

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

Original Article

علی چراغعلی‌خانی (استادیار)
 دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تفرش

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 درگسترده و وسیع جغرافیایی پراکنده‌اند، در این مقاله شبکه‌ی بهینه‌ی 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 محدودی مشتریان، در شبکه‌ی پیشنهادی انتقال محصول به مراکز محدودی مشتریان به روش ارسال مستقیم و همچنین تحویل در داخل محدودی مشتریان به روش مسیریابی انجام شده است. به منظور 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.

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 قرار گرفته است.^[۱] زنجیره‌ی تأمین تمام تعاملات بین تأمین‌کننده، تولیدکننده، توزیع‌کننده و مشتری نهایی را به منظور 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 به منظور افزایش رضایت‌مندی مشتری تأکید شده است.^[۲] در بسیاری از سیستم‌های تولیدی محصول نهایی بعد از اتمام فرایندهای خود باید به سرعت و بدون اتلاف وقت به مشتری نهایی تحویل داده شود. در این تحقیق فرایندهای تولید، انتقال و تحویل به مشتری نهایی به صورت یکپارچه در نظر گرفته

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۵/۲۱، اصلاحیه ۱۳۹۶/۹/۱۸، پذیرش ۱۳۹۶/۱۰/۵.

DOI:10.24200/J65.2019.7166.1731

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 هروسیله‌ی 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 به منظور رسیدن به کارایی بهتر، تولید و انتقال و توزیع باید به صورت یکپارچه بررسی و برنامه‌ریزی شوند.^[۳] همچنین

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 به عبارتی فرض محدود بودن تولیدکننده از نظر بعد جغرافیایی در نظر گرفته شده است. در حالی که بسیاری از تولیدکنندگان از سیستم جریان کارگاهی برای تولید استفاده می‌کنند و همچنین با توجه به گستردگی وسیع جغرافیایی محل قرارگیری مشتریان نمی‌توانند از مدل‌های موجود استفاده کنند. از این رو، در این مقاله برای اولین بار به مدل‌سازی و طراحی شبکه‌ی بهینه‌ی تولید، انتقال و توزیع یکپارچه که به صورت هم‌زمان در سه سطح تولید محصولات در سیستم جریان کارگاهی، انتقال به روش ارسال مستقیم به مرکز توزیع در مرکز محدودی مشتری و تحویل محصولات به روش مسیریابی به مشتری نهایی در نظر گرفته و پیشنهاد شده است. در شبکه‌ی یکپارچه‌ی پیشنهادی، برنامه‌ریزی و تصمیمات تولید و انتقال و تحویل محصولات به مشتری نهایی به صورت 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 به همراه 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 گستردگی جغرافیایی وسیع محل قرارگیری مشتریان، مفهوم محدودی مشتری^۲ معرفی می‌شود. محدودی مشتری به محل قرارگیری تعدادی از مشتریان که از نظر جغرافیایی در نزدیکی هم قرار دارند و فواصل آن‌ها از هم به صورت قابل توجهی از فاصله‌شان از مرکز تولیدی کمتر و به عبارتی قابل چشم‌پوشی هنگام مدل‌سازی است، گفته می‌شود. شکل ۱ طرح‌واره‌ی گرافیکی از مفهوم محدودی مشتریان به منظور درک بهتر را نشان داده است.

مثلاً می‌توان از دو رویکرد خوشه‌بندی (Clustering) و گروه‌بندی مشتریان به‌عنوان روش‌های متداول و پرکاربرد برای تعیین محدودی 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

تأکید شده است که جدا در نظر گرفتن این دو دسته از فعالیت‌های کلیدی سازمان به نتایج مطلوب نمی‌رسد.^[۱] 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 نظر گرفتن تعداد کافی وسیله‌ی حمل که بلافاصله محصول نهایی را به مشتری تحویل می‌دهند، بررسی کردند. در مطالعات هرمان و لی،^[۶] یوان،^[۷] چن^[۸] و چنگ و همکاران^[۹] بعد از اتمام فرایندهای تولیدی، محصول نهایی توسط وسایل نقلیه با ظرفیت محدود ولی با تعداد کافی در دسترس به مشتری تحویل داده می‌شود. 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 آغاز کردند. هال و پاتس^[۱۲] نیز مدل یکپارچه‌ی تولید و تحویل را برای فضای تک‌ماشینه‌ی تولیدی در نظر گرفتند و تابع هدف خود را هزینه‌ی کلی تحویل و تولید گرفتند. چنگ و لی^[۱۳] همین مطالعه را با فرض فضاها متفاوت برای سفارش‌های مختلف گسترش دادند. لی و همکاران^[۱۴] مدل یکپارچه‌ی زمان‌بندی تولید تک‌ماشینه و مسیریابی وسیله‌ی نقلیه را با هدف کمیته‌سازی 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 بهبوددهنده‌ی 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 کمیته‌سازی زمان تکمیل سفارش‌ها ارائه کردند. لی^[۲۰] مدل یکپارچه‌ی تک‌ماشینه‌ی بدون پیش‌نیازی و ارسال به یک مشتری را ارائه کردند. خدابنده و همکاران^[۲۱] 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^[۲۲] 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 نظر گرفته شده‌اند.

