

## مدل سازی دوهدفه مسئله مکان‌یابی تخصیص در یک زنجیره تأمین سبز با در نظر گرفتن سیستم حمل‌ونقل و انتشار گاز CO<sub>2</sub>

سین دخت مرتضوی\*، مهدی سیف برقی\*\*

### چکیده

در این پژوهش به مطالعه مسئله مکان‌یابی تسهیلات در زنجیره تأمین سه‌سطحی، شامل کارخانه‌ها، انبارها و خرده‌فروشان پرداخته شده است. انواع کالاها از طریق حالت‌های مختلف حمل‌ونقل بین سطوح زنجیره منتقل می‌شوند. امروزه یکی از چالش‌های بسیار مهم در سازمان‌ها، کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای در سراسر شبکه است؛ با این حال با توجه به پیچیدگی‌های مشکلات زنجیره تأمین سبز، ارائه مدل قابل حل دارای اهمیت زیادی است. در این پژوهش، به منظور ساده‌سازی مدل ریاضی، تنها CO<sub>2</sub> منتشرشده در شبکه زنجیره تأمین در نظر گرفته شده است. هر تسهیل، مطابق با تقاضای ارسال شده، مقدار مشخصی از آلودگی را ایجاد می‌کند و آلودگی وسایل نقلیه به مسافت پیموده شده بستگی دارد. اهداف مدل پیشنهادی، کمینه‌کردن هزینه کل شبکه و کمینه‌کردن میزان انتشار گاز CO<sub>2</sub> است. روش حل پیشنهادی برای حل مدل ارائه‌شده، روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای است. به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، یافته‌ها با نتایج به‌دست‌آمده از روش محدودیت افسیلون مقایسه شده و تحلیل حساسیت پارامترهای ضروری صورت گرفته است.

**کلیدواژه‌ها:** زنجیره تأمین سبز؛ مکان‌یابی - تخصیص؛ انتشار CO<sub>2</sub>؛ محدودیت افسیلون؛ برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۲۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۰۷.

\* دانشجوی دکتری، دانشگاه الزهرا.

\*\* دانشیار، دانشگاه الزهرا (نویسنده مسئول).

## ۱. مقدمه

مدیریت زنجیره تأمین شامل مدیریت همه سطوح زنجیره از نقطه شروع تا مشتریان است و تمامی جریان‌های درون شبکه از استخراج مواد تا ارزش‌نهایی محصولات را دربر می‌گیرد. یکی از موضوع‌های مهم در بررسی زنجیره تأمین، مکان‌یابی تسهیلات شبکه است. مسائل مکان‌یابی تسهیلات، قراردادن مجموعه‌ای از تسهیلات (منابع) برای به‌حداقل‌رساندن هزینه‌های برآورده‌سازی مجموعه‌ای از تقاضاهای مشتریان با توجه به مجموعه‌ای از محدودیت‌ها است. تصمیم‌های مربوط به مکان‌یابی تسهیلات از عناصر مهم در برنامه‌ریزی استراتژیک برای بسیاری از شرکت‌های خصوصی و دولتی به‌شمار می‌رود. این تصمیم‌ها عموماً وسیع و طولانی‌مدت هستند و بر تصمیم‌گیری‌های عملیاتی و لجستیکی مؤثرند. هزینه‌های سنگین ساخت‌وساز تسهیلات و یا خرید اموال، مسائل مکان‌یابی تسهیلات یا جابه‌جایی تسهیلات را به پروژه‌های سرمایه‌گذاری بلندمدت تبدیل کرده است. تصمیم‌گیرندگان باید محل‌هایی را انتخاب کنند که نه تنها با توجه به وضعیت سیستم فعلی عملکرد خوبی دارند، بلکه در دوره‌های بعد و با تغییر در عوامل محیطی و جمعیت نیز سودآور باشند؛ در نتیجه، یافتن محل تسهیلات جزء مسائل دشوار در زنجیره تأمین است.

اهداف مورد مطالعه در مدل‌های ریاضی شبکه زنجیره تأمین، به‌طور سنتی، به‌حداقل‌رساندن هزینه و یا به‌حداکثررساندن سود بوده است و اهداف و محدودیت‌های زیست‌محیطی کمتر در نظر گرفته می‌شدند. در سال‌های اخیر، تغییرات آب‌وهوایی و اهمیت روزافزون مسائل زیست‌محیطی باعث شده است که تصمیم‌گیرندگان، عوامل زیست‌محیطی را به‌طور کامل در فرایند تصمیم‌گیری در نظر بگیرند. یکی از گازهای گلخانه‌ای آزاد شده طی فعالیت‌های انسانی، دی‌اکسید کربن ( $CO_2$ ) است. افزایش انتشار  $CO_2$  یک مسئله مهم برای چرخه طبیعی در اکوسیستم محسوب می‌شود. از آنجاکه طبیعت همواره تعادل بین مقدار  $CO_2$  تصفیه‌شده و مقدار  $CO_2$  آزاد شده را حفظ می‌کند، فعالیت‌های انسانی موجب افزایش انتشار این گاز می‌شوند؛ از سوی دیگر، زنجیره تأمین شامل فعالیت‌های مختلف از قبیل تولید، حمل‌ونقل، بهبود و غیره است؛ بنابراین در نظر گرفتن موضوعات زیست‌محیطی، مانند انتشار گاز  $CO_2$  در طراحی یک شبکه زنجیره تأمین، امری ضروری است.

در بخش دوم، پیشینه پژوهش بررسی می‌شود. در بخش سوم خلاصه مسئله، مدل ریاضی پیشنهادی و روش‌های حل پیشنهادی برای مسئله مورد نظر ارائه می‌شود. در بخش چهارم روش‌های حل مسئله معرفی می‌شوند. در بخش پنجم نتایج عددی حاصل از حل مدل توسط روش‌های پیشنهادی محدودیت اپسیلون و روش آرمانی چندگزینه‌ای ارائه شده و مقایسه و

تحلیل حساسیت روی پارامترهای مهم مسئله انجام می‌شود. در بخش ششم نیز نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای پژوهش‌های آتی ارائه می‌شود.

## ۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مکان‌یابی تسهیلات از جمله زمینه‌های پژوهشی است که در حوزه تحقیق در عملیات به‌خوبی تثبیت شده است. مقاله‌ها و کتاب‌های متعدد منتشر شده در این زمینه گواه این واقعیت هستند. پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه مکان‌یابی تسهیلات در شبکه‌های زنجیره تأمین صورت گرفته است. نخستین کار پژوهشی توسط وبر (۱۹۰۹) در زمینه نظریه مکان‌یابی صنعتی انجام شده است که توسط حکیمی (۱۹۶۴) گسترش داده شد [۹، ۳۱]. مفهوم زمینه زنجیره تأمین (SCM)<sup>۱</sup> توسط الیور و وبر (۱۹۸۲)، معرفی شد [۱۷]. از سال ۱۹۷۰، سطح رقابت جهانی در میان شرکت‌های مختلف در سراسر جهان در بسیاری جهات افزایش یافت. ملکاته و دسکین (۲۰۰۱) نخستین مطالعات را در زمینه طراحی شبکه زنجیره تأمین انجام دادند [۱۴]. مدل پیشنهادی آن‌ها، مدل مکان‌یابی تسهیلات یک‌سطحی با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت است. ملو و همکاران (۲۰۰۹) در مقاله مروری خود، به تفصیل، شش گروه متفاوت از مسائل مکان‌یابی تسهیلات گسسته با عنوان «مسائل مکان‌یابی میانه، مشکلات مکان‌یابی مرکزی، مسائل پوشش تسهیلات، مسائل مکان‌یابی تسهیلات بدون محدودیت ظرفیت (UFLP)<sup>۲</sup>، مسائل مکان‌یابی تسهیلات با محدودیت ظرفیت (CFLP)<sup>۳</sup> و مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین (SCND)<sup>۴</sup>» را معرفی و مطالعه کردند [۱۵]. فراهانی و همکاران (۲۰۱۲)، مسائل پوشش در مدل‌های مکان‌یابی تسهیلات را مورد مطالعه قرار دادند [۸]. مدل یک‌سطحی زنجیره تأمین توسط وو و ژانگ (۲۰۰۶) با تابع هزینه راه‌اندازی تسهیلات ارائه شده است. هدف از این مدل، تعیین مکان تعدادی از تسهیلات است. [۳۲].

