فصلنامه علمی – پژوهشی مطالعات مدیریت صنعتی – سال شانزدهم، شماره ۴۹، تابستان ۹۷
صفحات ۱۹۸-۱۷۳

مدل بهینه‌سازی مکانیابی-تخصیص تسهیلات قابل اطمینان تحت ریسک اختلال در تسهیلات

مهدی سیف برقی،* شیما زنگنه**

تاریخ دریافت: ۹۵/۴/۲۰- تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۱۹

چکیده

در مدل‌های کلاسیک مکانیابی تسهیلات به طور ضمنی فرض می‌شود که تسهیلات انتخاب شده همواره طبق برنامه کار خواهند کرد، در حالی که، در دنیای واقعی تسهیلات همواره در معرض ریسک اختلال هستند و گاهی این اختلالات اثر بلند مدت روی شبکه زنجیره تأمین گذاشته و آن را با بحران مواجه می‌کند. در این مقاله، یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط جهت تعیین نحوه خدمت رسانی به مشتریان در زمان اختلال مراکز توزیع در یک زنجیره تأمین دو سطحی شامل توزیع کنندگان و مشتریان ارائه شده است. این مدل مکان‌هایی را برای توزیع کننده‌ها انتخاب می‌کند که علاوه بر حداقل نمودن هزینه‌های معمول زنجیره تأمین، هزینه‌های حمل و نقل بعد از مختل شدن توزیع کننده‌ها نیز حداقل شوند. در واقع سعی می‌شود انتخاب محل توزیع کنندگان با کم ترین هزینه و بیشترین قابلیت اطمینان صورت گرفته و ضمناً تخصیص مشتریان به آنها انجام شود. با استفاده از رویکرد لاگرانژ مسأله آزاد سازی شده و به دو زیر مسئله تقسیم می‌شود. با بررسی شرایط بهینگی زیر مسئله‌ها، حل ابتکاری برای زیر مسأله اول و الگوریتم ژنتیک برای زیر مسأله دوم به منظور حل مسائل با ابعاد بزرگ استفاده شده است. در پایان، عملکرد و کارایی مدل و روش پیشنهادی در قالب مثال‌های عددی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

کلمات کلیدی: مکانیابی- تخصیص، مدیریت زنجیره تأمین، اختلال، الگوریتم ژنتیک، آزاد سازی لاگرانژ

---

* دانشیار گروه مهندسی صنایع دانشگاه الزهرا، تهران، ایران (نویسنده مسئول) m.seifbarghy@alzahra.ac.ir
** کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران

مقدمه

به منظور کاهش اختلال در یک زنجیره تأمین، طراحی یک شبکه قابل اطمینان بسیار مهم و تاثیر گذار است. در مدل‌های کلاسیک مکانیابی تسهیلات به طور ضمنی فرض می‌شود که تسهیلات همیشه طبق برنامه کار خواهند کرد و تسهیلات به گونه ای جایابی می‌شوند که گویی هیچگاه دچار اختلال نمی شوند. در حالی که در دنیای واقعی، شرکت‌ها سالانه با حوادث غیر منتظره متعددی در زنجیره تأمین خود رو به رو می‌شوند. اگر چه برخی شرکت‌ها خطرات ناشی از اختلال را در سطح عملیاتی مدیریت می‌کنند، اما گاهی این اختلالات به صورت بلند مدت روی شبکه زنجیره تأمین اثر گذاشته و شرکت‌ها را دچار بحران می‌کند. سازمان‌ها برای اینکه بتوانند از عهده این اختلالات برآیند، باید یک شبکه لجستیکی قابل اطمینان برای خود طراحی کنند. حوادثی از جمله حمله تروریستی ۱۱ سپتامبر ۲۰۰۱ و حملات سیاه زخم در سال ۲۰۰۲ و تاثیر آن بر سیستم پستی ایالات متحده، طوفان کاترینا و ریتا در سال ۲۰۰۵ و زلزله فوکوشیما در سال ۲۰۱۱ ، نیاز به در نظر گرفتن ریسک ابتلا به اختلالات، در زمان طراحی یک شبکه لجستیکی را پر رنگ کردند (بردلی[1]، ۲۰۱۴). پس از وقوع اختلال در یک شبکه، منابع و زمان بسیار کمی برای بازسازی و ترمیم زیرساخت‌های استراتژیک شبکه وجود دارد. با این حال بررسی‌ها نشان داده است که سرمایه گذاری اضافی هنگام طراحی اولیه یک شبکه می‌تواند منجر به عملکرد مطلوب زنجیره تأمین هنگام وقوع اختلال شود (لئونارد[2]، ۲۰۰۵). تعیین مکان مراکز توزیع، یکی از سوالات اساسی در طراحی سیستم‌های لجستیک است. زیرا تعیین مکان مراکز توزیع نه تنها بر سودآوری یک سازمان، بلکه بر توانایی سازمان در جلب رضایت مشتریان نیز موثر است. مسائل متعددی در زمینه مکانیابی و تخصیص تسهیلات وجود دارد اما در این مسائل عموماً کم تر به موضوع اختلال در تسهیلات توجه شده است.

1. Bradley
2. Leonard

در ادامه مروری بر پیشینه اختلال در زمینه مسائل مکان یابی می‌شود. نخستین مطالعه ای که به طور مستقیم مسائل مکانیابی و تخصیص تسهیلات را با درنظرگرفتن بحث قابلیت اطمینان مورد بررسی قرار داد، درزنر[۱] (۱۹۸۷) بود. او بحث اختلالات در تسهیلات بر پایه ی دو مدل کلاسیک p- میانه و p- مرکز مطرح کرد. اشنایدر[۲] (۲۰۰۳) در تحقیقی که به راهنمایی پروفسور داسکین[۳] انجام شد، برای اولین بار در قالب رویکردی جدید به مباحث بهینه سازی در زنجیره تأمین در حالت عدم قطعیت، موضوع خرابی و از کار افتادگی تسهیلات تحت عنوان قابلیت اطمینان تسهیلات در بحث مکانیابی و تخصیص پرداخت و دو مسأله از مسائل مکانیابی تسهیلات با عنوان مسائل مکانیابی تسهیلات با هزینه ثابت وp- میانه را با در نظر گرفتن اختلال مدل سازی نمود. اشنایدر و داسکین (۲۰۰۵) بحث قابلیت اطمینان را در دو مدل کلاسیک p– میانه و مدل مکانیابی تسهیلات با در نظر گرفتن هزینه ثابت مطرح کردند. هر دو مدل به صورت دو هدفه بوده و در آن یک هدف اسمی (با نادیده گرفتن اختلال‌ها) و دیگری متناظر با هزینه‌های مورد انتظار خرابی می‌باشد. شن، ژان و ژانگ[۴] (۲۰۰۷) دو مدل ریاضی برای مسأله با خرابی وابسته به مکان ارائه کردند. به نحوی که مدل اول از رویکرد سناریویی در چارچوب برنامه ریزی تصادفی استفاده شده و در دومی هزینه‌های مورد انتظار حمل و نقل به صورت غیر خطی محاسبه می‌کند. همچنین یک روش ابتکاری بر اساس تقریب متوسط نمونه ای برای مدل اول و دو روش ابتکاری از نوع افزودن حریصانه را برای مدل دوم پیشنهاد کردند. ژان[۵] (۲۰۰۷) و کیو، اویانگ و شن[۶] (۲۰۱۰) نیز نشان داده اند که در در بحث قابلیت اطمینان در مسائل مکان یابی تسهیلات، ممکن است متفاوت بودن احتمال خرابی برای تسهیلات در مکانهای مختلف تاثیر قابل توجهی در انتخاب مکان تسهیلات و مکانیابی آنها داشته باشد. ژان و همکاران با ارائه یک الگوریتم ژنتیک و کیو و همکاران با

