



DESIGNING AND SOLVING AN INTEGRATED MODEL FOR INVENTORY AND DISTRIBUTION WITH TARDINESS

Mohamad Ali Movafaghpour* & Reza Zanjirani Farahani

*Mohamad Ali Movafaghpour, Assistant Professor of Industrial Engineering- Jundi-Shapur University of Technology
Reza Zanjirani Farahani, Senior Lecturer of Informatics and Operations Management-Kingston University*

Keywords

Supply chain management,
Inventory,
Transportation,
Time window,
Optimization,
Memetic algorithm

ABSTRACT

The aim of this research is to design and solve a model for inventory and distribution planning in supply chain. A mixed integer programming (MIP) model is developed in which not only the traditional supply chain costs are considered but also lateness and earliness is considered. Developed model is also capable of satisfying time windowed demand with capacity limits on shipment, delivery and storage by assigning transportation mode to each rout. Since solving this multi commodity, multi period for mode selection requires excessive time so a memetic algorithm is developed. Developed memetic algorithm benefits from fast local searches executed via optimally solving a relaxed version of developed MIP model as good as diverse search property by imitating genetic algorithm behavior. Experimental results exhibit the dominance of developed memetic algorithm over the standard genetic algorithm as good as the general solution approach or MIPs.

© 2016 IUST Publication, IJIEPM. Vol. 26, No. 4, All Rights Reserved



طراحی و حل یک مدل یکپارچه توزیع و موجودی در حالت پس‌افت

محمدعلی موفق‌پور* و رضا زنجیرانی فراهانی

چکیده:

هدف از این تحقیق طراحی و حل یک مدل برای برنامه‌ریزی توزیع و موجودی در زنجیره تامین است. یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی مختلط عدد صحیح برای یک شبکه توزیع سه سطحی توسعه داده شده است که هزینه‌های معمول در مدیریت زنجیره تامین و هزینه‌های دیرکرد و زودکرد را در نظر می‌گیرد. مدل توسعه داده شده همچنین تقاضای با محدودیت زمانی در ارضاء، محدودیت در ظرفیت حمل، تحویل و ذخیره را در نظر می‌گیرد و به عنوان خروجی نوع وسیله حمل را نیز مشخص می‌کند. حل این مدل چند دوره‌ای، چند کالایی، با چند مد حمل به دلیل تعداد زیاد متغیرهای عدد صحیح، برای ابعاد واقعی در زمان منطقی قابل حصول نیست لذا یک الگوریتم ممتیک توسعه داده شده است. الگوریتم ممتیک توسعه داده شده از آن رو که بر چارچوب الگوریتم ژنتیک بنا شده است، از مزایای الگوریتم ژنتیک سود می‌برد و از سوی دیگر چون در مرحله ارزیابی کروموزوم‌ها با استفاده از جستجوی محلی کیفیت کروموزوم‌ها ارتقا می‌یابد، به‌طور متوسط انتظار می‌رود جواب‌هایی به مراتب بهتر از الگوریتم ژنتیک به دست آید. نتایج محاسباتی برتری کارایی روش حل توسعه داده شده را نسبت به روش عمومی حل مسایل برنامه‌ریزی ریاضی مختلط نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی

مدیریت زنجیره تامین،
موجودی،
حمل‌ونقل،
پنجره زمانی،
بهینه‌سازی،
الگوریتم ممتیک

۱. مقدمه

ارضای تقاضای مشتریان کلید اصلی موفقیت سازمان‌ها است. در مبحث مدیریت زنجیره تامین یک مجموعه از سازمان‌ها با مالکیت جداگانه سعی در حل و بهینه‌سازی مسئله‌ای را دارند که با تامین تقاضای مشتریان نهایی زنجیره، همه حلقه‌های زنجیره از مزایای آن منتفع می‌گردند. در میان همه فرایندهای زنجیره تامین، توزیع به جریان مواد و کالاها از تامین کنندگان به مشتریان نهایی زنجیره اشاره دارد. در سال‌های اخیر طراحی بهینه شبکه‌های توزیع به دلیل فراگیر بودن و کاربردی بودنشان در بازارهای رقابتی، توجه محققین بسیاری را به خود جلب کرده است. علاوه بر کاهش هزینه‌های شبکه، تامین به موقع نیاز مشتریان، با افزایش سطح سرویس زنجیره در رقابت‌پذیر کردن سازمان‌ها در بازارهای رقابتی امروزه سهم به سزایی دارد.

تاریخ وصول: ۹۰/۰۴/۱۴

تاریخ تصویب: ۹۲/۱۰/۱۱

محمدعلی موفق‌پور، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول،
روبروی پایگاه چهارم شکاری. Movafaghpour@jstu.ac.ir

*نویسنده مسئول مقاله: دکتر رضا زنجیرانی فراهانی، دانشکده تجارت، دانشگاه
کینگستون، R.Zanjiranifarahani@kingston.ac.uk

در این تحقیق یک شبکه توزیع سه سطحی مشتمل بر تعدادی کارخانه، عمده فروش و خرده‌فروش مورد مطالعه قرار گرفته است و مدل ریاضی آن برای یافتن مقدار بهینه توزیع هر قلم کالا در مسیرهای کاندید برای ارسال بین مبادی و مقصدها با هر مد حمل‌ونقل در هر دوره از افق برنامه‌ریزی توسعه داده شده است. هنگامی که یک تقاضای پیش‌بینی شده قرار است به وقوع بپیوندد، یک فرجه زمانی تعریف شده برای تامین آن وجود دارد تا آن تقاضا برآورده شود. علاوه بر محدود کردن زمان ارضای تقاضا به پنجره زمانی مقرر، به ازای روزهایی که این تقاضا با زودکرد یا دیرکرد تامین می‌گردد متحمل هزینه‌های جریمه می‌شویم که متناسب با ارزش کالا و مدت زمان تعدی از زمان دقیق تامین تقاضا است. اگر تقاضایی در مدت پنجره زمانی معین شده تامین نگردد، به عنوان تقاضای از دست رفته منظور می‌گردد. که توسط مدل به عنوان جواب غیرموجه شناخته می‌شود.

هدف از بیان پنجره زمانی در مدل، حالتی است که هم اکنون در برخی قراردادهای تحویل دیده می‌شود و به این شرح است که اگر زمان تعیین شده برای تحویل کالایی t باشد، طرف تأمین‌کننده موظف است تا تحویل را در بازه زمانی از $(t - \Delta t^-)$ تا $(t + \Delta t^+)$ انجام دهد؛ تا مترتب هیچ‌گونه (و یا اندکی) هزینه دیرکردی نگردد.

۲. مرور ادبیات

این مقاله، مسئله توزیع کالا را بین خرده‌فروشان با انتخاب ناوگان حمل‌ونقل و یا همان مد حمل و نقل مد نظر قرار می‌دهد؛ هیچ‌گونه تصمیمات مسیریابی توسط مدل اتخاذ نمی‌گردد بلکه از بین مسیرهای معرفی شده توسط کاربر بهترین مسیرها برای ارسال محصولات انتخاب می‌گردند. حوزه مطالعه این تحقیق خرید کالاها تامین‌کنندگان، سپس ادغام ارسال‌ها در سطح عمده‌فروشان و یا تحویل مستقیم محصولات به خرده‌فروشان را در نظر می‌گیرد. در بین این دو لایه از زنجیره، جهت ایجاد جریان روان کالاها یک لایه از عمده‌فروشان قرار دارند که جریان مواد و کالاها را تثبیت نموده و امکان ارسال‌های ادغامی را فراهم می‌آورند.

مسئله توزیع در شبکه علاقه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است [۱-۳] یک مدل کمینه‌سازی هزینه‌های تولید-لجستیک از نوع (s,Q) با حل نزدیک به بهینه برای یک شبکه تولید و توزیع با چند تامین‌کننده که فقط یک مرکز توزیع را پشتیبانی می‌کردند - که آن هم به نوبه خود تعداد زیادی خرده‌فروش را پشتیبانی می‌کرد- ارائه داد [۴]. نیز در شرایط قطعی، با دخالت دادن سیاست تولیدی یک فروشنده که محصولات را به صورت دسته‌ای تولید می‌کرد باز هم حلقه مطالعه را محدودتر و فقط تا سطح خریداران مدلی را گسترش داد [۵]. نیز در مورد شبکه تامین فقط به مبحث مکان‌یابی انبارها توجه نمودند که مدل توسعه داده شده توسط آنها سعی در ارضای ترجیحات مشتریان داشت. البته موضوع چند انبار مرکزی که چند خرده‌فروش را تامین می‌کنند سناریوی رایجی در ادبیات است [۶]. یک شبکه توزیع سلسله مراتبی دو سطحی را با تقاضای احتمالی مورد بررسی قرار داد [۷]. نیز با مطرح کردن بهینه‌سازی همزمان چند هدف متضاد با قیمت‌هایی غیرقطعی اولین کسی بود که بهینه‌سازی چند هدفه را در شبکه‌های زنجیره تامین مطرح کرد. همچنین یک مدل دوهدفه توسط [۸] ارائه شده است که یک شبکه توزیع سه سطحی ولی بدون تعیین مد حمل را مورد توجه قرار داده است. آنها برای حل مدل برنامه‌ریزی مختلط عددصحیح توسعه داده‌شان، از یک الگوریتم ژنتیک^۳ (GA) استفاده نمودند.

