پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری
دوره ۳، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۷

ارائه یک روش ابتکاری برای کمینه‌کردن مجموع وزنی کارهای تأخیری و هزینه‌های ارسال برای زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع در زنجیره تأمین با در نظر گرفتن مسیریابی

مهدی خدابنده[۱*]، سیدرضا حجازی[۲]، مرتضی راستی برزکی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
۳- استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

دریافت: ۱۳۹۶/۴/۱ پذیرش: ۱۳۹۷/۳/۲۹

چکیده

یک مسئله یکپارچه زمان‌بندی تولید و توزیع را در نظر بگیرید که در آن کارها پس از پردازش در سیستم تولیدی، به‌صورت مسیریابی و در قالب دسته‌هایی برای مشتریان ارسال می‌شود. فرض کنید هر مشتری یک سفارش به تولیدکننده ارائه می‌کند. هر سفارش دارای یک موعد تحویل است. سفارش‌ها توسط یک ماشین پردازش می‌شوند و به‌صورت دسته‌ای توسط وسایلی به تعداد کافی و با ظرفیت نامحدود ارسال می‌شوند. ارسال دسته‌ای معمولاً منجر به کاهش هزینه‌های ارسال می‌گردد، اما ممکن است تعداد کارهای تأخیری را افزایش دهد. هدف تعیین تعداد وسایل ارسال و مسیرهای بهینه جهت کمینه‌کردن مجموع وزنی کارهای تأخیری و هزینه‌های ارسال است. این مسئله برای اولین بار با این تابع هدف موردبررسی قرار گرفته‌است. پیچیدگی مسئله مذکور NP-Hard قوی است. در این مقاله، برای این مسئله یک مدل برنامه‌ریزی خطی ریاضی و یک روش ابتکاری به همراه آزمون محاسباتی ارائه شده است. طراحی آزمایش‌ها به‌صورت کامل بر روی تمام عوامل انجام شده است. نتایج آزمون محاسباتی برای مسائل حل‌شده، کارایی روش ابتکاری را نشان

* نویسنده مسئول مقاله: E-mail: M.khodabandeh@in.iut.ac.ir

می‌دهد. همچنین با استفاده از روش تجزیه و تحلیل واریانس تأثیر سطوح مولفه‌های مسئله بر روی عملکرد CPLEX موردبررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: زنجیره تأمین؛ زمان‌بندی؛ کارهای دارای تأخیر؛ ابتکاری.

۱- مقدمه

بازارهای رو به رشد و انتظارات فزاینده مشتریان به‌عنوان عوامل مهم و تأثیرگذار بر سازمان‌ها محسوب شده و موجب می‌شوند تا آن‌ها به دنبال کسب مزیت رقابتی از طریق زنجیره تأمین خود باشند [۱]. در سال‌های اخیر، مفهوم مدیریت کیفیت زنجیره تأمین به‌عنوان ایده جدید مدیریتی ظهور پیدا کرده است [۲]. بخش زیادی از اهمیت روش‌های تحقیق در عملیات مربوط به فعالیت‌های انجام‌شده بر روی مواردی همچون تولید و توزیع است [۳]. در دو دهه اخیر، رقابت بین شرکت‌ها در راستای عرضه کالا و خدمات، تبدیل به واقعیتی بزرگ برای پیشرفت آن‌ها شده است. شاید مهم‌ترین رویکرد برای حفظ مزیت رقابتی، بهینه نگه‌داشتن شرایط زنجیره در طول زمان باشد [۴]. یکی از مهم‌ترین انگیزه‌های شکل‌گیری زنجیره تأمین، نگرش یکپارچگی و هماهنگی در اخذ تصمیمات در زنجیره تأمین است [۵]. تولید و توزیع دو عملیات کلیدی در زنجیره تأمین هستند. برای دسترسی به کارایی بهینه در یک زنجیره تأمین برنامه‌ریزی و زمان‌بندی یکپارچه این دو عامل بسیار مهم است. این درحالی است که مدل‌های کلاسیک زمان‌بندی تولید به واحد حمل‌ونقل توجهی ندارند و تصمیمات مربوط به زمان‌بندی تولید و تصمیمات مربوط به برنامه‌ریزی ارسال به‌صورت جداگانه انجام می‌شود [۶]. در مسائل زمان‌بندی سنتی، معمولاً هزینه ارسال در نظر گرفته نمی‌شود. بررسی توماس و گریفین نشان داده است که بیش از ٪۱۱ تولید خالص ملی آمریکا صرف هزینه‌های حمل‌ونقل می‌شود و هزینه‌های آماد[۱] بیش از ٪۳۰ هزینه کالاهای فروخته‌شده را تشکیل می‌دهد. جهت رسیدن به کارایی بهینه در زنجیره تأمین، یکپارچه‌سازی دو بخش تولید و توزیع ضروری به نظر می‌رسد [۷].

---

۱. Logistic

موضوع زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع یکی از موضوعات مهمی است که اخیراً تحقیقات زیادی را در زمینه مدیریت تولید و زنجیره تـأمین بـه خـود اختصـاص داده است [۸]. هال و پاتس در سـال ۲۰۰۳ [۹] مسـائل متنـوعی را در خصـوص همـاهنگی زمان‌بندی، دسته‌بندی و ارسال را بررسی کردند و روشـی بـا رویکـرد برنامـه‌ریـزی پویا جهت کمینه‌سازی انواع توابع هدف ارائه نموده‌اند. یکی از توابـع هـدفی کـه آن‌هـا موردبررسـی قـرار داده‌انـد کمینـه‌سـازی مجمـوع وزنـی تعـداد کارهـای تـأخیری و هزینه‌های ارسال است که در مقاله حاضر موردتوجه قرار گرفته است.

کمینه‌کردن تعداد کارهای تأخیری بر روی یک تک‌ماشین از طریـق الگـوریتم مـور[۱] در زمان چندجمله‌ای با پیچیدگی $O(nlogn)$ قابل انجام است. همچنـین هـلا و بـولفین [۱۰] برای این مسئله یک روش شاخه و کران[۲] ارائه کردند. اما نکته مهم در این زمینـه این است که هیچ‌کدام از مقالات مرور شده حیطه ارسال و هزینه‌های مربوط بـه آن را در نظر نگرفتند.

در نظر گرفتن هزینه‌های حمـل‌ونقـل منجـر بـه در نظـر گـرفتن مسـئله مسـیریابی می‌شود. مسئله مسیریابی در زمره مسائل پیچیده بهینه‌سازی بوده به‌گونه‌ای که حتی یافتن یک جواب بهینه برای ابعاد کوچک آن بسیار دشوار و زمان‌بر است [۱۱].

در این مقاله، زمان‌بندی سفارش‌ها بر روی یک ماشین و دسته‌بندی و زمـان‌بنـدی ارسال سفارش‌ها با در نظر گرفتن مسیریابی برای یک سیستم تولیـدی «تولیـد بـرای سفارش» یا MTO[۳] با هـدف کمینـه‌سـازی مجمـوع وزنـی تعـداد کارهـای تـأخیری و هزینه‌های ارسال موردبررسی قرار گرفته است.

در زمینه یکپارچه‌سازی بخش تولید و ارسال، تحقیقات زیادی در دو دهـه گذشـته بر روی مدل‌های یکپارچـه تولیـد-توزیـع در سـطوح اسـتراتژیک و تـاکتیکی صـورت گرفتـه اسـت [۱۲]. مقـالات مـروری زیـادی نظیـر سـارمنتو و نگـی [۱۳]، ارنگـوس و همکارانش [۱۴] و بیلگن و اوخاهان [۱۵] در خصـوص چنـین مـدل‌هـایی وجـود دارد. هماهنگی بخش تولید و ارسال با در نظر گرفتن مسیریابی از هـر نـوع مسـئله دیگـری در زمینه یکپارچگی تولید- توزیع مشکل‌تر است [۱۶].

