

مدیریت تولید و عملیات، دوره هفتم، شماره (۲)، پیاپی (۱۳)، پاییز و زمستان ۱۳۹۵  
دریافت: ۹۲/۷/۱۷ پذیرش: ۹۳/۱۰/۱۰  
صص: ۱۷۲-۱۵۳

## ارائه یک مدل دوهدفه برای تصمیم‌های مکان‌یابی و تخصیص در یک زنجیره تأمین سه‌سطحی

ابوالفضل کاظمی<sup>۱\*</sup>، امیرحسین نوییل<sup>۲</sup>، علیرضا علی‌نژاد<sup>۳</sup>

۱- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، قزوین، ایران

۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، قزوین، ایران

۳- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، قزوین، ایران

### چکیده

مدیریت زنجیره تأمین یکی از مسائل اساسی پیش روی سازمان‌ها است. در این تحقیق مدلی برای تصمیم‌های مکان‌یابی تسهیلات و تخصیص شبکه توزیع به منظور کمینه کردن دو هدف هزینه و زمان در داخل زنجیره تأمین سه‌سطحی ارائه شده است. این هدف‌ها شامل هزینه‌های راه‌اندازی، سفارش، خرید، تولید، حمل‌ونقل، زمان‌های تولید، ارسال کالا و دریافت مواد اولیه است. مدل ارائه شده، یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط است که مکان مناسب برای راه‌اندازی تسهیلات را با توجه به تأمین‌کنندگان و توزیع‌کنندگان مشخص می‌کند. همچنین در این تحقیق برای حل مدل از ابزار بهینه‌سازی سیپلکس، الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید استفاده شده است. و در نهایت برای بررسی و اندازه‌گیری کارایی روش حل مسئله، نتایج محاسباتی به دست آمده با تحلیل آماری با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ریزی توزیع، زنجیره تأمین، شبیه‌سازی تبرید، مکان‌یابی تسهیلات.

## ۱- مقدمه

در شرایط رقابتی حاکم بر دنیای کنونی، رمز بقای سازمان‌ها در ارتباط مؤثر با یکدیگر است تا بتوانند با ویژگی‌های محیط تولیدی عصر حاضر به خواسته‌های متنوع مشتریان پاسخ دهند. در این ارتباط سازمان‌ها قصد دارند که با همکاری یکدیگر به اهداف استراتژیک کارتری دست یابند. با ارتباط سازمان‌ها، فعالیت‌هایی نظیر مکان‌یابی، برنامه‌ریزی عرضه و تقاضا، برنامه‌ریزی نگهداری کالا و موجودی که قبلاً همگی در سطح شرکت انجام می‌شدند، به سطوح زنجیره تأمین انتقال پیدا کرده‌اند (لکزیان و دهقانی، ۱۳۸۹). به‌طور کل، هدف زنجیر تأمین ارائه خدمات و محصولات به مشتری نهایی از طریق ایجاد ارتباط بین سازمان‌های وابسته است که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم در برطرف کردن نیازهای مشتری با یکدیگر در ارتباط هستند (بیرر<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۸). از همین‌رو، برای یکپارچه‌سازی مواد، اطلاعات و مالی بین سازمان‌ها در زنجیره تأمین فلسفه مدیریتی جدیدی به نام مدیریت زنجیره تأمین به وجود آمده است (استدler و کیلگر، ۲۰۰۰). مدیریت زنجیره تأمین را می‌توان به سه دسته طراحی زنجیره تأمین، برنامه‌ریزی زنجیره تأمین و کنترل زنجیره تأمین تقسیم‌بندی کرد (شانکار و همکاران، ۲۰۱۳). تصمیم‌های مکان‌یابی و تخصیص می‌توانند مدیریت زنجیره تأمین را در طراحی با انتخاب تسهیلات، انتخاب مکان‌هایی مناسب برای احداث تسهیلات و انتخاب شبکه توزیع مناسب بین تسهیلات، تأمین‌کنندگان و توزیع‌کنندگان کمک کنند. همچنین، هر کارخانه چه مقدار کالا تولید کند، چه مقدار مواد اولیه از هر تأمین‌کننده و چه مقدار کالا به

هر توزیع‌کننده ارسال می‌کند، مدیریت زنجیره تأمین را در برنامه‌ریزی کمک می‌کند. بر همین اساس تصمیم‌های مکان‌یابی و تخصیص را می‌توان به‌عنوان یکی از مباحث بسیار مهم در مدیریت زنجیره تأمین بیان کرد که به مدیران برای اتخاذ تصمیم‌ها کارا و مؤثر کمک می‌کنند.

ادامه این مقاله به این صورت مرتب شده است: پس از مروری بر ادبیات مسائل مکان‌یابی و تخصیص در حیطه زنجیره تأمین در بخش ۲، یک مدل ریاضی برای تصمیم‌های مکان‌یابی و تخصیص به‌منظور کمینه‌کردن مجموع هزینه‌ها و زمان در بخش ۳ پیشنهاد شده است. در بخش ۴ برای حل مدل با توجه به پیچیدگی مسئله از روش‌های فراابتکاری الگوریتم ژنتیک<sup>۲</sup> و شبیه‌سازی تبرید<sup>۳</sup> چندجمعیتی استفاده شده است. همچنین در بخش ۵ برای بررسی و اندازه‌گیری کارایی الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید، نتایج محاسباتی به‌دست‌آمده با خروجی ابزار بهینه‌سازی سیپلکس<sup>۴</sup> مقایسه شده و با تحلیل آماری کارایی دو الگوریتم با یکدیگر سنجیده شده‌اند. در نهایت نتایج تحقیق و پیشنهادهایی برای کارهای آتی در بخش ۶ ارائه شده است.

## ۲- مروری بر ادبیات

در سال ۱۹۰۹ آلفرد وبر مسائل مکان‌یابی را برای اولین بار به صورت فرموله بیان کرد و گام بزرگی را در زمینه علمی این مسائل بنا نهاد (فراهانی و همکاران، ۲۰۱۰). او مکان یک انبار را با استفاده از یک مسئله مکان‌یابی مشخص کرد. در مدل او، هدف شامل کمینه‌کردن فاصله بین انبار و مشتریان بود. مسئله وبر یک مسئله مکان‌یابی میانه<sup>۵</sup> (حداقل

این روش‌ها نسبت به دیگری مزایا و نواقصی دارد. مقایساتی از روش‌های مختلف سنتی با روش‌های جست‌وجوی جدید برای مسائل مکان‌یابی و تخصیص را می‌توان در مطالعه‌ای که بیسچف و داچرت (۲۰۰۹) انجام دادند، مشاهده کرد. همچنین فراهانی و همکاران (۲۰۱۰) بر مطالعات اخیر مسائل مکان‌یابی چندمعیاره بازنگری کردند. این معیارها شامل سه دسته دو هدفه، چندهدفه و چندصفتی<sup>۱۱</sup> هستند. آن‌ها در مطالعه خود نیز مروری بر معیارهای مختلف استفاده‌شده انجام دادند.

در سال ۱۹۸۲ اولیور و وبر اصولی از مقدمات زنجیره تأمین‌یابی کردند (سارکار و ماجومدر، ۲۰۱۳). مدیران صنایع با گسترش مفهوم زنجیره تأمین دریافتند که برای ادامه حضور در بازارهای جهانی تنها بهبود فرآیندهای داخلی سازمان کافی نیست، بلکه تأمین‌کنندگان، توزیع‌کنندگان قطعات و مواد نیز باید ارتباط نزدیکی با سیاست‌های توسعه بازار تولیدکننده داشته باشند (نوبیل و همکاران، ۲۰۱۲). با این رویکرد مباحث مربوط به زنجیره‌های تأمین بیش از پیش مورد توجه محققان مسائل مکان‌یابی و تخصیص قرار گرفت.

وئو و ژانگ<sup>۱۲</sup> (۲۰۰۶) زنجیره تأمین یک سطحی را با تابع هزینه راه‌اندازی مدل کردند. در همان سال، لشینه و همکاران (۲۰۰۶) تصمیم‌های مکان‌یابی-تخصیص و مسیریابی در شبکه زنجیره تأمین را ارائه دادند. مدل آن‌ها یک مدل عدد صحیح برای مکان انبارها، تخصیص خرده‌فروشان به انبارها و پیدا کردن تعداد وسایل تحویل و مسیر این وسایل با هدف کمینه‌کردن کل هزینه‌های حمل‌ونقل، عملیات، مسیریابی و راه‌اندازی بود. هو و همکاران (۲۰۰۸) مسئله مکان‌یابی و تخصیص تسهیلات را در یک

مجموعه<sup>۱۳</sup> یک وسیله بر فضای پیوسته دوبعدی (صفحه) است. مسائل مکان‌یابی برای انتخاب برخی از تسهیلات مانند بیمارستان‌ها و ایستگاه‌های آتش-نشانی بسیار مؤثر هستند.

