

مدل سازی یک مسئله دومرحله‌ای تلفیقی جهت انتخاب تأمین کننده و طراحی شبکه زنجیره تأمین

پایدار با استفاده از روش اعداد D و بهینه‌سازی استوار امکانی

علی ابراهیم نیا^a، مجید خلیلی^b، حمیدرضا فیلی^c

^a وابستگی نویسنده اول (دانشجوی کارشناسی ارشد صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی کرج، کرج، ایران)

^b وابستگی نویسنده دوم (استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی کرج، کرج، ایران)

^c وابستگی نویسنده سوم (استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی کرج، کرج، ایران)

نویسنده مسئول: علی ابراهیم نیا

چکیده:

یک مدل غیرقطعی از مسئله شبکه زنجیره تأمین طراحی شده؛ لذا پارامترهای هزینه حمل و نقل و مقدار تقاضای مشتریان از محصولات به صورت غیرقطعی و فازی دوزنقه‌ای در نظر گرفته که برای کنترل این پارامترها، از روش بهینه‌سازی استوار فازی استفاده گردیده است. به همین منظور ابتدا یک مسئله در سایز کوچک طراحی و به دلیل سه‌هدف بودن مدل از روش تصمیم‌گیری چندهدفه معیار جامع برای حل مدل استفاده شده که نتیجه کسب ۶ جواب کارا می‌باشد. پس از بررسی متغیرهای خروجی مسئله، از الگوریتم‌های NSGA II، MOPSO و MOALO استفاده شده و ۱۰ مسئله نمونه در سایزهای بزرگ‌تر طراحی و حل گردیده که پس از بررسی روند تغییرات میانگین‌های توابع هدف و شاخص‌های محاسباتی در مسائل نمونه سایز بزرگ، مشاهده گردید که الگوریتم NSGA II در کسب شاخص‌های تابع هدف اول، دوم، تعداد جواب کارا بیشترین کارایی را داشته و همچنین الگوریتم MOPSO نیز در کسب شاخص بیشترین گستردگی کارایی خود را اثبات نموده است. در نهایت الگوریتم MOALO در کسب شاخص‌های تابع هدف سوم، فاصله متریک و زمان محاسباتی بهتر از دو الگوریتم دیگر عمل نموده است. در انتها از روش تصمیم‌گیری چندشاخصه تاپسیس برای انتخاب بهترین الگوریتم استفاده شده که نتیجه آن انتخاب الگوریتم MOALO با کسب وزن مطلوبیت ۰٫۹۰۷۱ به عنوان کارا ترین الگوریتم در حل مسئله شبکه زنجیره تأمین پیشنهادی می‌باشد.

کلمات کلیدی: زنجیره تأمین؛ طراحی شبکه؛ روش استوار فازی؛ عدم قطعیت.

مقدمه

تشدید صحنه رقابت جهانی در محیطی که به صورت دائم در حال تغییر است ضرورت واکنش‌های مناسب سازمان‌ها و شرکت‌های تولیدی-صنعتی را دوچندان کرده و بر انعطاف‌پذیری آن‌ها با محیط نامطمئن خارجی پای می‌فشارد و سازمان‌های امروزی در عرصه ملی و جهانی به منظور کسب جایگاهی مناسب و حفظ آن نیازمند بهره‌گیری از الگوی مناسب همچون مدیریت زنجیره تأمین در راستای تحقق مزیت رقابتی و انتظارات مشتریان هستند. مدیریت مؤثر زنجیره تأمین از عوامل اصلی بقا می‌باشد. ضمن آنکه استفاده از فناوری اطلاعات در فعالیت‌های زنجیره تأمین پتانسیل ایجاد ارزش را در زنجیره افزایش داده است. به‌طور کلی مدیریت زنجیره تأمین برافزایش انطباق‌پذیری و انعطاف‌پذیری شرکت‌ها تأکید دارد و دارای قابلیت واکنش و پاسخ سریع و اثربخش به تغییرات بازار است. زنجیره‌های تأمین در سال‌های اخیر به سرعت رشد یافته‌اند و تنها تمرکز نمودن بر عملکرد اقتصادی برای بهینه‌سازی هزینه‌ها یا بازگشت سرمایه نمی‌تواند باعث توسعه پایدار در زنجیره تأمین گردد. اثر فعالیت‌های گوناگون درگیر در زنجیره تأمین بر زندگی اجتماعی و مسائل زیست‌محیطی که منجر به توسعه پایدار می‌شود را نیز باید در نظر گرفت. به همین منظور، مفاهیم مدیریت زنجیره تأمین سبز و مدیریت زنجیره تأمین پایدار به منظور اهمیت نگرانی‌های اجتماعی و زیست‌محیطی همراه با عوامل اقتصادی در برنامه‌ریزی زنجیره تأمین ظهور یافته‌اند. در این مقاله با استفاده از شاخص‌های اساسی پایداری در سه بعد (اقتصادی، زیست‌محیطی و مسئولیت‌های اجتماعی)، در بخش تأمین‌کنندگان به رتبه‌بندی و اولویت‌بندی این بخش از زنجیره و در نهایت طراحی یک شبکه زنجیره تأمین پایدار پرداخته شده است. زنجیره تأمین، یک مجموعه از سازمان‌هایی است که به وسیله جریان‌های مواد، اطلاعات و جریان‌های مالی به یکدیگر مرتبط می‌شوند، این سازمان‌ها می‌توانند شامل بنگاه‌هایی باشند که مواد اولیه قطعات و محصولات را تولید و خدماتی از قبیل توزیع، انبارش، عمده‌فروشی و خرده‌فروشی را ارائه دهند. در این مجموعه مشتریان نهایی، آخرین سطح یک زنجیره و یکی از اعضای این سازمان‌ها در نظر گرفته می‌شوند [۱]. این نوع از شبکه‌های زنجیره تأمین، به شبکه‌های زنجیره تأمین روبه‌جلو معروف‌اند، در شبکه‌های زنجیره تأمین روبه‌جلو، تنها جریان مواد از سوی تأمین‌کننده‌های به سمت مشتریان نهایی در جریان است و شامل تسهیلاتی نظیر تأمین‌کننده‌های مواد اولیه، مراکز تولیدی، مراکز توزیع‌کننده محلی و در نهایت مشتریان می‌باشند. در اولین سطح از شبکه زنجیره تأمین، تأمین‌کننده‌ها به عنوان عضو اصلی شبکه زنجیره تأمین مسئول تهیه مواد اولیه جهت تولید اقلام نهایی را دارند. انتخاب مناسب‌ترین تأمین‌کننده با توجه به شاخص‌های متعددی نظیر پایین بودن هزینه تهیه مواد، کیفیت بالای مواد اولیه، تأمین به موقع مواد اولیه، ارائه خدمات پس از فروش برای مواد و غیره می‌تواند در انتخاب تأمین‌کننده نقش اساسی بر عهده داشته باشد [۲]. لذا پس از انتخاب مناسب‌ترین تأمین‌کننده‌ها جهت تأمین و تهیه مواد اولیه، نوبت به مدیریت جریان محصولات تولیدی در سطح بعدی یعنی مراکز تولیدی می‌گردد. در این سطح مراکز تولیدی پس از تهیه مواد اولیه از سوی تأمین‌کننده‌ها، اقدام به تولید محصولات با کیفیت با تکنولوژی تولید متفاوت می‌کنند. لذا برای تهیه هر محصول نهایی می‌توان از تکنولوژی‌های متفاوتی با هزینه‌های متفاوت استفاده نمود. دلیل استفاده از تکنولوژی‌های متفاوت در نظر گرفتن پایداری شبکه زنجیره تأمین، یعنی توجه به مسائل دیگر به جز هزینه؛ یعنی میزان آلودگی زیست‌محیطی و همچنین توجه به مسئولیت‌های اجتماعی است [۳]. پس از تولید محصولات با استفاده از تکنولوژی‌های متعدد، نحوه مدیریت جریان کالا، یعنی استفاده از نوع ناوگان حمل و نقل، اهمیت خاصی پیدا می‌کند. در این بخش نحوه ارسال محصولات بین مراکز، کمیت ارسال محصولات، نوع وسیله نقلیه مورد استفاده برای انتقال

محصولات، از جمله مواردی است که به عنوان متغیرهای اصلی تاکتیکی مسائل زنجیره تأمین مطرح می شود [۴]. لذا برنامه ریزی مناسب حمل و نقل نیز یکی دیگر از جنبه های تصمیمات تاکتیکی مدیریت زنجیره تأمین مطرح می گردد. در گام بعدی نیز نحوه انبارش محصولات، نحوه توزیع آن ها به مشتریان به عنوان مسائل تاکتیکی سطح بعدی مطرح می گردد. به طور کلی می توان مسائل تصمیم گیری زنجیره تأمین پایدار مسئله را در دودسته تصمیمات استراتژیکی و تاکتیکی مطرح نمود. در سطح تصمیمات استراتژیکی، به تصمیم گیری مسائل کلان و بلندمدت زنجیره تأمین پرداخته می شود. از جمله این تصمیمات می توان به انتخاب تأمین کننده ها جهت تهیه مواد اولیه، انتخاب مکان مناسب برای تأسیس مراکز تولیدی، انتخاب مناسب ترین تکنولوژی تولید برای تولید محصولات نهایی اشاره نمود [۵]. این مسائل بدین دلیل جزو تصمیمات استراتژیکی قرار گرفته اند که به راحتی امکان تغییر و جابجایی آن ها در کوتاه مدت وجود ندارد. در دسته دیگر تصمیمات تاکتیکی مسئله وجود دارد که آن نیز، نحوه توزیع و برآورده سازی تقاضای غیرقطعی مشتریان از هر محصول، نحوه انتخاب ناوگان حمل و نقل در هر دوره زمانی، نحوه انبارش و مقدار انبارش محصولات در انبارهای مراکز توزیع عمده و سایر موارد مرتبط با تصمیم گیری های کوتاه مدت می باشد [۶]. تصمیمات تاکتیکی معمولاً بعد از اتخاذ تصمیمات استراتژیکی گرفته می شود. زیرا بایستی ابتدا تأمین کننده ها، تولید کننده ها و سطح تکنولوژی تولید مشخص گردیده تا نسبت به آن نوع ناوگان حمل و نقل، مسیریابی بهینه حمل و نقل و غیره مشخص شود.

۱. زنجیره تأمین

در دو دهه ۶۰ و ۷۰ میلادی، سازمان ها برای افزایش توان رقابتی خود تلاش می کردند تا با استانداردسازی و بهبود فرایندهای داخلی، محصولی با کیفیت بهتر و هزینه کمتر تولید کنند. در آن زمان تفکر غالب این بود که مهندسی و طراحی قوی، عملیات تولید منسجم و هماهنگ، پیش نیاز دستیابی به خواسته های بازار و در نتیجه کسب سهم بیشتری از بازار است، بنابراین طراحان مجبور شدند که نیازمندی های مورد نظر مشتریان را در طراحی محصولات خود قرار دهند و در حقیقت محصولی را با حداکثر سطح کیفی ممکن در حداقل هزینه، توأم با ایده آل های مورد نظر مشتری روانه بازار سازند [۷]. به همین دلیل سازمان ها تمام تلاش خود را بر افزایش کارایی معطوف کردند. در دهه ۸۰ میلادی با افزایش تنوع در الگوهای مورد نیاز مشتریان، سازمان ها به طور قابل ملاحظه ای به افزایش انعطاف پذیری در خطوط تولید، بهبود محصولات، فرایندهای موجود و توسعه محصولات جدید برای ارضای نیاز مشتریان علاقه مند شدند که این موضوع چالش های جدیدی را بر آن ها رقم زد [۸]. در دهه ۹۰ میلادی به موازات بهبود در فرایندهای تولید و به کارگیری الگوهای مهندسی مجدد، مدیران بسیاری از صنایع دریافتند که برای ادامه حضور در بازار تنها بهبود فرایندهای داخلی و انعطاف پذیری در توانایی شرکت کافی نیست، بلکه تأمین کنندگان قطعات و مواد نیز باید موادی با بهترین کیفیت و کمترین هزینه تولید کنند و توزیع کنندگان محصولات نیز باید ارتباط نزدیکی با سیاست های توسعه بازار تولیدکننده داشته باشند، چنین نگرشی رویکردهای زنجیره تأمین و مدیریت آن، پا به عرصه وجود نهاد [۹]. در حالت کلی زنجیره تأمین از دو یا چند سازمان تشکیل شده که از یکدیگر جدا می باشند و به وسیله جریان های مواد، اطلاعات و جریان های مالی به یکدیگر مرتبط می شوند، این سازمان ها می توانند بنگاه هایی باشند که مواد اولیه، قطعات، محصول نهایی را تولید و یا خدماتی چون توزیع، انبارش، عمده فروشی و خرده فروشی ارائه می دهند. زنجیره تأمین شامل تأمین کنندگان، مراکز تولید، انبارهای مراکز توزیع و خرده فروشی هاست به گونه ای که مواد خام، موجودی در جریان ساخت و محصولات نهایی بین تسهیلات جریان دارند [۱۰].

۲. انتخاب تأمین کنندگان

سازمان های تولیدی به منظور حفظ مزیت رقابتی و همچنین فعالیت در محیط پویایی که دائماً در حال تغییر است نیازمند انعطاف پذیری بالایی هستند. موفقیت سازمان ها، به توانایی آن ها در ارائه خروجی ها وابسته است. ارائه مطلوب محصولات با توجه به معیارهایی مانند هزینه، کیفیت، عملکرد، تحویل، انعطاف پذیری و نوآوری به توانایی سازمان در اداره جریان مواد، اطلاعات و غیره درون و بیرون سازمان وابسته است. این جریان به عنوان زنجیره تأمین شناخته می شود. مدیریت مؤثر زنجیره تأمین از عوامل اصلی بقای سازمان می باشد و به طور کلی مدیریت زنجیره تأمین برافزایش انطباق پذیری و انعطاف پذیری شرکت ها تأکید دارد و از سوی دیگر دارای قابلیت واکنش و پاسخ سریع و اثربخش به تغییرات بازار است [۱۱]. موفقیت و شکست زنجیره عرضه در بازار در نهایت توسط مشتری یا مصرف کننده نهایی تعیین می شود. رساندن کالای درست، در قیمت و زمان مناسب به مصرف کننده، نه تنها مهم ترین عامل برای موفقیت رقابتی است، بلکه نقش کلیدی در بقای یک سازمان تولیدی دارد. بنابراین، در راستای برقراری یک استراتژی زنجیره عرضه، تأمین به موقع مواد اولیه و آماده سازی آن تأثیر بسزایی دارد. انتخاب تأمین کننده موضوع مهمی در زنجیره تأمین محسوب می شود. به گونه ای که تولیدکنندگان ۶۰٪ از زمان خود را صرف تأمین مواد اولیه، اجزا و قطعات می کنند. علاوه بر این هفتاد درصد از هزینه های تولیدی مربوط به خرید کالا و خدمات می شود. بنابراین انتخاب و تعیین مناسب ترین تأمین کننده موضوع مهمی در زنجیره تأمین محسوب می شود که باید به گونه ای استراتژیک مورد بررسی قرار گیرد [۱۱].

۳. تئوری اعداد D

نظریه شواهد شاخه ای از علوم ریاضی است که دارای پیوند با شواهد تجربی موجود در ذهن و اندیشه هر انسان، جهت خلق و ساخت یک تصویر منسجم از واقعیت هاست. این نظریه که در راستای برخورد با دلایل تجربی غیرمنتظره طراحی گردیده به ارائه احتمال های جدید و تازه در مقابل شواهد موجود می پردازد. نظریه شواهد اولین بار توسط دمپستر و بعدها توسط شافر ارائه شد؛ از این رو این نظریه، نظریه دمپستر-شافر و به اختصار D_S نامیده می شود. نظریه دمپستر-شافر بر اساس باوری است که از شواهد حاصل می شود به طوری که ساختار باور نظریه شواهد به مدل احتمال کلاسیک مربوط می شود [۱۲]. نظریه دمپستر-شافر یا نظریه شواهد برای رسیدگی به اطلاعات نامعین استفاده می شود. این نظریه شرایط ضعیف تری نسبت به نظریه بیزین می طلبد؛ از این رو از آن اغلب به عنوان شکلی از نظریه بیزین یاد می شود. در چارچوب ریاضی نظریه دمپستر-شافر، از تخصیص پایه ای احتمال (BPA) در چارچوب تشخیص برای بیان عدم قطعیت استفاده شده است، با این وجود این نظریه برای نمایش بعضی اطلاعات با محدودیت هایی روبرو است. یکی از محدودیت ها، نیاز به منحصربه فرد بودن عناصر در

چارچوب تشخیص است؛ برای مثال در ارزیابی یک شی، اغلب از متغیرهای زبانی استفاده می شود. با «خیلی بد» و «بد»، «نسبتاً خوب»، «خوب»، «خیلی خوب» مانند توجه به ارزیابی ها بر اساس قضاوت انسانی، فرضیه انحصار دقیقاً تضمین نمی شود؛ به طوری که کاربرد نظریه دمپستر -شافر برای چنین موقعیت هایی سؤال برانگیز است [۱۳]. روش اعداد D در رسیدگی به عدم قطعیت های مختلف، از جمله ابهام و نقص اطلاعات، به طور کارا و مؤثر عمل می کند؛ بنابراین می تواند در بسیاری از زمینه های دیگر مانند مدیریت بحران، تجزیه و تحلیل تصمیم گیری، ارزیابی ریسک و ... مورد ارائه جدیدی برای مدل کردن اطلاعات نامطمئن در D استفاده قرار گیرد. اعداد تصمیم های بلندمدت است که برای غلبه بر کاستی های نظریه دمپستر -شافر معرفی شده است و به صورت زیر تعریف می شود:

اگر Ω مجموعه متناهی غیر تهی باشد، آنگاه نگاشت اعداد D به صورت رابطه (۱) نشان داده می شود

$$D: \Omega \rightarrow [0,1] \quad (1)$$

به طوری که

$$\sum_{B \subseteq \Omega} D(B) \leq 1 \quad \text{and} \quad D(\phi) = 0 \quad (2)$$

ϕ یک مجموعه تهی و B یک زیرمجموعه ای Ω است [۱۴].

بر اساس ارزیابی به روش اعداد D، عناصر متقابلاً منحصربه فرد نبوده و با توجه اصل اطلاعات ناقص، جمع احتمال ممکن است کمتر از ۱ باشد، به طوری که $\sum_{B \subseteq \Omega} D(B) = 1$ به معنی کامل بودن اطلاعات و $\sum_{B \subseteq \Omega} D(B) < 1$ نشان دهنده اطلاعات ناقص خواهد بود.

