

طراحی شبکه زنجیره تأمین چند هدفه، حلقه بسته سبز و چابک به کمک الگوریتم

فراابتکاری علف‌های هرز چند هدفه

مهدی داستانی

دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، گروه مدیریت، dastani33@yahoo.com

سید محمدرضا داودی*

(نویسنده مسئول) استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دهقان، گروه مدیریت صنعتی

مهدی کرباسیان

دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، گروه مهندسی صنایع، mkarbasi@mut-es.ac.ir

شهرام معینی

استادیار، دانشگاه اصفهان، گروه اقتصاد، shahram.moeeni@gmail.com

چکیده:

تغییرات در بازار و نیاز مشتریان یکی از مهم‌ترین موضوعات و چالش‌های مدیران زنجیره تأمین می‌باشد. چابکی مفهومی است که اخیراً توسط محققان حوزه زنجیره تأمین به منظور طراحی هرچه بهتر زنجیره تأمین ارائه شده است. از طرفی دیگر توجه به مشکلات زیست محیطی موضوع دیگری است که زنجیره‌ها تلاش دارند با تمرکز بر این حوزه، مقبولیت خود را افزایش دهند. با توجه به اهمیت موضوع، در این تحقیق به طراحی چند هدفه شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته به همراه یکپارچه‌سازی مفاهیم سبز و چابک پرداخته شده است. در این راستا، یک مدل ریاضی با اهداف اقتصادی، زیست محیطی و چابکی ارائه شده است. به منظور حل این مدل ریاضی، دو روش محدودیت افسیلون و علف‌های هرز چند هدفه ارائه شده است. نتایج مقایسات انجام شده بین این روش‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم علف‌های هرز عملکرد مناسبی از نظر شاخص‌های مختلف کیفیت و پراکندگی مرز پارتو داشته است. در پایان، مطالعه موردی زنجیره تأمین محصولات لبنی شرکت دالان کوه تشریح شده و جواب‌های بهینه حاصل از به کارگیری الگوریتم علف‌های هرز چند هدفه ارائه گردیده است.

کلمات کلیدی: زنجیره تأمین سبز حلقه بسته، روش محدودیت افسیلون، الگوریتم علف‌های هرز چند هدفه، مرز پارتو.

۱- مقدمه

زنجیره تأمین چابک به معنای سازگاری و انعطاف‌پذیری می‌باشد و زنجیره را به گونه‌ای برنامه‌ریزی می‌کند که از روشی جدید برای تحویل خدمات و کالاها در آن استفاده شود تا سریعاً به نیازهای مشتری پاسخ دهد و قیمت تمام شده را کاهش دهد. مشتری که محصول و یا خدمات را استفاده می‌کند، حداقل می‌خواهد از فناوری‌ها و محصولی همراه با نوآوری استفاده کند که تفاوتی با محصولات و خدمات پیشین دارد. با استفاده از فناوری اطلاعات، یک زنجیره چابک محیط کاری خود را تغییر می‌دهد تا بتواند علاوه بر پاسخ‌گویی به تغییرات در نیاز مشتری، کاهش قیمت‌ها را به روشی مؤثر داشته باشد و چنین تغییراتی را تا حدودی پیش‌بینی کند و با تصمیم‌گیری‌های مناسب با آن‌ها روبه‌رو شود. منابع انسانی و توانایی‌های نوآوری سازمان دو عامل سازنده مهم در ایجاد یک شرکت چابک هستند. زنجیره تأمین چابک بر انعطاف‌پذیری و ارتقای سطح کیفی تولید تأکید دارد و

در میان زنجیره‌های تأمین، عدم توانایی رویارویی با چالش‌ها، می‌تواند به معنای سقوط و منجر به پیدایش زمینه‌های ناتوانی در رقابت باشد. برای برخی این اقدام نگران‌کننده به نظر می‌رسد اما کم و بیش به لزوم ایجاد روش‌های جدید تفکر و چاره‌جویی و معیارهای جدید تأکید می‌ورزد تا توانایی بالقوه در حل چالش‌های متغیر و غیرقابل پیش‌بینی بازار را حفظ نماید. در فراهم ساختن راه‌حل‌هایی برای این تغییرات بی‌ثبات به شکلی موفق‌تر، تحلیل‌های زیادی راه‌حل‌های مختلفی را پیشنهاد کرده‌اند که عبارتند از: شبکه‌بندی، مهندسی مجدد، سازمان‌های مدولار، همکاری‌های مجازی، سازمان‌هایی با بازده بالا، تقویت کارکنان، سیستم‌های ساخت انعطاف‌پذیر و تولید به‌هنگام (مرادی و همکاران، ۲۰۱۹). در این میان، مفهوم مؤسسه چابک و سیستم ساخت ناب زمینه‌های تأثیرگذار بیشتری را دارند.

* (Corresponding author) smrdavoodi@.ut.ac.ir

تشدید رقابت در بازارهای جهانی، سازمان‌ها اقدام به بهبود عملکرد زنجیره‌های تأمین خود کرده‌اند. گاویندان و همکاران^۱ [1]، یک مدل دو هدفه برای مکان‌یابی و تخصیص پایدار در زنجیره تأمین ارائه کردند. آن‌ها به‌طور هم‌زمان به کمینه‌سازی کل هزینه‌ها و نیز کمینه‌سازی آلودگی‌های زیست‌محیطی پرداخته‌اند. به‌منظور ایجاد راه‌حل‌های پایدار از رویکرد بهینه‌سازی استوار استفاده شده است و بر روی صنعت اتومبیل‌سازی آمریکا بررسی و پیاده‌سازی شده است.

فلاح و همکاران [2]، طراحی زنجیره تأمین در شرایط رقابتی را مطرح کردند. در این شرایط زنجیره تأمین موردنظر باید در رقابت با سایر زنجیره‌ها بهترین مکان را برای مراکز خود تعیین کند. آن‌ها برای این مسئله از رویکرد تئوری بازی‌ها بهره برده‌اند.

مونتایا و همکاران^۲ [3]، به مکان‌یابی تسهیلات با محدودیت ظرفیت در زنجیره تأمین با نگاه به آلودگی‌های زیست‌محیطی و نیز هزینه‌های ساخت و راه‌اندازی تسهیلات پرداختند. در این تحقیق که در حالت چند محصولی شکل گرفته است به ارائه یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح به‌منظور تعیین بهینه مکان تسهیلات با شرایط و محدودیت‌های تعریف‌شده پرداخته شده است. این تحقیق بر روی زنجیره تأمین سیمان در کشور کلمبیا پیاده‌سازی و اجرا شده است. جنا و همکاران^۳ [4]، مکان‌یابی پویا در زنجیره تأمین را مورد بررسی قرار داده‌اند. این محققین امکان باز و نیز بسته شدن هر تسهیل در دوره‌های مختلف را برای تسهیلات مختلف در زنجیره تأمین در نظر گرفتند. این تحقیق در ساختار چند محصولی و نیز چند ظرفیتی انجام شده است. این مسئله در قالب یک مدل ریاضی ارائه شده و سپس به کمک آزادسازی لاگرانژ حل شده است. نورول و همکاران^۴ [5]، در مقاله‌ی خود به صورت برجسته در مورد آگاهی از زنجیره تأمین سبز در مالزی پرداختند. اهداف خاص این مقاله عبارتند از: (الف) ادبیات حد در ترابری سبز و زنجیره تأمین سبز و (ب) برای شناسایی آمادگی صنعت لجستیک مالزی به سوی اجرای تدارکات سبز و زنجیره تأمین سبز. برای تجزیه و تحلیل داده‌های پرسشنامه ساخته شده از نرم افزار آماری، SPSS استفاده شده است. این یافته‌ها به خصوص در کشور حال توسعه برای آمادگی زیست محیطی در صنعت لجستیک مهم است.

