نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید
IERPS
ISSN: 2345-2269

نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید

سال پنجم، شماره دهم، بهار و تابستان ۱۳۹۶، صفحه ۵۳-۶۷
www.ier.basu.ac.ir

DOI: 10. 22084/ier.2017.11534.1525

# طراحی شبکه زنجیره‌ی تأمین چند سطحی با در نظر گرفتن راهبردهای پایای چندگانه در سطح مراکز توزیع

هیوا فاروقی[۱،*]، محمد اشرفی فشی[۲]

۱. استادیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.
۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

**اطلاعات مقاله**

**تاریخچه مقاله:**
دریافت ۱۳۹۵/۰۶/۳۱
پذیرش ۱۳۹۶/۰۵/۰۴

**کلمات کلیدی:**
شبکه زنجیره‌ی تأمین چند سطحی
مکان‌یابی تسهیلات
راهبردهای پایا
الگوریتم ژنتیک
طراحی آزمایشات تاگوچی

**خلاصه**

در اکثر مسائل مکان‌یابی پایا، هدف اصلی، کمینه کردن کل هزینه‌های احداث و حمل و نقل در یک شبکه‌ی تک سطحی با در نظر گرفتن راهبردی جهت تقویت پایایی شبکه است. از این‌رو، در این مقاله با مد نظر قرار گرفتن واقعیات عینی بیشتر؛ مدلی به منظور طراحی یک شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین سه سطحی با در نظر گرفتن راهبردهای پایای چندگانه در سطح مراکز توزیع ارائه شده است. در این مدل، دو نوع مرکز توزیع مطمئن و نامطمئن در نظر گرفته می‌شود. راهبردها به این صورت است که اگر مرکز توزیع نامطمئنی در یک مکان کاندیدا احداث شود، آنگاه باید از طریق بودجه محدودی که برای تقویت مراکز توزیع نامطمئن در شرایط بحرانی پیش‌بینی شده است، مقاوم‌سازی شود و یا یک مرکز توزیع مطمئن، به‌عنوان پشتیبان آن لحاظ گردد تا در صورت بروز اختلال، تقاضای مشتریان را پاسخ دهد. از طرف دیگر، چنانچه مرکز توزیع مطمئنی در یک مکان کاندیدا احداث شود، این مرکز توزیع حالت خود پشتیبان خواهد داشت. با توجه به پیچیدگی محاسباتی مسئله و مدل ارائه شده، برای حل مدل از یک الگوریتم ژنتیک پیشنهادی استفاده شده است. پس از تنظیم نمودن پارامترهای الگوریتم پیشنهادی از طریق طراحی آزمایشات تاگوچی، جواب‌های به دست آمده در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ با جواب‌های حاصل از نرم‌افزار بهینه‌سازی گمز مقایسه گردید. نتایج به دست آمده، نشان می‌دهند درصد خطای الگوریتم، در تمامی مسائل حل شده، کمتر از ۳ درصد است که این موضوع کارآیی الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

## ۱- مقدمه

مسائل مکان‌یابی تسهیلات (Facilities Location Problem) از ابتدای دهه ۱۹۶۰ جایگاه بسیار رفیعی در ادبیات تحقیق در عملیات (Operations Research) پیدا کرده‌اند. این دسته از مسائل، بررسی می‌کنند که چگونه می‌توان یک مجموعه از تسهیلات را به صورت فیزیکی مکان‌یابی کرد بطوری‌که، بتوان یک تابع هدف را بر اساس شرایط حاکم بر مسئله و تحت مجموعه‌ای از محدودیت‌ها بهینه نمود.

مکان‌یابی یکی از علوم مهندسی صنایع است که توجه به آن موجب کاهش هزینه‌ها و موفقیت واحدهای صنعتی و بهبود عملکرد زنجیره‌های تأمین می‌شود [۱]. مسئله مکان‌یابی تسهیلات به‌صورت امروزی، نخستین بار توسط اقتصاددان آلمانی آلفرد وبر در سال ۱۹۰۹ به منظور مکان‌یابی تک وسیله‌ای در جهت کمینه نمودن فاصله‌ی میان تسهیل و مشتریان پیشنهاد گردید. پس از وبر، تاکنون محققان زیادی در این حوزه تحقیق کرده و مسائل مکان‌یابی متنوعی را توسعه داده‌اند. در ادبیات، مدل‌های مکان‌یابی به دو دسته کلی مدل‌های گسسته و پیوسته تفکیک می‌شوند. در مدل‌های پیوسته، تسهیلات می‌توانند در هر نقطه‌ای از صفحه قرار

* نویسنده مسئول: هیوا فاروقی
تلفن: ۰۸۷-۳۳۶۶۰۰۷۳؛ پست الکترونیکی: h.farughi@uok.ac.ir

بگیرند، درحالی‌که در مدل‌های گسسته، تسهیلات فقط می‌توانند بر روی تعداد محدودی مکان پیشنهادی قرار بگیرند. مدل‌های مکان‌یابی شبکه، یک زیرمجموعه‌ی بزرگ و مهم از مدل‌های گسسته هستند. در این مدل‌ها، ساختار سیستم به‌گونه‌ای است که یک شبکه، مانند راه‌آهن، بزرگراه‌ها یا سیستم‌های ارتباطاتی مفروض بوده و مسافت واقعی سفر بین دو نقطه از شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد و همین موضوع باعث می‌شود تا مدل‌های گسسته واقع بینانه‌تر از مدل‌های پیوسته باشند. بیشتر تحقیقات منتشر شده در زمینه‌ی طراحی شبکه، از مدل‌های مکان‌یابی تک/ چندوسیله‌ای، مسائل پوششی(CLP)[1]، P-میانه، P-مرکز و کاربردها و تعمیم آن‌ها استفاده نموده‌اند [۲]. با توجه به اینکه مکان‌یابی تسهیلات در شبکه‌های توزیع کالا، برای یک افق زمانی بلندمدت دوام دارد و مستلزم صرف هزینه‌های بسیار زیادی است، بنابراین باید عواملی که باعث ایجاد عدم قطعیت در عملکرد شبکه می‌شوند شناسایی و تمهیدات لازم برای مقابله با آن‌ها اندیشیده شود تا از این طریق بتوان قابلیت اطمینان شبکه را افزایش داد.

در دنیای واقعی، هنگامی که مجموعه‌ای از تسهیلات ساخته می‌شوند و استقرار می‌یابند ممکن است یکی و یا تعدادی از آن‌ها به هر دلیلی دچار اختلال شده و نتوانند در زمان لازم عملکرد مناسبی را از خود نشان دهند. به‌عنوان مثال ممکن است در شرایط بحرانی همچون وقوع بلایای طبیعی، بدی شرایط جویی، اعتصاب کارگران، اقدامات خرابکارانه، حملات تروریستی و یا تغییرات در مالکیت سیستم، مجموعه تسهیلات و یا سیستم نتوانند خدمت‌دهی خود را به نحو شایسته‌ای انجام دهند. بروز اختلال در عملکرد تسهیلات، ممکن است منجر به هزینه‌های حمل و نقل اضافی به دلیل طی مسافت دورتر توسط مشتریان شود [۳]. از این‌رو، می‌توان با ارائه مدل‌های ریاضی مناسب و کارآمد، علاوه بر کمینه کردن هزینه‌های مکان‌یابی تسهیلات و حمل و نقل، پایایی شبکه را در مقابل بروز اختلالات ناخواسته افزایش داد.

یکی از مهم‌ترین مسائل مورد بحث در SCM، عدم قطعیت است [۴]، اما رهیافت پایایی با عدم قطعیت متفاوت است. در بحث عدم قطعیت، هدف یافتن یک جواب بهینه است بطوری‌که در شرایط غیرقطعی آتی از کارایی مطلوبی برخوردار باشد و استواری[2] آن در برابر تغییرات پارامترهایی همچون تقاضا و قیمت‌ها تضمین شود، اما در رهیافت پایایی، هدف آن است که جواب بهینه‌ای یافت شود که بتواند در شرایط ازکارافتادگی تسهیلات نیز کارایی لازم را داشته باشد. به دلیل سختی حل مدل‌های (SCND)[3] تصادفی، تحقیقات چندانی که مدل‌های چند سطحی و پیچیده را در نظر بگیرند وجود ندارد و در اکثر آن‌ها و در مسائل مکان‌یابی تحت عدم‌قطعیت، تقاضا به عنوان تنها پارامتر تصادفی، در نظر گرفته می‌شود [۵]. از جمله مطالعاتی که در این حوزه انجام شده است، می‌توان به تحقیقات پیدرو و همکاران [۶, ۷]، توکلی‌مقدم و همکاران [۵] و غفاری‌نسب و همکاران [۸] اشاره نمود که در آن‌ها تقاضا به‌عنوان پارامتر تصادفی در نظر گرفته شده است. خوانندگان علاقه‌مند به مسائل مکان‌یابی و SCND تحت عدم‌قطعیت، به مطالعات مروری اسنایدر [۹] و کلیبی و همکاران [۱۰] ارجاع داده می‌شوند. در ادامه، به بررسی مسائل مکان‌یابی پایا و مدل‌های SCND با در نظر گرفتن پایایی تسهیلات، پرداخته می‌شود.

مسائل مکان‌یابی پایا را می‌توان به مدل‌های P–میانه [۳, ۱۱]، هزینه ثابت [۳, ۱۱]، سناریویی ظرفیت محدود و نامحدود [۱۲] تقسیم‌بندی نمود. اسنایدر و دسکین [۳] یکی از اولین مدل‌های مکان‌یابی پایا را با اهداف حداقل‌سازی هزینه‌های ثابت و عملیاتی در شرایط کارکرد سالم تسهیلات و کمینه‌سازی متوسط هزینه‌های مازاد عملیاتی ناشی از بروز اختلال در عملکرد تسهیلات را برای مسائل P-میانه و تسهیلات با ظرفیت نامحدود در یک شبکه تک سطحی مطرح و تجزیه و تحلیل نمودند. لیم و همکاران [۱۳] مسئله مکان‌یابی هزینه ثابت ظرفیت نامحدود پایا (RUFLP)[4] را با لحاظ نمودن یک راهبرد محکم‌سازی تسهیلات[5] مورد مطالعه قراردادند و یک مدل آمیخته [6] عدد صحیح را با فرض یکسان و مستقل بودن احتمال خرابی تسهیلات، ارائه کردند و نهایتاً آن را با روش آزادسازی لاگرانژ حل نمودند. لی و اویانگ [۱۴] مدل لیم و همکاران را با فرض وابسته بودن خرابی هر تسهیل به مکان قرار گیریش، توسعه دادند. آن‌ها روش حلی را بر اساس تقریب پیوسته[7] به منظور کمینه‌سازی هزینه‌های ساخت و ساز اولیه و حمل و نقل ارائه نمودند. کیو و همکاران [۱۵] یک مدل خطی آمیخته عدد صحیح را برای RUFLP ارائه دادند. تابع هدف مسئله آن‌ها، حداقل‌سازی هزینه‌های راه‌اندازی و انتظاری حمل و نقل در حالت عملکرد صحیح تسهیلات و بروز اختلال و خرابی در آن‌ها بود. همچنین، آن‌ها برای مسائل با اندازه کوچک و متوسط، روش آزادسازی لاگرانژ و برای مسائل با اندازه بزرگ، روش حلی را مبتنی بر مدل تقریب پیوسته به کار گرفتند. برمن و کرس [۱۶] مسئله P-میانه را با در نظر گرفتن شکست در فضای پیوسته تک‌بعدی، مورد مطالعه قرار دادند. هدف آن‌ها، کمینه کردن مجموعه هزینه‌های سفر با فرض آگاهی مشتری از وضعیت تسهیلات بود. جبارزاده و همکاران [۱۷] یک مسئله طراحی زنجیره تأمین را با لحاظ نمودن ریسک خرابی تسهیلات مورد بررسی قرار دادند و یک مدل عدد صحیح آمیخته غیرخطی[8] را با هدف حداکثر نمودن سوددهی کل سیستم ارائه کردند. اوهانلی و همکاران [۱۸] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی را برای مکان‌یابی تسهیلات با در نظر گرفتن

1. Covering location models (CLP)
2. Robustness
3. Supply Chain Network Design (SCND)

4. Reliable Uncapacitated Fixed Charge Location Problem
5. Facility Hardening
6. Mixed Integer
7. Continuum Approximation (CA) Model
8. Mixed Integer Nonlinear Model

احتمال شکست و تمرکز روی مسئله P- میانه پیشنهاد کردند. هدف آن‌ها پیدا کردن مکان P وسیله جدید بود بطوری‌که هزینه‌های انتظاری حمل و نقل بین مشتریان و نزدیک‌ترین تسهیل به آن‌ها کمینه شود. آن‌ها از روش شاخه و کران برای حل مسئله خود استفاده کردند.

