چشم‌انداز مدیریت صنعتی
سال دهم، شماره ۳۹، پاییز ۱۳۹۹
شاپا چاپی: ۹۸۷۴-۲۲۵۱، شاپا الکترونیکی: ۴۱۶۵-۲۶۴۵
ص‌ص ۵۲ – ۲۹

ارائه یک مدل بهینه برای مسئله زمان‌بندی زنجیره تأمین حلقه‌بسته

محمد رستمی*

چکیده

در جهان پیچیده امروزی و به‌منظور افزایش رقابت‌پذیری، توجه برنامه‌ریزان در بخش سیستم‌های تولیدی به مقوله توزیع محصولات و جمع‌آوری محصولات استفاده‌شده افزایش یافته است. در این پژوهش، مسئله زمان‌بندی زنجیره تأمین حلقه‌بسته برای نخستین بار بررسی می‌شود. یک مدل جامع و یکپارچه در خصوص زمان‌بندی تولید محصولات، ارسال بسته‌ای آن‌ها به مشتریان توسط وسایل حمل‌ونقل با ظرفیت محدود و جمع‌آوری محصولات استفاده‌شده از محل مشتریان و بازگرداندن آن‌ها به محل کارخانه برای انجام فرآیند بازیافت ارائه می‌شود. هدف این مسئله، کمینه‌کردن حداکثر زمان تأخیر در تحویل محصولات است. با توجه به NP-hardبودن مسئله، برای حل مسائل بزرگ یک الگوریتم ژنتیک ارائه می‌شود که قادر است جواب‌هایی نزدیک به جواب بهینه ایجاد کند. برای بیان میزان اهمیت مسئله موردبررسی در این پژوهش، یک مطالعه موردی مربوط به زنجیره تأمین روغن‌موتور ارائه می‌شود.

کلیدواژه‌ها: زمان‌بندی؛ زنجیره تأمین حلقه‌بسته؛ بیشترین تأخیر؛ مدل برنامه‌ریزی خطی؛ الگوریتم ژنتیک.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۰۵، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۰۲.

* استادیار، دانشگاه صنعتی شاهرود (نویسنده مسئول).

E-mail: Rostami_m@shahroodut.ac.ir

۱. مقدمه

با رشد جوامع و انقلاب صنعتی چهارم، صنایع تولیدی نیز با رشد زیادی مواجه شده‌اند و رقابت در زمینه تولید و فروش محصولات بسیار پیچیده‌تر شده است. به همین دلیل صنایع تولیدی به‌دنبال ایجاد مزیت‌های رقابتی به‌منظور توسعه بازار خود هستند. یکی از سازوکارهای توسعه سهم بازار در صنعت، یکپارچگی زنجیره تأمین و توزیع است که سبب شده است شرکت-های تولیدکننده به سمت استقرار سیستم‌های پخش مویرگی و همچنین ایجاد فروشگاه‌های منطقه‌ای برای خدمات‌رسانی به مصرف‌کنندگان نهایی بروند.

یکپارچگی تولید و توزیع سبب می‌شود تا نخست، مجموع کل هزینه‌های زنجیره تأمین کاهش یابد [۲۱] که درنتیجه به کاهش بهای تمام‌شده محصولات منجر می‌شود و دوم، کنترل و نظارت بر شبکه فروش محصولات توسط تولیدکننده بیشتر شود که افزایش سطح رضایت مشتریان و مصرف‌کنندگان نهایی را به‌دنبال دارد. به همین دلیل توسعه شبکه پخش مویرگی، اصلی‌ترین ابزار در توزیع محصولات توسط یک تولیدکننده در سال‌های اخیر موردتوجه صنعت‌گران در بخش کالاهای مصرفی بوده است. از نمونه‌های بازر استقرار شبکه توزیع مویرگی توسط تولیدکننده در ایران می‌توان به «گروه صنعتی گلرنگ»، «فرآورده‌های لبنی کاله» و «شرکت نفت سپاهان» اشاره کرد که علاوه بر توزیع محصولات خود از طریق شبکه توزیع بنک‌داری، اقدام به پخش مویرگی محصولات خود به خرده‌فروشان کرده‌اند. پخش مویرگی به سیستمی گفته می‌شود که در آن تولیدکننده با استفاده از وسایل حمل‌ونقل محصولات خود را از محل کارخانه مستقیماً به دست خرده‌فروشان و یا مصرف‌کننده نهایی می‌رساند و از این طریق لایه عمده‌فروشی را از شبکه توزیع حذف می‌کند. در مبانی نظری موضوع، مسئله توزیع محصولات توسط وسایل حمل‌ونقل تحت عنوان «مسئله مسیریابی وسایل نقلیه»[1] (VRP) شناسایی می‌شود.

با افزایش تقاضای کالاهای مصرفی، حجم محصولات منقضی‌شده[2] (EOL) نیز افزایش یافته است. در زنجیره‌های تأمین سنتی، توجه کافی به محصولات EOL صورت نمی‌گیرد که این امر از یک سو سبب ازدست‌رفتن کسب ارزش‌افزوده بیشتر توسط تولیدکنندگان می‌شود و از سوی دیگر تأثیرات مخرب‌زیستی نیز بر جای می‌گذارد. لجستیک معکوس به‌کارگرفته شده در زنجیره تأمین حلقه‌بسته[3] می‌تواند پاسخ مناسبی برای جمع‌آوری و استفاده مجدد از محصولات EOL باشد. بدین‌ترتیب با کمک محصولات EOL به‌عنوان بخشی از فرآیند تولید مجدد محصولات، می‌توان بهای تمام‌شده تولید محصول را کاهش داد و از این طریق مزیت رقابتی

1. Vehicle Routing Problem
2. End-Of-Life
3. Closed loop supply chain

برای سازمان ایجاد کرد. فرآیند جمع‌آوری محصولات EOL (اگر در محل خرده‌فروشان موجود باشند) در مبانی نظری مسائل VRP به‌عنوان «مسائل مسیریابی وسایل نقلیه به‌همراه ارسال و برداشت»[1] (VRPDP) شناخته می‌شوند. در این نوع از مسائل، وسایل حمل‌کننده محصولات به محل مشتریان، پس از تخلیه این محصولات، اقدام به جمع‌آوری محصولات EOL موجود در محل مشتری می‌کنند. باید توجه شود که با درنظرگرفتن محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه، ممکن است نتوان تمامی محصولات EOL موجود در محل مشتری را برداشت کرد و از این نظر برنامه‌ریزی مسئله VRPDP دارای اهمیت بوده و پیچیده است.

تولیدکنندگانی که اقدام به توزیع محصولات خود از طریق سیستم پخش مویرگی می‌کنند، باید به مسئله زمان‌بندی تولید و مسئله توزیع محصولات و جمع‌آوری محصولات EOL به‌صورت هم‌زمان توجه کنند. مسئله یکپارچگی تصمیم‌گیری در زمان‌بندی تولید محصولات و ارسال بسته‌ای[2] آن‌ها به مشتریان بدون توجه به مسیریابی وسایل نقلیه، به‌عنوان «مسئله زمان‌بندی زنجیره تأمین»[3] (SCSP) شناخته می‌شود که برای نخستین توسط هال و پات[4] (۲۰۰۳) ارائه شد [۱۰]. این مسئله برنامه‌ریزی هم‌زمان تولید محصولات سفارش‌داده‌شده و تخصیص آن‌ها به وسایل نقلیه را انجام می‌دهد و به نحوه توزیع آن‌ها به مشتریان از طریق مسیریابی مناسب وسایل نقلیه نمی‌پردازد.

اگرچه پس از آن‌ها، پژوهش‌های زیادی در خصوص زمان‌بندی زنجیره تأمین و همچنین درنظرگرفتن مسائل مسیریابی وسایل نقلیه در کنار این مسئله صورت گرفته است؛ اما طبق دانش موجود تاکنون مسئله زمان‌بندی زنجیره تأمین حلقه‌بسته که در آن علاوه بر زمان‌بندی تولید، تخصیص محصولات تولیدشده به وسایل نقلیه و مسیریابی وسایل نقلیه برای توزیع محصولات، به نحوه جمع‌آوری محصولات EOL از محل مشتریان نیز پرداخته شود، موردتوجه پژوهشگران قرار نگرفته است؛ بنابراین نوآوری‌های این پژوهش شامل موارد زیر است:

ـ درنظرگرفتن جمع‌آوری محصولات EOL در ضمن تولید و ارسال محصولات سفارش‌داده‌شده توسط مشتریان به‌وسیله سیستم ارسال بسته‌ای برای نخستین بار در مبانی نظری موضوع؛

ـ ارائه دو ویژگی ساختاری مهم مسئله موردبررسی که سبب ساده‌سازی مدل‌سازی و حل مسئله می‌شود؛

ـ ارائه یک مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح برای حل بهینه مسئله؛

ـ اعتباردهی به مدل ارائه‌شده از طریق حل یک مسئله واقعی (مطالعه موردی در صنعت روانکارها)؛

1. Vehicle routing problem with deliveries and pickups
2. Batch delivery
3. Supply Chain Scheduling Problem
4. Hall and Potts