از طرفی وگینگر^[۲۳] مدل یکپارچه خود را برای ماشین‌های موازی ارائه و روشی ابتکاری پیشنهاد کرده است. ونگ و چنگ^[۲۴] 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^[۲۵] مطالعه‌ی مشابهی را در تولید دسته‌ی پیشنهاد کردند. آلریچ^[۲۶] مدل یکپارچه‌ی برای تولید ماشین‌های موازی و تحویل با وسیله‌ی نقلیه با ظرفیت محدود و پنجره‌ی زمانی ارائه کرد. ون و ژنگ^[۲۶] تولید با MI 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. لیو و همکاران^[۲۸] نیز الگوریتمی ابتکاری برای حل مدل یکپارچه‌ی زمان‌بندی ماشین‌های موازی و تحویل ارائه کردند.

یوان و همکاران^[۲۹] برای اولین بار 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

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 حالی که در گام بعدی که تحویل سفارش مشتری نهایی در داخل محدوده‌ی مشتری است، از عبارت «تحویل» استفاده شده است. در مدل پیشنهادی و به منظور 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 یک بار 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 c ($N = \{n_1 + n_2 + \dots + n_c\}$)

M تعداد ماشین‌آلات تولیدی در سیستم جریان کارگاهی

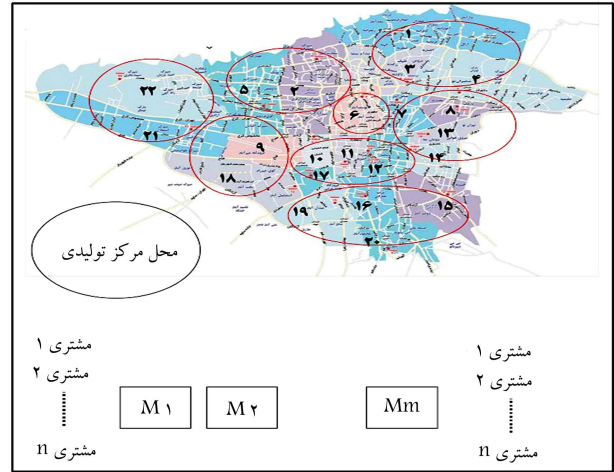
V تعداد وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع ۱ با ظرفیت محدود به منظور انتقال سفارش‌ها به محدوده‌ی مشتری

V'_c تعداد وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع ۲ با ظرفیت محدود به منظور تحویل سفارش‌ها در داخل محدوده‌ی مشتری c

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

O_{icm} عملیات ماشین m ام روی سفارش J_{ic}

P_{icm} زمان پردازش عملیات O_{icm}



شکل ۱. طرح‌واره‌ی گرافیکی برای نشان دادن محدوده مشتریان.

اعضای آن مشابه یکدیگرند، تقسیم می‌شوند که به این دسته‌ها خوشه گفته می‌شود. بنابراین خوشه مجموعه‌ی از اشیا است که در آن اشیا با یکدیگر مشابه هستند و با اشیا 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.^[۲۲]

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 به عنوان خروجی تعیین می‌شود. هو و شی^[۲۳] در مطالعه‌ی خود به معرفی این مفهوم و الگوریتم آن پرداخته‌اند.

در صورتی که گستری 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. در واقع 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 به منظور کمیته 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

$$\sum_{c=1}^C Y'_{cv} = 1 \quad \forall \nu \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{n_c} q_{icv} Y_{icv} \leq Q_v Y'_{cv} \quad \forall c, \nu \quad (6)$$

$$ST_v \geq (T_{icm} + p_{icm}) - U(1 - Y_{icv}) \quad \forall c, i, v \quad (7)$$

$$ST'_{cv'} \geq (ST_v + f_{cv}) - U(1 - Y_{icv}) - U(1 - Y''_{icv'}) \quad \forall c, i, v, v' \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^{n_c} X_{ojcv'} = 1 \quad \forall c, v' \quad (9)$$

$$X_{ijcv'} \leq Y''_{icv'} Y''_{jcv'} \quad \forall c, i, j, v'; i \neq j \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{n_c} X_{ikcv'} - \sum_{j=1}^{n_c} X_{kjcv'} = 0 \quad \forall c, v'; k = 1, 2, \dots, n_c \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^{n_c} q'_{icv'} Y''_{icv'} \leq Q'_{v'} \quad \forall c, v' \quad (12)$$