حکیمی (۱۹۶۴) مسئله مکان‌یابی را به‌عنوان یک ابزار قوی برای طراحی شبکه استفاده کرد. او در مطالعه خود مراکز راهگزینی<sup>۱۴</sup> در شبکه ارتباط و ایستگاه‌های پلیس در سیستم بزرگراه‌ها را مکان‌یابی کرد.

بالینسکی (۱۹۶۵) مسئله مکان‌یابی تسهیلات گسسته را با هدف کمینه‌کردن هزینه‌های ثابت احداث و حمل‌ونقل فرموله کرد.

ورجین و راجرز (۱۹۶۷) یک مجموعه از تأمین‌کنندگان و تخصیص مشتریان به آن‌ها را با استفاده از مکان‌یابی مراکز تأمین تعیین کردند. ریویله و لاپورته (۱۹۹۶) ادبیات مسائل مکان‌یابی را بازنگری کردند و شکل‌های رسمی از این مسائل را با چندین هدف، چندین محصول و ماشین شرح دادند.

در اوایل دهه ۸۰ میلادی تحقیقات بسیاری روی مسائل مکان‌یابی میانه با فواصل متعامد<sup>۱۵</sup> انجام شد. در این مسائل فاصله‌های بین مراکز تأمین و مشتریان با در نظر گرفتن به‌صورت متعامد کمینه می‌شوند (حسیه و تین، ۲۰۰۴). قالمت و همکاران (۱۹۸۱) راه‌حل‌های مؤثری را برای مسائل مکان‌یابی با فاصله متعامد پیدا کردند. آن‌ها با استفاده از یک الگوریتم پیکانی ساده<sup>۱۶</sup> که بر اساس آنالیز هندسی<sup>۱۷</sup> است، مکان تسهیل جدید را با توجه به مکان‌های تسهیلات موجود پیدا کردند.

در هر کدام از تحقیقات انجام‌شده به‌علت پیچیدگی و ابعاد مسئله، محققان از روش‌های مختلفی برای حل مدل استفاده کرده‌اند که هر کدام از

زنجیره تأمین مشتری-تحویل دهنده، بهینه کردند. آن‌ها از تکنیک AHP و مدل برنامه‌ریزی آرمانی<sup>۱۳</sup> برای هر دو فاکتور کیفی و کمی به‌منظور پیشینه‌کردن سود استفاده کردند.

ملو و همکاران (۲۰۰۹) یک مرور ادبیاتی بر مسائل مکان‌یابی در مدیریت زنجیره تأمین انجام دادند. آن‌ها ویژگی‌های اساسی مدل‌هایی که از تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی زنجیره تأمین استراتژیک حمایت می‌کنند را شناسایی، و یک لیست از مسائل موردنیاز برای تحقیقات بیشتر را فهرست کردند. وانگ و همکاران (۲۰۱۱) تصمیم‌های مکان‌یابی و تخصیص در زنجیره تأمین دوسطحی با هدف کمینه‌کردن هزینه راه‌اندازی و ارتباط بین مراکز توزیع و تسهیلات را با پیشینه‌کردن سود ارائه دادند.

تساو و لو (۲۰۱۲) یک شبکه زنجیره تأمین سه‌سطحی را با تخفیف‌های هزینه حمل‌ونقل ارائه دادند که در این تحقیق، مکان‌یابی تسهیلات و تخصیص موجودی، تحت تخفیف‌های هزینه حمل‌ونقل صورت گرفته است.

امین و ژانگ (۲۰۱۳) یک مدل مکان‌یابی تسهیلات چندهدفه را برای شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته<sup>۱۴</sup>، تحت تقاضا و بازگشت نامشخص ارائه کردند. این شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته شامل هر دو زنجیره تأمین جلو و عقب است. آن‌ها در این تحقیق یک شبکه زنجیره تأمین که شامل چندین کارخانه، مراکز جمع‌آوری<sup>۱۵</sup>، بازار تقاضا و محصولات است را بررسی کردند.

شانکار و همکاران (۲۰۱۳) تصمیم‌های مکان‌یابی و تخصیص دوهدفه را برای یک شبکه زنجیره تأمین چهار سطحی شامل تأمین‌کنندگان، کارخانه‌ها، مراکز توزیع و مشتریان ارائه دادند. این مدل با استفاده از

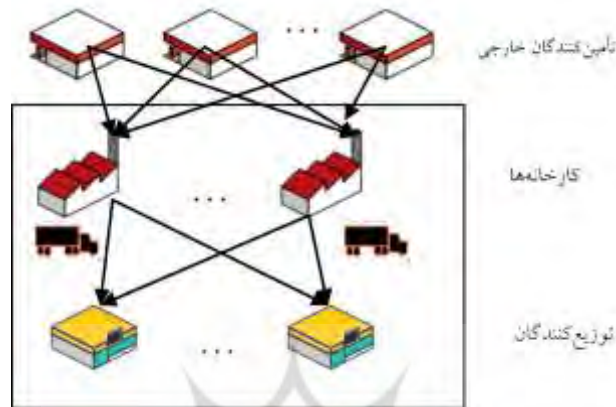
الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات<sup>۱۶</sup> چندهدفه، هزینه تولید و احداث در شبکه زنجیره تأمین را کمینه و نرخ سرعت پردازش<sup>۱۷</sup> و خدمات را پیشینه می‌کند. با توجه به بررسی تحقیقات گذشته، توابع چندهدفه-ای که شامل هزینه‌های راه‌اندازی، خرید، سفارش، تولید توسط پیمانکار خارجی و هدف زمان سپری‌شده در داخل زنجیره تأمین باشند، چندان مورد توجه محققان قرار نگرفته است. همچنین، در بیشتر تحقیقات انجام‌شده تقاضای هر توزیع‌کننده را فقط یک تسهیل پاسخ می‌دهد که در بیشتر اوقات در عمل این‌گونه نیست و هر مرکز توزیع از چندین تسهیل می‌تواند سرویس دریافت کند. با توجه به اهمیت هزینه‌هایی که بر زنجیره‌های تأمین تحمیل شده و شکاف‌های مطالعاتی که در این راستا مشاهده کرده‌ایم، یک مدل مکان‌یابی و تخصیص با دو هدف هزینه و زمان برای یک زنجیره تأمین سه‌سطحی با تأمین‌کنندگان خارجی و با توجه به فاصله‌های خطی مستقیم بین آن‌ها ارائه کرده‌ایم. در این مدل هر توزیع‌کننده با چندین تسهیل و هر تسهیل با چندین تأمین‌کننده می‌تواند ارتباط داشته باشد.

### ۳- تعریف مدل پیشنهادی

مسائل مکان‌یابی و تخصیص به‌عنوان مسائل تصمیم استراتژی در مدیریت زنجیره تأمین در حال گسترش هستند (هو و همکاران، ۲۰۰۸). در این مسائل سه استراتژی مکان‌یابی تسهیلات، تخصیص شبکه توزیع و مقدار توزیع در داخل زنجیره تأمین که با یکدیگر مرتبط هستند، تعیین می‌شوند. در این مطالعه مدل ارائه‌شده، یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط<sup>۱۸</sup> است که هدف‌های مدل شامل موارد زیر است:

زنجیره تأمین در این مدل شامل سه سطح کارخانه‌ها، توزیع‌کنندگان و تأمین‌کنندگان خارجی است که با یکدیگر ارتباط چندگانه دارند. شکل (۱) مسئله مکان‌یابی و تخصیص در زنجیره تأمین سه‌سطحی با تأمین‌کنندگان خارجی را نشان می‌دهد.

هزینه راه‌اندازی، هزینه حمل‌ونقل، هزینه سفارش، هزینه خرید، هزینه تولید توسط کارخانه و پیمانکار خارجی و زمان سپری شده در داخل زنجیره تأمین



شکل (۱) زنجیره تأمین سه‌سطحی با تأمین‌کنندگان خارجی

$ol_{ki}$ : هزینه خرید هر واحد ماده اولیه کارخانه نام از تأمین‌کننده نام اگر مقدار سفارش از  $p_k$  کمتر باشد.

اندیس‌ها، توابع هدف، پارامترها و متغیرهای تصمیم استفاده شده در این مقاله به شرح زیر است: مجموعه اندیس‌ها:

$oh_{ki}$ : هزینه خرید هر واحد ماده اولیه کارخانه در سایت نام از تأمین‌کننده نام اگر مقدار سفارش بزرگ‌تر یا مساوی  $p_k$  بیشتر باشد.

