

ارایه مدلی برای مساله مکان‌یابی - موجودی سه سطحی با در نظر گرفتن کمبود موجودی و تقاضا همبسته و حل آن با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری

بهنام وحدانی^{۱*}، توفیق الهویرنلو^۲، مهدی سلطانی^۳

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

۲- استاد، دانشگاه آزاد اسلامی علوم و تحقیقات تهران، گروه ریاضی، تهران، ایران

۳- کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، گروه مهندسی صنایع، قزوین، ایران

رسید مقاله: ۲۷ بهمن ۱۳۹۳

پذیرش مقاله: ۱۶ تیر ۱۳۹۴

چکیده

در این مقاله، یک مساله مکان‌یابی - موجودی سه سطحی با همبستگی تقاضا را در حالی که کمبود مجاز است بررسی می‌کنیم. مدل به دنبال کمینه نمودن کل هزینه‌های زنجیره‌ی تامین، شامل هزینه‌های مکان‌یابی تسهیلات، حمل و نقل و موجودی می‌باشد. با توجه به این که مساله مورد بررسی جزء مسائل NP-Hard محسوب می‌شود، به منظور حل آن دو الگوریتم فرا ابتکاری، شامل الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید ارایه شده است. در نهایت نیز الگوریتم‌های پیشنهادی بر روی چند مساله عددی اجرا شده که نشان‌گر کارایی بهتر الگوریتم ژنتیک از لحاظ تابع هدف نسبت به الگوریتم شبیه‌سازی تبرید است؛ ولی از لحاظ زمان محاسباتی، شبیه‌سازی تبرید عملکرد بهتری دارد.

کلمات کلیدی: زنجیره‌ی تامین، مکان‌یابی - موجودی، کمبود موجودی، الگوریتم‌های فرا ابتکاری.

۱ مقدمه

یکی از زمینه‌های مهم در زنجیره‌ی تامین، تصمیمات مکان‌یابی - موجودی در شبکه زنجیره‌ی تامین است. برای بسیاری از صنایع، شبکه‌های زنجیره‌ی تامین به عنوان پایه و اساس عملیاتی در نظر گرفته می‌شود. امروزه در بازار رقابتی، با توجه به مخاطره‌آمیز بودن محیط نامشخص عملیاتی، طراحی شبکه به گونه‌ای مقرون به صرفه، کارآمد و پاسخ‌گو بسیار مهم می‌باشد [۱]. یک شبکه استراتژیکی با طراحی مناسب می‌تواند به طور بالقوه ۶۰ درصد هزینه‌های زنجیره‌ی تامین را کاهش دهد [۲]. در تنظیمات کلاسیک، طراحی چنین سیستمی در درجه اول به طرز برخورد با مشکلات استراتژیکی مربوط به تعداد و محل امکانات لازم (انبارها و کارخانه‌ها) برای یک شبکه با حداقل هزینه و بدون پرداختن به مشکلات عملیاتی (مانند کنترل موجودی و سطح خدمات) وابسته است. به طور

* عهده‌دار مکاتبات

آدرس الکترونیکی: b.vahdani@gmail.com

معمول، در چنین چارچوبی، تصمیم گیری های عملیاتی پس از این که مکان تعیین شد، اتخاذ می گردد. با توجه به این که بسیاری از محققان بحث کرده اند، این روش موثرترین و کارآمدترین ساختار شبکه را ارائه نمی دهد و می تواند موانع موجود در میان رده های مختلف از یک زنجیره ی تامین را افزایش دهد [۳]؛ بنابراین، مسایل مکان یابی تسهیلات موجودی مشترک معرفی گردید که در آن مشکلات استراتژیک و عملیاتی در یک چارچوب یکپارچه با توجه به ارتباطات بین خرده فروشان، توزیع کنندگان، تامین کنندگان و دیگر نهادهای زنجیره تامین حل شد.

در مدل های موجودی، تمرکز بر روی یافتن استراتژی بهینه موجودی در مراکز توزیع می باشد و معمولاً فرض بر آن است که تعداد و محل مراکز توزیع معلوم و مشخص است. در این مدل ها هدف کمینه نمودن هزینه های نگهداری و سفارش دهی می باشد. از سوی دیگر در مدل های مکان یابی، تمرکز بر روی توسعه مدل ها برای تعیین بهینه مراکز توزیع و محل استقرار آن ها و چگونگی تخصیص مشتریان به مراکز توزیع می باشد. در این مدل ها از هزینه های کمبود موجودی چشم پوشی می شود و هدف کمینه کردن هزینه های استقرار و تخصیص می باشد. از طرفی، هزینه حمل و نقل در مدل های مکان یابی، وابستگی به تواتر تامین سفارش در تسهیلات مختلف دارد و این تواتر تامین خود تابعی از سیاست موجودی است. همچنین در مسایل مکان یابی، هر چقدر الگوی مکان یابی بتواند در ازای مقداری مشخص از منابع، خدمات بیش تری را تولید کند، کارا تر است [۴]. به طور مشابه، در مسایل موجودی، هزینه موجودی در هر تسهیل وابسته به مقدار سفارشی است که به آن تسهیل تخصیص داده شده است و این خود به اطلاعاتی در خصوص نحوه ی تخصیص گره های تقاضا به هر یک از تسهیلات نیازمند است. این روابط متقابل بین سیاست های مکان یابی و موجودی نشان دهنده آن است که یک مدل یکپارچه با در نظر گرفتن هزینه های حمل و نقل، موجودی و احداث جهت حل این دسته از مساله ها نیاز است. با این وصف مسایل مکان یابی تسهیلات مشترک و کنترل موجودی به صورت ریاضی مدل سازی شد [۳]. مدل آن ها شامل مشخصات محل انبار و تخصیص مشتری و همچنین بهینه سازی تصمیمات موجودی بود و هزینه موجودی اطمینان، به عنوان یک استراتژی تجمع ریسک برای مقابله با عدم اطمینان تقاضا در سطح خرده فروش در نظر گرفته شد، در حالی که یک کارخانه واحد با مدت زمان تحویل ثابت فرض شده بود.

هزینه موجودی اطمینان در یک شبکه زنجیره ی تامین چند سطحی، به خصوص با توجه به تغییرات در مدیریت زنجیره تامین و با توجه به شیوه های جدید مانند هماهنگی پیچیده تر خواهد شد [۵]. یک نمونه از این تغییرات، افزایش همبستگی تقاضا در طول زمان و فضا به عنوان یک نتیجه از به اشتراک گذاری اطلاعات بین خرده فروشان از شبکه های زنجیره ی تامین می باشد [۶]. مطالعات زیادی در مورد ارزش همبستگی تقاضا در مدل سازی مدیریت زنجیره تامین صورت پذیرفته است [۷]. پارک و همکاران [۸]، مساله مکان یابی - موجودی سه سطحی را مطالعه کردند که در آن هزینه ی موجودی اطمینان برای محل کارخانه وابسته به مدت زمان تحویل در نظر گرفته می شود. با این حال، مدل آن ها تاثیر همبستگی تقاضا را در خرده فروشان در نظر نمی گیرد. شهابی و همکاران [۹]، مطالعات پارک و همکاران [۸] را با ترکیب همبستگی تقاضا در یک مدل طراحی شبکه زنجیره ی تامین سه سطحی که در آن مدت زمان تحویل، وابسته به مکان کارخانه است، توسعه دادند. با توجه به

همبستگی تقاضا، بهتر می‌توان استراتژی تجمع ریسک را در یک مساله مکان‌یابی - موجودی مشترک نشان داد. با توجه به توضیحات ارائه شده، در این مقاله یک مساله مکان‌یابی - موجودی سه سطحی با تقاضا همبسته را با در نظر گرفتن کمبود موجودی مد نظر قرار می‌دهیم. بر اساس توصیف فوق، نوآوری‌های اصلی در این مقاله به شرح زیر است:

- در نظر گرفتن توأمان تقاضا همبسته، کمبود موجودی در سیستم مرور دائم در زنجیره تامین سه سطحی.
- ارائه یک مدل ریاضی برای مکان‌یابی - موجودی در یک زنجیره‌ی تامین با لحاظ نمودن مورد اول.
- توسعه‌ی یک روش حل فرا ابتکاری برای حل این مساله.

به طور خاص، روند این مقاله به شرح زیر است: در بخش ۲ به بررسی ادبیات موضوع پرداخته شده است. در بخش ۳، تعریف دقیقی از مساله، همراه با مفروضات و فرمولاسیون ارائه می‌دهیم. بخش ۴ الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید را توصیف می‌کند. در بخش ۵، آزمایش‌های محاسباتی در مسایل مختلف شبکه را ارائه می‌دهیم. بخش ۶ نیز نتیجه‌گیری و تحقیقات آتی را شامل می‌شود.

۲ مروری بر تحقیقات مشابه

تصمیم‌گیری‌های استراتژیک مکان‌یابی تسهیلات به شدت تحت تاثیر تصمیمات تاکتیکی مانند تصمیمات موجودی می‌باشد. سیاست‌های مکان‌یابی از جمله سیاست‌های بلندمدت یا میان‌مدت و سیاست‌های موجودی از جمله سیاست‌های کوتاه‌مدت یا میان‌مدت در شبکه توزیع کالا به حساب می‌آید؛ اما تاثیر سیاست‌های مکان‌یابی در هزینه‌های موجودی کاملاً مشهود است؛ زیرا با تغییر تقاضای اختصاص یافته به خدمت‌دهندگان نیز هزینه‌های موجودی تغییر می‌کند. در نتیجه مدل‌های موسوم به مدل‌های مکان‌یابی - موجودی ارائه شد که به طور هم‌زمان، هزینه‌های مکان‌یابی و موجودی را کمینه می‌کند. اولین مطالعه که ایده ادغام هزینه‌ی موجودی را در مدل مکان‌یابی پیشنهاد داد، توسط بامول و ولف [۱۰]، ارائه شد. آن‌ها یک مساله مکان‌یابی تسهیلات را بدون در نظر گرفتن ظرفیت توسعه دادند و روشی ارائه کردند که می‌تواند بهینه محلی را به دست آورد. اربلچر و ملر [۱۱]، یک مدل مکان‌یابی - موجودی یکپارچه را بررسی کردند و روشی ابتکاری را برای حل مدل ارائه شده، توسعه دادند.

