نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید
IERPS
ISSN: 2345-2269

نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید

سال اول شماره دوم پاییز و زمستان ۱۳۹۲، صفحه ۱۶۷-۱۸۱
www.ier.basu.ac.ir

یک الگوریتم ژنتیک برای مسأله زمانبندی یکپارچه تولید و توزیع با در نظر گرفتن مسیریابی در زنجیره تأمین

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

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

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
دریافت: ۱۳۹۲/۶/۷
پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۱۲

کلمات کلیدی:
زمان‌بندی زنجیره تأمین
کارهای تأخیری
الگوریتم ژنتیک

خلاصه

در این مقاله یک مسأله یکپارچه‌سازی تولید و توزیع با هدف حداقل‌سازی مجموع وزنی تعداد کارهای تأخیری و هزینه‌های حمل‌ونقل با درنظر گرفتن مسیریابی در زنجیره تأمین، مورد بررسی قرار گرفته‌است. در این مسأله k مشتری و یک تسهیل تولیدی وجود دارد که در آن کارها پس از پردازش در سیستم تولیدی، به صورت مسیریابی و در قالب دسته هایی برای مشتریان ارسال می‌شود. ارسال دسته‌ای معمولاً منجر به کاهش هزینه‌های ارسال می‌گردد؛ اما، ممکن است تعداد کارهای تاخیری را افزایش دهد. پیچیدگی مسأله مورد بررسی، NP-Hard قوی است. در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی مختلط و یک الگوریتم ژنتیک (GA) با عملگر تقاطع ابتکاری برای حل مسأله مذکور ارایه شده است. در پایان، نتیجه آزمایشات محاسباتی با طرح کامل با استفاده از تکنیک تحلیل واریانس ارایه شده است. نتایج آزمایشات محاسباتی کارایی الگوریتم فرا ابتکاری را نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

زمان‌بندی زنجیره تأمین موضوع نسبتا جدیدی است که اخیرا مورد توجه فراوان قرار گرفته است [۱]. تولید و توزیع دو عملیات کلیدی در زنجیره تأمین هستند که برای دسترسی به کارایی بهینه در یک زنجیره تامین، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی یکپارچه این دو عامل بسیار مهم است [۲]. مدل های کلاسیک زمان‌بندی تولید به واحد حمل و نقل توجهی ندارند و تصمیمات مربوط به زمان‌بندی تولید و تصمیمات مربوط به برنامه‌ریزی ارسال به‌صورت جداگانه انجام می‌شود. نگرش جامع‌تر این موضوع یعنی یکپارچگی زمان‌بندی تولید و توزیع با در نظر گرفتن شرایط ارسال باعث توجه محققین به رویکرد نوین مدل‌های یکپارچگی زمان‌بندی تولید و توزیع شده است. در مسائل یکپارچگی زمان‌بندی تولید و توزیع، زمان‌بندی تولید و توزیع به‌صورت همزمان و یکپارچه انجام می‌شود. امروزه بررسی مسائل حمل و نقل و هزینه‌های آن به‌صورت گسترده مورد توجه محققین قرار گرفته است. بررسی توماس و گریفین نشان داده است که بیش از ٪۱۱ تولید خالص ملی آمریکا صرف هزینه های حمل و نقل می‌شود و هزینه‌های لجستیک بیش از ٪۳۰ هزینه کالاهای فروخته شده را تشکیل می‌دهد. جهت رسیدن به کارایی بهینه در زنجیره تأمین یکپارچه‌سازی دو بخش تولید و توزیع ضروری بنظر می‌رسد [۳].

چن و وایراکتاراکیس [۴] و پاندور و چن [۵] نشان داده‌اند، استفاده از زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع، منافع بیشتری نسبت به استفاده از زمان‌بندی غیر متمرکز و هماهنگ تولید و توزیع دارد. به همین دلیل موضوع زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع یکی از

* نویسنده مسئول. مرتضی راستی برزکی
تلفن: ۹۸۳۱۱۳۹۱۵۵۱۵+؛ پست الکترونیکی: rasti@cc.iut.ac.ir

موضوعات مهمی است که اخیرا تحقیقات زیادی را در زمینه مدیریت تولید و زنجیره تأمین به خود اختصاص داده است [۶]. در دو دهه گذشته، در خصوص مسائل مطرح در یکپارچگی زمان‌بندی تولید و توزیع (IPODS)[1]، تحقیقات زیادی در سطوح استراتژیک و تاکتیکی صورت گرفته است [۷]. مقالات مروری متعددی نظیر سارمنتو و نگی [۸]، ارنگوس و همکارانش [۹]، گوتسچالک و همکارانش [۱۰]، بیلگن و اوخاهان [۱۱]، چن [۱۲] در خصوص چنین مسائلی وجود دارد.

هال و پاتس [۱۳] در سال ۲۰۰۳ مسائل متنوعی را در خصوص هماهنگی زمان‌بندی، دسته‌بندی و ارسال بررسی کردند و روشی با رویکرد برنامه‌ریزی پویا جهت کمینه‌سازی انواع توابع هدف ارایه نمودند. همچنین هلا و بولفین [۱۴] برای این مسأله یک روش شاخه و کران[2] ارایه کردند.

از طرف دیگر، یکی از موضوعات مهم در مسائل حمل‌ونقل مسأله مسیریابی است. مسأله مسیریابی در زمره مسائل پیچیده بهینه‌سازی است به‌طوری‌که حتی یافتن یک جواب بهینه برای ابعاد کوچک آن بسیار دشوار و زمانبر است[۱۵]. با توجه به پیچیدگی مسأله مسیریابی (که جز مسائل NP-Hard قوی می‌باشد)، الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل آنها مورد توجه قرار گرفته است [۱۶].