1. Drezner
2. Snyder
3. Daskin
4. Shen, Zhan & Zhang
5. Zhan
6. Cui,Ouyang & Shen

توسعه یک روش آزادسازی لاگرانژ، روشهای حلی را برای تعیین جواب مسائل مکانیابی تسهیلات در شرایط یاد شده ارائه کرده اند. لیم، داسکین، باسامبو و چپرا[1] (۲۰۱۰) مسأله مکانیابی تسهیلات با هزینه ثابت با درنظرگرفتن بحث قابلیت اطمینان مورد مطالعه قرار داده و یک مدل ریاضی عدد صحیح از مسأله یاد شده در حالتی که استحکام تسهیلات مطرح است ارائه نموده و مدل ریاضی بدست آمده را با استفاده از روش آزادسازی لاگرانژ حل کرده اند. آریا نژاد و جبارزاده (۲۰۰۹) یک مسأله مکانیابی– موجودی را با در نظر گرفتن امکان وقوع خرابی‌ها ی تصادفی در مراکز توزیع مورد مطالعه قرار دادند. برمن، کراس و منزس[2] (۲۰۰۹) و یون و همکاران[3] (۲۰۱۵) مسئله‌ی خرابی تسهیلات را تحت شرایط اطلاعات ناکامل مورد بررسی قرار داده و فرض کردند که مشتری‌ها ندانند کدام تسهیلات دچار اختلال شده و باید از یکی از تسهیلات به دیگری سفر کنند تا این که یکی از آنها که دچار اختلال نشده است را پیدا کنند. پنگ، اشنایدر، لیم و لیو[4] (۲۰۱۱) و جبارزاده، جلیلی نایینی، داوود پور و آزاد (۲۰۱۲) یک مسأله زنجیره تأمین استراتژیک را با هدف طراحی یک شبکه قابل اطمینان مورد مطالعه قرار دادند. لی و ساواچکین[5] (۲۰۱۳) دو مسأله p– میانه و مکانیابی تسهیلات بدون محدودیت ظرفیت و با در نظر گرفتن مفهوم تقویت سازی ارائه کردند. در مدل ارائه شده یک بودجه‌ی محدود برای تقویت تسهیلات در نظر گرفته شده است. ملیزوسکی، کوبی و هرنر[6] (۲۰۱۲) با به کارگیری رویکردی متفاوت به تقویت تسهیلات در مقابل خرابی‌ها پرداخته اند و با مکان‌یابی مناسب آن‌ها از طریق پراکنده کردن، سعی در مقاوم سازی آنها در برابر اختلالات دارند. ژانگ، کی، لین و میاو[7] (۲۰۱۵) یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط مبتنی بر سناریو برای بهینه سازی محل انبار، مسیریابی تحویل و برنامه‌هایی برای پشتیبانی از انبارهای مختل شده ارائه کردند و یک الگوریتم فرا ابتکاری مبتنی بر روش

1. Lim, Daskin, Bassamboo,& Chopra
2. Berman, Krass & Menezes
3. Yun et al.
4. Peng, Snyder, Lim & Liu
5. Li & Savachkin
6. Maliszewski, P. J., Kuby, M. J. & Horner
7. Zhang, Qi, Lin & Miao

حداکثر احتمال، بهبود مسیر تخصیص مجدد، جستجوی همسایگی دو مرحله ای و شبیه سازی تبرید طراحی کردند. اصل نجفی، زهیری، بزرگی امیری و طاهری مقدم (۲۰۱۵) یک مسأله مکانیابی- موجودی حلقه بسته پویا که بهینه سازی تصمیم گیری‌های استراتژیک (مکان تسهیلات در شرایط قرارداد / انتخاب مراکز توزیع و مراکز بازسازی) به همراه تصمیم گیری‌های تاکتیکی (تخصیص مراکز، مدیریت موجودی) تحت ریسک اختلال در تسهیلات را بررسی کردند. مدل آن‌ها به دنبال به حداقل رساندن هزینه کل به عنوان اولین تابع هدف، و به حداقل رساندن زمان به عنوان تابع هدف دوم می‌باشد. آن‌ها یک الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی بر اساس بهینه سازی ازدحام ذرات چند هدفه[1] و الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامرغوب[2] ارائه کردند. جبارزاده، فهیم نیا، جیوبینگ[3] و شاهمرادی مقدم (۲۰۱۶) یک مدل بهینه سازی استوار در تصادفی ترکیبی و یک روش حل آزادسازی لاگرانژی برای طراحی یک زنجیره تأمین انعطاف پذیر با در نظر گرفتن وقفه در عرضه / تقاضا و اختلال در تسهیلات ارائه کردند که خطر وقوع و مقدار تاثیر آن می‌تواند از طریق سرمایه گذاری کاهش یابد. عملکرد مدل پیشنهادی آن‌ها با استفاده از یک روش شبیه سازی مونت کارلو مورد بررسی قرار گرفته است. ژانگ، اشنایدر، رالفز[4] و خو[5] (۲۰۱۶) در پژوهشی یک مسأله مکانیابی تسهیلات را همراه با رقابت در خدمات و ریسک اختلال بررسی کردند. آن‌ها یک مدل جدید برنامه ریزی باینری دو سطحی خطی توسعه دادند و یک روش فرا ابتکاری بر اساس جستجوی همسایگی متغیر طراحی کردند. در مدل آن‌ها تسهیلات در معرض ریسک اختلال می‌باشند و هر مشتری به نزدیک ترین مرکز عملیاتی، بدون در نظر گرفتن خدمت رسانی به مشتری، تخصیص پیدا می‌کند. بنابراین مسأله مکانیابی رقابتی و مکانیابی با اختلالات ترکیب می‌شود. نتایج محاسباتی آن‌ها نشان می‌دهد که راه حل با کیفیت بالا می‌تواند به سرعت پیدا

1. MOPSO
2. NSGA-II
3. Jiuh-Biing
4. Ralphs
5. Xue

شود. کیو، ژائو[1] و پارس فرد (۲۰۱۶) یک زنجیره تأمین دو سطحی که در آن مجموعه ای از تأمین کننده‌ها به مجموعه ای از پایانه‌ها خدمت رسانی می‌کنند را در نظر گرفتند که تقاضای مشتریان نامشخص است. به طور مشخص، آن‌ها احتمال اختلال در حمل و نقل که ممکن است عرضه محصول از تأمین کننده‌ها را متوقف کند، در نظر گرفتند. این مسأله به صورت یک برنامه ریزی عدد صحیح غیر خطی برای تعیین طراحی سیستم بهینه که کل هزینه مورد انتظار را به حداقل می‌رساند فرموله شده است. یک الگوریتم بر اساس آزادسازی لاگرانژ برای حل این مدل توسعه داده شده است. کومارپائول، سارکر و اسم[2] (۲۰۱۷) یک شبکه زنجیره تأمین سه سطحی، با تولید کننده‌های مختلف، مراکز توزیع و خرده فروشان، در نظر گرفته اند و یک رویکرد برنامه ریزی پیش بینی برای مدیریت کاهش تغییرات تقاضا ارائه کردند. آن‌ها همچنین یک طرح کاهش واکنش برای مدیریت اختلال ناگهانی در تولید ارائه نمودند. آن‌ها یک مدل کمی برای تجدید نظر در اختلال در تولید و برنامه‌های توزیع، در طی یک دوره محدود ، برای به حداقل رساندن هزینه کل زنجیره تأمین ، تدوین و ارائه کردند.

