ارائه الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه میرایی ارتعاشات برای مسئله مکان‌یابی تسهیلات و تخصیص سهم به تأمین‌کنندگان در یک زنجیره‌تأمین چند دوره‌ای چند محصولی

حمـزه امین طهمـاسبی[1*]، سینا صدفی[2]

دانشگاه گیلان

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۲۳

چکیده

یکی از عوامل مهم برای شرکت‌های قدرتمند تولیدی به‌منظور بقا در محیط رقابتی امروزی، کاهش هزینـه‌هـای تولیـد محصـول است. مواد و تجهیزات تأمین‌شده از تأمین‌کنندگان نقش مهمی را در مدیریت زنجیره تأمین ایفا کرده و در تصمیمات لجسـتیکی یک شرکت و مکان‌یابی تسهیلات تولیدی، تأثیر زیادی در طراحی زنجیره تأمین از منظر برنامه‌ریـزی حمـل‌ونقـل و توزیـع دارد. هدف از انجام این پژوهش، ارائه یک مدل یکپارچه برای مسائل انتخاب تـأمین‌کننـدگان، تخصـیص سـهم بـه تـأمین‌کننـدگان و مکان‌یابی تسهیلات تولیدی در یک زنجیره تأمین چند دوره‌ای و چند محصولی با در نظرگیری اهداف اقتصادی، قابلیت اطمینان شبکه و ارزشیابی تأمین‌کنندگان منتخب می‌باشد. در این راستا یک مدل برنامه‌ریزی عـدد صـحیح مخـتلط توسـعه داده شـده و برای مسائل با اندازه کوچک توسط روش دقیق حل شده است. از آنجایی‌که مسئله پیشنهادی زنده می‌باشد، برای حل مسـائل بـا اندازه بزرگ، الگوریتم فراابتکاری بهینه‌سازی چند هدفه میرایی ارتعاشات (MOVDO) بـا معرفـی معیارهـایی در جهـت بررسـی نتایج ارائه می‌شود. نتایج عددی نشان می‌دهد که الگوریتم MOVDO زمان حل مسئله را کاهش و جواب‌هایی نزدیک به بهینـه و با درصد اختلاف کمی نسبت به روش دقیق را ارائه می‌دهد که در معیار کیفیت جواب نیز وضعیت خوبی دارد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم چندهدفه میرایی ارتعاشات، انتخاب تأمین‌کنندگان، زنجیره تأمین، مدل چندهدفه

۱- مقدمه

امـروزه، بازارهـا رقـابتی و پویاسـت. تغییـرات سـریع فناوری، جهانی‌شدن و انتظارات متفـاوت مشـتریان باعـث تغییر ماهیت رقابت بین شرکت‌ها و تبـدیل آن بـه رقابـت بین زنجیره‌های تأمین آنها شده است. زنجیره تأمین شامل تمام کسب‌وکارها و واحدهایی است که به‌طور مستقیم یـا غیرمستقیم تأمین‌کننده و برطـرف‌کننـده تقاضـای نهـایی مشتری هستند. بـه‌طـورکلی زنجیـره تـأمین شـامل همـه فعالیت‌های مرتبط با جریان کالا و تبدیل مـواد، از مرحلـه تهیـه مـاده اولیـه تـا مرحلـه تحویـل کـالای نهـایی بـه مصرف‌کننده می‌شود. هدف هـر زنجیـره تـأمین، افـزایش ارزش تولیدی و رضایت مشتریان برای موفقیـت در عرصـه رقابتی است. مدیریت زنجیـره تـأمین بـر یکپارچـه‌سـازی فعالیت‌های زنجیـره تـأمین و نیـز جریـان‌هـای اطلاعـاتی مرتبط بـا آنهـا از طریـق بهبـود در روابـط زنجیـره، بـرای دستیابی به‌مزیت رقابتی قابل‌اتکا و مستدام مشتمل می‌شود. مدیریت زنجیره تأمین به‌عنوان فرآیندی شامل تمام وقایع جریان و تبدیل کـالا و خـدمات از نقطـه منبـع بـه نقطـه استفاده تعریف می‌شود[۱]. یکی از اهداف مدیریت زنجیره تأمین، مدیریت تأمین است که بـه‌طـورکلی فعالیـت‌هـای مرتبط با تأمین‌کنندگان از جمله توانمندسـازی، ارزیـابی و انتخاب، مشارکت و این قبیل را نشان می‌دهد[۲].

۱*- استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی شرق، دانشگاه گیلان، نویسنده مسئول، پست الکترونیک: amintahmasbi@guilan.ac.ir، نشانی: رشت، کیلومتر ۵ جاده تهران، دانشگاه گیلان، ساختمان معاونت فناوری و پژوهشی، دفتر ارتباط با صنعت

۲- کارشناس ارشد مهندسی صنایع، گیلان، پست الکترونیک: sina.sadafi90@ yahoo.com

یکی از فعالیت‌های مهم برای شرکت‌ها در راستای کسب مزیت رقابتی و دستیابی به اهداف کل زنجیره تأمین، انتخاب تأمین‌کننده است[۳]. از ضروری‌ترین فعالیت‌ها برای ایجاد زنجیره تأمین مناسب می‌توان به فرآیند انتخاب تأمین‌کننده مناسبی که قادر به فراهم کردن نیاز خریدار از نظر محصولات با کیفیت، با قیمت مناسب و در زمان و حجم مناسب باشد، اشاره کرد. انتخاب تأمین‌کنندگان مناسب می‌تواند به شکل قابل ملاحظه‌ای هزینه‌های خرید را کاهش داده و قابلیت رقابت‌پذیری سازمان را افزایش دهد، چرا که در بیشتر صنایع، قسمت عمده‌ای از بهای تمام شده محصول شامل هزینه مواد خام و اجزای تشکیل‌دهنده محصول می‌شود. تأمین، هدف مشترک هر عملکرد در مدیریت زنجیره تأمین بوده و به خاطر تأثیر آن در هزینه‌های کلی و سهم بازار از اهمیت راهبردی خاصی برخوردار است[۴]. مسئله انتخاب تأمین‌کننده زمینه مطالعاتی محققان زیادی بوده که در ادامه، تحقیقات مربوط به این دسته به‌طور مختصر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

سیف‌برقی و اسفندیاری مسئله چند هدفه تخصیص سهمیه تأمین‌کنندگان را با در نظرگیری هزینه‌های معامله با اهداف حداقل‌سازی هزینه‌های خرید، واحدهای رد شده، تحویل با تأخیر واحدها، هزینه‌های معامله هنگام خرید از تأمین‌کنندگان، به همراه حداکثرسازی نمره ارزیابی تأمین‌کنندگان مورد بررسی قرار دادند. برای حل مدل ارائه شده، ابتدا آن را با یک روش وزن‌دهی ساده مدل چندهدفه به یک مدل تک هدفه تبدیل کرده، سپس از الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک[۱] و شبیه‌سازی تبرید[۲] استفاده می‌شود[۲].

آیهان و کیلیک[۳] یک روش دو مرحله‌ای برای مسئله انتخاب تأمین‌کننده در محیط چند منظوره، چند تأمین‌کننده با مقدار تخفیف را مطالعه کردند. در ساختار اصلی روش پیشنهادی، ابتدا با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی[۴] برای یافتن وزن نسبی معیارها تلاش کرده و در مرحله بعد با ارائه مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای انتخاب بهترین تأمین‌کنندگان است[۵].

سودنکمپ[۵] و همکاران بر مدل‌سازی چند معیاره هم‌زمان انتخاب تأمین‌کنندگان و تخصیص سفارش مطالعه کردند. مدل ارائه‌شده شامل ترکیبی از آنالیز تصمیم‌گیری چند معیاره و برنامه‌ریزی خطی است. این مدل برای بررسی تأثیرات عملکرد همکاری تأمین‌کنندگان در یک ساختار تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی ارائه شد[۶]. همدان و چیتاو[۶] یک رویکرد بهینه‌سازی چند هدفه برای مسائل انتخاب چند دوره‌ای تأمین‌کنندگان و تخصیص سفارش به آنها با معیارهای سبز را معرفی کردند. این ابزار شامل سه جزء یکپارچه می‌شد:

اول تاپسیس فازی[۷] برای تخصیص در اولویت وزنی به هر تأمین‌کننده براساس دو مجموعه جداگانه سنتی و سبز

دوم، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی برای تخصیص وزن به هر یک از دو مجموعه معیار براساس راهبردهای شرکت و مستقل از تأمین‌کنندگان

سوم، برای هریک از تأمین‌کنندگان اولویت وزنی تاپسیس فازی در رابطه با معیارهای سنتی به دست آمد[۷].

چه[۸] الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه برای حل مسائل انتخاب تأمین‌کننده با برنامه‌ریزی توالی و بالانس خط مونتاژ را بررسی کرد. برنامه‌ریزی خط تولید برای حل مسائل خاص مرتبط با انتخاب تأمین‌کنندگان با استفاده از مدل بهینه‌سازی چند هدفه اعمال شد. ترکیبی از الگوریتم‌های جستجوی هدایت‌شده[۹] و بهینه‌سازی چند هدفه ازدحام ذرات برای حل مدل استفاده گردید[۸].

چراغعلی‌پور و فرساد[۱۰] یک مدل دو هدفه پایدار برای مسئله انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش با در نظرگیری مقدار تخفیف تحت احتمال اختلال را بررسی کردند. مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط با اهداف کمینه‌سازی هزینه کل و بیشینه‌سازی امتیاز

1- Genetic Algorithm
2- Simulated Annealing
3- Ayhan & Kilic
4- Analytical Hierarchy Process

5- Sodenkamp
6- Hamdan & Cheaitou
7- Fuzzy TOPSIS
8- Che
9- Guided Search Algorithm
10- Cheraghalipour & Farsad

تأمین‌کنندگان معرفی‌شده و برای حل آن از روش برنامه‌ریزی آرمانی چند گزینه‌ای بهبود یافته[1] استفاده شد[۹].

صادقی راد و نهاوندی[2] یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه برای مسئله یکپارچه طراحی شبکه زنجیره‌تأمین حلقه بسته و مقدار تخفیف را بررسی کردند.

مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط در چهار سطح تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، مراکز توزیع و مشتریان با اهداف کمینه‌سازی هزینه کل، کمینه‌سازی انتشار دی اکسید کربن و بیشینه‌سازی رضایت مشتریان معرفی شد. نتایج نشان داد که در نظر گرفتن کمیت تخفیف در مدل منجر به دستیابی به هزینه‌های کلی بهینه‌تر می‌شود[۱۰].

میرزایی[3] و همکاران مسئله چند هدفه انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش، با دوره‌های زمانی مختلف، چند محصول، تأمین‌کنندگان مختلف و همچنین مقدار تخفیف با توجه به بودجه و محدودیت‌های ظرفیت برای خریداران و تأمین‌کنندگان را بررسی کردند. اهداف مسئله شامل کمینه‌سازی هزینه کل و بیشینه‌سازی ارزش خرید هستند. مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط ارائه شده به‌وسیله برنامه‌ریزی آرمانی فازی انحصاری[4] حل شد. با استفاده از مثال عددی عملکرد مدل ارائه شده با روش‌های برنامه‌ریزی فازی آرمانی وزنی، برنامه‌ریزی max-min و برنامه‌ریزی آرمانی کلاسیک مقایسه و ارزیابی شد[۱۱].

