مکان‌یابی مراکز خدماتی با هدف بیشینه‌سازی سهم رقابتی در یک زنجیرهٔ تأمین بسته

علی مصطفایی‌پور[۱*]، هنگامه هادیان[۲]، امیرمحمد گل‌محمدی[۳]

۱. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه یزد

۲. عضو هیئت‌علمی گروه مهندسی صنایع، دانشگاه نهاوند

۳. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه یزد

(تاریخ دریافت: ۹۶/۰۸/۱۷، تاریخ روایت اصلاح‌شده۹۶/۱۰/۱۶ تاریخ تصویب: ۹۶/۱۱/۲۷)

چکیده

این مقاله به مدل‌سازی و حل مسئلهٔ مکان‌یابی مراکز خدماتی و تعیین مراکز جمع‌آوری کالاها در زنجیرهٔ تأمین حلقهٔ بسته پرداخته است. مقالات موجود در ادبیات موضوع، معمولاً یکی از رویکردهای افزایش سود یا افزایش سهم بازار را مدنظر قرار داده‌اند، اما با توجه به پژوهش حاضر، این دو هدف ممکن است در تعارض با یکدیگر باشند. در این مقاله، هر دو رویکرد افزایش سهم بازار و افزایش سودآوری به‌صورت هم‌زمان اعمال شده‌اند. رابطه‌ای جدید نیز برای تعیین میزان مطلوبیت هر مرکز بالقوه برای مشتریان برمبنای تابعی از فاصله و کیفیت خدمت‌رسانی مراکز معرفی شده است. پس از اعتبارسنجی مدل ارائه‌شده، از روش‌های دقیق LP-METRIC و فراابتکاری NSGA II برای حل استفاده شده است. درنهایت نتایج بررسی مسائل نمونهٔ متعدد در ابعاد مختلف، دلالت بر دقت و سرعت عمل بسیار NSGA II دارد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم فراابتکاری NSGA II، روش LP-METRIC، زنجیرهٔ تأمین حلقهٔ بسته، سهم بازار، مکان‌یابی رقابتی.

مقدمه

امروزه با توجه به شرایط رقابتی جهان، تجارت الکترونیک و الزامات و قوانین زیست‌محیطی، موضوع لجستیک معکوس[۱] مدنظر قرار گرفته است. این موضوع بر فعالیت‌هایی مانند مدیریت و هدایت فعالیت‌های مرتبط با تجهیزات، محصولات، اجزاء، مواد یا کل سیستم‌هایی که دوباره احیا می‌شوند، می‌پردازد. در گذشته، کمیابی منابع، اصلی‌ترین انگیزهٔ این فعالیت‌ها بود، اما در سال‌های پس از آن، بلایای زیست‌محیطی، اذهان عمومی را به خود معطوف داشت. چنانچه این موضوع در قالب اسامی‌ای مانند بازیافت، استفادهٔ مجدد، کاهش منابع و محصولات سبز[۲] مدنظر قرار گرفت [۱]. از اواسط دههٔ نود، به‌ویژه در اروپا، این موضوع با قوانین اجرایی درمورد تولید محصول، بازیافت یا انهدام مناسب آن‌ها همراه شد. افزایش هزینه‌های مربوط به دفن مواد و محدودیت‌های مربوط به آن نیز موجب توجه هرچه بیشتر به این مقوله شد. در اوایل قرن بیستم نیز سودآوری حاصل از فعالیت‌های مربوط به احیای مجدد محصولاتی مانند موبایل و مواردی از این قبیل، بیش از توجهات زیست‌محیطی موجب افزایش هرچه بیشتر ارزش حاصل از چنین اقداماتی شد؛ به‌طوری‌که رقابت‌پذیری و تلاش برای کسب، سهم بیشتری از بازار شرکت‌ها را به اجرای سیاست‌های بازگشتی متعددی وادار کرد.

ادغام فعالیت‌های لجستیک معکوس تغییرات عمده‌ای در ساختار زنجیرهٔ تأمین شرکت‌ها ایجاد کرده است. از آنجا که زنجیره‌های روبه‌جلو و معکوس به‌شدت با یکدیگر در ارتباط هستند، عملکرد هر زنجیره بر زنجیرهٔ دیگر و بر کل زنجیرهٔ تأمین اثرگذار است؛ بنابراین طراحی هم‌زمان و یکپارچه به‌جای طراحی جداگانهٔ زنجیره‌های تأمین روبه‌جلو و معکوس، امری ضروری به‌نظر می‌رسد؛ از این‌رو مفهومی با عنوان زنجیرهٔ تأمین حلقهٔ بسته[۳] مطرح شد که جریان‌های روبه‌جلو و معکوس را به‌صورت یکپارچه و هم‌زمان درنظر می‌گیرد و به حفاظت از هر دو جریان روبه‌جلو و معکوس می‌پردازد [۲-۳].

* نویسندهٔ مسئول، تلفن: (۰۳۵) ۳۱۲۳۲۴۱۵

Email: mostafaei@yazd.ac.ir

از سوی دیگر با پیشرفت فناوری، جهانی‌سازی اقتصاد و رفتارهای غیرقابل‌پیش‌بینی مشتریان در بازارها، محیط رقابتی بسیار پیچیده‌ای ایجاد شده است؛ به‌طوری‌که بیشتر پژوهشگران از واژه‌های «پویا[۴]» و «رقابتی[۵]» برای توصیف شرایط بازار استفاده می‌کنند. امروزه شکل این رقابت‌ها از نوع رقابت بین‌سازمانی در زنجیره‌های تأمین به رقابت میان زنجیره‌های تأمین در حال تغییر است، اما تصمیم‌های طراحی شبکهٔ زنجیرهٔ تأمین عمدتاً زمانی صورت می‌گیرد که بسیاری از رقبای بالقوه هنوز وارد بازار نشده و رقبای موجود نیز امکان تصمیم‌گیری برای کسب سهم بیشتر بازار را در آینده خواهند داشت؛ بنابراین درنظرگرفتن فاکتورهای رقابتی در زمان طراحی شبکهٔ زنجیرهٔ تأمین امری ضروری است. در این محیط‌های رقابتی، سازمان‌ها می‌توانند با مکان‌یابی درست مراکز سرویس‌دهی سهم بیشتری از بازار رقابت را در اختیار داشته باشند. یکی از مسائل مطرح در این میان مکان‌یابی رقابتی گسسته است که دسته‌ای از مسائل مکان‌یابی-تخصیص محسوب می‌شود که در آن رقابت بر سر متقاضیان را با استفاده از مکان‌یابی بهینه و تخصیص متقاضیان به این مراکز انجام می‌دهند. در بهینه‌سازی رقابتی، مسائل مکان‌یابی همواره بیش از یک رقیب در ناحیهٔ رقابت وجود دارد. تصمیم‌گیری برای مکان‌یابی از سوی یک سازمان نه‌تنها بر سهم این سازمان از بازار، بلکه بر سهم و فعالیت سایر سازمان‌ها نیز تأثیر مستقیم می‌گذارد. در این میان، فاصلهٔ مشتری‌ها از مراکز آن شرکت‌ها و کیفیت خدمات آن‌ها، مهم‌ترین عوامل در جذب مشتری بیشتر است. از سوی دیگر می‌دانیم که در دنیای واقعی مشتری ممکن است تسهیلاتی را انتخاب کند که لزوماً نزدیک نباشد و از آن فاصلهٔ دورتری داشته باشد؛ زیرا ممکن است جذابیت آن تسهیلات بیشتر از تسهیلات نزدیک به آن باشد. جذابیت ممکن است فضای مرکز سرویس‌دهنده، تنوع محصولات ارائه داده‌شده، قیمت تمام‌شده و دردسترس پذیربودن مرکز بسته به کاربردهای مشخص تعریف شود. با وجود این شرایط لزوم ارائهٔ رویکردی جامع به‌منظور انتخاب بهترین مکان برای یک شرکت و ارائهٔ مناسب‌ترین سطح مطلوبیت خدمات، اهمیت ویژه‌ای دارد.