در بیشتر مطالعات پیشین با در نظر گرفتن بحث اختلال، احتمال خرابی تسهیلات یکسان در نظر گرفته شده است. از شاخص‌ترین پژوهش‌های انجام شده که احتمال خرابی تسهیلات را غیر یکسان در نظر گرفته است، می‌توان به تحقیق کیو و همکاران (۲۰۱۰) اشاره کرد. در این مقاله به دنبال طراحی شبکه ی تأمینی قابل اطمینان و کارآمدی هستیم که هزینه حمل و نقل مورد انتظار در حالت عادی و در حالت وقوع اختلال را کمینه کند. احتمال خرابی در هر مکان مستقل در نظر گرفته شده است. با توجه به در نظر گرفتن هزینه ثابت راه اندازی، مسئله مورد نظر، مکان‌هایی را انتخاب می‌کند که از نظر هزینه کمترین باشد. در مرحله اول مکانیابی مراکز توزیع و تخصیص مشتریان بدون در نظر گرفتن وقوع خرابی انجام می‌پذیرد. مشتریان می‌توانند به تعدادی سطوح پشتیبان برای مانعی در برابر اختلالات، تخصیص پیدا کنند. بعد از وقوع هر خرابی، هر مشتری به نزدیکترین مرکز توزیع عملیاتی تخصیص پیدا می‌کند. اگر

1. Zhao
2. Kumar Paul, Sarker & Essam

تمام مراکز توزیع تخصیص داده شده به مشتری دچار خرابی شده باشند، هزینه ی جریمه در نظر گرفته می‌شود. در این مواقع که هیچ مرکز توزیعی نمی تواند تقاضای مشتری را پاسخ دهد، مشتری به مرکز توزیعی به نام مرکز توزیع مجازی تخصیص داده می‌شود.
مسأله مورد نظر با استفاده از الگوریتم لاگرانژ آزاد سازی می‌شود و سپس با الگوریتم ژنتیک حل می‌شود. در ادامه ی مقاله در بخش ۲ به بیان مسئله می‌پردازیم. در بخش ۳ مدل ریاضی مسأله ارائه و همچنین ساده سازی مسأله با آزاد سازی لاگرانژ ارائه می‌شود. در بخش ۴ شیوه حل مسأله با استفاده از یک روش حل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک ارائه می‌شودو در ادامه با توجه به نتایج به دست آمده، کارایی روش حل مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش ۵ نیز به نتیجه گیری و پیشنهادات برای تحقیقات آتی پرداخته شده است.

بیان مسئله

هدف این تحقیق ارائه زنجیره تأمینی شامل توزیع کنندگان و مشتریان است که در مواقع وقوع اختلال قابل اطمینان و کارآمد باشد. به همین منظور مجموعه ای از مشتریان و مجموعه ای از مکان‌های بالقوه در نظر گرفته شده است. هر مشتری دارای تقاضای سالیانه می‌باشد و برای انتقال تقاضای مشتری از مراکز توزیع متحمل هزینه ای خواهیم شد. هر مرکز توزیع دارای هزینه ثابت برای راه اندازی می‌باشد. مراکز توزیع باز شده ممکن است با احتمالی دچار ختلال و خرابی شوند. خرابی‌ها مستقل از یکدیگر رخ می‌دهند و چندین مراکز توزیع ممکن است هم زمان دچار خرابی شوند. هنگامی که مرکز توزیعی از کار می‌افتد دیگر قادر نیست هیچ خدمتی ارائه دهد و مشتریان تخصیص داده شده به آن مرکز توزیع می‌بایست به مرکز توزیع دیگری تخصیص داده شود. اگر تقاضای مشتری برآورده نشود، شرکت متحمل جریمه خواهد شد. این جریمه می‌تواند به عنوان هزینه فرصت از دست رفته و یا هزینه یافتن یک منبع جایگزین برای تأمین تقاضا نیز تعبیر شود. برای مدلسازی این مفهوم، از مرکز توزیع مجازی استفاده شده است. هزینه استقرار برای این مرکز توزیع در نظر گرفته نمی شود و احتمال خرابی آن صفر در نظر گرفته می‌شود.

مفروضات

- ✓ تعداد مکانهای بالقوه برای استقرار مراکز توزیع محدود و معین است.
- ✓ تقاضای مشتریان قطعی و معلوم است.
- ✓ نوع کالا یا خدمت، تک کالایی است.
- ✓ با توجه به امکان وجود اختلال، مراکز توزیع نمی توانند همواره به مشتریان سرویس ارائه دهند.
- ✓ مراکز توزیع با احتمال‌های متفاوت دچار اختلال می‌شوند.
- ✓ هر مشتری می‌تواند تعدادی مرکز توزیع پشتیبان داشته باشد.
- ✓ یک مرکز توزیع می‌تواند به طور همزمان به چندین مشتری خدمت دهد.

نمادها و مدل ریاضی

نمادها

اندیس‌ها:

i : اندیس مشتریان ($i = 0,1,\dots,I-1$)

j: اندیس مکان‌های بالقوه برای مراکز توزیع ($j = 0,1,\dots,J-1$)

J : اندیس مرکز توزیع مجازی

r : اندیس سطوح پشتیبان برای مراکز توزیع ($r = 0,1,\dots,R$)

پارامترها:

λ_i : تقاضای مشتری i ام

d_{ij} : هزینه انتقال هر واحد کالا/خدمت از مرکز توزیع j به مشتری i

f_j : هزینه ثابت استقرار مراکز توزیع در مکان j

q_j : احتمال خرابی مرکز توزیع j ام ($0 \le q_j \le 1$)

متغیرهای تصمیم:

$X_j =$ ۱ چنانچه مرکز توزیعی در مکان j استقرار یابد

۰ در غیر این صورت

$\mathrm{Y_{ijr}} =$ ۱ چنانچه تقاضای مشتری i توسط مرکز توزیع j در r امین سطح برآورده شود

۰ در غیر این صورت

$P_{ijr} =$ احتمال اینکه مرکز توزیع j به مشتری i در r امین سطح خدمت دهد.

مدل ریاضی مسأله

$$\text{Min Z} = \sum_{j=0}^{J-1} f_j X_j + \sum_{i=0}^{I-1}\sum_{j=0}^{J}\sum_{r=0}^{R} \lambda_i d_{ij} P_{ijr} Y_{ijr} \quad (۱)$$

S.t:

$$\sum_{j=0}^{J-1} Y_{ijr} + \sum_{s=0}^{r} Y_{iJs} = ۱ \quad \forall\, 0 \le i \le I\text{-}1,\ 0 \le r \le R \quad (۲)$$

$$\sum_{r=0}^{R-1} Y_{ijr} \le X_j \quad \forall\, 0 \le i \le I\text{-}1,\ 0 \le j \le J\text{-}1 \quad (۳)$$

$$\sum_{r=0}^{R} Y_{iJr} = ۱ \quad \forall\, 0 \le i \le I\text{-}1 \quad (۴)$$

$$P_{ij0} = ۱ - q_j \quad \forall\, 0 \le i \le I\text{-}1,\ 0 \le j \le J \quad (۵)$$

$$P_{ijr} = (1 - q_j)\sum_{m=0}^{J-1} \frac{q_m}{1-q_m} P_{i,m,r-1} Y_{i,m,r-1} \quad \forall\, 0 \le i \le I\text{-}1,\ 0 \le j \le J,\ 1 \le r \le R \quad (۶)$$

$$X_j, Y_{ijr} \in \{۰,۱\} \quad \forall\, 0 \le i \le I\text{-}1,\ 0 \le j \le J,\ 0 \le r \le R \quad (۷)$$

تابع هدف (۱) مجموع هزینه ثابت استقرار مراکز توزیع و هزینه مورد انتظار حمل و نقل را کمینه می‌کند. محدودیت (۲) تضمین می‌کند که هر مشتری در هر سطح، یا به یک مرکز توزیع در همان سطحی تخصیص یابد یا در سطح پایین تر به مرکز توزیع مجازی تخصیص یافته است. محدودیت (۳) از تخصیص یک مشتری به مرکز توزیعی که استقرار نیافته است، جلوگیری می‌نماید. محدودیت (۴) تضمین می‌کند که هر مشتری حتماً به مرکز توزیع مجازی در یک سطح تخصیص یابد. محدودیت‌های (۵) و (۶) معادلات "احتمالات انتقال"

هستند. محدودیت (۵) احتمال تخصیص مشتری به مرکز توزیعی را در سطح صفر محاسبه می‌کند و محدودیت (۶) این احتمال را برای سطوح پشتیبان بالاتر محاسبه می‌کند.

