مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (تابستان ۱۳۹۸)
دوره‌ی ۱-۳۵، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۸۵-۹۴

Original Article

شبکه‌ی بهینه‌ی تولید، انتقال و توزیع یکپارچه در سیستم‌های جریان کارگاهی: مدل‌سازی و کاربرد شبکه در سیستم‌های تولیدی

علی جراغعلی‌خانی (استادیار)
دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه نفرش
شهریار محمدی (دانشیار)
رضا رمضانیان* (دانشیار)
دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

توانایی هر سازمان در هماهنگ کردن تصمیمات با مشتری نهایی، باعث افزایش رضایت مشتری و ایجاد مزیت رقابتی و سودآوری بیشتر سازمان می‌شود. با توجه به اهمیت عملیات تولید، انتقال و تحویل محصول در سازمان‌هایی که مشتریان درگستره‌ی وسیع جغرافیایی پراکنده‌اند، در این مقاله شبکه‌ی بهینه‌یی برای اتخاذ تصمیمات بهینه‌ی یکپارچه‌ی تولید، انتقال و توزیع محصولات نهایی معرفی شده و مدل ریاضی شبکه‌ی پیشنهادی در فضای تولیدی جریان کارگاهی ارائه شده است. در این تحقیق به کمک مفهوم محدوده‌ی مشتریان، در شبکه‌ی پیشنهادی انتقال محصول به مراکز محدوده‌ی مشتریان به روش ارسال مستقیم و همچنین تحویل در داخل محدوده‌ی مشتریان به روش مسیریابی انجام شده است. به‌منظور سنجش عملکرد مدل، مسائل عددی استاندارد تصادفی در اندازه‌های مختلف تولید شده و پس از حل، کارایی مدل پیشنهادی ارزیابی شده است. در انتها نیز بخش تحلیل حساسیت به بررسی تأثیر عوامل مختلف بر روی شبکه پرداخته است.

واژگان کلیدی: شبکه‌ی بهینه‌ی تولید و انتقال و توزیع، رویکرد یکپارچه، سیستم تولیدی جریان کارگاهی، مدل‌سازی ریاضی، تحلیل حساسیت.

ali_cheraghalikhani@mail.kntu.ac.ir
mohammadi@kntu.ac.ir
ramezanian@kntu.ac.ir

۱. مقدمه

در دنیای تجاری رقابتی فعلی، سازمان‌هایی موفق هستند که به سمت یکپارچه‌سازی فعالیت‌های مرتبط با حوزه‌ی کاریشان حرکت می‌کنند. در سالیان اخیر تحقیقات مرتبط با موضوع مدیریت زنجیره‌ی تأمین مورد توجه محققان و فعالان حوزه‌ی مدیریت عملیات قرارگرفته است.[۱] زنجیره‌ی تأمین تمام تعاملات بین تأمین‌کننده، تولیدکننده، توزیع‌کننده و مشتری نهایی را به‌منظور افزودن ارزش به محصول از ابتدا تا انتها در نظر می‌گیرد. همین امر باعث ایجاد هماهنگی گسترده بین اجزای مختلف زنجیره‌ی تأمین شده و این هماهنگی افزایش توجه به مزایای عملیاتی مدل‌های یکپارچه در زنجیره‌ی تأمین را به دنبال داشته است. در تحقیقات اخیر به اهمیت هماهنگی تولیدکننده‌ی محصول با مشتری نهایی به‌منظور افزایش رضایت‌مندی مشتری تأکید شده است.[۲] در بسیاری از سیستم‌های تولیدی محصول نهایی بعد از اتمام فرایندهای خود باید به‌سرعت و بدون اتلاف وقت به مشتری نهایی تحویل داده شود. در این تحقیق فرایندهای تولید، انتقال و تحویل به مشتری نهایی به‌صورت یکپارچه در نظر گرفته و برنامه‌ریزی می‌شوند. همچنین فرض بر آن است که سیاست‌ها و برنامه‌ریزی‌های تحویل محصول به مشتری نهایی توسط تولیدکننده برنامه‌ریزی می‌شود.

زمان‌بندی تولید تخصیص کارها به ماشین‌آلات، ترتیب انجام کارها در ماشین‌های تولیدی و زمان شروع و پایان کارها در هر ماشین را بررسی می‌کند و بر اساس نوع مسئله به توابع هدف مختلفی می‌پردازد. سفارش‌ها بعد از اتمام فرایندهای تولیدی به کمک وسایل نقلیه به مشتری مربوطه ارسال و تحویل داده می‌شوند. از سوی دیگر در برنامه‌ریزی انتقال و تحویل، سفارش‌های ارسالی با هر وسیله‌ی نقلیه، تعداد سفارش‌های موجود در هر سفر، زمان حرکت و رسیدن هر وسیله به مشتریان و نیز مسیر هر وسیله در هر سفر تعیین می‌شود. در این زمینه، بسیاری از محققان در حجم وسیعی به این دو مقوله بدون در نظر گرفتن دیگری پرداخته‌اند و تحقیقات با حجم کمتری با هدف در نظر گرفتن و بهینه‌سازی یکپارچه‌ی زمان‌بندی تولید و حمل و تحویل کارها به مشتری انجام شده است. این در صورتی است که طبق گزارش‌های ارائه شده حدود ۳۰٪ هزینه‌ی کالای فروخته شده در سیستم‌های تولیدی را هزینه‌های آمادی (لجستیک) تشکیل می‌دهند و به‌منظور رسیدن به کارایی بهتر، تولید و انتقال و توزیع باید به‌صورت یکپارچه بررسی و برنامه‌ریزی شوند.[۳] همچنین

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۵/۲۱، اصلاحیه ۱۳۹۶/۹/۱۸، پذیرش ۱۳۹۶/۱۰/۵.
DOI:10.24200/J65.2019.7166.1731

تأکید شده است که جدا در نظرگرفتن این دو دسته از فعالیت‌های کلیدی سازمان به نتایج مطلوب نمی‌رسد.[۲] در مدل‌های یکپارچه، زمان تکمیل سفارش به زمان تحویل آخرین سفارش به آخرین مشتری و بازگشت وسیله‌ی حمل مربوطه به محل تولیدی گفته می‌شود. مرکز تولیدی بعد از دریافت سفارش از مشتریان، آنها را توسط ماشین‌ها و ایستگاه‌های تولیدی پردازش و بدون نگهداشتن آنها در انبار میانی به مشتری نهایی تحویل می‌دهد.

مفهوم یکپارچه‌سازی زمان‌بندی تولید و توزیع اولین بار توسط پاتس[۴] در سال ۱۹۸۰ بیان شده است. هال و شمویس[۵] برنامه‌ی زمان‌بندی سیستم تک‌ماشینه را با در نظرگرفتن تعداد کافی وسیله‌ی حمل که بلافاصله محصول نهایی را به مشتری تحویل می‌دهند، بررسی کردند. در مطالعات هرمان و لی،[۶] یوآن،[۷] چن[۸] و چنگ و همکاران[۹] بعد از اتمام فرایندهای تولیدی، محصول نهایی توسط وسایل نقلیه با ظرفیت محدود ولی با تعدادکافی در دسترس به مشتری تحویل داده می‌شد. یانگ[۱۰] فرض زمان تحویل از قبل تعیین شده را به مطالعه‌ی چنگ و همکاران[۹] اضافه کرد. لی و چن[۱۱] مسیر تحقیقاتی جدیدی را در این مدل با معرفی مفهوم ظرفیت حمل و نیز زمان حمل آغازکردند. هال و پاتس[۱۲] نیز مدل یکپارچه‌ی تولید و تحویل را برای فضای تک‌ماشینه‌ی تولیدی در نظرگرفتند و تابع هدف خود را هزینه‌ی کلی تحویل و تولید گرفتند. چنگ و لی[۱۳] همین مطالعه را با فرض فضاهای متفاوت برای سفارش‌های مختلف گسترش دادند. لی و همکاران[۱۴] مدل یکپارچه‌ی زمان‌بندی تولید تک‌ماشینه و مسیریابی وسیله‌ی نقلیه را با هدف کمینه‌سازی مجموع زمان‌های بازگشت آخرین وسیله پیشنهاد کردند. هی و همکاران،[۱۵] ژنگ و همکاران[۱۶] و سو و همکاران[۱۷] مدل چنگ و همکاران[۹] را بازنویسی و الگوریتم‌های حل بهبوددهنده‌یی را ارائه کردند. چن و لی[۱۸] مدل جامعی که شامل دو سیستم برای تولید و چندین روش برای تحویل به چندین مشتری است را ارائه کردند. لیو و لو[۱۹] مدل یکپارچه‌ی زمان‌بندی تولید تک‌ماشینه و تحویل برای کمینه‌سازی زمان تکمیل سفارش‌ها ارائه کردند. لی[۲۰] مدل یکپارچه‌ی تک‌ماشینه‌ی بدون پیش‌نیازی و ارسال به یک مشتری را ارائه کردند. خدابنده و همکاران[۲] مدل زمان‌بندی تولید تک‌ماشینه و مسیریابی وسیله‌ی نقلیه را با هدف مجموع وزنی کارهای تأخیری به همراه هزینه‌ی ارسال ارائه و حل کردند. حاجی‌آقایی و امین‌نیری[۲۱] نیز از الگوریتم ژنتیک برای زمان‌بندی تولید تک‌ماشینه و مسیریابی وسیله‌ی نقلیه استفاده کردند. در تحقیقات اشاره شده مدل‌های یکپارچه تنها برای سیستم تولیدی تک‌ماشینه ارائه شده و روش ارسال و تحویل نیز ارسال مستقیم یا مسیریابی در نظرگرفته شده‌اند.