برای مجموعه گسسته $\Omega = \{b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_n\}$ به طوری که $b_i \in R$ و $b_i \neq b_j$ اگر $i \neq j$ فرم خاصی از اعداد به شکل زیر بیان می شود:

$$\begin{aligned} D(\{b_1\}) &= v_1 \\ D(\{b_2\}) &= v_2 \\ D(\{b_i\}) &= v_i \\ \dots &\dots \dots \dots \dots \\ D(\{b_n\}) &= v_n \end{aligned} \quad (3)$$

یا به صورت ساده تر $D = \{(b_1, v_1), (b_2, v_2), \dots, (b_i, v_i), \dots, (b_n, v_n)\}$ به طوری که $v_i > 0$ و $\sum_{i=1}^n v_i \leq 1$ در صورت وجود دو عدد D به صورت D_1 و D_2 به صورت رابطه (۴):

$$\begin{aligned} D_1 &= \{(b_1^1, v_1^1), \dots, (b_i^1, v_i^1), \dots, (b_n^1, v_n^1)\} \\ D_2 &= \{(b_1^2, v_1^2), \dots, (b_i^2, v_i^2), \dots, (b_m^2, v_m^2)\} \end{aligned} \quad (4)$$

ترکیب D_1 و D_2 به صورت $D = D_1 \oplus D_2$ نشان داده شده به صورت زیر محاسبه می شود:

$$D(b) = v \quad (5)$$

$$b = \frac{b_i^1 + b_j^2}{2} \quad (6)$$

$$v = \frac{v_i^1 + v_j^2}{2} \quad (7)$$

$$C = \begin{cases} \left(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left(\frac{v_i^1 + v_j^2}{2} \right), \sum_{i=1}^n v_i^1 = 1 \ \& \ \sum_{j=1}^m v_j^2 = 1; \right. \\ \left(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left(\frac{v_i^1 + v_j^2}{2} \right) + \sum_{j=1}^m \left(\frac{v_c^1 + v_j^2}{2} \right), \sum_{i=1}^n v_i^1 < 1 \ \& \ \sum_{j=1}^m v_j^2 = 1; \right. \\ \left(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left(\frac{v_i^1 + v_j^2}{2} \right) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{v_i^1 + v_c^2}{2} \right), \sum_{i=1}^n v_i^1 = 1 \ \& \ \sum_{j=1}^m v_j^2 < 1; \right. \\ \left(\left(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left(\frac{v_i^1 + v_j^2}{2} \right) + \sum_{j=1}^m \left(\frac{v_c^1 + v_j^2}{2} \right) \right) + \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{v_i^1 + v_c^2}{2} \right) + \frac{v_c^1 + v_c^2}{2} \right), \sum_{i=1}^n v_i^1 < 1 \ \& \ \sum_{j=1}^m v_j^2 < 1; \right. \end{cases} \quad (8)$$

به طوری که

$$v_c^1 = 1 - \sum_{i=1}^n v_i^1 \quad \& \quad v_c^2 = 1 - \sum_{j=1}^m v_j^2 \quad (9)$$

قابل ذکر است که عملیات ترکیبی، خاصیت شرکت پذیری را حفظ نمی کند، بنابراین اعداد D می توانند به درستی و کارآمدی ترکیب شوند [۱۵].

$$(D_1 \oplus D_2) \oplus D_3 \neq (D_1 \oplus D_3) \oplus D_2 \neq (D_2 \oplus D_3) \oplus D_1 \quad (10)$$

اگر $D = \{(b_1, v_1), (b_2, v_2), \dots, (b_i, v_i), \dots, (b_n, v_n)\}$ یک عدد D باشد، عمل گر اجماع D طبق رابطه (۱۱) تعریف می‌شود.

$$I(D) = \sum_{i=1}^n b_i v_i \quad (11)$$

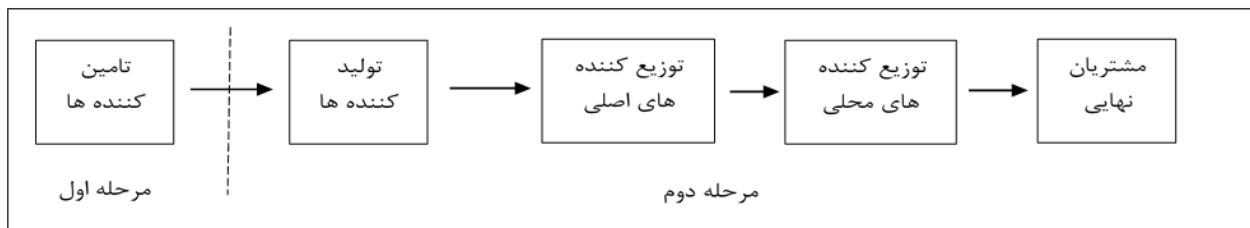
۴. پیشینه مقالات

نوبیل و طالعی زاده در مقاله‌ای به بررسی یک مدل برنامه‌ریزی توزیع-تولید و موجودی در شرایط عدم قطعیت با حداکثر سازی ارزش خالص فعلی در شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پرداختند. آن‌ها یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با چندین تأمین‌کننده، چندین کارخانه تولیدی و مشتری طراحی نمودند که هدف آن کاهش هزینه‌های طراحی شبکه با در نظر گرفتن افزایش ارزش خالص فعلی بود. آن‌ها از روش تصمیم‌گیری فازی برای کنترل پارامترهای غیرقطعی خود استفاده نمودند [۱۶]. قهرمانی و همکاران در مقاله‌ای به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین با قابلیت باز و بسته کردن تسهیلات در دوره‌های مختلف پرداختند. آن‌ها از الگوریتم بهینه‌سازی وال برای حل مدل غیرقطعی خود بهره بردند [۱۷]. پاندا و همکاران به بررسی اثرات مسئولیت اجتماعی شرکت (CSR) پرداخته است و هماهنگی کانال در یک زنجیره تأمین حلقه بسته تولیدکننده-خرده‌فروشان با مسئولیت اجتماعی را با در نظر گرفتن دو حوزه حداکثر سود و مسئولیت اجتماعی از طریق بازیافت محصول بررسی کرده است. تولیدکننده مسئولیت اجتماعی دارد و با بازیافت محصول مورد استفاده که از طریق خرده‌فروش با استفاده از کانال معکوس جمع‌آوری می‌کند، آن را به نمایش می‌گذارد. مشخص شده است که انگیزه حداکثر سود غیرفعال کانال از طریق عمل CSR حاشیه سود بالاتری را نسبت به سود حداکثر رساندن هدف و قرارداد تقسیم درآمد ایجاد می‌کند که تضاد کانال را برطرف می‌کند. بازیافت یک عامل اساسی برای قیمت عمده‌فروشی و از این رو سود خالص سازنده است زیرا تغییر آن ممکن است به کاهش یا افزایش حتی قیمت عمده‌فروشی منجر شود. بنابراین، باید محدودیتی از بازیافت برای سود بهینه داشته باشید. برای بهترین عملکرد کانال، تولیدکننده کلیه درآمدی را که از طریق بازیافت به‌صورت پاداش به دست می‌آورد، به خرده‌فروش ارائه می‌دهد. بنابراین، CSR صرفاً یک تلاش گران برای تولیدکننده است [۱۸]. امین و همکاران در مقاله خود یک شبکه CLSC با تولید مجدد لاستیک را بر اساس گزینه‌های بازیابی تاجر طراحی و بهینه کرده است که هدف مدل ارائه‌شده بهینه‌سازی حداکثر سود کل می‌باشد. کاربرد این مدل بر اساس یک شبکه واقع‌بینانه در تورنتو، کانادا با استفاده از نقشه مورد بحث قرار گرفته است. وی در این مدل از یک روش جدید مبتنی بر درخت تصمیم استفاده کرده است تا ارزش فعلی خالص مسئله را در چندین دوره تحت منابع مختلف عدم اطمینان مانند تقاضا و بازده محاسبه کند. علاوه بر این، جریان نقدی تخفیف در این روش به‌عنوان یک رویکرد نوآورانه جدید در نظر گرفته شده است. این روش می‌تواند در مقایسه سودآوری گزینه‌های مختلف طراحی برای زنجیره تأمین حلقه بسته به کار رود [۱۹]. امین و باکی همچنین در یک بررسی با در نظر گرفتن عوامل جهانی، از جمله نرخ ارز و عوارض گمرکی، یک مدل ریاضی برای یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه داده است. مدل ارائه‌شده یک مدل برنامه‌نویسی خطی چندمنظوره مخلوط عدد صحیح است که تحت تقاضای نامشخص می‌باشد. وی یک روش راه‌حل مبتنی بر برنامه‌نویسی فازی برای حل مسئله بهینه‌سازی ارائه کرده است. سپس مدل را در یک شبکه اعمال می‌کند که در جنوب غربی انتاریو، کانادا واقع شده است و تجزیه و تحلیل حساسیت به اعتبار مدل را ارائه می‌کند. مدل ارائه‌شده عوامل جهانی، چند هدف و عدم قطعیت را هم‌زمان در یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در نظر می‌گیرد [۲۰]. صاحب جم نیا و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مخلوط چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با تاجر پایدار ارائه داده است. مدل ارائه‌شده باهدف بهینه‌سازی کل هزینه، تأثیرات زیست‌محیطی در ایجاد تسهیلات، پردازش لاستیک و حمل‌ونقل بین هر سطح و همچنین تأثیرات اجتماعی از جمله فرصت‌های شغلی و خسارت کار می‌باشد. برای کاهش اشکالات الگوریتم‌های متاهوریستیک موجود هنگام حل شبکه‌ها در مقیاس بزرگ، چهار الگوریتم متاهوریستیک هیبریدی جدید بر اساس مزایای موارد جدید و قدیمی توسعه داده شده است. برای ارزیابی کیفیت الگوریتم‌های ترکیبی پیشنهادی، آزمایش‌های محاسباتی گسترده، مقایسه و تحلیل حساسیت با معیارهای مختلف انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم‌های ترکیبی رویکردهای مؤثر برای حل مشکل اساسی در شبکه‌های بزرگ هستند [۲۱]. فتح الهی فرد و همکاران در مقاله‌ای یک مدل برنامه‌نویسی سه سطحی را برای طراحی اولین تخصیص مکان از تاجر CLSC ارائه کرده است. مدل ارائه‌شده در بازی استاتیک استاکلبرگ بین تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و جمع‌آوری‌کنندگان در چارچوب CLSC فرموله شده است. این راه‌حل برای حل مشکلات در مقیاس بزرگ امکان‌پذیر نمی‌باشد. برای حل این اشکال، در این مطالعه تعدادی از بهینه‌سازهای هیبریدی جدید با در نظر گرفتن مزایای فراشناختی اخیر پیشنهاد شده است. یک مطالعه مقایسه‌ای گسترده، کارایی مدل توسعه‌یافته و عملکرد بهینه‌سازهای هیبریدی را که هنگام حل مشکلات در مقیاس بزرگ پیشنهاد شده است، تأیید می‌کند [۲۲]. حاجی آقایی و همکاران در مطالعه‌ای، یک مدل برنامه‌نویسی عدد صحیح مخلوط جدید ایجاد کرده تا با توجه به فرض تخفیف در هزینه‌های حمل‌ونقل برای اولین بار، یک طرح شبکه زنجیره تأمین حلقه‌ای پایدار چندمنظوره ایجاد کند. برای پرداختن به مشکل، نه تنها از استعاره سنتی و اخیر استفاده شده بلکه الگوریتم‌ها با توجه به نقاط قوت خود به‌ویژه در تشدید و متنوع سازی، ترکیبی می‌شوند. برای ارزیابی کارایی و اثربخشی این الگوریتم‌ها، آن‌ها با چهار معیار ارزیابی برای تجزیه و تحلیل بهینه پارتو با یکدیگر مقایسه می‌شوند. اگرچه نتایج حاکی از عملکرد سه الگوریتم هیبریداسیون جدید پیشنهادی است، KAGA در مقایسه با سایرین راه‌حل‌های بهتری به دست می‌آورد، اما به زمان بیشتری نیاز دارد و در پایان، یک نمونه صنعتی واقعی در صنعت شیشه را برای تأیید مدل پیشنهادی و الگوریتم‌ها معرفی کرده است [۲۳]. جبار زاده و همکاران در طراحی یک مدل بهینه‌سازی تصادفی مستقل برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه کرده است که در صورت بروز اختلالات، به‌صورت انعطاف‌پذیر عمل می‌کند. مدل ارائه‌شده قادر به در نظر گرفتن تراپی جانبی به‌عنوان یک استراتژی واکنش برای مقابله با خطرات عملیاتی و اختلال است. هدف این است که تصمیمات مربوط به مکان تأسیسات و مقادیر حمل‌ونقل جانبی که حداقل هزینه زنجیره تأمین را در سناریوهای مختلف اختلال به حداقل می‌رساند، تعیین شود.

یک الگوریتم آزادسازی لاگرانژ برای حل کارآمد مدل استوار ایجاد شده است. بینش مهم مدیریتی از اجرای مدل در یک مطالعه موردی از صنعت شیشه به دست می آید [۲۴]. مردان و همکاران مقاله ی یک مدل ریاضی جامع برای زنجیره تأمین حلقه بسته سبز چند دوره، چند محصول، چند مدل و دو هدف را ارائه داده است که هدف از این مدل، به حداقل رساندن کل هزینه و انتشار گازهای محیطی از طریق تصمیم گیری در مورد مکان تأسیسات، مبلغ حمل و نقل و مانده موجودی می باشد. با توجه به پیچیدگی ذاتی مشکل و در نظر گرفتن مفروضات چند محصول، چند دوره و چند حالت کار را دشوار می کند و در مورد راه حل، الگوریتم تجزیه بندرز شتاب مؤثر اجرا شده است. سپس، نتایج محاسباتی برای مجموعه ای از مثال های عددی مورد بحث قرار گرفته است. سپس، یک تحلیل حساسیت در تلاش برای اعتبارسنجی مدل انجام شده است. نتایج نشان می دهد که رویکرد راه حل پیشنهادی منجر به کاهش بیش از ۱۳ درصد کل هزینه موردی شده و حتی می تواند برای کاربردهای صنعتی بزرگ تر و پیچیده تر در دنیای واقعی مورد استفاده قرار گیرد [۲۵]. یادگاری و همکاران یک بررسی، برای بهبود استراتژی هایی برای پیکربندی هم زمان زنجیره های عرضه و روبه جلو، یک الگوریتم ممتیک (MA) با روش رمز گذاری/ رمز گشایی مبتنی بر اولویت (EPb) مبتنی بر یک استراتژی جستجوی انعطاف پذیر محله ترکیبی (NS) ارائه داده است. علاوه بر این، برای جلوگیری از فرآیند تعمیر وقت گیر در نمایندگی محلول گسسته، روشی برای تبدیل نمایندگی گسسته به روش مداوم ارائه داده است و سرانجام، برای سرعت بخشیدن به الگوریتم پیشنهادی، باز پخت شبیه سازی چند مرحله ای (MSA) در MA تعبیه شده است. نتایج ابتدا با حلال های تجاری مقایسه شده و سپس با سایر الگوریتم های ژنتیکی (GA) و کارشناسی ارشد موجود در ادبیات با روش های مختلف رمز گذاری/ رمز گشایی و عملگرها مقایسه شده است. همه الگوریتم ها برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته (CLSCND) که به مکان یابی امکانات و همچنین اختصاص جریان محصول و هزینه های موجودی در یک محیط چند دوره ای می پردازد، کاربرد دارند. نتایج نشان دهنده کیفیت بالای HMA پیشنهادی است [۲۶].

۵. تعریف مسئله و مدل سازی

در این بخش از مقاله به ارائه مدل سازی شبکه زنجیره تأمین پیشنهادی تحت عدم قطعیت پرداخته شده است. از این رو ابتدا به تعریف مسئله و بیان آن پرداخته شده و در ادامه با تعریف مجموعه، پارامترها و متغیرهای تصمیم گیری، به مدل سازی غیرقطعی شبکه زنجیره تأمین پرداخته شده است. در انتها با استفاده از روش بهینه سازی استوار فازی به کنترل پارامترهای غیرقطعی پرداخته شده و مسائل بیان شده می توان شبکه زنجیره تأمین مورد مطالعه را به صورت شکل (۱) مطرح نمود.



شکل ۱. شبکه زنجیره تأمین مورد مطالعه

در این مقاله، هدف ارائه یک مدل دوسطحی انتخاب تأمین کننده و طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار می باشد. همان طور که بیان شد، انتخاب تأمین کننده جزو تصمیمات استراتژیک هر شبکه زنجیره تأمین می باشد. در این مقاله و در سطح اول مدل سازی هدف اولویت بندی و انتخاب تأمین کننده ها جهت تأمین مواد اولیه می باشد. لذا جهت انتخاب تأمین کننده ها از نظریه اعداد D که توسط دمپستر و شافر [۸] معرفی گردیده است، استفاده می شود. در این روش چندین معیار از جمله (هزینه پایین مواد، تأمین به موقع محصولات، کیفیت بالای محصولات و غیره) برای هر تأمین کننده استخراج و توسط نخبگان هر صنعت امتیازدهی می شود. ارجحیت این روش نسب به روش هایی نظیر تاپسیس، ویکور و غیره این است که نخبگان شاید امتیاز کاملی به هر تأمین کننده نداده باشند (اطلاعات ناقص در اختیار محقق قرار دهند). از این رو روش اعداد D توانایی محاسبه و اولویت بندی گزینه ها را با اطلاعات ناقص ارائه شده توسط نخبگان دارد. در نتیجه در مرحله اول مدل سازی کلیه تأمین کنندگان توسط نخبگان بر اساس معیارهای معرفی شده امتیازدهی خواهند شد و با استفاده از نظریه اعداد D به اولویت دهی تأمین کنندگان و در نهایت انتخاب تأمین کنندگان واجد شرایط برای تأمین مواد اولیه شبکه زنجیره تأمین برگزیده خواهند شد. در مرحله دوم از مسئله به مدل سازی یک شبکه زنجیره تأمین پایدار تحت عدم قطعیت تقاضا و هزینه حمل و نقل پرداخته شده است. در این مرحله هدف اصلی تأمین تقاضای غیرقطعی مشتریان از هر محصول می باشد. با توجه به غیرقطعی بودن تقاضای مشتریان، برنامه ریزی تولید، انبارش، نحوه صحیح انتقال محصولات و غیره تحت الشعاع قرار می گیرد. لذا بایستی با ابزارهای مناسب نسبت به کنترل این پارامتر حساس پرداخته شود. روش بهینه سازی استوار امکانی [۹] از جمله جدیدترین روش های کنترل پارامترهای غیرقطعی مسئله می باشد. در این مرحله متغیرهای تصمیم گیری نظیر نحوه حمل و نقل محصولات با ناوگان مناسب، مسیریابی وسیله نقلیه، نحوه انبارش و توزیع محصولات مدنظر بوده و بایستی با توجه به اهداف مسئله، مقداردهی شوند. از آنجایی که در این مقاله نوع خاصی از شبکه زنجیره تأمین، یعنی شبکه زنجیره تأمین پایدار مدنظر می باشد، لذا متناظر با نوع شبکه انتخاب شده توابع هدف مسئله به صورت زیر قابل بیان است:

- الف- کاهش هزینه های کل شبکه شامل (هزینه های مکان یابی مراکز تولیدی، هزینه های استفاده از نوع تکنولوژی تولید، هزینه های انبارش محصولات در مراکز توزیع اصلی، هزینه توزیع محصولات در مراکز توزیع فرعی و هزینه های مرتبط با حمل و نقل) می باشد،
 - ب- کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه ای به سبب استفاده از نوع تکنولوژی تولید در مراکز تولیدی و نحوه صحیح توزیع محصولات با ناوگان حمل و نقل،
 - ج- بیشینه سازی مسئولیت های اجتماعی به سبب احداث مراکز تولیدی بیشتر.
- لذا با توجه به مفروضات زیر مدل شبکه زنجیره تأمین قابل مدل سازی خواهد بود:

- الف- توابع هدف این مدل شامل ۱- کاهش هزینه‌های کل شبکه، ۲- کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و ۳- بیشینه‌سازی مسئولیت‌های اجتماعی،
 ب- تقاضای مشتریان به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است،
 ج- سطوح شبکه زنجیره تأمین، شامل تأمین‌کننده‌ها، مراکز تولیدی، مراکز توزیع‌کننده اصلی و محلی و مشتریان خواهد بود،
 د- مکان مشتریان، مراکز توزیع اصلی و محلی ثابت می‌باشد،
 ه- کنترل پارامترهای غیرقطعی با روش برنامه‌ریزی فازی استوار صورت می‌پذیرد، و
 و- کمبود مجاز نبوده و بایستی تمامی تقاضای مشتریان پاسخ داده شود.