$$B_{icv'} \geq ST'_{cv'} - U(1 - Y''_{icv'}) \quad \forall c, i, v' \quad (13)$$

$$B_{ocv'} \geq ST'_{cv'} - U(1 - \sum_{i=1}^{n_c} X_{oicv'}) \quad \forall c, v' \quad (14)$$

$$(B_{icv'} + s_{ic} + f_{ijcv'}) - U(1 - X_{ijcv'}) \leq B_{jcv'} \quad \forall c, i, j, v' \quad (15)$$

$$\sum_{v'_c=1}^{V'_c} Y''_{icv'_c} = 1 \quad \forall c, i \quad (16)$$

$$Y''_{icv'_c} \leq \sum_{j=1}^{n_c} X''_{jicv'_c} \quad \forall c, i \quad (17)$$

$$MRT \geq (B_{icv'_c} + s_{ic} + f_{i'cv'_c}) - U(1 - X_{i'cv'_c}) \quad \forall c, i, v'_c \quad (18)$$

$$\begin{cases} Z_{icj'c'}, Y_{icv}, Y'_{cv}, Y''_{icv'}, X_{ijcv'} = \{0, 1\} \\ T_{icm}, ST_v, ST'_{cv'}, B_{icv'}, MRT \geq 0 \end{cases} \quad \forall c, c', i, j, v, v', m \quad (19)$$

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 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

f_{cv} زمان طی شده بین مرکز و محدوده‌ی مشتری c توسط وسیله‌ی نقلیه‌ی ν ام نوع ۱

q_{icv} ظرفیت اشغال شده توسط J_{ic} از وسیله‌ی نقلیه‌ی ν ام نوع ۱

$f'_{ijcv'_c}$ زمان طی شده بین مشتری i ام و j ام از محدوده‌ی مشتری c توسط وسیله‌ی نقلیه‌ی ν' ام نوع ۲

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

Q_v ظرفیت وسیله‌ی ν ام نوع ۱

$Q'_{\nu'}$ ظرفیت وسیله‌ی ν' ام نوع ۲

s_{ic} زمان خدمت‌دهی سفارش i ام در محل محدوده‌ی مشتری c

U عدد مثبت خیلی بزرگ

متغیرهای تصمیم مساله:

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

$Z_{icj'c'}$ متغیر باینری، مقدار یک: اگر سفارش J_{ic} ام زودتر از سفارش $J_{j'c'}$ ام مورد پردازش قرار بگیرد؛ صفر: در غیر این صورت

Y_{icv} متغیر باینری، مقدار یک: اگر سفارش J_{ic} توسط وسیله‌ی ν ام (نوع ۱) به محدوده‌ی مشتری c منتقل شود؛ صفر: در غیر این صورت

Y'_{cv} متغیر باینری، مقدار یک: اگر وسیله ν ام (نوع ۱) سفارش‌های محدوده‌ی c را حمل دهد؛ صفر: در غیر این صورت

$Y''_{icv'}$ متغیر باینری، مقدار یک: اگر سفارش J_{ic} توسط وسیله‌ی ν' ام (نوع ۲) در محدوده‌ی مشتری c به مشتری نهایی تحویل شود؛ صفر: در غیر این صورت

ST_v زمان شروع حرکت وسیله‌ی ν ام نوع ۱ از مرکز تولیدی به سمت محدوده‌ی مشتری

$ST'_{cv'}$ زمان حرکت وسیله‌ی ν' ام نوع ۲ در داخل محل محدوده‌ی مشتری c به منظور 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 این صورت

$B_{icv'_c}$ زمان شروع خدمت‌دهی به مشتری i ام در محل محدوده‌ی مشتری c ام 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.

$$\text{Minimise}(MRT) \quad (1)$$

$$\text{Subject to} \quad (2)$$

$$\begin{cases} T_{icm} + p_{icm} \leq T_{j'c'm} + U(1 - Z_{icj'c'}) & \forall c, c', i, j, m \\ Z_{icj'c'} = 1 - Z_{j'c'ic} & (i, c) \neq (j, c') \end{cases} \quad (2)$$

$$T_{icm} + p_{icm} \leq T_{ic(m+1)} \quad \forall c, i, m \quad (3)$$

$$\sum_{v=1}^V Y_{icv} = 1 \quad \forall c, i \quad (4)$$

زیر خطی می شود:

$$X_{ijcv'_e} \leq YY_{ijcv'_e} \quad \forall i, j, c, v'_e; i \neq j \quad (20)$$

$$YY_{ijcv'_e} \leq Y''_{icv'_e} \quad \forall i, j, c, v'_e; i \neq j \quad (21)$$

$$YY_{ijcv'_e} \leq Y''_{jcv'_e} \quad \forall i, j, c, v'_e; i \neq j \quad (22)$$

$$1 + YY_{ijcv'_e} = Y''_{icv'_e} + Y''_{jcv'_e} \quad \forall i, j, c, v'_e; i \neq j \quad (23)$$