شبکه زنجیره تأمین دوسطحی توسط امیری (۲۰۰۶)، معرفی شد؛ که در این شبکه، تسهیلات با چند سطح مختلف ظرفیت در نظر گرفته شده و از رویکرد فراابتکاری با آزادی لاگرانژی برای حل مدل استفاده شده است [۱]. راد و همکاران (۲۰۱۶) یک مدل ریاضی یکپارچه برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مسئله زنجیره تأمین دوسطحی با چندین محصول و چندین مشتری ارائه کرده‌اند. دو نوع وسیله نقلیه در شبکه مورد بررسی در نظر گرفته شده است و هدف کمینه‌کردن هزینه‌های شبکه است [۲۰].

- 
1. Supply Chain Management
  2. Uncapacitated Facility Location Problem
  3. Capacitated Location Problem
  4. Supply Chain Network Design

رحمتی و همکاران (۲۰۱۳)، یک مدل چندهدفه مکان‌یابی در چارچوب سیستم صف با سه هدف به‌حداقل‌رساندن زمان سفر، بیشترین مدت زمان بیکاری تجهیزات و همچنین بودجه موردنیاز برای ایجاد تسهیلات ارائه داده‌اند. آن‌ها از الگوریتم‌های فراابتکاری جست‌وجوی هارمونی و ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب به‌منظور حل مدل استفاده کرده‌اند [۲۲]. شول و همکاران (۲۰۱۳) مدل چنددوره‌ای و چندمحصولی را با اهداف حداقل‌کردن هزینه تولید، کاهش زمان ارسال محصولات و افزایش قابلیت اطمینان زنجیره تأمین پیشنهاد کرده‌اند. برای حل مدل از روش محدودیت افسیلون و از تحلیل پوششی داده‌ها برای ارزیابی جواب‌های نامغلوب استفاده کرده‌اند [۲۸].

کراتیکا و همکاران (۲۰۱۴)، برای مسئله مکان‌یابی چندسطحی تسهیلات بدون در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت، مدل جدید برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی (MILP)<sup>۱</sup> را پیشنهاد کرده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده از حل مدل توسط CPLEX و مقایسه آن با نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های دیگر، نشان‌دهنده کارایی مدل پیشنهادی است [۱۲]. سرکار و مجمودر (۲۰۱۳)، مسئله مکان‌یابی تسهیلات در ابعاد مختلف را بررسی کردند. آن‌ها ابتدا، مدل دوعدی را مطالعه کردند؛ سپس بعد محصول و تسهیلات حمل‌ونقل را به مدل اضافه کردند و مدل را گسترش دادند. زمان تحویل و تأمین‌کننده خارجی برای پاسخگویی به تقاضای خرده‌فروش در نظر گرفته شده است [۲۶].

مسائل مکان‌یابی تسهیلات با در نظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی در سال‌های اخیر توجه پژوهشگران بسیاری را به خود جلب کرده است. برای مثال نتو و همکاران (۲۰۰۹)، یک مدل دوهدفه برنامه‌ریزی خطی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین روبه‌جلو با توجه به اثرات زیست‌محیطی در صنعت کاغذ اروپا ارائه دادند [۱۶]. هوگو و پیستیکپولس (۲۰۰۵)، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی دوهدفه با در نظر گرفتن اثرات زیست‌محیطی در مسئله شبکه زنجیره تأمین روبه‌جلو پیشنهاد کردند. در مدل ارائه‌شده هدف، به‌حداکثر رساندن کل سود و به‌حداقل رساندن اثرات زیست‌محیطی است [۱۰]. خویشتن‌دار و همکاران (۲۰۱۶) به مطالعه در مورد تعیین مکان بهینه رآکتور تولید زیست‌متان و چگونگی تخصیص انواع پسماند به‌عنوان ماده اولیه به رآکتور پرداخته‌اند. در مدل پیشنهادی، هزینه کل سیستم تولید، با در نظر گرفتن محدودیت‌های مقدار عرضه، مقدار تقاضا حداقل می‌شود. الگوریتم‌های ژنتیک و تکامل تفاضلی برای حل مدل، توسعه ارائه شده‌اند [۱۱]. پیشوایی و رزمی (۲۰۱۲)، یک مدل چندهدفه فازی برای زنجیره تأمین معکوس با هدف به‌حداقل‌رساندن هزینه‌های اقتصادی و همچنین بهینه‌سازی انتشار  $CO_2$  ارائه دادند [۱۸].

1. Mixed Integer Linear Programming

طلایی و همکاران (۲۰۱۶)، به بررسی یک مدل مکان‌یابی - تخصیص تسهیلات برای شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه‌بسته چندمحصولی با هدف کاهش هزینه‌های کل شبکه و همچنین اهداف زیست‌محیطی، برای مثال کاهش نرخ انتشار دی‌اکسید کربن در محیط‌زیست پرداختند [۲۹]. آن‌ها برای حل مدل از روش محدودیت اپسیلون و برنامه‌ریزی فازی بهره گرفتند. پیشوایی و همکاران (۲۰۱۲)، یک مدل دوهدفه با قابلیت بهینه‌سازی اثرات اجتماعی و اقتصادی معرفی کردند [۱۹]. بیانی مجد و همکاران (۲۰۱۷) مدلی یکپارچه برای برنامه‌ریزی زنجیره با اهداف بیشینه‌سازی سود و کمینه‌سازی میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید توسعه داده‌اند. محدودیت‌های زمانی پروژه برای تعیین میزان تولید، موجودی، حمل‌ونقل و غیره بر اساس مقدار تقاضای پروژه در هر دوره در نظر گرفته شده است [۴].

صفار و همکاران (۲۰۱۴)، یک مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین چندمحصولی و چنددوره‌ای با در نظر گرفتن شبکه بازگشت کالا در حالت فازی ارائه کردند. هدف، انتخاب بهینه تأمین‌کننده بر اساس عوامل مختلف از قبیل قیمت فروش، متوسط کمبود و هزینه حمل‌ونقل بود. به‌منظور حل مدل از روش خیمنز و رویکرد TH<sup>۱</sup> و برای مسائل در مقیاس بزرگ از الگوریتم NSGA-II<sup>۲</sup> استفاده شد [۲۵].

سرکار و همکاران (۲۰۱۶)، یک مدل زنجیره تأمین سه‌سطحی که در آن تأمین‌کننده محصولات نیمه‌آماده تولید می‌کند و آن‌ها را به‌منظور تولید محصولات نهایی به تولیدکننده می‌فرستد، ارائه کردند. هدف از این مدل کاهش هزینه‌های زنجیره تأمین با توجه به حالات حمل‌ونقل و هزینه‌های انتشار کربن است و از رویکرد حل جبری برای به دست آوردن جواب بهینه استفاده شده است [۲۷]. در مطالعه تورو و همکاران (۲۰۱۷) و راتنایاک و همکاران (۲۰۱۹) از تکنیک محدودیت اپسیلون کلاسیک برای مدل ریاضی دو هدفه برای محاسبه انتشار گازهای گلخانه‌ای در مسئله مکان‌یابی تسهیلات با ظرفیت محدود با در نظر گرفتن کمینه‌سازی مصرف سوخت استفاده شده است [۳۰، ۲۳].

رضایی و همکاران (۲۰۱۷)، یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای برای طراحی زنجیره تأمین سبز در تجارت ذغال‌سنگ ارائه کردند. این مدل به مسئله مکان‌یابی و تعیین جریان‌های مطلوب با در نظر گرفتن عدم قطعیت در قیمت و تقاضای محصول می‌پردازد [۲۴]. استفاده از روش‌های فراابتکاری، مانند الگوریتم فراابتکاری چندهدفه مبتنی بر شبیه‌سازی تبرید در مطالعه چیلز و همکاران (۲۰۱۶) مشاهده می‌شود. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی چندهدفه به‌منظور تعیین موقعیت و ظرفیت‌های تسهیلات زنجیره تأمین (کارخانه‌ها، انبارها و مراکز توزیع) با هدف افزایش سود و به حداقل رساندن اثرات زیست‌محیطی ارائه کردند [۷].