لی و همکاران [۱۱] دو مدل برای پایایی یک شبکه تک سطحی ارائه کردند. آن‌ها پایایی مسئله P-میانه و RUFLP را مورد مطالعه قرار دادند و از راهبرد مقاوم‌سازی تسهیلات از طریق یک بودجه محدود در هنگام وقوع اختلال در آن‌ها استفاده کردند. به دلیل غیرخطی و NP-سخت بودن مدل‌ها، از روش آزادسازی لاگرانژ برای حل آن‌ها استفاده شد. آشتیانی و همکاران [۱۹] با در نظر گرفتن یک شبکه تک سطحی، بر روی RUFLP متمرکز شدند و فرض نمودند که وابستگی خرابی تسهیلات به محل احداثشان وابسته است و از کیفیت تسهیلات مستقل است. آن‌ها در مقاله خود، بر اساس معیار فاصله و با استفاده از یک تابع خطی، محدوده‌ای را برای تأمین تقاضای مشتریان در نظر گرفتند و با حل چند مثال از طریق نرم‌افزار گمز، نتایج را تحلیل کردند. مدال و همکاران [۲۰] با درک اینکه در اکثر پژوهش‌ها به منظور کاهش ریسک خرابی سیستم‌های توزیع از مکان‌یابی راهبردی و راهبرد مستحکم‌سازی تسهیلات به عنوان دو روش مجزا تا به حال استفاده شده است، سعی نمودند ضرورت و اهمیت پرداختن همزمان به این دو روش را در یک مسئله تحت عنوان (MFLHP)[1] مطرح کنند. هدف آن‌ها کمینه‌سازی بیشترین فاصله بین نقاط تقاضا تا نزدیک‌ترین تسهیل سالم پس از خرابی و ازکارافتادگی تعدادی از تسهیلات شبکه بود و از الگوریتم جستجوی دودویی[2] برای حل مسئله خود استفاده کردند. لی و ساواچکین [۲۱] در ادامه‌ی پژوهشی که با همکاری زِنگ [۱۱] انجام داده بودند، یک تابع غیرخطی جدید را برای محدودیت بودجه در نظر گرفتند. با اعمال نمودن تابع غیرخطی جدید، مدل مسئله به یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته عدد صحیح تبدیل شد. با توجه به NP-سخت بودن مدل، آن‌ها یک روش ابتکاری مبتنی بر آزادسازی لاگرانژ را برای مسئله‌ی تحت بررسی ارائه دادند.

در همه‌ی این مطالعات، یک شبکه‌ی تک سطحی با تسهیلات ظرفیت نامحدود به همراه راهبردی جهت تقویت پایایی شبکه مد نظر قرار گرفته شده است؛ درحالی‌که در واقعیت می‌توان شبکه‌های زنجیره‌ی تأمین چند سطحی با تسهیلات دارای ظرفیت‌های مختلف و هزینه‌های متفاوت ایجاد نمود. تحقیقات کمی این وضعیت را در مسائل SCND با لحاظ نمودن پایایی تسهیلات در نظر گرفته‌اند.

علی و ناکاد [۲۲] یک مدل آمیخته عدد صحیح را برای یک شبکه زنجیره تأمین دوسطحی چندکالایی، توسعه دادند. آن‌ها بحث پایایی را به‌طور همزمان برای تأمین‌کنندگان و مراکز توزیع به صورت سناریویی در نظر گرفتند و فرض نمودند که احتمال خرابی و ازکارافتادگی توأم مراکز توزیع و تأمین‌کنندگان ثابت بوده و از یکدیگر مستقل هستند و در هر یک از سناریوها، احتمال خرابی تعدادی از مراکز توزیع و تأمین‌کنندگان وجود دارد. به‌منظور لحاظ نمودن هزینه انتظاری کمبود ناشی از خرابی و ازکارافتادگی مراکز توزیع و تأمین‌کنندگان، هر سناریو را به دو دوره‌ی زمانی تفکیک کردند و با استفاده از نرم‌افزارهای CPLEX و GAMS با حل مثال‌های مختلف و تجزیه و تحلیل ریسک‌های موجود در مسئله، نشان دادند که مدل توسعه داده شده توسط آن‌ها، از مدل پایه سودمندتر و کاراتر است.

در جدیدترین تحقیقات، روحانی نژاد و همکاران [۲۳] با توسعه‌ی مدل P-میانه‌ی اِسنایدر و دسکین [۳]، مدلی را مطرح نمودند که در آن تسهیلات دارای احتمال خرابی متفاوت و ظرفیت محدود بودند. آن‌ها با توجه به اینکه مدلشان یک مدل غیرخطی آمیخته عدد صحیح بود، دو رویکرد ابتکاری[3] برای حل آن ارائه دادند و عملکرد این رویکردها را از طریق مثال‌های مورد ارزیابی قرار دادند که نتایج، عملکرد مناسب و کارآمدی رویکردهای ابتکاری را تأیید می‌نمود.

تانگ و همکاران [۲۴] یک مسئله مکانی‌یابی را با هدف تقویت پایایی شبکه از طریق حفاظت و پشتیبانی از تسهیلات در مقابل بروز اختلالات ناگهانی، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای مسئله تحت بررسی یک مدل عدد صحیح پیشنهاد دادند که در آن احتمال خرابی تسهیلات برای مکان‌ها مشخص شده بود. رویکرد حل آن‌ها ترکیبی از روش آزادسازی لاگرانژ و جستجوی محلی بود و اثربخشی و کارآمدی آن را از طریق مثال‌های عددی تصادفی در اندازه‌های مختلف نشان دادند. نهایتاً مدل مورد مطالعه را در ایالت هونان[4] به‌کارگیری نمودند و مباحث مدیریتی را برای آن مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند.

بر اساس بررسی نویسندگان این مقاله، از مرور ادبیات می‌توان فهمید، مطالعه‌ای که یک شبکه چند سطحی را همراه با راهبردهای پایای چندگانه و تسهیلات با ظرفیت‌های متفاوت و هزینه‌های احداث مختلف در نظر بگیرد، وجود ندارد. در این مقاله، با توسعه‌ی مدل RUFLP لی و همکاران [۱۱] و در نظر گرفتن یک شبکه سه سطحی با ظرفیت‌ها و هزینه‌های احداث متفاوت برای تسهیلات و لحاظ نمودن راهبردهای پایای چندگانه در سطح مراکز توزیع، یک مدل ریاضی پیشنهادی ارائه می‌شود و برای حل مدل به شکل کارا، یک الگوریتم ژنتیک پیشنهاد می‌گردد.

## ۲- تشریح ساختار مسئله

### ۲-۱- تعریف مسئله

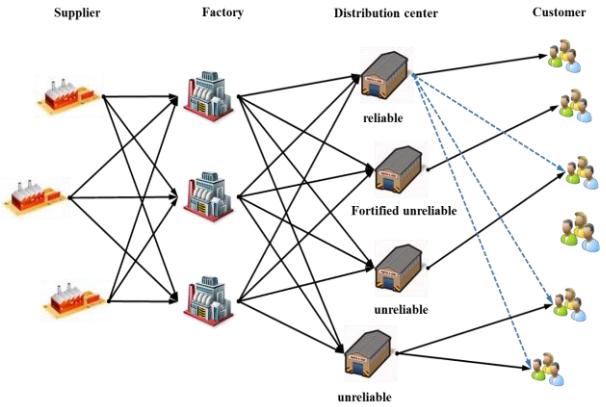
در این بخش، مسئله مورد مطالعه توضیح داده می‌شود و یک مدل

1. The Mini max Facility Location And Hardening Problem
2. Binary Search Algorithm
3. Heuristic
4. Hunan province

برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته عدد صحیح برای آن پیشنهاد می‌گردد، سپس مدل خطی‌سازی می‌شود تا به صورت بهینه حل شود. این مسئله شامل مکان‌یابی کارخانه‌ها، مراکز توزیع (مطمئن و نامطمئن) و انتخاب تأمین‌کنندگان و مشتریان در یک شبکه سه سطحی و تعیین بهترین راهبرد پایا به منظور تقویت پایایی مراکز توزیع نامطمئن با هدف تأمین تقاضای مشتریان در شرایط بحرانی می‌باشد. هدف این مسئله، پیدا کردن تعداد، مکان و ظرفیت بهینه برای کارخانه‌ها، مراکز توزیع (مطمئن و نامطمئن)، انتخاب تأمین‌کنندگان و تخصیص مشتریان به مراکز توزیع (مطمئن و نامطمئن) و همچنین تعیین بهترین راهبردهای پایا در سطح مراکز توزیع و کمینه‌سازی هزینه کل طراحی شبکه می‌باشد. در این مقاله فرض می‌شود که پایایی مراکز توزیع وابسته به کیفیت آن‌ها بوده و شرایط محیطی و مکانی برای همه‌ی مراکز توزیع، یکسان در نظر گرفته می‌شود. در مکان‌های پیشنهادی برای استقرار مراکز توزیع، امکان استقرار حداکثر یکی از مراکز توزیع مطمئن و نامطمئن (با ظرفیت انبارش مشخص) وجود دارد.

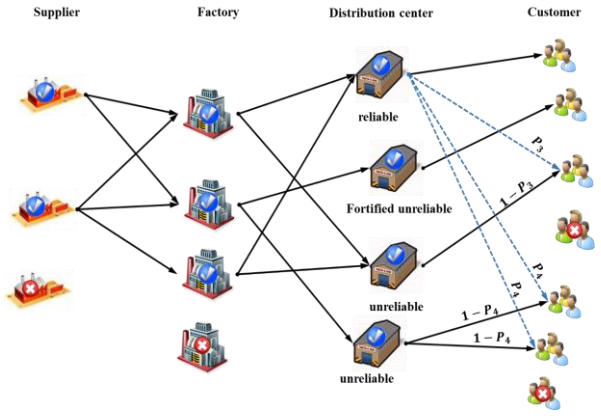
راهبردهای پایای مد نظر به این صورت است که اگر در یکی از مکان‌های پیشنهادی مرکز توزیع مطمئنی با سطح انبارش مشخص و هزینه‌ی معین احداث شود، آنگاه این مرکز توزیع حالت خود پشتیبان داشته و دیگر نیازی به استفاده از راهبردهای تقویت‌سازی[1] و یا در نظرگیری پشتیبان نیست، اما اگر مرکز توزیع نامطمئنی در یک مکان کاندیدا احداث شود آنگاه به منظور ایجاد قابلیت اطمینان صددرصدی در تأمین کالای مشتریانش، باید این مرکز توزیع توسط یکی از مراکز توزیع مطمئن پشتیبانی شود تا در صورت بروز خرابی در مرکز توزیع نامطمئن اولیه، کالای مشتریان را تأمین نماید و یا از طریق یک بودجه‌ی محدود که از قبل برای تقویت‌سازی مراکز توزیع نامطمئن در شرایط بحرانی پیش‌بینی شده است، تقویت‌سازی شود. در مدل مسئله، هزینه عدم پوشش مشتریان و هزینه‌هایی همچون هزینه‌های نگهداری کالا در مراکز توزیع پشتیبان به منظور پاسخ گوئی به تقاضای مشتریانی که مرکز توزیع اولیه آن‌ها دچار خرابی شده است و نیز هزینه‌های استقرار تسهیلات مختلف در شبکه توزیع کالا، هزینه‌های خرید مواد اولیه از تأمین‌کنندگان، هزینه تولید محصول در کارخانه‌ها و کلیه هزینه‌های حمل و نقل در مدل مسئله گنجانده شده است. شکل (۱) ساختار کلی شبکه‌ی را نشان می‌دهد، در سطح مراکز توزیع پیکان کامل نشان‌دهنده تخصیص اولیه مشتریان و پیکان خط‌چین به معنای تخصیص پشتیبان مشتریان می‌باشد و مشتریانی که هیچ‌گونه پیکانی به آنها وصل نشده است، تحت پوشش قرار نگرفته‌اند. همچنین، در این شکل یکی از مراکز توزیع نامطمئن با توجه به ساختار مسئله و شرایط حاکم بر مسئله و هزینه کل طراحی شبکه، از طریق بودجه محدودی که برای شرایط بحرانی در نظر گرفته شده، تقویت‌سازی شده است.

