



پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری
دوره ۵، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۹، صص ۲۸-۱

زنجیره تأمین سبز چندهدفه: مدل چند محصولی در شرایط عدم قطعیت

داود خدادادیان^۱، رضا رادفر^{۲*}، عباس طلوعی اشلقی^۳

۱-دانش‌آموخته دکترای مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲-استاد تمام، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۳-استاد تمام، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۲۳

تاریخ ارسال: ۱۳۹۸/۱۱/۱۵

چکیده

افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی موجب گرم شدن کره زمین شده و سلامت انسان‌ها و حیوانات را تحت تأثیر قرار داده است. از این رو، بحث سبز بودن در مطالعات اخیر اهمیت ویژه‌ای یافته است. هدف از این پژوهش، ارائه‌ی یک مدل ریاضی چندهدفه سبز در یک شبکه زنجیره تأمین چند سطحی و چند محصولی است که به کمینه‌سازی تأثیرات زیست‌محیطی و هزینه‌های کلی زنجیره تأمین و به بیشینه‌سازی سطح رضایت مشتری می‌پردازد. از طرف دیگر، به دلیل نامشخص بودن سطح تقاضا در بازار، تقاضا دارای عدم اطمینان و به صورت سناریویی خواهد بود. با توجه به پیچیدگی مدل ریاضی پیشنهادی و سختی‌های حل مسئله با روش‌های دقیق در اندازه‌ی بزرگ، یک الگوریتم NSGA II طراحی شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، NSGA II پیشنهادی یک روش قابل‌اطمینان برای یافتن مرزهای پارتوی کارآمد در زمان قابل‌قبول محسوب می‌شود.

کلیدواژه‌ها: زنجیره تأمین سبز، بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نا مغلوب، عدم قطعیت، لجستیک معکوس

۱- مقدمه

آب، زمین، جنگل و تنوع زیستی همه جزء دارایی‌های با ارزش و حیاتی بشر به حساب می‌آیند که



عدم انجام اقدامات محافظتی، خسارات فاجعه باری را در پی خواهد داشت [۱، ص ۲]. مدیریت زنجیره تأمین سبز، مفهومی است که در سال‌های اخیر برای حصول اطمینان از تأمین اولویت‌های محیط‌زیست و مسئولیت‌های اجتماعی سازمان‌ها در تمامی مراحل تولید، انتقال و مصرف محصول شکل‌گرفته است [۲، ص ۱]. در نظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی در زنجیره تأمین ممکن است موقعیت رقابتی شرکت را به‌وسیله کاهش هزینه‌ها بهبود بخشد. علاوه بر کاهش هزینه، همکاری نزدیک با تأمین‌کننده می‌تواند به تولید محصولات سبز منتهی شود. زیرا این امر شرکت‌ها را بر آن می‌دارد تا محصولات خود را جهت عدم تخریب محیط‌زیست بازنگری کنند. در این رابطه، برای موفقیت به همکاری بیشتر و نزدیک‌تر با تأمین‌کنندگان نیاز است [۳، ص ۱۹۶]. باید توجه داشت که در هر زنجیره تأمین دو نوع جریان مواد و محصولات می‌تواند وجود داشته باشد. زنجیره تأمین مستقیم به کمک جریان روبه‌جلو، جریان مواد و محصولات را در شبکه مشخص می‌سازد. در این نوع از زنجیره تأمین، پس از فراهم نمودن مواد خام، محصولات نهایی به‌صورت مرحله‌به‌مرحله توسط سطوح زنجیره تأمین تولید شده و در نهایت توسط مراکز توزیع به دست مشتری می‌رسند [۴، ص ۲]. نوع دیگر جریان، جریان معکوس محصولات از سمت مشتری به اجزای زنجیره می‌باشد که در سال‌های اخیر توجهات زیادی را به خود جلب نموده است. در لجستیک معکوس، محصولات می‌توانند توسط مشتری بازگشت داده شوند تا دفع، بازیافت، استفاده مجدد و یا تولید مجدد شوند [۵، ص ۲].

هدف مدل پیشنهادی کمیته‌سازی هزینه، پیشینه‌سازی میزان رضایت مشتری و کمیته‌سازی تأثیرات زیست‌محیطی می‌باشد. این مدل انعطاف‌پذیری بالایی برای اجرا در دنیای واقعی مثلاً در صنایع خودروسازی، صنایع الکترونیک و صنایع داروسازی دارد. در بخش بعدی، به معرفی پژوهش‌های مرتبط در این حوزه پرداخته می‌شود.

۲- مروری بر ادبیات تحقیق (پیشینه پژوهش)

ادبیات تحقیق نشان می‌دهد که مدیریت زنجیره تأمین سبز می‌تواند کارایی شرکت‌ها را افزایش دهد [۶، ص ۲۶۵]. فلیشمن^۲ به‌عنوان اولین تحقیق در این حوزه روی لجستیک معکوس سبز با در نظر گرفتن عوامل زیست‌محیطی مطالعه کرد. مطالعات دیگری نیز صورت گرفته‌اند که بر لجستیک‌های سبز و معکوس متمرکز بوده‌اند [۷، ص ۶۵۳].



کواریگواسی فروتانتو^۲ و همکارانش یک زنجیره تأمین حلقه بسته برای سیستم بازیافت ارائه کردند. آن‌ها چند استراتژی زیست‌محیطی همراه با تعداد زیادی معیار زیست‌محیطی و اقتصادی یافتند. در پایان آن‌ها این مدل را به وسیله نرم‌افزاری به نام ADBASE حل کردند [۸، ص ۴۸]. کاردوسو^۳ و همکارانش یک شبکه زنجیره تأمین همراه با جریان‌های معکوس، عدم اطمینان تقاضا و در نظر گرفتن وجود مراکز لجستیک معکوس، تولید و توزیع توسعه دادند. هدف این مطالعه به حداکثر رساندن ارزش فعلی خالص (NPV) و یافتن اندازه و موقعیت مراکز، انبارها و خرده‌فروشان است [۹، ص ۲۲۶]. رضانی و همکارانش یک مدل چندهدفه تصادفی برای شبکه‌های لجستیک معکوس و روبه‌جلو ارائه کردند. آن‌ها در مطالعه خود، برای لجستیک معکوس و روبه‌جلو به ترتیب دو سه مرحله در نظر گرفتند. در این پژوهش توابع هدف سود به حداکثر رسید و کیفیت و پاسخگویی مشتری را بهینه گردید، درحالی‌که شرایط نامشخص بود و اطمینان نداشت [۱۰، ص ۳۷].

زحل و سلیمانی یک مدل چندهدفه پیشنهاد کردند که زنجیره تأمین حلقه بسته شامل چهار سطح برای جریان روبه‌جلو و سه سطح برای جریان معکوس را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها یک بررسی موردی در صنعت طلا انجام دادند که انتشار CO₂ در آن یک مسئله حیاتی است [۱۱، ص ۱۳۳]. ژاله چیان و همکاران یک تحقیق با عنوان "طراحی پایداری مسیریابی موجودی زنجیره تأمین حلقه بسته با عدم اطمینان" انجام دادند. آن‌ها در این تحقیق تأثیرات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی مدل مسیریابی موجودی با عدم اطمینان را در نظر گرفتند. آن‌ها همچنین یک الگوریتم فرا ابتکاری برای حل مدل ارائه کردند [۱۲، ص ۱۹۳].

توکلی مقدم و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط برای لجستیک معکوس توسعه دادند که به کمینه‌سازی هزینه‌های کل زنجیره می‌پرداخت. درنهایت، مدل را توسط روش دقیق حل نمودند [۱۳]. رضانی و همکاران یک زنجیره تأمین سبز حلقه بسته دو هدفه را ارائه نمودند که توابع هدف شامل کمینه‌سازی هزینه‌ها و کربن دی‌اکسید منتشرشده بود. یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط ارائه شد و برای حل آن، دو هدف را به یک هدف تبدیل کرده و به صورت تک هدفه حل گردید [۱۴].

پیشوایی و همکارانش یک مدل بهینه‌سازی معین برای شبکه‌ی لجستیک معکوس ارائه دادند.



سپس یک مدل احتمالی سناریو محور توسعه داده شد [۱۵]. پیشوایی و ترابی یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط احتمالی دو هدفه ارائه نمودند و از یک رویکرد تعاملی فازی جهت حل مدل استفاده کردند. در ادامه آزمایش‌های عددی جهت اثبات کاربردپذیری مدل و همچنین سودمندی رویکرد حل پیشنهادی ارائه‌شده است [۱۶]. شی^۵ و همکارانش یک مسئله برنامه‌ریزی تولید برای سیستم حلقه بسته چند محصولی ارائه دادند. نویسندگان تقاضا و برگشت در شرایط عدم قطعیت را از طریق برنامه‌ریزی احتمالی موردبررسی قراردادند [۱۷].

