پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری
دوره 3، شماره 1، بهار 1397

روش تجزیه‌وتحلیل پایدار با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای حل مسئله دوهدفه مکان‌یابی تسهیلات ظرفیت‌دار چندمحصولی و چندمنبعی در لجستیک سبز

مهسا جهانگرد[1]، فروغ معین مقدس[2*]

1- کارشناسی‌ارشد مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران
2- استادیار، گروه ریاضی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران

دریافت: 1396/1/27 پذیرش: 1396/8/17

چکیده

مسئله مکان‌یابی تسهیلات یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین مباحث در حوزه مسائل تصمیم‌گیری است. کاهش هزینه‌ها همواره یکی از اصلی‌ترین اهداف این مسائل بوده است. در سال‌های اخیر با افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، توجه به انتشار گازهای مضر و آلودگی‌های ناشی از آن‌ها به‌عنوان یکی دیگر از معیارهای تأثیرگذار در امر مکان‌یابی تسهیلات و نیز تخصیص مشتریان به آن‌ها درآمده است. در این مقاله، مسئله دوهدفه مکان‌یابی تسهیلات ظرفیت‌دار چندمنبعی و چندمحصولی با توجه همزمان به هزینه‌های مالی و میزان انتشار گاز co_2 موردبررسی قرار گرفته است. ابتدا، مدل ریاضی مسئله ارائه و سپس برای حل مسئله از روش تجزیه‌وتحلیل پایدار به کمک شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شده است. با به‌کارگیری این روش می‌توان میزان پایداری جواب‌های بهینه پارتو به‌منظور تصمیم‌گیری بهتر برای تأسیس انبارها و تخصیص مشتریان به آن‌ها را تعیین نمود. درنهایت، نتایج محاسباتی ارائه و تحلیل شده است.

واژگان کلیدی: مسئله مکان‌یابی تسهیلات؛ لجستیک سبز؛ بهینه‌سازی چندهدفه؛ تجزیه‌وتحلیل

---

* نویسنده مسئول مقاله: E-mail: F.moeen@ub.ac.ir

پایداری؛ چندمحصولی؛ چندمنبعی.

1- مقدمه

مسئله مکان‌یابی تسهیلات یکی از مهم‌ترین مسائل راهبردی برای کسب‌وکار محسوب می‌شود. معمولاً تعیین محل تسهیلات از بین مکان‌های بالقوه، تحت تأثیر عواملی نظیر وضعیت جغرافیایی، محدودیت‌های مالی و ظرفیت تسهیلات است. در مسئله کلاسیک مکان‌یابی تسهیلات ظرفیت‌دار (CFLP)[1]، هدف به حداقل رساندن مجموع هزینه‌ها با حفظ سطحی خاص از خدمات است [1]. با گذشت زمان، مسائل دنیای واقعی پیچیده‌تر شده و لزوم توجه به سایر معیارها در امر تصمیم‌گیری موجب شده است که پژوهشگران اهداف دیگری را نیز در این مسائل در نظر گیرند. رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه می‌تواند امکان ارزیابی سایر اهداف در کنار اهداف مرسوم مانند اهداف اقتصادی را برای تصمیم‌گیرندگان فراهم آورد.

نظر به تغییرات زیست‌محیطی طی دهه‌های اخیر و اثرات نامطلوب ناشی از عملیات شرکت‌های صنعتی، توجه به هدف دستیابی به محیط‌زیستی سالم ضرورت پیدا کرده است. در قوانینی که به‌تازگی در اغلب کشورها به‌خصوص اروپا به تصویب رسیده، به‌منظور جلوگیری از متضرر شدن محیط‌زیست، شرکت‌ها مسئول جمع‌آوری، احیا و بازیافت ضایعات و نهایتاً کنترل و کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از عملیات خود هستند [2]. ازاین‌رو، اخیراً پژوهش‌هایی در خصوص مسائل بهینه‌سازی چندهدفه با هدف کاهش اثرات مخرب ناشی از گازهای گلخانه‌ای صورت گرفته است. مسئله موردبحث در پژوهش حاضر یک مسئله دوهدفه است که هدف اول کمینه‌کردن هزینه‌ها و هدف دوم کمینه‌کردن میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن (CO_2) ناشی از عملیات است. از سوی دیگر، درحالی‌که در بیشتر مدل‌های مکان‌یابی تنها یک محصول و یک تأمین‌کننده مفروض است، در این مقاله یک مسئله مکان‌یابی تسهیلات ظرفیت‌دار چندمحصولی و چندمنبعی که در آن اهداف زیست‌محیطی نیز لحاظ شده است، موردمطالعه قرار می‌گیرد.

---

1. Capacitated Facility Location Problem

بنا به بررسی‌های انجام‌شده توسط نویسندگان، علی‌رغم کاربردی‌بودن این مسئله، تاکنون پژوهش‌های کمی در خصوص آن صورت گرفته است. در مقاله حاضر به بررسی مدل ریاضی مسئله و ارائه روش حلی برای آن و تجزیه‌وتحلیل نتایج حاصل خواهیم پرداخت. در روش به‌کار برده شده، برنامه‌ریزان بدون نیاز به یک تصمیم‌گیری قبلی در مورد اهمیت نسبی اهداف مختلف می‌توانند از بین راه‌حل‌های توافقی[1]، جواب‌های مناسب‌تر را انتخاب نماید. ساختار مقاله به این صورت است: در بخش دوم به بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در مورد مسائل مکان‌یابی تسهیلات چندهدفه و خصوصاً مسائل با معیارهای زیست‌محیطی خواهیم پرداخت. در بخش سوم به ارائه مدل ریاضی و در بخش چهارم به تشریح روش حل ارائه‌شده برای مسئله می‌پردازیم. در بخش پنجم، نتایج محاسباتی و تحلیل آن‌ها و درنهایت، بخش نتیجه‌گیری را ارائه خواهیم کرد.

2- مبانی نظری پژوهش

مدل عمومی CFLP شامل دو سطح تصمیم‌گیری است. در سطح اول، مشخص می‌شود که کدامیک از تسهیلات از بین مجموعه مکان‌های بالقوه باید تأسیس شوند و در سطح دوم، تعیین می‌شود که هر یک از مشتریان به کدامیک از تسهیلات تخصیص داده شوند. مروری دقیق از فرمول‌بندی‌های مسئله مکان‌یابی تسهیلات و روش‌های حل آن‌ها در مقالات [3-5] ارائه شده است. کلوز و درکسل [1] برخی استفاده‌های رایج از مدل‌های مکان‌یابی تسهیلات برای طراحی سیستم توزیع در صنایع فعلی را بررسی و طبقه‌بندی‌هایی برای این مسائل ارائه نمودند.