از طرفی وگینگر[۲۲] مدل یکپارچه خود را برای ماشین‌های موازی ارائه و روشی ابتکاری پیشنهاد کرده است. ونگ و چنگ[۲۳] نیز مدلی یکپارچه برای زمان‌بندی ماشین‌های موازی و تحویل ارائه کردند. سفارش‌ها در مطالعه‌ی سو و همکاران[۱۷] توسط دو ماشین موازی پردازش و به یک مشتری تحویل داده می‌شود. لو و همکاران[۲۴] مطالعه‌ی مشابهی را در تولید دسته‌یی پیشنهاد کردند. آلریچ[۲۵] مدل یکپارچه‌یی برای تولید ماشین‌های موازی و تحویل با وسیله‌ی نقلیه با ظرفیت محدود و پنجره‌ی زمانی ارائه کرد. ون و ژنگ[۲۶] تولید با M ماشین موازی و ارسال به یک مشتری را برای هدف مجموع زمان‌های بازگشت ارائه کردند. گوا و همکاران[۲۷] نیز الگوریتمی دوسطحی برای یکپارچه‌سازی زمان‌بندی ماشین‌های موازی و تحویل ارائه کردند. لیاو و همکاران[۲۸] نیز الگوریتمی ابتکاری برای حل مدل یکپارچه‌ی زمان‌بندی ماشین‌های موازی و تحویل ارائه کردند.

یوآن و همکاران[۲۹] برای اولین‌بار یکپارچه‌سازی تولید و تحویل در سیستم تولیدی جریان کارگاهی با دو ماشین تولیدی و ارسال با محدودیت‌های ارسال به مشتری را پیشنهاد کردند. پان و همکاران[۳۰] نیز زمان‌بندی در شرایط جریان کارگاهی با دو ماشین و ارسال بعد از اتمام تولید را بررسی کردند. در تمام مطالعات بررسی شده فقط به مدل‌سازی تولید و توزیع پرداخته شده است. با توجه به سختی بالای مدل‌های ارائه شده بیشترین تحقیق نیز به شرایط تولیدی با یک ماشین، ماشین‌های موازی، یا جریان کارگاهی با تعداد محدودی ماشین پرداخته شده است.[۳۱] همچنین در تمام مقالات موجود فواصل تولیدکننده با مشتریان نهایی تقریباً یکسان و به‌عبارتی فرض محدود بودن تولیدکننده از نظر بعد جغرافیایی در نظرگرفته شده است. در حالی‌که بسیاری از تولیدکنندگان از سیستم جریان کارگاهی برای تولید استفاده می‌کنند و همچنین با توجه به گستره‌ی وسیع جغرافیایی محل قرارگیری مشتریان نمی‌توانند از مدل‌های موجود استفاده کنند. از این‌رو، در این مقاله برای اولین‌بار به مدل‌سازی و طراحی شبکه‌ی بهینه‌ی تولید، انتقال و توزیع یکپارچه که به‌صورت هم‌زمان در سه سطح تولید محصولات در سیستم جریان کارگاهی، انتقال به روش ارسال مستقیم به مرکز توزیع در مرکز محدوده‌ی مشتری و تحویل محصولات به روش مسیریابی به مشتری نهایی در نظرگرفته و پیشنهاد شده است. در شبکه‌ی یکپارچه‌ی پیشنهادی، برنامه‌ریزی و تصمیمات تولید و انتقال و تحویل محصولات به مشتری نهایی به‌صورت هم‌زمان انجام می‌شود.

در بخش دوم مقاله، شبکه‌ی یکپارچه‌ی پیشنهادی برای سیستم تولیدی تبیین و مدل ریاضی ارائه شده است. در بخش سوم نتایج محاسباتی در سه اندازه مسئله حل شده است و در زیربخش تحلیل حساسیت به بررسی تأثیر تصمیمات مختلف بر روی تابع هدف پرداخته شده است. نتیجه‌گیری به‌همراه پیشنهادهای تحقیقات آتی در بخش پایانی آورده شده است.

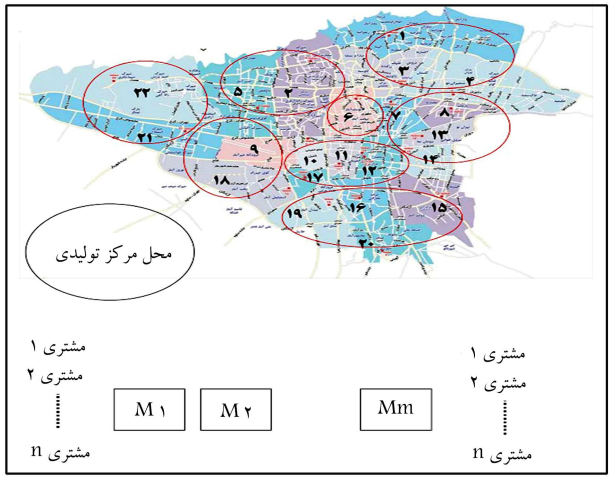
۲. شبکه‌ی بهینه‌ی تولید، انتقال و توزیع یکپارچه

۱.۲. تعریف مسئله

تولید محصول به روش جریان کارگاهی در مرکز تولیدی[۱] بر اساس سفارش‌های دریافتی از سوی مشتریان مختلف که در محل‌های مختلف قرار دارند، انجام می‌شود. بدین معنی که تمام سفارش‌های مشتریان دارای ترتیب یکسانی در ماشین‌آلات تولیدی است و تمام فرایندهای تولیدی با ترتیب یکسانی طی می‌شوند. سفارش‌های مختلف مشخصاتی نظیر زمان‌های تولید در ایستگاه‌های مختلف برای هر سفارش، ترتیب تکمیل در ایستگاه‌های مختلف و هم‌چنین حجم قابل اشغال محصول نهایی از وسیله‌های حمل دارند. محصولات باید پس از اتمام فرایندهای تولیدی بنا به دلایلی نظیر تاریخ مصرف‌دار بودن محصول، فاسد شدنی بودن محصول و ... اقدام به ارسال و تحویل سریع سفارش‌ها به مشتری نهایی نمایند. مشتریان نیز در محل‌های جغرافیایی مختلف قرار دارند. با توجه به گستره‌ی جغرافیایی وسیع محل قرارگیری مشتریان، مفهوم محدوده‌ی مشتری[۲] معرفی می‌شود. محدوده‌ی مشتری به محل قرارگیری تعدادی از مشتریان که از نظر جغرافیایی در نزدیکی هم قرار دارند و فواصل آن‌ها از هم به‌صورت قابل توجهی از فاصله‌شان از مرکز تولیدی کمتر و به‌عبارتی قابل چشم‌پوشی هنگام مدل‌سازی است، گفته می‌شود. شکل ۱ طرح‌واره‌ی گرافیکی از مفهوم محدوده‌ی مشتریان به‌منظور درک بهتر را نشان داده است.

مثلاً می‌توان از دو رویکرد خوشه‌بندی (Clustering) و گروه‌بندی مشتریان به‌عنوان روش‌های متداول و پرکاربرد برای تعیین محدوده‌ی مشتریان استفاده کرد. توضیحی کلی از نحوه‌ی کارکرد این دو روش در ادامه آمده است:

خوشه‌بندی: خوشه‌بندی یا تحلیل خوشه در آمار و یادگیری ماشینی، یکی از شاخه‌های یادگیری بدون نظارت است و فرایندی است که در طی آن، نمونه‌ها به دسته‌هایی که



شکل ۱. طرح‌واره‌ی گرافیکی برای نشان دادن محدوده مشتریان.