مدل‌های مکان‌یابی رقابتی بسیاری در ادبیات موضوع وجود دارد و در این باره چند مقالهٔ مروری نیز ارائه شده است. آشتیانی به مرور ادبیات انواع مدل‌های رقابتی ارائه‌شده در ادبیات موضوع پرداخته است [۴]. گووینندن و همکاران نیز به مرور ادبیات لجستیک معکوس و زنجیرهٔ تأمین حلقهٔ بسته پرداخته‌اند [۵]، اما در بیشتر پژوهش‌ها در ادبیات موضوع، مکان‌یابی رقابتی در زنجیرهٔ تأمین روبه‌جلو ارائه شده است. همچنین با توجه به پیچیدگی مدل‌های مسائل مکان‌یابی رقابتی، در بسیاری از پژوهش‌ها یکی از دو رویکرد زیر برای تابع هدف مکان‌یابی رقابتی انتخاب شده است. رویکرد اول کاهش هزینه‌ها و افزایش درآمد و درنتیجه افزایش سود است و رویکرد دوم بیشینه‌سازی سهم بازار است. درحالی‌که با توجه به مقالهٔ حاضر، این دو هدف معمولاً در تعارض با یکدیگر هستند و برای رسیدن به جوابی بهینه که از هر دو حیث قابل‌قبول باشد، باید این دو هدف هم‌زمان در مسئله مدنظر قرار بگیرند.

از سوی دیگر، در بسیاری از مسائل فرض بر این است که متقاضی به نزدیک‌ترین سرویس‌دهنده مراجعه می‌کند. درحالی‌که فاصلهٔ متقاضی از مرکز نمی‌تواند تنها عامل مراجعهٔ متقاضی به مرکز سرویس‌دهی باشد. هدف اصلی پژوهش حاضر ارائهٔ مدلی به‌منظور مکان‌یابی مراکز خدماتی در زنجیرهٔ تأمین حلقهٔ بسته با اهداف بیشینه‌سازی سهم رقابتی و بیشینه‌سازی سود است. نوآوری‌های ارائه‌شده در این مقاله به شرح زیر است:

۱. درنظرگرفتن زنجیرهٔ تأمین حلقهٔ بسته در فضای رقابتی و مکان‌یابی مرکز رفت‌وبرگشت به‌صورت توأم؛
۲. تلفیق‌کردن هر دو رویکرد افزایش سهم بازار و افزایش سود و کاهش هزینه‌ها به‌صورت هم‌زمان؛
۳. ارائهٔ فرمولاسیون جدید برای جذابیت هر مرکز و جایگزین‌کردن آن به‌جای توابع مطلوبیت ارائه‌شده در ادبیات موضوع؛
۴. استفاده از الگوریتم فراابتکاری و تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌منظور یافتن بهترین جواب مسئله.

به این ترتیب، در بخش بعد ابتدا ادبیات موضوع به‌صورت مختصر مرور شده و پس از آن تشریح شبکه، مدل ریاضی و فرضیات آن صورت گرفته است. سپس روش‌های حل دقیق و الگوریتم فرابتکاری برای حل مدل ارائه شده و پس از اعتبارسنجی مدل مذکور، چندین مسئلهٔ نمونه در ابعاد مختلف حل شده است. در پایان نیز یافته‌ها و نتایج پژوهش و پیشنهادهای مطالعات آتی مطرح شده است.

مرور ادبیات موضوع

برای مدل‌های مکان‌یابی مراکز رقابتی می‌توان سه نوع مکان‌یابی کلی را درنظر گرفت. مدل‌های مکان‌یابی رقابتی پیوسته که مکان‌های بالقوه برای قرارگرفتن مراکز در هر جایی از صفحه می‌تواند باشد. مدل‌های مکان‌یابی شبکه که مکان مراکز می‌تواند روی هر جایی از یال‌های شبکه قرار بگیرد. مدل‌های مکان‌یابی گسسته که تنها تعدادی متناهی (معمولاً کم) کاندید برای مکان‌یابی مرکز وجود دارد.

مدل‌های مکان‌یابی رقابتی پیوسته گسترشی از مدل هتلینگ [۶] است که به‌عنوان اولین مقاله از مسئلهٔ مکان‌یابی رقابتی شناخته شده است. در این مقاله، هدف احداث مرکزی جدید در شرایطی است که یک مرکز رقیب از قبل در بازار وجود دارد. در این مدل، تخصیص بر اساس قاعده‌ای است که مطابق آن هر متقاضی به نزدیک‌ترین مرکز مراجعه می‌کند. در این مدل، سهم مراکز با تابع جذب[۶] سنجیده می‌شود. مدلی جامع از این نوع که توسعه‌ای از مدل‌های مکان‌یابی-تخصیص است در پژوهش گودچایلد [۷] آورده شده است. از ویژگی‌های این نوع مدل‌ها وجود مدل سودمندی (تابع جذب) برای استقرار مراکز جدید است که نشان می‌دهد مرکز به چه اندازه سودمند است. به این ترتیب که مراکز در یک یا چندین مورد با هم تفاوت دارند که بر مقدار جذب متقاضی به این مراکز تأثیرگذار است. درزنر در مقالات [۸-۹] دو مدل پیوسته با استفاده از مدل جذب را برای یافتن بهترین مراکز جدید معرفی کرده است که قصد ورود به بازار را دارند.

کریستالر [۱۰] به مکان‌یابی در فضای پیوسته با استفاده از نظریهٔ مکان‌یابی مراکز پرداخته است و فرض شده است که متقاضیان به نزدیک‌ترین مرکزی رجوع می‌کنند که سرویس‌ها و کالاهای متقاضی در آن مرکز یافت می‌شود. در مقاله‌های [۱۱-۱۳] نیز فضای جست‌وجوی مکان‌یابی یک فضای پیوسته بوده که معمولاً از فاصلهٔ اقلیدسی در محاسبهٔ فاصلهٔ متقاضی از مراکز استفاده شده است. حالتی که در این مقالات نادیده گرفته شده این است که همواره نمی‌توان در همه‌جا مکان‌یابی انجام داد. به‌نظر منطقی می‌آید که برخی نواحی که از آن به نواحی ممنوعه یاد می‌شود، از ناحیهٔ جست‌وجو خارج شده و این محدودیت نیز در مدل درنظر گرفته شده است.

در مدل‌های شبکه، مکان مراکز و محل تقاضا می‌تواند روی هر جایی از یال‌های شبکه قرار بگیرد. گره‌های یال مکان‌هایی هستند که یال‌ها همدیگر را ملاقات می‌کنند. از آنجا که سفرها تنها در شبکه انجام می‌شوند، کوتاه‌ترین مسیر نیز به‌عنوان کوتاه‌ترین فاصله درنظر گرفته می‌شود. از نمونه مقالاتی که فضای جست‌وجو برای مراکز را در شبکه‌ای رقابتی درنظر گرفته‌اند، پژوهش‌های [۳-۱۴] است. مکان‌یابی شبکه برای بعضی موارد خاص که مکان‌یابی روی گره‌ها انجام می‌گیرد در قالب مکان‌یابی گسسته قرار داده می‌شود. از سوی دیگر، با توجه به پیشرفت‌هایی که در طراحی شبکه انجام شده است، وجود برخی از بهترین نقاط در شبکه را برای مکان‌یابی و رسیدن به نقطهٔ بهینه تضمین می‌کند؛ بنابراین می‌توان مسئلهٔ مکان‌یابی شبکه را به مکان‌یابی گسسته تقلیل داد. در اواخر دههٔ ۷۰، مدل‌های مکان‌یابی رقابتی در فضای گسسته بیشتر از هر زمانی بررسی شده است.

دو رویکرد در تعیین تابع هدف این‌گونه مسائل وجود دارد؛ رویکرد اول متناظر با مدل‌هایی است که هدف در آن ماکزیمم‌کردن سود است. در این دسته دو نوع مدل اصلی وجود دارد که اولین نوع آن را گوش و کریگ توسعه داده‌اند [۱۵]. در این مدل فرض بر این است که هدف مکان‌یابی چندین مرکز خدماتی در بازار رقابتی توسط دو نوع شرکت است که در آن شرکت جدید به دنبال ماکزیمم‌کردن سود خود با بهترین مکان‌یابی است. چندین محل که در آن شرکت نمی‌تواند مکان‌یابی انجام دهد، در مدل مشخص شده است (مثلاً مکان‌هایی که مراکز شرکت اول در آن احداث شده‌اند). برای حل این مدل از روش

ابتکاری استفاده شده است. مدل‌های مشابه نیز برای یافتن مکان‌هایی ثابت برای احداث مراکز معرفی شده‌**اند** که در آن شرکت‌های رقیب نتوانند با واردکردن مراکز، سودی بیشتر از این شرکت ببرند؛ یعنی در اصل دید مینیمم‌کردن ماکزیمم سود رقیبان مدنظر است [۱۶-۱۹].