ـ به‌کارگیری یک الگوریتم ژنتیک برای حل مسائل با ابعاد بزرگ؛

در بخش دوم شرح کاملی از مبانی نظری موضوع ارائه شده و خلأ موجود در این حوزه شناسایی می‌شود؛ سپس در بخش سوم، ضمن تعریف مسئله موردبررسی در این پژوهش، ویژگی‌های ساختاری مهم این مسئله معرفی خواهد شد. در ادامه با کمک این ویژگی‌ها یک مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط[1] (MILP) برای مسئله توسعه داده می‌شود؛ همچنین برای حل مسائل با ابعاد بزرگ، یک الگوریتم ژنتیک[2] (GA) ارائه می‌شود که قادر است جواب‌های نزدیک به بهینه را به‌دست بیاورد. در بخش چهارم به‌منظور نشان‌دادن کاربردی‌بودن مسئله، یک مطالعه موردی در زنجیره تأمین روغن‌موتور ارائه می‌شود که با استفاده از مدل ارائه-شده قابل‌حل است. برای ارزیابی GA ارائه‌شده نیز تعدادی مسائل تصادفی تولید شده و توسط روش‌های ارائه‌شده در این پژوهش حل می‌شوند. در بخش پنجم به ارائه نتایج و دستاوردهای پژوهش و موضوع‌های پیشنهادی برای مطالعات آتی پرداخته خواهد شد.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مسئله زمان‌بندی زنجیره تأمین برای نخستین بار توسط هال و پات (۲۰۰۳) ارائه شد [۱۰]. این مسئله به‌دنبال بهینه‌سازی هم‌زمان زمان‌بندی تولید محصولات در تولیدکننده و هزینه‌های ارسال بسته‌ای این محصولات برای مشتریان است. آن‌ها در پژوهش خود مسائل مختلف با اهداف مختلف را از جنبه سختی حل موردبررسی قرار دادند و برای حل برخی از این مسائل از برنامه‌ریزی پویا استفاده کردند. پس از آن‌ها پژوهش‌های زیادی در خصوص یکپارچگی تصمیم‌گیری زمان‌بندی تولید و ارسال بسته‌ای کارها صورت گرفت. از آن جمله می‌توان به پژوهش مزده و همکاران (۲۰۱۱) اشاره کرد که مسئله زمان‌بندی یک‌ماشینه به‌همراه ارسال بسته‌ای با هدف کمینه‌کردن مجموع وزنی زمان جریان[3] در کنار هزینه‌های ارسال بسته‌ای را بررسی کردند [۲۰]. یین[4] و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی مسئله زمان‌بندی زنجیره تأمین با درنظرگرفتن پنجره زمانی تحویل مشترک قابل‌تخصیص[5] پرداختند [۲۷]. همچنین می‌توان به پژوهش‌های مزده و رستمی (۲۰۱۴) و کاظمی و همکاران (۲۰۱۷) اشاره کرد که در آن‌ها مسئله زمان‌بندی زنجیره تأمین در محیط تولید کارگاهی[6] بررسی شده است [۱۹و۱۴]. کونگ[7] و همکاران (۲۰۱۹)، این مسئله در محیط غیرقطعی بررسی کرده‌اند [۱۶]. پژوهش‌های بسیاری نیز

1. Mixed Integer Linear Programming
2. Genetic Algorithm
3. Sum of weighted flow time
4. Yin
5. Assignable common due window
6. Flow shop environment
7. Kong

در این حوزه تاکنون صورت گرفته است که به‌دلیل محدودیت مقاله به آن اشاره نشده است؛ اما هیچ‌یک از آن‌ها در سیستم ارسال بسته‌ای خود به ظرفیت وسایل نقلیه و همچنین تأثیر مسیریابی آن‌ها بر زمان رسید محصولات به دست مشتریان توجه نکرده‌اند. با درنظرگرفتن مسئله مسیریابی وسایل نقلیه در مسئله زمان‌بندی زنجیره تأمین تاکنون پژوهش‌های کمی منتشر شده است. لی[1] و همکاران (۲۰۱۶)، مسئله زمان‌بندی تولید بر روی یک ماشین و ارسال بسته‌ای سفارش‌های تولیدشده به مشتریان توسط چندین وسیله نقلیه را بررسی کردند [۱۷]. سیستم توزیع محصولات تولیدشده در این پژوهش بر اساس مسئله مسریابی وسایل نقلیه صورت گرفت. آن‌ها برای حل مسئله خود از یک الگوریتم ژنتیک غیرمغلوب به‌همراه استراتژی نخبه-گرایی[2] استفاده کردند. دواپریا[3] و همکاران (۲۰۱۷)، مسئله‌ای مشابه را برای زمان‌بندی زنجیره تأمین محصولات فسادپذیر و توزیع آن‌ها توسط وسایل حمل سنگین[4] توسعه دادند. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی عددصحیح و روش‌های ابتکاری جهت حل این مسئله ارائه کردند [۶]. سجادی و همکاران (۲۰۱۶)، به‌طور هم‌زمان به مسائل زمان‌بندی وظایف تولید و ارسال وسایل نقلیه هدایت خودکار در یک سیستم تولید انعطاف‌پذیر پرداختند و با کمک الگوریتم ژنتیک این مسائل را حل کردند [۲۴].

فو[5] و همکاران (۲۰۱۷)، مسئله یکپارچه زمان‌بندی تولید و مسیریابی وسایل نقلیه را در حالتی که انقطاع کارها مجاز است، ولی دارای محدودیت پنجره زمانی است، بررسی کردند. آن‌ها یک روش ابتکاری دومرحله‌ای برای حل مسائل خود ارائه دادند [۸]. ژو[6] و همکاران (۲۰۱۸)، مسئله یکپارچه زمان‌بندی تولید و مسیریابی وسایل نقلیه را با هدف حداقل‌کردن بیشترین زمان ارسال سفارش‌ها[7] موردبررسی قرار دادند و برای حل آن از یک الگوریتم ژنتیک استفاده کردند [۲۸]. قرایی و جولای (۲۰۲۰)، مسئله یکپارچه زمان‌بندی تولید و مسیریابی وسایل نقلیه را در شرایط زنجیره تأمین چندعامله توسعه دادند و برای آن دو روش ابتکاری بر اساس تجزیه ارائه کردند [۹]. براساس دانش موجود، مسئله زمان‌بندی زنجیره تأمین حلقه‌بسته تاکنون توسط پژوهشگران موردتوجه قرار نگرفته است. در این مسئله، یکپارچگی زمان‌بندی تولید و مسئله مسیریابی وسایل حمل با برداشت و ارسال مدنظر است. زنجیره‌های تأمین حلقه‌بسته، شبکه‌های زنجیره تأمینی هستند که فرآیند بازگشت محصولات و تولید مجدد را شامل می‌شوند و

1. Li
2. non-dominated genetic algorithm with the elite strategy
3. Devapriya
4. trucks
5. Fu
6. Zou
7. order delivery time

تولیدکننده از طریق آن‌ها به‌دنبال کسب ارزش‌افزوده بیشتر و یکپارچگی کامل اجزای زنجیره تأمین است [۴].

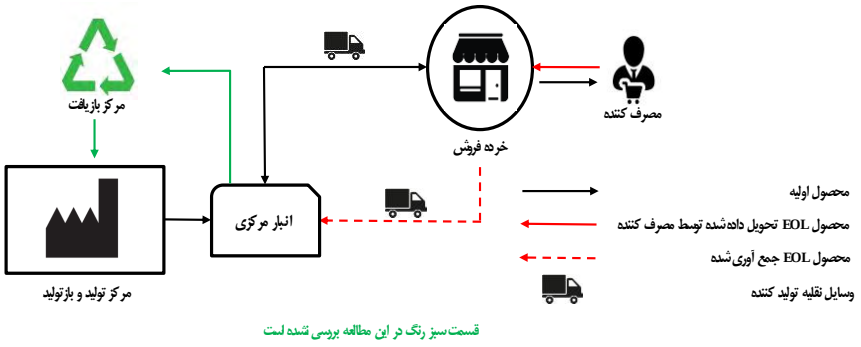
درخصوص زنجیره‌های تأمین حلقه‌بسته تاکنون پژوهش‌های زیادی صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به پژوهش‌های ساواشکان[1] و همکاران (۲۰۰۴)، پایدار و همکاران (۲۰۱۷)، آتاسو[2] و همکاران (۲۰۰۸)، کیوان شکوه و همکاران (۲۰۱۶)، تقی‌زاده و سلمانی زارچی (۲۰۲۰)، حیدری و همکاران (۲۰۱۷) و حسنف[3] و همکاران (۲۰۱۹) اشاره کرد که همگی آن‌ها بدون توجه به مسئله زمان‌بندی تولید در زنجیره تأمین انجام شده‌اند [۲۵،۲۲،۲،۱۵،۲۶،۱۲،۱۱].

۳. روش‌شناسی پژوهش

تعریف مسئله. یک زنجیره تأمین حلقه‌بسته وجود دارد که در آن یک تولیدکننده با یک ماشین، N محصول سفارشی توسط M خرده فروش را تولید می‌کند و تمامی این سفارش‌ها در زمان صفر دردسترس هستند. وظیفه تأمین و توزیع محصولات سفارش داده‌شده خرده‌فروشان بر عهده تولیدکننده است. بر اساس میزان سطح موجودی و نرخ فروش هر محصول i در هر خرده‌فروش j، موعد تحویل خاصی تعریف می‌شود. تولیدکننده باید تا حد امکان محصولات را قبل از رسیدن به موعد تحویل به خرده‌فروشان تحویل دهد. این خرده‌فروشان در نقاط مختلف جغرافیایی و با فواصل مشخص از محل تولیدکننده حضور دارند. این کار در قالب یک سیستم ارسال بسته‌ای و توسط K وسیله حمل‌ونقل صورت می‌گیرد که دارای ظرفیت محدود هستند. این وسایل باید هر خرده‌فروش را یک و فقط یکبار ملاقات کنند و کل تقاضای آن را تحویل دهند؛ همچنین در زمان ملاقات و بر اساس ظرفیت خالی وسیله، باید تمام محصولات کارکرده توسط این وسایل نقلیه جمع‌آوری شود تا درنهایت به محل تولیدکننده بازگردادنده شده و فرآیند تولید مجدد استفاده شود. باید توجه کرد که فرض بر این است محصولات کارکرده از نظر تنوع با یکدیگر تفاوت ندارند و بنابراین یک نوع محصول EOL در این زنجیره وجود دارد. هدف این مسئله کمینه‌کردن بیشترین زمان تأخیر[4] است؛ زیرا تولیدکننده به دنبال ایجاد توازن در توزیع و کسب حداکثری رضایت خرده‌فروشان است. برای شناسایی بهتر این زنجیره، شکل ۱، ساختار شماتیک زنجیره تأمین حلقه‌بسته مدنظر در این پژوهش را نشان می‌دهد.