هنگامی که درخواست کالایی از سوی یک خرده‌فروش صادر می‌گردد، هزینه و زمان دو عامل کلیدی هستند. در این مقاله ما تلاش داریم تا هر دو این ابعاد را مورد توجه قرار دهیم. چنانچه فقط بعد کاهش هزینه‌ها را مد نظر قرار دهیم، به مدل‌های رایج در ادبیات زنجیره تامین خواهیم رسید و چنانچه ارتقای نرخ پاسخگویی و افزایش سطح سرویس زنجیره تامین مبنا قرار گیرد به دسته‌ای از مقالات در ادبیات خواهیم رسید که فلسفه تولید به هنگام [۹] در برنامه‌ریزی احتیاجات توزیع را مورد اشاره قرار می‌دهند. فلسفه JIT اولین بار توسط [۱۰] در زمینه مدیریت زنجیره تامین به کار برده شد پس از آن هم [۸] به موضوع توزیع به‌هنگام در زنجیره تامین پرداختند. با توجه به سیاست JIT، باید مقدار مناسب از کالاها در زمان مناسب و در مکان مناسب تحویل گردد. در این تحقیق ما به دنبال ارتقای نرخ پاسخگویی و

تحویل در خارج از این فرجه زمانی می‌تواند غیرمجاز و یا منجر به جریمه‌ی سنگین دیرکرد گردد. در مدل ارائه شده در این مقاله، حالتی را ملاک قرار داده‌ایم که طبق آن تحویل کالا فقط در فرجه زمانی تعیین شده مجاز است. البته حالت دوم هم می‌تواند به راحتی و بر اساس یافته‌های این تحقیق مدل گردد.

مدل ریاضی علاوه بر کمینه کردن کل هزینه‌های خرید، نگهداری موجودی و حمل‌ونقل، که هزینه‌های رایج در ادبیات موضوع هستند، یک سری ملاحظات دیگر را هم مورد توجه قرار می‌دهد؛ که ما به آنها ملاحظات ارضای تقاضای خرده‌فروشان در پنجره زمانی معین می‌گوییم. معمولاً هزینه‌های حمل (و یا هرگونه هزینه که ماهیت پلکانی داشته باشد) باعث تعدیل حجم ارسال‌ها می‌گردد، و این امکان به‌وجود می‌آید که در حالت کمینه‌سازی هزینه‌ها، ارسال کالا به یک خرده‌فروش بسیار زود و یا بسیار دیرتر از موعد مقرر صورت گیرد. از این رو است که تعریف فرجه زمانی تحویل می‌تواند در جنب توجه به موضوع کاهش هزینه‌ها، موضوع ارتقای سطح سرویس زنجیره تامین را به‌صورت رقابتی مورد توجه قرار دهد.

توجه به مفهوم سطح سرویس زنجیره تامین با استفاده از دو ابزار در مدل پدیدار می‌گردد: هزینه‌های دیرکرد و زودکرد و دیگری تقاضای با پنجره زمانی جهت تامین. تحویل پیش از موعد به خرده‌فروشان به عنوان موجودی منظور می‌گردد و تحویل پس از موعد به عنوان تقاضای پس‌افت در نظر گرفته می‌شود؛ هر یک از انواع تامین گفته شده در بالا با هزینه‌هایی وارد تابع هدف می‌گردند. از سوی دیگر چون ممکن است ساختار هزینه‌ای گفته شده به درستی توان اعمال سیاست‌های سطح سرویس در زنجیره تامین را نداشته باشد، با تعریف فرجه زمانی برای تامین تقاضا تاکید بیشتری بر روی سطح سرویس زنجیره گردیده است. تحت این فرض، هر تقاضایی فقط و فقط باید در پنجره زمانی معینی ارضا گردد، در غیر این صورت به عنوان تقاضای از دست رفته و غیرموجه محسوب می‌گردد. و مدل برای رسیدن به جواب موجه تلاش خواهد کرد تا برنامه زمان‌بندی موجهی برای ارسال‌ها بیابد که شرط پنجره زمانی داده شده را ارضا نماید.

با توجه به اینکه مسایل نمونه از مسئله مورد بحث دارای تعداد زیادی متغیرهای عدد صحیح است، لذا حل آن به راحتی امکان‌پذیر نیست؛ از این رو برای حل این مدل ریاضی یک الگوریتم ممتیک^۱ (MA) بر اساس نسخه آزادسازی شده خطی^۲ از مدل اصلی توسعه داده شده است.

در ادامه این مقاله در بخش ۲ به مرور ادبیات مرتبط با موضوع پرداخته می‌شود. مسئله مورد بحث با جزئیات کامل در بخش ۳ تشریح می‌گردد و مدل ریاضی آن در بخش ۴ ارائه می‌گردد. الگوریتم ممتیک توسعه داده شده برای حل نیز در بخش ۵ ارائه شده و نتایج محاسباتی آن در بخش ۶ آمده است. در پایان، خلاصه کارهای صورت گرفته در این مقاله و پیشنهادهای برای کارهای تحقیقاتی آتی در بخش ۷ آمده است.

هزینه زودکرد و دیرکرد انجام دادند. [۱۷] یک الگوریتم ژنتیک برای مسئله تحویل و برداشت همزمان ارائه دادن و کارایی آن را با نتایج حاصل از CPLEX مقایسه کردند. آنها همچنین در [۱۸] ضمن مدلسازی ریاضی مسئله تحویل و برداشت انعطاف پذیر بدون در نظر گرفتن هزینه دیرکرد/زودکرد در تحویل با پنجره‌ها زمانی بیان کردند که این مسئله NP-Hard است و سپس یک الگوریتم ژنتیک به همراه اپراتور جستجوی محلی برای این مسئله توسعه دادند. [۱۹] از تحلیل پوششی داده‌ها برای بررسی کارایی عملگرهای تکاملی در الگوریتم ژنتیک استفاده کردند و نهایتاً بیان کردند که استراتژی انتخاب تورنومنتی و عملگر تقاطع ساده از بین همه ترکیبات مختلفی که بررسی کرده اند بهترین کارایی را دارد. [۲۰] یک الگوریتم شاخه-و-قیمت^۷ برای حل بهینه دقیق مسئله برنامه ریزی مسیر تحویل و برداشت با پنجره‌های زمانی توسعه دادند. آنها بیان کردند که الگوریتم شاخه-و-قیمت در واقع تعبیه نمودن یک تکنیک تولید ستون در فرایند جستجوی شاخه و کران است که الگوریتم شاخه و کران هر بار جواب بهینه زیرمسئله تولید شده را یافته و با به روز رسانی شبه قیمت‌ها می‌توان متغیرها (ستون‌ها)ی جدید را تولید کرد. [۲۱] با این فرض که می‌توان تقاضای هر مشتری را در سرویس‌های متعدد به جای یکباره تحویل داد، مدل ریاضی مربوطه را توسعه دادند و با تفکیک آن به دو مدل اصلی و قیمت گذاری^۸ یک الگوریتم شاخه-و-قیمت برای حل آن توسعه دادند. [۲۲] یک مسئله واقعی تحویل/برداشت با پنجره زمانی که شامل حمل به مراکز دپو و سپس تحویل به مشتری نهایی بود را بدون مدلسازی ریاضی و با یک الگوریتم ابتکاری حل کردند. [۲۳] مسئله تحویل/برداشت انعطاف پذیر فازی با پنجره‌های زمانی را با برنامه ریزی شانس - مقید^۹ حل کرد.

به خاطر نیاز به یک سیستم لجستیک جامع تر همراه با ملاحظات پاسخ‌گویی زنجیره تأمین در کنار بهینه‌سازی هزینه‌ها، و منظور کردن طرح‌های توزیع متفاوت، تفاوت در ظرفیت و هزینه‌ی مدهای مختلف حمل‌ونقل، فرض‌های واقع بینانه‌تر در مورد ظرفیت وسایل حمل (به دلیل گسسته بودن مقادیر آن، و با توجه به اینکه تا کنون مدلی برای در نظر گرفتن همه این ابعاد خصوصاً هزینه‌های زودکرد/دیرکرد از پنجره زمانی به صورت یکپارچه در ادبیات یافته نشده است، در این تحقیق بر آن شدیم تا مدلی یکپارچه برای در نظر گرفتن فرضیات فوق توسعه دهیم.

۳. تشریح مساله

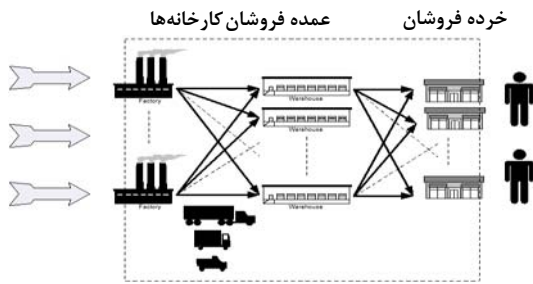
مسئله مورد بحث از یک شبکه توزیع (تسهیلات ثابت) و ناوگان حمل (تسهیلات متحرک) تشکیل گردیده است. شبکه توزیع در برگیرنده سه سطح از نقاط است: کارخانه‌ها، انبارهای مرکزی و خرده‌فروشان. کالاها می‌توانند قبل از تحویل به خرده‌فروشان به صورت موقتی در انبارهای مرکزی ذخیره و برای ارسال ادغام گردند و یا به صورت مستقیم از کارخانجات به خرده‌فروشان ارسال گردند. ناوگان حمل در برگیرنده مدهای مختلف حمل و نقل است.

افزایش سطح سرویس زنجیره تأمین از طریق استفاده از مفهوم پنجره زمانی هستیم. به عبارت دیگر هدف ما کاهش کل هزینه‌های زنجیره تأمین است به نحوی که کالای تحویل داده شده به آخرین رده از زنجیره تأمین محدودیت فرجه زمانی از پیش تعیین شده‌ای را برآورده نماید.

