

## ارائه یک مدل برنامه‌ریزی چند هدفه برای مسئله مکان‌یابی - موجودی - مسیریابی در یک شبکه زنجیره تامین چند سطحی با در نظر گرفتن حداکثر پوشش تقاضا

بهنام وحدانی،\* محمدحسین طاهروردی\*\*

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۱/۲۶ - تاریخ پذیرش: ۹۶/۶/۱۵

### چکیده

امروزه رقابت شدید در بازارهای جهانی شرکتها را وادار به طراحی و مدیریت بهتر زنجیره‌های تامین کرده است. از آنجا که نقش مهم سه عامل مکانیابی، مسیریابی و موجودی در ادامه حیات یک زنجیره تامین پوشیده نیست لذا یکپارچگی این سه عنصر یک زنجیره تامین کارا و موثر را بدست خواهند داد. در این پژوهش مساله طراحی شبکه زنجیره تامينی را مورد مطالعه قرار مي‌دهيم که شامل مسئله مسیریابی و موجودی مشکل از تخصیص جریان، مسیریابی وسایل نقلیه بین تسهیلات، مکانیابی مراکز توزیع و همچنین در نظر گرفتن حداکثر پوشش جهت پاسخ به تقاضای مشتریان می‌باشد. مدل ریاضی ارائه شده یک مدل برنامه‌ریزی غیر خطی عدد صحیح مختلط برای مساله مکانیابی-مسیریابی-موجودی در زنجیره تامین چهار سطحی با در نظر گرفتن اهداف متعارض چندگانه هزینه کل، زمان سفر و حداکثر پوشش می‌باشد. به منظور حل مدل ارائه شده از سه الگوریتم فراابتکاری NSGA-II، NPGA و MOPSO استفاده شده است. که صحت مدل ریاضی و الگوریتم‌های ارائه شده از طریق مثال عددی ارزیابی می‌شود.

**واژگان کلیدی:** مکانیابی، مسیریابی، زنجیره تامین، موجودی، الگوریتم فراابتکاری.

\* استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، گروه صنایع، قزوین

(نویسنده مسئول) b.vahdani@gmail.com

\*\* دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، گروه صنایع،

قزوین

## مقدمه

امروزه با جهانی شدن بازارها و افزایش رقابت، سعی شرکت‌ها برای بقا در این بازارها افزایش یافته و سبب پیدایش فلسفه‌ی مدیریت زنجیره‌ی تامین شده است. در سال‌های اخیر محققین توجه زیادی به مباحث مرتبط با زنجیره‌ی تامین نموده‌اند. یکی از مهم‌ترین مباحث مرتبط با زنجیره‌ی تامین ایجاد مکانیزم‌ها جهت هماهنگ کردن فعالیت‌های اعضای مختلف در زنجیره است. طراحی زنجیره‌ی تامین فیزیکی از مهمترین مباحث موجود در مدیریت زنجیره‌ی تامین است که شامل مدل‌های مختلف در زنجیره می‌باشد. از مدل‌های موجود در طراحی زنجیره‌ی تامین مدل‌های موجودی-مکان‌یابی، مسیریابی-مکان‌یابی در زنجیره‌ی تامین با سطوح مختلف می‌باشد. حرکت کارا و مؤثر کالا از سایت‌های تهیه مواد خام به کارخانه‌های تولید کالا و از آنجا به مراکز توزیع و سپس خرده‌فروشان و در نهایت مصرف‌کننده نهایی در محیط رقابتی امروزه بسیار مهم و ضروری می‌باشد. به طوریکه امروزه، درصد هزینه‌های مربوط به حمل کالا تا رسیدن به مشتری نهایی، درصد قابل توجهی از هزینه‌ها را تشکیل می‌دهد.

مدیریت زنجیره‌ی تامین بر سیستم‌های اقتصادی آثار قابل ملاحظه‌ای دارد و منجر به افزایش کیفیت، افزایش سود و ایجاد موازنه بین سطوح زنجیره‌ی تامین می‌گردد. در زنجیره‌ی تامین، ابتدا مواد خام از تامین‌کنندگان به کارخانه‌ها منتقل شده در گام بعد محصولات تولید شده، از کارخانه به انبارها و مراکز توزیع ارسال می‌شوند و در نهایت به مشتریان منتقل می‌گردند. بر همین اساس اعضای اصلی هر زنجیره‌ی تامین عبارتند از: تامین‌کنندگان، تولیدکنندگان، مراکز توزیع، انبارها و مشتریان نهایی؛ تمام این اعضا به ترتیب از بالا دستی به پایین دستی در فرآیندها و فعالیت‌ها با یکدیگر در ارتباط‌اند. تصمیمات مکانیابی-تخصیص، مدیریت زنجیره‌ی تامین را در طراحی با انتخاب تسهیلات، انتخاب مکان‌های مناسب برای احداث تسهیلات، و انتخاب شبکه‌ی توزیع مناسب بین تسهیلات تامین‌کنندگان و توزیع‌کنندگان را فراهم می‌کند. مکانیابی-تخصیص به طور همزمان بر مکان‌یابی تسهیلات و مشخص کردن شبکه‌ی توزیع کالا تمرکز دارد. بدون شک تصمیمات ذکر شده از مباحث بسیار مهم در

زنجیره‌ی تأمین هستند که تأثیر فراوانی بر کاهش هزینه‌ها، کاهش زمان انتظار و ارائه‌ی خدمات بهتر به مشتریان را در یک زنجیره تأمین به دنبال دارند .

در این میان، ساختار و مدیریت ناوگان حمل و نقل از عوامل تأثیر گذار در بهینگی شبکه توزیع ایجاد شده است. به طوریکه تصمیم گیری در مورد تعداد و نوع وسایل نقلیه، مسیرهای هر کدام از وسایل نقلیه برای انتقال کالا و از سوی دیگر، تخصیص مشتریان به دپوهای راه اندازی شده، می تواند تصمیم گیری انتخاب دپوها را تحت تاثیر قرار دهد . همچنین موجودی، در طول زنجیره تأمین در قالب‌های گوناگون و به دلایل مختلف نگهداری می‌شود. در هر نقطه از فرآیند تولید، موجودی ممکن است در قالب مواد خام، کار در جریان ساخت و یا کالای نهایی باشد. بدیهی است هزینه‌ی نگهداری موجودی در سال، در هر وضعیتی باعث افزایش هزینه‌ها می‌گردد. با این وجود، نگهداری موجودی برای افزایش سطح خدمت رسانی به مشتری و کاهش هزینه‌های توزیع ضروری است. اما مدیریت این موجودی‌ها برای نگهداشتن حداقل موجودی، موجب کاهش کل هزینه‌ها می‌شود

در این راستا با توجه به ضرورت در نظر گرفتن مسئله مکانیابی-مسیریابی-موجودی به طور همزمان جهت پاسخ به تقاضای مشتریان، مسئله حداکثر پوشش تقاضا نیز می‌تواند بیان گردد که با توجه به مسائل برشمرده شده در این تحقیق یک مسئله زنجیره تأمین چهار سطحی متشکل از تأمین کنندگان، کارخانه‌ها، انبارها و مشتریان با اهداف متعارض چندگانه با در نظر گرفتن هزینه کل، حداکثر پوشش تقاضا و زمان رسیدن کالا به مشتریان ارائه می‌گردد. همچنین طراحی شبکه زنجیره تأمین شامل مسئله مسیریابی و موجودی متشکل از تخصیص جریان، مسیریابی وسایل نقلیه بین تسهیلات و مکانیابی مراکز توزیع (کارخانه‌ها و انبارها) می‌باشد که باید به طور همزمان حل شوند. همچنین در این تحقیق این امکان وجود دارد که تقاضای مشتریان توسط مراکز توزیع مختلف تأمین شود و چندین وسیله به هر مشتری خدمت ارائه دهد. مدل ارائه شده دارای ساختار برنامه ریزی ترکیبی عدد صحیح برای مسئله مورد نظر می‌باشد. این مسئله، مسئله مکانیابی-تخصیص و مسیریابی وسایل نقلیه را با مسئله موجودی ترکیب می‌کند و نشان داده می‌شود که در حوزه یکپارچه‌سازی تصمیمات مکانیابی-

مسیریابی و موجودی انسجام و در نظر گرفتن همزمان آنها به نحو قابل توجهی به بهبود عملکرد یک زنجیره تامین خواهد انجامید. که به منظور حل مدل ریاضی ارائه شده از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده می‌گردد.

ادامه مقاله به شرح زیر می‌باشد. بخش ۲ به بررسی مختصری از ادبیات زنجیره تامین پرداخته شده است. در بخش ۳ بیان مساله و مدل پیشنهادی ارائه شده است. روش حل پیشنهادی در بخش ۴ بیان شده است. در بخش ۵ به تنظیم پارامتر پرداخته می‌شود. مثالهای عددی و تحلیل نتایج محاسباتی جهت اعتبارسنجی مدل در بخش ۶ ارائه شده است. در نهایت در بخش ۷ نتیجه گیری و پیشنهادات آتی ارائه شده است.

### مرور ادبیات

سیمچی و همکاران در سال ۲۰۰۰ یک زنجیره‌ی تامین را بررسی کردند که شامل سازمان‌هایی است که فعالیت‌ها و فرآیندهای زنجیره‌ی تامین را به یکدیگر متصل می‌نماید. در حالت عمومی زنجیره‌ی تامین شامل تامین کنندگان، خدمت‌دهندگان لجستیکی، خرده‌فروشان و مصرف کنندگان نهایی است. سیاریف و همکاران در سال ۲۰۰۲ شبکه‌ی زنجیره‌ی تامینی شامل تامین کنندگان، کارخانجات و مراکز توزیع را مورد بررسی قرار داده‌اند. تصمیماتی که باید در این شبکه اتخاذ شوند شامل، راه‌اندازی کارخانه‌ها و مراکز توزیع میزان تولید حمل و نقل محصولات است. ماکسیم تعداد کارخانجات و مراکز توزیعی که می‌توانند باز باشند، ظرفیت کارخانجات مراکز توزیع و تامین کنندگان محدودیت دارد و تابع هدف بصورت مینیم کردن هزینه‌ها بیان می‌شود. برای حل این مدل از روش الگوریتم ژنتیک بر اساس مکانیابی-مسیریابی چند انباره تک محصولی برای گرفتن تصمیمات کنترل موجودی پیشنهاد دادند. آنها تقاضای تصادفی مشتری را در مسئله مکان‌یابی-مسیریابی در نظر گرفتند. مدل ارائه شده شامل هزینه‌های موجودی در مسئله مکان‌یابی-مسیریابی است. مشتریان بر مبنای افزایش سفارش و هزینه‌های موجودی خوشه‌بندی شده و سپس برای هر خوشه نزدیکترین مکان به هر

انبار به عنوان مرکز مکانیابی در نظر گرفته می شود. در نهایت مدل پیشنهادی از یک روش بهبوددهنده ابتکاری برای کاهش هزینه های سیستم که شامل هزینه های مکانیابی، حمل و نقل و موجودی است، به کار گرفته شده است.

تثو و شو (۲۰۰۴)، مسئله ی طراحی شبکه ی توزیع با در نظر گرفتن هزینه های حمل و نقل و تابع هزینه ی موجودی چند رده ای در افق برنامه ریزی نامحدود را بررسی کردند. آن ها موازنه ی بین هزینه ی موجودی، هزینه ی انتقال مستقیم و هزینه ی مکان یابی تسهیلات را در این سیستم در نظر گرفتند. آن ها مسئله ی مورد نظر خود را از طریق تکنیک های تولید ستونی حل کردند. کاراسکال و همکاران در سال ۲۰۰۴ به جای یک فاصله بحرانی یک محدوده فاصله برای پوشش جزئی در نظر گرفتند. آن ها این محدوده را به عنوان سطح پوشش جزئی معرفی کردند. سپس در مطالعه خود ثابت کردند که مدل سازی مسائل با در نظر گرفتن سطح پوشش جزئی کاراتر از در نظر گرفتن رویکرد کلاسیک پوشش حداکثری است. خصوصا برای مسائلی که در آن ها پوشش یافتن نقاط تقاضا به صورت نسبی امکان پذیر است. آن ها بهینه سازی مسائل لجستیک و هدف گیری نظامی را به عنوان یکی از کاربردهای رویکرد پوشش جزئی مطرح کردند. تابع پوشش جزئی که تابعی از فاصله نقاط تقاضا تا محل تسهیلات است توسط آنها معرفی شد. گائور و راویندران در سال ۲۰۰۶ یک مدل دو هدفه مکان یابی-موجودی که تابع هدف بیشینه سازی پاسخگویی به تقاضای مشتریان و تابع هدف دوم کمینه سازی هزینه کل از زنجیره بدون در نظر گرفتن هزینه نگهداری موجودی در سطح خرده فروشان را ارائه دادند. و از الگوریتم حل چند هدفه فراابتکاری NSGA II برای حل مدل بهره جستند. راجاگوپلن و همکاران (۲۰۰۶) یک مکانیابی پوشش چند دوره ای برای اعزام پویای آمبولانس ها ارائه دادند که به منظور بهبود عملکرد سیستم خدمات پزشکی اضطراری به ویژه برای پاسخ به تقاضا در زمان حوادث طراحی شده بود. هدف مدل تعیین حداقل تعداد آمبولانس ها و مکان های بهینه آن ها برحسب واحد زمانی معین بود. زیرا تقاضا برای آمبولانس ها ممکن است برحسب روزهای هفته یا حتی اوقات روز در نوسان باشد. با تعریف پوشش مورد نیاز، تقاضا با قابلیت اطمینان معین حداقل تعداد

آمبولانس‌ها تعیین می‌شود. لی و همکاران در سال ۲۰۰۸ هدف کمینه کردن هزینه‌های لجستیک همچون نگهداری موجودی جانشینی و حمل و نقل زنجیره‌ی تامین چهار سطحی شامل تولیدکننده، انبار، توزیع‌کننده و مشتری لحاظ کردند.