داسکین و همکاران [۱۲]، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی را پیشنهاد دادند که در آن هدف به حداقل رساندن حمل و نقل، مکان‌یابی و هزینه‌های موجودی اطمینان می‌باشد و آن را از طریق الگوریتم لاگرانژ حل کردند. شن و همکاران [۱۳]، مدل داسکین و همکاران [۱۲] را به عنوان یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح پوشش مجموعه‌ای مدل‌سازی کردند و از روشی مبتنی بر تولید ستون جهت حل مدل برای دو مورد خاص استفاده نمودند: نخست، هنگامی که واریانس تقاضا با میانگین متناسب است و دوم، زمانی که واریانس تقاضا صفر است. تئو و شو [۱۴]، با تعیین سیاست‌های موجودی مطلوب برای مراکز توزیع و خرده‌فروشان، با استفاده از یک تابع هزینه موجودی دو سطحی، کار پیشین را بسط دادند. مساله به عنوان یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح فرموله شده، با استفاده از رویکرد تولید ستون حل می‌شود. میراندا و گاریدو [۳]، تصمیم‌گیری کنترل موجودی را

با مساله مکان‌یابی تسهیلات با محدودیت ظرفیت ترکیب کردند. مدل آن‌ها، مراکز توزیع را مکان‌یابی می‌کند و خرده‌فروشان را به آن‌ها تخصیص می‌دهد و بهترین سیاست‌های موجودی در هر مرکز توزیع را با توجه به محدودیت ظرفیت مرکز توزیع تعریف می‌کند. مساله عدد صحیح غیرخطی مختلط حاصل، با استفاده از آزاد سازی لاگرانژ و روش زیر شیب حل شد.

شو و همکاران [۱۵] یک مساله حمل و نقل - موجودی تصادفی را ارائه دادند که رویکرد تولید ستون شن و همکاران [۱۳] را با استفاده از ساختار خاصی از مساله قیمت‌گذاری گسترش می‌داد. میراندا و گاریدو [۱۶] کار قبلی خود را با در نظر گرفتن دو نوع محدودیت ظرفیت در مراکز توزیع توسعه دادند. اولی حداکثر مقدار سفارش را محدود می‌کند و دومی حداکثر سطح موجودی را برای هر مرکز توزیع تعیین می‌کند. شو و سان [۱۷] و اسنایدر و همکاران [۱۸] نوعی تصادفی از مدل توسعه توسط داسکین و همکاران [۱۲] و شن و همکاران [۱۳] را مطالعه کردند. شو و سان [۱۷] فرمول مساله شن و همکاران [۱۳] را به عنوان یک مدل پوشش مجموعه دوباره بررسی کردند و یک رویکرد حل تولید ستون که به دو مورد خاص از طرح تقاضا محدود نمی‌شود، توسعه دادند. با این حال، اسنایدر و همکاران [۱۸] دو مورد خاص از تقاضا شناسایی شده توسط شن و همکاران [۱۳] را در نظر گرفتند و یک مساله مکان‌یابی - موجودی تصادفی را فرمول‌بندی نموده و از الگوریتم لاگرانژ برای حل مدل استفاده کرده‌اند. رومیجن و همکاران [۱۹]، نسخه محدودیت ظرفیت مدل ارائه شده توسط تئو و شو [۱۴] را مطالعه کردند. آن‌ها مساله را به عنوان یک مدل پوشش مجموعه‌ای فرموله کرده و از یک رویکرد تولید ستون استفاده نموده‌اند. ارتباط بین مدت زمان تحویل و موجودی اطمینان در مطالعه سوریراجان و همکاران [۲۰] انجام شد که در آن مدل ارائه شده به توضیح ارتباط مدت زمان تحویل و مزایای موجودی در تجمع ریسک پرداخته و از یک رویکرد ابتکاری لاگرانژ برای حل مساله استفاده کرده‌اند.

ویدیارثی و همکاران [۲۱]، یک مورد چند محصولی از یک مدل مکان‌یابی - موجودی مشترک که کارخانه‌ها و مراکز توزیع را مکان‌یابی کرده، پیشنهاد داده‌اند که میزان محموله را از کارخانه‌ها به مراکز توزیع ارزیابی می‌کند و خرده‌فروشان را به مراکز توزیع تخصیص می‌دهد. با این حال آن‌ها تنها هزینه‌های موجودی اطمینان را به عنوان استراتژی مدیریت ریسک در نظر گرفته‌اند. نسخه محدودیت ظرفیت مدل ارائه شده داسکین و همکاران [۱۲] و شن و همکاران [۱۳]، توسط اوزسن و همکاران [۲۲] و همچنین میراندا و گاریدو [۲۳] مطالعه شد که در آن از یک روش آزادسازی لاگرانژ به عنوان روش حل استفاده گردید. یک شبکه زنجیره‌ی تامین دو سطحی با تقاضا نامعلوم توسط شو و همکاران [۲۴]، ارائه شد. آن‌ها مساله را به عنوان مدل بهینه‌سازی غیرخطی گسسته فرمول‌بندی نموده و با استفاده از رویکرد تولید ستون مدل مورد نظر را حل کرده‌اند.

پارک و همکاران [۸]، تاثیر مکان‌های کارخانه و تخصیص مراکز توزیع را به آن‌ها بر روی مقدار موجودی اطمینان نگهداری شده در مراکز توزیع بررسی کردند و یک مدل زنجیره‌ی تامین سه سطحی را معرفی کردند که در آن وابستگی مراکز توزیع به تامین‌کننده و مدت زمان تحویل مد نظر قرار گرفته شده بود. یک الگوریتم مبتنی بر آزادسازی لاگرانژ دو مرحله‌ای برای حل مدل استفاده شد. چن و همکاران [۲۵]، یک مساله مکان‌یابی - موجودی را بررسی کردند که در آن تسهیلات ساخته شده ممکن است با احتمال شناخته شده قطع شود. آن‌ها

یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح را برای مساله ارایه و یک روش حل آزادسازی لاگرانژ را توسعه دادند. یک مساله مکان یابی - موجودی در یک زنجیره تامین سه سطحی توسط تنسز و همکاران [۲۶]، مطالعه شد. آنها یک فرمول مستمر غیر خطی برای کمینه کردن هزینه های حمل و نقل، ثابت و نگهداری پیشنهاد و یک الگوریتم ابتکاری تکرار برای حل مدل توسعه دادند. تساو و همکاران [۲۷]، یک مساله مکان یابی - موجودی یکپارچه مراکز توزیع و خرده فروشان چند سطحی را مطالعه کردند. آنها یک روش تقریبی مستمر را برای کمینه نمودن کل هزینه های شبکه ارایه کردند.

برمن و همکاران [۲۸]، یک مساله مکان یابی - موجودی یکپارچه را با سیاست مرور دوره ای موجودی (R, S) در نظر گرفتند که برای هر مرکز توزیع، دو نوع هماهنگی ارایه شد: هماهنگی نسبی که هر مرکز توزیع ممکن است از آن برای فاصله بررسی موجودی خود استفاده کند و هماهنگی کامل که همه مراکز توزیع یک فاصله بررسی یکسان دارند. کمبود موجودی لحاظ شده و مساله به عنوان یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح غیرخطی فرموله شد و یک الگوریتم آزادسازی لاگرانژ برای حل آن ارایه گردید. آتامترک و همکاران [۲۹]، چندین نمونه از یک مساله مکان یابی - موجودی مشترک فرموله شده به عنوان یک برنامه ریزی عدد صحیح ترکیبی درجه دوم مخروطی را مطالعه کردند. چارچوب مدل پیشنهادی را با استفاده از بسته های بهینه سازی تجاری حل نمودند که باعث راه حل های محاسباتی کوتاه تر می شود. در حالی که یک شبکه زنجیره تامین دو سطحی را در نظر گرفته بودند. همچنین همبستگی تقاضا را برای طراحی شبکه زنجیره تامین چند سطحی ادغام کردند. کسکین و اوتسه [۳۰]، یک طراحی سیستم تولید و توزیع در شبکه زنجیره تامین سه سطحی را با توجه به موجودی در مراکز توزیع، خرده فروشان و محدودیت ظرفیت در کارخانه ها ارایه دادند و یک روش ابتکاری کارآمد را با یک روش جستجوی محلی ترکیب کردند و یک الگوریتم شبیه سازی شده را برای حل مساله ایجاد نمودند. یک مساله مکان یابی - موجودی حلقه بسته توسط دیابات و همکاران [۳۱]، پیشنهاد شد. آنها مساله را به عنوان مدل برنامه ریزی غیرخطی ترکیبی فرموله کردند و یک الگوریتم آزادسازی لاگرانژ دو فاز دقیق برای حل مدل توسعه دادند. یک مساله طراحی شبکه زنجیره تامین چهار سطحی توسط شهابی و همکاران [۳۲]، ارایه شده است، که در آن تسهیلات مرکزی در یک مساله مکان یابی تسهیلات چند سطحی با موجودی و استراتژی تجمع ریسک ارزیابی شده است. شهابی و همکاران [۹]، یک مساله مکان یابی - موجودی سه سطحی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند، که تقاضا در سراسر خرده فروشان همبسته در نظر گرفته شده است. آنها یک روش حل تقریب بیرونی برای مدل خود گسترش داده اند.

