



پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری

دوره ۱۱، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، صص ۲۴-۱

نوع مقاله: پژوهشی

الگوریتم‌های فراابتکاری گورکن عسل خوار و ژنتیک چندهدفه برای حل مدل ریاضی استوار زنجیره تأمین پایدار

معصومه نظری^۱، محمود دهقان نیری^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، ایران.

۲. دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۷

چکیده

با افزایش عدم قطعیت در بازار و پیچیدگی فزاینده‌ی محیط رقابتی، پایداری زنجیره‌های تأمین بیش‌ازپیش در معرض اختلال قرار گرفته و هرگونه نوسان در تقاضا یا کاهش ظرفیت اثرات منفی گسترده‌ای بر عملکرد کل زنجیره تأمین ایجاد می‌کند. لذا توسعه مدل‌های ریاضی متناسب از پیچیدگی بیشتری برخوردار شده و نیازمند رویکردهای مناسب حل می‌باشد. این پژوهش با هدف ارائه رویکرد مناسب حل مدل ریاضی چندهدفه استوار و سناریو محور توسعه یافته به منظور کاهش هزینه‌های کل سیستم و آلاینده‌های زیست‌محیطی، که نوآوری عمده آن در ترکیب هم‌زمان عدم قطعیت تقاضا ناشی از نرخ تورم و کاهش ظرفیت در اثر اختلال بوده، اجرا شده است. از آنجا که با افزایش ابعاد و چندهدفه شدن مسئله، استفاده از روش‌های دقیق حل امکان‌پذیر نیست لذا برای حل مدل از دو الگوریتم فراابتکاری قدرتمند شامل توسعه الگوریتم نوظهور گورکن عسل خوار (HBA) به چند هدفه و الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II) استفاده شد. برای ارزیابی کارایی مدل و الگوریتم‌های پیشنهادی، یک مثال عددی طراحی و اجرا شد. یافته‌ها بیانگر آنست که مدل ارائه‌شده توانایی بالایی در مواجهه با عدم قطعیت داشته و تصمیمات بهینه‌تری در راستای پایداری اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی فراهم می‌کند. همچنین نتایج محاسباتی نشان‌دهنده‌ی کارایی و دقت بالاتر الگوریتم HBA در حل مسائل سخت (NP-Hard) با فضای جستجوی بزرگ و پیچیده است.

کلیدواژه‌ها: زنجیره تأمین پایدار، بهینه‌سازی چندهدفه، عدم قطعیت، الگوریتم فرا ابتکاری.



۱- مقدمه و بیان مسئله

در سال‌های اخیر توجه به اثرات بلندمدت مسائل زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی در توسعه سازمان‌ها و بهبود عملکرد آن‌ها به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. دغدغه‌هایی نظیر کاهش آلاینده‌های آب، هوا و خاک، مصرف بهینه منابع، استفاده از انرژی‌های پاک و همچنین توجه به حقوق اقشار مختلف جامعه، در کنار اهداف اقتصادی، موجب شکل‌گیری و گسترش مفهوم پایداری در مدیریت زنجیره تأمین شده است [۱]. این روند با افزایش آگاهی مصرف‌کنندگان نسبت به محصولات و خدمات دوستدار محیط‌زیست نیز تقویت شده است [۲،۳]. به‌زعم آذر و همکاران (۲۰۱۷)، مدیریت زنجیره تأمین پایدار با یکپارچه‌سازی ملاحظات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی، موجب بهبود هماهنگی و کارایی جریان مواد، اطلاعات و منابع مالی، ارتقای سودآوری و انعطاف‌پذیری سازمان در کوتاه‌مدت و بلندمدت می‌شود [۴].

با وجود اهمیت این حوزه، یکی از چالش‌های اساسی در مدیریت زنجیره تأمین، عدم قطعیت است [۵،۶]. بسیاری از پارامترهای کلیدی زنجیره تأمین—مانند تقاضا، ظرفیت تولید و کیفیت محصول—به دلیل ماهیت متغیر محیط کسب‌وکار، رفتار مشتریان و محدودیت‌های اطلاعاتی، به‌طور دقیق قابل پیش‌بینی نیستند [۶،۷]. استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری قطعی نیز نمی‌تواند عملکرد مطلوبی در شرایط آینده تضمین کند، زیرا این مدل‌ها عدم اطمینان موجود در روابط داده‌های واقعی سیستم را نادیده می‌گیرند.

یکی از مهم‌ترین انواع عدم قطعیت، اختلالات عملیاتی است که می‌تواند منجر به کاهش ظرفیت تولید، توزیع و بازیافت شود. این اختلالات ممکن است ناشی از خرابی تجهیزات، آتش‌سوزی، نوسانات ارزی و دلاری، تحریم، جنگ یا بحران‌هایی مانند همه‌گیری کرونا باشند. از سوی دیگر، کیفیت محصول نقش تعیین‌کننده‌ای در رضایت مشتری و میزان برگشت کالا دارد؛ محصولاتی که کیفیت آن‌ها کمتر از حد انتظار باشد، باعث افزایش مرجوعی و ایجاد اختلال در جریان‌های پایین‌دستی می‌شوند. علاوه بر این، تورم و نوسانات اقتصادی از عوامل مهمی هستند که باعث تغییرات شدید در الگوی تقاضا شده و پیش‌بینی آن را دشوار می‌سازند.

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که در مدل‌سازی زنجیره‌های تأمین پایدار تحت شرایط عدم قطعیت، هنوز خلأهایی وجود دارد. از جمله مهم‌ترین این خلأها، نبود رویکردی یکپارچه برای در نظر گرفتن هم‌زمان نوسانات تقاضا ناشی از نرخ تورم، کاهش ظرفیت در اثر اختلالات



و تغییرات کیفیت محصول است؛ عواملی که در بسیاری از مطالعات پیشین یا نادیده گرفته شده‌اند یا به صورت جداگانه بررسی شده‌اند. همچنین، کیفیت محصول، فرآیند برگشت کالا و اختلافات ظرفیت کمتر در قالب یک ساختار جامع و چندهدفه مورد توجه قرار گرفته‌اند. از سوی دیگر، پیچیدگی محاسباتی و ماهیت NP-Hard مسائل بزرگ‌مقیاس، استفاده از روش‌های دقیق را با محدودیت مواجه کرده و ضرورت به‌کارگیری روش‌های فراابتکاری کارآمد را افزایش داده است.

در پاسخ به این خال‌ها، پژوهش حاضر یک مدل ریاضی چندهدفه و استوار توسعه یافته [۸] برای زنجیره تأمین پایدار ارائه می‌دهد که ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را به صورت هم‌زمان در فرآیند تصمیم‌گیری لحاظ می‌کند. این مدل با هدف ایجاد توازن میان کاهش هزینه‌های کل زنجیره تأمین، کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی و مصرف منابع، و بهبود رضایت مشتری و مدیریت فرآیند برگشت کالا طراحی شده است. نوآوری اصلی پژوهش، یکپارچه‌سازی مؤلفه‌های مذکور در یک چارچوب استوار و چندهدفه و توسعه یک رویکرد حل مناسب برای این ساختار پیچیده است. در این راستا، نسخه چندهدفه الگوریتم گورکن عسل‌خوار (HBA) توسعه یافته و در کنار الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) برای حل مدل به‌کار گرفته شده است. عملکرد این دو الگوریتم نیز بر اساس شاخص‌های استاندارد همگرایی، تنوع و کیفیت جبهه پارتو مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

برای ارزیابی عملکرد مدل و روش‌های حل، یک مثال عددی طراحی و اجرا شده است. از آنجا که پژوهش حاضر بر توسعه و تحلیل مدل ریاضی تمرکز دارد، مطالعه موردی واقعی در آن ارائه نشده است. نتایج حاصل از حل مدل، امکان ارزیابی قابلیت چارچوب پیشنهادی در مواجهه با عدم قطعیت و پیچیدگی محاسباتی و نیز مقایسه عملکرد الگوریتم‌های توسعه‌یافته را فراهم می‌کند. بر این اساس، پژوهش حاضر تلاش می‌کند با ارائه یک چارچوب یکپارچه برای تصمیم‌گیری در زنجیره تأمین پایدار، زمینه را برای دستیابی هم‌زمان به عملکرد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی مطلوب فراهم سازد. ساختار مقاله به این ترتیب سازمان‌دهی شده است: در بخش دوم پیشینه پژوهش و شکاف تحقیقاتی مطرح می‌شود؛ در بخش سوم روش‌شناسی پژوهش و مدل پیشنهادی ارائه می‌گردد؛ در بخش چهارم تحلیل یافته‌های



محاسباتی ارائه می‌شود؛ و در بخش پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی مطرح خواهد شد.