ژوو و وی^۵ [6]، یک مدل غیرخطی عدد صحیح به‌منظور مکان‌یابی و تعیین موجودی و نیز قیمت فروش در یک زنجیره حلقه بسته

دارای قابلیت واکنش و پاسخ‌گویی سریع و اثربخشی به تغییرات بازار است. در مقابل زنجیره تأمین ناب بر استفاده از فعالیت‌های بهبود مستمر و حذف فعالیت‌های بدون ارزش افزوده در طول زنجیره تأمین تأکید دارد. درحقیقت برای رسیدن به اهداف استراتژیک سازمان، فعالیت‌های لازم باید به‌صورت یکپارچه همراه با شرکت‌های تأمین‌کننده برای سازمان انجام پذیرد.

هر زنجیره تأمین که به‌عنوان یک زنجیره تأمین چابک تلقی می‌شود، تغییرات عملیاتی خود را انجام می‌دهد. در بخش تغییرات، ایده‌ها و راه‌حل‌های جدیدی از سوی منابع انسانی که ناشی از نوآوری در سازمان است ظهور پیدا می‌کنند. این خلاقیت در منابع انسانی و نوآوری سبب ارتقای کل دامنه فناوری در محصولات و خدماتی که می‌توانند در بازار رقابتی رقابت کنند می‌شود. در این رابطه، استفاده از معیارهای چابک توسط یک زنجیره تأمین، نه تنها سبب حفظ آن، بلکه باعث متمایز شدن آن از زنجیره تأمین‌های دیگر می‌شود. از آنجا که تغییر در بازار دائماً وجود دارد، یک سازمان چابک هم باید دائماً طی زمان تغییر کند تا بتواند تطابق خود را با تغییرات بازار حفظ کند.

از طرفی دیگر توجه به مشکلات زیست محیطی زنجیره‌های تأمین یکی از دغدغه‌های جوامع می‌باشد. آلودگی‌های یکه از تولید و حمل و نقل به وجود می‌آید بیشترین لطمه را به محیط زیست وارد می‌کند. لذا زنجیره‌های تأمین بایستی علاوه بر تلاش بر سود بیشتر و چابکی بیشتر برای مواجهه با تلاطم‌های بازار، بایستی حداقل کردن آلودگی‌های زیست محیطی خود را مد نظر داشته باشند. بر همین اساس، در این تحقیق به یکپارچه‌سازی زنجیره تأمین چابک و سبز پرداخته می‌شود. در ادامه مقاله و در بخش ۲ به ارائه جدیدتری تحقیقات مربوطه پرداخته می‌شود. در بخش ۳ مدل ریاضی و در بخش ۴ روش‌های بهینه‌سازی معرفی می‌شود. در بخش ۵ به تشریح مطالعه موردی پرداخته می‌شود در بخش ۶ نتایج عددی حاصل از بهینه‌سازی مدل ارائه شده و در پایان و در بخش ۷ به جمع‌بندی تحقیق پرداخته می‌شود.

۲- ادبیات موضوع

اخیراً مفهوم زنجیره تأمین توجه قابل ملاحظه‌ای را از طرف محققان به خود جلب کرده است. به‌طور کلی یک زنجیره تأمین شبکه‌ای از تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و خرده‌فروشان می‌باشد که از طریق آن مواد خام مورد نیاز انتقال، تولید و در نهایت به مصرف‌کنندگان تحویل داده می‌شود. بنابراین یک زنجیره تأمین شامل جریان پیچیده‌ای از مواد، محصولات، و اطلاعات در سراسر زنجیره تأمین می‌باشد. به علت

¹ Govindan et al.

² Montoya et al.

³ Jena et al.

⁴ Norol et al.

⁵ Zhuo and Wei

مرادی و همکاران [12]، یک مدل چند هدفه به منظور طراحی زنجیره تامین چابک معرفی کرده اند. در این مدل ریاضی قیمت گذاری کالا ها در شرایط غیر قطعی انجام می شود. اهداف این مدل ریاضی کاهش کل هزینه ها و کاهش کل زمان تحویل می باشد. برای حل این مدل ریاضی از رویکرد برنامه ریزی فازی استفاده شده است. نتایج عددی نشانگر کارایی مدل در شرایط عدم قطعیت می باشد.

محمودی [13]، یک مدل ریاضی سه هدفه به منظور طراحی شبکه زنجیره تامین ۵ سطحی چند محصولی پرداخته اند. در این مدل ریاضی چابکی زنجیره تامین و ریسک تولید و توزیع در نظر گرفته شده است. اهداف این مدل ریاضی شامل کمینه سازی کل هزینه ها، کمینه سازی ریسک کل زنجیره تامین و حداکثر سازی انعطاف زنجیره تامین می باشد. برای بهینه سازی این مسئله از الگوریتم NSGA-II استفاده شده است. نتایج نشان دهنده تاثیر چابکی بر طراحی زنجیره تامین و ارائه سیاست های بهتر در بازار می باشد.

شکاف این تحقیق شامل یک پارچه سازی زنجیره تامین سبز و زنجیره تامین چابک می باشد. در هیچ یک از تحقیقات مرور شده به بهینه سازی همزمان چابکی و آلودگی های زیست محیطی به طور همزمان پرداخته نشده است. همچنین جهت بهینه سازی این مسئله، از الگوریتم فراابتکاری علف های هرز چند هدفه استفاده خواهد شد که یکی از جدیدترین روش های حل چند هدفه به حساب می آید.

۳- مدل ریاضی تحقیق

در این تحقیق به بررسی زنجیره تامین محصولات لبنی پرداخته می شود. در این زنجیره تامین شیر و سایر مواد اولیه لازم از تامین کننده های مختلف دریافت می شود. همچنین مازاد نیاز از ایستگاه جمع آوری شیر که یک واسطه می باشد تامین می شود. محصولات پس از تولید به توزیع کننده های مختلف ارسال شده و آنها پس از بازرسی محصولات آنها را نگهداری کرده و در زمان مناسب بین مشتریان توزیع می کنند. توزیع کننده امکان نگهداری کالا و تحویل در دوره های آتی را دارد. این شرایط باعث می شود که درصدی از محصولات موجود در انبار توزیع کننده فاسد شده و نیاز به بازگشت به کارخانه داشته باشد. کارخانه تولیدی درصدی محصولات برگشتی را فرآوری کرده و مجدداً به چرخه توزیع و فروش برمی گرداند. سایر این محصولات برگشتی نیز جز ضایعات تولید محسوب شده و دفع می شود.

ارائه کردند. در این تحقیق میزان تقاضا به صورت یک رابطه نمایی از میزان قیمت تعیین شده ارائه شده است. به منظور حل این مدل یک روش ابتکاری مبتنی بر سیستم سفارش موجودی و نیز دوره سفارش دهی طراحی و پیاده سازی شده است. بارگیس و همکاران^۱ [7]، به ترکیب لجستیک رفت و لجستیک معکوس به منظور طراحی یک زنجیره تامین در شرایط عدم قطعیت تقاضا پرداخته اند. برای این منظور علاوه بر کمینه سازی هزینه های کل زنجیره، کاهش تولید گازهای CO2 نیز مدنظر قرار گرفت. برای حل این مدل یک الگوریتم کلونی مورچگان توسعه داده شده است. وو و بارنز^۲ [8]، به طراحی شبکه زنجیره تامین با در نظر گرفتن چابکی زنجیره و نیز قابلیت اطمینان پرداخته اند. در این تحقیق، چند مدل ریاضی مختلف برای بررسی تبادل بین هزینه ها، چابکی و قابلیت اطمینان ارائه شده است. این تحقیق بر روی صنعت تولید اتوبوس در چین پیاده سازی شده است. برای بهینه سازی این مسئله از روش برنامه ریزی پویا استفاده شده است. نتایج تحقیق بیانگر آن است که زنجیره تامین چابک قابلیت تعیین مقدار مناسبی از همکاران تجاری زنجیره تامین می باشد.

راد و همکاران [9]، یک مدل چند هدفه یکپارچه به منظور طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته سبز با در نظر گرفتن کیفیت محصولات و تخفیف در زنجیره ارائه کرده اند. اهداف این مدل شامل کاهش هزینه ها، کاهش آلودگی های زیست محیطی و افزایش رضایتمندی مشتریان می باشد. نتایج این تحقیق نشان داده است که کاهش آلودگی های زیست محیطی منجر به نتایج مناسب از نظر رضایتمندی مشتریان خواهد شد.