در بین مقالاتی که در این زمینه با در نظر گرفتن حمل و نقل به‌صورت مسیریابی انجام شده‌اند می‌توان به مقاله لی و همکاران [۱۷] اشاره کرد که یک الگوریتم برنامه‌ریزی پویا جهت حداقل‌سازی مجموع زمان تحویل کار به مشتری ارایه کردند. ون بوئر و همکاران [۱۸] مسأله تولید و توزیع روزنامه را با هدف حداقل‌سازی زمان تحویل سفارش به مشتریان بررسی کردند و برای آن یک روش ابتکاری ارائه دادند. لی و وایراکتاراکیس [۱۹] برای یک مسأله زمان‌بندی تولید و توزیع با دو ماشین و با در نظر گرفتن بسته‌بندی[3]، یک روش ابتکاری ارایه کردند.

آرمسترانگ [۲۰]، دیواپریا و همکاران [۲۱] و گیسمار و همکاران [۲۲] برروی مسائلی کار کردند که محصول آن‌ها فاسدشدنی است و باید در زمان مشخصی تحویل مشتری شود. چانگ و لی [۲۳] برای مسأله حداقل‌سازی بیشینه زمان تحویل کار به مشتری یک الگوریتم ابتکاری ارایه دادند.

اخیرا استفاده از الگوریتم های فراابتکاری برای حل این دسته از مسائل مورد توجه قرار گرفته است. علی رغم استفاده گسترده الگوریتم ژنتیک در زمینه مسائل زمان‌بندی و مسیریابی، این الگوریتم در مسائل یکپارچه سازی کمتر به کار گرفته شده است [۲۴]. حمیدنیا و همکاران [۲۵]، کاکیچی و همکاران [۲۶] و گارسیا و همکاران [۲۷] در زمینه برنامه‌ریزی تولید، نگهداری و ارسال کالا از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. در سال ۲۰۱۲ کوندوتا و همکاران [۲۸] از الگوریتم جست‌وجوی ممنوع برای حل مسأله یکپارچه‌سازی با روش ارسال مستقیم استفاده کردند. اما نزدیک‌ترین کار به موضوع مورد بررسی در این مقاله، مربوط به مقاله اولریخ [۲۴] می‌باشد که یک مسأله یکپارچه‌سازی تولید و توزیع با استفاده از مسیریابی را در حالت ماشین‌های موازی برای حداقل‌سازی مجموع دیرکرد مورد بررسی قرار داده و برای آن یک الگوریتم ژنتیک ارایه کرده است.

همان‌طور که مشخص است در هیچ یک از مقالات مرور شده، تابع هدف مجموع وزنی تعداد کارهای تأخیری به همراه هزینه‌های ارسال با مسیریابی در نظر گرفته نشده است. تابع هدف مجموع وزنی تعداد کارهای تأخیری دارای کاربردهای فراوانی مانند کالاهای فاسد شدنی و یا محصولات خدماتی است. در این مقاله پس از معرفی مدل عدد صحیح مختلط، یک الگوریتم ژنتیک برای حل این مسأله ارایه می‌شود. انجام تست های محاسباتی به منظور مقایسه دو رویکرد در ادامه آورده شده است. جمع‌بندی به همراه ارایه پیشنهاداتی جهت کارهای آتی، بخش پایانی مقاله می‌باشد.

۲- تعریف مسأله

یک تسهیل تولیدی تک ماشین و k مشتری وجود دارد. هر مشتری یک سفارش را به تسهیل تولیدی ارایه می‌دهد. هر کار دارای زمان پردازش، وزن (جریمه تأخیر) و موعد تحویل می‌باشد. انقطاع کارها مجاز نمی‌باشد. به منظور کاهش هزینه ارسال، ارسال کارها به‌صورت دسته‌ای مجاز است. جهت انجام این کار می‌توان کارهای پردازش شده را دسته‌بندی نمود و تمام کارهای یک دسته را با یک وسیله و با هزینه f_v برای هر مشتری ارسال نمود. علی‌رغم این که 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 وجود دارد و ظرفیت آنها نامحدود فرض شده است. یک کار تأخیری است اگر بعد از موعد تحویل به مشتری مربوطه تحویل داده شود در غیر این صورت به موقع نامیده می‌شود. زمان تکمیل و ارسال هر دسته برابر زمان تکمیل آخرین کار آن دسته می باشد.

با توجه به علائمی‌که چن [۲۹] برای مسائل زمان‌بندی با در نظر گرفتن ارسال در نظر گرفته است نمایش اختصاری مسأله مورد نظر در این مقاله به صورت زیر می‌باشد که منظور، کمینه‌سازی مجموع وزنی تعداد کارهای تاخیری و هزینه‌های ارسال در حالت تک ماشین با وجود k مشتری، ارسال به‌صورت مسیریابی و وجود تعداد کافی وسیله حمل و نقل با فرض نامحدود بودن ظرفیت برای هر یک و نیز عدم وجود محدودیت و شرایط خاص می‌باشد:

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

1. Integrated Production and Outbound Distribution System
2. Branch and Bound
3. Bundling

۲-۱- پیچیدگی مسأله

از آنجایی‌که ارسال کالا به چند مشتری در یک دسته قابل انجام است؛ برای هر بار ارسال، باید یک مسیر یافت. از آنجایی‌که مسأله مسیریابی به تنهایی NP-Hard قوی است، مسأله مورد بررسی در این پژوهش نیز NP-Hard قوی می‌باشد.

۲-۲- ویژگی جواب بهینه

دانستن ویژگی‌های جواب بهینه معمولا منجر به ارایه روش حل بهتر و کاراتر می‌شود. 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. فرض شود یک توالی بهینه وجود داشته باشد که در آن بیکاری وجود داشته باشد. حال اگر بیکاری حذف شود، کارهای غیر تأخیری، تأخیری نخواهند شد و کارهای تأخیری نیز ممکن است از حالت تأخیری خارج شوند. در نتیجه تابع هدف بدتر نخواهد شد.