1. Fortification




**شکل (۱): ساختار کلی شبکه توزیع مسئله مورد بررسی**

از جمله مصادیق تقویت‌سازی، می‌توان به ایجاد مراکز توزیع اضطراری و موقت پس از خرابی مراکز توزیع اصلی و قرض گرفتن نیروی کار از سایر مراکز توزیع (پس از اعتصاب کارگران) و مواردی از این قبیل اشاره نمود. در این مقاله فرض می‌شود که مرکز توزیع نامطمئن تقویت شده، پس از تقویت‌سازی به یک مرکز توزیع مطمئن تبدیل می‌شود و دیگر نیازی به مرکز توزیع پشتیبان ندارند. در این حالت از هزینه‌های نگهداری کالا در مراکز توزیع پشتیبان و هزینه‌های پیمایش مسیر طولانی‌تر توسط مشتریانی که نتوانسته‌اند از مرکز توزیع اولیه تقاضای خود را تأمین کنند، جلوگیری خواهد شد. اما، به علت محدودت بودجه امکان تقویت‌سازی همه‌ی مراکز توزیع نامطمئن وجود ندارد. به‌منظور ایجاد درک بهتر مسئله، در شکل (۲) یک نمونه از شبکه پس از طراحی نشان داده شده است. در ابتدا، ۳ تأمین‌کننده در شبکه حضور داشته‌اند، که بر اساس ساختار مدل، کارخانه‌ها تنها از ۲ تأمین‌کننده ماده اولیه خود را دریافت کرده‌اند.




**شکل (۲): یک نمونه مثال از شبکه پس از طراحی**

همچنین، از ۴ مکان پیشنهادی برای احداث کارخانه‌ها، ۳ مکان انتخاب شده و نهایتاً در سطح مراکز توزیع (نامگذاری از بالا به پایین) $P_3$ و $P_4$ احتمال خرابی و ازکارافتادگی مرکز توزیع ۳ و ۴ باشد. آنگاه احتمال انتقال کالا، برای مشتریانی که به مراکز توزیع نامطمئن (تقویت نشده و دارای پشتیبان) تخصیص پیدا کرده‌اند، بر روی کمان‌ها نوشته شده است. همچنین، مقدار موجودی احتمالی در مراکز توزیع پشتیبان، بر اساس جریان‌های احتمالی رسم شده از

آن‌ها به سمت مشتریان خواهد بود.

## ۲-۲- مفروضات، اندیس‌ها، پارامترها، متغیرها و مدل ریاضی

### مفروضات مدل

- ❖ مسئله یک مدل تک‌محصولی است و مکان تأمین‌کنندگان و مشتریان و همچنین تقاضا و هزینه عدم تأمین هر واحد از تقاضای مشتریان، ثابت و مشخص است.
- ❖ مکان‌های بالقوه برای احداث کارخانه‌ها و مراکز توزیع به‌صورت گسسته در نظر گرفته می‌شود.
- ❖ کارخانه‌ها دارای سطوح ظرفیت تولیدی متفاوت و محدود هستند و هزینه تولید و استقرار آن‌ها وابسته به سطح ظرفیت تولیدشان است.
- ❖ مراکز توزیع کالا دارای سطوح ظرفیت انبارش متفاوت و محدود بوده و هزینه احداث مراکز توزیع و همچنین نگهداری کالا در مراکز پشتیبان، وابسته به سطح ظرفیت آن‌ها است.
- ❖ تقاضای هر مشتری تنها از یک مرکز توزیع اولیه می‌تواند تأمین شود و در صورت خرابی مرکز توزیع اولیه و عدم تقویت‌سازی آن، تقاضای مشتری باید توسط یک مرکز توزیع مطمئن، پاسخ داده شود.
- ❖ احتمال خرابی مراکز توزیع نامطمئن از یکدیگر مستقل بوده و مراکز توزیع مطمئن دارای احتمال خرابی صفر هستند.
- ❖ در مکان‌های پیشنهادی برای احداث مراکز توزیع، حداکثر یکی از مراکز توزیع مطمئن یا نامطمئن با سطح ظرفیت مشخص می‌تواند استقرار پیدا کند.
- ❖ مراکز توزیع دارای سطوح ظرفیت انبارش متفاوت و محدود هستند و هزینه نگهداری و احداث آن‌ها وابسته به نوع (مطمئن و نامطمئن) و ظرفیت انبارش آن‌ها است.
- ❖ جریان ورودی و خروجی هر سطح برابر است و اتلاف موجودی وجود ندارد.

### مجموعه اندیس‌ها

$I$: مجموعه مکان‌های ثابت تأمین‌کنندگان

$J$: مجموعه مکان‌های کاندیدا برای احداث کارخانه

$K$: مجموعه مکان‌های کاندیدا برای احداث مراکز توزیع

$R$: مجموعه مکان‌های کاندیدا برای تأسیس مراکز توزیع (با مجموعه $K$ مستعار[1] هستند)

$L$: مجموعه مکان‌های ثابت مشتریان

$O$: مجموعه سطوح ظرفیت تولیدی برای کارخانه‌ها

$P$: مجموعه سطوح ظرفیت انبارش کالا برای مراکز توزیع

### پارامترهای مدل

$D_l$: تقاضای مشتری $l$ است، بطوری‌که: $(D_l \in Z^+)$

$T_l$: هزینه عدم تأمین هر واحد تقاضای مشتری $l$ است، بطوری‌که: $(T_l \in Z^+)$

$F_j^O$: هزینه ثابت تأسیس کارخانه در مکان پیشنهادی $j$ با سطح ظرفیت $o$

$F_K^{UP}$: هزینه ثابت تأسیس مرکز توزیع نامطمئن در مکان پیشنهادی $k$ با سطح ظرفیت $p$

$F_K^{RP}$: هزینه ثابت تأسیس مرکز توزیع مطمئن در مکان پیشنهادی $k$ با سطح ظرفیت $p$

$S_K^U$: هزینه ثابت تقویت‌سازی مرکز توزیع نامطمئن $k$

$r_K^{UP}$: هزینه متغیر تقویت‌سازی مرکز توزیع نامطمئن $k$ با سطح ظرفیت $p$ (متناسب با احتمال خرابی مرکز توزیع)

$DS_{ij}$: مسافت طی شده بین تأمین‌کننده $i$ و کارخانه $j$

$DF_{jk}$: مسافت طی شده بین کارخانه $j$ و مرکز توزیع $k$

$DD_{kl}$: مسافت طی شده بین مرکز توزیع $k$ و مشتری $l$

$q_K^P$: احتمال خرابی مرکز توزیع تأسیس شده در مکان پیشنهادی $k$ (برای مرکز توزیع نامطمئن)

$BS_i$: هزینه خرید هر واحد ماده اولیه از تأمین‌کننده $i$

$PF_j^O$: هزینه تولید هر واحد کالا در کارخانه $j$ در سطح ظرفیتی o

$h_k^P$: هزینه نگهداری هر واحد کالا در مرکز توزیع مطمئن $k$ در سطح ظرفیت $p$ به منظور پشتیبانی از مراکز نامطمئن

$C_j^O$: ظرفیت تولیدی کارخانه $j$ در سطح ظرفیت $o$ است، بطوری‌که: $\left(C_j^O \in Z^+\right)$

$CD_k^P$: ظرفیت انبارش مراکز توزیع $k$ در سطح ظرفیت $p$، بطوری‌که: $(CD_k^P \in Z^+)$

$M$: عدد بسیار بزرگ

$\omega_{ij}, \omega_{jk}, \omega_{kl}$: هزینه حمل و نقل در هر واحد مسافت طی شده بین سطوح شبکه

### متغیرهای تصمیم

$X_j^O$: اگر در مکان پیشنهادی $j$ کارخانه با سطح ظرفیت $o$ احداث شود برابر ۱ و در غیر این صورت صفر می‌شود.

$X_K^{UP}$: اگر در مکان پیشنهادی $k$ مرکز توزیع نامطمئن با ظرفیت $p$ احداث شود، برابر ۱ و در غیر این صورت صفر می‌شود.

$X_K^{RP}$: اگر در مکان پیشنهادی $k$ مرکز توزیع مطمئن با سطح ظرفیت $p$ احداث شود، ۱ و در غیر این صورت صفر می‌شود.

$X_K^{FP}$: اگر در مکان پیشنهادی $k$ مرکز توزیع غیرمطمئن با سطح ظرفیت $p$ احداث گردد و تقویت‌سازی شود، مقدار ۱ می‌گیرد در غیر این صورت صفر می‌شود.

$Y_{KPl}^P$: اگر مرکز توزیع $k$ با سطح ظرفیت $p$ به‌عنوان تخصیص اولیه‌ی مشتری $l$ باشد، ۱ و در غیر این صورت صفر می‌شود.

1. Alias

$Y_{KPl}^{B}$: اگر مرکز توزیع $k$ با سطح ظرفیت $p$ به‌عنوان تخصیص پشتیبان مشتری $l$ باشد، ۱ و در غیر این صورت صفر می‌شود.

$U_{ijo}$: مقدار ماده‌ی اولیه که از تأمین‌کننده $i$ به کارخانه $j$ در سطح ظرفیت $o$ ارسال می‌شود.

$V_{jokp}$: تعداد کالایی که از کارخانه $j$ در سطح ظرفیت $o$ به مرکز توزیع $k$ در سطح ظرفیت $P$ ارسال می‌شود.