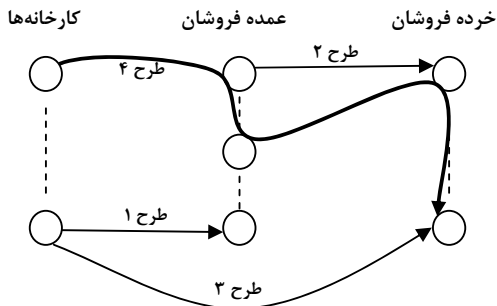
مفهوم تقاضاهایی با پنجره زمانی جهت ارضا تاکنون در مبحث مدیریت زنجیره تأمین اعمال نگردیده است؛ هرچند در زمینه مسیریابی وسایل نقلیه^{۱۰}، مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است [۱۱] مرور جامعی از مفهوم مسیریابی با پنجره زمانی ارائه داده‌اند. [۱۲] نیز مفهوم تقاضای با پنجره زمانی را برای مسئله تعیین اندازه انباشته مورد توجه قرار داد و اشاره کرد که این مفهوم در برخی محیط‌های تولیدی که مشتری اجازه وقوع یک فرجه زمانی را برای تحویل‌های با تأخیر بدهد کارایی دارد. بدیهی خواهد بود که پنجره زمانی تحویل ذاتاً به دو صورت قابل تعریف باشد: قبل از موعد و یا پس از موعد تحویل. به این معنی که مثلاً اگر در قراردادی زمان تحویل کالایی t تعیین شده باشد، تحویل پیش از موعد در بازه $[t - \Delta t^+, t]$ می‌تواند تحویلی موجه باشد و از سوی دیگر تحویل پس از موعد در بازه زمانی $[t, t + \Delta t^-]$ نیز می‌تواند به عنوان تحویلی موجه تعریف گردد. که البته در حالت کلی‌تر امکان تعریف هر دو نوع تحویل و موجه (مجاز) دانستن آنها در قراردادهای امکان‌پذیر است. بدیهی است که پس از تعیین نوع و مدت پنجره زمانی تحویل، کلیه تحویل‌ها فقط باید در این فرجه صورت پذیرند. هرچند به ازای مدت زمان مجاز تعدی از زمان دقیق تحویل، امکان دارد نرخ جریمه‌ای برای واحد کالا در واحد زمان تعریف گردد.

موضوع دیگری که در برنامه‌ریزی شبکه‌های توزیع اهمیت دارد، تعیین نوع طرح‌های تحویل است که شامل تحویل‌های ساده و یا ترکیبی^{۱۱} می‌گردد. طرح‌های تحویل ترکیبی به دلیل اینکه امکان ارسال در دسته‌های بزرگ‌تر را فراهم می‌کنند باعث صرفه‌جویی در هزینه‌ها می‌گردند و از سوی دیگر به دلیل ماهیت چند مبدا-چند مقصدی که این گونه ارسال‌ها دارند بهره‌وری بیشتری در استفاده از ظرفیت وسایل حمل امکان‌پذیر خواهد بود. البته به دلیل پیچیدگی‌های مدل‌سازی این گونه طرح‌های تحویل برای توزیع، محققین متعددی [۱۳-۱۵] فقط بر روی نیاز برای وجود داشتن آنها و تعریف تحویل‌های ترکیبی تأکید کرده‌اند و فقط در مورد اولویت‌هایی که در این گونه موارد باید مد نظر قرار داد، اشاراتی کرده‌اند. مدل‌های مفصل‌تر در مورد تعیین تحویل‌های ترکیبی در مدل‌های مسیریابی موجودی^{۱۲} بررسی می‌گردند. در این مقاله، مدل ریاضی توسعه داده شده، طرح‌های تحویل ترکیبی جدیدی را معرفی نمی‌کند بلکه فقط توانایی استفاده از طرح‌های تحویل تعریف شده توسط کاربر (اعم از ساده و یا ترکیبی) را دارد.

اخیراً [۱۶] محاسبه بهینه پنجره‌های زمانی را برای زنجیره تأمین سری انجام دادند. آنها محاسبات را با فرض توزیع یکنواخت، نمایی، لاپلاس نامتقارن و ... برای پنجره زمانی با هدف کمینه کردن



شکل ۱. قلمرو مسئله مورد بحث در این مقاله



شکل ۲. نمای شماتیکی از طرح‌های توزیع. طرح‌های ۱ و ۲ حمل غیرمستقیم هستند؛ طرح ۳ حمل مستقیم است و طرح ۴ حمل ترکیبی است

در هر کانال ارسال، گزینه‌های متعددی برای انتخاب مد حمل وجود دارد، مثلاً ریلی، جاده‌ای و یا هوایی. از آنجا که تعداد کانال‌ها و مدهای حمل (یا انواع وسایل نقلیه مجاز) در تعداد پارامترها و اندازه مسئله تاثیر مستقیم دارد، در نمونه مسائل حل شده در قسمت نتایج محاسباتی فقط طرح‌های ساده و همراه با ۳ نوع وسیله یا مد حمل منظور گردیده است. برای حل کردن هر نمونه از مدل فوق لازم است تا کاربر مشخصات هر کانال را به‌عنوان پارامترهای مدل وارد کند یعنی مشخص کند که آن مسیر از چه نقاطی از شبکه عبور می‌کند.

محدودیت‌های مسئله شامل محدودیت در ظرفیت تامین، نگهداری و توزیع عمده‌فروشان، خرده‌فروشان و ناوگان حمل است. در ابتدا و انتهای افق برنامه‌ریزی هیچ‌گونه موجودی اولیه‌ای در انبارها موجود نیست و کل تقاضا باید در افق برنامه‌ریزی ارضا گردد. جهت کاهش هزینه‌های کل زنجیره، در مواردی الزامی می‌گردد که برخی تقاضاها را زودتر و یا دیرتر از موعد به محل عمده‌فروشان/خرده‌فروشان ارسال نمود که خود می‌تواند منجر به هزینه‌های نگهداری موجودی در این تسهیلات گردد. ولی از سوی دیگر ارتقای سطح پاسخگویی زنجیره تامین حکم می‌نماید که حداکثر زمان تعدی از موعد تحویل به خرده‌فروشان، محدود به پنجره زمانی پیش/پس از موعد گردد.

هدف کمینه کردن کل هزینه‌های مستقیم زنجیره تامین شامل هزینه‌های خرید، نگهداری و حمل و به همراه هزینه جریمه ناشی از تخلف از موعد تحویل شامل زودکرد و دیرکرد است. و شرط پنجره زمانی به صورت قید در مدل بیان می‌گردد. در نهایت مدل مشخص

هر انبار مرکزی می‌تواند هر یک از اقلام کالا را از هر کدام از کارخانه‌ها تامین نماید و همچنین می‌تواند به چندین خرده‌فروش سرویس دهد. انبارهای مرکزی دارای ظرفیت معین و محدود هستند که نگهداری کالا در آنها متضمن پرداخت هزینه نگهداری می‌گردد. در این میان سیستمی که بتواند تقاضای خرده‌فروشان را در مقادیر و زمان‌های خواسته شده با در نظر گرفتن محدودیت‌های ظرفیت برآورده کند، بسیار مهم جلوه می‌نماید.

ارسال کالاها بین هر دو نقطه مبدا و مقصد به وسیله یکی از انواع مختلف ارسال صورت می‌گیرد. اگر هزینه ارسال کالا فقط وابسته به مقدار کالای ارسالی باشد و هزینه‌های ثابت دخالت نداشته باشند، می‌توان متغیرهای مربوط به میزان استفاده از هر مد حمل را پیوسته در نظر گرفت. ولی از آنجا که در عمل این موضوع کمتر واقعیت فیزیکی به خود می‌گیرد مثلاً ارسال مواد در کانتینرها و یا با کامیون‌هایی صورت می‌گیرد که اجازه حمل آن در صورت پر و یا نیمه پر بودن مقداری ثابت است، لذا منطقی می‌نماید که میزان استفاده از هر مد حمل را هر مسیر را به‌صورت متغیرهای عدد صحیح تعریف نماییم.

پنجره زمانی هم تحویل پس از موعد و هم تحویل پیش از موعد را موجه دانسته و به عبارت دیگر کلیه تحویل‌ها به خرده‌فروش‌ها باید در بازه زمانی $[t - tw^+, t + tw^-]$ واقع شوند که در آن، t زمان مبنا و موعد اصلی تحویل است که بر اساس پیش‌بینی تقاضا تعیین شده. تکنیک مدل‌سازی به‌کار گرفته شده برای اعمال پنجره زمانی تحویل پس از موعد (پیش از موعد) به این صورت است که حد بالای تقاضای پس‌افت (موجودی ذخیره شده) در محل هر خرده‌فروش، در هر دوره برابر است با مجموع تقاضای $\tau = 0, 1, 2, \dots, tw^-$ دوره بعدتر $\tau = 0, 1, 2, \dots, tw^+$ دوره قبل‌تر قرار داده می‌شود.