۳ تعریف مساله

به طور خاص این مقاله، یک مساله سه سطحی مکان یابی - موجودی را در شبکه زنجیره تامین، با در نظر گرفتن کمبود موجودی و تقاضای همبسته در یک سیاست بررسی مرور دائم موجودی ارایه می دهد. همچنین مدل پیشنهادی شامل سه تصمیم مختلف می باشد: ۱- یک مساله مکان یابی تسهیلات چند سطحی برای تعیین تعداد و محل کارخانه ها و انبارها، ۲- یک مساله تخصیص برای تعیین بهترین تخصیص خرده فروشان به انبارها و انبارها به

کارخانه‌ها و ۳- تصمیم‌گیری کنترل موجودی در هر انبار. هدف از مدل در واقع به حداقل رساندن همزمان مکان‌یابی تسهیلات، حمل و نقل و هزینه‌های موجودی (کمبود، موجودی اطمینان و مدت زمان تحویل) متحمل شده، توسط شبکه می‌باشد. به طور خاص مدل، مفروضات زیر را در نظر می‌گیرد:

- کمبود موجودی مجاز است.
 - یک هزینه راه اندازی ثابت برای گشایش کارخانه‌ها و انبارها وجود دارد.
 - هزینه حمل و نقل به ازای هر واحد حمل و نقل، هر دو بین کارخانه‌ها و انبارها و بین انبارها و خرده‌فروشان فاصله اقلیدسی است.
 - یک استراتژی منابع‌یابی در نظر گرفته می‌شود که در آن هر خرده‌فروش فقط از یک انبار تامین می‌شود و هر انبار تنها از یک کارخانه بارگذاری می‌گردد.
 - کنترل موجودی تنها در انبار لحاظ شده، به دنبال یک سیاست بررسی مرور دائم موجودی (r, Q) می‌باشد.
 - موجودی اطمینان در هر انبار برای مقابله با تغییرات تقاضای خرده‌فروشان تخصیص داده شده، در نظر گرفته می‌شود.
 - تقاضا در خرده‌فروشان دارای یک توزیع نرمال چند متغیره با بردار میانگین و ماتریس کواریانس معلوم است.
 - یک مدت زمان تحویل (LT) کارخانه به انبار موجود است که بستگی به محل کارخانه و انبار دارد.
 - کارخانه‌ها در معرض هیچ‌گونه محدودیت ظرفیتی نیستند، در حالی که در هر انبار ظرفیت محدود در نظر گرفته شده است.
- علاوه بر این، شاخص‌های مدل، پارامترها و متغیرهای تصمیم مورد استفاده‌ی مقاله، به صورت جداول زیر می‌باشد:

جدول ۱. مجموعه‌ها

R	مجموعه خرده‌فروشان با شاخص i و l
W	مجموعه انبارها با شاخص j
P	مجموعه کارخانه‌ها با شاخص k

جدول ۲. متغیرهای تصمیم

v_k	اگر کارخانه k بازگشایی شود ۱ در غیر این صورت صفر است
y_{jk}	اگر انبار j به کارخانه k تخصیص یابد ۱ در غیر این صورت صفر است
x_{ij}	اگر خرده‌فروش i به انبار j تخصیص یابد ۱ در غیر این صورت صفر است
b_j	بخشی از تقاضا در طول دوره کمبود پس‌افت در انبار j که به صورت $[0, 1]$ می‌باشد

جدول ۳. پارامترهای مدل

g_k	هزینه راه‌اندازی ثابت برای کارخانه k
f_{jk}	هزینه ثابت انبار j تخصیص یافته شده به کارخانه k
a_{jk}	هزینه هر واحد حمل و نقل متغیر از کارخانه k به انبار j
t_{jk}	هزینه هر واحد حمل و نقل از کارخانه k به انبار j
c_{ij}	هزینه هر واحد حمل و نقل بین انبار j و خرده‌فروش i
μ_i	میانگین تقاضا هر واحد زمانی از خرده‌فروش i
σ_i^2	واریانس تقاضا هر واحد زمانی از خرده‌فروش i
cap_j	ظرفیت در انبار j
h_j	هزینه نگهداری هر واحد زمانی در انبار j
A_{oj}	هزینه ثابت سفارش‌دهی شامل هزینه بررسی وضعیت موجودی در انبار j
π_j	هزینه کمبود هر واحد کمبود در انبار j
π_{oj}	قیمت هر واحد فروش در انبار j
ρ_{il}	ضریب همبستگی بین تقاضا خرده‌فروش i و خرده‌فروش l
l_{jk}	مدت زمان تحویل سفارش از کارخانه k به انبار j
r_j^*	سطح سفارش بهینه در انبار j
z_α	α درصد از توزیع نرمال استاندارد

۳-۱ سیاست موجودی در انبارها

در این مقاله، تقاضا در خرده‌فروش i و خرده‌فروش l با ضریب همبستگی معلوم ρ_{il} همبسته است و تقاضای هر واحد زمانی در انبار j ، D_j ، مستقل فرض شده و دارای یک توزیع نرمال چند متغیره با میانگین $U_j = \sum_i \mu_i x_{ij}$ و واریانس $\sigma_j^2 = \sum_i \sum_l \rho_{il} \sigma_i \sigma_l x_{ij} x_{lj}$ و همچنین $D_j(\tau)$ ، نشان‌گر تقاضا در طی یک بازه زمانی به طول τ در انبار j با تابع توزیع تجمعی $F_j(\cdot; \tau)$ می‌باشد. علاوه بر این، مدت زمان تحویل سفارش در انبار j را می‌توان از رابطه $L_j = \sum_k l_{jk} y_{jk}$ به دست آورد. همچنین، تقاضای انبار j در طول مدت زمان تحویل $D_j L_j$ ، به طور معمول با میانگین $U_j L_j$ و واریانس $\sigma_j^2 L_j$ توزیع می‌گردد. فرض می‌شود که بخشی از کمبودها، پس‌افت و بخش باقی‌مانده فروش از دست‌رفته است. این تعمیم دو مدل موجودی کلاسیک می‌باشد: در حالت فروش از دست‌رفته، $b_j = 0$ و در حالت پس‌افت، $b_j = 1$ می‌باشد. ما به سادگی از تقریب ارایه شده توسط مونتگومری و همکاران [۳۳] استفاده خواهیم نمود؛ بنابراین قسمتی از هزینه‌های مدل پیشنهادی با رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$C_j(r_j) = a_{jk} U_j + \frac{U_j (A_{oj} + t_{jk})}{Q_j} + h_j \left\{ \frac{Q_j}{\sqrt{2\pi}} + r_j - U_j L_j + (1 - b_j) E [D_j L_j - r_j]^+ \right\}$$

$$+ \left[\frac{U_j [\pi_j + (1-b_j)(\pi_{oj} - a_{jk})]}{Q_j} \right] E [D_j L_j - r_j]^+ \quad (1)$$

با توجه به رابطه (۱)، آیتم اول و دوم متوسط هزینه های سفارش متغیر (ثابت) و حمل و نقل هر واحد زمانی است. آیتم سوم تقریبی از متوسط هزینه نگهداری موجودی را در هر واحد زمانی نشان می دهد و آیتم چهارم نمایانگر متوسط هزینه کمبود در هر واحد زمانی می باشد.

سپس با تعریف هزینه های $C_{oj} = h_j Q_j / U_j$ و $C_{uj} = \pi_j + (1-b_j)(\pi_{oj} - a_{jk}) - b_j h_j Q_j / U_j$ و انجام فاکتورگیری، می توان تابع هزینه موجودی (۱) را به صورت رابطه (۲) نوشت:

$$C_j(r_j) = a_{jk} U_j + \frac{U_j (A_{oj} + t_{jk})}{Q_j} + h_j \left[\frac{Q_j}{2} + r_j - U_j L_j \right] + \left[\frac{U_j [C_{oj} + C_{uj}]}{Q_j} \right] E [D_j L_j - r_j]^+ \quad (2)$$

علاوه بر این در این مقاله، مقدار سفارش بهینه و سطح سفارش مجدد (r, Q) را بر اساس روش تقریبی مقدار سفارش اقتصادی کلاسیک به کار برده ایم که به طور گسترده ای در مسایل موجودی و مکان یابی استفاده می شود. بر اساس این روش، مقدار سفارش بهینه Q_j ، سطح بهینه سفارش مجدد r_j^* و موجودی اطمینان ss_j در هر انبار j با توجه به تقاضا همبسته خرده فروشان و مدت زمان تحویل وابسته به کارخانه از رابطه های (۳)، (۴) و (۵) به دست می آید:

$$Q_j = \sqrt{2 A_{oj} U_j / h_j} = \sqrt{2 A_{oj} \sum_i \mu_i x_{ij} / h_j} \quad (3)$$

$$r_j^* = U_j L_j + Z_\alpha \sqrt{\sigma_j^2 L_j} \quad (4)$$

$$ss_j = Z_\alpha \sqrt{\sigma_j^2 L_j} = Z_\alpha \sqrt{\sum_i \sum_l \rho_{il} \sigma_i \sigma_l x_{ij} x_{lj} \sum_k l_{jk} y_{jk}} \quad (5)$$

همچنین، $Z_\alpha = \Phi^{-1} [C_{uj} / (C_{oj} + C_{uj})]$ و $\Phi(\cdot)$ نشان دهنده تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد می باشد. حال با قرار دادن رابطه سطح بهینه سفارش مجدد (۴) در رابطه (۲)، $C_j(r_j^*)$ بهینه که با رابطه (۶) نشان داده شده است، به دست می آید.

$$C_j(r_j^*) = a_{jk} U_j + \frac{U_j (A_{oj} + t_{jk})}{Q_j} + \frac{h_j Q_j}{2} + \left[\frac{U_j [C_{oj} + C_{uj}]}{Q_j} \right] \Phi[Z_\alpha] \sqrt{\sigma_j^2 L_j} \quad (6)$$

اثبات رابطه (۶). با توجه به توضیحات ارایه شده در این بخش که تقاضا انبار j در طول مدت زمان تحویل $D_j L_j$ دارای توزیع نرمال با میانگین $U_j L_j$ و واریانس $\sigma_j^2 L_j$ می باشد، می توان نوشت:

$$E [D_j L_j - y]^+ = \sqrt{\sigma_j^2 L_j} E (Z - \omega)^+$$

در رابطه بالا، Z نشان گر متغیر تصادفی نرمال استاندارد و $y = \mu_j L_j + \omega \sqrt{\sigma_j^2 L_j}$ است.