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، طراحی زنجیره تأمین با رویکردهای پایدار و مقاوم در برابر عدم قطعیت مورد توجه گسترده قرار گرفته است. در مطالعه ای فتاحی^۱ (۲۰۲۰) مدلی نوآورانه که با استفاده از الگوریتم تجزیه بندرز و روش ارزیابی چرخه زندگی اجتماعی (S-LCA)، به صورت هم‌زمان ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را در طراحی شبکه بازیافت شهری با هدف تولید انرژی در نظر می‌گیرد، ارائه داده است [۹]. همچنین در راستای این رویکرد، لی و لیو^۲ (۲۰۲۲) با بهره‌گیری از نظریه بازی و عدم قطعیت فازی، زنجیره تأمین سبز دو سطحی را با مداخلات دولتی مدل‌سازی کرده‌اند [۱۰]. وانگ و همکاران^۳ (۲۰۲۱) نیز به بررسی راهکارهای انگیزشی در زنجیره سبز تحت عدم قطعیت تقاضا پرداخته‌اند [۷]. شن^۴ (۲۰۲۰) با استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی تصادفی چندهدفه، تأثیر عدم قطعیت را بر شبکه‌های زیست‌محیطی تحلیل کرده است [۱۱]. در مطالعه ای، والی‌سیار و روغنیان^۵ (۲۰۲۲) شبکه‌ای پایدار، پاسخگو و انعطاف‌پذیر را با رویکرد ترکیبی عدم قطعیت و شرایط بحرانی نظیر COVID-۱۹ طراحی و مدل‌سازی کرده‌اند [۱۲]. در مطالعه ای دیگر محقر و عباسی (۱۳۹۸) به طراحی و تبیین مدل پایداری زنجیره تأمین خدمات بانکی در بانک ملت پرداختند [۱۳]. همچنین ایزدیار و همکاران (۱۴۰۲) به بررسی کاربرد پویایی سیستم در ارزیابی عملکرد پایداری زنجیره تأمین لارج در صنعت خودروسازی پرداخته‌اند [۱۴]. در پژوهشی هاشم زهی و همکاران (۱۴۰۳) به ملاحظات اجتماعی در طراحی زنجیره تأمین پایدار حلقه بسته با رویکرد الگوریتم تکاملی چندین هدفه برای کربن زدایی عمیق پرداختند. این مدل با برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط غیرقطعی توسعه داده شد تا هزینه و مصرف انرژی را به حداقل برساند [۱۵]. در پژوهشی دیگر فتحی هلی آبادی و همکاران (۱۴۰۲) به ارائه یک مدل ریاضی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین با در نظر داشتن اعتبار تجاری تحت شرایط عدم قطعیت پرداختند [۱۶]. در مطالعه ای دیگر شرافتی و قبادی (۱۴۰۱) به ارائه یک مدل

^۱ Fattahi

^۲ Li and Liu

^۳ Wang et al.

^۴ Shen

^۵ Vali-Siar & Roghanian



نوین جهت طراحی یک شبکه زنجیره تامین پایدار شامل مباحث توسعه یافتگی و تصمیمات زیست محیطی پله ای پرداختند که در آن تنها تسهیلات سازگار با محیط زیست می توانند فعالیت داشته باشند و سایر تسهیلات آسیب زا به محیط زیست باید تعمیر و نوسازی شوند [۱۷]. در پژوهش های دیگری، درگر^۱ (۲۰۲۳) به تحلیل شوک های تقاضا، کاوسر^۲ (۲۰۲۴) به بررسی تأثیر فراوانی تبلیغات بر تقاضا، فروزش و همکاران^۳ (۲۰۲۲) به مطالعه تقاضای مصرف کننده، جبار زاده و همکاران^۴ (۲۰۱۸) مفهوم تقاضای بازار را مورد توجه قرار داده اند [۱۸-۲۱]. افشار و همکاران (۲۰۲۴)، خلیلی و همکاران (۲۰۲۴)، عرب مؤمنی و همکاران (۲۰۲۴) زنجیره تأمین حلقه بسته را در نظر گرفتند [۲۲-۲۴]. بررسی مطالعات انجام شده نشان می دهد که علی رغم حجم بالای پژوهش ها در این حوزه، برخی کاستی ها و خلأها همچنان پابرجاست و شکاف عمیقی بین تحقیقات پیشین و مطالعه حاضر وجود دارد. لذا مدل مطالعه می تواند ضمن برطرف سازی و پوشش دهی این شکاف ها بر سرعت حل و کاهش خطرات زیست محیطی، و کاهش هزینه ها تأثیر مثبت بگذارد.

۳- روش شناسی پژوهش

پژوهش از لحاظ روش تحقیق، توصیفی-تحلیلی است، زیرا به تشریح یک مسئله موجود در شرایط واقعی پرداخته و با مدل سازی، حل و تحلیل آن، نسبت به دستیابی به اهداف تحقیق اقدام می شود.

مدل پیشنهادی این پژوهش نسبت به مدل های پیشین مزیت های مهمی دارد. نخست آنکه این مدل قادر است سه نوع عدم قطعیت کلیدی شامل کاهش ظرفیت ناشی از اختلالات، تغییرات کیفیت محصول و برگشت کالا را به طور هم زمان مورد توجه قرار دهد، در حالی که عمده مدل های موجود تنها بخشی از این عدم قطعیت ها را پوشش داده اند. دوم آنکه مدل حاضر هر سه بعد پایداری یعنی اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی را در یک چارچوب یکپارچه تلفیق می کند. این یکپارچگی سبب می شود تصمیم گیری ها در شرایط واقعی و پیچیده زنجیره تأمین پایدار با دقت، جامعیت و کارایی بالاتر انجام شود و از نظر اثرات زیست محیطی (کاهش آلاینده های

^۱ -Dreger

^۲ -Kausar

^۳ Foroozesh et al.

^۴ Jabbarzadeh et al.



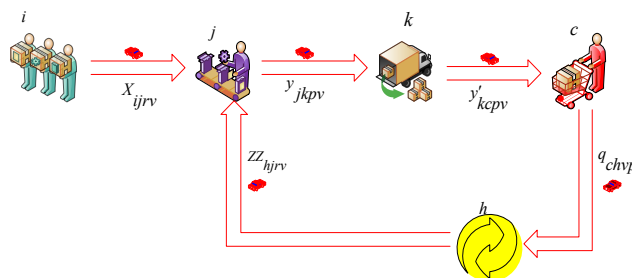
و مصرف منابع)، اقتصادی (بهینه‌سازی هزینه‌ها) و اجتماعی (افزایش رضایت مشتری و مدیریت مؤثر برگشت کالا) نسبت به مدل‌های پیشین برتری داشته باشد.

لزوم استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری:

با توجه به پیچیدگی مدل ریاضی چندهدفه و ابعاد بزرگ مسائل زنجیره تأمین پایدار، حل دقیق آن‌ها با روش‌های سنتی یا نرم‌افزارهای تجاری دشوار، زمان‌بر و بعضاً غیرممکن است. از این رو، در این پژوهش از الگوریتم‌های فراابتکاری، شامل الگوریتم گورکن عسل‌خوار (HBA) و الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II)، استفاده شده است. این الگوریتم‌ها قادرند در زمان مناسب راه‌حل‌های با کیفیت بالا و قابل قبول برای مسائل NP-Hard ارائه دهند و کارایی مدل پیشنهادی را در شرایط واقعی نشان دهند.

تعریف مسئله:

در این مطالعه از زنجیره تأمین ۴ لایه روبه‌جلو، مراکز تأمین‌کنندگان، مراکز کارخانجات، مراکز توزیع‌کننده و مشتری و همچنین یک‌لایه بازیافت روبه عقب بهره گرفته شد.



شکل ۱. مدل مفهومی مطالعه

متغیرهای اصلی پژوهش:

متغیرهای اصلی پژوهش شامل متغیر مقدار ارسال از تأمین‌کننده به کارخانه، متغیر مقدار ارسال از کارخانه به توزیع‌کننده، متغیر مقدار ارسال از توزیع‌کننده به مشتری، متغیر مقدار ارسال از مشتری به بازیافت، متغیر مقدار ارسال از بازیافت به کارخانه، متغیر موجودی، متغیر کمبود، متغیر هزینه و متغیر آلاینده‌گی زیست‌محیطی هستند.