پرتال جامع علوم انسانی

1. Savaskan
2. Atasu
3. Hasanov
4. Maximum tardiness



شکل ۱. ساختار شماتیک مربوط به CLSC

مدل بالا به دنبال تصمیم‌گیری یکپارچه زمان‌بندی تولید محصولات، ارسال این محصولات به مشتریان از طریق سیستم پخش و با کمک وسایل حمل‌ونقل با ظرفیت محدود و همچنین جمع‌آوری محصولات کارکرده از مشتریان و بازگرداندن آن‌ها به محل کارخانه برای انجام فعالیت‌های بعدی (بازیافت و استفاده مجدد در فرآیند تولید روغن‌موتور) است. بایستی توجه شود فرآیند بازیافت و استفاده مجدد در خط تولید در این پژوهش موردتوجه قرار نگرفته است.

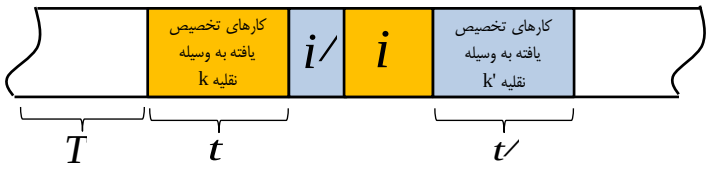
تمامی مفروضات بالا از یک مثال واقعی در یک زنجیره تأمین حلقه‌بسته روغن‌موتور مستخرج شده است که داده‌های مربوط به آن در بخش چهارم ارائه می‌شود. آموریم[1] و همکاران (۲۰۱۳) اثبات کرده‌اند که مسئله برنامه‌ریزی در سطح عملیاتی تولید و توزیع که در آن توزیع به شکل مسیریابی وسایل نقلیه انجام شود، NP-hard است [۱]؛ بنابراین مسئله موردبررسی در این پژوهش که به آن فرض تحویل و برداشت هم‌زمان نیز اضافه شده است، NP-hard محسوب می‌شود.

ویژگی‌های ساختاری مسئله. در این بخش دو ویژگی ساختاری مهم مسئله موردبررسی در این پژوهش بیان می‌شود که می‌تواند به ساده‌سازی مدل‌سازی و حل این مسئله کمک کند.

گزاره ۱: در زمان‌بندی بهینه مسئله، تمامی کارهای تخصیص‌یافته به هر وسیله نقلیه به‌صورت متوالی و بدون فاصله پردازش می‌شوند.

اثبات. از طریق برهان خلف. فرض کنید توالی S (شکل ۲)، زمان‌بندی بهینه مسئله باشد که در آن کار i' متعلق به ماشین k' قبل از آخرین کار متعلق به ماشین k (یعنی کار i) پردازش شود (در شرایطی که $k' \neq k$).

1. Amorim



شکل ۲. توالی S

حال توالی $S/$ را در نظر بگیرید که در آن کارهای i و $i/$ جابه‌جا شده‌اند. درصورتی‌که p_n نمایانگر زمان پردازش کار n و ST_m نمایانگر زمان آماده به ارسال وسیله حمل m باشد:

$$For\ S\circ\ \ ST_k^s \cong T\ .\ t\ .\ p_{i/}\ .\ p_i$$

$$ST_{k/}^s \cong T\ .\ t\ .\ p_{i/}\ .\ p_i\ .\ t/$$

$$For\ S/\circ\ \ ST_k^{s/} \cong T\ .\ t\ .\ p_i$$

$$ST_{k/}^{s/} \cong T\ .\ t\ .\ p_i\ .\ p_{i/}\ .\ t/$$

$$Thus\ \Diamond \begin{cases} ST_k^s\ \mathrm{A}ST_k^{s/} \\ ST_{k/}^s \cong ST_{k/}^{s/} \end{cases}$$

درنتیجه با مشاهده تناقض، درست‌بودن گزاره اثبات می‌شود.

گزاره ۲: با توجه به نتایج گزاره ۱، توالی عملیات تولید محصولاتی که به یک وسیله نقلیه تخصیص می‌یابد، تأثیری بر زمان آماده به ارسال آن وسیله نقلیه ندارد.

اثبات. با توجه به نتایج گزاره ۱، بین توالی تولید کارهایی که به یک وسیله نقلیه تخصیص یافته‌اند، کاری از وسیله نقلیه دیگر قرار ندارد. از طرفی هر وسیله نقلیه زمانی می‌تواند به سمت خرده‌فروشان حرکت کند که عملیات تولید تمامی کارهای تخصیص‌یافته به آن به اتمام رسیده باشد. واضح است که زمان تکمیل آخرین کار تخصیص‌یافته به وسیله نقلیه بی‌تأثیر از توالی کارهای قبل از آن است که به آن وسیله نقلیه تخصیص یافته و پردازش شده‌اند.

مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط (MILP). در این بخش یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح ارائه می‌شود که قادر است جواب بهینه مسائل با ابعاد کوچک را به‌دست آورد. جدول ۱، پارامترها و متغیرهای تصمیم مدل توسعه‌داده‌شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱. پارامترها و متغیرهای تصمیم مسئله

حوزه	نشانه	توضیحات
مجموعه‌ها	K	مجموعه وسایل نقلیه
	V	مجموعه خرده‌فروشان
	V_0	مجموعه خرده‌فروشان به همراه انبار مرکزی (اندیس انبار معادل صفر است)
اندیس‌ها	i	اندیس کارها $(i=1,2,...,n_j)$
	j,j',h	اندیس خرده‌فروشان و انبار مرکزی $(j=0,1,...,M)$
	k	اندیس وسایل نقلیه $(k=1,2,...,K)$
پارامترها	n_j	تعداد سفارش خرده‌فروش j
	d_{ij}	موعد تحویل کار iام از خرده‌فروش jام
	$tt_{jj'}$	زمان سفر بین دو گره
	p_{ij}	زمان پردازش کار iام از خرده‌فروش jام
	V_{ij}	حجم فیزیکی سفارش iام از خرده‌فروش jام
	Q_k	ظرفیت وسیله نقلیه k
	P_j	حجم محصول EOL موجود در محل خرده‌فروش j
	M	یک عدد مثبت بسیار بزرگ
متغیرهای تصمیم	x_{ijk}	معادل ۱ می‌شود، اگر سفارش‌های خرده‌فروش j به وسیله نقلیه k تخصیص یابد.
	$y_{jj'k}$	معادل ۱ می‌شود، اگر وسیله نقلیه k مستقیماً از مشتری j' به محل مشتری j حرکت کند.
	u_j	متغیر مثبت کمکی
	$T_{\max}$	بیشترین زمان تأخیر
	AT_j	زمان رسیدن وسیله نقلیه به محل خرده‌فروش j
	ST_k	زمان شروع به حرکت وسیله نقلیه k از انبار مرکزی
	L_{jk}	ظرفیت اشغال‌شده وسیله نقلیه k وقتی که محل خرده‌فروش j را ترک می‌کند

بر اساس پارامترها و متغیرهای تصمیم تعریف‌شده در بالا و همچنین نتایج به‌دست‌آمده از گزاره‌های ۱ و ۲، مدل ریاضی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Min\ T_{\max} \qquad (۱)$$

S.t:

$$T_{\max} \propto AT_j\ 0\, d_{ij} \qquad \%i, \%j \angle V \qquad (۲)$$

$$AT_j \propto AT_{j'}\ .\ tt_{jj'}\ 0\, M\left[10\Big|_k\ y_{jj'k}\right] \qquad \%j, j' \angle V \qquad (۳)$$

$$AT_j \propto ST_k \cdot tt_{0j} \quad \forall k, \forall j \in V \tag{۴}$$

$$\begin{cases} ST_k \cong ST_{k01} \cdot \prod_{j \in V} \prod_{i} x_{ijk} p_{ij} & \forall k \\ ST_0 \cong 0 \end{cases} \tag{۵}$$

$$\sum_{k} x_{ijk} \cong 1 \qquad \forall i, \forall j \in V \tag{۶}$$

$$L_{0k} \cong \sum_{j \in V} \sum_{i} V_{ij} x_{ijk} \qquad \forall k \tag{۷}$$

$$L_{jk} \propto Q_k \qquad \forall k, \forall j \in V_0 \tag{۸}$$

$$\begin{cases} L_{jk} \propto L_{0k} - \sum_{i} V_{ij} + P_j \quad \forall k, \forall j \in V \\ L_{jk} \propto L_{j'k} - \sum_{i} V_{ij} + P_j \quad \forall k, \forall j', j \in V \end{cases} \tag{۹}$$

$$\begin{cases} \sum_{j' \in V_0} \sum_{k} y_{j'jk} \cong 1 & \forall j \in V \\ \sum_{j' \in V} y_{j'0k} \cong 1 & \forall k \end{cases} \tag{۱۰}$$

$$\sum_{j' \in V_0} y_{j'jk} \cong \sum_{i} x_{ijk} \qquad \forall k, \forall j \in V \tag{۱۱}$$

$$\begin{cases} u_j \propto u_{j'} + \sum_{i} V_{ij} \partial y_{j'jk} \quad \forall k, \forall j', j \in V \\ \sum_{i} V_{ij'} \propto u_{j'} \propto Q_k \cdot M \left[1 - \sum_{j} y_{jj'k} \right] \quad \forall k, \forall j' \in V \end{cases} \tag{۱۲}$$

$$\sum_{j' \in V_0} y_{j'hk} \cong \sum_{j \in V_0} y_{hjk} \qquad \forall k, \forall h \in V \tag{۱۳}$$

$$\sum_{j \in V} y_{0jk} \cong \sum_{j' \in V} y_{j'0k} \qquad \forall k \tag{۱۴}$$

$$x_{ijk}, y_{j'jk} \in \{0,1\}$$
$$T_{\max}, AT_j, ST_j, L_{jk}, u_j \propto 0 \tag{۱۵}$$