---

۱. Moor algorithm

۲. Branch and Bound

۳. Make to Order

ازجمله مقالات ارائه‌شده در این زمینه می‌توان به مقاله لی و همکاران [۱۷] اشاره کرد که یک الگوریتم برنامه‌ریزی پویا با پیچیدگی $O(n^{k(k+7)/2})$ جهت کمینه‌کردن مجموع زمان تحویل کار به مشتری ارائه کردند. آرمسترانگ [۱۸]، دیواپریا و همکاران [۱۹] بر روی مسائلی کار کردند که محصول آن‌ها فاسدشدنی بود و باید در زمان مشخصی به دست مشتری می‌رسید. چن و همکاران [۲۰] بر روی مسئله‌ای جهت کمینه‌کردن بیشینه زمان تحویل کار به مشتری به همراه هزینه‌های ارسال کار کردند. راستی و همکاران [۵] برای مسئله تولید و توزیع با ارسال مستقیم یک روش شاخه و کران ارائه کردند. منسندیک و همکاران [۲۱] بر روی مسئله‌ای با تابع هدف کمینه‌کردن مجموع زمان‌های تأخیر با وجود ماشین‌های موازی کار کردند. همچنین راستی [۲۲] یک روش ابتکاری جهت بررسی این مسئله در حالت تخصیص موعد تحویل ارائه داد. اولریخ [۲۳] برای مسئله تولید و توزیع با تابع هدف مجموع دیرکرد، یک الگوریتم ژنتیک ارائه کرد. کندوتا و همکاران [۲۴] برای مسئله کمینه‌سازی هزینه ارسال و تحویل کالا قبل از موعد مقرر یک روش جست‌وجوی ممنوعه ارائه دادند. ژانگ [۲۵] برای مسئله کمینه‌سازی مجموع هزینه ارسال برای کارهایی که باید قبل موعد مقرر تحویل شوند، راه‌حلی ارائه داد. لی و همکاران [۲۶] بر روی مسئله‌ای با تابع هدف کمینه‌سازی هزینه‌های ارسال و زمان انتظار مشتری کار کردند و مدل چندهدفه‌ایی را توسعه دادند.

اما مسئله یکپارچه زمان‌بندی تولید و ارسال برای حالت چند مشتری با در نظر گرفتن مسیریابی جهت کمینه‌کردن مجموع وزنی تعداد کارهای تأخیری و هزینه‌های ارسال تاکنون معرفی و بررسی نشده است. ما در این مقاله به معرفی مسئله مذکور می‌پردازیم و یک مدل ریاضی و یک روش ابتکاری جدید ارائه می‌کنیم.

پس از معرفی علائم، در بخش بعد، تعریف مسئله و ویژگی‌های جواب بهینه مطرح می‌شود و سپس، مدل برنامه‌ریزی ریاضی مختلط MIP[۱] در بخش بعدی توسعه داده شده است. در ادامه، یک روش ابتکاری ارائه می‌شود. یک مثال عددی و انجام آزمون‌های محاسباتی به‌منظور مقایسه دو رویکرد به ترتیب در ادامه آورده شده

۱. Mixed Integer Programing

است. جمع‌بندی به همراه ارائه پیشنهادهایی جهت کارهای آتی، بخش پایانی مقاله را تشکیل می‌دهد.

۲- علائم اصلی

N تعداد کل کارها؛

f هزینه هر بار ارسال وسیله نقلیه؛

d_k موعد تحویل پیش‌فرض کار مشتری k ام؛

p_k زمان پردازش کار مشتری k؛

w_k وزن کار مشتری k؛

$t_{kk'}$ مدت‌زمان لازم برای رسیدن به مشتری k' وقتی از مشتری k مستقیماً به‌سوی آن حرکت می‌کنیم؛

U_k یک، اگر کار مشتری k تأخیر داشته باشد و در غیر این صورت صفر؛

X_{jv} یک، اگر کار مشتری k با ماشین v ارسال شود و در غیر این صورت صفر؛

$Q_{kk'v}$ یک، اگر کار مشتری k دقیقاً قبل از کار مشتری k' توسط ماشین v ارسال شود و در غیر این صورت صفر؛

$G_{kk'}$ یک، اگر کار مشتری k قبل از مشتری k' پردازش شود و در غیر این صورت صفر؛

S_v زمان حرکت ماشین v از تسهیل تولیدی؛

D_k زمان تحویل کار مشتری k؛

Y_v یک، اگر از ماشین v استفاده شود و در غیر این صورت صفر.

۳- تعریف مسئله

یک تسهیل تولیدی و k مشتری وجود دارد که هر مشتری یک سفارش را به تسهیل تولیدی ارائه می‌دهد. ساختار تسهیل تولیدی به‌صورت تک‌ماشین فرض شده است. هر کار دارای زمان پردازش، وزن (جریمه تأخیر) و موعد تحویل است. انقطاع کارها مجاز نیست. به‌منظور کاهش هزینه ارسال، ارسال کارها به‌صورت دسته‌ای مجاز است. جهت انجام این کار می‌توان کارهای پردازش‌شده را دسته‌بندی نمود و تمام کارهای یک دسته را با یک وسیله و با هزینه f_v برای هر مشتری ارسال نمود. علی‌رغم اینکه ارسال دسته‌ای کارها در کاهش هزینه ارسال مؤثر است، این کار ممکن است باعث افزایش کارهای تأخیری شود. وسایل نقلیه جهت ارسال کار به مشتری‌ها به تعداد کافی موجود هستند و ظرفیت آن‌ها نامحدود فرض شده است. هیچ

محدودیتی در تعداد کارهای ارسالی در هر بار ارسال وجود ندارد. یک کار «تأخیری» است، اگر بعد از موعد تحویل به مشتری مربوطه برسد؛ در غیر این صورت، «به‌موقع» نامیده می‌شود. زمان تکمیل و ارسال هر دسته برابر زمان تکمیل آخرین کار آن دسته است.

با توجه به علائمی که چن [۱۳] برای مسائل زمان‌بندی با در نظر گرفتن ارسال در نظر گرفته است، نمایش اختصاری مسائل موردنظر در این مقاله به‌صورت زیر خواهد بود که منظور، کمینه‌سازی مجموع وزنی تعداد کارهای تأخیری و هزینه‌های ارسال در حالت تک ماشین با وجود k مشتری، ارسال به‌صورت مسیریابی و وجود تعداد کافی وسیله حمل‌ونقل با فرض نامحدود بودن ظرفیت برای هریک و نیز عدم وجود محدودیت و شرایط خاص است:

$$1//V\ (\infty,\infty)\ ,routing/K/\sum_{k=1}^{K} W_k U_k + \sum_{k=1}^{K} f_v Y_v + \sum_{k=1}^{K}\sum_{k\prime=1}^{K} t_{kk\prime} Q_{kk\prime} \qquad (۱)$$

۴- پیچیدگی مسئله

در مورد این مسئله می‌توان این‌طور بیان کرد که چون ارسال کالا به چند مشتری در یک دسته قابل انجام است، درنتیجه ما برای هر بار ارسال سفارش‌ها نیاز به یافتن یک مسیر داریم. این مسئله مسیریابی به‌تنهایی یکی از مسائل رام نشدنی[۱] است. ازآنجایی‌که در مسئله اصلی تعداد مشتریان در هر سفر یک متغیر تصمیم است، TSP یک مسئله خاص مسئله فروشنده دوره‌گرد[۲] محسوب می‌شود [۱۳]. در مورد پیچیدگی این مسئله می‌توان بیان کرد که چون مسئله TSP یک حالت خاص از این مسئله بوده و مسئله TSP دارای پیچیدگی NP-Hard قوی است، پس این مسئله نیز دارای پیچیدگی NP-Hard قوی باید باشد. ضمناً می‌توان یادآور شد که این دسته از مسائل مشکل‌ترین دسته از مسائل IPODS محسوب می‌شوند [۱۳].

