

مدل سازی ریاضی و روش اپسیلون - محدودیت فازی در طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته ماسک

علیرضا گلی (استادیار)

کامران کیانفار* (استادیار)

گروه مهندسی صنایع و آینده پژوهی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اصفهان

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، تابستان ۱۴۰۱
دوره ۱، شماره ۱، ص. ۱۱۹-۱۲۸، (پادداشت فنی)

استفاده از ماسک‌ها مهم‌ترین ابزار مقابله با انواع ویروس‌ها، از جمله ویروس کروناست. در این تحقیق به طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته برای انواع ماسک‌ها پرداخته شده است. زنجیره‌ی مورد مطالعه شامل تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و خرده‌فروشان در زنجیره‌ی پیشرو و مراکز جمع‌آوری، مراکز جداسازی، مراکز بازیافت و مراکز دفع در زنجیره‌ی برگشتی است. در این جا یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی دوهدفه با اهداف افزایش سود زنجیره‌ی تأمین و کاهش اثرات زیست‌محیطی ارائه می‌شود؛ بهینه‌سازی این مدل ریاضی با رویکرد بهینه‌سازی فازی در محیط نرم‌افزار GAMS انجام گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که اهداف بیشینه‌سازی سود نهایی و کمینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی در تقابل با یکدیگرند زیرا کاهش اثرات زیست‌محیطی منجر به افزایش کل هزینه می‌شود و سود سازمان را کاهش می‌دهد. همچنین افزایش تقاضا برای انواع ماسک، سود زنجیره را به صورت خطی افزایش می‌دهد اما تأثیر آن بر اثرات زیست‌محیطی زنجیره، رفتاری غیرخطی دارد.

واژگان کلیدی: زنجیره‌ی تأمین ماسک، طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین، زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته، رویکرد بهینه‌سازی فازی، اثرات زیست‌محیطی.

۱. مقدمه

یک زنجیره‌ی تأمین مجموعه‌ی بی‌از فعالیت‌ها شامل خرید، تولید و توزیع می‌شود که بر اساس آن یک کالا یا خدمت (ارزش) به مشتری نهایی انتقال می‌یابد. زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته شامل فعالیت‌های تولید، نگهداری و توزیع در مسیر پیشرو از تأمین‌کننده‌ی مواد اولیه به مشتری نهایی و همچنین فعالیت‌های جمع‌آوری و انتقال کالای بازبافتی از مشتری می‌شود.^[۱] امروزه، هیچ شرکتی نمی‌تواند از مدیریت زنجیره‌ی تأمین چشم‌پوشی کند و همچنان انتظار بقا داشته باشد. اکنون، اندیشه‌ی زنجیره‌ی تأمین به یک اندیشه‌ی رایج در تمامی شرکت‌های عمده‌ی سراسر جهان تبدیل شده است. اگر تا همین چند سال پیش، دسترسی به بازارهای جهانی فقط در اختیار بزرگترین و موفق‌ترین شرکت‌ها بود، امروزه به برکت وجود اینترنت، حتی کوچک‌ترین شرکت‌ها نیز می‌توانند به بازارها و نمایشگاه‌های اینترنتی وارد شده و کالای خود را با بهترین قیمت‌ها و شرایط عرضه کنند.

در رقابت‌های جهانی موجود در عصر حاضر، باید محصولات متنوع را با توجه به درخواست مشتری، در دسترس وی قرار داد. خواست مشتری بر کیفیت بالا و خدمت‌رسانی سریع، موجب افزایش فشارهایی شده که قبلاً وجود نداشته است. در نتیجه شرکت‌ها بیش از این نمی‌توانند به تنهایی از عهده‌ی تمامی کارها برآیند. در بازار

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۳/۸، اصلاحیه ۱۴۰۰/۶/۱۰، پذیرش ۱۴۰۰/۷/۲۷

DOI:10.24200/J65.2021.58447.2230

رقابتی موجود، بنگاه‌های اقتصادی و تولیدی علاوه بر پرداختن به سازمان و منابع داخلی، خود را به مدیریت و نظارت بر منابع و ارکان مرتبط خارج از سازمان نیازمند یافته‌اند. علت این امر در واقع دستیابی به مزیت رقابتی با هدف کسب سهم بیشتری از بازار با در نظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی است. بر این اساس، فعالیت‌هایی نظیر برنامه‌ریزی عرضه و تقاضا، تهیه‌ی مواد، تولید و برنامه‌ریزی محصول، خدمت‌نگهداری کالا، کنترل موجودی، توزیع، تحویل و خدمت به مشتری که قبلاً همگی در سطح شرکت انجام می‌شد اکنون به سطح زنجیره‌ی تأمین انتقال یافته است. مسئله‌ی کلیدی در یک زنجیره‌ی تأمین، مدیریت و کنترل هماهنگ تمامی این فعالیت‌هاست. مدیریت زنجیره‌ی تأمین پدیده‌ی بی‌است که این کار را به طریقی انجام می‌دهد که مشتریان بتوانند خدمت قابل اطمینان و سریع را با محصولات با کیفیت و با کمترین هزینه دریافت کنند. در حالت کلی زنجیره‌ی تأمین از دو یا چند سازمان تشکیل می‌شود که رسماً از یکدیگر جدا هستند و به وسیله‌ی جریان‌های مواد، اطلاعات و جریان‌های مالی به یکدیگر مربوط می‌شوند. این سازمان‌ها می‌توانند بنگاه‌هایی باشند که مواد اولیه، قطعات، محصول نهایی یا خدماتی چون توزیع، انبارش، عمده‌فروشی و خرده‌فروشی تولید می‌کنند. حتی خود مصرف‌کننده‌ی نهایی را نیز می‌توان یکی از این سازمان‌ها در نظر گرفت.

در نیمه‌ی اول سال ۲۰۲۰ با شیوع پاندمی ویروس کوید - ۱۹، کمبود شدیدی در تجهیزات پزشکی مورد نیاز برای مقابله با این ویروس در سطح جهانی به وجود

آمد.^[۲] این موضوع اهمیت وجود یک زنجیره تأمین برای تجهیزات حفاظت فردی و کیت‌های آزمایش و بیوس را در سرتاسر جهان مشخص ساخت. به نقل از خبرگزاری ایسنا، سرپرست وزارت صمت در سخنرانی ۲۳ تیرماه ۱۳۹۹ تأکید کرد که بهترین مدل تولید ماسک به شکل تولید درون زنجیره تأمین است و باید تکمیل زنجیره تولید در هر واحد تولیدی در دستورکار قرار گیرد.^[۳] در گزارش سازمان جهانی توسعه و همکاری اقتصادی^[۴] در ماه می دلایل کمبود ماسک‌های جراحی و N۹۵ در زمان شیوع کوید - ۱۹ در سطح جهانی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این گزارش به لزوم همکاری کشورها در تأمین این محصول در مواقع ضروری و تشکیل زنجیره‌های تأمین جهانی تأکید شده است. بر اساس بررسی ادبیات موضوع، تاکنون کمتر پژوهشی به صورت اختصاصی به مدل‌سازی و تحلیل زنجیره تأمین حلقه‌بسته ماسک پرداخته است. با در نظر گرفتن اهمیت روزافزون تأمین ماسک‌های پزشکی و لزوم بازیافت ماسک‌های مصرف شده، مشخص است که پژوهش حاضر می‌تواند نقش مهمی در بهینه‌سازی فرایند تولید و توزیع این محصول داشته باشد.

پژوهش حاضر با دید نه فقط اقتصادی، بلکه اقتصادی توأم با مسائل زیست‌محیطی، بر طراحی زنجیره تأمین ماسک متمرکز می‌شود و در آن یک مدل ریاضی چندهدفه جدید به همراه روش حل فازی آن برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین ماسک ارائه می‌شود. در بخش دوم این مقاله پیشینه پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد. در فصل ۳ تعریف دقیق مسئله و مدل‌سازی ریاضی آن ارائه خواهد شد؛ این مدل در فصل ۴ در قالب روش پیشنهادی حل می‌شود. نحوه تولید داده‌های ورودی و نتایج محاسباتی در بخش ۵ مقاله ارائه می‌شود و آخرین بخش نیز به نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای مطالعات آتی اختصاص یافته است.