خطی سازی

مدل ریاضی ارائه شده خطی می‌باشد. اگر چه تنها جمله ی غیر خطی مدل $P_{ijr}Y_{ijr}$ است، که حاصل ضرب یک متغیر پیوسته با یک متغیر صفر و یک است. برای خطی سازی، مدل به جای $P_{ijr}Y_{ijr}$ از یک متغیر جدید به نام W_{ijr} استفاده می‌شود. در این صورت مجموعه ای جدید از محدودیت‌ها مطابق (۸) – (۱۲) به مدل اضافه می‌شود.

$$W_{ijr} = P_{ijr}Y_{ijr} \quad \forall\ 0 \le i \le I\text{-}1,\ 0 \le j \le J,\ 0 \le r \le R \tag{۸}$$

$$W_{ijr} \le P_{ijr} \quad \forall\ 0 \le i \le I\text{-}1,\ 0 \le j \le J,\ 0 \le r \le R \tag{۹}$$

$$W_{ijr} \le Y_{ijr} \quad \forall\ 0 \le i \le I\text{-}1,\ 0 \le j \le J,\ 0 \le r \le R \tag{۱۰}$$

$$W_{ijr} \ge 0 \quad \forall\ 0 \le i \le I\text{-}1,\ 0 \le j \le J,\ 0 \le r \le R \tag{۱۱}$$

$$W_{ijr} \ge P_{ijr} + Y_{ijr} \quad \forall\ 0 \le i \le I\text{-}1,\ 0 \le j \le J,\ 0 \le r \le R \tag{۱۲}$$

الگوریتم آزاد سازی لاگرانژ

در مدل ارائه شده محدودیت (۳) را برای کاهش پیچیدگی مسأله و همچنین برای حذف متغیر تصمیم X از محدودیت‌ها برای جداسازی زیرمسأله‌ها در بخش بعد، با ضریب μ آزاد می‌کنیم. تابع هدف بعد از آزاد سازی این محدودیت‌ها مطابق (۱۳) می‌باشد.

$$\sum_{j=0}^{J-1}(f_j - \sum_{i=0}^{I-1}\mu_{ij})\, X_j + \sum_{i=0}^{I-1}\sum_{j=0}^{J}\sum_{r=0}^{R}\lambda_i\, d_{ij} W_{ijr} + \sum_{i=0}^{I-1}\sum_{j=0}^{J-1}\sum_{r=0}^{R-1} Y_{ijr}\ \mu_{ij} \tag{۱۳}$$

از رویکرد بهینه سازی زیر گرادیان برای به روز کردن ضریب لاگرانژ (μ) استفاده می‌شود. در ابتدا، انتخاب یک مجموعه ضریب اولیه مناسب می‌تواند کارایی روش حل را تسریع کند که در این مقاله مقدار بهینه دوگان برنامه ریزی خطی آزاد شده به عنوان مقدار اولیه ضریب

لاگرانژ در نظر گرفته شده است. در هر تکرار n در الگوریتم، ضریب لاگرانژ μ_{ij}^{n} به یک مجموعه جدید از ضرایب μ_{ij}^{n+1} مطابق (۱۴) می‌شود.

$$\mu_{ij}^{n+1} = \mu_{ij}^{n}+t^{n} \left(\sum_{r=0}^{R-1} Y_{ijr} - X_j\right),\ \forall\, 0 \leq i\leq I\text{-}1,\ 0 \leq j\leq J\text{-}1 \qquad (۱۴)$$

t^{n} برابر با اندازه گام است که مطابق (۱۵) محاسبه می‌شود.

$$t^{n} = \frac{u_n(UB_n-LB_n)}{\sum_{i=0}^{I-1}\sum_{j=0}^{J-1}|\sum_{r=0}^{R-1} Y_{ijr} - X_j|} \qquad (۱۵)$$

در فرمول بالا UB_n بهترین کران بالا و LB_n حد پایین بدست آمده در تکرار n ام است. پارامتر u_n یک عدد ثابت در تکرار n ام است که مقدار اولیه آن را برابر ۲ قرار دادیم. اگر در چند تکرار متوالی بهبود نداشته باشیم، مقدار u_n نصف می‌شود. رویکرد به روز رسانی تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که به ماکسیمم تکرار برسیم. محاسبات مربوط به آزادسازی در نرم افزار GAMS انجام شده است. بعد از انجام آزاد سازی مسأله به دو زیر مسأله تبدیل می‌شود.

زیر مسأله آزاد شده اول

زیر مسأله اول را برابر قسمت اول تابع هدف ($\sum_{j=0}^{J-1}(f_j - \sum_{i=0}^{I-1}\mu_{ij})\, X_j$) قرار می‌دهیم. X_j که یکی از متغیرهای تصمیم مسأله می‌باشد و مشخص می‌کند که کدام مراکز توزیع بالقوه باید استقرار پیدا کند، را می‌توان با استفاده از مقادیر ظرایب لاگرانژ و هزینه استقرار به دست آورد. با توجه به اینکه مسأله مینیمم سازی است، مرکز توزیع بالقوه ای استقرار می‌یابد که هزینه استقرارش از مجموع ضرایب لاگرانژ مشتری‌ها و خود، کمتر باشد ($f_j - \sum_{i=0}^{I-1}\mu_{ij} \leq 0$).

زیر مسأله آزاد شده دوم

برای بدست آوردن مقدار بهینه Y_{ijr}، باید توجه داشت که مسأله برای هر مشتری تفکیک پذیر است. زیر مسأله آزاد شده ۲ برای هر مشتری مطابق (۱۵) – (۲۶) می‌باشد. برای راحتی در نمایش نمادها، i در اندیس Y_{ijr}، P_{ijr} و W_{ijr} حذف شده است.

$$\text{Min Z}= \sum_{j=0}^{J}\sum_{r=0}^{R}\lambda_i\, d_{ij}W_{jr} + \sum_{j=0}^{J-1}\sum_{r=0}^{R-1} Y_{jr}\,\mu_{ij} \quad (۱۶)$$