اعضای آن مشابه یکدیگرند، تقسیم می‌شوند که به این دسته‌ها خوشه گفته می‌شود. بنابراین خوشه مجموعه‌یی از اشیا است که در آن اشیا با یکدیگر مشابه هستند و با اشیاء موجود در خوشه‌های دیگر غیرمشابه‌اند. خروجی الگوریتم می‌تواند به دو صورت باشد: (۱) گروه‌بندی اشیا به مجموعه‌های مجزا یا (۲) خوشه‌بندی سلسله مراتبی که یک درخت برای تقسیم‌بندی اشیا پیدا می‌کند. از الگوریتم‌های مشهور برای خوشه‌بندی می‌توان به k-means اشاره کرد.[۳۲]

گروه‌بندی مشتریان: گروه‌بندی مشتریان روشی است که قبل از شروع به حل مسائل مسیریابی توسط برخی محققان استفاده شده است که با استفاده از خصوصیات مشتریان نظیر محل قرارگیری جغرافیایی آن‌ها اقدام به طبقه‌بندی مشتریان می‌کنند. در این روش خصوصیات مشتریان تعریف شده و بعنوان ورودی روش تعریف شده و با استفاده از روش‌های آماری طبقه‌بندی مشتریان به‌عنوان خروجی تعیین می‌شود. هو و شی[۳۳] در مطالعه‌ی خود به معرفی این مفهوم و الگوریتم آن پرداخته‌اند.

در صورتی که گستره‌ی جغرافیایی مشتریان (مانند شکل ۱) به قدری وسیع باشد که بتوان مشتریانی را که در محل‌های مختلف قرار دارند با هزینه‌ی توجیه‌پذیری در قالب محدوده‌ی مشتریان تقسیم کرد، آنگاه می‌توان با استفاده از وسیله‌ی نوع یک سفارش مشتریان هر محدوده را از مرکز تولیدی به مرکز محدوده‌ی مشتری به روش ارسال مستقیم رساند و بلافاصله در داخل محدوده اقدام به مسیریابی و رساندن سفارش به مشتری نهایی به روش مسیریابی کرد. درواقع این رویکرد شبکه‌ی یکپارچه تلفیقی از ارسال مستقیم (از محل تولید به محدوده‌ی مشتری با وسیله‌ی نوع ۱) و ارسال به روش مسیریابی (رساندن سفارش‌های داخل محدوده‌ی مشتریان به روش مسیریابی) استفاده می‌کند. هدف از طراحی شبکه‌ی بهینه، به دست آوردن پارامترهای زیر به‌منظور کمینه کردن زمان بازگشت آخرین وسیله به عنوان تابع هدف است.

- تعیین ترتیب دقیق تولید در سیستم جریان کارگاهی (ترتیب سفارش‌های مشتریان در ایستگاه‌های تولیدی)،
- زمان دقیق ارسال هر محموله به محدوده‌ی مشتری با وسیله‌ی حمل نوع ۱،
- بار هر محموله‌ی ارسالی به محدوده‌ی مشتری که خود تابعی از زمان و ترتیب تولید و ظرفیت‌های اشغال‌کننده‌ی سفارش‌ها و ظرفیت کلی وسیله‌ی حمل نوع ۱ است.
- زمان دقیق ارسال هر محموله‌ی نوع ۲ و زمان دقیق رسیدن سفارش به مشتری نهایی،
- بار هر محموله‌ی ارسالی برای هر سفر مشخص در داخل محدوده‌ی مشتری که خود تابعی از زمان حرکت وسیله و ظرفیت‌های اشغال‌کننده‌ی سفارش‌ها و ظرفیت کلی وسیله‌ی حمل نوع ۲ است.

۲.۲. مدل‌سازی ریاضی

در این بخش مدل‌سازی ریاضی شبکه‌ی بهینه‌ی تولید و تحویل در سیستم جریان کارگاهی انجام شده است. در این مدل دو عبارت انتقال و تحویل با دو معنای متفاوت استفاده شده‌اند. در مرحله‌ی انتقال سفارش‌های یک محدوده از محل تولیدی به محدوده‌ی مشتری عبارت «انتقال» استفاده شده است؛ در حالی‌که درگام بعدی که تحویل سفارش مشتری نهایی در داخل محدوده‌ی مشتری است، از عبارت «تحویل» استفاده شده است. در مدل پیشنهادی و به‌منظور پوشش جامع تمام حالات ممکن، در هر محدوده‌ی مشتری مرکز محدوده با یک گره مجازی مشخص شده است. این گره یا مشتری فرضی، با این فرض تعریف شده است که مشتری با میزان سفارش همیشه صفر و با شماره‌ی مشتری صفر وجود دارد که سفارش‌های هر محدوده ابتدا وارد این گره مجازی می‌شوند و سپس مسیر خود را جهت تحویل به مشتریان درون محدوده طی می‌کنند و در انتهای سفر خود مجدداً به مرکز محدوده یا گره مجازی تعریف شده باز می‌گردند.

فرضیات اصلی

- هر سفارش در هر زمان تنها روی یک ماشین تولیدی پردازش می‌شود.
- ترتیب پردازش تمام سفارش‌ها روی ماشین‌های تولیدی یکسان است.
- هر ماشین تولیدی در هر زمان فقط یک سفارش را پردازش می‌کند.
- وسایل نقلیه ظرفیت محدود دارند.
- هر سفارش تنها با یک وسیله‌ی نوع یک و دو ارسال و تحویل می‌شود و شکستگی مجاز نیست.
- هر وسیله بعد از تحویل سفارش به محل اولیه باز می‌گردد.
- هر وسیله‌ی نقلیه فقط یک‌بار مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- مجموع ظرفیت‌هایی که سفارش‌های مشتریان از وسیله‌ی نوع ۱ اشغال می‌کند کمتر از مجموع ظرفیت کل وسایل نوع ۱ است.
- مجموع ظرفیت‌هایی که سفارش‌های مشتریان از وسیله‌ی نوع ۲ اشغال می‌کند کمتر از مجموع ظرفیت کل وسایل نوع ۲ است.

پارامترهای مسئله

C تعداد محدوده‌های مشتری

c اندیس محدوده‌ی مشتری

N مجموع کل مشتریان سیستم $(C \leq N)$

n_c تعداد مشتریان محدوده‌ی مشتری cام $(N = \{n_1 + n_2 + \cdots + n_c\})$

M تعداد ماشین‌آلات تولیدی در سیستم جریان کارگاهی

V تعداد وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع ۱ با ظرفیت محدود به‌منظور انتقال سفارش‌ها به محدوده‌ی مشتری

ν'_c تعداد وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع ۲ با ظرفیت محدود به‌منظور تحویل سفارش‌ها در داخل محدوده‌ی مشتری cام

J_{ic} سفارش مشتری iام از محدوده‌ی مشتری cام $(\forall c : i = \{1, 2, 3, \ldots, n_c\})$

O_{icm} عملیات ماشین mام روی سفارش J_{ic}

P_{icm} زمان پردازش عملیات O_{icm}

f_{cv} زمان طی شده بین مرکز و محدوده‌ی مشتری cام توسط وسیله‌ی نقلیه‌ی νام نوع ۱

$q_{ic\nu}$ ظرفیت اشغال شده توسط J_{ic} از وسیله‌ی نقلیه‌ی νام نوع ۱

$f'_{ijcv'_c}$ زمان طی شده بین مشتری iام و jام از محدوده‌ی مشتری cام توسط وسیله‌ی نقلیه‌ی ν'ام نوع ۲

$q'_{icv'_c}$ ظرفیت اشغال شده توسط J_{ic} از وسیله‌ی نقلیه‌ی ν'ام نوع ۲

Q_ν ظرفیت وسیله‌ی νام نوع ۱

$Q'_{\nu'_c}$ ظرفیت وسیله‌ی ν'_cام نوع ۲

s_{ic} زمان خدمت‌دهی سفارش iام در محل محدوده‌ی مشتری cام

U عدد مثبت خیلی بزرگ

متغیرهای تصمیم مساله:

T_{icm} زمان شروع پردازش عملیات O_{icm}ام

$Z_{icjc'}$ متغیر باینری، مقدار یک: اگر سفارش J_{ic}ام زودتر از سفارش $J_{jc'}$ام مورد پردازش قرار بگیرد؛ صفر: در غیر این‌صورت