$i=1,2,\dots,n$ : اندیس مربوط به کارخانه‌ها  
 $j=1,2,\dots,m$ : اندیس مربوط به مراکز توزیع  
 $k=1,2,\dots,K$ : اندیس مربوط به تأمین‌کنندگان

$u_i$ : هزینه تولید هر واحد کالا در کارخانه نام  
 $w_i$ : هزینه تولید هر واحد کالا توسط پیمانکار خارجی برای کارخانه نام

توابع هدف  
 $F_1$ : هزینه کل زنجیره تأمین  
 $F_2$ : زمان کل سپری شده در زنجیره تأمین پارامترها

$Q_i$ : حداکثر ظرفیت تولید کارخانه نام  
 $e$ : ظرفیت حمل کالای هر وسیله نقلیه  
 $r_i$ : حداکثر تعداد وسیله نقلیه موجود در کارخانه نام نام

$D_j$ : تقاضای کل مشتریان از مرکز توزیع نام  
 $f_i$ : هزینه ثابت راه‌اندازی کارخانه در سایت نام  
 $l_{ki}$ : هزینه سفارش کارخانه نام از تأمین‌کننده نام

$c_{ij}$ : هزینه هر واحد طی شده توسط یک وسیله نقلیه از کارخانه نام به مرکز توزیع نام

$p_k$ : مرز تخفیف خرید از تأمین‌کننده نام

<p><math>z_{ki}</math>: یک متغیر پیوسته است و نسبتی از تقاضای ماده اولیه کارخانه نام که تأمین کننده نام آن را برآورده می کند را نشان می دهد.</p> <p><math>ss_{ki}</math>: مقدار ماده اولیه فرستاده شده از تأمین کننده نام به کارخانه نام</p> <p><math>o_{ki}</math>: هزینه خرید هر واحد ماده اولیه کارخانه نام از تأمین کننده نام</p> <p><math>s_i</math>: کل کالای ارسال شده از کارخانه نام</p> <p><math>g_i</math>: مقدار کالای تولید شده توسط پیمانکار خارجی برای کارخانه نام</p> <p><math>v_{ij}</math>: تعداد وسیله نقلیه فرستاده شده از کارخانه نام به مرکز توزیع نام</p> <p>فرض های ذیل برای توسعه مدل در نظر گرفته شده اند:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>۱. کمبود جایز نیست.</li> <li>۲. تقاضا برای یک دوره است.</li> <li>۴. ظرفیت تأمین کنندگان خارجی نامحدود است.</li> <li>۵. ظرفیت تولید هر کارخانه محدود است اما با استفاده از پیمانکار خارجی می تواند به مازاد ظرفیت پاسخ دهند.</li> <li>۶. زنجیره تأمین برای یک نوع کالا و یک نوع ماده اولیه است.</li> <li>۷. ارتباط چندگانه بین تأمین کننده ها و کارخانه ها وجود دارد.</li> <li>۸. ارتباط چندگانه بین کارخانه ها و توزیع کننده ها وجود دارد.</li> <li>۹. مکان تأمین کننده ها، توزیع کننده ها و سایت هایی برای احداث کارخانه ها مشخص و معلوم هستند.</li> </ol>	<p><math>tu_i</math>: مدت زمان تولید کالا در کارخانه نام</p> <p><math>tw_i</math>: مدت زمان تولید کالا توسط پیمانکار خارجی برای کارخانه نام</p> <p><math>tz_{ki}</math>: مدت زمان طی شده از تأمین کننده نام به کارخانه نام به ازای هر واحد طی شده</p> <p><math>tx_{ij}</math>: مدت زمان طی شده از کارخانه نام به توزیع کننده نام به ازای هر واحد طی شده</p> <p><math>(a_i, b_i)</math>: مختصات کارخانه در سایت نام</p> <p><math>(a_j, b_j)</math>: مختصات مرکز توزیع نام</p> <p><math>(a_k, b_k)</math>: مختصات تأمین کننده نام</p> <p><math>d_{ij}</math>: فاصله متعامد بین کارخانه نام و مرکز توزیع نام</p> <p><math>dd_{ki}</math>: فاصله متعامد بین تأمین کننده نام و کارخانه نام</p> <p>متغیرهای تصمیم</p> <p><math>y_i</math>: یک متغیر صفر و یک است که اگر کارخانه نام در سایت نام احداث شود برابر یک، و در غیر این صورت صفر می شود.</p> <p><math>xx_{ij}</math>: ارتباط بین کارخانه نام و مرکز توزیع نام است که اگر کالایی از کارخانه نام به مرکز توزیع نام ارسال شود برابر یک، و در غیر این صورت صفر می شود.</p> <p><math>zz_{ki}</math>: ارتباط بین تأمین کننده نام و کارخانه نام است که اگر ماده اولیه ای از تأمین کننده نام به کارخانه نام ارسال شود برابر یک، و در غیر این صورت صفر می شود.</p> <p><math>x_{ij}</math>: یک متغیر پیوسته است و نسبتی از تقاضای کالای مرکز توزیع نام که کارخانه نام آن را برآورده می کند را نشان می دهد.</p>
--	---

توابع هدف و محدودیت‌های مدل به صورت زیر هستند:

$$\text{Min } F_1 = \sum_{i=1}^n f_i y_i + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n l_{ki} z_{ki} + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n o_{ki} s_{ki} + \sum_{i=1}^n u_i (s_i - g_i) + \sum_{i=1}^n w_i g_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} d_{ij} v_{ij} \quad (1)$$

$$\text{Min } F_2 = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n t z_{ki} z_{ki} d_{ki} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m t x_{ij} x_{ij} d_{ij} + \sum_{i=1}^n t u_i (s_i - g_i) + \sum_{i=1}^n t w_i g_i \quad (2)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^n y_i \geq 1 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

$$x_{ij} \leq y_i \quad i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

$$v_{ij} = (x_{ij} D_j / e) \times (1 - \theta_{ij}) + ([x_{ij} D_j / e] + 1) \times (\theta_{ij}) \quad i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

$$x_{ij} D_j / e - [x_{ij} D_j / e] \leq \theta_{ij} \leq (x_{ij} D_j / e - [x_{ij} D_j / e]) M \quad i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^m v_{ij} \leq r_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$s_i = \sum_{j=1}^m x_{ij} D_j \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$$g_i = \max\{0, s_i - Q_i\} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^K s_{ki} = s_i - g_i \quad i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, K \quad (11)$$

$$o_{ki} = ol_{ki} (1 - \alpha_{ki}) + oh_{ki} (\alpha_{ki}) \quad i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, K \quad (12)$$

$$\left[ \frac{ss_{ki}}{P_k} \right] - \left[ \frac{ss_{ki}}{P_k} - 1 \right] \leq \alpha_{ki} \leq \left[ \frac{ss_{ki}}{P_k} \right] \quad i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, K \quad (13)$$

$$d_{ij} = |a_i - a_j| + |b_i - b_j| \quad i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

$$dd_{ki} = |a_k - a_i| + |b_k - b_i| \quad i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, K \quad (15)$$

$$z_{ki} = \frac{ss_{ki}}{s_i - g_i} \quad i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, K \quad (16)$$

$$x_{ij} \leq x x_{ij} \leq x_{ij} M \quad i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \quad (17)$$

$$z_{ki} \leq z z_{ki} \leq z_{ki} M \quad i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, K \quad (18)$$

$$\theta_{ij} \in \{0, 1\} \quad i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \quad (19)$$

$$\alpha_{ki} \in \{0, 1\} \quad i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, K \quad (20)$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (21)$$

$$zz_{ki} \in \{0,1\} \quad i = 1,2,\dots,n, k = 1,2,\dots,K \quad (22)$$

$$xx_{ij} \in \{0,1\} \quad i = 1,2,\dots,n, j = 1,2,\dots,m \quad (23)$$

$$x_{ij}, v_{ij}, s_i, g_i \geq 0 \quad i = 1,2,\dots,n, j = 1,2,\dots,m \quad (24)$$

$$z_{ki}, ss_{ki}, o_{ki} \geq 0 \quad i = 1,2,\dots,n, k = 1,2,\dots,K \quad (25)$$

(۱۱) مقدار مواد اولیه‌ای که هر تأمین‌کننده به هر کارخانه ارسال می‌کند، مشخص می‌شود. محدودیت (۱۲) قیمت خرید هر واحد ماده اولیه خریداری شده از هر توزیع‌کننده برای هر کارخانه را نشان می‌دهد. در محدودیت (۱۳) نیز مقدار  $\alpha_{ki}$  مشخص می‌شود؛ اگر مقدار ماده اولیه سفارش داده شده به تأمین‌کننده  $k$  از کارخانه  $i$  کوچک‌تر از مرز تخفیف خرید ( $p_k$ ) باشد عدد صفر، و در غیر این صورت عدد یک می‌شود.

در محدودیت‌های (۱۴) و (۱۵) به ترتیب فاصله متعامد هر کارخانه از هر توزیع‌کننده و هر تأمین‌کننده از هر کارخانه محاسبه می‌شود. محدودیت (۱۶) مقدار درصد ماده اولیه‌ای که از هر تأمین‌کننده به هر کارخانه ارسال می‌شود را نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۱۷) و (۱۸) نیز به ترتیب ارتباط بین کارخانه  $i$  و توزیع‌کننده  $j$  ( $xx_{ij}$ )، و تأمین‌کننده  $k$  و کارخانه  $i$  ( $zz_{ki}$ ) را بیان می‌کنند؛ در این محدودیت‌ها،  $M$  نشان‌دهنده یک عدد مثبت خیلی بزرگ است. محدودیت‌های (۱۹) و (۲۰) نیز به ترتیب محدوده تغییرات  $\theta_{ij}$  و  $\alpha_{ki}$  را نشان می‌دهند. محدودیت‌های (۲۱)، (۲۲) و (۲۳) متغیرهای تصمیم دودویی را بیان می‌کنند. در نهایت، محدودیت‌های (۲۴) و (۲۵) متغیرهای تصمیم پیوسته را نشان می‌دهند.