**مدل ریاضی**

مدل برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته عدد صحیح مسئله در ادامه آورده شده است:

$$Min \sum_{J}\sum_{O} F_J^O X_J^O + \sum_{K}\sum_{P} F_k^{RP} X_k^{RP} + \sum_{K}\sum_{P} F_k^{UP} X_k^{UP} + \sum_{i}\sum_{j}\sum_{o} (Bs_i + Ds_{ij}\omega_{ij}) U_{ijo} + \sum_{j}\sum_{O}\sum_{k}\sum_{p} (PF_j^O + Df_{jk}\omega_{jk}) V_{jokp} + \sum_{k}\sum_{P}\sum_{l} [ D_l Dd_{kl}\omega_{kl} \left(1 - q_k^p (1 - X_k^{RP})(1 - X_k^{FP})\right) Y_{kPl}^P + D_l\omega_{kl}(Dd_{kl} + h_k^P) Y_{kPl}^B \sum_{r\in K,\ r\neq k} Y_{rPl}^P q_r^p (1 - X_r^{RP})(1 - X_r^{FP})] + \sum_{l} D_l T_l (1 - \sum_{P}\sum_{k} Y_{kPl}^P)$$

$S.T$

$$\sum_{i} U_{ijo} \le M.X_J^O \qquad \forall j \in J \quad \forall o \in O \qquad (۱)$$

$$\sum_{i} U_{ijo} \ge \sum_{k}\sum_{P} V_{jokp} \qquad \forall j \in J \quad \forall o \in O \qquad (۲)$$

$$\sum_{j}\sum_{O} V_{jokP} \ge \sum_{l} D_l (Y_{kPl}^P + Y_{kPl}^B) \qquad \forall k \in K,\ \forall p \in P \qquad (۳)$$

$$\sum_{P} X_k^{FP} \le \sum_{P} X_k^{UP} \qquad \forall k \in K \qquad (۴)$$

$$\sum_{j}\sum_{O} V_{jokP} \le M.(X_k^{RP} + X_k^{UP}) \qquad \forall k \in K,\ \forall p \in P \qquad (۵)$$

$$\sum_{K}\sum_{P} V_{jokP} \le C_J^O \qquad \forall j \in J \quad \forall o \in O \qquad (۶)$$

$$Y_{kPl}^P + Y_{kPl}^B \le Max(X_k^{RP}, X_k^{UP}) \qquad \forall l \in L,\ \forall k \in K,\ \forall p \in P \qquad (۷)$$

$$\sum_{j}\sum_{o} V_{jokP} \le Cd_K^p \qquad \forall k \in K \quad \forall p \in P \qquad (۸)$$

$$\sum_{P} X_k^{RP} + X_k^{UP} \le 1 \qquad \forall k \in K \qquad (۹)$$

$$X_k^{UP} \le Max(Y_{kP1}^P, \dots, Y_{kPL}^P) \qquad \forall k \in K\ \forall p \in P \qquad (۱۰)$$

$$\sum_{P}\sum_{k} Y_{kPl}^P \le 1 \qquad \forall l \in L \qquad (۱۱)$$

$$Y_{kPl}^B \le X_k^{RP} \qquad \forall l \in L \quad \forall k \in K \quad \forall p \in P \qquad (۱۲)$$

$$\sum_{P}\sum_{k} (S_K^U + r_k^{UP} q_k) X_k^{FP} \le B \qquad (۱۳)$$

$$\sum_{P}\sum_{r\in k, r\neq k} Y_{rPl}^B = \sum_{P} Y_{kPl}^P X_k^{UP} (1 - X_k^{FP}) \qquad \forall k \in K \quad \forall l \in L \qquad (۱۴)$$

$$\sum_{O} X_J^O \le 1 \qquad \forall J \in j \qquad (۱۵)$$

$$X_j^O, X_k^{UP}, X_k^{FP}, Y_{kl}^{PR}, Y_{kl}^{PB}, X_k^{RP} \in \{0,1\} \qquad (۱۶)$$

$$U_{ijo}, V_{jokp} \ge 0 \qquad (۱۷)$$

در این مدل، بخش اول تابع هدف، هزینه احداث کارخانه‌ها با سطوح ظرفیت مختلف را محاسبه می‌کند. بخش دوم و سوم تابع هدف، هزینه ثابت استقرار مراکز توزیع مطمئن و نامطمئن را با سطوح انبارش متفاوت نشان می‌دهد. بخش چهارم تابع هدف، کل هزینه خرید و حمل و نقل مواد اولیه از تأمین‌کنندگان به کارخانه‌ها را محاسبه می‌کند. بخش پنجم تابع هدف، هزینه تولید کالا در کارخانه‌ها و حمل و نقل کالا از سطح کارخانه $j$ به مرکز توزیع $k$ (مطمئن و نامطمئن) را نشان می‌دهد. بخش ششم تابع هدف هزینه حمل و نقل از مراکز توزیع به مشتریان را محاسبه می‌کند. در این بخش اثرات راهبردهای چندگانه‌ی پایا بر روی هزینه‌های حمل و نقل بین مراکز توزیع و مشتریان از طریق حالات مختلف احداث مراکز توزیع در مکان‌های پیشنهادی و استفاده از متغیرهای دودویی، در نظر گرفته شده است. در ادامه حالات ممکن تشریح می‌شود.

حالت اول: اگر در مکان پیشنهادی $k$، یک مرکز توزیع مطمئن با سطح ظرفیتی مشخص احداث شود، آنگاه دیگر نیاز به تقویت‌سازی آن نیست و به‌نوعی پشتیبان خود محسوب می‌شود. حالت دوم: اگر در مکان پیشنهادی $k$، یک مرکز توزیع نامطمئن با سطح ظرفیتی مشخصی احداث شود، باید تقویت‌سازی (با بودجه محدود پیش‌بینی شده در شرایط بحرانی) گردد و یا تقاضای مشتریانش در زمان بروز اختلال، از طریق یک مرکز توزیع مطمئن، پشتیبانی شود. در این صورت هزینه نگهداری کالا در مرکز توزیع پشتیبان به منظور تأمین تقاضای مشتریانی که مرکز توزیع اولیه آن‌ها دچار اختلال شده به‌صورت احتمالی در نظر گرفته می‌شود. به بیانی ساده‌تر، اگر مرکز توزیع مطمئنی در یک مکان کاندیدا احداث شود، دیگر نیازی به تقویت‌سازی و یا در نظر گرفتن پشتیبان برای آن وجود ندارد، اما اگر مرکز توزیع نامطمئنی در یک مکان کاندیدا احداث شود، آنگاه باید تقویت‌سازی شود و یا یک مرکز توزیع مطمئن به منظور تأمین تقاضای مشتریانش از آن پشتیبانی کند. بخش هفتم تابع هدف، هزینه عدم تأمین تقاضای مشتریانی را که تحت پوشش قرار نگرفته‌اند، محاسبه می‌کند.

محدودیت (۱): بیان می‌کند که فقط در صورتی از تأمین‌کنندگان به سمت کارخانه $j$ می‌تواند جریان برقرار شود که کارخانه $j$ با سطح ظرفیتی مشخص احداث شده باشد. محدودیت (۲): این اطمینان را حاصل می‌کند که جریان ورودی به هر کارخانه

با جریان خروجی از کارخانه برابر باشد. محدودیت (۳): این اطمینان را حاصل می‌کند که مجموع جریان‌های ورودی به مراکز توزیع باید با مجموع جریان‌های خروجی از آن برابر باشد. محدودیت (۴): بیان می‌کند که تنها در صورتی مرکز توزیع مستقر در مکان $k$ تقویت می‌شود که نامطمئن باشد. محدودیت (۵): تضمین می‌کند که در صورتی از کارخانه‌ها به مرکز توزیع $k$ جریان برقرار شود که در مکان $k$ یک مرکز توزیع مطمئن یا نامطمئن با سطح ظرفیتی مشخص احداث شده باشد. محدودیت (۶): این اطمینان را حاصل می‌کند که میزان تولید هر کارخانه با سطح ظرفیتی مشخص، نباید از ظرفیتش فراتر باشد. محدودیت (۷): تضمین می‌کند که مراکز توزیع اولیه و پشتیبان برای یک مشتری خاص متفاوت باشد. محدودیت (۸): تضمین می‌کند که مجموع جریان‌های ورودی به هر مرکز توزیع با سطح ظرفیتی مشخص، نباید از ظرفیت آن مرکز تجاوز نماید. محدودیت (۹): بیان می‌کند که در مکان توزیع $k$ حداکثر یک نوع مرکز توزیع (مطمئن یا نامطمئن) با سطح ظرفیتی مشخص می‌تواند استقرار پیدا می‌کند.

محدودیت (۱۰): تضمین می‌کند که زمانی می‌توان مرکز توزیعی نامطمئن ایجاد کرد که حداقل یک مشتری به آن تخصیص داده شود.

محدودیت (۱۱): بیان می‌کند که هر مشتری در تخصیص اولیه خود تنها به یک مرکز توزیع (مطمئن یا نامطمئن) با سطح انبارش مشخص، می‌تواند اختصاص یابد. محدودیت (۱۲): نشان می‌دهد که زمانی مرکز توزیع مستقر در مکان پیشنهادی $k$ می‌تواند به‌عنوان پشتیبان مرکز یا مراکز توزیع دیگر در نظر گرفته شود که در آن مکان یک مرکز توزیع مطمئن احداث شود. محدودیت (۱۳): محدودیت بودجه به‌منظور تقویت‌سازی مراکز توزیع نامطمئن، بر اساس احتمال خرابی آنها و یک هزینه ثابت در نظر گرفته شده است. محدودیت (۱۴): تضمین می‌کند که اگر یک مرکز توزیع نامطمئن با سطح انبارش مشخص احداث شود و تقویت نشود آنگاه حتماً یک مرکز توزیع مطمئن به عنوان پشتیبان آن لحاظ خواهد شد.

محدودیت (۱۵): در هر مکان پیشنهادی برای احداث کارخانه، حداکثر یک کارخانه در سطوح ظرفیتی مشخص می‌تواند احداث گردد. محدودیت (۱۶): متغیرهای دودویی مربوط به احداث کارخانه‌ها، مراکز توزیع مطمئن و نامطمئن و نحوه تخصیص مشتریان به مراکز توزیع مختلف، را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۷): غیرمنفی و صحیح بودن متغیرهای جریان بین تسهیلات را بیان می‌کند.

**روند خطی‌سازی مدل**

با بررسی مدل، کاملاً واضح است که مدل مسئله، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته عدد صحیح [1] است، بنابراین در ادامه، روند خطی‌سازی مدل، به‌صورت اجمالی بیان می‌شود. ابتدا، می‌توان با توجه به دودویی بودن متغیرهای محدودیت‌های (۷) و (۱۰)، به ترتیب محدودیت‌های (۱۸) و (۱۹) را جایگزین آن‌ها نمود.

$$\sum_{P} Y^{P}_{kPl} + Y^{B}_{kPl} \le \sum_{P} X^{RP}_{k} + X^{UP}_{k} \qquad \begin{matrix}\forall l \in L \\ \forall k \in K\end{matrix} \qquad (۱۸)$$

$$\sum_{P} X^{UP}_{k} \le \sum_{P}\sum_{l} Y^{P}_{kPl} \qquad \begin{matrix}\forall k \in K \\ \forall p \in P\end{matrix} \qquad (۱۹)$$

در ادامه، برای خطی‌سازی قسمت‌های غیر خطی مدل (در محدودیت‌ها و تابع هدف) از روش تغییر متغیر استفاده شده است. در محدودیت (۱۴) بجای مقدار سمت راست محدودیت از متغیر جدیدی بنام $W_{kPl}$ استفاده شده است. همچنی ن، برای خطی‌سازی قسمت‌های غیرخطی تابع هدف از متغیرهای $E_{kPl}$، $G_{kPl}$، $Y^{PB}_{krPl}$، $YE_{krPl}$، $N_{kPl}$، $YG_{krPl}$، $YN_{krPl}$ استفاده شده است.

$$W_{kPl} = X^{UP}_{k}(1 - X^{FP}_{k})Y^{P}_{kPl} \qquad E_{kPl} = Y^{P}_{kPl}X^{FP}_{k}$$
$$G_{kPl} = Y^{P}_{kPl}X^{RP}_{k} \qquad N_{kPl} = Y^{P}_{kPl}X^{RP}_{k}X^{FP}_{k}$$
$$Y^{PB}_{krPl} = Y^{P}_{rPl}Y^{B}_{kPl} \qquad YE_{krPl} = Y^{B}_{kPl}E_{rPl}$$
$$YG_{krPl} = Y^{B}_{kPl}G_{rPl} \qquad YN_{krPl} = Y^{B}_{kPl}N_{rPl}$$

با توجه به نحوه‌ی تعریف متغیرهای دودویی مدل، متغیرهای جدید $N_{kPl}$ و $YN_{krPl}$ همواره مقداری برابر با صفر می‌گیرند، بنابراین در مدل خطی نهایی وارد نخواهند شد. در ادامه با توجه به NP-سخت بودن مسئله [۱۱] یک الگوریتم ژنیک پیشنهادی برای مسئله ارائه شده است.