ویژگی جواب بهینه

۱. Intractable

۲. Traveler Salesman Problem

دانستن ویژگی‌های جواب بهینه معمولاً منجر به ارائه روش حل بهتر و کاراتر می‌شود. همچنین با دانستن ویژگی‌هایی که برقرار نیستند، از روش‌های نامناسب دوری کرده و درنتیجه، فضای جواب تا حد ممکن کاهش می‌یابد. از طرفی، ویژگی‌هایی وجود دارند که در یک مسئله برقرار نیستند، اما این ویژگی‌ها معمولاً منجر به ایجاد جواب‌های نزدیک به بهینه می‌شوند. در ادامه به برخی از این ویژگی‌ها اشاره می‌شود:

ویژگی ۱- یک توالی بهینه وجود دارد که در آن کارها بدون وجود بیکاری پردازش می‌شوند.

اثبات: اگر زمان بیکاری بر روی ماشین پردازش وجود داشته باشد، می‌توان کارها را به عقب‌تر حرکت داد تا بیکاری از بین برود و ضمناً به تابع هدف هم افزوده نشود. به‌بیان‌دیگر، وجود بیکاری منفعتی برای ما نخواهد داشت.

ویژگی ۲- اگر کار i زودتر از کار j پردازش شود، کار i دیرتر از کار j تسهیل تولیدی را ترک نخواهد کرد. این بدان معنی است که در زمان‌بندی بهینه، کاری وجود ندارد که پردازش شده باشد و در دسته کارهای ارسال‌شده قرار نگیرد.

اثبات: فرض کنید در یک توالی بهینه، کار i زودتر از کار j پردازش شود، اما دیرتر از کار j از تسهیل تولیدی خارج شود. در این حالت تغییر جایگاه‌های این دو کار در تسهیل تولیدی و توالی پردازش کارها باعث می‌شود که زمان تکمیل دسته‌ای که کار j در آن قرار دارد، به‌اندازه زمان پردازش کار i کمتر شود. لذا با توجه به ثابت بودن کارهای دسته مذکور و کاهش زمان شروع حرکت وسیله نقلیه، ممکن است کارهایی که در حالت قبل دیرکرددار بودند، از حالت دیرکرد خارج شوند ولی عکس آن برقرار نخواهد بود.

نتیجه ۱- کارهای داخل هر دسته به‌صورت متوالی و بدون انقطاع توسط کارهای مربوط به دسته‌های دیگر، پردازش می‌شوند.

ویژگی ۳- در توالی بهینه، ترتیب پردازش کارهایی که در یک دسته ارسال می‌شوند، تأثیری در تابع هدف نخواهد داشت.

اثبات: با توجه به این نکته که تعیین توالی مشتری‌ها در مسیریابی کارهای یک دسته، مستقل از ترتیب کارهای آن دسته حین پردازش انجام می‌شود و در نظر گرفتن این نکته که زمان تکمیل یک دسته برابر مجموع زمان پردازش کارهای آن

دسته است، اثبات می‌شود که ترتیب توالی پردازش کارهای موجود در یک دسته تأثیری در تابع هدف نخواهد گذاشت.

مدل خطی مختلط

$$\sum_{k=1}^{K} W_k U_k + \sum_{k=1}^{K} f_v Y_v + \sum_{v=1}^{V}\sum_{k=1}^{K}\sum_{k\prime=1}^{K} t_{kk\prime} Q_{kk\prime v} \qquad (۲)$$

$$\sum_{v=1}^{V} X_{kv} = 1 \qquad k = 1, \dots, K \qquad (۳)$$

$$X_{0v} \geq X_{kv} \qquad ,v = 1, \dots, V \quad k = 1, \dots, K \qquad (۴)$$

$$X_{kv} = \sum_{k\prime=1}^{K} Q_{kk\prime v} \qquad k = 0, \dots, K \quad v = 1, \dots, V \qquad (۵)$$

$$X_{kv} = \sum_{k\prime=1}^{K} Q_{k\prime kv} \qquad k = 0, \dots, K\ , \quad v = 1, \dots, V \qquad (۶)$$

$$G_{kk\prime} + G_{k\prime k} \leq 1 \qquad ,k = 1, \dots, K \quad k' = 1, \dots, K \qquad (۷)$$

$$G_{k\prime k} + G_{kk\prime\prime} + G_{k\prime\prime k} \geq 1 \qquad ,k = 1, \dots, K \quad k' = 1, \dots, K, \quad k'' = 1, \dots, K \qquad (۸)$$

$$G_{kk} = 0 \qquad k = 1, \dots, K \qquad (۹)$$

$$S_v \geq \sum_{k'=1}^{K} (P_{k'} * G_{k'k}) + P_k - M(1 - X_{kv}) \quad ,k = 1, \dots, K \quad v = 1, \dots, V \quad (۱۰)$$

$$D_k \geq S_v + t_{0k} - M(1 - Q_{0k'v}) \quad , k = 1, \dots, K \quad k' = 1, \dots, K, \quad v = 1, \dots, V \quad (۱۱)$$

$$D_k \geq D_{k'} + t_{k'k} - M(1 - \sum_{v=1}^{V} Q_{kk'v}) \quad ,k = 1, \dots, K \quad k' = 1, \dots, K \quad (۱۲)$$

$$D_k - d_k \leq MU_k \quad k = 1, \dots, K \quad (۱۳)$$

$$U_k \in \{0,1\} \, , Y_v \in \{0,1\}, S_v \, , D_k \geq 0 \quad ,k = 1, \dots, K \quad v = 1, \dots, V \quad (۱۴)$$

$$Q_{kk'v} \in \{0,1\}, X_{kv} \in \{0,1\}, \quad G_{k'k} \in \{0,1\} \quad ,k = 1, \dots, K \quad ,v = 1, \dots, V \quad k' = 0, \dots, K \quad (۱۵)،(۱۶)،(۱۷)$$

رابطه ۲ تابع هدف مسئله را که شامل کمینه‌کردن مجموع هزینه‌ها است، نشان می‌دهد. این هزینه‌ها متشکل از سه هزینه مجموع وزنی کارهای تأخیری، هزینه ثابت ارسال و هزینه‌های متغیر ارسال می‌شود. رابطه ۳ بیان می‌کند که هر کار فقط توسط یک ماشین ارسال شود. در رابطه ۴ و ۵ زیروند صفر نشانگر تسهیل تولیدی است، این رابطه بیان می‌کند که تسهیل تولیدی در هر مسیر وجود دارد. روابط ۶ و ۷ تضمین می‌کنند که قبل و بعد از هر کار فقط و فقط یک کار تحویل شود. روابط ۸، ۹ و ۱۰ روابط مربوط به‌توالی کارها در پردازش آن‌هاست [۲۷] که این توالی در محاسبه زمان اتمام پردازش هر کار در تسهیل تولیدی و درنهایت، محاسبه زمان حرکت هر وسیله نقلیه مورداستفاده قرار می‌گیرد. رابطه ۱۰ بر اساس مجموع زمان

پردازش کارهای داخل یک دسته بیان می‌کند که زمان حرکت یک وسیله نقلیه بزرگ‌تر یا مساوی مجموع زمان پردازش کارهای داخل یک دسته است. البته رابطه شماره ۱۰ به این صورت عمل می‌کند که زمان تحویل کارهای موجود در هر دسته از مجموع زمان شروع حرکت دسته و زمان رسیدن به مشتری اول با حرکت از تسهیل تولیدی بزرگ‌تر است. رابطه ۱۱ و ۱۲ مربوط به زمان تحویل هر کار به مشتری است. درواقع، رابطه ۱۱ کمکی برای محاسبه زمان تحویل کار مشتری اول هر دسته است. یعنی زمان تحویل کار اول هر دسته از زمان شروع حرکت دسته بعلاوه زمان رسیدن به اولین مشتری بزرگ‌تر باشد.