گلیچی و همکاران^۳ [10]، به طراحی زنجیره سبز برای تولید خودروهای دیزلی پرداخته اند. در این یک مدل ریاضی چند هدفه وابسته به سناریو طراحی شده و با برنامه ریزی ریاضی تصادفی بهینه سازی شده است. اهداف این مدل شامل کاهش هزینه ها و کاهش آلودگی های زیست محیطی در نظر گرفته شده است. لیانگ و کونستا^۴ [11]، زنجیره تامین حمل و نقل سوخت را مورد مطالعه قرار داده اند. آنها کاهش هزینه انرژی و کاهش گازهای گلخانه ای را به عنوان مهمترین اهداف این زنجیره معرفی و به بهینه سازی آن پرداخته اند. این تحقیق در ژاپن پیاده سازی شده و راه حل ایده آل که یک بالانس بین هزینه های انرژی و آلودگی های زیست محیطی ایجاد می کند را ارائه کرده است.

¹ Burgess et al.

² Wu and Barnes

³ Liang et al.

⁴ Liang and Quesade

سایر مفروضات مدل ریاضی به شرح زیر می‌باشد

پارامترها

- D_{cp}^t : تقاضای مشتری c برای محصول p در دوره t
- SC_{sr}^t : هزینه خرید ۱ واحد ماده خام r از تأمین کننده s در دوره t
- \dot{MC}_{ip}^t : واحد هزینه تولید محصول p در کارخانه i در دوره t
- IC_{jp}^t : هزینه هر واحد بازرسی و بازیافت محصول p در مرکز توزیع j در دوره t
- HC_{jp}^t : واحد هزینه نگهداری محصول p در مرکز توزیع j در دوره t
- FX_i^t : هزینه ثابت راه اندازی کارخانه i در دوره t
- FY_j^t : هزینه ثابت راه اندازی مرکز توزیع j در دوره t
- CS_{sr}^t : ظرفیت تأمین کننده s برای تأمین ماده اولیه r در دوره t
- CX_i^t : ظرفیت تولید در کارخانه i در دوره t
- CY_j^t : ظرفیت مرکز توزیع j در دوره t
- CSI_{sir}^t : واحد هزینه انتقال ماده خام r از تأمین کننده s به کارخانه i در دوره t
- CII_{ijpl}^t : واحد هزینه انتقال محصول p از کارخانه i به مرکز توزیع j در دوره t با سیستم حمل و نقل l
- CJC_{jcp}^t : واحد هزینه انتقال محصول p از مرکز توزیع j به مشتری c با سیستم حمل و نقل l در دوره t
- CJI_{jip}^t : واحد هزینه انتقال محصول p از مرکز توزیع j به کارخانه i در دوره t با سیستم حمل و نقل l
- CTR_i^t : هزینه ثابت به کار گیری حمل و نقل l در دوره t
- ESI_{sir}^t : واحد آلودگی Co2 حاصل از انتقال ماده خام r از تأمین کننده s به کارخانه i در دوره t
- EII_{ijpl}^t : واحد آلودگی Co2 حاصل از انتقال محصول p از کارخانه i به مرکز توزیع j در دوره t با سیستم حمل و نقل l

- زنجیره تأمین دارای ۴ سطح اصلی شامل تأمین کننده، تولید کننده و توزیع کننده و مشتریان می باشد.
- علاوه بر تأمین کننده ها یک ایستگاه جمع آوری شیر به منظور تأمین مازاد شیر مورد نیاز در شبکه وجود دارد.
- در بین اعضای زنجیره سیستم‌های حمل و نقل متفاوتی وجود دارد که هر کدام دارای هزینه‌های ثابت و هزینه‌های متغیر می‌باشد.
- بین هر تأمین کننده و توزیع کننده و نیز بین هر توزیع کننده و مشتری تنها یک سیستم حمل و نقل می‌تواند استفاده شود.
- زنجیره موظف به تأمین کل تقاضای پیش بینی شده می باشد.
- تعدادی مراکز بالقوه برای تأسیس مراکز توزیع و چند مرکز بالقوه برای کارخانه ها وجود دارد که یک یا چند مورد از آن‌ها باید تأسیس شود.
- تعداد مراکز که باید تأسیس شود از پیش مشخص نیست اما مدل ریاضی بایستی با توجه به میزان تقاضا و هزینه‌های احداث و ارسال، بهترین حالت ممکن را ارائه کند.
- اهداف این مسئله شامل کاهش کل هزینه ها و کاهش گازهای گلخانه ای و بهینه سازی انعطاف زنجیره تأمین می باشد.

اندیس‌ها

- S: اندیس مکان ثابت تأمین کننده‌ها (s=1,2,..., S)
- i: اندیس مکان‌های ثابت کارخانه‌ها (i=1,2,..., I)
- j: اندیس مکان‌های بالقوه برای مراکز توزیع (j=1,2,..., J)
- c: اندیس مکان‌های ثابت مشتریان (c=1,2,..., C)
- p: اندیس محصولات (p=1,2,..., P)
- r: اندیس مواد خام (r=1,2,..., R)
- l: اندیس سیستم‌های انتقال کالا (l=1,2,..., L)
- t: اندیس دوره‌های زمانی (t=1,2,..., T)

QJI_{ijpl}^t : مقدار محصول p ارسال شده از مرکز توزیع j به کارخانه i با سیستم حمل و نقل l در دوره t

W_s^t : متغیر باینری برابر ۱ اگر در تامین کننده s در دوره t، انتخاب شود

X_i^t : متغیر باینری برابر ۱ اگر در نقطه i در دوره t، کارخانه تاسیس شود

Y_j^t : متغیر باینری برابر ۱ اگر در نقطه j در دوره t، مرکز توزیع راه اندازی شود

A_{ijl}^t : متغیر باینری برابر ۱ اگر سیستم حمل و نقل l کارخانه i و مرکز توزیع j را در دوره t به هم متصل کند

B_{jcl}^t : متغیر باینری برابر ۱ اگر سیستم حمل و نقل l مرکز توزیع j را به مشتری c در دوره t متصل کند

روابط مدل ریاضی

$$\text{Min } Z1 = \sum_t \sum_j F Y_j^t (Y_j^t) + \sum_t \sum_i F X_i^t (X_i^t) \quad (1)$$

$$+ \sum_t \sum_s \sum_i \sum_r (QSI_{sir}^t + QSO_{ir}^t) SC_{sr}^t + \sum_i \sum_p \sum_t QI_{ip}^t MC_{ip}^t$$

$$+ \sum_t \sum_c \sum_j \sum_p \sum_l QJC_{jcpl}^t IC_{jp}^t + \sum_t \sum_j \sum_p INV_{jp}^t HC_p^t$$

$$+ \sum_t \sum_s \sum_i \sum_r QSI_{sir}^t CSI_{sir}^t$$

$$+ \sum_t \sum_i \sum_j \sum_p \sum_l QIJ_{ijpl}^t CIJ_{ijpl}^t$$

$$+ \sum_t \sum_j \sum_c \sum_p \sum_l QJC_{jcpl}^t CJC_{jcpl}^t$$

$$+ \sum_t \sum_i \sum_j \sum_p \sum_l QJI_{ijpl}^t CJI_{ijpl}^t$$

EJI_{ijpl}^t : واحد آلودگی Co2 حاصل از انتقال محصول p از مرکز توزیع j به کارخانه i در دوره t با سیستم حمل و نقل l

EJC_{jcpl}^t : واحد آلودگی Co2 حاصل از انتقال محصول p از مرکز توزیع j به مشتری c با سیستم حمل و نقل l در دوره t