در این تحقیق ما به‌دنبال تعیین بهترین تصمیمات برای توزیع کالاها در طول افق برنامه‌ریزی برای یک شبکه توزیع سه سطحی هستیم. در تصویر شماره ۱ حوزه مطالعه این تحقیق نمایش داده شده است: چندین تولیدکننده، عمده‌فروش و خرده‌فروش وجود دارد که تقاضای مشتریان برای اقلام مختلف کالا را برآورده می‌کنند. کالاهایی که توسط تولیدکنندگان فراهم شده‌اند توسط کانال حمل به دست مصرف‌کنندگان نهایی می‌رسند. انواع کانال‌های توزیع به این قرار هستند: (۱) حمل مستقیم: مستقیماً از کارخانه به خرده‌فروش (طرح ۳ در شکل ۲). (۲) حمل غیرمستقیم: حمل از کارخانه به عمده‌فروش و از آنجا به یک خرده‌فروش (طرح‌های ۱ و ۲ در شکل ۲). (۳) حمل ترکیبی: مسیر ارسال از یک یا چند تامین‌کننده/عمده‌فروش آغاز می‌شود و از یک یا چند عمده‌فروش/خرده‌فروش عبور می‌کند (طرح ۴ در شکل ۲). با توجه به اینکه در دو نوع اول هر کانال توزیع فقط دو نقطه از شبکه را ملاقات می‌کند به آنها طرح‌های ساده نیز می‌گویند. در مقابل اگر کانال توزیع بیش از دو نقطه از شبکه را ملاقات کند، حمل ترکیبی^۱ خوانده می‌شود.

زنجیره تأمین شرکت کامپیوترهای Dell را نام می‌برند که تعداد اندکی تولیدکننده، تنوع وسیعی از محصول را در اختیار لایه‌های پایین‌تر زنجیره قرار می‌دهد. در داخل ایران نیز با توجه به روند رو به گسترش گرایش یکی تولیدکنندگان بخش کامپیوتر به تولید و مونتاژ کامپیوترهای شخصی و همراه، انتظار می‌رود استفاده از معماری مد نظر این تحقیق برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین آن، کاهش هزینه و ارتقای سطح پاسخگویی زنجیره تأمین مناسبی را فراهم آورد.

۴. مدل ریاضی

نشان‌گذاری ذیل برای مدل ریاضی استفاده شده است.

می‌کند که در هر دوره زمانی چه مقدار، از کدام کالا، توسط کدام مد حمل و از طریق کدام طرح توزیع (مسیر) باید ارسال گردد. در برخی منابع گزینه‌های ممکن برای انتخاب معماری زنجیره تأمین دسته‌بندی شده‌اند. یکی از کامل‌ترین دسته‌بندی‌ها شامل ۶ گزینه متفاوت برای معماری شبکه توزیع است که توسط [۲۴] ارائه شده است. شبکه توزیع مد نظر این مقاله، بسیار مشابه حالتی است که در دسته‌بندی ارائه شده توسط [۲۴] به نام شبکه ادغام در راه (ادغام در هنگام حمل)^{۱۱} معرفی شده است. در شبکه ادغام در راه تقاضای بالایی به هر تولیدکننده ارجاع داده می‌شود تا از امکان ادغام در ارسال‌ها سود برده شود. از این‌رو تعداد تولیدکنندگان به ندرت از ۴ تا ۵ کارخانه فراتر می‌رود. این مؤلفین به عنوان مثال

جدول ۱. مجموعه‌ها و اندیس‌ها

i	اندیس کارخانه‌ها	$i = 1, 2, \dots, I$
j	اندیس عمده فروش‌ها	$j = 1, 2, \dots, J$
k	اندیس خرده‌فروش‌ها	$k = 1, 2, \dots, K$
p	اندیس کالاها	$p = 1, 2, \dots, P$
r	اندیس طرح توزیع (مسیر توزیع)	$r = 1, 2, \dots, R$
m	اندیس مد حمل (وسیله نقلیه)	$m = 1, 2, \dots, M$

جدول ۲. پارامترهای به کار رفته در مدل ریاضی

e_p	حجم هر واحد از کالای p
ca_{jt}	ظرفیت تحویل عمده فروش j در دوره t
S_{pit}	ظرفیت تأمین کارخانه i در دوره t برای کالای p
pu_{pit}	هزینه خرید هر واحد کالای نوع p از کارخانه i در دوره t
h_{pj}	هزینه نگهداری هر واحد کالای p در انبار عمده‌فروشی j
Tw_{pk}^+	حداکثر مدت مجاز تحویل پیش از موعد کالای نوع p در خرده‌فروشی k
a	ضریب هزینه مرتبط با جریمه هر روز-قلم دیرکرد نسبت به موعد تحویل
cap_m	ظرفیت حمل هر واحد وسیله نقلیه نوع m
ca'_{kt}	ظرفیت تحویل خرده‌فروش k در دوره t
d_{pkt}	تقاضای کالای p در خرده‌فروشی k در دوره t
c_{mr}	هزینه اجاره یک واحد وسیله نقلیه نوع m در مسیر r
q_{jt}	ظرفیت نگهداری عمده فروش j در دوره t
tw_{pk}^-	حداکثر مدت مجاز تحویل پس از موعد کالای نوع p در خرده‌فروشی k
b	ضریب هزینه مرتبط با جریمه هر روز-قلم زودکرد نسبت به موعد تحویل

جدول ۳. متغیرهای تصمیم به کار رفته در مدل ریاضی

کل مقداری از کالای نوع p که از کارخانه i به انبار مرکزی j در دوره t و از طریق همه طرح‌های توزیع ارسال گردیده است.	y_{pijt}
مقداری از کالای نوع p که از کارخانه i به انبار مرکزی j در دوره t و از طریق طرح توزیع r ارسال گردیده است، مشروط بر اینکه مسیر r ابتدا از کارخانه i و سپس از انبار مرکزی j بگذرد.	y_{rpjkt}
کل مقداری از کالای نوع p که از کارخانه i به خرده‌فروش k در دوره t و از طریق همه طرح‌های توزیع ارسال گردیده است.	v_{pikt}
مقدار تجمعی تقاضای پس‌افت کالای نوع p تا دوره t در خرده‌فروشی k .	B_{pkt}
تعداد وسایل حمل نوع m که در دوره t مسیر r را طی می‌کنند.	l_{mrt}
کل مقداری از کالای نوع p که از انبار مرکزی j به خرده‌فروش k در دوره t و از طریق همه طرح‌های توزیع ارسال گردیده است.	u_{pjkt}
مقداری از کالای نوع p که از انبار مرکزی j به خرده‌فروش k در دوره t و از طریق طرح توزیع r ارسال گردیده است، مشروط بر اینکه مسیر r ابتدا از انبار مرکزی j و سپس از خرده‌فروش k بگذرد.	u_{rpjkt}
مقداری از کالای نوع p که از کارخانه i به خرده‌فروش k در دوره t و از طریق طرح توزیع r ارسال گردیده است، مشروط بر اینکه مسیر r ابتدا از کارخانه i و سپس از خرده‌فروش k بگذرد.	v_{rpikt}
مقدار تجمعی موجودی کالای نوع p تا دوره t در خرده‌فروشی k .	ln_{pkt}

فرمول‌بندی ریاضی مدل به صورت ذیل است:

PI:

$$Min Z = \sum_p \sum_i \sum_j \sum_t p u_{pit} y_{pijt} + \sum_p \sum_i \sum_k \sum_t p u_{pit} v_{pikt} + \sum_m \sum_r \sum_t c_{mr} l_{mrt} + \quad (1)$$

$$\sum_p \sum_j \sum_t h_{pj} \left(\sum_i \sum_{\tau=1}^t y_{pij\tau} - \sum_i \sum_{\tau=1}^t u_{pjkt} \right) + \left(a \sum_p \sum_k \sum_t B_{pkt} + b \sum_p \sum_k \sum_t ln_{pkt} \right)$$

s.t.:

$$\sum_j y_{pijt} + \sum_k v_{pikt} \leq S_{pit} \quad \forall p, i, t \quad (2)$$

$$\sum_j \sum_t u_{pjkt} + \sum_i \sum_t v_{pikt} = \sum_t d_{pkt} \quad \forall k, p \quad (3)$$

$$\sum_i \sum_{\tau=1}^t y_{pij\tau} \geq \sum_k \sum_{\tau=1}^t u_{pkj\tau} \quad \forall p, j, t < T \quad (4)$$

$$\sum_i \sum_t y_{pijt} = \sum_k \sum_t u_{pjkt} \quad \forall p, j \quad (5)$$

$$\sum_p \sum_i \sum_{\tau=1}^t e_p y_{pij\tau} - \sum_p \sum_k \sum_{\tau=1}^t e_p u_{pkj\tau} \leq q_{jt} \quad \forall j, t \quad (6)$$

$$\sum_j \sum_{\tau=1}^t u_{pjkt} + \sum_i \sum_{\tau=1}^t v_{pikt} - \sum_{\tau=1}^t d_{pk\tau} = ln_{pkt} - B_{pkt} \quad \forall p, k, t \quad (7)$$

$$ln_{pkt} - B_{pkt} \leq \sum_{\tau=t}^{t+tw_{pk}^+} d_{pk\tau} \quad \forall p, k, t \leq T - tw_{pk}^+ \quad (8)$$

$$B_{pkt} - ln_{pkt} \leq \sum_{\tau=t-tw_{pk}^-}^t d_{pk\tau} \quad \forall p, k, t > tw_{pk}^- \quad (9)$$

$$\sum_p \sum_i y_{pijt} \leq ca_{jt} \quad \forall j, t \quad (10)$$

$$\sum_p \sum_i v_{pikt} + \sum_p \sum_j u_{pjkt} \leq ca'_{kt} \quad \forall k, t \quad (11)$$