آلمیدر و همکاران در سال ۲۰۰۹ به بهینه‌سازی یک زنجیره‌ی تامین سه سطحی شامل تامین‌کنندگان، تولیدکنندگان و مشتری از طریق شبیه‌سازی پرداختند. آن‌ها هزینه‌های حمل و نقل، هزینه‌های موجودی، هزینه‌های تولید و کمبود را در نظر گرفتند. زاکاریادس و همکاران در سال ۲۰۰۹ مدلی را با هدف کمینه‌سازی هزینه کل نگهداری موجودی و حمل و نقل ارائه کرده‌اند. که از دو روش ابتکاری جست و جوی محلی جهت ترکیب دو جنبه موجودی و مسیریابی یعنی تعیین میزان مقادیر تحویل و مجموعه مسیرها استفاده شده است. همچنین جهت کاهش بیشتر در هزینه‌های حمل و نقل روش جست و جوی ممنوعه‌ای نیز به کار گرفته شده است. توکلی مقدم و همکاران (۲۰۱۰)، یک مسئله‌ی مکان‌یابی-مسیریابی چند انباره دو هدفه را مطرح کردند. به این صورت که آن‌ها در روش خود، حداقل کردن هزینه‌ی کل شامل، راه‌اندازی تسهیلات انبارهای ثابت و متغیر، هزینه‌ی تحویل متغیر و ماکزیمم کردن تقاضای برآورده شده کل به طور همزمان در نظر گرفتند. در این پژوهش یک مسئله‌ی مکانیابی-مسیریابی ظرفیت دار شده چندهدفه گسسته با دولایه (به عنوان مثال انبارها و مشتریان) و یک ناوگان خودرو ظرفیت دار شده و همگن با ظرفیت زمان و محدودیت‌های فاصله در نظر گرفته شده که هر مشتری، تقاضای مشخص و تسهیلات بالقوه (به عنوان مثال انبارها) یک ظرفیت مشخص دارد. هزینه‌ی مکانیابی هر انبار از قبل شناخته شده است. مدل مشخص می‌کند که انبارها باز می‌شوند و مسیرهای توزیع از انبارها به مشتریان شناسایی می‌شوند. کاروگلن و همکارانش در سال ۲۰۱۱، یک مسئله‌ی مکانیابی-مسیریابی با برداشت و تحویل به طور همزمان که حالتی کلی از مسئله‌ی مکانیابی-مسیریابی است را مطالعه کردند. و برای پیدا کردن مکان‌های انبار و طراحی مسیرهای وسیله نقلیه روشی ارائه دادند. به طوری که تقاضاهای برداشت تحویل هر مشتری باید با همان وسیله نقلیه انجام شود و هزینه‌ی کلی به حداقل برسد. لیائو و همکاران در سال ۲۰۱۱، یک رویکرد ارزیابی برای بهینه‌سازی مدل چند

هدفه شبکه توزیع مکان یابی - موجودی تحت مدیریت موجودی فروشنده در یک زنجیره تامین دو سطحی ارائه کردند. و برای حل مدل ارائه شده از الگوریتم NSGA II و الگوریتم ارزیابی ترکیبی استفاده شده است. یک مسئله مکان یابی - موجودی در یک زنجیره ی تامین سه سطحی توسط تانسرز و همکاران در سال ۲۰۱۲، مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها یک فرمول مستمر غیر خطی برای کمینه کردن هزینه‌های حمل و نقل ثابت و نگهداری پیشنهاد دادند و یک الگوریتم ابتکاری تکراری برای حل مدل توسعه دادند سرکار و ماجومدر در سال ۲۰۱۳، یک مدل مکان یابی تسهیلات سه سطحی ارائه دادند. در این زنجیره ظرفیت کارخانه‌ها و انبارها ثابت است و تقاضای هر خرده فروشی باید برآورده گردد. همچنین در اینجا به منظور برآورده ساختن تقاضاها از تامین کنندگان خارجی نیز استفاده شده است. مدل به صورت یک مسئله برنامه ریزی خطی صحیح ترکیبی است که کمینه کردن یک هزینه‌های زنجیره به عنوان هدف آن اتخاذ گردیده است .

گوریرو و همکاران در سال ۲۰۱۳، برای اولین بار الگوریتمی برای مسئله مکانیابی - مسیریابی - موجودی چند دوره با تقاضا قطعی معرفی کردند. آن‌ها مجموعه‌ای از انبارهای بالقوه و مجموعه ای از خرده فروشان را در نظر گرفتند و سپس چند تصمیم گیری به طور همزمان برای تخصیص خرده فروشان به انبارها گرفتند. غفاری نسب و همکاران در سال ۲۰۱۳، یک مسئله ی مکان یابی - مسیریابی ظرفیت دار دو هدفه ی احتمالی که زمان سفر احتمالی فرض می شود و ممکن است در مفاهیم علمی بسیاری در مدیریت لجستیک در زنجیره ی تأمین رخ دهد را معرفی کردند که هم ظرفیت انبار هم ظرفیت وسیله نقلیه محدود می شوند. با در نظر گرفتن مسئله مکانیابی پوشش، داوری و همکاران در سال ۲۰۱۳ یک مدل مکان یابی حداکثر پوشش را ارائه دادند. مدل ارائه شده با شعاع پوشش فازی در نظر گرفته شده است. سپس برای حل مدل از الگوریتم جستجوی حریصانه استفاده شد. برای کاربرد مسئله حداکثر پوشش در دنیای واقعی مقیاس بزرگ در سازمان هوایمایی مورد مطالعه قرار گرفته است. ژاو و ورتور در سال ۲۰۱۴، یک مدل دو هدفه برای مسئله مکانیابی - مسیریابی استفاده شده در نفت را ارائه دادند. در پژوهش مورد بررسی به طور همزمان به سوالاتی پاسخ داده می شود. سطح

ظرفیت مناسب برای مکان‌ها و مسیرهایی که باید در میان رده‌های مختلف از مکانیابی صورت بگیرد. مدل ارائه شده برای مسئله مسیریابی به طوری که برای به حداقل رساندن خطر محیط زیست و حداقل کردن کل هزینه می باشد ارائه شده است. یک نوع دیگر از مساله مکانیابی - مسیریابی از مکانی به مکان دیگر وجود دارد که در آن تقاضایی برای مشتریان در نظر گرفته شده است. علاوه بر اینکه مکان‌های توزیع باید مکانیابی شوند، مسیریابی وسایل نقلیه نیز برای برآورده شدن تقاضای مشتریان انجام می شود، هوانگ (۲۰۱۵) یک مسئله ظرفیت دار مکانیابی-مسیریابی در یک شبکه توزیع با مسیرهای چندگانه جمع کننده و توزیع کننده به گونه‌ای که تقاضای هر مشتری به صورت تصادفی در نظر گرفته شده است را ارائه داد. خدمات جمع آوری و توزیع به دو ناوگان وسایل نقلیه و دو مجموعه متفاوت مسیر نیاز دارد. فرآیند مورد استفاده در این پژوهش شامل سه مرحله انتخاب مکان، تخصیص مشتری و مسیریابی وسایل نقلیه می باشد. برای حل مسئله از الگوریتم جستجوی ممنوع استفاده شده است که نتایج حاصل از آن نشان‌دهنده کارآمدی و موثر بودن آن می باشد. بلانکرو و همکاران (۲۰۱۵) یک مدل بهینه‌سازی چند دوره‌ای برای مسئله مکانیابی حداکثر پوشش را ارائه دادند. آن‌ها یک مدل برنامه ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط را ارائه دادند و آن را با الگوریتم شاخه و کران حل کردند. این مسئله به منظور سیاست‌های ایمنی در مناطق شهری با در نظر گرفتن مسئله موقعیت بهینه‌ی دوربین‌های ایمنی تقاطع در یک شبکه ترافیک شهری برای به حداقل رساندن کنترل جاده‌ها و کاهش تعداد حوادث رانندگی مورد بررسی قرار گرفته شد. سپس مدل روی داده‌های واقعی در مورد تصادفات یکی از ایالات کشور ایتالیا مورد بررسی قرار گرفت. نجفی و همکاران (۲۰۱۵) یک مسئله موجودی - مکان‌یابی حلقه بسته پویا تحت خطر اختلال ارائه دادند. و کاربردی بودن مدل خود را از طریق یک مطالعه موردی واقعی در صنعت یخچال و فریزر نشان دادند. کومار و همکاران (۲۰۱۵) یک مدل ریاضی توسعه دادند که مسئله مسیریابی تولید آلودگی و تصمیم‌گیری موجودی را در نظر می گرفت. روش پیشنهادی آن‌ها براساس الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات خودآموز ترکیبی برای حل مدل ارائه شده بود



ویدوویک و همکاران (۲۰۱۶) یک فرمول ریاضی از لحاظ مسئله مسیریابی - مکان یابی دوسطحی، در رابطه با جمع آوری بازیافت غیرخطرناک با نرخ مجموعه وابسته به فاصله و پروفایل ارائه دادند. مدل ارائه شده توسط آنها به طور هم زمان نقاط تخصیص وابسته به مقادیر مجموعه بازیافت در فاصله بین کاربر نهایی و نقاط جمع آوری، محل نقاط تحکیم میانی (ایستگاه های انتقال) و مسیریابی مجموعه وسایل نقلیه را شناسایی می کند. برای حل مشکلات ذکر شده آنها مدل ابتکاری (روش اکتشافی) را برای بدست آوردن راه حل های مناسب در زمان معقول توسعه دادند. کایا و یورک در سال ۲۰۱۶ یک CLSC ارائه دادند که مکان یابی، انبارداری و قیمت گذاری تصمیمات کلی نگر در مدل MINLP را مورد خطاب قرار می داد. آنها سه الگوریتم فراابتکاری ترکیبی برای حل مدل ارائه شده توسعه دادند. ژاله چیان و همکاران (۲۰۱۶) اثرات اقتصادی، محیطی و تاثیر اجتماعی را در نظر گرفتند. آنها یک مدل حلقه بسته مکان یابی - مسیریابی - موجودی پایدار جدید تحت عدم قطعیت ترکیبی ارائه دادند. آنها در مقاله خود اثرات زیست محیطی تاثیر انتشار گاز CO<sub>2</sub>، گازهای گلخانه ای، مصرف سوخت، اثرات اجتماعی فرصت های شغلی ایجاد شده و توسعه اقتصادی را در نظر گرفتند. و در مدل آنها ماهیت نامشخص شبکه با استفاده از رویکرد برنامه ریزی تصادفی - احتمالی به کار برده شده است. علاوه بر این برای مشکلات با مقیاس بزرگ، یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی و کران پایین، توسعه یافته و مورد بحث قرار گرفته اند.

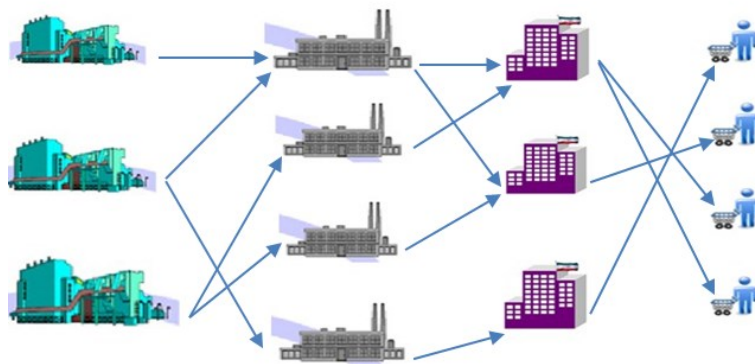
مدل پیشنهادی در این پژوهش دارای مشخصه های هماهنگی می باشد که به ندرت در متون گذشته در نظر گرفته شده اند در حالیکه در عمل کلی تر و کارا تر هستند. در این مطالعه یک مدل مکانیابی - موجودی - مسیریابی در شبکه زنجیره تامین در نظر گرفته شده است که دارای سطوح مختلفی می باشد. سطوح مربوط به مکان های کارخانه و انبار در این مدل مکانیابی شده است که در پژوهش های گذشته کمتر از مکانیابی چند سطوح استفاده شده است. به منظور جلوگیری از کمبود برای پاسخ گویی به تقاضا، مفهوم موجودی در نظر گرفته شده است. در این مدل موجودی کارخانه ها و انبارها مدنظر قرار گرفته شده و هزینه های نگهداری موجودی

آن‌ها به منظور کنترل هزینه‌های سیستم لحاظ شده است. در مدل ارائه شده بین کلیه سطوح زنجیره تامین جریان حمل و نقل به صورت همگن در نظر گرفته شده است. همچنین با استفاده از مفهوم مسئله پوشش برای پاسخ‌گویی به مشتریانی که در مکان مناسب از مراکز که مکانیابی شده‌اند مدل سازی انجام گرفته شده است. از آنجایی که پاسخ‌گویی باید در زمان مناسب صورت پذیرد، مسئله زمان نیز در مدل پیشنهادی در نظر گرفته شده است. در نهایت مدلی چند هدفه برای زنجیره‌تامین جهت مکانیابی مراکز توزیع (کارخانه‌ها و انبارها) و همچنین طراحی مسیرهای حمل و نقل وسایل نقلیه با در نظر گرفتن موجودی در هر یک از مکان‌های بازگشایی شده و همچنین استفاده از مسئله پوشش با توجه به زمان رسیدن خدمت به مشتریان، ارائه می‌گردد که اهداف آن شامل کمینه‌سازی هزینه کل سیستم، بیشینه‌سازی زمان تحویل کالا به مشتریان و بیشینه سازی حداکثر پوشش تقاضا مشتریان می‌باشد که جهت حل مدل با توجه به NP-hard بودن مسئله از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده می‌شود.