مفروضات پژوهش

۱. مدل به صورت غیرقطعی سناریو محور تشریح می‌شود.
 ۲. زنجیره تأمین شامل ۴ لایه روبه‌جلو عبارت‌اند از: مراکز تأمین‌کنندگان، مراکز کارخانجات، مراکز توزیع‌کننده و مشتری همچنین یک لایه باز یافت روبه عقب می‌باشد که به صورت مواد اولیه وارد کارخانه خواهند شد.
 ۳. مشتریان در صورت عدم برآورده شدن کیفیت موردنظر کالای خود را به مرکز باز یافت ارجاع می‌دهند.
 ۴. تقاضا و نرخ کاهش ظرفیت هر لایه به صورت غیرقطعی می‌باشند که به دلیل وجود داده‌های ناقص به صورت استوار مدل‌سازی گردید.
 ۵. عدم مجاز بودن کمبود.
 ۶. ظرفیت و تأمین‌کننده مشخص هستند.
- پس از ارائه متغیرهای اصلی و مفروضات پژوهش به ارائه مدل ریاضی و مجموعه‌ها و پارامترهای مدل می‌پردازیم:

مدل ریاضی استوار:

در این مقاله از مدل ریاضی نظری و همکاران [۸] که یک مدل ریاضی چندهدفه استوار سناریو محور می‌باشد به منظور مدل‌سازی مساله استفاده شده است.

مجموعه‌های مدل:

S مجموعه سناریوها، I مجموعه تأمین‌کنندگان، J مجموعه کارخانجات، K مجموعه توزیع‌کنندگان، K مجموعه توزیع‌کنندگان، C مجموعه مشتریان، V مجموعه مسائل نقلیه، H مجموعه مراکز باز یافت، T مجموعه دوره‌ها، P مجموعه محصولات، R مجموعه مواد اولیه

پارامترهای مدل:

λ_p : نرخ تبدیل ماده اولیه به محصول P

CI_{jpt} : هزینه موجودی محصول P در کارخانه j در دوره t

CIK_{kpt} : هزینه موجودی محصول P در توزیع‌کننده k در دوره t

CIH_{hrt} : هزینه موجودی ماده اولیه r در مرکز باز یافت h در دوره t



- D_{cpts} : تقاضای غیرقطعی محصول p برای مشتری c در دوره t تحت سناریو s
- Cx_{jrvt} : هزینه ارسال کالای اولیه r از تأمین‌کننده i به کارخانه j در دوره t با ماشین v
- Czz_{hrvt} : هزینه ارسال کالای اولیه r از محل بازیافت h به کارخانه j در دوره t با ماشین v
- Cq_{chpvt} : هزینه ارسال محصول برگشتی p از مشتری c به مرکز بازیافت h در دوره t با ماشین v
- $capJ_{jpt}$: ظرفیت کارخانه j برای محصول p در دوره t
- $capI_{irt}$: ظرفیت تأمین‌کننده i برای ماده اولیه r در دوره t
- $capK_{kpt}$: ظرفیت توزیع‌کننده k برای محصول p در دوره t
- $capH_{hpt}$: ظرفیت مرکز بازیافت h برای محصول p در دوره t
- φ_r : درصد ماده اولیه r از محصول p که قابل بازیافت هستند
- $\bar{u}_{\varphi}$: درصدی از تقاضا محصول p از مشتری c جهت بازیافت
- γ_{vp} : مقدار آلودگی از ماشین v به ازای هر واحد محصول p
- γ'_{vr} : مقدار آلودگی از ماشین v به ازای هر واحد ماده اولیه r
- βJ_{jpts} : میزان کاهش ظرفیت کارخانه j برای محصول p در اثر اختلال در دوره t تحت سناریو s
- βI_{irts} : میزان کاهش ظرفیت تأمین‌کننده i برای ماده اولیه r در اثر اختلال در دوره t تحت سناریو s
- βK_{kpts} : میزان کاهش ظرفیت توزیع‌کننده k برای محصول p در اثر اختلال در دوره t تحت سناریو s
- βH_{hpts} : میزان کاهش ظرفیت مرکز بازیافت h برای محصول p در اثر اختلال در دوره t تحت سناریو s
- η_t : مقدار نرخ تورم در دوره t
- p_{pt} : قیمت فروش محصول p در دوره t
- CS_{jpt} : هزینه کمبود محصول p در کارخانه j در دوره t

CSK_{kpt} : هزینه کمبود محصول P در توزیع‌کننده k در دوره t
 CSH_{hrt} : هزینه کمبود ماده اولیه r در مرکز بازیافت h در دوره t
 Bd_t : میزان بودجه در هر دوره
 q'_{kpt} : کیفیت محصول P برای توزیع‌کننده k در دوره t
 Q_{gr} : حداقل کیفیت موردنظر محصول P برای مشتری C در دوره t
 Cy'_{kcpvt} : هزینه ارسال محصول P از مرکز توزیع‌کننده k به مشتری C در دوره t با ماشین v
 Cy_{jkpvt} : هزینه ارسال محصول P از مرکز کارخانجات j به توزیع‌کننده k در دوره t با ماشین v
 pp_s : مقدار احتمال وقوع هر سناریو
 ω : وزن غیرموجه بودن مدل
 θ_s : اختلاف تابع هدف از میانگین آن به ازای هر سناریو .
 $\eta^1_{irts}, \eta^2_{jpts}, \eta^3_{kpts}, \eta^4_{hpts}, \eta^5_{cpt}$: مقدار تخطی محدودیت از پارامتری که عدم قطعیت دارد
 (ناموجه بودن مدل را نشان می‌دهد) .

متغیرهای تصمیم مدل:

I_{jp} : موجودی محصول P در کارخانه j در دوره t تحت سناریو s
 S_{jpts} : کمبود محصول P در کارخانه j در دوره t تحت سناریو s
 IK_{kpts} : موجودی کالای P در توزیع‌کننده k در دوره t تحت سناریو s
 IH_{hpts} : موجودی ماده اولیه r در مرکز بازیافت h در دوره t تحت سناریو s
 SK_{kpts} : کمبود محصول P در توزیع‌کننده k در دوره t تحت سناریو s
 SH_{hpts} : کمبود ماده اولیه r در مرکز بازیافت h در دوره t تحت سناریو s
 x_{ijrvts} : مقدار ارسال کالای اولیه r از تأمین‌کننده i به کارخانه j در دوره t با ماشین v تحت سناریو s
 zz_{hjrvt} : مقدار ارسال کالای اولیه r از محل بازیافت h به کارخانه j در دوره t با ماشین v تحت سناریو s



q_{chvpts} : مقدار ارسال کالای برگشتی p از مشتری c به مرکز بازیافت h در دوره t با ماشین v تحت سناریو S

y'_{kcpvts} : مقدار ارسال محصول p از مرکز توزیع‌کننده k به مشتری c در دوره t با ماشین v تحت سناریو S

y_{jkpvts} : مقدار ارسال محصول p از مرکز کارخانجات j به توزیع‌کننده k در دوره t با ماشین v تحت سناریو S

D'_{cptS} : میزان تقاضا محصول p مشتری c در دوره t بر اساس نرخ تورم تحت سناریو S
 ξ_s : مقدار کل تابع هدف به ازای هر سناریو بدون دخالت احتمال آن.