$$\sum_r y^r_{pijt} = y_{pijt} \quad \forall p, i, j, t \quad (12)$$

$$\sum_r v^r_{pikt} = v_{pikt} \quad \forall p, i, j, t \quad (13)$$

$$\sum_r u^r_{pjkt} = u_{pjkt} \quad \forall p, i, j, t \quad (14)$$

$$\sum_p \sum_i \sum_j e_p y^r_{pijt} \leq \sum_m cap_m l_{mrt} \quad \forall r, t \quad (15)$$

$$\sum_p \sum_i \sum_k e_p v^r_{pikt} \leq \sum_m cap_m l_{mrt} \quad \forall r, t \quad (16)$$

$$\sum_p \sum_j \sum_k e_p u^r_{pjkt} \leq \sum_m cap_m l_{mrt} \quad \forall r, t \quad (17)$$

$$y_{pijt}, y^r_{pijt}, u_{pkjt}, u^r_{pkjt}, v_{pikt}, v^r_{pikt}, In_{pkt}, B_{pkt} \geq 0 \quad \forall p, i, j, k, t \quad (18)$$

$$l_{mrt} \in Z^+ \quad \forall m, r, t \quad (19)$$

سطح تامین‌کنندگان و انبارهای مرکزی هستند. مجموعه محدودیت‌های (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) کل مقدار از هر کالا به هر خرده‌فروش را که از طریق طرح‌های مختلف ارسال تحویل گردیده است را محاسبه می‌کنند. مجموعه محدودیت‌های (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) ظرفیت حمل مورد استفاده در هر مسیر را به حجم جریان کالاهای آن مسیر ارتباط می‌دهند. مجموعه محدودیت‌های (۱۸) و (۱۹) به ترتیب محدودیت‌های مثبت بودن و صحیح بودن متغیرهای تصمیم هستند.

دقت در محدودیت (۱۹) نمایان می‌سازد که هر مسئله نمونه که توسط مدل فوق بیان گردد به تعداد $m \times r \times t$ متغیر عدد صحیح برای تعیین تعداد وسایل نقلیه نیاز دارد. که در آن پارامترهای m ، r و t به ترتیب تعداد انواع وسایل نقلیه، تعداد مسیرهای مجاز برای ارسال کالا و تعداد دوره‌های زمانی در افق برنامه‌ریزی هستند. اگر برای ارسال فقط مسیرهای ساده را که از بالادست زنجیره به پایین‌دست آن وصل می‌شوند، را در نظر بگیریم و از ارسال کالا در طرح‌های ترکیبی (با بیش از دو نقطه برداشت و تحویل کالا در یک مسیر) چشم‌پوشی کنیم، مشاهده می‌گردد که حتی در مسائل به ظاهر کوچک تعداد انبوهی مسیر کاندید برای ارسال کالا وجود خواهد داشت. به عبارت روشن‌تر در یک زنجیره تأمین شامل ۱ تولیدکننده، ۱ عمده‌فروش و ۱ خرده‌فروش به تعداد $1 \times (1+K) + 1 \times K$ مسیر کاندید برای ارسال کالا وجود خواهد داشت. در مسائل نمونه حل شده، همواره سه مد حمل ($m = 3$) مینا قرار گرفته شده است.

در این مقاله ما محدودیت در ظرفیت حمل (محدودیت‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۷) را بر اساس حجم کالاها قراردادیم. ولی در حالت عمومی محدودیت بر ظرفیت حمل می‌تواند ناشی از خصیصه‌های دیگر کالا همچون ارزش پولی آن باشد. چرا که مثلاً در برخی قراردادهای

تابع هدف (۱) کل هزینه‌ها، شامل هزینه‌های خرید (دو عبارت اول)، هزینه اجاره وسایل حمل (عبارت سوم)، هزینه نگهداری موجودی در عمده‌فروشی‌ها (عبارت چهارم) و هزینه‌های مرتبط با عدول از زمان دقیق تحویل به خرده‌فروشی‌ها را کمینه می‌کند. مجموعه محدودیت‌های (۲) اطمینان حاصل می‌کنند که مجموع ارسال‌های صورت گرفته از هر کارخانه به تمام عمده‌فروشان و خرده‌فروشان از ظرفیت تامین کارخانه فراتر نرود. مجموعه محدودیت‌های (۳) بیان می‌کنند که کل تقاضا در طول افق برنامه‌ریزی باید تامین گردد به عبارت دیگر مجموع کالاهای ورودی به هر خرده‌فروش در طول افق باید با مجموع تقاضای رسیده به آن برابر باشد. مجموعه محدودیت‌های (۴) معادلات بالانس موجودی دوره‌ای در هر عمده‌فروش هستند و یا به عبارتی اطمینان حاصل می‌کنند که مجموع کالاهای خروجی از هر عمده‌فروش از کل موجودی آن در هر دوره فراتر نرود. مجموعه محدودیت‌های (۵) معادلات بالانس موجودی هر عمده‌فروش در افق برنامه‌ریزی هستند و اطمینان حاصل می‌کنند که موجودی هر عمده‌فروش در پایان افق برنامه‌ریزی صفر باشد. مجموعه محدودیت‌های (۶) محدودیت ظرفیت هر عمده‌فروش را در هر دوره ارضا می‌نمایند یعنی تفاوت جریان ورودی و خروجی هر تامین‌کننده در هر دوره نباید از ظرفیت آن تجاوز کند. مجموعه محدودیت‌های (۷) کمبود و یا سطح موجودی در هر خرده‌فروش را محاسبه می‌کنند. مجموعه محدودیت‌های (۸) ارضای شرط پنجره زمانی را برای تحویل‌های پیش از موعد اعمال می‌کنند و به همین ترتیب مجموعه محدودیت‌های (۹) ارضای شرط پنجره زمانی را برای تحویل‌های پس از موعد فرموله می‌کنند. مجموعه محدودیت‌های (۱۰) و (۱۱) تامین‌کننده محدودیت توان توزیعی (سرویس‌دهی) به‌ترتیب در

مسئله و یا جستجوی محلی است که در تصویر به صورت یک دایره سیاه در کنار مراحل سنتی GA قرار می‌گیرد تا MA را نتیجه دهد. در این مقاله بهبود کیفیت جواب کروموزوم‌ها با استفاده مؤثر از جواب به‌دست آمده از حل یک نسخه با آزادسازی شده خطی^{۱۵} از مدل ریاضی P1 که آن را P3 می‌نامیم، صورت می‌پذیرد. P3 علاوه بر حذف محدودیت‌های (19) تفاوت دیگری که با P1 دارد این است که محدودیت‌هایی را بر روی حد پایین متغیرهای l_{mrt} اعمال می‌کند.

۵-۱. طرح کد به کار رفته برای الگوریتم ممتیک:

هر کروموزوم در الگوریتم ممتیک رشته‌ای از مقادیر صحیح است که مقادیر مربوط به متغیرهای l_{mrt} از مدل P1 را در خود ذخیره می‌کنند. اما می‌دانیم که یک جواب کامل برای مسئله اصلی باید به همه متغیرها مقداردهی کند؛ رویکردی که در این تحقیق برای تعیین مقدار سایر متغیرها انتخاب شده‌است بر این مفهوم متکی است که: متغیرهای سخت (متغیرهایی که زمان حل مدل ریاضی را به صورت نمایی رشد می‌دهند) متغیرهای صحیح^{۱۶} هستند لذا اگر یک روش حل جنبی (مثل الگوریتم ممتیک) مقدار این متغیرها را فقط مورد توجه قرار دهد و مقدار نزدیک به بهینه آنها را ارائه دهد، با اعمال این مقادیر نزدیک به بهینه به مدل ریاضی اصلی، مدلی خطی حاصل می‌گردد که حل آن تلاش محاسباتی چندانی را طلب نمی‌کند.

۵-۲. جمعیت اولیه:

جمعیت اولیه برای شروع الگوریتم با حل کردن نسخه آزادسازی شده از مدل P1 که ما آن را P2 می‌نامیم تولید می‌گردد. در مدل P2 محدودیت‌ها (۱۹) آزادسازی می‌شوند تا بتوان با سرعت بالایی، جواب اولیه‌ای برای مسئله تولید گردد. مقدار l_{mrt} هایی که در جواب P2 غیر صحیح باشند با یک روند تصادفی اریب‌شده گرد می‌شوند:

if $n \leq l_{mn} \leq n+1, n \in N$:

$$Gene_{mn} = \begin{cases} n & \text{if } Random \# < (l_{mn} - n) \\ n+1 & \text{if } Random \# \geq (n+1 - l_{mn}) \end{cases} \quad (20)$$

۵-۳. عملگر تقاطع^{۱۷}:

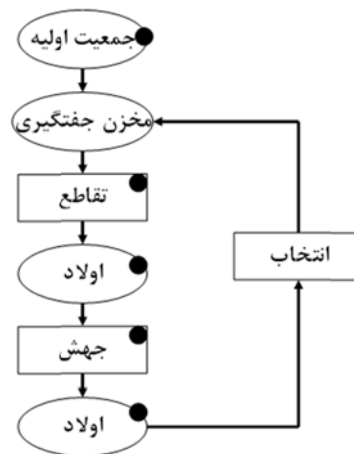
عملگر تقاطع به‌کار رفته یک ویرایش از عملگر تقاطع ساده حسابی^{۱۸} است که متناسب با این مسئله دست‌کاری شده‌است. در عملگر تقاطع ساده حسابی یک تعداد از ژن‌ها از کروموزوم‌های والد به طور تصادفی انتخاب می‌گردند و میانگین حسابی مقدار آنها در مکان هندسی^{۱۹} مربوطه در هر دو کروموزوم فرزند جایگزین می‌گردند، سایر ژن‌ها از مکان هندسی‌های مربوطه از کروموزوم‌های والد رونویسی می‌شوند.