ویژگی ۲. اگر کار i زودتر از کار j پردازش شود، کار i دیرتر از کار j تسهیل تولیدی را ترک نخواهد کرد.

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 به اندازه 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 تأخیری بودند از حالت تاخیری خارج شوند ولی عکس آن برقرار نیست.

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

۳- علائم اصلی

پارامترهای مسأله

K	تعداد کل کارها
f_v	هزینه هر بار ارسال وسیله نقلیه
d_k	موعد تحویل پیش فرض کار مشتری kام
p_k	زمان پردازش کار مشتری k
w_k	وزن کار مشتری k

متغیرهای مسأله

$t_{kk'}$	مدت زمان لازم برای رسیدن به مشتری k' با حرکت مستقیم از مشتری k
U_k	یک، اگر کار مشتری k تاخیر داشته باشد و در غیر این صورت صفر
X_{kv}	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 تحویل 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

۴- مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط

در این قسمت مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط[1] مسأله ارائه می‌شود.

$$\min \quad \sum_{k=1}^{K} W_k U_k + \sum_{v=1}^{V} f_v Y_v + \sum_{k=1}^{K}\sum_{k'=1}^{K}\sum_{v=1}^{V} t_{kk'} Q_{kk'v} \quad (2)$$

$s.t$:

$$\sum_{v=1}^{V} X_{kv} = 1; \qquad k = 1, \dots, K \quad (3)$$

$$X_{0v} \geq X_{kv}\ ; \quad v = 1, \dots, V,\ k = 1, \dots, K \quad (4)$$

$$X_{kv} = \sum_{k'=1}^{K} Q_{kk'v}\ ; \quad k = 0, \dots, K, v = 1, \dots, V \quad (5)$$

$$X_{kv} = \sum_{k'=1}^{K} Q_{k'kv}\ ; \quad k = 0, \dots, K, v = 1, \dots, V \quad (6)$$

$$G_{kk'} + G_{k'k} \leq 1\ ; \quad k = 1, \dots, K, k' = 1, \dots, K \quad (7)$$

$$G_{k'k} + G_{kk''} + G_{k''k} \geq 1\ ; \quad k = 1, \dots, K, k' = 1, \dots, K',\ k'' = 1, \dots, K \quad (8)$$

$$G_{kk} = 0\ ; \quad k = 1, \dots, K \quad (9)$$

$$S_v \geq \sum_{k'=1}^{K} (P_{k'} * G_{k'k}) + P_k - M(1 - X_{kv})\ ;$$

$$k = 1, \dots, K, v = 1, \dots, V \quad (10)$$

$$D_k \geq S_v + t_{0k} - M(1 - Q_{0k'v})\ ;$$

$$k = 1, \dots, K,\ k' = 1, \dots, K,\ v = 1, \dots, V \quad (11)$$

$$D_k \geq D_{k'} + t_{k'k} - M\left(1 - \sum_{v=1}^{V} Q_{kk'v}\right)\ ;$$

$$k = 1, \dots, K,\ k' = 1, \dots, K \quad (12)$$

$$D_k - d_k \leq M U_k\ ; \quad ;\ k = 1, \dots, K \quad (13)$$

$$X_{kv} \leq Y_v\ ;\ k = 1, \dots, K,\ v = 1, \dots, V \quad (14)$$

$$Q_{kk'v} \in \{0,1\}, X_{kv} \in \{0,1\},$$

$$G_{k'k} \in \{0,1\}, U_k \in \{0,1\}, Y_v \in \{0,1\}, S_v, D_k \geq 0$$

$$k = 1, \dots, K,\ k' = 0, \dots, K,\ v = 1, \dots, V \quad (15)$$

رابطه (۲) تابع هدف مسأله را که شامل کمینه کردن مجموع هزینه ها می‌باشد، نشان می‌دهد. این هزینه‌ها متشکل از سه هزینه مجموع وزنی کارهای تأخیری، هزینه ثابت ارسال و هزینه‌های متغیر

1. Mixed integer Programing (MIP)

ارسال است. رابطه (۳) بیان می‌کند که هرکار فقط توسط یک ماشین ارسال گردد. در رابطه (۴) و (۱۱) اندیس صفر نشانگر تسهیل تولیدی می‌باشد، رابطه (۴) بیان می‌کند که تسهیل تولیدی در هر مسیر وجود دارد. روابط (۵) و (۶) تضمین می‌کنند که قبل و بعد از هر کار فقط و فقط یک کار تحویل شود. روابط (۷)، (۸) و (۹) روابط مربوط به توالی کارها در پردازش آنها می‌باشد [۳۰] که این توالی در محاسبه زمان اتمام پردازش هر کار در تسهیل تولیدی و در نهایت محاسبه زمان حرکت هر وسیله نقلیه مورد استفاده 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 می‌باشد. رابطه (۱۱) و (۱۲) مربوط به زمان تحویل هر کار به مشتری می‌باشد. در واقع رابطه (۱۱) کمکی برای محاسبه زمان تحویل کار مشتری اول هر دسته است. همچنین محدودیت‌های مربوط به زمان تحویل سفارش مشتری از تشکیل زیرتور[1] جلوگیری می‌کند.