## ۳- روش حل

### ۳-۱- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های فراابتکاری است که توسط پروفسور جان هنری هالند [۲۵] با انتشار کتابی تحت عنوان «سازگاری در طبیعت و سیستم‌های مصنوعی» به همگان معرفی شد. ایده اصلی این الگوریتم از سیستم‌های تکاملی موجود در طبیعت الهام گرفته شده است. در الگوریتم ژنتیک، مشابه سیستم‌های تکاملی که طی چندین نسل از موجودات به کمک روش‌های لقاح و جهش ژنتیکی به بهبود و اصلاح نسل می‌پردازند، از مکانیزم جهش، اصلاح و بهبود جواب‌ها در حل مسائل بهینه‌سازی استفاده می‌گردد. بدین منظور، ابتدا با تولید تعدادی جواب اولیه در الگوریتم که به‌صورت رشته‌هایی متشکل از چند ژن[2] (همان متغیرهای مسئله) می‌باشند و به نام کروموزوم[3] شناخته می‌شوند، جمعیت اولیه شکل می‌گیرد. در مرحله بعد با استفاده از یک روش انتخاب، جفت کروموزوم‌هایی از جمعیت اولیه که والدین نامیده می‌شوند، برگزیده شده و با بکارگیری عملگر تقاطع و جهش، نسل بعدی جمعیت ایجاد می‌شود. در گام بعدی با انتخاب جواب‌هایی با تابع برازش بهتر از میان جمعیت نسل حاضر و نسل اول، دوباره جمعیت برتر شکل گرفته و دوباره روند تولید جواب‌های جدید به

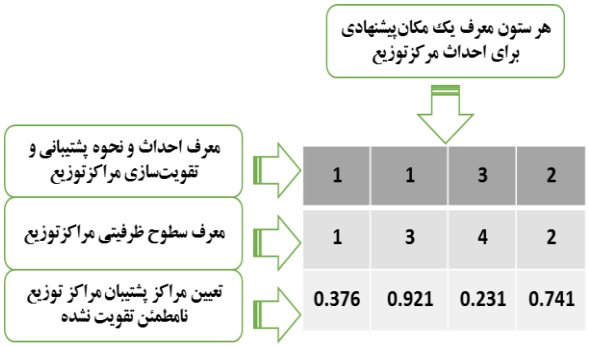
1. Mixed Integer Nonlinear Programming

2. Gene
3. Chromosome

کمک عملگرهای یاد شده تا رسیدن به جواب مطلوب ادامه می‌یابد.

**تعریف کروموزوم‌ها**

هر یک از کروموزوم‌های تعریف شده در این مقاله، شامل ۵ قسمت است. هر قسمت خود از یک یا چند بخش (سطر) مجزا تشکیل شده است و دارای ژن‌های صفر و یک، عدد صحیح و پیوسته هستند. بخش اول کروموزوم نشان‌دهنده‌ی نحوه‌ی احداث مراکز توزیع است. یک نمونه از آن در شکل (۳) نشان داده شده است. این بخش از سه سطر تشکیل شده است که در سطر اول هر یک از ژن‌ها می‌توانند از مجموعه اعداد {0,1,2,3} انتخاب شوند، بطوری‌که عدد صفر نشان دهنده عدم احداث مرکز توزیع، عدد ۱معرف احداث مرکز توزیع مطمئن، عدد ۲ نشان‌دهنده‌ی احداث مرکز توزیع نامطمئن تقویت شده و عدد ۳ نشان‌دهنده‌ی احداث مرکز توزیع نامطمئن دارای پشتیبان است.

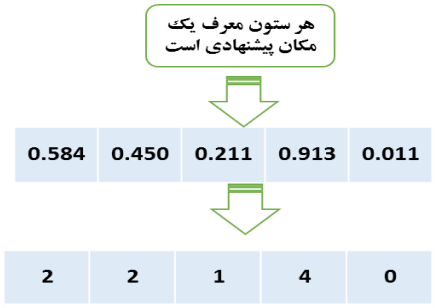



**شکل (۳): بخش اول کروموزوم پیشنهادی**

سطر دوم بخش اول کروموزوم، نشان‌دهنده‌ی ظرفیت انبارش مراکز توزیع احداث شده است. همچنین، از یک سطر پیوسته با اعداد تصادفی در بازه [0,1] برای تعیین پشتیبان مرکز (مراکز) توزیع نامطمئن که تقویت‌سازی نشده‌اند، استفاده شده است. بطوری‌که، بازه [0,1] به تعداد مراکز توزیع مطمئنی که احداث شده‌اند تقسیم‌بندی می‌شود و هر زیر بازه تولید شده به ترتیب معرف مراکز توزیع مطمئن احداث شده در سطر اول است و زمانی که ژنی در سطر اول عدد ۳ را بگیرد (مرکز توزیع نامطمئن تقویت نشده) و عدد تصادفی تولید شده در سطر سوم از ستون مذکور بین کران‌های بالا و پایین هر زیر بازه‌ای (هر زیر بازه به یک مرکز توزیع مطمئن تعلق دارد) قرار بگیرد، آنگاه این مرکز توزیع نامطمئن باید توسط مرکز توزیع مطمئنی که زیر بازه مذکور بدان تعلق دارد، پشتیبانی شود.

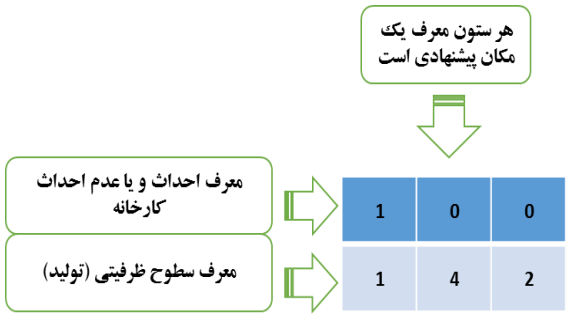
بخش دوم کروموزوم نشان‌دهنده‌ی نحوه تخصیص مشتریان به مراکز توزیع است و در شکل (۴) یک نمونه از آن آورده شده است.

یک رشته از اعداد پیوسته در نظر گرفته شده که تعداد آن‌ها برابر با تعداد مشتریان است و برای تفسیر نحوه تخصیص و یا عدم تخصیص مشتریان به مراکز توزیع، به تعداد مراکز توزیع احداث شده بعلاوه عدد ۱ (در نظر گرفتن حالت عدم پاسخ‌گویی به مشتری) بازه [0,1] به زیر بازه‌های یکسان تقسیم می‌شود. سپس هر یک از ژن‌های این سطر، به هر زیر بازه‌ای که تعلق داشت، آنگاه ژن مورد نظر که معرف یک مشتری خاص است به مرکز توزیع متناظر با زیر بازه مذکور تخصیص می‌یابد و اگر عدد تصادفی تولید شده در هر ژن، متعلق به بازه اول باشد، نشان‌دهنده‌ی این است که این مشتری توسط هیچ مرکز توزیعی پاسخ داده نمی‌شود.




**شکل (۴): بخش دوم کروموزوم پیشنهادی**

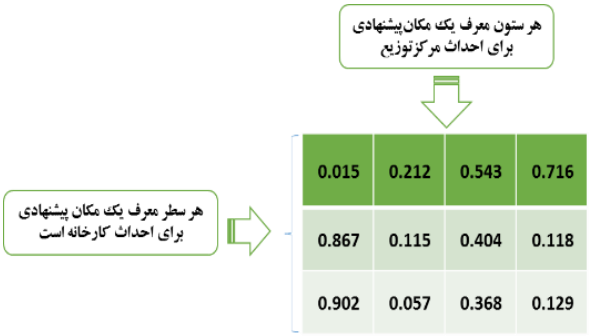
بخش سوم کروموزوم، به احداث کارخانه‌ها با سطوح ظرفیتی مشخص در مکان‌های پیشنهادی تعلق دارد. همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده، این بخش دو سطری در نظر گرفته شده است که در سطر اول اعداد صفر و یک قرار می‌گیرند و عدد یک نشان دهنده احداث و عدد صفر نشان دهنده‌ی عدم احداث کارخانه است. در سطر دوم، اعداد صحیح متعلق به مجموعه‌ی {1,2,3,4} قرار می‌گیرد که نشان دهنده‌ی سطوح ظرفیت است و در این مقاله، ۴ سطح ظرفیت در نظر گرفته شده است.




**شکل (۵): بخش سوم کروموزوم پیشنهادی**

بخش چهارم کروموزوم مربوط به تخصیص مراکز توزیع به کارخانه‌ها است. با توجه به شکل (۶)، این بخش شامل چند سطر از اعداد پیوسته است که ستون‌ها معرف مراکز توزیع و سطرها معرف کارخانه‌ها است. به منظور تخصیص مراکز توزیع مختلف به کارخانه‌ها، ابتدا هر ژن عددی در بازه [0,1] می‌گیرد، سپس در مکان‌هایی که مرکز توزیع و کارخانه‌ای احداث نشده است، سطر و ستون مورد نظرش در این بخش از کروموزوم حذف می‌شود.

بر اساس مفروضات مسئله در هر ستون که به یک مرکز توزیع تعلق دارد، ابتدا مقدار بیشینه اعداد ستون مورد نظر در نظر گرفته شده و سعی می‌شود تا بر اساس ظرفیت کارخانه متناظر با سطر این عدد بیشینه، کل تقاضای این مرکز توزیع از طریق کارخانه مذکور تأمین شود، درصورتی‌که مقداری از تقاضای مرکز توزیع باقی بماند، عدد بیشینه دوم در ستون مورد نظر انتخاب شده و باقیمانده تقاضا از کارخانه متناظر با آن، برداشت می‌شود. روند ذکر شده، برای سایر ستون‌ها که هر یک معرف یک مرکز توزیع است، اعمال می‌شود.




**شکل (۶): بخش چهارم کروموزوم پیشنهادی**

بخش پنجم کروموزوم، مربوط به نحوه تخصیص کارخانه‌ها به تامین‌کنندگان است. با توجه به شکل (۷)، تعداد سطرهای این بخش برابر با تعداد تامین‌کنندگان است و هر ستون معرف یک مکان پیشنهادی برای احداث کارخانه است. هر ژن عددی تصادفی در بازه [0,1] را می‌گیرد، سپس هر مکان که در آن کارخانه‌ای احداث نشده است، همه‌ی اعداد ستونی که معرف این مکان است صفر می‌شود و برای تخصیص هر کارخانه که در مکانی پیشنهادی احداث شده است، ابتدا ستون متناظرش در نظر گرفته می‌شود و بزرگترین عدد درج‌شده در ژن‌های آن ستون انتخاب شده و با این فرض که محدودیت ظرفیتی برای تأمین‌کنندگان وجود ندارد، کل تقاضای مواد اولیه‌ی کارخانه مذکور از تأمین‌کننده‌ای که متناظر با سطر ژن منتخب است، تأمین می‌شود. شایان ذکر است که در محاسبه برازش کروموزوم‌ها، مجموع مقدار تخطی جواب به دست آمده در محدودیت‌های ظرفیت تولید و انبارش کارخانه‌ها و مراکز توزیع و محدودیت بودجه، در یک مقدار جریمه ضرب می‌شود و به تابع هدف اضافه می‌گردد تا الگوریتم مجبور شود در فضای شدنی جستجوی خود را انجام دهد. در این مقاله از روش چرخ رولت[1] به منظور انتخاب کروموزوم‌ها استفاده شده است.

### عملگرهای تقاطع

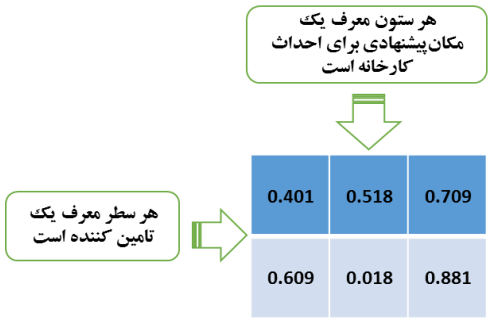
از عملگر تقاطع (به عنوان عملگر اصلی) برای ایجاد جواب‌های نسل جدید، بر اساس ویژگی‌های نسل فعلی استفاده می‌شود. با انجام عمل تقاطع میان والدین منتخب، فرزندان نسل بعد به وجود می‌آیند. در این مقاله با توجه به ساختار کروموزوم‌ها، از دو نوع عملگر تقاطع استفاده شد.