Y_{icv} متغیر باینری، مقدار یک: اگر سفارش J_{ic} توسط وسیله‌ی νام (نوع ۱) به محدوده‌ی مشتری cام منتقل شود؛ صفر: در غیر این‌صورت

Y'_{cv} متغیر باینری، مقدار یک: اگر وسیله νام (نوع ۱) سفارش‌های محدوده‌ی cام را حمل دهد؛ صفر: در غیر این‌صورت

$Y''_{ic\nu'_c}$ متغیر باینری، مقدار یک: اگر سفارش J_{ic} توسط وسیله‌ی ν' ام (نوع ۲) در محدوده‌ی مشتری cام به مشتری نهایی تحویل شود؛ صفر: در غیر این‌صورت

ST_ν زمان شروع حرکت وسیله‌ی νام نوع ۱ از مرکز تولیدی به سمت محدوده‌ی مشتری

$ST'_{cv'_c}$ زمان حرکت وسیله‌ی ν'ام نوع ۲ در داخل محل محدوده‌ی مشتری cام به‌منظور تحویل سفارش مشتریان در سفر

$X_{ijcv'_c}$ متغیر باینری، مقدار یک: اگر کمان (i,j) در محدوده‌ی مشتری c ام در مسیر طی شده ام در مسیر طی شده توسط وسیله‌ی ν'ام نوع ۲ برای تحویل قرار داشته باشد؛ صفر: در غیر این‌صورت

$B_{icv'_c}$ زمان شروع خدمت‌دهی به مشتری iام در محل محدوده‌ی مشتری cام توسط وسیله‌ی ν'ام نوع ۲

MRT زمان بازگشت آخرین وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع ۲ به محل اولیه (محل بارگیری محدوده‌ی مشتری)

مدل ریاضی

در این قسمت مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی مختلط ارائه می‌شود.

$$Minimise(MRT) \quad (۱)$$

$$Subject\ to$$

$$\begin{cases} T_{icm} + p_{icm} \le T_{jc'm} + U(۱ - Z_{icjc'}) & \forall c, c', i, j, m \\ Z_{icjc'} = ۱ - Z_{jc'ic} & (i,c) \ne (j,c') \end{cases} \quad (۲)$$

$$T_{icm} + p_{icm} \le T_{ic(m+۱)} \qquad \forall c, i, m \quad (۳)$$

$$\sum_{v=۱}^{V} Y_{icv} = ۱ \qquad \forall c, i \quad (۴)$$

$$\sum_{c=۱}^{C} Y'_{cv} = ۱ \qquad \forall \nu \quad (۵)$$

$$\sum_{i=۱}^{n_c} q_{icv} Y_{icv} \le Q_v Y'_{cv} \qquad \forall c, \nu \quad (۶)$$

$$ST_v \ge (T_{icm} + p_{icm}) - U(۱ - Y_{icv}) \qquad \forall c, i, v \quad (۷)$$

$$ST'_{cv'_c} \ge (ST_v + f_{cv}) - U(۱ - Y_{icv}) - U(۱ - Y''_{icv'_c}) \qquad \forall c, i, v, v'_c \quad (۸)$$

$$\sum_{j=۱}^{n_c} X_{۰jcv'_c} = ۱ \qquad \forall c, v'_c \quad (۹)$$

$$X_{ijc}v'_c \le Y''_{icv'_c} Y''_{jcv'_c} \qquad \forall c, i, j, v'_c; i \ne j \quad (۱۰)$$

$$\sum_{i=۰}^{n_c} X_{ikc}v'_c - \sum_{j=۰}^{n_c} X_{kjcv'_c} = ۰ \qquad \forall c, v'_c; k = ۱, ۲, \dots, n_c \quad (۱۱)$$

$$\sum_{i=۱}^{n_c} q'_{icv'_c} Y''_{icv'_c} \le Q'_{v'_c} \qquad \forall c, v'_c \quad (۱۲)$$

$$B_{icv'_c} \ge ST'_{cv'_c} - U(۱ - Y''_{icv'_c}) \qquad \forall c, i, v'_c \quad (۱۳)$$

$$B_{۰cv'_c} \ge ST'_{cv'_c} - U(۱ - \sum_{i=۰}^{n_c} X_{۰icv'_c}) \qquad \forall c, v'_c \quad (۱۴)$$

$$(B_{icv'_c} + s_{ic} + f_{ijcv'_c}) - U(۱ - X_{ijcv'_c}) \le B_{jcv'_c} \qquad \forall c, i, j, v'_c \quad (۱۵)$$

$$\sum_{v'_c=۱}^{V'_c} Y''_{icv'_c} = ۱ \qquad \forall c, i \quad (۱۶)$$

$$Y''_{icv'_c} \le \sum_{j=۰}^{n_c} X''_{jicv'_c} \qquad \forall c, i \quad (۱۷)$$

$$MRT \ge (B_{icv'_c} + s_{ic} + f_{i۰cv'_c}) - U(۱ - X_{i۰cv'_c}) \qquad \forall c, i, v'_c \quad (۱۸)$$

$$\begin{cases} Z_{icjc'}, Y_{icv}, Y'_{cv}, Y''_{icv'_c}, X_{ijcv'_c} = \{۰, ۱\} \\ T_{icm}, ST_v, ST'_{cv'_c}, B_{icv'_c}, MRT \ge ۰ \end{cases} \qquad \forall c, c', i, j, v, v'_c, m \quad (۱۹)$$

رابطه‌ی ۱ تابع هدف مدل را که کمینه‌سازی زمان بازگشت آخرین وسیله‌ی نقلیه بعد از تحویل سفارش‌ها به مشتریان نهایی در داخل محدوده‌ی مشتری است، نشان می‌دهد. دو نامساوی در رابطه‌ی ۲ نشان می‌دهند که در هر لحظه فقط پردازش یک سفارش بر روی هر ماشین تولیدی انجام می‌گیرد و هم‌چنین ترتیب انجام پردازش سفارش‌ها بر روی تمام ماشین‌ها یکسان است. سفارش‌های مشتریان مختلف بدون توجه به محدوده‌ی مشتری در سیستم تولیدی پردازش می‌شوند. رابطه‌ی ۳ بیان‌کننده‌ی

ترتیب عملیات پردازش‌های مختلف هر سفارش روی ماشین‌های متوالی است که بعد از اتمام عملیات فعلی عملیات بعدی شروع می‌شود.

محدودیت ۴ بیان می‌کند که هر سفارش از هر محدوده‌ی مشتری فقط توسط یک وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع ۱ به محل محدوده‌ی مشتری حمل می‌شود و قابل شکسته شدن نیست. محدودیت (۵) بیان می‌کند که هر وسیله نقلیه‌ی نوع ۱ فقط یک‌بار برای حمل سفارش‌های فقط یک محدوده‌ی مشتری استفاده می‌شود. در واقع فقط به یک محدوده عزیمت می‌کند. محدودیت (۶) نیز بیان‌کننده‌ی ظرفیت محدود وسیله‌ی نقلیه نوع ۱ است. محدودیت (۷) بیان می‌کند که وسیله‌ی نقلیه بعد از اتمام فرایندهای تولیدی همه‌ی سفارش‌های تخصیص داده شده به آن می‌تواند حمل را آغاز کرده و حرکت کند.