تابع هدف (۱) مجموع هزینه‌های راه‌اندازی، سفارش‌دهی، خرید، تولید کارخانه و پیمانکار خارجی و حمل‌ونقل را محاسبه می‌کند. تابع هدف (۲) مجموع زمان شبکه توزیع از تأمین‌کنندگان تا توزیع‌کنندگان را محاسبه می‌کند. محدودیت (۳) بیان می‌کند که حداقل یک کارخانه باید راه‌اندازی شود تا تقاضاهای توزیع‌کنندگان پاسخ داده شود. در محدودیت (۴) مجموع نسبت کالایی که هر توزیع‌کننده از کل کارخانه‌ها می‌گیرد، باید برابر یک باشد تا کل تقاضای هر توزیع‌کننده پاسخ داده شود. در محدودیت (۵) تضمین می‌کند که توزیع‌کنندگان می‌توانند از کارخانه‌ای که احداث شده است، کالا دریافت کنند.

محدودیت (۶) تعداد وسایل نقلیه‌ای که از هر کارخانه به هر توزیع‌کننده ارسال می‌شود را مشخص می‌کند. در محدودیت (۷) مقدار  $\theta_{ij}$  مشخص می‌شود؛ اگر مقدار کالای ارسالی از کارخانه  $i$  به توزیع‌کننده  $j$  ضریب صحیحی از ظرفیت وسیله نقلیه ( $e$ ) باشد عدد صفر، و در غیر این صورت عدد یک می‌شود. محدودیت (۸) تضمین می‌کند که کل وسایل نقلیه ارسالی از هر کارخانه حداکثر باید برابر با ظرفیت وسایل نقلیه موجود در آن کارخانه ( $f_i$ ) باشد. محدودیت‌های (۹) و (۱۰) به ترتیب مقدار کل کالای ارسالی از هر کارخانه و مقدار تولید کالای هر پیمانکار خارجی را مشخص می‌کنند. در محدودیت



#### ۴- روش حل مدل

در این مطالعه یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط برای مسئله مکان‌یابی و تخصیص ارائه شده است. و به دلیل پیچیدگی محاسباتی مسائل مکان‌یابی و تخصیص، استفاده از روش‌های عمومی (دقیق) بهینه‌سازی برای آن‌ها معمولاً بسیار زمان‌بر و دشوار است (وانگ و چن، ۲۰۰۹). از همین رو، محققان برای حل این نوع مسائل به سوی استفاده از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری سوق پیدا کرده‌اند. در میان این روش‌ها، الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های بسیار امیدوارکننده و مناسب برای بررسی مسائل مکان‌یابی و تخصیص است (وانگ و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین تومونوبو و همکاران (۲۰۰۴) نشان دادند که الگوریتم ژنتیک کارایی مناسبی برای مکان‌یابی بهینه تسهیلات دارد. اما در این مطالعه برای حل و بررسی صحت اطلاعات و کارایی الگوریتم ژنتیک از یک روش فراابتکاری دیگری به نام الگوریتم شبیه‌سازی تبرید چندجمعیتی نیز استفاده شده است. از مهم‌ترین کاربردهای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید می‌توان به بررسی مسائل مکان‌یابی و تخصیص اشاره کرد (عالم تبریز و همکاران، ۱۳۹۰).

#### ۴-۱- الگوریتم ژنتیک (GA)

ایده اصلی الگوریتم‌های تکاملی در سال ۱۹۶۰ میلادی را ریچنبرگ مطرح کردند (عالم تبریز و همکاران، ۱۳۹۰). در حقیقت الگوریتم ژنتیک جزء الگوریتم‌های تکاملی<sup>۱۹</sup> است که از نظام طبیعت منشأ گرفته شده است (والترز و شیبیلی<sup>۲۰</sup>، ۱۹۹۳). الگوریتم ژنتیک را برای اولین بار پروفیسور هالند در

سال ۱۹۷۵ مطرح کرد. این الگوریتم جزء الگوریتم‌های بهینه‌سازی تصادفی محسوب می‌شود (گلدبرگ و هالند، ۱۹۸۸). الگوریتم‌های ژنتیک برای حل مسائل بهینه‌سازی سخت که تابع هدف آن‌ها چندهدفه و غیرخطی باشد، بسیار مناسب است (هالند، ۱۹۷۵).

#### ۴-۱-۱- ساختار الگوریتم ژنتیک

در این مقاله، الگوریتم ژنتیک برای کمینه‌کردن اهداف هزینه و زمان، و با توجه به محدودیت‌های مدل مکان‌یابی و تخصیص ارائه شده است. الگوریتم ژنتیک پیشنهادی از سه تصمیم کلیدی تشکیل شده است: (۱) چه تعداد کارخانه و در چه مکان‌هایی باید راه‌اندازی شوند؛ (۲) کارخانه‌ها به کدام مراکز توزیع کالا و چه مقدار کالا بفرستند و (۳) کارخانه‌ها از کدام تأمین‌کنندگان مواد اولیه و چه مقدار دریافت کنند. در ابتدا الگوریتم به صورت تصادفی، کروموزوم‌های<sup>۲۱</sup> جمعیت اولیه<sup>۲۲</sup> را تولید می‌کند که هر کروموزوم از سه قسمت  $x_{ij}$ ،  $y_i$  و  $z_{ki}$  تشکیل شده‌اند. دیگر متغیرهای تصمیم مدل لازم به استفاده در کروموزوم پیشنهادی نیستند، زیرا با استفاده از سه متغیر تصمیم ( $x_{ij}$ ،  $y_i$  و  $z_{ki}$ ) و روابطی که بین آن‌ها با دیگر متغیرها وجود دارد، می‌توان متغیرهای دیگر را به دست آورد.  $pop1$  جمعیت والدین در هر نسل<sup>۲۳</sup> تولید شده و  $pop2$  و  $pop3$  به ترتیب جمعیت فرزندان است که از تقاطع<sup>۲۴</sup> و جهش<sup>۲۵</sup> در والدین به دست آمده است. در این الگوریتم با توجه به ساختار کروموزوم‌های پیشنهادی و متغیرهای تصمیم مسئله، از تقاطع تک‌نقطه‌ای و جهش تصادفی استفاده شده است؛ زیرا نسبت به اپراتورهای دیگر برای این

اتصال ژن‌ها به یکدیگر و با توجه به پارامترهای متغیر مسئله یعنی  $y_i$  (مکان کارخانه) و  $x_{ij}$ ،  $z_{ki}$  (مسیرهای توزیع) به وجود می‌آید. چنانچه هر یک از کروموزوم‌ها در محدودیت‌های (۳)، (۵)، (۱۶)، (۲۱)، (۲۴) و (۲۵) صدق کنند، ژن‌ها به صورت تصادفی تولید می‌شوند. همچنین هر قسمت این کروموزوم‌ها به صورت تصادفی به وجود می‌آیند. ژن‌های قسمت  $y_i$  عدد دودویی صفر یا یک، و ژن‌های  $x_{ij}$ ،  $z_{ki}$  متغیر پیوسته بین صفر و یک هستند. شکل (۲) مثالی از ساختار کروموزوم را برای ۲ کارخانه با ۲ تأمین‌کننده و ۲ توزیع‌کننده نشان می‌دهد.

$z_{11}$	$z_{12}$	$z_{21}$	$z_{22}$	$y_1$	$y_2$	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{21}$	$x_{22}$
۰.۲	۰	۰.۸	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱

ارتباط بین کارخانه ۱ و مرکز توزیع ۲  
 راه‌اندازی کارخانه در سایت ۱  
 ارتباط بین کارخانه ۲ و تأمین‌کننده ۱

شکل (۲) ساختار کروموزوم

این الگوریتم پیشنهادی از روش تقاطع تک‌نقطه‌ای برای هر سه قسمت کروموزوم استفاده شده است. در ابتدا دو والد از  $pop1$  انتخاب می‌شوند و سپس یک عدد تصادفی  $I$  در بازه ۱ تا  $n-1$  برای اندیس  $i$  (کارخانه‌ها) تولید می‌شود که هر سه قسمت دو والد براساس آن تغییر می‌کنند. در دو والد ژن‌هایی که شماره  $I$  در اندیس  $i$  را دارند با یکدیگر عوض شده، و بر اساس محدودیت‌های مدل تغییر می‌کنند. تعداد کروموزوم‌هایی که از تقاطع والدین حاصل شده، در

مسئله، سرعت همگرایی<sup>۲۶</sup> را بیشتر می‌کنند. در نهایت الگوریتم، تابع برازش<sup>۲۷</sup> را برای هر نسل بررسی و عملگرها را اجرا می‌کند تا آنجایی که شرط توقف حاصل شود. اگر شرط توقف حاصل نشد، الگوریتم با استراتژی انتخاب به تولید نسل جدید می‌پردازد و عملگرها را دوباره اجرا می‌کند. این رویه الگوریتم پیشنهادی آنقدر تکرار می‌شود تا شرط توقف حاصل شود.