طی سال‌های گذشته پژوهش‌های زیادی نیز در خصوص مسائل مکان‌یابی چندهدفه با در نظر گرفتن هدف اقتصادی و اهداف دیگر صورت گرفته که ازاین‌دست می‌توان به این موارد اشاره کرد: لیائو و همکارانش در سال 2011 مدل چندهدفه‌ای پیشنهاد دادند که تصمیمات موجودی را ادغام کرده و به یک مدل مکان‌یابی تسهیلات معمولی تبدیل می‌کرد. هدف این مدل کمینه‌کردن هزینه کل و بیشینه نمودن سطح

1. Trade Off

خدمات به مشتریان است [6]. جوانشیر و همکارانش نیز در سال 2012 برای حداقل کردن هزینه کل زنجیره تأمین و به حداکثر رساندن پاسخگویی به مشتریان که شامل عدم تأخیر نیز هست، از دو روش فرا ابتکاری MOPSO[1] و NSGA-II[2] استفاده کردند [7]. لاتاشانکر و همکارانش در سال 2013 یک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ترکیبی چندهدفه برای به حداقل رساندن ترکیب هزینه‌های مکان‌یابی تسهیلات و حمل‌ونقل ارائه نمودند [8]. اوزگن و گلسان در سال 2014 ترکیب بهینه‌سازی خطی احتمالی با AHP فازی را برای حل مسئله چندهدفه CFLP به‌کار بردند. تابع هدف اول در این مقاله، کمینه‌کردن هزینه‌های متداول مکان‌یابی و تخصیص و تابع هدف دوم در این مقاله، بیشینه‌کردن کیفیت خدمات‌رسانی است [9].

نظر به تغییرات اقلیمی چند سال اخیر، کاهش گازهای گلخانه‌ای ناشی از عملیات به یکی از اساسی‌ترین معیارها در تصمیم‌گیری و نیز بخشی از مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها تبدیل شده است. پژوهشگران همچنین مطالعاتی در خصوص ترکیب اهداف زیست‌محیطی با اهداف کلاسیک موجود در زمینه طراحی زنجیره تأمین انجام داده‌اند [ن.ک.10-13]. در ادامه به‌مرور برخی از پژوهش‌های صورت گرفته خواهیم پرداخت.

خو و همکارانش، در سال 2001، از یک روش شبیه‌سازی در طراحی یک زنجیره تأمین در رابطه با توزیع فلز آلومینیوم خام بهره بردند [14]. پتی و همکارانش در سال 2006 از برنامه‌ریزی آرمانی[3] به‌منظور حفظ تعادل اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی و افزایش کاغذ بازیافت شده در یک سیستم لجستیک کاغذ استفاده نمودند [15]. کوریگاسی و همکارانش در سال 2008 به سازماندهی مجدد یک شبکه تولید کاغذ در اروپا پرداختند. آن‌ها تأثیرات زیست‌محیطی را نیز با استفاده از روش ارزیابی چرخه عمر[4] بررسی کردند [16].

بوجارسکی و همکارانش، در سال 2009، یک مسئله طراحی زنجیره تأمین چنددوره‌ای را با در نظر گرفتن اهداف زیست‌محیطی موردبررسی قرار دادند. آن‌ها

1. Multi-Objective Particle Swarm Optimization
2. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
3. Goal Programming
4. Life Cycle Assessment

از روش ارزیابی چرخه عمر به‌منظور حل مدل بهینه‌سازی عدد صحیح آمیخته خطی (MILP) استفاده کردند [17]. وانگ و همکارانش، در سال 2011، یک مدل دوهدفه را به‌منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین که شامل دو هدف کمینه‌سازی کل هزینه‌ها و کمینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی ناشی از انتشار گاز co_2 است، موردبررسی قرار دادند. آن‌ها از روش محدودیت‌های نرمال[1] برای حل مدل خود و یافتن جواب‌های پارتو[2] بهره بردند [18].

هریس و همکارانش، در سال 2011، تأثیر گازهای مخرب را در شبکه زنجیره تأمین بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که جواب بهینه حاصل از حل مدل‌هایی که تنها بر اساس اهداف اقتصادی باشد، ممکن است برای مسائلی که اهداف زیست‌محیطی را نیز موردتوجه قرار می‌دهند، بهینه نباشد؛ ازاین‌رو لازم است این هدف نیز به‌عنوان یکی از اهداف اصلی در طراحی شبکه زنجیره تأمین به مسائل اضافه شود [19].

هریس و همکارانش، در سال 2011، مسئله دوهدفه مکان‌یابی تسهیلات ظرفیت‌دار تک‌منبعی و تک‌محصولی را با لحاظ کردن تأثیرات گاز مخرب co_2 موردمطالعه قرار دادند. در مدل آن‌ها انبارها ازلحاظ حجم و تعداد مشتریان تخصیص داده‌شده به آن‌ها، دارای ظرفیت هستند. آن‌ها از یک رویکرد دومرحله‌ای به‌منظور حل مدل دوهدفه عدد صحیح خود استفاده کردند. در سطح اول از شیوه‌ای موسوم به بهینه‌سازی چندهدفه تکاملی[3] به‌منظور تعیین مراکز باز و در سطح دوم از ساده‌سازی لاگرانژین به‌منظور تعیین نحوه تخصیص مشتریان به مراکز باز استفاده نمودند [20].

پیشوایی و رزمی، در سال 2012، مسئله طراحی زنجیره تأمین با داده‌های غیرقطعی را موردبررسی قرار دادند. مدل آن‌ها علاوه بر کمینه‌سازی هزینه‌های متداول، اثرات زیست‌محیطی را نیز موردتوجه قرار می‌دهد. آن‌ها از روشی مبتنی بر روش ε-محدودیت به‌منظور یافتن جواب‌های فازی تعاملی استفاده کردند. همچنین به‌منظور ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و کیفیت بخشیدن به جواب‌ها از شیوه ارزیابی

1. Normalized Constraints
2. Pareto Solutions
3. Simple Evolutionary Multi-objective Optimization

چرخه عمر بهره بردند [21]. هریس و همکارانش در سال 2014، مقاله [20] را تکمیل کردند. آن‌ها ابتدا مدل ارائه‌شده را بهبود داده و سپس با به‌کارگیری روش حل ارائه‌شده در [20] و نیز استفاده از روش مجموع وزن‌دار[1]، به تخصیص انعطاف‌پذیر انبارها و ایجاد تعادل بین اهداف پرداختند [22].

افشاری و همکارانش، در سال2014، مسئله چندهدفه مکان‌یابی تسهیلات پویای چندمحصولی را در شبکه‌های توزیع سبز[2] بررسی کردند. آن‌ها اعتقاد دارند که شبکه‌های توزیع سبز هم ازلحاظ اقتصادی به‌صرفه‌تر و هم ازلحاظ اجتماعی مزایای بیشتری برای بشر دارند [23]. ذاکری و همکارانش، در سال 2015، تأثیر هزینه‌های ناشی از گازهای مخرب را در شبکه زنجیره تأمین یک شرکت تجاری استرالیا به‌وسیله دو سناریو که منعکس‌کننده دو سیاست نظارتی زیست‌محیطی است، مورد ارزیابی قرار دادند[24]. فهیم‌نیا و همکارانش، در سال 2015، یک مطالعه موردی در استرالیا درخصوص نحوه طراحی شبکه زنجیره تأمین با در نظر گرفتن سیاست‌های مالیاتی کربن انجام دادند. در این پژوهش، روش‌هایی برای نحوه محاسبه هزینه ناشی از انتشار گازهای مخرب معرفی شده است. علاوه بر این، نحوه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از طریق اعمال سیاست‌های مالیاتی و ارائه راهکارهایی برای تصمیم‌گیرندگان به‌منظور برنامه‌ریزی بهتر در مسائل مرتبط با اهداف زیست‌محیطی موردتوجه قرار گرفته است [25]. سلطانی و همکارانش در سال 2015 به بررسی و طراحی یک شبکه زنجیره تأمین سبز چندهدفه، چندمحصولی و چنددوره‌ای پرداختند. در این مقاله، تابع هدف اول کمینه‌سازی هزینه‌های کل شامل هزینه‌های احداث، حمل‌ونقل بین مراکز و هزینه پردازش داخل مراکز و تابع هدف دوم کمینه‌سازی co_2 تولیدشده در داخل مراکز و co_2 منتشرشده در اثر حمل‌ونقل بین مراکز است. آن‌ها مسئله دوهدفه خود را با روش مجموع وزن‌دار حل کردند [26]. بابایی و همکارانش، در سال 2017، یک مدل چندهدفه برای مسئله تعیین مکان تأمین‌کننده سبز و تخصیص در شرایط چندمحصولی، چندمنبعی و تک دوره‌ای ارائه دادند. در این