وحدانی و همکارانش یک مدل تخصیص غیرخطی مختلط برای مراکز جمع‌آوری ارائه کرده‌اند. مدل لجستیک حلقه بسته به‌صورت چندلایه با چندین تأمین‌کننده، چندین مرکز جمع‌آوری، چند دوره‌ای و چند تسهیلی طراحی شده است. همچنین تقاضا، هزینه، ظرفیت، فواصل و تعداد محصولات برگشتی به‌صورت غیرقطعی و فازی می‌باشند [۱۸]. سامان حسن‌زاده امین و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با کاهش کل هزینه ارائه می‌کنند. همچنین تأثیرات عدم قطعیت تقاضا و برگشت بر ساختار شبکه از طریق برنامه‌ریزی احتمالی با رویکرد سناریو محور موردبررسی قرار [۱۹]. شنو^۶ و همکاران یک زنجیره تأمین سبز چندهدفه را برای لجستیک معکوس و یکپارچه ارائه نمودند. آن‌ها یک مطالعه موردی در کشور تایوان جهت اعتبارسنجی مدل ریاضی خود ارائه نمودند [۲۰].

فضلی خلف و همکاران به طراحی یک مدل حلقه بسته سبز دو هدفه پرداختند که به‌وسیله آن اثرات نامطلوب زیست‌محیطی زنجیره تأمین و هزینه‌های آن را کمینه می‌نمودند. در این مقاله، جهت مقابله با عدم قطعیت پارامترهای مسئله، برنامه‌ریزی احتمالی سناریو محور استفاده شد [۲۱]. راد و نهاوندی یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح چندهدفه برای زنجیره تأمین حلقه بسته سبز ارائه نمودند که هدف آن کمینه‌سازی اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی و بیشینه‌سازی رضایت مشتری بود [۲۲]. قومی آویلی و همکاران در مقاله خود درباره عدم قطعیت در زنجیره تأمین حلقه بسته سبز بحث نمودند. آن‌ها از رویکرد فازی جهت مقابله با عدم قطعیت تقاضا استفاده کردند. مدل دو هدفه ارائه‌شده توسط روش اپسیلون محدودیت حل شد و یک مطالعه موردی نیز در این تحقیق صورت گرفت [۲۳]. جبارزاده و همکاران در مدل خود ریسک را در زنجیره تأمین حلقه بسته بررسی نمودند که در آن هزینه‌های زنجیره کمینه می‌شد. جهت ارزیابی کارایی مدل یک مطالعه موردی در ایران نیز انجام شد [۲۴].



طبق تحقیقات انجام‌شده در حوزه‌ی زنجیره تأمین حلقه بسته سبز، مقالات اندکی عدم قطعیت را در مدل پیشنهادی خود در نظر گرفته‌اند و در اکثر این مقالات روش‌های فازی و احتمالی به‌کارگیری شده‌اند. بنابراین یکی از نوآوری‌های اصلی این مقاله استفاده از رویکرد سناریوسازی برای پارامتر تقاضا می‌باشد. همچنین، ارائه یک مدل زنجیره تأمین معکوس سبز سه هدفه با در نظرگیری هم‌زمان سطوح کامل زنجیره‌های تأمین در مسئله به همراه یکپارچه‌سازی سطوح تولید و بازیافت در سطح سوم، و یکپارچه‌سازی سطوح توزیع و بازرسی در سطح چهارم تاکنون در ادبیات مشاهده نشده است. در ادامه مقاله، مسئله مربوطه و مدل ریاضی مربوط به آن تشریح می‌گردد.

۳- بیان مسئله و مدل ریاضی

در این بخش، ابتدا به بیان مسئله پرداخته می‌شود. سپس فرضیات و شرایط مسئله به‌طور کامل توضیح داده می‌شوند و درنهایت، با استفاده از اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای معرفی‌شده، مدل ریاضی مسئله ارائه می‌گردد.

۳-۱- تعریف مسئله

در این تحقیق، یک مسئله چند سطحی زنجیره تأمین سبز بررسی می‌گردد. سطوح زنجیره موردنظر عبارت‌اند از:

- تأمین‌کننده سطح اول که مواد خام اولیه را تأمین کرده و به سطح بعدی می‌فرستد.
- تأمین‌کننده سطح دوم که با استفاده از مواد خام اولیه، قطعات را تولید کرده و به سطح بعدی می‌فرستد.
- مراکز تولیدی که قطعات را از سطح قبلی خود دریافت نموده و تبدیل به محصولات نهایی می‌کند.
- مراکز توزیع که محصولات نهایی را از سطح قبلی خود دریافت نموده و به مشتریان (یا نمایندگی‌های فروش محصولات) عرضه می‌دارد.
- مشتریان (یا نمایندگی‌های فروش محصولات) که به‌عنوان آخرین سطح روبه‌جلوی این



زنجیره در نظر گرفته می‌شوند.

- مراکز دورریز که کالاهای غیرقابل مصرف به این مراکز ارسال می‌گردند. در واقع این سطح، به عنوان سطح جریان رو به عقب زنجیره در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که در این مسئله، بخشی از وظیفه سطح چهارم زنجیره (مراکز توزیع) مربوط به بازرسی محصولات نیز می‌شود. یعنی کالاها در این مراکز بازرسی نهایی شده و چنانچه قابلیت عرضه به سطح بعدی را داشته باشند، به دست مشتریان می‌رسند. در غیر این صورت، اگر نیاز به تعمیر یا بازسازی داشته باشند به عنوان کالای مرجوعی به سطح قبلی خود (مراکز تولیدی) فرستاده می‌شوند تا مجدداً پردازش گشته و آماده عرضه شوند. در صورتی که کالایی نه قابلیت عرضه به سطوح مشتریان و نه قابلیت بازسازی مجدد در سطح تولیدی را داشته باشد، به مراکز دورریز فرستاده می‌شود.

بنابراین، یکی از ویژگی‌های خاص این مسئله، در نظریه هم‌زمان سطوح کامل زنجیره‌های تأمین در مسئله به همراه یکپارچه‌سازی سطوح تولید و بازیافت در سطح سوم، و یکپارچه‌سازی سطوح توزیع و بازرسی در سطح چهارم می‌باشد. استفاده دوطرفه از این مراکز باعث کاهش هزینه و آلودگی ناشی از استفاده متقابل از زیرساخت‌ها و وسایل حمل‌ونقل می‌شود.

از دیگر ویژگی‌های این مسئله چند کالایی بودن آن است. به عبارت دیگر، از مواد خام اولیه گرفته تا محصولات نهایی انواع مختلفی از محصول وجود دارد. مدل ریاضی مسئله به گونه‌ای طراحی شده است که در مورد اینکه کدام مرکز چه محصولی را دریافت کرده و چه محصولی را تولید کند و به سطح بعدی بفرستد تصمیم‌گیری می‌نماید.

همچنین، احتمال هرج‌ومرج و اختلال بازار در مدل در نظر گرفته می‌شود. از این رو با سناریوسازی و طراحی سناریوهای مختلف در تقاضای محصولات، به مقابله با عدم قطعیت موجود در دنیای واقعی پرداخته می‌شود.

در نهایت، در نظریه سه تابع هدف به منظور حداقل رساندن هزینه‌های کل و تأثیرات زیست‌محیطی و به حداکثر رساندن رضایت مشتری مسئله موردنظر را از سایر مسائل موجود در این حوزه متمایز می‌سازد.

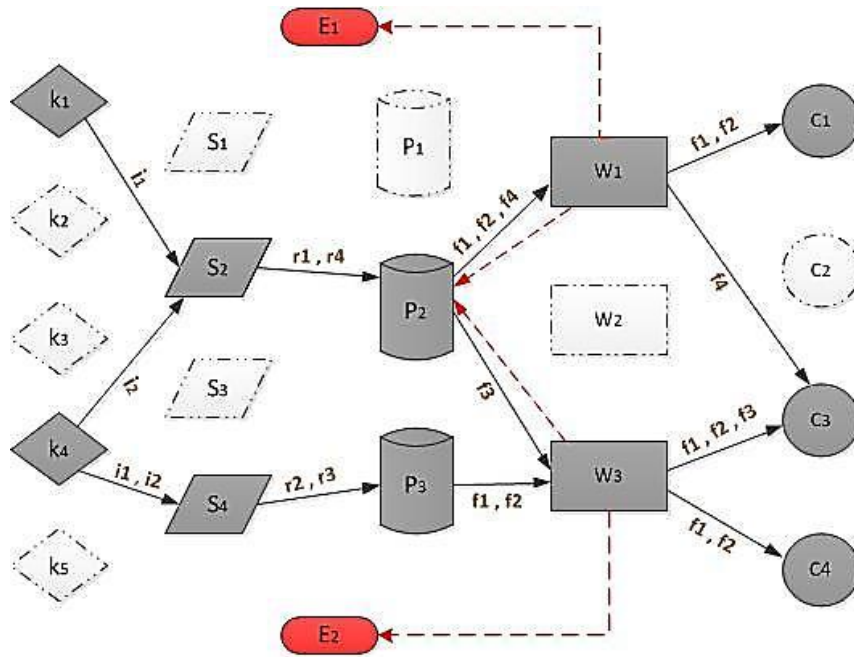
یک کاربرد بسیار مهم مسئله تحت مطالعه صنعت خودروسازی می‌باشد. به این صورت که کویل‌های آلومینیومی توسط تأمین‌کننده سطح اول به تأمین‌کننده سطح دوم ارسال می‌شود.