### بیان مسئله و مدل ریاضی

در این تحقیق یک شبکه زنجیره تامین چهارسطحی در نظر گرفته شده است که شامل چند تامین کننده، چند کارخانه، چندین انبار و مناطق مشتری می‌باشد. طراحی شبکه زنجیره تامین شامل مسیریابی و موجودی متشکل از تخصیص جریان، مسیریابی وسایل نقلیه بین تسهیلات و مکانیابی مراکز توزیع (کارخانه‌ها، انبار) می‌باشد که باید به طور همزمان حل شوند. ساختار شبکه در شکل ۱ به تصویر کشیده شده است. مدل ارائه شده دارای ساختار برنامه ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط برای مساله مکانیابی - مسیریابی - موجودی با اهداف متعارض چندگانه می‌باشد. اهداف مدل شامل حداقل کردن هزینه کل، حداقل کردن ماکزیمم زمان سفر وسایل نقلیه و حداکثر سازی سطح پوشش تقاضا می‌باشد. فرآیند هدایت توزیع کالا در شبکه مذکور به این صورت می‌باشد که ابتدا زیر مجموعه ای از مکانها برای ایجاد کارخانه‌ها و انبارها تعیین می‌شوند، بعد از مکانیابی کارخانه و انبار، هر وسیله نقلیه تخصیص داده شده به هر تامین کننده محصولات را ابتدا به کارخانه و سپس به انبار ایجاد شده منتقل می‌کند و در

نهایت با استفاده از مفهوم مساله پوشش جزئی، مناطق مشتری به انبارها تخصیص داده می‌شوند به گونه ای که تقاضای آنها برآورده شود و هیچگونه کمبودی ایجاد نشود. در واقع موجودی هر انبار متناسب با تقاضای مشتریانی است که به آنها تخصیص داده شده است. از طرفی جهت نگهداری کالا در کارخانه و انبار، هزینه‌های نگهداری و موجودی در این مراکز در نظر گرفته شده است. همچنین در این تحقیق هر تامین کننده به بیشتر از یک کارخانه جریان دارد که این فرض برای سطوح مختلف شبکه برقرار می‌باشد و تقاضای هر مشتری می‌تواند توسط مراکز توزیع و وسایل نقلیه مختلف تامین شود.



شکل ۱. ساختار شبکه زنجیره تامین چهار سطحی

مجموعه‌ها

$h \in H$  : مجموعه تامین کننده‌ها

$i \in I$  : مجموعه کارخانه

$e \in E$  : مجموعه انبار

$j \in J$  : مجموعه مشتری

$k \in K$  : مجموعه وسایل نقلیه

## پارامترها

$f_i$ : هزینه ثابت راه اندازی کارخانه  $i$  ام

$fe$ : هزینه ثابت راه اندازی انبار  $e$  ام

$cv_k$ : هزینه وسایل نقلیه  $k$  ام

$ch_i$ : هزینه نگهداری موجودی در کارخانه  $i$  ام

$ch_e$ : هزینه نگهداری موجودی در انبار  $e$  ام

$d_j$ : تقاضای مشتری  $j$  ام

$w_h$ : ظرفیت تامین کننده  $h$  ام

$tp_{hik}$ : زمان حمل و نقل محصول از تامین کننده  $h$  به کارخانه  $i$  ام توسط وسیله نقلیه  $k$

$tw_{iek}$ : زمان حمل و نقل محصول از کارخانه  $i$  ام به انبار  $e$  ام توسط وسیله نقلیه  $k$

$tz_{ejk}$ : زمان حمل و نقل محصول از انبار  $e$  ام به مشتری  $j$  توسط وسیله نقلیه  $k$

## متغیرهای تصمیم

$y_i$ : مقدار یک اگر کارخانه  $i$  بازگشایی شود؛ صفر در غیر اینصورت

$x_e$ : مقدار یک اگر انبار  $e$  بازگشایی شود؛ صفر در غیر اینصورت

$z_{hik}$ : مقدار یک اگر تامین کننده  $h$  به کارخانه  $i$  توسط وسیله نقلیه  $k$  ارتباط داشته باشد؛

صفر در غیر اینصورت

$Q_{iek}$ : مقدار یک اگر کارخانه  $i$  به انبار  $e$  توسط وسیله نقلیه  $k$  ارتباط داشته باشد؛ صفر در غیراینصورت

$R_{ejk}$ : مقدار یک اگر انبار  $e$  به مشتری  $j$  توسط وسیله نقلیه  $k$  ارتباط داشته باشد؛ صفر در غیراینصورت

$g_{hi}$ : مقدار یک اگر تامین کننده  $h$  به کارخانه  $i$  تخصیص پیدا کند؛ در غیر اینصورت صفر

$l_{hk}$ : مقدار یک اگر وسیله نقلیه  $k$  به تامین کننده  $h$  تخصیص پیدا کند؛ صفر در غیراینصورت

$O_{ik}$ : مقدار یک اگر وسیله نقلیه  $k$  به کارخانه  $i$  تخصیص پیدا کند؛ صفر در غیراینصورت

$P_{ie}$ : مقدار یک اگر کارخانه  $i$  به انبار  $e$  ارتباط داشته باشد؛ صفر در غیراینصورت

$M_{ek}$ : مقدار یک اگر وسیله نقلیه  $k$  به انبار  $e$  تخصیص پیدا کند؛ صفر در غیراینصورت

$N_{ej}$ : مقدار یک اگر انبار  $e$  به مشتری  $j$  ارتباط داشته باشد؛ صفر در غیراینصورت

$Inv_i$ : مقدار موجودی در کارخانه  $i$  ام

$Inv_e$ : مقدار موجودی در انبار  $e$  ام

$uv_{hk}, uv_{ik}, uv_{ek}, uv_{jk}$ : متغیرهای کمکی جریان

## مدل ریاضی

در مدل ریاضی ارائه شده سه تابع هدف وجود دارد. رابطه (۱) نشان دهنده تابع هدف اول به منظور مینیمم کردن هزینه‌ها شامل: هزینه مکانیابی کارخانه و انبار، هزینه مسیریابی وسیله نقلیه بین تامین کننده - کارخانه و انبار - مشتری، و همچنین هزینه نگهداری موجودی در کارخانه و انبار است. تابع هدف دوم مینیمم کردن ماکزیمم زمان رسیدن کالا از تامین کننده به کارخانه، کارخانه به انبار و انبار به مشتری را در رابطه (۲) نشان می‌دهد. رابطه (۳) نشان دهنده تابع هدف سوم برای ماکزیمم پوشش مشتریان است.

$$\min f_1(x) = \sum_i f_i y_i + \sum_e f_e x_e + \sum_h \sum_i \sum_k c v_k z_{hik} + \sum_i \sum_e \sum_k c v_k Q_{iek} + \sum_e \sum_j \sum_k c v_k R_{ejk} + \sum_h \sum_i \sum_k Inv_i z_{hik} \cdot ch_i + \sum_i \sum_e \sum_k Inv_e Q_{iek} \cdot ch_e \quad (1)$$

$$\min f_2 = \max \left( \sum_h \sum_i t p_{hik} z_{hik} + \sum_i \sum_e t w_{iek} Q_{iek} + \sum_e \sum_j t z_{ejk} R_{ejk} \right) \quad (2)$$

$$\max f_3 = \sum_e \sum_j \sum_k R_{ejk} \cdot x_e \cdot d_j \quad (3)$$

با توجه به اینکه تابع هدف دوم به صورت غیرخطی می‌باشد طبق رابطه (۴) و (۵) آن را به مدل خطی تبدیل نموده که فرمول بندی آن به صورت زیر است:

$$(4) \quad \min f_2 = T$$

$$\forall k$$

$$\sum_h \sum_i t p_{hik} z_{hik} + \sum_i \sum_e t w_{iek} Q_{iek} + \sum_e \sum_j t z_{ejk} R_{ejk} \leq T \quad (5)$$

محدودیت‌های مدل ریاضی ارائه شده به صورت زیر فرمولبندی شده است.

- (۶)  $\forall i, h, k \quad z_{hik} \leq y_i$
- (۷)  $\forall k \quad \sum_h \sum_i z_{hik} \geq 1$
- (۸)  $\forall h \quad \sum_i \sum_k z_{hik} \geq 1$
- (۹)  $\forall i, h \quad \sum_k z_{hik} \leq 1$
- (۱۰)  $\forall i, e, k \quad Q_{iek} \leq x_e$
- (۱۱)  $\forall k \quad \sum_i \sum_e Q_{iek} \geq 1$
- (۱۲)  $\forall i, e, k \quad Q_{iek} \leq y_i$
- (۱۳)  $\forall k, i \quad \sum_h z_{hik} - \sum_e Q_{iek} = 0$
- (۱۴)  $\forall k \quad \sum_e \sum_j R_{ejk} \geq 1$
- (۱۵)  $\forall j \quad \sum_e \sum_k R_{ejk} \geq 1$
- (۱۶)  $\forall i, e \quad \sum_k Q_{iek} \leq 1$
- (۱۷)  $\forall k, e \quad \sum_i Q_{iek} - \sum_j R_{ejk} = 0$
- (۱۸)  $\forall i \quad Inv_i = \sum_h \sum_k w_h \cdot z_{hik}$
- (۱۹)  $\forall e \quad Inv_e = \sum_i \sum_k Inv_i \cdot Q_{iek}$

$$(20) \quad \forall e, j, k \quad Inv_e \geq d_j \cdot R_{ejk}$$

$$(21) \quad \forall e, j \quad \sum_k R_{ejk} \leq 1$$

$$(22) \quad \forall h, i, k \quad uv_{hk} - uv_{ik} + nz_{hik} \leq n - 1$$

$$(23) \quad \forall i, e, k \quad uv_{ik} - uv_{ek} + mQ_{iek} \leq m - 1$$

$$(24) \quad \forall e, j, k \quad uv_{ek} - uv_{jk} + pR_{ejk} \leq p - 1$$

محدودیت ۶، بیان می‌کند که، اگر کارخانه راه اندازی شده باشد، تامین کننده به کارخانه با وسیله نقلیه  $k$  تخصیص پیدا می‌کند. براساس محدودیت ۷، نشان می‌دهد که، به ازای هر وسیله نقلیه از تامین کننده به کارخانه حداقل یکبار جریان دارد. از سوی دیگر محدودیت ۸ نشان می‌دهد که، از تامین کننده به کارخانه با وسیله نقلیه  $k$  حداقل یک جریان وجود دارد. علاوه بر این مطابق، محدودیت ۹ بیان کننده این مسئله است که، به ازای کارخانه و تامین کننده، از هر تامین کننده با وسیله نقلیه  $k$  حداکثر یکبار جریان دارد. براساس محدودیت ۱۰ نشان می‌دهد که، اگر انبار  $e$  راه اندازی شده باشد، از کارخانه به انبار با وسیله نقلیه  $k$  تخصیص پیدا می‌کند. و محدودیت ۱۱ نیز بیان می‌کند که، به ازای هر وسیله نقلیه از کارخانه به انبار حداقل یکبار جریان وجود دارد. علاوه بر این محدودیت ۱۲ نشان می‌دهد که، از کارخانه به انبار با وسیله نقلیه  $k$  جریان وجود دارد اگر فقط اگر کارخانه  $i$  راه اندازی شده باشد این محدودیت نشان داده شده است. براساس محدودیت ۱۳، محدودیت حفظ جریان بین تامین کننده و کارخانه، کارخانه و انبار با وسیله نقلیه  $k$  می‌باشد. و مطابق با در محدودیت ۱۴، به ازای هر وسیله نقلیه از انبار به مشتری حداقل یکبار جریان وجود دارد. و براساس محدودیت ۱۵، به ازای همه مشتریان، از انبار به مشتری با وسیله نقلیه  $k$  حداقل یکبار جریان دارد که این محدودیت نشان داده شده است. محدودیت ۱۶ نیز که، به ازای کارخانه و انبار بازگشایی شده، از کارخانه به انبار با وسیله نقلیه  $k$  حداکثر یک جریان وجود دارد. براساس



محدودیت ۱۷ نیز نشان می دهد که حفظ جریان با وسیله نقلیه  $k$  بین کارخانه و انبار، انبار و مشتری می باشد. از سوی دیگر مطابق با محدودیت ۱۸ نشان دهنده میزان موجودی کارخانهی بازگشایی شده و محدودیت ۱۹ نشان دهنده میزان موجودی انبار بازگشایی شده است. محدودیت ۲۰ نیز از بروز کمبود جلوگیری می کند. که در محدودیت ۲۱، به ازای انبار و مشتری، از انبار به مشتری با وسیله نقلیه  $k$  حداکثر یکبار جریان وجود دارد. و در نهایت محدودیت های ۲۲، ۲۳ و ۲۴ محدودیت حذف زیر تور در زنجیره می باشد که به ترتیب در فرمول های ۲۲، ۲۳ و ۲۴ نشان داده شده اند.

### روش های حل مبتنی بر الگوریتم های فراابتکاری

از آنجائیکه در مسائل تک هدفه، فقط یک تابع هدف وجود دارد، بررسی و مقایسه جواب ها کار آسانی است و بهترین جواب در آن، جوابی است که با توجه به نوع تابع هدف (Max یا Min)، بیشترین یا کمترین مقدار تابع هدف را ایجاد کند. ولی در مسائل چند هدفه بدلیل وجود اهداف چندگانه، مقایسه جواب ها به راحتی صورت نمی گیرد چرا که ممکن است یک جواب بهترین مقدار را برای تابع هدف اول ایجاد کند ولی مقدار مناسبی برای سایر اهداف ایجاد نکند، به همین دلیل در تصمیم گیری برای رد یا قبول آن جواب با روش های قدیمی دچار مشکل می شویم. به همین منظور در این تحقیق برای حل مدل ریاضی چند هدفه از روش حل الگوریتم های فراابتکاری NSGA II، NPGA و MOPSO استفاده نموده ایم.