1. weighted sum
2. green distribution network

پژوهش، علاوه بر در نظر گرفتن مجموعه‌ای از معیارهای اقتصادی، جنبه‌های زیست‌محیطی نیز بررسی شده است. آن‌ها برای حل مدل خود از روش ε-محدودیت استفاده کردند [27]. در سال2017، تورو و همکارانش یک مدل MILP برای مسئله مکان‌یابی-مسیریابی سبز پیشنهاد دادند. در مدل آن‌ها، هدف اول کمینه کردن هزینه‌های مکان‌یابی و مسیریابی و هدف دوم کمینه کردن میزان سوخت مصرفی و هزینه‌های ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای است. آن‌ها از روش ε-محدودیت برای یافتن جواب‌های پارتوی مناسب استفاده کردند [28].

در این مقاله، حالت کلی‌تری از مقاله [22] موردبررسی قرار می‌گیرد. فرض تک‌محصولی و تک‌منبعی آورده شده در مرجع [22]]، مشتریان را ملزم می‌کند که اولاً تنها یک نوع تقاضا داشته باشند و ثانیاً، هر مشتری تقاضای خود را تنها از یک منبع یا انبار دریافت کند. این مفروضات محدودکننده، گاهی اوقات موجب نارضایتی مشتریان و همین‌طور افزایش هزینه‌های شبکه خواهد شد. در مقاله حاضر فرض شده است که اولاً نوع محصولات می‌تواند متفاوت باشد (مسئله چندمحصولی) و به‌علاوه اینکه به‌جای الزام متقاضیان برای دریافت خدمات تنها از یک مرکز یا انبار، امکان برآورده شدن تقاضا یا دریافت خدمات از انبارهای متفاوت (در صورت نیاز) میسر است (مسئله چندمنبعی). از سوی دیگر، در مسائل عملی به دلیل محدودیت فضای فیزیکی انبارها و شرایط خاص موردنیاز برای نگهداری محصولات در آن‌ها، ظرفیت‌هایی نیز برای حجم محصولات در هر انبار و همین‌طور تعداد مشتریانی که می‌توانند از انبارها استفاده کنند، وجود دارد. در این مقاله نیز محدودیت‌هایی برای انبارها ازلحاظ حجم انبار و تعداد مشتریان تخصیص داده‌شده به هر انبار در نظر گرفته شده است. با توجه به فرض چندمحصولی بودن مسئله، ظرفیت هر انبار برای نگهداری هر محصول محدود و مشخص است. مسئله از نوع دوهدفه است که هدف اول کمینه‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل و احداث انبارهاست و هدف دوم کمینه کردن میزان گازهای انتشاریافته ناشی از عملیات انبارداری و حمل‌ونقل است. در نظر گرفتن این اهداف و مفروضات می‌تواند موجب کاربردی‌تر شدن مدل و همین‌طور کمک به تصمیم‌گیرندگان به‌منظور برنامه‌ریزی بهتر شود.

در عمل، تعیین میزان اولویت یا وزن توابع هدف تحت تأثیر عوامل مختلف است و درنتیجه، تشخیص مقدار دقیق برای آن‌ها امری مشکل و اغلب غیردقیق است. لذا در این مقاله از روش تجزیه‌وتحلیل پایدار[1] به کمک شبیه‌سازی مونت‌کارلو [29] برای حل مدل دوهدفه ارائه‌شده، استفاده می‌شود. این روش، ترکیبی از بهینه‌سازی و شبیه‌سازی مونت‌کارلو بوده و از طریق آن می‌توان میزان پایداری[2] جواب‌های بهینه پارتو به‌منظور تصمیم‌گیری بهتر برای تأسیس انبارها و تخصیص مشتریان به آن‌ها را تعیین نمود. با به‌کارگیری این روش میزان پایداری هر یک از جواب‌های پارتو در برابر تغییرات وزن‌های دو تابع هدف بررسی می‌شود.

3- مدل ریاضی مسئله

مسئله مکان‌یابی تسهیلات ظرفیت‌دار چندمنبعی و چندمحصولی، تعمیمی از مسئله مکان‌یابی تسهیلات ظرفیت‌دار است که در آن، مشتریان دارای تقاضای معینی از انواع محصولات هستند و به‌جای یک محصول، برنامه‌ریزی مکان تسهیلات و تخصیص مشتریان به آن‌ها، برای چند محصول انجام می‌شود. در این مقاله فرض شده است که مشتریان برای تأمین تقاضای خود از هر نوع کالا می‌توانند به بیشتر از یک تسهیل تخصیص یابند. به‌عبارت‌دیگر، مسئله چندمنبعی فرض شده است. هزینه‌های انبارداری و حمل‌ونقل برای هر انبار متفاوت است. علاوه بر دو محدودیت برای انبارها، ابتدا برای مقدار محصولات مختلف نگهداری شده درون انبارها و سپس، تعداد مشتریانی که می‌توانند از این انبار خدمات دریافت کنند، ظرفیت در نظر گرفته شده است. هزینه‌های حمل‌ونقل، منعکس‌کننده زمان (یا فاصله) طی مسیر بین نقاط است. هزینه‌های انبارداری شامل هزینه‌های مرتبط با چیدن و بارگذاری کالاهاست.

این مسئله شامل دو تابع هدف است که هدف اول به حداقل رساندن هزینه‌های احداث، نگهداری و ارائه خدمات به مشتریان است و هدف دوم، کمینه‌کردن میزان

1. Robustness Analysis
2. Robustness

انتشار گازهای مخرب co_2 ناشی از انبارداری و حمل‌ونقل انواع کالا بین نقـاط اسـت. تعیین مکان مراکز تسهیلات و نحوه اتصال مشتریان به این مراکز به‌گونـه‌ای بایسـتی باشد که با توجه به ظرفیت محدود تسهیلات توابع هـدف کمینـه شـوند. لازم بـه ذکـر است که در این مدل تمامی پارامترهای مسئله از نوع قطعی فرض می‌شوند.

اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مورداستفاده در ایـن مـدل بـه شـرح زیـر است:

- اندیس‌ها:

iاندیس نقاط نامزد[1] تأسیس انبار؛

jاندیس نقاط تقاضا؛

kاندیس نوع محصولات.

- پارامترها:

Iمجموعه مکان انبارهای بالقوه؛

Jمجموعه مشتریان؛

Kمجموعه انواع محصولات؛

c_{ijk} هزینه برآورده کردن هر واحد تقاضای نوع k مشتری j توسط انبار i؛

f_iهزینه ثابت احداث و نگهداری انبار i؛

d_{jk} تقاضای نوع k مشتری j؛

q_{ik} ظرفیت تعداد کالای نوع k برای انبار i؛

n_iظرفیت تعداد مشتریان برای انبار i؛

e_t_{ijk} میزان انتشار گاز co_2 ناشی از حمل‌ونقل بین انبـار i و مشـتری j بـه‌منظـور برآوردن هر واحد تقاضای محصول نوع k مشتری j؛

e_g_i میزان انتشار گاز co_2 ناشی از مصرف گاز برای انبار i؛

e_e_i میزان انتشار گاز co_2 ناشی از مصرف برق برای انبار i؛

Mیک عدد ثابت بزرگ غیر منفی.