رابطه‌ی ۸ بیان‌کننده‌ی این محدودیت است که تحویل به روش مسیریابی در محدوده‌ی مشتری پس از حمل همه‌ی سفارش‌های مشتریان سفر به محدوده‌ی مشتری که ممکن است توسط وسایل نوع ۱ مختلف حمل شده باشند، آغاز می‌شود. محدودیت ۹ بیان می‌کند که هر وسیله در محدوده مشتری فقط با عزیمت به یک مشتری داخل محدوده، سفر خود به‌منظور تحویل به مشتری نهایی را آغاز می‌کند. محدودیت ۱۰ بیان می‌کند که در صورتی مسیر بین دو مشتری توسط وسیله‌ی نقلیه طی می‌شود که آن وسیله به هر دو مشتری دو سر مسیر تخصیص یافته باشد. محدودیت ۱۱ جریان ورودی و خروجی به هر مشتری را بیان می‌کند که در صورت ورود وسیله به یک مشتری همان وسیله باید از آن خارج شود و مسیر را ادامه دهد. محدودیت ۱۲ نیز بیان‌کننده‌ی ظرفیت محدود وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع ۲ است. محدودیت ۱۳ بیان می‌کند که زمان شروع خدمت‌دهی به مشتریان هر سفر بعد از عزیمت از محدوده آغاز می‌شود. محدودیت ۱۳ همچنین بیان می‌کند که زمان خدمت‌دهی به مشتری در محل خود بعد از حرکت از محل مشتری قبلی در مسیر سفر وسیله آغاز می‌شود. محدودیت ۱۴ بیان می‌کند که زمان حرکت وسیله برای تحویل بعد از رسیدن به محل محدوده‌ی مشتری آغاز می‌شود. محدودیت ۱۵ بیان می‌کند زمان خدمت‌دهی هر مشتری پس از زمان اتمام خدمت‌دهی مشتری قبلی در مسیر وسیله‌ی تخصیصی است. در ضمن گفتنی است که محدودیت ۱۵ به عنوان شکننده‌ی زیرتور برای بخش مسیریابی مدل نیز عمل می‌کند و از تولید جواب نشدنی جلوگیری می‌کند. این محدودیت باعث می‌شود که در داخل یک سفر بیش از یک تور ایجاد نشود که به این محدودیت شکننده زیرتور می‌گویند. فقط وقتی سفری از یک مشتری آغاز می‌شود که تولید آن انجام شده باشد و وسیله‌ی نقلیه هم به آن تخصیص داده شده باشد که همین امر باعث جلوگیری از ایجاد زیرتور می‌شود. توث و ویگو[۳۴] و میلر و همکاران[۳۵] در تحقیقات خود به شکننده‌ی زیرتور پرداخته‌اند. محدودیت ۱۶ بیان می‌کند که تقاضای هر مشتری از هر محدوده مشتری فقط با یک وسیله حمل تحویل می‌شود. محدودیت ۱۷ بیان می‌کند که وسیله‌ی حمل نهایی به یک مشتری در صورتی تخصیص داده می‌شود که از یک مشتری دیگر در همان محدوده به آن مشتری عزیمت کرده باشد. محدودیت ۱۸ بیان‌کننده‌ی رابطه‌ی زمان بازگشت وسیله‌ی نوع ۲ به محدوده‌ی مشتری است که برابر زمان رسیدن وسیله به آخرین مشتری سفر به‌علاوه‌ی زمان خدمت‌دهی سفارش در محل مشتری مذکور به‌علاوه‌ی زمان عزیمت از آخرین مشتری به محدوده‌ی مشتری مربوطه است. در انتها محدودیت ۱۹ نیز تعریف‌کننده‌ی نوع متغیرهای مدل است. با توجه به این‌که مدل پیشنهادی فقط به‌علت وجود محدودیت ۱۰ غیرخطی شده است، محدودیت ۱۰ با تعریف متغیر کمکی $YY_{ijcv'_c} \geq 0$ و $YY_{ijcv'_c} = Y''_{icv'_c} \times Y''_{jcv'_c}$ (که فقط در صورت مقدار گرفتن دو متغیر مربوطه مقدار خواهد گرفت) و با اضافه کردن ۴ محدودیت زیر خطی می‌شود:

$$X_{ijcv'_c} \leq YY_{ijcv'_c} \quad \forall i,j,c,v'_c; i \neq j \quad (۲۰)$$

$$YY_{ijcv'_c} \leq Y''_{icv'_c} \quad \forall i,j,c,v'_c; i \neq j \quad (۲۱)$$

$$YY_{ijcv'_c} \leq Y''_{jcv'_c} \quad \forall i,j,c,v'_c; i \neq j \quad (۲۲)$$

$$1 + YY_{ijcv'_c} = Y''_{icv'_c} + Y''_{jcv'_c} \quad \forall i,j,c,v'_c; i \neq j \quad (۲۳)$$

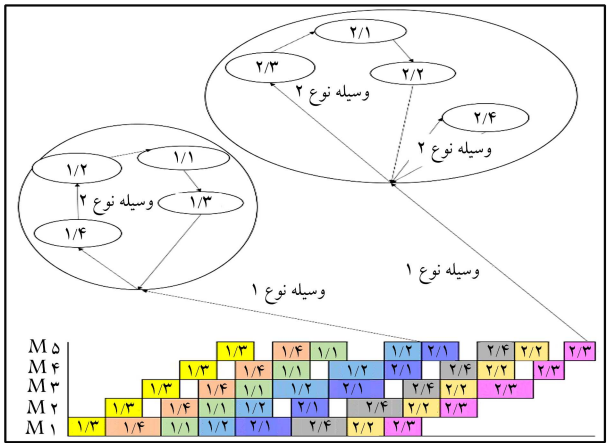
۳. نتایج محاسباتی و تحلیل حساسیت

با توجه به جدید بودن مدل پیشنهادی و عدم دسترسی نویسندگان به مسائل عددی استاندارد برای سنجش عملکرد مدل پیشنهادی، در این بخش ابتدا به‌صورت تصادفی مسائل عددی استاندارد تولید و سپس این مسائل حل می‌شوند. به این منظور از داده‌های استاندارد موجود در پیشینه‌ی زمان‌بندی تولید استفاده شده و سه دسته مسائل عددی در اندازه‌ی مسئله‌های کوچک، متوسط و بزرگ تولید شده است؛ داده‌های آن‌ها به کمک جدول ۱ به صورت تصادفی تولید شده‌اند.

پس از تولید تصادفی داده‌های مسائل عددی در اندازه‌های مختلف، مسائل با استفاده از نرم‌افزار حل دقیق گمز حل شده و جواب نهایی آن‌ها به تفصیل در جدول ۲ آورده شده است. در جدول ۲، ستون‌های اول تا چهارم به ترتیب اندازه‌ی مسئله، تعداد کل مشتریان شبکه، تعداد ماشین‌های موجود در مرکز تولیدی فرایندهای سیستم جریان کارگاهی و تعداد محدوده‌ی مشتریان و تعداد مشتریان هر محدوده را نشان می‌دهند. ستون پنجم جواب بخش تولید شبکه است که ترتیب حرکت سفارش‌ها به ماشین‌های اول تا پنجم تولیدی را نشان می‌دهد. ستون ششم انتقال سفارش‌ها با وسیله‌ی نوع یک که بر اساس ظرفیت به محدوده‌ی مشتری و به روش ارسال مستقیم انجام می‌شود، را نشان می‌دهد و ستون آخر نیز مسیریابی درون محدوده‌ی مشتری با وسیله‌ی نوع ۲ برای تحویل سفارش‌ها در داخل محدوده را نشان می‌دهد. گفتنی است که ابتدا و انتهای هر مسیر مرکز محدوده مشتری است که تحویل از آن‌جا آغاز و به آن‌جا ختم می‌شود. به‌عنوان نمونه در مسئله‌ی اول با اندازه‌ی کوچک دو محدوده‌ی مشتری وجود دارد که هر کدام دارای ۴ مشتری در محدوده‌ی خود هستند. در جواب مدل، سفارش‌های هر محدوده با یک وسیله‌ی نوع یک جداگانه منتقل می‌شود و در داخل محدوده سفارش‌های مشتریان محدوده‌ی ۱ با یک وسیله‌ی نوع ۲ مسیریابی و تحویل نهایی می‌شوند. در صورتی‌که در محدوده‌ی ۲ به علت تعداد سفارش‌ها و محدودیت ظرفیت از دو وسیله‌ی نوع ۲ برای مسیریابی و تحویل نهایی استفاده شده است. در مسئله‌ی دوم که محدوده‌ی اول ۸ و محدوده‌ی دوم ۱۲ مشتری در خود جای داده است، ابتدا توالی عملیات جریان کارگاهی به دست آمده است. سپس با توجه به ظرفیت وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع ۱ سفارش‌های هر محدوده فقط با یک وسیله منتقل شده‌اند و در مسیریابی تحویل نیز محدوده‌ی دوم به ۲ وسیله‌ی نوع ۲ برای مسیریابی به علت محدودیت ظرفیت نیاز دارد. در مسئله با اندازه‌ی بزرگ که ۴۰ مشتری با ۴ محدوده در نظر گرفته شده است نیز تحویل در محدوده‌ی مشتریان به ترتیب با ۲، ۲، ۳ و ۳ وسیله‌ی نوع ۲ انجام می‌شود. شکل ۲ نمونه‌یی تصویری از جواب بهینه‌ی مسئله‌ی اول را نشان داده است. در جدول ۲ عددی که سمت چپ جداکننده قرار دارد شماره‌ی مشتری و عدد سمت راست محدوده‌ی مشتری است. مثلاً ۱٫۲ نشان‌دهنده‌ی مشتری شماره‌ی ۱ از محدوده‌ی شماره‌ی ۲ است (مشتری اول از محدوده‌ی دوم). در حالی‌که ۲.۱

جدول ۱. نحوه‌ی تولید داده‌های مسائل عددی.