Z_{kcpts} : اگر مقدار محصول p از مرکز توزیع‌کننده k به مشتری c در دوره t تحت سناریو S از لحاظ کیفی پایین‌تر از حداقل کیفیت بود یک در غیر این صورت صفر

y_{ykpt} : اگر مقدار محصول p از مرکز توزیع‌کننده k به مشتری c در دوره t تحت سناریو S ارسال شود یک در غیر این صورت صفر

YI_i : اگر تأمین‌کننده i انتخاب شود یک در غیر این صورت صفر

YK_k : اگر توزیع‌کننده k انتخاب شود یک در غیر این صورت صفر

YJ_j : اگر کارخانه j انتخاب شود یک در غیر این صورت صفر

YH_h : اگر مرکز بازیافت h انتخاب شود یک در غیر این صورت صفر

$$F1_s = \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} (I_{jpts} \cdot CI_{jpt} + S_{jpts} \cdot CS_{jpt}) + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} (IK_{kpts} \cdot CIK_{kpt} + SK_{kpts} \cdot CSK_{kpt}) + \sum_{h \in H} \sum_{r \in R} (IH_{hrts} \cdot CIH_{hrt} + SH_{hrts} \cdot CSH_{hrt}) \quad (1)$$

$$+ \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{r \in R} x_{ijrvts} \cdot Cx_{ijrvt} + \sum_{j \in J} \sum_{h \in H} \sum_{v \in V} \sum_{r \in R} zz_{hjrvts} \cdot Czz_{hjrvt} + \sum_{c \in C} \sum_{h \in H} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} q_{chvpts} \cdot Cq_{chvpt} \\ + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} y_{jkpvts} \cdot Cy_{jkpvts} + \sum_{c \in C} \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} y'_{kcpvts} \cdot Cy'_{kcpvt} \quad \forall s \in S, t \in T \\ F2_s = \sum_{j \in J} \sum_{h \in H} \sum_{v \in V} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} \gamma'_{vr} \cdot zz_{hjrvts} + \sum_{c \in C} \sum_{h \in H} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \gamma_{vp} \cdot q_{chvpts} + \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} \gamma'_{vr} \cdot x_{ijrvts} \\ + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \gamma_{jkpvts} \cdot \gamma_{vp} + \sum_{c \in C} \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \gamma'_{kcpvts} \cdot \gamma_{vp} \quad \forall s \in S, t \in T$$

$$Min(Z) = \sum_{s' \in S} pp_{s'} \cdot \xi_{s'} + \gamma \cdot \sum_{s' \in S} pp_{s'} \cdot [(\xi_{s'} - pp_{s'} \xi_s) + 2\theta_{s'}] \quad (3)$$

$$+ \omega \cdot \sum_{s' \in S} pp_{s'} \cdot (\sum_{r \in R} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \eta^1_{irts} + \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \eta^2_{jppts} + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \eta^3_{kppts} + \sum_{h \in H} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \eta^4_{hppts} + \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \eta^5_{cptts})$$



$$\begin{aligned} Min(Z) = & \sum_{s' \in S} pp_{s'} \xi_{s'} + \gamma \cdot \sum_{s' \in S} pp_{s'} [(\xi_{s'} - pp_{s'} \xi_s) + 2\theta_{s'}] \\ & + \omega \cdot \sum_{s' \in S} pp_{s'} \cdot (\sum_{r \in R} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \eta_{irts}^1 + \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \eta_{jpts}^2 + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \eta_{kpts}^3 + \sum_{h \in H} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \eta_{hpts}^4 + \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \eta_{cptst}^5) \end{aligned}$$

$$\sum_{v \in I'} \sum_{j \in J} x_{ijrvts} - \eta_{irts}^1 \leq (1 - \beta I_{irts}) \cdot cap I_{irt} \cdot YI_{is} \quad \forall i \in I, t \in T, r \in R, s \in S \quad (4)$$

$$\sum_{v \in I'} \sum_{k \in K} y_{jkpvts} - \eta_{jpts}^2 \leq (1 - \beta J_{jpts}) \cdot cap J_{jpt} \cdot YJ_j \quad \forall j \in J, t \in T, p \in P, s \in S \quad (5)$$

$$\sum_{v \in I'} \sum_{c \in C} y'_{kcpvts} - \eta_{kpts}^3 \leq (1 - \beta K_{kpts}) \cdot cap K_{kpt} \cdot YK_k \quad \forall k \in K, t \in T, p \in P, s \in S \quad (6)$$

$$\sum_{v \in I'} \sum_{c \in C} q_{chpvts} - \eta_{hpts}^4 \leq (1 - \beta H_{hpts}) \cdot cap H_{hpt} \cdot YH_h \quad \forall h \in H, t \in T, p \in P, s \in S \quad (7)$$

$$D'_{cptst} + \eta_{cptst}^5 = D_{cptst} - (1 + \eta_t) \cdot P_{pt} \quad \forall c \in C, p \in P, t \in T, s \in S \quad (8)$$

$$\xi_{s'} - \sum_{s \in S} pp_s \xi_s + \theta_{s'} \geq 0 \quad \forall s' \in S \quad (9)$$

$$\begin{aligned} I_{jpts} - S_{jpts} = I_{jpt-1s} - S_{jpt-1s} + \sum_{r \in R} \sum_{v \in I'} \sum_{i \in I} x_{ijrvts} \lambda_{rp} - \sum_{k \in K} \sum_{v \in I'} y_{jkpvts} \\ + \sum_{r \in R} \sum_{v \in I'} \sum_{h \in H} z_{hjrvts} \lambda_{rp} \end{aligned} \quad \forall j \in J, p \in P, t \in T, s \in S \quad (10)$$

$$IK_{kpts} - SK_{kpts} = IK_{kpt-1s} - SK_{kpt-1s} + \sum_{j \in J} \sum_{v \in I'} y_{jkpvts} - \sum_{c \in C} \sum_{v \in I'} y'_{kcpvts} \quad \forall k \in K, p \in P, t \in T, s \in S \quad (11)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{v \in I'} y'_{kcpvts} = D'_{cptst} \quad \forall c \in C, p \in P, t \in T, s \in S \quad (12)$$

$$\begin{aligned} IH_{hrts} - SH_{hrts} = IH_{hrt-1s} - SH_{hrt-1s} \\ - \sum_{v \in I'} \sum_{j \in J} z_{hjrvts} + \sum_{c \in C} \sum_{v \in I'} \sum_{p \in P} \varphi_{rp} \cdot q_{chpvts} \end{aligned} \quad \forall h \in H, t \in T, r \in R, s \in S \quad (13)$$

$$F1_{ts} \leq Bd_t \quad (14)$$

$$yy_{kcpvts} \leq \sum_{v \in I'} y'_{kcpvts} \quad \forall c \in C, k \in K, p \in P, t \in T, s \in S \quad (15)$$



$$y_{kpts} \cdot MM \geq \sum_{v \in V'} y'_{kpts} \quad \forall c \in C, k \in K, p \in P, t \in T, s \in S \quad (16)$$

$$(Q_{cpt} - q'_{kpt}) \cdot y_{kpts} \geq (z_{kpts} - 1) \cdot MM \quad \forall c \in C, k \in K, p \in P, t \in T, s \in S \quad (17)$$

$$(Q_{cpt} - q'_{kpt}) \cdot y_{kpts} \leq z_{kpts} \cdot MM \quad \forall c \in C, k \in K, p \in P, t \in T, s \in S \quad (18)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{v \in V'} q_{chpvs} \geq \alpha_{cp} \sum_{v \in V'} y'_{kpts} - (1 - Z_{kpts}) \cdot MM \quad \forall c \in C, k \in K, p \in P, t \in T, s \in S \quad (19)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{v \in V'} q_{chpvs} \leq \alpha_{cp} \sum_{v \in V'} y'_{kpts} + (1 - Z_{kpts}) \cdot MM \quad \forall c \in C, k \in K, p \in P, t \in T, s \in S \quad (20)$$

$$\xi_s = (w_1 \cdot A1_s + w_2 \cdot A2_s) \quad \forall s \in S \quad (21)$$

$$l_{jps}, S_{jpts}, IK_{kpts}, IH_{hpts}, SK_{kpts}, SH_{hpts}, x_{ijrvts}, zz_{hjrvt}, q_{chpvs}, y'_{kpts}, D'_{cpt}, y_{jkpvs} \geq 0$$

$$y_{kpts}, zz_{kpts}, YI_i, YK_k, YJ_j, YH_h \in \{0, 1\}$$

$$\theta_{s'}, \eta^1_{irts}, \eta^2_{jpts}, \eta^3_{kpts}, \eta^4_{hpts}, \eta^5_{cpts} \geq 0$$

تکنیک حل مدل:

الگوریتم گورکن عسل خوار و ژنتیک دو هدفه: الگوریتم گورکن عسل خوار (Honey Badger Algorithm) توسط هاشیم و همکاران^۱ (۲۰۲۲) ارائه شد [۲۵]. این الگوریتم با الهام از رفتار تطبیقی این گورکن عسل، برای مقابله با عدم قطعیت‌ها و اختلالات در زنجیره تأمین طراحی شده است. این الگوریتم با شناسایی مؤثر مرز جبهه پارتو و جستجوی پویا، به بهینه‌سازی عملیات، کاهش اختلالات و سازگاری سریع با تغییرات محیطی کمک می‌کند. الگوریتم ژنتیک دوهدفه با بهره‌گیری از نظریه انتخاب طبیعی داروین و تکنیک‌های بهینه‌سازی چندهدفه، راه‌حلهایی سریع و کارآمد بدون پیچیدگی محاسباتی بالا ارائه می‌دهد.