- متغیرهای تصمیم:

1. Candidat

y_iبرابر با 1 است؛ اگر انبار i برای خدمت‌رسانی انتخاب شود و در غیر این صورت، صفر.

v_{ij}برابر با 1 است؛ اگر مشتری j به انبار i تخصیص یابد و در غیر این صورت، صفر.

x_{ijk} مقدار تقاضای نوع k مشتری j که توسط انبار i برآورده می‌شود.

بنابراین، مدل ریاضی مسئله به‌صورت زیر خواهد شد:

$$Min\left[\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K} c_{ijk}\, x_{ijk} + \sum_{i\in I} f_i\, y_i\right] \quad (1)$$

$$Min\left[\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K} e_{t_{ijk}}\, x_{ijk} + \sum_{i\in I}(e_{g_i} + e_{e_i})\, y_i\right] \quad (2)$$

s.t

$$\sum_{i\in I} x_{ijk} = d_{jk}, \qquad \forall j \in J, k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{j\in J} x_{ijk} \le q_{ik}\, y_i, \qquad \forall i \in I, k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{k} x_{ijk} \le M\, v_{ij}, \qquad \forall i \in I, j \in J \quad (5)$$

$$\sum_{j\in J} v_{ij} \le n_i\, y_i, \qquad \forall i \in I \quad (6)$$

$$v_{ij} \in \{0, 1\}, \qquad \forall i \in I, j \in J \quad (7)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \qquad \forall i \in I \quad (8)$$

$$x_{ijk} \ge 0, \qquad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (9)$$

مدل ریاضی فوق از نوع مسائل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط است. تابع هدف اول بیانگر حداقل‌کردن هزینه‌هاست. این هزینه‌ها شامل هزینه‌های اتصال (حمل‌ونقل) مشتریان به انبارها، به‌علاوه هزینه ثابت اداره کردن انبارها است. تابع هدف دوم کمینه‌سازی میزان انتشار گاز co_2 ناشی از حمل‌ونقل و انبارداری است. عبارت اول نشان‌دهنده انتشار گازهای گلخانه‌ای بر اثر حمل‌ونقل برای برآوردن تقاضای نوع k مشتری توسط انبارهای باز است و عبارت دوم نشان‌دهنده مجموع گازهای تولیدشده به علت استفاده از منابع برق و گاز در انبارهاست.

محدودیت (3) تضمین می‌کند که کل تقاضای مشتری j از هر نوع محصول، به‌طور کامل برآورده می‌شود. محدودیت‌های (4) و (6) مربوط به ظرفیت‌های انبارها برای تقاضای نوع k و تعداد مشتریان برای هر انبار است. محدودیت (5) رابطه صحیح بین دو متغیر x_{ijk} و v_{ij} را نشان می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر، برآورده شدن هر نوع تقاضای یک مشتری توسط یک انبار مشروط به این است که آن مشتری در ابتدا به آن انبار اختصاص یافته باشد. محدودیت‌های (7) تا (9) مربوط به تعریف متغیرهای تصمیم مسئله هستند.

4- ارائه روش حل

در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه به‌جای به‌دست‌آوردن یک جواب بهینه واحد، اغلب چندین جواب که به‌عنوان اعضای مجموعه پارتو شناخته می‌شوند، ارائه می‌شود. روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه مدرن، امکان انعطاف‌پذیری برای یافتن راه‌حل‌های توافقی خوب را با در نظرگرفتن تعادل اهداف مهم فراهم می‌سازد؛ به‌طوری‌که تصمیم‌گیرندگان بدون نیاز به تصمیم‌گیری قبلی در مورد اهمیت نسبی اهداف مختلف، می‌توانند از بین جواب‌های توافقی، جواب‌های مناسب‌تر را تعیین نمایند. این روش‌ها با ارائه گزینه‌های کافی، امکان انتخابی آگاهانه‌تر از بین اعضای پارتو را برای تصمیم‌گیرندگان فراهم می‌آورد. در این بخش، جزئیات و الگوریتم روش تجزیه‌وتحلیل پایدار را که برگرفته از مرجع [29] است، ارائه خواهیم کرد.

4-1- تجزیه‌وتحلیل پایدار

بهینه‌سازی متأثر از عدم قطعیت[1]، طی بیست سال اخیر بسیار موردتوجه جامعه برنامه‌ریزان قرار گرفته است. هرکدام از جواب‌های مسائل بهینه‌سازی می‌تواند نشان‌دهنده حساسیت قابل‌توجه به آشفتگی پارامترهای مسئله باشد. درنتیجه غالباً ارائه تنها یک جواب، غیرکارا و غیرمفید است؛ زیرا حساس بودن جواب به تغییرات پارامترهای ورودی گاهی موجب غیرعملی شدن آن جواب یا تفاوت چشمگیر آن از بهینگی خواهد شد. بنابراین مفهوم پایداری یا استواری در برنامه‌ریزی ریاضی توجه جامعه علمی را به خود جلب کرده است. معمولاً واژه پایداری در زیر چتر بهینه‌سازی پایدار[2] مطرح می‌شود. وقتی از این واژه استفاده می‌کنیم، منظورمان این است که نوعی عدم قطعیت در مدل وجود دارد و قصد داریم به سمت جواب‌های ایمن‌تر (پایدارتر) حرکت کنیم. پایداری را می‌توان به‌عنوان درجه غیرحساس بودن یک جواب به مفروضات اساسی مدل، تعریف کرد. درواقع، بهینه‌سازی پایدار مجموعه‌ای از پاسخ‌هایی را به دست می‌آورد که در برابر نوسانات پارامترها (داده‌های ورودی) پایدار باشند. رویکرد بهینه‌سازی پایدار توسط مولوی و همکارانش [30] ارائه شده است.

صرف‌نظر از اینکه مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، ازنظر زمان منطقی برای حل، جزء مسائل پیچیده به شمار می‌روند، به دلیل وجود شرایط عدم قطعیت در آن‌ها، بی‌ثباتی بالایی در جواب‌هایشان وجود دارد که موجب عدم بهینگی جواب‌ها می‌شود. لذا تجزیه‌وتحلیل پایداری در برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه می‌تواند بینش مفیدی را به تصمیم‌گیرندگان ارائه نماید. در سال 2015، ماوروتاس و همکارانش [29] روش تجزیه‌وتحلیل پایداری با شبیه‌سازی مونت‌کارلو را برای سه نوع مسئله برنامه‌ریزی چندهدفه (خطی، عدد صحیح خطی و مختلط خطی) مطرح کردند. آن‌ها چگونگی حساسیت جواب تعیین‌شده نسبت به پارامترهای موردنظر تصمیم‌گیرندگان را موردبررسی قرار دادند و نیز اذعان داشتند که مفهوم پایداری یک جواب، تنها با