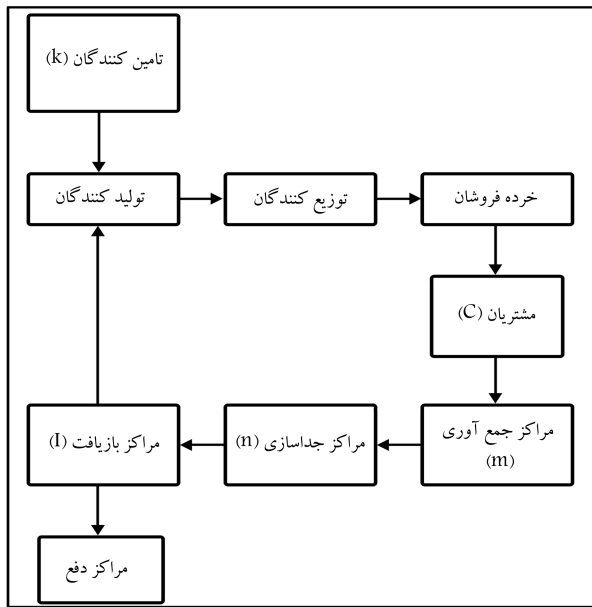
۲. پیشینه‌ی پژوهش

بهینه‌سازی زنجیره تأمین معکوس و حلقه‌بسته از جمله مسائلی است که در ادبیات موضوع مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته است. کو و ایوانز^[۵] در سال ۲۰۰۷ یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته را برای طراحی شبکه‌ی لجستیک یکپارچه‌ی مستقیم و معکوس برای فراهم‌آوردندگان خدمات لجستیک ارائه دادند. برای غلبه بر عدم قطعیت موجود شرایط، مشخصه‌های مسئله برای هر دوره تعیین شد و در دوره‌ی بعد، مدل مجدداً برای مشخصه‌های جدید حل شد. آنها الگوریتم ژنتیک را برای حل مدل توسعه دادند. در همان سال، دولانرت و همکاران^[۶] مروری کلی بر طراحی مدل‌های زنجیره تأمین داشتند و از این طریق، امکان دستیابی به مدل‌های کامل‌تر - که قابلیت در نظر گرفتن تمامی هزینه‌های لجستیکی را داشته باشند - را فراهم کردند. آراس و همکاران^[۷] در سال ۲۰۰۸ یک مدل غیرخطی از شبکه‌ی لجستیک را ارائه دادند و با کمک الگوریتم جست‌وجوی ممنوع به حل آن پرداختند. آنها از این طریق، موقعیت مکانی مراکز جمع‌آوری و قیمت بهینه‌ی خرید محصولات را محاسبه کردند. هدف آنها بهینه‌سازی سود در یک شبکه‌ی لجستیک معکوس بود. دو و ایوانز^[۸] در سال ۲۰۰۸، یک شبکه‌ی لجستیک حلقه‌بسته را در نظر گرفتند که توسط فراهم‌آوردندگان لجستیک طرف سوم اداره می‌شد. آنها هدف خود را کمینه‌سازی دیرکرد و هزینه‌ی کل تصمیمات مربوط به جایابی و ظرفیت تسهیلات قرار دادند و برای حل مدل خود نیز از روش ترکیبی جست‌وجوی پراکنده استفاده کردند. پیشوایی و همکاران^[۹] برای طراحی یکپارچه‌ی شبکه‌ی لجستیک مستقیم و معکوس از یک مدل خطی عدد صحیح آمیخته استفاده کردند. آنها برای کمینه‌سازی هزینه‌ها و بهینه‌سازی پاسخ‌گویی،

مدل را با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک مجهز به جست‌وجوی همسایگی حل کردند.

در تحقیقات جدیدتر، کانان و همکاران^[۱۰] بازیافت باتری‌ها را تحت قالب یک زنجیره تأمین سبز حلقه‌بسته مورد بررسی قرار دادند. هدف اساسی این تحقیق طراحی یک زنجیره‌ی چندسطحی و تصمیم‌گیری در خصوص نحوه‌ی تولید و توزیع کالای مورد نظر، لحاظ کردن شرایط زیست‌محیطی است. این مسئله توسط الگوریتم فراابتکاری ژنتیک حل و نتایج مورد تحلیل قرار گرفته است. حسن‌زاده و وانگ^[۱۱] در سال ۲۰۱۳ یک مدل ریاضی چندهدفه برای طراحی زنجیره تأمین سبز حلقه‌بسته ارائه کردند. ساختار زنجیره‌ی مورد بررسی شامل کارخانه‌های تولیدی، مراکز مونتاژ، مراکز جمع‌آوری و مراکز بازیافت است. اهداف مورد بررسی شامل کاهش هزینه‌ها و کاهش نرخ آسیب‌رسانی به زنجیره تأمین است. این محققین مسئله‌ی ارائه شده را با مثال‌های عددی مختلف حل کرده و نتایج را تحلیل کرده‌اند. گاویندان و همکاران^[۱۲] در سال ۲۰۱۵ به مرور مباحث مرتبط با زنجیره تأمین حلقه‌بسته پرداخته‌اند. در این مقاله تحقیقات در سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۳ از نظر نگاه به مسئله و متدولوژی آنها مرور شده است. در این مقاله تلفیق مباحث زنجیره تأمین سبز با مباحث زنجیره تأمین حلقه‌بسته و استفاده از روش‌های کمی برای طراحی زنجیره‌ی آن، به‌عنوان یکی از جذاب‌ترین مباحث جدید در این حوزه معرفی شده است.

طلایی و همکاران^[۱۳] در سال ۲۰۱۶ به طراحی یک زنجیره تأمین چندسطحی در صنعت الکترونیک به صورت حلقه‌بسته سبز پرداخته‌اند. در این تحقیق هدف ارائه زنجیره‌ی است که کمترین میزان کربن تولیدی را داشته باشد و همچنین کمترین هزینه را به کل زنجیره وارد کند. به منظور طراحی زنجیره تأمین در مسئله‌ی مورد نظر، مکان‌یابی مراکز تولیدی و مراکز انباشت و مراکز بازیافت تصمیم‌گیری می‌شود. این مسئله در شرایط عدم قطعیت فازی پیاده‌سازی شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. وی و همکاران^[۱۴] یک زنجیره تأمین حلقه‌بسته با تقارن اطلاعاتی را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق به منظور بررسی قیمت فروش محصولات از رویکرد نظریه‌ی بازی‌ها استفاده شده است. در این تحقیق به تعیین قیمت عمده‌فروشی و خرده‌فروشی و نیز میزان نگهداری در هر یک از انبارها در شرایط تقارن اطلاعاتی پرداخته شده است. کایا و یورک^[۱۵] در سال ۲۰۱۶ یک مدل غیرخطی عدد صحیح به منظور مکان‌یابی و تعیین موجودی و نیز قیمت فروش در یک زنجیره حلقه‌بسته ارائه کردند. در این تحقیق میزان تقاضا به صورت یک رابطه‌ی نمایی از میزان قیمت تعیین شده ارائه شده است. به منظور حل این مدل یک روش ابتکاری مبتنی بر سیستم سفارش موجودی و نیز دوره‌ی سفارش‌دهی طراحی و پیاده‌سازی شده است. زهل و سلیمانی^[۱۶] در سال ۲۰۱۶ به ترکیب لجستیک رفت و لجستیک معکوس به منظور طراحی یک زنجیره تأمین حلقه‌بسته پرداخته‌اند. برای این منظور علاوه بر کمینه‌سازی هزینه‌های کل زنجیره‌ی کاهش تولید گازهای دی‌اکسید کربن به‌عنوان یک هدف سبز نیز معرفی شده است. برای حل این مدل یک الگوریتم کلونی مورچگان توسعه داده شده است. سقاییان و رضانیان^[۱۷] در سال ۲۰۱۸ به بهینه‌سازی زنجیره تأمین رقابتی در شرایط چندمحصولی و تقاضای وابسته به قیمت پرداخته‌اند. برای این منظور یک مدل عدد صحیح غیرخطی توسعه داده شده است. برای حل این مدل ریاضی یک الگوریتم ترکیبی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و الگوریتم کرم شب‌تاب ارائه شده است. نوبری و همکاران^[۱۸] یک رقابت زنجیره - زنجیره را مورد مطالعه قرار داده و در آن موضوعات زیست‌محیطی و اجتماعی را لحاظ کرده‌اند. برای این منظور از رویکرد نظریه‌ی بازی‌ها استفاده شده است. در نهایت مجموعه‌ی راه حل‌های پارتو برای این مسئله‌ی رقابتی ارائه شده است. وانگ و همکاران^[۱۹] در سال ۲۰۲۰ یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای



شکل ۱. چارچوب زنجیره‌ی تأمین بسته پیشنهادی.