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 به صورت تصادفی مسائل عددی استاندارد تولید و سپس این مسائل حل می شوند. به این منظور از داده های استاندارد موجود در پیشینه زمان بندی تولید استفاده شده و سه دسته مسائل عددی در اندازه های مسئله های کوچک، متوسط و بزرگ تولید شده است؛ داده های آن ها به کمک جدول ۱ به صورت تصادفی تولید شده اند.

پس از تولید تصادفی داده های مسائل عددی در اندازه های مختلف، مسائل با استفاده از نرم افزار حل دقیق گمز حل شده و جواب نهایی آن ها به تفصیل در جدول ۲ آورده شده است. در جدول ۲، ستون های اول تا چهارم به ترتیب اندازه ی مسئله، تعداد کل مشتریان شبکه، تعداد ماشین های موجود در مرکز تولیدی فرایندهای سیستم جریان کارگاهی و تعداد محدودی مشتریان و تعداد مشتریان هر محدوده را نشان می دهند. ستون پنجم جواب بخش تولید شبکه است که ترتیب حرکت سفارش ها به ماشین های اول تا پنجم تولیدی را نشان می دهد. ستون ششم انتقال سفارش ها با وسیله ی نوع یک که بر اساس ظرفیت به محدوده ی مشتری و به روش ارسال مستقیم انجام می شود، را نشان می دهد و ستون آخر نیز مسیریابی درون محدوده ی مشتری با وسیله ی نوع ۲ برای تحویل سفارش ها در داخل محدوده را نشان می دهد. گفتنی است که ابتدا و انتهای هر مسیر مرکز محدودی مشتری است که تحویل از آن جا آغاز و به آن جا ختم می شود. به عنوان نمونه در مسئله ی اول با اندازه ی کوچک دو محدودی مشتری وجود دارد که هر کدام دارای ۴ مشتری در محدوده ی خود هستند. در جواب مدل، سفارش های هر محدوده با یک وسیله ی نوع یک جداگانه منتقل می شود و در داخل محدوده سفارش های مشتریان محدوده ۱ با یک وسیله ی نوع ۲ مسیریابی و تحویل نهایی می شوند. در صورتی که در محدوده ی ۲ به علت تعداد سفارش ها و محدودیت ظرفیت از دو وسیله ی نوع ۲ برای مسیریابی و تحویل نهایی استفاده شده است. در مسئله ی دوم که محدودی اول ۸ و محدودی دوم ۱۲ مشتری در خود جای داده است، ابتدا توالی عملیات جریان کارگاهی به دست آمده است. سپس با توجه به ظرفیت وسیله ی نقلیه ی نوع ۱ سفارش های هر محدوده فقط با یک وسیله منتقل شده اند و در مسیریابی تحویل نیز محدودی دوم به ۲ وسیله ی نوع ۲ برای مسیریابی به علت محدودیت ظرفیت نیاز دارد. در مسئله با اندازه ی بزرگ که ۴۰ مشتری با ۴ محدوده در نظر گرفته شده است نیز تحویل در محدوده ی مشتریان به ترتیب با ۲، ۳، ۳ و ۳ وسیله ی نوع ۲ انجام می شود. شکل ۲ نمونه یی تصویری از جواب بهینه ی مسئله ی اول را نشان داده است. در جدول ۲ عددی که سمت چپ جداکننده قرار دارد شماره ی مشتری و عدد سمت راست محدودی مشتری است. مثلاً ۱/۲ نشان دهنده ی مشتری شماره ی ۱ از محدوده ی شماره ی ۲ است (مشتری اول از محدوده ی دوم). در حالی که ۲/۱