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 تعیین شده برای آن بزرگتر باشد آن کار تاخیری محسوب می‌شود. در رابطه (۱۴) بیان می‌شود که اگر یک کار، باید توسط یک وسیله ارسال شود، آن وسیله باید به استخدام درآید. روابط (۱۵) بیانگر وضعیت متغیرها می‌باشد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود این مدل دارای $K(K^2+5K+6)$ محدودیت و $K(K^2+2K+2)$ متغیر صفر و یک و $2k$ متغیر عدد صحیح غیرمنفی می‌باشد؛ همان‌طور که مشخص است تعداد محدودیت ها و متغیرهای این مدل زیاد است که همین امر تأثیر زیادی بر روی زمان حل بالای این مسأله دارد (برای مثال مسأله‌ای با ۱۰ مشتری دارای ۱۵۶۰ محدودیت و ۱۲۲۰ متغیر صفر و یک و ۲۰ متغیر عدد صحیح غیر منفی است). به همین دلیل برای حل این مسأله یک روش فراابتکاری ارائه می‌گردد تا در زمان قابل قبول برای این مسأله در ابعاد بزرگ، جواب نزدیک به بهینه به‌دست آید.

۵- الگوریتم ژنتیک

در مسائل کلاس NP-Hard قوی، پیچیدگی فضای حل سبب می‌شود تا روش‌های بهینه‌سازی دقیق نتوانند به راحتی به جواب واقعی دست یابند و یا جهت دست‌یابی به چنین جوابی زمان زیادی صرف شود. به همین دلیل رویکرحل مسأله در این تحقیق مبتنی بر بکارگیری الگوریتم فراابتکاری برای حل مسأله است. در این میان الگوریتم ژنتیک یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری مشهور و پرکاربرد است که با بررسی مرور ادبیات موضوع، کاربرد گسترده آن برای مسائل زمان‌بندی و مسیریابی مشخص می‌شود.

الگوریتم ژنتیک که یکی از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی و الهام گرفته شده از قوانین طبیعی است اولین بار توسط جان هالند و همکارانش [۳۱] در سال ۱۹۷۵ میلادی ارایه گردید. بعدها این روش به‌وسیله دانشمندان دیگری مانند گلدبرگ [۳۲] و دیویس [۳۳] گسترش یافت.

رویکردی که در این تحقیق برای به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک مورد توجه قرار گرفته‌است رویکرد مبتنی بر اولویت است. در رویکرد مبتنی بر اولویت، به هر کار اولویتی نسبت داده شده و کارها بر اساس اولویت زمان‌بندی می‌شوند.

الگوریتم ژنتیک توسط مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها که به عنوان جواب اولیه می‌باشند، کار خود را آغاز می‌کند. هر کدام از این کروموزوم‌ها دارای یک مقدار برای تابع هدف است که مقدار برازندگی[2] نام دارد. هر چه مقدار برازندگی بهتر باشد کروموزوم مربوطه شانس بیشتری برای بقا یا تولید مثل پیدا می‌کند. این کروموزوم‌ها، جمعیت اولیه[3] نام دارند و به طرق مختلف مانند تولید تصادفی، استفاده از روش ابتکاری و ... قابل تولید هستند. مرحله بعد ایجاد یک ساز و کار برای انتخاب والدین جهت تولید نسل بعدی است. والدین انتخاب شده توسط این ساز و کار تحت عملگرهای بازترکیبی[4] و جهش[5] قرار گرفته و فرزندان جدیدی را تولید و جایگزین نسل قبل می‌کند. این الگوریتم آن‌قدر تکرار می‌شود تا به معیار توقف مانند تعداد تکرار، تعداد تکرار بدون بهبود و ... برسد.

در الگوریتم پیشنهادی برای نشان دادن یک جواب شدنی از رشته‌های عدد صحیح به طول K مانند شکل (۱) استفاده می‌شود. ژن‌ها نشان‌دهنده مشتریان هستند و توالی آن‌ها نشان‌دهنده توالی مشتریان است. کروموزوم اول نشان دهنده ترتیب مشتریان برای پردازش و ارسال سفارش است و کروموزوم دوم نشان‌دهنده دسته‌ای است که سفارش هر مشتری در آن دسته ارسال می‌گردد.

۱	۳	۴	۲	۶	۵
۱	۱	۱	۲	۲	۳

شکل (۱): نمایش جواب به‌صورت کروموزوم

در شکل (۱) در ردیف اول ترتیب مشتریان نمایش داده شده است. در ردیف دوم دسته‌هایی که مشتریان در آن‌ها قرار می‌گیرند مشخص شده است. بر اساس این کروموزوم مشتریان یک، سه و چهار در دسته اول، مشتریان دو و شش در دسته دوم و مشتری پنج در دسته سوم قرار می‌گیرند. این نحوه کدبندی باعث می‌شود تا هر جایگشتی از ژن‌های کروموزوم به یک زمان‌بندی قابل قبول برای مسأله تبدیل شود.

تابع برازندگی پایه و اساس فاز انتخاب را تشکل می‌دهد. در این مقاله تابع هدف همان تابع برازندگی در نظر گرفته شده است. در این

1. Sub tour

2. Fitness Value
3. Initial population
4. Crossover
5. Mutation

الگوریتم یکی از جواب‌های اولیه بر اساس یک روند ابتکاری که برای این مسأله توسعه داده شده است ایجاد شده و بقیه بصورت تصادفی تولید می‌شوند. در این روش ابتکاری برای انتخاب هر کار، کار با بیشترین مقدار معیار زیر انتخاب می‌شود:

$$I_k = \left(\frac{w_k}{p_k}\right) - \left(\frac{d_k - p_k - t - c}{A}\right) - (t) \qquad (۲)$$

معیار ابتکاری مورد استفاده در این مسأله بر اساس ایده معیار انتخاب ابتکاری پیندو [۳۰] و با توجه به عوامل موثر در تابع هدف و رفتار مسأله تنظیم شده است که بر اساس آزمایشات محاسباتی اولیه انجام‌گرفته این معیار از معیارهای دیگر نتیجه بهتری ارایه می‌دهد. معمولا این معیارها در روش‌های ابتکاری و بر اساس ویژگی‌های تابع هدف مورد استفاده قرار می‌گیرند. این معیار از سه بخش مختلف تشکیل شده است که در آن سفارشات بر اساس وزن، زمان پردازش، زمان باقیمانده تا موعد تحویل و زمان مورد نیاز برای رسیدن به مشتری مذکور از مشتری قبلی مورد انتخاب قرار می‌گیرند.