ویرایش صورت گرفته بر روی این عملگر این گونه است که به جای اینکه مقدار میانگین حسابی عیناً در مکان‌های هندسی در کروموزوم‌های فرزند رونویسی گردد، به دو عدد صحیح (کوچک‌ترین عدد صحیح بزرگ‌تر از مقدار میانگین و بزرگ‌ترین عدد صحیح کوچک‌تر از مقدار میانگین) گرد می‌گردد و این اعداد صحیح به طور

بیمه کالا، هزینه بیمه محموله به صورت پلکانی و بر اساس ارزش پولی محموله افزایش می‌یابد. پدیده فوق این امر را به ذهن متبادر می‌کند که به جز حجم کالاهای حمل شده که بر تعداد محموله‌ها (و در نتیجه بر هزینه حمل) تأثیرگذار است، می‌توان محدودیت‌هایی مشابه روابط (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) را برای پارامترهای جدید ظرفیتی e_p و cap_m مثلاً به‌عنوان: ارزش هر نوع کالای p و حداکثر ارزش پولی کالاهای مجاز برای بارگیری در هر وسیله نقلیه به مدل اضافه کرد.

۵. الگوریتم ممتیک پیشنهادی

MAها یک کلاس از رویه‌های فراابتکاری جستجوی تصادفی هستند که در آنها یک رویکرد تکاملی (EA)^{۱۲} با حل‌کننده مخصوص مسئله^{۱۳} ترکیب می‌شود [۲۵] این حل‌کننده می‌تواند به‌صورت یک تکنیک جستجوی محلی، یک رویه زیربهینه‌یاب^{۱۴}، و یا الگوریتم تقریب‌زن به‌کار رود. ترکیب کردن رویه تکاملی با این تکنیک‌ها می‌تواند منجر به یافتن جواب‌هایی گردد که در غیاب این پیوند، یافتن آنها به این سرعت امکان‌پذیر نبود. علت این امر هم این است که جستجوی تکاملی پیمایش گسترده‌ای را از فضای جواب فراهم می‌آورد در حالی که روش‌های جستجوی محلی فقط در ناحیه کوچکی از فضای جواب جستجو کرده و بهبودهای موضعی فراهم می‌آورند [۲۶].



شکل ۳. ساختار کلی الگوریتم ممتیک. دایره‌های سیاه نمایانگر استفاده از دانش مسئله هستند [۲۵]

در پایان برای اینکه تصویر روشن‌تری از ساختار MA و تفاوتش با GA در ذهن خواننده شکل بگیرد، شکل ۳ نمایی از ساختار کلی GA را ارائه می‌دهد. ولی با در نظر گرفتن دایره‌های سیاهی که در گوشه عملگرهای تکاملی قرار گرفته‌اند، که در واقع به معنای استفاده از دانش مربوط به مسئله جهت ارتقای کارکرد آن مرحله است، این نمودار جریان ساختار MA را ارائه خواهد داد. نمودار جریان نمایش داده شده در شکل ۳، تمامی مراحل اجرای GA را عیناً در خود دارد ولی مهم‌ترین تفاوت آن در استفاده از دانش

که منجر به تولید دو کروموزوم فرزند CC1, CC2 گردیده است، در شکل ۴ نشان داده شده است.

تصادفی در مکان هندسی مربوطه در هر یک از ژن‌های فرزند ذخیره می‌گردند. سازوکار این عملگر برای دو کروموزوم والد PC1, PC2

PC1:	8	6	4	8	8	6	3
PC2:	1	0	9	7	9	2	7
CC1:	5	6	6	8	8	4	5
CC2:	4	0	7	7	9	4	5

کروموزوم‌های والد:

کروموزوم‌های فرزند:

شکل ۴. نحوه عملکرد عملگر تقاطع مورد استفاده در این تحقیق

ریاضی خطی که P3 نامیده می‌شود، مقدار متغیرهای l_{mrt} را که، ژن‌های مربوطه‌شان در کروموزوم مورد ارزیابی مقداری بزرگ‌تر از یک گرفته است محدود به مقدار ذخیره شده در ژن مربوطه می‌کند. مدل P3 علاوه بر تابع هدف و محدودیت‌های ۱ تا ۱۹ یک سری محدودیت حد پایین بر روی مقادیر متغیرهای l_{mrt} اعمال می‌کند. بنابر خروجی گرفته شده از حل دقیق $P3^{22}$ ، این حدود پایین که همان مقادیر ذخیره شده در ژن‌ها هستند به‌روز می‌گردند. نحوه به‌روز کردن مقادیر ژن‌های $Gene_{mrt}$ با استفاده از مقادیر l_{mrt} به دست آمده از حل P3 توسط تابع ذیل قابل نمایش است:

۴-۵. عملگر جهش

اگر عملگر جهش بر روی یک کروموزوم والد اعمال گردد، این‌گونه عمل می‌کند که همه ژن‌ها عیناً رونویسی می‌گردند مگر تعدادی تصادفی از آنها که بجای رونویسی، مقداری تصادفی در آنها ذخیره می‌گردد. این مقدار تصادفی اینگونه محاسبه می‌گردد: عددی بین صفر و "مقدار محاسبه شده در جمعیت اولیه برای آن مکان هندسی به علاوه یک عدد تصادفی بین صفر و یک" است.

۵-۵. تابع ارزیابی^{۲۰} کروموزوم‌ها و ارتقاء کیفیت کروموزوم‌ها:

جهت محاسبه مقدار تابع برازندگی^{۲۱} و یا تابع ارزیابی کروموزوم‌ها لازم است تا یک مدل ریاضی حل گردد. این مدل برنامه‌ریزی

$$Gene_{mrt} = \begin{cases} Gene_{mrt} - 1 & \text{if } Gene_{mrt} = l_{mrt} \quad \text{AND } l_{mrt} \geq 1 \\ Int(l_{mrt}) & \text{if } l_{mrt} \geq Gene_{mrt} + 1 \quad \text{AND } l_{mrt} \geq 1 \\ Gene_{mrt} \text{ or } Gene_{mrt} + 1 & \text{if } Gene_{mrt} < l_{mrt} < Gene_{mrt} + 1 \quad \text{AND } l_{mrt} \geq 1 \\ 0 \text{ or } Gene_{mrt} & \text{otherwise} \end{cases}$$

انتخاب و مستقیماً به نسل بعد منتقل می‌کنیم. سایر اعضای نسل بعد توسط سازوکار چرخ رولت^{۲۴} و با شانس‌هایی که با مقدار تابع برازندگی آنها رابطه مستقیم دارد، انتخاب می‌گردند.

۶. نتایج محاسباتی

به دلیل اینکه مسئله مورد تمرکز این تحقیق، با مشخصات گفته شده صریحاً در ادبیات مشاهده نگردید، لذا جهت سنجش کارایی آن اقدام به تولید یک دسته مسائل نمونه گردید. برای تولید مسائل نمونه رویه‌ای به‌کار گرفته شد که مقادیر پارامترها بر اساس توزیع نرمال تولید شده و سپس به اعداد مثبت و صحیح گرد شدند. جزئیات بیشتر در مورد مقدار و یا توزیع احتمال مقدار پارامترها در جدول ۴ آورده شده است.

پس از حل مدل P3 معکوس مقدار تابع هدف آن به عنوان تابع برازندگی کروموزوم مربوطه ذخیره می‌گردد. متغیرهای l_{mrt} که مقدار آنها در ژن‌های مربوطه مقدار صفر داشته ولی در جواب P3 مقدار بزرگ‌تر از صفر به خود گرفته‌اند، به بالا گرد شده و در ژن‌های مربوطه ذخیره می‌شوند. این عمل جهت رسیدن به یک جواب موجه در پایان اجرای الگوریتم است.

۶-۵. انتخاب بهترین‌ها برای نسل بعد

در هر تکرار از الگوریتم ممتیک کلیه کروموزوم‌های فرزند تولید شده به همراه کروموزوم‌های والد که مستقیماً از نسل قبل آمده‌اند، در ظرف انتخاب قرار می‌گیرند، به تعداد مورد نظر (جواب‌های نخبه^{۲۳}) کروموزوم از این ظرف که بهترین مقدار تابع برازندگی را دارند،

جدول ۴. جزئیات نحوه تولید پارامترها در مسائل نمونه

پارامتر	مقدار	توضیحات	پارامتر	مقدار	توضیحات
e_p	$N(5,1)$	توزیع نرمال	d_{pkt}	$N(100,10)$	توزیع نرمال
cap_m	$N(200,14)$	توزیع نرمال	h_{pj}	$N(15,2)$	توزیع نرمال
S_{pit}	$N(15000,30)$	توزیع نرمال	tw_{pk}^+	$N(2,1)$	توزیع نرمال
pu_{pit}	$N(15,2)$	توزیع نرمال	tw_{pk}^-	$N(2,1)$	توزیع نرمال
q_{jt}	$N(3000,20)$	توزیع نرمال	c_{mr}	$N(2000,30)$	توزیع نرمال
ca_{jt}	$N(15000,20)$	توزیع نرمال	a	.2	عدد ثابت
ca'_{kt}	$N(3000,20)$	توزیع نرمال	b	.2	عدد ثابت