اندازه‌ی مسئله	تعداد مشتریان	داده‌های فرایندهای تولیدی	تعداد محدوده‌ی مشتریان	محل قرارگیری مرکز تولیدی	محل قرارگیری		ظرفیت		
					مرکز محدوده‌ی مشتری	مشتریان در محدوده	اشغال‌کننده سفارش‌ها	وسیله‌ی نوع ۱	وسیله‌ی نوع ۲
کوچک	۸	از داده‌های استاندارد نمونه‌های [۳۶-۳۸]	۲	(۵۰۰ و ۵۰۰)	(۶۲۵۰ و ۳۲۵۰) (۳۷۵۰ و ۵۲۵۰)	پراکندگی یکنواخت اطراف مرکز محدوده به صورت تصادفی	اعدا تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه‌ی (۲و۹)	یکنواخت (۱۰۰ و۵۰)	یکنواخت (۲۰ و۳۰)
متوسط	۲۰		۲		(۶۲۵۰ و ۳۲۵۰) (۳۷۵۰ و ۵۲۵۰)				
بزرگ	۴۰		۴		(۶۲۵۰ و ۳۲۵۰) (۳۷۵۰ و ۵۲۵۰) (۳۲۵۰ و ۳۲۵۰) (۶۲۵۰ و ۶۲۵۰)				



شکل ۲. نمایش کامل جواب نهایی مسئله با اندازه‌ی کوچک.

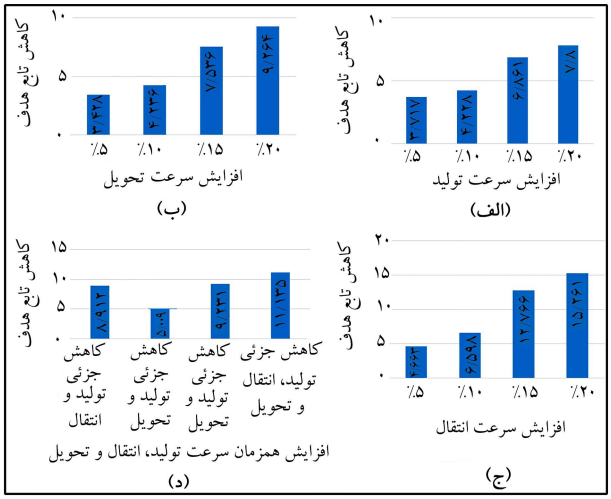
نشان‌دهنده‌ی مشتری شماره‌ی ۲ از محدوده‌ی شماره‌ی ۱ است (مشتری دوم از محدوده‌ی اول).

تحلیل حساسیت

با توجه به هدف تحقیق که معرفی شبکه‌ی بهینه‌سازی برای اولین‌بار است، در این قسمت تحلیل حساسیتی بر روی نمونه‌های بالا انجام و نتایج آن تحلیل شده‌اند. در این قسمت چهار سیاست کلی برای بهبود شبکه پیشنهاد می‌شود و این چهار پیشنهاد به کمک تحلیل حساسیت می‌توانند در تصمیم‌گیری مدیران مؤثر باشند که این سیاست‌ها عبارت‌اند از:

الف) کاهش زمان‌های تولید با اعمال بهبودهای جزئی (نظیر تعمیرات جزئی ماشین‌ها، نگهداری و تعمیرات و ...) در سطوح ۵ و ۱۰٪ و بهبود اساسی (نظیر تعویض تعدادی از ماشین‌آلات، فرایندهای تولیدی و ...) در سطوح ۱۵ و ۲۰٪؛

ب) کاهش زمان‌های انتقال از مرکز تولیدی به محدوده‌ی مشتریان با بهبود جزئی (نظیر تعمیرات جزئی وسیله‌ها، نگهداری و تعمیرات بهتر وسیله‌ها و ...) و اساسی (نظیر تعویض وسیله‌ی نوع ۲، استفاده از راننده‌ی بهتر و ...) بر روی وسیله‌ی



شکل ۳. نمودارهای تحلیل حساسیت.

حمل نوع ۱ (در سطوح ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪ نظیر الف)؛

ج) کاهش زمان‌های تحویل از مرکز محدوده به مشتریان با بهبود جزئی (نظیر تعمیرات جزئی وسیله‌ها، نگهداری و تعمیرات بهتر وسیله‌ها و ...) و اساسی (نظیر تعویض وسیله‌ی نوع ۲، استفاده از راننده‌ی بهتر، استفاده از طرح‌های ترافیکی و ...) در وسیله‌ی حمل نوع ۲ (در سطوح ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪ نظیر الف)؛

د) بهبودهای جزئی همزمان (کاهش زمان تولید، انتقال و تحویل در سطح ۵٪ به‌صورت همزمان و ترکیبی).

برای هر یک از ۱۶ مورد سیاست بهبود تابع هدف که توضیح داده شدند داده‌های مسئله‌ی عددی با اندازه‌ی بزرگ در بخش قبل روزآمد شده و مجدداً حل شده‌اند و نتایج آن‌ها به‌منظور تحلیل حساسیت تأثیر تصمیمات مختلف بر روی جواب بهینه‌ی مدل نسبت به سیاست‌های بهبودی پیشنهادی، در جدول ۳ آورده شده‌اند: بر اساس جدول ۳، نمودارهای چهارگانه در شکل ۳ ترسیم و تحلیل شده‌اند: مطابق جدول ۳ و نمودارهای شکل ۳ ـ الف، ۳ ـ ب و ۳ ـ ج در هر سه مورد سرعت تولید، انتقال و توزیع

جدول ۲. جواب مسائل عددی تصادفی تولید شده.

مسئله‌ی عددی	تعداد مشتریان	تعداد ماشین آلات	تعداد مشتری محدوده مشتریان	ترتیب سفارش‌ها در فرایند تولیدی	ارسال مستقیم با وسیله‌ی نوع ۱	مسیریابی درون محدوده‌ی مشتری
کوچک	۸	۵	محدوده اول: ۴ مشتری محدوده دوم: ۴ مشتری	۳/۱ ← ۴/۱ ← ۱/۱ ← ۲/۱ ← ۱/۲ ← ۴/۲ ← ۲/۲ ← ۳/۲	محدوده ۱: وسیله ۱ محدوده ۲: وسیله ۲	۱/۱ ← ۳/۱ ← ۰/۱ ۰/۱ ← ۴/۱ ← ۲/۱ ← ۰/۲ ← ۴/۲ ← ۰/۲ ۱/۲ ← ۲/۲ ← ۰/۲ ← ۳/۲ ← ۰/۲
متوسط	۲۰	۵	محدوده اول: ۸ مشتری محدوده دوم: ۱۲ مشتری	۹/۲ ← ۲/۱ ← ۴/۱ ← ۲/۲ ← ۱/۱ ← ۶/۱ ← ۵/۱ ← ۷/۲ ← ۳/۱ ← ۷/۱ ← ۸/۱ ← ۸/۲ ← ۶/۲ ← ۵/۲ ← ۱۱/۲ ← ۱۲/۲ ← ۳/۲ ← ۴/۲ ← ۱/۲ ← ۱۰/۲	محدوده ۱: وسیله ۱ محدوده ۲: وسیله ۲	۶/۱ ← ۱/۱ ← ۴/۱ ← ۸/۱ ← ۰/۱ ← ۷/۱ ← ۳/۱ ← ← ۲/۱ ← ۵/۱ ← ۰/۱ ۵/۲ ← ۳/۲ ← ۱۰/۲ ← ۰/۲ ← ۱/۲ ← ۹/۲ ← ۱۲/۲ ← ۶/۲ ← ۷/۲ ← ۰/۲ ← ۲/۲ ← ۱۱/۲ ← ۰/۲ ۰/۲ ← ۸/۲ ← ۴/۲ ←
بزرگ	۴۰	۵	محدوده اول: ۸ مشتری محدوده دوم: ۱۲ مشتری محدوده سوم: ۱۰ مشتری محدوده چهارم: ۱۰ مشتری	۳/۴ ← ۴/۱ ← ۴/۲ ← ۴/۳ ← ۴/۴ ← ۵/۱ ← ۵/۲ ← ۵/۳ ← ۵/۴ ← ۶/۱ ← ۶/۲ ← ۶/۳ ← ۷/۱ ← ۷/۲ ← ۷/۳ ← ۳/۳ ← ۶/۴ ← ۷/۴ ← ۹/۳ ← ۲/۴ ← ۹/۲ ← ۱۱/۲ ← ۸/۳ ← ۸/۱ ← ۸/۲ ← ۱۰/۳ ← ۹/۴ ← ۸/۴ ← ۱۰/۴ ← ۱۰/۲ ← ۱۲/۲ ← ۲/۳ ← ۳/۱ ← ۱/۲ ← ۱/۱ ← ۲/۱ ← ۳/۲ ← ۲/۲ ← ۱/۳ ← ۱/۴	محدوده ۱: وسیله ۱ محدوده ۲: وسیله ۲ محدوده ۳: وسیله ۳ محدوده ۴: وسیله ۴	۱/۱ ← ۷/۱ ← ۲/۱ ۰/۱ ← ۳/۱ ← ۵/۱ ← ۸/۱ ← ← ۰/۱ ۰/۱ ← ۶/۱ ← ۴/۱ ← ۰/۱ ۴/۲ ← ۸/۲ ← ۱۰/۲ ← ۰/۲ ← ۹/۲ ← ۳/۲ ← ۵/۲ ← ۶/۲ ← ۰/۲ ۱۲/۲ ← ۱۱/۲ ← ۲/۲ ← ۱/۲ ← ۰/۲ ← ۷/۲ ← ۰/۲ ۰/۳ ← ۱/۳ ← ۸/۳ ← ۰/۳ ۳/۳ ← ۹/۳ ← ۰/۳ ۰/۳ ← ۱۰/۳ ← ۴/۳ ← ۵/۳ ← ۲/۳ ← ۰/۳ ۰/۳ ← ۶/۳ ← ۷/۳ ← ۸/۴ ← ۴/۴ ← ۰/۴ ← ۲/۴ ← ۰/۴ ۰/۴ ← ۵/۴ ← ۷/۴ ← ۰/۴ ۶/۴ ← ۱۰/۴ ← ۰/۴ ۰/۴ ← ۱/۴ ← ۳/۴ ← ۹/۴ ←