حال با اتصال رابطه (۴) به رابطه (۲) داریم:

$$\begin{aligned} C_j(r_j^*) &= a_{jk} U_j + \frac{U_j (A_{oj} + t_{jk})}{Q_j} + h_j \left[\frac{Q_j}{2} + Z_\alpha \sqrt{\sigma_j^2 L_j} \right] \\ &\quad + \left[\frac{U_j [C_{oj} + C_{uj}]}{Q_j} \right] \sqrt{\sigma_j^2 L_j} E[Z - Z_\alpha]^+ \\ &= a_{jk} U_j + \frac{U_j (A_{oj} + t_{jk})}{Q_j} + \frac{h_j Q_j}{2} \\ &\quad + \left\{ h_j Z_\alpha + \left[\frac{U_j [C_{oj} + C_{uj}]}{Q_j} \right] \left\{ \Phi[Z_\alpha] - Z_\alpha [1 - \phi[Z_\alpha]] \right\} \right\} \times \sqrt{\sigma_j^2 L_j} \\ &= a_{jk} U_j + \frac{U_j (A_{oj} + t_{jk})}{Q_j} + \frac{h_j Q_j}{2} \\ &\quad + \left\{ h_j Z_\alpha + \left[\frac{U_j [C_{oj} + C_{uj}]}{Q_j} \right] \left\{ \Phi[Z_\alpha] - \frac{Z_\alpha U_j C_{oj}}{Q_j} \right\} \right\} \times \sqrt{\sigma_j^2 L_j} \\ C_j(r_j^*) &= a_{jk} U_j + \frac{U_j (A_{oj} + t_{jk})}{Q_j} + \frac{h_j Q_j}{2} + \left[\frac{U_j [C_{oj} + C_{uj}]}{Q_j} \right] \Phi[Z_\alpha] \sqrt{\sigma_j^2 L_j} \end{aligned}$$

تساوی دوم با استفاده از $E(Z - \omega)^+ = \Phi(\omega) + \omega[1 - \phi(\omega)]$ و تساوی سوم با استفاده از $\phi[Z_\alpha] = C_{uj}(R_j) / C_{oj}(R_j) + C_{uj}(R_j)$ [۲۸].

۲-۳ فرمول بندی مساله

تابع هدف با $C(X, Y)$ مشخص شده و متشکل از چهار نوع هزینه: هزینه ثابت مکان یابی تسهیلات، هزینه حمل و نقل از انبار به خرده فروش، هزینه های حمل و نقل از کارخانه به انبار و سفارش متغیر (ثابت)، هزینه های سیستم موجودی می باشد. سپس، با استفاده از رابطه (۶)، داریم:

$$\begin{aligned} C(X, Y) &= \sum_k g_k v_k + \sum_j \sum_k f_{jk} y_{jk} + \sum_i \sum_j \mu_i c_{ij} x_{ij} + \sum_j \sqrt{2 A_{oj} \sum_i \mu_i x_{ij}} / h_j \\ &\quad + \sum_i \sum_j \sum_k a_{jk} \mu_i x_{ij} + \sum_i \sum_j \sum_k \frac{\mu_i x_{ij} (A_{oj} + t_{jk})}{\sqrt{2 A_{oj} \sum_i \mu_i x_{ij}} / h_j} y_{jk} \end{aligned}$$

$$+ \sum_j \frac{h_j \sqrt{\sum_i \mu_i x_{ij}}}{\sqrt{A_{oj}}} + \sum_j h_j Z_\alpha \sqrt{\sum_i \sum_l \rho_{il} \sigma_i \sigma_l x_{ij} x_{lj} \sum_k l_{jk} y_{jk}}$$

$$+ \sum_i \sum_j \sum_k \left[\frac{\mu_i x_{ij} [C_{oj} + C_{uj}]}{\sqrt{\sum_i \mu_i x_{ij}} / h_j} \right] \phi [Z_\alpha] \sqrt{\sum_i \sum_l \rho_{il} \sigma_i \sigma_l x_{ij} x_{lj} \sum_k l_{jk} y_{jk}}$$

حال با جایگزین نمودن مقادیر C_{oj} و C_{uj} در تابع هدف $C(X, Y)$ ، می توان مساله را به عنوان برنامه ریزی غیر خطی عدد صحیح فرمول بندی نمود:

$$\text{Min } C(X, Y) = \sum_k g_k v_k + \sum_j \sum_k f_{jk} y_{jk} + \sum_i \sum_j \mu_i c_{ij} x_{ij} + \sum_j \sqrt{\sum_i \mu_i x_{ij}} / h_j$$

$$+ \sum_i \sum_j \sum_k a_{jk} \mu_i x_{ij} + \sum_i \sum_j \sum_k \frac{\mu_i x_{ij} (A_{oj} + t_{jk})}{\sqrt{\sum_i \mu_i x_{ij}} / h_j} y_{jk}$$

$$+ \sum_j \frac{h_j \sqrt{\sum_i \mu_i x_{ij}}}{\sqrt{A_{oj}}} + \sum_j h_j Z_\alpha \sqrt{\sum_i \sum_l \rho_{il} \sigma_i \sigma_l x_{ij} x_{lj} \sum_k l_{jk} y_{jk}}$$

$$+ \sum_i \sum_j \sum_k \left[\frac{\mu_i x_{ij} [\pi_j + (1 - b_j)(\pi_{oj} - a_{jk})] + h_j \sqrt{\sum_i \mu_i x_{ij}} / h_j (1 - b_j)}{\sqrt{\sum_i \mu_i x_{ij}} / h_j} \right]$$

$$\times \phi [Z_\alpha] \sqrt{\sum_i \sum_l \rho_{il} \sigma_i \sigma_l x_{ij} x_{lj} \sum_k l_{jk} y_{jk}}$$

s.t.

$$\sum_j x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (8)$$

$$x_{ij} \leq \sum_k y_{jk} \quad \forall i, j \quad (9)$$

$$\sum_i \mu_i x_{ij} \leq cap_j \quad \forall j \quad (10)$$

$$\sum_k y_{jk} \leq 1 \quad \forall j \quad (11)$$

$$B = \sum_i \sum_j b_j \mu_i x_{ij} \quad (12)$$

$$y_{jk} \leq v_k \quad \forall j, k \quad (13)$$

$$x_{ij}, y_{jk}, v_k \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, k \quad (14)$$

در فرمول‌بندی بالا، در تابع هدف (۷)، عبارت اول مربوط به هزینه ثابت راه‌اندازی کارخانه می‌باشد. عبارت دوم شامل هزینه ثابت از انبار تخصیص یافته شده به کارخانه است؛ بنابراین، عبارت اول و دوم نشان‌دهنده هزینه ثابت مکان‌یابی تسهیلات می‌باشد. عبارت سوم نمایان‌گر هزینه حمل و نقل از انبار به خرده‌فروش است. عبارات چهارم و پنجم مربوط به هزینه‌های حمل و نقل از کارخانه به انبار و سفارش متغیر (ثابت) است. عبارات ششم و هفتم نشان‌گر هزینه‌های نگهداری در انبار می‌باشد که شامل هزینه نگهداری موجودی اطمینان در انبار هم می‌گردد. عبارت هشتم مربوط به کمبود موجودی در انبار است؛ بنابراین، عبارات ششم، هفتم و هشتم نشان‌دهنده هزینه‌های سیستم موجودی می‌باشد. محدودیت (۸) و محدودیت (۱۱)، فرض استراتژی منابع‌یابی برای هر خرده‌فروش و انبار می‌باشد. محدودیت (۹) و محدودیت (۱۳)، اطمینان حاصل می‌کند که هر خرده‌فروش و انبار به ترتیب به یک انبار و کارخانه گشایش یافته تخصیص داده می‌شود. محدودیت (۱۰)، ظرفیت را در هر انبار کنترل می‌کند. محدودیت (۱۲)، کمبود موجودی انبار می‌باشد.

۴ روش‌های حل پیشنهادی

مسایل مکان‌یابی - موجودی در حوزه مسایل دشوار (NP-Hard) قرار دارد؛ بنابراین در این مقاله برای حل آن در ابعاد واقعی و بزرگ از الگوریتم‌های ژنتیک (GA) و شبیه‌سازی تبرید (SA) بهره گرفته شده است.

۴-۱ الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم ژنتیک نوع خاصی از الگوریتم‌های تکاملی است که از تکنیک‌های برایش (تکاملی) مانند وراثت و جهش استفاده می‌کند [۳۴]. شکل معمول الگوریتم ژنتیک توسط گلدبرگ [۳۵] ارائه گردید. یکی از گام‌های پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک، شرط توقف الگوریتم می‌باشد که در این مقاله، سپری شدن تعداد معینی تکرار به عنوان معیار توقف در نظر گرفته شده است. سایر گام‌های پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی به صورت زیر بیان می‌شود:

• مقداردهی اولیه

اطلاعات اولیه برای شروع کار الگوریتم ژنتیک پیشنهادی به قرار زیر است:

✓ تعداد تکرار

✓ اندازه‌ی جمعیت را به معنی تعداد کروموزوم‌هایی که در هر مرحله باید نگهداری شود نشان می‌دهد.