۶. مدل‌سازی مسئله در شرایط عدم قطعیت

مجموعه‌ها:

$I = \{1, \dots, I\}$	مجموعه تأمین‌کننده‌ها	I
$J = \{1, \dots, J\}$	مجموعه مراکز تولیدی	J
$K = \{1, \dots, K\}$	مجموعه مراکز توزیع‌کننده اصلی	K
$L = \{1, \dots, L\}$	مجموعه مراکز توزیع‌کننده محلی	L
$C = \{1, \dots, C\}$	مجموعه مشتریان نهایی	C
$N = \{1, \dots, N\}$	مجموعه تکنولوژی تولید	N
$P = \{1, \dots, P\}$	مجموعه محصولات	P
$M = \{1, \dots, M\}$	مجموعه مواد اولیه	M
$T = \{1, \dots, T\}$	مجموعه دوره زمانی	T
$V = \{1, \dots, V\}$	مجموعه وسایل نقلیه	V

پارامترها:

هزینه تأسیس مرکز توزیع‌کننده محلی l	$FixL_l$
هزینه تأسیس مرکز توزیع‌کننده اصلی k	$FixK_k$
هزینه انتخاب تأمین‌کننده i	$FixI_i$
هزینه تأسیس مرکز تولیدکننده j با سطح تکنولوژی n	$FixJ_{jn}$
هزینه ثابت استفاده از وسیله نقلیه v	$FixV_v$
هزینه حمل‌ونقل به ازای هر واحد محصول p بین توزیع‌کننده اصلی k و توزیع‌کننده محلی l در دوره زمانی t	\bar{Tr}_{klpt}
هزینه حمل‌ونقل بین مراکز توزیع‌کننده محلی l و مشتری c $l, c \in LUC$	\bar{Tr}_{lc}
هزینه حمل‌ونقل به ازای هر واحد محصول p بین مرکز تولیدکننده j و توزیع‌کننده اصلی k در دوره زمانی t	\bar{Tr}_{jkpt}
هزینه حمل‌ونقل به ازای هر واحد محصول p بین مراکز توزیع‌کننده اصلی k و k' در دوره زمانی t	$\bar{Tr}_{kk'pt}$
هزینه حمل‌ونقل به ازای هر واحد ماده اولیه m بین مرکز تأمین‌کننده i و مرکز تولیدکننده j در دوره زمانی t	\bar{Tr}_{ijmt}
میزان انتشار گاز CO_2 به ازای هر واحد محصول بین توزیع‌کننده اصلی k و توزیع‌کننده محلی l	$Co2_{kl}$
میزان انتشار گاز CO_2 بین مراکز توزیع‌کننده محلی l و مشتری c $l, c \in LUC$	$Co2_{lc}$
میزان انتشار گاز CO_2 به ازای هر واحد محصول بین مرکز تولیدکننده j و توزیع‌کننده اصلی k	$Co2_{jk}$
میزان انتشار گاز CO_2 به ازای هر واحد محصول بین مراکز توزیع‌کننده اصلی k و k'	$Co2_{kk'}$
میزان انتشار گاز CO_2 به ازای هر واحد ماده اولیه بین مرکز تأمین‌کننده i و مرکز تولیدکننده j	$Co2_{ij}$
تعداد افراد استخدام‌شده به ازای تأسیس مرکز توزیع‌کننده محلی l	NL_l
تعداد افراد استخدام‌شده به ازای تأسیس مرکز توزیع‌کننده اصلی k	NK_k
تعداد افراد استخدام‌شده به ازای تأسیس تأمین‌کننده i	NI_i
تعداد افراد استخدام‌شده به ازای تأسیس مرکز تولیدکننده j	NJ_j
هزینه توزیع به ازای یک واحد محصول p توسط مرکز توزیع‌کننده محلی l	C_{lp}
هزینه توزیع به ازای یک واحد محصول p توسط مرکز توزیع‌کننده اصلی k	C_{kp}
هزینه تولید به ازای یک واحد محصول p توسط مرکز تولیدکننده j	C_{jp}
هزینه تأمین به ازای یک واحد ماده اولیه m توسط تأمین‌کننده i	C_{im}
مقدار تقاضای مشتری c از محصول p در دوره زمانی t	\bar{Dem}_{cpt}

حداکثر ظرفیت مرکز توزیع‌کننده محلی l از محصول p	$capL_{lp}$
حداکثر ظرفیت مرکز توزیع‌کننده اصلی k از محصول p	$capK_{kp}$
حداکثر ظرفیت مرکز تولیدکننده j از محصول p	$capJ_{jp}$
حداکثر ظرفیت تأمین‌کننده i از ماده اولیه m	$capI_{im}$
ظرفیت وسیله نقلیه v	$capV_v$
هزینه نگهداری محصول p در مرکز توزیع‌کننده اصلی k در انتهای دوره زمانی t	h_{kpt}
مقدار ماده اولیه m موردنیاز برای تولید یک محصول نهایی p	ξ_{mp}

متغیرهای تصمیم:

مقدار محصول انتقال‌یافته p بین توزیع‌کننده اصلی k و توزیع‌کننده محلی l در دوره زمانی t	U_{klpt}
مقدار محصول انتقال‌یافته p بین مرکز تولیدکننده j و توزیع‌کننده اصلی k در دوره زمانی t	W_{jkpt}
مقدار ماده اولیه انتقال‌یافته m بین تأمین‌کننده i و مرکز تولیدکننده j در دوره زمانی t	X_{ijmt}
مقدار محصول انتقال‌یافته p بین مراکز توزیع‌کننده اصلی k و k' در دوره زمانی t	$N_{kk'pt}$
کل مقدار محصول p توزیع‌شده توسط مرکز توزیع‌کننده محلی l در دوره زمانی t	V'_{lpt}
در صورتی که مرکز توزیع‌کننده محلی l تأسیس گردد، مقدار 1 و در غیر این صورت 0 می‌گیرد.	Y_l
در صورتی که مرکز توزیع‌کننده اصلی k تأسیس گردد، مقدار 1 و در غیر این صورت 0 می‌گیرد.	Y_k
در صورتی که مرکز تولیدکننده j تأسیس گردد، مقدار 1 و در غیر این صورت 0 می‌گیرد.	Y_j
در صورتی که تأمین‌کننده i انتخاب گردد، مقدار 1 و در غیر این صورت 0 می‌گیرد.	Y_i
در صورتی که مشتری C به مرکز توزیع محلی l در دوره زمانی t تخصیص یابد، مقدار 1 و در غیر این صورت 0 می‌گیرد.	Z'_{lct}
در صورتی که مشتری C بعد از مرکز توزیع‌کننده محلی l توسط وسیله نقلیه v در دوره زمانی t بازدید شود، مقدار 1 و در غیر این صورت 0 می‌گیرد.	Z_{lcv}
	$l, c \in LUC$
متغیر کمکی برای محدودیت حذف زیر تور	U_{cvt}
مقدار محصول ذخیره‌شده در انبار مرکز توزیع‌کننده اصلی k از محصول p در انتهای دوره زمانی t	Q_{kpt}

۷. مدل‌سازی شبکه چندهدفه زنجیره تأمین

با توجه به ذات پویا و نوسانی برخی از پارامترهای مهم (از جمله هزینه‌های حمل‌ونقل و تقاضا) که تعیین آن‌ها مافوق برنامه‌ریزی است و همچنین در دسترس نبودن و حتی غیرقابل حصول بودن داده‌های تاریخی موردنیاز در مرحله طراحی، این پارامترها عمدتاً با تکیه بر نظرات و تجارب ذهنی کارشناسان تخمین زده می‌شود؛ بنابراین، پارامترهای مبهم فوق به‌عنوان داده غیرقطعی در قالب اعداد فازی ذوزنقه‌ای به شرح زیر فرموله شده است:

$$\begin{aligned} \bar{Tr}_{lc} &= (Tr_{lc}^1, Tr_{lc}^2, Tr_{lc}^3, Tr_{lc}^4) \\ \bar{Tr}_{klpt} &= (Tr_{klpt}^1, Tr_{klpt}^2, Tr_{klpt}^3, Tr_{klpt}^4) \\ \bar{Tr}_{kk'pt} &= (Tr_{kk'pt}^1, Tr_{kk'pt}^2, Tr_{kk'pt}^3, Tr_{kk'pt}^4) \\ \bar{Tr}_{jkpt} &= (Tr_{jkpt}^1, Tr_{jkpt}^2, Tr_{jkpt}^3, Tr_{jkpt}^4) \\ \bar{Tr}_{ijmt} &= (Tr_{ijmt}^1, Tr_{ijmt}^2, Tr_{ijmt}^3, Tr_{ijmt}^4) \\ \bar{Dem}_{cpt} &= (Dem_{cpt}^1, Dem_{cpt}^2, Dem_{cpt}^3, Dem_{cpt}^4) \end{aligned}$$

شایان‌ذکر است که برای تصمیم‌گیری‌های بلندمدت، ارزیابی هزینه حمل‌ونقل و تقاضا، سخت و حتی گاهی غیرممکن است. حتی اگر یک نفر بتواند یک تابع توزیع احتمالی برای این پارامترها را برآورد کند، ممکن است که این پارامترها رفتار مشابهی با داده‌های گذشته نداشته باشند. لذا این پارامترها که در یک افق برنامه‌ریزی بلندمدت تغییر می‌کند به‌عنوان داده‌های فازی در نظر گرفته شده است. با توجه به بیان مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم بیان شده، مسئله طراحی شبکه چندهدفه زنجیره تأمین به‌عنوان یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی عدد صحیح مختلط به‌صورت ذیل مدل‌سازی می‌شود:

$$Min \omega_1 = E[\omega] + \xi(f_{(\max)} - E[\omega]) + \quad (12)$$

$$\eta \sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T (Dem_{cpt}^4 - Dem_{cpt}^3 - \alpha(Dem_{cpt}^4 - Dem_{cpt}^3))$$

$$Min \omega_2 = \sum_{c=1}^{LUC} \sum_{l=1}^{LUC} \sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T Co2_{lc} Z_{lcv} + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T Co2_{kl} U_{klpt} + \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T Co2_{jk} W_{jkpt} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T Co2_{ij} X_{ijmt} + \sum_{k=1}^K \sum_{k'=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T Co2_{kk'} N_{kk'pt} \quad (14)$$

$$Max \omega_3 = \sum_{l=1}^L NL_l Y_l + \sum_{k=1}^K NK_k Y_k + \sum_{i=1}^I NI_i Y_i + \sum_{j=1}^J NJ_j Y_j$$

s. t.:

$$E[\omega] = \sum_{l=1}^L FixL_l Y_l + \sum_{k=1}^K FixK_k Y_k + \sum_{i=1}^I FixI_i Y_i + \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N FixJ_{jn} Y_{jn} + \sum_{c=1}^{LUC} \sum_{l=1}^{LUC} \sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T \left(\frac{Tr_{lc}^1 + Tr_{lc}^2 + Tr_{lc}^3 + Tr_{lc}^4}{4} \right) Z_{lcvt} + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \left(\frac{Tr_{klpt}^1 + Tr_{klpt}^2 + Tr_{klpt}^3 + Tr_{klpt}^4}{4} \right) U_{klpt} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \left(\frac{Tr_{jkpt}^1 + Tr_{jkpt}^2 + Tr_{jkpt}^3 + Tr_{jkpt}^4}{4} \right) W_{jkpt} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \left(\frac{Tr_{ijmt}^1 + Tr_{ijmt}^2 + Tr_{ijmt}^3 + Tr_{ijmt}^4}{4} \right) X_{ijmt} + \sum_{k=1}^K \sum_{k'=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \left(\frac{Tr_{kk'pt}^1 + Tr_{kk'pt}^2 + Tr_{kk'pt}^3 + Tr_{kk'pt}^4}{4} \right) N_{kk'pt} + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T C_{lp} V'_{lpt} + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T C_{kp} U_{klpt} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T C_{jp} W_{jkpt} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T C_{im} X_{ijmt} + \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T h_{kpt} Q_{kpt} + \sum_{l=1}^L \sum_{c=1}^C \sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T FixV_v Z_{lcvt} \quad (15)$$

$$f(\max) = \sum_{l=1}^L FixL_l Y_l + \sum_{k=1}^K FixK_k Y_k + \sum_{i=1}^I FixI_i Y_i + \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N FixJ_{jn} Y_{jn} + \sum_{c=1}^{LUC} \sum_{l=1}^{LUC} \sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T Tr_{lc}^4 Z_{lcvt} + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T Tr_{klpt}^4 U_{klpt} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T Tr_{jkpt}^4 W_{jkpt} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T Tr_{ijmt}^4 X_{ijmt} + \sum_{k=1}^K \sum_{k'=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T Tr_{kk'pt}^4 N_{kk'pt} + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T C_{lp} V'_{lpt} + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T C_{kp} U_{klpt} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T C_{jp} W_{jkpt} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T C_{im} X_{ijmt} + \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T h_{kpt} Q_{kpt} + \sum_{l=1}^L \sum_{c=1}^C \sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T FixV_v Z_{lcvt} \quad (16)$$

$$V'_{lpt} = \sum_{c=1}^C \left((1-\alpha)Dem_{kpt}^3 + \alpha Dem_{kpt}^4 \right) Z'_{lct}, \quad \forall l, p, t \quad (17)$$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{c=1}^{CUL} Z_{lcv} = 1, \quad \forall c, t \quad (18)$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \left((1-\alpha)Dem_{kpt}^3 + \alpha Dem_{kpt}^4 \right) Z_{lcv} \leq capV_v, \quad \forall v, t \quad (19)$$

$$U_{avt} - U_{cvt} + |C|.Z_{acvt} \leq |C| - 1, \quad \forall a, c \in C, v, t \quad (20)$$

$$\sum_{c=1}^{CUL} Z_{lcv} = \sum_{c=1}^{CUL} Z_{clv}, \quad \forall v, t, l \in C \cup L \quad (21)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{c=1}^C Z_{lcv} \leq 1, \quad \forall v, t \quad (22)$$

$$-Z'_{lct} + \sum_{u=1}^K (Z_{luvt} + Z_{ucvt}) \leq 1, \quad \forall l, c, v, t \quad (23)$$

$$V'_{lpt} = \sum_{k=1}^K U_{klpt}, \quad \forall l, p, t \quad (24)$$

$$\sum_{l=1}^L U_{klpt} = \sum_{j=1}^J W_{jkpt} + \sum_{k'=1}^K N_{k'kpt} - \sum_{k'=1}^K N_{kk'pt} + Q_{kpt-1} - Q_{kpt}, \quad \forall k, p, t \quad (25)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \xi_{mp} W_{jkpt} = \sum_{i=1}^I X_{ijmt}, \quad \forall j, m, t \quad (26)$$

$$V'_{lpt} \leq capL_{lp} Y_l, \quad \forall l, p, t \quad (27)$$

$$\sum_{j=1}^J W_{jkpt} + \sum_{k'=1}^K N_{k'kpt} \leq capK_{kp} Y_k, \quad \forall k, p, t \quad (28)$$

$$\sum_{k=1}^K W_{jkpt} \leq \sum_{n=1}^N capK_{jp} Y_{jn}, \quad \forall j, p, t \quad (29)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{ijmt} \leq capI_{im} Y_i, \quad \forall i, m, t \quad (30)$$

$$\sum_{n=1}^N Y_{jn} \leq 1, \quad \forall j \quad (31)$$

$$U_{klpt}, W_{jkpt}, X_{ijmt}, N_{kk'pt}, V'_{lpt}, U_{cvt}, Q_{kpt} \geq 0 \quad (32)$$

$$Y_i, Y_{jn}, Y_k, Y_l, Z'_{lct}, Z_{ckvt} \in \{0,1\} \quad (33)$$

در تابع هدف اول رابطه (۱۲)، عبارت اول به مقدار مورد انتظار تابع هدف اول با استفاده از مقادیر متوسط پارامترهای غیرقطعی مدل اشاره دارد. عبارت دوم به هزینه جریمه برای انحراف بیش از مقدار مورد انتظار تابع هدف اول (استواری بهینگی) اشاره می‌کند. جمله سوم نیز هزینه کل جریمه انحراف از تقاضا (پارامتر غیرقطعی) را نشان می‌دهد. از این رو، پارامتر ξ ضریب وزنی تابع هدف، η هزینه جریمه عدم برآورد تقاضا می‌باشد. پارامتر α به عنوان ضرایب تصحیح در مقدار سطوح فازی اعداد را نشان می‌دهد که بایستی عددی مابین ۰،۵ و ۱ باشد. رابطه (۱۳) تابع هدف دوم مسئله را نشان می‌دهد و شامل کمیته‌سازی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از انتقال محصولات و مواد اولیه بین سطوح مختلف شبکه زنجیره تأمین است. رابطه (۱۴) به پیشینه‌سازی نرخ استخدام به ازای تأسیس مراکز بالقوه جدید می‌پردازد. رابطه (۱۵) و (۱۶) میانگین و پیشینه مقدار تابع هدف مسئله را نشان می‌دهد و شامل کمیته‌سازی مقدار کل هزینه‌های شبکه

زنجیره تأمین می‌باشد. هزینه‌های کل شبکه زنجیره تأمین، ترکیبی از هزینه‌های تأسیس مراکز بالقوه، هزینه‌های حمل‌ونقل، هزینه‌های عملیاتی و هزینه‌های نگهداری محصولات می‌باشد. رابطه (۱۷) کل میزان محصولات توزیع شده توسط هر مرکز توزیع‌کننده محلی را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۸) تضمین می‌کند هر مرکز توزیع‌کننده محلی تنها به یک مشتری می‌تواند تخصیص پیدا کند. محدودیت (۱۹) حداکثر ظرفیت حمل‌ونقل محصولات را توسط وسیله نقلیه در دسترس نشان می‌دهد. محدودیت (۲۰) محدودیت مربوط به حذف زیر تور می‌باشد. محدودیت (۲۱) تضمین می‌کند وسیله نقلیه تنها یک‌بار می‌تواند به هر خوشه مشتری وارد و از آن خارج شود. محدودیت (۲۲) و (۲۳) تضمین می‌کند که نقاط ابتدا و انتهای مسیریابی وسیله نقلیه در توزیع محصولات به مشتریان، مراکز توزیع‌کننده محلی می‌باشد. رابطه (۲۴) مقدار محصول انتقال یافته از مرکز توزیع‌کننده اصلی به مرکز توزیع‌کننده محلی را نشان می‌دهد. رابطه (۲۵) رابطه تعادل در مرکز توزیع‌کننده اصلی را نشان می‌دهد و همچنین مقدار موجودی انباشته شده در انتهای هر دوره زمانی در این رابطه قابل مشاهده است. رابطه (۲۶) مقدار مواد اولیه موردنیاز برای تولید محصولات جدید را نشان می‌دهد که بایستی توسط تأمین‌کننده‌ها تأمین گردد. رابطه (۲۷) ظرفیت مرکز توزیع‌کننده محلی را نشان می‌دهد. رابطه (۲۸) ظرفیت توزیع‌کننده اصلی را نشان می‌دهد. رابطه (۲۹) ظرفیت تولید محصولات جدید در مرکز تولید را نشان می‌دهد. رابطه (۳۰) ظرفیت تأمین‌کننده‌ها از تأمین مواد اولیه را نشان می‌دهد. رابطه (۳۱) نشان می‌دهد که هر مرکز تولیدی حداکثر از یک سطح تکنولوژی می‌تواند استفاده کند. رابطه (۳۲) و (۳۳) نیز نوع و جنس متغیرهای تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد.