در روابط بالا تابع هدف ۱، به‌دنبال کمینه‌کردن بیشترین تأخیر است. محدودیت ۲، بیشترین تأخیر را محاسبه می‌کند که بر اساس زمان‌های رسیدن محصولات سفارش‌داده‌شده به محل خرده‌فروشان است. محدودیت ۳، زمان رسیدن محصول به خرده‌فروشانی را محاسبه می‌کند که وسیله نقلیه قبل از آن نیز در محل خرده‌فروش دیگر حضور داشته است. محدودیت ۴، زمان رسیدن محصول به خرده‌فروشانی را محاسبه می‌کند که وسیله نقلیه قبل از آن از انبار حرکت

کرده است. روابط ۵، به‌منظور محاسبه زمان شروع به حرکت وسایل نقلیه از انبار ارائه شده‌اند. رابطه ۶، این الزام را به‌وجود می‌آورد که هر کار از هر خرده‌فروش فقط به یک وسیله نقلیه تخصیص یابد. رابطه ۷، ظرفیت پرشده هر وسیله نقلیه را زمانی که از انبار خارج می‌شود، محاسبه می‌کند. محدودیت ۸، به‌منظور کنترل ظرفیت هر وسیله نقلیه زمانی که یک گره را ترک می‌کند، ارائه شده است. محدودیت‌های ۹، ظرفیت اشغال‌شده وسایل نقلیه را زمانی که یک خرده‌فروش را ترک می‌کنند، محاسبه می‌کند. محدودیت ۱۰، ملزم می‌کند هر مشتری فقط‌وفقط با یک وسیله نقلیه ملاقات شود و همچنین هر وسیله نقلیه درنهایت به انبار بازگردد. محدودیت ۱۱، ملزم می‌کند که مسیر بین خرده‌فروشان فقط برای وسایل حملی تشکیل شود که کارها به آن وسایل نقلیه تخصیص یافته باشد. محدودیت‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴، برای ایجاد مسیرهای منطقی و مسیربندی صحیح ارائه شده‌اند و مانع از ایجاد زیرتور[1] می‌شوند. درنهایت روابط ۱۵، متغیرهای تصمیم مسئله را تعریف می‌کنند.

الگوریتم ژنتیک توسعه‌یافته. حل مسائل بزرگ NP-hard با استفاده از روش‌های دقیق با توجه به آنکه زمان حل به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد، چندان به‌صرفه نیست؛ بنابراین پژوهشگران در این شرایط به سراغ روش‌های فراابتکاری می‌روند. روش‌های فراابتکاری بر مبنای رفتار طبیعت بنا شده‌اند. یکی از روش‌های معروف در این حوزه، «الگوریتم ژنتیک» است که نخستین بار توسط هولند[2] (۱۹۹۲) معرفی شد [۱۳]. این الگوریتم یک روش جمعیت‌محور بر مبنای فرآیند طبیعی انتخاب و تکامل است. پژوهش‌های بسیاری با به‌کارگیری این الگوریتم اقدام به حل مسائل خود کرده‌اند [۳، ۱۸، ۷].

در این الگوریتم یک جمعیت از کروموزوم‌ها (N_p) دائماً در حال بهبود هستند. ایجاد بهبود در ژن‌ها از طریق عملگرهای جهش و تقاطع رخ می‌دهد. در ابتدا از طریق فرآیند انتخاب دو–دویی نیمی از جمعیت برای عملگر تقاطع انتخاب می‌شوند. با انتخاب تصادفی هر زوج از کروموزوم‌ها و استفاده از عملگر تقاطع PMX (برای مطالعه جزئیات بیشتر به پژوهش [۵] مراجعه شود)، از هر زوج دو فرزند تولید می‌شود؛ سپس به میزان P_m % از فرزندان به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شند تا عمل جهش بر روی آن‌ها اتفاق بیفتد. فرآیند جهش به این صورت است که در هر کروموزوم انتخاب‌شده، دو ژن به‌صورت تصادفی انتخاب شده و مقادیر این ژن‌ها با یکدیگر جابه‌جا می‌شوند. درنهایت تمامی کروموزوم‌های تولیدشده به همراه جمعیت اضافه‌شده از مرحله قبل به‌وسیله تابع برازندگی موردارزیابی قرار می‌گیرند. ۹۰ درصد از اندازه جمعیت مرحله بعد از طریق فرآیند انتخاب چرخ رولت و ۱۰ درصد از جمعیت از طریق فرآیند نخبه‌گرایی انتخاب می‌شوند تا

1. Sub-tour
2. Holland

جمعیت نسل بعدی تولید شود. این فرآیند تا رسیدن به شرط توقف که در اینجا برابر با حداکثر تعداد تکرار مشخص‌شده $Iter_\max$ است، ادامه می‌یابد. شایان ذکر است که تابع برازش در این الگوریتم معادل تابع هدف مسئله موردبررسی است.

نوع نمایش جواب‌ها در این پژوهش به‌صورت ماتریس های سه‌سطری و Mستونی در نظر گرفته شده است که M نشان‌دهنده تعداد کل خرده‌فروشان است. سطر اول نمایانگر شماره وسیله نقلیه‌ای است که کارهای آن خرده‌فروش به آن تخصیص یافته است. سطر دوم نشان‌دهنده اولویت ملاقات خرده‌فروشان در هر تور است که دارای شماره‌هایی از ۱ تا M است. درنهایت سطر سوم، اعداد تصادفی غیریکسان بین ۱ تا M است که برای تعیین اولویت پردازش و ارسال کارهای تخصیص‌یافته به هر وسیله نقلیه استفاده می‌شود. برای این کار بدین صورت عمل می‌شود که به‌ازای هر وسیله نقلیه میانگین اعداد سطر سوم آن محاسبه می‌شود. وسیله‌ای برای پردازش کارها و ارسال در اولویت قرار می‌گیرد که میانگین اعداد سطر سوم آن کمتر باشد. در صورت مساوی‌بودن این میانگین برای دو وسیله نقلیه، وسیله‌ای در اولویت قرار می‌گیرد که شماره آن کوچک‌تر باشد. شکل ۳، نمونه یک کروموزوم برای مسئله‌ای با ۸ خرده‌فروش و ۳ وسیله نقلیه را نشان می‌دهد.

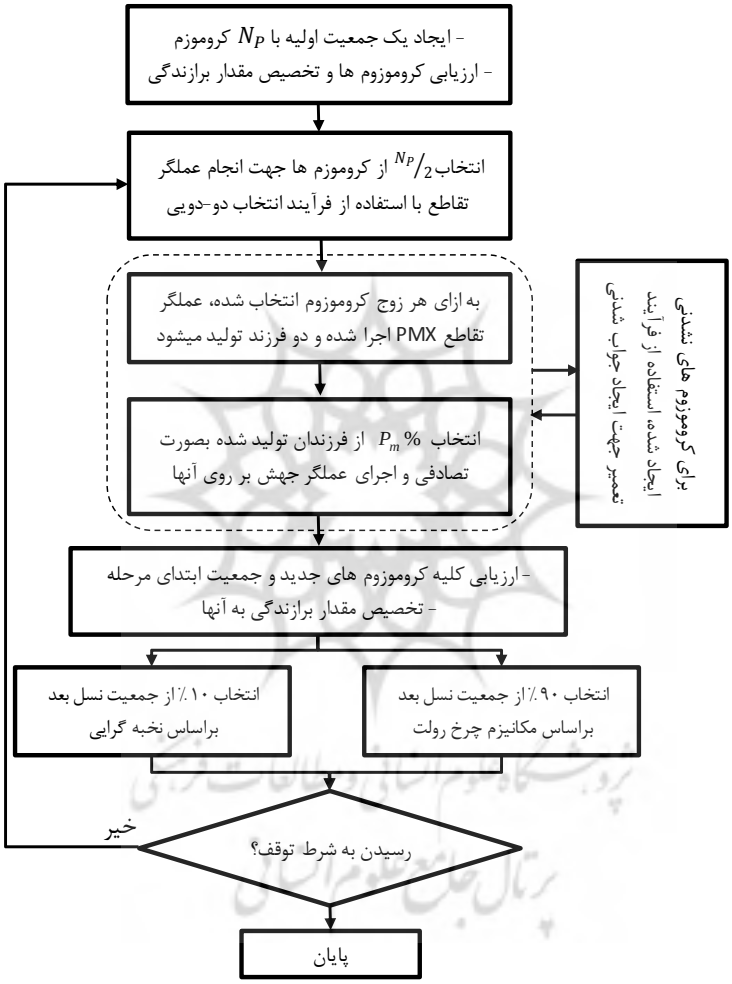
۳	۳	۲	۳	۱	۱	۳	۱
۵	۸	۱	۴	۲	۶	۷	۳
۴	۵	۷	۱	۶	۲	۳	۸