مقدار حد پایین تابع هدف هر مسئله از طریق چشم پوشی از محدودیت‌های عدد صحیح بودن متغیرها (قیود (۱۹) در مدل P1) حاصل شده است. بهترین جواب موجه عدد صحیح تولید شده توسط LINGO پس از اجرای ۳۰ دقیقه‌ای نیز مبنای مناسبی برای ارزیابی کیفیت جواب‌های تولید شده توسط الگوریتم توسعه داده شده است. در برخی موارد ممکن است که این جواب یک جواب بهینه باشد اما به دلیل اینکه کل فضای جواب مورد جستجو قرار نگرفته است، دلایل کافی برای تأیید بهینگی این گونه جواب‌ها وجود ندارد. برای مقایسه، کارایی الگوریتم توسعه داده شده با بهترین جواب موجه LINGO که در زمان محدود ۳۰ دقیقه‌ای یافته شده مقایسه شد. حداکثر مقدار شکاف بهینگی هر دو این جواب‌ها نسبت به حد پایین جواب بهینه که توسط LINGO در همین مدت تولید شده، محاسبه گردید. به این معنی که اختلاف نسبی تابع هدف تولید شده توسط الگوریتم ممتیک (یا LINGO) با مقدار حد پایین ارائه شده برای همان مسئله در همان زمان محاسبه گردید. برای اجرای الگوریتم ممتیک و LINGO 8 از یک کامپیوتر همراه با سرعت پردازنده 1.7 GHz و 512 MB حافظه استفاده شده است. تعداد نسل‌ها در الگوریتم ممتیک برابر ۵ و تعداد کروموزوم در هر نسل ۴ عدد انتخاب گردید. در هر نیز ۱ جواب به عنوان جواب نخبه به نسل بعد انتقال یافت. خلاصه نتایج محاسباتی در جدول ۶ آمده است.

با مبنا قرار دادن تعداد متغیرهای عدد صحیح، می‌توان مسائل نمونه را به سه کلاس مسائل کوچک، متوسط و بزرگ دسته‌بندی نمود. مشخصات اصلی مربوط به هر مسئله نمونه در جدول ۱ آورده شده است. به منظور کاهش اثرات تصادفی بر روی نتایج اجرای الگوریتم حل توسعه داده شده، به ازای هر نوع مسئله سه نمونه تولید و حل گردید. جهت اجرای الگوریتم ممتیک، کد مربوطه در محیط Visual Basic 6 نوشته شد و برای حل مدل‌های P2 و P3 از LINGO 8 استفاده گردید که فراخوانی آن از درون محیط Visual Basic صورت گرفت. به منظور مقایسه کیفیت جواب‌های الگوریتم ممتیک توسعه داده شده با حل دقیق ریاضی، از جواب‌های به‌دست آمده از LINGO 8 برای حل P1 استفاده شده است. ولی از سوی دیگر، به دلیل وجود تعداد زیاد متغیرهای عدد صحیح، حل مسائل نمونه تولید شده حتی در کلاس کوچک نیز توسط LINGO 8.0 در زمان ۶۰ دقیقه‌ای ممکن نگردید. از این رو برای ارزیابی کیفیت جواب‌های تولید شده توسط الگوریتم توسعه داده شده از دو مقدار استفاده شد. مقدار اول را حد پایین می‌نامیم و مقدار دوم را بهترین جواب تولید شده توسط LINGO 8.0 پس از مدت زمان معین و محدود. هر چند انتظار می‌رود که LINGO جواب بهینه را تولید کند، اما به دلیل اینکه قبل از رسیدن به جواب بهینه نرم افزار را متوقف می‌کنیم، جواب تولید شده الزاماً بهینه نیست.

جدول ۵. مشخصات مسائل نمونه حل شده

تعداد متغیرهای عدد صحیح	تعداد مسائل حل شده از نمونه	تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی	تعداد خرده‌فروشان عمده‌فروشان	تعداد تامین‌کنندگان محصولات	تعداد کلاس نمونه	نام نمونه
۲۴۳	۳	۳	۳	۳	کوچک	SCM3-3-3-3-3
۴۸۶	۳	۶	۳	۳	متوسط	SCM3-3-3-3-6
۴۰۵	۳	۳	۶	۳	متوسط	SCM3-3-3-6-3
۴۰۵	۳	۳	۳	۶	متوسط	SCM3-3-6-3-3
۴۰۵	۳	۳	۳	۳	متوسط	SCM3-6-3-3-3
۲۴۳	۳	۳	۳	۳	متوسط	SCM6-3-3-3-3
۲۴۳	۳	۳	۳	۲۰	متوسط	SCM20-3-3-3-3
۴۸۶	۳	۶	۳	۲۰	متوسط	SCM20-3-3-3-6
۲۴۸۴	۳	۱۲	۱۰	۳	بزرگ	SCM3-3-3-10-12
۲۴۸۴	۳	۱۲	۳	۱۰	بزرگ	SCM3-3-10-3-12

جدول ۶. خلاصه نتایج محاسباتی

مسئله نمونه	الگوریتم ممتیک		LINGO با زمان محدود			مقایسه		
	زمان اجرا (ثانیه)	شکاف بهینگی ^۱ (%)	شکاف بهینگی ^۲ (%)	زمان اجرا (ثانیه)	اختلاف شکاف ^۳	کل متغیرها	نسبت تعداد متغیرهای عدد صحیح	
SCM3-3-3-3-3	۱۵.۵	۱.۴۵	۳.۱۳	۳۶۰۰	-۱.۶۷۶	۷۱۰۱	۲۴۳	
SCM3-3-3-3-6	۲۳.۷	۲.۶	۵.۰۲	۱۸۰۰	-۲.۴۱۸	۱۴۲۰۲	۴۸۶	
SCM3-3-3-6-3	۲۹.۱	۰.۷۴	۲.۵۴	۱۸۰۰	-۱.۸۰۸	۱۹۱۴۳	۴۰۵	
SCM3-3-6-3-3	۳۴.۲	۱.۲۱	۳.۴۶	۱۸۰۰	-۲.۲۴۹	۱۹۰۸۹	۴۰۵	
SCM3-6-3-3-3	۴۰.۳	۲.۱۷	۳.۳۱	۱۸۰۰	-۱.۱۳۷	۱۹۰۸۹	۴۰۵	
SCM6-3-3-3-3	۲۳	۰.۸۴	۱.۱۳	۱۸۰۰	-۰.۲۸۱	۱۳۹۵۹	۲۴۳	
SCM20-3-3-3-3	۵۷.۵	۱.۰۶	۰.۴۴	۱۸۰۰	۰.۶۲۵	۴۵۹۶۳	۲۴۳	
SCM20-3-3-3-6	۱۱۹	۰.۸۲	۰.۲۵	۱۸۰۰	۰.۵۶۶	۹۱۹۲۶	۴۸۶	
SCM3-3-3-10-12	۲۱۱	۲.۰۴	۱.۷	۱۸۰۰	۰.۳۴۵	۱۷۷۰۸۴	۲۴۸۴	
SCM3-3-10-3-12	۲۱۱	۱.۱۷	۱.۱۵	۱۸۰۰	۰.۰۲	۱۷۶۵۸۰	۲۴۸۴	

^۱. (LINGO Result – Lower Bound)/(Lower Bound)*100

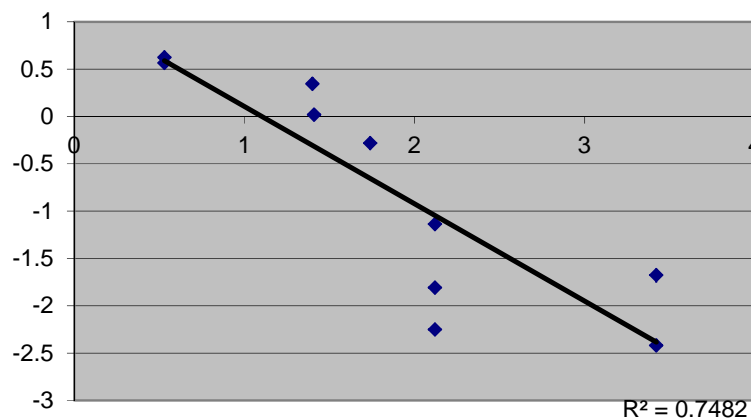
^۲. (MA Result – Lower Bound)/(Lower Bound)*100

^۳. MA Optimality Gap – LINGO Optimality Gap

^۴. Integer Variables / Total Variables*100

نمونه و میزان تفاوت در شکاف بهینگی دو رویکرد حل وجود دارد. با رسم نمودار پراکنش^{۲۵} این دو خصیصه نتیجه جالبی حاصل می‌گردد و آن اینکه ظاهراً هرچه نسبت تعداد متغیرهای عدد صحیح به کل متغیرها بیشتر گردد، شکاف بهینگی MA نسبت به LINGO مقادیر بهتری ارائه می‌دهد. از آنجا که تعداد متغیرهای عدد صحیح در یک مسئله برنامه‌ریزی ریاضی به‌طور معمول باعث افزایش تلاش محاسباتی برای حصول جواب بهینه می‌گردد، انتظار می‌رود به ازای مسائل سخت‌تر و با چگالی بیشتر متغیرهای عدد صحیح، کیفیت جواب روش حل توسعه داده شده افزایش یابد. از سوی دیگر مشاهده گردید که هرچه متغیرهای عدد صحیح در جواب بهینه مقادیر بزرگ‌تری بگیرند، کیفیت جواب روش حل ارائه شده نسبت به LINGO برتری محاسباتی می‌یابد.