#### ۴-۱-۲- ساختار کروموزوم

نخستین گام در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، کدگذاری کردن ژن‌های کروموزوم مسئله است (زرین‌پور و همکاران، ۱۳۸۹). هر کروموزوم از

#### ۴-۱-۳- نسل اولیه

در این قدم به تعداد جمعیتی که موردنیاز است، کروموزوم به صورت تصادفی تولید می‌شود. تعداد کروموزوم‌هایی که از این قدم حاصل شده است، در  $pop1$  ذخیره می‌شوند.

#### ۴-۱-۴- عملگر تقاطع

با اعمال عملگر تقاطع بر والدین ( $pop1$ )، دو نوزاد با ترکیب ساختار والدین به وجود می‌آیند. در

فضای جواب موضعی خاص دور می‌کند (زرین‌پور و همکاران، ۱۳۸۹). در این الگوریتم از عملگر جهش تصادفی استفاده می‌شود. بدین صورت که یک عدد تصادفی در بازه ۱ تا  $n$  انتخاب می‌شود و ژن موجود در قسمت  $i$  کروموزوم معکوس می‌شود.

pop2 ذخیره می‌شوند. در شکل (۳) رویه کار تقاطع تک‌نقطه‌ای با عدد تصادفی یک ملاحظه می‌شود.

#### ۴-۱-۵- عملگر جهش

عملگر جهش موجب تغییرات تصادفی در کروموزوم‌های الگوریتم می‌شود و آن‌ها را از یک



شکل (۳) تقاطع تک‌نقطه‌ای

محدودیت‌های موجود ترمیم می‌شود. مثالی از عملگر جهش را در شکل (۴) می‌توان ملاحظه کرد.

کروموزوم جدید با معکوس کردن ژن  $i$  و براساس روابطی که  $y_i$  با ژن‌های  $x_{ij}$  و  $z_{ki}$  دارد، بوجود می‌آید. سپس کروموزوم به‌وجودآمده براساس



شکل (۴) عملگر جهش

$F_1^*$  و  $F_2^*$  به‌ترتیب بهترین جواب‌های به‌دست‌آمده برای توابع هدف هزینه و زمان هستند.

#### ۴-۱-۶- تابع برازش

تابع برازش الگوریتم به‌دلیل دوهدفه‌بودن مدل با استفاده از روش معیار جامع<sup>۲۸</sup> با نرْم یک برای هر نسل محاسبه شده است. تابع برازش الگوریتم پیشنهادی به‌صورت تابع (۲۶) است؛ مقدار  $\sigma$  برحسب درجه اولویت تصمیم‌گیرنده که هزینه‌ها یا زمان سپری‌شده ارجح‌تر هستند، داده می‌شود.

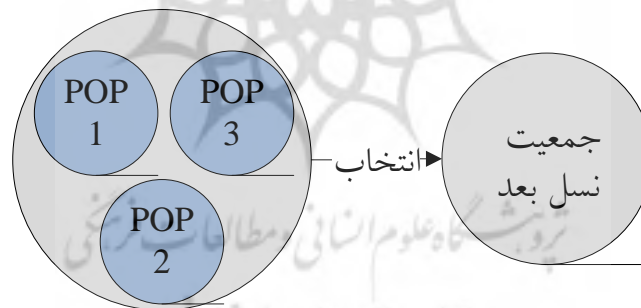
#### ۴-۱-۷- تابع جریمه

با توجه به محدودیت (۹) بعضی از کروموزوم‌های تولیدشده ممکن است موجه نباشند. از همین‌رو، در این الگوریتم برای بررسی محدودیت‌های مدل از سیاست جریمه استفاده شده است؛ در این الگوریتم جریمه به‌صورت یک عدد

$$F = \left[ \sigma \times \left( \frac{F_1 - F_1^*}{F_1^*} \right)^\pi + (1 - \sigma) \times \left( \frac{F_2 - F_2^*}{F_2^*} \right)^\pi \right]^{1/\pi} \quad (26)$$

بر اساس ادغام بهترین‌ها استفاده شده است. ادغام بهترین کروموزوم‌ها روشی برای نگهداری کروموزوم‌هایی با بهترین تابع برازش در هر نسل جدید است. در این استراتژی کروموزوم‌های داخل  $pop1$ ،  $pop2$  و  $pop3$  با توجه به تابع برازش به ترتیب از کمترین به بیشترین مرتب می‌شوند و به تعداد جمعیت  $pop1$  برای نسل اولیه مرحله بعد، کروموزوم‌هایی با بهترین تابع برازش (حداقل‌ترین) انتخاب می‌شوند.

استراتژی فوق‌الگوریتم ژنتیک را مجبور می‌کند همواره بهترین کروموزوم‌ها را در هر نسل نگه دارد. مکانیزم انتخاب الگوریتم در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۵) مکانیزم انتخاب

ثابت خیلی بزرگ است. با در نظر گرفتن فرم کلی محدودیت‌های مدل که به صورت  $g(x) \leq B$  است، مقدار جریمه برای یک جواب به صورت معادله (۲۷) تعریف می‌شود.

$$N(x) = M \times \text{Max} \left\{ \left( \frac{g(x)}{B} - 1 \right), 0 \right\} \quad (27)$$

در معادله (۲۷)  $M$ ،  $g(x)$  و  $N(x)$  به ترتیب نشان‌دهنده یک مقدار بزرگ، محدودیت و جریمه اعمال‌شده بر جواب  $x$  هستند.

#### ۴-۱-۸- استراتژی انتخاب

در الگوریتم‌های ژنتیک، زمانی که از عملگرهای ژنتیک (تقاطع و جهش) استفاده می‌شود، ممکن است بهترین کروموزوم‌ها از دست بروند. از این رو، در این مقاله از استراتژی انتخاب در هر نسل برای نسل بعد،

#### ۴-۱-۱۰- تنظیم پارامتر و همگرایی GA

الگوریتم ژنتیک ارائه‌شده با نرم‌افزار *Matlab* نسخه ۷ کد شده و بر روی یک سیستم پنتیوم پنج با ۱٫۸ گیگاهرتز برای حل مسئله، اجرا شده است. مجموعه پارامترهای استفاده‌شده در زنجیره تأمین سه‌سطحی در جدول (۱) آمده است. برای تنظیم

#### ۴-۱-۹- شرط توقف

در الگوریتم ژنتیک از شرط توقف‌هایی مانند تعداد تکرارهای مشخص و یا حاصل‌نشدن بهبود از نسلی به نسل بعد، استفاده می‌شود. در این الگوریتم پیشنهادی اگر از نسلی به نسل بعد بهبودی صورت نگیرد (رسیدن به همگرایی) توقف حاصل می‌شود.

جدول (۲) نشان داده شده است. همچنین در شکل (۶) میانگین و بهترین تابع برازش برای هر نسل ملاحظه می‌شود.

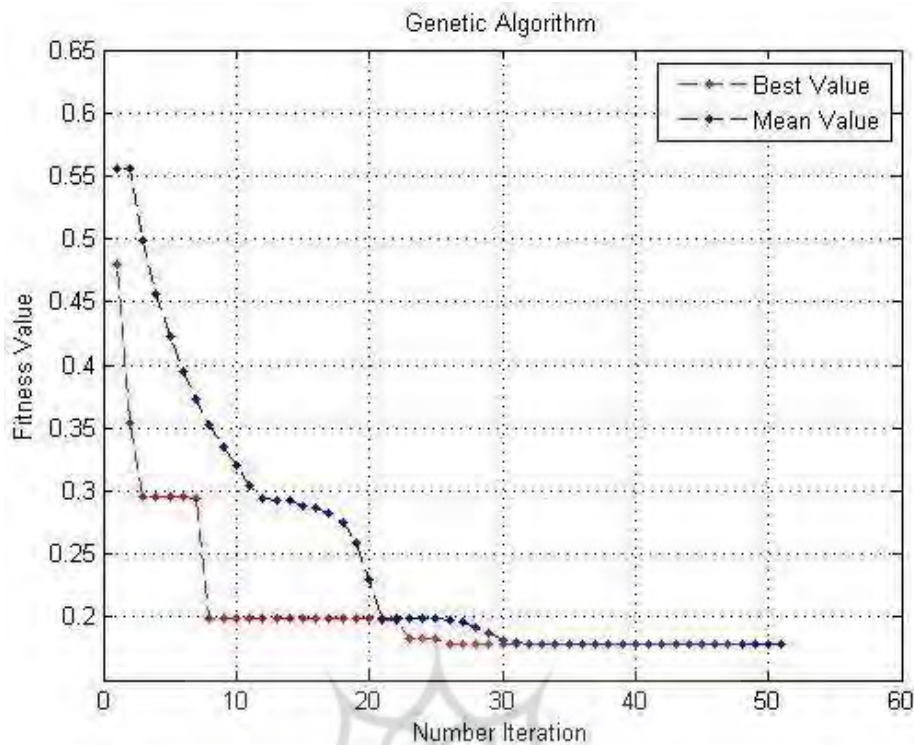
پارامترها و همگرایی الگوریتم از یک مثال عددی با  $n=2$ ,  $m=3$  و  $k=3$  از روش RSM در برنامه Minitab14 برای تنظیم پارامترهای الگوریتم استفاده شده است. جواب بهینه‌شده پارامترهای الگوریتم در