EC_{ip}^t : واحد آلودگی Co2 حاصل از تولید محصول p در کارخانه i در دوره t

n_{rp} : ضریب مصرف ماده خام r در محصول p

m_p : نرخ استفاده از ظرفیت در تولید محصول p

R_p : درصد بازگشت محصول p به کارخانه

Rp_p : درصد فراوری محصول p از محصولات برگشتی به کارخانه

BM: یک عدد خیلی بزرگ

W1: میزان تاثیر(وزن) چابکی کارخانه ها در چابکی کل زنجیره تامین

W2: میزان تاثیر(وزن) چابکی مراکز توزیع در چابکی کل زنجیره تامین

W3: میزان تاثیر(وزن) چابکی تامین کننده ها در چابکی کل زنجیره تامین

متغیرهای تصمیم

QSI_{sir}^t : مقدار ماده خام r ارسال شده از تامین کننده s به کارخانه i در دوره t

QSO_{ir}^t : مقدار ماده خام r ارسال شده از ایستگاه تامین ماده اولیه به کارخانه i در دوره t

QI_{ip}^t : مقدار محصول p تولید شده در کارخانه i در دوره t

QIJ_{ijpl}^t : مقدار محصول p ارسال شده از کارخانه i به مرکز توزیع j با سیستم حمل و نقل l در دوره t

INV_{jp}^t : موجودی محصول p در مرکز توزیع j در پایان دوره t

QJC_{jcpl}^t : مقدار محصول p انتقال یافته از مرکز توزیع j به مشتری c با سیستم حمل و نقل l در دوره t

$$\sum_j \sum_p \sum_l m_p QIJ_{ijpl}^t \leq CX_i^t X_i^t, \forall i, t \quad (11)$$

$$\sum_p INV_{jp}^t + \sum_c \sum_p \sum_l QJC_{jcpl}^t \leq CY_j^t Y_j^t, \quad \forall j, t \quad (12)$$

$$\sum_l A_{ijl}^t \leq 1, \quad \forall i, j, t \quad (13)$$

$$\sum_l B_{jcl}^t \leq 1, \quad \forall j, c, t \quad (14)$$

$$A_{ijl}^t \leq \sum_p QIJ_{ijpl}^t, \quad \forall i, j, l, t \quad (15)$$

$$B_{jcl}^t \leq \sum_p QJC_{jcpl}^t, \quad \forall j, c, l, t \quad (16)$$

$$\sum_p QIJ_{ijpl}^t + QJI_{jipl}^t \leq BM * A_{ijl}^t, \quad \forall i, j, l, t \quad (17)$$

$$\sum_p QJC_{jcpl}^t \leq BM * B_{jcl}^t, \quad \forall j, c, l, t \quad (18)$$

$$\sum_l QJI_{jipl}^t = R_p * INV_{jp}^t, \quad \forall j, p, l, t \quad (19)$$

$$\sum_j QIJ_{ijpl}^t = QI_{ip}^t + R_{pp} * \sum_j QJI_{jipl}^t, \quad \forall i, p, l, t \quad (20)$$

رابطه ۱، کل هزینه‌های هر دوره زنجیره را بیان می‌کند. این هزینه‌ها شامل هزینه‌های ثابت راه اندازی مراکز توزیع و خرید از تأمین کننده‌ها، هزینه‌های تولید، هزینه‌های عملیاتی در مراکز توزیع، هزینه‌های موجودی در مراکز توزیع و هزینه‌های انتقال توسط سیستم‌های مختلف حمل و نقل در زنجیره تأمین می‌باشد. همچنین رابطه ۲ کل میزان CO2 انتشار یافته از تولید محصولات، انتقال از تأمین کننده به کارخانه، انتقال از کارخانه به مراکز توزیع و انتقال از مراکز توزیع به مشتریان را کمینه سازی می‌کند. رابطه ۳ کل میزان چابکی زنجیره تأمین را مشخص می‌کند. در این هدف به دلیل اینکه ممکن است چابکی تأمین، تولید و توزیع از اهمیت یکسانی برخوردار نباشد، مجموع موزون چابکی تأمین، تولید و توزیع به عنوان چابکی کل زنجیره تأمین معرفی شده است.

$$\begin{aligned} & + \sum_t \sum_j \sum_i \sum_l A_{ijl}^t CTR_l^t \\ & + \sum_t \sum_j \sum_c \sum_l B_{jcl}^t CTR_l^t \\ \text{Min } Z2 = & \sum_i \sum_p \sum_t QI_{ip}^t EC_{ip}^t \quad (2) \\ & + \sum_t \sum_s \sum_i \sum_r QSI_{sir}^t ESI_{sir}^t \\ & + \sum_t \sum_i \sum_j \sum_p \sum_l QIJ_{ijpl}^t EIJ_{ijpl}^t \\ & + \sum_t \sum_j \sum_c \sum_p \sum_l QJC_{jcpl}^t EJC_{jcpl}^t \\ & + \sum_t \sum_i \sum_j \sum_p \sum_l QJI_{jipl}^t EJI_{jipl}^t \end{aligned}$$

$$\text{Min } Z3 = \sum_t w1 A_t + \sum_t w2 A_t + \sum_t w3 AS_t \quad (3)$$

$$A_t = \sum_i CX_i^t X_i^t - \sum_c \sum_p D_{cp}^t \quad (4)$$

$$AS_t = \sum_r (\sum_s CS_{sr}^t W_s^t - \sum_c \sum_p n_{rp} D_{cp}^t) \quad (5)$$

$$A_t = \sum_j CY_j^t Y_j^t - \sum_c \sum_p D_{cp}^t \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \sum_j \sum_p \sum_l n_{rp} QIJ_{ijpl}^t \\ & = \sum_s QSI_{sir}^t, \quad \forall i, r, t \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & INV_{jp}^{t-1} + \sum_i \sum_l QIJ_{ijpl}^t \\ & = INV_{jp}^t + \sum_c \sum_l QJC_{jcpl}^t \\ & + \sum_i \sum_l QJI_{jipl}^t, \quad \forall j, p, t \quad (8) \end{aligned}$$

$$\sum_j \sum_l QJC_{jcpl}^t = D_{cp}^t, \quad \forall c, p, t \quad (9)$$

$$\sum_i QSI_{sir}^t \leq CS_{sr}^t W_s^t, \quad \forall s, r, t \quad (10)$$

استفاده قرار گرفته است که در ادامه این بخش به تشریح آنها پرداخته می شود.

۴-۱ روش محدودیت اپسیلون

روش محدودیت اپسیلون یک روش حل دقیق برای حل مدل های ریاضی با توابع هدف چندگانه می باشد. در این روش با حفظ تنها یک تابع هدف و انتقال سایر توابع به مجموعه محدودیت ها با مقادیر سمت راست قابل تعریف توسط کاربر، مدلسازی جدیدی از مسأله بهینه سازی چند هدفه را ارائه کردند. این مدل کلی به صورت زیر می باشد.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } f_{\mu}(x) & (21) \\ & \text{subject to } f_m(m) \leq \varepsilon_m, \quad m = 1, 2, \dots, M \text{ and } m \\ & \quad \quad \quad \neq \mu \\ & g_j(x) \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, J \end{aligned}$$

در مدل فوق، پارامتر ε_m ، حد بالای مقدار f_m را نشان می دهد. برای نشان دادن چگونگی کارکرد این روش، مسأله با دو هدف f_1 و f_2 را در نظر بگیرید. همچنین، فرض کنید که f_2 در تابع هدف باقی می ماند و f_1 به مجموعه محدودیت ها اضافه می شود $(f_1(x) \leq \varepsilon_1)$.

فرض کنید که در ابتدا $\varepsilon_1 = \varepsilon_1^c$ باشد. مسأله حاصل از در نظر گرفتن این محدودیت، فضای هدف امکان پذیر اصلی را به دو قسمت $f_1(x) \leq \varepsilon_1^c$ و $f_1(x) > \varepsilon_1^c$ تقسیم می کند. قسمت چپ ناحیه امکان پذیر، جواب شدنی مسأله بیان شده را به دست می دهد. اکنون مأموریت مسأله منتج شده، یافتن جوابی است که می نیمم مقدار این ناحیه شدنی باشد. از شکل واضح است که c جواب مینیمم است. با توجه به این شکل، جواب های میانی را می توان در مسائلی با فضای هدف غیر محدب، با استفاده از روش محدودیت- ε بدست آورد.