شکل ۳. نمونه کروموزوم تعریف‌شده

در شکل ۳، مشخص است که کارهای مربوط به خرده‌فروشان ۵، ۶ و ۸ به وسیله نقلیه ۱، کارهای مربوط به خرده‌فروش ۳ به وسیله نقلیه ۲ و سایر خرده‌فروشان به وسیله نقلیه ۳ تخصیص یافته‌اند. همچنین به‌عنوان نمونه وسیله نقلیه ۱ ابتدا خرده‌فروش ۵ را ملاقات کرده و سپس به‌ترتیب خرده‌فروشان ۸ و ۶ را ملاقات می‌کند و به انبار بازمی‌گردد. درنهایت کارهای تخصیص‌یافته به وسیله نقلیه ۳ در اولویت اول پردازش، سپس کارهای تخصیص یافته به وسیله نقلیه ۱ و کارهای تخصیص یافته به وسیله نقلیه ۲ در اولویت آخر پردازش قرار می‌گیرند. مقدار تابع هدف ۱، بر اساس تور ملاقات خرده‌فروشان و زمان رسید به هر خرده‌فروش و با کمک مقادیر موعدهای تحویل قابل‌محاسبه است. باید توجه شود که توالی پردازش کارهای خرده‌فروشان بر اساس نتایج گزاره‌های ۱ و ۲، قابل‌مشخص‌شدن هستند؛ همچنین به‌دلیل محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه، ممکن است پس از اجرای عملگرهای بالا، کروموزوم‌های نشدنی ایجاد شود که برای رفع آن‌ها از فرآیند تعمیر به‌صورت زیر استفاده می‌شود:

ـ وسیله نقلیه‌ای که محدودیت ظرفیت آن نقض شده است را انتخاب کنید؛
ـ کلیه کارهای آخرین خرده‌فروشی که قرار است توسط آن وسیله ملاقات شود را به وسیله‌ای که کمترین درصد اشغال ظرفیت را دارد (به‌شرط داشتن ظرفیت خالی)، تخصیص دهید؛
ـ این فرآیند را تا جایی ادامه دهید که محدودیت ظرفیت کلیه وسایل نقلیه رعایت شود.

در صورتی که پس از عملگر تقاطع شماره‌های اولویت (سطر دوم کرموزوم) مشابه برای ملاقات‌های یک وسیله نقلیه به‌وجود آید، اولویت ملاقات با خرده‌فروش با شماره کوچک‌تر است. برای درک بهتر الگوریتم ژنتیک توسعه‌داده‌شده، شکل ۴، فلوچارت آن را نشان می‌دهد.



شکل ۴. فلوچارت الگوریتم ژنتیک توسعه‌داده‌شده

٤. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

در این بخش برای ارزیابی مدل ارائه‌شده در این پژوهش، ابتدا یک مطالعه موردی در شبکه زنجیره تأمین روغن‌موتور ارائه می‌شود. سپس جهت ارزیابی عملکرد روش فراابتکاری، تعدادی مسائل تصادفی در ابعاد مختلف تولید شده و توسط الگوریتم حل می‌گردد. مدل ریاضی در نرم‌افزار GAMS کد و توسط سالور CPLEX در کامپیوتری با مشخصات پردازنده Intel Core i7 حل گردید. همچنین GA ارائه شده توسط زبان #C کد و در همان کامپیوتر اجرا شده است.

مطالعه موردی: زنجیره تأمین حلقه‌بسته روغن‌موتور. شرکت «اوجان شیمی» واقع در آذرشهر تبریز، فعالیت تولید، آماده‌سازی و تحویل محصولات اسپیدی به خرده‌فروشان در استان آذربایجان شرقی و شهرهای هم‌جوار این استان را بر عهده دارد. در اینجا اطلاعات مستخرج‌شده از یک هفته کاری این شرکت برای ارزیابی مدل ارائه‌شده در این پژوهش ارائه می‌شود.

بر اساس اطلاعات، در ابتدای هفته سفارش‌های درخواستی ۱۵ خرده‌فروش به‌ازای محصولات مختلف (۴۲ سفارش) و با موعد تحویل‌های مشخص‌شده وصول شده است. با توجه به ماهیت فروش محلی، باید محصولات درخواست‌شده خرده‌فروشان در کارتن‌هایی مخصوص آن خرده‌فروش (برچسب کارتن‌ها ویژه هر مشتری و متفاوت با سایر مشتریان است) و به‌صورت پالت‌بندی شده تحویل داده شوند که برای انجام این فعالیت‌ها یک ایستگاه کاری در شرکت وجود دارد که در هر زمان می‌تواند فقط یک محصول را پردازش کند. باید توجه شود که سیستم تولیدی این شرکت مونتاژ بر اساس سفارش[1] (ATO) است؛ به این صورت که محصولات با مشخصات کیفی معین در ظروف یکسان قبل از دریافت سفارش پر شده و در انبار نگهداری می‌شوند. بسته‌بندی نهایی بر اساس سفارش خرده‌فروشان در کارتن‌های ویژه آن خرده‌فروش صورت می‌پذیرد و محصولات پالت‌بندی شده و سپس ارسال می‌شوند.

این شرکت برای توزیع سفارش‌ها ۲ وسیله حمل هر یک با ظرفیت ۳۵۰۰ لیتر انواع روغن‌موتور دارد که باید محصولات را به محل خرده‌فروش برسانند؛ همچنین با توجه به حجم روغن‌موتور کارکرده تجمیع‌شده در محل خرده‌فروشان و ظرفیت خالی وسایل حمل، پس از تحویل محصولات به خرده‌فروش اقدام به جمع‌آوری روغن‌های کارکرده می‌شود. جدول‌های ۲ و ۳، اطلاعات مربوط به زمان‌های پردازش، موعدهای تحویل، حجم سفارش‌ها و همچنین حجم روغن کارکرده در محل خرده‌فروشان و مشخصات جغرافیایی خرده‌فروشان را نشان می‌دهند. با توجه به مشخصات جغرافیایی خرده‌فروشان و مشخصات محل کارخانه که در آذرشهر واقع است (عرض جغرافیایی: ۳۷,۷۴۶۴۴۴ و طول جغرافیایی: ۴۵,۹۷۸۸۱۲)، فواصل هر دو گره دلخواه بر

1. Assemble to Order

حسب کیلومتر قابل‌محاسبه است. داده‌های گذشته نشان می‌دهد که وسایل نقلیه به‌صورت میانگین با سرعت ۴۰ کیلومتر بر ساعت حرکت می‌کنند و از طرفی میانگین زمان تخلیه و بارگیری در هر گره معادل ۳۰ دقیقه است؛ بنابراین فواصل زمانی بین هر دو گره قابل‌محاسبه است.

جدول ۲. قسمت اول داده‌های ورودی مطالعه موردی

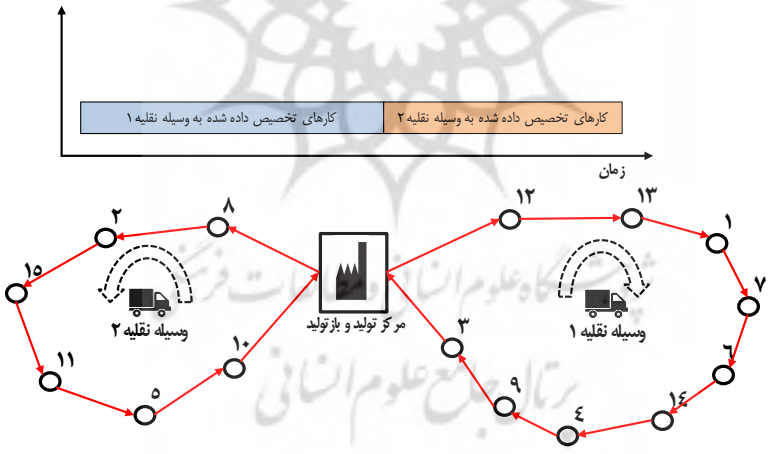
خرده‌فروش	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	مقدار روغن کارکرده خرده‌فروش (لیتر)	تعداد سفارش	حجم سفارش (لیتر)			
					سفارش ۱	سفارش ۲	سفارش ۳	سفارش ٤
۱	۳۷,۹۳۸۸۸	۴۶,۱۳۴۱۶۳	۵۴۱	۲	۲۰۰	۲۲۰		
۲	۳۸,۰۳۳۷۸	۴۶,۱۶۳۲۹۵	۲۹۶	۳	۱۶۰	۱۲۰	۶۰	
۳	۳۸,۰۴۶۲۲	۴۶,۳۰۷۱۴۲	۶۳۳	۲	۲۸۰	۲۰۸		
۴	۳۸,۲۷۱۴۱	۴۵,۹۷۹۷۵۷	۴۵۲	۲	۲۲۰	۸۰		
۵	۳۸,۴۳۳۵۱	۴۵,۷۸۲۲۸۷	۷۴۸	۴	۲۲۰	۳۰۰	۱۲۰	۱۶۰
۶	۳۸,۹۴۱۹	۴۵,۶۳۵۰۵۱	۱۸۶	۱	۱۸۰			
۷	۳۹,۳۰۶۰۷	۴۴,۴۶۵۴۶۶	۱۶۵	۲	۱۴۰	۶۰		
۸	۳۹,۰۶۱۹۸	۴۴,۳۹۷۰۴۴	۵۰۳	۳	۲۰۰	۱۶۰	۲۰۸	
۹	۳۸,۱۸۸۰۲	۴۴,۷۷۷۵۲	۶۱۳	۴	۱۲۰	۱۶۰	۴۱۶	۸۰
۱۰	۳۸,۵۰۸۲۱	۴۶,۶۴۷۵۷۳	۷۱۲	۴	۲۲۰	۱۴۰	۱۸۰	۱۲۰
۱۱	۳۸,۴۹۷۱۳	۴۷,۸۳۲۴۴۲	۶۰۴	۴	۱۶۰	۸۰	۲۰۰	۱۴۰
۱۲	۳۷,۴۰۳۸۸	۴۶,۲۵۹۱۲۴	۱۸۴	۴	۲۰۸	۶۰	۱۰۰	۱۲۰
۱۳	۳۷,۹۴۳۷۹	۴۷,۵۲۴۵۹۴	۴۶۱	۳	۱۰۰	۲۰۰	۱۶۰	
۱۴	۳۸,۵۲۱۸۲	۴۴,۹۵۵۹۳۵	۲۲۷	۲	۴۰	۱۴۰		
۱۵	۳۸,۱۴۴۸۷۲	۴۸,۰۷۶۹۸۸	۶۱۹	۲	۲۴۰	۲۸۰		