✓ احتمال عملگر تقاطع، بیان‌گر تعداد والدینی است که در عملیات جفت‌گیری شرکت می‌کنند.

✓ احتمال عملگر جهش، بیان‌گر تعداد جواب‌هایی است که در فرآیند جهش شرکت می‌کنند.

• نحوه نمایش کروموزوم

طریقه تعریف ساختار نمایش جواب‌ها از جمله تاثیرگذارترین بخش‌ها برای افزایش کارایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌باشد. با توجه به مساله تعریف شده ما ۴ نوع متغیر تصمیم داریم: b_j, v_k, y_{jk}, x_{ij} که تابع هدف و

همین‌طور محدودیت‌های روی این متغیرها تعریف می‌شوند. الگوریتم GA برای شروع کار خود نیاز به یک جمعیت اولیه دارد. به صورت عمومی و خیلی ساده این جمعیت به صورت تصادفی ایجاد می‌شود؛ اما این کار ایرادهایی هم دارد؛ زیرا اگر جواب تصادفی تولید شده از کیفیت خوبی برخوردار نباشد، جواب نهایی نیز کیفیت خوبی نخواهد داشت. پس باید سعی شود که در عین حال که جواب‌ها تصادفی هستند، ناحیه‌ای از فضای حل را که شرایط بهتری دارد، برگزینیم. برای توضیح بیش‌تر، در صورتی که جواب‌های به صورت کامل، تصادفی انتخاب شود، ممکن است که تعدادی از محدودیت‌ها را نقض کنند، این کار باعث ایجاد جریمه می‌شود و مقدار تابع هزینه افزایش خواهد یافت، الگوریتم GA جواب‌ها را تا حد ممکن اصلاح می‌کند؛ اما در نهایت ممکن است پس از این که الگوریتم همگرا شد، باز هم جواب شدنی نباشد و در برخی از محدودیت‌ها صدق نکند و روشن است که چنین جوابی فاقد هرگونه ارزش است. برای حل این مشکل و تولید جواب‌های با کیفیت‌تر و بهتر، از روش Decoding استفاده شده است. الگوریتم GA توسط یک سازوکار مشخص و بهبود دهنده، یک سری جواب را برای مساله ما تولید می‌کند. برای ایجاد کارایی بیش‌تر، این جواب‌ها به صورت یک کد تعریف شده است. به این صورت که در ابتدا یک جمعیت اولیه از کروموزوم کلی که درایه‌های آن را فقط اعداد بین صفر و یک تشکیل می‌دهد، ایجاد کرده و سپس برای محاسبه میزان برازندگی، این کروموزوم در تابعی که برای محاسبه برازندگی تعریف شده، ترجمه می‌شود. مدل پیشنهادی دارای ۳ اندیس i, j, k می‌باشد که اندیس i نشان‌دهنده‌ی تعداد retailer، اندیس j نمایان‌گر تعداد warehouse و در نهایت اندیس k نشان‌دهنده تعداد plant می‌باشد. برای تولید یک ماتریس که همه این اندیس‌ها را پوشا باشد، یک ماتریس را که دارای (تعداد retailer + تعداد ۱ + plant) سطر و تعداد (warehouse + ۱) ستون می‌باشد را تعریف نموده‌ایم.

کروموزوم طراحی شده برای مدل پیشنهادی از چهار قسمت تشکیل شده است:

قسمت اول ماتریسی $(i \times j)$ است (i نشان‌دهنده تعداد خرده‌فروشان و j نشان‌دهنده تعداد انبارها) که هر یک از درایه‌های آن اعداد صفر یا یک می‌باشد (x_{ij}) .

قسمت دوم نیز ماتریسی $(k \times j)$ است (k نشان‌دهنده تعداد کارخانه‌ها و j نشان‌دهنده تعداد انبارها) که هر یک از درایه‌های آن اعداد صفر یا یک می‌باشد (y_{kj}) .

قسمت سوم ماتریسی $(1 \times j)$ است (j نشان‌دهنده تعداد انبارها) که هر یک از درایه‌های آن اعداد بین صفر و یک می‌باشد (b_j) .

قسمت چهارم نیز ماتریسی $(k \times 1)$ است (k نشان‌دهنده تعداد کارخانه‌ها) که هر یک از درایه‌های آن اعداد صفر یا یک می‌باشد (v_k) .

شکل (۱)، ساختار کروموزوم طراحی شده را نشان می‌دهد و شکل (۲)، نمونه‌ای از کروموزوم اولیه و کروموزوم نهایی (جواب موجه قابل درک) برای مساله‌ای با ۷ خرده‌فروش، ۳ انبار و ۲ کارخانه را نشان می‌دهد.

$$\begin{pmatrix} x_{ij} & \dots & \dots \\ y_{kj} & \ddots & v_k \\ b_j & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

شکل ۱. ساختار کروموزوم طراحی شده

	1	2	3	4					
1	۰/۱۷	۰/۱۵	۰/۴۲	۰/۹۱		0	0	1	0
2	۰/۱۳	۰/۵۲	۰/۱۷	۰/۸۹		0	1	0	0
3	۰/۷۴	۰/۹۱	۰/۴۵	۰/۱۷		0	1	0	0
4	۰/۳۸	۰/۷۴	۰/۸۵	۰/۸۹		0	0	1	0
5	۰/۶۶	۰/۱۳	۰/۷۵	۰/۷۴		0	0	1	0
6	۰/۱۶	۰/۲۷	۰/۰۷	۰/۹۱		0	1	0	0
7	۰/۸۷	۰/۵۲	۰/۶۳	۰/۱۰		1	0	0	0
8	۰/۱۶	۰/۶۶	۰/۶۰	۰/۶۱	Decoding	0	1	1	1
9	۰/۵۴	۰/۲۶	۰/۴۱	۰/۳۹		1	0	0	1
10	۰/۹۰	۱/۰۰	۰/۹۵	۰/۳۶		۰/۹۰	۱/۰۰	۰/۹۵	0
کروموزوم اولیه						کروموزوم نهایی			

شکل ۲. نمونه‌ای از کروموزوم اولیه و نهایی

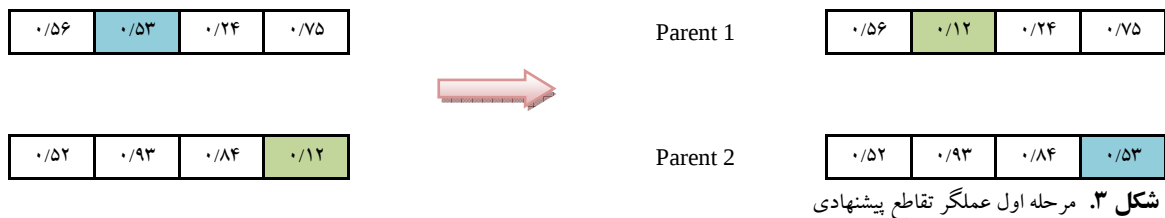
• ارزیابی جواب‌ها

مهم‌ترین مساله در به کارگیری الگوریتم‌های فراابتکاری در مورد مدل‌های دارای محدودیت، چگونگی مواجه شدن با محدودیت‌هاست. همان‌گونه که اشاره شد، برای تولید جواب‌های با کیفیت‌تر و بهتر که محدودیت‌های مساله را ارضا کند، از روش Decoding استفاده نموده‌ایم که در ادامه به نحوه انجام این کار می‌پردازیم. اولین متغیری که به آن می‌پردازیم، متغیر x_{ij} است، در n retailer سطر اول و n warehouse ستون اول، ماتریسی را که به عنوان کروموزوم تعریف کردیم جدا و x قلمداد می‌کنیم. با توجه به محدودیت (۸)، باید طوری این ماتریس را تعریف نماییم که در هر سطر آن فقط یک ۱ وجود داشته باشد. تفسیر این ماتریس به این گونه است که در هر سطر ما کمزیم را بیابد و آن را برابر ۱ و الباقی را صفر قرار دهد. دومین متغیر مورد بررسی، متغیر y_{jk} است. برای راحتی و سرعت بیشتر، ابتدا این متغیر به صورت y_{kj} تعریف شده، تا n plant سطر بعدی و n warehouse ستون اول ماتریس کروموزوم به عنوان ماتریس y قلمداد شود. نکته حائز اهمیت این است که این متغیر در دو محدودیت (۹) و (۱۱) شرکت دارد، برای این که این محدودیت‌ها ارضا شود، ابتدا هر درایه را که بالاتر از ۰/۵ باشد را ۱ و الباقی را صفر در نظر می‌گیریم. پس از آن ابتدا هر ستون ماتریس x را در نظر گرفته و اگر در هر ستون j حداقل یک ۱ وجود داشته باشد در این صورت در آن ستون باید ما کمزیم اعداد آن ستون برابر ۱ شده و الباقی صفر و در غیر این صورت هر درایه ماتریس y به صورت همان حالت قبلی در نظر گرفته می‌شود. سومین متغیری که به آن می‌پردازیم، متغیر v_k است که ماتریس مربوط به آن شامل k سطر می‌باشد. نحوه Decoding به این صورت می‌باشد که ابتدا هر درایه که بزرگ‌تر از ۰/۵ است ۱ و الباقی صفر در نظر گرفته می‌شود. سپس برای ارضای محدودیت (۱۲)، اگر در یک سطر ماتریس y عدد ۱ وجود داشت، حتما باید در آن سطر، ماتریس v

درایه مورد نظر ۱ باشد. در نهایت، چهارمین متغیری که مورد بررسی قرار می‌دهیم، متغیر b_j است که ماتریس مربوط به آن سطری می‌باشد و شامل z ستون بوده که هر درایه آن را اعداد بین صفر و یک تشکیل می‌دهد.