۸. روش حل

در این بخش به بیان مبانی نظری الگوریتم‌های فرا ابتکاری MOALO و MOPSO، NSGA II و همچنین طراحی کروموزوم اولیه مسئله پرداخته شده است. در انتهای این بخش نیز شاخص‌های مقایسه الگوریتم‌های فرا ابتکاری ذکر شده است.

۱.۱. الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نا مغلوب (NSGA II)

الگوریتم ژنتیک با ایجاد تصادفی یک جمعیت اولیه از کروموزوم‌ها شروع می‌شود، درحالی‌که حدود یا محدودیت‌های مسئله را ارضا می‌کنند. به عبارت دیگر، کروموزوم‌ها رشته‌هایی از مقادیر پیشنهادی برای متغیرهای تصمیم مسئله هستند و هر یک نمایانگر یک پاسخ محتمل برای مسئله هستند. کروموزوم‌ها از تکرارهای متوالی که نسل نامیده می‌شوند، استنتاج می‌شوند. در طول هر نسل، این کروموزوم‌ها با توجه به هدف بهینه‌سازی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و کروموزوم‌هایی که پاسخ بهتری برای مسئله مورد نظر محسوب می‌شوند، شانس بیشتری برای تولید مجدد جواب‌های مسئله پیدا می‌کنند. فرموله نمودن تابع ارزیابی کروموزوم‌ها به نحوی که بر سرعت همگرایی محاسبات به سمت جواب بهینه عمومی کمک کند، حائز اهمیت زیادی است. چراکه در الگوریتم ژنتیک برای هر کروموزوم بایستی مقدار تابع ارزیابی محاسبه شود و معمولاً در بسیاری از مسائل با تعداد قابل ملاحظه‌ای از کروموزوم‌ها مواجه هستیم، زمان‌بر بودن محاسبه تابع ارزیابی می‌تواند عملاً استفاده از الگوریتم ژنتیک را در برخی از مسائل به لحاظ کاربردی غیرممکن سازد؛ بنابراین، بر اساس مقادیر به دست آمده تابع هدف در جمعیت رشته‌ها، به هر رشته یک عدد برازندگی نسبت داده می‌شود. این عدد برازندگی احتمال انتخاب را برای هر رشته تعیین خواهد کرد. بر اساس این احتمال انتخاب، ابتدا مجموعه‌ای از رشته‌ها انتخاب می‌شوند. برای تولید نسل بعدی کروموزوم‌های جدید که فرزند نامیده می‌شوند از طریق پیوند دو کروموزوم از نسل کنونی با استفاده از عملگر ترکیب یا از طریق اصلاح کروموزوم با استفاده از عملگر جهش ایجاد می‌شوند. پس رشته‌های جدید جایگزین رشته‌هایی از جمعیت اولیه می‌شوند تا تعداد جمعیت رشته‌ها در تکرارهای محاسباتی مختلف ثابت باشد. مکانیزه‌ای تصادفی که روی انتخاب و حذف رشته‌ها عمل می‌کنند به گونه‌ای هستند که رشته‌هایی که برازندگی بیشتری دارند، احتمال بیشتری برای ترکیب و تولید رشته‌های جدید داشته و در مرحله جایگزینی نسبت به دیگر رشته‌ها مقاوم‌تر هستند. بدین لحاظ جمعیت دنباله‌ها در یک رقابت بر اساس تابع هدف در طی نسل‌های مختلف، کامل شده و توسط مقدار تابع هدف در جمعیت رشته‌ها افزایش می‌یابد، به طوری که بعد از چندین سال، الگوریتم به سمت بهترین کروموزوم همگرا می‌شود که به طور امیدوارانه نشان‌دهنده حل بهینه یا زیر بهینه برای مسئله مورد نظر است. به طور کلی در این الگوریتم ضمن آنکه در هر تکرار محاسباتی، توسط عملگرهای ژنتیکی نقاط جدیدی از فضای جواب مورد جستجو قرار می‌گیرند توسط مکانیسم انتخاب، روند جستجوی نواحی از فضایی را که متوسط آماری تابع هدف در آن‌ها بیشتر است، کنکاش می‌کند. معمولاً جمعیت جدید که جایگزین جمعیت پیشین می‌شود برازندگی بیشتری دارد. این بدان معناست که از نسلی به نسل دیگر جمعیت بهبود می‌یابد. هنگامی جستجو نتیجه‌بخش خواهد بود که به حداکثر نسل ممکن رسیده باشیم یا همگرایی حاصل شده باشد یا معیارهای توقف برآورده شده باشد و در نتیجه بهترین کروموزوم به دست آمده از آخرین نسل به عنوان حل بهینه تخمینی یا حل بهینه برای مسئله انتخاب می‌شود. در کاربرد الگوریتم ژنتیک چندین موضوع باید در نظر گرفته شود. اول در مورد ژن‌هایی که نشان‌دهنده حل‌های مسئله هستند باید تصمیم‌گیری شود (کد کردن). دوم، تابع برازندگی برای ارزیابی حل باید معین شود. سوم، عملگرهای ژنتیک مانند عملگرهای جهش و ترکیب و روش‌های انتخاب باید طراحی شوند. چهارم، روش تولید جمعیت نسل جدید باید معلوم شود. سرانجام موضوعی که برای کاربرد این الگوریتم در مسائل بهینه‌سازی محدودیت‌دار بسیار لازم است، اینکه چطور با محدودیت‌ها رفتار کنیم، به دلیل اینکه عملگرهای ژنتیک با دست‌کاری کردن کروموزوم‌ها معمولاً منجر به تولید فرزندان نشدنی (غیرموجه) می‌شوند؛ در ادامه به بررسی این موارد پرداخته شده است [۲۷].

۲.۱. الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات (MOPSO)

اولین بار کندی و ابرهارت [۲۸] با الگوبرداری از حرکت پرندگان در هوا و با کشف رابطه منطقی بین تغییر جهت و سرعت پرندگان و با استفاده از دانش فیزیک روش پیشنهادی به نام حرکت ذرات را ارائه نمودند. این دانشمندان چندی بعد در مقالات خود متوجه وابستگی این حرکات به یکدیگر شدند و دریافتند که حرکت یک پرند ناشی از اطلاعاتی است که از پرندگان اطراف خود دریافت می‌کنند از این رو روش ارائه شده را تکمیل کرده و نام آن را حرکت ازدحامی گذاشتند. به طور کلی الگوریتم حرکت تجمعی ذرات شباهت‌های زیادی را با الگوریتم‌هایی نظیر مورچگان یا ژنتیک دارد، اما تفاوت‌های جدی نیز با آن‌ها دارد که

باعث تمایز و سادگی این الگوریتم می‌شود. به‌عنوان نمونه این الگوریتم از عملگرهایی نظیر تقاطع و جهش استفاده نمی‌کند در نتیجه آن این الگوریتم نیاز به استفاده از رشته‌های اعداد و مرحله رمزخوانی ندارد در نتیجه بسیار ساده‌تر از الگوریتم‌هایی نظیر ژنتیک است. این الگوریتم فضای حل را با استفاده از یک تابع شبه احتمالی به مسیریابی چندتکه تقسیم می‌کند که این مسیرها در اثر حرکت ذرات انفرادی در فضا تشکیل می‌شوند. حرکت یک گروه از ذرات از دو جز قطعی و احتمالی تشکیل می‌شود. هر ذره علاقه‌منداست در جهت بهترین جواب جاری X^* یا بهترین جواب به‌دست‌آمده تاکنون g^* حرکت کند. فرایند الگوریتم MOPSO به شرح گام‌های زیر می‌باشد:

الف- ایجاد جمعیت اولیه

ب) جدا کردن اعضای نامغلوب جمعیت و ذخیره کردن آن‌ها در آرشیو یا مخزن خارجی

ج) جدول‌بندی فضای هدف کشف‌شده

د) هر ذره از میان اعضای آرشیو یک رهبر انتخاب می‌کند.

ه) به‌روزرسانی سرعت و موقعیت ذرات

هر ذره، اطلاعاتی شامل بهترین مقداری که تاکنون به آن رسیده (بهینه شخصی) و موقعیت X_t را دارا است. این اطلاعات، حاصل مقایسه تلاش‌هایی است که هر ذره برای یافتن بهترین جواب انجام می‌دهد. همچنین هر ذره بهترین جوابی را که تاکنون در کل گروه به‌دست‌آمده است، از مقایسه مقادیر بهینه ذرات مختلف می‌شناسد (بهینه فراگیر) هر ذره برای رسیدن به بهترین جواب سعی می‌کند موقعیت خود را با استفاده از اطلاعات زیر تغییر دهد:

الف- X_t موقعیت کنونی،

ب- V_t سرعت کنونی،

ج- فاصله بین موقعیت کنونی و بهینه شخصی، و

د- فاصله بین موقعیت کنونی و بهینه فراگیر.

بدین ترتیب سرعت هر ذره و به‌تبع آن موقعیت جدید آن به‌صورت روابط (۳۴) و (۳۵) تغییر می‌کند.

$$V_i^{t+1} = wV_i^t + c_1 \text{rand}(pbest_i - X_i^t) + c_2 \text{rand}(gbest_i - X_i^t) \quad (34)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (35)$$

که در آن سرعت V_i^{t+1} سرعت ذره i در تکرار جدید t ، V_i^t سرعت ذره i در تکرار فعلی t ، X_i^{t+1} موقعیت کنونی ذره $t+1$ ، X_i^t موقعیت ذره در تکرار جدید، $pbest_i$ بهترین موقعیتی که ذره i تاکنون اختیار کرده است و $gbest_i$ بهترین موقعیت بهترین ذره (بهترین موقعیتی که تمام ذرات تاکنون اختیار کرده‌اند) است. $Rand$ یک عدد تصادفی بین صفر و یک است که برای حفظ تنوع و گوناگونی گروه بکار می‌رود. C_1 و C_2 به ترتیب پارامترهای شناختی و اجتماعی هستند. انتخاب مقدار مناسب برای این پارامترها منجر به تسریع همگرایی الگوریتم و جلوگیری از همگرایی زودرس در بهینه‌های محلی می‌شود. مقادیر اخیر نشان می‌دهد که انتخاب مقدار بزرگ‌تری برای پارامتر شناختی C_1 نسبت به پارامتر اجتماعی C_2 مناسب‌تر است. پارامتر w اینرسی وزنی نام دارد که برای تضمین همگرایی در دسته ذرات به کار می‌رود. اینرسی وزنی، جهت کنترل تأثیر سوابق سرعت‌های پیشین بر سرعت‌های جاری مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۹].

و) استفاده از عملگر جهش

ی) بهترین خاطره شخصی هر ذره به‌روز رسانی می‌شود.

ط) اعضای نامغلوب جدید را به آرشیو اضافه کرده و اعضای مغلوب آرشیو را حذف کنید.

ظ) جدول‌بندی را به‌روز رسانی کنید.

ع) در صورتی که برقراری شرایط توقف، الگوریتم متوقف می‌شود و بهترین ذره در بین ازدحام، جواب به‌دست‌آمده برای مسئله است. در غیر این صورت به گام چهارم بروید.

۳.۱. الگوریتم چندهدفه شیر مورچه (MOALO)

همانند سایر الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت، الگوریتم شیر مورچه راه‌حل‌های بهینه را برای مسائل بهینه‌سازی با اعمال مجموعه راه‌حل‌های تصادفی، تقریب می‌زند. این مجموعه بر اساس علوم الهام گرفته از تعامل بین مورچه‌ها و شیر مورچه ارتقاء می‌یابد. دو جمعیت در الگوریتم شیر مورچه وجود دارند: مجموعه مورچه‌ها و مجموعه شیر مورچه. مراحل کلی الگوریتم شیر مورچه برای تغییر این مجموعه‌ها و نهایتاً تخمین بهینگی کلی برای مسئله بهینه‌سازی موردنظر به شرح زیر می‌باشد [۳۰]:

الف- مجموعه مورچه با مقادیر تصادفی آغاز شده و عوامل اصلی جستجو در الگوریتم شیر مورچه می‌باشند،

ب- مقدار برازش هر مورچه با استفاده از تابع هدف در هر تکرار ارزیابی می‌شود،

ج- مورچه‌ها در فضای جستجو با استفاده از گام‌های تصادفی پیرامون شیر مورچه‌ها حرکت می‌کنند،

د- جمعیت شیر مورچه هرگز ارزیابی نمی‌شود. در واقع، شیر مورچه‌ها مکان مورچه‌ها در اولین تکرار فرض شده و به موقعیت جدید مورچه‌ها در تکرارهای باقیمانده جابجا می‌شوند، البته اگر مورچه‌ها بهتر شوند،

و- یک شیر مورچه به هر مورچه اختصاص یافته و موقعیت آن در صورت متناسب‌تر شدن مورچه بروز می‌شود،

ه- یک شیر مورچه برگزیده وجود دارد که صرف‌نظر از فاصله‌اش بر جابجایی مورچه‌ها تأثیر می‌گذارد،
 ی- اگر هر شیر مورچه‌ای بهتر از مورچه برگزیده باشد، جای آن را به‌عنوان مورچه برگزیده می‌گیرد،
 ط- مراحل (ب) تا (ی) تا جایی تکرار می‌شود که معیار نهایی به‌صورت رضایت بخشی رعایت گردد، و
 ظ- موقعیت و مقدار برازش شیر مورچه برگزیده به‌عنوان بهترین تخمین برای بهینگی جهانی بازگردانده می‌شود.

مسئولیت اصلی مورچه‌ها بررسی فضای جستجو است. آن‌ها می‌بایست با استفاده از گام تصادفی، در میان فضای جستجو جابجا شوند. شیر مورچه‌ها بهترین موقعیت حاصله از مورچه‌ها را حفظ کرده و جستجوی مورچه‌ها را به‌سوی مناطق نویدبخش از فضای جستجو هدایت می‌کنند. به‌منظور حل مسائل بهینه‌سازی، الگوریتم شیر مورچه از گام تصادفی مورچه‌ها، غوطه‌ور شدن در حفرة شیر مورچه، ساخت حفرة، حرکت مورچه به‌سوی شیر مورچه‌ها، گرفتن طعمه و بازسازی حفرة، و انتخاب برگزیده، تقلید می‌کند.

۴.۱. نحوه نمایش جواب و تولید جمعیت اولیه

در این مقاله با توجه به پیچیدگی بالای مدل پیشنهادی، از رمزگشایی جدید مبتنی بر اولویت که توسط جن و همکاران [۳۱] معرفی شده، استفاده شده است. در شکل (۲) رمزگذاری در یکی از سطوح شبکه زنجیره تأمین با ۳ مرکز توزیع و ۴ مرکز تقاضا ثابت نشان داده شده است، رمزگذاری بر اساس یک جایگشت از تعداد گره‌ها می‌باشد که در شکل (۲) به‌صورت (۲-۳-۵-۷-۴-۱-۶) نشان داده شده است که اولویت‌های (۷-۴-۱-۶) مربوط به مراکز تقاضای ثابت و (۳-۵-۲) مربوط به مرکز توزیع می‌باشد. برای رمزگشایی دو مرحله زیر بایستی طی شود:

مرحله ۱- ابتدا بزرگ‌ترین اولویت از بین مرکز توزیع انتخاب شده (اولویت ۵ مربوط به توزیع کننده دوم) و در صورتی که این توزیع کننده بتواند همه تقاضای مراکز مشتری را پاسخ دهد، اولویت بقیه مراکز توزیع به مقدار صفر کاهش پیدا می‌کند. در مثال شکل (۲) ظرفیت مرکز توزیع کننده ۲ برابر با ۹۵۰ می‌باشد، در صورتی که مجموع تقاضای مراکز مشتریان ثابت برابر ۱۳۰۰ است. در این صورت مرکز توزیع بعدی با بزرگ‌ترین اولویت بعدی (اولویت ۳ مربوط به مرکز توزیع کننده سوم) انتخاب می‌شود. حال مجموع ظرفیت دو مرکز توزیع (مقدار ۱۶۵۰) بزرگ‌تر از مجموع تقاضای مراکز مشتریان (مقدار ۱۳۰۰) می‌باشد. در این صورت تنها اولویت مرکز توزیع اول به صفر کاهش پیدا خواهد کرد.

مرحله ۲- پس از تعیین تعداد و مکان مراکز توزیع، تخصیص بهینه بین مراکز توزیع انتخاب شده و مراکز تقاضا صورت می‌گیرد. در این مرحله نیز بزرگ‌ترین اولویت (اولویت ۷ مربوط به مرکز تقاضای اول) انتخاب شده و کمترین هزینه حمل‌ونقل مربوط به این مشتری با مرکز توزیع انتخاب شده از مرحله اول شناسایی می‌شود (مرکز توزیع کننده سوم با هزینه ۱۵) و حداقل مقدار ظرفیت مرکز توزیع انتخاب شده و مشتری تعیین شده به‌عنوان مقدار بهینه تخصیص مشخص می‌شود. پس از به‌روزرسانی ظرفیت باقیمانده و یا تقاضای برآورده نشده، مقدار اولویت به صفر کاهش می‌یابد. تا زمانی که همه مقدار همه اولویت‌ها به صفر کاهش نیافته، مرحله دوم تکرار می‌شود.