راه‌حل‌های متوازن را با ایجاد یک تعادل مناسب بین اهداف محیطی و اقتصادی ایجاد کند.

از دیدگاه اقتصادی، سازمان باید سود نهایی را بیشینه کند، در حالی که تقاضای بخش تولیدی کارخانه را برآورده می‌کند. برای این منظور سازمان باید بدانند چه تعدادی از ماسک‌ها باید در فرایند بازسازی به‌کار گرفته شوند و چه مقدار مواد اولیه‌ی جدید از تأمین‌کنندگان خارجی خریداری شوند. در این مسئله مناطق متعدد مشتری، مراکز جمع‌آوری، مراکز جداسازی و مراکز بازافت وجود دارد و بنابراین مدل نه تنها تعداد ماسک‌ها و مواد اولیه مورد پردازش را معین می‌کند بلکه باید در مورد این که کدام مرکز تأسیساتی احداث شوند نیز تصمیم‌گیری کند. همچنین مقدار مواد اولیه خریداری شده از تأمین‌کننده خارجی توسط مدل تعیین می‌شود. از دید زیست‌محیطی، دو عامل اصلی در ایجاد تأثیرات نامطلوب زیست‌محیطی وجود دارد. مورد اول، کربن ایجاد شده در اثر حمل‌ونقل انواع ماسک‌ها و مورد دوم، تأثیرات نامطلوب دفع ماسک‌های استفاده شده است. بر همین اساس و با توجه به اهمیت تأثیرات زیست‌محیطی در زنجیره‌ی تأمین ماسک، کاهش اثرات نامطلوب زیست‌محیطی در کنار تابع هدف اقتصادی، به‌طور هم‌زمان بهینه‌سازی می‌شود.

اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم استفاده شده برای فرموله کردن مدل چندهدفه در زیر معرفی شده است.

۱.۳. اندیس‌ها

c : مناطق مشتری؛

\bar{c} : مواد اولیه‌ی مصرفی در تولید ماسک؛

z : مجموعه‌ی انواع ماسک‌ها؛

k : تأمین‌کنندگان؛

l : مراکز بازافت؛

m : مراکز جمع‌آوری؛

n : مراکز جداسازی.

طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین چندمحصولی و چنددوره‌ی در شرایط رقابتی ارائه کرده‌اند. در این مدل ریاضی، علاوه بر مکان‌یابی و توزیع، قیمت‌گذاری محصولات در شرایط رقابتی نیز انجام می‌شود. برای حل این مدل از الگوریتم‌های شبیه‌سازی تبریید و ازدحام ذرات استفاده شده و سپس تحلیل‌های حساسیت ارائه شده است.

استفاده از زنجیره‌ی تأمین برای مواجهه با شرایط بحرانی، یکی از موضوعات جذابی است که در چند سال گذشته به آن توجه شده است. اسدپور و همکاران^[۲۰] در سال ۲۰۲۱ یک زنجیره‌ی تأمین سبز برای انتقال خون ارائه کرده است. در این راستا یک مدل عدد صحیح دوهدفه در راستای کاهش هزینه‌ها و کاهش اثرات نامطلوب زیست‌محیطی ارائه شده است. این مدل ریاضی با روش برنامه‌ریزی آرمانی بهینه‌سازی شده و بر روی یک مطالعه‌ی موردی در استان اصفهان پیاده‌سازی شده است. کراماگر و همکاران^[۲۱] در سال ۲۰۲۱ به مطالعه‌ی پایداری زنجیره‌ی تأمین در شرایط شیوع ویروس کرونا پرداخته‌اند. بر این اساس یک تحلیل از تأثیرات اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی شیوع ویروس کرونا ارائه شده است و سپس با استفاده از رویکرد نظریه‌ی فازی و مدل‌سازی ساختاری، پیشنهاداتی برای بهبود زنجیره‌های تأمین در شرایط کرونا ارائه شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که شرکای زنجیره‌ی تأمین می‌توانند با سیاست‌گذاری مشترک در زمینه اتوماسیون و همچنین جذب سرمایه‌های دولتی، ریسک‌های نامطلوب شیوع کرونا بر زنجیره‌ی تأمین را کمینه کنند. به طور خلاصه می‌توان تحقیقات ارائه شده در این حوزه را در جدول ۱ ارائه کرد.

بر اساس تحقیقاتی که روی ادبیات موضوع انجام شد تاکنون هیچ پژوهشی به‌صورت اختصاصی به بررسی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته برای ماسک‌های پزشکی نپرداخته است. بخش عمده‌ی از مواد به‌کار رفته در ماسک‌ها می‌تواند پس از بازافت و استریل شدن مجدد مورد استفاده قرارگیرد و در شرایطی که تقاضا برای این محصول رو به افزایش است این موضوع می‌تواند موجب کاهش هزینه‌های مواد اولیه مصرفی و نیز کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از دفع این محصول باشد.

۳. تعریف مسئله و مدل‌سازی ریاضی

ساختار کلی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته برای تولید انواع ماسک در شکل ۱ ارائه شده است که جریان پیشرو، جریان معکوس و تعاملات متقابل آنها را به‌طور هم‌زمان در نظر می‌گیرد. در این زنجیره‌ی تأمین، چند نوع ماسک با قابلیت استفاده‌ی مجدد، بازسازی یا دفع در نظر گرفته شده است. این شبکه به‌عنوان یک زنجیره‌ی تأمین در پنج مرحله‌ی پیشرونده و پنج مرحله در زنجیره‌ی معکوس ساخته شده است. در این تحقیق یک مدل ریاضی دوهدفه به منظور طراحی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته‌ی ماسک ارائه می‌شود که هدف اول افزایش کل سود زنجیره‌ی تأمین و هدف دوم کاهش تأثیرات نامطلوب زیست‌محیطی است. یک روش حل پیشنهادی بر مبنای برنامه‌ریزی فازی و با استفاده از روش ϵ - محدودیت ارائه شده است. مزیت روش ϵ - محدودیت این است که تمام راه‌حل‌های کارآمد را با تولید راه‌حل‌های غیرمؤثر فراهم می‌کند. این راه‌حل‌ها به تصمیم‌گیرنده کمک می‌کند که راه‌حل کامل را ببیند و یکی از بهترین گزینه‌ها را انتخاب کند. علاوه بر این، راه‌حل به دست آمده با روش ϵ - محدودیت توسط مقیاس تابع هدف تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. این مدل از راه‌حل کارآمد استفاده می‌کند که می‌تواند

جدول ۱. خلاصه‌ی تحقیقات بررسی شده.

مرجع	موضوع	اهداف	روش حل
کو و ایوانز [۵]	طراحی شبکه‌ی لجستیک مستقیم و معکوس	کاهش هزینه‌ها	الگوریتم ژنتیک
دولارت و همکاران [۶]	مروری بر مدل‌های زنجیره‌ی تأمین	-	-
آراس و همکاران	طراحی لجستیک حلقه‌بسته	کمینه‌سازی هزینه‌های دیرکرد و جایابی تسهیلات	جست‌وجوی پراکنده
پیشویی و همکاران [۹]	طراحی یکپارچه لجستیک مستقیم و معکوس	کمینه‌سازی هزینه‌ها و بیشینه‌سازی پاسخگویی	الگوریتم ژنتیک
کانان و همکاران [۱۰]	بررسی زنجیره‌ی تأمین سبز حلقه‌بسته	کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی	الگوریتم ژنتیک
حسن زاده و ژانگ [۱۱]	طراحی زنجیره‌ی تأمین سبز حلقه‌بسته	کاهش هزینه‌ها و کاهش نرخ آسیب رسانی	حل دقیق
گاویندان و همکاران [۱۲]	مروری بر مقالات حوزه زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته	-	-
طلایی و همکاران [۱۳]	طراحی زنجیره‌ی تأمین چندسطحی حلقه‌بسته	کاهش کربن دی‌اکسید تولید شده	رویکرد بهینه‌سازی فازی
وی و همکاران [۱۴]	بررسی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته با تقارن اطلاعاتی	تعادل در قیمت رقابتی	نظریه‌ی بازی‌ها
کایا و یورک [۱۵]	مکان‌یابی و موجودی و قیمت‌گذاری در زنجیره‌ی حلقه‌بسته	کمینه‌سازی کل هزینه‌های زنجیره	روش ابتکاری
سقایان و رمضانپان [۱۷]	طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی چندمحصولی رقابتی	کاهش کل هزینه‌ها	ژنتیک و کرم شب‌تاب
نوبری و همکاران [۱۸]	رقابت بین زنجیره‌ی	توازن رقابت	نظریه‌ی بازی‌ها
وانگ و همکاران [۱۹]	طراحی شبکه‌ی چندمحصولی و چنددوره‌ی	کاهش کل هزینه‌ها	شبیه‌سازی تیرید و ازدحام ذرات
اسدپور و همکاران [۲۰]	طراحی زنجیره‌ی تأمین خون	اقتصادی - زیست‌محیطی	برنامه‌ریزی آرمانی
کرماکر و همکاران [۲۱]	پایداری زنجیره‌ی تأمین در شروع کرونا	اقتصادی - زیست‌محیطی - اجتماعی	نظریه‌ی فازی