هر چه سرعت افزایش پیدا می‌کند میزان کاهش در تابع هدف نیز افزایش پیدا می‌کند؛ ولی با افزایش سرعت انتقال میزان کاهش در تابع هدف بیشتر از تولید و تحویل کاهش پیدا می‌کند که نشان از تأثیر بیشتر انتقال نسبت به تولید و تحویل دارد. کمترین کاهش در تابع هدف با افزایش ۵ درصدی سرعت تحویل و بیشترین کاهش آن نیز در افزایش ۲۰ درصدی سرعت انتقال اتفاق می‌افتد. مطابق نمودارهای بالا با افزایش هر سه سرعت تولید و انتقال و توزیع از ۱۰ به ۱۵ بیشترین جهش در کاهش تابع هدف مشاهده می‌شود. در نمودار شکل ۳ ـ د، تأثیر هم‌زمان تولید، انتقال و تحویل بر روی تابع هدف بررسی شده است. با افزایش ۵ درصدی سرعت تولید و انتقال به‌صورت مجزا که هرکدام به ترتیب ۳٫۷ و ۴٫۷ درصد کاهش در تابع هدف داشتند، در حالی‌که ۸٫۹ درصد کاهش در تابع هدف به ازای افزایش هم‌زمان تولید و انتقال به میزان ۵ درصد اتفاق می‌افتد. با افزایش ۵ درصدی سرعت تولید و تحویل به‌صورت مجزا که هرکدام به ترتیب ۳٫۷ و ۳٫۴ درصد کاهش در تابع هدف داشتند در حالی‌که ۵ درصد کاهش در تابع هدف به ازای افزایش هم‌زمان تولید و تحویل به میزان ۵ درصد اتفاق می‌افتد. به‌همین ترتیب با افزایش ۵ درصدی سرعت انتقال و تحویل به‌صورت مجزا

جدول ۳. نتایج محاسباتی تحلیل حساسیت.

محل اعمال سیاست بهبود	سطح بهبود	درصد کاهش برای اعمال سیاست بهبود	درصد کاهش تابع هدف
زمان تولید	جزئی	۵	۳٫۷
		۱۰	۴٫۲
	اساسی	۱۵	۶٫۹
		۲۰	۷٫۸
زمان انتقال	جزئی	۵	۴٫۷
		۱۰	۶٫۶
	اساسی	۱۵	۱۲٫۸
		۲۰	۱۵٫۳
زمان تحویل	جزئی	۵	۳٫۴
		۱۰	۴٫۲
	اساسی	۱۵	۷٫۵
		۲۰	۹٫۳
زمان تولید وانتقال	هردوجزئی	هردو ۵	۸٫۹
زمان تولید و تحویل	هردو جزئی	هردو ۵	۵
زمان انتقال و تحویل	هردوجزئی	هردو ۵	۹٫۲
زمان تولید، انتقال و تحویل	هر سه جزئی	هرسه ۵	۱۱٫۱

که هرکدام به‌ترتیب ۴٫۷ و ۳٫۴ درصد کاهش در تابع هدف داشتند در حالی‌که ۹٫۲ درصد کاهش در تابع هدف به ازای افزایش هم‌زمان انتقال و تحویل به میزان ۵ درصد اتفاق می‌افتد. درانتها نیز با افزایش هم‌زمان هر سه سرعت تولید و انتقال و تحویل شاهد کاهش ۱۱٫۱ درصدی تابع هدف هستیم. درکل تأثیر انتقال از بقیه بیشتر است و بین تولید و تحویل نیز تأثیر تحویل بیشتر از تولید است.

۴. کاربرد مدل پیشنهادی

از صنایع تولید مصنوعات چوبی می‌توان به عنوان یک نمونه‌ی کاربردی کاملاً منطبق بر روی مؤلفه‌های شبکه‌ی پیشنهادی نام برد. در این صنایع با توجه به مشخصات فرایندهای تولیدی که از ایستگاه‌های کاری برای تولید در مراحل مختلف از مواد اولیه تا محصول نهایی استفاده می‌کنند، می‌توان گفت که از سیستم جریان کارگاهی برای فرایند تولیدی خود کمک می‌گیرند. در این کارخانه‌ها در بازه‌های زمانی خاصی از سال (مانند شهریور و اسفند) حجم بالایی از مشتریان از محدوده‌های جغرافیایی مختلف و نسبتاً با فواصل زیاد از هم (مناطق شهرداری مختلف تهران و شهرستان‌های اطراف تهران) با مرکز تماس گرفته و درخواست خود را ارائه می‌دهند. پس از جمع‌آوری سفارش‌ها توسط واحد تولید سفارش‌ها در مرکز تولیدی و خدماتی پردازش و بارگیری و ارسال می‌شوند. در شبکه‌ی پیشنهادی تعدادی کامیونت (وسیله‌ی نوع ۱) سفارش‌های محدوده‌های مختلف را به مرکز محدوده می‌رسانند و آماده‌ی تحویل به وسایل نوع ۲ می‌شوند. با توجه به این‌که سفارش‌ها در محدوده‌های مشتری آماده‌ی تحویل نهایی به مشتریان قرار دارند و برای هر محدوده‌ی مشتری یک یا چند خاور یا وانت‌بار (وسیله‌ی نوع ۲) برای توزیع سفارش‌ها درون محدوده مورد استفاده قرار می‌گیرند لذا وسایل نقلیه نوع ۲، سفارش‌ها را با توجه به ظرفیت خود از طریق مسیریابی با کمترین زمان به مشتری تحویل می‌دهند و به مرکز محدوده باز می‌گردند.