محمد[5] و همکاران یک روش ترکیبی بهینه‌سازی تصمیم‌گیری چندمعیاره- چند هدفه فازی برای مسئله انتخاب تأمین‌کننده پایدار و تخصیص سفارش با در نظر گرفتن معیارهای اقتصادی، محیطی و اجتماعی را ارائه دادند.

در این پژوهش یک فرآیند یکپارچه AHP فازی و تاپسیس فازی برای ارزیابی و رتبه‌بندی تأمین‌کنندگان براساس سه مجموعه معیار (سنتی، سبز و اجتماعی) پیشنهاد شد. برای مقابله با عدم قطعیت‌ها در داده‌های ورودی، مدل بهینه‌سازی چند هدفه مجدد در وضعیت فازی فرمول‌بندی شد. از روش‌های محدودیت اپسیلون و LP متریک برای نشان دادن مجموعه جواب‌های پارتو براساس مدل بهینه‌سازی چند هدفه فازی استفاده شده و در نهایت، روش تاپسیس برای انتخاب راه‌حل نهایی پارتو که به راه‌حل ایده‌آل نزدیک است اعمال شد[۱۲]. محبعلی‌زاده و هندفیلد[6] مدل چند هدفه برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را بررسی کرده و از یک روش حل ترکیبی برای مسئله انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش پایدار استفاده کردند. مدل مزبور شامل حالات کمبود و تخفیف است. یک روش حل سه مرحله‌ای برای حل مدل ارائه شده، با استفاده از روش محدودیت اپسیلون[7] مدل چند هدفه به یک مدل تک هدفه تبدیل کرده، سپس، مدل تک هدفه را با استفاده از الگوریتم تجزیه بندرز[8] حل کرد. از بین جواب‌های پارتو حاصل‌شده، پاسخ برتر براساس رتبه‌بندی DEA[9] تمام شرکت‌ها، به‌عنوان یک ابزار پشتیبانی تصمیم‌گیری انتخاب شد[۱۳].

سید حائری و رضایی[10] مدل انتخاب تأمین‌کننده سبز مبتنی بر سیستم خاکستری برای محیط‌های عدم قطعیت را معرفی کرده، که معیارهای اقتصادی و محیطی را در نظر گرفته است. مدل تخصیص وزنی از ترکیب روش بهترین بدترین[11] (bwm) و نقشه‌های شناختی فازی خاکستری[12] (FGCM) برای به دست آوردن وابستگی‌های متقابل میان معیارها ارائه شد. آنالیز رابطه خاکستری بهبودیافته قادر به استفاده از وزن‌های خاکستری معیارها برای ارزیابی تأمین‌کنندگان سبز است که متعاقباً با استفاده از یک روش تجزیه و تحلیل فاصله‌ای رتبه‌بندی گردیدند[۱۴].

از عوامل تأثیرگذار مهم بر رقابت، به‌خصوص در بازار خرده‌فروشی می‌توان به تصمیمات مکان‌یابی تسهیلات، و تصمیمات مربوط به ساختار فیزیکی شبکه زنجیره تأمین اشاره کرد. در یک مسئله مکان‌یابی تسهیلات گسسته، انتخاب مکان‌هایی برای ایجاد تسهیلات محدود به یک

1- Revised Multi-Choice Goal Programming
2- Sadeghi Rad & Nahavandi
3- Mirzaee
4- Preemptive Fuzzy Goal Programming
5- Mohammed
6- Moheb-Alizadeh & Handfield
7- ε-Constraint
8- Benders Decomposition Algorithm
9- Data Envelopment Analysis
10- Seyed Haeri & Rezaei
11- Best-Worst Method
12- Fuzzy Grey Cognitive Maps

مجموعه مکان کاندید در دسترس است[۱۵]. در این‌گونه مسائل مشخص می‌شود مکان تسهیلات تولیدی در کجای شبکه قرار دارد و اینکه کدام تسهیلات در هر دوره زمانی دایر است. ساده‌ترین حالت برای چنین مسئله‌ای این است که در آن P تسهیل در راستای به حداقل رساندن مجموع فواصل یا هزینه‌های تأمین تقاضای مشتری باید انتخاب شوند[۱۵]. مهم‌ترین و دشوارترین تصمیمات در راستای تحقق زنجیره تأمین کارآمد، تصمیمات مکان‌یابی تسهیلات است، چرا که مکان‌های ناکارآمد برای تولید، بدون توجه به چگونگی تولید کارخانه‌ها، گزینه‌های حمل‌ونقل، مدیریت موجودی و تصمیمات تبادل بهینه اطلاعات در واکنش به شرایط متغیر، منجر به هزینه‌های اضافی در طول عمر تسهیلات می‌شود[۱۶]. در ادامه، تحقیقات مربوط به این دسته از موضوعات نیز مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد؛

رحمتی[1] و همکاران روشی برای مکان‌یابی تسهیلات و بالانس موجودی در زنجیره تأمین چند هدفه، چند سطحی و چند دوره‌ای را بررسی کردند. برای ایجاد مدلی نزدیک به دنیای واقعی برنامه‌ریزی موجودی و مکان‌یابی تسهیلات به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته شد. یک نسخه چند هدفه جدید از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه مبتنی بر جغرافیای زیستی[2] معرفی شده و کارایی الگوریتم با مقایسه آن با الگوریتم چند هدفه جستجوی هارمونی[3] اثبات گردید[۱۷].

موسوی[4] و همکاران بهینه‌سازی مسئله طراحی شبکه توزیع‌کننده- خرده‌فروش برای مسئله مکان‌یابی تخصیص موجودی شبکه در زنجیره تأمین دو سطحی را با الگوریتم بهینه‌سازی مگس میوه[5] مطالعه کردند. در این مقاله، چند محصول فصلی در یک افق برنامه‌ریزی شامل چند دوره مدل‌سازی شد. با توجه به ماهیت غیرخطی فرمول‌بندی، الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات[6] و شبیه‌سازی تبرید نیز مطرح شدند[۱۸].

رنجبر تزنجی[7] و همکاران مدلی یکپارچه برای مکان‌یابی- انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش تحت محدودیت‌های ظرفیت در محیط عدم قطعیت را معرفی کردند. در این تحقیق یک مدل دو هدفه برای بهینه‌سازی میانگین و واریانس هزینه‌ها معرفی شده و از برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط با دو الگوریتم فراابتکاری ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید برای حل مدل استفاده شد[۱۹].

اتابکی[8] و همکاران بهینه‌سازی ترکیبی الگوریتم‌های ژنتیک و علف‌های هرز[9] را از طریق رمزگذاری مبتنی بر اولویت برای تصمیمات مکان‌یابی تخصیص در زنجیره تأمین سه سطحی مطالعه کردند. اعمال رمزگذاری مبتنی بر اولویت و روش رمزگشایی چهار مرحله‌ای وارونه، الگوریتم فراابتکاری Gaiwo براساس بهترین ویژگی‌های الگوریتم ژنتیک و الگوریتم علف‌های هرز برای حل مسئله طراحی شد. آزمون ویلکاکسون[10] سیستم رتبه‌بندی شطرنج[11] برای ارزیابی و رتبه‌بندی الگوریتم‌ها مورد استفاده قرار گرفت[۲۰].

عربزاد[12] و همکاران برنامه‌ریزی آرمانی فازی را برای مکان‌یابی تخصیص در زنجیره تأمین صنعت فولاد معرفی کردند. این مسئله تعداد و سطح ظرفیت کارخانه‌ها، تخصیص تقاضای مشتریان و تخصیص سفارشات به مشتریان را تعیین کرد. برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چند هدفه با اهداف کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره تأمین و کمینه‌سازی میزان خسارت ناشی از گزینه‌های حمل‌ونقل برای مدل‌سازی مسئله ارائه شد[۲۱].

سعیدی مهرآباد[13] و همکاران مدل مکان‌یابی تخصیص در زنجیره تأمین چند سطحی با رویکرد چند هدفه تکاملی را معرفی کردند. این پژوهش به‌طور هم‌زمان بهینه‌سازی هزینه‌های کل زنجیره و رضایت‌مندی مشتری را مدنظر قرار داده است. به‌منظور دستیابی به راه‌حل‌های مطلوب برای مدل از الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شد[۲۲].

1- Rahmati
2- Multi-Objective Version of the Biogeography-Based Optimization Algorithm
3- Multi-Objective Harmony Search
4- Mousavi
5- Modified Fruit Fly Optimization Algorithm
6- Particle Swarm Optimization Algorithm

7- Ranjbar Tezenji
8- Atabaki
9- Invasive Weed Optimization
10- Wilcoxon Test
11- Chess Rating System
12- Arabzad
13- Saidi-Mehrabad

دای[1] و همکاران مدل مکان‌یابی موجودی در یک زنجیره‌تأمین سه سطحی برای محصولات فاسدشدنی را مطالعه کردند. مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط با هدف کمینه‌سازی هزینه کل و محدودیت‌های فازی معرفی شده، و برای حل آن از الگوریتم ترکیبی ژنتیک[2] و الگوریتم ترکیبی جستجوی هارمونی[3] استفاده شد. نتایج نشان داد الگوریتم ترکیبی جستجوی هارمونی عملکرد بهتری از نظر کیفیت حل دارد[۲۳].

بیاجولی[4] و همکاران الگوریتم ژنتیک مبتنی بر ساختار کروموزومی جایگشتی[5] را برای مسئله دو سطحی مکان‌یابی تسهیلات ظرفیت‌دار با اهداف حداقل‌سازی هزینه‌های عملیاتی، برآورده کردن تقاضا و محدودیت‌های ظرفیت استفاده کردند. در این مقاله، محصول از مجموعه‌ای از کارخانه‌ها به انبارهای واسطه منتقل شده تا به تقاضای مشتریان پاسخ داده شود[۲۴].

امین طهماسبی و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای طراحی زنجیره تأمین یکپارچه چند سطحی و مکان‌یابی تسهیلات را بررسی کردند. مدل معرفی شده شامل اهداف هزینه‌ای بخش تولید، نگهداری و ارسال محصولات به بخش توزیع، ارسال به مشتریان و استقرار کارخانه‌ها و مراکز توزیع است. برای حل مدل از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات و رقابت استعماری استفاده شد[۲۵].