1. Torabi-Hassini Approach

2. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II

در برخی از مطالعات، مانند پژوهش‌های عرب‌زاد و همکاران (۲۰۱۷) و بال و ساتوگلو (۲۰۱۸)، از رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی برای حل مسائل بهره گرفته شده است [۲، ۳]. عرب‌زاد و همکاران (۲۰۱۷)، برای مسئله مکان‌یابی - تخصیص تسهیلات در زنجیره تأمین، شامل چند محصول تأمین‌کننده، کارخانه، گزینه‌های مختلف حمل‌ونقل و چندین نقطه تقاضا، یک مدل ریاضی به‌منظور تعیین تعداد و ظرفیت کارخانه‌ها، تخصیص تقاضای مشتریان و انتخاب و تخصیص سفارش‌های تأمین‌کنندگان توسعه دادند [۲].

بال و ساتوگلو (۲۰۱۸)، به مطالعه جمع‌آوری ضایعات محصولات الکترونیکی و انتقال آن‌ها به مراکز بازیافت و بازیابی مواد زائد در شبکه چنددوره‌ای، چندمحصولی و چند سطحی پرداختند [۳]. راد و نه‌اوندی (۲۰۱۸)، یک مدل برنامه‌ریزی یکپارچه ریاضی برای زنجیره تأمین سبز چند دوره‌ای، چندمحصولی و با ظرفیت محدود ارائه دادند که توابع هدف آن، به‌حداقل‌رساندن هزینه‌های اقتصادی و انتشار مواد زیست‌محیطی و به‌حداکثررساندن رضایت مشتری با تعیین بهترین تأمین‌کنندگان، میزان خرید، مکان‌یابی - تخصیص تسهیلات و نوع فناوری است [۲۱].

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در میان پژوهش‌ها صورت‌گرفته در حوزه زنجیره تأمین سبز و مکان‌یابی - تخصیص تسهیلات در این زنجیره، با وجود کارایی بالای روش‌های مختلف برنامه‌ریزی آرمانی در حل مسائل چندهدفه در مطالعات کمی برای حل مسائل زنجیره تأمین سبز از این دسته روش‌ها بهره گرفته شده است. در این مطالعه روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای در حل مسئله مکان‌یابی تسهیلات در زنجیره تأمین سبز به‌کار رفته که در مبانی نظری مشاهده نشده است؛ همچنین عملکرد روش پیشنهادی با روش محدودیت اِپسیلون مقایسه می‌شود؛ از طرفی در نظر گرفتن امکان انتقال انواع مختلف کالاها از طریق حالت‌های مختلف حمل‌ونقل بین تسهیلات مختلف در شبکه تأمین سه‌سطحی که شامل کارخانه‌ها، انبارها و خرده‌فروشان است، از دیگر نوآوری‌های مدل پیشنهادی است. اهداف در نظر گرفته‌شده در این پژوهش، کمینه‌کردن هزینه کل شبکه و کمینه‌کردن میزان انتشار گاز CO<sub>2</sub> است.

### ۳. روش‌شناسی پژوهش

در این بخش، مدل پیشنهادی معرفی و رویکردها و روش‌های در نظر گرفته‌شده برای حل این مدل توضیح داده خواهد شد. مدل پیشنهادی در سه سطح کارخانه‌ها، انبارها و خرده‌فروشان مطالعه می‌شود. محصولات مختلفی از طریق سیستم‌های مختلف حمل‌ونقل به سطوح مختلف شبکه انتقال داده می‌شوند. میزان انتشار گاز CO<sub>2</sub> توسط هر وسیله نقلیه در نظر گرفته می‌شود. برخی مفروضات در نظر گرفته‌شده برای توسعه مدل پیشنهادی به شرح زیر است:

- شبکه زنجیره تأمین، سه‌سطحی در نظر گرفته شده است.

- کارخانه‌ها و انبارها دارای ظرفیت ثابت هستند.
- زمان تحویل محصول در مدل در نظر گرفته شده است.
- تقاضای هر خرده‌فروش به‌طور کامل برآورده می‌شود.
- تأمین‌کننده بیرونی برای برآورد خواسته‌های خرده‌فروشان در نظر گرفته شده است.
- هزینه ثابت سالانه برای بازگشایی هر انبار و کارخانه در نظر گرفته شده است.
- کارخانه و انبار در هر سایت، هزینه نگهداری ثابت دارند.
- در این پژوهش، یک ظرفیت ثابت (۱۰۰ واحد) برای وسیله حمل‌ونقل کالا در نظر گرفته شده است که باعث ساده‌شدن محاسبات می‌شود و برآورد واقعی‌تری از انتشار CO<sub>2</sub> ارائه می‌دهد.
- انتشار گاز CO<sub>2</sub> خودرو ثابت فرض شده است که بر اساس مطالعات، ۵۰۰ کیلومتر/گرم برای یک وسیله نقلیه در نظر گرفته می‌شود.

**نمادها.** اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای مدل پیشنهادی به شرح زیر است:

#### اندیس‌ها

$i \in I$	: مجموعه خرده‌فروشان
$j \in J$	: مجموعه مکان‌های بالقوه انبار
$k \in K$	: مکان‌های کارخانه‌ها
$p \in P$	: مجموعه محصولات مختلف
$t \in T$	: مجموعه حالات مختلف حمل‌ونقل

#### پارامترها

$WC_j$	: ظرفیت انبار $j$
$PC_k$	: ظرفیت کارخانه $k$
$D_{ip}$	: تقاضای خرده‌فروش $i$ از محصول $p$
$TCW_j$	: هزینه بازگشایی انبار $j$
$PTC_{jkp}^t$	: هزینه تولید و حمل‌ونقل یک واحد محصول $p$ از کارخانه $k$ به انبار $j$ توسط وسیله نقلیه $t$
$TCP_k$	: هزینه بازگشایی کارخانه $k$
$TC_{ijp}^t$	: هزینه حمل‌ونقل یک واحد محصول $p$ از انبار $j$ به خرده‌فروش $i$ توسط وسیله نقلیه $t$
$IC_{jp}$	: هزینه نگهداری هر واحد محصول $p$ در انبار $j$

هزینه نگهداری هر واحد محصول p در کارخانه k	$: JC_{kp}$
هزینه حمل‌ونقل یک واحد محصول p از تأمین‌کننده بیرونی به خرده‌فروش i توسط وسیله نقلیه t	$: OSC_{ip}^t$
هزینه مالی به‌ازای هر واحد زمان تحویل برای محصول p	$: M_p$
زمان تحویل هر واحد محصول p از انبار j به خرده‌فروش i توسط وسیله نقلیه t	$: TWR_{ijp}^t$
زمان تحویل هر واحد محصول p از کارخانه k به انبار j توسط وسیله نقلیه t	$: TPR_{jkp}^t$
فاصله بین خرده‌فروش i و انبار j	$: d_{ij}$
فاصله بین انبار j و کارخانه k	$: d_{jk}$
گاز CO <sub>2</sub> منتشرشده از وسیله نقلیه t به‌ازای هر کیلومتر	$: \varepsilon^t$
ظرفیت وسیله نقلیه t	$: vC^t$
حد پایین تابع هدف h ام (h=1,2)	$: g_{h.min}$
حد بالا تابع هدف h ام (h=1,2)	$: g_{h.max}$

## متغیرها

۱، اگر انبار در محل j باز شود. صفر، در غیر این صورت	$= z_j$
۱، اگر کارخانه در محل k باز شود. صفر، در غیر این صورت	$= c_k$
۱، اگر خرده‌فروش i به انبار j توسط وسیله نقلیه t تخصیص داده شود. صفر، در غیر این صورت	$= Y_{ij}^t$
۱، اگر انبار j به کارخانه k توسط وسیله نقلیه t تخصیص داده شود. صفر، در غیر این صورت	$= Z_{jk}^t$
کسری از تقاضای محصول p (بر حسب $D_{ip}$ ) که از انبار j به خرده‌فروش i توسط وسیله نقلیه t ارسال می‌شود.	$: X_{ijp}^t$
کسری از تقاضای محصول p (بر حسب $WC_j$ ) که از کارخانه k به انبار j توسط وسیله نقلیه t ارسال می‌شود.	$: Y_{jkp}^t$
کسری از تقاضای محصول p (بر حسب $D_{ip}$ ) که از تأمین‌کننده بیرونی به خرده‌فروش i توسط وسیله نقلیه t ارسال می‌شود.	$: S_{ip}^t$
مقدار موجودی نگهداری‌شده از محصول p در انبار j	$: I_{jp}$



$$\begin{aligned}
 & \text{مقدار انحراف بیشتر از مقدار موردانتظار تابع هدف } h\text{م} & : d_h^+ \\
 & \text{مقدار انحراف کمتر از مقدار موردانتظار تابع هدف } h\text{م} & : d_h^- \\
 & \text{مقدار انحراف از مقدار LLUF برای تابع هدف } h\text{م} & : f_h^- \\
 & \text{مقدار مطلوبیت برای تابع هدف } h\text{م} & : \gamma_h \\
 & \text{مقدار هدف برای تابع هدف } h\text{م} (g_{h,min} \leq T_h \leq g_{h,max}) & : T_h
 \end{aligned}$$