S.t:

$$\sum_{j=0}^{J-1} Y_{jr} + \sum_{s=0}^{r} Y_{Js} = ۱ \qquad \forall\ 0 \le r \le R \quad (۱۷)$$

$$\sum_{r=0}^{R-1} Y_{jr} \le ۱ \qquad \forall\ 0 \le j \le J\text{-}1 \quad (۱۸)$$

$$\sum_{r=0}^{R} Y_{Jr} = ۱ \qquad \forall\ 0 \le i \le I\text{-}1 \quad (۱۹)$$

$$P_{j0} = ۱ - q_j \qquad \forall\ 0 \le j \le J \quad (۲۰)$$

$$P_{jr} = (1 - q_j)\sum_{m=0}^{J-1}\frac{q_m}{1-q_m} W_{m,r-1} \qquad \forall\ 0 \le j \le J,\ 1 \le r \le R \quad (۲۱)$$

$$Y_{jr} \in \{۰, ۱\} \qquad \forall\ 0 \le j \le J,\ 0 \le r \le R \quad (۲۲)$$

$$W_{ijr} = P_{ijr}Y_{ijr} \qquad \forall\ 0 \le i \le I\text{-}1,\ 0 \le j \le J,\ 0 \le r \le R \quad (۲۳)$$

$$W_{ijr} \le P_{ijr} \qquad \forall\ 0 \le i \le I\text{-}1,\ 0 \le j \le J,\ 0 \le r \le R \quad (۲۴)$$

$$W_{ijr} \le Y_{ijr} \qquad \forall\ 0 \le i \le I\text{-}1,\ 0 \le j \le J,\ 0 \le r \le R \quad (۲۴)$$

$$W_{ijr} \ge 0 \qquad \forall\ 0 \le i \le I\text{-}1,\ 0 \le j \le J,\ 0 \le r \le R \quad (۲۵)$$

$$W_{ijr} \ge P_{ijr} + Y_{ijr} \qquad \forall\ 0 \le i \le I\text{-}1,\ 0 \le j \le J,\ 0 \le r \le R \quad (۲۶)$$

روش تقریبی برای ساده سازی زیر مسأله آزاد شده دوم

برای حل زیر مسأله دوم، متغیر تصادفی P_{jr} را با مقادیر ثابت جایگزین کرده و تقریب می‌زنیم. مراکز توزیع را به ترتیب احتمال خرابی نامگذاری می کنیم، به این صورت که $j_0, j_1, \dots, j_{J-1}$ ترتیب مراکز توزیع است به نحوی که $q_{j_0} \le q_{j_1} \le \cdots \le q_{j_{J-1}}$ باشد. به همین منظور α_r و β_r مطابق (۲۷) و (۲۸) تعریف می کنیم:

$$\alpha_r = (1 - q_{j_r}) \prod_{l=0}^{r-1} q_{j_l} \quad (۲۷)$$

$$\beta_r = \prod_{l=0}^{r-1} q_{j_l} \quad (۲۸)$$

مدل سازی دوباره زیر مسأله ۲ با جایگزین کردن P_{jr} با α_r و جایگزین کردن P_{Jr} با β_r، مطابق (۲۹) – (۳۳) می‌باشد:

$$(RRSP_i)\ \ Min \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{r=0}^{R-1} (\lambda_i\, d_{ij} \alpha_r + \mu_{ij})\, Y_{jr} + \sum_{r=0}^{R} \lambda_i d_{iJ} \beta_r\, Y_{Jr} \quad (۲۹)$$

S.t:

$$\sum_{j=0}^{J-1} Y_{jr} + \sum_{s=0}^{r} Y_{Js} = ۱ \qquad \forall\ 0 \le r \le R \quad (۳۰)$$

$$\sum_{r=0}^{R-1} Y_{jr} \le ۱ \qquad \forall\ 0 \le j \le J\text{-}1 \quad (۳۱)$$

$$\sum_{r=0}^{R} Y_{Jr} = ۱ \quad (۳۲)$$

$$Y_{jr} \in \{۰, ۱\} \qquad \forall\, 0 \le j \le J,\ 0 \le r \le R \quad (۳۳)$$

روش حل پیشنهادی و نتایج عددی

در این بخش، یک روش حل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله در ابعاد بزرگ ارائه می‌شود. در ادامه توضیحاتی در مورد روش حل پیشنهادی ارائه می‌شود.

روش حل پیشنهادی زیر مسأله دوم

نحوه نمایش جواب **:** طریقه تعریف ساختار نمایش جواب‌ها از جمله تاثیر گذارترین بخش‌ها برای افزایش کارایی الگوریتم می‌باشد. ساختار جواب مورد استفاده در این الگوریتم شامل متغیر Y_{ijr} می‌باشد، به این صورت که برای هر مشتری یک کروموزوم وجود دارد. این کروموزوم، برداری به طول تعداد سطوح پشتیبان به علاوه ۱می باشد. هر خانه نشان دهنده ی یک سطح بوده و عدد درون آن، مرکز توزیع انتخاب شده در آن سطح می‌باشد. در این بردار هیچ مرکز توزیعی بیش از دو بار تکرار نمی‌شود و مرکز توزیع مجازی حتماً یک بار انتخاب

می‌شود. اگر این مرکز توزیع در هر سطحی انتخاب شد، سطوح بعدی باید از مرکز توزیع مجازی استفاده کنند. در اینجا از یک مثال برای توضیح ساختار جواب استفاده می‌کنیم. فرض می‌کنیم ۵ مرکز توزیع وجود دارد و r=۵ می‌باشد. ساختار نمایش جواب برای یک مشتری می‌تواند مطابق جدول ۱ باشد.

جدول ۱- نحوه ی نمایش جواب

۵r=	۴r=	۳r=	۲r=	۱r=	۰r=	
J	۴	۲	۵	۱	۳	j

خانه اول جدول از سمت چپ به این مفهوم است که ابتدا مشتری به مرکز توزیع شماره ۳ در سطح صفر تخصیص داده می‌شود. اگر این مرکز توزیع دچار اختلال شد، مشتری به مرکز توزیع شماره ۱ تخصیص داده می‌شود و اگر این مرکز توزیع هم دچار اختلال شد، مشتری را به مرکز توزیع بعدی تخصیص می‌دهیم. این کار را تا سطح چهار ادامه می‌دهیم. خانه ی آخر در سطح پنجم حتماً باید به مرکز توزیع مجازی تخصیص پیدا کند.

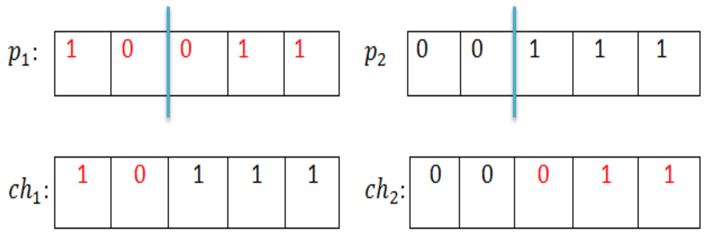
مقدار دهی اولیه**:** برای محاسبه مقادیر بهینه n ، pc و pm از روش آزمایش و خطا بهره گرفته ایم. برای این منظور مقادیر مختلف این سه پارامتر را در بازه‌های گفته شده، به عنوان پارامترهای الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته و الگوریتم به ازای این مقادیر، بر مسأله پیاده شده است. برای آن که بتوان با تقریب خوبی به مقادیر n، pm و pc به دست آمده اطمینان کرد، برنامه را با مقادیر مختلفn (۴۰، ۵۰، ۶۰)، pc (۰/۵، ۰/۶، ۰/۷) و pm (۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۳) اجرا کردیم. با توجه به نتایج حاصل مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم ژنتیک عبارتند از: n=۵۰، pm=۰/۶ و pc=۰/۰۲. مقدار اولیه کروموزوم در سطح آخر برابر مرکز توزیع مجازی قرار می گیرد و بری بقیه سطوح به طور تصادفی انتخاب می‌شود.

انتخاب والدین: برای تولید فرزندان جدید از جمعیت فعلی، والدین توسط روش تورنمنت انتخاب می‌شوند. در روش تورنومنت یک زیر مجموعه از صفات یک جامعه انتخاب

می‌شوند و اعضای آن مجموعه با هم رقابت می‌کنند و سرانجام فقط یک صفت از هر زیرگروه برای تولید انتخاب می‌شوند.