رابطه ۱۲ بیان می‌کند که در هر دسته، زمان تحویل کار هر مشتری باید از زمان تحویل کار مشتری قبلی بعلاوه زمان رسیدن به آن مشتری بزرگ‌تر باشد. رابطه ۱۳ بیان می‌کند که اگر زمان تحویل یک کار از موعد تحویل تعیین‌شده برای آن بزرگ‌تر باشد، آن کار تأخیری محسوب می‌شود. در رابطه ۱۴ بیان می‌شود که اگر یک کار باید توسط یک وسیله ارسال شود، آن وسیله باید به استخدام درآمده و درنتیجه، هزینه ثابت آن پرداخت شود. روابط ۱۵ تا ۱۷ بیانگر وضعیت متغیرهاست.

۵- روش ابتکاری

روش حل دقیق توسط برنامه‌ریزی ریاضی به دلیل زیاد بودن تعداد محدودیت‌ها و متغیرها بسیار وقت‌گیر است و وقتی تعداد متغیرها بسیار زیاد شود، استفاده از این روش به‌صرفه نیست. در این قسمت، روش ابتکاری جهت حل این مسئله ارائه می‌شود. این روش ابتکاری از دو بخش اصلی تشکیل شده است که در بخش اول، بر اساس یک معیار ابتکاری کارها را انتخاب می‌کند و در بخش دوم، این کارها را به سه دسته مختلف تقسیم کرده و آن‌ها را زمان‌بندی می‌کند. این سه مجموعه عبارت‌اند از: کارهای زمان‌بندی‌شده (S)، کارهای تأخیری (T) و کارهای با وضعیت نامشخص (N). در ابتدا، همه کارها درمجموعه زمان‌بندی نشده (U) قرار دارند. معیار ابتکاری مورداستفاده در این مسئله بر اساس عوامل مؤثر در تابع هدف و رفتار مسئله تنظیم شده است که بر اساس آزمایش‌های محاسباتی اولیه انجام‌گرفته این معیار از معیارهای دیگر نتیجه بهتری ارائه می‌دهد. این معیار از سه بخش مختلف تشکیل شده است که در آن سفارش‌ها بر اساس وزن، زمان پردازش، زمان باقیمانده تا موعد

تحویل و زمان موردنیاز برای رسیدن به مشتری مذکور از مشتری قبلی مورد انتخاب قرار می‌گیرند. بر این اساس در قسمت اول معیار، سفارش‌هایی که دارای وزن بیشتر و زمان پردازش کمتری هستند، دارای مقدار بیشتری در شاخص خواهند بود. در قسمت دوم، سفارش‌هایی که زمان کمتری تا موعد تحویل آن‌ها باقیمانده است، دارای مقدار بیشتری در شاخص هستند. در قسمت آخر معیار انتخاب نیز سفارش‌هایی که زمان کمتری نیاز دارند تا از مشتری کنونی به مشتری مذکور برسند، مقدار بیشتری را در شاخص دارا خواهند بود. روش ابتکاری ارائه‌شده شامل گام‌های زیر می‌باشد:

گام ۱: در ابتدا همه کارها درمجموعه U قرار دارند.

- $T = \emptyset$, $S = \emptyset$, $N = \emptyset$, $N' = \emptyset$
- $A = \sum_{k=1}^{K} p_k$, $v = 1$

گام ۲: انتخاب کاری که باید زمان‌بندی شود.

– اگر مجموعه U تهی است به گام ۶ بروید. در غیر این صورت، از بین کارهای باقیمانده درمجموعه U کاری را که دارای بزرگ‌ترین مقدار بر اساس معیار زیر است، انتخاب کنید.

$$I_k = e^{(w_k/p_k)} * e^{(-d_k - p_k - t - c/A)} * e^{-t}$$

– اگر کار k اولین کاری باشد که انتخاب می‌شود، داریم $t = t_{0k}$ و در غیر این صورت، $t = t_{k'k}$ که k' کار قبل از کار مشتری k است.

گام ۳:

– اگر کار k دیرکرددار بود، آن را در مجموعه T قرار بدهید. در غیر این صورت، به گام ۳ بروید.

گام ۴:

– کارهایی را که به دلیل اضافه‌کردن کار k تأخیری می‌شوند، به مجموعه N' انتقال بدهید.

– اگر $B = \sum_{j=1}^{j} w_j = 0 , j \in N'$ کار k را به مجموعه S انتقال بدهید؛ در غیر این صورت، به گام ۵ بروید.

گام ۵:

– اگر $B + t \geq F + t_{0k}$، آنگاه $v = v + 1$؛ در غیر این صورت از بین کارهای $N' + \{k\}$ کار با بزرگ‌ترین نسبت p_j/w_j را انتخاب کرده و اگر این کار همان کار k بود آن را به N اضافه کرده و به گام یک بروید. در غیر این صورت کار انتخاب‌شده را به T اضافه کرده و فرآیند انتخاب را تکرار کنید تا جایی که $N' = \emptyset$ شود.

– اگر مجموعه N' تهی شد کار k را به S اضافه کرده و به گام یک بروید.

گام ۶:

– در بین کارهای N، کارهایی را که تا این لحظه تأخیری شده‌اند، به مجموعه T اضافه کنید.

– بقیه کارها را بر اساس بیشترین مقدار معیار زیر انتخاب کرده و روال تخصیص آن‌ها مانند گام ۴ و ۵ خواهد بود.

$$I = \frac{w_j}{p_j} \qquad (۱۸)$$

گام ۷: کارهای مجموعه T را یک‌بار به آخرین ماشین اضافه کرده و مجموع وزن کارهای دیرکرددار شده را برابر B قرار داده و هزینه حمل‌ونقل را C1 قرار دهید. یک‌بار هم آن‌ها را در ماشین جدید قرار داده و هزینه حمل‌ونقل را C2 قرار دهید و بر اساس رابطه زیر عمل کنید:

– اگر $B + C1 \geq F + C2 + t_{k0}$، آنگاه $v = v + 1$ و کارهای T را به S اضافه می‌کنیم؛ در غیر این صورت، کارهای T را به S اضافه کنید.

نحوه ترتیب مشتریان مجموعه T بر اساس نزدیک‌ترین مشتری بعدی است.

۶- نتایج محاسباتی

به‌منظور بررسی کارایی روش ابتکاری ارائه‌شده، مدل MIP در GAMS و روش ابتکاری در محیط C# کدنویسی شدند. این الگوریتم‌ها توسط کامپیوتری دارای CPU با سرعت 2.3GHz و 2GB حافظه RAM اجرا شد؛ بدین ترتیب که هر نمونه توسط

روش ابتکاری و مدل MIP اجرا شده است. همچنین یک محدودیت زمانی ۳۶۰۰ ثانیه‌ای برای اجرای الگوریتم MIP در نظر گرفته‌شده است و اگر روش موردنظر نتواند در این مدت جوابی ارائه دهد، متوقف می‌شود.

زمان پردازش در بازه [100 1]، در نظر گرفته شده است. برای تولید موعد تحویل از رویه زیر برای تولید داده‌ها استفاده شده است. ابتدا در نظر گرفته شد که تمام کارها یک‌بار و در یک دسته ارسال شوند که زمان تحویل آخرین کار را با A_1 نشان می‌دهیم. و حالت دیگر اینکه هر کار با یک ماشین ارسال شود که زمان تحویل آخرین کار را با A_2 نشان می‌دهیم. بدیهی است در حالت اول زمان تحویل کارها افزایش یافته و احتمال دیرکرددار شدن کارها بیشتر است و در حالت دوم زمان تحویل کارها کاهش می‌یابد. این دو حالت، حالت‌های حدی هستند که می‌توانند رخ دهند. به همین منظور از عبارت زیر برای تولید موعد تحویل استفاده شده است:

$$(0, \propto A_1 + \propto A_2] \qquad (۱۹)$$

در عبارت بالا برای آلفا سه مقدار ۰، ۰/۵ و ۱ در نظر گرفته شده است تا بازه به فراخور تغییر مقدار آلفا کوچک و بزرگ شود. برای تعیین مکان مشتریان چهار حالت در نظر گرفته شد. حالت اول آنکه مکان تسهیل تولیدی در نقطه [0 0] و مشتریان در فاصله [50 0] باشند. حالت دوم آنکه تسهیل تولیدی در نقطه [25 25] و مشتریان در فاصله [50 0] باشند. در حالت سوم، تسهیل تولیدی در مکان [0 0] و مشتریان در فاصله [100 0] قرار می‌گیرند. در حالت چهارم نیز تسهیل تولیدی در مکان [50 50] و مشتریان در فاصله [100 0] قرار می‌گیرند. همچنین فاصله بین مشتریان با یکدیگر و تسهیل تولیدی بر اساس فاصله اقلیدسی محاسبه شده است.