نحوه نمایش کروموزوم‌ها:

به ازای هر t, S داریم:

^۱ Hashim et al.



۱- با توجه به محدودیت ۹، صورت تصادفی یا به‌تنهایی D'_{cpts} برابر با مقدار سمت راست خواهد شد یا هم‌زمان هم D'_{cpts} و η_{cpts}^5 برابر با سمت راست خواهند شد.

$$D'_{cpts} + \eta_{cpts}^5 = D_{cpts} - (1 + \eta_t).P_{pt}$$

۲- به دست آوردن متغیرهای y'_{kcpvts} ، YK_k ، yy_{kcpts} ، Z_{kcpts} ، q_{chpvs} ؛

• با توجه به محدودیت ۷ و متغیر ورودی تعیین‌شده D'_{cpts} و به ازای p, c متغیر y'_{kcpvts} را به دست می‌آوریم:

$$\sum_{k \in K} \sum_{v \in V'} y'_{kcpvts} = D'_{cpts}$$

ابتدا تعداد مراکز K به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شوند سپس هر سطر از جواب تصادفی بخش یک و ستون به‌اندازه تعداد مراکز K انتخاب‌شده، جدا کرده سپس با استفاده از قاعده مرتب‌سازی نوع مراکز K انتخاب می‌شوند همچنین با استفاده از همین بخش جداشده مقدار محصولات ارسالی از آن مجموعه K توسط قاعده پخش نرمال تعیین می‌گردد. در مرحله بعد به ازای هر نوع از K ، نوبت به انتخاب نوع ماشین می‌رسد که ابتدا تعداد ماشین V به‌صورت تصادفی تعیین، سپس هر سطر از جواب تصادفی بخش یک و ستون به‌اندازه ماشین‌های انتخاب‌شده جدا کرده، درنهایت با استفاده از قاعده مرتب‌سازی نوع ماشین‌ها مشخص می‌شوند در ادامه با استفاده از همین بخش جداشده، مقدار محصولات ارسالی توسط ماشین V بر اساس قاعده پخش نرمال تعیین می‌گردد.

	$ K \cdot V \cdot H $			
بخش اول $ T \cdot P \cdot C $	۰/۱۳	۰/۷۵	...	۰/۱۸
	⋮	...		⋮
	۰/۷۸	۰/۱۹	...	۰/۲۰

درنتیجه مقدار ارسالی به مشتری تعیین می‌گردند.

➤ به‌طور مثال ۴ نوع K داریم،

	K_1	K_2	K_3	K_4
--	-------	-------	-------	-------



$p=1, c=1, t=1$	۰/۱۳	۰/۷۵	۰/۲۲	۰/۱۸
...				

فرضاً ۲ تا K به صورت تصادفی انتخاب شد، ۲ ستون جدا می‌کنیم، سپس بر اساس قاعده مرتب‌سازی می‌شوند.

	K_2	K_4
$p=1, c=1, t=1$	۰/۷۵	۰/۱۸
	۲	۱

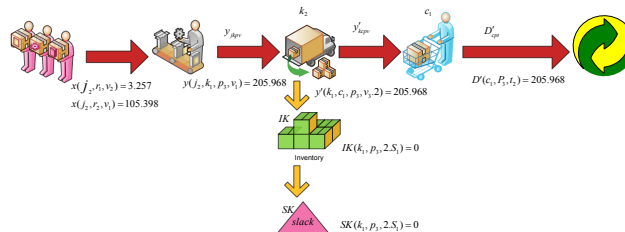
بر اساس قاعده مرتب‌سازی، دو توزیع‌کننده k_2, k_4 انتخاب شدند. سپس نوع و تعداد ماشین V برای ارسال محصولات k_4 و k_2 هرکدام به صورت مجزا و بر اساس قاعده پخش نرمال تعیین می‌گردد. در انتها با توجه به متغیرهای به دست آمده و پارامترهای موجود، توابع هدف محاسبه می‌گردند. همچنین جهت اینکه جواب ایجاد شده شدنی باقی بماند از روش پناالتی بهره گرفته شد. M مقدار جریمه تابع هدف، P مقدار جریمه، F تابع هدف است.

$$F + M * \text{Penalty Value}$$

در خصوص ضمانت شدنی بودن مدل: (۱) با استفاده از تابع جریمه (پناالتی)، شدنی بودن مدل کنترل می‌شود. (۲) در صورتی که بعد از تکرارهای زیاد الگوریتم، نشدنی باقی بماند، جواب یکی از نقاط پارتو repair یا به عبارتی اصلاح می‌شود.

اعتبارسنجی مدل:

از طریق اعتبار درونی به روابط بین عناصر و مفاهیم مدل می‌پردازیم که آیا این روابط صادق هستند، اگر رابطه نادرستی بین یک ورودی و یکی از متغیرهای مدل برقرار شود مدل نیز نتایج نادرستی خواهد داد. با آزمون‌های رفتار مدل، اعتبارسنجی مدل کلی به کار گرفته می‌شود که رفتار مدل تا چه اندازه با رفتار قابل مشاهده سیستم واقعی، مطابقت دارد. در نهایت با آزمون حساسیت، حساسیت پارامترهای مدل در سیستم واقعی مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۲. مثال مدل قطعی با (داده تصادفی)

مثال: کارخانه تولید قطعات خودرو، مواد اولیه را در دو مرحله به میزان $10/65$ تن از تأمین‌کننده دریافت می‌دارد، سپس کارخانه (مثال سوم) برای مشتری سوم $20/968$ قطعه تولید کرده، و از طریق توزیع‌کننده $20/968$ را به مشتری ارسال می‌نماید. توزیع‌کننده باید ببیند از قبل موجودی داشت است و یا کمبودی داشته است یا خیر، که کمبود و موجودی از قبل توزیع‌کننده برابر صفر بوده لذا تمام دریافتی خود را به مشتری سوم ارسال می‌دارد و خروجی مدل درست عمل نموده است.

تحلیل حساسیت:

در این بخش به تحلیل حساسیت مدل بر اساس هزینه‌های کمبود در مرکز توزیع‌کننده CSK_{kpt} به دلیل نقش از دست دادن مشتری و اعتبار مراکز توزیع‌کننده پرداخته و پارامتر CSK_{kpt} برای دوره سوم ($t=3$) و توزیع‌کننده k_1 و محصول p_1 موردبررسی قرار گرفته شد.

جدول ۱. تحلیل حساسیت مدل غیرقطعی بر اساس داده غیرواقعی

مجموع وزنی تابع هدف	A^2	A^1	میزان کمبود $SK_{k_1 p_1 t_3}$	میزان تغییرات هزینه کمبود $CSK_{k_1 p_1 t_3}$	پارامتر
۴۸۳۵۰۰۰	۵۴۰۹/۹۸۳	۹۶۷۵۴۰۰	۰	+۵۰٪	
۴۸۲۸۸۰۰	۵۳۹۲/۴۶۸	۹۶۶۳۰۰۰	۴۲۶/۹۶۲	۰	$CSK_{k_1 p_1 t_3}$
۴۷۵۵۵۰۰	۵۳۱۴/۸۱۷	۹۵۱۶۲۰۰	۶۵۲/۹۴۳	-۵۰٪	
۴۷۰۹۵۰۰	۴۹۳۰/۲۷۲	۹۴۲۳۹۰۰	۱۰۷۴/۵۳۷	-۷۰٪	

با توجه به پارامترهای تعریف‌شده و با افزایش هزینه‌های کمبود، به دلیل افزایش هزینه‌ها، انتظار کمبود برای آن مرکز توزیع باید کاهش پیدا کند. همچنین با توجه به کاهش هزینه‌های کمبود و با توجه به حالت تغییرات صفر که مقدار کمبودی برای آن در نظر گرفته شده پس بهینه‌ترین حالت به دلیل کاهش



هزینه کمبود برای مرکز توزیع k_1 ، افزایش کمبود برای آن دوره و توزیع‌کننده است. در نتیجه با توجه به خروجی‌های جدول (۱)، این میزان تغییرات در متغیر و توابع هدف منطبق با رفتار تشریح شده و مورد انتظار آن می‌باشد که دال بر درست بودن است.