۵. نتیجه‌گیری

دراین مقاله، ابتدا لزوم یکپارچه‌سازی فرایندهای تولید و تحویل در صورتی‌که زمان‌بندی تولید در سیستم جریان کارگاهی و انتقال و تحویل محصول به مشتری به روش ارسال مستقیم و مسیریابی باشند، تبیین شده است؛ سپس برای اولین‌بار شبکه‌ی بهینه‌ی یکپارچه تولید، انتقال و توزیع با وسایل نقلیه‌ی محدود با ظرفیت محدود ارائه شده و مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی مختلط ارائه شده است. این شبکه برای سیستم‌هایی که مشتریانشان درگستره‌ی وسیع جغرافیایی قرار دارند بسیار مناسب است و به‌همین دلیل مفهوم محدوده‌ی مشتری معرفی شده است. تابع هدف مدل بیشترین زمان بازگشت که زمان تحویل آخرین سفارش به مشتری مربوطه و بازگشت وسیله‌ی مورد نظر به مرکز محدوده‌ی مشتری است، در نظرگرفته شده است. در این پژوهش از مفهوم محدوده‌ی مشتری برای روش ارسال مستقیم از مرکز تولیدی به مرکز محدوده استفاده شده است. مسائل عددی در اندازه‌های مختلف به‌صورت تصادفی تولید شده و با کمک نرم‌افزارگمز حل شده‌اند و نتایج به دست آمده نشان از کارایی بالای مدل داشت. به‌منظور بررسی تأثیر تصمیمات مختلف بر روی تابع هدف نهایی نیز به تفصیل تحلیل حساسیت انجام شد که نشان از تأثیر بالای انتقال و وسیله‌ی نوع ۱ بر روی تابع هدف داشت. درانتها نیز یک نمونه‌ی واقعی از کاربرد شبکه‌ی بهینه‌ی پیشنهادی در صنایع تولید مصنوعات چوبی توضیح داده شده است. برای تحقیقات آتی می‌توان از سایر سیستم‌های تولیدی غیراز جریان کارگاهی در مدل‌سازی شبکه استفاده کرد و همچنین استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری نظیر جستجوی فاخته،[3] الگوریتم کرم شب‌تاب[4] و الگوریتم خفاش[5] برای حل مدل شبکه پیشنهاد می‌شود.

پانوشت‌ها

1. shop center
2. customer area
3. cuckoo search algorithm
4. firefly algorithm
5. bat algorithm

منابع (References)

1. Rasti-Barzoki, M. and Hejazi, S.R. "Minimizing the weighted number of tardy jobs with group due date assignment and capacity-constrained deliveries", *International Journal of Industrial Engineering & Production Management*, **24**, pp. 203-214 (2013).
2. Khodabandeh, M., Hejazi, S.R. and Rasti-Barzoki, M. "A genetic algorithm for an integrated production and distribution scheduling problem with VRP", *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, **1**, pp. 167-181 (2014).
3. Thomas, D.J. and Griffin, P.M. "Coordinated supply chain management", *European Journal of Operational Research*, **94**, pp. 1-15 (1996).
4. Potts, C.N. "Analysis of a heuristic for one machine sequencing with release dates and delivery times", *Operations Research*, **28**, pp. 1436-1441 (1980).
5. Hall, L.A. and Shmoys, B. "Jackson_s rule for single-machine scheduling: making a good heuristic better", *Mathematics of Operations Research*, **17**, pp. 22-35 (1992).
6. Herrmann, J.W. and Lee, C.Y. "On scheduling to minimize earliness-tardiness and batch delivery costs with a common due date", *European Journal of Operational Research*, **70**, pp. 272-288 (1993).
7. Yuan, J. "A note on the complexity of single-machine scheduling with a common due date, earliness-tardiness, and batch delivery costs", *European Journal of Operational Research*, **94**, pp. 203-205 (1996).
8. Chen, Z. L. "Scheduling and common due date assignment with earliness-tardiness penalties and batch delivery costs", *European Journal of Operational Research*, **93**, pp. 49-60 (1996).
9. Cheng, T.C.E., Gordon, V.S. and Kovalyov, M.Y. "Single machine scheduling with batch deliveries", *European Journal of Operational Research*, **94**, pp. 277-283 (1996).
10. Yang, X. "Scheduling with generalized batch delivery dates and earliness penalties", *IIE Transactions*, **32**, pp. 735-741 (2000).
11. Lee, C.Y. and Chen, Z.L. "Machine scheduling with transportation considerations", *Journal of Scheduling*, **4**, pp. 3-24 (2001).
12. Hall, N.G. and Potts, C.N. "Supply chain scheduling: batching and delivery", *Operations Research*, **51**, pp. 566-584 (2003).
13. Chang, Y.C. and Lee, C.Y. "Machine scheduling with job delivery coordination", *European Journal of Operational Research*, **158**, pp. 470-487 (2004).
14. Li, C.L. Vairaktarakis, G. and Lee, C.Y. "Machine scheduling with deliveries to multiple customer locations", *European Journal of Operational Research*, **164**, pp. 39-51 (2005).
15. He, Y., Zhong, W. and Gu, H. "Improved algorithms for two single machine scheduling problems", *Theoretical Computer Science*, **363**, pp. 257-265 (2006).
16. Zhong, W.Y. Dosa, G. and Tan, Z.Y. "On the machine scheduling problem with job delivery coordination", *European Journal of Operational Research*, **182**, pp. 1057-1072 (2007).
17. Su, C.Sh., Pan, J.C.H. and Hsu, T.S. "A new heuristic algorithm for the machine scheduling problem with job delivery coordination", *Theoretical Computer Science*, **410**, pp. 2581-2591 (2009).
18. Chen, B. and Lee, C.Y."Logistics scheduling with batching and transportation", *European Journal of Operational Research*, **189**, pp. 871-876 (2008).
19. Liu, P. and Lu, X. "An improved approximation algorithm for single machine scheduling with job delivery", *Theoretical Computer Science*, **412**, pp. 270-274 (2011).
20. Lee, I.S. "A coordinated scheduling of production-and-delivery under dynamic delivery cost environments", *Computers & Industrial Engineering*, **81**, pp. 22-35 (2015).
21. Hajiaghaei-Keshteli, M. and Aminnayeri, M. "Solving the integrated scheduling of production and rail transportation problem by keshtel algorithm", *Appl. Soft-Comput*, **25**, pp. 184-203 (2014).
22. Woeginger, G.J. "Heuristics for parallel machine scheduling with delivery times", *Acta Informatica*, **31**, pp. 503-512 (1994).
23. Wang, G. and Cheng, T.C.E. "Parallel machine scheduling with batch delivery costs", *International Journal of Production Economics*, **68**, pp. 177-183 (2000).
24. Lu, L. Yuang, J. and Zhang, L. "Single machine scheduling with release dates and job delivery to minimize the makespan", *Theoretical Computer Science*, **393**, pp. 102-108 (2008).
25. Ullrich, C.A. "Integrated machine scheduling and vehicle routing with time windows", *European Journal of Operational Research*, **227**, pp. 152-165 (2013).
26. Wan, L. and Zhang, A. "Coordinated scheduling on parallel machines with batch delivery", *International Journal of Production Economics*, **150**, pp. 199-203 (2014).
27. Guoa, H., Zhanga, D., Leung, S.Y.S. and et al. "A bi-level evolutionary optimization approach for integrated-production and transportation scheduling", *Applied Soft Computing*, **42**, pp. 215-228 (2016).
28. Liao, C.J. Kuo, Y.W., Chung, T.P. and et al. "Integrating production and trans-portation scheduling in a two-stage supply chain", *European Journal of Industrial Engineering*, **9**, pp. 327-343 (2015).
29. Yuan, J., Soukhal, A., Chen, Y. and et al. "A note on the complexity of flow shop scheduling with transportation constraints", *European Journal of Operational Research*, **178**, pp. 918-925 (2007).
30. Pan, J.C.H., Wu, C.L., Huang, H.C. and et al. "Coordinating scheduling with batch deliveries in a two-machine flow shop", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **40**, pp. 607-616 (2009).
31. Chen, Z.-L. "Integrated production and outbound distribution scheduling: review and extensions", *Operations Research*, **58**, pp. 130-148 (2010).

32. Murphy, K. *Machine learning a Probabilistic Perspective*, MIT Press (2012).

33. Hu, T.-L. and Sheu, J.-B. "A fuzzy-based customer classi$cation method for demand-responsive logistical distribution operations", *Fuzzy Sets and Systems*, **139**, pp. 431-450 (2003).

34. Toth, P. and Vigo, D. "Models, relaxations and exact approaches for the capacitated vehicle routing problem", *Discrete Applied Mathematics*, **123**, pp. 487-512 (2002).

35. Miller, C.E. Tucker, A.W. and Zemlin, R.A. "Integer programming formulations and traveling salesman problems", *Journal of the Association for Computing Machinery*, **7**, pp. 326-329 (1960).

36. Carlier, J. "Ordonnancements a contraintes disjonctives", *Recherche perationelle/Operations Research*, **12**, pp. 333-351 (1978).

37. Reeves, C.R. "A genetic algorithm for flow shop sequencing", *Computers & Operations Research*, **22**, pp. 5-11 (1995).

38. Taillard, E. "Benchmarks for basic scheduling problems", *European Journal of Operational Research*, **64**, pp. 278-285 (1993).