تأمین‌کننده سطح دوم، زیرقطعات خودرو (درب، سیلندر، یاتاقان و ...) را تولید کرده و به سطح سوم یعنی تولیدکننده ارسال می‌کنند. تولیدکننده‌ها در اینجا کارخانه‌های خودروسازی می‌باشند که پس از تولید محصول آن‌ها را به انبارها می‌فرستند. در نظر داشته باشید که انواع مختلف خودروها در این مراکز تولید می‌شوند. سپس، در انبار محصولات مورد تقاضای مشتریان به نمایندگی‌های فروش ارسال شده و محصولات غیرقابل عرضه به کارخانه جهت ساخت مجدد مرجوع می‌گردند. انتخاب بهینه تأمین‌کنندگان، کارخانه‌های تولیدی، مراکز توزیع و نمایندگی‌های فروش همواره جزو دغدغه‌های صاحبان این صنایع بوده که به‌وسیله مدل ریاضی در تحقیق حال حاضر، تصمیم‌گیری بهینه در این خصوص و تخصیص هرکدام از محصولات به مراکز خاص انجام می‌شود.

شکل ۱ یک تصویر شماتیک از حل مسئله موردنظر در ابعاد کوچک را نشان می‌دهد. در این مسئله در سطح اول تا ششم به ترتیب ۵، ۴، ۳، ۳، ۴ و ۲ مرکز موجود است. مدل در سطح اول تصمیم می‌گیرد تا با تأمین‌کننده‌های مواد خام k_1 و k_2 در سطح دوم با تأمین‌کنندگان قطعات S_1 و S_2 در سطح سوم با تولیدکنندگان P_1 و P_2 در سطح چهارم با مراکز توزیع W_1 و W_2 و در سطح پنجم با مشتریان (مراکز نمایندگی) C_1 ، C_3 و C_4 همکاری کند. مراکز دورریز E_1 و E_2 نیز از قبل موجود می‌باشند. به‌طورکلی، مراکزی که مدل تصمیم به همکاری با آن‌ها گرفته است به‌صورت توپر در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، فلش‌های سیاه‌رنگ، جریان روبه‌جلوی زنجیره و فلش‌های قرمز رنگ جریان معکوس را در این زنجیره نشان می‌دهند.

بر روی هر فلش، نشان داده شده است که چه نوع محصول از هرکدام از مراکز آن سطح به مراکز سطح بعدی انتقال می‌یابد. اندیس I نشان‌دهنده‌ی مواد اولیه خام، R نشان‌دهنده‌ی قطعات و F نشان‌دهنده‌ی محصول نهایی می‌باشد.



شکل ۱. تصویر شماتیک از شبکه موردبررسی

۳-۲- شرایط مسئله

-مسئله شامل چند محصول و یک دوره است.

-این شبکه از شش سطح تشکیل می‌شود: (۱) تأمین‌کننده سطح اول (مواد خام) (۲) تأمین‌کننده سطح دوم (قطعات) (۳) مرکز تولید/ بازیافت، (۴) مرکز توزیع/ بازرسی، (۵) مشتریان، و (۶) مرکز دورریز.

-تعداد تأسیسات و موقعیت قرارگیری آن‌ها از پیش مشخص می‌شوند.

-جریان مواد، قطعات و محصولات تنها می‌توانند بین دو سطح ترتیبی از شبکه قرار گیرند.

-مراکز تولید قادر به تولید مواد خام یا محصولات نیمه ساخت نیستند.

-مواد خام و محصولات نهایی در مراکز مربوطه تنوع بالایی دارند.

-تأمین‌کننده مواد خام و مراکز تولید به خاطر سیاست‌های تولید و تجهیزات فنی خود، کالاهای



متفاوتی را تولید می‌کنند.

-تسهیلات تولید (منابع) مراکز تولید، مراکز توزیع و مراکز دورریز علاوه بر هزینه‌های تولید نامشخص (تصادفی) هستند.

-تقاضای مشتریان قطعی نیست و این عدم قطعیت به‌صورت سناریوسازی می‌باشد.

-مشتریان می‌توانند با ارتباط با بیش از یک مرکز احتیاجات خود را رفع کنند.

-تابع توزیع احتمال برای پارامترهای نامشخص تعریف می‌شود.

علاوه بر این مهم‌ترین تصمیماتی که به‌واسطه مدل ریاضی گرفته می‌شوند عبارت‌اند از:

- انتخاب تأمین‌کننده مواد خام
 - انتخاب تأمین‌کننده قطعه
 - انتخاب تولیدکننده (کارخانه)
 - انتخاب مراکز توزیع
 - تخصیص مواد خام، قطعات و محصولات نهایی مختلف برای تأسیسات انتخابی
- در اینجا، هدف طراحی یک شبکه زنجیره تأمین به‌منظور به حداقل رساندن هزینه‌های کلی زنجیره تأمین، به حداقل رساندن تأثیرات زیست‌محیطی و به حداکثر رساندن سطح رضایت مشتریان است.

۳-۳- اندیس‌ها، پارامترها و متغیرها

اندیس‌های مورداستفاده در این مدل عبارت‌اند از:

مجموعه مراکز توزیع ($W=1, 2, 3, \dots, W$)	W	مجموعه تأمین‌کنندگان مواد اولیه (سطح اول) ($K=1, 2, 3, \dots, K$)	K
مجموعه قطعات ($R=1, 2, 3, \dots, R$)	R	مجموعه مواد اولیه ($I=1, 2, 3, \dots, I$)	I
مجموعه سناریوها ($N=1, 2, 3, \dots, N$)	N	مجموعه تأمین‌کننده قطعه (سطح دوم) ($S=1, 2, 3, \dots, S$)	S
نشانگر مجموعه مکان‌های بالقوه تولیدی و بازیافت	A	مجموعه مشتریان ($C=1, 2, 3, \dots, C$)	C
نشانگر مجموعه مکان‌های بالقوه برای	B	مجموعه تقاضاها ($D=1, 2, 3, \dots, D$)	D



مراکز توزیع و بازرسی
 E نشانگر مجموعه مکان‌های ثابت دورریز

P مجموعه تسهیلات تولید ($P=1, 2, \dots, P$)
 F مجموعه محصولات ساخته‌شده
 ($F=1, 2, 3, \dots, F$)

پارامترهای مدل ریاضی عبارت‌اند از:

<p>d_{pw}^n هزینه واحد تهیه محصول f توسط کارخانه p برای مرکز پخش w تحت سناریوی n</p>	<p>مقدار ماده اولیه i موردنیاز برای ساخت یک واحد قطعه r: تقاضای مشتری منطقه مشتری r از قطعات r</p>	<p>a^{ir}</p>
<p>d_{wc}^n هزینه واحد تهیه محصول f توسط مرکز پخش w برای مشتری c تحت سناریوی n</p>	<p>متوسط نسبت قطعات r فرستاده‌شده به واحد دورریز E</p>	<p>d_{cr}</p>
<p>p^n احتمال وقوع سناریوی n</p>	<p>متوسط نسبت قطعات r فرستاده‌شده به واحد بازیافت A</p>	<p>$S1_r$</p>
<p>k_{ik}^n حد بالای ماده اولیه i فرستاده‌شده توسط تأمین‌کننده سطح اول k تحت سناریوی n</p>	<p>مقدار قطعه r موردنیاز برای ساخت یک واحد محصول نهایی f</p>	<p>$S2_r$</p>
<p>s_{rs}^n حد بالای قطعه r فرستاده‌شده توسط تأمین‌کننده سطح دوم sk تحت سناریوی n</p>	<p>تقاضای مشتری c برای کالای f تحت سناریوی n</p>	<p>b^{rf}</p>
<p>p_{fp}^n حد بالای محصول نهایی f فرستاده‌شده توسط تأمین‌کننده کارخانه p تحت سناریوی n</p>	<p>هزینه ثابت انتخاب تأمین‌کننده سطح یکم (مواد اولیه) k</p>	<p>D_{cf}^n</p>
<p>w_{fw}^n حد بالای محصول نهایی f فرستاده‌شده توسط مرکز پخش w تحت سناریوی n</p>	<p>هزینه ثابت انتخاب تأمین‌کننده سطح دوم (قطعات) s</p>	<p>CK_k</p>