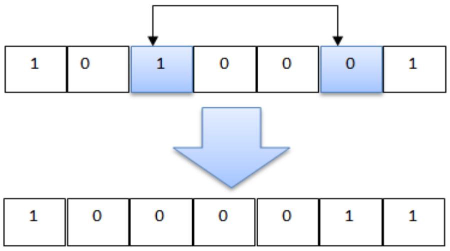
تابع برازندگی: در این بخش والدین با توجه به استراتژی انتخاب مربوطه انتخاب می‌شوند و عمل تقاطع و جهش بر روی آنها صورت می‌گیرد، به این صورت که جفت‌هایی انتخاب می‌شوند که هزینه ی کمتری داشته باشند.

عملگر تقاطع: بخشی از فرایند تکامل در طبیعت بدین صورت است که کروموزوم‌هایی به عنوان والدین انتخاب شده و با هم ترکیب می‌شوند. جهت تولید فرزند جدید در هر تکرار الگوریتم، عملگر تقاطع تک نقطه ای پیاده‌سازی شده است، به این صورت که به طور تصادفی عددی در بازه ی [1,R] انتخاب می‌شود و افراد جدیدی تولید می نماید که اجزای (ژن‌ها) آن از والدینش تشکیل می گردد.



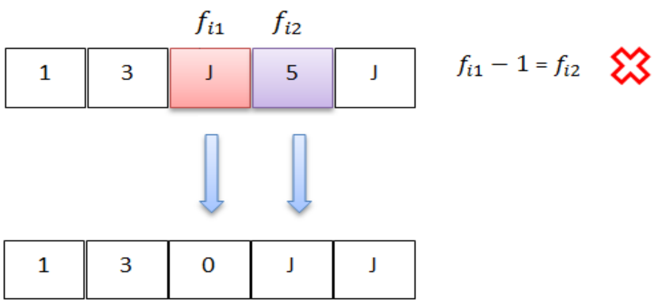
شکل ۱. نمایش عملگر تقاطع

عملگر جهش: عملگر جهش مورد استفاده در این تحقیق عملگر جهش جابه‌جایی است و بدین صورت است که دو ژن را از یک کروموزوم گرفته و جای آن دو را با هم عوض می-کند. شکل (۲) بیانگر نحوه اجرای عملگر جهش می‌باشد.



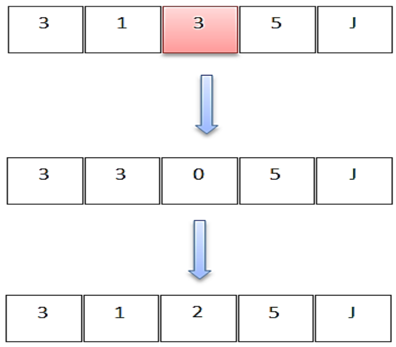
شکل ۲. نمایش عملگر جهش

نحوه‌ی اعمال محدودیت‌ها در الگوریتم: محدودیت اول مسأله ($\sum_{j=0}^{J-1} Y_{jr} + \sum_{s=0}^{r} y_{Js} = 1$) تضمین می‌کند که هر مشتری در هر سطح، یا به یک مرکز توزیع در همان سطحی تخصیص یابد یا در سطح پایین تر به مرکز توزیع مجازی تخصیص یافته است. این محدودیت بدین شکل در الگوریتم گنجانده شده است که ابتدا اولین خانه ی دارای مرکز توزیع مجازی را پیدا کرده و با f_{i1} نام گذاری می‌کند. سپس آخرین سطحی که شامل مرکز توزیع غیر مجازی است را پیدا کرده و آن را f_{i2} می‌نامد. برای ارضای محدودیت باید $f_{i2} = f_{i1} - 1$ باشد، اگر برقرار نبود، از f_{i2} به بعد را با مرکز توزیع مجازی پر می‌کند و از f_{i1} تا $f_{i2} - 1$، داخل خانه‌های کروموزوم صفر می‌گذارد. در مرحله بعد مرکز توزیع‌های غیر مجازی جایگزین این صفرها می‌شوند. شکل ۳ نحوه ی ارضای این محدودیت را نشان می‌دهد.



شکل ۳. نحوه ی ارضای محدودیت اول

محدودیت دوم ($\sum_{r=0}^{R-1} Y_{jr} \leq 1$) الزام می‌دارد که هر مشتری را حداکثر یک بار به هر مرکز توزیع تخصیص دهیم. یعنی در خانه‌های هر کروموزوم، نباید مرکز توزیع تکراری وجود داشته باشد. الگوریتم به این صورت عمل می‌کند که عدد هر خانه ی بردار را از نظر تکراری نبودن بررسی می‌کند. اگر خانه ای دارای عدد تکراری بود، آن خانه را صفر می‌کند. سپس خانه‌های شامل صفر را با مرکز توزیع‌های غیر تکراری پر می‌کند. شکل ۴ نحوه ی ارضای این محدودیت را نشان می‌دهد.



شکل ٤. نحوه ی ارضای محدودیت دوم

محدودیت سوم ($\sum_{r=0}^{R} Y_{Jr} = 1$) زمانی که مقدارهای اولیه کروموزوم داده می‌شود ارضا می‌شود زیرا سطح آخر به مرکز توزیع مجازی تخصیص داده می‌شود.

معیار توقف : آخرین قدم در الگوریتم‌های ژنتیک بررسی شرایط توقف می‌باشد. شرط توقف در این الگوریتم، بر اساس سعی و خطا عدم بهبود جواب در ۲۰ تکرار متوالی در نظر گرفته می‌شود.

در این بخش نتایج بدست آمده از پیاده سازی روش حل پیشنهادی بر روی مسائل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. الگوریتم حل پیشنهادی با نرم افزار MATLAB (version 7.8.0 ,R2009 a) برنامه نویسی شده است و بر روی یک کامپیوتر شخصی (PC) با چهار گیگ RAM و پردازنده ۲۴۵۰ اجرا شده است.

اعتبارسنجی روش پیشنهادی

در این قسمت برای اعتبارسنجی روش حل پیشنهادی از نرم افزار گمز استفاده شده است. نتایج برای یک مسأله با ۱۰ مشتری و ۵ مرکز توزیع بالقوه در دو سطح به ازای احتمال‌های مختلف (q_j) ارائه شده است. در جدول ۱ هزینه کل و مقدار خطا در مقایسه با هزینه بدست آمده از گمز آمده است.

جدول ۲- نتایج محاسباتی اعتبار سنجی

تعداد مرکز توزیعات باز شده	درصد خطا	هزینه کل (گمز)	هزینه کل (ژنتیک)
۲	۰/۰۵	۳۹۰۵	۴۱۰۷/۰۳

نتایج عددی

الگوریتم بر روی پنج مجموعه داده پیاده سازی شده است. سه مجموعه ی اول داده‌های آماری سال ۱۹۹۰ هستند: یک مجموعه ۴۹ نقطه ای شامل پایتخت‌های ایالت متحده به علاوه واشنگتن، یک مجموعه ۸۸ نقطه ای شامل مجموعه ی ۴۹ نقطه ای به علاوه ۵۰ شهر بزرگ ایالت متحده و یک مجموعه ۱۵۰ نقطه ای شامل ۱۵۰ شهر بزرگ ایالت متحده. تقاضاها (λ_i) برابر جمعیت ایالت‌ها تقسیم بر 10^5 برای مجموعه ۴۹ نقطه ای و تقسیم بر 10^4 برای دو مجموعه دیگر است. هزینه ثابت (f_j) برابر با میانگین ارزش خانه برای هر مکان بالقوه است. هزینه حمل ونقل (d_{ij}) برابر فاصله بین i و j می‌باشد. جریمه عدم تخصیص مشتری برابر 10^4 به ازای همه مشتری‌ها می‌باشد. دو مجموعه داده ی دیگر به صورت تصادفی تولید شده اند. یکی از آنها شامل ۵۰ نقطه و دیگری شامل ۱۰۰ نقطه می‌باشد. احتمال خرابی هر مرکز توزیع از توزیع یکنواخت به صورت $q_j \sim Uniform[0,0/2]$ است. در همه مجموعه داده‌ها،

مشتریان و مراکز توزیع برابر هستند (هر مشتری ممکن است یک مرکز توزیع باشد). داده‌های مسائل از داسکین (۱۹۹۵) گرفته شده است.