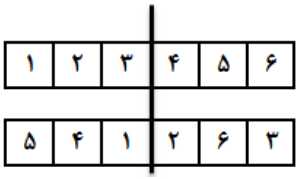
در این معیار، t برابر زمان لازم برای رسیدن از مشتری انتخاب شده قبلی به مشتری k است. همچنین c برابر زمان تحویل کار به مشتری قبلی است. در قسمت اول معیار، سفارشاتی که دارای وزن بیشتر و زمان پردازش کمتری هستند دارای مقدار بیشتری در شاخص خواهند بود. در قسمت دوم، سفارشاتی که زمان کمتری تا موعد تحویل آن‌ها باقیمانده است دارای مقدار بیشتری در شاخص هستند. در قسمت آخر معیار انتخاب نیز سفارشاتی که زمان کمتری نیاز دارند تا از مشتری کنونی به مشتری مذکور برسند مقدار بیشتری را در شاخص دارا خواهند بود.

با توجه به ویژگی شماره ۲، برای کارهایی که برای زمان‌بندی در این مرحله انتخاب می‌شوند، همزمان برای دسته‌ای که باید در آن قرار بگیرند نیز تصمیم‌گیری می‌شود. با این روند یکپارچگی تصمیمات نیز لحاظ خواهد شد.

اگر کار مذکور تاخیری بود به دسته کارهای تأخیری اضافه شده و در غیر اینصورت با انجام یک مقایسه هزینه، زمان‌بندی می‌شود. اگر هزینه اضافه کردن این کار به دسته جدید (شامل هزینه ثابت دسته جدید و هزینه حمل و نقل) کمتر از هزینه اضافه کردن آن به دسته قبلی (شامل هزینه حمل‌ونقل و هزینه تاخیری کردن کارهای دسته قبل) باشد برای آن کار دسته جدید ایجاد می‌شود و در غیر اینصورت به همان دسته قبلی اضافه شده و به سراغ انتخاب کار بعدی بروید. بعد از زمان‌بندی همه کارها، به سراغ دسته کارهای تاخیری بروید. اگر هزینه اضافه کردن این کارها به آخرین دسته کمتر از هزینه اضافه کردن کارها به دسته جدید بود آن‌ها را به دسته آخر اضافه کنید و در غیر این صورت آن‌ها را به دسته جدید اضافه کنید. ترتیب مشتریان دسته کارهای تأخیری به‌صورت نزدیک‌ترین مشتری ملاقات‌نشده می‌باشد.

در GA پیشنهادی برای انتخاب والد از روش مسابقه‌ای استفاده شده است. این روش نیازی به اطلاعات از تمام جمعیت ندارد. این روش از دو بخش تصادفی و مقایسه و انتخاب تشکیل شده است که به همین دلیل شدت همگرایی و واگرایی آن نسبت به سایر روش‌ها کمتر است. همچنین در پیش‌آزمایش‌ها نتایج بهتری بدست داد. در این روش برای انتخاب هر والد تعداد ۵ فرد از بین جمعیت موجود انتخاب شده و از بین آن‌ها بهترین فرد از لحاظ برازندگی به عنوان والد انتخاب می‌شود. این کار به تعداد مورد نیاز انجام می‌شود و در هر بار والد انتخاب شده در استخر[1] قرار می‌گیرد. برای انجام عمل تولید مثل هربار دو والد به صورت تصادفی از استخر انتخاب می‌شود.

در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی برای تولید فرزندان از عملگرهای تقاطع و جهش استفاده می‌شود. عملگر تقاطع استفاده شده در این الگوریتم، یک نوع عملگر تقاطع ابتکاری است که بر اساس روش ابتکاری توضیح داده شده، توسعه یافته است. این عملگر بر اساس ویژگی‌های مسأله توسعه داده شده است به همین دلیل در پیش‌آزمایش‌ها نتایج خوبی ارائه کرده است. مطابق شکل (۲) در تقاطع ابتکاری ابتدا یک نقطه تصادفی در هر کروموزوم انتخاب می‌شود. سپس از گره بعد از نقطه تصادفی انتخابی ژن با کمترین هزینه بر اساس معیار هزینه ارایه شده در روش ابتکاری که جهت دسته بندی استفاده می‌شد, انتخاب می‌شود؛ یعنی برای انتخاب هر ژن بررسی می‌گردد که اضافه کردن این کار به دسته قبلی کارها تا چه حد هزینه را افزایش می‌دهد. این عمل تا جایی که تمام ژن‌ها مورد بررسی قرار گیرند ادامه می‌یابد.



شکل (۲): تقاطع ابتکاری

روند عملکرد در تقاطع به این صورت است که اگر ژن چهار در والد اول به صورت اختیاری انتخاب می‌گردد. آن‌گاه بر اساس ترتیب ژن‌های موجود در والد دوم اگر هزینه قرار گیری ژن پنج بیشتر از هزینه قرار گیری ژن شش بعد از ژن چهار باشد، ژن شش انتخاب شده و باید در کروموزوم اول ژن شش با ژن پنج جابجا شود یا ژن شش به منظور جلوگیری از تکرار حذف شود. هزینه‌های مورد بررسی شامل هزینه تاخیری کردن کارهای دسته قبل یا اگر دسته جدید اضافه شود، هزینه اضافه کردن دسته جدید و هزینه حمل و نقل است. این فرآیند تا زمانی که فرزند جدید به طور کامل ایجاد شود ادامه یابد.