حد بالای ماده اولیه i فرستاده‌شده توسط تأمین‌کننده سطح اول k به تأمین‌کننده سطح دوم s تحت سناریوی n	ks_{ik}^n	هزینه ثابت انتخاب کارخانه تولیدی p	CS_s
حد بالای قطعه r فرستاده‌شده توسط تأمین‌کننده سطح دوم s به کارخانه تولیدی p تحت سناریوی n	sp_{rsp}^n	هزینه ثابت انتخاب مرکز پخش w	CP_p
حد بالای محصول نهایی f فرستاده‌شده توسط کارخانه p به مرکز پخش w تحت سناریوی n	pw_{fpw}^n	هزینه ثابت تخصیص ماده اولیه i به تأمین‌کننده سطح یک k	CW_w
حد بالای محصول f فرستاده‌شده توسط مرکز پخش w به مشتری c تحت سناریوی n	wc_{fwc}^n	هزینه ثابت تخصیص قطعه r به تأمین‌کننده سطح دوم s	CK_{ih}
ظرفیت تأمین‌کننده سطح اول k تحت سناریوی n	UK_k^n	هزینه ثابت تخصیص محصول نهایی f به کارخانه تولیدی p	CS_{rs}
ظرفیت تأمین‌کننده سطح دوم s تحت سناریوی n	US_s^n	هزینه ثابت تخصیص محصول نهایی f به مرکز پخش w	CP_{ft}
ظرفیت کارخانه p تحت سناریوی n	UP_p^n	هزینه ثابت تهیه ماده اولیه i توسط تأمین‌کننده سطح اول k برای تأمین‌کننده سطح دوم s	CW_f
ظرفیت مرکز پخش w تحت سناریوی n	UW_w^n	هزینه ثابت تهیه قطعه r توسط تأمین‌کننده سطح دوم s برای کارخانه p	CKS
منبع مورد استفاده یک واحد ماده	UK_{ik}	هزینه ثابت تهیه محصول f توسط کارخانه	CSP_i



اولیه i در تأمین کننده سطح اول k منبع مورد استفاده یک واحد قطعه r در تأمین کننده سطح دوم s منبع مورد استفاده یک واحد محصول نهایی f در کارخانه p منبع مورد استفاده یک واحد محصول نهایی f در مرکز پخش w یک عدد بزرگ نزدیک بی نهایت	US_{rs} UP_{fp} UW_{fw} M	p برای مرکز پخش w هزینه ثابت تهیه محصول f توسط مرکز پخش w برای مشتری c هزینه واحد تهیه ماده اولیه i توسط تأمین کننده سطح اول k برای تأمین کننده سطح دوم s تحت سناریوی n هزینه واحد تهیه قطعه r توسط تأمین کننده سطح دوم s برای کارخانه p تحت سناریوی n مقدار ماده اولیه i مورد نیاز برای ساخت یک واحد قطعه r : تقاضای مشتری منطقه مشتریان c از قطعات r	CPW CW dks_{ik}^r dsp_{ir}^r E_{cf}^n HK_{ik} HS_{rs} ei_{abr}^{ad} ei_{bcr}^{an}
اگر کارخانه p بتواند محصول نهایی f را تولید کند، در غیر این صورت اگر مرکز پخش w متقاضی پخش محصول نهایی f باشد، در غیر این صورت تأثیر محیطی تولید یک واحد محصول r تأثیر محیطی حمل یک واحد محصول r از مکان a به مکان b تأثیر محیطی حمل یک واحد محصول r از مکان b به مکان c	HP_{fp} HW_{fw} ei_r^{ro} ei_{abr}^{rd} ei_{bcr}^{dc}	اگر تقاضای مشتری c برای کالای f تحت سناریوی n بزرگتر از صفر باشد، در غیر این صورت اگر تأمین کننده مواد اولیه k بتواند ماده اولیه i تولید کند، در غیر این صورت اگر تأمین کننده قطعات s بتواند قطعه r تولید کند، در غیر این صورت تأثیر محیطی حمل یک واحد محصول r از مکان b به مکان e تأثیر محیطی بازرسی یک واحد محصول r در مکان b	



ei_{ar}^{re}	تأثیر محیطی بازیاقت یک واحد محصول r	تأثیر محیطی حمل یک واحد
	در مکان a	محصول r از مکان b به مکان a
ei_{er}^{da}	تأثیر محیطی دفع یک واحد محصول r در مکان e	

متغیرهای تصمیم به کار گرفته‌شده در مدل ریاضی پیشنهادی به صورت زیر می‌باشد :

XKS_{iks}^n	مقدار ماده اولیه i تهیه‌شده به وسیله تأمین‌کننده سطح یکم k برای تأمین‌کننده سطح دوم s تحت سناریوی n	تصمیم در مورد تخصیص و یا عدم تخصیص ماده اولیه i به تأمین‌کننده سطح اول k
XSP_{rsp}^n	مقدار قطعه r تهیه‌شده به وسیله تأمین‌کننده سطح دوم s برای کارخانه p تحت سناریوی n	تصمیم در مورد تخصیص و یا عدم تخصیص قطعه r به تأمین‌کننده سطح دوم s
XPW_{fpw}^n	مقدار محصول نهایی f تهیه‌شده به وسیله کارخانه p برای مرکز پخش w تحت سناریوی n	تصمیم در مورد تخصیص و یا عدم تخصیص محصول نهایی f به کارخانه p
XWC_{fWC}^n	مقدار محصول نهایی f تهیه‌شده به وسیله مرکز پخش w برای مشتری c تحت سناریوی n	تصمیم در مورد تخصیص و یا عدم تخصیص محصول نهایی f به مرکز پخش w
YK_k	تصمیم در مورد انتخاب و یا عدم انتخاب تأمین‌کننده سطح یکم k	تصمیم در مورد تهیه و یا عدم تهیه ماده اولیه i برای تأمین‌کننده سطح دوم s توسط تأمین‌کننده سطح اول k
YS_s	تصمیم در مورد انتخاب و یا عدم انتخاب تأمین‌کننده سطح دوم s	تصمیم در مورد تهیه و یا عدم تهیه قطعه r برای کارخانه p



توسط تأمین‌کننده سطح دوم S تصمیم در مورد تهیه و یا عدم تهیه محصول نهایی f برای مرکز پخش w توسط کارخانه p	$Y_{pw_{fpw}}$	تصمیم در مورد انتخاب و یا عدم انتخاب کارخانه تولیدی p	Y_{P_p}
تصمیم در مورد تهیه و یا عدم تهیه محصول نهایی f برای مشتری c توسط مرکز پخش w	YWC_{fwc}	تصمیم در مورد انتخاب و یا عدم انتخاب مرکز توزیع w	Y_{W_w}
تعداد محصولات r حمل شده از مرکز توزیع b به مرکز بازیافت a	V_{bar}	اگر تقاضای مشتری c برای کالای f تحت سناریوی n ارضاء شود، در غیر این صورت ۰	T_{cf}^n
تعداد محصولات r حمل شده از مرکز توزیع b به مرکز دورریز e متغیر صفر و یک نشانگر باز بودن و یا بسته بودن مرکز تولیدی a	T_{ber}	سطح رضایت مشتریان	Y
متغیر صفر و یک نشانگر باز بودن و یا بسته بودن مرکز تولیدی a	W_a	تعداد محصولات r حمل شده از مرکز تولید a به مرکز توزیع b	X_{abr}
متغیر صفر و یک نشانگر باز بودن و یا بسته بودن مرکز توزیع b	Y_b	تعداد محصولات r حمل شده از مرکز توزیع b به مکان مشتری c	u_{bcr}

۳-۴- تابع هدف و محدودیت‌های مسئله موردنظر

$$\begin{aligned}
 \text{Minimize } & \sum_k CK_k \cdot YK_k + \sum_s CS_s \cdot YS_s + \sum_p CP_p \cdot YP_p + \sum_w CW_w \cdot YW_w \quad (1) \\
 & + \sum_i \sum_k CK_{ik} \cdot YK_{ik} + \sum_r \sum_s CS_{rs} \cdot YS_{rs} + \sum_f \sum_p CP_{fp} \cdot YP_{fp} + \\
 & \sum_f \sum_w CW_{fw} \cdot YW_{fw} + \sum_i \sum_s \sum_k CKS_{iks} \cdot YKS_{iks} \\
 & + \sum_r \sum_p \sum_s CSP_{rsp} \cdot YSP_{rsp} + \sum_f \sum_w \sum_p CPW_{fpw} \cdot YPW_{fpw} + \sum_f \sum_c \sum_w CWC_{fwc} \cdot \\
 & YWC_{fwc} \\
 & + \sum_{n \in N} P^n [\sum_i \sum_s \sum_k dks_{iks}^n \cdot XKS_{iks}^n + \sum_r \sum_p \sum_s dsp_{rsp}^n \cdot XSP_{rsp}^n \\
 & + \sum_f \sum_w \sum_p dpw_{fpw}^n \cdot XPW_{fpw}^n + \sum_f \sum_c \sum_w dwc_{fwc}^n \cdot XWC_{fwc}^n]
 \end{aligned}$$