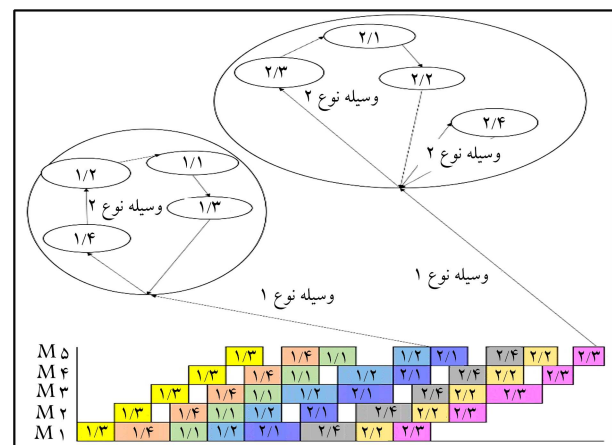
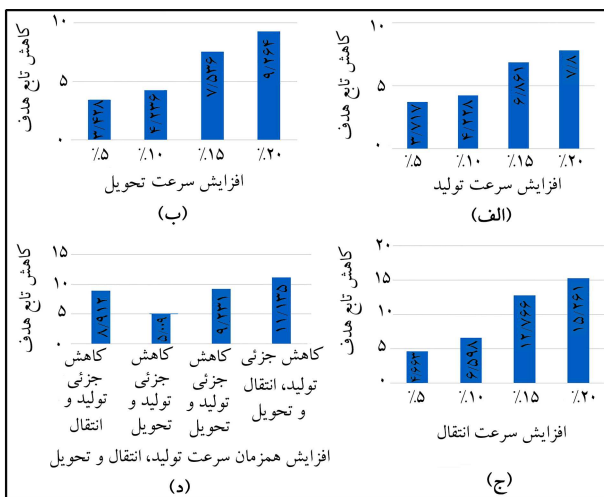
ترتیب عملیات پردازش های مختلف هر سفارش روی ماشین های متوالی است که بعد از اتمام عملیات فعلی عملیات بعدی شروع می شود.

محدودیت ۴ بیان می کند که هر سفارش از هر محدوده ی مشتری فقط توسط یک وسیله ی نقلیه ی نوع ۱ به محل محدودی مشتری حمل می شود و قابل شکسته شدن نیست. محدودیت (۵) بیان می کند که هر وسیله نقلیه ی نوع ۱ فقط یک بار برای حمل سفارش های فقط یک محدودی مشتری استفاده می شود. در واقع فقط به یک محدودی عزیمت می کند. محدودیت (۶) نیز بیان کننده ی ظرفیت محدودی وسیله ی نقلیه ی نوع ۱ است. محدودیت (۷) بیان می کند که وسیله ی نقلیه بعد از اتمام فرایندهای تولیدی همه ی سفارش های تخصیص داده شده به آن می تواند حمل را آغاز کرده و حرکت کند.

رابطه ی ۸ بیان کننده ی این محدودیت است که تحویل به روش مسیریابی در محدوده ی مشتری پس از حمل همه ی سفارش های مشتریان سفر به محدوده ی مشتری که ممکن است توسط وسایل نوع ۱ مختلف حمل شده باشند، آغاز می شود. محدودیت ۹ بیان می کند که هر وسیله در محدوده مشتری فقط با عزیمت به یک مشتری داخل محدوده، سفر خود به منظور تحویل به مشتری نهایی را آغاز می کند. محدودیت ۱۰ بیان می کند که در صورتی مسیر بین دو مشتری توسط وسیله ی نقلیه طی می شود که آن وسیله به هر دو مشتری دو سر مسیر تخصیص یافته باشد. محدودیت ۱۱ جریان ورودی و خروجی به هر مشتری را بیان می کند که در صورت ورود وسیله به یک مشتری همان وسیله باید از آن خارج شود و مسیر را ادامه دهد. محدودیت ۱۲ نیز بیان کننده ی ظرفیت محدودی وسیله ی نقلیه ی نوع ۲ است. محدودیت ۱۳ بیان می کند که زمان شروع خدمت دهی به مشتریان هر سفر بعد از عزیمت از محدوده آغاز می شود. محدودیت ۱۳ همچنین بیان می کند که زمان خدمت دهی به مشتری در محل خود بعد از حرکت از محل مشتری قبلی در مسیر سفر وسیله آغاز می شود. محدودیت ۱۴ بیان می کند که زمان حرکت وسیله برای تحویل بعد از رسیدن به محل محدودی مشتری آغاز می شود. محدودیت ۱۵ بیان می کند زمان خدمت دهی هر مشتری پس از زمان اتمام خدمت دهی مشتری قبلی در مسیر وسیله ی تخصیصی است. در ضمن گفتنی است که محدودیت ۱۵ به عنوان شکننده ی زیرتور برای بخش مسیریابی مدل نیز عمل می کند و از تولید جواب نشدنی جلوگیری می کند. این محدودیت باعث می شود که در داخل یک سفر بیش از یک تور ایجاد نشود که به این محدودیت شکننده زیرتور می گویند. فقط وقتی سفری از یک مشتری آغاز می شود که تولید آن انجام شده باشد و وسیله ی نقلیه هم به آن تخصیص داده شده باشد که همین امر باعث جلوگیری از ایجاد زیرتور می شود. توپ و ویگو [۲۴] و میلر و همکاران [۲۵] در تحقیقات خود به شکننده ی زیرتور پرداخته اند. محدودیت ۱۶ بیان می کند که تقاضای هر مشتری از هر محدوده مشتری فقط با یک وسیله حمل تحویل می شود. محدودیت ۱۷ بیان می کند که وسیله ی حمل نهایی به یک مشتری در صورتی تخصیص داده می شود که از یک مشتری دیگر در همان محدوده به آن مشتری عزیمت کرده باشد. محدودیت ۱۸ بیان کننده ی رابطه ی زمان بازگشت وسیله ی نوع ۲ به محدوده ی مشتری است که برابر زمان رسیدن وسیله به آخرین مشتری سفر به علاوه ی زمان خدمت دهی سفارش در محل مشتری مذکور به علاوه ی زمان عزیمت از آخرین مشتری به محدوده ی مشتری مربوطه است. در انتها محدودیت ۱۹ نیز تعریف کننده ی نوع متغیرهای مدل است. با توجه به این که مدل پیشنهادی فقط به علت وجود محدودیت ۱۰ غیرخطی شده است، محدودیت ۱۰ با تعریف متغیر کمکی $YY_{ijcv'_e} \geq 0$ و $YY_{ijcv'_e} = Y''_{icv'_e} \times Y''_{jcv'_e}$ (که فقط در صورت مقدار گرفتن دو متغیر مربوطه مقدار خواهد گرفت) و با اضافه کردن ۴ محدودیت