امیرحسین اوقلو و اکیچی[6] مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را برای مسئله مکان‌یابی تسهیلات پویا و انتخاب تأمین‌کننده با تخفیف کمی معرفی کردند. در این پژوهش تصمیمات مکان‌یابی چند دوره‌ای خرده‌فروش که محصولات را از چند تأمین‌کننده تحت یک طرح تخفیف کمی افزایشی تهیه می‌کند، آنالیز کرده و تقاضای آن را برآورد می‌کند. تصمیمات خرده‌فروش ازجمله اینکه کجا و چه زمانی یک تسهیل را دایر کند، چه مقدار از هر تأمین‌کننده در هر دوره زمانی سفارش دهد، و از کدام تسهیل برای تأمین تقاضا استفاده کند. برای نمونه‌های بزرگ یک رویکرد مبتنی بر تجزیه شامل تصمیمات در اولین سطح (تأمین‌کنندگان و تسهیلات) و دومین سطح (تسهیلات و مشتریان) به‌صورت تکراری تا همگرایی توسعه داده شد[۲۶].

رمشانی[7] و همکاران مسئله دو سطحی مکان‌یابی تسهیلات نامحدود و تخصیص مشتریان به آنها با اختلال را در زنجیره توزیع تک کالایی بررسی کردند. با دو نوع فرمول‌بندی، مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح با هدف کمینه‌سازی هزینه راه‌اندازی تسهیلات و هزینه تأمین برای مسئله معرفی شده و از الگوریتم جستجوی ممنوعه[8] و الگوریتم ابتکاری RSS[9] برای حل آن استفاده گردید[۲۷].

با بررسی مطالعات گذشته و شکاف‌های تحقیق شناسایی‌شده، می‌توان نوآوری‌های این مقاله را به‌شرح زیر برشمرد:

۱- عمده تحقیقات در این موضوع، هدف اقتصادی را مورد توجه قرار داده‌اند، اما در این پژوهش علاوه‌بر کمینه‌سازی هزینه کل، بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان شبکه عرضه محصول را در نظر گرفته، همچنین تأمین‌کنندگانی که در تولید محصول ملاحظات زیست‌محیطی بیشتری را رعایت می‌کنند (ارزش بیشتری دارند)، سبز بودن و شبکه عرضه محصول نیز مورد توجه قرار می‌گیرد.

۲- در نظر گرفتن هزینه معامله وابسته به دوره‌های زمانی تا با متغیر بودن هزینه معامله در طی دوره‌های مختلف، نتیجه حاصل‌شده از اعتبار بیشتری برخوردار باشد.

۳- محدودیت ظرفیت برای سطوح تأمین و تولید در نظر گرفته شده است.

۴- مکان‌یابی پویا و در نظر گرفتن حداکثر بودجه توسعه شبکه در طی دوره‌های مختلف

۵- در نظر گرفتن ذخیره احتیاطی مراکز تولید محصول در کنار برآورد مقدار تقاضای محصولات در راستای کاهش ریسک کمبود.

هدف این پژوهش، دستیابی به بهترین تصمیمات برنامه‌ریزی ازجمله؛ مکان تسهیلات تولیدی و باز (دایر)

1- Dai
2- Hybrid Genetic Algorithm
3- Hybrid Harmony Search
4- Biajoli
5- Biased Random-Key Genetic Algorithm
6- Emirhüseyinoğlu & Ekici
7- Ramshani
8- Tabu Search Algorithm
9- Route Subset Selector - RSS

بودن آنها و میزان سفارشات هر کارخانه از هر تأمین‌کننده است به‌طوری‌که هزینه‌های کل زنجیره کمینه شود. مسئله پیشنهادی در اینجا دو نوع برنامه‌ریزی را با هم انجام می‌دهد: برنامه‌ریزی شبکه تولیدی برای هر یک از تسهیلات تولیدی و برنامه‌ریزی بخش تهیه و تخصیص سهمیه تأمین‌کنندگان برای هر تسهیل تولیدی.

کاربرد این مدل در شرکت‌هایی است که از چندین کارخانه تشکیل شده و این کارخانه‌ها مواد موردنیاز خود را از تأمین‌کنندگان مختلف تهیه می‌کنند. همچنین، در این پژوهش اهداف مشتری‌مداری و سبز بودن تأمین‌کنندگان در کنار هدف اقتصادی کمینه‌سازی هزینه کل، مکان‌یابی پویا، در نظر گرفتن تغییرات هزینه معامله با تأمین‌کنندگان با چند دوره‌ای کردن مدل، در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت تسهیلات شبکه و در نهایت در نظر گرفتن ذخیره احتیاطی مراکز تولید محصول نیز در کنار برآورد مقدار تقاضای محصولات، مورد توجه قرار گرفته است. برای ارزیابی مدل ریاضی ارائه شده، مدل ابتدا در اندازه‌های کوچک در نرم‌افزار گمز با روش LP متریک با نرم‌های (۱، ۲ و بی‌نهایت) کدنویسی شده و سپس در اندازه بزرگ با الگوریتم فراابتکاری بهینه‌سازی چندهدفه میرایی ارتعاشات[1] با معرفی معیارهایی برای ارزیابی عملکرد الگوریتم حل می‌شود.

در ادامه این مقاله به این‌صورت سازمان‌دهی شده است: در بخش دوم بیان مسئله، فرضیات و مدل ریاضی آن بررسی می‌شود. در بخش سوم، روش حل مسئله تشریح می‌شود. در بخش چهارم، یافته‌های پژوهش برای ارزیابی اعتبار مدل و پیچیدگی محاسباتی آن ارائه شده و در بخش پنجم، نتایج حاصل از ارائه مدل و تحلیل حساسیت آن ذکر خواهد شد.

۲- بیان مسئله و مدل ریاضی

در این قسمت، به ارائه مدل مکان‌یابی تسهیلات و انتخاب تأمین‌کنندگان در قالب یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه پرداخته می‌شود. مدل پیشنهادی به‌طور هم‌زمان به دنبال کاهش اهداف اقتصادی و افزایش قابلیت اطمینان شبکه عرضه محصول بوده و تأمین‌کنندگانی که در تولید محصول ملاحظات زیست‌محیطی بیشتری رعایت می‌کنند را در نظر می‌گیرد. این مدل تقریباً در تمام شرکت‌هایی که مقداری مواد (قطعات) را از تعدادی تأمین‌کننده منتخب در بازه‌های زمانی مختلف در راستای تأمین مواد موردنیاز خود تهیه می‌کنند، کاربرد دارد، مانند کارخانه‌های سازنده یخچال، کارخانه‌های مونتاژکننده و از این قبیل. در ادامه ابتدا مفروضات مسئله، سپس مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم‌گیری معرفی شده و درنهایت مدل ریاضی چند هدفه ارائه می‌شود.

۲-۱- مفروضات مدل

- مکان تسهیلات و تأمین‌کنندگان مشخص است.
- میزان تقاضا در هر دوره زمانی مشخص است.
- ۱۰ درصد تقاضای هر دوره به‌عنوان ذخیره احتیاطی آن دوره در نظر گرفته می‌شود.
- برای هر تأمین‌کننده یک کران بالا (حد مجاز) برای واحدهای معیوب و رد شده وجود دارد.
- تسهیلات ظرفیت محدود دارند.

۲-۲- مجموعه‌ها و اندیس‌های مدل

i	مجموعه تأمین‌کنندگان $\{1,2,\ldots,I\}$
j	مجموعه محصولات $\{1,2,\ldots,J\}$
f	مجموعه سایت‌های کاندیدا برای مکان تسهیلات تولیدی $\{1,2,\ldots,F\}$
h	مجموعه دوره‌های زمانی $\{1,2,\ldots,H\}$

۲-۳- پارامترهای مدل

P_{ijh}	قیمت پیشنهادی محصول j توسط تأمین‌کننده i در دوره زمانی h
TC_{ijf}	هزینه انتقال یک واحد از محصول j از تأمین‌کننده i به سایت تولیدی f
W_{ih}	نمره ارزشیابی برای تأمین‌کننده i در دوره زمانی h
r_{ij}	درصدی از واحدهای رد شده محصول j توسط تأمین‌کننده i
R_j	بیشینه درصد قابل‌قبول از واحدهای رد شده از محصول j
d_{jh}	میزان تقاضای محصول j در دوره زمانی h

1- Multi-Objective Vibration Damping Optimization

CS_{ijh} بیشینه ظرفیت تولید تأمین‌کننده i برای تولید محصول jدر دوره زمانی h

α_{ijh} هزینه معامله برای خرید محصول jاز تأمین‌کننده i در دوره زمانی h

H_{fh} هزینه لازم برای استقرار تسهیل تولیدی در سایت کاندیدای fدر دوره زمانی h

b_{ijh} پارامتر باینری، هرگاه تأمین‌کننده i بتواند محصول jدر دوره زمانی h را فراهم کند برابر یک می‌شود، در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد

C_{fh} بیشینه ظرفیت تسهیل تولیدی fدر دوره زمانی h

M یک عدد خیلی بزرگ

n حداکثر تعداد تسهیل تولیدی که می‌تواند در هر دوره زمانی دایر شود.

B حداکثر بودجه موجود شرکت

SS_{jh} مقدار ذخیره احتیاطی از محصول jدر دوره زمانی h

SC_{jh} هزینه کمبود محصول jدر دوره زمانی h

۲-۴- متغیرهای تصمیم‌گیری

X_{ijfh} مقدار سفارش ارسالی از محصول jتوسط تأمین‌کننده i به سایت تولیدی fدر دوره زمانی h

S_{jh} متغیر پیوسته برای مقدار کمبود محصول jدر دوره زمانی h

Y_{ijfh} متغیر باینری مقدار یک می‌گیرد، هرگاه محصول j از تأمین‌کننده i به سایت تولیدی fدر دوره زمانی h ارسال گردد و در غیر این‌صورت مقدار صفر می‌گیرد.

Z_{fh} متغیر باینری مقدار یک می‌گیرد هرگاه در سایت کاندید i در دوره زمانی h تسهیل تولیدی دایر گردد و در غیر این‌صورت مقدار صفر می‌گیرد.