$$\text{Maximize } y \quad (2)$$



$$\text{Min} \sum_{a,b,r} (ei_{abr}^{rd} + ei_{ar}^{rro})x_{abr} + \sum_{b,c,r} (ei_{bcr}^{dc} + ei_{br}^{an})u_{bcr} \quad (۳)$$

$$+ \sum_{a,b,r} (ei_{bar}^{ar} + ei_{ar}^{re})v_{bar} + \sum_{b,e,r} (ei_{ber}^{ad} + ei_{er}^{da})T_{ber}$$

$$\sum_k XKS_{iks}^n - \sum_r \sum_p a^{ir} \cdot XSP_{rsp}^n = 0 \quad \forall n,i,s \quad (۴)$$

$$\sum_s XSP_{rsp}^n - \sum_f \sum_w b^{rf} \cdot XPW_{fpw}^n = 0 \quad \forall n,r,p \quad (۵)$$

$$\sum_p XPW_{fpw}^n - \sum_c XWC_{fwc}^n = 0 \quad \forall n,f,w \quad (۶)$$

$$\sum_i \sum_s UK_{ik} \cdot XKS_{iks}^n \leq UK_k^n \cdot YK_k \quad \forall n,k \quad (۷)$$

$$\sum_r \sum_p US_{rs} \cdot XSP_{rsp}^n \leq US_s^n \cdot YS_s \quad \forall n,s \quad (۸)$$

$$\sum_f \sum_w UP_{fp} \cdot XPW_{fpw}^n \leq UP_p^n \cdot YP_p \quad \forall n,p \quad (۹)$$

$$\sum_f \sum_c UW_{fw} \cdot XWC_{fwc}^n \leq UW_w^n \cdot YW_w \quad \forall n,w \quad (۱۰)$$

$$\sum_s XKS_{iks}^n \leq qk_{ik}^n \cdot YK_{ik} \quad \forall n,i,k \quad (۱۱)$$

$$\sum_p XSP_{rsp}^n \leq qs_{rs}^n \cdot YS_{rs} \quad \forall n,r,s \quad (۱۲)$$

$$\sum_w XPW_{fpw}^n \leq qp_{fp}^n \cdot YP_{fp} \quad \forall n,f,p \quad (۱۳)$$

$$\sum_c XWC_{fwc}^n \leq qw_{fw}^n \cdot YW_{fw} \quad \forall n,f,w \quad (۱۴)$$

$$XKS_{iks}^n \leq HK_{ik} \cdot qks_{iks}^n \cdot YKS_{iks} \quad \forall n,i,k,s \quad (۱۵)$$

$$XSP_{rsp}^n \leq HS_{rs} \cdot qsp_{rsp}^n \cdot YSP_{rsp} \quad \forall n,r,s,p \quad (۱۶)$$

$$XPW_{fpw}^n \leq HP_{fp} \cdot qp_{fpw}^n \cdot Ypw_{fpw} \quad \forall n,f,p,w \quad (۱۷)$$

$$XWC_{fwc}^n \leq HW_{fw} \cdot qwc_{fwc}^n \cdot YWC_{fwc} \quad \forall n,f,w,c \quad (۱۸)$$

$$\sum_k (\sum_{n \in N} P^n \cdot UK_k^n) / UK_{ik} \cdot YK_{ik} \geq \quad \forall i \quad (۱۹)$$

$$\sum_r a^{ir} \cdot \sum_f b^{rf} \cdot \sum_c (\sum_n P^n \cdot D_{cf}^n) \quad \forall r \quad (۲۰)$$

$$\sum_s (\sum_{n \in N} P^n \cdot US_s^n) / US_{rs} \cdot YS_{rs} \geq \quad \forall r \quad (۲۱)$$

$$\sum_f b^{rf} \cdot \sum_c (\sum_{n \in N} P^n \cdot D_{cf}^n) \quad \forall f \quad (۲۲)$$

$$\sum_p (\sum_{n \in N} P^n \cdot UP_p^n) / UP_{fp} \cdot YP_{fp} \sum_c (\sum_{n \in N} P^n \cdot D_{cf}^n) \quad \forall f \quad (۲۳)$$

$$\sum_w (\sum_{n \in N} P^n \cdot UW_w^n) / UW_{fw} \cdot YW_{fw} \geq \sum_c (\sum_{n \in N} P^n \cdot D_{cf}^n) \quad \forall f \quad (۲۴)$$

$$\sum_w XWC_{fwc}^n - D_{cf}^n < M \cdot T_{cf}^n \quad \forall n,f,c \quad (۲۵)$$

$$\sum_w XWC_{fwc}^n - D_{cf}^n \geq M \cdot (T_{cf}^n - 1) \quad \forall n,f,c \quad (۲۶)$$

$$(\sum_f T_{cf}^n) / (\sum_f E_{cf}^n) \geq \gamma \quad \forall n,c \quad (۲۷)$$



$$\sum_a x_{abr} - \sum_{a,e} (v_{bar} + T_{ber}) = \sum_c u_{bcr} \quad \forall b \in J, r \quad (26)$$

$$\sum_c u_{bcr} - (1 - s1_r - s2_r) \sum_a x_{abr} = 0 \quad \forall b \in J, r \quad (27)$$

$$\sum_c T_{ber} - s1_r \sum_a x_{abr} = 0 \quad \forall b \in J, r \quad (28)$$

$$\sum_a v_{bar} - s2_r \sum_a x_{abr} = 0 \quad \forall b \in J, r \quad (29)$$

$$\sum_b v_{bar} - \sum_b x_{abr} \leq 0 \quad \forall a \in I, r \quad (30)$$

$$\sum_b u_{bcr} \geq d_{cr} \quad \forall c, r \quad (31)$$

$$XKS_{iks}^n, XSP_{rsp}^n, XPW_{fpw}^n, XWC_{fwc,y}^n \geq 0 \quad \forall \quad (32)$$

$$YK_k, YS_s, YP_p, YW_w, YK_{ik}, YS_{rs}, YP_{fp}, YW_{fw} \in \{0,1\} \quad \forall i,r,f,s,p,w,c,n$$

$$YKS_{iqks}, YSP_{rqsp}, YPW_{fqpw}, YWC_{fqwc}, T_{cfq}^n \in \{0,1\}$$

مدل پیشنهادی یک مدل چندهدفه است. هدف اول به حداقل رساندن هزینه‌های کل زنجیره تأمین (مثلاً هزینه‌های ثابت و متغیر) است. تابع هدف دوم سطح رضایت مشتریان (سطح خدمات) را با در نظر گرفتن سطح کیفیت به حداکثر می‌رساند. تابع هدف سوم تأثیرات زیست‌محیطی شبکه مانند تأثیرات خطرناکی که مراکز تولید، بازرسی و مراکز دورریز بر محیط‌زیست دارند و آلودگی که در نتیجه حمل‌ونقل بر طبیعت وارد می‌شود را به حداقل می‌رساند.

محدودیت‌های (۴) نشان می‌دهند که کل ماده خام i که به تأمین‌کننده s فرستاده می‌شود معادل کمیت کل مواد خامی است که تأمین‌کننده برای تولید قطعات نیاز دارد. محدودیت‌های (۵) تضمین می‌کنند که کل قطعه r که به تولیدکننده p فرستاده شده است، معادل کمیت کل قطعات است که تولیدکننده برای تولید محصولات نهایی به آن‌ها احتیاج دارد. محدودیت‌های (۶) تضمین می‌کنند که کل محصولاتی که به مرکز وارد می‌شوند در عوض از همان مرکز خارج می‌شود. محدودیت‌های (۷) تا (۱۰) نشان می‌دهند که مقدار منابع مورد استفاده در هر تأسیسات باید کمتر یا برابر با حداقل منابع موجود آن‌ها باشد. محدودیت‌های (۱۱) تا (۱۴) نشان می‌دهند که مواد خام مورد استفاده، قطعه یا محصولات نهایی می‌بایست کمتر یا برابر با کران بالایی آن محصول خاص باشد. محدودیت‌های (۱۵) تا (۱۸) نشان می‌دهند که واحدهای یک محصول در صورتی



برای تحویل از مبدأ تا مقصد ارائه خواهند شد که مبدأ انتخاب شود. محدودیت‌های (۱۹) تا (۲۲) تضمین می‌کنند که کل ظرفیت تأسیسات باز بیشتر یا برابر با کل تقاضا است. محدودیت‌های (۲۳) و (۲۴) به‌عنوان بازرسی برای برآورده ساختن تقاضا عمل می‌کنند. به‌عبارت‌دیگر در صورتی که تقاضا برآورده شود، سنسور T_{cfq}^n برابر با ۱ و در غیر این صورت برابر ۰ است. محدودیت‌های (۲۵) ایجاب می‌کنند که متوسط تعداد سنسورهایی که برابر با ۱ هستند، می‌بایست بیشتر از سطح رضایت باشد. محدودیت‌های (۲۶) الی (۲۹) معادلات تعادل بین سطوح مختلف زنجیره را نشان می‌دهد. محدودیت (۳۰) نشان می‌دهد که تعداد محصولات فرستاده‌شده از توزیع به بازیافت کوچک‌تر یا مساوی با تعداد محصولات فرستاده‌شده از تولید به توزیع می‌باشد. محدودیت (۳۱) تضمین می‌کنند که تمام تقاضاها برآورده شوند. محدودیت (۳۲) قلمرو متغیرها در مدل ریاضی را نشان می‌دهد.