۴-۲ الگوریتم علف های هرز چند هدفه

الگوریتم علف های هرز (IWO^1)، یک الگوریتم فرا ابتکاری الهام گرفته از طبیعت است که رفتار علف های هرز و رویش آنها الهام گرفته شده است. شکل سراسری و برجسته رشد می کنند به طوری که توسط بشر قابل حذف و کنترل نیستند. یک ادعایی که

رابطه ۴ چابکی کارخانه ها و یا همان سطح تولید را نشان می دهد. رابطه ۵ چابکی تامین کننده ها یا همان سطح تامین را نشان می دهد. رابطه ۶ چابکی توزیع کننده ها یا همان سطح توزیع را نشان می دهد. محدودیت ۷ نشان می دهد که میزان ماده خام وارد شده به هر کارخانه در هر دوره برابر میزان خروجی از آن کارخانه در همان دوره می باشد. محدودیت ۸ تضمین می کند که برای هر یک از محصولات در هر یک از دوره ها، میزان وارد شده به هر یک از مراکز توزیع و نیز موجودی باقی مانده از دوره قبل، برابر میزان ارسال شده به مشتری ها و نیز مابقی موجودی در انتهای دوره می باشد. این رابطه به رابطه بالانس موجودی معروف است.

محدودیت ۹ بیان می کند که برای هر محصول و در هر دوره، میزان موجود در هر یک از مراکز توزیع باید بتواند تقاضای آن محصول را برآورده کند. محدودیت ۱۰ تضمین می کند که میزان ارسال از هر یک از مواد خام در تأمین کننده ها از ظرفیت آن ها بیشتر نباشد. محدودیت ۱۱ محدودیت ظرفیت مواد در کارخانه ها را مشابه تأمین کننده ها بیان می کند. محدودیت ۱۲ بیان می کند که موجودی باقی مانده در هر یک از مراکز توزیع از ظرفیت آن ها نباید بیشتر باشد. محدودیت ۱۳ و ۱۴ بیان می کند که در هر یک از اعضای زنجیره تنها یک سیستم حمل و نقل می تواند به کار گرفته شود.

محدودیت ۱۵ و ۱۶ این نکته را بیان می کند که سیستم حمل و نقل در بین اعضای از زنجیره که به یکدیگر کالا ارسال می کنند به کار گرفته می شود. محدودیت ۱۷ و ۱۸ این نکته را بیان می کند که اعضای از زنجیره که ارتباطی باهم ندارند، کالایی نیز ارسال نمی شود.

رابطه ۱۹ میزان کالای برگشتی را به عنوان درصدی از موجودی توزیع کننده تعیین می کند. رابطه ۲۰ به این نکته اشاره دارد که میزان کالای ارسال شده از کارخانه به مراکز توزیع برابر میزان تولید شده در کارخانه و درصدی از محصولات برگشتی است که بازفرآوری می شود.

۴- روش های حل مدل ریاضی پیشنهادی

با توجه به این موضوع که مدل ریاضی طراحی شده یک مدل چند هدفه می باشد، لذا جهت حل این مدل بایستی از روش های بهینه سازی چند هدفه استفاده نمود. در این راستا روش محدودیت اپسیلون و الگوریتم فرا ابتکاری علف های هرز چند هدفه مورد

¹ Invasive weed optimization algorithm

در این تحقیق از الگوریتم علف های هرز چند هدفه استفاده شده است.

۵- معرفی شرکت مورد مطالعه

واحد مورد مطالعه این تحقیق، صنعت تولید محصولات لبنی کشور می باشد و به عنوان نمونه شرکت دالان کوه جهت پیاده سازی مدل پیشنهادی تحقیق انتخاب شده است. پس از ارائه مدل ریاضی توسعه یافته و نیز روش های بهینه سازی آن، به پیاده سازی آن در یک مطالعه موردی واقعی پرداخته می شود. این شرکت دارای یک دامداری ۵۰۰ راسی بوده که کارخانه در زمینی به مساحت ۱۰۰۰۰ متر مربع، با ظرفیت سالانه ۴۰۰۰۰ تن در یک خط تولید، با جدیدترین تکنولوژی روز دنیا و به صورت اتوماسیون کامل و دقت بسیار بالا و با بهره گیری از نیروهای مجرب و متخصص شروع به کار نموده است.

۶- نتایج عددی

۶-۱ شاخص های عملکردی مقایسه الگوریتم های فراابتکاری

در این قسمت، شاخص های کمی و کیفی که اغلب برای مقایسه عملکرد الگوریتم های فرا ابتکاری به کار می رود، معرفی می گردند.

SNS

این شاخص که به آن شاخص گستردگی نیز می گویند برای محاسبه میزان تنوع جواب های پارتو مورد استفاده قرار می گیرد. هر چه مقدار این شاخص بزرگ تر باشد الگوریتم اولویت بالاتری دارد. مقدار مربوط به این شاخص با استفاده از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$SNS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MID - C_i)^2}{n-1}} \quad (22)$$

در رابطه بالا، n معرف تعداد جواب های نامغلوب می باشد و هم چنین مقدار C_i نیز با استفاده از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$C_i = \sqrt{f_1^2 + f_2^2 + f_3^2} \quad (23)$$

در رابطه بالا f_1 و f_2 به ترتیب مقدار تابع هدف اول و دوم به ازای جواب نامغلوب i می باشد.

در مورد علف های هرز وجود دارد این است که علف های هرز همیشه برنده هستند. به طور کلی دلایل این ادعا را می توان به شکل زیر بیان کرد [14].

- وجود علف های هرز بعد از هزاران سال از کشاورزی
 - وجود علف های هرز حتی بعد از استفاده از سموم مختلف
 - ظاهر شدن گونه های جدید علف های هرز به صورت گسترده روی زمین
 - تطبیق با محیط پیرامون خود
- ویژگی های فوق نشان می دهد که علف های هرز گیاهانی قوی و مزاحم در کشاورزی هستند. همچنین نشان دهنده این واقعیت است که علف های هرز خود را با محیط تطبیق می دهند و برای رشد رفتار خود را تغییر می دهند. موفقیت علف های هرز، وابسته به اکولوژی و زیست شناسی آن ها است.

۴-۲-۱ بهینه سازی بر اساس رفتار علف های هرز

مراحل الگوریتم بهینه سازی علف های هرز مطابق با رفتار این موجود در طبیعت به صورت زیر می باشد.

مرحله اول: پخش دانه در فضای مورد نظر

مرحله دوم: رشد دانه ها با توجه به مطلوبیت (زادوولد) و پراکندگی محیطی

مرحله سوم: ادامه حیات علف هایی با مطلوبیت بیشتر (حذف رقابتی)

مرحله چهارم: ادامه پروسه تا رسیدن به گیاهان با بهترین مطلوبیت

مزیت اصلی الگوریتم علف های هرز نسبت به سایر الگوریتم های فراابتکاری در آن است که این الگوریتم با توجه به مفهوم پخش دانه و رشد آنها، می تواند طیف وسیعی از جواب های موجه که پراکندگی زیادی نیست به هم دارد را یافت کند. سپس با انجام تکرارهای مختلف، پوشش کاملی از فضای موجهه ایجاد میکند. لذا می توان انتظار داشت که این الگوریتم بر خلاف سایر الگوریتم ها که در دام بهینه محلی قرار می گیرند، بتواند با پوشش حداکثری فضای موجه، جواب بهینه کلی مسئله را پیدا کند. به همین دلیل

با به کارگیری این شاخص، یکنواختی انتشار جواب‌های نامغلوب طبق رابطه زیر حاصل می‌شود. هرچه شاخص SM کوچک‌تر باشد، الگوریتم اولویت بالاتری دارد.

$$SM = \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{d} - d_i|}{(n-1)\bar{d}} \quad (27)$$

در رابطه بالا n تعداد جواب‌های نامغلوب حاصله و d_i کمترین فاصله اقلیدسی بین جواب i ام و جواب‌های یافت شده در مجموعه جواب‌های نامغلوب حاصله و \bar{d} متوسط این فاصله‌ها است.

NPS

این شاخص برای محاسبه تعداد جواب‌های نامغلوب به دست آمده توسط الگوریتم به کار می‌رود. هرچه شاخص SM بزرگ‌تر باشد، الگوریتم اولویت بالاتری دارد.