جدول ۱. نحوه‌ی تولید داده‌های مسائل عددی.

اندازه‌ی مسئله	تعداد مشتریان	داده‌های فرایندهای تولیدی	تعداد محدودی مشتریان	محل قرارگیری مرکز تولیدی	محل قرارگیری		ظرفیت
					مرکز محدودی مشتری	مشتریان در محدوده	
کوچک	۸	از داده‌های استاندارد نمونه‌های [۲۸-۲۶]	۲	مرکز تولیدی (۵۰۰ و ۵۰۰)	پراکنندگی		وسیله‌ی ۱
					یکنواخت		
متوسط	۲۰	از داده‌های استاندارد نمونه‌های [۲۸-۲۶]	۲	مرکز تولیدی (۵۰۰ و ۵۰۰)	اطراف مرکز محدودی به صورت تصادفی		وسیله‌ی ۱ و ۲
					با توزیع یکنواخت در بازه‌ی (۲ و ۹)		وسیله‌ی ۱ و ۲
بزرگ	۴۰	از داده‌های استاندارد نمونه‌های [۲۸-۲۶]	۴	مرکز تولیدی (۵۰۰ و ۵۰۰)	پراکنندگی		وسیله‌ی ۱
					یکنواخت		



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

شکل ۳. نمودارهای تحلیل حساسیت.

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

ج) کاهش زمان‌های تحویل از مرکز محدودی 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٪ به صورت 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 به منظور 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 - الف، ب - ۳ - ج در هر سه مورد سرعت تولید، انتقال و توزیع

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 اولین بار 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

جدول ۲. جواب مسائل عددی تصادفی تولید شده.