۲-۵- مدل ریاضی

با شناسایی شکاف‌های تحقیق، در ادامه به ارائه یک مدل ریاضی چند هدفه در زمینه مکان‌یابی تسهیلات، انتخاب تأمین‌کنندگان و تخصیص سفارش پرداخته شده است که سعی شده شکاف‌های موجود پوشش داده شده و مسئله با شرایط دنیای واقعی سازگاری بیشتری داشته باشد.

$$Min\ Z_1 = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{f=1}^{F}\sum_{h=1}^{H} a_{ijh}y_{ijfh} + \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{f=1}^{F}\sum_{h=1}^{H} P_{ijh}x_{ijfh} + \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{f=1}^{F}\sum_{h=1}^{H} TC_{ijf}x_{ijfh} + \sum_{f=1}^{F}\sum_{h=1}^{H} H_{fh}Z_{fh} + \sum_{j=1}^{J}\sum_{h=1}^{H} SC_{jh}S_{jh} \quad (۱)$$

$$Min\ Z_2 = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{f=1}^{F}\sum_{h=1}^{H} r_{ij}x_{ijfh} \quad (۲)$$

$$Max\ Z_3 = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{f=1}^{F}\sum_{h=1}^{H} w_{ih}x_{ijfh} \quad (۳)$$

s.t:

$$d_{jh} + SS_{jh} = \sum_{i=1}^{I}\sum_{f=1}^{F} x_{ijfh} \qquad \forall j,h \quad (۴)$$

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{f=1}^{F} r_{ij}\, x_{ijfh} \le R_j\, d_{jh} \qquad \forall j,h \quad (۵)$$

$$\sum_{f=1}^{F} x_{ijfh} \le CS_{ijh} \qquad \forall i,j,h \quad (۶)$$

$$x_{ijfh} \le M\, y_{ijfh} \qquad \forall i,j,f,h \quad (۷)$$

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} y_{ijfh} \le M\, Z_{fh} \qquad \forall f,h \quad (۸)$$

$$\sum_{f=1}^{F} Z_{fh} \le n \qquad \forall h \quad (۹)$$

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{i=1}^{I} x_{ijfh} + M(Z_{fh} - 1) \le C_{fh} \qquad \forall f,h \quad (۱۰)$$

$$\sum_{f=1}^{F} y_{ijfh} \le M\, b_{ijh} \qquad \forall i,j,h \quad (۱۱)$$

$$\sum_{f=1}^{F} H_{fh} Z_{fh} + \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{f=1}^{F}\sum_{h=1}^{H} a_{ijh} y_{ijfh} + \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{f=1}^{F}\sum_{h=1}^{H} P_{ijh} x_{ijfh} + \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{f=1}^{F}\sum_{h=1}^{H} TC_{ijf} x_{ijfh} + \sum_{f=1}^{F}\sum_{h=1}^{H} H_{fh} Z_{fh} + \sum_{j=1}^{J}\sum_{h=1}^{H} SC_{jh} S_{jh} \leq B \quad \forall i,j,f,h \tag{۱۲}$$

$$x_{ijfh}, SS_{jh}, S_{jh} \in \{0,1,2,3,\dots.\} \ \ and \ \ y_{ijfh}, Z_{fh} \in \{0,1\} \quad \forall i,j,f,h \tag{۱۳}$$

در مدل فوق رابطه (۱) تابع هدف اول را نشان می‌دهد که شامل هزینه‌های: معامله، خرید مواد، انتقال مواد از تأمین‌کنندگان به تسهیلات، استقرار تسهیلات در سایت‌های کاندیدا و کمبود است که به دنبال کمینه‌سازی این مقادیر هستیم.

رابطه(۲) تابع هدف دوم مسئله و نشان‌دهنده کمینه‌سازی کل واحدهای رد شده است. در اینجا سعی می‌شود هزینه‌های مربوط به محصولات برگشتی که دارای کیفیت لازم نیستند کمینه گردد.

رابطه (۳) تابع هدف سوم که از نوع بیشینه‌سازی بوده و به دنبال حداکثر کردن میزان خرید از تأمین‌کنندگان برتر با امتیاز ارزشیابی بالاتر (تأمین‌کنندگانی که در تولید محصول ملاحظات زیست‌محیطی بیشتری را رعایت می‌کنند) می‌باشد.

رابطه (۴) محدودیت اول مدل، تضمین می‌کند که تقاضا برای هر محصول از طریق شبکه تأمین گردد.

در رابطه (۵) یک کران بالا (حداکثر سطح مجاز) برای میزان محصولات برگشتی در نظر گرفته شده است که باید برای هر تأمین‌کننده رعایت شود.

طبق رابطه (۶) مقدار سفارش هر محصول برای هر یک از تأمین‌کنندگان نمی‌تواند بیشتر از ظرفیت تولید تأمین‌کننده مورد نظر باشد.

رابطه (۷) نشان‌دهنده ارتباط منطقی بین متغیرهای تصمیم‌گیری است.

رابطه (۸) نشان می‌دهد که محصولات تنها می‌توانند به تسهیلات فعال ارسال شوند.

در رابطه (۹) کران بالا برای تعداد تسهیلات تولیدی مشخص شده است.

در رابطه (۱۰) ظرفیت تسهیلات تولیدی در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که همه تأمین‌کنندگان نمی‌توانند عرضه همه محصولات را برآورده کنند،

رابطه (۱۱) برای نشان دادن اینکه سفارش محصول به تأمین‌کنندگانی داده می‌شود که بتوانند آن محصول را تولید کنند تعریف شده است.

رابطه (۱۲) سقف بودجه موجود را در نظر می‌گیرد، زیرا شرکت دارای محدودیت بودجه برای احداث تسهیلات تولیدی، معامله، خرید مواد، انتقال مواد از تأمین‌کنندگان به تسهیلات و کمبود می‌باشد.

در رابطه (۱۳) متغیرهای تصمیم‌گیری تعریف شده‌اند.

۳- روش حل

۳-۱- بهینه‌سازی چند هدفه و روش LP متریک

روش Lp متریک یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره برای حل مسائل چند هدفه با اهداف متناقض[1] است که روی کمینه‌سازی انحراف هر تابع هدف نسبت به مقدار بهینه آن تمرکز دارد. در مسائل MODM، به خاطر وجود چند هدف متعارض، معمولاً جواب $x^* \in X$ وجود ندارد که به‌ازای آن، همه اهداف در حالت بهینه قرار گیرند ($\nexists\, x^* \in X : f_i^* = f_i(x^*)$). ازاین‌رو، اگر x^A به‌عنوان خروجی روش حل A باشد آنگاه هرچه $f_i(x^A)$ فاصله کمتری نسبت به f_i^* داشته باشد کارایی روش حل A بیشتر است. بر اساس معیار انحراف از ایده‌آل[2](MID)، اگر جواب $F^* = (f_1^*, f_2^*, \dots, f_n^*)$ به‌عنوان جواب ایده‌آل در نظر گرفته شود، آنگاه هرچه جواب $F^A = (f_1(x^A), f_2(x^A), \dots, f_n(x^A))$ از جواب F^* فاصله کمتری داشته باشد، عملکرد روش A و پاسخ آن بهتر است. اما اینکه فاصله F^A از F^* به چه صورت تعریف شود، اساس تعریف روش Lp متریک است. در واقع، در روش Lp متریک، p به‌عنوان نرم اندازه‌گیری فاصله در نظر گرفته می‌شود. فاصله متریک در روش Lp به‌منظور

1- Conflict
2- Mean of Ideal Distance

سنجش نزدیکی یک راه‌حل موجود نسبت به راه‌حل ایده‌آل مورد استفاده واقع می‌شود. اگر اهداف نسبت به یکدیگر از درجه اهمیت مختلفی برخوردار باشند، فاصله با نرم p به‌صورت معادله ۱۴ تعریف می‌شود که هر چه $|F^* - F^A|_p$ کمتر باشد، روش A با ارزش‌تر است.

$$\begin{aligned} \mathrm{Norm_p}\left(F^*, F^A\right) &= \left|F^* - F^A\right|_p \\ &= \left(\sum_{i=1}^{n} w_i \left(f_i^* - f_i\left(x^A\right)\right)^p\right)^{\frac{1}{p}} \end{aligned} \quad (۱۴)$$

در رابطه فوق w_i $(0 \le w \le 1)$، نشان‌دهنده اهمیت نسبی یا وزن توابع هدف بوده که توسط تصمیم‌گیرنده برای اهداف در نظر گرفته می‌شود.

در روش Lp متریک، p یک پارامتر کنترلی بوده که در بازه $1 \le p \le \infty$ تعریف شده و معمولاً مقادیر p=1، p=2 و $p=\infty$ در محاسبات به کار گرفته می‌شوند که به ترتیب در معادله ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است.

$$|F^* - F^A|_{p=1} = \sum_{i=1}^{n} w_i |f_i^* - f_i(x^A)| \quad (۱۵)$$

$$|F^* - F^A|_{p=2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} w_i \left(f_i^* - f_i(x^A)\right)^2} \quad (۱۶)$$

$$|F^* - F^A|_{p=\infty} = max\{\, i \,|w_i(f_i(x^A) - f_i^*)\} \quad (۱۷)$$

طبق معادله شماره ۱۵، اگر p=1 قرار داده شود، آنگاه مدل قدرمطلقی (معیار منهتن)[1] به روش مجموع وزنی[2] معروف است و در آن مجموع نسبی انحرافات حداقل می‌شود. در معادله شماره ۱۶، اگر مقدار p=2 باشد، مدل درجه دوم محدب[3] حاصل‌شده به فاصله اقلیدسی[4] معروف است و به مفهوم کمینه کردن مجموع توان دوم انحرافات نسبی می‌باشد. در فاصله با p=2 نسبت به p=1 به انحراف از بهینگی هر هدف توجه بیشتری دارد و به‌جای مجموع انحراف از بهینگی، مجموع مربع آنها جایگزین می‌شود. در یک فاصله معروف دیگر طبق معادله شماره ۱۷، اگر در روش Lp متریک $p=\infty$ تعریف شود، به آن مدل Minimax یا معیار چبیشف[5] اطلاق می‌شود، به بیشینه انحراف توجه شده، در این روش جواب پارتویی انتخاب می‌شود که بیشینه انحراف آن کمینه باشد. لازم به توضیح است همان‌طورکه از اسم این روش نیز مشخص است، در این روش کمترین انحراف از بهینگی اهداف حاصل می‌شود. در این پژوهش، روش Lp متریک با هر سه مقدار p=1 و p=2 و $p=\infty$، برای حل مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه‌شده به‌کار گرفته می‌شود.

۳-۲- الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه میرایی ارتعاشات (MOVDO)

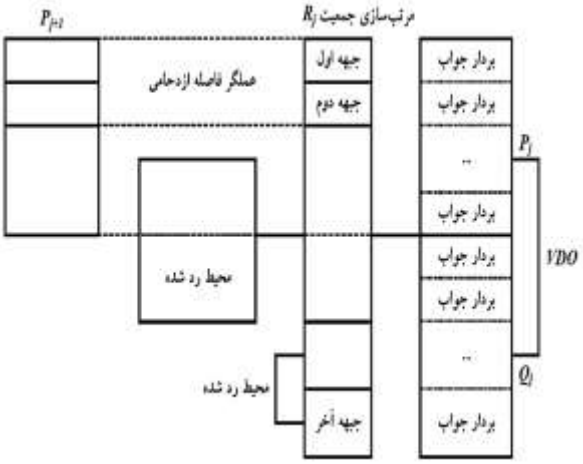
یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری، الگوریتم بهینه‌سازی میرایی ارتعاشات است که با استفاده از مفاهیم میرایی نوسان/ ارتعاشات در نظریه ارتعاشات توسعه‌یافته است. اولین بار این الگوریتم توسط مهدی‌زاده و توکلی‌مقدم[6] (۲۰۰۸) برای مسائل تک هدفه ارائه شد[۲۸]، که از میرایی ارتعاشات مکانیکی (طبیعت اجسامی که خاصیت کشسانی دارند) الهام گرفته شده است. هنگامی‌که منبع انرژی نوسانگر قطع می‌شود، دامنه نوسان دچار کاهش شده، با گذشت زمان به صفر تمایل یافته و از نوسان باز می‌ماند که به این فرآیند میرایی می‌گویند. عملکرد این الگوریتم به این‌صورت است؛ حرکت از جواب اولیه تصادفی شروع شده، در هر تکرار، یک جواب تصادفی تولید کرده و از قوانین احتمالی برای جستجو در همسایگی بهره می‌جوید.