• متغیرهای تصمیم

- f_{inl} : مقدار ماده‌ی اولیه i باز یافتی در مرکز l توسط جداسازی در مرکز n ؛
- p_j : تعداد ماسک j تولید شده؛
- r_{jmn} : تعداد ماسک j جدا شده در مرکز n انتقالی از مرکز جمع‌آوری m ؛
- s_{ik} : مقدار ماده اولیه‌ی i خریداری شده از تأمین‌کننده k ؛
- t_{in} : مقدار ماده اولیه‌ی i از طریق جدا کردن در مرکز n ؛
- u_{il} : متغیر باینری برای راه‌اندازی مرکز باز یافت برای قطعه‌ی i در l ؛
- v_{jn} : متغیر باینری برای راه‌اندازی مرکز جداسازی برای محصول j در مرکز جداسازی n ؛
- a_{jm} : تعداد ماسک j دوباره استفاده شده در مرکز m ؛
- b_{jm} : متغیر باینری برای راه‌اندازی تأسیسات جمع‌آوری برای ماسک j در مرکز جمع‌آوری m ؛
- c_{jm} : تعداد ماسک j جمع‌آوری شده در مرکز m ؛
- c_{jem} : تعداد ماسک j جمع‌آوری شده در مرکز m از منطقه‌ی مشتری c ؛
- f_{il} : مقدار ماده‌ی اولیه i باز یافتی در مرکز l ؛

مراکز مختلف تأسیسات در آخرین مرحله، یعنی مرحله ی پنجم ارائه شده است.

$$\begin{aligned}
 Max \quad Z_1 = & \sum_j PF_j \left(p_j + \sum_m a_{jm} \right) + \sum_{n,i} RP_i \cdot y_{in} \\
 - & \sum_{k,i} PC_{ik} \cdot s_{ik} - \sum_{j,c,m} CC_{jm} \cdot c_{jem} - \sum_{m,j} SC_{jm} \cdot b_{jm} \\
 - & \sum_{m,j} UC_{jm} \cdot a_{jm} - \sum_{n,i} DC_{in} \cdot t_{in} - \sum_{n,j} SD_{jn} \cdot v_{jn} \\
 - & \sum_{l,i} RC_{il} \cdot f_{il} - \sum_{l,i} SR_{il} \cdot u_{il} - \sum_{n,i} WDC_i \cdot w_{in} \\
 - & \sum_{j,c,m} RF_{jm} \cdot c_{jem} - \sum_{j,c,m} TCC_{jem} \cdot c_{jem} - \sum_{j,m,n} TCD_{jmn} \cdot r_{jmn} \\
 - & \sum_{i,n,l} TCR_{inl} \cdot f_{inl} - \sum_{i,l} TCP_{il} \cdot f_{il} - \sum_{j,m} TCU_{jm} \cdot a_{jm} \quad (1)
 \end{aligned}$$

هدف دوم کمینه سازی تأثیرات زیست محیطی حمل و نقل در زنجیره ی عرضه معکوس از نظر رد پای کربن است (رابطه ی ۲). بخش های تابع هدف دوم به ترتیب نشان دهنده ی انتشار کربن از ناحیه ی مشتری به مرکز جمع آوری، از مرکز جمع آوری به مرکز جداسازی قطعات، از مرکز جداسازی به مرکز بازیافت و از مرکز بازیافت به کارخانه است.

$$\begin{aligned}
 Min \quad Z_2 = & \sum_{j,c,m} ETC_{jem} \cdot c_{jem} + \sum_{j,m,n} ETD_{jmn} \cdot r_{jmn} \\
 + & \sum_{i,n,l} ETR_{inl} \cdot f_{inl} + \sum_{i,l} ETP_{il} \cdot f_{il} \quad (2)
 \end{aligned}$$

محدودیت ۳ تضمین می کند که تقاضا برای هر ماسک با مجموع تولیدات جدید و ماسک های دوباره استفاده شده تأمین می شود. محدودیت های ۴ تا ۶ تعادل جریان را در مراکز جمع آوری، مراکز جداسازی و مراکز بازیافت نشان می دهند. محدودیت های ۷ تا ۹ مقدار مواد اولیه در مراکز جداسازی، مقدار مواد اولیه در مراکز بازیافت و تعداد ماسک ها در مراکز جداسازی را محاسبه می کنند. محدودیت ۱۰ تعداد ماسک ها در هر مرکز جمع آوری از مناطق مختلف مشتری را محاسبه می کند. محدودیت های ۱۱ تا ۱۴ مربوط به بیشینه محدودیت تعداد ماسک های جمع آوری شده، تعداد دفعات استفاده مجدد، مقدار مواد اولیه ی بازیافتی شده و مقدار مواد اولیه ی قابل بازیافت است. محدودیت های ۱۵ تا ۱۸ محدودیت ظرفیت را برای مراکز جمع آوری، مراکز جداسازی، مراکز بازیافت و کارخانه را تضمین می کنند. محدودیت ۱۹ بیشینه و کمینه ی ظرفیت تأمین کنندگان خارجی را تضمین می کند. محدودیت های ۲۰ و ۲۱ مربوط به نوع متغیرهای تصمیم در مدل هستند. تمام متغیرهای تصمیم گیری مثبت اند.

$$\sum_c DE_{jc} = p_j + \sum_m a_{jm} \quad \forall j \quad (3)$$

$$c_{jm} = a_{jm} + \sum_n a_{jmn} \quad \forall j, m \quad (4)$$

$$t_{in} = y_{in} + w_{in} + \sum_i f_{inl} \quad \forall i, n \quad (5)$$

$$\sum_j Q_{ij} \cdot p_j = \sum_l f_{il} + \sum_k s_{ik} \quad \forall i \quad (6)$$

$$t_{in} = \sum_m \sum_j Q_{ij} \cdot r_{jmn} \quad \forall i, n \quad (7)$$

$$f_{il} = \sum_n f_{inl} \quad \forall i, l \quad (8)$$

w_{in} : مقدار ماده اولیه ی i انتقال یافته توسط جدا کردن در مرکز n ؛

y_{in} : مقدار ماده اولیه ی i بازیافت شده توسط جدا کردن در مرکز n .