تنظیم پارامترها به روش تاگوچی:

تنظیم پارامتر الگوریتم‌های فرا ابتکاری خود جزء فرایند بهینه‌سازی است. با مقداری مناسب پارامترهای الگوریتم‌های فرا ابتکاری از تکرار با طیف وسیعی از پارامترهای گوناگون جلوگیری می‌شود و در انتها الگوریتم موردنظر به بهترین عملکرد در کمترین زمان ممکن خود می‌رسد. جهت حصول اطمینان از درستی مدل به تنظیم کردن پارامترهای الگوریتم‌ها، به روش تاگوچی پرداخته شد و نتایج تنظیم پارامتر دو الگوریتم در جدول (۲) نمایش داده است:

جدول ۲. نتیجه تنظیم پارامتر الگوریتم HBA, NSGA-II

پارامترهای HBA	مقادیر	پارامترهای NSGA-II	مقادیر
Maxit	۱۰	Maxit	۱۰
Npop ^۱	۵۰	Npop	۵۰
Ngrid ^۱	۱	Pcrossover	۰/۷
Alpha ^۱	۰/۲۵	Pmutation	۰/۱
Gamma ^۱	۴		
Betap ^۱	۱۲		
Beta ^۱	۲		
nRep	۸		
C	۳		

با توجه به درستی پارامترهای جدول (۲) که دال بر درست بودن مدل الگوریتم می‌باشد، از آن‌ها در الگوریتم گورکن عسل خوار و ژنتیک دوهدفه برای حل مدل و تحلیل عددی مثال‌ها بهره گرفته شد.

۴- یافته‌های پژوهش

برای اثبات کارایی مدل طراحی‌شده و جهت اینکه بتوان الگوریتم‌ها را در ابعاد بزرگ حل کرد ۱۰ مثال عددی با اندازه‌های متفاوت طراحی شد که نتایج عددی به صورت زیر می‌باشد.

جدول ۳. مجموعه مثال‌ها



مثال‌ها	$ i $	$ j $	$ k $	$ c $	$ v $	$ H $	$ T $	$ P $	$ R $	$ S $
۱	۲	۲	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۲	۳	۳	۲	۳	۲	۲	۳	۳	۳	۳
۳	۴	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۴	۴	۳
۴	۵	۶	۶	۵	۶	۵	۵	۵	۶	۵
۵	۶	۵	۵	۵	۵	۶	۵	۶	۶	۵
۶	۵	۵	۵	۶	۶	۵	۵	۵	۶	۵
۷	۶	۶	۶	۶	۵	۵	۶	۶	۵	۶
۸	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۶	۵	۵	۶
۹	۸	۱۰	۹	۱۲	۱۵	۱۰	۱۶	۱۲	۸	۱۶
۱۰	۱۴	۱۲	۱۴	۱۴	۱۶	۱۲	۱۷	۱۲	۱۱	۱۷

نتایج تحلیلات عددی الگوریتم گور کن عسل خوار بشرح ذیل است:

جدول ۴. مثال‌های تصادفی تولیدشده الگوریتم HBA

مثال‌ها	DM ^۱	NPS ^۲	SNS ^۳	MID ^۴	TIME
۱	۳/۶۰e+۰۷	۳	۰/۱۷۷۲	۰/۱۸۵۶	۵۰۳/۶۱۲۷
۲	۴/۶۸e+۰۷	۴	۰/۲۰۹۵	۰/۲۲۶۳	۵۱۸/۶۳۴۴
۳	۵/۳۳e+۰۶	۴	۰/۰۱۳۸	۰/۰۵۱۴	۵۰۲/۳۹۶۷
۴	۵/۰۵۵۳e+۰۶	۸	۰/۰۴۵۰	۰/۱۶۲۲	۱۱۳/۲۱۴۳
۵	۳/۷۶۲۷e+۰۷	۶	۰/۲۷۶۸	۰/۳۹۹۰	۱۱۷/۹۵۷۹
۶	۱/۲۵۳۸e+۰۷	۶	۰/۰۶۰۰	۰/۱۵۳۵	۱۰۳/۳۹۳۵
۷	۴/۷۰۵۵e+۰۷	۶	۰/۲۴۶۷	۰/۲۵۴۶	۱۲۵/۵۶۳۸
۸	۸/۱۲۷۰e+۰۵	۵	۰/۰۴۳۰	۰/۰۹۵۵	۸۲/۳۱۵۱
۹	۱/۷۸۶e+۰۷	۳	۰/۰۳۰۳	۰/۰۴۵۱	۱۱۴۲۳/۶۷۰۵
۱۰	۱/۷۵۷۳e+۰۸	۵	۰/۱۲۱۰	۰/۱۴۵۷	۱۷۱۰۰/۶۵۷۳

نتایج تحلیلات عددی الگوریتم ژنتیک دوهدفه بشرح ذیل است:

جدول ۵. مثال‌های تصادفی تولیدشده الگوریتم NSGA-II

^۱ Diversity metric

^۲ Number of pareto solution

^۳ Spread of non-dominatanse sorting

^۴ Means ideal distance



مثال‌ها	DM ^۱	NPS ^۲	SNS ^۳	MID ^۴	TIME
۱	۲/۰۲۵+۰۷	۹	۰/۰۴۷۴	۰/۱۵۲۲	۷۳۳/۳۶۸
۲	۲/۷۹۵+۰۷	۱۱	۰/۰۸۳۹	۰/۱۴۰۷	۷۷۰/۴۳۵۹
۳	۲/۲۷۵+۰۷	۹	۰/۰۶۷۸	۰/۱۵۰۳	۷۳۸/۱۰۶۸
۴	۴/۳۵۷۳۵+۰۷	۹	۰/۴۰۴۹	۰/۵۰۷۰	۱۶۱/۶۵۵۳
۵	۴/۴۸۹۷۵+۰۷	۸	۰/۳۰۸۶	۰/۴۲۰۳	۱۵۹/۰۶۳۴
۶	۲/۴۵۴۷۵+۰۷	۸	۰/۲۰۹۹	۰/۲۷۶۶	۱۳۹/۶۲۸۲
۷	۸/۹۹۸۷۵+۰۶	۱۰	۰/۵۱۵۵	۰/۱۹۱۰	۱۷۲/۶۱۳۲
۸	۱/۲۸۳۰۵+۰۷	۷	۰/۱۱۱۹	۰/۲۳۰۷	۱۱۸/۶۹۸۴
۹	۳/۴۵۱۲۵+۰۷	۱۴	۰/۰۲۸۵	۰/۰۷۲۱	۱۵۸۷۲/۸۸۰۸
۱۰	۱/۹۴۱۸۵+۰۸	۵	۰/۱۴۶۵	۰/۱۷۷۲	۱۶۱۳۶/۲۶۳۷

طبق جدول (۴) یافته‌های مثال عددی مبین آن است، الگوریتم گورکن عسل‌خوار در مسائل کوچک‌تر، زمان اجرای کمتری داشته و پاسخ‌های بهینه‌تری ارائه کرده، در حالی که الگوریتم ژنتیک دوهدفه در مسائل بزرگ‌تر با زمان کمتر و کیفیت بالاتر راه‌حل‌ها، عملکرد بهتری داشته است. علاوه بر تحلیل عددی برای اثبات کارایی مدل، ارزیابی میدانی آن در یک شرکت قطعه‌ساز صنعت خودرو نیز انجام شد.

جدول ۶. بهترین و بدترین جواب توابع هدف

GAMS	FF ^۱	FF ^۲
BestSol & Best possible solution	-	۴۰۰۳۱/۷۴۸
WorstSol	۲/۲۵۷۴۳۲۵+۸	۷۳۳۹۴/۸۷۶
HBA	FF ^۱	FF ^۲
BestSol & Best possible solution	۱/۶۲۷۲۵+۰۹	۱/۹۸۶۵۵+۰۴
WorstSol	۱/۷۸۹۲۵+۰۹	۲/۰۰۸۲۵+۰۴
NSGA ^۲	FF ^۱	FF ^۲
BestSol	۱/۶۰۵۱۵+۰۹	۱/۹۱۲۷۵+۰۴

^۱ شاخص DM تنوع جواب‌های غیر غالب که توسط الگوریتم به‌دست‌آمده‌اند را تعیین می‌کند.

^۲ شاخص NPS تعداد جواب‌های موجود در پارتو مربوط به هر الگوریتم حل را نشان می‌دهد.

^۳ شاخص SNS که به آن شاخص گستردگی نیز می‌گویند، برای محاسبه میزان تنوع جواب‌های پارتو مورد استفاده قرار می‌گیرد.