بعد از توسعه الگوریتم بهینه‌سازی میرایی ارتعاشات، نسخه چند هدفه این الگوریتم به نام MOVDO، برای اولین بار توسط حاجی‌پور و همکاران در سال ۲۰۱۴ برای حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه ارائه شد[۲۹]. MOVDO مبتنی بر دو مفهوم مهم به نام مرتب‌سازی نامغلوب سریع[7] (FNDS) و فاصله ازدحامی[8] (CD) اجرا

1- Manhattan Metric
2- Weighted Sum Method
3- Convex Quadratic
4- Euclidean Distance

5- Tchebycheff Metric
6- Mehdizadeh & Tavakkoli-Moghaddam
7- Fast Non Dominated Sorting
8- Crowding Distance

می‌شود. در FNDS، مقدار R از جمعیت اولیه مقایسه و مرتب می‌شود.



شکل (۱): فرآیند تکامل در الگوریتم MOVDO [25]

بدین‌منظور همه کروموزوم‌های لایه اول نامغلوب پیدا می‌شود. کروموزوم‌ها با استفاده از مفهوم چیرگی انتخاب‌شده، سپس به‌منظور یافتن لایه بعدی از کروموزوم‌های نامغلوب، جواب‌های انتخاب‌شده برای لایه قبلی موقتاً نادیده گرفته می‌شود. این رویه تا زمانی ادامه می‌یابد که همه کروموزوم‌ها در لایه‌ها قرار گیرند. به‌منظور انتخاب جواب‌های نسل بعدی تورنمنت اجرا می‌شود، گام‌های اجرایی این‌کار عبارت است از:

- به‌طور تصادفی n جواب از جمعیت انتخاب می‌شود.
- رتبه نامغلوب هر جواب محاسبه شده و پارامتر هرکدام از جواب‌ها که رتبه مساوی دارند به دست می‌آید.

جواب‌هایی با کمترین رتبه انتخاب می‌شود. از بین دو

- جواب با رتبه یکسان، جوابی که CD بیشتری دارد، انتخاب می‌شود.

بعد از بیان مفاهیم و عملگرهای فوق، جمعیت والدین و فرزندان باید به‌منظور تضمین نخبه‌سالاری ترکیب شود. از آنجا که اندازه جمعیت ترکیب شده به‌طور طبیعی بزرگ‌تر از اندازه جمعیت ابتدایی (N) است. بار دیگر مرتب‌سازی انجام می‌شود. در حقیقت تا زمانی‌که اندازه جمعیت به N برسد، کروموزوم با رتبه بالاتر انتخاب‌شده و به جمعیت اضافه می‌شود. تا زمانی‌که تعداد از پیش تعیین‌شده تکرارها به‌دست آید (یا هر شرایط توقف دیگر) الگوریتم تکرار می‌شود.

فرآیند با مقداردهی اولیه جمعیت اولیه از بردار جواب p_j آغاز شده، سپس عملگرهای جدید به‌منظور تولید جمعیت جدید Q_j بر روی p_j اجرا می‌شوند.

برای نخبه‌گرایی ترکیب p_j و Q_j در الگوریتم انجام می‌شود. در این مرحله بردارهای R_j در چندین لایه بر مبنای FNDS و فاصله ازدحامی مرتب می‌گردد. با استفاده از روش انتخاب پیشنهادی یک جمعیت از تکرار بعدی p_{j+1} به‌منظور حفظ تعداد جمعیت از پیش تعیین شده انتخاب می‌شود. در شکل (۱) فرآیند تکامل در الگوریتم MOVDO ذکر شده است.

۳-۳- به‌کارگیری الگوریتم MOVDO پیشنهادی برای حل مسئله سه هدفه (3ODM)

در دو بخش قبل، کلیات الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه میرایی ارتعاشات برای حل یک مسئله MODM بیان شد. در ادامه به نحوه به‌کارگیری این الگوریتم برای حل مسئله 3ODM تعریف‌شده در این تحقیق پرداخته می‌شود. برای این‌منظور، ابتدا به بیان نمایش جواب پرداخته شده، سپس به‌روزرسانی جواب‌ها براساس توابع همسایگی توضیح داده می‌شود و فرآیند کلی الگوریتم و شرط توقف آن تشریح می‌گردد.

الف) نمایش جواب

بخش اول نمایش جواب (مکان احداث مراکز تولید در هر دوره): این بخش از نمایش جواب ابعاد F*H داشته و درایه‌های آن با اعداد تصادفی ۰ و ۱ پر می‌شود. از این ماتریس برای تعیین اینکه در هر دوره کدام سایت کاندیدای تولید احداث شود به‌کار برده می‌شود. در صورتی‌که F=2 و H=3 باشد، نمونه‌ای از این ماتریس به‌صورت زیر تولید می‌شود:

جدول (۱): نمونه‌ای از ماتریس نمایش جواب (مکان احداث مراکز تولید در هر دوره)

	H_1	H_2	H_3
F_1	۱	۰	۱
F_2	۰	۱	۰

بخش دوم نمایش جواب (جریان محصولات از تأمین‌کنندگان به تسهیلات احداث شده زنجیره): این

بخش از نمایش جواب J*F سطر و H*I ستون دارد. این ماتریس برای نشان دادن میزان جریان محصول j از تأمین‌کننده i به سایت احداث شده F در دوره h است. درایه‌های این ماتریس با اعداد بین ۰ و $d_{jh} + SS_{jh}$ پر می‌شود. دقت شود که در پر شدن این درایه‌ها، میزان جریان از همه تأمین‌کنندگان به همه تولیدکنندگانی که احداث شده‌اند، در هر دوره و برای هر محصول، برابر با مقدار $d_{jh} + SS_{jh}$ بوده و این مسئله در تولید جواب اولیه لحاظ شده است. درصورتی‌که F=2 و I=2 و H=3 و J=2 باشد نمونه‌ای از این ماتریس در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۲): نمونه‌ای از ماتریس نمایش جواب
(جریان محصولات از تأمین‌کنندگان به تسهیلات احداث‌شده)

		H_1		H_2		H_3	
		I_1	I_2	I_1	I_2	I_1	I_2
J_1	F_1	۱۲	۱۴	۰	۰	۱۶	۱۳,۵
	F_2	۰	۰	۲,۵	۳۴,۵	۰	۰
J_2	F_1	۲۴	۲۲	۰	۰	۱۲,۵	۲۹,۵
	F_2	۰	۰	۱۴	۲۰	۰	۰

بر اساس جدول (۲)، مشاهده می‌شود که میزان جریان از تأمین‌کننده ۱ و ۲ برای محصول ۱ در دوره ۱ به تولیدکننده ۱ به ترتیب با ۱۲ و ۱۴ برابر است و از طرفی به‌دلیل اینکه براساس بخش اول نمایش جواب، در سایت کاندید ۲ در دوره ۱ تولیدکننده‌ای احداث نشده است، از هیچ تأمین‌کننده‌ای در دوره اول به سایت ۲ محصولی ارسال نشده است.

ب) ساختار همسایگی (به‌روزرسانی جواب‌ها)

همسایگی در این الگوریتم به این صورت است که ابتدا درصد مشخصی از درایه‌های هر یک از دو بخش نمایش جواب به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود و سپس مقادیر آنها حذف شده و مقادیر جدید که به‌صورت تصادفی تولید شده‌اند، جایگزین مقادیر قبلی می‌شوند.

ج) تابع ارزیابی در الگوریتم‌های حل

در الگوریتم MOVDO پیشنهادی، تابع ارزیابی همان تابع هدف است. ولی برای محدودیت‌های ظرفیت منابع تجدیدناپذیر از روش پنالتی استفاده شده است. روش‌های پنالتی کلاس خاصی از الگوریتم‌ها هستند که برای حل مسائل بهینه‌سازی (ریاضیات) مقید به‌کار می‌روند. در روش پنالتی، یک مسئله بهینه‌سازی محدود، به مجموعه‌ای از مسائل بدون قید تبدیل می‌شود. مسائل بدون قید با افزودن یک شرط به تابع هدفی به وجود می‌آیند که متشکل از یک پارامتر پنالتی و میزانی از نقض قید و محدودیت‌ها هستند. زمانی‌که محدوده‌ها نقض شوند، میزان نقض مخالف صفر و زمانی‌که محدوده‌ها نقض نشوند، برابر با صفر است.

د) شرط توقف در الگوریتم MOVDO

معیارهای مختلفی را می‌توان برای توقف الگوریتم در نظر گرفت و معمولاً یک معیار برای توقف استفاده می‌شود. یکی از معیارها می‌تواند این باشد که الگوریتم نتواند بعد از چند تکرار مشخص بهترین جواب به‌دست‌آمده را بهبود بدهد. معیار دیگر اینکه میانگین برازندگی جواب‌های موجود در جمعیت جاری، همان برازندگی بهترین جواب به‌دست‌آمده یا بسیار نزدیک به آن باشد. یا اینکه بتوان از پیش قرارداد کرد که الگوریتم به تعداد مشخصی اجرا شود (پرکاربردترین معیار توقف است). در روش MOVDO پیشنهادی، شرط توقف را سپری کردن تعداد مشخصی تکرار در نظر می‌گیرند.

ه) تنظیم پارامترهای الگوریتم

پارامترهای الگوریتم MOVDO شامل تعداد تکرار، تعداد جمعیت، دامنه اولیه (A_0)، بیشترین تعداد تکرار در هر دامنه (L)، ضریب میرایی (γ) و انحراف استاندارد (σ) است. پارامترهای تعداد تکرار و تعداد جمعیت تأثیر به‌سزایی در کیفیت جواب به‌دست آمده توسط الگوریتم دارند. مقدار کم این پارامترها باعث می‌شود زمان حل الگوریتم کاهش یافته و امکان دارد کیفیت جواب‌های به‌دست آمده نیز مناسب نباشد و مقدار زیاد این پارامترها معمولاً باعث می‌شود که جواب‌هایی با کیفیت مناسب توسط الگوریتم حاصل شود، ولی قطعاً زمان حل الگوریتم افزایش می‌یابد. پارامتر دامنه اولیه و ضریب میرایی در احتمال پذیرش جواب‌های بدتر تأثیرگذار هستند. احتمال پذیرش جواب بدتر در این الگوریتم به‌صورت زیر است:

$$1-\exp(-\frac{A^2}{2\sigma^2}) \quad (۱۸)$$

پارامتر A مقدار دامنه در هر تکرار است که براساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$A = A_0\exp(-\frac{\gamma t}{2}) \quad (۱۹)$$

همان‌طورکه مشاهده می‌شود، در تکرار پایین‌تر مقدار دامنه بزرگ‌تر است و باعث می‌شود که احتمال پذیرش جواب بدتر افزایش یابد. با افزایش تعداد تکرار الگوریتم، مقدار دامنه کاهش یافته و با کاهش مقدار دامنه، احتمال پذیرش جواب بدتر نیز کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش انحراف استاندارد احتمال پذیرش جواب‌های بدتر کاهش می‌یابد. پارامتر ضریب میرایی نیز تأثیر مستقیم در مقدار دامنه در هر تکرار داشته و با افزایش آن مقدار دامنه کاهش یافته و احتمال پذیرش جواب بدتر کاهش می‌یابد.