• پارامترها

CC_{jm} : هزینه ی جمع آوری هر واحد ماسک j در مرکز جمع آوری m ؛

DC_{in} : هزینه ی جداسازی هر واحد ماده ی اولیه ی i در مرکز جداسازی n ؛

DE_{jc} : تقاضا برای محصول j در مرکز مشتری c ؛

ETD_{jmn} , ETC_{jem} : تأثیر زیست محیطی حمل و نقل ماسک j از منطقه

مشتری c به مرکز جمع آوری m و نیز از مرکز جمع آوری m به واحد جداسازی n ؛

ETR_{inl} , ETR_{inl} : تأثیر زیست محیطی حمل و نقل قطعه ی i از واحد جداسازی n

به واحد بازیافت l و نیز از واحد مرمت l به کارخانه؛

MC_{jm} : بیشینه ظرفیت مرکز جمع آوری m برای ماسک j ؛

MD_{jn} : بیشینه ظرفیت مرکز جداسازی n برای ماسک j ؛

MNS_k : کمترین سفارش خرید از تأمین کننده k ؛

MP_j : بیشینه ظرفیت کارخانه برای ماسک j ؛

MR_{il} : بیشینه ظرفیت مرکز بازیافت l برای قطعه ی i ؛

MXS_k : بیشینه سفارش خرید از تأمین کننده k ؛

n_j : بیشینه درصد ماسک j جمع آوری شده؛

PC_{ik} : هزینه ی خرید هر واحد ماده ی اولیه ی i از تأمین کننده k ؛

PF_j : سود بر فروش ماسک j ؛

Q_{ij} : تعداد واحدهای ماده اولیه ی i در هر عدد ماسک j ؛

RC_{il} : هزینه ی بازیافت هر واحد ماده اولیه ی i در مرکز بازیافت l ؛

RF_{jm} : مبلغ بازپرداخت به مشتری برای ماسک j در مرکز m ؛

RP_i : واحد سود از بازیافت برای ماده ی اولیه ی i ؛

SC_{jm} : هزینه ی راه اندازی تأسیسات جمع آوری ماسک j در مرکز m ؛

SD_{jn} : هزینه ی راه اندازی برای جداسازی ماسک j در مرکز جداسازی n ؛

SR_{il} : هزینه ی راه اندازی برای بازیافت ماده ی اولیه ی i در مرکز بازیافت l ؛

TCD_{jmn} , TCC_{jem} , TCU_{jm} : هزینه ی واحد حمل و نقل ماسک j از مرکز

جمع آوری m به توزیع کننده، از منطقه مشتری به c مرکز جمع آوری m و نهایتاً از

مرکز جمع آوری m به واحد جداسازی n ؛

TCP_{il} , TCR_{inl} : هزینه ی واحد حمل و نقل ماده ی اولیه ی i از واحد جداسازی

n به واحد بازیافت l و نیز از واحد بازیافت l به کارخانه؛

UC_{jm} : هزینه ی جمع آوری واحد ماسک j در مرکز جمع آوری m ؛

WDC_i : هزینه ی ثابت دفع در هر یک از مراکز دفع i ؛

β_i : بیشینه درصد ماده ی اولیه ی i مرمت شده؛

γ_j : بیشینه درصد ماسک j دوباره استفاده شده؛

λ_i : بیشینه درصد ماده ی اولیه ی i بازیافت شده؛

$\tilde{\eta}_j$: بیشینه درصد ماسک j جمع آوری شده.

اولین تابع هدف، بیشینه سازی عوامل اقتصادی و اجتماعی در سود کل سازمان

است (رابطه ی ۱). دو بخش اول در تابع هدف Z_1 مقدار سود از فروش محصولات

(محصولات تولیدی و محصولات دوباره استفاده شده) و همچنین سود از بازیافت

محصولات را نمایش می دهند. سومین بخش نشان دهنده ی هزینه ی خرید مواد

اولیه از تأمین کنندگان خارجی است. سه مرحله ی بعدی، هزینه ی پردازش، هزینه ی

راه اندازی و هزینه ی جمع آوری را در مرکز جمع آوری نشان می دهد. دو مرحله ی بعدی

شامل هزینه ی پردازش و راه اندازی در مراکز جداسازی است. هزینه ی حمل و نقل از

$$Z_1^{\alpha_{nadir}} = \text{Max} \{Z_1 | Z_2 \leq Z_2^{\alpha_{optimal}} \& x \in F(x)\}$$

$$Z_2^{\alpha_{nadir}} = \text{Min} \{Z_2 | Z_1 \geq Z_1^{\alpha_{optimal}} \& x \in F(x)\} \quad (23)$$

پس از تعریف اصول و مفاهیم مورد استفاده در این روش، در ادامه به تشریح مراحل روش حل پیشنهادی پرداخته می شود.

مرحله ۱: راه حل های α_{nadir} و $\alpha_{optimal}$ را برای هر تابع هدف بر روی مجموعه کارآمد تعیین کنید.

مرحله ۲: تابع مطلوبیت فازی خطی برای هر تابع هدف به صورت زیر معین می شود که در آن $\mu_1(x)$ و $\mu_2(x)$ نشان دهندهی درجهی عضویت فازی برای هدف اول و دوم است.

$$\mu_1(Z_1) = \begin{cases} 1 & Z_1 > Z_1^{\alpha_{optimal}} \\ 0 & Z_1 < Z_1^{\alpha_{nadir}} \\ \frac{Z_1 - Z_1^{\alpha_{nadir}}}{Z_1^{\alpha_{optimal}} - Z_1^{\alpha_{nadir}}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\mu_2(Z_2) = \begin{cases} 1 & Z_2 < Z_2^{\alpha_{optimal}} \\ 0 & Z_2 > Z_2^{\alpha_{nadir}} \\ \frac{Z_2^{\alpha_{nadir}} - Z_2}{Z_2^{\alpha_{nadir}} - Z_2^{\alpha_{optimal}}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (24)$$

مرحله ۳: تبدیل مدل معادل چندهدفه به یک مدل تک هدفه بر پایه ی روش ϵ - محدودیت که مطابق رابطه ی ۲۵ انجام می شود.

$$\text{max} \{ \mu_1(x) | \mu_2(x) \geq \epsilon, x \in F(x), 0 \leq \epsilon \leq 1 \} \quad (25)$$

در رابطه ی ۲۵، درجه رضایت از عملکرد هدف اول در تابع هدف حفظ شده و درجهی رضایت از تابع هدف دوم به عنوان یک محدودیت جانبی استفاده می شود. با این حال، هریک از درجهی رضایت را می توان به عنوان محدودیت جانبی یا تابع هدف مورد استفاده قرار داد.

مرحله ۴: مقدار ϵ در رابطه ی ۲۵ به طور سیستماتیک بین صفر و ۱ برای تولید راه حل های پارتو - بهینه در کل مجموعه ی کارآمد تغییر می کند.

مرحله ۵: اگر تصمیم گیرنده با یکی از راه حل های تولیدی راضی باشد، فرایند متوقف می شود و راه حل مورد قبول به عنوان تصمیم نهایی انتخاب خواهد شد. در غیر این صورت پاره خط بیشتر ترجیح داده شده انتخاب می شود و تصمیم گیرنده به مرحله ی ۴ می رود تا مقدار ϵ را در محدوده ی جدید تغییر دهد و راه حل های پارتو بهینه جدیدی تولید می کند.

۵. نتایج محاسباتی

داده های ورودی برای ساخت مسائل نمونه از یک کارخانه ی تولید ماسک در اطراف اصفهان اخذ شده است. در اینجا دو نوع ماسک سه لایه ی پزشکی و N95 جهت عرضه در بازار و سه نوع ماده ی اولیه ی پارچه، کش های نگهدارنده و فیلتر تنفسی برای ساخت ماسک ها در نظر گرفته شده است. در ساختار زنجیره ی تأمین مربوطه سه مرکز جمع آوری، دو مرکز جداسازی، دو مرکز باز یافت، سه تأمین کننده ی مواد اولیه و یک مرکز دفع وجود دارد. سایر پارامترهای مسئله در جدول ۲ آمده است؛ در این جدول نماد *Unif* نشان دهنده ی توزیع یکنواخت پیوسته و نماد *UnifInt* نشان دهنده ی توزیع یکنواخت گسسته است. هزینه ی حمل و نقل در مسیرهای مختلف از حاصل ضرب «مسافت مسیر \times هزینه ی هر کیلومتر حمل یک واحد کالا» به دست می آید. به عنوان

$$r_{jn} = \sum_m r_{jmn} \quad \forall j, n \quad (9)$$

$$c_{jm} = \sum_c c_{jcm} \quad \forall j, m \quad (10)$$

$$\sum_m c_{jcm} \leq \eta_j \cdot DE_{jc} \quad \forall j, c \quad (11)$$

$$a_{jm} \leq \gamma_j \cdot c_{jm} \quad \forall j, m \quad (12)$$

$$\sum_l f_{inl} \leq \lambda_i \cdot t_{in} \quad \forall i, n \quad (13)$$

$$y_{in} \leq \beta_i \cdot t_{in} \quad \forall i, n \quad (14)$$

$$c_{jm} \leq MC_{jm} \cdot b_{jm} \quad \forall j, m \quad (15)$$

$$\sum_m r_{jmn} \leq MD_{jn} \cdot v_{jn} \quad \forall j, n \quad (16)$$

$$\sum_n f_{inl} \leq MR_{il} \cdot u_{il} \quad \forall i, l \quad (17)$$

$$p_j \leq MR_j \quad \forall j \quad (18)$$

$$MNS_k \leq \sum_i s_{ik} \leq MXS_k \quad \forall k \quad (19)$$

$$b_{jm}, v, u_{il} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, m, n, l \quad (20)$$

$$p_j, c_{jcm}, a_{jm}, r_{jmn}, r_{jn}, s_{ik}, t_{in}, f_{inl}, f_{il}, w_{in}, y_{in} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i, j, m, n, l, k \quad (21)$$