**فرموله‌کردن مسئله.** مدل ارائه‌شده در این بخش، مدلی برای مسئله مکان‌یابی سه‌سطحی شامل کارخانه، انبار و خرده‌فروش است که محصولات متنوع و سیستم‌های مختلف حمل‌ونقل به‌منظور بررسی میزان انتشار گاز CO<sub>2</sub> در نظر گرفته شده است. اهداف مدل ریاضی پیشنهادی، کمینه‌کردن هزینه و کمینه‌کردن میزان انتشار گاز CO<sub>2</sub> در شبکه با در نظر گرفتن محدودیت‌های ظرفیتی است. در این بخش مدل ریاضی و در بخش بعدی مدل‌سازی مسئله به‌منظور حل با روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای ارائه می‌شود.

$$\begin{aligned}
 \text{Min } f = & \sum_t \sum_i \sum_j \sum_p TC_{ijp}^t X_{ijp}^t D_{ip} & (1) \\
 & + \sum_t \sum_k \sum_j \sum_p PTC_{jkp}^t y_{jkp}^t WC_j \\
 & + \sum_i \sum_p \sum_t OSC_{ip}^t S_{ip}^t D_{ip} \\
 & + \sum_j \sum_p IC_{jp} I_{jp} + \sum_k \sum_p JC_{kp} J_{kp} + \sum_j TCW_j z_j \\
 & + \sum_k TCP_k c_k + \sum_t \sum_i \sum_j \sum_p TWR_{ijp}^t X_{ijp}^t D_{ip} M_p \\
 & + \sum_t \sum_j \sum_k \sum_p TPR_{jkp}^t y_{jkp}^t WC_j M_p
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Min } CO_2 \text{ em.} = & \sum_i \sum_j \sum_t [d_{ij}(X_{ijp}^t D_{ip} / vc^t)] Y_{ij}^t \varepsilon^t & (2) \\
 & + \sum_j \sum_k \sum_t [d_{jk}(y_{jkp}^t WC_j / vc^t)] Z_{jk}^t \varepsilon^t
 \end{aligned}$$

$$\sum_t \sum_j X_{ijp}^t \geq 1 \quad \forall i, \forall p \quad (3)$$

$$\sum_t S_{ip}^t \geq 1 \quad \forall i, \forall p \quad (۴)$$

$$\sum_t \sum_k y_{jkp}^t \geq 1 \quad \forall j \quad (۵)$$

$$\sum_t \sum_i \sum_p X_{ijp}^t D_{ip} + \sum_p I_{jp} \leq WC_j z_j \quad \forall j \quad (۶)$$

$$\sum_t \sum_j \sum_p y_{jkp}^t WC_j + \sum_p J_{kp} \leq PC_k c_k \quad \forall k \quad (۷)$$

$$Y_{ij}^t \leq z_j \quad \forall i, \forall j \quad (۸)$$

$$Z_{jk}^t \leq c_k \quad \forall j, \forall k \quad (۹)$$

$$\begin{aligned} Y_{ij}^t, Z_{jk}^t, z_j, c_k &\in \{0,1\} \\ 0 &\leq X_{ijp}^t, y_{jkp}^t, S_{ip}^t \leq 1 \end{aligned} \quad (۱۰)$$

تابع هدف ۱، هزینه کل شبکه زنجیره تأمین را به حداقل می‌رساند. عبارت اول آن نشان‌دهنده هزینه متغیر حمل‌ونقل برای برآورده کردن تقاضای خرده‌فروش است. عبارت دوم مربوط به هزینه‌های متغیر تولید و حمل‌ونقل برای تولید محصول در کارخانه‌ها و همچنین انتقال آن‌ها از کارخانه‌ها به انبار است. عبارت سوم، هزینه حمل‌ونقل متغیر برای ارسال محصول از تأمین‌کنندگان خارجی به خرده‌فروشان را نشان می‌دهد.

عبارت‌های چهارم و پنجم نشان‌دهنده هزینه موجودی متغیر برای نگهداری هر محصول در انبار و کارخانه‌ها هستند. عبارت‌های ششم و هفتم هزینه سالانه ثابت برای بازگشایی و حفظ انبارها و کارخانه‌ها را نشان می‌دهند. دو عبارت آخر به ترتیب نشان‌دهنده هزینه متغیر زمان تحویل، هم برای حمل‌ونقل کالا بین انبارها و خرده‌فروشان و هم بین کارخانه‌ها به انبارها هستند. تابع هدف ۲، شامل دو بخش است: ۱. مقدار کل CO<sub>2</sub> که در نتیجه حمل‌ونقل وسایل نقلیه در شبکه بین خرده‌فروشان و انبارها در محیط‌زیست منتشر می‌شود، در عبارت اول محاسبه می‌شود؛ ۲. مقدار کل CO<sub>2</sub> که در نتیجه حمل‌ونقل وسایل نقلیه در شبکه بین انبارها و کارخانه‌ها در محیط‌زیست منتشر می‌شود، در عبارت دوم محاسبه می‌شود.

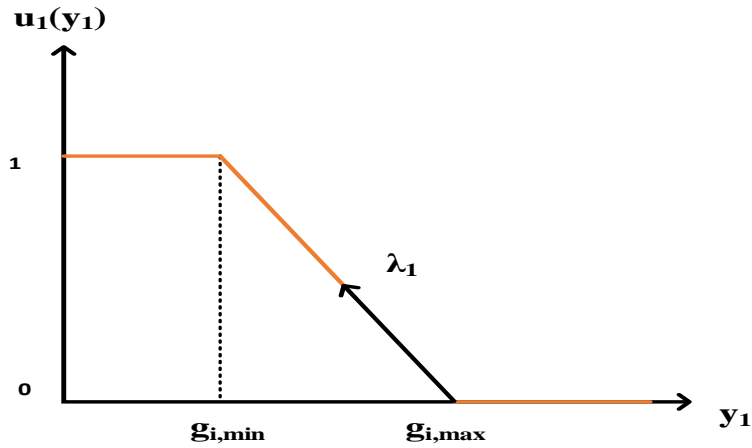
محدودیت‌های موجود در مدل به‌صورت زیر است:

محدودیت ۳، نشان می‌دهد که تقاضای هر خرده‌فروش برای هر محصول برآورده شود. محدودیت ۴، تحقق معیار فرض ۵ است، برای مثال، تقاضای هر خرده‌فروش توسط تأمین‌کننده خارجی برآورده می‌شود. محدودیت ۵، بیان می‌کند که حداقل یک کارخانه باید باز باشد تا عرضه محصولات به انبار انجام گیرد. محدودیت ۶، نشان می‌دهد که تقاضای خرده‌فروشان و مقدار موجودی نگهداری‌شده در هر انبار نباید از سطح ظرفیت انبار تجاوز کند. محدودیت ۷، مشابه محدودیت ۶ است؛ تنها تفاوت در این است که محدودیت ۷ برای هر کارخانه اعمال می‌شود. برای مثال، ظرفیت هر انبار و مقدار موجودی نگهداری‌شده در هر کارخانه نمی‌تواند از سطح ظرفیت کارخانه تجاوز کند. محدودیت ۸، نشان می‌دهد که تخصیص خرده‌فروش به انبار به بازگشایی انبار بستگی دارد. محدودیت ۹، نشان‌دهنده این است که تخصیص انبار به کارخانه، به بازگشایی کارخانه بستگی دارد. محدودیت ۱۰، متغیرهای باینری و مثبت را نشان می‌دهد.