۴- روش حل

در بخش قبلی، مدل ریاضی ارائه شد. به خاطر این واقعیت که مدل ریاضی پیشنهادی شامل متغیرهای باینری زیادی است، حل آن به‌خصوص در نمونه‌های بزرگ کار بسیار سختی است. برای حل این مسئله، الگوریتم ژنتیک می‌تواند روش مناسبی باشد. از این‌رو در این تحقیق، از یک NSGA II (الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نا مغلوب) برای حل مسئله‌های بزرگ، روش دقیق EC^V (محدودیت اپسیلون) به‌وسیله نرم‌افزار GAMS پیاده‌سازی می‌شود. در پایان، نتایج به‌دست‌آمده از هر دو روش ارائه و با هم مقایسه می‌شوند.

۴-۱- نحوه نمایش جواب برای NSGA II

برای ارائه یک جواب شدنی در NSGA II پیشنهادی، دو کروموزوم باینری با طول A و B (تعداد بیت‌ها) تعریف می‌شوند، درحالی‌که A و B به ترتیب تعداد مکان‌های بالقوه مراکز تولید / بازیافت و مراکز توزیع / بازرسی هستند. شکل ۲ کروموزوم‌های تعریف‌شده برای NSGA II را نشان می‌دهد.



a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_{A-1}	a_A
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-----	-----	-----	-----------	-------

b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_{B-1}	b_B
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-----	-----	-----	-----------	-------

شکل ۲. نحوه نمایش جواب برای NSGA II (قسمت اول)

در کروموزوم^۱ اول شکل ۲، در صورتی که یک مرکز تولید در مکان بالقوه a ایجاد شود، سلول مرتبه a (بیت) برابر با ۱ است، در غیر این صورت برابر با ۰ است. همچنین در کروموزوم دوم شکل ۲ در صورتی که مرکز توزیع در مکان بالقوه b ایجاد شود، سلول مرتبه b برابر با ۱ است و در غیر این صورت برابر با ۰ است.

در اینجا یک ماتریس باینری با ۱۲ ردیف برای نشان دادن راه حل به کار می رود. ردیف ۱ تا ۱۲ به ترتیب ارزش متغیرهای $YK_k, YW_{fw}, YP_{fp}, YS_{rs}, YK_{ik}, YW_w, YP_p, YS_s$ ، $YK_{iks}, YSP_{rsp}, Ypw_{fpw}, YWC_{fwc}$ هستند.

k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	...	...	...	k_{K-1}	k_K
s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8	...	...	...	s_{S-1}	s_S
p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	...	...	...	p_{P-1}	p_P
w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	w_8	...	...	...	w_{W-1}	w_W
i_1k_1	i_1k_2	...	i_1k_K	...	...	...	...	...	...	...	...	i_1k_K
r_1s_1	r_1s_2	...	r_1s_S	...	...	...	...	...	...	...	...	r_1s_S
f_1p_1	f_1p_2	...	f_1p_P	...	...	...	...	...	...	...	...	f_1p_P
f_1w_1	f_1w_2	...	f_1w_W	...	...	...	...	...	...	...	...	f_1w_W
$i_1k_1s_1$	$i_1k_1s_2$	$i_1k_1s_3$	$i_1k_1s_5$	...	...	...	...	...	...	...	$i_1k_1s_{S-1}$	$i_1k_1s_S$
$r_1s_1p_1$	$r_1s_1p_2$	$r_1s_1p_3$	$r_1s_1p_4$	...	...	...	...	...	...	...	$r_1s_1p_{P-1}$	$r_1s_1p_P$



					
$f_1 p_1 w_1$	$f_1 p_1 w_2$	$f_1 p_1 w_3$	$f_1 p_1 w_4$	\ddots	\dots	\ddots	\dots	\ddots	\ddots	$f_F p_P w_{W-1}$	$f_F q_Q p_P w_W$
$f_1 w_1 c_1$	$f_1 w_1 c_2$	$f_1 w_1 c_3$	$f_1 w_1 c_4$	\ddots	\dots	\ddots	\dots	\ddots	\ddots	$f_F w_W c_{C-1}$	$f_F w_W c_C$

شکل ۳. نحوه نمایش جواب برای NSGA II (قسمت دوم)

۲-۴- عملگر جهش^۱ و تقاطع^{۱۰}

برای تولید یک فرزند، از عملگر جهش و تقاطع استفاده می‌شود. در این تحقیق از یک عملگر تقاطع (ادغام) تک نقطه‌ای استفاده شده است. به طوری که یکی از این بیت‌ها به شکل تصادفی انتخاب می‌شود و کروموزوم‌ها به دو بخش (بخش یک قبل از بیت انتخاب شده، بخش ۲ از بیت انتخاب شده تا آخر) تقسیم می‌شوند. پس از آن، بخش‌های اول از کروموزوم اول با بخش دوم از کروموزوم دوم تغییر می‌کنند و نسل جدید تولید می‌شود.

همچنین، بخش دوم کروموزوم اول با بخش اول کروموزوم دوم برای دیگر فرزند جدید ترکیب می‌شود. با این وجود، از روش تک نقطه‌ای برای جهش استفاده می‌شود. برای انجام این کار، یکی از بیت‌ها به شکل تصادفی انتخاب می‌شود و ارزش بیت انتخاب شده معکوس می‌گردد. به عبارت دیگر، اگر مقدار آن برابر با ۱ باشد به ۰ تغییر می‌کند و بالعکس.

۳-۴- نتایج محاسباتی

برای ارزیابی مدل پیشنهادی و بررسی کارایی NSGA II، پنج نمونه با اندازه مختلف تولید می‌شود که در جدول ۱ نشان داده می‌شود. همچنین، جدول ۲ تابع توزیع و دامنه پارامتر مدل ریاضی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، نمونه‌های ۱ تا ۳ به عنوان مسئله‌های کوچک فرض می‌شوند، در حالی که نمونه‌های ۴ و ۵ به عنوان مسئله‌های بزرگ در نظر گرفته می‌شوند.



جدول ۱. مسائل نمونه

sample	K	I	S	R	C	D	P	F	W	N	A	B	E
۱	۱	۱	۲	۳	۳	۵	۲	۲	۳	۳	۲	۲	۲
۲	۲	۳	۲	۳	۵	۷	۲	۲	۴	۳	۲	۲	۲
۳	۳	۴	۵	۵	۸	۱۰	۳	۳	۶	۴	۳	۳	۳
۴	۵	۸	۹	۹	۱۵	۱۸	۵	۵	۸	۹	۴	۴	۴
۵	۸	۱۲	۱۲	۱۴	۲۰	۲۵	۶	۶	۱۰	۱۲	۵	۵	۵

ستون اول در جدول ۱ تعداد مسئله را نشان می‌دهد، ستون دوم تعداد تأمین‌کننده مواد خام (سطح اول)، ستون سوم تعداد مواد خام، ستون چهارم تعداد تأمین‌کنندگان قطعه (سطح دوم)، ستون پنجم تعداد تأمین‌کنندگان قطعه (سطح دوم)، ستون پنجم تعداد قطعات، ستون ششم تعداد مشتریان، ستون هفتم تعداد تقاضا، ستون هشتم تعداد تأسیسات تولیدکننده، ستون نهم تعداد محصولات نهایی، ستون دهم تعداد مراکز توزیع، ستون یازدهم تعداد مراکز توزیع، سطح یازدهم تعداد سناریو، سطح دوازدهم تعداد مکان‌های بالقوه برای مراکز توزیع / بازیافت، ستون سیزدهم تعداد مکان‌های بالقوه برای مراکز توزیع / بازرسی و ستون چهاردهم تعداد مراکز دورریز در هر نمونه را نشان می‌دهد.

علاوه بر این، پارامترهای موجود در جدول ۱ به شکل تصادفی و با استفاده از یک تابع توزیع یکنواخت ساخته می‌شوند. پس از تولید نمونه‌های تصادفی در اندازه‌های مختلف، نمونه‌ها در نرم‌افزار GAMS حل می‌شوند و نتایج ارائه می‌شوند. جدول ۲ نیز دامنه پارامترهای مسئله را نشان می‌دهد.