دومین رویکرد در تعیین تابع هدف این‌گونه مسائل، به‌دست‌آوردن ماکزیمم سهم از بازار است. این مدل را ریویل [۲۰] توسعه داد که هدف آن مکان‌یابی برای تعداد ثابت مراکز برای رقابت با سایر شرکت‌ها برای به‌دست‌آوردن سهم بیشتر از بازار مصرف است. در مدلی که در این مقاله معرفی شده است، رقابت براساس فاصله است. اولین گسترش از این مدل برای بازار رقابتی سلسله‌مراتبی معرفی شده است که در هر لایهٔ آن می‌توان رقابت را درنظر گرفت [۲۱].

از سوی دیگر، در ادبیات انتخاب مراکز پارامترهایی که می‌توانند در انتخاب متقاضی تأثیر بگذارند، آورده شده است. در دسته‌بندی عمومی می‌توان ادبیات انتخاب مراکز را به سه دسته تقسیم کرد. اولین گروه شامل مدل‌هایی است که براساس یک هنجار و قانون از رفتار متقاضی است. این فرض ساده کاربردهای محدودی دارد. دومین گروه براساس اطلاعاتی است که از رقابت‌های دوره‌های گذشتهٔ شرکت‌ها و عملکرد و عکس‌العمل متقاضیان به این رقابت‌ها به‌دست می‌آید. مشکلی که در این دسته وجود دارد وابستگی آن به اطلاعات گذشته است. سومین گروه نیز به‌دنبال تخمین تابعی است که بتواند رفتار متقاضی را مدل کند. به‌عنوان نمونه، در مقالهٔ [۲۲] این موضوع به‌طور کامل بررسی شده و وفاداری متقاضی به مراکز در مدل مدنظر قرار گرفته است. در این میان، برخی پژوهشگران برخی معیارهای انتخاب مرکز معرفی کرده‌اند. کارکازیز [۲۳] دو معیار را برای انتخاب متقاضی درنظر گرفته است: معیار اول سایز و ویژگی‌های ظاهری مرکز و معیار دوم فاصله از مرکز است. سایر نویسندگان نیز از توابع مطلوبیت مختلف برای نشان‌دادن جذابیت مرکز برای جذب مشتری استفاده کرده‌اند [۲۴-۲۷].

شواهد تجربی نشان می‌دهد که متقاضی همواره سبک سنگینی میان هزینهٔ مراجعه به مرکز و جذابیت مرکز انجام درنظر می‌گیرند. یکی از مطالبی که باید به آن توجه کرد قانون جاذبهٔ مرکز است که بیان می‌کند مراجعهٔ متقاضی به یک مرکز متناسب با جذابیت مرکز (ویژگی‌های مرکز) است و رابطهٔ عکس با فاصلهٔ مرکز تا متقاضی دارد.

از دیدگاه مدل‌های رقابتی نیز انواع مدل‌های رقابتی شامل مدل‌های رقابتی ایستا[۷]، رقابت با پیش‌بینی و رقابت پویاست. رقابت ایستا زمانی است که رقابت از قبل در زنجیره باشد. مراکز و مشخصه‌های رقیبان در این زنجیره معلوم و ثابت است [۹-۲۸]. مدل‌های رقابت با پیش‌بینی نیز مربوط به حالتی است که شرکتی قصد واردشدن به بازار را دارد و به‌محض آمدن آن، سایر شرکت‌ها که یا از قبل در بازار بوده‌اند یا وارد بازار خواهند شد، به‌عنوان رقیب عکس‌العمل نشان می‌دهند. از این مدل‌ها به مدل‌های تعقیبی یا مدل‌های پیشرو-پیرو[۸] نیز یاد می‌شود [۱۶-۲۹]. با ورود رقیبی جدید در بازار ممکن است سهم رقیبان موجود کمتر شود یا از دست برود؛ بنابراین این مهم به تغییر راهبردی از سوی این رقیبان می‌انجامد. این مسئله، مدل‌های پویا را به‌وجود می‌آورد که هدف آن توصیف یک دوره یا سیکل رقابتی میان شرکت‌هاست [۳۰]. هریک از مدل‌ها برای مکان‌یابی رقابتی را می‌توان حالت خاص تک‌دوره‌ای از مدل‌های پویا (چنددوره‌ای) درنظر گرفت. در مطالعات اخیر نیز، وو و همکاران [۳] به مکان‌یابی بهینه برای کانال‌های لجستیک معکوس در زنجیرهٔ تأمین رقابتی می‌پردازند. لئو و همکاران نیز به مسئلهٔ جمع‌آوری کالاهای برگشتی و انتخاب کانال‌های لجستیک معکوس در زنجیرهٔ تأمین حلقهٔ بسته پرداخته‌اند [۳۱].

تعریف مسئله

در این مقاله به مکان‌یابی رقابتی برای مراکز خدماتی در زنجیرهٔ تأمین حلقهٔ بسته به‌منظور کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، کاهش هزینه‌ها و هماهنگی عملیات رفت‌وبرگشت پرداخته شده است. این مراکز شامل مراکز پردازش محصولات رفت برای عرضهٔ محصولات رفت از مراکز تولیدی به متقاضیان همچنین مراکز برگشت یا جمع‌آوری به‌منظور برگرداندن محصولات برگشت از متقاضیان به مراکز تولیدی هستند.

فرضیه‌های مدل

به‌منظور ارائهٔ مدل ریاضی مورد نظر مفروضات زیر اعمال شده است:

- مراکز با ظرفیت محدود درنظر گرفته شده‌اند.
- مدل از نوع مکان‌یابی رقابتی گسسته و رقابت از نوع ایستاست.
- مدل تک‌دوره‌ای و تک‌محصولی است.
- فرض بر این است که شرکت A به بازار وارد می‌شود و دیگر شرکت‌های موجود در بازار (دیگر رقبا) را یک شرکت به اسم شرکت B درنظر می‌گیریم.
- مشتری‌ها درمجموع به دو دستهٔ J_1 و J_2 تقسیم شده‌اند. J_1 مربوط به مشتری‌هایی با تقاضای رفت (محصولات جدید) و J_2 مربوط به مشتری‌هایی با تقاضای برگشت (محصولات استفاده‌شده) هستند.

پارامترها

j (نقاط ثابت برای مشتریان)

j_1 (مشتریان با تقاضای رفت)

j_2 (مشتریان با تقاضای برگشت)

i (مکان‌های بالقوه برای مراکز A)

l (مکان ثابت برای کارخانهٔ l)

cf_i^f (هزینهٔ ثابت احداث مرکز توزیع)

cf_i^r (هزینهٔ ثابت احداث مرکز جمع‌آوری)

q_j^f (مقدار تقاضای رفت مشتری j ام)

q_j^r (مقدار محصولات برگشتی مشتری j ام)

Q_i (کیفیت (سطح سرویس) مرکز i ام)

d_{ij} (فاصلهٔ مرکز i ام از مشتری j ام)

ρ_{ij} (جذابیت مرکز i ام برای مشتری j ام)

b_j (قدرت خرید مشتری)

d_{jb_i} (فاصلهٔ مشتری j ام از نزدیک‌ترین مرکز شرکت B)

S_i^f (ظرفیت مرکز توزیع i ام برای محصولات رفت)

S_i^r (ظرفیت مرکز جمع‌آوری i ام برای عملیات محصولات برگشتی)

C_{li} (هزینهٔ ارسال محصولات از کارخانهٔ l ام به مرکز i ام)

p (قیمت خرید یک واحد از محصولات برگشتی از مشتریان)

PP (قیمت فروش محصولات برگشتی از سوی مراکز به کارخانه)

C_l (ماکزیمم مقدار محصول جدید ارسال‌شده توسط کارخانهٔ l ام)

γ (درصد محصولات برگشتی که به مراکز برگشت داده می‌شوند)

$J(B)$ (مکان بالقوهٔ تسهیلاتی از شرکت A که نسبت به تسهیلات شرکت B، به مشتری نزدیک‌ترند) $\left\{J : d_{ij} \le d_{iB_i}\right\}$.