1. Optimization Affected By Uncertainty
2. Robust Optimization

توجه به ترجیحات تصمیم‌گیرنده و نه بر روی دیگر داده‌های مدل سنجیده می‌شود. آن‌ها در مقاله خود اولویت تصمیم‌گیرندگان را مربوط به مجموعه‌ای از وزن‌های توابع هدف در نظر گرفته و چگونگی حساسیت جواب به‌دست‌آمده نسبت به وزن‌های اختصاص‌یافته به توابع هدف را موردبررسی قرار دادند. در مقاله مذکور به سنجش استواری جواب‌های پارتو در برابر تغییرات وزن اهداف پرداخته شده است. در این روش با استفاده از شبیه‌سازی همزمان مونت‌کارلو، اثر مستقیم تغییرات لازم در پارامترهای موردنظر (در اینجا وزن) بر روی جواب‌های به‌دست‌آمده –به منظور اندازه‌گیری پایداری جواب- بررسی می‌شود. گفتنی است که در تحلیل حساسیت[1] در یک زمان یک پارامتر را تغییر می‌دهیم اما در مقابل، با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو قادر خواهیم بود به‌طور همزمان پارامترهای موردنیاز را تغییر دهیم [29]. ما در این مقاله برای حل مدل دوهدفه خود از روش پیشنهادی مرجع [29] استفاده می‌کنیم. هدف استفاده از این روش، بررسی شاخص پایداری یک راه‌حل بهینه پارتو منتخب است. این شاخص، درواقع، نشان‌دهنده یک درجه اطمینان است که میزان کارایی و ثبات آن راه‌حل پارتو خاص را نمایش می‌دهد. سرانجام، اطلاعات به‌دست‌آمده از این روش به‌عنوان یک ابزار برای هدایت در امر تصمیم‌گیری یا معیاری برای پشتیبانی از تصمیم نهایی در اختیار مدیران و تصمیم‌گیرندگان قرار خواهد گرفت.

4-2- الگوریتم تحلیل پایداری

مدل ارائه‌شده یک مسئله برنامه‌ریزی چندهدفه است. در ابتدا باید مسئله دوهدفه مربوطه را توسط یکی از روش‌های حل مسائل چندهدفه مانند برنامه‌ریزی آرمانی، روش مجموع وزن‌دار، روش ε-محدودیت و... به مسئله‌ای معادل با یک تابع هدف تبدیل کرد. در اینجا با استفاده از روش مجموع وزنی ساده که یک رویکرد معمول برای حل مدل‌های چندهدفه است، می‌توان مسئله دوهدفه خود را با یک تابع هدف

1. Sensitivity Analysis

جایگزین کرد. به دلیل اینکه دو تابع هم مقیاس نیستند، ابتدا آن‌ها را با استفاده از رابطه زیر نرمالایز می‌کنیم:

$$z_i = \frac{f_i(x) - f_i^u}{f_i^n - f_i^u} \quad (10)$$

که در آن f_i^u مقدار بهینه برای هر تابع هدف و f_i^n مقدار هر تابع هدف در زمان بهینگی آن تابع هدف دیگر است. توجه شود که در اینجا هر دو تابع هدف از نوع کمینه‌سازی هستند. فرض کنید z_1 و z_2، به ترتیب، توابع هدف نرمال‌شده مربوط به هزینه‌ها و انتشار گازهای مخرب باشد، مسئله جدید را که تابع هدفش ترکیب خطی محدب z_1 و z_2 است به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$Min\ z = w_1 z_1 + w_2 z_2 \quad (11)$$

$$s.t \qquad w_1 + w_2 = 1 \quad (12)$$

$$w_1, w_2 \geq 0 \quad (13)$$

w_1 و w_2، به ترتیب، وزن‌های مربوط به توابع هدف z_1 و z_2 هستند.

معمولاً در مسائل چندهدفه، وزن هر تابع هدف یا به‌طور مستقیم توسط تصمیم‌گیرندگان تعیین می‌شود یا به‌طور غیرمستقیم به دست می‌آید. در اینجا، وزن‌های اختصاص‌یافته به هر تابع هدف به‌صورت اعداد تصادفی بین (1 و 0) است. نقطه پارتو به‌دست‌آمده از ترکیب خاص اولیه وزن توابع هدف را به‌عنوان جواب بهینه ترجیحی مرجع[1] (POS) مسئله دوهدفه در نظر می‌گیریم. سپس، وزن‌های به این نقطه مرجع را به‌وسیله مجاز کردن آن‌ها به اخذ مقادیر جدید در همسایگی‌شان، آزاد[2] می‌کنیم. این همسایگی توسط تصمیم‌گیرندگان مشخص

1. Pareto Optimal Solution
2. Relax

می‌شود؛ برای مثال، $a = \%10$ بیانگر این است که وزن‌های جدید می‌توانند در بازه‌ای به‌صورت زیر مقدار بگیرند:

$$[w \times (1 - 0.1), w \times (1 + 0.1)] \quad (14)$$

به‌منظور بررسی بهتر بازه همسایگی وزن، تصمیم‌گیرنده این فواصل وزنی را به زیربازه‌هایی تقسیم می‌کند که تعداد این زیربازه‌ها معمولاً بین 5 تا 10 نقطه است. هرچه تعداد زیربازه‌ها بیشتر باشد، دقت در ارزیابی پایداری جواب بالاتر می‌رود اما زمان محاسبه نیز افزایش می‌یابد. زیربازه‌ها کمک می‌کنند که به‌تدریج در محله همسایگی وزن پیشروی کنیم. وزن‌های جدید با توجه به زیربازه‌های ایجادشده به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$\left[w_p \times (1 - g/G \times a),\ w_p \times (1 + g/G \times a)\right] \quad (15)$$

که G تعداد کل نقاط شکست بازه همسایگی وزن یا همان تعداد زیر بازه‌ها، g شمارنده زیربازه مربوطه ($g = 1, \dots, G$) و a پارامتر همسایگی است که به‌صورت درصد بیان شده و بازه همسایگی اطراف وزن مرجع را مشخص می‌کند (مثلاً $a = \%10$). w_p وزن مرجع برای تابع هدف p است. منظور از وزن مرجع، همان وزن ابتدایی است که به‌طور تصادفی در بازه (1 و 0) انتخاب شده و توسط آن، مسئله تک‌هدفه حل می‌شود و جواب پارتو اولیه به‌عنوان نقطه مرجع به دست می‌آید.

لذا بر اساس فرمول (15)، حداکثر فاصله وزنی برای w_p به‌صورت زیر است:

$$[w_p \times (1 - a),\ w_p \times (1 + a)] \quad (16)$$

پس‌ازآن، برای هر نقطه از g یک شبیه‌سازی مونت‌کارلو یا به‌عبارت‌دیگر، نمونه‌گیری تصادفی در فواصل وزن انجام می‌دهیم. بدین‌صورت که در هر زیربازه

g به تعداد n که یک پارامتر ورودی است و توسط تصمیم‌گیرندگان تعیین شده است، شبیه‌سازی مونت‌کارلو انجام می‌شود؛ یعنی برای هر g به تعداد n تا وزن تصادفی تولید می‌شود و هر بار، مسئله تک‌هدفه موردنظر با وزن‌های جدید حل شده و مقادیر توابع هدف و متغیرهای تصمیم ذخیره می‌شوند. با پایان $N = n \times g$ تکرار مونت‌کارلو، مجموعه‌ای از N پارتو در اختیار داریم که آن‌ها را در مجموعه S_g قرار می‌دهیم. حال، در هر S_g تعداد دفعاتی را که جوابی مشابه با نقطه بهینه مرجع مطابق با w_p تولید شده است، حساب می‌کنیم. این فراوانی نشانه‌ای از پایداری جواب ترجیحی در مواجهه با انحرافات کوچک در وزن‌های توابع هدف است.