### الگوریتم فراابتکاری چند هدفه ی مرتب سازی نامغلوب (NSGA II)

دب ۲ و همکارانش در سال ۲۰۰۰ الگوریتمی را با عنوان NSGA برای حل مسائل بهینه یابی چند هدفه ارائه دادند. در الگوریتم ارائه شده جواب ها براساس اینکه چند جواب بهتر از آن ها وجود داشته باشد رتبه بندی و مرتب می شوند و جوابی که هیچ جواب دیگری به طور قطع بهتر از آن نباشد از امتیاز بیشتری برخوردار است. همچنین میزان شایستگی و برازندگی

1. algorithms of Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II
2. Deb

اختصاص داده شده به هر جواب براساس رتبه‌ی آن جواب و عدم غلبه‌ی سایر جواب‌ها صورت می‌گیرد. از آنجایی که پراکندگی جواب‌ها به نحو مطلوب‌تری تنظیم شود و آن‌ها به طور یکنواخت در فضای جستجو توزیع شوند از ویژگی‌های فاصله‌ی تراکمی استفاده شده است. در هر تکرار الگوریتم NSGA-II می‌بایست تعدادی از جواب‌های نسل بعنوان والد انتخاب شوند تا بتوان از طریق عملگرهای تقاطع و جهشی که روی آنها انجام می‌شود فرزندان تولید کرد. نحوه‌ی انتخاب والدین با استفاده از عملگر انتخاب دو-دویی صورت می‌گیرد. برای این کار ابتدا دو جواب به طور تصادفی از میان جمعیت انتخاب می‌شوند و هر کدام از این دو جواب که از دیگری بهتر باشد، نهایتاً به عنوان یک والد انتخاب می‌شود. معیار انتخاب جواب بهتر در الگوریتم NSGA-II در درجه‌ی اول، رتبه و در درجه‌ی دوم فاصله‌ی تراکمی مربوط به هر جواب است. به این صورت که ابتدا رتبه‌ی دو جواب با هم مقایسه می‌شود و هر کدام دارای رتبه‌ی کمتری بود انتخاب می‌شود ولی اگر رتبه‌ی هر دو جواب برابر بود آنگاه جوابی که فاصله‌ی تراکمی بیشتری دارد انتخاب می‌شود.

بعد از انتخاب دو والد توسط عملگر انتخاب دو-دویی، به روی آن‌ها عملگر تقاطع را انجام می‌دهیم تا دو فرزند جدید تولید شوند. این عمل تا زمانی که تعداد فرزندان تولید شده به اندازه‌ی آن که در نظر گرفته شده برسد تکرار می‌شود. در انتهای این قسمت مجموعه‌ی فرزندان تولید شده را داریم. بعد از آن نوبت به عملگر جهش می‌رسد تا تعدادی جمعیت جهش یافته تولید کنند. برای این منظور ابتدا توسط عملگر انتخاب دو-دویی یک عضو را جمعیت اصلی انتخاب شده و سپس به روی آن عملگر جهش را انجام می‌دهیم و این عمل نیز تا زمانی که تعداد جمعیت جهش یافته به اندازه‌ی آن پیش در نظر گرفته شده برسد ادامه پیدا می‌کند. در نهایت دو جمعیت جدید (جمعیت فرزندان و جمعیت جهش یافته)، تولید شده که می‌بایست آن‌ها را با جمعیت اصلی ادغام کرد، به دلیل اینکه بعد از ادغام جمعیت‌ها تعداد جمعیت جامعه بیشتر از جمعیت اصلی می‌شود می‌بایست از بین اعضای جامعه ادغام شده به اندازه‌ی تعداد جمعیت اصلی، اعضای را انتخاب و از سایر اعضا چشم‌پوشی کرد. طبیعی است که در این مرحله باید اعضای انتخاب شوند که دارای مطلوبیت بیشتری هستند. بر این اساس و با

استفاده از مفهوم غلبه و فاصله ازدحامی به انتخاب اعضایی با مطلوبیت بیشتر می‌پردازیم و این فرایند تا محقق شدن شرط توقف الگوریتم ادامه پیدا می‌کند. شکل ۲ شبه کد الگوریتم NSGA-II را برای مسئله ارائه شده را نشان می‌دهد.

شبه کد الگوریتم NSGA II	
۳-	برای هر $i = 1$ تا $M$ (اندازه جمعیت یعنی تعداد ذرات است)
الف-	$P[i]$ را به طور تصادفی تولید کنید.
ج-	$P[i]$ را ارزیابی کنید (مقادیر تابع هدف را برای آن محاسبه کنید).
۴-	$T=0$ قرار دهید.
۵-	جوابهای غیر پست پیدا شده در $P$ را در $A$ قرار دهید. ( $A$ آرشیو خارجی است)
۵-۱-	فاصله ازدحام و رتبه بندی را برای هر یک از جوابهای موجود در $P$ محاسبه کنید
۵-۲-	جوابهای موجود در $P$ را بر حسب فاصله ازدحام و رتبه هر جواب به صورت نزولی مرتب کنید.
۶-	مراحل زیر را تکرار کنید:
۶-۱-	بر اساس انتخاب تورنومنت والدین انتخاب می‌شوند
۶-۲-	انجام عملیات ترکیب و تولید فرزندان
۶-۳-	انجام عملیات جهش و تولید فرزندان
۶-۴-	محدودیت‌های مسئله بروی $P_{new}[i]$ چک می‌شوند و فرایند تعمیر بروی آن اعمال می‌شود.
۶-۵-	تابع هدف ارزیابی می‌شود.
۶-۶-	جواب‌های فرزندان و والدین ادغام شده و همه جواب‌های غیر مغلوب که در $P$ یافت شده اند را در $A$ قرار می‌دهیم.
۶-۷-	فاصله ازدحام و رتبه بندی را برای هر یک از جوابهای موجود در $P$ محاسبه کنید
۶-۸-	جوابهای موجود در $P$ را بر حسب فاصله ازدحام و رتبه هر جواب به صورت نزولی مرتب کنید.
۶-۹-	$M$ جواب خوب را جدا می‌کنیم و به عنوان والدین مرحله بعد قرار می‌دهیم
۷-	شماره تکرار را یکی زیاد می‌کنیم. $t=t+1$ و به مرحله ۴-۳ می‌رویم. این فرایند تا رسیدن به حداکثر تعداد تکرار ادامه می‌یابد.

شکل ۲. شبه کد الگوریتم NSGA-II

### الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NRGA)

الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NRGA) نیز یکی از الگوریتم‌های ژنتیک چند هدفه می‌باشد که بر اساس رتبه‌بندی نامغلوب به بهینه‌سازی مسائل چند هدفه می‌پردازد. استفاده از چرخ رولت در فرآیند انتخاب والد باعث شده این الگوریتم مشابه با NSGA-II است با این تفاوت که مکانیزم انتخاب کروموزوم در این الگوریتم چرخ رولت می‌باشد. منظور از انتخاب در الگوریتم ژنتیک، چگونگی انتخاب افراد با همان جواب‌ها در هر نسل برای تولید مثل و ایجاد جمعیت نسل بعد می‌باشد. هدف انتخاب در واقع تاکید بر افراد لایق تر در جمعیت است، به این امید که فرزندان آن‌ها برازندگی بیشتری داشته باشند. قدم‌های الگوریتم NRGA مشابه قدم‌های الگوریتم NSGA-II ارائه شده می‌باشد. مکانیزم انتخاب کروموزوم در الگوریتم NRGA بر اساس چرخ رولت است. شبه کد الگوریتم NRGA در شکل 3 نمایش داده شده است.

## شبه کد الگوریتم NPGA

- ۸- برای هر  $i = 1$  تا  $M$  (اندازه جمعیت یعنی تعداد ذرات است)
- الف-  $P[i]$  را به طور تصادفی تولید کنید.
- ج-  $P[i]$  را ارزیابی کنید (مقادیر تابع هدف را برای آن محاسبه کنید).
- ۹-  $T=0$  قرار دهید.
- ۱۰- جوابهای غیر پست پیدا شده در  $P$  را در  $A$  قرار دهید. ( $A$  آرشیو خارجی است)
- ۱-۱۰- فاصله ازدحام و رتبه بندی را برای هر یک از جوابهای موجود در  $P$  محاسبه کنید
- ۲-۱۰- جوابهای موجود در  $P$  را بر حسب فاصله ازدحام و رتبه هر جواب احتمال انتخاب جواب تعیین می گردد
- ۱۱- مراحل زیر را تکرار کنید:
- ۱-۱۱- براساس انتخاب چرخه رولت والدین انتخاب می شوند
- ۲-۱۱- انجام عملیات ترکیب و تولید فرزندان
- ۳-۱۱- انجام عملیات جهش و تولید فرزندان
- ۴-۱۱- محدودیت های مسئله بروی  $P_{new}[i]$  چک می شوند و فرایند تعمیر بروی آن اعمال می شود.
- ۵-۱۱- تابع هدف ارزیابی می شود.
- ۶-۱۱- جواب های فرزندان و والدین ادغام شده و همه جواب های غیر مغلوب که در  $P$  یافت شده اند را در  $A$  قرار می دهیم.
- ۷-۱۱- فاصله ازدحام و رتبه بندی را برای هر یک از جوابهای موجود در  $P$  محاسبه کنید
- ۸-۱۱- جوابهای موجود در  $P$  را بر حسب فاصله ازدحام و رتبه هر جواب به صورت نزولی مرتب کنید.
- ۹-۱۱-  $M$  جواب خوب را جدا می کنیم و به عنوان والدین مرحله بعد قرار می دهیم.
- ۱۰-۱۱- احتمال انتخاب هر جواب مشخص می شود.
- ۱۲- شماره تکرار را یکی زیاد می کنیم.  $t=t+1$  و به مرحله ۴-۳ می رویم. این فرایند تا رسیدن به حداکثر تعداد تکرار ادامه می یابد.

شکل ۳. شبه کد الگوریتم NPGA

### الگوریتم فراابتکاری چند هدفه تجمع ذرات (MOPSO)

برای مقایسه‌ی جواب‌های بدست آمده و همچنین کارا بودن الگوریتم بهینه‌سازی نامغلوب برای حل مسئله چندهدفه، این الگوریتم با الگوریتم فراابتکاری دیگر به نام تجمع ذرات چند هدفه مقایسه می‌شود که در این قسمت توضیحاتی در مورد الگوریتم فوق ارائه می‌گردد. Coello در سال ۲۰۰۲ الگوریتم MOPSO را برای مسائل چند هدفه ارائه داد. در این الگوریتم هر جواب مانند یک پرنده در فضای جستجو است که ذره نامیده می‌شود. هر ذره دارای بردار سرعتی است که جهت پرواز ذره را مشخص می‌کند. سرعت ذره در این الگوریتم از رابطه ۲۵ و ۲۶ محاسبه می‌گردد.  $v_{it}$  سرعت نام در تکرار  $t$ ، نشان‌دهنده فاصله و جهتی است که به وسیله ذره طی می‌شود و موقعیت ذره نام در تکرار نام است.  $p_i$  بهترین جوابی است که ذره در مسیر خود، به آن رسیده است ( $p\ best$ ) و  $p_g$  بهترین جواب جهانی در بین ذرات ( $g\ best$ ) است. همچنین  $c_1$  و  $c_2$  ثابت‌هایی هستند که شتاب ذره به سمت  $p_g$  و  $p_i$  را مشخص می‌کنند. همه ذرات نیز دارای مقادیر برازندگی هستند. به طور خلاصه ذرات در فضای جست و جو به دنبال بهترین نقطه پرواز می‌کنند. مهمترین بخش در بهینه‌یابی گروه ذرات چند هدفه MOPSO، تعیین بهترین ذره جهانی برای ذره  $i$  از بین بردن جمعیت است. در MOPSO مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه پارتو وجود دارند که هر ذره بایستی یکی از آن‌ها را به عنوان  $g\ best$  خود انتخاب کند که این فرآیند به تعیین بهترین راهنمای محلی موسوم است. شکل ۴ مراحل الگوریتم MOPSO را نشان می‌دهد.

$$v_{i,t} = w \times v_{i,t-1} + C_1 \times \text{Rand}(p_i - x_{i,t-1}) + C_2 \times \text{Rand}(p_g - x_{i,t-1}) \quad (25)$$

$$x_{i,t} = x_{i,t-1} + v_{i,t} \quad (26)$$

## شبه کد الگوریتم MOPSO

- ۱- برای هر  $i = 1$  تا  $M$  (اندازه جمعیت یعنی تعداد ذرات است)
- الف-  $P[i]$  را به طور تصادفی تولید کنید.
- ب-  $V[i]=0$  (سرعت هر ذره است)
- ج-  $P[i]$  را ارزیابی کنید (مقادیر تابع هدف را برای آن محاسبه کنید).
- ت-  $pbest[i]=P[i]$
- ث- بهترین ذره ای که در  $P[i]$  ها یافت شده را در  $gbest$  قرار بدهید.
- ۲-  $T=0$  قرار دهید.
- ۳- جوابهای غیر پست پیدا شده در  $P$  را در  $A$  قرار دهید. ( $A$  آرشیو خارجی است)
- ۴- مراحل زیر را تکرار کنید:
- ۴-۱- فاصله ازدحام را برای هر یک از جوابهای موجود در  $A$  محاسبه کنید
- ۴-۲- جوابهای موجود در  $A$  را بر حسب فاصله ازدحام به صورت نزولی مرتب کنید.
- ۴-۳- برای هر  $i=1$  تا  $M$ :
- ۴-۳-۱- به صورت تصادفی یکی از جوابهای بالای (مثلاً 10 درصد بالا) آرشیو را به عنوان بهینه انتخاب کنید.
- ۴-۳-۲- سرعت جدید را حساب کنید.
- ۴-۳-۳- موقعیت جدید  $P[i]$  را حساب کنید.
- ۴-۳-۴- محدودیت‌های مسئله بروی  $P[i]$  چک می‌شوند و فرایند تعمیر بروی آن اعمال می‌شود.
- ۴-۳-۵- تابع هدف ارزیابی می‌شود.
- ۴-۴- همه جواب‌های غیر مغلوب که در  $P$  یافت شده اند را در  $A$  قرار می‌دهیم.
- ۴-۵- جواب‌های غیر مغلوب در  $A$  را استخراج می‌کنیم.
- ۴-۶- فاصله ازدحام را برای هر یک از جوابهای موجود در  $A$  محاسبه کنید
- ۴-۶-۱- جوابهای موجود در  $A$  را بر حسب فاصله ازدحام به صورت نزولی مرتب کنید.
- ۴-۷- بهینه شخصی برای همه ذرات را بروز رسانی می‌کنیم
- ۴-۸- شماره تکرار را یکی زیاد می‌کنیم.  $t=t+1$  و به مرحله ۴-۳ می‌رویم. این فرایند تا رسیدن به حداکثر تعداد تکرار ادامه می‌یابد.