عملگر جهش مورد استفاده در این الگوریتم جهش بهم ریختگی تصادفی[2] است. در جهش بهم ریختگی تصادفی دو موقعیت در رشته مربوط به ترتیب مشتریان به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و مقادیر بین آن دو به‌صورت تصادفی در هم می‌آمیزد. این جهش در شکل (۷) نشان داده شده است. لازم به ذکر است این عملگر در مقایسه با دو عملگر پرکاربرد در مسیریابی و زمان‌بندی؛ جهش جابجایی و جهش معکوس نتایج بهتری را در پیش‌آزمایش‌ها نشان

1. Pool
2. Scramble Mutation

داده است.

مکانیزم انتخاب بازمانده‌ای که برای الگوریتم پیشنهادی در نظر گرفته شده، به این صورت است که درصدی از بهترین‌های جمعیت به عنوان نخبه بدون اعمال هیچ گونه تغییری به نسل بعد راه می‌یابند و مابقی جمعیت به این صورت انتخاب می‌شوند که بعد از اعمال عملگرهای تقاطع و جهش بر روی والدین، فرزندان برای حضور در نسل بعد انتخاب شده و والدین حذف می‌شوند. این مکانیسم انتخاب بازمانده به دلیل نخبه گرایی و از طرفی جایگزینی سایر فرزندان بجای والدین از نظر همگرایی زودرس و یا واگرایی زیاد دچار مشکل نیست. زیرا نرخ نخبه‌گرایی تضمین کننده این است که همیشه مقداری از جست و جو اطراف بهترین جواب بدست‌آمده می‌باشد. همچنین جابجایی فرزندان و والدین از همگرایی زودرس جلوگیری کرده و اجازه جست و جوی مناطق جدید را می‌دهد.

برای الگوریتم GA پیشنهادی در این مقاله رسیدن به یکی از شرایط زیر موجب توقف الگوریتم می‌شود. ۱) رسیدن به تعداد معینی از نسل‌ها. ۲) برای یک دوره معینی از نسل‌ها بهبودی حاصل نشود.

همچنین برای تنظیم پارامترها مقادیر مختلفی در نظر گرفته شد که در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱): تنظیم پارامتر

نوع پارامتر	سطوح مختلف	پارامتر انتخاب شده
احتمال تقاطع	۰/۶،۰/۷، ۰/۸ و ۰/۹	۰/۷
احتمال جهش	۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲	۰/۱
جمعیت اولیه	۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰	۱۵۰
تعداد نسل	۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰	۴۰۰
نرخ نخبه گرایی	۰/۰۵ و ۰/۱	۰/۰۵

البته مشهود است که تعداد نسل و تعداد جمعیت بیشتر کارایی کیفیت جواب الگوریتم را بدتر نمی‌کند اما می تواند منجر به افزایش زمان حل شود؛ بنابراین مقادیر مندرج در جدول ۱ انتخاب شد. همچنین یک معیار خاتمه دیگر برای الگوریتم پیشنهادی تدارک دیده شد؛ بدین صورت که در صورت تشکیل ۱۰۰ نسل متوالی و عدم بهبود جواب، الگوریتم خاتمه یابد.

۶- نتایج محاسباتی

۶-۱- طراحی آزمایش

برای سنجش کارایی الگوریتم ارائه شده باید آن را سنجید، اما به این دلیل که برای این مسأله هیچ دسته مسأله نمونه وجود ندارد، لذا برای این کار یک آزمایش محاسباتی طراحی شد که در آن سطوح مختلف پارامترها بر اساس نتایج پیش‌آزمایش‌ها انتخاب گردیدند. معیارهای مدنظر در انتخاب این پارامترها، معناداری سطوح مختلف و پوشش حالت‌های بیشتری از مسأله بوده‌است.

به منظور بررسی کارایی الگوریتم ژنتیک ارایه شده و مقایسه کارایی آن با مدل MIP، این الگوریتم در محیط C# کدنویسی شد. این الگوریتم توسط کامپیوتری دارای CPU با سرعت 2.3GHz و 2GB حافظه RAM اجرا شد و همچنین یک محدودیت زمانی ۳۶۰۰ ثانیه‌ای برای اجرای الگوریتم MIP در نظر گرفته شده است.

زمان پردازش در بازه [۱,۱۰۰] در نظر گرفته شده است. وزن مشتریان در چهار بازه [۱,۱۰]، [۴۵,۵۵]، [۱,۱۰۰] و [۹۰,۱۰۰] که بازه اول میانگین کم وزن‌ها، بازه دوم میانگین متوسط، بازه سوم میانگین متوسط با پراکندگی زیاد و بازه انتهایی میانگین زیاد را شامل می‌شود، تولید شده است. برای هزینه ثابت هم دو بازه [۱,۱۰] و [۱,۱۰۰] 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 گردد که زمان تحویل آخرین کار را با A_2 نشان می‌دهیم. این دو حالت، حالت‌های حدی هستند که می‌تواند رخ دهد:

$$(0, \propto A_1 + (1- \propto) A_2] \qquad (۳)$$

در عبارت (۳) برای آلفا سه مقدار ۰، ۰/۵ و ۱ در نظر گرفته شده است. برای تعیین مکان مشتریان چهار حالت در نظر گرفته شد. حالت اول آنکه مکان تسهیل تولیدی در نقطه (۰,۰) و مشتریان در فاصله [۰,۵۰] باشند. حالت دوم آنکه تسهیل تولیدی در نقطه [۲۵,۲۵] و مشتریان در فاصله [۰,۵۰] باشند. در حالت سوم تسهیل تولیدی در مکان (۰,۰) و مشتریان در فاصله [۰,۱۰۰] قرار می‌گیرند. در حالت چهارم نیز تسهیل تولیدی در مکان [۵۰,۵۰] و مشتریان در فاصله [۰,۱۰۰] قرار می‌گیرند. همچنین فاصله بین مشتریان با یکدیگر و تسهیل تولیدی بر اساس فاصله اقلیدسی محاسبه گردیده است. جدول (۲) نشان‌دهنده عوامل مختلف، سطوح آن و بازه‌هایی که عوامل مختلف در آن بازه تولید شده‌اند، است.