گره	هزینه ثابت احداث	ظرفیت	تقاضا	هزینه حمل‌ونقل				
				گره	۱	۲	۳	۴
۱	۱۱۰۰۰	۸۰۰	۳۰۰	۱	۱۱	۱۹	۱۷	۱۸
۲	۹۰۰۰	۹۵۰	۳۵۰	۲	۱۶	۱۴	۱۸	۱۵
۳	۱۰۰۰۰	۷۰۰	۳۰۰	۳	۱۵	۱۶	۱۹	۱۳
۴	-	-	۳۵۰					

$v(K+J)$	گره	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۴
	اولویت	۲	۵	۳	۷	۴	۱	۶

↓

$v(K+J)$	گره	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۴
	اولویت	۰	۵	۳	۷	۴	۱	۶

شکل ۲. نحوه رمزگذاری و رمزگشایی مبتنی بر اولویت اصلاح شده

۵.۱. شاخص‌های مقایسه الگوریتم‌های فرا ابتکاری چندهدفه

فرض کنید مدل در معادله (۳۶) شامل سه هدف است که توسط سه الگوریتم مذکور حل و تعداد N جواب کارا توسط مدل کسب شده است. برای مقایسه اینکه کدام الگوریتم نسبت به دیگری کاربردی‌تر است شاخص‌هایی به شرح زیر معرفی شده است. فرض کنید مجموعه جواب‌های کارا به‌صورت زیر است:

$$(f_1^1, f_2^1), \dots, (f_1^n, f_2^n) \quad (36)$$

الف- شاخص بیشترین گسترش MSI

این شاخص توسط زیرتله، ارائه شده است. این معیار، گسترش فضای جواب‌های کارا را اندازه‌گیری می‌کند. هر قدر جواب‌های کارا در فضای گسترده‌تری پراکنده باشند این شاخص مقدار بزرگ‌تری خواهد داشت و هر قدر این مقدار بیشتر باشد، مناسب‌تر است. فرض کنید:

$$f_j^{max}$$

بزرگ‌ترین مقدار تابع هدف از نظر هدف J در بین جواب‌های کارا

این شاخص را با نماد D مشخص می‌کنیم و از رابطه (۳۷) محاسبه می‌شود.

$$D = \sqrt{\sum_{j=1}^k (f_j^{\max} - f_j^{\min})^2} \quad (37)$$

ب- شاخص تعداد جواب‌های کارا یا پارتو (NPF)

این شاخص نشان‌دهنده تعداد جواب‌های کارایی است که با استفاده از مدل قابل استخراج است. بدیهی است هر قدر این شاخص بیشتر باشد بهتر است. ج- زمان اجرای مدل (CPU-time)

این معیار مدت‌زمان اجرای مدل را برای رسیدن به جواب‌های کارا نشان می‌دهد. بدیهی است هر چه این معیار کمتر باشد مناسب‌تر است. د- شاخص فاصله‌گذاری (SI)

این معیار نحوه پراکندگی و توزیع جواب‌های پارتو یا همان جواب‌های کارا را نشان می‌دهد. جواب (f_1^i, f_2^i) را در نظر بگیرید، فاصله پلکانی این جواب را با تک‌تک جواب‌های دیگر محاسبه کنید، سپس حداقل آن‌ها را به عنوان d_i در نظر بگیرید، به صورت رابطه (۳۸):

$$d_i = \min_{j=1, \dots, n, j \neq i} \left(\sum_{k=1}^2 |f_k^i - f_k^j| \right), \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (38)$$

برای همه جواب‌ها این مقدار را محاسبه می‌کنیم، به عبارت دیگر n مقدار d خواهیم داشت. در نهایت شاخص SI از رابطه (۳۹) به دست می‌آید:

$$SI = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n (\bar{d} - d_i)^2 \right)} \quad (39)$$

ه- شاخص فاصله متریک (SM)

با استفاده از این شاخص، به اندازه‌گیری یکنواختی گسترش جواب‌های غیر تحت سلطه خواهیم پرداخت. هر چه میزان این شاخص کمتر باشد، نشانه عملکرد بهتر الگوریتم می‌باشد. به طوری که از رابطه (۴۰) محاسبه می‌شود:

$$SM = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} |\bar{d} - d_i|}{(n-1)\bar{d}} \quad (40)$$

۹. تحلیل آزمایشات و نتایج آن

در این بخش از مقاله به ارائه نتایج و بررسی مدل شبکه زنجیره تأمین طراحی شده پرداخته شده است. از این‌رو در این بخش ابتدا با یک مثال عددی در سایز کوچک، کاربرد تئوری اعداد D در انتخاب تأمین‌کننده‌ها و بررسی خروجی‌های مدل شبکه زنجیره تأمین با روش معیار جامع بررسی شده است. در ادامه و به منظور حل مسائل مختلف در سایزهای بزرگ‌تر از الگوریتم‌های NSGA II، MOPSO و MOALO بهره گرفته شده است.

۱.۱. حل مسئله نمونه در سایز کوچک

در این بخش ابتدا به تعریف اندازه و حدود بازه‌ای پارامترهای قطعی و غیرقطعی مسئله پرداخته شده و در ادامه با استفاده از روش تئوری اعداد D ابتدا تأمین‌کننده‌های واجد شرایط برای ارائه مواد اولیه شناسایی شده و در مرحله دوم مدل با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندهدفه معیار جامع حل شده است. جدول (۱) و (۲) به ترتیب اندازه مسئله نمونه در سایز کوچک و حدود بازه‌ای پارامترهای قطعی و غیرقطعی مسئله را بر اساس تابع توزیع یکنواخت نشان می‌دهد. از آنجایی که دسترسی به داده‌های واقعی در این مقاله قابل حصول نبوده است، از داده‌های تصادفی و بر اساس تابع توزیع یکنواخت استفاده شده است.

جدول ۱. اندازه مسئله نمونه در سایز کوچک

اندازه	شرح	مجموعه	اندازه	شرح	مجموعه
۱	مجموعه محصولات	P	۵	مجموعه تأمین‌کننده‌ها	I
۲	مجموعه مواد اولیه	M	۳	مجموعه مراکز تولیدی	J
۱	مجموعه دوره زمانی	T	۳	مجموعه مراکز توزیع‌کننده اصلی	K
۵	مجموعه وسایل نقلیه	V	۳	مجموعه مراکز توزیع‌کننده محلی	L
۳	مجموعه تکنولوژی تولید	N	۵	مجموعه مشتریان نهایی	C

جدول ۲. حدود بازه‌های پارامترهای قطعی و غیرقطعی مسئله بر اساس تابع توزیع یکنواخت

پارامتر	حدود بازه‌ای
$FixL_i, FixJ_j, FixK_k, FixI_l$	$\sim U(15000, 25000)$
$FixV_v$	$\sim U(5000, 7000)$
$Co2_{kl}, Co2_{lc}, Co2_{jk}, Co2_{kk'}, Co2_{ij}$	$\sim U(20, 60)$
NL_i, NK_k, NI_i, NJ_j	$\sim U(100, 120)$
$C_{lp}, C_{kp}, C_{jp}, C_{im}$	$\sim U(1, 5)$
$capL_{lp}, capJ_{jp}, capI_{im}$	$\sim U(1000, 1200)$
$capK_{kp}$	$\sim U(1200, 1500)$
$capV_v$	$\sim U(600, 800)$
h_{kpt}	$\sim U(1, 2)$
ξ_{mp}	$\sim U(1, 2)$
$\bar{Tr}_{klpt}, \bar{Tr}_{lc}, \bar{Tr}_{jkpt}, \bar{Tr}_{kk'pt}, \bar{Tr}_{ijmt}$	$\sim U((10, 15), (15, 20), (20, 25), (25, 30))$
\bar{Dem}_{cpt}	$\sim U((75, 100), (100, 125), (125, 150), (150, 200))$

مطابق با جدول (۱)، ۵ تأمین کننده بالقوه برای تأمین مواد اولیه موردنیاز برای تولید محصولات در نظر گرفته شده است. از این رو در این بخش به رتبه‌بندی و انتخاب مناسب‌ترین تأمین کننده‌های با روش تئوری اعداد D پرداخته شده است. مطابق با جدول (۳)، سه شاخص برای هر تأمین کننده در نظر گرفته شده است که بایستی سه خبره در خصوص هر یک از شاخص‌ها و برای هر تأمین کننده نظرات خود را ارائه دهند. شاخص‌های C_1 و C_3 دارای ارزیابی مثبت (هر چه بیشتر بهتر) و شاخص C_2 دارای ارزیابی منفی (هر چه کمتر بهتر) هستند. جدول (۳) ماتریس تصمیم‌گیری برای ارزیابی اولیه تأمین کننده‌ها نسبت به هر شاخص و توسط هر خبره را نشان می‌دهد.

جدول ۳. ماتریس تصمیم‌گیری اولیه برای تصمیم‌گیری گروه خبره در انتخاب تأمین کننده‌ها

تأمین کننده	خبره ۱			خبره ۲			خبره ۳		
	C_1	C_2	C_3	C_1	C_2	C_3	C_1	C_2	C_3
۱	۰,۲۴	۰,۳۳	۰,۴۳	۰,۴۰	۰,۲۰	۰,۴۰	۰,۱۵	۰,۲۴	۰,۶۱
۲	۰,۳۰	۰,۳۵	۰,۳۵	۰,۱۸	۰,۳۷	۰,۳۵	۰,۲۸	۰,۱۶	۰,۵۶
۳	۰,۲۸	۰,۳۳	۰,۳۹	۰,۲۵	۰,۰	۰,۳۵	۰,۲۳	۰,۴۴	۰,۳۳
۴	۰,۴۲	۰,۲۶	۰,۳۲	۰,۴۲	۰,۳۵	۰,۲۵	۰,۳۵	۰,۲۰	۰,۴۵
۵	۰,۲۵	۰,۳۲	۰,۴۳	۰,۳۰	۰,۳۰	۰,۴۰	۰,۴۴	۰,۱۸	۰,۳۸

در این مقاله نیاز به ارائه وزن مطلوبیت برای هر شاخص توسط هر خبره وجود دارد که برای این امر از روش همبستگی متغیر برای وزن دهی به شاخص‌ها استفاده شده است. جدول (۴) وزن شاخص‌ها را با روش همبستگی متغیر نشان می‌دهد.

جدول ۴. وزن شاخص‌های ارزیابی در انتخاب تأمین کننده‌ها

خبره	C_1	C_2	C_3
خبره ۱	۰,۵۰۸۲	۰,۲۲۵۵	۰,۲۶۶۳
خبره ۲	۰,۳۶۵۸	۰,۵۳۷۱	۰,۰۹۷۱
خبره ۳	۰,۳۴۷۹	۰,۴۲۲۲	۰,۲۲۹۹

در ادامه مسئله اولویت‌بندی تأمین کننده‌ها بر اساس نظر خبرگان می‌باشد که برای این امر از روش تئوری اعداد D استفاده شده است. جدول (۵) ماتریس تبدیل شده تصمیم‌گیری در انتخاب تأمین کننده‌ها را نشان می‌دهد. از آنجایی که شاخص‌های C_1 و C_3 دارای ارزیابی مثبت (هر چه بیشتر بهتر) و شاخص C_2 دارای ارزیابی منفی (هر چه کمتر بهتر) هستند، در تبدیل شاخص‌های منفی از عملگر $(1 - C_2)$ استفاده می‌شود تا همه شاخص‌ها به ارزیابی مثبت تبدیل گردند.

جدول ۵. ماتریس تبدیل شده برای تصمیم‌گیری گروه خبره در انتخاب تأمین کننده‌ها

تأمین کننده	خبره ۱			خبره ۲			خبره ۳		
	C_1	C_2	C_3	C_1	C_2	C_3	C_1	C_2	C_3
۱	۰,۲۴	۰,۶۷	۰,۴۳	۰,۴۰	۰,۸۰	۰,۴۰	۰,۱۵	۰,۷۶	۰,۶۱
۲	۰,۳۰	۰,۶۵	۰,۳۵	۰,۱۸	۰,۸۲	۰,۳۵	۰,۲۸	۰,۸۴	۰,۵۶
۳	۰,۲۸	۰,۶۷	۰,۳۹	۰,۲۵	۰,۷۵	۰,۳۵	۰,۲۳	۰,۵۶	۰,۳۳
۴	۰,۴۲	۰,۷۴	۰,۳۲	۰,۴۲	۰,۶۰	۰,۲۵	۰,۳۵	۰,۸۰	۰,۴۵
۵	۰,۲۵	۰,۶۸	۰,۴۳	۰,۳۰	۰,۷۰	۰,۴۰	۰,۴۴	۰,۸۲	۰,۳۸

در مرحله دوم، هر یک از گزینه‌ها (تأمین‌کننده‌ها) بایستی به صورت قالب اعداد D تنظیم گردند. برای مثال وزن اعمال شده توسط خبره اول در انتخاب تأمین‌کننده اول به صورت $(0.5082, 0.2255, 0.2663)$ و مقدار تخصیص یافته آن $(0.24, 0.67, 0.43)$ می‌باشد. بر این اساس عدد D متناظر با وزن‌ها و مقدار تخصیص یافته برای خبره اول در انتخاب تأمین‌کننده اول به صورت $D_{A_1}^{E_1} = \{(0.24, 0.5082), (0.67, 0.2255), (0.43, 0.2633)\}$ می‌باشد. لذا همین روابط برای سایر خبرگان در انتخاب تأمین‌کننده‌ها محاسبه و به دست می‌آید. برای مثال جدول (۶)، اعداد D نظرات خبرگان در خصوص انتخاب تأمین‌کننده اول را نشان می‌دهد.

جدول ۶. اعداد D ارائه شده برای انتخاب تأمین‌کننده اول

تأمین‌کننده اول	اعداد D
خبره ۱	$D_{A_1}^{E_1} = \{(0.24, 0.5082), (0.67, 0.2255), (0.43, 0.2633)\}$
خبره ۲	$D_{A_1}^{E_2} = \{(0.40, 0.3658), (0.67, 0.5371), (0.43, 0.0971)\}$
خبره ۳	$D_{A_1}^{E_3} = \{(0.15, 0.3479), (0.67, 0.4222), (0.43, 0.2299)\}$

در مرحله سوم بایستی مجموع نظرات همه خبرگان تحت قالب اعداد D مشخص گردد. برای مثال تلفیق نظرات کلیه خبرگان در انتخاب تأمین‌کننده اول به صورت رابطه (۴۱) می‌باشد.

$$D_{A_1} = D_{A_1}^{E_1} \oplus D_{A_1}^{E_2} \oplus D_{A_1}^{E_3} \quad (41)$$

جدول (۷) نظرات تجمیع شده خبرگان در خصوص انتخاب تأمین‌کننده اول را نشان می‌دهد.

جدول ۷. نتایج نظرات تجمع شده خبرگان در خصوص انتخاب تأمین‌کننده اول

v	b	v	b
۰.۰۴۴۹	۰.۵۶۵۰	۰.۰۶۶۰	۰.۲۳۵۰
۰.۰۴۲۵	۰.۵۷۲۵	۰.۰۵۷۱	۰.۲۸۲۵
۰.۰۶۵۳	۰.۵۸۷۵	۰.۰۵۸۰	۰.۳۳۵۰
۰.۰۴۰۴	۰.۶۱۲۵	۰.۰۵۵۶	۰.۳۴۲۵
۰.۰۶۶۳	۰.۶۴۰۰	۰.۰۵۳۵	۰.۳۸۲۵
۰.۰۶۳۸	۰.۶۴۷۵	۰.۰۵۲۸	۰.۴۴۲۵
۰.۰۳۹۷	۰.۶۷۲۵	۰.۰۵۲۹	۰.۴۶۵۰
۰.۰۶۱۸	۰.۶۸۷۵	۰.۰۴۴۰	۰.۵۱۲۵
۰.۰۶۱۰	۰.۷۴۷۵	۰.۰۷۴۳	۰.۵۴۰۰

بر اساس جدول فوق امتیاز نهایی تخصیص یافته به تأمین‌کننده اول برابر با ۰.۵۱۲۶ می‌باشد. در نهایت جدول (۸) رتبه بندی و امتیاز کسب شده هر یک از تأمین‌کننده‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۸. رتبه بندی تأمین‌کننده‌ها با توجه به مجموع نظرات خبرگان

گزینه	تأمین‌کننده ۱	تأمین‌کننده ۲	تأمین‌کننده ۳	تأمین‌کننده ۴	تأمین‌کننده ۵
$I(D)$	۰.۵۱۲۶	۰.۵۳۴۵	۰.۴۳۱۱	۰.۵۰۶۵	۰.۵۱۸۳
رتبه	۳	۱	۵	۴	۲

با توجه به اینکه فرض شده است، حداقل امتیاز تأمین‌کننده برای تأمین مواد اولیه ۵، باشد، لذا تأمین‌کننده ۳ برای تأمین مواد اولیه در مرحله اول انتخاب نمی‌گردد. پس از تعیین اولیه تأمین‌کننده‌ها، مدل شبکه زنجیره تأمین با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندهدفه معیار جامع قابل حل خواهد بود. همچنین به دلیل خطی بودن مدل، سولور Cplex بر روی نرم‌افزار GAMS 24.8.5 به کار برده شده است. در روش تصمیم‌گیری معیار جامع، نیاز به کسب بهترین مقدار هر تابع هدف به روش بهینه‌سازی انفرادی می‌باشد. یعنی بایستی ابتدا مقدار هر تابع هدف بدون در نظر گرفتن تابع هدف دیگر توسط نرم‌افزار به دست آید تا در محاسبات از آن بهره گرفته شود. رابطه (۴۲) روش تصمیم‌گیری چندهدفه معیار جامع را نشان می‌دهد.

$$L_p = \left\{ \sum_{i=1}^n W_i \left[\frac{(f_i - f_i^*)}{(f_i^*)} \right]^p \right\}^{\frac{1}{p}}, \quad p \geq 1 \quad (42)$$

همچنین در این مقاله از نرم خطی یعنی $p = 1$ استفاده شده است. جدول (۹) مقدار بهینه هر تابع هدف را به روش بهینه‌سازی انفرادی نشان می‌دهد.

جدول ۹. بهترین مقدار توابع هدف کسب شده با فرض نرخ عدم قطعیت ۰.۵

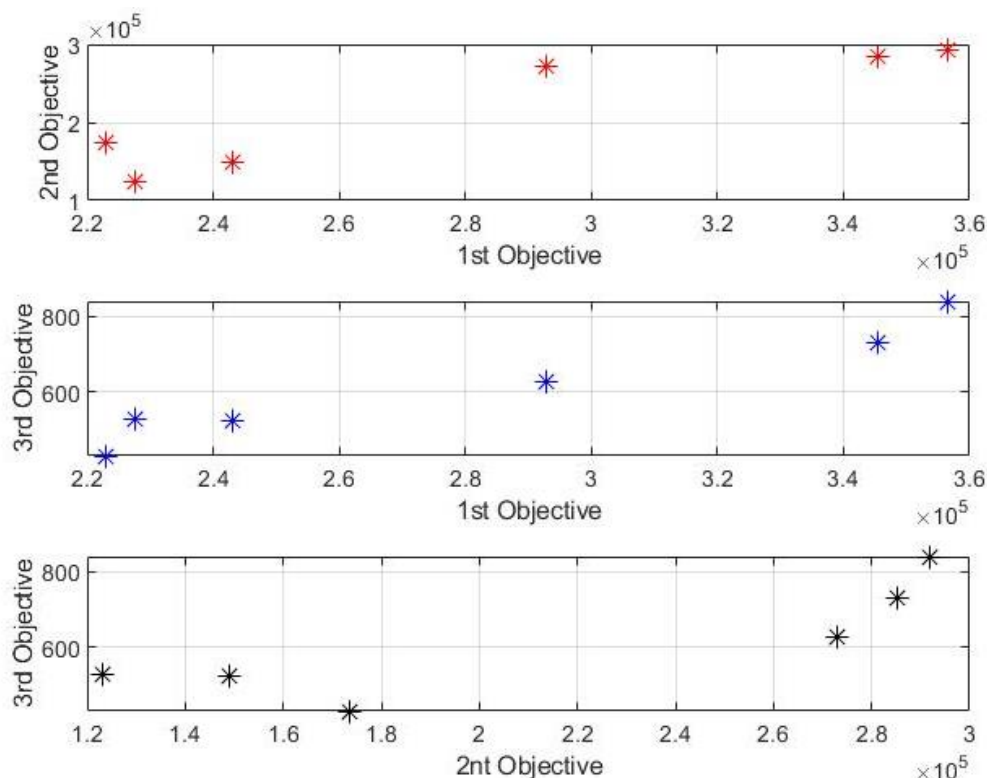
هزینه کل	مقدار انتشار گاز گلخانه‌ای	مجموع افراد استخدام شده	زمان محاسباتی (ثانیه)
۱۹۳۸۹۴.۸۳۲	۹۰۵۸۸.۲۹۵	۱۴۱۱	۱۲۹.۶۴

پس از کسب مقادیر بهینه توابع هدف و با استفاده از رابطه (۴۲) مجموعه جواب کارای به دست آمده از حل مسئله نمونه در سایز کوچک به شرح جدول (۱۰) می باشد.