متغیرهای تصمیم

x_i^f (اگر مرکز رفت i ام در مکان i ام باز باشد یک و در غیر این صورت صفر)

x_i^r (اگر مرکز جمع‌آوری i ام در مکان i ام باز باشد یک و در غیر این صورت صفر)

x_{ij} (اگر مشتری j ام مرکز i ام را انتخاب کند. (مشتری j ام توسط مرکز i ام سرویس‌دهی شود.) یک و در غیر این صورت صفر)

u_{li} (مقدار محصول تازه ارسال‌شده از کارخانهٔ l ام به مرکز i ام)

u_{il}^r (مقدار محصول برگشتی از مرکز i ام به کارخانهٔ l ام)

که در تعریف پارامترهای مدل ρ_{ij} را چنین تعریف می‌کنیم: مقدار جذابیت تسهیل i ام برای مشتری j ام و به‌صورت رابطهٔ $\rho_{ij} = \frac{\alpha Q_i^2}{(1+d_{ij})}$ تعریف می‌شود (α ضریب هم واحد سازی Q و d است).

درنهایت مدل ریاضی ارائه‌شده به‌صورت زیر خواهد بود.

$$MAX\ Z = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j}(b_j \rho_{ij} x_{ij}) \qquad (۱)$$

$$MAX\ W = \sum_{i}\sum_{J_1 \cup J_2} q_j^f b_j x_{ij} + \sum_{i}\sum_{l}(PP - P)u_{il}^r - \left[\sum_{i}\left(cf_i^f x_i^f + cf_i^r x_i^r\right) + \sum_{l}\sum_{i} u_{li} c_{li} + \gamma \sum_{i}\sum_{j_2} P q_j^r x_{ij}\right] \qquad (۲)$$

$$S.t$$

$$\sum_{i\in I} x_{ij} \le 1 \qquad \forall j \in J_1 \cup J_2 \tag{۳}$$

$$x_{ij} \le x_i^f \qquad \forall i \in J(B), j \in J_1 \tag{۴}$$

$$x_{ij} \le x_i^r \qquad \forall i \in J(B), j \in J_2 \tag{۵}$$

$$x_i^f + x_i^r \le 1 \qquad \forall i \in I \tag{۶}$$

$$\sum_{j\in J_1} q_j^f x_{ij} \le u_{li} \qquad \forall i \in I \tag{۷}$$

$$\sum_{j\in J_2} q_j^r x_{ij} \le S_i^r x_i^r \qquad \forall i \in I \tag{۸}$$

$$u_{li} \le S_i^f x_i^f \qquad \forall i \in I, l \tag{۹}$$

$$\sum_{i\in I} u_{li} \le C_l \tag{۱۰}$$

$$u_{il}^r \le \gamma \sum_{j\in J_2} q_j^r x_{ij} \qquad \forall i \in I \tag{۱۱}$$

$$x_{ij}, x_i^f, x_i^r \in \{0,1\},\ u_{li}, u_{il}' \ge 0 \qquad \forall i, j, l \tag{۱۲}$$

در تابع هدف اول فرض بر این است ماکزیمم سهم بازار برای شرکت A با وجود رقبای دیگر موجود در بازار (که در اینجا تمامی رقبای شرکت A به اسم یک شرکت (B) فرض شده است)، به‌دست می‌آید. در تابع هدف دوم، کل درآمد زنجیره منهای کل هزینه‌های زنجیره حداکثر می‌شود که بیشینه‌سازی سود زنجیره مدنظر است. محدودیت ۳ بیان می‌کند که هر متقاضی حداکثر از یک مرکز سرویس می‌گیرد. محدودیت ۴ بیان می‌کند مشتریانی که تقاضای رفت دارند می‌توانند از مراکزی که باز باشند استفاده کنند. محدودیت ۵ بیان می‌کند مشتریانی که تقاضای برگشت دارند از مراکزی که باز باشند می‌توانند استفاده کنند. محدودیت ۶ تضمین می‌کند که در هر مکانی حداکثر یک تسهیل می‌تواند باز باشد. محدودیت ۷ بیان می‌کند که میزان ارسالی از هر کارخانه به هر مرکز باید از میزان تقاضای مشتریانی که از آن نقطه سرویس می‌گیرند بیشتر باشد. مطابق با محدودیت ۸، مقدار محصولات برگشتی از سوی مشتریان به مراکز در صورتی که از مرکز i ام استفاده کند، از ظرفیت مرکز i ام کمتر است. مطابق با محدودیت ۹، مقدار محصولات ارسال‌شده از کارخانهٔ l ام به مرکز i از ماکزیمم ظرفیت آن مرکز کمتر است. محدودیت ۱۰ بیان می‌کند که مقدار محصولات ارسال‌شده از کارخانهٔ l م به کل مراکز از ماکزیمم ظرفیت کارخانه کمتر است. محدودیت ۱۱ میزان برگشتی به کارخانه را مشخص می‌کند. محدودیت ۱۲ نیز نوع متغیرهای تصمیم را تعیین می‌کند.

حل مدل

به‌منظور حل مدل ارائه‌شده، در این پژوهش از دو روش حل استفاده می‌شود. در روش اول مدل در محیط GAMS کدنویسی شده و با روش LP-METRIC به‌دنبال یافتن بهترین جواب مدل هستیم. در روش دوم از الگوریتم فراابتکاری NSGA II به‌منظور یافتن بهترین جواب ممکن مسئله استفاده شده است. در ادامه، پس از اعتبارسنجی و ارائهٔ نتایج عددی حاصل از اجرای دو روش حل، مقایسه و ارزیابی نتایج ارائه می‌شود.

اعتبارسنجی مدل

هدف از این اعتبارسنجی این است که نشان دهیم مدل ریاضی از نظر ساختاری چارچوب درست و اصولی دارد. برای این منظور لازم است مثال نمونه طراحی شود و بررسی دقیق جواب بهینهٔ این مدل برای مثال طراحی‌شده صورت بگیرد. در این شرایط می‌توان موجه‌بودن و منطقی‌بودن خروجی نهایی مدل را اثبات کرد. بدین‌منظور، مسئله‌ای را درنظر بگیرید که در آن ۵ مشتری وجود دارد. مشتری اول و سوم تقاضای رفت، و مشتری چهارم و پنجم تقاضای برگشت دارند. ۳ مکان بالقوه برای تأسیس مراکز توزیع در زنجیرهٔ رفت و مراکز جمع‌آوری در زنجیرهٔ برگشت وجود دارد. ۲ تأمین‌کننده وجود دارد که کالاهای مراکز توزیع را تأمین می‌کنند و مراکز جمع‌آوری، محصولات جمع‌آوری‌شده را به آن‌ها می‌فروشند. ۴۰ درصد محصولات به مراکز جمع‌آوری برگشت داده می‌شوند. قیمت خرید محصولات بازیافتی از مشتریان ۲ واحد پولی و قیمت فروش به تأمین‌کننده ۴ واحد پولی است. سایر اطلاعات این مسئله در جدول‌های ۱-۴ آمده است.

جدول ۱. اطلاعات مسئلهٔ تولیدشده

شمارهٔ مکان بالقوه	۱	۲	۳
هزینهٔ راه‌اندازی مراکز توزیع	۱۰۰	۱۲۰	۹۵
هزینهٔ راه‌اندازی مرکز جمع‌آوری	۹۰	۸۵	۱۰۰
سطح سرویس	۰/۸	۰/۹	۰/۷۵
ظرفیت مرکز توزیع	۴۰	۳۰	۳۰
ظرفیت مرکز جمع‌آوری	۲۵	۳۰	۲۵

جدول ۲. اطلاعات مسئلهٔ نمونه

شمارهٔ مشتری	۱	۲	۳	۴	۵
تقاضای رفت	۱۰	۷	۱۰	-	-
تقاضای برگشت	-	-	-	۵	۷

جدول ۳. مسافت بین نقاط کاندید و مشتریان

مشتری/ مکان	۱	۲	۳	۴	۵
۱	۲	۵	۱	۳	۷
۲	۵	۴	۷	۲	۳
۳	۳	۴	۲	۵	۶

اکنون بر اساس رابطهٔ ۱۳، مقدار جذابیت هر مرکز برای هر مشتری مشخص می‌شود:

$$\rho_{ij} = \frac{\alpha Q_i^2}{(1+d_{ij})} \qquad (۱۳)$$

جدول ۴. هزینهٔ ارسال از هر تأمین‌کننده به مرکز توزیع بالقوه

مرکز توزیع/ تأمین‌کننده	۱	۲	۳
۱	۵	۹	۶
۲	۹	۵	۷

همچنین ظرفیت تأمین‌کنندهٔ اول ۳۰ واحد محصول و ظرفیت تأمین‌کنندهٔ دوم ۳۵ واحد محصول است. این مسئلهٔ نمونه در محیط GAMS کدنویسی شده است. به‌منظور اعتبارسنجی مدل و بررسی اثر توابع هدف بر روی یکدیگر، ابتدا هر تابع هدف به‌صورت جداگانه بهینه شده است. به عبارت دیگر در مرتبهٔ اول با حذف تابع هدف دوم، تابع هدف اول بهینه شده و در مرتبهٔ دوم عکس این کار صورت گرفته است.