به منظور اندازه‌گیری درجه پایداری هر جواب بهینه مرجع از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$RI = \frac{\frac{1}{2}+\sum_{g=1}^{G-1} \lambda_g+\frac{\lambda_G}{2}}{G} \quad (17)$$

که در این فرمول λ_g فراوانی نقطه مرجع اولیه (POS) در مجموعه جواب S_g است. RI شاخص پایداری[1] نامیده می‌شود. هر نقطه بهینه مرجعی که RI بالاتری داشته باشد، از پایداری بیشتری نیز برخوردار بوده و ازنظر تصمیم‌گیرنده نسبت به جواب‌های پارتو دیگر، ارجح‌تر می‌باشد.

همچنین به‌منظور تشخیص اینکه کدامیک از راه‌حل‌های موجود در S_g مشابه POS هستند، یک مقدار بیشینه انحراف برای مجموعه متغیرهای تصمیم و نیز برای توابع هدف تعریف می‌کنیم. به‌این‌ترتیب که اگر بیشینه انحرافات سایر متغیرهای تصمیم هر جواب موردبررسی مجموعه‌ی S_g از متغیرهای تصمیم POS، کمتر از این مقدار باشد و داخل این محدوده قرار بگیرد، آن جواب مشابه با POS در نظر گرفته می‌شود. هرچه محدوده تغییرات را بزرگ‌تر قرار دهیم، تعداد جواب‌های مشابه بیشتری با POS می‌توان یافت. معمولاً حد تغییرات 5% یا 10% مناسب است اما این بستگی به

1. Robustness Index

مسئله دارد؛ به‌طور مثال، اگر حد تغییرات برای متغیرهای تصمیم را 10% قرار دهیم، حداکثر انحراف در میان تمام متغیرهای تصمیم یک جواب باید کمتر از 10% باشد تا به‌عنوان راه‌حلی مشابه POS در نظر گرفته شود.

درصد انحراف نسبی هر مقدار متغیر تصمیم از مقدار متغیر تصمیم مشابه در POS طبق فرمول زیر به دست می‌آید:

$$rd_i = \frac{|x_i - x_i^{POS}|}{x_i^{POS}} \quad (18)$$

x_i مقدار متغیر تصمیم i ام راه‌حل بهینه پارتوی موردنظر و x_i^{POS} مقدار متغیر تصمیم iام جواب بهینه‌ی مرجع است.

همچنین درصد انحراف نسبی مقدار تابع هدف نیز با توجه به فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$rz_p = \frac{|z_p - z_p^{POS}|}{z_p^{POS}} \quad (19)$$

در اینجا نیز z_p مقدار تابع هدف p راه‌حل بهینه پارتوی موردنظر و z_p^{POS} مقدار تابع هدف p جواب بهینه مرجع است.

5- نتایج محاسباتی

به علت تعداد دفعات حل مسئله اصلی، ترجیح داده شد الگوریتم با نرم‌افزار GAMS 23.4.3 کدنویسی شود. برای این مسئله، 15 دسته نمونه به‌طور تصادفی تولید شده است که توسط حل‌کننده‌ی تجاری CPLEX 12.2 حل شده‌اند. مشخصات نمونه‌های حل‌شده در جدول 1 آورده شده است. مقادیر پارامترهای مسئله بر اساس تابع توزیع احتمال یکنواخت تولید شده‌اند که بازه‌های این توابع توزیع مطابق جدول 2 است. برای هر مسئله 10 پارتوی اولیه، 5 زیر بازه و 10

عدد تصادفی در هر زیر بازه در نظر گرفته شده است؛ لذا هر مسئله جمعاً 500 بار با وزن‌های مختلف توسط الگوریتم تحلیل پایداری حل شده است که نتایج حاصل از حل در جداول آتی به‌طور خلاصه آورده شده است. شایان‌ذکر است که تمامی پردازش‌های مربوطه بر روی یک رایانه شخصی با مشخصات Core i5, RAM 4GB, 2.7GH اجرا شده است.

جدول 1 مشخصات مسائل حل‌شده

مسئله	تعداد مشتریان	تعداد انبارها	تعداد محصولات
1	15	2	2
2	20	3	3
3	20	3	3
4	20	3	3
5	20	3	3
6	30	6	3
7	30	6	3
8	30	6	3
9	30	6	3
10	40	8	4
11	40	8	4
12	40	8	4
13	50	10	5
14	60	15	6
15	70	20	7

در مورد جدول 1 لازم به توضیح است که همه مسائل قرارگرفته در دسته مسائل 2 تا 5، 6 تا 9 و نیز 10 تا 12 دارای تعداد یکسانی مشتری، انبار و نوع محصولات هستند اما به دلیل متفاوت بودن پارامترهایشان (پارامترهای جدول2) مسائل مختلفی از آن‌ها ساخته شده است. ازاین‌رو، آن‌ها را با شماره مسئله متفاوت نمایش می‌دهیم.

جدول2 توابع توزیع احتمال برای تولید پارامترها

پارامتر	$U(a,b)$
c_{ijk}	U(5و15)
f_i	U(100و200)
d_{jk}	U(0و30)
q_{ik}	U(50و200)
n_i	U(5و15)
e_t_{ijk}	U(100و500)
e_g_i	U(50و300)
e_e_i	U(15و20)

الگوریتم حل برای 15 مسئله در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ به اجرا در آمده و درنهایت برای هر مسئله، پایدارترین پارتو از بین 10 پارتوی اولیه توسط اندازه‌گیری شاخص پایداری، مشخص شده است. همان‌طور که قبلاً بیان شد، در اینجا منظور از پایداری، ثبات یک راه‌حل بهینه در برابر تغییرات کوچک در وزن‌های اختصاص‌یافته به توابع هدف مربوطه است. درواقع با استفاده از شاخص پایداری، علاوه بر مقدار توابع هدف (هزینه و میزان انتشار گاز co_2) معیار مهم دیگری برای ارزیابی جواب‌های پارتو موردنظر شخص تصمیم‌گیرنده و درنهایت، انتخاب ارجح‌ترین راه‌حل توسط وی، ارائه می‌شود. در جدول3، ستون m شماره پارتوی پایدارتر از بین 10 پارتوی اولیه برای هر مسئله، w_1 و w_2 به ترتیب وزن تابع هدف اول و وزن تابع هدف دوم، f_1 مقدار تابع هدف اول و f_2 مقدار تابع هدف دوم و نیز z_1 و z_2 توابع هدف به‌صورت نرمال شده هستند. RI شاخص پایداری هر راه‌حل است و زمان کل حل هر مسئله توسط الگوریتم، به‌صورت «ثانیه: دقیقه: ساعت»، در جدول 3 آمده است.