در مسئله مذکور برای هر ترکیب از ∝، w، f و t، ۱۰ مسئله با توجه به مولفه‌های بیان‌شده تولید شدند. همچنین این مسئله برای تعداد مشتریان ۳، ۵، ۷ و ۹ موردبررسی قرار گرفته است. بنابراین، درمجموع ۳۸۴۰ = (۱۰×۴×۲×۴×۳×۴) مسئله تولید و حل شدند. نتایج محاسباتی به ۳ گروه بر اساس ∝ تقسیم‌بندی شده است. در جداول زیر در ستون زیرگروه‌ها برای نام هر دسته سه رقم وجود دارد که رقم اول بازه وزن کارها، رقم دوم نشان‌دهنده بازه هزینه‌های ثابت و رقم انتهایی نشان‌دهنده

بازه‌ی مربوط به مکان مشتریان است. گفتنی است به این دلیل که CPLEX توانایی حل هیچ‌کدام از دسته‌های مسئله با تعداد کارهای بیشتر از ۹ را نداشته است، از آوردن آن‌ها خودداری شده است. همچنین در بین حل‌کننده‌های[۱] موجود فقط CPLEX توانایی حل بالای این دسته از مسائل را داشته است. جدول ۱ نشان‌دهنده عوامل مختلف و سطوح آن است.

جدول ۱ عوامل مختلف و سطوح آن

Factor	**Value**		**Level**
Number of jobs	jobs3,5,7,9		3,5,7,9
w_k	[1 10]		1
	[45 55]		2
	[1 100]		3
	[90 100]		4
$\propto$	0		1
	0.5		2
	1		3
$t_{kk'}$	**Facility**	**Customer**	------
	(0,0)	[0 50]	1
	(25,25)	[0 50]	2
	(0,0)	[0 100]	3
	(50,50)	[0 100]	4

۱. Solver

جداول ۲ تا ۴ نشان‌دهنده نتایج محاسباتی به ازای مقادیر مختلف $\propto$ هستند. همچنین سطر انتهایی هر جدول نشان‌دهنده میانگین مقادیر ستون مربوطه هستند.

جدول ۲ نتایج حل مسائل تولیدشده برای $\propto$ های مختلف

Sub group	N	$\propto = 0$				$\propto = 0.5$				$\propto = 1$			
		CPLEX Time	Avg. $\frac{HA}{Opt.}$	Max. $\frac{HA}{Opt.}$	No. of opt. CPLEX	CPLEX Time	Avg. $\frac{HA}{Opt.}$	Max. $\frac{HA}{Opt.}$	No. of opt. CPLEX	CPLEX Time	Avg. $\frac{HA}{Opt.}$	Max. $\frac{HA}{Opt.}$	No. of opt. CPLEX
111	3	0.120	0.011	0.099	10	0.070	0.015	0.070	10	0.080	0.030	0.049	10
	5	0.303	0.030	0.153	10	0.308	0.055	0.180	10	0.333	0.035	0.059	10
	7	16.297	0.050	0.146	10	11.899	0.062	0.130	10	17.745	0.051	0.168	10
	9	807.344	0.054	0.134	8	491.948	0.093	0.152	9	952.731	0.055	0.224	9
112	3	0.089	0.010	0.016	10	0.084	0.016	0.096	10	0.086	0.005	0.080	10
	5	0.389	0.058	0.116	10	0.859	0.061	0.162	10	0.636	0.036	0.148	10
	7	22.468	0.052	0.110	10	33.839	0.033	0.105	10	45.728	0.094	0.209	10
	9	1072.810	0.107	0.210	7	736.149	0.054	0.262	8	1113.311	0.103	0.167	8
113	3	0.072	0.047	0.075	10	0.070	0.050	0.011	10	0.084	0.006	0.058	10
	5	0.227	0.027	0.120	10	0.230	0.040	0.124	10	0.304	0.038	0.138	10
	7	14.981	0.037	0.139	10	9.467	0.052	0.157	10	12.907	0.051	0.100	10
	9	57.519	0.082	0.172	10	204.172	0.086	0.174	10	100.073	0.069	0.178	10
114	3	0.078	0.039	0.082	10	0.083	0.007	0.000	10	0.072	0.011	0.072	10
	5	0.512	0.034	0.134	10	0.281	0.041	0.098	10	0.279	0.046	0.144	10
	7	21.931	0.039	0.104	10	1.524	0.081	0.182	10	21.982	0.055	0.209	10
	9	154.860	0.064	0.224	10	381.521	0.088	0.121	10	194.111	0.055	0.171	10
121	3	0.078	0.011	0.016	10	0.077	0.017	0.041	10	0.088	0.028	0.029	10
	5	0.296	0.027	0.068	10	0.275	0.025	0.082	10	0.264	0.013	0.036	10
	7	68.541	0.077	0.253	10	18.433	0.076	0.221	10	7.894	0.041	0.101	10
	9	387.811	0.057	0.209	9	1049.144	0.049	0.133	9	545.200	0.057	0.128	9
122	3	0.075	0.013	0.022	10	0.070	0.004	0.055	10	0.080	0.013	0.009	10
	5	0.530	0.041	0.115	10	0.198	0.027	0.102	10	0.288	0.019	0.075	10
	7	23.168	0.040	0.099	10	4.339	0.052	0.161	10	30.426	0.067	0.114	10
	9	1191.153	0.063	0.144	9	1177.772	0.056	0.183	9	962.788	0.053	0.097	9
123	3	0.070	0.021	0.043	10	0.073	0.022	0.108	10	0.081	0.013	0.061	10
	5	0.226	0.021	0.094	10	0.282	0.068	0.160	10	0.223	0.054	0.135	10

	7	4.841	0.054	0.190	10	10.679	0.039	0.111	10	4.946	0.063	0.104	10
	9	92.156	0.064	0.192	10	147.529	0.113	0.203	10	177.755	0.058	0.118	10