جدول ۳. قسمت دوم داده‌های ورودی مطالعه موردی

خرده فروش	زمان پردازش (ساعت)				موعد تحویل (ساعت)			
	سفارش ۱	سفارش ۲	سفارش ۳	سفارش ۴	سفارش ۱	سفارش ۲	سفارش ۳	سفارش ۴
۱	۱/۵	۲			۵۰	۴۶		
۲	۲	۱/۵	۱		۹۱	۱۲۲	۷۳	
۳	۳/۵	۱			۴۲	۴۷		
۴	۱/۵	۱/۵			۷۰	۷۷		

خرده فروش	زمان پردازش (ساعت)				موعد تحویل (ساعت)			
	سفارش ۱	سفارش ۲	سفارش ۳	سفارش ۴	سفارش ۱	سفارش ۲	سفارش ۳	سفارش ۴
۵	۲/۵	۴	۳	۲/۵	۱۲۹	۱۲۲	۱۳۵	۱۴۲
۶	۳				۹۸			
۷	۱/۵	۱			۶۱	۵۴		
۸	۲	۲	۲		۶۰	۵۷	۵۹	
۹	۲/۵	۱	۱/۵	۱	۱۰۶	۱۰۰	۱۰۷	۹۴
۱۰	۳	۲	۲	۲	۱۱۵	۱۱۲	۱۲۱	۱۱۲
۱۱	۱/۵	۱	۱/۵	۲/۵	۱۲۸	۱۲۳	۱۲۰	۱۲۲
۱۲	۱	۱	۱/۵	۱	۶۱	۶۵	۵۸	۶۶
۱۳	۲	۱/۵	۱/۵		۵۰	۴۸	۴۷	
۱۴	۱	۱			۸۰	۷۸		
۱۵	۲/۵	۴			۷۷	۹۰		

برای به‌دست‌آوردن جواب بهینه مسئله بالا، داده‌های ذکر شده در جدول‌های ۲ و ۳، وارد مدل ریاضی شده و توسط نرم‌افزار حل می‌شود. مقدار بهینه بیشترین زمان تأخیر به‌دست‌آمده برابر ۲۶/۵ ساعت است که مربوط به تحویل سفارش‌های خرده‌فروش شماره ۳ است. این جواب پس از اجرای مدل ریاضی در نرم‌افزار GAMS به مدت ۱۸۰۰ ثانیه به‌دست آمده است. شکل ۵، نحوه زمان‌بندی تولید سفارش‌ها و همچنین مسیریابی وسایل نقلیه را نشان می‌دهد.



شکل ۵. نتایج حل مطالعه موردی

بر اساس نتایج گزاره‌های ۱ و ۲، توالی عملیات تولید سفارش‌های مربوط به هر وسیله نقلیه تأثیری بر بیشترین زمان تأخیر ندارد و بنابراین زمان‌بندی تولید هر سفارش بیان نشده است. با

توجه به شکل ۵، ابتدا کارهای تخصیص‌یافته به وسیله نقلیه ۱ و سپس کارهای مربوط به وسیله نقلیه ۲ پردازش می‌شود؛ همچنین تور ملاقات بهینه برای هر وسیله نقلیه در شکل ۵، مشخص است. برای سنجش اعتبار مدل تصمیم‌گیری یکپارچه ارائه‌شده در این پژوهش و همچنین ارزیابی میزان تأثیرگذاری آن بر بهبود جواب به‌دست‌آمده، پاسخ به‌دست‌آمده در بالا با شرایط فعلی شرکت مقایسه می شود. در شرایط فعلی، مدیر برنامه‌ریزی تولید به‌صورت مجزا در خصوص زمان‌بندی تولید سفارش‌ها تصمیم‌گیری می‌کند و پس از تولید این سفارش‌ها، مدیر لجستیک اقدام به برنامه‌ریزی توزیع محصولات و جمع‌آوری روغن‌موتورهای کارکرده با کمک ۲ وسیله حمل‌ونقل خود می‌کند.

در ابتدا و پس از دریافت سفارش‌ها، مدیر برنامه‌ریزی تولید با توجه به موعدهای تحویل، اولویت تولید سفارش‌ها را مشخص می‌کند. چون محیط تولید به‌صورت یک‌ماشینه است و تابع هدف نیز کمینه‌کردن بیشترین زمان تأخیر است، قاعده زودترین موعد تحویل[1] (EDD) می‌تواند توالی بهینه را ایجاد کند؛ بنابراین سفارش‌های مربوط به مشتریانی در اولویت تولید قرار می‌گیرند که موعد تحویل آن‌ها کمتر باشد. با توجه به آنکه بهتر است سفارش‌های هر مشتری به‌صورت متوالی پردازش شود، در صورت انتخاب یک سفارش از یک مشتری به‌عنوان اولویت تولید، سایر سفارش‌های این مشتری نیز پس از پردازش آن در اولویت تولید قرار خواهند گرفت؛ سپس مدیر لجستیک با توجه به برنامه تحویل سفارش‌های آماده به ارسال از واحد تولید، با کمک مدل VRPDP اقدام به برنامه‌ریزی تخصیص سفارش‌ها به وسایل نقلیه و مسیریابی بهینه می‌کند. باید توجه شود که این فرآیند برنامه‌ریزی در یک سناریوی خوشبینانه است؛ زیرا در برخی از موارد مسئولان برنامه‌ریزی لجستیک بدون استفاده از مدل VRPDP و صرفاً بر اساس قانون FIFO، هر سفارش که زودتر آماده ارسال باشد، به وسیله نقلیه تخصیص می‌دهند و به‌محض تکمیل ظرفیت وسیله نقلیه، محصولات را برای مشتریان ارسال می‌کنند (سناریوی بدبینانه).

با درنظرگرفتن فرآیند برنامه‌ریزی دومرحله‌ای بالا (سناریوی خوشبینانه)، جدول ۴، نتایج زمان‌بندی تولید، نحوه تخصیص سفارش‌ها به وسایل حمل‌ونقل و همچنین مسیریابی این وسایل را نشان می‌دهد. در این شرایط مقدار تابع هدف مسئله معادل ۲۸/۶ می‌شود که به میزان ۸ درصد از جواب بهینه در شرایط تصمیم‌گیری یکپارچه بدتر است و میزان اهمیت مدل ارائه‌شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. واضح است که اگر از سناریوی بدبینانه برای برنامه‌ریزی استفاده شود، این اختلاف در جواب بیشتر خواهد شد و یا حتی ممکن است به یک جواب شدنی دست پیدا نکنیم.

1. Earliest Due Date

جدول ۴. نتایج حل مطالعه موردی بدون درنظرگرفتن تصمیم‌گیری یکپارچه

خرده فروش	اولویت تولید	زمان شروع به حرکت از انبار مرکزی	مسیریابی
۱	۲	۶۶/۵	
۲	۸	۷۸/۵	
۳	۱	۶۶/۵	
۴	۷	۷۸/۵	
۵	۱۵	۷۸/۵	
۶	۱۲	۶۶/۵	
۷	۴	۶۶/۵	۰→۱۵→۲→۴→۹→۱۴→۸→۵→۰
۸	۵	۷۸/۵	۰→۱۱→۱۰→۷→۶→۱۳→۳→۱→۱۲→۰
۹	۱۱	۷۸/۵	
۱۰	۱۳	۶۶/۵	
۱۱	۱۴	۶۶/۵	
۱۲	۶	۶۶/۵	
۱۳	۳	۶۶/۵	
۱۴	۱۰	۷۸/۵	
۱۵	۹	۷۸/۵	

ارزیابی مهم دیگری که باید در این مطالعه صورت بگیرد، تحلیل حساسیت جواب‌های مسئله به دو پارامتر مهم، یعنی تعداد وسایل نقلیه و ظرفیت این وسایل است؛ به همین دلیل جدول ۵، نتایج حل مسئله مطالعه موردی با درنظرگرفتن مقادیر مختلف این دو پارامتر را نشان می‌دهد.