جدول ۱۰. جواب های کارای به دست آمده از حل مسئله نمونه سایز کوچک

مجموع افراد استخدام شده	مقدار انتشار گاز گلخانه ای	هزینه کل	جواب کارا
۴۳۰	۱۷۳۵۰۰,۸۲۴	۲۲۲۹۷۰,۷۱۱	۱
۵۲۳	۱۴۹۰۸۶,۴۲۴	۲۴۳۱۲۲,۹۱۲	۲
۶۲۵	۲۷۲۹۱۵,۱۵۲	۲۹۲۸۸۱,۴۳۱	۳
۵۲۹	۱۲۳۳۱۱,۷۳۷	۲۲۷۶۳۳,۸۸۶	۴
۷۳۰	۲۸۵۳۲۸,۱۵۴	۳۴۵۳۲۸,۱۵۴	۵
۸۴۱	۲۹۱۷۹۳,۱۱۹	۳۵۶۵۱۵,۳۴۱	۶

شکل (۳) نیز جبهه پارتو حاصل از حل مسئله نمونه سایز کوچک را با روش تصمیم گیری چندهدفه معیار جامع با در نظر گرفتن نرم خطی و مقدار عدم قطعیت ۰,۵ نشان می دهد.



شکل ۳. جبهه پارتو کسب شده از حل مسئله نمونه سایز کوچک در نرخ عدم قطعیت ۰,۵

مطابق با شکل (۳) و جدول (۱۰) مشاهده می شود با افزایش هزینه کل شبکه زنجیره تأمین، به دلیل احداث مراکز بیشتر، نرخ استخدام بیشتر شده است. همچنین به دلیل ۳ هدفه بودن مسئله، ارتباط خطی بین تابع هدف اول و دوم و همچنین تابع هدف دوم و سوم مشاهده نمی گردد. در ادامه به بررسی متغیرهای خروجی مسئله شامل تصمیمات استراتژیکی و تاکتیکی مسئله پرداخته شده است. جدول (۱۱) مکان یابی بهینه تسهیلات بالقوه را که با روش های بهینه سازی انفرادی و معیار جامع به دست آمده است را نشان می دهد.

جدول ۱۱. مکان یابی بهینه تسهیلات بالقوه در مسئله نمونه سایز کوچک

تسهیلات	جواب کارای ۱	بهینه تابع هدف ۱	بهینه تابع هدف ۲	بهینه تابع هدف ۳
توزیع کننده محلی	توزیع کننده محلی ۳	توزیع کننده محلی ۳	توزیع کننده محلی ۳-۲-۱	توزیع کننده محلی ۳-۲-۱
توزیع کننده اصلی	توزیع کننده اصلی ۲	توزیع کننده اصلی ۳	توزیع کننده اصلی ۳-۲-۱	توزیع کننده اصلی ۳-۲-۱
تولید کننده	تولید کننده ۳ با سطح تکنولوژی ۱	تولید کننده ۲ با سطح تکنولوژی ۲	تولید کننده ۳-۲-۱ با سطح تکنولوژی ۱	تولید کننده ۳-۲-۱ با سطح تکنولوژی ۱
تأمین کننده	تأمین کننده ۴	تأمین کننده ۴	تأمین کننده ۵-۴-۲-۱	تأمین کننده ۵-۴-۲-۱

جدول (۱۲) نیز مسیریابی بهینه وسیله نقلیه را در مسئله نمونه سایز کوچک که با روش های حل مختلف به دست آمده است را نشان می دهد.

جدول ۱۲. مسیریابی بهینه حمل و نقل به دست آمده در مسئله نمونه سایز کوچک

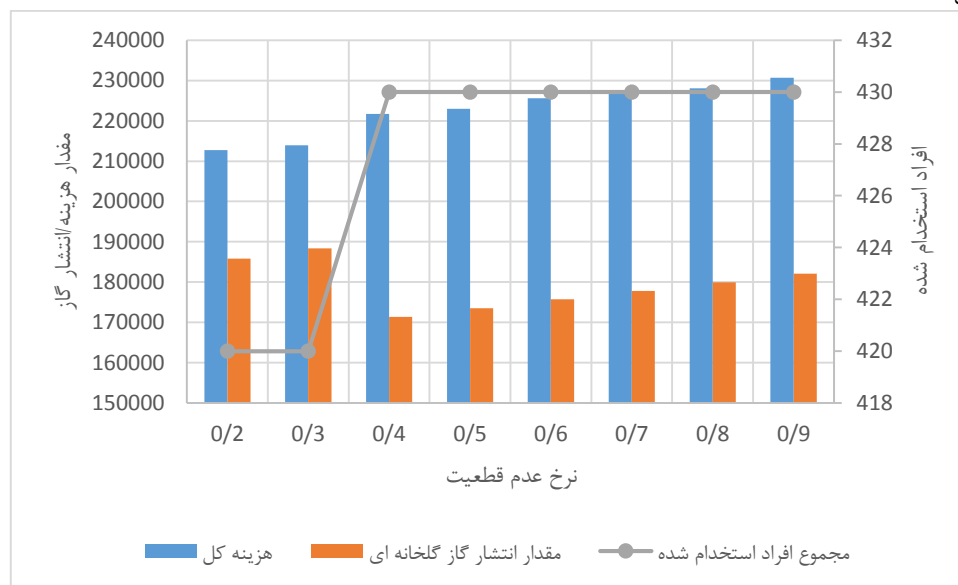
روش حل	مسیریابی بهینه حمل و نقل	وسیله نقلیه به کار رفته
جواب کارای ۱	$l_3 \rightarrow c_3 \rightarrow c_2 \rightarrow c_4 \rightarrow l_3$	v_4
	$l_3 \rightarrow c_5 \rightarrow c_1 \rightarrow l_3$	v_3
تابع هدف اول (انفرادی)	$l_3 \rightarrow c_3 \rightarrow c_2 \rightarrow l_3$	v_4
	$l_3 \rightarrow c_4 \rightarrow c_5 \rightarrow c_1 \rightarrow l_3$	v_3
تابع هدف دوم (انفرادی)	$l_2 \rightarrow c_2 \rightarrow c_1 \rightarrow l_2$	v_4
	$l_2 \rightarrow c_3 \rightarrow c_4 \rightarrow c_5 \rightarrow l_2$	v_5
تابع هدف سوم (انفرادی)	$l_2 \rightarrow c_1 \rightarrow c_3 \rightarrow c_4 \rightarrow l_2$	v_2
	$l_2 \rightarrow c_5 \rightarrow c_2 \rightarrow l_2$	v_3

برای بررسی تأثیر روش بهینه سازی استوار فازی بر روی هزینه، میزان انتشار گاز گلخانه ای و مجموع افراد استخدام شده، نرخ عدم قطعیت از مقدار ۰,۲ تا ۰,۹ تغییر یافته است. جدول (۱۳) روند تغییرات هزینه، میزان انتشار گاز گلخانه ای و مجموع افراد استخدام شده را در نرخ های مختلف عدم قطعیت نشان می دهد.

جدول ۱۳. روند تغییرات مقادیر توابع هدف به ازای نرخ های مختلف عدم قطعیت

نرخ عدم قطعیت	هزینه کل	مقدار انتشار گاز گلخانه ای	مجموع افراد استخدام شده
۰,۲	۲۱۲۷۵۷,۲۳۸	۱۸۵۸۲۳,۴۰۸	۴۲۰
۰,۳	۲۱۳۹۶۶,۲۷۱	۱۸۸۳۶۳,۷۶۰	۴۲۰
۰,۴	۲۲۱۷۲۸,۲۷۳	۱۷۱۳۸۴,۱۳۱	۴۳۰
۰,۵	۲۲۲۹۷۰,۷۱۱	۱۷۳۵۰۰,۸۲۴	۴۳۰
۰,۶	۲۲۵۵۹۵,۱۷۴	۱۷۵۷۳۸,۲۲۷	۴۳۰
۰,۷	۲۲۷۳۰۲,۹۱۲	۱۷۷۸۳۷,۷۲۳	۴۳۰
۰,۸	۲۲۸۰۹۲,۰۵۲	۱۷۹۹۵۴,۱۵۸	۴۳۰
۰,۹	۲۳۰۷۱۱,۴۷۱	۱۸۲۱۲۴,۳۰۴	۴۳۰

با توجه به جدول (۱۳) مشاهده می گردد با افزایش نرخ عدم قطعیت، مقدار کل هزینه های شبکه زنجیره تأمین افزایش یافته است. همچنین مشاهده می گردد مقدار کل انتشار گازهای گلخانه ای زمانی که نرخ عدم قطعیت ۰,۴ است، افزایش یافته است. دلیل افزایش هزینه به دلیل افزایش تقاضا می باشد، از این رو با افزایش مقدار تقاضا، مقدار کل حمل و نقل افزایش و در نتیجه هزینه حمل و نقل افزایش یافته است. شکل (۴) نیز روند تغییرات مقادیر توابع هدف را به ازای نرخ های مختلف عدم قطعیت نشان می دهد.



شکل ۴. روند تغییرات مقادیر توابع هدف به ازای نرخ های مختلف عدم قطعیت

با توجه به عدم کارایی نرم افزار GAMS در حل مسائل نمونه سایز بزرگ، در ادامه از الگوریتم های فرا ابتکاری NSGA II، MOPSO و MOALO برای حل مسئله پرداخته شده است. لذا در ابتدای بخش بعدی به تنظیم پارامتر الگوریتم های مذکور پرداخته شده است.

۲.۱. تنظیم پارامتر الگوریتم به روش تاگوچی

قبل از پرداختن به حل مسئله با استفاده از روش های فرا ابتکاری، به تنظیم پارامترهای الگوریتم های MOALO، MOPSO و NSGA II با روش تاگوچی پرداخته شده است. در روش تاگوچی، در ابتدا باید فاکتورهای مناسب را شناسایی و سپس سطوح هر یک از فاکتورها را انتخاب و در ادامه باید طرح آزمایش مناسب را برای این فاکتورهای کنترل مشخص شود. پس از مشخص شدن طرح آزمایش، آزمایش ها را انجام داده و باهدف پیدا کردن بهترین ترکیب پارامترها، آزمایش ها تحلیل می شود. در این مقاله، برای هر فاکتور ۳ سطح مطابق با جدول (۱۴) در نظر گرفته شده است. برای هر الگوریتم، با توجه به تعداد فاکتورها و تعداد سطوح آن ها به تعیین طراحی آزمایش و اجرای آن ها پرداخته شده است.

جدول ۱۴. مقدار پارامترهای تنظیم شده (بهینه) الگوریتم های فرا ابتکاری

الگوریتم	پارامتر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	بهینه
NSGA II	حداکثر تعداد تکرار	۵۰	۱۰۰	۲۰۰	۲۰۰
	تعداد جمعیت	۵۰	۱۰۰	۲۰۰	۱۰۰
	نرخ ترکیب	۰,۳	۰,۵	۰,۷	۰,۳
	نرخ جهش	۰,۳	۰,۵	۰,۷	۰,۷
MOPSO	حداکثر تعداد تکرار	۵۰	۱۰۰	۲۰۰	۲۰۰
	تعداد ذرات	۵۰	۱۰۰	۲۰۰	۵۰
	پارامتر شناختی	۱	۱,۵	۲	۲
	پارامتر جمعیتی	۱	۱,۵	۲	۱,۵
MOALO	ضریب گرانشی	۰,۹	۰,۹	۱	۰,۹
	حداکثر تعداد تکرار	۵۰	۱۰۰	۲۰۰	۲۰۰
MOALO	تعداد شیر مورچه	۵۰	۱۰۰	۲۰۰	۱۰۰

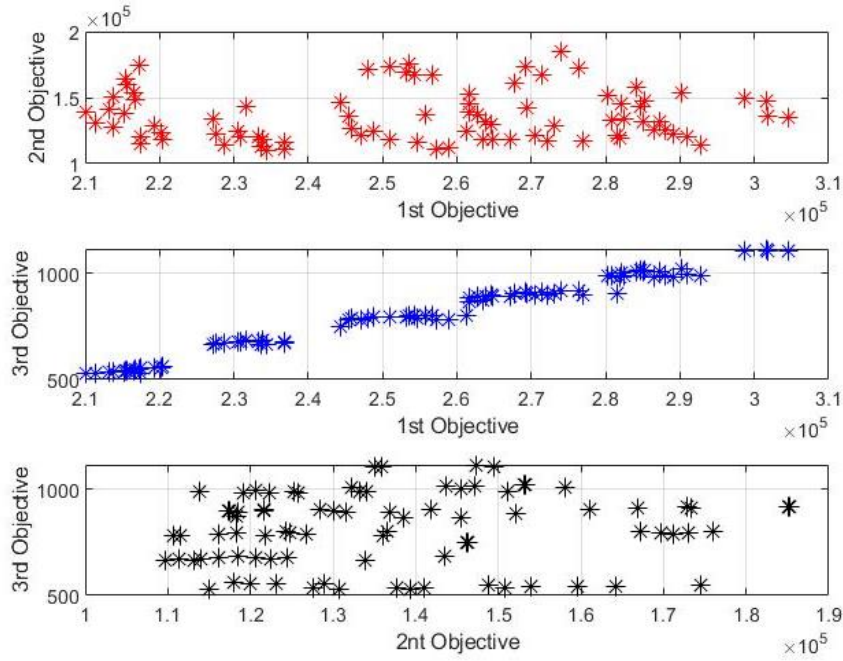
۳.۱. حل مسئله نمونه سائز کوچک با الگوریتم های فرا ابتکاری

در این بخش به منظور تحلیل نتایج به دست آمده از نرم افزار GAMS (روش معیار جامع) و الگوریتم های فرا ابتکاری، مسئله نمونه طراحی شده در سائز کوچک با الگوریتم های مذکور حل می گردد. پس از حل مسئله نمونه طراحی شده مطابق با جدول (۱) و حدود بازه های پارامترهای مسئله بر اساس جدول (۲) میانگین شاخص های جواب کارا به شرح جدول (۱۵) به دست آمده است.

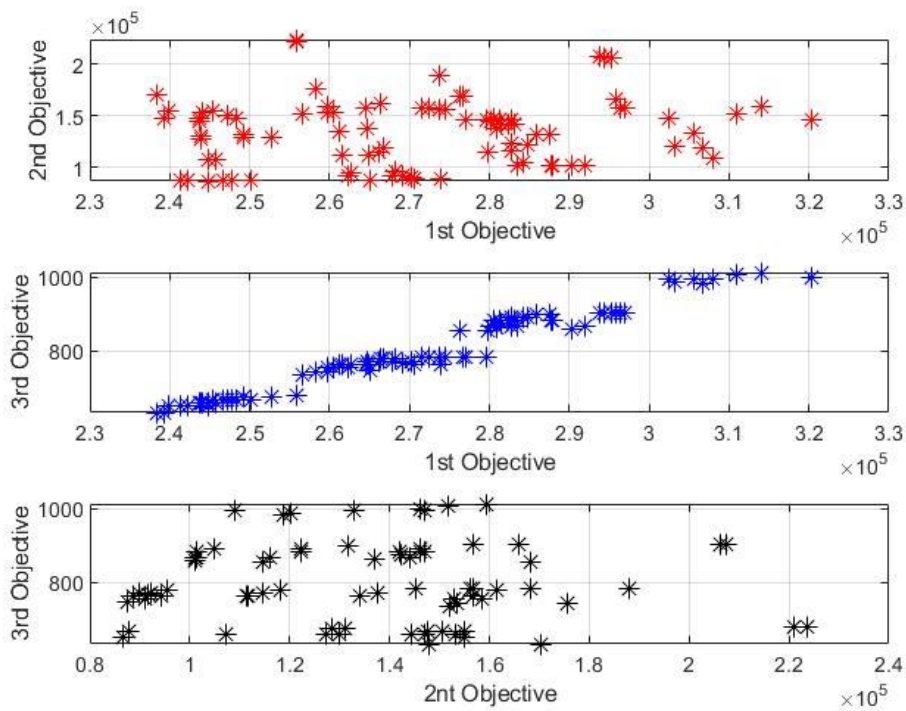
جدول ۱۵. مقایسه شاخص های جواب های کارا بین روش های مختلف حل

شاخص	معیار جامع	NSGA II	MOPSO	MOALO
میانگین هزینه کل	۲۸۱۴۰۸,۷۴	۲۵۵۴۸۳,۷۹	۲۷۰۵۶۱,۳۵	۲۹۳۵۱۴,۱۴
میانگین انتشار گاز گلخانه ای	۲۱۵۹۸۹,۳۴	۱۳۸۱۴۹,۴۰	۱۳۷۰۰۸,۳۵۹	۱۶۳۳۸۷,۷۷
میانگین مجموع افراد استخدام شده	۶۱۳	۸۰۸,۵۳	۷۹۱,۳۶	۸۲۲,۶۹
NPF	۶	۹۱	۱۰۰	۶۲
MSI	۲۱۴۹۸۹,۱۰	۱۲۰۹۶۶,۳۲۷	۱۵۹۶۷۷,۳۷	۱۲۸۳۳۶,۳۶
SM	۰,۳۶۱	۰,۵۴۷	۰,۷۸۹	۰,۸۶۱
CPU-time	۱۲۹,۶۴	۸۳,۴۰	۲۹,۱۵	۲۶,۱۴

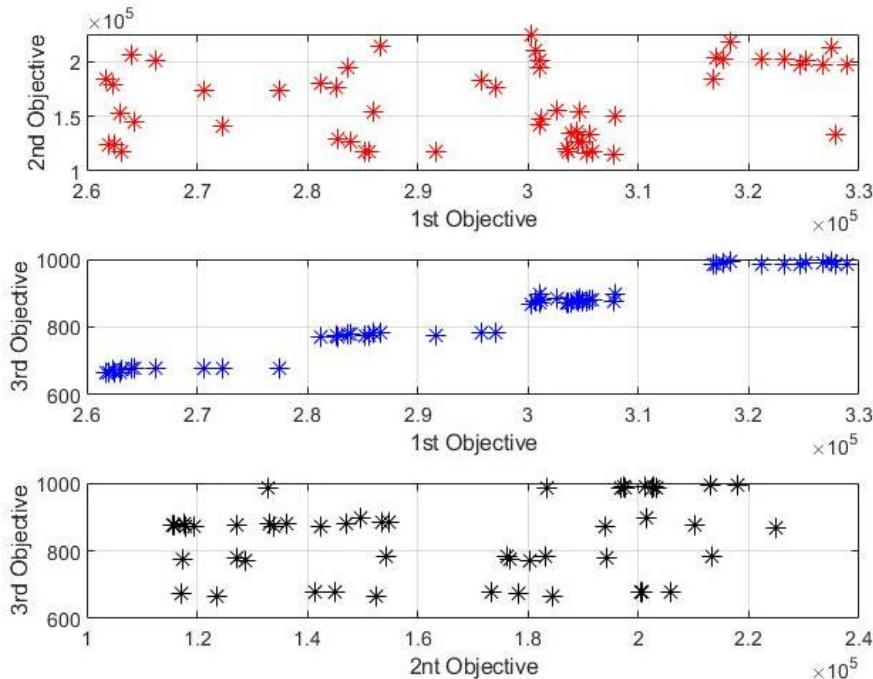
مطابق با جدول (۱۵)، مشاهده می گردد که روش معیار جامع در کسب شاخص های بیشترین گسترش و فاصله متریک، الگوریتم NSGA II در کسب شاخص میانگین کل هزینه، الگوریتم MOPSO در کسب شاخص میانگین کل انتشار گاز، تعداد جواب کارا و الگوریتم MOALO در کسب شاخص های زمان محاسباتی، میانگین کل افراد استخدام شده بهتر از دیگر روش های حل عمل نموده اند. در شکل های (۵) تا (۷) به ترتیب جبهه پارتو به دست آمده از حل مسئله نمونه سائز کوچک با الگوریتم های NSGA II، MOPSO و MOALO نشان داده شده است.