ادامه جدول ۲

Sub group	N	$\alpha = 0$				$\alpha = 0.5$				$\alpha = 1$			
		CPLEX Time	Avg. $\frac{HA}{Opt.}$	Max. $\frac{HA}{Opt.}$	No. of opt. CPLEX	CPLEX Time	Avg. $\frac{HA}{Opt.}$	Max. $\frac{HA}{Opt.}$	No. of opt. CPLEX	CPLEX Time	Avg. $\frac{HA}{Opt.}$	Max. $\frac{HA}{Opt.}$	No. of opt. CPLEX
124	3	0.068	0.038	0.061	10	0.113	0.014	0.159	10	0.074	0.029	0.049	10
	5	0.253	0.042	0.134	10	9.381	0.057	0.148	10	0.238	0.048	0.127	10
	7	5.675	0.060	0.164	10	655.781	0.058	0.133	10	4.339	0.056	0.129	10
	9	98.710	0.074	0.186	10	41.353	0.086	0.397	10	185.253	0.066	0.182	10
211	3	0.095	0.006	0.034	10	0.097	0.018	0.027	10	0.094	0.006	0.065	10
	5	2.800	0.024	0.058	10	6.269	0.021	0.061	10	7.487	0.018	0.038	10
	7	808.742	0.015	0.041	10	1252.741	0.031	0.087	9	503.596	0.028	0.083	8
	9	-	-	0.000	0	-	-	0.000	0	-	-	0.000	0
212	3	0.092	0.038	0.085	10	0.075	0.013	0.034	10	0.089	0.058	0.004	10
	5	13.516	0.008	0.033	10	0.632	0.022	0.056	10	8.899	0.015	0.045	10
	7	1173.187	0.034	0.089	7	50.503	0.066	0.166	8	294.584	0.054	0.044	8
	9	-	-	0.000	0	-	-	0.000	0	-	-	0.000	0
213	3	0.090	0.009	0.029	10	0.072	0.010	0.023	10	0.071	0.011	0.070	10
	5	1.049	0.027	0.085	10	3.568	0.011	0.028	10	2.562	0.043	0.084	10
	7	55.294	0.022	0.061	10	256.942	0.033	0.075	10	374.304	0.037	0.140	10
	9	1108.164	0.036	0.096	9	1442.149	0.042	0.094	7	1315.090	0.074	0.074	1
214	3	0.098	0.024	0.022	10	0.086	0.033	0.016	10	0.101	0.024	0.057	10
	5	4.109	0.019	0.045	10	4.313	0.011	0.025	10	3.981	0.027	0.078	10
	7	88.811	0.036	0.082	9	706.699	0.034	0.080	10	124.523	0.028	0.102	10
	9	833.240	0.020	0.054	4	736.830	0.006	0.006	1	1465.435	0.035	0.050	4
221	3	0.094	0.013	0.032	10	0.097	0.013	0.025	10	0.089	0.010	0.058	10
	5	2.723	0.014	0.053	10	8.677	0.022	0.066	10	5.516	0.021	0.053	10
	7	662.477	0.028	0.057	10	757.385	0.044	0.071	8	346.645	0.026	0.052	10
	9	2484.700	0.026	0.026	1	-	-	0.000	0	-	-	0.000	0
222	3	0.098	0.004	0.042	10	0.082	0.021	0.032	10	0.085	0.003	0.004	10
	5	11.097	0.021	0.075	10	1.428	0.008	0.019	10	4.967	0.010	0.039	10
	7	831.602	0.025	0.050	8	98.898	0.024	0.057	6	488.957	0.038	0.101	10
	9	-	-	0.000	0	-	-	0.000	0	-	-	0.000	0
223	3	0.081	0.007	0.014	10	0.080	0.010	0.027	10	0.086	0.010	0.017	10
	5	1.318	0.046	0.111	10	2.462	0.009	0.032	10	0.933	0.043	0.118	10
	7	54.055	0.016	0.025	10	46.479	0.033	0.094	10	80.294	0.035	0.067	10
	9	945.777	0.045	0.119	8	1525.507	0.037	0.065	6	751.048	0.031	0.051	4

ادامه جدول ۲

Sub group	N	$\alpha = 0$				$\alpha = 0.5$				$\alpha = 1$			
		CPLEX Time	Avg. $\frac{HA}{Opt.}$	Max. $\frac{HA}{Opt.}$	No. of opt. CPLEX	CPLEX Time	Avg. $\frac{HA}{Opt.}$	Max. $\frac{HA}{Opt.}$	No. of opt. CPLEX	CPLEX Time	Avg. $\frac{HA}{Opt.}$	Max. $\frac{HA}{Opt.}$	No. of opt. CPLEX
224	3	0.081	0.008	0.030	10	0.099	0.007	0.024	10	0.091	0.016	0.053	10
	5	2.431	0.009	0.032	10	2.754	0.015	0.042	10	3.627	0.027	0.056	10
	7	44.177	0.024	0.108	10	888.144	0.026	0.071	9	183.568	0.028	0.106	10
	9	939.270	0.073	0.092	3	527.160	0.032	0.035	2	436.890	0.000	0.000	1
311	3	0.098	0.016	0.041	10	0.087	0.029	0.056	10	0.103	0.032	0.030	10
	5	6.083	0.021	0.042	10	8.716	0.017	0.093	10	4.170	0.039	0.122	10
	7	476.558	0.014	0.072	9	1403.212	0.036	0.093	10	1021.957	0.016	0.058	10
	9	-	-	0.000	0	-	-	0.000	0	-	-	0.000	0
312	3	0.088	0.027	0.042	10	0.074	0.019	0.066	10	0.097	0.029	0.012	10
	5	8.870	0.033	0.145	10	0.935	0.025	0.080	10	5.513	0.020	0.038	10
	7	1219.357	0.028	0.065	7	147.731	0.076	0.109	10	449.220	0.038	0.083	10
	9	-	-	0.000	0	-	-	0.000	0	-	-	0.000	0
313	3	0.069	0.014	0.000	10	0.079	0.014	0.054	10	0.091	0.014	0.038	10
	5	0.855	0.034	0.133	10	1.571	0.018	0.072	10	1.119	0.034	0.081	10
	7	61.268	0.029	0.054	10	413.810	0.024	0.080	10	201.122	0.026	0.067	10
	9	406.090	0.043	0.082	3	1419.015	0.041	0.086	6	845.573	0.058	0.075	3
314	3	0.074	0.014	0.060	10	0.093	0.009	0.031	10	0.085	0.030	0.064	10
	5	2.619	0.028	0.078	10	5.317	0.026	0.083	10	3.414	0.019	0.043	10
	7	303.414	0.025	0.075	10	579.997	0.053	0.089	10	421.838	0.035	0.067	9
	9	766.810	0.025	0.051	4	815.702	0.060	0.104	4	3581.080	0.060	0.060	1
321	3	0.081	0.020	0.004	10	0.089	0.020	0.036	10	0.085	0.010	0.042	10
	5	3.224	0.016	0.043	10	2.754	0.013	0.036	10	5.768	0.020	0.073	10
	7	463.050	0.023	0.044	9	572.330	0.020	0.077	10	449.377	0.032	0.091	10
	9	-	-	0.000	0	-	-	0.000	0	710.780	0.018	0.018	1
322	3	0.093	0.043	0.036	10	0.089	0.008	0.060	10	0.083	0.035	0.000	10
	5	4.931	0.031	0.045	10	0.695	0.011	0.036	10	6.723	0.017	0.047	10
	7	628.532	0.025	0.052	9	192.547	0.019	0.062	10	404.532	0.040	0.091	9
	9	-	-	0.000	0	-	-	0.000	0	-	-	0.000	0
323	3	0.070	0.015	0.047	10	0.078	0.006	0.029	10	0.080	0.009	0.034	10
	5	0.844	0.025	0.067	10	2.419	0.018	0.063	10	3.819	0.017	0.065	10
	7	46.586	0.029	0.084	10	144.222	0.026	0.076	10	132.539	0.021	0.067	10
	9	549.248	0.064	0.098	5	1219.404	0.029	0.100	9	819.788	0.041	0.076	4
324	3	0.073	0.020	0.079	10	0.097	0.039	0.039	10	0.075	0.025	0.046	10
	5	2.149	0.003	0.009	10	6.113	0.038	0.085	10	2.723	0.025	0.092	10
	7	81.519	0.033	0.069	10	1239.393	0.031	0.066	10	160.013	0.026	0.083	10
	9	542.058	0.019	0.055	4	1347.060	0.032	0.054	4	774.733	0.058	0.092	3