جدول ۵. تحلیل حساسیت مسئله مطالعه موردی

تعداد وسایل نقلیه	ویژگی‌های وسایل نقلیه	ظرفیت هر وسیله نقلیه (لیتر)	مقدار تابع هدف
۲	۲ ایسوزو اما با ظرفیت اتاق کمتر	۳۲۰۰	نشدنی
۲	شرایط فعلی مسئله	۳۵۰۰	۲۶/۵
۲	اضافه‌کردن به ظرفیت شرایط فعلی به میزان ۳٪	۳۶۰۰	۱۶
۲	اضافه‌کردن به ظرفیت شرایط فعلی به میزان ۸٪	۳۸۰۰	۶/۲
۳	۳ ایسوزو با ظرفیت پایین	۲۴۰۰	۹/۴
۴	۴ نیسان جونیور	۱۸۰۰	۳/۶
۹	۹ پیکان‌وانت	۸۰۰	نشدنی
۱۰	۱۰ پیکان‌وانت	۸۰۰	۰

پیشنهادهای مدیریتی حاصل از تحلیل حساسیت بالا به شرح زیر است:
ـ با افزایش تعداد وسایل نقلیه مقدار تابع هدف کاهش می‌یابد؛ حتی اگر مجموع ظرفیت ناوگان حمل‌ونقل ثابت باقی بماند؛
ـ در صورت شرط ثابت‌ماندن مجموع ظرفیت ناوگان، با جایگزینی ۹ وسیله نقلیه با ظرفیت پایین (پیکان‌وانت) به‌جای شرایط فعلی، امکان تحویل محصولات و برداشت کلیه روغن‌موتورهای کارکرده از محل مشتری وجود ندارد (جواب نشدنی)؛
ـ در صورت شرط ثابت‌ماندن مجموع ظرفیت ناوگان، با جایگزینی ۴ وسیله نقلیه با ظرفیت متوسط (نیسان جونیور) به‌جای شرایط فعلی، کمترین مقدار تابع هدف حاصل می‌شود؛
ـ استفاده از وسایل حمل‌ونقل با ظرفیت بسیار کم (پیکان‌وانت) چندان به‌صرفه نیست؛ زیرا میزان ظرفیت بلااستفاده آن‌ها زیاد است و از طرفی تعداد رانندگان استخدامی شرکت نیز بالا می رود؛
ـ در صورت عدم‌امکان جایگزینی وسایل نقلیه، بهترین گزینه افزایش ظرفیت اتاق وسایل نقلیه فعلی به میزان ۸ درصد است.

نتایج تحلیل مسائل تصادفی. در این بخش برای ارزیابی میزان کارایی الگوریتم ژنتیک توسعه‌داده‌شده، تعدادی مسائل تصادفی در ابعاد مختلف تولید می‌شود و نتایج حل آن‌ها موردبررسی قرار می‌گیرد. جدول ۶، نحوه تولید تصادفی پارامترهای مسئله را نشان می‌دهد.

جدول ۶. نحوه تولید تصادفی پارامترهای مسائل

پارامترها	فرمول تولید تصادفی
d_{ij}	عدد صحیح از توزیع یکنواخت [N+5,6N]
tt_{jj}	توزیع یکنواخت [1,10]
p_{ij}	توزیع یکنواخت [1,5]
V_{ij}	عدد صحیح از توزیع یکنواخت [20,200]
Q_k	عدد صحیح از توزیع $[20, 200]$ به شرط $N/K \partial \sum_{i,j} V_{ij} \infty \sum_k Q_k \infty 1.1\partial \sum_{i,j} V_{ij}$ 1.05∂
P_j	عددصحیح از توزیع $[0.7\partial \sum_i V_{ij}, 1.3\partial \sum_i V_{ij}]$ به شرط $0.9\partial \sum_k Q_k \infty \sum_j P_j \infty 0.95\partial \sum_k Q_k$

در جدول ۶، برای به‌دست‌آوردن مقادیر منطقی ظرفیت وسایل نقلیه، ابتدا مجموع ظرفیت‌ها به‌صورت تصادفی انتخاب شده و سپس بر تعداد وسایل نقلیه تقسیم می‌شود. برای ارزیابی روش‌های حل توسعه‌داده‌شده از دو شاخص CPU time و درصد خطا از بهینه (GAP%)

استفاده می‌شود. شاخص GAP% میانگین انحراف جواب به‌دست‌آمده توسط الگوریتم ژنتیک از جواب بهینه مدل MILP است که از طریق رابطه ۱۶، قابل‌محاسبه است.

$$GAP\% \cong \frac{1}{R}\left| \sum_{r\cong 1}^{R} \frac{Solution_{GA}(r) - Solution_{OPT}(r)}{Solution_{OPT}(r)} \times 100 \right| \qquad (۱۶)$$

در رابطه بالا، R نشان‌دهنده تعداد مثال حل شده در هر یک از تنظیمات است. جدول ۷، نتایج حل مسائل مختلف توسط روش‌های حل ارائه‌شده را نشان می‌دهد. در این جدول ۱۰۰ مسئله تصادفی در قالب ۲۰ تنظیم مختلف (5×20) توسط MILP و GA حل شده و جواب‌های به‌دست‌آمده با یکدیگر مقایسه شده‌اند. برای حل این مسائل توسط GA، N_P=30 در نظر گرفته شده است؛ همچنین برای پارامترهای P_m% و $Iter_\max$ به‌ترتیب مقادیر ۵ درصد و ۵۰ در نظر گرفته شده است. تمامی مقادیر پارامترهای الگوریتم ژنتیک بر اساس فرآیند تنظیم پارامتر و با کمک شاخص SSE حاصل شده است (برای مشاهده جزئیات بیشتر این روش به پژوهش [۲۳] رجوع شود).

جدول ۷. نتایج حل مسائل تصادفی

تنظیمات	تعداد سفارش	تعداد خرده‌فروش	تعداد وسایل حمل	GAP%	Avg. CPU time (Sec.)	
					MILP	GA
S1	۱۰	۴	۲	٪۰,۰۰	۵/۷	۰/۶
S2	۱۵	۴	۲	٪۰,۰۰	۵/۸	۰/۶
S3	۲۰	۵	۲	٪۱/۲۵	۱۴/۱	۰/۸
S4	۲۰	۵	۳	٪۰/۸۵	۱۴/۸	۱/۱
S5	۲۵	۷	۲	٪۱/۸۰	۲۹	۲/۶
S6	۲۵	۷	۳	٪۲/۲۳	۳۳/۹	۲/۹
S7	۲۵	۷	۴	٪۲/۴۴	۴۱/۵	۳/۲
S8	۳۰	۹	۲	٪۲/۴۸	۷۰/۶	۴/۲
S9	۳۰	۹	۳	٪۲/۳۴	۹۲/۴	۴/۸
S10	۳۰	۹	۴	٪۲/۴۵	۱۲۶/۸	۵/۵
S11	۳۵	۱۲	۲	٪۳/۱۷	۳۸۵/۸	۸/۶
S12	۳۵	۱۲	۳	٪۳/۵۵	۴۱۹/۲	۹/۸
S13	۳۵	۱۲	۴	٪۳/۴۷	۵۰۸/۱	۱۱
S14	۴۰	۱۵	۲	٪۳/۲۱	۱۶۷۲/۳	۱۸/۵
S15	۴۰	۱۵	۳	٪۲/۶۰	۱۷۵۸/۵	۲۰/۴
S16	۴۰	۱۵	۴	٪۲/۱۳	۱۸۰۰*	۲۲/۱
S17	۵۰	۱۸	۲	٪۲/۹۶	۱۸۰۰*	۶۸/۹

تنظیمات	تعداد سفارش	تعداد خرده‌فروش	تعداد وسایل حمل	GAP%	Avg. CPU time (Sec.)	
					MILP	GA
S18	۵۰	۱۸	۳	٪۳/۴۲	۱۸۰۰*	۷۶/۳
S19	۵۰	۱۸	۴	٪۳/۵۹	۱۸۰۰*	۸۲/۸
S20	۵۰	۱۸	۵	–	N/A	۹۰/۵

* هیچ‌کدام از مسائل حل‌شده در این تنظیم در زمانی قبل از مدت‌زمان منطقی (در اینجا معادل ۱۸۰۰ ثانیه است) به جواب بهینه نهایی نرسیدند و بنابراین آخرین جواب به‌دست‌آمده پس از ۱۸۰۰ ثانیه به‌عنوان جواب نهایی لحاظ شده است.

N/A حداقل یکی از مسائل در این تنظیم در مدت زمان منطقی هیچ جواب شدنی به‌دست نیاورده است.

با توجه به جدول ۷، سرعت رسیدن به جواب بهینه توسط GA توسعه‌داده‌شده بسیار بالا است و در بزرگ‌ترین مسئله در ۹۰/۵ثانیه جواب نهایی قابل‌محاسبه است. این در حالی است که MILP برای به‌دست‌آوردن جواب بهینه به‌صورت میانگین به زمان بسیار بیشتری نیاز دارد؛ به‌طوری‌که برای هیچ‌یک از مسائل S16 تا S19 در مدت‌زمان حل منطقی (اینجا معادل ۱۸۰۰ ثانیه است) امکان رسیدن به جواب بهینه نهایی وجود نداشته و بهترین جواب به‌دست‌آمده تا آن زمان گزارش شده است. این مدل برای حداقل یک مسئله تصادفی مربوط به تنظیم S20 نتوانسته است در مدت زمان منطقی یک جواب شدنی اولیه به‌دست آورد. بررسی مدت‌زمان حل مسائل نشان می‌دهد که سرعت افزایش مدت‌زمان حل با افزایش ابعاد مسائل در مدل MILP بسیار بیشتر از GA است؛ همچنین در هر تنظیم با افزایش تعداد وسایل نقلیه، سختی مسئله بیشتر می‌شود و مدت‌زمان حل آن توسط هر دو روش افزایش می‌یابد. این در حالی است که سرعت افزایش زمان حل به‌ازای افزایش تعداد خرده‌فروشان به‌مراتب بیشتر از افزایش به‌ازای افزایش تعداد وسایل نقلیه است؛ همچنین بررسی نتایج شاخص GAP% نشان می‌دهد که GA توسعه‌داده‌شده از این نظر عملکرد قابل‌قبولی دارد؛ به‌طوریکه در مسائل بزرگ کمتر از ۴ درصد است. نکته قابل‌توجه در این شاخص آن است که برای تنظیمات S16 تا S19، به‌دلیل آنکه مدل ریاضی به جواب بهینه نهایی نرسیده است، فاصله از جواب بهینه به‌دست‌آمده کمتر از مقدار واقعی آن نمایش داده می‌شود؛ به همین دلیل میانگین شاخص GAP% در این دو تنظیم نسبت به تنظیمات قبلی که مسائل با ابعاد کوچک‌تری هستند، افت پیدا کرده است.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، مسئله زمان‌بندی زنجیره تأمین حلقه‌بسته برای نخستین بار بررسی شد. این مسئله در شرکت‌هایی که فرآیند تولید و توزیع محصولات را به‌صورت یکپارچه انجام می‌دهند، بااهمیت است؛ به‌خصوص برای محصولاتی که پس از استفاده امکان بازیافت و استفاده مجدد در زنجیره تأمین مهیا است. ابتدا برای این مسئله یک مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط

ارائه شد. هدف این مدل حداقل کردن بیشترین زمان تأخیر است. این مدل قادر است مسائل با ابعاد کوچک را در مدت زمان منطقی حل کند؛ همچنین با ارائه ویژگی‌های ساختاری برای مسئله موردبررسی، یک GA سریع توسعه داده شد که قادر است مسائل را در مدت‌زمان حل بسیار کم و با خطای پایین از جواب بهینه حل کند.