۶-۲- نتایج

جدول (۵)، (۶) و (۷) که در بخش ضمائم آورده شده‌اند نشان دهنده نتایج محاسباتی به ازای مقادیر مختلف $\propto$ می‌باشند. ستون اول، زیرگروه‌ها، ستون دوم، تعداد مشتریان، ستون سه و چهار زمان حل، ستون پنج و شش میانگین و حداکثر خطای GA و ستون هفت و هشت نیز تعداد مسأله بهینه حل شده توسط GA و CPLEX را نشان می‌دهند. به این دلیل که CPLEX توانایی حل هیچ کدام از دسته‌های مسأله با تعداد کارهای بیشتر از ۹ را نداشته است از آوردن آن‌ها خودداری شده است. همچنین در بین Solver های موجود فقط CPLEX توانایی حل بالای این دسته از مسائل را داشته است. علامت "-" در جدول نشان‌دهنده این است که CPLEX در آن کلاس موفق به حل هیچ مسألهای نشده است.

جدول (۲): عوامل مختلف و سطوح آن

Factor	Value	Level
Number of jobs	۳,۵,۷,۹	۳,۵,۷,۹

Factor	Value	Level
w_k	[۰,۱۰]	۱
	[۴۵,۵۵]	۲
	[۱,۱۰۰]	۳
	[۹۰,۱۰۰]	۴
$\propto$	۰	۱
	۰/۵	۲
	۱	۳
f_v	[۱,۱۰]	۱
	[۱,۱۰۰]	۲
$t_{kk'}$	Facility customer ----------	
	(۰,۰) [۰,۵۰]	۱
	(۲۵,۲۵) [۰,۵۰]	۲
	(۰,۰) [۰,۱۰۰]	۳
	(۵۰,۵۰) [۰,۱۰۰]	۴

CPLEX موفق به حل ٪۸۲/۰۰ مسائل شده که به‌طور میانگین برای هر مسأله ۳۴۵/۱۱ ثانیه زمان صرف شده است، در حالی که GA ٪۷۲/۹۴ مسائل را با خطای میانگین ٪۰/۳۲ حل کرده است که برای هر مسأله بطور متوسط ۰/۱۹ ثانیه زمان صرف شده است. باید توجه داشت که میانگین زمان حل CPLEX زیاد می‌باشد، بصورتی که در بسیاری از گروه‌ها قادر به حل هیچ مسأله‌ای نیست.

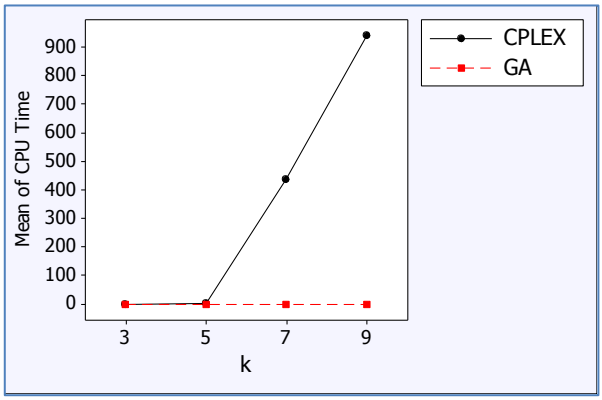
همچنین با توجه به جدول می‌توان دریافت که الگوریتم GA در مسائل حل شده با تعداد مشتری سه، ٪۹۹/۷۹ کل مسائل و برای دسته مسائل با تعداد پنج مشتری، ٪۹۹/۵۸ کل مسائل را با خطای ناچیزی حل کرده‌اند. الگوریتم GA برای دسته مسائل با تعداد هفت مشتری، ٪۷۵/۶۲ درصد از کل مسائل را با میانگین خطای ٪۰/۲۰ و با میانگین زمان ۰/۲۲ ثانیه حل کرده است. این در حالی است که CPLEX برای این دسته از مسائل موفق به حل ٪۹۰/۱۰ از کل مسائل شده است. برای دسته مسائل با تعداد نه مشتری نیز الگوریتم GA، ٪۱۶/۷۷ مسائل را میانگین خطای ٪۱/۱۰ و با میانگین زمان ۰/۳۱ ثانیه حل کرده است که CPLEX در این دسته موفق به حل ٪۳۶/۰۴ از کل مسائل شده است.

جدول (۳) به‌طور خلاصه نشان‌دهنده خلاصه نتایج عملکرد الگوریتم GA و CPLEX است که نشان از کارایی مناسب GA با توجه به میانگین خطا و زمان حل دارد.