ادامه جدول ۲

Sub group	N	$\alpha = 0$				$\alpha = 0.5$				$\alpha = 1$			
		CPLEX Time	Avg. $\frac{HA}{Opt.}$	Max. $\frac{HA}{Opt.}$	No. of opt. CPLEX	CPLEX Time	Avg. $\frac{HA}{Opt.}$	Max. $\frac{HA}{Opt.}$	No. of opt. CPLEX	CPLEX Time	Avg. $\frac{HA}{Opt.}$	Max. $\frac{HA}{Opt.}$	No. of opt. CPLEX
411	3	0.106	0.013	0.013	10	0.097	0.011	0.032	10	0.086	0.022	0.017	10
	5	10.917	0.009	0.031	10	13.594	0.005	0.022	10	6.084	0.005	0.015	10
	7	1424.376	0.014	0.036	9	1620.450	0.010	0.028	7	1594.367	0.027	0.083	7
	9	-	-	0.000	0	-	-	0.000	0	-	-	0.000	0
412	3	0.096	0.052	0.023	10	0.135	0.049	0.015	10	0.107	0.020	0.226	10
	5	16.162	0.005	0.025	10	2.349	0.007	0.026	10	17.875	0.027	0.137	10
	7	1559.120	0.002	0.006	3	311.875	0.026	0.047	3	1381.893	0.055	0.106	3
	9	-	-	0.000	0	-	-	0.000	0	-	-	0.000	0
413	3	0.074	0.012	0.041	10	0.072	0.007	0.021	10	0.098	0.053	0.026	10
	5	1.692	0.020	0.058	10	4.534	0.028	0.067	10	4.864	0.006	0.035	10
	7	353.789	0.018	0.051	10	555.059	0.020	0.066	10	236.431	0.017	0.043	8
	9	-	-	0.000	0	2219.933	0.009	0.012	3	-	-	0.000	0
414	3	0.089	0.069	0.043	10	0.092	0.058	0.058	10	0.089	0.077	0.006	10
	5	2.799	0.015	0.044	10	4.313	0.006	0.039	10	7.251	0.011	0.037	10
	7	438.948	0.021	0.060	10	1542.411	0.031	0.130	9	1042.572	0.034	0.052	9
	9	1646.655	0.005	0.010	2	-	-	0.000	0	2408.610	0.012	0.012	1
421	3	0.082	0.003	0.034	10	0.090	0.019	0.007	10	0.094	0.023	0.037	10
	5	7.002	0.006	0.024	10	19.740	0.009	0.029	10	13.794	0.006	0.022	10
	7	1136.606	0.005	0.010	8	1582.000	0.015	0.043	7	793.166	0.018	0.040	10
	9	-	-	0.000	0	-	-	0.000	0	-	-	0.000	0
422	3	0.097	0.002	0.019	10	0.075	0.039	0.011	10	0.103	0.060	0.010	10
	5	15.860	0.014	0.032	10	3.153	0.011	0.037	10	10.587	0.008	0.029	10
	7	1294.149	0.014	0.036	7	277.138	0.032	0.045	4	842.070	0.024	0.045	3
	9	-	-	0.000	0	-	-	0.000	0	-	-	0.000	0
423	3	0.095	0.019	0.017	10	0.070	0.016	0.003	10	0.080	0.014	0.041	10
	5	2.839	0.024	0.073	10	2.968	0.015	0.054	10	4.287	0.012	0.040	10
	7	284.849	0.027	0.080	10	281.008	0.031	0.107	10	215.111	0.019	0.041	9
	9	1344.833	0.014	0.049	7	671.000	0.052	0.064	2	2426.970	0.001	0.001	1
424	3	0.072	0.013	0.012	10	0.070	0.030	0.026	10	0.083	0.035	0.024	10
	5	3.234	0.007	0.033	10	2.968	0.011	0.032	10	3.401	0.008	0.038	10
	7	287.429	0.015	0.044	9	281.008	0.029	0.063	10	374.959	0.029	0.062	9
	9	1147.583	0.014	0.032	3	-	-	0.000	0	2344.380	0.005	0.006	2
Average	-	256.692	0.028	0.065	8.32	284.300	0.031	0.070	8.26	279.787	0.032	0.066	8.12

علامت «-» در جدول نشان‌دهنده این است که CPLEX در آن دسته، موفق به حل هیچ مسئله‌ای نشده است.

درمجموع میانگین خطای روش ابتکاری برابر ۰/۰۳۰ است و میانگین بیشینه خطای مسائل حل‌شده برابر ۰/۰۶۷ است که نشان از کارایی روش ابتکاری با توجه به نوع و پیچیدگی مسئله دارد. بیشترین زمان روش ابتکاری برابر ۰/۰۰۲ ثانیه است و برای مسائلی که در زیر ۳۶۰۰ ثانیه به جواب رسیده‌اند، میانگین زمان حل برای CPLEX برابر ۲۸۱/۴۸۵ است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، CPLEX درمجموع ۸۲/٪۳ مسائل را حل کرده است؛ به‌طوری‌که برای تعداد مشتری‌های ۳ و ۵ تمام مسئله‌ها را در محدودیت زمانی تعیین‌شده حل کرده است. برای تعدادکار ۷، ٪۹۱/۳ مسائل و برای تعداد کار ۹، ٪۳۶ مسائل را به‌صورت بهینه حل کرده است.

به‌وسیله تحلیل واریانس[۱] می‌توان عوامل تأثیرگذار و مهم در آزمایش‌های محاسباتی را مشخص کرد. نتیجه تحلیل واریانس برای میانگین تعداد مسائل حل‌شده بهینه توسط CPLEX در جدول ۵ آمده است. در این تحلیل، میانگین تعداد مسائل حل‌شده به‌صورت بهینه توسط CPLEX به‌عنوان متغیر پاسخ انتخاب شده است. بر این اساس به دلیل کوچک بودن مقادیر p-value، می‌توان نتیجه گرفت هنگامی‌که در بین عوامل انتخاب‌شده از سطحی به سطح دیگر می‌رویم، حداقل یکی از عوامل انتخاب‌شده، تأثیر مهمی در تغییرپذیری متغیر پاسخ دارد [۲۸].

جدول ۵ تحلیل واریانس و بررسی تأثیرات اصلی داده‌ها، متغیر پاسخ: تعداد مسئله حل‌شده بهینه توسط CPLEX

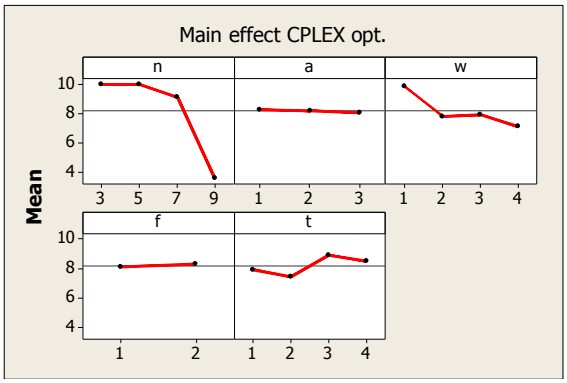
Source	S.S.[1]	d.f.[2]	F	p-value
Corrected Model	3239.797(a)	12	81.339	0.000
n	2731.781	3	274.337	0.000
a	2.880	2	0.434	0.648
w	381.281	3	38.290	0.000
f	3.010	1	0.907	0.342
t	120.844	3	12.136	0.000
Error	1231.443	371		
Total	30180.000	384		

۱- مجموع مربعات

۲- درجه آزادی

۱. Analysis of variance (ANOVA)

در سطح معناداری ۵٪، سختی مسئله تحت تأثیر تعداد مشتریان، وزن آن‌ها و مکان مشتریان قرار دارد. درنتیجه می‌توان گفت کارایی مدل ریاضی و روش ابتکاری نه‌تنها تحت تأثیر تعداد مشتریان که تحت تأثیر سایر عوامل نیز قرار دارد. از شکل ۱ می‌توان دریافت که تعداد مشتریان، مکان آن‌ها و وزن هر مشتری تأثیرات مهمی بر سختی مسئله و کارایی مدل ریاضی مختلط دارد.