شکل 4. شبه کد الگوریتم MOPSO

### ساختار کروموزوم

به منظور نمایش کروموزوم مسئله ارائه شده از سه ماتریس جداگانه استفاده شده است که، ماتریس اول، به ابعاد تعداد تامین کننده در کارخانه‌های ایجاد شده می‌باشد و نشان می‌دهد که هر تامین کننده به کدام کارخانه راه اندازی شده، با کدام وسیله نقلیه ارسال می‌شود. ماتریس دوم، به ابعاد تعداد کارخانه در انبار می‌باشد و نشان می‌دهد هر کارخانه به کدام انبار با چه وسیله نقلیه‌ای تخصیص پیدا می‌کند. ماتریس سوم، نیز به ابعاد تعداد انبارهای راه اندازی شده در تعداد مشتریان است. نمایش ساختار کروموزوم در سه ماتریس به صورت جداگانه در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده است.

تامین کننده	2	0		7
	8	0		3
	0	4		0
	1	0		5
	0	6		0

$h = 5$   
 $i = 4$   
 $k = 8$   
 $h \times i$

#### کارخانه

شکل ۵. نحوه نمایش جواب ارتباط تامین کننده به کارخانه

کارخانه	0	2	1		8
	4	0	6		0
	5	7	0		3

$i = 4$   
 $e = 5$   
 $k = 8$   
 $i \times e$

#### انبار

شکل ۶. نحوه نمایش جواب ارتباط کارخانه به انبار



انبار	4	0	0	5	0	0
	0	0	7	0	0	2
	1	6	0	0	0	0
	0	0	0	8	3	0

$e = 5$   
 $j = 6$   
 $k = 8$

$e \times j$

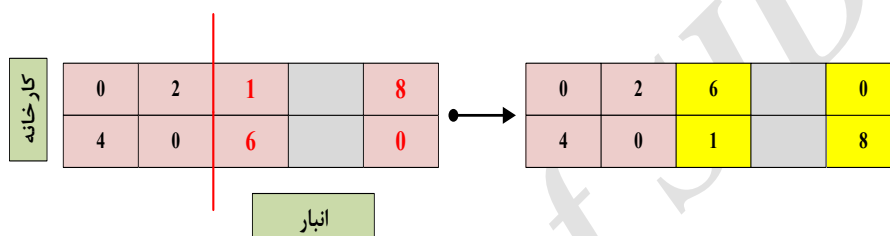
مشتری

شکل ۷. نحوه نمایش جواب ارتباط انبار به مشتری

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می شود، در ماتریس اول کارخانه سوم بازگشایی نشده است و از تامین کننده اول با وسیله نقلیه ۲ و ۷ به کارخانه های اول و سوم که بازگشایی شده اند حمل و نقل صورت گرفته است. به همین صورت برای بقیه تامین کننده ها حمل و نقل طبق ماتریس اول صورت گرفته شده است. در ماتریس دوم از پنج انبار کاندید، انبار شماره چهارم بازگشایی نشده است. این ماتریس ارتباط بین کارخانه های بازگشایی شده به انبارهای بازگشایی شده را با وسیله نقلیه نشان می دهد. در سطر اول این ماتریس از کارخانه اول به انبار دوم با وسیله نقلیه دوم ارتباط وجود دارد. همچنین از کارخانه اول با وسیله نقلیه ۱ به انبار شماره سوم و با وسیله نقلیه ۸ به انبار پنجم حمل و نقل صورت گرفته است. نمایش جواب این ماتریس در شکل ۶ نشان داده شده است. در نهایت ماتریس سوم که نشان دهنده ارتباط بین انبار و مشتریان است، حمل و نقل با وسیله نقلیه از انبار به مشتری را نشان می دهد که در شکل ۷ ارائه شده است. در این ماتریس انبار چهارم که در مرحله قبل بازگشایی نشده است هیچ حمل و نقلی ندارد. برای سطر اول ماتریس از انبار اول بازگشایی شده به مشتری اول و چهارم با وسیله نقلیه چهار و پنج حمل و نقل صورت گرفته است. همچنین برای بقیه انبارها نیز این روال تکرار و در شکل نشان داده شده است.

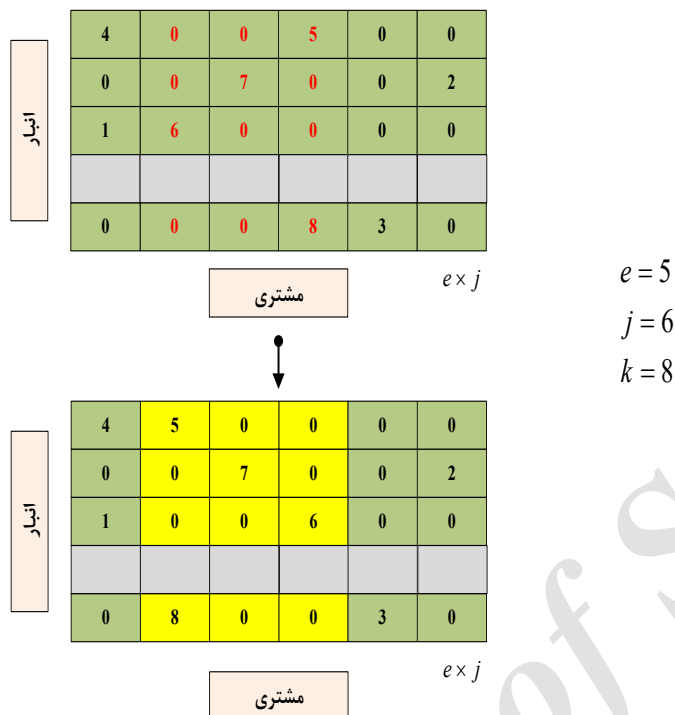
### عملگرها

عملگر تقاطع به کار گرفته شده است در این مدل، عملگر تقاطع تک نقطه‌ای است. در هر سه ماتریس ابتدا یک نقطه به تصادف روی هر دو والد انتخاب می‌شود. هر یک از دو والد از نقطه‌ی انتخاب شده از هم جدا می‌شوند. سپس با جابجایی ژن‌ها دو فرزند جدید ایجاد می‌شود. شکل ۸ عملگر تقاطع تک نقطه‌ای را بر روی ماتریس ارتباط کارخانه به انبار نشان می‌دهد.



شکل ۸. تقاطع تک نقطه‌ای

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود عملگر جهش برای هر سه ماتریس از نوع inversion است. به عنوان نمونه در ماتریس سوم یک انبار و مشتری به صورت تصادفی انتخاب شده و وسایل نقلیه آنها با یکدیگر جابجا می‌شوند.



شکل ۹. نمایش عملگر جهش

با توجه به استفاده از عملگرهای فوق برای شدنی بودن مسئله کارهای مختلفی انجام شده است. ابتدا بررسی می‌شود که کارخانه‌هایی که بازگشایی شده اند بیشتر از وسایل نقلیه ای که از تامین کننده محصول ارسال می‌کند، محصول دریافت نکنند. از طرفی هر تامین کننده باید حداقل به یک کارخانه وصل شده باشد. در واقع بررسی می‌شود که تمام تامین کنندگان حداقل به یک کارخانه تخصیص داده شده باشند. سپس چک می‌گردد که از تمام وسایل نقلیه بین تامین کننده و کارخانه استفاده شده باشد و در صورتی که از وسیله نقلیه استفاده نشده باشد به کارخانه ای که ظرفیت دارد و بتواند به یک تامین کننده وصل شود، وسیله نقلیه تخصیص داده می‌شود. در مرحله بعد ارتباط بین تامین کننده به کارخانه و همچنین کارخانه به

انبار بررسی می‌گردد. با توجه به اینکه کدام تامین کننده به کارخانه تخصیص داده شده، موجودی هر یک از کارخانه‌ها محاسبه می‌گردد و سپس کارخانه‌هایی که باز گشایی شده‌اند و موجودی دارند به انبارهایی که مکانیابی شده‌اند متصل شده‌باشند. هر کارخانه حداقل به یک انبار تخصیص داده می‌شود. علاوه بر تخصیص کارخانه به انبار بررسی می‌شود که وسیله نقلیه ای که به آن تخصیص داده شده است از ابتدا یکی باشد. به این منظور که از تامین کننده به کارخانه و از کارخانه به انبار با یک وسیله نقلیه جابجایی صورت گرفته شده باشد. در نهایت ارتباط کارخانه به انبار و انبار به مشتری با وسیله نقلیه بررسی می‌شود. در این مرحله در نظر گرفته می‌شود که از هر کارخانه به هر انبار چقدر محصول ارسال شده است و بعد از محاسبه مجموع آن در انبار بررسی می‌شود که مشتری به انبار تخصیص پیدا کرده باشد و آن محصول به مشتری‌ها با همان وسیله نقلیه ارسال شده باشد. در آخر نیز بررسی می‌شود که مجموع مقدار موجودی‌ها در انبار  $e$  ام از مقدار تقاضای مشتریانی که به آن انبار تخصیص داده شده بیشتر نباشد. با بررسی این موارد موجه بودن مسئله مدیریت و از غیرموجه بودن جواب جلوگیری می‌شود و در نهایت مقدار تابع هدف برای مسئله محاسبه می‌گردد.

### تنظیم پارامتر

عملکرد الگوریتم فراابتکاری تا حد زیادی به مقادیر پارامترهای ورودی آن‌ها وابسته است. به طوری که اگر پارامترهای یک الگوریتم کارآمد به طور صحیح تنظیم نگردد، باعث ناکارآمدی این الگوریتم خواهد شد. تکنیک‌های مختلفی مانند تکنیک طرح‌های چند عاملی طراحی آزمایش‌ها، رویه سطح پاسخ و طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی، برای تنظیم پارامتر الگوریتم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله، از روش تاگوچی به منظور تنظیم پارامتر الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی استفاده شده است.

انتخاب مناسب جدول تاگوچی امر مهمی می‌باشد. در روش تاگوچی با توجه به درجه‌ی آزادی الگوریتم، تعداد پارامترهای الگوریتم و سطوح در نظر گرفته شده برای آن‌ها، بر اساس جداول تاگوچی، یک طرح ترکیبی از سطوح مختلف پارامتر جهت آزمایش انتخاب می‌شود

که، با کمترین تعداد آزمایش ممکن، بهترین مقدار برای هر پارامتر تعیین می گردد. در تنظیم پارامتر تاگوچی تعداد اجراها باید بزرگتر مساوی از درجه آزادی باشد، که از رابطه ۲۷، به دست می آید:

$$((1 - \text{تعداد سطوح}) * \text{تعداد فاکتورها}) + 1 = \text{درجه آزادی}$$

(۲۷)

سطوح مختلف پارامترهای ورودی الگوریتم های NSGA-II، NPGA و MOPSO برای تنظیم پارامتر در جدول ۱، نشان داده شده است.

جدول ۱. سطوح پارامترهای الگوریتم های NSGA-II، NPGA و MOPSO

Algorithm	Parameter	Low(1)	Medium(2)	High(3)
NSGA-II	npop	30	50	70
	max-it	50	100	150
	pm	0.2	0.3	0.4
	pc	0.7	0.8	0.9
NPGA	npop	30	50	70
	max-it	50	100	150
	pm	0.2	0.3	0.4
	pc	0.7	0.8	0.9
MOPSO	npop	30	50	70
	max-it	100	150	200
	c1	1	1.5	2
	c2	1	1.5	2

آزمایشات با استفاده از آرایه های متعامد ( $L_9$ ) برای هر الگوریتم انجام شده است. از آنجایی که ۵ شاخص برای مقایسه جواب وجود دارد. این مقادیر در هر تکرار آزمایش در نظر گرفته می شوند. ابتدا مقادیر ۵ شاخص را برای هر آزمایش در نظر گرفته و سپس این مقادیر نرمالایز می شوند. این کار برای، ۵ بار اجرای هر الگوریتم در تست شماره سه مسائل آزمایشی طراحی شده تکرار می شود. نتیجه اعداد نرمالایز بدست آمده برای ۵ شاخص در یکبار اجرای الگوریتم های NSGA-II، NPGA و MOPSO در جدول ۲ تا ۴ ارائه شده است.

جدول ۲. ماتریس نرمال بدست آمده الگوریتم NSGA-II

nos	diversity	spacing	MID	time	sum 1
0.5	0.640397002	1	1	1	4.140397002
0.795454545	0.69384936	0.811533174	0.999999996	0.375910934	3.676748009
0.924242424	1	0.717051074	0.999999992	0.145963021	3.787256511
0.613636364	0.805218053	0.818511839	0.999999995	0.424274054	3.661640305
0.810606061	0.607857921	0.686078549	0.999999986	0.213953305	3.318495821
0.757575758	0.900434595	0.673526075	0.999999982	0.134630878	3.466167287
0.598484848	0.66060564	0.730165389	0.999999987	0.255727839	3.244983703
1	0.862924173	0.639195682	0.999999984	0.123147996	3.625267835
0.931818182	0.687111187	0.67853738	0.999999969	0.088415742	3.385882461

جدول ۳. ماتریس نرمال بدست آمده الگوریتم NRGA

nos	diversity	spacing	MID	time	sum 1
0.352	0.593229817	0.911911054	0.999999998	1	3.85714087
0.664	0.857154761	1	1	0.296083423	3.817238185
0.752	0.964394199	0.850213691	0.999999988	0.162312412	3.728920291
0.6	0.827140531	0.778527097	0.999999989	0.35563607	3.561303687
0.672	0.891859731	0.851955492	0.999999996	0.168181939	3.583997158
0.744	1	0.768453347	0.999999986	0.118827192	3.631280525
0.712	0.955911031	0.851903523	0.999999987	0.216899806	3.736714347
0.624	0.84355743	0.790026044	0.999999988	0.10844008	3.366023543
1	0.88280873	0.681974279	0.999999979	0.071037716	3.635820705

جدول ۴. ماتریس نرمال بدست آمده الگوریتم MOPSO

nos	diversity	spacing	MID	time	sum 1
0.536585366	0.803281581	1	1	1	4.339866947
0.56097561	0.831111421	0.59187451	0.999999987	0.916890515	3.900852042
0.512195122	0.811142571	0.775624465	0.999999987	0.700825257	3.799787402
0.524390244	0.823824265	0.580066071	0.999999983	0.914245842	3.842526405
0.634146341	0.879605535	0.781971128	0.999999992	0.495529828	3.791252825
1	0.588844612	0.64652766	0.999999976	0.363383113	3.598755361
0.829268293	0.97987151	0.959641309	0.999999992	0.591448773	4.360229877
0.743902439	1	0.599752916	0.999999986	0.395002363	3.738657703
0.731707317	0.509313421	0.676739004	0.999999981	0.30704667	3.224806392

برای تنظیم پارامتر لازم است که مجموع مقادیر نرمال شده نتایج پنج معیار مقایسه حاصل از پنج بار اجرای الگوریتم‌ها را در نرم افزار مینی تب<sup>۱</sup> قرار داده و تحلیل را روی این نتایج انجام داد. ماتریس حاصل از مجموع پنج بار اجرای الگوریتم‌ها در جدول ۵ تا ۷ نشان داده شده است.