جدول ۲. دامنه پارامترها برای نمونه‌های مثال

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
a^{ir}	uniform(1,2)	qp_{fqp}^n	uniform(5,7)	CKS_{iqks}	uniform(20,26)	US_{rqs}	uniform(50,80)
b^{rf}	uniform(2,3)	qw_{fqw}^n	uniform(5,7)	CSP_{rqsp}	uniform(20,26)	UP_{fqp}	uniform(50,80)
D_{cfq}^n	uniform(4,8)	qks_{iqks}^n	uniform(5,7)	CPW_{fqpw}	uniform(20,26)	UW_{fqw}	uniform(50,80)
CK_k	uniform(20,26)	qsp_{rqsp}^n	uniform(5,7)	CWC_{fqwc}	uniform(20,26)	ei_r^{ro}	uniform(0,2,0,4)



پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
CS_s	uniform(20,26)	qpw_{fpw}^n	uniform(5,7)	dk_{sqks}^n	uniform(20,26)	ei_{abr}^{rd}	uniform(0,2,0,4)
CP_p	uniform(20,26)	qwc_{fqwc}^n	uniform(5,7)	dsp_{rqsp}^n	uniform(20,26)	ei_{bcr}^{dc}	uniform(0,2,0,4)
CW_w	uniform(20,26)	UK_k^n	uniform(50,80)	dpw_{fpw}^n	uniform(20,26)	ei_{bar}^{ar}	uniform(0,2,0,4)
CK_{iqk}	uniform(20,26)	US_s^n	uniform(50,80)	dwc_{fqwc}^n	uniform(20,26)	ei_{ber}^{ad}	uniform(0,2,0,4)
CS_{rqs}	uniform(20,26)	UP_p^n	uniform(50,80)	p^n	1/n	ei_{br}^{an}	uniform(0,2,0,4)
CP_{faq}	uniform(20,26)	UW_w^n	uniform(50,80)	qk_{iqk}^n	uniform(5,7)	ei_{ar}^{re}	uniform(0,2,0,4)
CW_{fqw}	uniform(20,26)	UK_{iqk}	uniform(50,80)	qs_{rqs}^n	uniform(5,7)	ei_{er}^{da}	uniform(0,2,0,4)

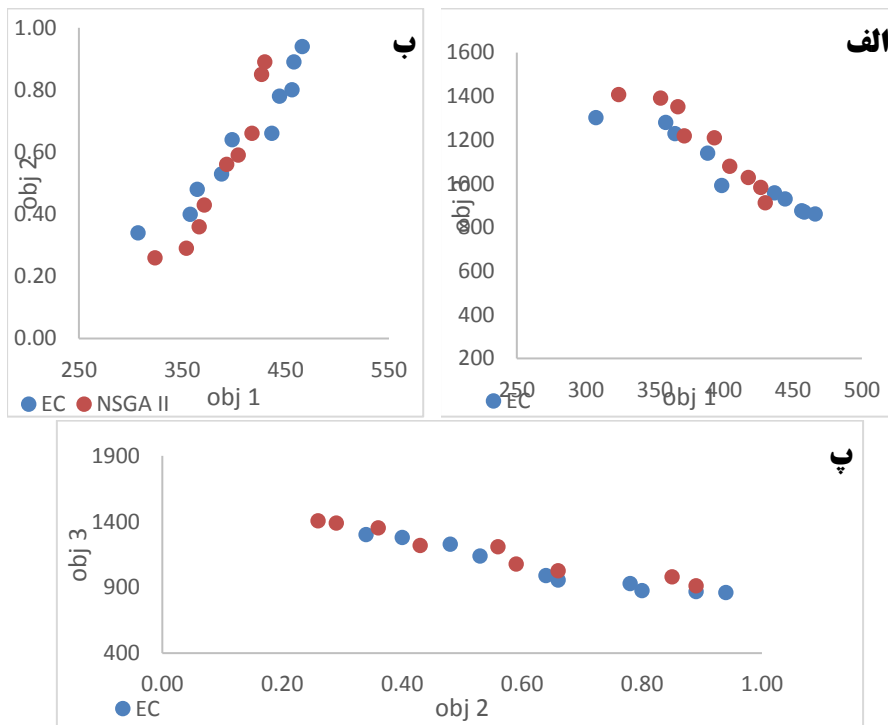
در EC، اولین تابع هدف به‌عنوان تابع هدف اصلی در نظر گرفته می‌شود و توابع هدف دیگر به‌عنوان محدودیت به کار می‌روند. ۱۰ نقطه انفعال برای مسئله در نظر گرفته می‌شود و بنابراین ۱۰ راه‌حل پارتو برای هر نمونه به دست می‌آید. برای مثال، نمونه ۳ به‌وسیله روش EC و سپس به‌وسیله NSGA II پیشنهادی حل می‌شود و راه‌حل‌های پارتو به‌دست‌آمده در شکل ۴، به تصویر کشیده می‌شوند.

شکل ۴ (الف) جبهه پارتو برای اهداف اول و دوم را نشان می‌دهد. با توجه به ماهیت تابع هدف اول (هزینه) و تابع هدف دوم (رضایت مشتری) را نشان می‌دهد، مشخص است که صرف هزینه بیشتر، رضایت بیشتری برای مشتریان به دنبال دارد. شکل ۴ (ب) رابطه هدف اول و سوم را بررسی می‌کنند. با توجه به شکل ۶، با افزایش هزینه، مقدار تأثیر مخرب بر روی محیط زیست کاهش می‌یابد که خود نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل پیشنهادی است. علاوه بر این در شکل ۴ (پ)، مشخص است که با کاهش تأثیرات مخرب زیست‌محیطی، سطح رضایت مشتری هم‌زمان افزایش می‌یابد.

از سوی دیگر، با توجه به شکل ۴، مسلماً جبهه پیشنهادی پارتو به‌وسیله NSGA II نزدیکی زیادی به جبهه پارتو مشتق از رویکرد EC دقیق دارد. اما برای اعتبار سنجی دقیق‌تر الگوریتم پیشنهادی و برای شناسایی نیروی NSGA II به‌منظور یافتن راه‌حل‌های مطلوب پارتو، از چند



شاخص استفاده می‌شود.



شکل ۴. مرزهای پارتو مسئله نمونه ۳

بنابراین، شاخص متوسط فاصله از نقطه ایده‌آل^{۱۱} (MID)، شاخص یکنواختی فضا^{۱۲} (SM)، و شاخص پراکندگی^{۱۳} (DM) محاسبه می‌شوند و با استفاده از جمع موزون ساده (SAW)، عملکرد NSGA II مورد بررسی قرار می‌گیرد. این ارزش‌ها برای جبهه پارتو دو الگوریتم موجود در پنج نمونه ارائه شده در جدول ۳ محاسبه می‌شوند.



جدول ۳. اعتبارسنجی NSGA II برای نمونه ۱

SAW	DM	SM	MID	شاخص / روش	نمونه
۱/۲۳	۱/۵۶	-/۹۵	۰/۹۳	E-constraint	نمونه ۱
۱/۰۹	۱/۲۲	-/۹۸	۰/۹۷	NSGA II	
۱/۳۷	۱/۶۲	-/۶۶	۰/۷۸	E-constraint	نمونه ۲
۱/۳۶	۱/۴۷	-/۷۳	۰/۸۱	NSGA II	
۱/۵۵	۲/۴۱	-/۷۴	۱/۱۴	E-constraint	نمونه ۳
۱/۴۳	۲/۲۱	-/۸۲	۱/۱۵	NSGA II	
-	-	-	-	E-constraint	نمونه ۴
۱/۳۹	۱/۴۶	-/۴۷	۱/۱۲	NSGA II	
-	-	-	-	E-constraint	نمونه ۵
۰/۹۱	-/۸۹	۱/۱۸	۱/۰۲	NSGA II	

با توجه به جدول ۳، عملکرد الگوریتم NSGA II بسیار نزدیک به روش محدودیت‌های افسیلون در ابعاد کوچک است (نمونه ۱ تا ۳). به عبارت دیگر می‌توان راه‌حل‌های نزدیک به بهینه در نبود روش دقیق یا ناکارآمدی آن‌ها ارائه کرد. برای مثال، پس از نمونه ۴، روش EC نمی‌تواند نمونه‌های موجود در محدوده زمانی ۳۶۰۰ ثانیه را حل کند. بنابراین طبق عملکرد مناسب NSGA II، از آن برای حل نمونه‌های سایز بزرگ استفاده شده است.

جدول ۸ مقادیر SM، MID و DM برای هر دو روش را نشان می‌دهد. این جدول همچنین بر کارایی بالای NSGA II تأکید می‌کند، همان‌طور که می‌توان مشاهده کرد، عملکرد آن نزدیکی زیادی به عملکرد EC در SAW^{۱۴} دارد. جدول ۴ زمان اجرا برای حل مسائل نمونه به‌وسیله هر دو روش را نشان می‌دهد.