شکل ۱ تأثیرات اصلی، متغیر پاسخ: میانگین تعداد مسائل حل‌شده بهینه CPLEX

همچنین با زیادشدن پراکندگی هزینه ثابت ارسال، کارایی روش ابتکاری بالا می‌رود. از طرف دیگر، در مواردی که تسهیل تولیدی در مرکز مختصات و مشتریان در ربع اول قرار می‌گیرند، کارایی روش ابتکاری بالاتر است. همچنین زمانی که تسهیل تولیدی در مکانی بین مشتریان قرار دارد و مشتریان در همه اطراف آن قرار دارند، مسئله مشکل‌تر شده و میانگین تعداد مسئله حل‌شده بهینه توسط CPLEX کاهش می‌یابد. شکل ۱ همچنین نشان‌دهنده این است که هزینه ثابت تأثیر مهمی بر سختی مسئله ندارد.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مسئله تولید و توزیع یکپارچه و ارسال با در نظر گرفتن ارسال سفارش‌ها در حالت چند مشتری به‌صورت مسیریابی در یک زنجیره تأمین با هدف

کمینه‌سازی مجموع وزنی تعداد کارهای دیرکرددار و هزینه‌های ارسال موردبررسی قرار گرفته است و مسئله زیر حل شده است:

$$1//V\ (\infty,\infty)\ ,routing/K/\sum_{k=1}^{K} W_k U_k + \sum_{k=1}^{K} f_v Y_v + \sum_{k=1}^{K}\sum_{k\prime=1}^{K} t_{kk\prime} Q_{kk\prime} \quad (۱۸)$$

این مسئله برای اولین بار با این تابع هدف موردبررسی قرار گرفته‌است. این مسئله ازنظر پیچیدگی NP-Hard قوی است. پس از معرفی و ارائه ساختار جواب بهینه، یک مدل ریاضی (MIP) و یک روش ابتکاری برای مسئله مذکور ارائه شد. در این مقاله، برای این مسئله یک مدل برنامه‌ریزی خطی ریاضی و یک روش ابتکاری به همراه آزمون محاسباتی ارائه شد. طراحی آزمایش‌ها به‌صورت کامل بر روی تمام عوامل انجام شد. نتایج آزمون محاسباتی بر اساس تعداد جواب‌های بهینه به‌دست‌آمده توسط CPLEX و درصد خطای روش ابتکاری و متوسط زمان حل کارایی روش ابتکاری را در ابعاد کوچک نشان می‌دهد. با توجه به عدم کارایی CPLEX برای حل ابعاد متوسط و بزرگ این مسئله (ناشی از پیچیدگی و فضای امکان بزرگ مسئله) می‌توان به‌منظور انجام فعالیت‌های آتی به توسعه روش‌های دقیق و کارا (نظیر شاخه و کران یا شاخه و برش) یا روش‌های فراابتکاری اشاره نمود که در این صورت کارایی روش ابتکاری ارائه‌شده در این مقاله برای ابعاد متوسط و بزرگ نیز می‌تواند موردبررسی قرار گیرد.

۸- منابع

[1] M. Kolyaei, A. Azar, M. Amini, and A. Rajabzadeh Gatari, Design of integrated mathematical model for closed-loop supply chain, Management Research in Iran, 2016, vol. 20, pp. 1-32.

[2] a. azar, l. Mortazavi, and m. m. abbasi, Conceptualization of quality in supply chain management by using Repertory Grid method (Case study : companies in Zanjan

specialized zinc industrial town), Organizational Resources Management Researches,2017, vol. 7, pp. 1-19.

[3] Viergutz, C. Integrated Production and Distribution Scheduling. Thesis, University of Osnabrück, Deutschland, 2011.

[4] Zahra Azadehranjbar, Ali Bozorgi-Amiri. Supply Chain Redesign with Routing Consideration, Modern Researches in Descision Making, vol. 2, pp. 1-23, 2017.

[5] Rasti-Barzoki, M., Integrated Due Date Assignment, Resource Allocation and Production and Outbound Distribution Scheduling in Supply Chain. Ph.D. thesis, Isfahan University of Technology. 2011.

[6] Rasti-Barzoki, M., Hejaz, S.R.., Minimizing the weighted number of tardy jobs with due date assignment and capacity-constrained deliveries for multiple customers in supply chains. European Journal of Operational Research. Vol. 228,2013, pp. 345–357.

[7] Thomas, D. J., & Griffin, P. M., Coordinated supply chain management. European Journal of Operational Research, 94,1996, 1–15.

[8] Rasti-Barzoki, M., Hejazi, S.R., Mazdeh, M.M., A Branch and Bound Algorithm to Minimize the Total Weighed Number of Tardy Jobs and Delivery Costs, Applied Mathematical Modeling, 37, 2013, 4924–4937.

[9] Hall N.G., Potts C.N., Supply Chain Scheduling: Batching And Delivery. Operations Research, Vol. 51, No. 4, 2003, pp. 566-584.

[10] R.M. Hallah, R.L. Bulfin, Minimizing the Weighted Number of Tardy Jobs on a Single Machine. European Journal of Operational Research, Vol. 145,2003, pp. 45–56.

[11] Taghavifard, M., Sheikh, K., Shahsavari, A., Modified ant colony algorithm for the vehicle routing problem with time windows. ,International journal of industrial engineering and production management, Vol. 20, No. 2,2009, pp. 23-30.

[12] Rasti-Barzoki, M., Hejazi, S. R., Mahdavi, M. M., An FPTAS for minimizing the weighted number of tardy jobs with group due date assignment, resource

allocation and distribution planning in supply chain, International journal of industrial engineering and production management,2013, In Press.

[13] Sarmiento, A. M., R. Nagi., A review of integrated analysis of production-distribution systems. IIE Trans. Vol. 31, 1999, pp. 1061–1074.

[14] Erenguc, S. S., N. C. Simpson, A. J. Vakharia. Integrated production/distribution planning in supply chains: An invited review.European Journal of Operational Research, Vol. 115, 1999, pp. 219–236.

[15] Bilgen, B., I. Ozkarahan. Strategic tactical and operational production-distribution models: A review. Internat. Journal of Technology Management, Vol. 28, 2004, pp. 151–171.

[16] Chen Z-L. Integrated Production And Outbound Distribution Scheduling: Review and Extensions. Operations Research, Vol. 58, No. 1, 2010, pp. 130-148.

[17] Li, C.-L., G. Vairaktarakis, C.-Y. Lee. Machine scheduling with deliveries to multiple customer locations. European Journal of Operational Research, Vol. 164, 2005a, pp. 39–51.

[18] Amstrong, R., S. Gao, L. Lei. A zero-inventory production and distribution problem with a fixed customer sequence. Annals of Operations Research, Vol. 159, 2008, pp. 395–414.

[19] Devapriya, P., W. Ferrell, N. Geismar. Optimal fleet size of an integrated production and distribution scheduling problem for a perishable product. A Thesis Presented to The Graduate School of Clemson University, Clemson, SC. 2006.

[20] Li, C.-L., G. Vairaktarakis, C.-Y. Lee. Machine scheduling with deliveries to multiple customer locations. European Journal of Operational Research, Vol. 164, 2005a, pp. 39–51.

[21] A. Mensendiek, J. N. Gupta, and J. Herrmann, Scheduling identical parallel machines with fixed delivery dates to minimize total tardiness, European Journal of Operational Research, vol. 243, 2009, pp. 514-522.

[22] Rasti-Barzoki, M., Minimizing the weighted number of tardy jobs with group due date assignment and capacity-constrained deliveries. International journal of industrial engineering and production management, In Press.

[23] Ullrich, C.A. Integrated machine scheduling and vehicle routing with time windows." European Journal of Operational Research ,http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2 012.11.049. 2013, pp. 152-165.

[24] A. Condotta, S. Knust, D. Meier, and N. V. Shakhlevich, Tabu search and lower bounds for a combined production–transportation problem, Computers & Operations Research, vol. 40, 2013, pp. 886-900.

[25] W. Zhong, An improved algorithm for integrated production and distribution scheduling problem with committed delivery dates," Optimization Letters, vol. 9, 2015, pp. 537-567.

[26] K. Li, C. Zhou, J. Y. Leung, and Y. Ma, Integrated production and delivery with single machine and multiple vehicles, Expert Systems with Applications, vol. 57, 2016, pp. 12-20.

[27] Pinedo, M., L., Scheduling: Theory, Algorithm, and system. 3rd. Ed. Springer Science and Business Media, New york.2008.

[28] Rabadi, G., Mollaghasemi, M., Anagnostopoulos, G.C., A branch-and-bound algorithm for the early/tardy machine scheduling problem with a common due-date and sequence-dependent setup time." Computers and Operations Research, Vol. 31, 2004, pp. 1727–1751.