حل مسئلهٔ نمونه برای تابع هدف اول

در ادامه به‌منظور اعتبارسنجی مدل ارائه‌شده، پس از کدنویسی مدل با تابع هدف اول در محیط GAMS، مسئله در زمان ۰/۹ ثانیه و بدون خطا حل شده است. با بررسی متغیرهای تصمیم مشخص می‌شود در حالت بهینه مکان‌های ۱ و ۳ برای مراکز توزیع و مکان ۲ به‌عنوان مرکز جمع‌آوری تعیین شده‌اند. مشتری ۱ و ۳ از مکان ۱، مشتری ۲ از مکان ۳ و مشتری ۴ و ۵ از مکان ۲ سرویس می‌گیرند.

با توجه به دسته‌بندی مشتریان از نوع مشتریان با تقاضای رفت و مشتریان با تقاضای برگشت و نیز نقاط تعیین‌شده به‌عنوان مراکز توزیع و جمع‌آوری مشخص است که تخصیص مشتریان به نقاط با توجه به مدل به‌درستی انجام شده است. در جدول ۵ میزان ارسال از هر تأمین‌کننده به هر مرکز توزیع آمده است.

همان‌طور که مشخص است، هر تأمین‌کننده در کل ۲۷ واحد ارسال می‌کند که این مقدار از ظرفیت هر تأمین‌کننده کمتر است و درنتیجه محدودیت ظرفیت رعایت شده است. همچنین مکان ۱ درمجموع ۴۰ واحد دریافت می‌کند که این مقدار فراتر از ظرفیت این مرکز نیست. همچنین مرکز ۳ نیز ۱۴ واحد دریافت می‌کند که این مقدار کمتر از ظرفیت آن است.

جدول ۵. میزان ارسال در زنجیرهٔ رفت

تأمین‌کننده/ مکان	۱	۲
۱	۲۰	۲۰
۳	۷	۷

همان‌طور که مشخص است، هر تأمین‌کننده در کل ۲۷ واحد ارسال می‌کند که این مقدار از ظرفیت هر تأمین‌کننده کمتر است و درنتیجه محدودیت ظرفیت رعایت شده است. همچنین مکان ۱ درمجموع ۴۰ واحد دریافت می‌کند که این مقدار فراتر از ظرفیت این مرکز نیست. همچنین مرکز ۳ نیز ۱۴ واحد دریافت می‌کند که این مقدار کمتر از ظرفیت آن است.

همچنین میزان برگشت از مرکز جمع‌آوری به تأمین‌کنندهٔ اول ۴/۸ و به تأمین‌کنندهٔ دوم ۴/۸ خواهد بود. این رقم دقیقاً برابر ۴۰ درصد تقاضای مشتریان زنجیرهٔ برگشت است. مقادیر تابع هدف در حل بهینهٔ مدل به شرح زیر است.

جدول ۶. خروجی حل دقیق در حالت بهینه‌سازی هدف اول

تابع هدف	تابع هدف اول (Z_1)	تابع هدف دوم (Z_2)
مقدار تابع هدف	۲۴/۷۷۹	۳۶۳/۴

حل مسئلهٔ نمونه برای تابع هدف دوم

مسئلهٔ نمونه طراحی‌شده دقیقاً برای تابع هدف دوم (بیشینه‌سازی سود) در محیط GAMS کدنویسی شده است. این مسئله در زمان ۰/۳ ثانیه و بدون خطا حل شد. پس از بررسی متغیرهای تصمیم مشخص شد که در حالت بهینه مکان ۱ و مکان ۳ برای مراکز توزیع و مراکز توزیع و مکان ۲ به‌عنوان مرکز جمع‌آوری مشخص شده است. مشتری ۱ و مشتری ۲ از مکان ۱، مشتری ۳ از مکان ۳ و مشتری ۴ و ۵ از مکان ۳ سرویس می‌گیرند. با توجه به دسته‌بندی مشتریان به مشتریان با تقاضای رفت و تقاضای برگشت و نیز نقاط تعیین‌شده به‌عنوان مراکز توزیع و جمع‌آوری مشخص می‌شود که تخصیص مشتریان به نقاط با توجه به مدل به‌درستی انجام شده است. در جدول ۷ میزان ارسال از هر تأمین‌کننده به هر مرکز توزیع مشخص می‌شود.

جدول ۷. میزان ارسال در حالت دوم

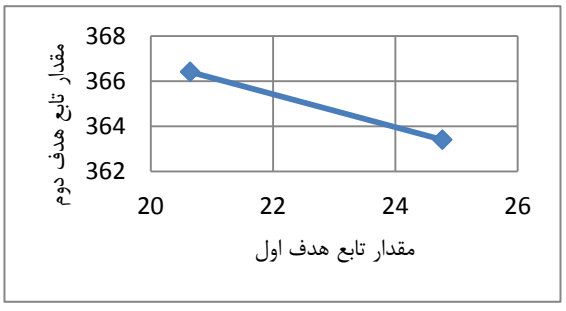
تأمین‌کننده/ مکان	۱	۲
۱	۱۷	۱۷
۲	۱۰	۱۰

میزان برگشت از مرکز جمع‌آوری به تأمین‌کنندهٔ اول ۴/۸ و به تأمین‌کنندهٔ دوم نیز ۴/۸ خواهد بود. این رقم دقیقاً برابر ۴۰ درصد تقاضای مشتریان زنجیرهٔ برگشت و با حالت قبل یکسان است. در این حالت نیز محدودیت ظرفیت هر تأمین‌کننده و محدودیت ظرفیت هر مرکز توزیع رعایت شده است. مقادیر تابع هدف در حل بهینهٔ مدل به شرح جدول ۸ است.

جدول ۸. خروجی بهینه‌سازی هدف دوم

تابع هدف	تابع هدف اول (Z_1)	تابع هدف دوم (Z_2)
مقدار تابع هدف	۲۰/۶۵	۳۶۶/۴

همان‌طور که مشخص است، تخصیص مشتری‌ها به مکان‌ها در حالتی که هدف افزایش سود است با حالتی که هدف افزایش رضایت‌مندی است متفاوت است. همچنین در حالتی که هدف بهینه‌سازی تابع اول است، مقدار تابع هدف دوم ۳۶۳/۴ است و زمانی که هدف بهینه‌سازی تابع هدف دوم است مقدار بهینهٔ تابع هدف دوم ۳۶۶/۴ است. این موضوع دقیقاً برای تابع هدف اول نیز صادق است. زمانی که بهینه‌سازی تابع دوم به‌عنوان هدف مدنظر است، مقدار تابع هدف اول ۲۰/۶ است و زمانی که بهینه‌سازی هدف اول مدنظر است مقدار بهینهٔ آن ۲۴/۷ است. این موضوع نشان می‌دهد زمانی که یک هدف را بهینه‌سازی می‌کنیم، هدف دوم مقداری کمتر از مقدار بهینهٔ خود می‌گیرد. به‌منظور درک بهتر این موضوع، شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. نتایج به‌دست‌آمده از حل انفرادی اهداف

درنتیجه این دو تابع هدف با هم تعارض دارند و باید برای حل مدل از روش‌هایی استفاده کرد که هر دو تابع هدف را هم‌زمان مدنظر قرار دهند.