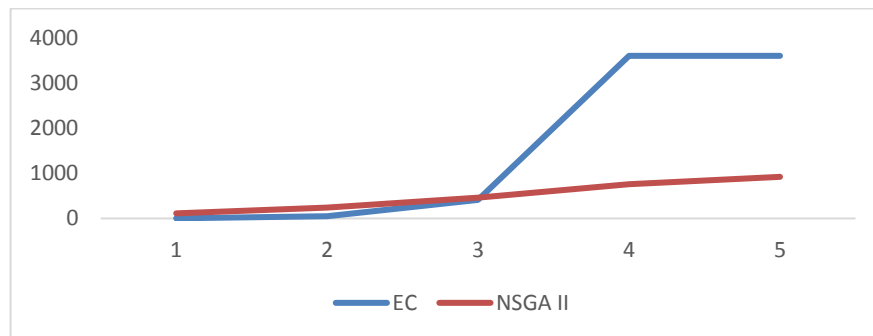
جدول ۴. زمان حل مسائل نمونه

نمونه / روش	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	نمونه ۵
E-constraint	۲/۶	۴۶/۲	۴۱۲/۸	۳۶۰۰	۳۶۰۰
NSGA II	۱۱۲/۴	۲۴۱/۲	۴۶۳/۷	۷۵۴/۹	۶۲۱/۵

با توجه به جدول ۴، با افزایش ابعاد مسئله، زمان دقیق راه‌حل تا حد معناداری افزایش یافته



است به طوری که پس از نمونه ۳، EC نمی‌تواند نمونه‌ها را در محدوده زمانی ۳۶۰۰ ثانیه حل کند. به این ترتیب، NSGA II می‌تواند نمونه‌های موجود را در زمان کوتاه‌تری حل کند. در نتیجه، NSGA II کارایی کمتری در زمان مناسب دارد. این مطلب را می‌توان در شکل ۵ دنبال کرد.



شکل ۵. زمان حل برای NSGA II و EC (ثانیه)

از همه این‌ها گذشته، به خاطر عملکرد بالای NSGA II پیشنهادی، نمونه‌های بزرگ این مطالعه به وسیله این الگوریتم حل می‌شوند.

۵- نتیجه‌گیری و مطالعات آتی

در این تحقیق، یک شبکه زنجیره تأمین چند سطحی مورد بررسی قرار گرفت که سطوح آن شامل: (۱) تأمین‌کننده سطح اول (مواد خام) (۲) تأمین‌کننده سطح دوم (قطعات) (۳) مرکز تولید/بازیافت، (۴) مرکز توزیع/بازرسی، (۵) مشتریان، و (۶) مرکز دورریز می‌باشد. بر این اساس، یک شبکه چند محصولی برای بازارهایی با تقاضای تصادفی طراحی می‌شود و احتمال هرج و مرج و اختلال تقاضا در مدل به وسیله سناریوسازی در نظر گرفته می‌شود. هدف این مدل تعیین ساختار مطلوب زنجیره تأمین به منظور حداقل رساندن هزینه‌های کل و تأثیرات زیست‌محیطی و به حداکثر رساندن رضایت مشتری با توجه به سطح کیفیت محصول است. علاوه بر این، به خاطر پیچیدگی مدل پیشنهادی و سختی‌های حل مسئله با روش‌های دقیق،



یک الگوریتم NSGA II طراحی شد. با توجه به نتایج، عملکرد الگوریتم NSGA II بسیار نزدیک به روش محدودیت‌های اپسیلون در ابعاد کوچک بوده و می‌توان با استفاده از روش NSGA II راه‌حل‌های نزدیک به بهینه ارائه کرد.

جهت پیشنهادات آتی، در نظرگیری قابلیت اطمینان تسهیلات جذابیت فراوانی به همراه خواهد داشت. همچنین، اجرای یک مطالعه موردی در صنعت خودروسازی، مسیریابی بین سطوح مختلف زنجیره و در نظر گرفتن چندین افق برنامه‌ریزی به جذابیت‌های مسئله خواهد افزود.

۶- پی‌نوشت‌ها

1. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
2. Fleischmann
3. Quariguasi Frota
4. Cardoso
5. Shi
6. Sheu
7. Epsilon Constraint
8. chromosome
9. mutation
10. crossover
11. Mean Ideal Distance
12. Space Metric
13. Diversity Metric
14. Sum Average Weighted

۷- منابع

- [1] Ghorbanpoor et al, "Importance assessment of green supply chain in Iran petroleum industry". *Modern Research in Decision-making* 2, (2017).
- [2] Khosravani et al, "Structuring the Strategy Development Problem using strategic negotiation approaches, reflecting concepts and drama theory". *Modern Research in Decision-making* 1:103-138, (2016).
- [3] Melo MT, Nickel S, Saldanha-da-Gama F., "Facility location and supply chain



- management- a review. *European Journal of Operational Research*, 196, 401-12. (2009).
- [4] Kannan, G., Sasikumar, P., Devika, K., "A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: a case of battery recycling". *Appl.Math.Model.*34,655e670.<https://doi.org/10.1016/j.apm.2009.06.021>. (2010).
- [5] Mishra, N., Kumar, V., Chan, F.T., "A multi-agent architecture for reverse logistics in a green supply chain". *Int. J. Prod. Res.* 50, 2396e2406. (2012).
- [6] Zhu, Q., & Sarkis, J. (2004). Relationships between operational practices and performance among early adopters of green supply chain management practices in Chinese manufacturing enterprises. *Journal of Operations Management*, 22(3), 265-289.
- [7] Fleischmann, M., Krikke, H. R., Dekker, R., & Flapper, S. D. P. (2000). A characterization of logistics networks for product recovery. *Omega*. 28(6), 653-666.
- [8] Quariguasi Frota Neto, J., Walther, G., Bloemhof, J. A. E. E., Van Nunen, J. A. E. E., & Spengler, T. (2010). From closed-loop to sustainable supply chains: the WEEE case. *International Journal of Production Research*, 48(15), 4463-4481.
- [9] Cardoso, S. R., Barbosa-Póvoa, A. P. F., & Relvas, S. (2013). Design and planning of supply chains with integration of reverse logistics activities under demand uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 226(3), 436-451.
- [10] Ramezani, M., Bashiri, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level. *Applied Mathematical Modelling*, 37(1), 328-344.
- [11] Zohal, M., & Soleimani, H. (2016). Developing an ant colony approach for green closed-loop supply chain network design: A case study in gold industry. *Journal of Cleaner Production*, 133, 314-337.



- [12] Zhalechian, M. & Tavakkoli-Moghaddam, R. & Zahiri, B. & Mohammadi, M., 2016. "Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Elsevier, vol. 89(C), pages 182-214.
- [13] Tavakoli Moghadam, R. Rekavandy Omid, M. Ghodrat Nema, A. (2013). Mathematical modeling to design integrated forward and reverse logistics network, *Management research in Iran*, 17.
- [14] Ramezani, Saeed. "Two-objective optimization model of costs and carbon dioxide in closed loop supply chain." *Management Research in Iran* 19.1 (2015): 169-189.
- [15] Pishvae, M.S., F. Jolai, and J. Razmi, A stochastic optimization model for integrated forward/reverse logistics network design. *Journal of Manufacturing Systems*, 2009. 28(4): p. 107-114.
- [16] Pishvae, M.S. and S.A. Torabi, A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Fuzzy sets and systems*, 2010. 161(20): p. 2668-2683.
- [17] Shi, J., et al., Coordinating production and recycling decisions with stochastic demand and return. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 2010. 19(4): p. 385-407.
- [18] Vahdani, B., et al., Reliable design of a forward/reverse logistics network under uncertainty: a robust-M/M/c queuing model. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2012. 48(6): p. 1152-1168.
- [19] Amin, S.H. and G. Zhang, A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied Mathematical Modelling*, 2013. 37(6): p. 4165-4176.
- [20] Sheu, J.-B., Chou, Y.-H., Hu, C.-C., 2005. An integrated logistics operational model for green-supply chain management. *Transp. Res. E Logist. Transp. Rev.* 41^{٢٨٧},e313. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2004.07.001>.



- [21] Fazli-Khalaf, M., Mirzazadeh, A., Pishvae, M.S., 2017. A robust fuzzy stochastic programming model for the design of a reliable green closed-loop supply chain network. *Hum. Ecol. Risk Assess. Int. J.* 23, 2119e2149.
- [22] 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. *J. Clean. Prod.* 196, 1549e1565. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.034>.
- [23] Ghomi-Avili, M., Naeini, S.G.J., Tavakkoli-Moghaddam, R., Jabbarzadeh, A., 2018. A fuzzy pricing model for a green competitive closed-loop supply chain network design in the presence of disruptions. *J. Clean. Prod.* 188, 425e442. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.273>.
- [24] Jabbarzadeh, A., Houghton, M., Khosrojerdi, A., 2018. Closed-loop supply chain network design under disruption risks: a robust approach with real world application. *Comput. Ind. Eng.* 116, 178e191. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.12.020>.