برای بیان اهمیت مسئله، یک مطالعه موردی در زنجیره تأمین روغن‌موتور صورت گرفت که توسط مدل MILP حل شد و نتایج آن به‌همراه پیشنهادهای مدیریتی ارائه شد. برای ارزیابی GA توسعه‌داده‌شده، ۱۰۰ مسئله تصادفی تولید و توسط هر دو روش حل شد. نتایج نشان داد که GA توسعه‌داده‌شده هم از نظر سرعت رسیدن به جواب بهینه و هم از نظر دقت رسیدن به این جواب‌ها دارای عملکرد قابل‌قبول است. علت اصلی آن، ارائه ویژگی‌های ساختاری مسئله و استفاده از آن‌ها در بدنه این الگوریتم است که سبب ساده‌سازی فرآیند رسیدن به جواب‌ها شد.

برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود که این مسئله در زنجیره تأمین سایر محصولات بررسی شود؛ همچنین می‌توان برای تولیدکنندگانی که بیش از یک ایستگاه کاری دارند، مسئله را در بخش تولید به‌صورت مسئله جریان کارگاهی و یا ماشین‌های موازی فرموله کرد. از دیگر توسعه‌های این مسئله، می‌توان به درنظرگرفتن مباحث پایداری زنجیره تأمین و همچنین اضافه‌کردن فرآیند بازیافت به فرآیند اصلی تولید اشاره کرد که سبب می‌شود مسئله به شرایط واقعی نزدیک‌تر شود. توجه به قیمت‌گذاری خرید محصولات EOL در یک بازار رقابتی با دلالان جمع‌آوری محصولات کارکرده می‌تواند جنبه دیگری از توسعه مسئله موردبررسی در این پژوهش باشد.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

منابع

1. Amorim, P., Belo-Filho, M., Toledo, F. M. B. d., Almeder, C., & Almada-Lobo, B., (2013). Lot sizing versus batching in the production and distribution planning of perishable goods. *International Journal of Production Economics, 146(1),* 208-218.
2. Atasu, A., V.D.R. Guide Jr, & Van Wassenhove, L.N. (2008). Product reuse economics in closed- loop supply chain research. *Production and Operations Management, 17(5),* 483-496.
3. Ayough, A., Zandieh, M., Farsijani, H., & Dorri, B., (2014). Job Rotation Scheduling in a New Arranged Lean Cell, a Genetic Algorithm Approach. *Journal of Industrial Management Perspective, 4(3),* 33-59 (In persian).
4. Daniel, V., Guide, R. & Van Wassenhove, L.N. (2002). Closed-loop supply chains, in Quantitative approaches to distribution logistics and supply chain management. Springer. 47-60.
5. Deep, K. & Mebrahtu, H. (2012). Variant of partially mapped crossover for the travelling salesman problems. *International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics, 3(1),* 47-69.
6. Devapriya, P., Ferrell, W. & Geismar, N. (2017). Integrated production and distribution scheduling with a perishable product. *European Journal of Operational Research, 259(3),* 906-916.
7. Fattahi, P., Keneshloo, S., & Daneshamooz, F. (2019). A hybrid genetic algorithm and parallel variable neighborhood search for jobshop scheduling with an assembly stage. *International Journal of Industrial Engineering & Production Research, 30(1),* 25-37.
8. Fu, L.-L., Aloulou, M.A. & Triki, C. (2017). Integrated production scheduling and vehicle routing problem with job splitting and delivery time windows. *International Journal of Production Research, 55(20),* 5942-5957.
9. Gharaei, A. & Jolai, F. (2020). Two heuristic methods based on decomposition to the integrated multi-agent supply chain scheduling and distribution problem. Optimization Methods and Software, 1-25.
10. Hall, N.G. & Potts, C.N. (2003). Supply chain scheduling: Batching and delivery. *Operations Research, 51(4),* 566-584.
11. Hasanov, P., Jaber, M., & Tahirov, N. (2019). Four-level closed loop supply chain with remanufacturing. *Applied Mathematical Modelling, 66,* 141-155.
12. Heydari, J., K. Govindan, & Jafari, A. (2017). Reverse and closed loop supply chain coordination by considering government role. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 52,* 379-398.
13. Holland, J.H., (1992). Genetic algorithms. *Scientific american, 267(1),* 66-73.
14. Kazemi, H., M.M. Mazdeh, & Rostami, M. (2017). The two stage assembly flow-shop scheduling problem with batching and delivery. *Engineering Applications of Artificial Intelligence, 63,* 98-107.
15. Keyvanshokooh, E., S.M. Ryan, & Kabir, E. (2016). Hybrid robust and stochastic optimization for closed-loop supply chain network design using accelerated Benders decomposition. *European Journal of Operational Research, 249(1),* 76-92.
16. Kong, M., Pei, J., Xu, J., Liu, X., Yu, X., & Pardalos, P. M., (2019). A robust optimization approach for integrated steel production and batch delivery scheduling with uncertain rolling times and deterioration effect. *International Journal of Production Research,* 1-23.

17. Li, K., Zhou, C., Leung, J. Y., & Ma, Y., (2016). Integrated production and delivery with single maine and multiple vehicles. *Expert Systems with Applications, 57,* 12-20.
18. Li, X. & Gao, L. (2016). An effective hybrid genetic algorithm and tabu search for flexible job shop scheduling problem. *International Journal of Production Economics, 174,* 93-110.
19. Mazdeh, M.M. & Rostami, M. (2014). A branch-and-bound algorithm for two-machine flow-shop scheduling problems with batch delivery costs. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics, 1(2),* 94-104.
20. Mazdeh, M. M., Shashaani, S., Ashouri, A., & Hindi, K. S., (2011). Single-machine batch scheduling minimizing weighted flow times and delivery costs. *Applied Mathematical Modelling, 35(1),* 563-570.
21. Mazdeh, M.M., Rostami, M., & Namaki, M.H. (2013). Minimizing maximum tardiness and delivery costs in a batched delivery system. *Computers & Industrial Engineering, 66(4),* 675-682.
22. Paydar, M.M., Babaveisi, V. & Safaei, A.S. (2017). An engine oil closed-loop supply chain design considering collection risk. *Computers & Chemical Engineering, 104,* 38-55.
23. Rostami, M., Kheirandish, O. & Ansari, N. (2015). Minimizing maximum tardiness and delivery costs with batch delivery and job release times. *Applied Mathematical Modelling, 39(16),* 4909-4927.
24. Sajadi, S.M., Ayough, A. & Sayed Isfahani, M.M. (2016). An Integrated Model for Analysis and Improvement of Scheduling "Flexible Manufacturing Systems (FMS)" and Dispatching "Automated Guided Vehicle (AGV)" Problems. *Journal of Industrial Management Perspective, 6(1),* 97-127 (In Persian).
25. Savaskan, R.C., S. Bhattacharya, & Van Wassenhove, L.N. (2004). Closed-loop supply chain models with product remanufacturing. *Management science, 50(2),* 239-252.
26. Taghizadeh Yazdi, M. & Salmani Zarchi, E. (2020). Presenting a Comprehensive Multi-Objective Model of the Multi level – Multi Product Green Closed-Loop Supply Chain with a Weighted Sum Method Approach: Pareto Front Generation (Case Study: Shahpar Momtaz Shoes Co.) *Journal of Industrial Management Perspective, 9(4),* 107-137 (In persian).
27. Yin, Y., Cheng, T., Hsu, C.-J., & Wu, C.-C., (2013). Single-machine batch delivery scheduling with an assignable common due window. *Omega, 41(2),* 216-225.
28. Zou, X., Liu, L., Li, K., & Li, W., (2018). A coordinated algorithm for integrated production scheduling and vehicle routing problem. *International Journal of Production Research, 56(15),* 5005-5024.

پرتال جامع علوم انسانی

An Optimization Model for Closed-Loop Supply Chain Scheduling Problem

Mohammad Rostami*

Abstract

In today's complex world and in order to increase competitiveness, planners in the manufacturing systems have focused on product distribution and collection of used products. In this paper, the closed-loop supply chain scheduling problem is investigated for the first time. A comprehensive and integrated model is presented for production scheduling, delivering products to retailers using limited-capacity vehicles, and pick-upping end of life products in order to recycle and reuse in supply chain. The aim of this problem is to minimize maximum tardiness. Due to the fact that this problem is NP-hard, a genetic algorithm is presented to solve the large-size instances by obtaining near-optimal solutions. To illustrate the importance of the problem under consideration, a case study of the motor oil supply chain is presented.

Keywords: Scheduling; Closed-Loop Supply Chain; Maximum Tardiness; Linear Programming Model; Genetic Algorithm.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

Received: March 24, 2020, Accepted: May 22, 2020.
* Assistant Professor, Shahrood University of Technology.
E-mail: Rostami_m@shahroodut.ac.ir