شایان ذکر است که شاخص‌های معرفی شده برای مسئله با سه تابع هدف ارائه شده است. در صورت افزایش تعداد توابع هدف تنها کافی است مقادیر توابع هدف مورد نظر در فرمول گنجانده شده و فرمول مورد نظر تعمیم داده شود. لازم به ذکر است که در این پژوهش از شاخص‌های Max-Spread، SNS، RAS، MID، Spacing، NPS، برای مقایسه کارایی روش‌های حل استفاده شده است.

۶-۲ بررسی کارایی روش‌های حل پیشنهادی

برای مقایسه روش‌های مورد نظر مورد نظر بر اساس شاخص‌های مورد بررسی، ۱۰ مثال در ابعاد مختلف تولید گردید. این مثال‌ها به صورت تصادفی تولید شده است اطلاعات این مثال‌ها به شرح جدول ۵ می‌باشد. لازم به ذکر است برای هر یک از روش‌های حل محدودیت زمانی ۳۶۰۰ ثانیه لحاظ شده است.

شاخص پراکندگی^۱

این شاخص (Max-Spread) برای محاسبه گستردگی جواب‌های جبهه پارتو بهینه حاصل از الگوریتم به کار می‌رود. هر چه مقدار این شاخص بزرگ‌تر باشد الگوریتم اولویت بالاتری دارد. مقدار این شاخص با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$DM = \sqrt{\sum_{i=1}^I (\text{Min } f_i - \text{Max } f_i)^2} \quad (24)$$

در رابطه بالا، $\text{Min } f_i$ بیانگر حداقل مقدار تابع هدف در میان تمامی جواب‌های نامغلوب حاصل از الگوریتم می‌باشد و $\text{Max } f_i$ نیز بیانگر حداکثر مقدار تابع هدف در میان تمامی جواب‌های نامغلوب حاصل از الگوریتم می‌باشد.

۲MID

با استفاده از این شاخص، فاصله نزدیکی بین جواب‌های نامغلوب حاصله و نقطه ایده آل حاصل می‌گردد. هر چه مقدار این شاخص کوچک‌تر باشد الگوریتم اولویت بالاتری دارد. این شاخص با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\left(\frac{f_{1i} - f_{1\text{best}}}{f_{1\text{total}}^{\text{max}} - f_{1\text{total}}^{\text{min}}}\right)^2 + \left(\frac{f_{2i} - f_{2\text{best}}}{f_{2\text{total}}^{\text{max}} - f_{2\text{total}}^{\text{min}}}\right)^2}}{n} \quad (25)$$

در رابطه بالا، $f_{1\text{total}}^{\text{max}}$ به صورت بزرگ‌ترین مقدار بین جواب‌های نامغلوب تعریف می‌شود. هم‌چنین $f_{2\text{total}}^{\text{min}}$ نیز به صورت کوچک‌ترین مقدار بین جواب‌های نامغلوب حاصل از الگوریتم در نظر گرفته می‌شود.

۳RAS

این شاخص به دنبال تعادلی در دستیابی به هر یک اهداف می‌باشد و مقدار آن با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$RAS = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\left| \frac{f_{1i}(x) - f_{1i}^{\text{best}}(x)}{f_{1i}^{\text{best}}(x)} \right| + \left| \frac{f_{2i}(x) - f_{2i}^{\text{best}}(x)}{f_{2i}^{\text{best}}(x)} \right| \right]}{n} \quad (26)$$

هر چه مقدار این شاخص کوچک‌تر باشد الگوریتم اولویت بالاتری دارد.

Spacing

¹ Max-Spread

² Mean Ideal Distance

³ The Rate of Achievement to Objectives Simultaneously

جدول ۲ اطلاعات مسائل عددی

شماره مثال	تعداد تامین کننده	تعداد کارخانه	تعداد مراکز توزیع	تعداد محصولات	تعداد مواد خام	تعداد سیستم های حمل و نقل	تعداد دوره های زمانی
۱	۵	۲	۴	۱	۱	۱	۷
۲	۷	۳	۶	۳	۲	۱	۷
۳	۹	۴	۸	۵	۳	۱	۹
۴	۱۱	۵	۱۰	۷	۴	۲	۹
۵	۱۳	۶	۱۲	۹	۵	۲	۱۲
۶	۱۵	۷	۱۴	۱۱	۶	۲	۱۲
۷	۱۷	۸	۱۶	۱۳	۷	۳	۱۵
۸	۱۹	۹	۱۸	۱۵	۸	۳	۱۵
۹	۲۱	۱۰	۲۰	۱۷	۹	۳	۲۰
۱۰	۲۳	۱۲	۲۲	۱۹	۱۰	۴	۲۰

سپس هر دو روش حل مقدار شاخص های کیفیت جواب مسئله محاسبه و در جداول ۳ و ۴ گزارش شده است.

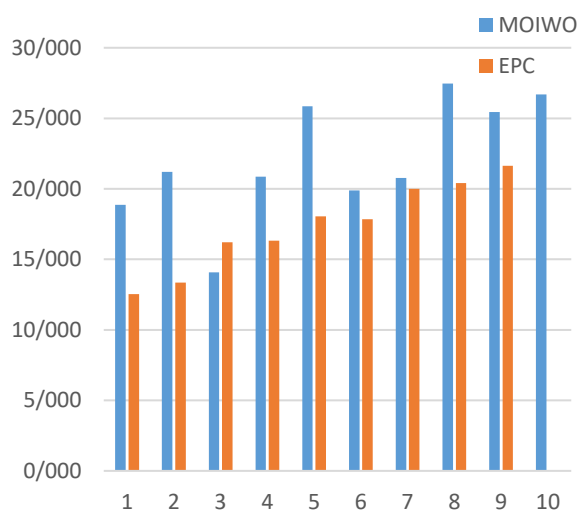
جدول ۳ خروجی محدودیت اپسیلون برای مثال های حل شده

شماره مسئله	MID	Max_Spread	SM	NPS	RAS	Spacing	CPU time
1	12.522	11.641	7.994	7	0.318	7.884	6.243
2	13.347	12.001	9.927	10	0.391	9.779	13.923
3	16.219	14.434	9.719	11	0.638	12.031	80.205
4	16.318	16.057	15.639	11	0.682	17.772	425.727
5	18.037	17.340	20.293	13	0.897	21.792	994.581
6	17.844	22.863	22.848	15	1.528	23.336	1272.391
7	20.006	31.395	30.102	17	2.064	33.215	2464.165
8	20.405	40.311	34.497	19	3.109	35.137	3600.299
9	21.629	42.374	52.884	19	3.616	49.150	3600.571

شماره مسئله	MID	Max_Spread	SM	NPS	RAS	Spacing	CPU time
10	0.000	0.000	0	0	0.000	0.000	Not solved
متوسط	17.369	23.157	22.656	13.556	1.471	23.344	1384.234

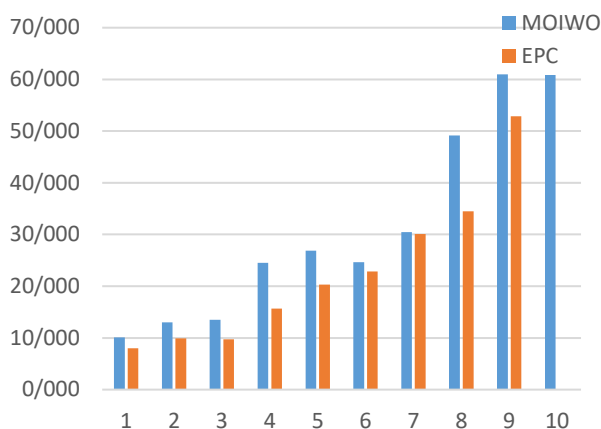
جدول ۴ خروجی MOIWO برای مثال های حل شده

شماره مسئله	MID	Max_Spread	SNS	NPS	RAS	Spacing	CPU time
1	18.863	8.128	10.083	7.000	0.446	7.038	13.628
2	21.198	16.778	12.985	19.000	0.554	9.126	13.067
3	14.086	17.496	13.515	17.000	0.767	17.506	31.580
4	20.849	24.965	24.499	22.000	0.786	16.450	57.938
5	25.844	18.693	26.859	20.000	1.224	24.946	74.544
6	19.884	33.126	24.651	37.000	1.577	30.373	96.803
7	20.778	38.493	30.473	40.000	2.529	46.129	129.095
8	27.458	47.356	49.158	49.000	4.223	43.533	134.002
9	25.433	47.813	60.994	47.000	3.865	53.544	159.827
10	26.681	55.862	60.842	48.000	6.493	64.762	171.294
متوسط	22.107	30.871	31.4059	30.6	2.247	31.341	88.17783



6-2-1 بررسی روش های حل بر اساس شاخص MID

میانگین این شاخص برای محدودیت اپسیلون برابر ۱۷.۵ بوده و برای الگوریتم MOIWO برابر ۲۲.۱۰ بوده است. در شکل ۳ مقدار این شاخص برای هر یک از مثال های حل شده توسط دو الگوریتم ارائه شده است.