^۴ شاخص MID فاصله از نقطه ایده آل است و میزان نزدیکی مجموعه پارتو به‌دست‌آمده توسط الگوریتم را به لبه پارتو بهینه محاسبه می‌کند.

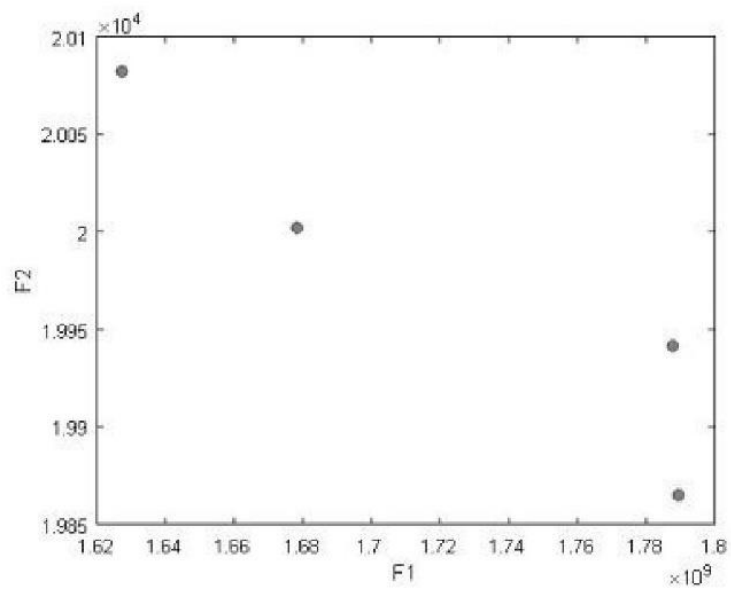


Best possible solution		
WorstSol	$1/8407e+09$	$2/0145e+04$

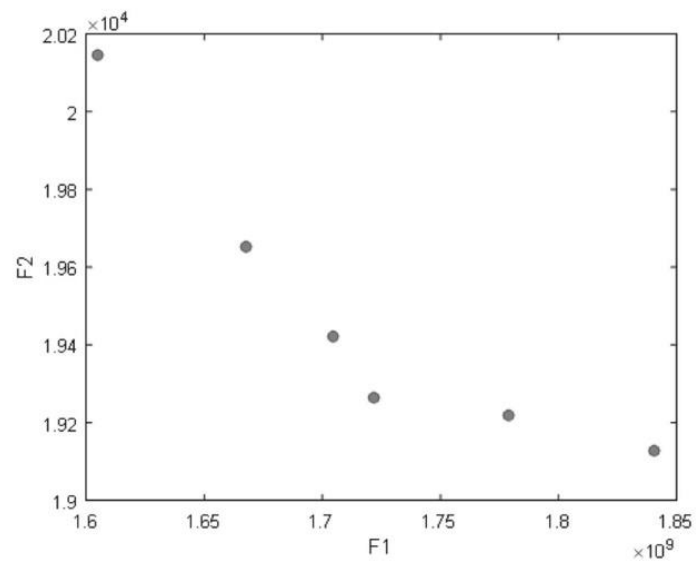
طبق جدول (۶) یافته‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های حل، حاکی از برتری قابل‌توجه تابع هدف دوم نسبت به تابع هدف اول در تمامی روش‌های مورد بررسی است. در مدل سناریو مقدار بهینه تابع هدف دوم برابر با $40031/748$ بوده که در 1448 تکرار و $0/327$ ثانیه به‌دست آمده است. در مقابل، بدترین مقدار آن در 17186 تکرار به $73394/876$ رسیده است و در تابع هدف اول بهترین جواب نداد و نتوانست مدل را حل نماید، لذا از الگوریتم‌ها برای ادامه حل مدل بهره گرفته شد. الگوریتم HBA در 10 بار تکرار و 4 نقطه، به مقدار بهینه $1/9865e+04$ برای تابع هدف دوم دست یافته که نشان‌دهنده پایداری و قدرت اکتشافی بالای آن است. به‌طور مشابه، NSGA-II نیز در 10 تکرار و 6 نقطه، مقدار $1/9127e+04$ را برای همین تابع به‌دست آورده است. در هر سه رویکرد، تابع هدف دوم ضمن دستیابی به نقاط شدنی بهینه، بر جبهه پارتو تسلط داشته و تأثیر بسزایی در تعیین کیفیت نهایی مدل و تصمیم‌گیری داشته است.

جدول ۷. شاخص‌های عملکردی و توابع هدف

	DM	SNS	NPS	MID	TIME
الگوریتم گورکن عسل خوار	$1/6200e+08$	$0/0457$	۴	$0/0604$	$140/7682$
الگوریتم ژنتیک دوهدفه	$2/3553e+08$	$0/0382$	۶	$0/0822$	$203/0374$



شکل ۳. جبهه پارتو توابع هدف الگوریتم گورکن عسلخوار



شکل ۴. جبهه پارتو توابع هدف الگوریتم ژنتیک دو هدفه



طبق جدول (۷) شاخص MID برای الگوریتم HBA برابر با ۰/۰۶۰۴ بوده و فاصله کمتری با جبهه پارتوی واقعی دارد؛ بنابراین، در ارزیابی کیفیت راه‌حل‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا می‌کند. از نظر زمان حل، الگوریتم HBA سریع‌تر از الگوریتم NSGA-II عمل کرده و از این‌رو در کاربردهای نیازمند پاسخ سریع، برتری دارد. در خصوص شاخص (NPS تعداد نقاط پارتو) طبق شکل (۴-۳)، الگوریتم NSGA-II عملکرد بهتری نسبت به HBA داشته‌اند. همچنین، مقدار SNS در الگوریتم HBA بالاتر از الگوریتم NSGA-II بوده که نشان‌دهنده تنوع بیشتر در راه‌حل‌های غیرمغلوب است. در نهایت، شاخص DM برای الگوریتم NSGA-II بیش از الگوریتم HBA گزارش شده و در تصمیم‌گیری نهایی تأثیرگذار بوده است.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مطالعه حاضر با استفاده از مدلی یکپارچه برای زنجیره تأمین پایدار تحت شرایط عدم قطعیت، پیشرفت چشمگیری در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه ارائه کرده است. همچنین مطالعه با هدف حداقل سازی هزینه‌های سیستم و آلاینده‌های زیست‌محیطی، به ارائه مدل دقیق‌تر، مقاوم‌تر و انطباقی که می‌تواند به‌طور مؤثری با عدم قطعیت مقابله کند و منجر به بهبود تصمیم‌گیری و نتایج شود، پرداخته است. در این مطالعه به ضرورت به کارگیری الگوریتم‌های مناسب برای حل مدل‌های ریاضی توسعه یافته امروزه که با راه‌حل دقیق و نرم‌افزارهای تجاری امکان‌پذیر نیست؛ تأکید شده و به توسعه چندهدفه یک تکنیک نوظهور و مقایسه آن با الگوریتم ژنتیک چندهدفه پرداخته شده است. به‌منظور مقایسه و اثبات کارایی حل از مثال عددی استفاده شد. یافته‌ها حاکی از اثربخشی الگوریتم‌های فرا ابتکاری به کار گرفته شده در حل مسائل بهینه‌سازی با فضای جستجوی پیچیده و دشوار (NP-Hard) است. علاوه بر این، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که الگوریتم گورکن عسل‌خوار به‌ویژه به دلیل ویژگی‌های سازگاری پویا، یادگیری تدریجی و توانایی کاوش مؤثر در نواحی ناشناخته فضای جستجو، در شرایط عدم قطعیت عملکردی برتر نسبت به الگوریتم ژنتیک چندهدفه ارائه می‌دهد. این برتری موجب شده است که الگوریتم گورکن به‌عنوان ابزاری توانمند برای توسعه مدل‌های پیچیده و پایدار زنجیره تأمین مطرح شود و نقشی کلیدی در بهبود کیفیت راه‌حل‌ها و تسریع همگرایی ایفا کند. در نهایت، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که به‌کارگیری الگوریتم‌های پیشنهادی، چارچوبی قدرتمند، قابل اعتماد و



قابل پیاده‌سازی در محیط‌های واقعی برای ارتقای کارایی و پایداری زنجیره تأمین فراهم می‌آورد و می‌تواند مسیر توسعه رویکردهای نوین در حوزه بهینه‌سازی پایدار را هموار سازد.