جدول ۵. ماتریس مجموع مقادیر نرمال بدست آمده الگوریتم NSGA-II

npop	max-it	pm	pc	Sum 1	Sum 2	Sum 3	Sum 4	Sum 5	SNRA
1	1	1	1	4.140397	4.297141	4.22425	4.479855	4.514565	12.71774
1	2	2	2	3.676748	3.392382	3.722484	4.987654	3.785659	11.63664
1	3	3	3	3.787257	3.362425	4.87986	3.804002	3.716369	11.6536
2	1	2	3	3.66164	4.98675	4.98654	3.851034	3.856566	12.37055
2	2	3	1	3.318496	3.235637	4.54678	3.643372	3.785139	11.19385
2	3	1	2	3.466167	3.569786	3.858966	3.363719	3.813865	11.12395
3	1	3	2	3.244984	3.669262	3.396264	3.654613	3.987891	11.03816
3	2	1	3	3.625268	3.1375	3.54378	3.383654	3.578002	10.72879
3	3	2	1	3.385882	3.598774	3.607877	3.371838	3.653752	10.92451

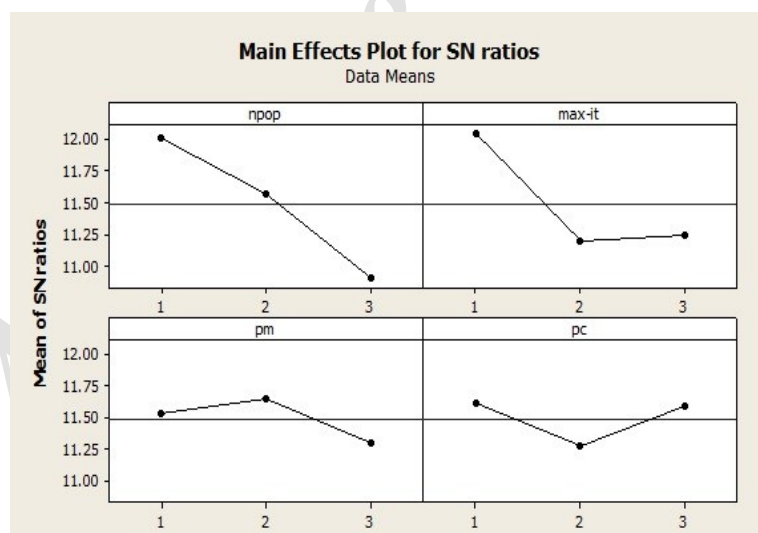
جدول ۶. ماتریس مجموع مقادیر نرمال بدست آمده الگوریتم NPGA

npop	max-it	pm	pc	Sum 1	Sum 2	Sum 3	Sum 4	Sum 5	SNRA
1	1	1	1	3.857141	4.293375	3.81522	4.277941	4.436748	12.28251
1	2	2	2	3.817238	3.599313	3.482514	3.985576	3.734947	11.3917
1	3	3	3	3.72892	3.624383	3.05345	3.773678	3.587909	10.93448
2	1	2	3	3.561304	3.802006	3.506855	4.120306	3.883649	11.493
2	2	3	1	3.583997	3.767237	3.131567	3.901899	3.460645	10.9749
2	3	1	2	3.631281	3.14027	3.128003	3.766631	3.764395	10.75204
3	1	3	2	3.736714	3.606527	3.395876	3.862035	3.564994	11.1811
3	2	1	3	3.366024	3.886189	3.143375	3.945292	3.419429	10.91031
3	3	2	1	3.635821	3.402576	3.772714	3.880369	3.41808	11.14317

جدول ۷. ماتریس مجموع مقادیر نرمال بدست آمده الگوریتم MOPSO

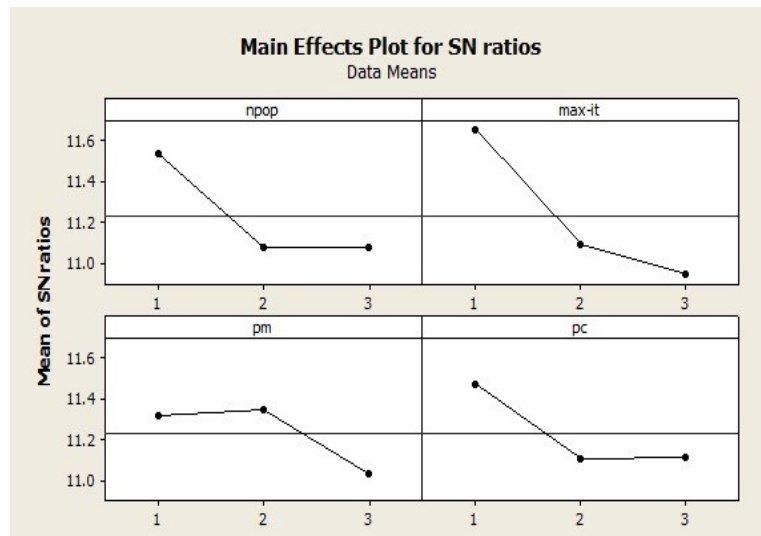
npop	max-it	c1	c2	Sum 1	Sum 2	Sum 3	Sum 4	Sum 5	SNRA
1	1	1	1	4.339867	4.712978	4.581202	4.75412	4.581202	13.23024
1	2	2	2	3.900852	4.373151	3.695349	3.9978	3.695349	11.84375
1	3	3	3	3.799787	4.67589	4.0145	3.976517	4.0145	12.1848
2	1	2	3	3.842526	4.290371	4.047371	4.197318	4.047371	12.20538
2	2	3	1	3.791253	3.580897	3.887929	3.972276	3.887929	11.63367
2	3	1	2	3.598755	4.108163	3.95437	3.521418	3.95437	11.61138
3	1	3	2	4.36023	4.012356	3.972584	3.885449	3.972584	12.10862
3	2	1	3	3.738658	3.988432	4.309724	4.027752	4.309724	12.16487
3	3	2	1	3.224806	3.699778	3.697431	3.85871	3.697431	11.16145

برای بدست آوردن سطوح بهینه‌ی پارامترهای هر الگوریتم، با توجه به نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌ها، نمودار S/N بدست آمده، در شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است.

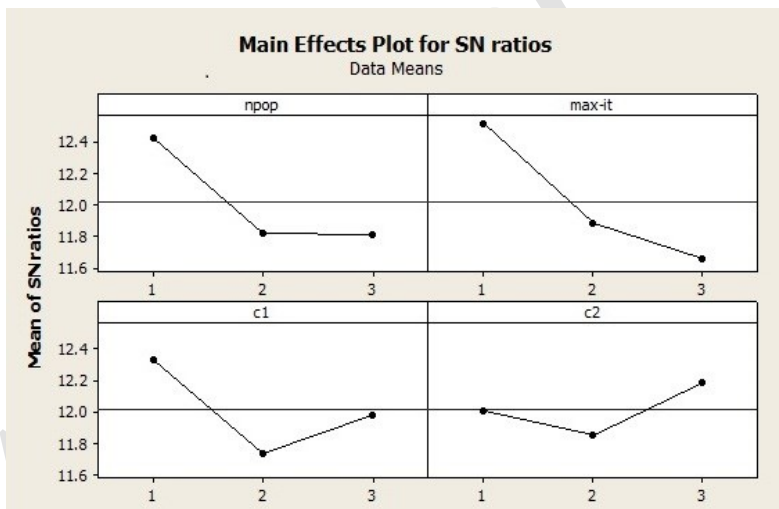


شکل ۱۰. نمودار S/N الگوریتم NSGA-II





شکل ۱۱. نمودار S/N الگوریتم NRG



شکل ۱۲. نمودار S/N الگوریتم MOPSO

با توجه به نمودار S/N بدست آمده، مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم‌های NSGA-II، NRG و MOPSO در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸. مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم NSGA-II، NPGA و MOPSO

algorithm	optimal value			
	npop	max-it	pm	pc
NSGA-II	30	50	0.3	0.7
NPGA	30	50	0.3	0.7
	npop	max-it	C1	C2
MOPSO	30	100	1	2

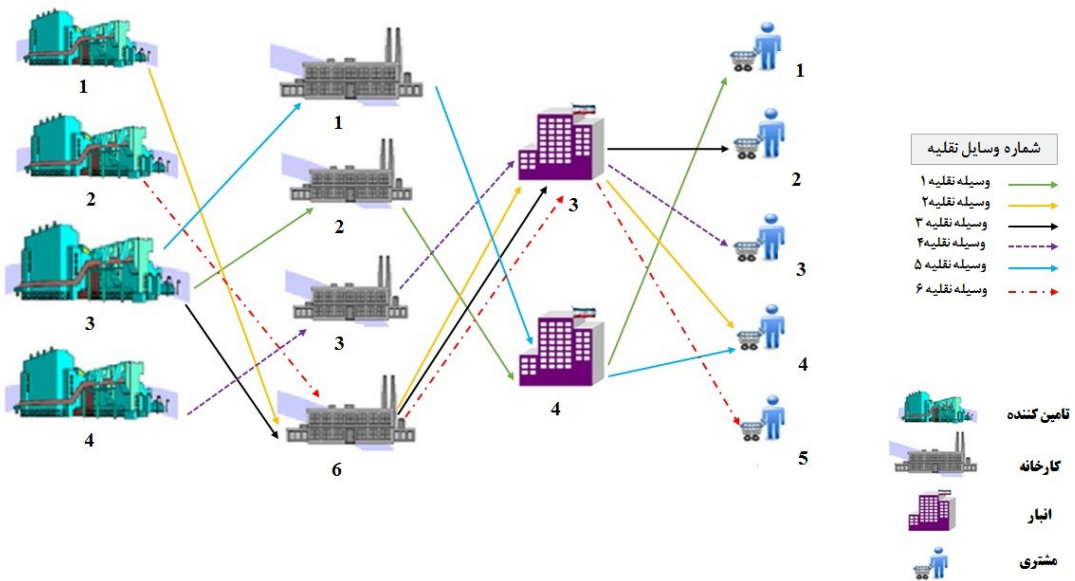
## نتایج محاسباتی

جهت حصول از صحت عملکرد الگوریتم‌های ارائه شده و نیز معتبر بودن نتایج حاصل از آن‌ها، مدل برای مسئله با سائز کوچک توسط نرم افزار GAMS 25.5.3 حل شده است. با توجه به چند هدفه بودن مدل ریاضی ارائه شده، برای تک هدفه کردن مدل و حل آن با نرم افزار از روش‌های تصمیم‌گیری چند هدفه<sup>۱</sup> (MODM) استفاده شده است. با استفاده از روش LP metric اهداف یکپارچه شده و با نرم افزار GAMS اجرا شده است که پارامترهای استفاده شده و مقادیر تابع هدف بدست آمده در جدول ۹ و شکل ۱۳ نمایش گرافیکی خروجی می‌باشد.

جدول ۹. نتایج GAMS

parameters					objective value			
h	i	e	j	k	objective 1	objective 2	objective 3	Lp-metric
۴	۶	۴	۵	6	184010000	12	620	0.42

## 1. Multiple objective decision making



شکل ۱۳. نمایش گرافیکی GAMS

مسائل آزمایشی در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ به تعداد ۳۰ مسئله طراحی شده است. مقادیر پارامترهای ورودی و مشخصات مسئله‌های آزمایشی در جدول ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است. برای تحلیل نتایج حاصل از اجرای ۳۰ مسئله آزمایشی، ۵ شاخص مورد ارزیابی قرار می‌گیرند که نتایج حاصل از آن در جدول ۱۲ نشان داده شده است.