جدول3 مشخصات پایدارترین جواب پارتوی به‌دست‌آمده از الگوریتم برای هر مسئله

مسئله	m	w_1 w_2	f_1 f_2	z_1 z_2	Z	شاخص پایداری (RI)	$CPU(h:m:s)$
1	8	0/929 0/071	840 1220	0 1	0/071	16/9	00:00:58
2	3	0/401 0/599	909 2005	0/372 0/195	0/266	45/6	00:01:09
3	6	0/820 0/180	1472 3786	0 1	0/180	33/3	00:01:10
4	5	0/572 0/428	526 1497	0/127 0/013	0/078	82/5	00:01:16
5	1	0/172 0/828	526 1497	0/127 0/013	0/032	33/3	00:01:12
6	3	0/401 0/599	1900 4450	0/241 0/090	0/151	70/2	00:04:13
7	2	0/756 0/244	1088 2433	0/129 0/4	0/195	45/6	00:02:46
8	1	0/172 0/828	1736 2770	1 0	0/172	476/1	00:02:35
9	10	0/205 0/795	1407 3281	0/790 0/003	0/164	390	00:02:20
10	1	0/172 0/828	1552 4124	0/431 0/046	0/112	73/3	00:18:12
11	3	0/401 0/599	2037 5006	0/181 0/182	0/181	172/7	00:11:27
12	6	0/820 0/180	1559 3815	0/067 0/361	0/120	664/7	00:24:51
13	3	0/401 0/599	1166 5386	0/528 0/113	0/280	139/9	01:30:23
14	4	0/434 0/566	2309 6168	0/217 0/299	0/263	328/5	02:44:27
15	7	0/684 0/316	3178 8098	0/054 0/431	0/173	783/6	03:24:05

به‌منظور واضح‌تر نشان دادن روند حل نمونه‌های عددی به کمک روش ارائه‌شده، برخی جزئیات حل این نمونه‌ها در جدول 4 و5 به‌اختصار آورده شده است. البته به دلیل طولانی بودن نتایج و محدودیت فضا تنها جزئیات یک مسئله (مسئله14) را به‌عنوان نمونه ارائه کردیم.

در جدول4، مشخصات 10 پارتوی اولیه مسئله چهاردهم شامل وزن‌های توابع هدف، شماره انبارهایی که باید تأسیس شوند، مقادیر تابع هدف اول و دوم و نیز شاخص پایداری مربوط به هرکدام از پارتوهای اولیه آورده شده است. سطر مشخص‌شده در این جدول بیانگر این موضوع است که نقطه پارتوی مرجع شماره 4 مسئله‌ی دارای 60 مشتری، 15 انبار و 6 نوع کالا، به علت داشتن شاخص پایداری بالاتر با مقدار تابع هدف اول برابر با 2309 و همچنین مقدار تابع هدف دوم مساوی با 6168، می‌تواند با اطمینان بیشتری به‌عنوان جواب بهینه ترجیحی از بین 10 جواب مرجع اولیه‌ی مسئله انتخاب شود. درواقع، در اینجا تصمیم‌گیرنده باید بین 10 پارتوی حاضر با مقدارهای متفاوت توابع هدف که ناشی از بازگشایی انبارهای مختلف و نیز تخصیص انواع تقاضای مشتریان به انبارهای متفاوت است، یکی را به‌عنوان جواب ارجح انتخاب کند. حال اگر بخواهیم این انتخاب با دلیلی فراتر از ترجیح و نظر شخص تصمیم‌گیرنده صورت پذیرد، می‌توانیم از یک معیار قاطع و به‌دوراز سلایق و نظرات قبلی تصمیم‌گیرنده، تحت عنوان شاخص پایداری بالاتر استفاده نماییم.

در جدول 5، نتایج بررسی انحرافات متغیرهای تصمیم و توابع هدف 4 نمونه جواب نسبت به POS سوم از نمونه مسئله‌ی شماره 14 با مشخصات 60 مشتری، 15 انبار و 6 نوع محصول به‌طور خلاصه آورده شده است. ما در اینجا حد تغییرات برای متغیرهای تصمیم را 5% و برای توابع هدف 3% در نظر گرفتیم. لذا همان‌طور که مشاهده می‌شود با توجه به بیشینه انحرافات موجود و عبور از بیشینه حد تغییرات فرض شده هم برای متغیرهای تصمیم و هم توابع هدف توسط جواب‌ها، تنها نمونه جواب 4 به‌عنوان مشابه POS توسط الگوریتم پذیرفته می‌شود. گفتنی است که جواب‌های 1 تا 4، همه مربوط به سومین پارتو اولیه ($m = 3$) مسئله چهاردهم و متعلق به زیر بازه‌های مختلف هستند.

جدول 4 مقادیر شاخص پایداری و توابع هدف برای 10 نقطه پارتوی اولیه مسئله 14

مسئله	شماره نقاط پارتوی مرجع	w_1 w_2	شماره انبارهای بازشده	f_1 f_2	شاخص پایداری (RI)
60×15×6	1	0/172 0/828	2، 3، 4، 7، 8، 14 و 15	2866 5904	8/7
	2	0/756 0/244	4، 7، 8، 9، 11، 14 و 15	2129 6514	107/1
	3	0/401 0/599	3، 4، 7، 8، 11، 14 و 15	2415 6084	156/3
	4	0/434 0/566	3، 4، 7، 8، 11، 14 و 15	2309 6168	328/5
	5	0/572 0/428	3، 4، 7، 8، 11، 14 و 15	2309 6168	16/9
	6	0/820 0/180	4، 7، 8، 9، 11، 14، 15	2129 6514	107/1
	7	0/684 0/316	4، 7، 8، 9، 11، 14 و 15	2151 6459	180/9
	8	0/929 0/071	4، 7، 8، 9، 11، 14 و 15	2129 6514	33/3
	9	0/328 0/672	3، 4، 7، 8، 11، 14 و 15	2464 5904	8/7
	10	0/205 0/795	2، 3، 4، 7، 8، 14 و 15	2866 5904	8/7

جدول 5 مقایسه 4 پارتو از بین 50 پارتوی سومین جواب مرجع مسئله‌ی 14 و نمایش انحرافات نمونه جواب‌های حاضر نسبت به POS

f_2	f_1	$x_{15,3,2}$	$x_{14,26,6}$	...	$x_{11,9,2}$	$x_{7,58,3}$	...	$x_{4,39,4}$	$x_{3,13,5}$	y_{13}	y_3	$v_{2,7}$	w_1 w_2	60 × 15 × 6
6084	2415	3	0	...	15	0	...	29	0	0	1	0	0/401 0/599	جواب‌های مرجع POS
6084	2415	3	0	...	15	30	...	0	10	0	1	0	0/357 0/643	جواب 1
6168	2309	3	7	...	0	30	...	0	0	0	1	0	0/471 0/529	جواب 2
6084	2415	3	0	...	0	0	...	0	10	0	1	0	0/395 0/605	جواب 3
6084	2415	3	0	...	15	0	...	29	0	0	1	0	0/402 0/598	جواب 4

انحراف از پارتوی مرجع (POS)														
بیشینه انحرافات توابع هدف	انحراف توابع هدف (%)		بیشینه انحرافات متغیرها	انحراف متغیرهای تصمیم (%)										
0	0	0	%100	0	0	0	100	100	100	0	0	0	جواب 1	
4/3	1/3	4/3	%100	0	100	100	100	100	0	0	0	0	جواب 2	
0	0	0	%100	0	0	100	0	100	100	0	0	0	جواب 3	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	جواب 4	

6- نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای تحقیقات آتی

در اغلب مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، در پی انتخاب ارجح‌ترین جواب از بین جواب‌های بهینه پارتو تولیدشده هستیم که این انتخاب در بیشتر موارد به‌طور ذهنی و وابسته به نظر شخص تصمیم‌گیرنده از بین جواب‌های عینی تعیین‌شده صورت می‌گیرد؛ ولی درواقع، حداقل یک عامل دیگر نیز در انتخاب جواب ترجیحی تأثیرگذار است که آن استوار بودن جواب در مقابل تغییرات است. در این مقاله، مسئله مکان‌یابی تسهیلات ظرفیت‌دار چندمنبعی چندمحصولی با توجه همزمان به دو تابع