پارامترهای الگوریتم باید به‌گونه‌ای تنظیم شوند که احتمال پذیرش جواب‌های بدتر در تکرارهای ابتدایی الگوریتم بالاتر باشد و به مرور و با افزایش تعداد تکرارهای الگوریتم، این احتمال کاهش یابد، چون در تکرارهای ابتدایی نیاز است که الگوریتم حدالامکان فضای جواب را به‌صورت گسترده‌ای بررسی کند و در تکرارهای بالاتر که الگوریتم به جواب‌های مناسبی همگرا شده است، بهتر است به‌جای دور شدن از فضای نزدیک به بهینه (با استفاده از پذیرش جواب‌های بدتر) مقادیر این جواب‌ها بهبود یابد. افزایش پارامترِ بیشترین تعداد تکرار در هر دامنه نیز باعث می‌شود که در یک دامنه ثابت، برای هر عضو از جمعیت، چندین همسایه تولید شود تا الگوریتم در هر دامنه فضای جواب را به‌طور کامل بررسی کند و در صورت امکان به جواب‌های مناسب‌تری دست یابد، ولی این افزایش در تعداد تکرار در هر دامنه، باعث می‌شود زمان الگوریتم افزایش یابد. با توجه به نکات فوق‌الذکر و مبتنی بر روش آزمون و خطا پارامترهای الگوریتم MOVDO به‌صورت جدول (۳) برای حل مسائل آزمایشی تنظیم شده‌اند.

جدول (۳): تنظیم پارامترهای الگوریتم MOVDO برای حل مسائل آزمایشی

ابعاد مسئله	L	σ	γ	A_0	maxit	pop
کوچک و متوسط	۱۰	۱/۵	۰/۵	۶	۱۰۰	۱۸۰
بزرگ	۱۲	۱/۶	۰/۴	۹	۸۰	۲۵۰

۴- یافته‌های پژوهش

برای ارزیابی مدل ۱۰ مسئله آزمایشی بعد کوچک و متوسط و ۱۰ مسئله آزمایشی بعد بزرگ با بررسی پژوهش‌های پیشین و به‌صورت تصادفی طراحی می‌شود. ۱۰ مسئله اول با نرم‌افزار گمز (روش Lp متریک) و الگوریتم فراابتکاری MOVDO حل می‌شود و با توجه به پیچیدگی مسئله و قادر نبودن روش‌های سنتی در یافتن جواب در مسائل با ابعاد بزرگ، ۱۰ مسئله دوم (مسائل بعد بزرگ) فقط توسط الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی مذکور حل خواهند شد. برای تولید تصادفی داده‌ها/ پارامترهای هر یک از این مسائل آزمایشی طراحی و همان‌طورکه در جدول (۴) مشاهده می‌شود، یک دامنه تغییرات مناسب تعریف شده است و داده‌ها به‌صورت تصادفی از بازه مربوطه مقداردهی می‌شوند. تولید داده‌های تصادفی به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده که محدودیت‌های مسئله را نقض نکند. با توجه به پارامترهای طراحی‌شده ابعاد مسائل آزمایشی به شرح جداول (۵) و (۶) ملاحظه می‌شوند. در بخش بعدی، تحلیل حساسیت برای بررسی تأثیر پارامترهای مدل روی جواب بهینه، انجام می‌شود.

جدول (۴): بازه تولید تصادفی پارامترهای مسائل آزمایشی

پارامتر	نحوه تولید	توضیحات
P_{ijh}	uniform(10,40)	---
TC_{ijf}	uniform(1,5)	---
w_{ih}	uniform(0,100)	---
r_{ij}	uniform(0,0.1)	حداکثر ۱۰٪ محصولات خرابی دارند.
d_{jh}	uniform(500,1500)	ظرفیت تسهیلات مبتنی بر تقاضای تعریف‌شده است.
CS_{ijh}	$\frac{\text{uniform}(1,2)d_{jh}}{\lvert I\rvert}$	مبتنی بر تقاضای محصولات و تعداد کل تأمین‌کنندگان
α_{ijh}	uniform(1000,1500)	---
SC_{jh}	uniform(5,10)	---
H_{fh}	uniform(1000,2000)	بودجه توسعه شبکه مبتنی بر هزینه ثابت احداث هر تسهیل تنظیم می‌شود.
b_{ijh}	ber(0.8)	در هر دوره به‌احتمال ۰٫۸ می‌توان از هر تأمین‌کننده به تسهیلات جریان برقرار کرد. به‌منظور سادگی این پارامتر را ۱ قرار دهید.
C_{fh}	$\frac{\text{uniform}(1,2)\sum_J d_{jh}}{\lvert F\rvert}$	مبتنی بر تقاضای محصولات و تعداد کل تسهیلات بالقوه
B	$\lvert F\rvert$uniform(1000,2000)	در مسائلی که تعداد مکان‌های بالقوه بیشتر می‌شود بودجه را بیشتر در نظر بگیرید تا امکان توسعه شبکه وجود داشته باشد.

جدول (۵): ابعاد مسائل آزمایشی ابعاد کوچک و متوسط

شماره مسئله آزمایشی	تعداد تأمین‌کنندگان (|I|)	تعداد مکان بالقوه (|F|)	دوره‌های برنامه‌ریزی (|H|)	تعداد محصول (|J|)
۱	۲	۴	۲	۲
۲	۴	۶	۲	۳
۳	۵	۸	۳	۳
۴	۷	۱۲	۴	۴
۵	۸	۱۴	۴	۴
۶	۹	۱۶	۴	۴
۷	۱۱	۱۷	۵	۵
۸	۱۲	۱۹	۵	۵
۹	۱۴	۲۲	۵	۵
۱۰	۱۵	۲۵	۵	۵

جدول (۶): ابعاد مسائل آزمایشی ابعاد بزرگ

شماره مسئله آزمایشی	تعداد تأمین‌کنندگان (|I|)	تعداد مکان بالقوه (|F|)	دوره‌های برنامه‌ریزی (|H|)	تعداد محصول (|J|)
۱	۲۲	۳۲	۶	۶
۲	۲۵	۳۸	۶	۷
۳	۲۵	۳۸	۷	۸
۴	۲۶	۴۲	۷	۹
۵	۲۸	۴۲	۸	۹
۶	۲۸	۴۷	۸	۹
۷	۳۰	۴۷	۸	۱۰
۸	۳۰	۵۰	۱۰	۱۰
۹	۳۲	۵۰	۱۲	۱۰
۱۰	۳۵	۵۰	۱۲	۱۰

لازم به ذکر است، از CPLEX Solver موجود در نرم‌افزار گمز نسخه ۲۵,۱,۲، برای اجرای کدهای نرم‌افزاری روش Lp متریک استفاده شده است که جواب بهینه سراسری مسئله را تضمین می‌کند (البته در ابعاد کوچک، نه لزوماً ابعاد بزرگ). همچنین، الگوریتم فراابتکاری MOVDO در نرم‌افزار متلب نسخه (R 2019 a) کد شده و عملکرد قابل‌قبولی برای حل مسئله در ابعاد بزرگ مشاهده شده است.

برای اجرای هر یک از کدهای نرم‌افزاری (گمز و متلب) از یک کامپیوتر شخصی با واحد پردازنده مرکزی ۵ هسته‌ای و حافظه دسترسی تصادفی ۶ گیگابایتی استفاده شده است.

به‌طورکلی در ارزیابی روش‌های حل MODM، به این مهم توجه می‌شود که در هر روش با تنوع جواب‌های پارتویی بیشتر و انحراف کمتر، اهداف از حالت بهینه و نامغلوب بودن جواب‌ها، به روش قابل‌قبولی رسیده و عملکرد مناسبی داشته است. بر این اساس، برای ارزیابی عملکرد روش‌های حل چند هدفه چهار شاخص ارائه شده است. که عبارت‌اند از:

معیار سطح پوشش(CS)

در این معیار، تعداد جواب‌های نامغلوب هر روش نسبت به روش دیگر ملاحظه می‌شوند. دو روش حل A و B برای یک مسئله MODM را در نظر بگیرید به‌طوری‌که F(A) نشان‌دهنده جبهه پارتو روش حل A باشد و F(B) نشان‌دهنده جبهه پارتو روش B باشد. همچنین برای هر عضو $pa \in F(A)$ و $pb \in F(B)$، نماد paDom pb را نشان‌دهنده غلبه جواب pa بر pb (یا مغلوب شدن pb به pa)، تعریف می‌کنند. معیار CS برای مقایسه دو روش حل A و B به‌طور زیر بیان می‌شود.

$$CS(A,B) = \frac{||\{pb \in F(B) | \exists\, pb \in F(A): pa\ Dom\ pb\}||}{||F(B)||} \qquad (۲۰)$$

در واقع معیار CS(A,B)، نسبتی از کل جواب‌های پارتو روش B را نشان می‌دهد که نسبت به لااقل یکی از جواب‌های پارتو روش A مغلوب می‌شود. واضح است که این معیار در بازه $0 \le CS(A,B) \le 1$ است؛

- اگر CS(A,B) نزدیک به ۰ باشد، آنگاه روش B عملکرد خوبی داشته و اکثریت جواب‌های آن کارا است.
- اگر CS(A,B) نزدیک به ۱ باشد، آنگاه روش A عملکرد خوبی داشته و اکثریت جواب‌های آن ناکارا است.

معیار میانگین انحراف از ایده‌آل (MID)

در این معیار که یکی از مهم‌ترین معیارهای ارزیابی روش‌های حل مسائل MODM است، ابتدا یک جواب ایده‌آل برای مسئله در نظر گرفته شده و سپس میانگین

1- Cover Set

انحرافات مجموعه جواب‌های پارتو از جواب ایده‌آل محاسبه می‌شود. جواب ایده‌آل که آن را با نماد I_{sol} نشان می‌دهند حالتی است که به‌طور هم‌زمان هر دو جواب در حالت بهینه خود باشند. واضح است که هرچه معیار MID کمتر باشد، بهتر است.

$$MID\ (A) = \frac{\sum_{pa\epsilon F(A)} ||pa - I_{sol}||_2}{||F(A)||} \qquad (۲۱)$$

معیار تعداد جواب‌ها[1](NOS) یا کمیت جواب‌ها

در این معیار تعداد جواب‌های پارتو روش محاسبه می‌شود. هر روش که معیار NOS بیشتری داشته باشد، بهتر است. این معیار گرچه ممکن است معیار مفیدی برای اندازه‌گیری تنوع جواب‌ها باشد اما یک ضعف عمده دارد که کیفیت جواب‌ها در آن مشاهده نمی‌شود. در معیار پیشنهادی بعدی، این ضعف رفع می‌شود.