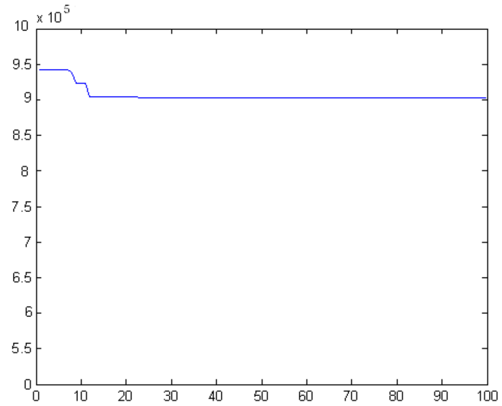
اعلام نتایج حل

در این بخش نتایج به دست آمده از پیاده سازی روش حل پیشنهادی بر روی مسائل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. برای هر مجموعه داده، الگوریتم برای تعداد سطوح ۲،۳،۴ r = آزمایش شده است. خلاصه ای از نتایج به دست آمده در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳: نتایج محاسباتی مثال عددی ارائه شده

مسأله	تعداد سطوح پشتیبان (r)	تعداد مرکز توزیعات باز شده	هزینه کل ($\$$)	زمان اجرای الگوریتم (s)
۴۹ نقطه	۲	۶	۹۰۶۳۲۲/۵۸	۳۱/۳۲
۴۹ نقطه	۳	۷	۸۹۶۶۳۸/۱۷	۳۹/۱۸
۴۹ نقطه	۴	۷	۸۹۵۶۲/۴۲	۴۱/۴۵
۸۸ نقطه	۲	۹	۱۲۷۱۷۸۶/۹۶	۷۳/۸۸
۸۸ نقطه	۳	۹	۱۲۴۳۳۲۷/۳۰	۸۹/۱۴
۸۸ نقطه	۴	۱۰	۱۲۳۲۸۷۲/۶۵	۸۴/۳۱
۱۵۰ نقطه	۲	۸	۱۹۱۳۷۶۵/۱۹	۹۰/۷۵
۱۵۰ نقطه	۳	۹	۱۷۹۲۵۵۲/۵۶	۹۹/۵۹
۱۵۰ نقطه	۴	۹	۱۷۶۵۶۴۹/۴۲	۱۱۲/۴۷
۵۰ نقطه	۲	۳	۶۹۲۷/۷۱	۲۵/۶۹
۵۰ نقطه	۳	۴	۶۵۰۸/۳۹	۲۹/۲۲
۵۰ نقطه	۴	۴	۶۴۳۲/۸۲	۳۲/۸۷
۱۰۰ نقطه	۲	۷	۱۱۴۶۲/۰۹	۶۳/۱۷
۱۰۰ نقطه	۳	۷	۱۱۶۲۳/۷۷	۸۲/۴۱
۱۰۰ نقطه	۴	۷	۱۲۲۱۷/۷۹	۷۵/۶۳

نتایج نشان می‌دهد که انتخاب تعداد سطوح پشتیبان تأثیر مهمی بر حل بهینه ساختار شبکه ندارد، اگر چه در حالت کلی، تعداد بیشتر سطوح پشتیبان به کاهش هزینه بهینه کمک می‌کند.
شکل (۵) همگرایی مسأله ۴۹ نقطه عرضه و تقاضا برای تعداد دو سطح پشتیبان را نشان می‌دهد.



شکل ۵. همگرایی مسأله ٤٩ نقطه عرضه و تقاضا با دو سطح پشتیبان

مقایسه آماری روش حل پیشنهادی با الگوریتم ژنتیک برای مسأله اصلی

برای اعتبار سنجی مناسب برای حدود ارائه شده توسط الگوریتم آزادسازی لاگرانژ و استفاده از الگوریتم ژنتیک برای حل زیرمسأله، از الگوریتم ژنتیک برای مساله اصلی استفاده شده است، تا کارایی روش آزادسازی لاگرانژ مشخص شود. برای مقایسه دو روش حل از دو معیار ارزیابی استفاده شده است. بنابراین ۲ آزمون فرض لازم است انجام پذیرد که این آزمون‌ها با نرم افزار spss انجام شده است. اطلاعات ورودی در این مثال، مربوط به مسأله ۴۹ نقطه عرضه و تقاضا می‌باشد.

جدول ٤: نتایج محاسباتی معیارهای مقایسه و توابع هدف برای روش حل پیشنهادی با الگوریتم ژنتیک برای مسأله اصلی

زمان اجرای الگوریتم (s)	هزینه کل ($)	تعداد مرکز توزیعات باز شده	تعداد سطوح پشتیبان (r)	مسأله	روش حل
۳۱/۳۲	۹۰۶۳۲۲/۵۸	۶	۲	۴۹ نقطه	
۳۹/۱۸	۸۹۶۶۳۸/۱۷	۷	۳	۴۹ نقطه	روش حل پیشنهادی
۴۱/۴۵	۸۹۵۶۲/۴۲	۷	۴	۴۹ نقطه	
۵۶/۵۱	۹۱۰۳۷۱/۹۴	۶	۲	۴۹ نقطه	
۶۸/۶۲	۹۰۲۹۳۱/۵۳	۷	۳	۴۹ نقطه	الگوریتم ژنتیک
۹۶/۱۱	۹۳۸۲۶۵/۰۶	۸	۴	۴۹ نقطه	

حال، برای بررسی علمی تر نتایج بدست آمده، برای هر شاخص یک آزمون آماری انجام شده است. نتایج این آزمون‌های آماری در جدول (۴) دیده می‌شود با توجه به آزمون کلموگروف اسمیرنف خروجی برای روش حل پیشنهادی و الگوریتم ژنتیک، معیارهای ارزیابی از توزیع نرمال استخراج شده است. بنابراین از آزمون پارامتری تی برای رد یا قبول فرضیات استفاده شده است.

- آزمون فرض زمان روش حل پیشنهادی و الگوریتم ژنتیک برای مسأله اصلی:

$$H_0:\ \mu_L = \mu_{GA}$$
$$H_1:\ \mu_{\mathrm{L}} \neq \mu_{GA}$$

جدول ٤: خروجی آزمون تی دو گردوه مستقل مربوط به آزمون فرض زمان روش حل پیشنهادی و الگوریتم ژنتیک برای مسأله اصلی

روش حل	میانگین	انحراف استاندارد	مقدار t	p-value
روش حل پیشنهادی	۳۷/۳۲	۵/۳۲	-۳/۰۰۸	۰/۰۴
الگوریتم ژنتیک	۷۳/۷۵	۲۰/۲۹		

به‌دلیل اینکه p-value این آزمون طبق جدول (۴) کمتر از سطح معنادار ۰/۰۵ می‌باشد. لذا فرضیه برابری میانگین‌ها رد می‌شود و با توجه به میانگین کمتر در روش حل پیشنهادی نسبت به الگوریتم ژنتیک برای مسأله اصلی، در نتیجه روش حل پیشنهادی در معیار زمان بهتر عمل می کند.