همانگونه که از نتایج محاسباتی آشکار است، میزان شکاف بهینگی الگوریتم ممتیک با کران پایین جواب تولید شده توسط LINGO به‌طور متوسط کمتر از ۳٪ است و در جواب‌های منفرد همواره کمتر از ۵٪ مشاهده گردید. این کیفیت مطلوب جواب و شکاف بهینگی رقابتی زمانی قابل توجه خواهد بود که مقادیر زمان اجرای چند ثانیه‌ای الگوریتم با زمان ۳۰ دقیقه‌ای اجرای LINGO مقایسه گردد. از سوی دیگر متوسط میزان شکاف نسبی بهینگی بهترین جواب موجه تولید شده توسط LINGO با کران پایین تولید شده برای هر مسئله در همان زمان، مقادیر بزرگی (حتی تا بیشتر از ۵٪) است که این مقادیر به‌طور معمول بزرگ‌تر از (شش سطر اول جدول) شکاف نسبی بهینگی تولید شده توسط الگوریتم پیشنهادی است. بررسی دقیق نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که ظاهراً ارتباط معناداری بین نسبت متغیرهای عدد صحیح به کل متغیرهای مسئله



شکل ۵. نمودار پراکنش رفتار "تفاوت بین شکاف بهینگی MA با LINGO" نسبت به چگالی متغیرهای عدد صحیح

17. Crossover
18. Simple arithmetic crossover
19. Loci
20. Evaluation function
21. Fitness function
22. Exact
23. Elite
24. Roulette wheel
25. Scatter Plot
26. Lead Time

مراجع

- [1] Grawes SC, Kleffer DB, Hetzel WB. A dynamic model for requirement planning with application to supply chain optimization, *Operations Research*, (1998), Vol. 46, No. 3, pp. S35-S49.
- [2] Vidal CJ, Goetschalckx M. Strategic production - distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models, *European Journal of Operational Research*, (1997), Vol. 101, pp. 1-18.
- [3] Ganeshan R. Managing supply chain inventories: A multiple retailer, one warehouse, multiple supplier model, *International Journal of Production Economics*, (1999), Vol. 59, pp. 341-354.
- [4] Bylka S. A dynamic model for the single - vendor, multibuyer problem, *International Journal of Production Economics*, (1999), Vol. 59, pp. 297-304.
- [5] Korepla J, Lehmusvaara A. A customer oriented approach to warehouse network evaluation and design, *International Journal of Production Economics*, (1999), Vol. 59, pp. 135-146.
- [6] Alptekinoglu A, Tang CS. A model for analyzing multi-channel distribution systems, *European Journal of Operational Research*, (2005), Vol. 163, No. 3, pp. 802-824.
- [7] Chen C, Lee W. Multi-objective optimization of multi-echelon supply chain networks with uncertain product demands and prices, *Computers and Chemical Engineering*, (2004), Vol. 28, pp. 1131-1144.
- [8] Farahani R, Elahipanah M. A genetic algorithm to optimize the total cost and service level for just-in-time distribution in a supply chain, *International Journal of Production Economics*, (2008), Vol. 111, No. 2, pp. 229-243.
- [9] Sugimori Y, Kusunoki K, Cho F, Uchikaa K. Toyota production system and kanban system materialization of just-in-time and respect-for-human system, *International Journal of*

۷. نتیجه گیری

در این مقاله ما مسئله توزیع در شبکه توزیع سه سطحی را مورد توجه قرار دادیم که برای ارسال کالاها در هر یک از مسیرهای از پیش تعریف شده، گزینه‌های متعددی به عنوان مد یا وسیله نقلیه وجود دارد. در خروجی مدل ریاضی مقادیر حمل و مقادیر موجودی در هر دوره برای هر نقطه از شبکه معین می‌گردد. در مدل ارائه شده زمان‌های پیشبرد^{۲۶} ناچیز در نظر گرفته شده لذا در فرمول‌بندی مسئله دخالت داده نشده‌اند. به دلیل تلاش محاسباتی بسیار سنگین برای حل کردن مسئله به صورت بهینه دقیق، یک روش حل مبتنی بر الگوریتم ممتیک ارائه دادیم که کیفیت جواب آن در با در نظر گرفتن زمان حصول جواب نهایی در مقایسه با روش حل استاندارد امیدوار کننده بود. از نظر فرایند کار MA، نیز از آنجا که در این روش حد بالا و پایین متغیرها، مورد جستجو قرار می‌گیرد، سازوکار آن را بسیار مشابه جستجو برای صفحات برش بر روی متغیرهای عدد صحیح می‌نماید؛ از این رو ما به این رویه افزودن تصادفی صفحات برش می‌گوییم.

برای بررسی زمینه‌های تحقیقاتی آتی باید بیان کرد، بجز حالتی که در این مقاله برای تأثیر پنجره زمانی بر روی تحویل‌ها ملاک قرار گرفت، همچنین می‌توان حالتی را نیز مدل کرد که در آن تحویل در خارج از پنجره زمانی منجر به جریمه‌های بسیار سنگین گردد ولی در عوض مدل ریاضی به جواب‌های موجه برسد. که البته این حالت نیز به راحتی و بر اساس یافته‌های این تحقیق قابل مدل سازی است. از دیگر زمینه‌های امیدبخش به عنوان تحقیقات آتی استفاده از تکنیک تولید ستون برای تولید طرح‌های توزیع ترکیبی است. در پایان شاید بتوان به جرأت گفت که مهم‌ترین و کاربردی‌ترین زمینه تحقیقاتی آتی می‌تواند محاسبه قیمت‌های سایه برای پنجره‌های زمانی و تحلیل حساسیت در تعیین آنها در هر زنجیره تأمین باشد. چرا که در هنگام تنظیم قراردادها بسیار حیاتی خواهد بود که طرفین قرارداد بدانند، در صورت جابجا کردن پنجره زمانی چه هزینه‌ها و چه فرصت‌هایی برای آنها بالقوه خواهد بود.

پی‌نوشت

1. Memetic Algorithm
2. Linear Relaxation
3. Genetic Algorithm
4. Vehicle Routing
5. Milk run
6. Inventory Routing
7. Branch-And-Price
8. Master Problem and Pricing Problem
9. Chance Constrained Programming
10. Milk Run
11. In-transit Merge Network
12. Evolutionary Algorithm
13. problem-specific solver
14. partial exact (sub-optimum)
15. Linear Relaxation
16. Integer

- [21] Salani M, Vacca I. Branch and price for the vehicle routing problem with discrete split deliveries and time windows, *European Journal of Operational Research*, (2011), Vol. 213, pp. 470-477.
- [22] Zachariadis EE, Tarantilis CD, Kiranoudis CT. Designing vehicle routes for a mix of different request types, under time windows and loading constraints, *European Journal of Operational Research*, (2013), Vol. 229, pp. 303-317.
- [23] Chen YY. Fuzzy flexible delivery and pickup problem with time windows, *Procedia Computer Science*, (2013), Vol. 17, pp. 379-386.
- [24] Chopra S, Meindl P. *Supply Chain Management: Strategy, Planning, & Operation*, 3rd edi, New Jersey, Prentice Hall, Chap. 4, (2007).
- [25] Krasnogor N, Aragon A, Pacheco J. Memetic Algorithms, In: *Metaheuristic Procedures For Training Neural Networks*, Edited by: Enrique Alba and Rafael Marti, Springer Science, New York, USA, (2006).
- [26] Moscato P, Cotta C. A gentle introduction to memetic algorithms, in: F. Glover and G.A. Kochenberger, *Handbook of Metaheuristics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, (2003).
- Production Research, (1977), Vol. 15, pp. 553-564.
- [10] Wang W, Fung RYK, Chai Y. Approach of just-in-time distribution requirements planning for supply chain management, *International Journal of Production Economics*, (2003), Vol. 91, pp. 101-107.
- [11] Solomon MM, Desrosiers J. Time window constrained routing and scheduling problems: a survey, *Transportation Science*, (1988), Vol. 22, pp. 1-13.
- [12] Lee CY, Cetinkaya S, Albert PM Wagelmans. A dynamic lot-sizing model with demand time windows, *Mgmt Sci*, (2001), Vol. 47, No. 10, pp 1384-1395.
- [13] Burns LD, Hall RW, Blemen field DE, Daganzo CF. Distribution strategies that minimize transportation and inventory costs. *Operations Research*, (1985), Vol. 33, No. 3, pp. 469-490.
- [14] Hall RW. Dependence between shipment size and mode in freight transportation, *Transportation Science*, (1985), Vol. 19, No. 4, pp. 436-444.
- [15] Sheffi Y. Some analytical problems in logistics research, *Transportation Research Part A: General*, (1985), Vol. 19, Nos. 5-6, pp. 402-405.
- [16] Bushuev MA, Guiffrida AL. Optimal position of supply chain delivery window: concepts and general condition, *International Journal of Production Economics*, (2012), Vol. 137, pp. 226-234.
- [17] Wang HF, Chen YY. A genetic algorithm for the simultaneous delivery and pickup problems with time window, *Computers & Industrial Engineering*, (2012), Vol. 62, pp. 84-95.
- [18] Wang HF, Chen YY. A coevolutionary algorithm for the flexible delivery and pickup problem with time windows, *International Journal of Production Economics*, (2013), Vol. 141, pp. 4-13.
- [19] Lu CC, Yu VF. Data envelopment analysis for evaluating the efficiency of genetic algorithms on solving the vehicle routing problem with soft time windows, *Computers & Industrial Engineering*, (2012), Vol. 63, pp. 520-529.
- [20] Gutiérrez-Jarpa G, Desaulniers G, Laporte G, Marianov V. A branch-and-price algorithm for the vehicle routing problem with deliveries, selective pickups and time windows, *European Journal of Operational Research*, (2010), Vol. 206, pp. 341-349.