**تشریح روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای و ارائه مدل مسئله بر اساس آن.**  
روش‌های بسیاری برای حل مسائل چندهدفه در مبانی نظری پژوهش معرفی شده است. اگرچه ترجیحات افراد و سازمان‌ها، به‌ندرت در آن‌ها در نظر گرفته شده‌اند. برنامه‌ریزی آرمانی از تکنیک‌های بسیار مهمی است که تصمیم‌گیرندگان (DMs) برای حل مسائل چند هدفه از آن استفاده می‌کنند و به مجموعه‌ای از جواب‌های مناسب دست می‌یابند. روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای با تابع هدف، گسترش‌یافته روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای با مقادیر هدف مختلف است که توسط چنگ (۲۰۰۸) معرفی شده است [۵]؛ با این تفاوت که در این روش که توسط چنگ (۲۰۱۱)، ارائه شده است [۶]، تابع مطلوبیت در نظر گرفته می‌شود. در این روش، تصمیم‌گیرنده با توجه به ساختار ترجیحات خود، توابع هدف مختلف را فرموله می‌کند. در روش پیشنهادی، تصمیم‌گیرنده درصد حداکثر کردن میزان مطلوبیت است. برای مثال، برای تابع هدف  $u_i(y_i)$ ، حد بالا و پایین به‌صورت  $g_{i,max}$  و  $g_{i,min}$  تعریف می‌شود. در این صورت برای تابع خطی  $u_i(y_i)$ ، رابطه ۱۱، ارائه خواهد شد:

$$u_i(y_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } y_i \leq g_{i,min} \\ \frac{g_{i,max} - y_i}{g_{i,max} - g_{i,min}} & \text{if } g_{i,min} \leq y_i \leq g_{i,max} \\ 0 & \text{if } g_{i,max} \leq y_i \end{cases} \quad (11)$$

در این حالت، تصمیم‌گیرنده تمایل دارد تا مقدار  $u_i(y_i)$  را تا حد امکان افزایش دهد، برای رسیدن به این هدف، مقدار  $y_i$  باید تا حد امکان به مقدار هدف  $g_{i,min}$  نزدیک شود (شکل ۱). به این نوع تابع، «تابع مطلوبیت خطی (LLUF)» گفته می‌شود و نمودار آن به صورت شکل ۱، است.



شکل ۱. توابع مطلوبیت خطی

با در نظر داشتن این هدف و مدل ارائه شده توسط چنگ (۲۰۰۸)، فرمول بندی مسئله به صورت زیر خواهد بود:

$$\min \sum_{i=1}^n [w_i(d_i^+ + d_i^-) + \beta_i f_i^-] \quad (12)$$

$$\text{s.t.} \quad (13)$$

$$\lambda_i \leq \frac{g_{i,max} - y_i}{g_{i,max} - g_{i,min}} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$f_i(x) - d_i^+ + d_i^- = y_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

$$\lambda_i + f_i^- = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

$$g_{i,min} \leq y_i \leq g_{i,max} \quad i = 1.2 \dots n \quad (۱۶)$$

$$d_i^+, d_i^-, f_i^-, \lambda_i \geq 0 \quad i = 1.2 \dots n \quad (۱۷)$$

که در آن،  $w_i$  و  $\beta_i$  وزن‌هایی هستند که به انحرافات  $d_i^+$ ،  $d_i^-$  و  $f_i^-$  اختصاص دارند. مقدار  $\lambda_i$ ، مقدار مطلوبیت مدل است. تابع هدف ۱۲، مقادیر انحرافات را با توجه به وزن آن‌ها کمینه می‌کند. محدودیت ۱۳، مربوط به مقدار مطلوبیت برای مسئله است. محدودیت ۱۴، توابع هدف را با در نظر گرفتن انحرافات نشان می‌دهد. محدودیت ۱۵، مربوط به LLUF است و حداکثر مقدار آن ۱، است. محدودیت ۱۶، نشان‌دهنده حد بالا و پایین توابع هدف است. در ادامه مدل برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای برای مسئله مورد نظر، ارائه می‌شود. محدودیت ۱۷، متغیرهای مثبت مسئله را نشان می‌دهد.

برای مدل مسئله مورد بحث می‌توان گفت که انحرافات از مقادیر بهینه توابع هدف که توسط تصمیم‌گیرنده در قالب مقادیر حداکثر و حداقل برای هر تابع هدف داده شده است، کمینه می‌شود. شرح تابع هدف و محدودیت‌ها در ادامه ارائه شده است:

$$Min d_1^+ + d_1^- + f_1^- + d_2^+ + d_2^- + f_2^- \quad (۱۸)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t:} \\ \sum_t \sum_i \sum_j \sum_p TC_{ijp}^t X_{ijp}^t D_{ip} + \sum_t \sum_k \sum_j \sum_p PTC_{jkp}^t Y_{jkp}^t WC_j \\ + \sum_i \sum_p \sum_t OSC_{ip}^t S_{ip}^t D_{ip} \\ + \sum_j \sum_p IC_{jp} I_{jp} + \sum_k \sum_p JC_{kp} J_{kp} + \sum_j TCW_j Z_j \\ + \sum_k TCP_k C_k + \sum_t \sum_i \sum_j \sum_p TWR_{ijp}^t X_{ijp}^t D_{ip} M_p \\ + \sum_t \sum_j \sum_k \sum_p TPR_{jkp}^t Y_{jkp}^t WC_j M_p - d_1^+ + d_1^- = T_1 \end{aligned} \quad (۱۹)$$

$$\gamma_1 \leq \frac{g_{1,max} - T_1}{g_{1,max} - g_{1,min}} \quad (۲۰)$$

$$\gamma_1 + f_1^- = 1 \quad (۲۱)$$

$$g_{1,min} \leq T_1 \leq g_{1,max} \quad (۲۲)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_t [d_{ij}(X_{ijp}^t D_{ip} / vc^t)] Y_{ij}^t \varepsilon^t + \sum_j \sum_k \sum_t [d_{jk}(y_{jkp}^t WC_j / vc^t)] Z_{jk}^t \varepsilon^t - d_2^+ + d_2^- \quad (۲۳)$$

$$= T_2 \quad (۲۴)$$

$$\gamma_2 \leq \frac{g_{2,max} - T_2}{g_{2,max} - g_{2,mix}}$$

$$\gamma_2 + f_2^- = 1 \quad (۲۵)$$

$$g_{2,min} \leq T_2 \leq g_{2,max} \quad (۲۶)$$

$$\sum_t \sum_j X_{ijp}^t \geq 1 \quad \forall i, \forall p \quad (۲۷)$$

$$\sum_t S_{ip}^t \geq 1 \quad \forall i, \forall p \quad (۲۸)$$

$$\sum_t \sum_k y_{jkp}^t \geq 1 \quad \forall j \quad (۲۹)$$

$$\sum_t \sum_i \sum_p X_{ijp}^t D_{ip} + \sum_p I_{jp} \leq WC_j z_j \quad \forall j \quad (۳۰)$$

$$\sum_t \sum_j \sum_p y_{jkp}^t WC_j + \sum_p J_{kp} \leq PC_k c_k \quad \forall k \quad (۳۱)$$

$$Y_{ij}^t \leq z_j \quad \forall i, \forall j \quad (۳۲)$$

$$Z_{jk}^t \leq c_k \quad \forall j, \forall k \quad (۳۳)$$

$$Y_{ij}^t, Z_{jk}^t, z_j, c_k \in \{0,1\} \quad (۳۴)$$

$$0 \leq X_{ijp}^t, y_{jkp}^t, S_{ip}^t \leq 1, d_1^+, d_1^-, f_1^-, \gamma_1, d_2^+, d_2^-, f_2^-, \gamma_2 \geq 0$$

تابع هدف ۱۸، مقادیر انحرافات از مقادیر بهینه توابع هدف را کمینه می‌کند. محدودیت ۱۹، تابع هدف اول در مدل ۱، را با در نظر گرفتن انحرافات از مقدار هدف نشان می‌دهد. محدودیت ۲۰، مربوط به مقدار مطلوبیت برای تابع هدف اول است. محدودیت ۲۱، مقدار LLUF را برای تابع هدف اول نشان می‌دهد و حداکثر مقدار آن یک است. محدودیت ۲۲، نشان‌دهنده حد بالا و پایین مقدار تابع هدف اول است. محدودیت‌های ۲۳ تا ۲۹، همانند محدودیت‌های ۱۹ تا ۲۲، هستند؛ با این تفاوت که برای تابع هدف دوم در نظر گرفته شده‌اند. محدودیت ۳۰ نشان می‌دهد که تمام تقاضای هر خرده‌فروش برای هر محصول برآورده شود. محدودیت ۳۱، تحقق معیار فرض پنجم مسئله است. به‌عنوان مثال، تقاضای هر خرده‌فروش توسط تأمین‌کننده خارجی برآورده می‌شود.