۴. روش حل پیشنهادی

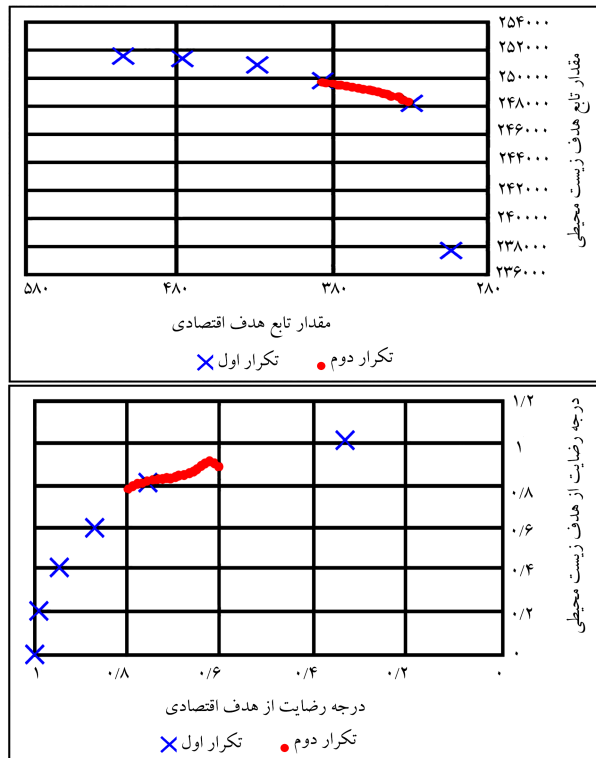
در این بخش، روش حل ریاضی با توجه به ماهیت چندهدفه بودن آن ارائه می شود. در این روش حل از رویکرد بهینه سازی چندهدفه ی فازی استفاده شده و تلاش می شود تا تغییرات هریک از توابع هدف در قالب یک تابع عضویت فازی بیان شود. سپس یکی از این توابع عضویت در محدودیت ها قرار داده می شود تا مقدار آن کنترل شود و دیگری در تابع هدف قرار گرفته تا بهترین مقدار آن به دست آید. به عبارت دیگر، روش حل پیشنهادی بر مبنای روش ϵ - محدودیت طراحی شده است با این تفاوت که به جای مقادیر توابع هدف از مقادیر مطلوبیت فازی هریک از اهداف استفاده خواهد شد.

بدنه ی اصلی روش حل پیشنهادی، مشابه تکنیک محدودیت اپسیلون است. در این روش دو مفهوم α_{nadir} و $\alpha_{optimal}$ استفاده می شود. مفهوم $\alpha_{optimal}$ به بهترین مقدار ممکن برای هریک از توابع هدف و نیز مقدار متغیرهای تصمیم متناظر با آن اشاره دارد که برای هریک از توابع هدف مطابق رابطه ی ۲۲ محاسبه می شود.

$$Z_1^{\alpha_{optimal}} = \text{Max} \{Z_1 | x \in F(x)\}$$

$$Z_2^{\alpha_{optimal}} = \text{Min} \{Z_2 | x \in F(x)\} \quad (22)$$

که در آن $F(x)$ مجموعه جواب های موجه مسئله است که شامل محدودیت های مدل معادل است. مفهوم α_{nadir} به بدترین مقدار مجاز برای هریک از توابع هدف، با شرط این که هدف دیگر در بهترین وضعیت خود (در مقدار بهینه ی خود) باشد، گفته می شود. به بیان دیگر، برای هریک از اهداف مطابق روابط ۲۳ محاسبه می شود.



شکل ۲. نتایج حاصل از روش پیشنهادی در تکرارهای اول و دوم.

جدول ۳. ماده‌ی اولیه‌ی خریداری شده، قطعات جدا شده، بازسازی شده، بازیافتی و دفع شده به‌ازای $\mu(Z_T) = 0$.

میانگین	$i = 3$	$i = 2$	$i = 1$		
	0	0	3590	$k = 1$	S_{ik}
1281,67	3178	0	0	$k = 2$	
	0	4767	0	$k = 3$	
	112	1680	1680	$n = 1$	t_{in}
1615,3	1640	2460	2120	$n = 2$	
	932	1098	1500	$l = 1$	f_{il}
1248	1000	1800	1160	$l = 2$	
	168	252	252	$n = 1$	w_{in}
267,5	246	369	318	$n = 2$	
	168	252	252	$n = 1$	y_{in}
267,5	246	369	318	$n = 2$	

مختلف را ارائه کند. نقاط ارائه شده در شکل ۲ را «مرز کارایی مسئله» می‌نامند. ۵ به منظور درک بهتر خروجی‌ها در جواب‌های مختلف مرز کارا، مقدار متغیرهای تصمیم در سه جواب مختلف از مرز کارا در جداول ۳ تا ۵ نشان داده شده است. متغیرهای تصمیم مورد بررسی در این جداول شامل مقدار ماده‌ی اولیه‌ی خریداری شده از تأمین‌کنندگان خارجی (S_{ik})، مقدار ماده‌ی اولیه‌ی تولیدی به‌وسیله جداسازی (t_{in})، مقدار ماده‌ی اولیه‌ی بازیافت شده (f_{il})، ماده‌ی اولیه‌ی انتقال

جدول ۲. داده‌های ورودی برای ساخت مسائل نمونه.

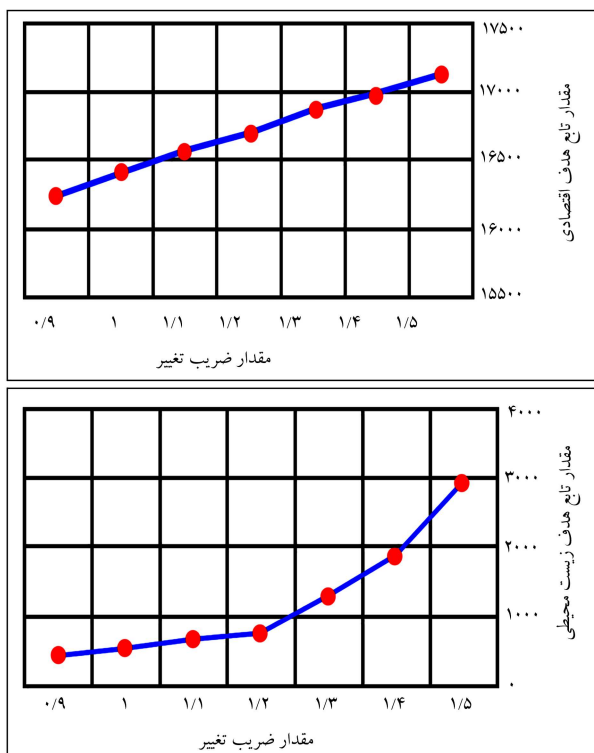
$$\begin{aligned} \widetilde{TCC}_{jem} &= Unif(0,4, 0,8) \\ \widetilde{TCP}_{il} &= Unif(0,3, 0,6) \\ D_{cm} &= Unif(3, 6) \\ D_{mn} &= Unif(18, 25) \\ D_{nl} &= (8, 12) \\ D_l &= Unif(6, 8) \\ MXS_k &= UnifInt(4000, 5000) \\ MNS_k &= 100 \\ MD_{jn} &= UnifInt(1000, 2000) \\ MR_{il} &= UnifInt(600, 1000) \\ n_j &= 0,7 \\ \gamma_j &= 0,2 \\ \lambda_i &= 0,7 \\ \beta_i &= 0,3 \end{aligned}$$

مثال $TCC_{jem} = \widetilde{TCC}_{jem} \cdot D_{cm}$ و نیز $TCP_{il} = \widetilde{TCP}_{il} \cdot D_l$ را خواهیم داشت که پارامترهای D_{cm} و D_l نشان‌گر فواصل بین مرکز تولید و کارخانه و نیز فاصله‌ی بین مرکز مشتری و مرکز جمع‌آوری هستند.