معیار تعداد جواب‌های نامغلوب[2](NS_CS) یا کیفیت جواب‌ها

معیار NS_CS(A,B) تعداد جواب‌های پارتو روش B را نشان می‌دهد که به جواب‌های روش A مغلوب نمی‌شوند. واضح است که هرچه مقدار این معیار بیشتر باشد، آنگاه روش B عملکرد بهتری داشته است.

$$NS_CS\ (A,B)= [NOS(B).(1- CS(A,B))] \qquad (۲۲)$$

پس از تنظیم پارامترهای الگوریتم پیشنهادی، در روش Lp متریک (از هر سه نرم p=1,2,inf)، با تنظیم N=20 تغییر در اوزان اهداف اجرا، جواب‌های پارتو از این روش‌ها به دست می‌آید. در این بخش، مسائل آزمایشی ابعاد کوچک، متوسط و بعد بزرگ حل می‌شوند و روش‌های حل پیشنهادی بر اساس معیارهای تعریف شده ارزیابی می‌شود. عملکرد و سطح پاسخ الگوریتم MOVDO در مقابل روش دقیق Lp متریک در مسائل بعد کوچک و متوسط در جدول (۷) نشان داده شده است.

با توجه به مقادیر حاصل شده برای معیارها می‌توان نتیجه گرفت که در مسائل آزمایشی ابعاد کوچک و متوسط، جبهه پارتو الگوریتم فراابتکاری تقریباً نزدیک به جبهه سراسری (جبهه روش Lp متریک) است. این موضوع به کارا بودن الگوریتم MOVDO ارائه شده دلالت می‌کند. ازآنجایی‌که حل مسائل با اندازه بزرگ توسط روش دقیق دشوار و زمان‌بر بوده، می‌توان از الگوریتم پیشنهادی به‌عنوان یک راه‌حل مناسب برای حل مسئله استفاده کرد. در جدول (۸) نتایج حل مسائل ابعاد بزرگ توسط الگوریتم پیشنهادی ذکر شده است. نتیجه حل مسائل آزمایشی ابعاد بزرگ توسط الگوریتم نشان می‌دهد که روش فراابتکاری، برخلاف روش دقیق Lp متریک، می‌تواند مسئله را در زمان قابل قبولی حل کرده و بخشی از مجموع جواب‌های پارتو مسئله را به دست آورد. نتایج بیان‌گر آن است که به‌کارگیری الگوریتم MOVDO سبب می‌شود که مسئله سریع‌تر حل شود و معمولاً در معیار کیفیت جواب وضعیت خوبی دارد.

با توجه به درصد اختلاف کمی که بین جواب‌های حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه میرایی ارتعاشات و نرم‌افزار گمز وجود دارد و همچنین کاهش محسوس زمان حل الگوریتم پیشنهادی نسبت به زمان حل روش حل دقیق، می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم مذکور یک ابزار حل مناسب برای مسئله ارائه شده است.

1- Number of Solutions
2- Number of Solutions Cover Set

جدول (۷): ارزیابی الگوریتم MOVDO در مقابل Lp متریک در مسائل آزمایشی بعد کوچک و متوسط

شماره مسئله آزمایشی	CS (Lp, MOVDO)	MID (Lp)	MID (MOVDO)	NOS (Lp)	NOS (MOVDO)	NS_CS (Lp, MOVDO)
۱	۰	۱۵۲/۷۳	۱۳۴/۱۴	۴	۴	۴
۲	۰	۱۳۶/۷۰	۱۳۶/۷۰	۴	۴	۴
۳	۰	۲۲۴/۷۹	۲۰۴/۲۹	۵	۵	۵
۴	۰,۱۰	۳۰۸/۱۵	۲۸۴/۴۷	۷	۸	۷
۵	۰,۲۰	۲۸۹/۶۱	۲۷۳/۴۳	۱۱	۱۰	۸
۶	۰	۳۴۷/۳۴	۳۸۶/۵۷	۱۳	۱۳	۱۳
۷	۰,۲۰	۳۹۸/۷۵	۴۰۱/۸۹	۱۶	۱۴	۱۲
۸	۰,۰۷	۵۲۹/۰۵	۴۷۷/۶۵	۱۷	۱۵	۱۴
۹	۰	۵۶۲/۲۳	۵۶۱/۱۸	۱۷	۱۷	۱۷
۱۰	۰	۵۸۹/۵۳	۶۶۱/۲۳	۱۹	۱۷	۱۷

جدول (۸): عملکرد MOVDO در حل مسائل آزمایشی ابعاد بزرگ

شماره مسئله آزمایشی	MID (MOVDO)	NOS (MOVDO)	زمان اجرا (دقیقه)
۱	۱۰۷۵	۱۷	۲۹/۵۷
۲	۱۴۱۹	۱۵	۴۱/۴۹
۳	۲۱۲۹	۲۲	۵۷/۱۶
۴	۲۹۰۰	۲۵	۸۱/۳۲
۵	۴۶۸۲	۱۵	۹۲/۱۴
۶	۶۸۷۲	۲۰	۱۲۵/۳۷
۷	۶۰۰۲	۲۸	۱۵۳/۵۲
۸	۸۰۲۴	۲۳	۱۹۱/۱۲
۹	۹۸۱۶	۳۲	۲۲۵/۲۳
۱۰	۱۶۸۱۵	۴۰	۳۳۶/۴۲

در ادامه، به ارائه چند تحلیل حساسیت روی برخی از پارامترهای مسئله پرداخته شده و نتایج حاصل از آن گزارش و تشریح می‌شود. برای این‌منظور، یکی از مسائل نمونه مطالعه عددی (مسئله نمونه شماره ۴) را مدنظر قرار داده و پارامترهای؛ هزینه ثابت استقرار تسهیلات و حداکثر بودجه توسعه شبکه تحلیل می‌شود.

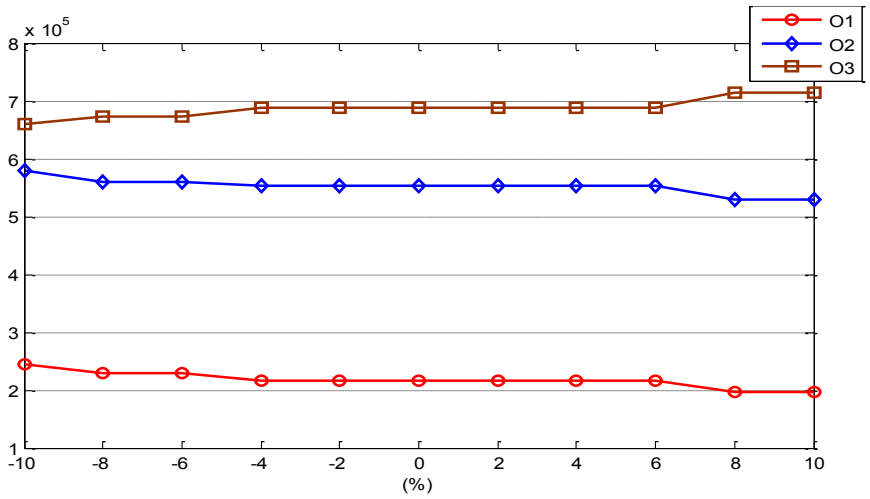
به‌منظور تحلیل حساسیت نتایج روی پارامتر ظرفیت تسهیلات، مقادیر داده‌های این پارامتر در مسئله نمونه شماره ۴ تا ۱۰ درصد افزایش و کاهش داشته است که طول گام ۲ درصد برای تغییرات لحاظ شده است. با تغییرات اعمال شده همان‌طورکه در نمودار تغییرات مقادیر اهداف در شکل (۲) بیان شده است، ملاحظه می‌شود که افزایش ظرفیت تسهیلات در حالت کلی باعث بهبود اهداف شده و کاهش آن باعث بدتر شدن مقادیر هدف می‌شود. البته لزومی ندارد هر درصد تغییرات باعث تغییر در مقادیر هدف شود. مثلاً ملاحظه می‌شود که اگر تا ۴ درصد ظرفیت کاهش یابد، آنگاه باز هم جواب بهینه تغییری نداشته است، همچنین افزایش ظرفیت تسهیلات نیز لزوماً باعث بهبود مقادیر هدف نمی‌شود.

در حالت کلی افزایش ظرفیت تسهیلات باعث می‌شود که هزینه کل (هدف اول) روند غیرصعودی داشته باشد، میزان مشتری مداری نیز غیرنزولی است و نهایتاً ارزش تأمین محصولات (هدف سوم) نیز غیرنزولی است. برعکس اگر این پارامتر از مقدار فعلی خود کمتر شود (درصد

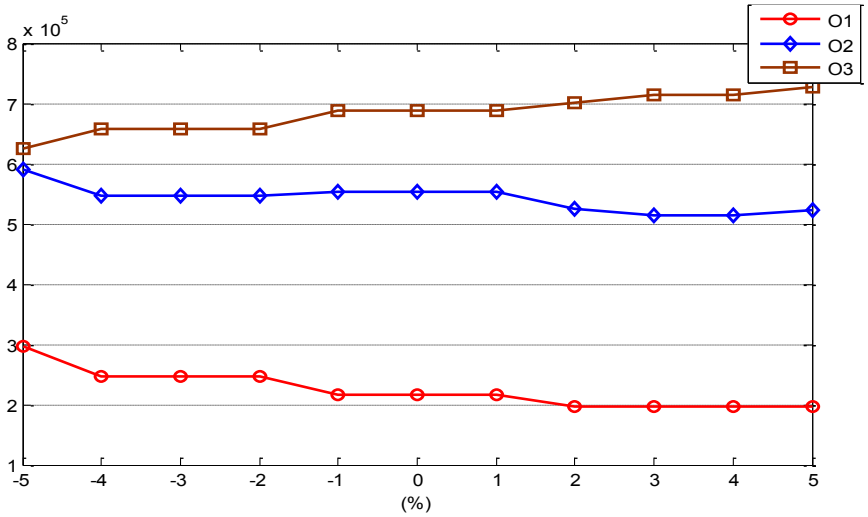
تغییرات منفی)، آنگاه اهداف اول و دوم غیرنزولی و هدف سوم غیرصعودی است.

به‌منظور تحلیل حساسیت نتایج روی پارامتر حداکثر بودجه توسعه شبکه، مقادیر داده‌های این پارامتر در مسئله نمونه شماره ۴ تا ۵ درصد افزایش و کاهش داشته است که طول گام ۱ درصد برای تغییرات لحاظ شده است. با تغییرات اعمال شده همان‌طورکه در نمودار تغییرات مقادیر اهداف در شکل (۳) ذکر شده است، ملاحظه می‌شود که افزایش بودجه در حالت کلی باعث بهبود اهداف شده و کاهش آن باعث بدتر شدن مقادیر هدف می‌شود.

البته این بار هم لزومی ندارد هر درصد افزایش/ کاهش در بودجه باعث تغییر در مقادیر هدف شود. در حالت کلی افزایش بودجه توسعه شبکه باعث می‌شود که هزینه کل (هدف اول) روند نزولی (غیرصعودی) داشته باشد، میزان مشتری‌مداری نیز صعودی (غیرنزولی) است و نهایتاً ارزش تأمین محصولات (هدف سوم) نیز صعودی غیرنزولی است. برعکس، کاهش بودجه (درصد تغییرات منفی)، باعث می‌شود که اهداف اول و دوم غیرنزولی و هدف سوم غیرصعودی باشد.