محدودیت ۳۲، نشان می‌دهد که حداقل یک کارخانه باید باز باشد تا عرضه محصولات به انبار صورت گیرد. محدودیت ۳۳، نشان‌دهنده این است که تقاضای خرده‌فروشان و مقدار موجودی نگهداری‌شده در هر انبار نباید از سطح ظرفیت انبار تجاوز کند. محدودیت ۳۴، مشابه محدودیت ۳۳، است؛ تنها تفاوت در این است که محدودیت ۳۴ برای هر کارخانه اعمال می‌شود. برای مثال، ظرفیت هر انبار و مقدار موجودی نگهداری‌شده در هر کارخانه نمی‌تواند از سطح ظرفیت کارخانه تجاوز کند. محدودیت ۳۵، نشان می‌دهد که تخصیص خرده‌فروش به انبار به بازگشایی انبار بستگی دارد. محدودیت ۳۶، نمایانگر این است که تخصیص انبار به کارخانه به بازگشایی کارخانه بستگی دارد. محدودیت ۳۷، متغیرهای باینری و مثبت را نشان می‌دهد.

#### ۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، برای حل مسئله ابتدا از روش محدودیت افسیلون که برای مسائل چند هدفه مناسب است، استفاده می‌شود. در روش محدودیت افسیلون در هر مرحله یکی از توابع هدف، درحالی‌که بقیه توابع هدف در محدودیت‌ها قرار گرفته‌اند، بهینه می‌شود. برای مثال، فرض کنید [۱۱]:

$$\begin{aligned} & \text{Max} \left( f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x) \right) \\ & \text{s. t. } x \in S \end{aligned} \quad (25)$$

در نتیجه برای حل، روش محدودیت افسیلون به صورت زیر عمل می‌شود:

$$\text{Max } f_1(x) \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \text{s. t. } & f_1(x) \geq \varepsilon_1 \\ & f_2(x) \geq \varepsilon_2 \\ & f_p(x) \geq \varepsilon_p \\ & x \in S \end{aligned} \quad (27)$$

در این حالت، هر بار یک حد بالا و پایین برای هر تابع هدف به دست می‌آید که این فواصل با توجه به مقداری از پیش‌تعیین شده، تقسیم‌بندی می‌شوند. با هر بار حل مسئله، جواب‌های بیشتری به دست می‌آیند که در نهایت مجموعه جواب‌های پارتو را به وجود می‌آورند. برای حل مدل‌های ۱ و ۲، به منظور اعتبارسنجی مدل مسئله، محاسبات به وسیله رایانه Corei3 2.5 GHz با RAM 4 GB توسط نرم‌افزار LINGO 11.0 انجام شده است.

**نتایج عددی.** به منظور انجام محاسبات عددی، پارامترهای مربوط به مسئله از توابع یکنواخت و با توجه به مطالعات پیشین به دست آمده [۱۷] و در جدول ۱، ارائه شده است.

جدول ۱. مقادیر پارامترهای ورودی برای حل مسئله

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$WC_j$	~ Uniform (100, 300)	$TWR_{ijp}^t$	~ Uniform (0.5, 6)
$PC_k$	~ Uniform (300, 600)	$TPR_{jkp}^t$	~ Uniform (1.5, 10)
$D_{ip}$	~ Uniform (8, 30)	$d_{ij}$	~ Uniform (100, 600)
$TCW_j$	~ Uniform (4000, 7000)	$d_{jk}$	~ Uniform (100, 600)
$PTC_{jkp}^t$	~ Uniform (70, 200)	$\varepsilon^t$	~ Uniform (300, 700)
$TCP_k$	~ Uniform (8000, 12000)	$vc^t$	~ Uniform (1000, 3000)
$TC_{ijp}^t$	~ Uniform (60, 130)	$OSC_{ip}^t$	~ Uniform (80, 200)
$IC_{jp}$	~ Uniform (10, 40)	$M_p$	~ Uniform (10, 30)

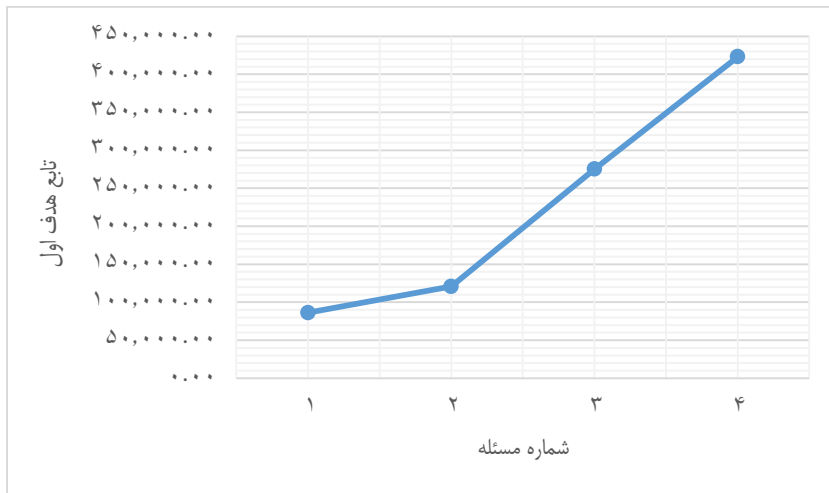
همان‌طور که قبلاً اشاره شد، مقادیر  $G_{i.min}$  و  $G_{i.max}$ ، به ترتیب حدود پایین و بالای توابع هدف هستند که مقادیر متناظر آن‌ها از حل مدل اول توسط روش محدودیت اِپسیلون به دست می‌آید. در این بخش نتایج حاصل از حل دو مدل پیشنهادی، ارائه می‌شود. مدل ۱، با بهره‌گیری از روش محدودیت اِپسیلون حل شده و نتایج در جدول ۲، آورده شده است.

جدول ۲. نتایج حاصل از حل مسائل با روش محدودیت اِپسیلون

شماره مسئله	سایز مسئله $ i  \times  j  \times  k  \times  p  \times  t $	OF1	OF2	Running Time(s)
۱	۲×۲×۲×۲×۲	۸۶۱۳۷	۲۷۰۲۱	۱۰
۲	۲×۳×۳×۳×۳	۱۲۰۶۵۷	۵۹۶۰۳	۲۶
۳	۳×۴×۵×۳×۴	۲۷۵۲۱۰	۸۳۵۲۶	۷۵
۴	۵×۶×۶×۷×۴	۴۲۲۹۶۱	۱۰۲۴۹۷	۱۵۰

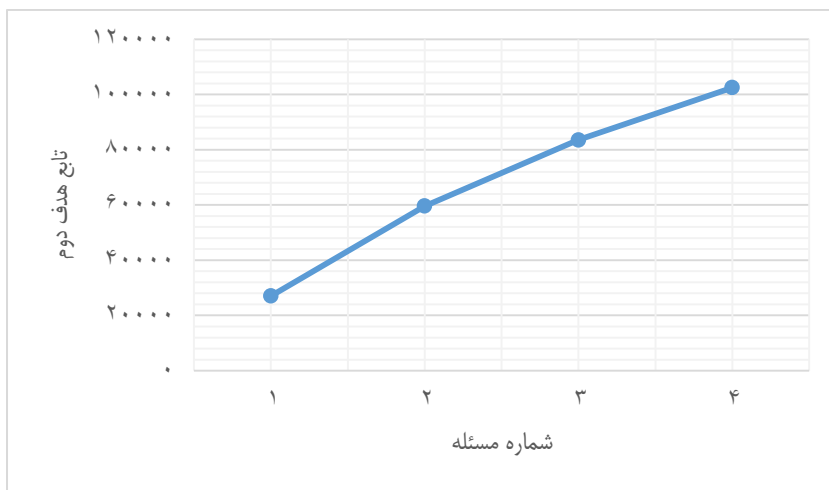


شکل‌های ۲ و ۳، به ترتیب، روند تغییر مقادیر تابع هدف اول و تابع هدف دوم در مسائل با اندازه‌های مختلف را نشان می‌دهند. در شکل ۴، روند تغییر زمان حل با افزایش اندازه مسئله نشان داده شده است.