مسئله‌ی عددی	تعداد مشتریان	تعداد ماشین آلات	تعداد مشتری	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	$۳/۱ \leftarrow ۴/۱ \leftarrow ۱/۱ \leftarrow ۲/۱$ $۱/۲ \leftarrow ۴/۲ \leftarrow ۲/۲ \leftarrow ۳/۲$	محدوده ۱: وسیله ۱ محدوده ۲: وسیله ۲	$۱/۱ \leftarrow ۳/۱ \leftarrow ۰/۱$ $۰/۱ \leftarrow ۴/۱ \leftarrow ۲/۱$ $۰/۲ \leftarrow ۴/۲ \leftarrow ۰/۲$ $۱/۲ \leftarrow ۲/۲ \leftarrow ۰/۲$ $۰/۲ \leftarrow ۳/۲$
متوسط	۲۰	۵	محدوده اول: ۸ مشتری محدوده دوم: ۱۲ مشتری	$۲/۱ \leftarrow ۴/۱ \leftarrow ۲/۱ \leftarrow ۹/۲$ $۱/۱ \leftarrow ۶/۱ \leftarrow ۵/۱ \leftarrow ۷/۲$ $۳/۱ \leftarrow ۷/۱ \leftarrow ۸/۱ \leftarrow ۸/۲$ $۶/۲ \leftarrow ۵/۲ \leftarrow ۱۱/۲ \leftarrow ۱۲/۲$ $۳/۲ \leftarrow ۴/۲ \leftarrow ۱/۲ \leftarrow ۱۰/۲$	محدوده ۱: وسیله ۱ محدوده ۲: وسیله ۲	$۶/۱ \leftarrow ۴/۱ \leftarrow ۸/۱$ $۰/۱ \leftarrow ۷/۱ \leftarrow ۳/۱$ $۰/۱ \leftarrow ۵/۱ \leftarrow ۲/۱$ $۵/۲ \leftarrow ۳/۲ \leftarrow ۱۰/۲$ $۰/۲ \leftarrow ۱/۲ \leftarrow ۹/۲$ $۱۲/۲ \leftarrow ۶/۲ \leftarrow ۷/۲ \leftarrow ۰/۲$ $۲/۲ \leftarrow ۱۱/۲ \leftarrow ۰/۲$ $۰/۲ \leftarrow ۸/۲ \leftarrow ۴/۲$
بزرگ	۴۰	۵	محدوده اول: ۸ مشتری محدوده دوم: ۱۲ مشتری محدوده سوم: ۱۰ مشتری محدوده چهارم: ۱۰ مشتری	$۳/۴ \leftarrow ۴/۱ \leftarrow ۴/۲ \leftarrow ۴/۳$ $۴/۴ \leftarrow ۵/۱ \leftarrow ۵/۲ \leftarrow ۵/۳$ $۵/۴ \leftarrow ۶/۱ \leftarrow ۶/۲ \leftarrow ۶/۳$ $۷/۱ \leftarrow ۷/۲ \leftarrow ۷/۳ \leftarrow ۳/۳$ $۶/۴ \leftarrow ۷/۴ \leftarrow ۹/۳ \leftarrow ۲/۴$ $۹/۲ \leftarrow ۱۱/۲ \leftarrow ۸/۳ \leftarrow ۸/۱$ $۸/۲ \leftarrow ۱۰/۳ \leftarrow ۹/۴ \leftarrow ۸/۴$ $۱۰/۴ \leftarrow ۱۰/۲ \leftarrow ۱۲/۲ \leftarrow ۲/۳$ $۳/۱ \leftarrow ۱/۱ \leftarrow ۱/۲ \leftarrow ۲/۱$ $۳/۲ \leftarrow ۱/۳ \leftarrow ۲/۲ \leftarrow ۱/۴$	محدوده ۱: وسیله ۱ محدوده ۲: وسیله ۲ محدوده ۳: وسیله ۳ محدوده ۴: وسیله ۴	$۱/۱ \leftarrow ۷/۱ \leftarrow ۲/۱$ $۰/۱ \leftarrow ۳/۱ \leftarrow ۵/۱ \leftarrow ۸/۱$ $۰/۱ \leftarrow ۴/۱ \leftarrow ۶/۱ \leftarrow ۰/۱$ $۴/۲ \leftarrow ۸/۲ \leftarrow ۱۰/۲$ $۰/۲ \leftarrow ۹/۲ \leftarrow ۳/۲$ $۵/۲ \leftarrow ۶/۲ \leftarrow ۰/۲$ $۱۲/۲ \leftarrow ۱۱/۲$ $۲/۲ \leftarrow ۱/۲ \leftarrow ۰/۲$ $۰/۳ \leftarrow ۱/۳ \leftarrow ۸/۳$ $۳/۳ \leftarrow ۹/۳ \leftarrow ۰/۳$ $۰/۳ \leftarrow ۱۰/۳ \leftarrow ۴/۳$ $۵/۳ \leftarrow ۲/۳ \leftarrow ۰/۳$ $۰/۳ \leftarrow ۶/۳ \leftarrow ۷/۳$ $۸/۴ \leftarrow ۴/۴ \leftarrow ۰/۴$ $۰/۴ \leftarrow ۲/۴$ $۰/۴ \leftarrow ۵/۴ \leftarrow ۷/۴$ $۶/۴ \leftarrow ۱۰/۴ \leftarrow ۰/۴$ $۰/۴ \leftarrow ۱/۴ \leftarrow ۳/۴ \leftarrow ۹/۴$

بررسی شده است. با افزایش ۵ درصدی سرعت تولید و انتقال به صورت مجزا که هرکدام به ترتیب ۳٫۷ و ۴٫۷ درصد کاهش در تابع هدف داشتند، در حالی که 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 به صورت مجزا که هرکدام به ترتیب ۳٫۷ و ۳٫۴ درصد کاهش در تابع هدف داشتند در حالی که ۵ درصد کاهش در تابع هدف به ازای افزایش هم‌زمان تولید و تحویل به میزان ۵ درصد اتفاق می‌افتد. به همین ترتیب با افزایش ۵ درصدی سرعت انتقال و تحویل به صورت مجزا

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 - د، تأثیر هم‌زمان تولید، انتقال و تحویل بر روی تابع هدف