۱- عملگر تقاطع تک نقطه‌ای[2]

۲- عملگر تقاطع پیوسته[3]

در تقاطع تک‌نقطه‌ای، یک نقطه به تصادف در طول هر دو کروموزوم انتخاب شده و دو کروموزوم والد از آن نقطه با یکدیگر جا به جا می‌شوند. از این عملگر تقاطع، به منظور ترکیب بخش‌های دودویی و عدد صحیح کروموزوم پیشنهادی استفاده می‌شود.

1. Roulette Wheel
2. Double Point Crossover
3. Continues Crossover




**شکل (۷): بخش پنجم کروموزوم پیشنهادی**

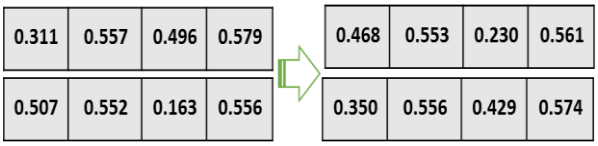
همچنین به منظور ترکیب قسمت پیوسته کروموزوم‌ها از عملگر تقاطع پیوسته که جنس متغیرهای تصمیم‌شان از نوع اعداد حقیقی[4] است، استفاده می‌شود. اگر $Q_1^{\text{والد}}$ و $Q_2^{\text{والد}}$ به ترتیب بردارهای جواب مربوط به والد اول و دوم و نیز $Q_1^{\text{فرزند}}$ و $Q_2^{\text{فرزند}}$ بردارهای جواب مربوط به فرزندان باشند، آنگاه عملگر تقاطع پیوسته با استفاده از دو رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$Q_1^{\text{فرزند}} = Alpha \times Q_1^{\text{والد}} + (1 - Alpha) \times Q_2^{\text{والد}}$$

$$Q_2^{\text{فرزند}} = Alpha \times Q_2^{\text{والد}} + (1 - Alpha) \times Q_1^{\text{والد}}$$

در روابط فوق، $Alpha$ یک مقدار تصادفی یکنواخت بین $-Gamma$ و $1+Gamma$ است که در آن مقدار پارامتر $Gamma$ به صورت ورودی به الگوریتم داده می‌شود. در ادامه، یک نمونه تقاطع تک نقطه‌ای و تقاطع پیوسته بر روی بخش اول کروموزوم، در شکل‌های (۸) و (۹) نمایش داده شده است.

**شکل (۸): تقاطع تک نقطه‌ای در سطر دوم بخش اول کروموزوم**




**شکل (۹): عملگر تقاطع پیوسته در سطر سوم بخش اول کروموزوم**

### عملگرهای جهش

عملگر جهش برای تنوع بخشی به پاسخ‌ها و جستجو در مناطق اکتشاف نشده در فضای جواب استفاده می‌شود. با توجه به ساختار کروموزوم ارائه شده قسمت‌های که به صورت صفر و یک هستند در صورت انتخاب برای ایجاد عملگر جهش، یکی از ژن‌ها به تصادف انتخاب شده و اگر مقداری برابر صفر داشت، مقدار یک و در صورتی که مقدارش برابر یک بود، مقدار صفر جایگزین آن ژن می‌شود. همچنین برای قسمت‌های از کروموزوم که دارای ساختار عدد صحیح است از همین نوع جهش تک نقطه‌ای استفاده می‌شود. یک

4. Real Number

نمونه جهش تک نقطه‌ای در شکل (۱۰) نمایش داده شده، که مربوط به سطر اول بخش اول کروموزوم پیشنهادی می‌باشد.

**شکل (۱۰): جهش در سطر اول بخش اول کروموزوم پیشنهادی**

حال، با توجه به اینکه سطر سوم بخش اول و کل بخش دوم، چهارم و پنجم کروموزوم پیشنهادی پیوسته هستند، از روابط زیر به منظور ایجاد جهش در کروموزوم‌ها استفاده می‌شود. رابطه مورد نظر به قرار زیر است:

$$Q^{\text{فرزند}} = Q^{\text{والد}} + randn * sigma$$

در رابطه فوق مقدار $Sigma$ توسط تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود و randn تابعی است که مقدار تصادفی نرمال با میانگین صفر و انحراف معیار ۱ تولید می‌کند.

## ۳-۲- مثال‌های عددی و تنظیم پارامتر الگوریتم

در این مقاله، با الگوبرداری از پژوهش‌های صورت گرفته در ادبیات موضوع [۳, ۱۱, ۱۹, ۲۲] و با توجه به ساختار مسئله و روابط بین پارامترهای مدل، مثال‌های عددی در سه اندازه کوچک، متوسط و بزرگ تعریف شده‌اند. تعداد مکان‌های بالقوه برای احداث کارخانه‌ها به ترتیب در مثال‌های کوچک، متوسط و بزرگ ۵، ۵ و ۶ در نظر گرفته شده است. تعداد مکان‌های بالقوه برای احداث مراکز توزیع به ترتیب ۷، ۷ و ۸ لحاظ شده است. نهایتاً تعداد مشتریان در این سه اندازه به ترتیب در بازه‌های [۲۰,۳۰]،[۳۰,۴۰] و [۴۰,۵۰] می‌باشند. در تمامی مثال‌ها، مقدار بودجه، ۳۵۰۰۰ واحد پولی در نظر گرفته شده است. اطلاعات مربوط به توزیع پارامترهای مدل در جدول (۱) آورده شده است. همچنین، سطوح ظرفیت تولیدی کارخانه‌ها و انبارش مراکز توزیع در هر سه اندازه از مثال‌های تعریف شده، برابر ۴ سطح (کوچک، متوسط، نسبتاً بزرگ و بزرگ) در نظر گرفته شده است و تعداد تأمین‌کنندگان نیز در تمام مثال‌ها، برابر ۵ عدد لحاظ شده است. اطلاعات مربوط به توزیع پارامترهای مدل در جدول ۱ آورده شده است. در این جدول، $P$ و $O$ همان سطوح ظرفیتی هستند که در مدل تعریف شده‌اند.

فاصله بین سطوح شبکه با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است، که به صورت نمونه برای سطوح تأمین‌کنندگان و کارخانه‌ها در ادامه آورده شده است.

$$d_{ij} = \left\lfloor \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2} \right\rfloor$$

در رابطه فوق $X_i$ مختصات افقی و $Y_i$ مختصات عمودی تأمین‌کننده iام بر روی نقشه است. $X_j$ و $Y_j$ مختصات عمودی کارخانه jام بر روی نقشه است و دارای یکنواخت گسسته در فاصله [25,50] است. هزینه حمل‌ونقل کالا بین سطوح شبکه ($\omega_{ij}$، $\omega_{jk}$، $\omega_{kl}$) به ازای هر واحد کالا، دارای توزیع گسسته یکنواخت در فاصله [25,50] است.

**جدول (۱): اطلاعات مربوط به توزیع پارامترهای مدل**

| پارامتر | بازه مقدارگیری |
|---|---|
| $D_l$ | $U \in [800,1000]$ |
| $BS_i$ | $U \in [15,20]$ |
| $T_l$ | $U \in [500,550]$ |
| $F_j^o$ | $U \in [(21-3O)*10^5, (23-3O)*10^5]$ ] |
| $F_j^{UP}$ | $U \in [(68-8P)*10^3, (72-8P)*10^3]$ |
| $F_j^{RP}$ | $U \in [(34-4P)*10^4, (36-4P)*10^4]$ |
| $S_K^U$ | $U \in [(30)*10^3, (32)*10^3]$ |
| $r_K^{UP}$ | $U \in [(26-2P)*10^3, (27-2P)*10^3]$ |
| $q_K^P$ | $U \in [(2P)*10^{-2}, (2P+1)*10^{-2}]$ |
| $PF_j^O$ | $U \in [(31+5O), (35+5O)]$ |
| $h_j^P$ | $U \in [2P, 2P+1]$ |
| $C_j^O$ | $U \in [(50-10*O)*10^3, (55-10*O)*10^3]$ |
| $CD_k^P$ | $U \in [(31+5O), (35+5O)]$ |

الگوریتم فراابتکاری ژنتیک در نرم‌افزار MATLAB 2014a کد نویسی شده و توسط یک سیستم رایانه‌ای با پردازنده‌ی Core i5 2.67 GHz و با حافظه داخلی 4GB، پیاده‌سازی شده است.

### تنظیم پارامتر به روش تاگوچی

روش تاگوچی یکی از پرکاربردترین روش‌های آماری برای تحلیل حساسیت خروجی یک فرآیند در حوزه طراحی آزمایشات به شمار می‌رود. این روش زمانی استفاده می‌شود که با انجام بخشی از کل آزمایشات لازم برای تعیین سطوح بهینه عوامل (مستقل) در نظر گرفته شده، به تعیین بهترین سطح خروجی فرآیند پرداخته شود. به این نوع از طرح‌ها، طرح‌های عاملی کسری گفته می‌شود.

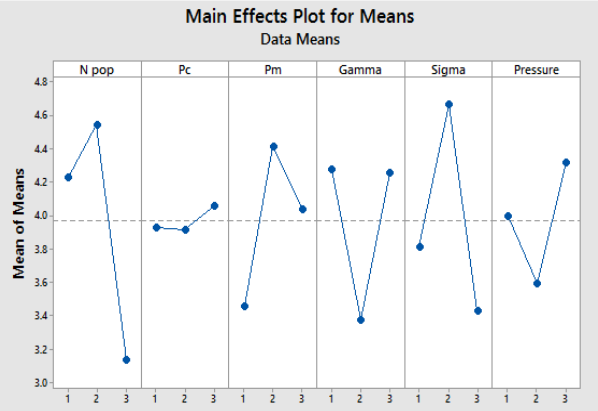
این روش داده‌های تکراری به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها را به یک نشانگر تغییرات تبدیل می‌نماید که به آن تبدیل نسبت سیگنال به نویز گفته می‌شود. هدف از روش تاگوچی، حداکثرسازی این نشانگر است. پارامترهای الگوریتم GA پیشنهادی که برای تنظیم در نظر گرفته شده، شش مورد است و سطوحی که برای این پارامترها لحاظ شده است، در جدول (۲) آورده شده است.[۲۶].

**جدول (۲): سطوح پارامترهای الگوریتم ژنتیک**

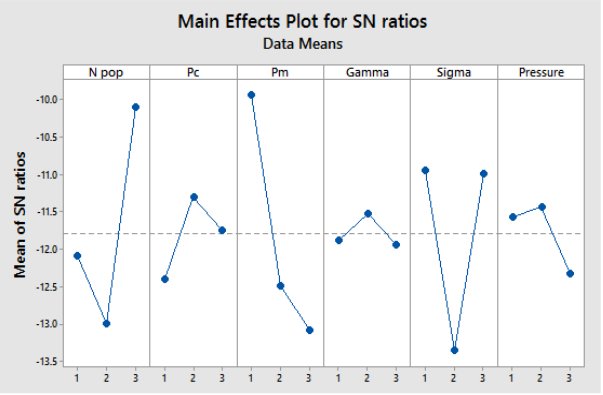
| ردیف | پارامتر | سطح | | |
|---|---|---|---|---|
| | | پایین | متوسط | بالا |
| | | ۱ | ۲ | ۳ |
| ۱ | تعداد جمعیت | ۱۵۰۰ | ۲۵۰۰ | ۳۵۰۰ |
| ۲ | درصد تقاطع | ۰/۷ | ۰/۸ | ۰/۹ |
| ۳ | درصد جهش | ۰/۱ | ۰/۲ | ۰/۳ |
| ۴ | Gamma | ۰/۰۵ | ۰/۱ | ۰/۱۵ |
| ۵ | sigma | ۰/۰۵ | ۰/۱ | ۰/۱۵ |
| ۶ | Selection Pressure | ۴ | ۵ | ۷ |

با توجه به تعداد پارامترها، ۲۷ آزمایش توسط طراحی آزمایشات به روش تاگوچی پیشنهاد گردید. شکل (۱۱) و (۱۲)

نشان‌دهنده‌ی اثرات اصلی میانگین و نسبت سیگنال به نویز در ۲۷ آزمایش انجام شده برای مثال‌ها با ابعاد کوچک است که در واقع خروجی نهایی روش تاگوچی را نمایش می‌دهند. شایان ذکر است که هر یک از آزمایش‌های عددی پیشنهاد شده توسط این روش در مثال‌های عددی کوچک، پنج مرتبه و در مثال‌های عددی متوسط و بزرگ هر کدام سه مرتبه تکرار شده‌اند. سپس، بهترین جواب هر یک از آزمایشات گزارش شد. در مرحله بعد با استفاده از روش نرمال‌سازی RPD، مقدار عددی هر یک از شاخص‌ها نرمال‌سازی شد. باید توجه داشت نرمال‌سازی به‌صورت شاخص به شاخص انجام شده و داده‌ها به‌گونه‌ای نرمال شدند که بهترین مقادیر به سمت صفر و بدترین مقدارها به سمت صد نگاشت شوند.