هدف کاهش هزینه‌ها و کاهش میزان انتشار گاز co_2 در شرایط غیرقطعی بودن وزن‌های توابع هدف مربوطه، موردبررسی قرار گرفت. در ابتدا، مدل ریاضی مسئله را بیان کرده و سپس از روش تجزیه‌وتحلیل پایدار با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای حل نمونه‌های عددی استفاده کردیم. این روش مبتنی بر سنجش استواری جواب‌های پارتو در برابر تغییرات وزن‌های اهداف بوده و ما آن را برای حل 15 نمونه عددی به‌کار بردیم. به کمک راه‌حل‌های پارتوی به‌دست‌آمده و محاسبه شاخص استواری هرکدام از جواب‌ها می‌توان به تصمیم‌گیرندگان در تصمیم‌گیری بهتر جهت انتخاب مناسب‌ترین مکان تسهیلات و تخصیص مساعدتر مشتریان به آن‌ها، با توجه همزمان به کاهش هزینه و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، یاری رساند. تحقیقات آتی می‌تواند شامل گسترش مدل حاضر جهت استفاده در زنجیره تأمین و البته ارائه روش‌های حل با استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری و فرا ابتکاری با توجه به پیچیده بودن مسئله باشد. همچنین می‌توان تأثیر عدم قطعی بودن دیگر پارامترهای مسئله را با استفاده از روش تجزیه‌وتحلیل پایدار برای این مدل بررسی نمود.

7- منابع

[1] A. Klose and A. Drexl, "Facility location models for distribution system design," *European Journal of Operational Research*, vol. 162(1), pp. 4-29, 2005.

[2] R. Tavakkoli-Moghaddam, M. Omidi-Rekavandi, and A. Ghodratnam, "Mathematical Modeling for the Forward and Reverse Logistics Network Design," *Management Researches in Iran*, vol. 17(4), pp. 43-63, 2014.

[3] M.S. Daskin, "Network and discrete location: models, algorithms and applications," *Journal of the Operational Research*, Wiley- Interscience Publication, New York. Society, 1995.

[4] Z. Drezner and H.W. Hamacher, *Facility location: applications and theory*, Berlin, Springer, 2002.

[5] S.H. Owen and M.S. Daskin, "Strategic facility location: a review," *European Journal of Operational Research*, vol. 111, pp. 423–447, 1998.

[6] S. Liao, C. Hsieh, and Y. Lin, "A multi-objective evolutionary optimization approach for an integrated location-inventory distribution network problem under vendor-managed inventory systems," *Annals of Operations Research*, vol. 186 (1), pp. 213–229, 2011.

[7] H. Javanshir, S. Ebrahimnejad, and S. Nouri, "Bi-objective supply chain problem using MOPSO an NSGA-II," *International Journal of Industrial Engineering Computations*, vol. 3(4), pp. 681–694, 2012.

[8] B. Latha Shankar, S. Basavarajappa, J.C.H. Chen, and R.S. Kadadevaramath, "Location and allocation decisions for multi-echelon supply chain network – a multi-objective evolutionary approach," *Expert Systems with Applications*, vol. 40 (2), pp. 551–562, 2013.

[9] D. Ozgen and B. Gulsun, "Combining possibilistic linear programming and fuzzy AHP for solving the multi-objective capacitated multi-facility location problem," *Information Sciences*, vol. 268, pp. 185–201, 2014.

[10] B.M. Beamon, "Designing the green supply chain," *Logistics Information Management*, vol. 12(4), pp. 332-342, 1999.

[11] R.Z. Farahani, M. Steadiesei, and N. Asgari, "Multiple criteria facility location problems: a survey," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 34(7), pp. 1689-1709, 2010.

[12] D. Lee and M. Dong, "A heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 44(3), pp. 455-474, 2008.

[13] N. Kumar, R.P. Agrahari, and D. Roy, "Review of green supply chain processes," *IFAC-Paper OnLine*, vol. 48(3), pp. 374-381, 2015.

[14] H.H. Khoo, I. Bainbridge, T.A. Spedding, and D.M. Taplin, "Creating a green supply chain," *Greener Management International*, vol. 35, pp. 71–88, 2001.

[15] R.K. Pati, P. Vrat, and P. Kumar, "A goal programming model for paper recycling system," *Omega*, vol. 36, pp. 405-417, 2008.

[16] J. Quariguasi Frota Neto, J.M. Bloemhof-Ruwaard, J.A.E.E. Van Nunen, and E. Van Heck, "Designing and evaluating sustainable logistics networks," *International Journal of Production Economics*, vol. 111(2), pp. 195–208, 2008.

[17] A.D. Bojarski, J.M. Lainez, A. Espuna, and L. Puigjaner, "Incorporating environmental impacts and regulations in a holistic supply chains modeling: an LCA approach," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 33(10), pp. 1747–1759, 2009.

[18] F. Wang, X. Lai, and N. Shi, "A multi-objective optimization for green supply chain network design," *Decision Support Systems*, vol. 51(2), pp. 262–269, 2011.

[19] I. Harris, M. Naim, A. Palmer, A. Potter, and C. Mumford, "Assessing the impact of cost optimization based on infrastructure modelling on CO2 emissions," *International Journal of Production Economics*, vol. 131(1), pp. 313–321, 2011.

[20] I. Harris, C. Mumford, and M. Naim, "An evolutionary bi-objective approach to the capacitated facility location problem with cost and CO2 emissions," *Genetic and Evolutionary Computation, GECCO* 2011, ACM.

[21] M.S. Pishvaee and J. Razmi, "Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 36(8), pp. 3433–3446, 2012.

[22] I. Harris, C. Mumford, and M. Naim, "A hybrid multi-objective approach to capacitated facility location with flexible store allocation for green logistics modeling," *Transportation Research Part E*, vol. 66, pp. 1–22, 2014.

[23] H. Afshari, M. Sharafi, T. ElMekkawy, and Q. Peng, "Optimizing multi-objective dynamic facility location decisions within green distribution network design," *Procedia CIRP*, vol. 17, pp. 675 – 679, 2014.

[24] A. Zakeri, F. Dehghanian, B. Fahimnia, and J. Sarkis, "Carbon pricing versus emissions trading: A supply chain planning perspective," *International Journal of Production Economics*, vol. 164, pp. 197–205, 2015.

[25] B. Fahimnia, J. Sarkis, A. Choudhary, and A. Eshragh, "Tactical supply chain planning under a carbon tax policy scheme: A case study," *International Journal of Production Economics*, vol. 164, pp. 206–215, 2015.

[26] M. Soltani Tehrani, H.A. Hassanpour, and S.Ramezani, "Two-objective optimization model of costs and carbon dioxide in closed loop supply chain," *Management Researches in Iran*, vol. 19(1), pp. 169-189, 2015 (In Persian).

[27] L. Babaee, M. Rabieh, E. Nikbakhsh, and M.Esmaeili, " Multi- Objective Mathematical Model for Green Supplier Selection (Case Study: Supply Chain of IRAN KHODRO Company)," *Modern Researches in Decision Making*, vol. 2 (2), pp. 1-261, 2017 (In Persian).

[28] E.M. Toro, J.F. Franco, M.G. Echeverri, and F.G. Guimarães, "A multi-objective model for the green capacitated location-routing problem considering environmental impact," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 110, pp. 114–125, 2017.

[29] G. Mavrotas, O. Pechak, E. Siskos, H. Doukas, and J. Psarras, "Robustness analysis in Multi-Objective Mathematical Programming using Monte Carlo simulation," *European Journal of Operational Research*, vol. 240, pp. 193–201, 2015.

[30] J.M. Mulvey, R.J. Vanderbei, and S.A. Zenios, "Robust optimization of large scale systems," *Operations Research*, vol. 43(2), pp. 264–281, 1995.