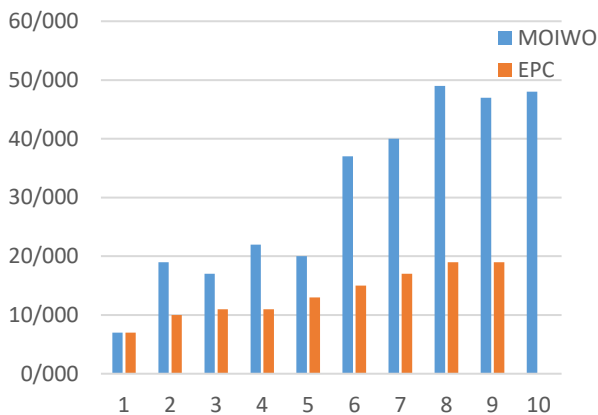


شکل ۵ مقایسه روش های حل بر اساس شاخص SNS

در خصوص شاخص SNS نیز همانند شاخص Max spread توانایی الگوریتم MOIWO در یافتن جواب های بهینه به خوبی قابل رویت می باشد. با افزایش شماره مسئله، برتری روش MOIWO در شاخص SNS بیشتر دیده می شود.

۴-۲-۶ بررسی روش های حل بر اساس شاخص NPS

میانگین این شاخص برای محدودیت اپسیلون برابر ۱۳.۵۵ بوده و برای الگوریتم MOIWO برابر ۳۰.۶۰ بوده است. در شکل ۶ مقدار این شاخص برای هر یک از مثال های حل شده توسط دو روش حل ارائه شده است.



شکل ۶ مقایسه روش های حل بر اساس شاخص NPS

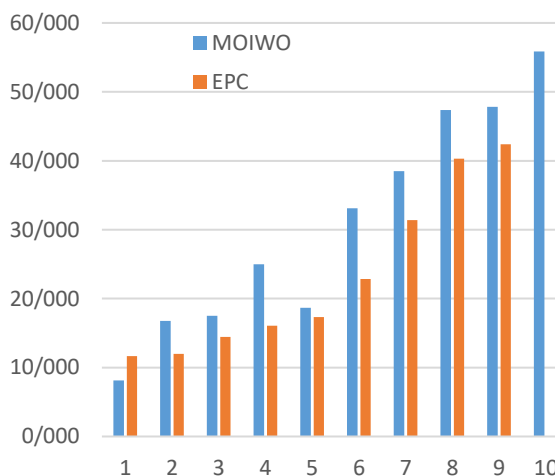
شاخص NPS یکی از مهمترین شاخص هایی است که برتری ویژه الگوریتم MOIWO نسبت به EPC نشان داده می شود. روش EPC به دلیل محدودیت هایی که در مسئله اضافه می شود،

شکل ۳ مقایسه روش های حل بر اساس شاخص MID

نتایج این شاخص نشان می دهد که در تمامی مثال ها مقدار MOIWO بیشتر بوده است. دلیل این موضوع آن است که روش EPC بهترین مقادیر ممکن را معرفی می کند و لذا برای روش فراابتکاری، فاصله اندک با این مقادیر، معادل کیفیت این روش خواهد می باشد.

۲-۲-۶ بررسی روش های حل بر اساس شاخص Max spread

میانگین این شاخص برای محدودیت اپسیلون برابر ۲۳.۱۵ بوده و برای الگوریتم MOIWO برابر ۳۱.۸۷ بوده است. در شکل ۴ مقدار این شاخص برای هر یک از مثال های حل شده توسط دو روش حل ارائه شده است.

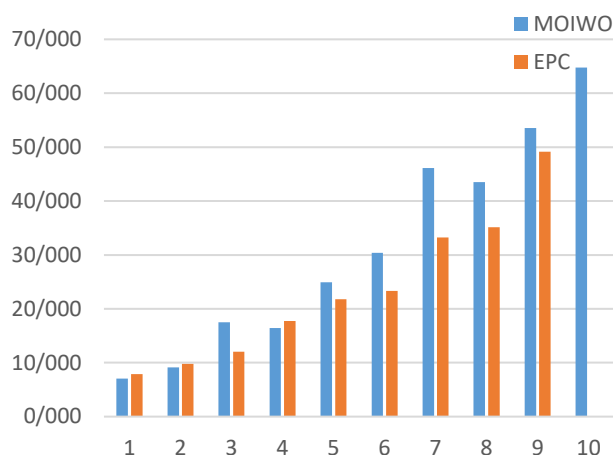


شکل ۴ مقایسه روش های حل بر اساس شاخص max spread

مطابق شکل ۶، روش EPC تنها در مثال اول توانسته است مقدار بهتری از MOIWO ارائه کند. در سایر مثال ها روش MOIWO مقدار بهتری از این شاخص ارائه کرده است که نشان از کارایی این روش در یافتن جواب های مسئله مورد نظر می باشد.

۳-۲-۶ بررسی روش های حل بر اساس شاخص SNS

میانگین این شاخص برای محدودیت اپسیلون برابر ۲۲.۶۵ بوده و برای الگوریتم MOIWO برابر ۳۱.۴۰ بوده است. در شکل ۵ مقدار این شاخص برای هر یک از مثال های حل شده توسط دو روش حل ارائه شده است.



شکل ۸ مقایسه روش های حل بر اساس شاخص SNS

تحلیل این شاخص نیز همانند شاخص RAS می باشد. روش EPC مقادیر کمتری را ارائه کرده و الگوریتم MOIWO تلاش می کند تا مقدار SNS ای نزدیک به این روش ارائه کند. نتایج فوق نشان می دهد که این الگوریتم در تلاش خود برای نزدیکی به جواب ایده آل نسبتاً موفق بوده است.

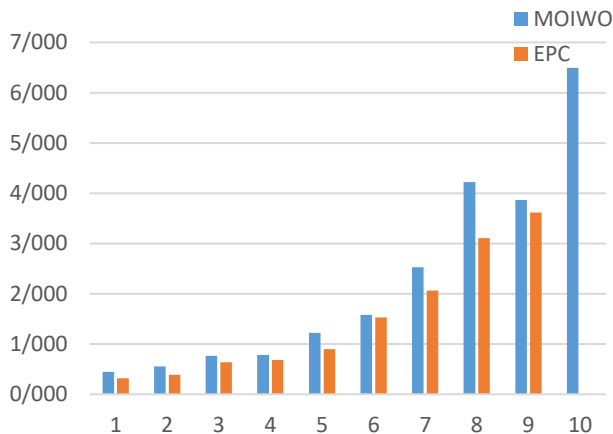
۶-۲-۷ بررسی روش های حل بر اساس زمان حل

بررسی ها نشان می دهد که محدودیت اپسیلون متوسط زمان حل ۱۳۸۴.۲۳ ثانیه ای را داشته است. در حالی که این شاخص برای MOIWO معادل ۸۸.۱۷ می باشد. شکل ۹ مقایسه زمان حل این دو روش را نشان داده است.

توانایی یافتن جواب های مختلف آن کاهش پیدا می کند. اما در الگوریتم MOIWO به دلیل جستجوی تصادفی و هوشمند آن، امکان یافتن جواب های بهینه بیشتری وجود دارد به همین دلیل در شاخص NPS عملکرد بسیار بهتری از این الگوریتم دیده می شود.