**شکل (۱۱): نمایش اثرات اصلی میانگین در آزمایشات انجام شده**



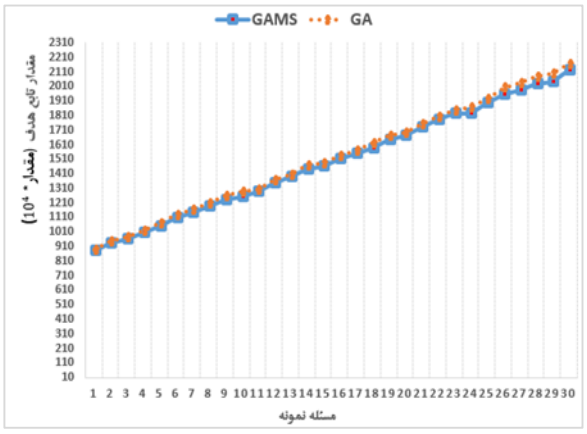

**شکل (۱۲): نمایش اثرات سیگنال به نویز در آزمایشات انجام شده**

نتایج پس از تنظیم پارامترها، در جدول (۳) نشان داده شده است.

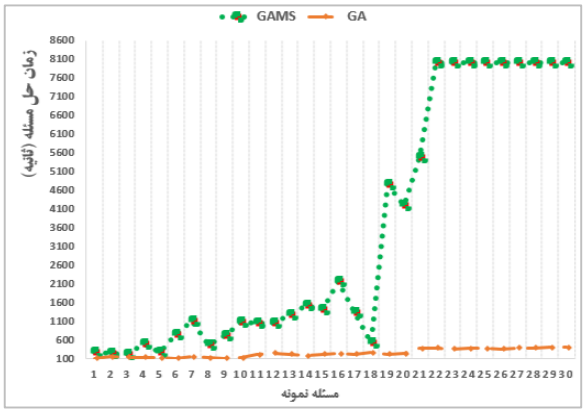
**جدول (۳): مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم ژنتیک**

| ردیف | پارامتر | اندازه | | |
|---|---|---|---|---|
| | | کوچک | متوسط | بزرگ |
| | | ۱ | ۲ | ۳ |
| ۱ | تعداد جمعیت | ۳۵۰۰ | ۲۵۰۰ | ۳۵۰۰ |
| ۲ | درصد تقاطع | ۰/۸ | ۰/۹ | ۰/۹ |
| ۳ | درصد جهش | ۰/۱ | ۰/۳ | ۰/۲ |
| ۴ | Gamma | ۰/۱ | ۰/۱۵ | ۰/۱۵ |
| ۵ | sigma | ۰/۱۵ | ۰/۱ | ۰/۱ |
| ۶ | Selection Pressure | ۵ | ۵ | ۵ |

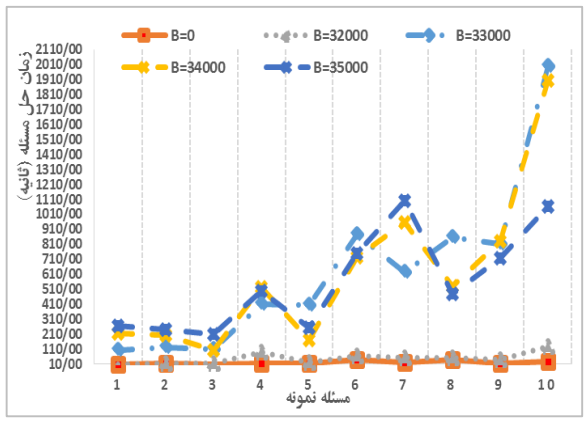
بر اساس نتایج حاصله که در جدول (۴) نمایش داده شده است، کاملاً مشهود است که الگوریتم ژنتیک، به عنوان کران بالای مسئله، کارایی بسیار مناسبی را از خود نشان داده است. بطوری‌که در مسائل با اندازه‌های مختلف، به ترتیب متوسط، بیشینه و کمینه خطای الگوریتم (در ۵ مرتبه اجرا)، برابر ۱/۷۸، ۲/۹۵ و۰/۵۲ بدست آمده است.




**شکل (۱۳): مقایسه جواب‌های الگوریتم ژنتیک با جواب‌های گمز**




**شکل (۱۴): مقایسه زمان حل الگوریتم ژنتیک با نرم‌افزار گمز**




**شکل (۱۵): بودجه و زمان حل GAMS برای ۱۰ مثال اول**

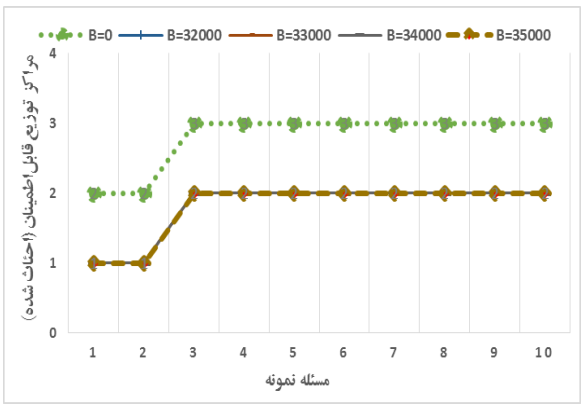
در ادامه، به منظور بررسی روش حل مسئله و پارامترهای مدل، چند نمونه از تحلیل حساسیت‌های مهم با توجه به ساختار مسئله آورده شده است. همچنین به منظور نشان دادن قدرت کاوش الگوریتم ژنتیک، در دست‌یابی به جواب‌های مناسب برای مسئله تحت بررسی، نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک برای دو نمونه از مثال‌های درج شده در جدول (۴)، در ادامه آورده شده است.

جدول (۴): جواب‌های الگوریتم ژنتیک و جواب‌های GAMS

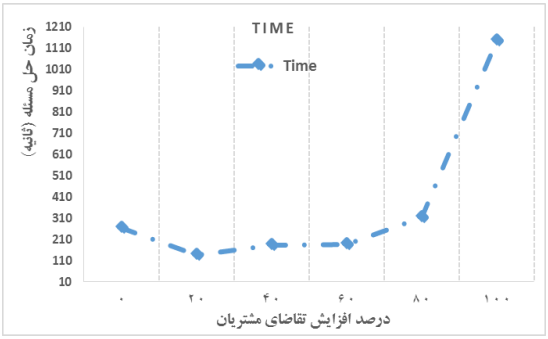
| مسئله نمونه | تعداد مشتریان | جواب GAMS (مقدار * $10^6$) | زمان حل در GAMS (ثانیه) | شکاف GA با جواب GAMS (درصد) | بهترین جواب GA (مقدار * $10^6$) | زمان حل در GA (ثانیه) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۲۰ | ۸/۸۲۵ | ۲۶۵/۱۰ | ۰/۵۲ | ۸/۸۷۱ | ۱۰۹/۲۴ |
| ۲ | ۲۱ | ۹/۳۳۹ | ۲۴۱/۱۰ | ۱/۳۷ | ۹/۴۶۸ | ۱۴۱/۷۵ |
| ۳ | ۲۲ | ۹/۵۹۳ | ۲۱۱/۷۰ | ۱/۹۶ | ۹/۷۸۲ | ۱۲۹/۰۱ |
| ۴ | ۲۳ | ۱۰/۰۵۱ | ۴۹۶/۶۷ | ۱/۶۳ | ۱۰/۲۱۵ | ۱۲۷/۶۳ |
| ۵ | ۲۴ | ۱۰/۴۶۵ | ۲۵۶/۹۰ | ۲/۵۴ | ۱۰/۷۳۱ | ۱۱۹/۵۸ |
| ۶ | ۲۵ | ۱۱/۰۳۷ | ۷۵۲/۲۳ | ۲/۱۳ | ۱۱/۲۷۳ | ۱۰۷/۲۱ |
| ۷ | ۲۶ | ۱۱/۴۱۱ | ۱۱۰۰/۱۲ | ۱/۷۸ | ۱۱/۶۱۵ | ۱۴۸/۱۱ |
| ۸ | ۲۷ | ۱۱/۸۲۴ | ۴۶۴/۵۶ | ۱/۹۰ | ۱۲/۰۴۹ | ۱۲۱/۱۵ |
| ۹ | ۲۸ | ۱۲/۳۲۴ | ۷۲۰/۳۹ | ۲/۰۸ | ۱۲/۵۸۱ | ۱۰۷/۴۶ |
| ۱۰ | ۲۹ | ۱۲/۵۱۱ | ۱۰۶۰/۹۶ | ۲/۹۴ | ۱۲/۸۸۰ | ۱۱۶/۸۳ |
| ۱۱ | ۳۰ | ۱۲/۸۹۰ | ۱۰۴۷/۶۸ | ۱/۰۰ | ۱۳/۰۱۹ | ۱۹۸/۰۳ |
| ۱۲ | ۳۱ | ۱۳/۴۴۰ | ۱۰۵۶/۲۹ | ۱/۹۷ | ۱۳/۷۰۵ | ۲۴۲/۶۵ |
| ۱۳ | ۳۲ | ۱۳/۹۲۰ | ۱۲۶۵/۰۶ | ۰/۹۰ | ۱۴/۰۴۶ | ۲۱۴/۰۹ |
| ۱۴ | ۳۳ | ۱۴/۴۲۵ | ۱۵۰۵/۴۵ | ۱/۷۸ | ۱۴/۶۸۳ | ۱۷۹/۱۲ |
| ۱۵ | ۳۴ | ۱۴/۶۴۴ | ۱۴۱۸/۳۱ | ۱/۴۸ | ۱۴/۸۶۱ | ۲۱۵/۹۵ |
| ۱۶ | ۳۵ | ۱۵/۱۲۲ | ۲۱۶۳/۹۳ | ۱/۶۴ | ۱۵/۳۷۱ | ۲۳۱/۰۱ |
| ۱۷ | ۳۶ | ۱۵/۴۷۱ | ۱۳۳۴/۱۱ | ۱/۴۹ | ۱۵/۷۰۲ | ۲۱۶/۱۹ |
| ۱۸ | ۳۷ | ۱۵/۸۵۹ | ۵۱۹/۱۴ | ۲/۲۰ | ۱۶/۲۰۹ | ۲۵۳/۷۱ |
| ۱۹ | ۳۸ | ۱۶/۴۰۳ | ۴۷۵۴/۶۵ | ۱/۷۴ | ۱۶/۶۸۹ | ۲۱۳/۴۸ |
| ۲۰ | ۳۹ | ۱۶/۷۴۳ | ۴۱۹۳/۷۰ | ۱/۲۴ | ۱۶/۹۵۱ | ۲۲۴/۷۹ |
| ۲۱ | ۴۰ | ۱۷/۲۷۷ | ۵۴۶۸/۳۱ | ۱/۲۱ | ۱۷/۴۸۶ | ۳۷۰/۰۴ |
| ۲۲ | ۴۱ | ۱۷/۸۲۲* | ۸۰۰۰ | ۱/۰۱ | ۱۸/۰۰۲ | ۳۸۴/۱۶ |
| ۲۳ | ۴۲ | ۱۸/۲۵۶* | ۸۰۰۰ | ۱/۱۸ | ۱۸/۴۷۱ | ۳۵۲/۳۱ |
| ۲۴ | ۴۳ | ۱۸/۲۱۳* | ۸۰۰۰ | ۲/۶۴ | ۱۸/۶۹۴ | ۳۶۴/۱۷ |
| ۲۵ | ۴۴ | ۱۸/۹۹۷* | ۸۰۰۰ | ۱/۳۲ | ۱۹/۲۴۷ | ۳۷۷/۴۸ |
| ۲۶ | ۴۵ | ۱۹/۵۳۵* | ۸۰۰۰ | ۲/۴۶ | ۲۰/۰۱۵ | ۳۵۹/۸۳ |
| ۲۷ | ۴۶ | ۱۹/۸۲۳* | ۸۰۰۰ | ۲/۴۴ | ۲۰/۳۰۷ | ۳۸۰/۰۹ |
| ۲۸ | ۴۷ | ۲۰/۲۷۸* | ۸۰۰۰ | ۲/۵۸ | ۲۰/۸۰۲ | ۳۸۵/۱۵ |
| ۲۹ | ۴۸ | ۲۰/۴۳۸* | ۸۰۰۰ | ۲/۷۷ | ۲۱/۰۰۵ | ۳۹۴/۴۳ |
| ۳۰ | ۴۹ | ۲۱/۱۷۶* | ۸۰۰۰ | ۲/۲۵ | ۲۱/۶۵۲ | ۳۹۹/۵۲ |