جدول ۱۰. مقادیر پارامترهای ورودی

parameters	values
$f_i$	$\sim uniform (150000, 350000)$
$f_e$	$\sim uniform (100000, 300000)$
$cv_k$	$\sim uniform (5000, 8000)$
$ch_i$	$\sim uniform (5000, 8000)$
$ch_e$	$\sim uniform (5000, 8000)$
$d_j$	$\sim uniform (50, 200)$
$w_h$	$\sim uniform (1000, 2000)$
$tp_{hik}$	$\sim uniform (5, 20)$
$tw_{iek}$	$\sim uniform (10, 40)$
$tz_{ejk}$	$\sim uniform (20, 50)$

جدول ۱۱. مشخصات مسائل آزمایشی

test	h	l	e	j	k
1	5	4	5	6	6
2	6	5	6	8	7
3	7	6	7	10	9
4	8	6	7	11	9
5	8	7	8	12	10
6	9	8	9	13	11
7	10	8	9	15	12
8	10	9	10	15	12
9	11	9	11	16	13
10	12	10	12	17	14
11	13	10	12	17	14
12	14	11	13	17	15
13	15	11	13	20	17
14	16	12	14	22	18
15	17	12	14	23	19
16	18	13	14	25	20
17	18	14	15	26	20
18	19	14	16	26	21
19	20	15	16	26	21
20	20	15	17	27	22
21	21	16	17	27	23
22	22	16	18	28	24
23	23	17	19	28	25
24	24	17	19	30	26
25	25	18	20	31	27
26	26	19	22	32	28
27	27	20	23	35	29
28	28	21	25	38	30
29	29	22	27	38	32
30	30	22	28	40	32

جدول ۱۲. نتایج محاسباتی

TestNO.	NSGA-II					NRGA					MOPSO				
	nos	diversity	spacing	MID	time	nos	diversity	spacing	MID	time	nos	diversity	spacing	MID	time
1	33	137621.8	1.49	1.00	8.29	56	1724309	1.41	1.00	10.49	42	81483.6	0.88	1.00	10.18
2	45	247749.8	1.51	1.00	9.07	54	2795629	1.43	1.00	13.15	39	235142	0.83	1.00	13.05
3	49	306597.5	1.35	1.00	13.04	66	3292066	1.27	1.00	14.68	49	269620	1.67	1.00	15.81
4	71	382686.7	1.19	1.00	17.25	81	3405464	1.10	1.00	16.81	51	369428	1.71	1.00	16.07
5	71	476683.6	1.08	1.00	21.07	77	4909536	1.20	1.00	20.12	53	491012	1.36	1.00	19.32
6	95	650039.6	1.29	1.00	23.86	77	5090691	1.14	1.00	21.70	61	535777	1.10	1.00	26.47
7	95	603414.3	1.26	1.00	27.26	106	6752299	1.23	1.00	24.39	60	539175	0.85	1.00	33.04
8	98	663606.2	1.00	1.00	28.05	131	7642722	1.02	1.00	39.20	78	655794	1.07	1.00	34.11
9	88	677399.9	1.21	1.00	29.56	126	8517425	1.08	1.00	44.47	81	855157	1.24	1.00	40.77
10	110	784070.2	1.04	1.00	30.13	153	9703985	0.83	1.00	52.04	97	979111	0.99	1.00	51.84
11	154	1108563	1.07	1.00	35.79	199	1059644	0.90	1.00	57.24	145	1188891	0.87	1.00	61.34
12	229	1456014	0.95	1.00	60.76	170	1174164	0.82	1.00	59.30	90	1123796	0.82	1.00	60.80
13	219	1429680	0.91	1.00	77.23	178	1287544	0.96	1.00	71.09	126	1285969	0.83	1.00	72.28
14	243	1629441	0.87	1.00	82.6	245	1685337	0.81	1.00	95.90	173	1794074	1.11	1.00	99.62
15	291	1864531	0.85	1.00	105.82	279	1689371	0.89	1.00	110.32	249	1922900	0.95	1.00	109.09
16	326	2207367	0.81	1.00	114.53	284	1981273	0.84	1.00	110.7	308	2338536	0.89	1.00	107.7
17	306	2158588	0.88	1.00	116.63	302	2216068	0.85	1.00	123.97	226	2244988	0.98	1.00	108.83
18	318	2278356	0.87	1.00	117.02	321	2461717	0.84	1.00	127.99	353	2913314	0.87	1.00	126.39
19	297	2035954	0.84	1.00	104.54	292	2106548	0.83	1.00	125.18	366	2999936	0.99	1.00	144.57
20	281	2076831	0.78	1.00	106.6	304	2419302	0.77	1.00	121.83	349	3334961	1.02	1.00	138.47
21	310	2707274	0.79	1.00	123.37	344	2713491	0.83	1.00	142.26	394	3613311	0.79	1.00	159.63
22	291	2377190	0.86	1.00	116.93	352	2669909	0.82	1.00	147.19	384	3625834	0.92	1.00	148.63
23	321	2590089	0.78	1.00	123.56	326	2485802	0.89	1.00	138.98	417	4019213	0.80	1.00	176.51
24	310	2362106	0.87	1.00	120.18	314	2383761	0.82	1.00	122.38	382	3758799	0.94	1.00	153.36
25	345	2919429	0.78	1.00	142.58	285	2659191	0.76	1.00	129.35	393	4233838	0.85	1.00	161.04
26	361	3423903	0.87	1.00	149.94	353	3428269	0.80	1.00	138.49	436	5087001	1.00	1.00	176.53
27	392	3912871	0.81	1.00	179.2	305	2868076	0.84	1.00	139.31	403	5716830	1.14	1.00	145.41
28	414	4265856	0.84	1.00	194.67	338	3040800	0.79	1.00	156.29	468	6198682	1.02	1.00	170.01
29	398	3838206	0.83	1.00	196.48	401	4215333	0.75	1.00	198.04	415	6935711	1.20	1.00	157.64
30	406	4466436	0.80	1.00	190.55	376	3956894	0.85	1.00	192.84	449	7326827	1.11	1.00	182.13

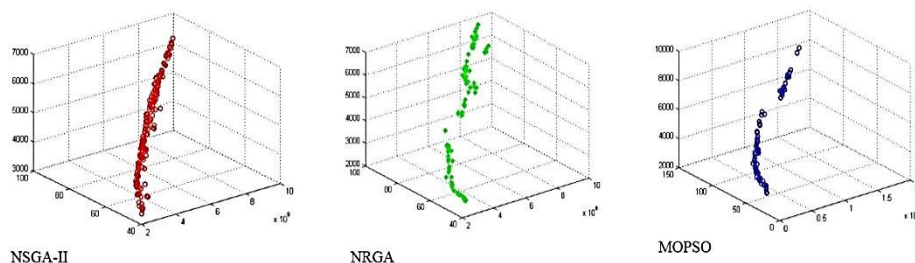
با توجه به سه هدفه بودن مدل ارائه شده، نتایج حاصل از اجرای مسائل آزمایشی به

تفکیک مقدار تابع هدف برای الگوریتم‌های NSGA-II، NRGA و MOPSO

در جدول ۱۳، ارائه شده است. نمونه‌ای از جواب‌های پارتو برای مسائل مختلف نیز در شکل ۱۴، نشان داده شده است.

Fast no.	NSGA - II			NRGA			MOPSO			GAMS			LP-metric
	f1	f2	f3	f1	f2	f3	f1	f2	f3	f1	f2	f3	
1	324721927	13.64	738.88	355171618	13.88	746.38	216569892	12.57	648.95	205375650	12.1	614	0.46
2	910689574	22.29	1373.51	675487964	19.93	1168.13	550393681	18.49	1123.79	339657345	15.22	1025	0.53
3	1.032E+09	28.24	1659.51	1.287E+09	29.97	1851.38	533825349	21.67	1251.78	---	---	---	---
4	1.537E+09	31.44	1944.38	1.423E+09	30.49	1897.14	644351346	27.16	1489.2	---	---	---	---
5	2.203E+09	35.87	2357.49	2.134E+09	36.94	2372.29	1.363E+09	34.43	2045.53	---	---	---	---
6	2.701E+09	44.81	2934.4	2.097E+09	43.03	2770.9	2.219E+09	45.97	2937.77	---	---	---	---
7	2.912E+09	47.67	3254.24	2.881E+09	47.88	3169.06	2.817E+09	47.92	3154.12	---	---	---	---
8	3.185E+09	54.17	3620.93	3.9E+09	57.24	3935.24	2.984E+09	53.69	3499.92	---	---	---	---
9	3.863E+09	58.39	3820.68	5.419E+09	65.38	4563.92	3.476E+09	57.38	3739.32	---	---	---	---
10	4.365E+09	64.57	4377.2	6.452E+09	74.35	5223.89	5.406E+09	74.26	4956.48	---	---	---	---
11	6.354E+09	80.46	5459.16	6.234E+09	77.7	5426.27	5.732E+09	77.5	5281.38	---	---	---	---
12	8.311E+09	86.97	6153.9	8.718E+09	91.52	6402.28	7.831E+09	89.84	6129.08	---	---	---	---
13	1.012E+10	100.95	7176.05	9.717E+09	97.88	6814.14	8.716E+09	93.67	6580.25	---	---	---	---
14	1.133E+10	103.33	7301.2	1.245E+10	108.88	7759.07	9.949E+09	102.55	6950.42	---	---	---	---
15	1.229E+10	116.76	8336.18	1.158E+10	114.16	8094.41	1.066E+10	107.25	7634.92	---	---	---	---
16	1.607E+10	130.19	9189.3	1.294E+10	114.82	8077.43	1.52E+10	126.48	9086.11	---	---	---	---
17	1.65E+10	138.6	9875.62	1.758E+10	141.79	10141.43	1.597E+10	133.86	9569.33	---	---	---	---
18	1.643E+10	137.67	9812.01	2.038E+10	153.65	10986.83	1.885E+10	148.84	10699.22	---	---	---	---
19	1.73E+10	157.58	11168.23	1.85E+10	161.75	11552.15	1.616E+10	150.53	10816.41	---	---	---	---
20	1.935E+10	156.12	11117.33	2.221E+10	168.14	12019.11	1.781E+10	148.67	10631	---	---	---	---
21	2.183E+10	165.15	11851.05	2.294E+10	171.17	12194.22	2.436E+10	176.39	12630	---	---	---	---
22	2.537E+10	187.15	13402.84	2.38E+10	180.86	12892.88	2.497E+10	183	13039.85	---	---	---	---
23	2.284E+10	187.18	13372.97	2.548E+10	199	14159.64	2.826E+10	208.92	14902.45	---	---	---	---
24	2.305E+10	197.85	14201.56	2.602E+10	212.11	15066.04	2.432E+10	200.77	14417.04	---	---	---	---
25	3.303E+10	231.94	16602.62	3.07E+10	224.18	15961.56	3.577E+10	240.07	17157.81	---	---	---	---
26	3.831E+10	260.73	18748.7	3.673E+10	254.29	18304.47	3.273E+10	240.07	17261.33	---	---	---	---
27	4.346E+10	274.48	19750.69	4.173E+10	272.96	19604.96	3.59E+10	243.2	17452.5	---	---	---	---
28	4.929E+10	308.14	22144.34	4.738E+10	307.19	22150.25	4.538E+10	292.19	20985.2	---	---	---	---
29	5.188E+10	322.85	23275.99	5.491E+10	326.85	23385.66	5.175E+10	316.12	22847.57	---	---	---	---
30	5.548E+10	327.25	23618.55	6.269E+10	354.18	25547.9	5.814E+10	331.34	23947.22	---	---	---	---

جدول ۱۳. مقادیر تابع هدف مسائل آزمایشی



شکل ۱۴. نمونه جوابهای پارتو برای مسئله شماره ۱۰

### مقایسه آماری عملکرد الگوریتم‌های NSGA-II، NPGA و MOPSO

به منظور ارائه تحلیل آماری نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی از آزمون تحلیل واریانس در سطح اطمینان ۹۵٪ استفاده شده است. هدف از انجام آنالیز واریانس، مقایسه میانگین چندین جامعه است تا مشخص گردد که آیا میانگین‌های این جوامع با هم مساوی هستند یا اختلاف معنادار بین آن وجود دارد. با توجه به استفاده از سه الگوریتم فراابتکاری و پنج شاخص مورد ارزیابی، نتایج برای شاخص‌ها به صورت دو به دو با هم مقایسه می‌گردند. نتایج حاصل از اجرای این آزمون برای مقایسه شاخص‌ها با استفاده از نرم افزار MINITAB 16 در جداول 14 و 15 ارائه شده است.

جدول ۱۴. خروجی تحلیل واریانس الگوریتم NPGA و MOPSO برای معیار diversity

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	8.66 E +12	8.66E +12	2.98	0.04
Error	58	1.69 E +14	2.91E +12		
Total	59	1.77 E +14			

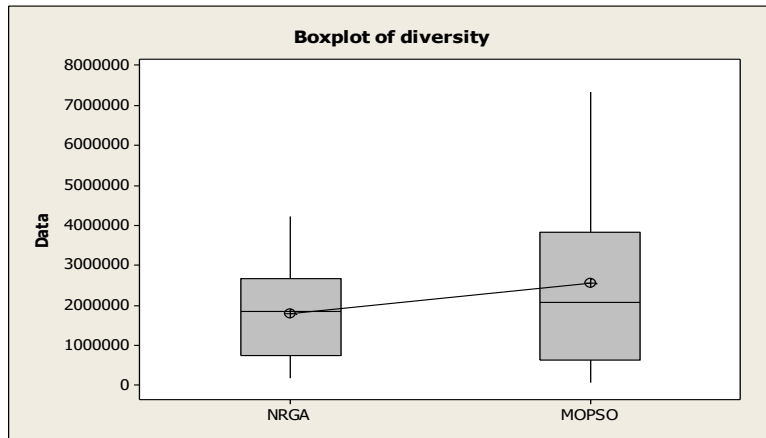
جدول ۱۵. خروجی تحلیل واریانس الگوریتم NPGA و MOPSO برای معیار spacing

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	0.1001	0.1001	2.21	0.014
Error	58	2.6223	0.0452		
Total	59	2.7224			

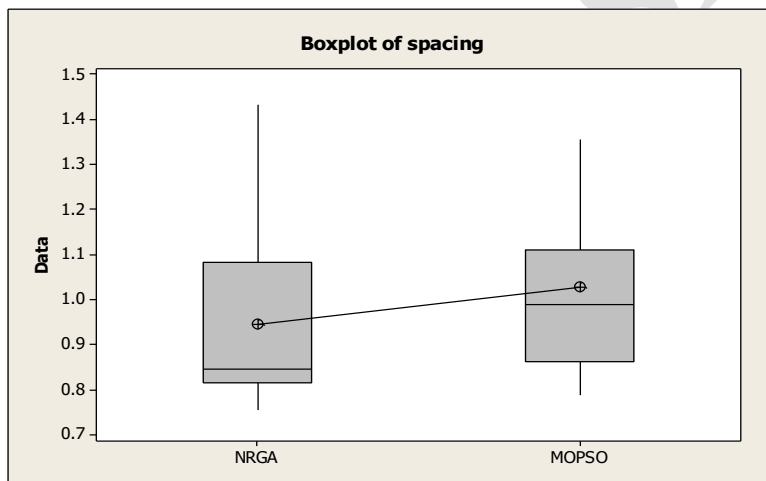
با توجه به مقدار  $p$ -value بدست آمده برای هر یک از شاخص‌های مقایسه‌ای می‌توان نتایج را تحلیل نمود. در شاخص  $nos$  مقدار  $p$ -value برای مقایسه هر سه الگوریتم بیشتر از ۰,۰۵ شده است و این نشان‌دهنده این است که اختلاف معناداری بین آن‌ها وجود ندارد. در شاخص  $diversity$  بین الگوریتم NSAGA-II-NRGA و NSGA-II-MOPSO اختلاف معناداری وجود ندارد ولی در مقایسه الگوریتم NRGA-MOPSO مقدار کمتر از ۰,۰۵ شده است و اختلاف معنادار وجود دارد. در شاخص spacing نیز برای الگوریتم NRGA-MOPSO اختلاف معنادار وجود دارد. برای شاخص‌های MID و time نیز اختلاف معنادار بین الگوریتم‌ها وجود ندارد.