شکل ۵. جبهه پارتو به‌دست‌آمده از حل مسئله نمونه سایز کوچک با الگوریتم NSGA II



شکل ۶. جبهه پارتو به‌دست‌آمده از حل مسئله نمونه سایز کوچک با الگوریتم MOPSO



شکل ۷. جبهه پارتو به دست آمده از حل مسئله نمونه سایز کوچک با الگوریتم MOALO

همچنین خروجی‌های استراتژیکی و تاکتیکی حاصل اولین جواب کارای به دست آمده از هر الگوریتم با اولین جواب کارای به دست آمده از روش معیار جامع در جداول (۱۶) و (۱۷) نشان داده شده است.

جدول ۱۶. مکان یابی بهینه تسهیلات بالقوه در مسئله نمونه سایز کوچک با روش‌های مختلف حل

MOALO	MOPSO	NSGA II	جواب کارای ۱	تسهیلات
توزیع کننده محلی ۳	توزیع کننده محلی ۲	توزیع کننده محلی ۳	توزیع کننده محلی ۳	توزیع کننده محلی
توزیع کننده اصلی ۲	توزیع کننده اصلی ۲	توزیع کننده اصلی ۲	توزیع کننده اصلی ۲	توزیع کننده اصلی
تولید کننده ۳ با سطح تکنولوژی ۳	تولید کننده ۱ با سطح تکنولوژی ۱	تولید کننده ۲ با سطح تکنولوژی ۲	تولید کننده ۳ با سطح تکنولوژی ۱	تولید کننده
تأمین کننده ۵	تأمین کننده ۵	تأمین کننده ۳	تأمین کننده ۴	تأمین کننده

جدول (۱۷) نیز مسیریابی بهینه وسیله نقلیه را در مسئله نمونه سایز کوچک که با روش‌های مختلف به دست آمده است را نشان می‌دهد.

جدول ۱۷. مسیریابی بهینه حمل و نقل به دست آمده در مسئله نمونه سایز کوچک با روش‌های مختلف حل

روش حل	مسیریابی بهینه حمل و نقل	وسیله نقلیه به کاررفته
جواب کارای ۱	$l_3 \rightarrow c_3 \rightarrow c_2 \rightarrow c_4 \rightarrow l_3$	v_4
	$l_3 \rightarrow c_5 \rightarrow c_1 \rightarrow l_3$	v_3
NSGA II	$l_3 \rightarrow c_1 \rightarrow c_2 \rightarrow c_4 \rightarrow l_3$	v_2
	$l_3 \rightarrow c_3 \rightarrow c_5 \rightarrow l_3$	v_4
MOPSO	$l_2 \rightarrow c_5 \rightarrow c_2 \rightarrow c_1 \rightarrow l_2$	v_1
	$l_2 \rightarrow c_4 \rightarrow c_3 \rightarrow l_2$	v_2
MOALO	$l_3 \rightarrow c_1 \rightarrow c_4 \rightarrow l_3$	v_4
	$l_3 \rightarrow c_2 \rightarrow c_3 \rightarrow c_5 \rightarrow l_3$	v_3

۴.۱ حل مسائل نمونه در سایز بزرگ تر با الگوریتم‌های فرا ابتکاری

به منظور حل مسائل نمونه در سایزهای بزرگ تر و انتخاب کاراترین الگوریتم چندهدفه، ۱۰ مسئله نمونه مطابق با جدول (۱۸) طراحی شده است. به دلیل عدم دسترسی به داده‌های واقعی از داده‌های تصادفی ارائه شده در جدول (۲) بهره گرفته شده است.

جدول ۱۸. اندازه مسئله نمونه در سایز بزرگ

مجموعه	مسئله نمونه									
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
I	۶	۸	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶	۱۸	۲۰	۲۲	۲۵
J	۶	۸	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶	۱۸	۲۰	۲۲	۲۵
K	۶	۸	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶	۱۸	۲۰	۲۲	۲۵
L	۶	۸	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶	۱۸	۲۰	۲۲	۲۵
C	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰	۵۵
N	۴	۴	۴	۵	۵	۵	۶	۶	۸	۸
P	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۶	۶	۵	۶
M	۲	۲	۲	۳	۳	۴	۴	۵	۶	۷
T	۲	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۴	۴	۴
V	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۵	۱۵	۱۵	۲۰	۲۰	۲۰

اندازه مسائل نمونه طراحی شده در جدول (۱۸) به صورت تصادفی و در نرم افزار MATLAB صورت گرفته است. برای کاهش خطای محاسباتی، نتایج هر مسئله نمونه ۳ بار توسط الگوریتم های مذکور حل و در جداول مربوطه نشان داده شده است. از این رو در جدول (۱۹) به ارائه مقادیر توابع هدف مسائل نمونه سایز بزرگ (میانگین هزینه، میانگین انتشار گاز گلخانه ای و میانگین مجموع افراد استخدام شده) توسط الگوریتم NSGA II و همچنین زمان محاسباتی به دست آمده از این الگوریتم پرداخته شده است.

جدول ۱۹. میانگین مقادیر توابع هدف و زمان محاسباتی سایز بزرگ توسط الگوریتم NSGA II

مسئله	تکرار	هزینه	انتشار گاز	افراد استخدام شده	زمان محاسباتی
۱	۱	۳۰۰۲۲۲,۶۱	۱۵۲۷۹۴,۸۵	۹۶۸,۷۴	۱۳۰,۶۷
	۲	۳۱۸۶۳۲,۳۳	۱۶۱۱۰۷,۴۲	۹۷۷,۸۳	۱۲۵,۱۴
	۳	۲۹۹۵۴۵,۳۲	۱۵۶۱۵۲,۱۵	۹۶۲,۰۰	۱۲۸,۶۴
۲	۱	۳۷۶۷۲۷,۳۷	۱۸۸۰۴۵,۹۰	۱۰۸۴,۹۱	۱۹۸,۰۶
	۲	۳۵۸۱۴۱,۰۳	۱۸۶۱۸۴,۰۸	۱۰۸۵,۲۲	۲۰۰,۲۳
۳	۱	۴۲۸۲۵۶,۸۳	۱۹۴۴۲۷,۸۸	۱۲۰۸,۴۹	۳۱۹,۲۶۴
	۲	۴۳۶۳۷۵,۱۱	۱۹۲۰۳۶,۸۷	۱۲۳۱,۲۲	۳۲۰,۱۴
	۳	۴۱۸۴۹۰,۲۱	۲۰۵۷۶۳,۹۲	۱۲۵۱,۵۸	۲۱۷,۳۳
۴	۱	۴۶۷۲۹۰,۸۹	۲۱۳۳۴۳,۴۷	۱۳۶۲,۰۳	۴۸۳,۲۹
	۲	۴۸۷۱۲۷,۰۷	۲۲۷۲۷۰,۸۴	۱۳۵۴,۱۵	۴۸۰,۶۶
۵	۱	۴۷۹۵۶۴,۱۰	۲۱۲۲۱۰,۸۸	۱۳۹۴,۹۶	۴۷۰,۶۴
	۲	۵۱۴۵۹۹,۲۱	۲۳۲۲۸۷,۹۷	۱۵۵۲,۱۱	۶۹۰,۱۳۸
	۳	۵۳۱۴۳۵,۹۸	۲۴۸۶۳۷,۸۲	۱۶۰۷,۵۵	۶۹۵,۶۶
۶	۱	۶۰۴۲۶۵,۷۹	۲۶۶۵۶۵,۴۳	۱۶۲۹,۱۸	۹۳۹,۸۰۸
	۲	۶۰۸۰۲۰,۵۱	۲۵۲۲۴۰,۵۶	۱۶۴۲,۴۲	۹۴۲,۶۹
	۳	۵۸۸۷۲۹,۹۵	۲۷۳۸۶۹,۳۶	۱۷۳۱,۸۳	۹۴۰,۸۸
۷	۱	۶۴۸۱۲۴,۴۰	۲۷۶۷۷۵,۷۵	۱۸۱۴,۴۱	۱۲۳۲,۳۰
	۲	۶۶۶۳۸۲,۳۰	۲۷۰۱۰۰,۴۶	۱۸۱۸,۴۶	۱۲۲۰,۴۷
	۳	۶۴۲۱۸۰,۴۰	۲۸۱۱۱۴,۰۹	۱۸۴۷,۳۵	۱۲۲۵,۰۲
۸	۱	۶۷۴۰۶۷,۲۳	۳۰۹۸۹۸,۸۴	۱۸۹۲,۳۹	۱۵۶۷,۶۱
	۲	۶۹۲۱۴۷,۴۸	۲۹۲۵۴۱,۴۵	۱۸۷۵,۷۲	۱۵۴۰,۸۴
	۳	۷۲۴۴۶۵,۸۶	۲۹۲۶۸۷,۹۲	۱۹۵۷,۶۴	۱۵۴۵,۱۱
۹	۱	۷۷۳۱۸۶,۱۳	۳۱۱۹۵۱,۳۲	۲۰۴۰,۸۸	۱۸۴۲,۶۵
	۲	۷۷۸۳۱۳,۷۲	۳۲۸۹۲۸,۹۰	۲۰۳۳,۳۲	۱۸۴۵,۶۳
	۳	۷۶۳۷۱۷,۷۹	۳۱۲۵۲۵,۳۷	۲۰۴۲,۵۲	۱۸۳۰,۰۸
۱۰	۱	۷۹۰۴۲۶,۰۸	۳۲۹۰۳۳,۴۴	۲۳۵۲,۸۴	۲۱۴۵,۶۸
	۲	۷۹۳۷۱۵,۰۲	۳۳۵۶۱۸,۸۹	۲۳۰۹,۸۹	۲۱۳۹,۳۱
	۳	۸۰۲۶۲۶,۲۲	۳۳۶۷۷۵,۱۵	۲۲۷۶,۵۰	۲۱۳۷,۴۲

جدول ۲۰. میانگین مقادیر توابع هدف و زمان محاسباتی سایز بزرگ توسط الگوریتم MOPSO

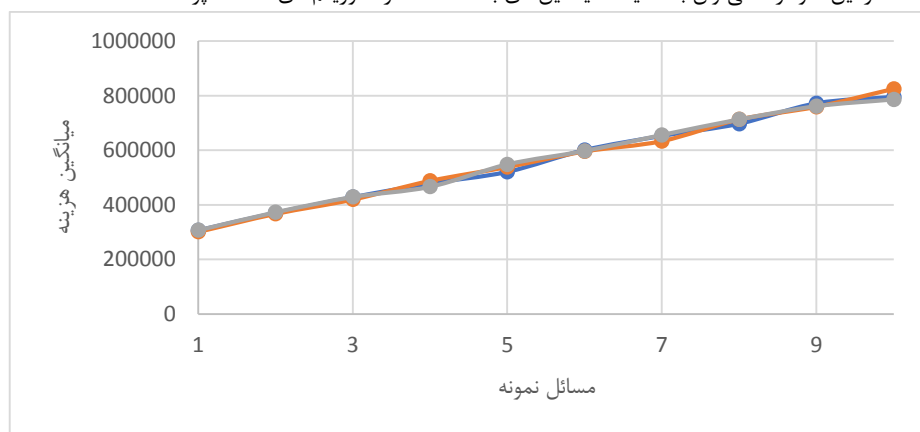
مسئله	تکرار	هزینه	انتشار گاز	افراد استخدام شده	زمان محاسباتی
۱	۱	۳۰۱۸۵۴,۳۳	۱۶۵۴۴۵,۹۳	۹۳۶,۲۷	۹۰,۹۶
	۲	۳۰۲۷۱۴,۵۱	۱۶۲۱۵۵,۹۳	۹۲۲,۲۲	۹۲,۱۰
	۳	۲۹۸۵۱۶,۵۴	۱۵۹۷۸۹,۹۱	۹۶۵,۷۵	۹۵,۲۸
۲	۱	۳۸۵۸۴۷,۶۱	۱۷۷۷۴۰,۸۰	۱۰۸۸,۸۷	۱۷۰,۲۸
	۲	۳۵۵۷۷۱,۹۶	۱۷۱۹۴۳,۴۱	۱۱۵۲,۶۹	۱۶۵,۴۴
	۳	۳۵۸۹۸۵,۹۲	۱۸۲۹۰۰,۴۸	۱۰۸۸,۸۴	۱۶۴,۸۲
۳	۱	۴۲۹۲۲۰,۸۳	۱۹۳۵۲۸,۵۸	۱۲۲۶,۵۶	۲۷۰,۳۱
	۲	۴۰۹۴۴۴,۸۱	۲۰۵۴۸۷,۰۵	۱۲۶۸,۲۴	۲۷۳,۲۶
	۳	۴۱۹۰۷۰,۹۰	۲۰۷۷۵۰,۶۰	۱۲۱۹,۵۰	۲۷۱,۲۰
۴	۱	۴۸۱۷۸۰,۶۸	۲۱۷۳۹۸,۷۸	۱۳۷۹,۹۱	۳۹۱,۰۵
	۲	۴۹۶۲۷۶,۱۴	۲۱۶۶۰۱,۱۳	۱۳۷۱,۱۵	۳۸۴,۱۶
	۳	۴۸۴۹۹۲,۰۷	۲۱۹۹۹۱,۱۵	۱۳۹۸,۷۸	۳۸۶,۶۹
۵	۱	۵۴۹۵۲۸,۹۰	۲۳۲۶۹۲,۳۲	۱۵۰۸,۱۷	۵۳۲,۵۱
	۲	۵۳۲۴۵۶,۴۰	۲۳۰۲۶۴,۱۰	۱۵۵۹,۸۲	۵۴۰,۳۳
	۳	۵۳۲۷۲۵,۷۸	۲۳۶۶۸۸,۹۴	۱۶۰۶,۴۰	۵۳۵,۳۵
۶	۱	۶۱۸۵۴۹,۱۴	۲۶۹۴۱۰,۷۶	۱۷۲۲,۷۲	۶۹۴,۶۹
	۲	۵۹۰۲۲۶,۲۲	۲۶۹۲۹۰,۷۹	۱۶۱۵,۴۷	۷۰۰,۹۱
	۳	۵۷۷۳۳۹,۹۷	۲۶۸۸۰۰,۴۸	۱۷۱۲,۲۸	۶۹۵,۹۵
۷	۱	۶۴۶۵۴۴,۷۰	۲۹۲۳۷۰,۱۰	۱۸۵۷,۶۱	۸۷۷,۵۸
	۲	۶۳۰۲۵۰,۲۷	۲۷۴۰۰۲,۳۴	۱۸۹۹,۳۴	۸۷۰,۹۳
	۳	۶۲۲۸۷۵,۵۵	۲۷۳۶۷۸,۳۶	۱۸۳۰,۳۰	۸۷۲,۱۶
۸	۱	۷۱۹۴۲۸,۵۱	۳۰۵۱۷۱,۲۶	۲۰۳۳,۸۱	۱۰۸۱,۱۸
	۲	۶۸۰۷۰۸,۷۰	۳۰۹۳۹۱,۳۱	۲۰۲۱,۸۶	۱۰۷۵,۴۵
	۳	۷۳۷۱۱۰,۱۲	۲۸۹۸۴۳,۵۰	۱۸۹۷,۸۸	۱۰۷۸,۳۷
۹	۱	۷۶۳۳۴۸,۴۹	۳۲۱۳۶۸,۳۴	۲۰۶۶,۵۳	۱۲۳۵,۱۵
	۲	۷۴۸۰۸۱,۶۸	۳۲۱۸۹۴,۵۹	۲۰۱۶,۷۸	۱۲۳۰,۶۸
	۳	۷۶۴۸۷۸,۰۸	۳۱۴۲۸۶,۲۱	۲۲۰۸,۱۰	۱۲۳۰,۷۷
۱۰	۱	۸۳۰۱۱۳,۸۳	۳۵۹۹۱۷,۰۸	۲۲۵۰,۳۱	۱۴۹۳,۵۵
	۲	۸۵۲۹۱۶,۳۷	۳۵۵۵۵۰,۲۰	۲۲۰۹,۰۱	۱۴۹۰,۹۰
	۳	۷۹۰۰۳۸,۶۴	۳۴۸۰۴۶,۴۹	۲۳۲۰,۹۲	۱۴۸۲,۷۵

جدول ۲۱. میانگین مقادیر توابع هدف و زمان محاسباتی سایز بزرگ توسط الگوریتم MOALO

مسئله	تکرار	هزینه	انتشار گاز	افراد استخدام شده	زمان محاسباتی
۱	۱	۳۰۳۲۳۳,۱۲	۱۶۱۵۹۱,۷۳	۹۴۶,۳۴	۳۳,۶۵
	۲	۲۹۸۱۰۶,۳۶	۱۶۲۲۹۰,۹۳	۹۴۳,۶۴	۳۴,۱۵
	۳	۳۲۰۰۲۲,۶۲	۱۶۱۱۲۸,۷۶	۹۸۴,۲۳	۳۳,۶۹
۲	۱	۳۶۱۱۷۹,۸۹	۱۸۵۹۲۰,۶۸	۱۱۴۹,۱۸	۷۰,۲
	۲	۳۷۹۴۶۸,۴۷	۱۷۹۶۹۵,۴۵	۱۰۹۳,۴۴	۷۲,۵۸
	۳	۳۷۸۵۳۱,۵۸	۱۸۲۰۳۰,۶۲	۱۰۵۱,۲۲	۷۳,۲۵
۳	۱	۴۳۹۶۵۷,۰۷	۲۱۰۲۷۲,۴۳	۱۲۵۸,۲۱	۱۲۰,۲۸
	۲	۴۲۹۶۶۶,۸۵	۱۹۴۷۹۱,۳۳	۱۲۳۱,۱۰	۱۲۴,۰۰
	۳	۴۱۷۹۵۶,۷۲	۲۰۳۳۷۰,۴۸	۱۲۰۰,۵۸	۱۲۳,۳۴
۴	۱	۴۵۷۵۰۱,۳۱	۲۲۶۰۲۹,۵۵	۱۴۲۳,۲۵	۱۸۳,۷۱
	۲	۴۷۶۵۲۰,۴۷	۲۱۸۱۷۳,۵۵	۱۴۰۰,۵۵	۱۸۵,۶۵
	۳	۴۶۵۱۳۶,۵۶	۲۲۸۵۸۸,۸۵	۱۳۴۵,۷۳	۱۸۸,۸۷