*بهترین جواب به‌دست‌آمده در ۸۰۰۰ ثانیه است و ممکن است این جواب، بهینه نباشد.

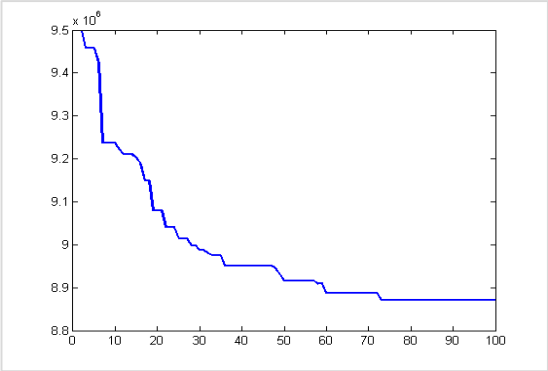
شکل (۱۶): بودجه و جواب GAMS برای ۱۰ مثال اول



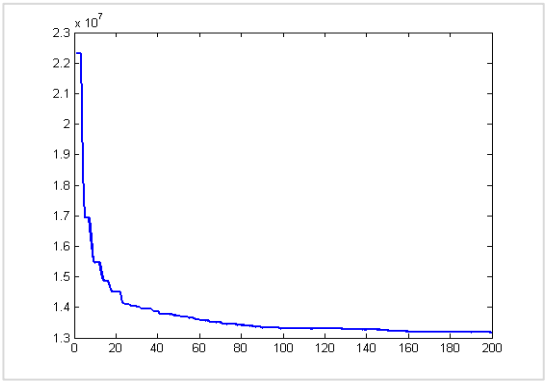

شکل (۱۷): تأثیر بودجه بر تعداد مراکز توزیع قابل‌اطمینان احداث شده، برای ۱۰ مثال اول




**شکل (۱۸): تأثیر درصد افزایش تقاضا، بر زمان حل مسئله در مثال اول**



**شکل (۱۹): نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، برای مثال اول**



**شکل (۲۰): نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، برای مثال یازدهم**

## ۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، ابتدا به بررسی مسائل مکان‌یابی پایا و طراحی شبکه زنجیره تأمین با در نظر گرفتن پایایی تسهیلات پرداخته شد و با بررسی ادبیات موضوع و تجزیه و تحلیل خلأهای آن، یک مسئله‌ی جدید به منظور طراحی شبکه زنجیره‌ی تأمین سه سطحی با در نظر گرفتن راهبردهای پایای چندگانه در سطح مراکز توزیع مطرح گردید. سپس، با توجه به پیچیدگی محاسباتی مسئله، یک الگوریتم ژنتیک پیشنهادی برای آن ارائه شد. به منظور افزایش کارایی الگوریتم از روش طراحی آزمایشات تاگوچی برای تنظیم پارامترهای الگوریتم استفاده شد. نتایج محاسباتی و خطای الگوریتم در دستیابی به جواب‌های مناسب حاکی از آن است که الگوریتم توانسته است جواب‌های مناسب را در یک زمان قابل قبول ارائه دهد. نهایتاً حساسیت مدل بر روی برخی از پارامترهای مهم همچون بودجه، مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور توسعه‌های آتی، می‌توان به مواردی همچون، توسعه رویکردهای حل دقیق، طراحی سایر الگوریتم‌های فرابتکاری و مقایسه نتایج الگوریتم ژنتیک پیشنهادی با آن‌ها و در نظر گرفتن عدم قطعیت در عملکرد تسهیلات سطوح دیگر به طور همزمان، همچون کارخانه‌ها و یا تأمین‌کنندگان اشاره نمود.

## مراجع


[1] Campbell, J.F., (1994). "Integer programming formulations of discrete hub location problems", European Journal of Operational Research, 72(2): 387-405.

[2] Hekmatfar, M., Farahani, R.Z., (2009). "Facility Location: Concepts, Models", Algorithms and Case Studies., Physica.

[3] Snyder, L.V., Daskin, M.S., (2005). "Reliability models for facility location: the expected failure cost case", Transportation Science, 39(3): 400-416.

[4] Sabri, E.H., B.M. Beamon, (2000). "A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design", Omega, 28(5): 581-598.

[۵] توکلی‌مقدم، رضا، افشاری‌نیا، زهرا، قلی‌پورکنعانی، یوسف (۱۳۹۲). استفاده از روش تجزیه بندرز برای حل مسأله طراحی شبکه زنجیره تأمین چند محصولی دو سطحی با تقاضای تصادفی، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم های تولید، ۲: ۱۵۵-۱۶۵.

[6] Peidro, D., Mula, J., Poler, R., Verdegay, J.L., (2009). "Fuzzy optimization for supply chain planning under supply, demand and process uncertainties", Fuzzy sets and systems, 160(18): 2640-2657.

[7] Peidro, D., Díaz-Madroñero, M., Vasant, P., (2010). "A fuzzy linear programming based approach for tactical supply chain planning in an uncertainty environment", European Journal of Operational Research, 205(1): 65-80.

[۸] غفاری‌نسب، نادر، غضنفری، مهدی، تیموری، ابراهیم (۱۳۹۲). طراحی شبکه لجستیک هاب استوار با در نظر گرفتن تقاضاهای تصادفی برای شرکت‌های ارائه دهنده خدمات لجستیکی، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۲: ۹۷-۱۰۷.

[9] Snyder, L.V., (2006). "Facility location under uncertainty: a review", IIE Transactions, 38(7): 547-564.

[10] Klibi, W., Martel, A., Guitouni, A., (2010). "The design of robust value-creating supply chain networks: a critical review", European Journal of Operational Research, 203(2): 283-293.

[11] Li, Q., Zeng, B., Savachkin, A., (2013). "Reliable facility location design under disruptions", Computers & Operations Research,. 40(4): 901-909.

[12] Wu, D., Huang, J., (2012). "Reliable facility location problem considering facility failure scenarios", Kybernetes, 41(10): 1440-1461.

[13] Lim, M., Daskin, M.S., Bassamboo, A., Chopra, S., (2010). "A facility reliability problem: formulation, properties, and algorithm", Naval Research Logistics (NRL), 57(1): 58-70.

[14] Li, X., Ouyang, Y., (2010). "A continuum approximation approach to reliable facility location design under correlated probabilistic disruptions", Transportation research part B: methodological,. 44(4): 535-548.

[15] Cui, T., Ouyang, Y., Shen, Z.J.M., (2010). "Reliable facility location design under the risk of disruptions", Operations Research, 58(4): 998-1011.

[16] Berman, O., D. Krass, (2011). "On n-facility median problem with facilities subject to failure facing uniform demand", Discrete Applied Mathematics, 159(6): 420-432.

[17] Jabbarzadeh, A., Jalali Naini, S.G., Davoudpour, H., Azad, N., (2012). "Designing a supply chain network under the risk of disruptions", Mathematical Problems in Engineering, 2012.

[18] O'Hanley, J.R., Scaparra, M.P., García, S., (2013). "Probability chains: A general linearization technique for modeling reliability in facility location and related problems", European Journal of Operational Research, 230(1): 63-75.

[19] Ashtiani, L.H., M. Seifbarghy, M. Bashiri., (2013). "Reliable cooperative and backup covering in disaster situations", Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), IEEE International Conference on.

[20] Medal, H.R., Pohl, E.A., Rossetti, M.D., (2014). "A multi-objective integrated facility location-hardening model: Analyzing the pre-and post-disruption tradeoff", European Journal of Operational Research, 237(1): 257-270.

[21] Li, Q., A. Savachkin, (2014). "Reliable distribution networks design with nonlinear fortification function", International Journal of Systems Science, (ahead-of-print): 1-9.

[22] Ali, S.M., Nakade, A., (2015), "Mathematical Optimization Approach to Supply Chain Disruptions Management Considering Disruptions to Suppliers and Distribution Centers", operations and supply chain management 8(2): 57-66.

[23] Rohaninejad, M., A. Amiri, M. Bashiri, (2015). "Heuristic Methods Based on MINLP Formulation for Reliable Capacitated Facility Location Problems", International Journal of Engineering Science (2008-4870), 26(3).

[24] Tang, L., Zhu, C., Lin, Z., Shi, J., Zhang, W., (2016). Reliable Facility Location Problem with Facility Protection. PloS one, 11(9): e0161532.

[25] Holland, J.H., (1992). "Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence", MIT press.

[26] Roy, R., (1990). "A Primer on the Taguchi Method, Society of Manufacturing Engineers", Ann Arbor, Mich, USA.

IERPS Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

ISSN: 2345-2269

Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

Spring and Summer 2017 Volume 5. No. 10. pp.53-67
www.ier.basu.ac.ir

DOI: 10. 22084/ier.2017.11534.1525

# The Multi-Echelon Supply Chain Network Design Subject To Multiple Reliable Strategies in Distribution Centers Level

**H. Farughi[1,*], M. Ashrafi Fashi[1]**

[1] Department of Industrial Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

ARTICLE INFO

***Article history*:**

Received 21 September 2016
Accepted 26 July 2017

***Keywords*:**

Multi-echelon supply chain network
Facilities Location
Reliable strategies
Genetic algorithm
Taguchi design of experiment

ABSTRACT

In the most of reliable location problems, the main objective is to minimize the total cost of establishment and shipping a single level network, taking into account a strategy to strengthen the reliability of the network. Therefore, in this paper more objective facts are considered; a model for designing a three-echelon supply chain network, taking into account reliable strategies across multiple distribution centers is presented. In this model, both reliable and unreliable distribution centers are considered. The strategy is in a way that if an unreliable distribution centers established in a candidate location, it should be fortified by the limited budget for unreliable distribution centers in critical situations or a reliable distribution center should be set as the backup to respond the customers in the case of failure. On the other hand, if a reliable distribution center were established in a candidate location, this center would be a backup itself. Considering the computational complexity of the problem and the presented model, a genetic algorithm is used. After setting the Taguchi design of experiments, the solutions in small, medium and large sizes were compared with results obtained from GAMS optimization software. The results show the percentage of algorithm gap, in all problems solved, is less than 3 percentage. This shows the effectiveness of the proposed algorithm.

* Corresponding author. Hiwa Farughi
Tel.: 087-33660073; *E-mail address: h.farughi@uok.ac.ir*