جهت انتخاب بهترین الگوریتم برای مدل ارائه شده از نمودار  $boxplot$  استفاده شده است. در تحلیل آماری برای دو شاخص  $diversity$  و spacing اختلاف معنادار بین الگوریتم‌های NRGA-MOPSO وجود دارد. شاخص  $diversity$  هر چه مقدار بیشتری داشته باشد بهتر است، پس در نمودار  $boxplot$  الگوریتمی انتخاب می‌شود که میانگین و واریانس بیشتری داشته باشد. در شاخص spacing هر چه مقدار کمتر باشد بهتر است، در نتیجه میانگین و واریانس کمتر مدنظر است. با توجه به نمودارهای  $boxplot$  رسم شده در شکل ۱۵ و ۱۶ برای شاخص‌های  $diversity$  و spacing از الگوریتم mopso استفاده می‌شود.





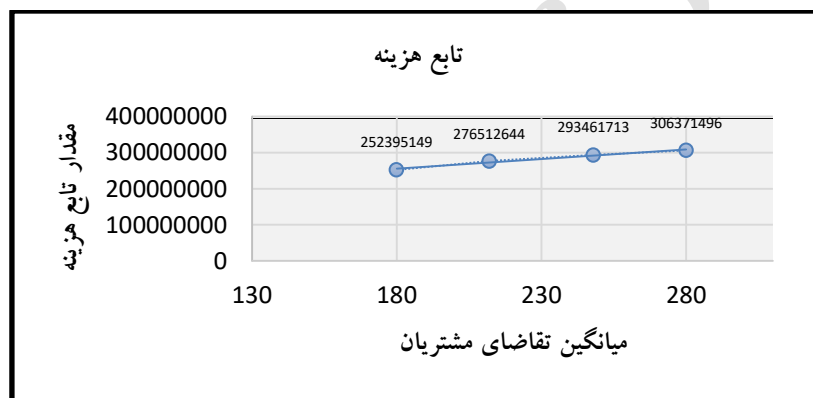
شکل ۱۵. نمودار boxplot معیار diversity



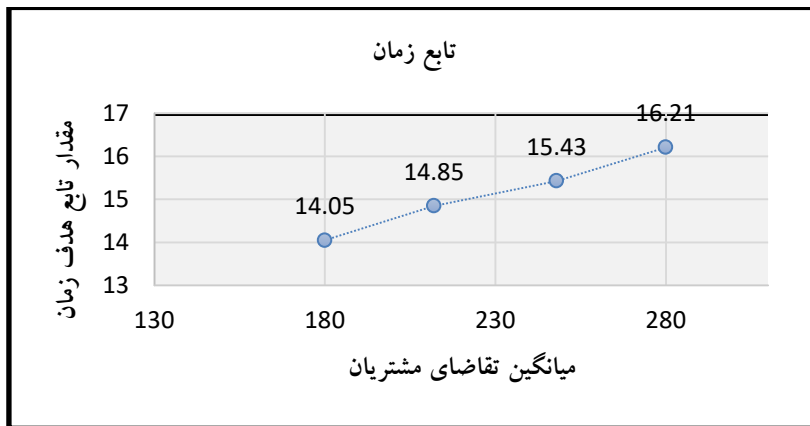
شکل ۱۶. نمودار boxplot معیار spacing

### آنالیز حساسیت

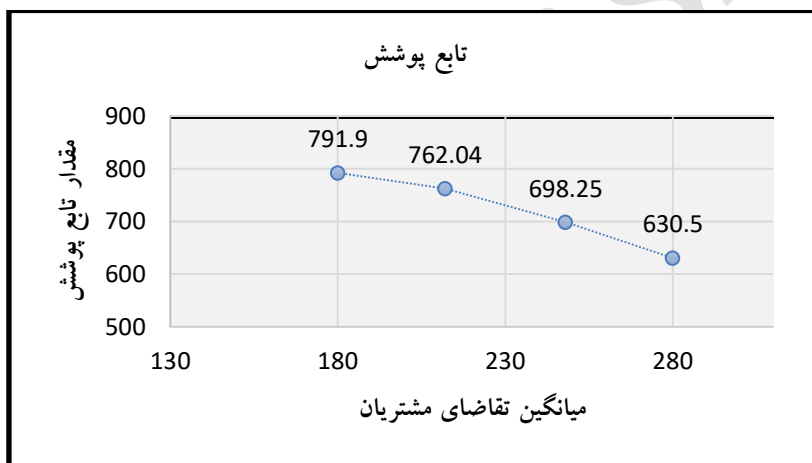
با تغییر در مقدار پارامترها در مدل چند هدفه ارائه شده، می توان حساسیت پارامترها را نسبت به تغییر مقدارشان مشاهده نمود. پارامتر مقدار تقاضای مشتریان  $d_j$  برای تحلیل حساسیت در مسئله شماره یک در نظر گرفته می شود. شکل ۱۷، ۱۸ و ۱۹ تغییر مقدار توابع هدف هزینه، پوشش و زمان نسبت به تغییر پارامتر تقاضای مشتریان را نشان می دهد. همانطور که در شکل مشاهده می شود با افزایش میانگین تقاضای مشتریان، مقدار تابع هدف هزینه و زمان افزایش می یابد و مقدار تابع هدف پوشش کاهش می یابد.



شکل ۱۷. میانگین تقاضای مشتریان و تابع هدف هزینه



شکل ۱۸. میانگین تقاضای مشتریان و تابع هدف زمان



شکل ۱۹. میانگین تقاضای مشتریان و تابع هدف پوشش

### نتیجه گیری

در این پژوهش ابتدا یک مدل چند هدفه ریاضی برای مسئله مکانیابی موجودی- مسیریابی در یک شبکه زنجیره تامین چهار سطحی ارائه شد. سپس با استفاده از رویکرد حل الگوریتم‌های فراابتکاری چند هدفه نتایج مورد بررسی قرار گرفت. جهت

اعتبارسنجی مدل ریاضی با نرم افزار گمز اجرا شد و نتایج آن صحت مدل ریاضی را نشان داد. برای حل با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری ابتدا پارامترها به روش تاگوچی تنظیم شدند و نتایج برای ۳۰ مسئله آزمایشی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در الگوریتم‌های ارائه شده پنج معیار مقایسه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در شاخص diversity و spacing الگوریتم MOPSO کارایی بهتری دارد و در شاخص‌های MID nos و time استفاده از هر دو الگوریتم NSGA-II و NPGA پیشنهاد می‌گردد. در نهایت نیز آنالیز حساسیت بر روی پارامتر میانگین تقاضای مشتریان صورت گرفت که نشان‌دهنده افزایش در تابع هدف هزینه و زمان و کاهش در تابع هدف پوشش بود. به منظور توسعه مدل ارائه شده می‌توان با توجه به چندسطحی بودن مدل، حالت چند دوره ای و چند محصولی با وسایل نقلیه ناهمگن را در مدل پیشنهاد نمود. همچنین مدل را در حالت تقاضای احتمالی مشتریان و با در نظر گرفتن کمبود در سیستم موجودی مدل سازی نمود. استفاده از دیگر روش‌های حل الگوریتم‌های فراابتکاری را می‌توان برای پیشنهادات آتی در نظر گرفت.

## منابع

- Almeder, C., Preusser, M., & Hartl, R. F. (2009). Simulation and optimization of supply chains: alternative or complementary approaches?. *OR spectrum*, 31(1), 95-119.
- Asl-Najafi, J., Zahiri, B., Bozorgi-Amiri, A., Taheri-Moghaddam, A., (2015). A dynamic closed-loop location-inventory problem under disruption risk. *Comput. Indust. Eng.* 90, 414-428.
- Blanquero, R., Carrizosa, E. and Boglárka, G., (2015). Maximal covering location problems on networks with regional demand. *Omega*.
- Coello, C. C., & Lechuga, M. S. (2002). MOPSO: A proposal for multiple objective particle swarm optimization. In *Evolutionary Computation, 2002. CEC'02. Proceedings of the 2002 Congress on (Vol. 2, pp. 1051-1056)*. IEEE.
- Davari, S., Zarandi, M.H.F. and Turksen, I.B., (2013). A greedy variable neighborhood search heuristic for the maximal covering location problem with fuzzy coverage radii. *Knowledge-Based Systems*, 41, pp.68-76.
- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., & Meyarivan, T. (2000, September). A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. In *International Conference on Parallel Problem Solving From Nature (pp. 849-858)*. Springer Berlin Heidelberg.
- Gaur, S., & Ravindran, A. R. (2006). A bi-criteria model for the inventory aggregation problem under risk pooling. *Computers & industrial engineering*, 51(3), 482-501.
- Ghaffari-Nasab N., Ahari S. G., Ghazanfari M., (2013), A hybrid simulated annealing based heuristic for solving the location-routing problem with fuzzy demands. *Scientia Iranica*20(3), 919-930.
- Guerrero, W.J., Prodhon, C., Velasco, N. and Amaya, C.A., (2013). Hybrid heuristic for the inventory location-routing problem with deterministic demand. *International Journal of Production Economics*, 146(1), pp.359-370.

Huang S. H., (2015), *Solving the multi-compartment capacitated location routing problem with pickup-delivery routes and stochastic demands*. *Computers & Industrial Engineering* 87, 104-113.

Karaoglan I., Altiparmak F., Kara I., Dengiz, B., (2011), *A branch and cut algorithm for the location-routing problem with simultaneous pickup and delivery*. *European Journal of Operational Research* 211(2), 318-332.

Karasakal, O., & Karasakal, E. K. (2004). *A maximal covering location model in the presence of partial coverage*. *Computers & Operations Research*, 31(9), 1515-1526.

Kaya, O., Urek, B., (2016). *A mixed integer nonlinear programming model and heuristic solutions for location, inventory and pricing decisions in a closed loopsupply chain*. *Comput. Oper. Res.* 65, 93-103.

Kumar, R.S., Kondapaneni, K., Dixit, V., Goswami, A., Thakur, L., Tiwari, M., (2015). *Multi-objective modeling of production and pollution routing problem with time window: a self-learning particle swarm optimization approach*. *Comput. Indust. Eng.*

Lee, B. K., Kang, K. H., & Lee, Y. H. (2008). *Decomposition heuristic to minimize total cost in a multi-level supply chain network*. *Computers & Industrial Engineering*, 54(4), 945-959.

Liao, S. H., Hsieh, C. L., & Lai, P. J. (2011). *An evolutionary approach for multi-objective optimization of the integrated location-inventory distribution network problem in vendor-managed inventory*. *Expert Systems with Applications*, 38(6), 6768-6776.

Liu S. C., Lee S. B., (2003), *A two-phase heuristic method for the multi-depot location routing problem taking inventory control decisions into consideration*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 22(11-12), 941-950.

Ma Z., Dai Y., (2010), *Stochastic dynamic location-routing-inventory problem in two-echelon multi-product distribution systems*. *Logistics for Sustained Economic Development*, pp. 2562-2568.

Rajagopalan H. K., Saydam C., Xiao J., (2008), *A multiperiod set covering location model for dynamic redeployment of ambulances*. *Computers & Operations Research* 35(3), 814-826.

Sarkar, B., & Majumder, A. (2013). A study on three different dimensional facility location problems. *Economic Modelling*, 30, 879-887.

Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., Simchi-Levi E. (2000). *Designing and Managing the Supply Chain Concepts, Strategies and Case Studies*. McGraw-Hill, Boston.

Syarif, A., Yun, Y., & Gen, M. (2002). Study on multi-stage logistic chain network: a spanning tree-based genetic algorithm approach. *Computers & Industrial Engineering*, 43(1), 299-314.

Tancrez, J. S., Lange, J. C., & Semal, P. (2012). A location-inventory model for large three-level supply chains. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(2), 485-502.

Tavakkoli-Moghaddam R., Makui A., Mazloomi Z., (2010), A new integrated mathematical model for a bi-objective multi-depot location-routing problem solved by a multi-objective scatter search algorithm. *Journal of Manufacturing Systems* 29(2), 111-119..

Teo CP., Shu J., (2004), Warehouse-retailer network design problems. *Operations Research* 52, 396-408.

Vidović, M., Ratković, B., Bjelić, N., & Popović, D. (2016). A two-echelon location-routing model for designing recycling logistics networks with profit: MILP and heuristic approach. *Expert Systems with Applications*, 51, 34-48.

Wang, K. J., Makond, B., & Liu, S. Y. (2011). Location and allocation decisions in a two-echelon supply chain with stochastic demand—A genetic-algorithm based solution. *Expert Systems with Applications*, 38(5), 6125-6131.

Zachariadis, E. E., Tarantilis, C. D., & Kiranoudis, C. T. (2009). An integrated local search method for inventory and routing decisions. *Expert Systems with Applications*, 36(7), 10239-10248.

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*, 89, 182-214.

*Zhao J., Verter V., (2014), A bi-objective model for the used oil location-routing problem. Computers & Operations Research 62, 157-168.*

Archive of SID