• عملگر تقاطع

در این مقاله، جهت تولید فرزندان جدید در هر تکرار از الگوریتم، از عملگر تقاطع یکنواخت پیوسته استفاده شده است. این نوع عملگر تقاطع دارای دو مرحله است. در مرحله اول با در نظر گرفتن دو کروموزوم (والد) توسط چرخ رولت، یک عدد تصادفی از یک تا طول کروموزوم اول و همچنین یک عدد تصادفی از یک تا طول کروموزوم دوم انتخاب شده و سپس جای ژن یا ستون انتخاب شده از کروموزوم اول با ژن یا ستون کروموزوم دوم عوض می‌شود. در شکل (۳)، نمونه‌ای از مرحله اول تقاطع را نشان می‌دهد.



در مرحله دوم، برای این که بتوانیم فضای ناحیه جواب را بیش‌تر جستجو کنیم، ابتدا باید یک عدد تصادفی (β) با مقدار بین صفر و یک تولید شود. حال با در نظر گرفتن روابط (۱۵) و (۱۶) و استفاده از تقاطع انجام شده در مرحله اول، فرزندان جهت انتقال به نسل بعد ایجاد خواهند شد.

$$Offspring_1 = \beta \times Parent_1 + (1 - \beta) \times Parent_2 \quad (15)$$

$$Offspring_2 = \beta \times Parent_2 + (1 - \beta) \times Parent_1 \quad (16)$$

شکل (۴)، نمونه‌ای از مرحله دوم عملگر تقاطع پیشنهادی با در نظر رفتن $\beta = 0.7$ را نشان می‌دهد.



• عملگر جهش

عملگر جهش مورد استفاده در این مقاله، عملگر جهش جابه‌جایی است. در این عملگر، یک کروموزوم از جمعیت به طور تصادفی انتخاب و موقعیت دو ژن آن که به صورت تصادفی انتخاب شده است، با یکدیگر عوض می‌شود. در شکل (۵)، نمونه از عملگر جهش جابه‌جایی ارایه شده است.

۰/۸۴	۰/۴۱	۰/۹۶	۰/۶۵
------	------	------	------



۰/۸۴	۰/۶۵	۰/۹۶	۰/۴۱
------	------	------	------

شکل ۵. عملگر جهش پیشنهادی

۴-۲ شبیه‌سازی تبرید (SA)

در این الگوریتم از همان ساختار، نحوه نمایش جواب ارایه شده برای الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. شبیه‌سازی تبرید یک الگوریتم بهینه‌سازی فرا ابتکاری ساده و اثربخش در حل مسایل بهینه‌سازی است. این الگوریتم، نخستین بار توسط کریک پاتریک [۳۶] معرفی شد. ایده اصلی در این الگوریتم، تولید جواب در همسایگی جواب فعلی و محاسبه تغییر در مقدار تابع هدف است. یکی از گام‌های پیاده‌سازی شبیه‌سازی تبرید، شرط توقف الگوریتم می‌باشد که در این مقاله، رسیدن به تکرار از پیش تعیین شده به عنوان معیار توقف در نظر گرفته شده است. سایر گام‌های پیاده‌سازی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید پیشنهادی به صورت زیر بیان می‌شود:

• مقداردهی اولیه

اطلاعات ابتدایی مورد نیاز برای شروع الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به شرح زیر است:

✓ تعداد تکرار

✓ دمای اولیه که الگوریتم شروع به کار می‌کند. انتخاب دمای اولیه تاثیر زیادی در جواب نهایی دارد.

✓ دمای نهایی

✓ ضریب همسایگی عددی بین صفر و ۱ می‌باشد که به صورت تصادفی تولید شده است.

✓ تعداد جواب‌های همسایگی، به این صورت است که الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به ازای هر جوابی که داریم، یک تعداد جواب دیگر تولید می‌کند. مثلاً اگر تعداد جواب‌های همسایگی برابر ۵ باشد، آنگاه ۵ جواب جدید دیگر تولید و با آن مقایسه می‌کند و هر کدام که بهتر باشد جایگزین می‌شود.

✓ مقدار کاهش دما که از تقسیم اختلاف بین دمای اولیه و نهایی بر تعداد تکرار به دست می‌آید.

• ساختار همسایگی

پس از تولید جواب اولیه شدنی باید در فضای شدنی مساله اقدام به تولید جواب‌های همسایه کرد. ساختار همسایگی مورد استفاده در این مقاله به این گونه است که عددی بین صفر و ۱ به صورت تصادفی تولید شده و سپس در تعداد ستون‌های جواب ضرب و جزء صحیح آن گرفته می‌شود. به مقدار جواب حاصل از جزء صحیح، ستون‌های جواب به صورت تصادفی انتخاب و به جای آن اعداد بین صفر و ۱ قرار داده می‌شود.

۵ تحلیل نتایج و مقایسات

برای نشان دادن اعتبار مدل پیشنهادی و سودمندی روش حل پیشنهادی، چندین آزمایش عددی اجرا و نتایج مربوط گزارش می‌شود. بر این اساس، ۲۰ مساله آزمون طراحی و اندازه آن‌ها در جدول (۴)، نشان داده شده است. پارامترهای دقیق نامشخص در جدول (۵)، ذکر شده است. در این جدول، $\bar{C}$ متوسط هزینه حمل و نقل بین انبار و خرده‌فروش می‌باشد، $\bar{U}$ متوسط میانگین تقاضای خرده‌فروشان است و در نهایت، $\bar{f}$ نشان دهنده متوسط

f_{jk} برای همه j و k می‌باشد. تمام مدل‌های ریاضی در نرم افزار بهینه سازی کد گذاری شده است (به عنوان مثال، GAMS). علاوه بر این، الگوریتم فراابتکاری با استفاده از زبان ++C توسعه یافته و آزمایش بر روی یک نت‌بوک چهار گیگابایت حافظه و پردازش گر AMD Brazos Dual Core E 450 کد شده است. خلاصه نتایج آزمون در جدول (۶)، ارایه شده است. همچنین از رابطه (۱۷) برای محاسبه شکاف موجود استفاده شده است. علاوه بر این برای درک بهتر، نتایج به دست آمده برای مساله شماره (۱)، به صورت گرافیکی در شکل (۶)، رسم شده است.

$$GAP = \frac{metaheuristics_{sol} - Optimal_{sol}}{Optimal_{sol}} \times 100 \quad (17)$$

جدول ۴. مسایل آزمایشی طراحی شده

شماره مساله	تعداد خرده فروشان	تعداد انبارها	تعداد کارخانه‌ها
۱	۷	۵	۲
۲	۸	۵	۲
۳	۸	۶	۲
۴	۱۰	۶	۲
۵	۱۰	۶	۳
۶	۱۵	۶	۳
۷	۱۵	۸	۳
۸	۲۰	۸	۳
۹	۲۰	۸	۵
۱۰	۲۵	۸	۵
۱۱	۲۵	۱۰	۵
۱۲	۲۵	۱۰	۷
۱۳	۳۰	۱۰	۷
۱۴	۳۰	۱۵	۷
۱۵	۳۵	۱۵	۷
۱۶	۳۵	۱۵	۱۰
۱۷	۴۰	۱۵	۱۰
۱۸	۴۰	۱۵	۱۲
۱۹	۴۵	۱۵	۱۲
۲۰	۴۵	۲۰	۱۲

جدول ۵. تولید داده

پارامتر	ارزش
g_k	$\sim 2.f.Uniform[-0.5, 0.5]$
f_{jk}	$\sim 2.c.Uniform[-0.5, 0.5]$
cap_j	$\sim 4.\mu.Uniform[-0.5, 0.5]$

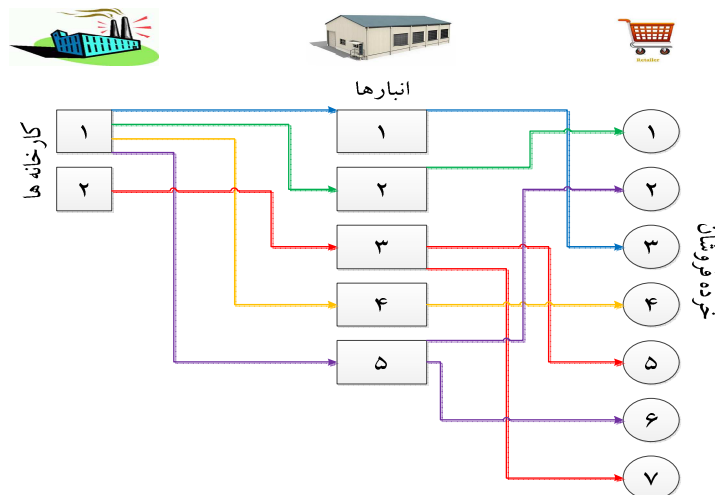
پارامتر	ارزش
h_j	$\sim 1000.Unifrom[-0.5, 0.5]$
A_{oj}	$\sim 10.\bar{c}.\bar{\mu}.Unifrom[-0.5, 0.5]$
t_{jk}	$\sim Unifrom[25, 50]$
c_{ij}	$\sim Unifrom[1, 3]$
μ_i	$\sim 10.Unifrom[1, 5]$
σ_i^r	$\sim 6.Unifrom[1, 5]$
l_{jk}	$\sim 3.Unifrom[1, 5]$
a_{jk}	۲
π_j	۱۰
π_{oj}	۴
ρ_{il}	$0.5, i \neq l \ \& \ 1, i = l$
z_α	۱/۶۵