برای تجزیه و تحلیل عملکرد مدل پیشنهادی، مدل در محیط نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS کدنویسی شده و حل می‌شود. در این مورد، میزان رضایت از اهداف اقتصادی در تابع هدف حفظ شده است و میزان رضایت از اهداف زیست‌محیطی به‌عنوان یک محدودیت جانبی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نتایج حاصل از حل مدل در شکل ۲ نمایش داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که دو هدف بیشینه‌سازی سود کل و کمیته‌سازی اثرات زیست‌محیطی در تقابل با یکدیگرند زیرا کاهش اثرات زیست‌محیطی منجر به افزایش کل هزینه می‌شود و بنابراین سود سازمان را کاهش می‌دهد. اختلاف بین مقادیر تابع هدف اقتصادی در این نمودار می‌تواند بیان‌گر قیمت پرداخت شده برای حفاظت از محیط زیست باشد که به‌معنای از دست دادن سود اقتصادی سازمان برای مراقبت از محیط زیست است. این شاخص اهمیت دوگانه دارد زیرا می‌تواند به‌عنوان یک شاخص کمی از سوی سازمان‌ها برای نشان دادن تلاش‌های خود برای نفعان در حفاظت از محیط زیست مورد استفاده قرار گیرد و نیز می‌تواند به‌عنوان مبنایی از سوی دولت برای تنظیم انگیزه سازمان‌ها استفاده شود.

تصمیم‌گیرنده در تکرار اول می‌تواند مقادیر اسپیلون را بین ۰ و ۱ تنظیم کند. بنابراین، تصمیم‌گیرنده ابتدا با یک محدوده‌ی وسیع شروع می‌کند تا به‌سرعت طیف وسیعی از راه‌حل‌های پارتو را پوشش دهد. با این حال، در تکرارهای بعدی، تصمیم‌گیرنده ممکن است علاقه‌مند به انتخاب راه‌حل نهایی از طریق تنظیم دقیق با استفاده از نقاط متراکم‌تر باشد. مجموعه راه‌حل اولیه در تکرار اول با استفاده از ε بین ۰ و ۱ همراه با یک رشد ۰,۲ در بخش دوم از شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج مربوط به درجه رضایت از اهداف نشان می‌دهد که با افزایش میزان رضایت از عملکرد زیست‌محیطی، میزان رضایت از عملکرد اقتصادی کاهش می‌یابد. در ادامه، الگوریتم پیشنهادی در تکرار دوم نیز پیاده‌سازی می‌شود. در تکرار دوم، پارامتر ε بین ۰,۶ تا ۰,۸ نوسان کرده و مقدار دو تابع هدف و میزان رضایت هر دو نقطه پارتو مشخص شده است. همانطور که در خروجی‌های دو مرحله مشخص شده است، روش ε - محدودیت طراحی شده توانسته است مجموعه‌ی کاملی از جواب‌های



شکل ۳. نتایج تحلیل حساسیت روی پارامتر تقاضا.

تولیدی توسط جداسازی در مراکز جداسازی به ترتیب از مقدار $۱۶۱۵/۳$ به ۱۳۶۰ در جدول ۳ و در نهایت به $۱۳۵۱/۳$ در جدول ۵ کاهش یافته است. میانگین مواد بازیافت شده نیز از ۱۲۴۸ به ۹۵۲ و در جدول آخر به $۹۴۵/۵$ رسیده است. از آنجا که در این سه جدول مقادیر مواد اولیه بازیافتی کاهش یافته، باید حجم بیشتری از ماسک‌ها را از مواد اولیه نو تهیه کرد. مشاهده می‌شود که میانگین مواد اولیه خریداری شده از تأمین‌کنندگان از مقدار $۱۲۸۱/۶۷$ به $۱۵۴۹/۷۸$ و $۱۵۵۵/۵۶$ افزایش یافته است که این موضوع موجب کاهش سود نهایی زنجیره‌ی تأمین در تابع هدف اول می‌شود.

۱.۵. تحلیل حساسیت

یکی از مزیت‌های مدل‌های ریاضی آن است که به کمک آن می‌توان تغییرات و نوسانات در هر یک از پارامترهای مطرح شده را بررسی و تأثیر آن بر روی خروجی نهایی مدل را رصد کرد. در این پژوهش، به منظور تحلیل حساسیت تقاضای هر یک از ماسک‌ها، این پارامتر را بر اساس یک روند صعودی افزایش داده و تأثیر آن بر اهداف مختلف بررسی می‌شود. یک ضریب تغییر از $۰/۹$ تا $۱/۵$ در نظر گرفته شده است و در هر مرتبه مقدار پایه تقاضا هر واحد محصول را در این مقدار ضرب کرده و سپس به‌ازای آن مدل را اجرا کرده تا تأثیر آن بر مقدار تابع کل مشخص شود. نتیجه‌ی این اجرا در شکل ۳ ارائه شده است.

چنان که در شکل ۳ مشاهده می‌شود با افزایش تقاضای ماسک‌ها، مقدار تابع هدف اقتصادی و نیز زیست‌محیطی روند افزایشی دارد. افزایش مقدار تابع هدف اول با افزایش ضریب تغییر رابطه‌ی کاملاً خطی دارد و این در حالی است که تغییر تقاضا با تابع هدف دوم رابطه‌ی غیرخطی دارد. به عبارت دیگر افزایش تقاضا منجر به افزایش شدید آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شود. لذا در این شرایط می‌توان ادعا کرد که افزایش یا کاهش تقاضا تأثیر کاملاً شفاف‌ی روی کل هزینه‌های زنجیره دارد

جدول ۴. ماده‌ی اولیه‌ی خریداری شده، قطعات جدا شده، بازسازی شده، بازیافتی و دفع شده به‌ازای $\mu(Z_r) = ۰/۶۶$.

میانگین	$i = 3$	$i = 2$	$i = 1$		
	۰	۰	۴۰۰۰	$k = 1$	
$۱۵۴۹,۷۸$	۳۸۶۲	۷۹۳	۲۹۳	$k = 2$	S_{ik}
	۰	۵۰۰۰	۰	$k = 3$	
	۱۱۲۰	۱۶۸۰	۱۶۸۰	$n = 1$	t_{in}
۱۳۶۰	۹۲۰	۱۳۸۰	۱۳۸۰	$n = 2$	
	۴۲۸	۳۴۲	۱۵۰۰	$l = 1$	f_{il}
۹۵۲	۱۰۰۰	۱۸۰۰	۶۴۲	$l = 2$	
	۱۶۸	۲۵۲	۲۵۲	$n = 1$	w_{in}
۲۰۴	۱۳۸	۲۰۷	۲۰۷	$n = 2$	
	۱۶۸	۲۵۲	۲۵۲	$n = 1$	y_{in}
۲۰۴	۱۳۸	۲۰۷	۲۰۷	$n = 2$	

جدول ۵. ماده‌ی اولیه‌ی خریداری شده، قطعات جدا شده، بازسازی شده، بازیافتی و دفع شده به‌ازای $\mu(Z_r) = ۰/۹۹۹$.

میانگین	$i = 3$	$i = 2$	$i = 1$		
	۰	۰	۴۰۰۰	$k = 1$	
$۱۵۵۵,۵۶$	۳۸۷۰	۸۰۶	۳۲۴	$k = 2$	S_{ik}
	۰	۵۰۰۰	۰	$k = 3$	
	۱۱۲۰	۱۵۸۰	۱۶۸۰	$n = 1$	t_{in}
$۱۳۵۱,۳$	۹۱۲	۱۳۶۸	۱۳۴۸	$n = 2$	
	۷۷۷	۱۱۷۵	۱۱۷۶	$l = 1$	f_{il}
$۹۴۵,۵$	۶۴۵	۹۵۷	۹۴۳	$l = 2$	
	۱۶۸	۲۵۳	۲۵۲	$n = 1$	w_{in}
$۲۰۳,۳$	۱۳۸	۲۰۶	۲۰۳	$n = 2$	
	۱۶۸	۲۵۲	۲۵۲	$n = 1$	y_{in}
$۲۰۲,۵$	۱۳۶	۲۰۵	۲۰۲	$n = 2$	

یافته توسط جدا کردن (w_{in}) و ماده‌ی اولیه‌ی بازیافت شده توسط جدا کردن (y_{in}) می‌شود.