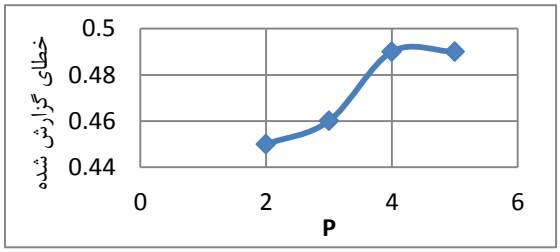
جدول ۹. نتایج حل مسئلهٔ نمونه به ازای P های مختلف

زمان حل	خطای گزارش‌شده توسط گمز	Z_{LP}	Z_2	Z_1	
۰/۴۴	۰/۰۴۵	۱/۵۷	۳۶۰/۴	۲۰/۹۳	P=2
۰/۴۲	۰/۴۶	۱/۵۶	۲۶۰/۴	۲۰/۹۳	P=3
۰/۴۷	۰/۴۹	۱/۵۶	۲۶۰/۴	۲۰/۹۳	P=4
۰/۴۶	۰/۴۹	۱/۵۶	۲۶۰/۴	۲۰/۹۳	P=5

تعیین P بهینه برای حل به روش LP-metric

در رابطهٔ ارائه‌شده برای روش LP-metric میزان پارامتر P مهم است. برای تعیین مقدار P مناسب، از مسئلهٔ نمونه استفاده می‌شود. در این حالت مقدار P بهینه از میان مقادیر ۲ تا ۵ انتخاب می‌شود. روش LP-metric برای مقادیر P مختلف در محیط GAMS کدنویسی شده است. در جدول ۹ خلاصهٔ نتایج به ازای هر P نشان داده شده است.

در شکل ۲، خطای GAMS در حل مدل LP-metric به ازای هر مقدار P نشان داده شده است.



شکل ۲. نمودار خطای گزارش‌شده در روش LP-metric

همان‌طور که مشخص است، از P=3 به بعد خطای گزارش‌شده به‌صورت چشمگیری افزایش پیدا می‌کند. همچنین از P=3 به بعد تغییری در مقدار تابع هدف اول و تابع هدف دوم دیده نمی‌شود. کمترین مقدار تابع هدف نیز در P=3 به‌دست آمده است؛ بنابراین با توجه به عوامل فوق می‌توان مقدار بهینه برای پارامتر P در روش LP-metric را عدد ۳ گزارش کرد. به این دلیل برای سایر مثال‌های نمونه در روش LP-metric از P=3 استفاده خواهد شد.

الگوریتم NSGA-II

الگوریتم فراابتکاریNSGA II یکی از پرکاربردترین و قدرتمندترین الگوریتم‌های موجود برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است [۳۲]. در این الگوریتم پاسخ‌ها براساس اینکه چند پاسخ بهتر از آن‌ها وجود داشته باشد، رتبه‌بندی و مرتب می‌شوند. پاسخی که هیچ پاسخ دیگری به‌طور قطع بهتر از آن نباشد، امتیاز بیشتری دارد. شایستگی (برازندگی[9]) برای جواب‌ها، برحسب رتبهٔ آن‌ها و غلبه‌نکردن سایر پاسخ‌ها اختصاص می‌یابد. همچنین از شیوهٔ اشتراک برازندگی برای جواب‌های نزدیک استفاده می‌شود تا به این ترتیب پراکندگی جواب‌ها به نحو مطلوبی تنظیم و جواب‌ها به‌طور یکنواخت در فضای جست‌وجو پخش شوند.

نمایش جواب (کروموزوم)

برای شروع به کار با این الگوریتم نیازمند طراحی سیستم کدگذاری هستیم که هر کروموزوم را بتواند به‌صورت یک یا چند رشته جواب نشان دهد. بدین‌منظور هر پاسخ به‌صورت برداری به طول $I+J_1+J_2$ نشان داده می‌شود. خانه‌های ۱ تا I برای مکان‌های بالقوه، خانه‌های I+1 تا I+J برای مشتریان با تقاضای رفت و خانه‌های $I+J_1+1$ تا $I+J_1+J_2$ برای مشتریان با تقاضای برگشت درنظر گرفته شده است. مقادیر هریک از سلول‌های این بردار با اعداد بین ۰ تا ۱ پر می‌شوند. برای نمونه، مسئلهٔ قبل را درنظر بگیرید که ۳ مکان بالقوه، ۳ مشتری با تقاضای رفت و ۲ مشتری با تقاضای برگشت داریم. نمونهٔ این رشتهٔ پاسخ به‌صورت زیر خواهد بود.

شکل ۳. نمونه‌ای از نمایش پاسخ

در قسمت اول که مربوط به مکان‌های بالقوه است، اگر مقدار سلولی بین ۰ تا ۱/۳ (یک‌سوم) باشد، به معنی تأسیس‌نکردن آن مکان است. اگر بین ۱/۳ تا ۲/۳ باشد، به معنی تأسیس آن مرکز با عنوان مرکز توزیع و اگر بین ۲/۳ تا ۱ باشد به معنی تأسیس آن با عنوان مرکز جمع‌آوری است. به‌عنوان نمونه، در مثال فوق مکان‌های ۱ و ۳ به‌عنوان مرکز توزیع و مکان ۲ به‌عنوان مرکز جمع‌آوری مشخص شده‌اند.

در قسمت دوم که به مشتریان با تقاضای رفت مربوط است، ابتدا به قسمت اول رجوع و تعداد مراکز توزیع را مشخص می‌کنیم. مثلاً در این مثال برابر ۲ شده است. حال اعداد بین ۰ تا ۱/۲ به معنای تخصیص مشتری به مرکز اول و اعداد ۱/۲ تا ۲/۲ به معنای تخصیص مشتری به مرکز توزیع دوم است. در مثال فوق، مشتری اول و مشتری سوم به مرکز توزیع اول و مشتری دوم به مرکز دوم تخصیص داده شده است. همین روند دقیقاً برای مشتریان با تقاضای برگشت تکرار می‌شود. در مثال فوق چون یک مرکز جمع‌آوری تأسیس می‌شود، همهٔ این مشتری‌ها به این مرکز تخصیص داده می‌شوند. چنین رشته پاسخی به‌سادگی قابلیت تقاطع و جهش دارد و الگوریتم فراابتکاری NSGAII به‌خوبی به‌کمک آن اجرا خواهد شد.

تقاطع[10]

به‌منظور تقاطع دو پاسخ در الگوریتم مورد نظر از روش تقاطع یک‌نقطه‌ای استفاده می‌شود. در این روش دو پاسخ از یک نقطه برش داده شده و با هم ترکیب می‌شوند و جواب‌های جدیدی تولید می‌کنند.

جهش[11]

به‌منظور اجرای جهش در الگوریتم NSGA II، یک نقطه از رشتهٔ پاسخ به تصادف انتخاب و مقدار آن به‌صورت تصادفی تغییر داده می‌شود.

تنظیم پارامترهای الگوریتم

به‌منظور تعیین مقدار مناسب برای پارامترهای الگوریتم NSGA II از روش سعی و خطا استفاده شده است. این روش یک‌بار برای مثال‌هایی با ابعاد کوچک و یک‌بار برای مثال‌هایی با ابعاد بزرگ اجرا شده است. درنهایت، مقادیر بهینه برای پارامترهای الگوریتم مطابق با جدول ۱۰ تعیین شده است.

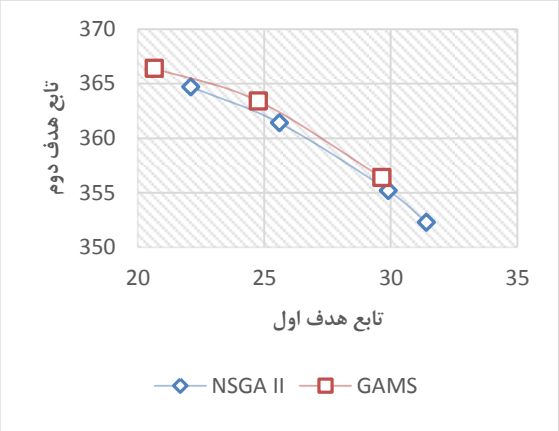
حل مسئلهٔ نمونه با الگوریتم NSGA II

مسئله‌ای که در قسمت اعتبارسنجی ارائه شد با الگوریتم NSGAII در محیط MATLAB کدنویسی و اجرا و زمان اجرا ۳/۷۵ ثانیه گزارش شده است. این الگوریتم درنهایت چند پاسخ به‌عنوان مرکز کارای مسئلهٔ مدنظر ارائه می‌کند که این پاسخ‌ها قابلیت مقایسه با جواب‌های نرم‌افزار GAMS به ازای حل مدل با تابع هدف اول، حل مدل با تابع هدف دوم و حل مدل با تابع هدف LP-metric را خواهد داشت. در شکل ۴ این دو مرز کارا با هم مقایسه شده‌اند.