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 و انتقال	هر دو جزئی	۵ هر دو	۸٫۹
زمان تولید و تحویل	هر دو جزئی	۵ هر دو	۵
زمان انتقال و تحویل	هر دو جزئی	۵ هر دو	۹٫۲
زمان تولید، انتقال و تحویل	هر سه جزئی	۵ هر سه	۱۱٫۱

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 وانت بار (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

در این مقاله، ابتدا لزوم یکپارچه‌سازی فرایندهای تولید و تحویل در صورتی که 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 اولین بار شبکه‌ی بهینه‌ی یکپارچه تولید، انتقال و توزیع با وسایل نقلیه محدود با ظرفیت محدود ارائه شده و مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی مختلط ارائه شده است. این شبکه برای سیستم‌هایی که مشتریان نشان در گستره‌ی وسیع جغرافیایی قرار دارند بسیار مناسب است و به همین 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 نظر گرفته 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 به صورت تصادفی تولید شده و با کمک نرم‌افزار گمز حل شده‌اند و نتایج به دست آمده نشان از کارایی بالای مدل داشت. به منظور 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. در انتها 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 غیر از جریان کارگاهی در مدل‌سازی شبکه استفاده کرد و همچنین استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری نظیر جستجوی فاخته،^۲ الگوریتم کرم شب‌تاب^۴ و الگوریتم خفاش^۵ برای حل مدل شبکه پیشنهاد می‌شود.

که هر کدام به ترتیب ۴٫۷ و ۳٫۴ درصد کاهش در تابع هدف داشتند در حالی که ۹٫۲ درصد کاهش در تابع هدف به ازای افزایش هم‌زمان انتقال و تحویل به میزان ۵ درصد اتفاق می‌افتد. در انتها نیز با افزایش هم‌زمان هر سه سرعت تولید و انتقال و تحویل شاهد کاهش ۱۱٫۱ درصدی تابع هدف هستیم. در کل 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

پانویس‌ها

1. shop center

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

(References) منابع

- 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).
- 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).
- Thomas, D.J. and Griffin, P.M. "Coordinated supply chain management", *European Journal of Operational Research*, **94**, pp. 1-15 (1996).
- Potts, C.N. "Analysis of a heuristic for one machine sequencing with release dates and delivery times", *Operations Research*, **28**, pp. 1436-1441 (1980).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- Yang, X. "Scheduling with generalized batch delivery dates and earliness penalties", *IIE Transactions*, **32**, pp. 735-741 (2000).
- Lee, C.Y. and Chen, Z.L. "Machine scheduling with transportation considerations", *Journal of Scheduling*, **4**, pp. 3-24 (2001).
- Hall, N.G. and Potts, C.N. "Supply chain scheduling: batching and delivery", *Operations Research*, **51**, pp. 566-584 (2003).
- Chang, Y.C. and Lee, C.Y. "Machine scheduling with job delivery coordination", *European Journal of Operational Research*, **158**, pp. 470-487 (2004).
- 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).
- He, Y., Zhong, W. and Gu, H. "Improved algorithms for two single machine scheduling problems", *Theoretical Computer Science*, **363**, pp. 257-265 (2006).
- 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).
- 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).
- Chen, B. and Lee, C.Y. "Logistics scheduling with batching and transportation", *European Journal of Operational Research*, **189**, pp. 871-876 (2008).
- Liu, P. and Lu, X. "An improved approximation algorithm for single machine scheduling with job delivery", *Theoretical Computer Science*, **412**, pp. 270-274 (2011).
- Lee, I.S. "A coordinated scheduling of production-and-delivery under dynamic delivery cost environments", *Computers & Industrial Engineering*, **81**, pp. 22-35 (2015).
- 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).
- Woeginger, G.J. "Heuristics for parallel machine scheduling with delivery times", *Acta Informatica*, **31**, pp. 503-512 (1994).
- Wang, G. and Cheng, T.C.E. "Parallel machine scheduling with batch delivery costs", *International Journal of Production Economics*, **68**, pp. 177-183 (2000).
- 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).
- Ullrich, C.A. "Integrated machine scheduling and vehicle routing with time windows", *European Journal of Operational Research*, **227**, pp. 152-165 (2013).
- Wan, L. and Zhang, A. "Coordinated scheduling on parallel machines with batch delivery", *International Journal of Production Economics*, **150**, pp. 199-203 (2014).
- 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).
- Liao, C.J. Kuo, Y.W., Chung, T.P. and et al. "Integrating production and transportation scheduling in a two-stage supply chain", *European Journal of Industrial Engineering*, **9**, pp. 327-343 (2015).
- 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).
- 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).
- 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 classification 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).