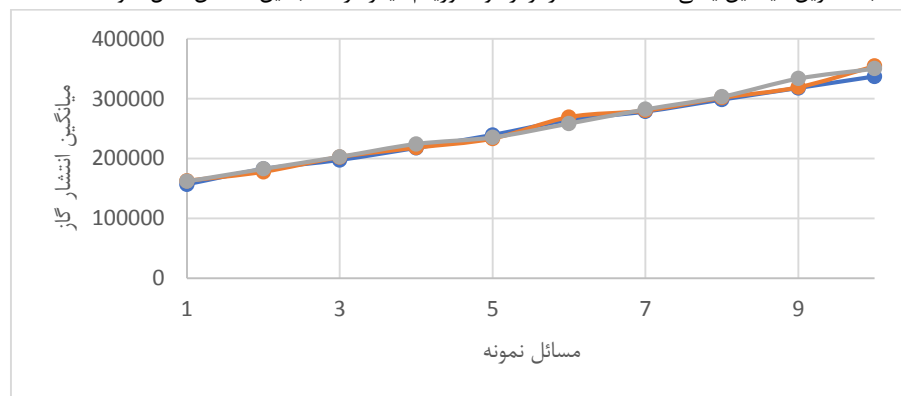
۲۶۰.۵۷	۱۵۵۷.۷۳	۲۳۵۰۸۳.۲۸	۵۶۱۰۵۵.۳۴	۱	۵
۲۵۵.۱۴	۱۴۸۷.۱۴	۲۳۸۷۰۴.۷۱	۵۲۳۹۲۵.۱۱	۲	
۲۶۸.۹۴	۱۴۶۶.۳۲	۲۳۱۷۸۸.۸۰	۵۵۹۲۹۵.۴۰	۳	
۳۵۰.۸۴	۱۷۵۰.۷۹	۲۵۹۴۳۵.۶۰	۶۰۵۹۵۰.۳۸	۱	۶
۳۵۶.۱۴	۱۷۳۲.۲۹	۲۶۵۸۲۶.۵۰	۵۸۳۶۷۹.۶۸	۲	
۳۵۲.۱۷	۱۷۲۳.۰۹	۲۴۹۹۲۷.۹۴	۶۰۲۲۴۲.۵۱	۳	
۴۵۴.۵۳	۱۷۸۱.۳۵	۲۸۵۳۴۴.۳۳	۶۶۹۲۴۷.۶۲	۱	۷
۴۵۰.۶۸	۱۸۱۸.۴۴	۲۸۴۰۵۷.۳۵	۶۴۱۳۵۶.۲۴	۲	
۴۵۷.۴۷	۱۷۷۷.۵۲	۲۷۶۸۳۶.۱۰	۶۵۶۵۳۹.۴۱	۳	
۵۷۱.۶۴	۲۰۶۹.۳۱	۳۰۵۰۱۲.۶۲	۷۲۶۶۰۳.۰۷	۱	۸
۵۷۰.۱۶	۱۸۸۷.۳۸	۲۹۱۳۷۸.۷۷	۷۳۹۴۱۲.۱۸	۲	
۵۶۶.۹۰	۲۰۵۹.۵۰	۳۱۳۱۱۰.۱۱	۶۷۱۹۹۳.۳۴	۳	
۷۲۶.۳۶	۲۱۴۵.۰۳	۳۳۵۷۵۹.۳۷	۷۲۴۶۵۸.۵۴	۱	۹
۷۲۰.۴۵	۲۰۴۱.۶۴	۳۳۷۱۶۱.۸۳	۷۷۵۳۳۸.۰۹	۲	
۷۲۸.۴۱	۲۰۵۸.۵۷	۳۳۷۶۰۴.۸۳	۷۸۲۹۴۳.۷۴	۳	
۹۲۴.۲۲	۲۲۴۳.۶۵	۳۴۹۳۹۵.۱۵	۷۹۱۵۶۱.۶۳	۱	۱۰
۹۳۰.۴۶	۲۳۷۳.۵۴	۳۶۰۵۵۸.۲۳	۷۸۰۰۸۹.۷۰	۲	
۹۲۱.۱۱	۲۳۶۴.۷۶	۳۴۰۳۴۶.۷۹	۷۸۵۴۱۳.۷۲	۳	

برای مقایسه راحت تر مسئله، نمودارهای شکل (۸) تا (۱۱) ترسیم شده است. این نمودارها به ترتیب میانگین های توابع هدف اول تا سوم مسئله را برای مسائل نمونه مختلف نشان می دهد. در این نمودارها می توان به مقایسه میانگین های به دست آمده از الگوریتم های مختلف پرداخت.



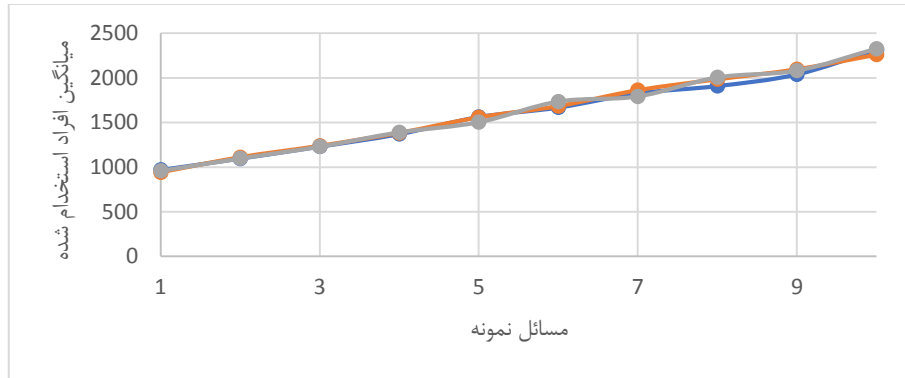
شکل ۸. روند تغییرات هزینه کل شبکه زنجیره تامین در مسائل نمونه سایز بزرگ تر

مطابق با شکل (۸) مشاهده می گردد با افزایش اندازه مسئله، هزینه های کل شبکه زنجیره تامین برای هر سه الگوریتم افزایش پیدا کرده است. به طور متوسط الگوریتم NSGA II با کسب کمترین میانگین یعنی ۵۶۱۹۱۷.۸ کارا تر از دو الگوریتم دیگر در کسب این شاخص عمل نموده است.



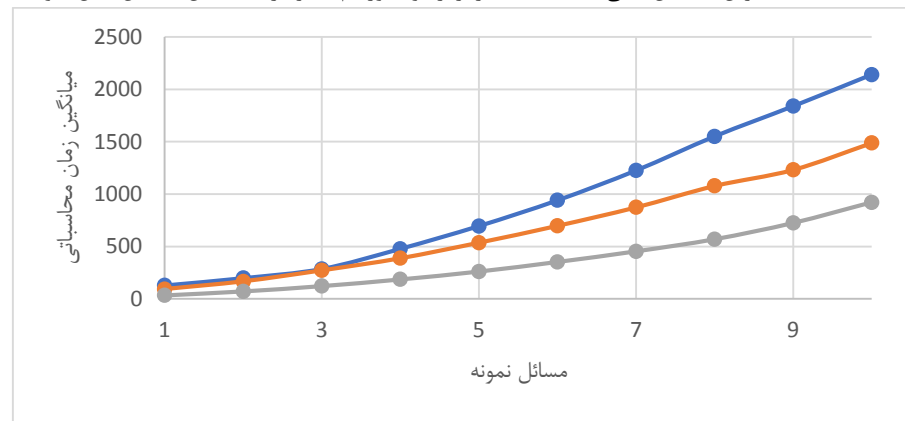
شکل ۹. روند تغییرات میزان انتشار گازهای گلخانه ای شبکه زنجیره تامین در مسائل نمونه سایز بزرگ تر

مطابق با شکل (۹) مشاهده می گردد با افزایش اندازه مسئله، میزان انتشار گازهای گلخانه ای شبکه زنجیره تأمین برای هر سه الگوریتم افزایش پیدا کرده است. به طور متوسط الگوریتم NSGA II با کسب کمترین میانگین یعنی ۲۴۸۸۹۵٫۹ کاراتر از دو الگوریتم دیگر در کسب این شاخص عمل نموده است.



شکل ۱۰. روند تغییرات تعداد افراد استخدام شده شبکه زنجیره تأمین در مسائل نمونه سایز بزرگ تر

مطابق با شکل (۱۰) مشاهده می گردد با افزایش اندازه مسئله، میانگین افراد استخدام شده شبکه زنجیره تأمین برای هر سه الگوریتم افزایش پیدا کرده است. به طور متوسط الگوریتم MOALO با کسب بیشترین میانگین یعنی ۱۶۱۲٫۱۸۴ کاراتر از دو الگوریتم دیگر در کسب این شاخص عمل نموده است.



شکل ۱۱. روند تغییرات زمان محاسباتی کسب شده در مسائل نمونه سایز بزرگ تر

مطابق با شکل (۱۱) مشاهده می گردد با افزایش اندازه مسئله، زمان محاسباتی به صورت نمایی افزایش یافته است. این امر به معنی NP-Hard بودن مسئله شبکه زنجیره تأمین می باشد. به طور متوسط الگوریتم MOALO با کسب کمترین میانگین یعنی ۳۶۹٫۹۸ کاراتر از دو الگوریتم دیگر در کسب این شاخص عمل نموده است.

۵.۱. انتخاب کاراترین الگوریتم با استفاده از روش TOPSIS

با توجه به عدم تصمیم گیری درست در خصوص انتخاب کاراترین الگوریتم از روی میانگین های کسب شده، در این بخش با استفاده از روش تصمیم گیری چند شاخصه تاپسیس به انتخاب کاراترین الگوریتم پرداخته شده است. شاخص های به کاررفته شامل میانگین توابع هدف، تعداد جواب کارا، شاخص بیشترین گسترش، شاخص فاصله متریک و زمان محاسباتی است. جدول (۲۲) میانگین های کلی شاخص های به دست آمده را به همراه وزن مطلوبیت کسب شده از روش TOPSIS نشان می دهد.

جدول ۲۲. میانگین کل شاخص های محاسباتی و وزن مطلوبیت روش TOPSIS

شاخص های محاسباتی	NSGA II	MOPSO	MOALO
هزینه کل	۵۶۱۹۱۷٫۷۶	۵۶۳۷۱۶٫۵۹	۵۶۳۶۰۹٫۵۶
میزان انتشار گاز	۲۴۸۸۹۵٫۸۹	۲۵۱۷۸۰٫۰۳	۲۵۳۳۷۳٫۸۹
نرخ استخدام	۱۵۹۸٫۴۰	۱۶۱۱٫۸۷	۱۶۱۲٫۱۸
زمان حل	۹۴۸٫۳۸	۶۸۲٫۴۹	۳۶۹٫۹۹
تعداد جواب کارا	۵۷٫۶۰	۵۶٫۵۰	۵۴٫۹۰
بیشترین گسترش	۲۰۵۰۰٫۵۴	۲۰۵۳۶٫۲۵	۱۹۳۰۰۰٫۰۳
فاصله متریک	۰٫۵۰	۰٫۵۱	۰٫۴۲
وزن مطلوبیت	۰٫۰۹۴۶	۰٫۴۴۲۹	۰٫۹۰۷۱

مطابق با وزن مطلوبیت کسب‌شده در جدول (۲۲) مشاهده می‌گردد الگوریتم MOALO به‌عنوان کاراترین الگوریتم با امتیاز ۰.۹۰۷۱ برای حل مسئله شبکه زنجیره تأمین انتخاب شده است.

۱۰. نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادی آتی

در این مقاله یک مدل غیرقطعی از مسئله شبکه زنجیره تأمین طراحی شد. سطوح شبکه زنجیره تأمین در نظر گرفته شده شامل (تأمین‌کننده‌ها، مراکز تولیدی، مراکز توزیع‌کننده اصلی، مراکز توزیع‌کننده محلی و مشتریان نهایی) بود. در این مقاله پارامترهای هزینه حمل‌ونقل و مقدار تقاضای مشتریان از محصولات به‌صورت غیرقطعی و فازی دوزنقه‌ای در نظر گرفته شد که برای کنترل این پارامترها، از روش بهینه‌سازی استوار فازی استفاده شد. در ادامه و به‌منظور بررسی مدل پیشنهادی و مشاهده خروجی‌های مدل، ابتدا یک مسئله در سایز کوچک طراحی و به دلیل سه هدفه بودن مدل از روش تصمیم‌گیری چندهدفه معیار جامع برای حل مدل استفاده شد. نتیجه این امر کسب ۶ جواب کارا بود. پس از بررسی متغیرهای خروجی مسئله، از الگوریتم‌های MOALSO، NSGA II و MOALO استفاده شد و ۱۰ مسئله نمونه در سایزهای بزرگ‌تر طراحی و حل گردید. پس از بررسی روند تغییرات میانگین‌های توابع هدف و شاخص‌های محاسباتی در مسائل نمونه سایز بزرگ، مشاهده گردید که الگوریتم NSGA II در کسب شاخص‌های تابع هدف اول، دوم، تعداد جواب کارا بیشترین کارایی را داشته است. همچنین الگوریتم MOPSO نیز در کسب شاخص بیشترین گستردگی کارایی خود را اثبات نمود. در نهایت الگوریتم MOALO در کسب شاخص‌های تابع هدف سوم، فاصله متریک و زمان محاسباتی بهتر از دو الگوریتم دیگر عمل نموده است. در انتها از روش تصمیم‌گیری چند شاخصه تاپسیس برای انتخاب بهترین الگوریتم استفاده شد که نتیجه آن انتخاب الگوریتم MOALO با کسب وزن مطلوبیت ۰.۹۰۷۱ به‌عنوان کاراترین الگوریتم در حل مسئله شبکه زنجیره تأمین پیشنهادی بود. پیشنهادهای زیر جهت بهبود کیفیت مقاله به محققین پیشنهاد می‌گردد:

الف- استفاده از روش تخفیف نموی و یا کلی در تأمین مواد اولیه موردنیاز برای تولید محصولات،

ب- استفاده از مکان‌یابی هاب سلسله مراتبی در بین مراکز توزیع‌کننده اصلی،

ج- استفاده از روش‌های دیگر کنترل عدم قطعیت و مقایسه آن با نتایج بهینه‌سازی استوار فازی، و

د- استفاده از دیگر الگوریتم‌های چندهدفه در حل مدل و بررسی خروجی آن با الگوریتم‌های پیشنهادی.

منابع

- [1]. Amin, Saman Hassanzadeh, and Guoqing Zhang. (2013). "A three-stage model for closed-loop supply chain configuration under uncertainty." *International Journal of Production Research* 51.5 (13), 1405-1425.
- [2]. Bai, C., Kusi-Sarpong, S., Badri Ahmadi, H., & Sarkis, J. (2019). Social sustainable supplier evaluation and selection: a group decision-support approach. *International Journal of Production Research*, 1-22.
- [3]. Chalmardi, M. K., & Camacho-Vallejo, J. F. (2019). A bi-level programming model for sustainable supply chain network design that considers incentives for using cleaner technologies. *Journal of Cleaner Production*, 213, 1035-1050.
- [4]. Alzaman, C., Zhang, Z. H., & Diabat, A. (2018). Supply chain network design with direct and indirect production costs: Hybrid gradient and local search based heuristics. *International Journal of Production Economics*, 203, 203-215.
- [5]. Kaya, Onur, and Busra Urek. (2016). "A mixed integer nonlinear programming model and heuristic solutions for location, inventory and pricing decisions in a closed loop supply chain." *Computers & Operations Research* 65 (16), 93-103.
- [6]. Rezaee, A., Dehghanian, F., Fahimnia, B., & Beamon, B. (2017). Green supply chain network design with stochastic demand and carbon price. *Annals of Operations Research*, 250(2), 463-485.
- [7]. Zimmer, K., Fröhling, M., & Schultmann, F. (2016). Sustainable supplier management—a review of models supporting sustainable supplier selection, monitoring and development. *International Journal of Production Research*, 54(5), 1412-1442
- [8]. Rad, R. S., & Nahavandi, N. (2018). A novel multi-objective optimization model for integrated problem of green closed loop supply chain network design and quantity discount. *Journal of cleaner production*, 196, 1549-1565.
- [9]. Farrokh, M., Azar, A., Jandaghi, G., & Ahmadi, E. (2018). A novel robust fuzzy stochastic programming for closed loop supply chain network design under hybrid uncertainty. *Fuzzy Sets and Systems*, 341, 69-91.
- [10]. Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., & Simchi-Levi, E. (2004). *Managing the Supply Chain: Definitive Guide*. Tata McGraw-Hill Education.
- [11]. Govindan, K., Rajendran, S., Sarkis, J., & Murugesan, P. (2015). Multi criteria decision making approaches for green supplier evaluation and selection: a literature review. *Journal of Cleaner Production*, 98, 66-83.
- [12]. Deng, Y. (2012). D numbers: theory and applications. *Journal of Information & Computational Science*, 9(9), 2421-2428.
- [13]. Li, M., Hu, Y., Zhang, Q., & Deng, Y. (2016). A novel distance function of D numbers and its application in product engineering. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 47, 61-67.
- [14]. Shafer, G. (1976). *A mathematical theory of evidence* (Vol. 42). Princeton university press.
- [15]. Liu, H. C., You, J. X., Fan, X. J., & Lin, Q. L. (2014). Failure mode and effects analysis using D numbers and grey relational projection method. *Expert Systems with Applications*, 41(10), 4670-4679.

- [16]. Nabil, Amir Hossein, and Ata Allah Taleizadeh. (2016). "Analysing a fuzzy integrated inventory-production-distribution planning problem with maximum NPV of cash flows in a closed-loop supply chain." *International Journal of Inventory Research* 3.1 (16), 31-48.
- [17]. Ghahremani-Nahr, J., Kian, R., & Sabet, E. (2019). A robust fuzzy mathematical programming model for the closed-loop supply chain network design and a whale optimization solution algorithm. *Expert Systems with Applications*, 116, 454-471.
- [18]. Panda, S., Modak, N. M., & Cárdenas-Barrón, L. E. (2017). Coordinating a socially responsible closed-loop supply chain with product recycling. *International Journal of Production Economics*, 188, 11-21.
- [19]. Amin, S. H., Zhang, G., & Akhtar, P. (2017). Effects of uncertainty on a tire closed-loop supply chain network. *Expert Systems with Applications*, 73, 82-91.
- [20]. Amin, S. H., & Baki, F. (2017). A facility location model for global closed-loop supply chain network design. *Applied Mathematical Modelling*, 41, 316-330.
- [21]. Sahebjamnia, N., Fathollahi-Fard, A. M., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2018). Sustainable tire closed-loop supply chain network design: Hybrid metaheuristic algorithms for large-scale networks. *Journal of cleaner production*, 196, 273-296.
- [22]. Fathollahi-Fard, A. M., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2018). A stochastic multi-objective model for a closed-loop supply chain with environmental considerations. *Applied Soft Computing*, 69, 232-249.
- [23]. Hajiaghaei-Keshteli, M., & Fard, A. M. F. (2018). Sustainable closed-loop supply chain network design with discount supposition. *Neural Computing and Applications*, 1-35.
- [24]. Jabbarzadeh, A., Houghton, M., & Khosrojerdi, A. (2018). Closed-loop supply chain network design under disruption risks: A robust approach with real world application. *Computers & Industrial Engineering*, 116, 178-191.
- [25]. Mardan, E., Govindan, K., Mina, H., & Gholami-Zanjani, S. M. (2019). An accelerated benders decomposition algorithm for a bi-objective green closed loop supply chain network design problem. *Journal of Cleaner Production*.
- [26]. Yadegari, E., Alem-Tabriz, A., & Zandieh, M. (2019). A memetic algorithm with a novel neighborhood search and modified solution representation for closed-loop supply chain network design. *Computers & Industrial Engineering*, 128, 418-436.
- [27]. Vo-Duy, T., Duong-Gia, D., Ho-Huu, V., Vu-Do, H. C., & Nguyen-Thoi, T. (2017). Multi-objective optimization of laminated composite beam structures using NSGA-II algorithm. *Composite Structures*, 168, 498-509.
- [28]. Kennedy, J. (2010). Particle swarm optimization. *Encyclopedia of machine learning*, 760-766.
- [29]. Shi, Y. (2001). Particle swarm optimization: developments, applications and resources. In *Proceedings of the 2001 congress on evolutionary computation (IEEE Cat. No. 01TH8546)* (Vol. 1, pp. 81-86). IEEE.
- [30]. Mirjalili, S., Jangir, P., & Saremi, S. (2017). Multi-objective ant lion optimizer: a multi-objective optimization algorithm for solving engineering problems. *Applied Intelligence*, 46(1), 79-95.
- [31]. Gen, M., Cheng, R., & Lin, L. (2008). *Network models and optimization: Multiobjective genetic algorithm approach*. Springer Science & Business Media.