همان‌طور که مشخص است، مرز کارای الگوریتم NSGA II پایین‌تر از مرز کارای پاسخ بهینه GAMS است. به این دلیل که هر دو تابع هدف از نوع بیشینه‌سازی است که به‌دلیل خطای اندک الگوریتم NSGA II نقاط به‌دست‌آمده در این الگوریتم تابع هدف اول یا تابع هدف دوم کمتری به پاسخ بهینهٔ خود دارند.

جدول ۱۰. مقادیر تنظیم‌شده برای الگوریتم NSGA II

برای مسائل با ابعاد بزرگ		برای مسائل با ابعاد کوچک	
۱۰۰	جمعیت اولیه	۲۰۰	جمعیت اولیه
۰/۷	نرخ تقاطع	۰/۸	نرخ تقاطع
۰/۵	نرخ جهش	۰/۳	نرخ جهش
۱۰۰۰	تعداد تکرار	۳۵۰۰	تعداد تکرار



شکل ۴. مقایسهٔ دو مرز کارا

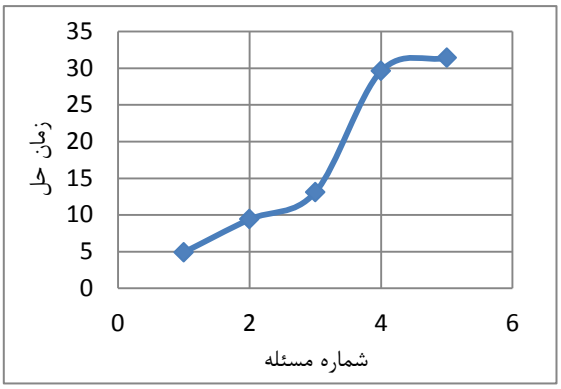
بررسی عملکرد الگوریتم در مسائل با ابعاد متفاوت

به‌منظور بررسی عملکرد الگوریتم ارائه‌شده، ابتدا ۵ مسئله در ابعاد کوچک و متوسط به‌صورت تصادفی تولید می‌شود. این مثال‌ها یک‌بار با روش LP-metric در GAMS با P=3 و بار دیگر نیز با الگوریتم NSGA II حل می‌شوند. به‌منظور مقایسهٔ این دو روش، یکی از جواب‌های مرز کارا در الگوریتم NSGA II با خروجی دقیق روش LP-metric مقایسه می‌شود. خلاصهٔ نتایج عددی برای مثال‌ها با ابعاد کوچک در جدول ۱۱ آمده است. در این جدول، z_1 میانگین تابع هدف اول برای جواب‌های مرز کارا و z_2 میانگین تابع هدف دوم برای جواب‌های مرز کاراست. همچنین T بیانگر زمان حل در هریک از روش‌های حل برحسب ثانیه است. همچنین GAP درصد خطای تجمیعی برای الگوریتم NSGA II است که براساس فرمول زیر محاسبه می‌شود.

$$GAP = \left(\frac{Z1_{LP-metric} - Z1_{NSGA\ II}}{Z1_{LP-metric}} + \frac{Z2_{LP-metric} - Z2_{NSGA\ II}}{Z2_{LP-metric}}\right)\times 100 \qquad (۱۴)$$

در الگوریتم NSGA II درمجموع دو تابع هدف به‌طور میانگین خطای ۷ درصدی از خود ارائه کرده‌اند. درحالی‌که متوسط زمان حل روش LP-metric برابر ۱۱۴۶ ثانیه است و متوسط زمان حل الگوریتم NSGA II برابر ۷ ثانیه است. در شکل زیر نمودار زمان حل الگوریتم NSGA II در مثال‌های مختلف نشان داده شده است.

به‌دلیل زمان‌بربودن روش LP-metric در ابعاد کوچک، برای مسائل با ابعاد بزرگ استفاده از این روش مناسب نیست؛ بنابراین در ابعاد بزرگ تنها با الگوریتم NSGA II مسائل را حل می‌کنیم. بدین منظور ۵ مسئلهٔ دیگر نیز در ابعاد بزرگ به‌صورت تصادفی تولید می‌شود. در این شرایط برای هر مثال شاخص پراکندگی مطابق رابطهٔ ۱۵ محاسبه و در نتایج ارائه می‌شود.



شکل ۵. نمودار زمان حل الگوریتم NSGA II

$$SM = \frac{\sum_{i=1}^{N} |\bar{d} - d_i|}{(n-1)\bar{d}} \qquad (۱۵)$$

در رابطهٔ فوق d_i فاصلهٔ اقلیدسی بین دو نقطهٔ متوالی است و $\bar{d}$ متوسط d_iهاست. خلاصهٔ نتایج عددی برای مثال‌ها با ابعاد بزرگ در جدول ۱۲ ارائه شده است. در این جدول z_1 میانگین تابع هدف اول برای جواب‌های مرز کارا و z_2 میانگین تابع هدف دوم برای جواب‌های مرز کاراست. براساس جدول ۱۲، الگوریتم NSGA II توانایی حل مسائل با ابعاد بزرگ را در زمان بسیار کوتاهی دارد. از نظر شاخص پراکندگی پاسخ‌ها، در مثال‌های مختلف به‌طور متوسط ۰/۹ پراکندگی وجود دارد که مقدار مناسبی برای مسائل با ابعاد بزرگ به‌حساب می‌آید.

نتایج و پیشنهادهای مطالعات آتی

در این پژوهش به ارائهٔ مدلی ریاضی برای تعیین مراکز ارائهٔ خدمت به مشتریان و تعیین مراکز جمع‌آوری کالاها در زنجیرهٔ بسته در شرایط رقابتی پرداخته شد. برای این منظور مدل ریاضی دوهدفه برای این مسئله ارائه شد. اهداف مورد بررسی افزایش سهم بازار و نیز افزایش سودآوری است. پس از اعتبارسنجی مدل ارائه‌شده، به‌منظور حل دقیق مدل از روش LP-metric در محیط GAMS، و برای حل تقریبی مدل از الگوریتم NSGA II در محیط MATLAB استفاده شد.

در ابتدا، پاسخ بهینهٔ مدل در ابعاد کوچک بررسی شد

که نشانگر منطقی‌بودن خروجی دقیق مدل است. همچنین به‌منظور مقایسهٔ روش‌های حل ارائه‌شده، مثال‌های نمونه‌ای در ابعاد کوچک و بزرگ تولید شد. در این زمینه نتایج نشان می‌دهد روش حل دقیق، تنها در ابعاد کوچک می‌تواند در یک زمان معقول و منطقی پاسخ بهینهٔ خود را ارائه دهد، اما به‌کمک روش فراابتکاری استفاده‌شده نمی‌توان مسائل با ابعاد بزرگ را در کوتاه‌ترین زمان ممکن حل کرد.

توسعهٔ مدل در حالت چنددوره‌ای یا چندمحصولی، درنظرگرفتن مدل با رقابت از نوع پویا و پیش‌بینی اعمال راهبردهای رقبا در بازار رقابتی و استفاده از رویکرد تئوری بازی‌ها برای حل مکان‌یابی رقابتی در زنجیرهٔ تأمین بسته و درنهایت حل مدل در شرایط عدم قطعیت زمینه‌های پژوهش‌های آتی در این پژوهش است.