جدول (۱) مقدار پارامترهای استفاده‌شده در مدل

معیار	پارامترها (واحد)
$f_i \sim U(20000, 40000)$	هزینه راه‌اندازی کارخانه در سایت $i$ (در هزار)
$l_{ki} \sim U(50, 100)$	متوسط هزینه سفارش مواد اولیه از مرکز تأمین $k$ توسط کارخانه $i$ (در هزار/کالا)
$ol_{ki} \sim U(80, 130)$	کمترین هزینه خرید مواد اولیه از مرکز تأمین $k$ توسط کارخانه $i$ (در هزار/کالا)
$oh_{ki} \sim U(140, 180)$	بیشترین هزینه خرید مواد اولیه از تأمین‌کننده $k$ توسط کارخانه $i$ (در هزار)
$p_k \sim U(100, 120)$	مرز تخفیف خرید تأمین‌کننده $k$ (در کالا)
$Q_i \sim U(300, 600)$	حداکثر ظرفیت تولید کارخانه $i$ (در کالا)
$u_i \sim U(100, 200)$	هزینه تولید هر واحد کالا در کارخانه $i$ (در هزار/کالا)
$w_i \sim U(150, 250)$	هزینه تولید هر واحد کالا توسط پیمانکار خارجی برای کارخانه $i$ (در هزار/کالا)
$c_{ij} \sim U(10, 20)$	هزینه هر واحد کالای حمل‌شده توسط وسیله نقلیه از کارخانه $i$ به مرکز توزیع $j$ (در هزار/کیلومتر)
$D_j \sim U(300, 500)$	تقاضای کل مشتریان از مرکز توزیع $j$ (در کالا)
$tw_i \sim U(500, 700)$	مدت زمان تولید یک واحد کالا توسط پیمانکار خارجی برای کارخانه $i$ (در دقیقه/کالا)
$tu_i \sim U(400, 600)$	مدت زمان تولید یک واحد کالا در کارخانه $i$ (در دقیقه/کالا)
$tz_{ki} \sim U(15, 20)$	مدت زمان طی شده از توزیع‌کننده به کارخانه به‌ازای هر واحد (در دقیقه/کیلومتر)
$tx_{ij} \sim U(10, 15)$	مدت زمان طی شده وسیله نقلیه از کارخانه به تأمین‌کننده به‌ازای هر واحد (در دقیقه/کیلومتر)
$e \sim U(20, 30)$	ظرفیت هر وسیله نقلیه (در کالا)
$r_i \sim U(20, 40)$	حداکثر تعداد وسایل نقلیه برای هر کارخانه $i$

جدول (۲) مقدار بهینه پارامترهای الگوریتم پیشنهادی

nPOP	Pcr	Pmu	بهینه‌سازی پاسخ
۱۰۰	۰٫۸	۰٫۰۰۱	حد پایین
۲۰۰	۰٫۹۸	۰٫۱	مقدار مناسب
۳۰۰	۱	۰٫۱	حد بالا



شکل (۶) تابع برازش هر نسل

حرارت داده شده و سپس به تدریج سرد می‌شود تا شبکه بلورینی حاصل شود و توزیع احتمال انرژی خود را حداقل کند. در الگوریتم‌های بهینه‌سازی محلی جواب جدید تنها در صورت بهبود تابع هدف پذیرفته می‌شود. این در حالی است که در شبیه‌سازی تبرید، نه تنها جوابی که باعث بهبود تابع هدف می‌شود، پذیرفته می‌شود، بلکه جواب‌های نامناسب نیز به‌طور احتمالی پذیرفته می‌شوند تا در این الگوریتم از به‌دام افتادن در منطقه بهینه محلی جلوگیری شود. تابع احتمالی که موجب جلوگیری از یک جواب بهینه محلی می‌شود، به‌صورت زیر است:

$$P(\Delta F) = h \frac{-\Delta}{T} \quad (28)$$

$$\Delta F(T) = F_e(T) - F_{e-1}(T) \quad (29)$$

#### ۴-۲- الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (SA)

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید یک روش قدم‌به‌قدم و بهبودیافته الگوریتم‌های جستجوی محلی است (سواپلا<sup>۲۹</sup>، ۱۹۹۵). مفهوم شبیه‌سازی تبرید در واقع یک قیاس بین فرایند آیل کردن فیزیکی در جامدات و فرایند حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی<sup>۳۰</sup> است. این الگوریتم را اولین بار کریک پاتریک و همکاران (۱۹۸۳) ارائه کردند و بر اساس ایده‌های مطرح‌شده در اوایل دهه ۱۹۵۰ توسط متروپولیس و همکاران، منتشر شد. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به‌دلیل پیاده‌سازی آسان و همگرا نشدن به یک جواب بهینه محلی<sup>۳۱</sup> از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند (یقینی و همکاران، ۱۳۸۹).

این الگوریتم فرایند بازپخت را شبیه‌سازی می‌کند. در این فرایند ابتدا یک ماده تا حد ذوب شدن

زیربخش (۴-۱-۶) و تابع جریمه برای محدودیت (۹) مانند زیربخش (۴-۱-۷) است.

#### ۴-۲-۲- ساختار همسایگی SA

کارایی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به مقدار زیادی به تابع همسایگی استفاده‌شده در آن بستگی دارد. تعداد همسایگی در این الگوریتم برابر با تعداد سایت موجود برای احداث کارخانه در نظر گرفته شده است. همچنین ساختار همسایگی الگوریتم به صورت تصادفی مانند جهش تصادفی در بخش (۴-۱-۵) است. رویه کار این گونه است که یک عدد تصادفی بین ۱ تا  $n$  تولید و سپس ژن مربوط به قسمت  $y_i$  آن معکوس می‌شود. سپس دو قسمت  $x_{ij}$  و  $z_{ki}$  با ارتباط با مکان کارخانه به صورت تصادفی تولید می‌شوند.

#### ۴-۲-۳- تنظیم پارامتر SA

در این الگوریتم از شبیه‌سازی تبرید چندجمعیتی استفاده شده است. در این بخش برای تنظیم پارامتر نیز مانند زیربخش (۴-۱-۱۰) عمل شده و تعداد جمعیت مناسب ۵۰ به دست آمده است.

#### ۵- تجزیه و تحلیل نتایج

در این تحقیق نتایج محاسباتی الگوریتم ژنتیک، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و ابزار بهینه‌سازی IBM ILOG CPLEX 12.4 برای مسائلی با ابعاد مختلف از نظر تعداد سایت‌های کارخانه، تأمین‌کنندگان و توزیع‌کنندگان با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

در این روابط،  $T$  نشان‌دهنده درجه حرارت در مرحله  $h$  و  $F(T)$  میزان تغییرات تابع هدف در دردمای  $T$  است. در شبیه‌سازی ارائه‌شده، معادله (۲۹) تغییر انرژی حاصله را اندازه‌گیری می‌کند. اگر انرژی کاهش یافته باشد ( $F < 0$ )، سیستم به حالت جدید می‌رود. اگر هم انرژی افزایش یافته باشد ( $F > 0$ )، حالت جدید با احتمال ذکرشده و رابطه (۳۰) پذیرفته می‌شود.

$$P(\Delta F) > G; G \sim U[0,1] \quad (30)$$

در رابطه (۳۰)  $G$  یک عدد تصادفی کوچک‌تر از یک است. این رابطه موجب می‌شود تا احتمال پذیرش حرکت اشتباه کاهش یابد. زیرا با این رابطه، احتمال پذیرش حرکت اشتباه تابعی از هر دو عامل، دمای سیستم و تغییرات در تابع هدف است (عالم-تبریز و همکاران، ۱۳۹۰).