در جداول ۳ تا ۵ با اضافه شدن میزان رضایت از تابع هدف زیست‌محیطی، از میزان مطلوبیت تابع هدف سود کاسته خواهد شد و این بدان معناست که در این جداول به ترتیب مقدار سود نهایی و تولید آلاینده‌ی‌ها کاهش می‌یابد. با کاهش میزان آلاینده‌ی‌ها باید میزان حمل‌ونقل در مسیر بازگشتی زنجیره‌ی تأمین نیز کاهش یابد که در جداول این موضوع مشخص است. به عنوان مثال، میانگین مواد اولیه

هدف اقتصادی ادغام شده است. این مدل، چند منطقه‌ی مشتری، مراکز جمع‌آوری چندگانه، مراکز بازسازی چندگانه و چند منبع خارجی مواد اولیه را با در نظر گرفتن هزینه‌ی خرید، هزینه‌ی حمل‌ونقل، هزینه‌ی پردازش، هزینه‌ی راه‌اندازی پوشش می‌دهد. با توجه به مزایای روش ϵ - محدودیت تعاملی، از این روش برای محاسبه‌ی راه‌حل‌های کارایی پارتو برای سطوح مختلف رضایت از عملکرد تابع هدف محیطی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که اهداف زیست‌محیطی و اقتصادی در این زنجیره‌ی تأمین در تضاد با یکدیگرند و وجود یک روش مناسب که هر دوی این اهداف را در حد قابل قبول برآورده کند ضروری است. با افزایش تقاضا برای ماسک‌ها، شرایط زیست‌محیطی با شتاب زیادی دچار مشکل می‌شود و در صورتی که تنها به اهداف اقتصادی توجه شود این موضوع می‌تواند به یک بحران زیست‌محیطی منجر شود.

به‌عنوان پیشنهاد برای مطالعات آتی می‌توان عدم قطعیت در تقاضای ماسک‌ها را به‌عنوان یک فرض اساسی و مهم به مدل ریاضی اضافه کرد و برای مقابله با این عدم قطعیت از رویکردهایی مانند بهینه‌سازی استوار یا برنامه‌ریزی امکانی استفاده کرد. همچنین پیشنهاد می‌شود با توجه به پیچیدگی مدل ریاضی، ابزارهای حل مناسب برای کاهش زمان حل آن ارائه شود که در این خصوص روش تجزیه‌ی بندرز شتاب یافته یا الگوریتم‌های فراابتکاری نوین همچون الگوریتم گوزن قرمز و بهینه‌سازی مهندسی اجتماعی می‌تواند کارآمد باشد.

و با توجه به رابطه‌ی کاملاً خطی بین آنها به‌سادگی می‌توان میزان افزایش یا میزان کاهش در ازای تغییر این پارامتر را مشخص کرد. این میزان تشخیص در خصوص آلودگی‌های زیست‌محیطی به دلیل رابطه‌ی غیرخطی آن، به سادگی قابل انجام نیست و لازم است حتماً مدل ریاضی مربوطه مجدداً بهینه‌سازی شود.

۶. نتیجه‌گیری

با توجه به پاندمی ویروس کوید - ۱۹ و استفاده روزافزون از ماسک‌ها به‌نظر می‌رسد برنامه‌ریزی برای تولید و بازیافت این محصول در قالب یک زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته در شرایط کنونی از ضرورت‌ها باشد. این تحقیق به طراحی و بهینه‌سازی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین چندهدفه‌ی ماسک با توجه به عوامل اقتصادی و زیست‌محیطی پرداخته است. اولین هدف شامل بهینه‌سازی سود سازمان با بهینه‌سازی تصمیم‌گیری بر تعداد ماسک‌های قابل بازیافت و مقدار مواد اولیه که از تأمین‌کنندگان خارجی خریداری می‌شود و همچنین مکان‌یابی و تخصیص مراکز تأسیساتی مختلف است. این در حالی است که هدف دوم این مسئله، کمیته‌سازی اثرات زیست‌محیطی با توجه به اثرات کربن ناشی از حمل‌ونقل در زنجیره‌ی تأمین معکوس است. در چارچوب پیشنهادی، انگیزه‌ی مشتری به‌عنوان عامل اجتماعی در نظر گرفته شده و با تابع

منابع (References)

- Kumar, R. and Kumar, R.M. "Closed loop supply chain management and reverse logistics-a literature review", *6*, pp. 455-468 (2013).
- Gereffi, G. "What does the COVID-19 pandemic teach us about global value chains? the case of medical supplies", *Journal of International Business Policy*, **3**(3), pp. 287-301 (2020).
- Available from: <https://www.isna.ir/news/99042317038>.
- OECD Policy Responses to Coronavirus. "In The face mask global value chain in the COVID-19 outbreak: Evidence and policy lessons", (2020).
- Ko, H.J. and Evans, G.W. "A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs", *Computers & Operations Research*, **34**(2), pp. 346-366 (2007).
- Dullaert, W. and et al. "Supply chain (re)design: support for managerial and policy decisions", *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, **7**(2), pp.73-92 (2007).
- Aras, N., Aksen, D. and Gönül Tanuğur, A. "Locating collection centers for incentive-dependent returns under a pick-up policy with capacitated vehicles", *European Journal of Operational Research*, **191**(3), pp. 1223-1240 (2008).
- Du, F. and Evans, G.W. "A bi-objective reverse logistics network analysis for post-sale service", *Computers & Operations Research*, **35**(8), pp. 2617-2634 (2008).
- Pishvaei, M., Zanjirani Farahani, R. and Dullaert, W. "A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design", *Computers & Operations Research*, **37**, pp. 1100-1112 (2010).
- Kannan, G., Sasikumar, P. and Devika, K. "A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: a case of battery recycling", *Applied Mathematical Modelling*, **34**(3), pp. 655-670 (2010).
- Hassanzadeh, A.S. and Zhang, G. "A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return", *Applied Mathematical Modelling*, **37**(6), pp. 4165-4176 (2013).
- Govindan, K., Soleimani, H. and Kannan, D. "Reverse logistics and closed-loop supply chain: a comprehensive review to explore the future", *European Journal of Operational Research*, **240**(3), pp. 603-626 (2015).
- Talaei, M. and et al. "A robust fuzzy optimization model for carbon-efficient closed-loop supply chain network design problem: a numerical illustration in electronics industry", *Journal of Cleaner Production*, **113**, pp. 662-673 (2016).
- Wei, J. and et al. "Pricing and collecting decisions in a closed-loop supply chain with symmetric and asymmetric information", *Computers & Operations Research*, **54**, pp. 257-265 (2015).
- Kaya, O. and Urek, B. "A mixed integer nonlinear programming model and heuristic solutions for location, inventory and pricing decisions in a closed loop supply

- chain”, *Computers & Operations Research*, **65**, pp. 93-103 (2016).
16. Zohal, M. and Soleimani, H. “Developing an ant colony approach for green closed-loop supply chain network design: a case study in gold industry”, *Journal of Cleaner Production*, **133**, pp. 314-337 (2016).
 17. Saghaeian, A. and Ramezani, R. “An efficient hybrid genetic algorithm for multi-product competitive supply chain network design with price-dependent demand”, *Applied Soft Computing*, **71**, pp. 872-893 (2018).
 18. Nobari, A., Kheirkhah, A. and Esmaeili, M. “Considering chain-to-chain competition on environmental and social concerns in a supply chain network design problem”, *International Journal of Management Science and Engineering Management*, **14**(1), pp. 33-46 (2019).
 19. Wang, J., Wang, X. and Yu, M. “Multi-period multi-product supply chain network design in the competitive environment”, *Mathematical Problems in Engineering*, **2020**, p. 8548150 (2020).
 20. Asadpour, M., Boyer, O. and Tavakkoli-Moghaddam, R. “A Blood supply chain network with backup facilities considering blood groups and expiration date: a real-world application”, *International Journal of Engineering*, **34**(2), pp. 470-479 (2021).
 21. Karmaker, C.L. and et al. “Improving supply chain sustainability in the context of COVID-19 pandemic in an emerging economy: exploring drivers using an integrated model”, *Sustainable Production and Consumption*, **26**, pp. 411-427 (2021).