزایش تقاضا مقدار حمل‌ونقل هم افزایش می‌یابد پس میزان انتشار گاز کربن هم افزایش می‌یابد. درستی این نمودارها و مطابقت آن‌ها با انتظار از تغییرات، نشان‌دهنده درستی برنامه‌ریزی خطی انجام‌شده در حالت قطعی و استوار است.

۸ نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک مدل دو هدفه زنجیره‌تأمین سبز چندمحصولی، چند دوره‌ای در دو حالت قطعی و استوار توسعه داده شد به‌طوری‌که برای تابع هدف اول چند مکان کاندید برای احداث توزیع‌کننده در نظر گرفته شده است و در تابع هدف دوم میزان انتشار گاز کربن هر وسیله نقلیه و میزان انتشار گاز کربن هر کارخانه هم لحاظ گردیده است. برای تحلیل‌های نزدیک به واقعیت از پارامترهای غیرقطعی استفاده شد که برای مقابله با پارامترهای عدم قطعیت از رویکرد بهینه‌سازی استوار سناریوی استفاده گردید و یک مثال عددی برای بررسی درستی مدل حل شد. با بررسی مثال عددی و نتایج آن مشاهده شد که میزان افزایش پارامترهای هزینه و میزان انتشار کربن در حالت استوار نسبت به حالت قطعی بسیار بیشتر است. پس مدل در حالت استواری نتایج نزدیک‌تری به واقعیت را نشان می‌دهد. همچنین تأثیر میزان افزایش تقاضا بر هردو پارامتر هزینه و میزان انتشار کربن مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده گردید که رابطه مستقیم نسبت به هر دو دارد به‌طوری‌که با افزایش تقاضا هرکدام از پارامترهای هزینه و انتشار کربن نیز افزایش پیدا خواهند کرد. برای مطالعات آینده می‌توان مدل پیشنهادی را با استفاده از برنامه‌ریزی فازی و یا احتمالی مورد بررسی قرارداد. همچنین مدل پیشنهادی به خاطر پیچیدگی بیش‌ازحد قابلیت استفاده در ابعاد بالا را ندارد و بایستی از روش‌های فراابتکاری برای حل این مدل در ابعاد بالاتر استفاده شود.

منابع

[1] Haddadsisakht, A., & Ryan, S. M. (2018). Closed-loop supply chain network design with multiple transportation modes under stochastic demand and uncertain carbon tax. International Journal of Production Economics, 195, 118-131.

[2] Rezaee, A., Dehghanian, F., Fahimnia, B., & Beamon, B. (2017). Green supply chain network design with stochastic demand and carbon price. Annals of Operations Research, 250(2), 463-485.

[3] Elhedhli, S., & Merrick, R. (2012). Green supply chain network design to reduce carbon emissions. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 17(5), 370-379.

[4] Jabbarzadeh, A., Haughton, M., & Khosrojerdi, A. (2018). Closed-loop supply chain network design under disruption risks: A robust approach with real world application. Computers & Industrial Engineering, 116, 178-191.

[5] Xu, Z., Elomri, A., Pokharel, S., & Mutlu, F. (2019). The Design of Green Supply Chains under Carbon Policies: A Literature Review of Quantitative Models. Sustainability, 11(11), 3094.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.6.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.4.53]