جدول ۱۱. خلاصهٔ نتایج حل مسائل نمونه در ابعاد کوچک و متوسط

مسائل	تعداد مکان‌ها	تعداد مشتریان رفت	تعداد مشتریان برگشت	LP-metric			NSGA II			GAP (درصد)
				Z_1	Z_2	T	Z_1	Z_2	T	
مسئلهٔ نمونهٔ1	۳	۳	۳	۲۹	۳۷۰	۲/۹۷	۲۸	۳۶۹/۴	۴/۹	۳/۶۱
مسئلهٔ نمونهٔ2	۵	۱۰	۷	۳۵	۴۹۰	۲۴/۷	۳۳	۴۸۵/۳	۹/۴	۶/۶۷
مسئلهٔ نمونهٔ3	۱۰	۲۰	۱۵	۹۴	۶۲۱	۱۶۷/۹	۹۰	۶۰۹	۱۳/۱	۶/۱۹
مسئلهٔ نمونهٔ4	۱۵	۲۵	۲۰	۱۷۸	۹۴۸	۱۹۳۷/۱	۱۷۰	۹۰۷	۲۹/۶	۸/۸۲
مسئلهٔ نمونهٔ5	۲۰	۳۰	۲۵	۲۱۸	۱۱۷۸	۳۶۰۰	۲۱۰	۱۱۰۴/۹	۳۱/۴	۹/۸۸
میانگین						۱۱۴۶/۵۳۴			۱۷/۶۸	۷/۰۳۴

جدول ۱۲. خلاصهٔ نتایج حل مسائل نمونه در ابعاد بزرگ

مسائل	تعداد مکان‌ها	تعداد مشتریان رفت	تعداد مشتریان برگشت	NSGA II			SM
				Z_1	Z_2	T	
مسئلهٔ نمونهٔ6	۲۵	۳۵	۳۰	۳۹۴	1394	۱۹/۷	۰/۹۷۵
مسئلهٔ نمونهٔ7	۳۰	۴۰	۳۵	۴۸۱	1945	۲۷/۶	۰/۸۴۶
مسئلهٔ نمونهٔ8	۳۵	۴۵	۴۰	۵۹۴	۲۳۴۸	۳۳/۷	۱/۰۷۸
مسئلهٔ نمونهٔ9	۴۰	۵۰	۴۵	۸۱۰	۳۱۹۷	۵۰/۱	۰/۹۳۷
مسئلهٔ نمونهٔ10	۵۰	۶۰	۵۰	۹۶۷	۵۴۹۸	۷۳/۳	۱/۰۱۶
میانگین						۴۰/۸۸	۰/۹۷۱

منابع

1. Gungor, A., and Gupta, S. M. (1999). "Issues in Environmentally Conscious Manufacturing and Product Recovery: A Survey", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 36, No. 4, PP. 811-853.
2. Ashtiani, M., Makui, A., and Ramezanian, R., (2011). "Huff-Type Competitive Facility Location Model with Foresight in a Discrete Space", *Management Science Letters*, Vol. 1, No. 1, PP. 1-12.
3. Ahn, H. K. et al. (2004). "Competitive Facility Location: The Voronoi Game", *Theoretical Computer Science*, Vol. 310, No. 1 and 3, PP. 457-467.
4. Ashtiani, M. (2016). "Competitive Location: A State-of-Art Review", *International Journal of Industrial Engineering Computations*, Vol. 7, No. 1. PP. 1-18.
5. Govindan, K., and Soleimani, H., (2017). "A Review of Reverse Logistics and Closed-Loop Supply Chains: A Journal of Cleaner Production Focus", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 142, No. 1, PP. 371-384.
6. Hotelling, H., (1929). "Stability In Competition", *The Economic Journal*, Vol. 39, No. 153, PP. 41-57.
7. Goodchild, M. F. (1984). "LACS: A Location-Allocation Mode for Retail Site Selection", *Journal of Retailing*, Vol. 60, No. 1, PP. 84-100.

8. Drezner, T. (1994). "Optimal Continuous Location of a Retail Facility, Facility Attractiveness and Market Share: An Interactive Model", *Journal of Retailing*, Vol. 70, No. 1, PP. 49-64.
9. Drezner, T., Drezner, Z., and Salhi, S. (2002). "Solving the Multiple Competitive Facilities Location Problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 142, No. 1, PP. 138-151.
10. Christaller, W. (1966). "Central Places in Southern Germany: Prentice-Hall".
11. Xiu Li, P,. and Yu-Qiang, F. (2006). "Solving Competitive Facilities Location Problem with the Clonal Selection Algorithm", *In Management Science and Engineering, ICMSE'06. 2006 International Conference On*.
12. Wendell, R. E., and Mckelvey, R. D. (1981). "New Perspectives in Competitive Location Theory", *European Journal of Operational Research*, Vol. 6, No. 2, PP. 174-182.
13. Zhao, Y., Chen, W., and Teng, S. H. (2009). "The Isolation Game: A Game of Distances", *Theoretical Computer Science*, Vol. 410, No. 47-49, PP. 4905-4919.
14. Meng, Q., Huang, Y., and Cheu, R. L. (2009). "Competitive Facility Location on Decentralized Supply Chains", *European Journal of Operational Research*, Vol. 196, No. 2, PP. 487-499.
15. Ghosh, A., and Craig, C. S. (1984). "A Location Allocation Model for Facility Planning in a Competitive Environment", *Geographical Analysis*, Vol. 16, No. 1, PP. 39-51.
16. Küçükaydin, H., Aras, N., and Altınel, I. K. (2011). "Competitive Facility Location Problem with Attractiveness Adjustment of the Follower: A Bilevel Programming Model and Its Solution", *European Journal of Operational Research*, Vol. 3, No. 208, PP. 206-220.
17. Konur, D., and Geunes, J. (2011). "Analysis of Traffic Congestion Costs in a Competitive Supply Chain", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 47, No. 1, PP. 1-17.
18. Aboolian, R., Berman, O., and Krass, D., (2007). "Competitive Facility Location and Design Problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 1, No. 182, PP. 40-62.
19. Fernández, J. et al. (2007). "Planar Location and Design of a New Facility with Inner and Outer Competition: An Interval Lexicographical-Like Solution Procedure", *Networks and Spatial Economics*, Vol. 7, No. 1, PP. 19-44.
20. Revelle, C., (1986). "The Maximum Capture or "Sphere of Influence" Location Problem: Hotelling Revisited on a Network", *Journal of Regional Science*, Vol. 26, No. 2, PP. 343-358.
21. Serra, D., Marianov, V., and Revelle, C. (1992). "The Maximum-Capture Hierarchical Location Problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 62, No. 3, PP. 363-371.
22. Santos Peñate, D., Suárez Vega, R., and Dorta González, P. (2007). "The Leader–Follower Location Model", *Networks and Spatial Economics*, Vol. 7, No. 1,PP. 45-61.
23. Karkazis, J. (1989). "Facilities Location in a Competitive Environment: A Promethee Based Multiple Criteria Analysis", *European Journal of Operational Research*, Vol. 42, No. 3, PP. 294-304.
24. Suárez Vega, R., Santos Peñate, D. R., and Dorta González, P. (2004). "Competitive Multifacility Location on Networks: The (R| Xp)-Medianoid Problem", *Journal of Regional Science*, Vol. 44, No. 3, PP. 569-588.
25. Lerner, A. P., and Singer, H. W. (1937). "Some Notes on Duopoly and Spatial Competition", *Journal of Political Economy*, Vol. 45. No. 2, PP. 145-186.
26. Megiddo, N., Zemel, E., and Hakimi, S. L. (1983). "The Maximum Coverage Location Problem", *SIAM Journal on Algebraic Discrete Methods*, Vol. 4, No. 2, PP. 253-261.
27. Eaton, B. C., and Lipsey, R. G. (1975). "The Principle of Minimum Differentiation Reconsidered: Some New Developments in the Theory of Spatial Competition", *The Review of Economic Studies*, Vol. 42, No. 1, PP. 27-49.
28. Pelegrín, B., Suárez Vega, R., and Cano, S. (2012). "Isodistant Points in Competitive Network Facility Location", *Top*, Vol. 20, No. 3, PP. 639-660.
29. Beresnev, V., and Suslov, V. (2010). "A Mathematical Model of Market Competition", *Journal of Applied and Industrial Mathematics*, Vol. 4, No. 2, PP. 147-157.
30. Miller, T. C. et al. (2007). "Reaction Function Based Dynamic Location Modeling in Stackelberg–Nash–Cournot Competition", *Networks and Spatial Economics*, Vol. 7, No. 1, PP. 77-97.

31. Liu, L. et al. (2017). "Collection Effort and Reverse Channel Choices in a Closed-Loop Supply Chain", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 144, PP. 492-500.
32. Deb, K. et al. (2002). "A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2, PP. 182-197.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Reverse Logestic
2. Green Products
3. Closed-Loop Supply Chain
4. Dynamic
5. Competitive
6. Gravity
7. Static
8. Leader–Follower
9. Fitness
10. Crossover
11. Mutation