#### ۴-۲-۱- ساختار الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

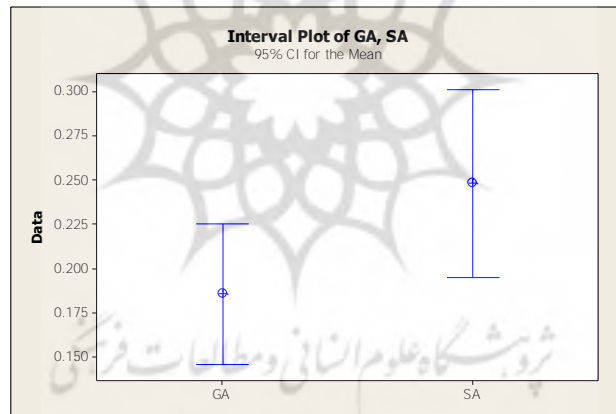
رویه کار الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به این گونه است که جواب موجه  $s$  با تابع هدف  $R: s \rightarrow f$  را داریم جواب الگوریتم شبیه‌سازی تبرید نیز مانند ساختار کروموزوم ارائه‌شده در زیربخش (۴-۱-۲) است. در هر تکرار از الگوریتم، مجموعه جواب‌هایی موجه تولید می‌شود و براساس تابع احتمال (۲۸) و تغییرات انرژی، این جواب‌ها در همان حالت  $s$  باقی می‌مانند یا به حالت همسایه‌ای  $s'$  می‌روند. این روند تا زمانی تکرار می‌شود تا شرایط توقف حاصل شود. معیار توقف در این الگوریتم (مانند الگوریتم ژنتیک پیشنهادی) این است که از نسلی به نسل بعد بهبود صورت نگیرد (الگوریتم همگرا شده است).

در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید تابع برآزش مانند

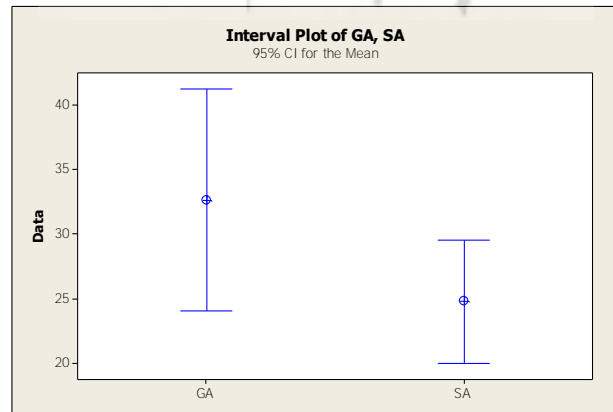
جدول (۳) نتایج محاسباتی مدل برای مسائلی با ابعاد مختلف

اندازه مسائل			ILOG CPLEX		GA		SA	
K	n	M	تابع برازش	زمان حل (ثانیه)	تابع برازش	زمان حل (ثانیه)	تابع برازش	زمان حل (ثانیه)
۱	۲	۲	۰/۱۳۸۷۸۷۸	۱	۰/۱۳۸۷۸۷۸	۲۱/۴۱۳۴۵۱	۰/۱۳۸۷۸۷۸	۱۸/۴۵۲۶۶۱
۳	۲	۳	۰/۱۳۸۸۴۱۲	۱	۰/۱۳۸۸۴۱۲	۲۲/۲۳۵۴۳۴	۰/۱۴۱۱۹۸۷	۱۹/۵۲۱۲۳۵
۵	۴	۵	۰/۱۴۰۰۱۱۲	۳	۰/۱۴۳۵۹۲۳	۲۵/۰۱۲۴۹۲	۰/۱۸۹۸۸۲	۱۹/۸۷۵۴۹۱
۸	۸	۸	-	-	۰/۱۴۷۶۰۴۱	۲۶/۸۷۵۲۶۵	۰/۲۰۸۷۹۱۲	۲۰/۷۴۹۶۷۷
۹	۸	۹	-	-	۰/۱۵۱۶۰۴۱	۲۷/۳۲۵۴۸۴	۰/۲۵۸۴۱۲۸	۲۰/۸۶۹۲۴۰
۱۰	۱۰	۱۰	-	-	۰/۱۵۸۹۶۵۱	۲۸/۷۰۴۵۰۲	۰/۲۷۹۹۳۶۴	۲۳/۵۳۲۵۲۹
۱۲	۱۰	۱۰	-	-	۰/۱۹۸۳۸۳	۳۱/۳۴۶۱۲۵	۰/۲۹۹۸۲۱۲	۲۵/۹۹۷۷۰۵
۱۴	۱۲	۱۴	-	-	۰/۲۲۶۸۳۸۷	۳۶/۲۱۳۷۴۵	۰/۲۹۸۹۹۹۳	۲۶/۷۵۳۵۴۷
۱۸	۱۸	۱۸	-	-	۰/۲۶۳۷۲۸۱	۴۹/۵۴۸۹۶۲	۰/۳۱۹۹۵۶۱	۳۳/۹۷۸۹۸۹
۲۲	۲۰	۲۰	-	-	۰/۲۸۷۰۴۳۲	۵۷/۵۴۸۷۵۱	۰/۳۴۵۱۲۴۵	۳۸/۳۳۲۳۰۸

$$\sigma = 0.5, \pi = 1$$



شکل (۷) مقایسه آماری فواصل اطمینان براساس میانگین جواب‌ها



شکل (۸) مقایسه آماری فواصل اطمینان براساس زمان‌های محاسباتی



به‌منظور بررسی تحلیل آماری<sup>۳۲</sup> دو الگوریتم فراابتکاری ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید ارائه‌شده از آنالیز واریانس<sup>۳۳</sup> و آزمون  $t$  (تعداد نمونه‌ها ۱۰ عدد است) استفاده شده است. در بحث آنالیز واریانس هدف این است که میانگین‌های چندین جامعه با یکدیگر مقایسه شوند و به این موضوع پی برده شود که آیا میانگین‌های این جوامع با یکدیگر مساوی هستند یا اینکه اختلاف بارز و معنی‌داری بین آن‌ها وجود دارد. بدین‌منظور، ابتدا خروجی تحلیل واریانس برای هر دو روش حل به کمک نرم‌افزار *Minitab 14* ارائه شده است.

با توجه به جدول (۳) ابزار بهینه‌سازی سیپلکس جواب مسائل را به سرعت محاسبه می‌کند؛ اما با افزایش ابعاد مسائل، دیگر قادر به پیدا کردن جواب بهینه نیست. موقعی که مسئله به ۸ تأمین‌کننده، ۸ کارخانه و ۸ توزیع‌کننده افزایش می‌یابد، سیپلکس دیگر جواب بهینه‌ای را نمی‌تواند برای این مسئله پیدا کند. این در حالی است که هر دو الگوریتم فراابتکاری *GA* و *SA* در ابعاد بالا قادر به یافتن یک جواب مناسب برای مسائل هستند و همچنین در ابعاد کوچک جواب آن‌ها با جواب سیپلکس تفاوت معناداری ندارد؛ این مطلب صحت کارایی هر دو الگوریتم را نشان می‌دهد.

جدول (۴) نتایج آزمون آماری  $t$  برای میانگین جواب‌ها

	N	Mean	StDev	SE Mean	P-Value
GA	۱۰	۰/۱۸۵۶	۰/۰۵۵	۰/۰۱۸	۰/۰۴۸
SA	۱۰	۰/۲۴۸۱	۰/۰۷۴	۰/۰۲۳	

جدول (۵) نتایج آزمون آماری  $t$  برای میانگین زمان‌ها

	N	Mean	StDev	SE Mean	P-Value
GA	۱۰	۳۲/۶	۱۲	۳/۸	۰/۰۹۳
SA	۱۰	۲۴/۸۱	۶/۶۵	۲/۱	

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید کارایی مناسب‌تری برای این مدل پیشنهادی دارد؛ زیرا الگوریتم ژنتیک جواب مناسب‌تری نسبت به الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به دست آورده با توجه به اینکه زمان‌های آن‌ها تفاوت معناداری با یکدیگر ندارند.

#### ۷- نتیجه‌گیری و تحقیقات آتی

در این تحقیق از مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط برای کمینه‌کردن هزینه‌ها و زمان

همانطور که در جدول (۴) نشان داده شده است، فرض صفر به دلیل اینکه میانگین‌های تیماری<sup>۳۴</sup> جواب‌ها با هم تفاوت معنی‌دار دارند، رد شده است. درحالی‌که میانگین آماری زمان‌های حل دو الگوریتم با توجه به جدول (۵) تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند. شکل‌های (۷) و (۸) تفاوت معنی‌دار روش‌های حل نسبت به هم را به‌ترتیب از نظر جواب‌ها و زمان‌های حل نشان می‌دهد. از همین‌رو می‌توان بیان کرد که الگوریتم ژنتیک در مقایسه با

به منظور حل مسئله مکان‌یابی و تخصیص در زنجیره تأمین سه سطحی با تأمین‌کنندگان خارجی استفاده شد. در این مدل تعدادی مکان بالقوه برای احداث کارخانه‌ها در میان تعداد معینی از مراکز توزیع و تأمین‌کنندگان انتخاب و تخصیص داده شد. مکان‌یابی کارخانه‌ها و تخصیص شبکه توزیع در مدل ارائه شده با توجه به محدودیت‌ها و اهداف مسئله انجام شدند؛ این اهداف شامل کمینه‌کردن هزینه‌های راه‌اندازی، خرید، سفارش، حمل و نقل و تولید و نیز کمینه‌کردن زمان‌های تولید، ارسال و دریافت هستند. این تحقیق می‌تواند به صنایع در توزیع شبکه محصولات و مکان‌یابی کارخانه‌ها با در نظرگیری فاصله‌های آن‌ها از هم کمک کند تا هزینه و زمان مناسبی را به دست آورند.