جدول ۶. نتایج حاصل از اجرای GAMS، الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید

شماره مساله	گمز	الگوریتم ژنتیک				شبیه سازی تبرید	
		تابع هدف	زمان(ثانیه)	شکاف %	تابع هدف	زمان(ثانیه)	شکاف %
۱	۲۷۸۸۹۶	۲۸۹۶۶۶	۴۵/۷	۳/۸	۲۹۹۸۲۸	۱/۵	۶/۹
۲	۲۸۹۸۵۲	۳۰۰۴۷۸	۴۶/۸	۳/۶	۳۱۶۵۸۵	۱/۹	۹/۲
۳	۳۱۱۱۲۳	۳۲۴۵۲۲	۴۷/۳	۴/۳	۳۳۰۵۶۸	۲/۵	۶/۲
۴	۳۳۵۶۳۳	۳۴۸۹۹۶	۵۰/۴	۳/۹	۳۵۷۸۸۱	۲/۸	۶/۶
۵	۳۶۷۸۵۵	۳۷۴۱۵۷	۵۰/۷	۱/۷	۳۷۹۹۸۵	۲/۹	۳/۲
۶	۳۸۳۵۲۲	۳۸۸۹۶۶	۵۹/۸	۱/۴	۴۰۱۲۵۷	۲/۹	۴/۶
۷	۴۰۶۵۳۸	۴۱۸۳۷۸	۶۴/۷	۲/۹	۴۲۱۴۲۱	۴/۲	۳/۶
۸	-	۵۴۲۵۳۵	۷۶/۳	-	۶۳۵۲۲۱	۵/۸	۱۷/۱
۹	-	۶۰۲۸۷۷	۸۶/۷	-	۷۲۵۶۴۵	۶/۲	۲۰/۳
۱۰	-	۷۳۹۸۸۷	۹۳/۹	-	۸۵۷۸۵۶	۶/۹	۱۵/۹
۱۱	-	۸۲۵۸۵۶	۱۳۳/۱	-	۹۴۹۱۲۱	۷/۸	۱۴/۹
۱۲	-	۹۲۳۶۷۴	۱۴۸/۹	-	۱۰۳۵۵۸۷	۹/۳	۱۲/۱
۱۳	-	۱۰۴۳۶۳۲	۱۷۳/۱	-	۱۱۸۵۴۷۴	۱۱/۲	۱۳/۵
۱۴	-	۱۱۶۳۶۹۸	۱۹۶/۴	-	۱۳۲۴۵۶۹	۱۱/۹	۱۳/۸
۱۵	-	۱۲۸۹۶۳۶	۲۶۲/۷	-	۱۴۱۲۵۶۹	۱۵/۴	۹/۵
۱۶	-	۱۳۷۸۹۶۶	۳۱۶/۲	-	۱۵۳۹۸۵۷	۱۸/۹	۱۱/۶
۱۷	-	۱۵۵۴۷۸۸	۳۵۹/۷	-	۱۷۹۶۳۲۱	۱۹/۷	۱۵/۵

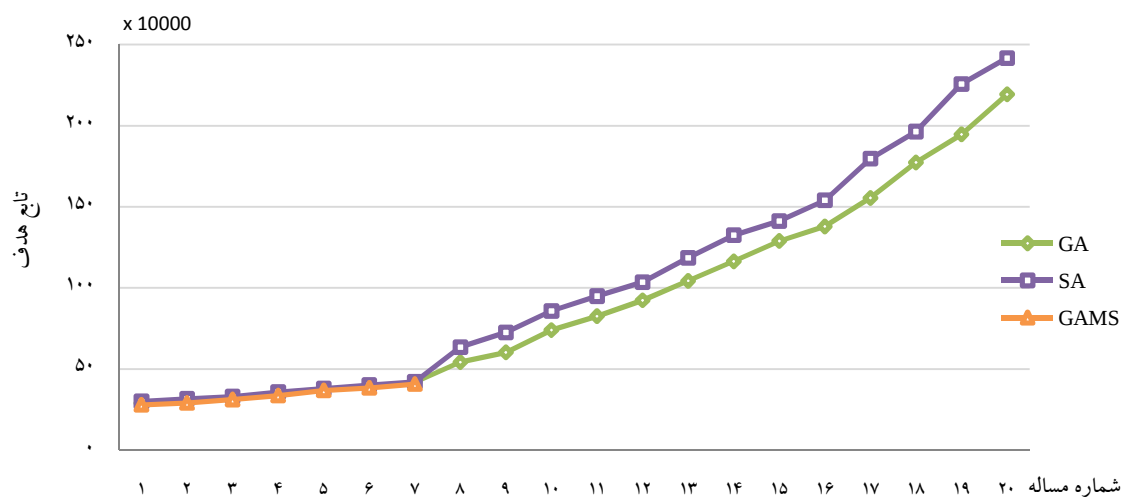
شماره مساله آزمایشی	گمز	الگوریتم ژنتیک	شبه سازی تبرید
تابع هدف	تابع هدف	زمان (ثانیه)	شکاف %
تابع هدف	تابع هدف	زمان (ثانیه)	شکاف %
۱۸	-	۱۷۷۳۲۹۴	۳۹۶/۵
۱۹	-	۱۹۴۶۴۹۱	۴۰۱/۵
۲۰	-	۲۱۹۳۲۷۵	۴۲۰/۷

شکل (۶) برای مساله‌ای با ۲ کارخانه، ۵ انبار و ۷ خرده‌فروش به صورت گرافیکی با توجه به خروجی GAMS رسم شده است که بیان گر صحت و درستی مدل پیشنهادی می‌باشد. با توجه به متغیر تصمیم بازگشایی کارخانه‌ها، این سائز مساله ایجاب کرده که هر دو کارخانه نیاز به راه‌اندازی دارند. همچنین دو متغیر تصمیم تخصیص انبار به کارخانه و تخصیص خرده‌فروش به انبار نشان داده شده است.

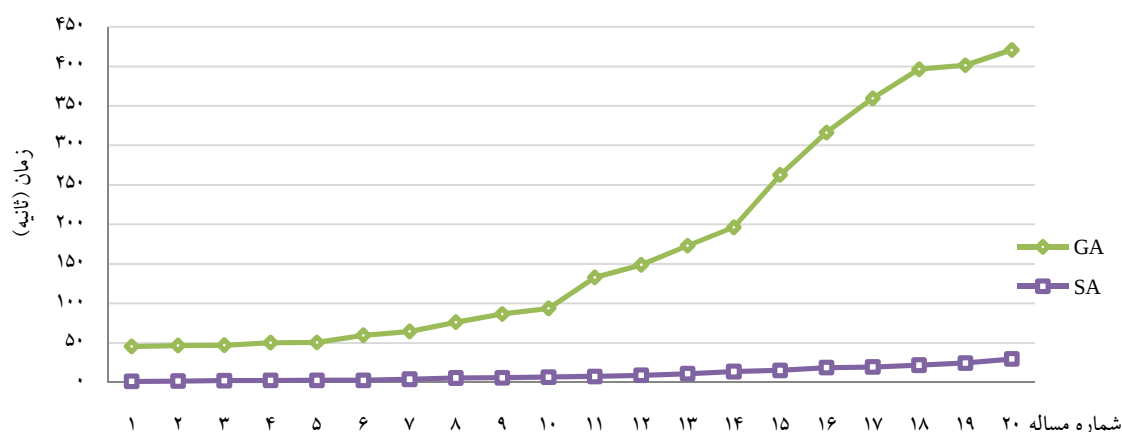


شکل ۶. استراتژی شبکه زنجیره تامین پیشنهادی برای مساله شماره ۱

در جدول (۶)، شکاف بهینگی نشان‌دهنده شکاف روش فرا ابتکاری و جواب بهینه به‌دست آمده توسط GAMS برای مسایل سائز کوچک (۱ تا ۷) می‌باشد. علاوه بر این، شکاف بهینگی برای مسایل سائز بزرگ (۸ تا ۲۰) نشان‌دهنده شکاف دو روش فرا ابتکاری است. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌های فرا ابتکاری پیشنهادی بر روی مسایل مختلف بیان گر این نکته است که الگوریتم ژنتیک پیشنهادی از لحاظ مقدار تابع هدف نسبت به شبه‌سازی تبرید بهتر عمل می‌کند؛ ولی از لحاظ زمان محاسباتی، شبه‌سازی تبرید برتری قابل توجهی نسبت به الگوریتم ژنتیک دارد. شکل (۷)، مقایسه الگوریتم‌ها و GAMS بر اساس مقدار تابع هدف را نشان می‌دهد. در حالی که در شکل (۸)، الگوریتم‌ها را بر اساس زمان محاسباتی مورد مقایسه قرار می‌دهد.



شکل ۷. مقایسه الگوریتم‌ها بر اساس تابع هدف



شکل ۸. مقایسه الگوریتم‌ها بر اساس زمان محاسباتی

با وجود مقایسه صورت گرفته بین پاسخ الگوریتم‌ها در رابطه با هر یک از معیارهای ارزیابی به صورت گرافیکی، عملکرد الگوریتم‌ها به صورت آماری نیز مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در این مقاله برای انجام این مهم از روش آنالیز واریانس استفاده شده است. به این صورت که در رابطه با دو معیار مقدار تابع هدف و مدت زمان رسیدن به جواب بهینه توسط نرم افزار Minitab مورد آنالیز واریانس قرار می‌گیرند و نتایج آن‌ها تحلیل می‌شود. در بحث آنالیز واریانس هدف این است که چندین جامعه را از نظر میانگین‌ها باهم مقایسه کنیم؛ یعنی آیا میانگین‌های این جوامع با هم مساوی هستند (H_0) یا این که اختلاف بارز و معناداری بین آن‌ها وجود دارد (H_1). بدین منظور خروجی تحلیل واریانس دو الگوریتم GA و SA با استفاده از آزمون Tukeys، به تفکیک برای دو معیار مقدار تابع هدف و مدت زمان رسیدن به جواب به دست آمده در جداول (۷) و (۸) ارائه شده است.