- آزمون فرض تعداد مرکز توزیع باز شده روش حل پیشنهادی و الگوریتم ژنتیک برای مسأله اصلی:

$$H_0:\ \mu_L = \mu_{GA}$$
$$H_1:\ \mu_{\mathrm{L}} \neq \mu_{GA}$$

جدول ۵: خروجی آزمون تی دو گردوه مستقل مربوط به آزمون فرض تعداد مرکز توزیع باز شده روش حل پیشنهادی و الگوریتم ژنتیک برای مسأله اصلی

روش حل	میانگین	انحراف استاندارد	مقدار t	سطح معناداری
روش حل پیشنهادی	۶/۶۷	۰/۵۸	-۰/۵۰	۰/۶۴
الگوریتم ژنتیک	۷/۰۰	۱/۰۰		

به‌دلیل اینکه p-value این آزمون طبق جدول (۵) بیشتر از سطح معنادار ۰/۰۵ می‌باشد. لذا فرضیه برابری میانگین‌ها تأیید می‌شود و دو روش حل از لحاظ فرض تعداد مرکز توزیع باز شده دارای تفاوت معناداری نمی باشند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، چگونگی خدمت رسانی به مشتریان در زمان بروز اختلال در مراکز توزیع مورد نظر است. همچنین احتمال خرابی‌ها برای مراکز توزیع متفاوت در نظر گرفته شده است. مکان‌هایی برای توزیع کننده‌ها انتخاب می‌شوند که هزینه‌ها را به حداقل برساند. هدف، انتخاب محل توزیع کننده‌هایی است که هم هزینه کمی داشته باشند و هم قابل اطمینان باشند. با توجه به پیچیدگی محاسباتی مسأله، الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک به منظور حل مدل در

سایز بزرگ، پس از ساده سازی مسأله با آزاد سازی لاگرانژ، به کار گرفته شده است. از نتایج به دست آمده مشخص است که روش حل پیشنهادی مسأله را در زمان کوتاه و با خطای کمی انجام می‌دهد. با بزرگتر شدن سایز مسأله مدت زمان اجرای برنامه به میزان قابل توجهی بالا رود. همین امر ضرورت استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری را تایید می‌کند. در پایان، به تعدادی از زمینه‌های تحقیقاتی بعدی این تحقیق اشاره می‌شود.

- ✓ اولین زمینه تحقیقاتی، با توجه به تطابق بیشتر با شرایط دنیای واقعی، در نظرگیری محدودیت ظرفیت برای تسهیلات می‌باشد.
- ✓ همچنین در بیشتر موارد، یک نوع کالا یا خدمت به مشتری در نظر گرفته می‌شود. حال آنکه در عمل ممکن است مشتری همزمان چندین نوع کالا یا خدمت دریافت کند.
- ✓ در این پژوهش هزینه حمل و نقل و زمان سفر بین توزیع کنندگان و مشتریان به عنوان پارامتر تعریف شده است. در تحقیقات آینده در نظر گرفتن این موضوع که هزینه حمل و نقل و زمان سفر به تصمیم گیری‌های سیستم بستگی دارد، می‌تواند مفید واقع شود.
- ✓ همچنین برای توسعه مدل پیشنهادی می‌توان اختلال را وابسته به مکان مراکز توزیع و همبسته در نظر گرفت.
- ✓ در این مطالعه فرض شد که تقاضا ثابت است، که برای تطابق بیشتر با شرایط دنیای واقعی، می‌توان آن را تصادفی در نظر گرفت.

منابع

Arianezhad, M. B., & Jabbarzadeh, A. (2009). *An integrated model for location-inventory problem with random disruptions, Computers & Industrial Engineering, CIE 2009*. International Conference on, 2009. IEEE, pp. 791-796.

Asl-Najafi, J., Zahiri, B., Bozorgi-Amiri, A. & Taheri-Moghaddam, A. (2015*). A dynamic closed-loop location-inventory problem under disruption risk,* Computers & Industrial Engineering, Volume 90, December 2015, Pages 414–428

Azad, N., Saharidis, G. K., Davoudpour, H., Malekly, H., & Yektammaram, S. A. (2012*). Strategies for protecting supply chain networks against facility and transportation disruptions: an improved Benders decomposition approach,* Annals of Operations Research, 210(1), pp. 125-163.

Berman, O., Krass, D. & Menezes, M. B., (2009*). Locating Facilities in the Presence of Disruptions and Incomplete Information,* Decision Sciences, 40(4), pp. 845-868.

Bradley, J.R., (2014). *An improved method for managing catastrophic supply chain disruptions*, Business Horizons, 57(4), pp. 483–495.

Cui, J., Zhao, M., Li, X., Parsafard, M. & An, S. (2016). *Reliable design of an integrated supply chain with expedited shipments under disruption risks,* Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Volume 95, November 2016, Pages 143–16.

Cui, T., Ouyang, Y. & Shen, Z.-J. M. (2010). *Reliable facility location design under the risk ofdisruptions,* Operations Research, 58(4), pp. 998-1011

Daskin, M. S. (1995). *Network and Discrete Location: Models, Algorithms and Applications,* New York, Wiley

Drezner, Z. (1987). *Heuristic solution methods for two location problems with unreliable facilities,* Journal of the Operational Research Society, 38(6), pp. 509-514.

Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B., Jiuh-Biing, S. & Shahmoradi Moghadam, H. (2016), *Designing a supply chain resilient to major disruptions and supply/demand interruptions,* Transportation Research Part B: Methodological, Volume 94, December 2016, Pages 121–149

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.

Kumar Paul, S., Sarker, R. & Essam, D. (2017*), A quantitative model for disruption mitigation in a supply chain Production*, Manufacturing and Logistics, European Journal of Operational Research, Volume 257, Issue 3, 16 March 2017, Pages 881–895.

Leonard, D. (2005), *The only lifeline was the Wal-Mart*", Fortune, 152, PP. 74-80.

Li, Q. & Savachkin, A. (2013). *A heuristic approach to the design of fortified distribution networks,* Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 50, pp. 138-148.

Li, Q., Zeng, B., & Savachkin, A. (2012). *Reliable facility location design under disruptions*, Computers & Operations Research, 40(4), pp. 901-909.

Lim, M., Daskin, M. S., Bassamboo, A. & Chopra, S. (2010). *A facility reliability problem: Formulation, properties*, and algorithm", Naval Research Logistics (NRL), 57(1), pp. 58-70

Maliszewski, P. J., Kuby, M. J. & HORNER, M. W. (2012). *A comparison of multi-objective spatial dispersion models for managing critical assets in urban areas",* Computers, Environment and Urban Systems, 36, pp. 331-341.

Peng, P., Snyder, L. V., Lim A. & Liu, Z., (2011*), "Reliable logistics networks design with facility disruptions",* Transportation Research Part B: Methodological, **45**, 1190-1211.

Shen, Z. J. M., Zhan, R. L., & Zhang, J., (2007), *"The Reliable Facility Location Problem: Formulations, Heuristics, and Approximation Algorithms"*, Informs journal of computing, **23**(3) pp. 470 – 482.

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

Snyder, L. V., (2003), *"Supply chain robustness and reliability"*, Models and algorithms. Northwestern University.

Yun, L., Qin, Y., Fan, H., Ji, C., Li, X., & Jia, L., (2015), *"A reliability model for facility location design under imperfect information"*, Transportation Research Part B, 81(2), pp. 596–615.Zhan, R. L., (2007), *"Models and algorithms for reliable facility location problems and system reliability optimization"*, University of Florida.

Zhang, Y., Qi, M., Lin, W. & Miao, L., (2015*). "A metaheuristic approach to the reliable location routing problem under disruptions"*. Transportation Research Part E, 83, pp. 90-110.

Zhang, Y., Snyder, L., Ralphs, T. & Xue, Z. (2016). *The competitive facility location problem under disruption risks, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Volume 93, September 2016, Pages 453–473.