۶-۲-۵ بررسی روش های حل بر اساس شاخص RAS

میانگین این شاخص برای محدودیت اپسیلون برابر ۱.۴۷ بوده و برای الگوریتم MOIWO برابر ۲.۲۴ بوده است. در شکل ۷ مقدار این شاخص برای هر یک از مثال های حل شده توسط دو روش حل ارائه شده است.



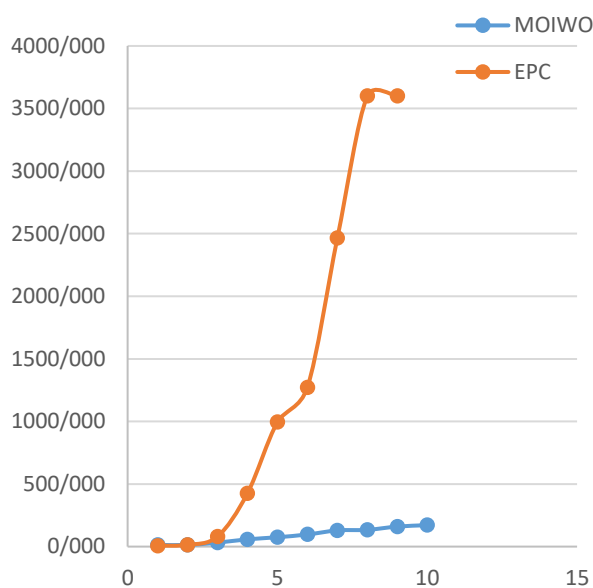
شکل ۷ مقایسه روش های حل بر اساس شاخص RAS

همانطور که مشاهده می کنید الگوریتم MOIWO مقادیر بیشتری نسبت به EPC ارائه کرده است. این اختلاف در بسیاری از مثال ها ناچیز اختلاف ناچیز الگوریتم MOIWO با روش EPC که به طور متوسط حدود ۰.۶ می باشد بیانگر توانایی الگوریتم MOIWO می باشد.

۶-۲-۶ بررسی روش های حل بر اساس شاخص Spacing

میانگین این شاخص برای محدودیت اپسیلون برابر ۲۳.۳۴ بوده و برای الگوریتم MOIWO برابر ۳۲.۳۴ بوده است. در شکل ۸ مقدار این شاخص برای هر یک از مثال های حل شده توسط دو الگوریتم ارائه شده است.

مستقل آنها کارایی لازم را جهت استفاده در زنجیره تأمین ندارد. از طرفی دیگر الگوریتم MOIWO در مقایسه با روش محدودیت افسیلون عملکرد مناسبی را از خود ارائه کرده است. این الگوریتم در شاخص های SNS، NPS و Max Spread از روش محدودیت افسیلون متمایز بوده و برتری داشته است. در خصوص زمان حل نیز متوسط زمان حل این الگوریتم حدود ۰.۱٪ زمان حل روش محدودیت افسیلون بوده است. لذا کارایی این الگوریتم چند هدفه با شاخص های متعدد تایید شده است و می توان این الگوریتم را ابزاری مناسب برای حل مسائل طراحی زنجیره تأمین معرفی نمود. جهت توسعه این تحقیق و ارائه تحقیقات آتی پیشنهاد می شود که عدم قطعیت در پارامتر های مدل از جمله تقاضای مشتریان، هزینه های تولید و توزیع در مدل ریاضی لحاظ شود. این عدم قطعیت می تواند با رویکرد هایی همچون برنامه ریزی امکانی و یا بهینه سازی استوار پیاده سازی و نتایج مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۹ مقایسه زمان حل دو روش

همانطور که مشاهده می شود در روش EPC، زمان حل روند صعودی با شیب بسیار زیاد داشته است. مسئله ۷ و ۸ را با حداکثر زمان ممکن حل کرده و نیز قابلیت حل مسئله ۱۰ را نداشته است. این در حالی است که الگوریتم MOIWO با شیب بسیار کمی زمان حل را افزایش داده است.

به طور خلاصه پس از تحلیل شاخص های مختلف مشخص می شود که الگوریتم MOIWO با صرف زمان بسیار کمتری نسبت به EPC می تواند خروجی هایی بسیار نزدیک به جواب بهینه ارائه کرده و حتی در برخی شاخص ها بهتر از EPC عمل کند. این موضوع توانایی الگوریتم MOIWO در حل مسئله مطرح شده در این تحقیق را به خوبی بیان می کند.

۷- جمع بندی

در این تحقیق به ارائه یک مدل ریاضی چند هدفه با رویکرد سبز و چابک ارائه شد. نوآوری اصلی این تحقیق یکپارچه سازی مفاهیم چابکی و زیست محیطی در طراحی زنجیره تأمین می باشد. نوآوری دیگر این تحقیق به کارگیری یک الگوریتم فراابتکاری چند هدفه جدید به نام MOIWO می باشد. نتایج حاصل شده در این تحقیق نشان می دهد که اهداف اقتصادی و زیست محیطی و چابکی در زنجیره تأمین دارای تعارض هستند و بهینه سازی

منابع

- [۱] Govindan, K., Jafarian, A., & Nourbakhsh, V. (2015). Bi-objective integrating sustainable order allocation and sustainable supply chain network strategic design with stochastic demand using a novel robust hybrid multi-objective metaheuristic. *Computers & Operations Research*, 62, 112-130.
- [۲] Fallah, H., Eskandari, H., & Pishvaei, M. S. (2015). Competitive closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 649-661.
- [۳] Montoya, A., Vélez-Gallego, M. C., & Villegas, J. G. (2016). Multi-product capacitated facility location problem with general production and

- [۱۲] Moradi, A., Razmi, J., Babazadeh, R., & Sabbaghnia, A. (2018). An integrated Principal Component Analysis and multi-objective mathematical programming approach to agile supply chain network design under uncertainty. *Journal of Industrial & Management Optimization*, 15(2), 855.
- [13] Mahmoodi, M. (2019). A new multi-objective model of agile supply chain network design considering transportation limits. *Production & Manufacturing Research*, 7(1), 1-22.
- [14] Mehrabian, A. R., & Lucas, C. (2006). A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization. *Ecological informatics*, 1(4), 355-366.
- building costs. *NETNOMICS: Economic Research and Electronic Networking*, 17(1), 47-70.
- [۴] Jena, S. D., Cordeau, J. F., & Gendron, B. (2016). Solving a dynamic facility location problem with partial closing and reopening. *Computers & Operations Research*, 67, 143-154.
- [۵] Norol, Holcomb, (2016), Development of a measure to assess quality management in certified firms, *European journal of operational research*, 156, 683-697.
- [۶] Zhuo, H., & Wei, S. (2017). Gaming of green supply chain members under government subsidies—Based on the perspective of demand uncertainty. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Management Science and Engineering Management* (pp. 1105-1116). Springer, Singapore.
- [۷] Burgess, T. F., Grimshaw, P., Huaccho Huatuco, L., & Shaw, N. E. (2017). Mapping the operations and supply chain management field: a journal governance perspective. *International Journal of Operations & Production Management*, 37(7), 898-926.
- [۸] Wu, C., & Barnes, D. (2018). Design of agile supply chains including the trade-off between number of partners and reliability. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(9-12), 3683-3700.
- [۹] 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*.
- [۱۰] Ghelichi, Z., Saidi-Mehrabad, M., & Pishvae, M. S. (2018). A stochastic programming approach toward optimal design and planning of an integrated green biodiesel supply chain network under uncertainty: A case study. *Energy*, 156, 661-687.
- [۱۱] Liang, L., & Quesada, H. J. (2018). Green Design of a Cellulosic Butanol Supply Chain Network: A Case Study of Sorghum Stem Bio-butanol in Missouri. *BioResources*, 13(3), 5617-5642.
- [۱۲] Mahmoodi, M. (2019). A new multi-objective model of agile supply chain network design considering transportation limits. *Production & Manufacturing Research*, 7(1), 1-22.