جدول ۷. خروجی تحلیل واریانس مقایسه GA و SA با معیار مقدار تابع هدف

مقدار P-Value	آماره F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع تغییرات
۰/۵۹۴	۰/۲۹	۱/۱۹۱۵۳ E+۱۱	۱/۱۹۱۵۳ E+۱۱	۱	فاکتور
		۴/۱۲۲۶۵ E+۱۱	۱/۵۶۶۶۱ E+۱۳	۳۸	خطا
			۱/۵۷۸۵۲ E+۱۳	۳۹	کل

جدول (۷)، بیان‌گر پذیرش فرض H_0 می‌باشد. بدین معنی که میانگین‌ها (روش‌های حل پیشنهادی) باهم تفاوت معناداری ندارند. به همین ترتیب خروجی تحلیل واریانس مقایسه GA و SA با معیار مدت زمان رسیدن به جواب بهینه در جدول (۸)، نشان داده شده است که بیان‌گر رد فرض H_0 می‌باشد. یعنی میانگین‌ها باهم تفاوت دارند.

جدول ۸. خروجی تحلیل واریانس مقایسه GA و SA با معیار مدت زمان محاسباتی

مقدار P-Value	آماره F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع تغییرات
۰/۰۰۰	۲۷/۶۴	۲۵۹۲۹۱	۲۵۹۲۹۱	۱	فاکتور
		۹۳۸۲	۳۵۶۵۲۹	۳۸	خطا
			۶۱۵۸۱۹	۳۹	کل

۶ نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این مقاله، یک مساله مکان‌یابی- موجودی سه سطحی با ترکیب همبستگی تقاضا و مجاز بودن کمبود بررسی شد، در حالی که از یک سیاست بررسی مرور داریم موجودی استفاده می‌کند. برای حل مدل پیشنهادی از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید استفاده شد. الگوریتم‌های حل بر روی چند مساله عددی اجرا شد که نشان‌گر کارایی بهتر الگوریتم ژنتیک از لحاظ تابع هدف نسبت به الگوریتم شبیه‌سازی تبرید می‌باشد؛ ولی از لحاظ زمان محاسباتی، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برتری قابل توجهی داشت. برای گسترش کار فعلی راه‌های مختلفی وجود دارد. یکی از توسعه‌های ممکن می‌تواند افزایش تعداد سطح‌های زنجیره‌ی تامین برای مساله مکان‌یابی- موجودی باشد. از آنجایی که پارامترهای مورد استفاده در مدل ارایه شده، در دنیای واقعی دارای عدم قطعیت می‌باشد، می‌توان برای لحاظ نمودن عدم قطعیت از روش‌های برنامه ریزی عدم قطعیت مانند برنامه‌ریزی فازی، احتمالی و ... استفاده کرد. همچنین می‌توان مدل ارایه شده را با در نظر گرفتن سایر اهداف مرتبط، توسعه داد.

منابع

- [۴] صالحی، م.، جمالیان، ع.، (۱۳۹۴). ارایه یک مدل دو هدفی ادغامی تحلیل پوششی داده و مکان‌یابی- تخصیص تک منبعی چند محصولی بدون محدودیت ظرفیت. مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، ۱۲(۱)، ۴۴-۷۹.
- [1] Friesz, T.L., Lee, I., Lin, C.C., (2011). Competition and disruption in a dynamic urban supply chain. Transportation Research Part B, 45(8), 1212-1231.
- [2] Harrison, T.P., (2004). Principles for the strategic design of supply chains. In: Harris, T.P., Lee, H.L., Neale, J.J. (Eds.), the Practice of Supply Chain Management: Where Theory and Application Converge. Springer, New York, 3-12.

- [3] Miranda, P.A., Garrido, R.A., (2004). Incorporating inventory control decisions into a strategic distribution network design model with stochastic demand. *Transportation Research Part E* 40(3), 183–207.
- [5] Arshinder, K.A., Deshmukh, S.G., (2008). Supply chain coordination: perspectives, empirical studies and research directions. *International Journal of Production Economics* 115(2), 316–335.
- [6] Lee, H., So, K., Tang, C., (2000). The value of information sharing in a two-level supply chain. *Management Science*, 46, 626–643.
- [7] Ganesha, M., Raghunathan, S., Rajendran, C., (2014). The value of information sharing in a multi-product, multi-level supply chain: Impact of product substitution, demand correlation, and partial information sharing. *Decision Support Systems*, 59, 79–94.
- [8] Park, S., Lee, T., Sung, C.S., (2010). A three-level supply chain network design model with risk-pooling and lead times. *Transportation Research Part E*, 46(5), 563–581.
- [9] Shahabi, M., unnikrishnan, A., jafari-shirazi, E., D.boyles, S., (2014). A three level location-inventory problem with correlated demand. *Transportation Research Part B*, 69(5), 1-18.
- [10] Baumol, W.J., Wolfe, P., (1958). A warehouse-location problem, *Operations Research*, 6252-263.
- [11] Erlebacher, S.J., Meller, R.D., (2000). The interaction of location and inventory in designing distribution systems, *Iie Transactions*, 32155-166.
- [12] Daskin, M.S., Coullard, C.R., Shen, Z.-J.M., (2002). An inventory-location model: Formulation, solution algorithm and computational results, *Annals of Operations Research*, 11083-106.
- [13] Shen, Z.-J.M., Coullard, C., Daskin, M.S., (2003). A joint location-inventory model, *Transportation Science*, 3740-55.
- [14] Teo, C., Shu, J., (2004). Warehouse-retailer network design problem. *Operations Research*, 52(3), 396–408.
- [15] Shu, J., Teo, C.-P., Shen, Z.-J.M., (2005). Stochastic Transportation-Inventory Network Design Problem, *Operations Research*, 53, 48-60.
- [16] Miranda, P.A., Garrido, R.A., (2006). A simultaneous inventory control and facility location model with stochastic capacity constraints. *Networks and Spatial Economics*, 6(1), 39–53.
- [17] Shu, J., Sun, J., (2006). Designing the distribution network for an integrated supply chain. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 2(3), 339–349.
- [18] Snyder, L.V., Daskin, M.S., C.-P. Teo, C.-P., (2007). The stochastic location model with risk pooling, *European Journal of Operational Research*, 179, 1221-1238.
- [19] Romeijn, H.E., Shu, J., Teo, C., (2007). Designing two-echelon supply networks. *European Journal of Operational Research*, 178(2), 449–462.
- [20] Sourirajan, K., Ozsen, L., Uzsoy, R., (2007). A single-product network design model with lead time and safety stock considerations. *IIE Transactions* 39(5), 411–424.
- [21] Vidyarthi, N., Elebi, E., Elhedhli, S., Jewkes, E., (2007). Integrated production-inventory-distribution system design with risk pooling: model formulation and heuristic solution. *Transportation Science*, 41(3), 392–408.
- [22] Ozsen, L., Coullard, C.R., Daskin, M.S., (2008). Capacitated warehouse location model with risk pooling. *Naval Research Logistics*, 55(4), 295–312.
- [23] Miranda, P.A., Garrido, R.A., (2008). Valid inequalities for lagrangian relaxation in an inventory location problem with stochastic capacity, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44, 47-65.
- [24] Shu, J., Ma, Q., Li, S., (2010). Integrated location and two-echelon inventory network design under uncertainty, *Annals of Operations Research*, 181, 233-247.
- [25] Chen, Q., Li, X., Ouyang, Y., (2011). Joint inventory-location problem under the risk of probabilistic facility disruptions, *Transportation Research Part B: Methodological*, 45, 991-1003.
- [26] Tancrez, J.-S., Lange, J.-C., Semal, P., (2012). A location-inventory model for large three-level supply chains, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48, 485-502.
- [27] Tsao, Y.-C., Mangotra, D., Lu, J.-C., Dong, M., (2012). A continuous approximation approach for the integrated facility-inventory allocation problem, *European journal of operational research*, 222(2012), 216-228.
- [28] Berman, O., Krass, D., Tajbakhsh, M.M., (2012). A coordinated location-inventory model, *European Journal of Operational Research*, 217(2012), 500-508.
- [29] Atamtürk, A., Berenguer, G., Shen, Z., (2012). A conic integer programming approach to stochastic joint location-inventory problems. *Operations Research*, 60(2), 366–381.

- [30] Keskin, B.B., Uster, H., (2012). Production/distribution system design with inventory considerations. *Naval Research Logistics*, 59(2), 172–195.
- [31] Diabat, A., Abdallah, T., Henschel, A., (2013). A closed-loop location-inventory problem with spare parts consideration, *Computers & Operations Research*.
- [32] Shahabi, M., Akbarinasaji, S., Unnikrishnan, A., James, R., (2013). Integrated inventory control and facility location decisions in a multi-echelon supply chain network with hubs. *Networks and Spatial Economics*, 13(4), 497–514.
- [33] Montgomery, D.C., Bazaraa, M.S., Keswani, A.K., (1973). Inventory models with amixture of backorders and lost sales. *Naval Research Logistics Quarterly* 20,255–263.
- [34] Carlborg, Ö., Jacobsson, L., Ahgren, P., Siegel, P., Andersson, L., (2006). Epistasis and the release of genetic variation during long-term selection. *Nature Genetics*, 38418-419.
- [35] Goldberg, D.E., (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Reading, MA: Addison-Wesle.
- [36] Kirkpatrick, S., Gelatt Jr, C.D., Vecchi, M.P., (1983). Optimization by simulated annealing. *Science* 220, 671–680.