تعارض منافع. برای ارائه مطالب و نگارش این مقاله هیچ‌گونه کمک مالی از هیچ فرد، نهاد و سازمانی دریافت نشده است و نتایج و دستاوردهای این مقاله به نفع یا ضرر سازمان یا فردی خاص نخواهد بود. حضور نویسندگان در این پژوهش به‌عنوان شهادی بی‌طرف ولی متخصص بوده است و نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافع ندارند.

۶. منابع

- [۱] Amini, A., Alinezhad, A., & Gharakhani, D. (۲۰۲۳). A New Rough BWM Approach for Evaluating and Selecting a Sustainable Supplier in Supply Chain Management. *Journal of Industrial Management Perspective*, ۱۳(۳), ۹-۳۸. [In Persian]
- [۲] Farrokh, M. (۲۰۲۳). Designing a Sustainable Closed-Loop Supply Chain Considering Carbon Tax and Technology Selection in the Battery Industry. *Journal of Industrial Management Perspective*, ۱۳(۴), ۴۶-۸۴. [In Persian]
- Seifbarghy, M. (۲۰۲۲). A Multi-Objective Sustainable Closed Loop Supply Chain Model Considering Suppliers Evaluation and using SWARA-WASPAS Method. *Journal of Industrial Management Perspective*, ۱۲(۳), ۶۳-۸۸. [In Persian]
- [۴] Azar, A., Ardakani, D. A., & Keshavarz, P. (۲۰۱۷). The principles of sustainable supply chain management. [In Persian].
- [۵] Azar, A., & Farrokh, M. (۲۰۱۸). Mathematical programming under uncertainty: stochastic, fuzzy and robust approaches. *Tehran: research institute for humanities research and development*. [In Persian].
- [۶] Nazari, M., Dehghan Nayeri, M., & Fathi Hafshjani, K. (۲۰۲۵). Prediction of Uncertain Parameters of a Sustainable Supply Chain Using an Artificial Intelligence Approach. *Operations Research Forum*, ۶(۱), ۱-۲۵. DOI: [10.1007/s43069-024-00408-7](https://doi.org/10.1007/s43069-024-00408-7)
- [۷] Wang, W., Zhang, Y., Zhang, W., Gao, G., & Zhang, H. (۲۰۲۱). Incentive mechanisms in a green supply chain under demand uncertainty. *Journal of cleaner production*, ۲۷۹, ۱۲۳۶۳۶. DOI: [10.1016/j.jclepro.2020.123636](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123636)
- [۸] Nazari, M., Dehghan Nayeri, M., Fathi Hafshejani, K. (۲۰۲۴). Presenting a Bi-objective mathematical model of a sustainable supply chain based on uncertainty parameters (capacity reduction due to disruption, shipping, and demand costs). *Organizational Resources Management Researches*, ۱۴(۲), pp. ۱۴۵-۱۷۶. [In Persian]



- [۹] Fattahi, M. (۲۰۲۰). A data-driven approach for supply chain network design under uncertainty with consideration of social concerns. *Annals of Operations research*, ۲۸۸(۱), ۲۶۵-۲۸۴. DOI: [10.1007/s110479-020-3532-9](https://doi.org/10.1007/s110479-020-3532-9)
- [۱۰] Li, J., & Liu, P. (۲۰۲۲). Modeling green supply chain games with governmental interventions and risk preferences under fuzzy uncertainties. *Mathematics and Computers in Simulation*, ۱۹۲, ۱۸۲-۲۰۰. DOI: [10.1016/j.matcom.2021.08.020](https://doi.org/10.1016/j.matcom.2021.08.020)
- [۱۱] Shen, J. (۲۰۲۰). An environmental supply chain network under uncertainty. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ۵۴۲, ۱۲۳۴۷۸. DOI: [10.1016/j.physa.2019.123478](https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.123478)
- [۱۲] Vali-Siar, M. M., & Roghanian, E. (۲۰۲۲). Sustainable, resilient and responsive mixed supply chain network design under hybrid uncertainty with considering COVID-۱۹ pandemic disruption. *Sustainable production and consumption*, ۳۰, ۲۷۸-۳۰۰. DOI: [10.1016/j.spc.2021.12.003](https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.003)
- [۱۳] Mohaghar, Ali, & Abbasi, Hamid. (۲۰۱۹). Designing and Explaining the Sustainability Model for Banking Supply Chain (A Case Study of Mellat Bank). *Management Research in Iran (Modares Human Sciences)*, ۲۳(۳), ۵۵-۷۴. [In Persian]
- [۱۴] Izadyar, M., Toloie Eshlaghy, A., Mehri, Z. (۲۰۲۱). Application of system dynamics in assessing sustainability performance of LARG supply chain in the automotive industry. *Management Research in Iran (Modares Human Sciences)*, ۲۵(۱), ۱-۲۴. [In Persian]
- [۱۵] Hashemzahi, P., Mohammadi, M. and Atabaki, M. S. (۲۰۲۴). Social Considerations in Designing Closed-Loop Sustainable Supply Chain: A Many-Objective Evolutionary Algorithm Approach for Deep Decarbonization. *Modern Research in Decision Making*, ۹(۴), ۲۹-۶۱. [In Persian]
- [۱۶] Fathiheliabadi, A., raad, A., Motameni, A. and Talebi, D. (۲۰۲۳). Presenting a mathematical model for supply chain network design considering trade credit under uncertainty. *Modern Research in Decision Making*, ۸(۲), ۹۸-۱۲۱. [In Persian]
- [۱۷] Sherafati, M. and Najafi Ghobadi, S. (۲۰۲۲). Provide a novel model for designing a sustainable supply chain network considering development and multi-level environmental decisions. *Modern Research in Decision Making*, ۷(۴), ۱۰۴-۱۲۴. [In Persian]
- [۱۸] Dreger, C. (۲۰۲۳). The impact of demand and supply shocks on inflation. Evidence for the US and the Euro area.
- [۱۹] Kausar, A., Hasan, A., Maheshwari, S., Gautam, P., & Jaggi, C. K. (۲۰۲۴). Sustainable production model with advertisement and market price dependent demand under salvage option for defectives. *Opsearch*, ۶۱(۱), ۳۱۵-۳۳۳. DOI: [10.1007/s12097-023-00688-3](https://doi.org/10.1007/s12097-023-00688-3)



- [۲۰] Foroozesh, N., Karimi, B., & Mousavi, S. M. (۲۰۲۲). Green-resilient supply chain network design for perishable products considering route risk and horizontal collaboration under robust interval-valued type-۲ fuzzy uncertainty: A case study in food industry. *Journal of environmental management*, ۳۰۷, ۱۱۴۴۷۰. DOI: [10.1016/j.jenvman.2022.114470](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114470).
- [۲۱] Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B., Sabouhi, F. (۲۰۱۸). Resilient and sustainable supply chain design: sustainability analysis under disruption risks. *International Journal of Production Research*, ۵۶(۱۷), ۵۹۴۵-۵۹۶۸. DOI: [10.1080/00207179.2018.1461950](https://doi.org/10.1080/00207179.2018.1461950).
- [۲۲] Afshar, M., Molana, H., & Parchicolaie, B. R. (۲۰۲۴). A multi objective optimization model for multi-commodity closed-loop supply chain network considering disruption risk. *International Journal of Engineering*, ۳۷(۴), ۶۴۶-۶۶۱. DOI: [10.5829/IJE.2024.37.04A.07](https://doi.org/10.5829/IJE.2024.37.04A.07).
- [۲۳] Khalili-Fard, A., Parsaee, S., Bakhshi, A., Yazdani, M., Aghsami, A., & Rabbani, M. (۲۰۲۴). Multi-objective optimization of closed-loop supply chains to achieve sustainable development goals in uncertain environments. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, ۱۳۳, ۱۰۸۰۵۲. DOI: [10.1016/j.engappai.2024.108052](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108052).
- [۲۴] Arab Momeni, M., Jain, V., & Bagheri, M. (۲۰۲۴). A multi-objective model for designing a sustainable closed-loop supply chain logistics network. *Logistics*, ۸(۱), ۲۹. DOI: [10.3390/logistics8010029](https://doi.org/10.3390/logistics8010029).
- [25] Hashim, F. A., Houssein, E. H., Hussain, K., Mabrouk, M. S., & Al-Atabany, W. (2022). Honey Badger Algorithm: New metaheuristic algorithm for solving optimization problems. *Mathematics and Computers in Simulation*, 192, 84-110. DOI: [10.1016/j.matcom.2021.08.013](https://doi.org/10.1016/j.matcom.2021.08.013)