برای حل مدل از یک ابزار بهینه‌سازی و دو الگوریتم فراابتکاری ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید استفاده شد که با توجه به پیچیدگی زیاد مدل و غیرخطی بودن مسئله، ابزار بهینه‌سازی سیلکس تنها توانایی حل مدل در ابعاد کوچک را داشت. اما در ابعاد بزرگ هر دو الگوریتم فراابتکاری جواب‌های مناسبی برای مسائل یافتند. در نهایت نیز، با آزمون آماری مشخص شد که الگوریتم ژنتیک کارایی مناسب‌تری نسبت به الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای این مسئله ارائه شده دارد.

به عنوان مطالعات آتی، می‌توان هر یک از حالت‌های زیر را در نظر گرفت:

(۱) توسعه شبکه زنجیره تأمین مانند در نظرگیری انواع شبکه‌ها (تلفیق روبه‌جلو و معکوس) و افزایش سطوح زنجیره تأمین (انبارها)

(۲) استفاده از روش‌های حل دیگر مانند الگوریتم‌های چندهدفه، الگوریتم ژنتیک چندهدفه<sup>۳۵</sup> و الگوریتم ژنتیک مرتب سازی نامغلوب<sup>۳۶</sup>

(۳) استفاده از مشخص‌های دیگر صنعت مانند تقاضای دوره‌ای و چندمحصولی

(۴) استفاده از اهداف و تصمیم‌های دیگر مانند پیشینه‌کردن نرخ پرشدگی محصول، حداکثر پوشش و تصمیم‌های موجودی، قابلیت اطمینان و جنبه‌های مالی زنجیره تأمین

#### منابع

- زرین‌پور، ناعمه، شوندی، حسن و باقری‌نژاد، جعفر. (۱۳۹۰). «توسعه مدل مکان‌یابی-تخصیص حداکثر پوشش با امکان ایجاد ازدحام در محیط رقابتی مبتنی بر انتخاب مشتری»، نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، ۲۲(۴)، ۳۹-۴۰۴.
- عالم‌تبریز، اکبر، زندیه، مصطفی و رحیمی، علیرضا. محمد. (۱۳۹۰). الگوریتم‌های فراابتکاری در بهینه‌سازی ترکیبی. انتشارات اشراقی.
- لکزیان، محمد و دهقانی. جلال. (۱۳۸۹). «شناسایی و ارزیابی شاخص‌های تأثیر گذار بر کاربرد فناوری اطلاعات در مدیریت زنجیره تأمین»، مجله پژوهش و توسعه فناوری، ۲، ۲۹-۶۰.
- یقینی، مسعود، پورسیدآقایی، محسن و نجاری، بهنام. (۱۳۸۹). «حل مسئله گروه‌بندی واگن‌ها در راه آهن باری با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی»، پژوهشنامه حمل و نقل، ۷(۲)، ۱۸۵-۱۹۸.

- of Modelling in Management*, 1(2), 173-183.
- Melo, M.T., Nickel, F., & Saldanha-da-Gama, F. (2009). "Facility location and supply chain management ° A review". *European Journal of Operational Research*, 196(2), 401-412.
- Nobil, A.H., Kazemi, A., & Alinejad, A. (2012). "A two objective model for location-allocation in a supply chain". *The Journal of Mathematics and Computer Science*, 4(3), 392-401.
- Revelle, C.S., & Laporte, G. (1996). "The plant location problem: new models and research prospects". I, 44(6), 864-874.
- Sarkar, B., & Majumder, A. (2013). "A Study on three different dimensional facility location problems". *Economic Modelling*, 30, (1), 879-887.
- Shankar, B.L., Basavarajappa, S., Chen, J.C.H., & Kadadevaramath, R.S. (2013). "Location and allocation decisions for multi-echelon supply chain network ° A multi-objective evolutionary approach". *Expert Systems with Applications*, 40(2), 551-562.
- Stadtler, H., & Kilger, C. (2000). *Supply chain management and advanced planning*. Springer.
- Souilah, A. (1995). "Simulated annealing for manufacturing systems layout design". *European Journal of Operational Research*, 82(3), 592-614.
- Tomonobu, S., Kai, S., Hirohito, Y., Katsumi, U., & Toshihisa, F. (2004). "Determination of location and capacity of power facilities by genetic algorithm". *Electric Power Components and Systems*, 32(4), 375-390.
- Tsao, Y-C., & Lu, J-C. (2012). "A supply chain network design considering transportation cost discounts". *Transportation Research Part E*, 48(2), 401-414.
- Vergin, R.C., & Rogers, J.D. (1967). "An algorithm and computational procedure for locating economic facilities", *Management Science*. 13(6), 240-254.
- Walters, D.C., & Sheble, G.B. (1993). "Genetic algorithm solution of economic dispatch with value point boding". *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(3), 1325-1332.
- uncertain demand and return". *Applied Mathematical Modelling*, 37(6), 4165-4176.
- Balinski, M.L. (1965). "Integer programming: Methods, uses, computation". *Management Science*, 12(3), 253-313.
- Bischoff, M., & Dächert, K. (2009). "Allocation search methods for generalized class of location-allocation problems". *European Journal of Operational Research*, 192(3), 793-807.
- Burer, S., Jones, P.C., & Lowe, T.J. (2008). "Coordinating the supply chain in the agricultural seed industry". *European Journal of Operational Research*, 185(1), 354-377.
- Farahani, R.Z., SteadieSeifi, M., & Asgari, N. (2010). "Multiple criteria facility location problems: A survey". *Applied Mathematical Modelling*, 34(7), 1689-1709.
- Ghalmet, L.G., Francis, R.L., & Kolen, A. (1981). "Finding efficient solutions for rectilinear distance location problems efficiently". *European Journal of Operational Research*, 22(2), 117-124.
- Goldberg, D.E., & Holland, J.H. (1988). "Genetic algorithms and machine learning". *Machine Learning*, 3, 95-99.
- Hakimi, S.L. (1964). "Optimum locations of switching centers and absolute centers and medians of a graph". *Operations Research*, 12(3), 450-459.
- Ho, W., Lee, C.K.M., & Ho, G.T.S. (2008). "Optimization of the facility location-allocation problem in a customer-driven supply chain". *Operations Management Research*, 1(1), 69-79.
- Holland, J.H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press.
- Hsieh, K-H., & Tien, F-C. (2004). "Self-organizing feature maps for solving location-allocation problems with rectilinear distances". *Computers & Operations Research*, 31(7), 1017-1031.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., & Vecchi, M.P. (1983). "Optimization by Simulated Annealing". *Science*, 220(4598), 671-680.
- Lashine, S.H., Fattouh, M., & Issa, A. (2006). "Location/ allocation and routing decisions in supply chain network design". *Journal*

- in a two-echelon supply chain with stochastic demand- A genetic-algorithm based solution". *Expert Systems with Applications*, 38(5), 6125-6131.
- Wu, L.Y., & Zhang, J.L. (2006). "Capacitated facility location problem with general setup cost". *Computers and Operations Research*, 33(5), 1226-1241.
- Wang, K.J., & Chen, M.-J., (2009), "Cooperative capacity planning and resource allocation by mutual outsourcing using ant algorithm in decentralized supply chain". *Expert Systems with Applications*, 36(2,2), 2831-2842.
- Wang, K.-J., Makond, B., & Liu, S.-Y. (2011). "Location and allocation decisions

پی نوشت

- 1 Burer
- 2 Genetic algorithm
- 3 Simulated annealing
- 4 CPLEX
- 5 Median Location
- 6 Minisum
- 7 Switching center
- 8 Rectilinear
- 9 Simple arrow algorithm
- 10 Geometrical analysis
- 11 Multi- attribute
- 12 Wu & Zhang
- 13 Goal programming
- 14 Closed-loop supply chain
- 15 Collection centers
- 16 Particle swarm optimization
- 17 Fill rate
- 18 Mixed-integer nonlinear programming
- 19 Evolutionary algorithm
- 20 Walters & Sheble
- 21 Chromosome
- 22 Initial population
- 23 Generation
- 24 Crossover
- 25 Mutation
- 26 Convergence
- 27 Fitness function
- 28 LP metric
- 29 Souilah
- 30 Hybrid optimization
- 31 Local optimization
- 32 Statistical analysis
- 33 Analysis of variance
- 34 Treatment mean
- 35 Multi-objective genetic algorithm
- 36 Nondominated sorting genetic algorithm