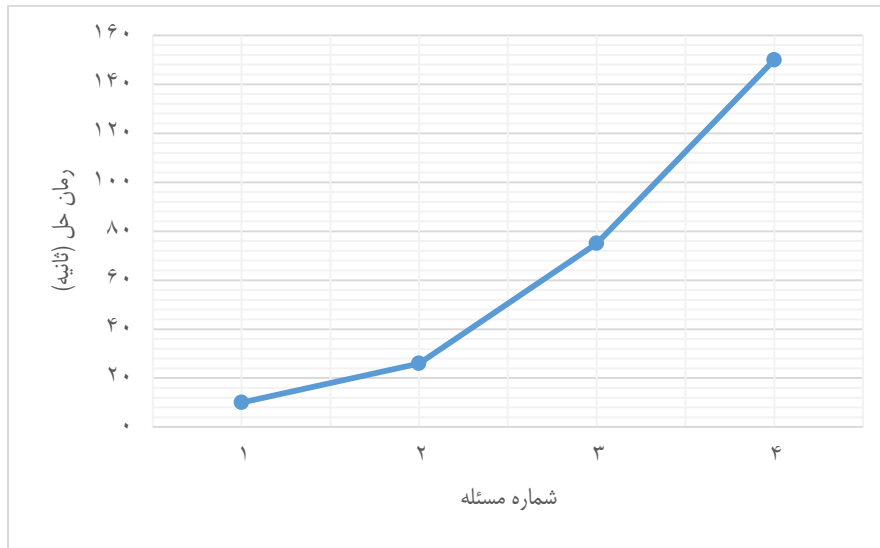


شکل ۲. روند تغییر مقادیر تابع هدف اول در مسائل نمونه

بر اساس شکل ۲، با افزایش اندازه مسئله و تعداد تسهیلات و تنوع محصولات تولیدی، هزینه‌های بازگشایی تسهیلات، حمل‌ونقل محصولات مختلف بین تسهیلات شبکه و هزینه‌های نگهداری محصولات در انبارها، افزایش می‌یابد و به افزایش هزینه کل شبکه منجر می‌شود.



شکل ۳. روند تغییر مقادیر تابع هدف دوم در مسائل نمونه



شکل ۴. روند تغییر زمان حل در مسائل نمونه

روند مشاهده شده در شکل ۳، مربوط به تغییرات ایجاد شده در مقدار تابع هدف دوم با تغییر اندازه مسئله است. این روند نشان می‌دهد که با افزایش تسهیلات شبکه و همچنین تنوع وسایل حمل‌ونقل، میزان انتشار گاز CO<sub>2</sub> افزایش می‌یابد. شکل ۴، نیز افزایش زمان حل مسئله با افزایش اندازه مسئله را نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از حل مدل پیشنهادی با روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای در جدول ۳، آورده شده است. ستون دوم جدول ۳، مقدار تابع هدف مدل دوم (Z)، ستون سوم مقدار مطلوبیت تابع هدف اول (V<sub>1</sub>) و ستون چهارم، مقدار مطلوبیت تابع هدف دوم (V<sub>2</sub>) را نشان می‌دهد.

جدول ۳. نتایج حاصل از حل مسائل با روش برنامه‌ریزی آرمانی

اندازه مسئله $ i  \times  j  \times  k  \times  p  \times  t $	مقدار تابع هدف Z	مقدار مطلوبیت تابع هدف اول V <sub>1</sub>	مقدار مطلوبیت تابع هدف دوم V <sub>2</sub>	زمان حل (ثانیه)
۲×۲×۲×۲×۲	۰/۹۳۳۴۹۸	۰/۹۹۴۹۷۷	۰/۰۷۲۵۲۳۸	۸
۲×۳×۳×۴×۳	۰/۹۴۵۶۷۸	۰/۸۴۷۱۷۶	۰/۰۷۳۰۹۷۷	۱۵
۳×۴×۵×۳×۴	۰/۹۷۴۳۲۹	۰/۸۹۵۲۳۶	۰/۰۰۵۵۶۲۱	۵۳
۵×۶×۶×۷×۴	۰/۹۸۴۳۵۶۷	۰/۹۲۴۱۸۲	۰/۰۷۶۲۳۹۹	۱۰۶

با توجه به نتایج حاصل از حل مسئله با روش آرمانی شده است، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش اندازه مسئله، مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد؛ درحالی‌که روند خاصی در تغییرات مقادیر مطلوبیت توابع هدف مشاهده نمی‌شود. درواقع با افزایش تعداد تسهیلات، محصولات، وسایل حمل‌ونقل، هزینه‌های کل شبکه و همچنین میزان انتشار گاز CO<sub>2</sub> افزایش می‌یابد و این مقدار از مقدار مطلوب توابع هدف تجاوز خواهد کرد؛ در نتیجه حدود بالا و پایین به‌دست‌آمده برای توابع هدف در مدل اول، در مطلوبیت توابع هدف و همچنین مقدار تابع هدف مدل آرمانی تأثیرگذار هستند؛ همچنین زمان حل با افزایش ابعاد مسئله روند افزایشی داشته است.

**تحلیل حساسیت.** پارامترهایی که در حل مدل برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای اثرگذار هستند، حد بالا و پایین توابع هدف مدل اول هستند ( $G_{i.min}$  و  $G_{i.max}$ ). به‌منظور مطالعه تأثیر این پارامترها در نتایج به‌دست‌آمده از مدل دوم، تحلیل حساسیت مدل دوم بررسی می‌شود؛ به همین منظور، مسئله نمونه شماره ۱ با اندازه  $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2$  بررسی می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مقادیر تابع هدف مدل دوم بر روی حدود بالا و پایین توابع هدف در جدول ۴، آورده شده است.

جدول ۴. رفتار تابع هدف دوم بر اساس تغییرات حدود بالا و پایین توابع هدف مدل اول ( $G_{i.min}$  و  $G_{i.max}$ )

اندازه مسئله	حدود بالا و پایین هدف اول		حدود بالا و پایین هدف دوم		مقدار هدف مدل دوم	مطلوبیت هدف اول	مطلوبیت هدف دوم
$i/j/p/t$	$G_{1.min}$	$G_{1.max}$	$G_{2.min}$	$G_{2.max}$	$Z$	$\gamma_1$	$\gamma_2$
$2 \times 2 \times 2$	۸۰۰۰۰	۹۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۴۰۰۰۰	-۰/۹۳۳۴۹	-۰/۹۹۴۹۷	-۰/۷۲۵۲۲
$2 \times 2 \times 2$	۷۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	۱۵۰۰۰	۴۵۰۰۰	-۰/۹۲۵۸۶	-۰/۹۸۵۶۸	-۰/۰۶۸۶۲
$2 \times 2 \times 2$	۶۰۰۰۰	۱۲۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۵۰۰۰۰	-۰/۸۷۵۸۶	-۰/۹۳۴۹۵	-۰/۰۸۹۶۴
$2 \times 2 \times 2$	۵۰۰۰۰	۱۳۰۰۰۰	۸۰۰۰	۵۲۰۰۰	-۰/۷۶۳۸۴	-۰/۹۷۱۵۸	-۰/۰۵۲۶۳

با توجه به جدول ۴، مقادیر تابع هدف دوم با افزایش فاصله حدود بالا و پایین توابع هدف مدل اول (افزایش دامنه مطلوبیت توابع هدف)، کاهش می‌یابد. این کاهش مقدار تابع هدف که در واقع کاهش میزان انحراف از حدود مطلوب تابع هدف است، به‌دلیل افزایش احتمال قرارگیری مقادیر تابع هدف در بازه بزرگ‌تر رخ می‌دهد. در واقع هر چه فاصله حدود بیشتر باشد، مقادیر به‌دست‌آمده از مدل، با احتمال بیشتری در بازه مطلوب قرار می‌گیرند و هزینه‌های مربوط به انحراف از مقادیر مطلوب از پیش تعیین‌شده، کاهش خواهد یافت.

## ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش به مطالعه یک مدل زنجیره تأمین سه‌سطحی، شامل کارخانه‌ها، انبارها و خرده‌فروشان در مسئله مکان‌یابی تسهیلات، پرداخته شده است. انواع کالاها از طریق حالت‌های مختلف حمل‌ونقل بین کارخانه‌های تولیدی، انبارها و خرده‌فروشان منتقل می‌شود. هر یک از وسایل نقلیه مفروض، مقدار متفاوتی از گاز  $CO_2$  را مطابق با حجم تقاضای ارسال شده و مسافت پیموده شده منتشر می‌کنند. تقاضای مشتریان از خرده‌فروشان به مکان‌های خرده‌فروشان و انواع محصول بستگی دارد. تقاضای نقاط مختلف هم از طریق کارخانه‌ها و هم از طریق تأمین‌کنندگان خارجی برآورده می‌شود.

مدل ارائه شده، دوهدفه بوده و اهداف آن، کمینه‌کردن هزینه کل شبکه و کمینه‌کردن میزان انتشار گاز  $CO_2$  است. مدل پیشنهادی ابتدا با روش محدودیت اپسیلون حل و سپس یافته‌ها با نتایج به‌دست‌آمده از حل با روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای مقایسه شده است. نتایج حاصل از حل مدل مکان‌یابی با روش محدودیت اپسیلون نشان می‌دهد که با افزایش اندازه مسئله، مقادیر تابع هدف‌ها، افزایش می‌یابد و این امر در نتیجه افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل، نگهداری و بازگشایی تسهیلات، به‌واسطه افزایش تعداد تسهیلات در شبکه است؛ همچنین افزایش تعداد وسیله‌های حمل‌ونقل، افزایش میزان انتشار گاز  $CO_2$  را در پی خواهد داشت.

در حل مدل برنامه‌ریزی آرمانی با افزایش اندازه مسئله، مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد؛ درحالی‌که روند خاصی در تغییرات مقادیر مطلوبیت توابع هدف مشاهده نمی‌شود. به‌منظور توسعه مدل فعلی، پیشنهاد می‌شود مسیریابی وسایل نقلیه در راستای اهداف زیست‌محیطی و همچنین جنبه‌های اجتماعی در پایداری زنجیره تأمین در نظر گرفته شود. جریان بازگشتی محصولات، بازیافت ضایعات و برنامه‌ریزی چنددوره‌ای نیز می‌تواند به مدل پیشنهادی افزوده شود. حل مدل توسط روش‌های دقیق نوین و یا الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مسائل بزرگ‌تر از دیگر راه‌های توسعه مدل است؛ همچنین می‌توان به‌منظور نزدیک‌تر شدن مدل به مسائل دنیای واقعی، مدل ارائه شده را با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترها و روش‌های بهینه‌سازی احتمالی بررسی کرد.

## منابع

1. Amiri, A. (2006). Designing a distribution network in a supply chain system: Formulation and efficient solution procedure. *European Journal of Operational Research*, 171(2), 567-576.
2. Arabzad, S. M., Ghorbani, M., & Ranjbar, M. J. (2017). Fuzzy Goal Programming for Linear Facility Location-Allocation in a Supply Chain; the Case of Steel Industry. *International Journal of Research in Industrial Engineering*, 6(2), 90-105.
3. Bal, A., & Satoglu, S. I. (2018). A Goal Programming Model for Sustainable Reverse Logistics Operations Planning and an Application. *Journal of Cleaner Production*.
4. Bayani Majd, A., Noori, S., Yaghoubi, S., Mohammadi, A. (2017). Green supply chain mathematical modeling for construction projects considering project scheduling. *Journal of Industrial Management Perspective*, 24, 123-156 (In Persian).
5. Chang, C. T. (2008). Revised multi-choice goal programming. *Applied Mathematical Modelling*, 32(12), 2587-2595.
6. Chang, C. T. (2011). Multi-choice goal programming with utility functions. *European Journal of Operational Research*, 215(2), 439-445.
7. Chibeles-Martins, N., Pinto-Varela, T., Barbosa-Póvoa, A. P., & Novais, A. Q. (2016). A multi-objective meta-heuristic approach for the design and planning of green supply chains-MBSA. *Expert Systems with Applications*, 47, 71-84.
8. Farahani, R. Z., Asgari, N., Heidari, N., Hosseini, M., & Goh, M. (2012). Covering problems in facility location: A review. *Computers & Industrial Engineering*, 62(1), 368-407.
9. Hakimi, S. L. (1964). Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations research*, 12(3), 450-459.
10. Hugo, A., & Pistikopoulos, E. N. (2005). Environmentally conscious long-range planning and design of supply chain networks. *Journal of Cleaner Production*, 13(15), 1471-1491.
11. Khishtandar, S., Zandieh, M., Dorri, B., Ranai Saadat, S.A. (2016). Green supply chain mathematical modeling for construction projects considering project scheduling. *Journal of Industrial Management Perspective*, 23, 29-54 (In Persian).
12. Kratica, J., Dugošija, D., & Savić, A. (2014). A new mixed integer linear programming model for the multi-level uncapacitated facility location problem. *Applied Mathematical Modelling*, 38(7), 2118-2129.
13. Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the  $\epsilon$ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied mathematics and computation*, 213(2), 455-465.
14. Melkote, S., & Daskin, M. S. (2001). Capacitated facility location/network design problems. *European journal of operational research*, 129(3), 481-495.
15. Melo, M. T., Nickel, S., & Saldanha-Da-Gama, F. (2009). Facility location and supply chain management—A review. *European journal of operational research*, 196(2), 401-412.
16. Neto, J. Q. F., Walther, G., Bloemhof, J., Van Nunen, J. A. E. E., & Spengler, T. (2009). A methodology for assessing eco-efficiency in logistics networks. *European Journal of Operational Research*, 193(3), 670-682.

17. Oliver, R. K., & Webber, M. D. (1982). Supply-chain management: logistics catches up with strategy. In: Christopher, M.G. (Ed.), *Logistics, The Strategic Issue*. Chapman & Hall, London.
18. Pishvae, M. S., & Razmi, J. (2012). Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming. *Applied Mathematical Modelling*, 36(8), 3433-3446.
19. Pishvae, M. S., Razmi, J., & Torabi, S. A. (2012). Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach. *Fuzzy sets and systems*, 206, 1-20.
20. Raad, A., Sadeghi, A., Ghasemi, B. (2016). Two-echelon mathematical modeling with different manufacturers and multiple transportation modes in the supply chain. *Journal of Industrial Management Perspective*, 23, 77-100 (In Persian).
21. 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*.
22. Rahmati, S. H. A., Hajipour, V., & Niaki, S. T. A. (2013). A soft-computing Pareto-based meta-heuristic algorithm for a multi-objective multi-server facility location problem. *Applied Soft Computing*, 13(4), 1728-1740.
23. Ratnayake, M. N., Kachitvichyanukul, V., & Luong, H. T. (2019). A Multi-Objective Model for Location-Allocation Problem with Environmental Considerations. In *Environmental Sustainability in Asian Logistics and Supply Chains* (pp. 205-217). Springer, Singapore.
24. 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.
25. Saffar, M., & Razmi, J. (2014). A new bi-objective mixed integer linear programming for designing a supply chain considering co2 emission. *Uncertain Supply Chain Management*, 2(4), 275-292.
26. Sarkar, B., & Majumder, A. (2013). A study on three different dimensional facility location problems. *Economic Modelling*, 30, 879-887.
27. Sarkar, B., Ganguly, B., Sarkar, M., & Pareek, S. (2016). Effect of variable transportation and carbon emission in a three-echelon supply chain model. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 91, 112-128.
28. Shoul, A., Amiri, M., Olfat, L., Khalili Damghani, K. (2013). Multi-echelon and multi-product supply chain network design using combinational approach of multi-objective mathematical programming and data envelopment analysis. *Journal of Industrial Management Perspective*, 14, 117-137 (In Persian).
29. 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. *Journal of Cleaner Production*, 113, 662-673.
30. Toro, E. M., Franco, J. F., Echeverri, M. G., & Guimarães, F. G. (2017). A multi-objective model for the green capacitated location-routing problem considering environmental impact. *Computers & Industrial Engineering*, 110, 114-125.
31. Weber, A., 1909. *Über Den Standort der Industrien*, 1. Teil: Reine Theorie des Standortes. Tubingen, Mohr, Germany.

32. Wu, L. Y., Zhang, X. S., & Zhang, J. L. (2006). Capacitated facility location problem with general setup cost. *Computers & Operations Research*, 33(5), 1226-1241.