شکل (۲): تحلیل حساسیت روی پارامتر ظرفیت تسهیلات



شکل (۳): تحلیل حساسیت روی پارامتر حداکثر بودجه توسعه شبکه

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مسئله یکپارچه انتخاب تأمین‌کنندگان، تخصیص سفارش و مکان‌یابی تسهیلات تولیدی در یک زنجیره تأمین چند محصولی و چند دوره‌ای در قالب مدل بهینه‌سازی چند هدفه بررسی شد. برای این‌منظور، ابتدا به پژوهش‌های پیشین در این زمینه پرداخته و چند مورد از شکاف‌های تحقیقاتی در این حوزه بیان شد (ازجمله توجه به اهداف مشتری‌مداری و سبز بودن تأمین‌کنندگان در کنار هدف اقتصادی کمینه‌سازی هزینه کل، در نظر گرفتن تغییرات هزینه معامله با تأمین‌کنندگان با چند دوره‌ای کردن مدل، در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت تسهیلات شبکه، مکان‌یابی پویا و در نظر گرفتن ذخیره احتیاطی مراکز تولید در راستای کاهش ریسک کمبود) که از موارد عمده مدنظر در جهت مدل‌سازی این مسئله است. مدل پیشنهادی با اهداف کمینه‌سازی هزینه کل، کمینه‌سازی مقدار محصول رد شده و معیوب (در جهت افزایش قابلیت اطمینان شبکه) و نهایتاً بیشینه‌سازی ارزش تأمین محصولات (به‌عنوان مثال، ارزش متناسب با ملاحظات زیست‌محیطی) است که در اینجا به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی تصمیم‌گیری سه هدفه تعریف گردید. برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی چندین مسئله آزمایشی در ابعاد کوچک و بزرگ تولید شد. چند معیار اعتبارسنجی معرفی گردید که در حالت کلی به معیارهای مبتنی بر کیفیت و کمیت قابل دسته‌بندی هستند.

نتایج نشان داد که در ابعاد کوچک و متوسط، روش فراابتکاری پیشنهادی نتایج نزدیک و قابل قبولی به خروجی روش Lp متریک داشته است. در مسائل آزمایشی ابعاد بزرگ نیز، به‌کارگیری الگوریتم MOVDO سبب می‌شود مسئله سریع‌تر حل شده و معمولاً از منظر کیفیت جواب آن بخصوص معیار MID و از نظر کمیت (تنوع جواب‌ها)، در جستجوی راه‌حل‌های بهینه یا نزدیک به بهینه موفق و کارا عمل می‌کند. در بخش پایانی پژوهش به ارائه تحلیل حساسیت روی برخی از پارامترهای مسئله (مسئله نمونه شماره ۴) پرداخته شده و نتایج حاصل از آن گزارش و تشریح شد.

به‌منظور بهبود و توسعه این پژوهش می‌توان به مسائل کنترل موجودی، قیمت‌گذاری محصولات و واحدهای با تأخیر تحویل داده شده از تأمین‌کنندگان در دوره‌های مختلف توجه کرد. همچنین می‌توان عدم قطعیت پارامترها و استفاده از رویکردهای عدم قطعیت از قبیل بهینه‌سازی استوار را در نظر گرفت. استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، همچنین روش‌های دقیق حل مسائل ابعاد بزرگ از جمله؛ روش‌های مبتنی بر تجزیه همچون الگوریتم تجزیه بندرز یا لاگرانژین برای حل مسئله و در نظر گرفتن رقابت بنگاه‌ها در زنجیره‌تأمین با استفاده از رویکردهای نظریه بازی جهت کاربردپذیری پژوهش جاری برای مسائل واقعی، از دیگر پیشنهادها برای تحقیقات آتی می‌باشد.

۶- منابع

[1] Buyukozkan, G., Cifci, G., ***"A novel fuzzy multi-criteria decision framework for sustainable supplier selection with incomplete information"***, Computers in Industry, Vol, 62, No. 2, pp. 164–174, 2011.

[2] Seifbarghy, M., and Esfandiari, N., ***"Modeling and solving a multi-objective supplier quota allocation problem considering transaction costs"***, Journal of Intelligent Manufacturing, Vol.24, No. 1, pp.201–209, 2013.

[3] Guneri, AF., Yucel, A., Ayyildiz, G., ***"An integrated fuzzy-lp approach for a supplier selection problem in supply chain management"***, Expert Systems with Applications, Vol.36, No. 5, pp.9223–9228, 2009.

[4] Houlihan, J.B., ***"International Supply Chain Management", International Journal of Physical Distribution & Materials Management***, Vol. 15, No. 1, pp.22–38, 1985.

[5] Ayhan, M.B., and Kilic, H.S., ***"A two stage approach for supplier selection problem in multi item/ multi-supplier environment with quantity discounts"***, Computers & Industrial Engineering, Vol.85, pp.1–12, 2015.

[6] Sodenkamp, M.A., Tavana, M. and Di Caprio, D., ***"Modeling synergies in multi-criteria supplier selection and order***

[14] Seyed Haeri, S.A., and Rezaei, J., ***"A grey-based green supplier selection model for uncertain environments"***, Journal of Cleaner Production, Vol.221, pp.768-784, 2019.

[15] Melo, M.T., Nickel, S., and Saldanha-da-Gama, F., ***"Facility location and supply chain management – A review"***, European Journal of Operational Research, Vol, 196, No. 2, pp.401–412, 2009.

[16] Meng, Q., Huang, Y., and Cheu, R.L., ***"Competitive facility location on decentralized supply chains"***, European Journal of Operational Research, Vol, 196, No. 2, pp.487–499, 2009.

[17] Rahmati, S.H.A., Ahmadi, A. and Karimi, B., ***"Facility Location and Inventory Balancing in a Multi-period Multiechelon Multi-objective Supply Chain: An MOEA Approach"***, Journal of Optimization in Industrial Engineering, Vol.16, No. 16, pp.83–99, 2014.

[18] Mousavi, S.M., Alikar, N., Akhavan Niaki, S.T. and Bahreininejad, A., ***"Optimizing a location allocation-inventory problem in a two-echelon supply chain network: A modified Fruit Fly optimization algorithm"***, Computers & Industrial Engineering, Vol.87, pp.543-560, 2015.

[19] Ranjbar Tezenji, F., Mohammadi, M., Pasandideh, S.H.R. and Nouri Koupaei, M., ***"An integrated model for supplier location-selection and order allocation under capacity constraints in an uncertain environment"***, Journal of Sharif University of Technology, Vol.23, No. 6, pp.3009-3025, 2016.

[20] Atabaki, M.S., Mohammadi, M. and Naderi, B., "***Hybrid Genetic Algorithm and Invasive Weed Optimization via Priority Based Encoding for Location-Allocation Decisions in a Three-Stage Supply Chain"***, Asia-Pacific Journal of Operational Research, Vol.34, No. 2, pp.44 pages, 2017.

[21] Arabzad, S. M., Ghorbani, M. and Ranjbar, M. J., ***"Fuzzy Goal Programming for Linear Facility Location-Allocation in a allocation: An application to commodity trading"***, European Journal of Operational Research, Vol.254, No. 3, pp.859–874, 2016.

[7] Hamdan, H., and Cheaitou, A., ***"Supplier selection and order allocation with green criteria: An MCDM and multi-objective optimization approach"***, Computers & Operations Research, Vol.81, pp.282–304, 2017.

[8] Che, Z.H., ***"A multi-objective optimization algorithm for solving the supplier selection problem with assembly sequence planning and assembly line balancing"***, Computers & Industrial Engineering, Vol.105, pp.247–259, 2017.

[9] Cheraghalipour, A. and Farsad, S., ***" A bi-objective sustainable supplier selection and order allocation considering quantity discounts under disruption risks: A case study in plastic industry"***, Computers & Industrial Engineering, Vol.118, pp.237–250, 2018.

[10] Sadeghi Rad, R. and Nahavandi, N., ***" A novel multi-objective optimization model for integrated problem of green closed loop supply chain network design and quantity discount"***, Journal of Cleaner Production, Vol.196, pp. 1549-1565, 2018.

[11] Mirzaee, H., Naderi, B. and Pasandideh, S.H.R., ***"A preemptive fuzzy goal programming model for generalized supplier selection and order allocation with incremental discount"***, Computers & Industrial Engineering, Vol.122, pp.292-302, 2018.

[12] Mohammed, A., Harris, I., and Govindan, K., ***"A hybrid MCDM-FMOO approach for sustainable supplier selection and order allocation"***, International Journal of Production Economics, 2019.

[13] Moheb-Alizadeh, H., and Handfield, R., ***"Sustainable supplier selection and order allocation: A novel multi-objective programming model with a hybrid solution approach"***, Computers & Industrial Engineering, Vol.129, pp.192-209, 2019.

Supply Chain; The Case of Steel Industry", International Journal of Research in Industrial Engineering, Vol.6, No. 2, pp.90–105, 2017.

[22] Saidi-Mehrabad, M., Aazami, A. and Goli, A., ***"A location-allocation model in the multi –level supply chain with multi-objective evolutionary approach"***, Journal of Industrial and system Engineering, Vol.10, No. 3, pp.140–160, 2017.

[23] Dai, Z., Aqlan, F., Zheng, X. and Gao, K. (2018) ***"A location-inventory supply chain network model using two heuristic algorithms for perishable products with fuzzy constraints"***, Computers & Industrial Engineering, Vol.119, pp. 338-352, 2018.

[24] Biajoli, F.L., Chaves, A.A., and Lorena, L.A.N., ***"A biased random-key genetic algorithm for the two-stage capacitated facility location problem"***, Computers & Industrial Engineering, Vol, 115, pp.418-426, 2019.

[۲۵] امین طهماسبی، حمزه. بدری، سید امین. رضازاده، بهناز. ***"مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط جدید به‌منظور طراحی زنجیره تأمین یکپارچه چندسطحی"***، فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل، زیر چاپ، ۱۳۹۸.

[26] Emirhüseyinoğlu, G., and Ekici, A., ***"Dynamic facility location with supplier selection under quantity discount"***, Computers & Industrial Engineering, Vol, 134, pp.64-74, 2019.

[27] Ramshani, M., Ostrowski, J., Zhang, K. and Li, X., ***"Two level uncapacitated facility location problem with disruptions"***, Computers & Industrial Engineering, Vol.137, 106089, 2019.

[28] Mehdizadeh, E., and Tavakkoli-Moghaddam, R., ***"Vibration Damping Optimization", Proc. of the Int. Conf. Operations Research - OR and Global Business***, Germany, 3-5 September, 2008.

[29] Hajipour, V., Mehdizadeh, E. and Tavakkoli-Moghaddam, R., ***"A novel Pareto-based multi-objective vibration damping optimization algorithm to solve multi-objective optimization problems"***, Scientia Iranica, Transaction E: Industrial Engineering, Vol. 21, No. 6, pp 2368-2378, 2014.