[6] 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.
[7] Paul, J. A., & Wang, X. J. (2019). Robust location-allocation network design for earthquake preparedness. Transportation research part B: methodological, 119, 139-155.
[8] Ghaderi, H., Moini, A., & Pishvaee, M. S. (2018). A multi-objective robust possibilistic programming approach to sustainable switchgrass-based bioethanol supply chain network design. Journal of cleaner production, 179, 368-406.
[9] Rad, R. S., & Nahavandi, N. (2018). A novel multi-objective optimization model for integrated problem of green closed loop supply chain network design and quantity discount. Journal of cleaner production, 196, 1549-1565.
[10] Hussain, M., Khan, M., & Al-Aomar, R. (2016). A framework for supply chain sustainability in service industry with Confirmatory Factor Analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 55, 1301-1312.
[11] Zhu, W., & He, Y. (2017). Green product design in supply chains under competition. European Journal of Operational Research, 258(1), 165-180.
[12] Matsumoto, M., Chinen, K., & Endo, H. (2018). Remanufactured auto parts market in Japan: Historical review and factors affecting green purchasing behavior. Journal of cleaner production, 172, 4494-4505.
[13] Govindan, K., Fattahi, M., & Keyvanshokooh, E. (2017). Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions. European Journal of Operational Research, 263(1), 108-141.
[14] Yavari, M., & Geraeli, M. (2019). Heuristic method for robust optimization model for green closed-loop supply chain network design of perishable goods. Journal of Cleaner Production, 226, 282-305.
[15] Zhen, L., Huang, L., & Wang, W. (2019). Green and sustainable closed-loop supply chain network design under uncertainty. Journal of Cleaner Production, 227, 1195-1209.
[16] Mardan, E., Govindan, K., Mina, H., & Gholami-Zanjani, S. M. (2019). An accelerated benders decomposition algorithm for a bi-objective green closed loop supply chain network design problem. Journal of Cleaner Production.
[17] Amin-Tahmasbi, H., Badri, S., & Rezazadeh, B. (2019). A Novel Mix Integer Linear Programming Model for Design of Multi-Level Integrated Supply Chain. Quarterly Journal of Transportation Engineering, 11(2), 497-524.
[18] Mansori, A., Iranzadeh, S., & Hadi, A. (2018). Designing a Model of Social Performance for Green Supply Chain using Fuzzy Mathematical Programming under Uncertain Conditions. Journal of Operational Research and Its Applications, 15(3): 87-106.
[19] Moradi, M., Salahi, M., Bardsiri, M., & Jamalian, A. (2014). A new model based on the design of the supply chain network under uncertainty. Journal of Operations Research in its Applications, 11 (2), 9-26.
[20] Azar, A., & Mousavi, S. F. (2014). Design a three-step integrated and robust model for supplier selection with an uncertainty approach. Journal of Operations Research in its Applications, 11(1), 1-18.
[21] Shahmoradi, M., Salahi, M., & Lotfi, S. (2018). Model of average absolute deviation with uncertainty on returns to optimize the portfolio. Journal of Operations Research in its Applications, 15(2), 1-17.
[22] Govindan, K., Mina, H., Esmaeili, A., & Gholami-Zanjani, S. M. (2020). An integrated hybrid approach for circular supplier selection and closed loop supply chain network design under uncertainty. Journal of Cleaner Production, 242, 118317.
[23] Mohebalizadehgashti, F., Zolfagharinia, H., & Amin, S. H. (2020). Designing a green meat supply chain network: A multi-objective approach. International Journal of Production Economics, 219, 312-327.
[24] Sherafati, M., Bashiri, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Pishvaee, M. S. (2020). Achieving sustainable development of supply chain by incorporating various carbon regulatory mechanisms. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 81,
[25] Diabat, A., & Jebali, A. (2021). Multi-product and multi-period closed loop supply chain network design under take-back legislation. International Journal of Production Economics, 231, 107879.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.6.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.4.53]

[26] Jouzdani, J., & Govindan, K. (2021). On the sustainable perishable food supply chain network design: A dairy products case to achieve sustainable development goals. Journal of Cleaner Production, 278, 123060.
[27] Rahimimanesh, A., Amin-Tahmasbi, H., shahroodi, K., (2020). Providing a mathematical optimization model for the multi-product supply chain despite the possibility of supplier disruption under sanctions (Case Study of Refinery Repair Industries). Modeling in Engineering, 18(60), 107–125.
[28] Zarrat Dakhely Parast, Z., Haleh, H., Avakh Darestani, S., Amin-Tahmasbi, H. (2021). Green reverse supply chain network design considering location-routing-inventory decisions with simultaneous pickup and delivery, Environmental Science and Pollution Research International, https://doi.org/10.1007/s11356-021-13770-4.
[29] Ghahremani nahr, J., Ghodratnama, A., IzadBakhah, H., & Tavakkoli Moghaddam, R. (2019). Design of multi-objective multi-product multi period green supply chain network with considering discount under uncertainty. Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems, 6(13), 119-137.
[30] Soyster, A. L. (1973). Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. Operations research, 21(5), 1154-1157.
[31] Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J., & Zenios, S. A. (1995). Robust optimization of large-scale systems. Operations research, 43(2), 264-281.
[32] Ben-Tal, A., & Nemirovski, A. (2000). Robust solutions of linear programming problems contaminated with uncertain data. Mathematical programming, 88(3), 411-424.
[33] Bertsimas, D., & Sim, M. (2004). The price of robustness. Operations research, 52(1), 35-53.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.6.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.4.53]