جدول (۳): خلاصه نتایج محاسباتی

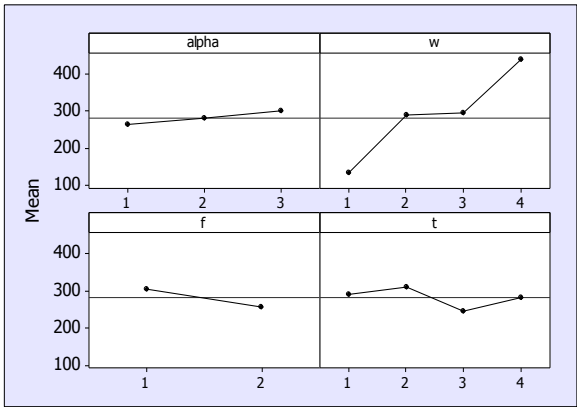
Avg. No. of Opt . (%)		Avg. CPU Time (second)		$\frac{GA-Opt.}{Opt.}$ (%)	k
GA	CPLEX	GA	CPLEX		
۹۹/۷۹	۱۰۰/۰۰	۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۰۳	۳
۹۹/۵۸	۱۰۰/۰۰	۰/۱۳	۴/۱۲	۰/۰۳	۵
۷۲/۶۳	۹۰/۱۰	۰/۲۲	۴۳۶/۴۳	۰/۲۲	۷
۱۶/۷۷	۳۶/۰۴	۰/۳۱	۹۳۹/۸۰	۱/۱۱	۹
۷۲/۹۴	۸۱/۵۴	۰/۱۹	۳۴۵/۱۱	۰/۴۸	Overall

همچنین برای نشان دادن پیچیدگی مسأله، نمودار مجموع زمان حل تمام مسائل برای هر دسته از مشتریان به نمایش درآمده‌است. شکل (۳) نشان‌دهنده میانگین زمان صرف شده برای حل مسائل، برای تعداد مختلف مشتریان است. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود مقدار زمان لازم برای حل مسائل توسط CPLEX بسیار بالاتر از مقدار زمان لازم برای حل مسأله توسط الگوریتم ژنتیک است. همچنین جهش ناگهانی میانگین زمان حل توسط CPLEX نشان‌دهنده پیچیدگی بالای مسأله است، به‌صورتی که با تغییر تعداد مشتری از ۵ به ۷، افزایش ناگهانی میانگین زمان حل مشاهده می‌شود. از طرفی با توجه به نتایج به‌دست آمده، مقدار میانگین خطای الگوریتم ژنتیک برابر ٪۰/۴۸ است که با توجه به میانگین زمان حل GA، می‌توان به کارایی بالای الگوریتم ژنتیک پیشنهادی پی برد.



شکل (۳): میانگین زمان حل

شکل (۴) نشان‌دهنده اثرات اصلی عوامل مختلف بر زمان حل مسائل توسط CPLEX است. در این شکل متغیر پاسخ میانگین زمان حل مسائل می‌باشد. در این شکل مشاهده می‌شود که بیشترین زمان حل مربوط به زیر گروه ۴۱۲ از گروه سوم است؛ یعنی برای آلفا در سطح یک، w در سطح ۴، f در سطح ۱ و t در سطح ۲ باشد. در این حالت پیچیدگی مسأله در بالاترین سطح خود قرار دارد.



شکل (۴): اثرات عوامل مختلف بر زمان حل مسائل توسط CPLEX

۶-۳- تحلیل واریانس

تحلیل واریانس[1] می‌تواند برای تعیین عوامل مؤثر و تعیین اثرات متقابل بین عوامل مورد استفاده قرار گیرد. نتیجه تحلیل واریانس برای میانگین تعداد مسائل حل شده بهینه توسط GA در جدول (۴) آمده‌است. در این تحلیل میانگین تعداد مسائل حل شده به‌صورت بهینه توسط CPLEX و GA به عنوان متغیر پاسخ انتخاب شده است. بر این اساس به دلیل کوچک بودن مقادیر p-value می‌توان نتیجه گرفت؛ هنگامی‌که در بین عومل انتخاب شده از سطحی به سطح دیگر می‌رویم، حداقل یکی از عوامل انتخاب شده تأثیر مهمی در تغییرپذیری متغیر پاسخ دارد [۳۵].

در جدول (۴) نتیجه تحلیل واریانس CPLEX و GA بصورت همزمان آورده شده است. جهت انجام مقایسه نتایج مربوط به تحلیل واریانس الگوریتم CPLEX و GA در یک جدول و در کنار یکدیگر گزارش شده‌اند. در این تحلیل میانگین تعداد مسائل حل شده به‌صورت بهینه توسط CPLEX و GA به عنوان متغیر پاسخ انتخاب شده است.

در سطح معناداری ٪۵ سختی مسأله یا همان عملکرد CPLEX توسط تعداد مشتریان، وزن آنها و مکان مشتریان تحت تأثیر قرار دارد. در نتیجه می‌توان گفت درصد جواب بهینه به‌دست آمده توسط CPLEX نه تنها تحت تأثیر تعداد مشتریان که تحت تأثیر سایر عوامل نیز قرار دارد. همچنین از جدول (۴) این نتیجه به‌دست می‌آید که تعداد مشتریان و مکان آن‌ها، تعداد مشتریان و وزن هر مشتری و وزن هر مشتری و مکان آن مشتری اثر متقابلی بر سختی مسأله دارند.

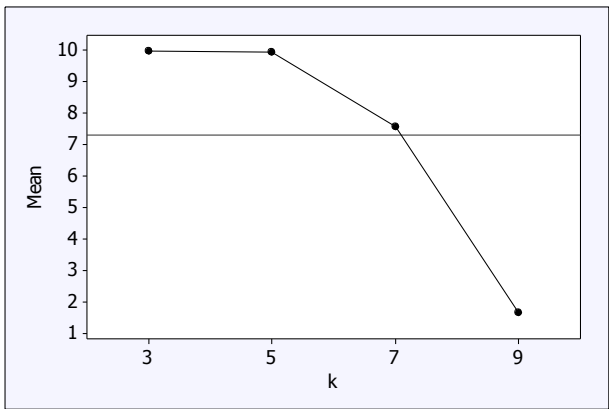
در مورد الگوریتم GA با توجه به نتایج تحلیل واریانس می‌توان دریافت که کارایی الگوریتم GA تحت تاثیر عوامل مختلفی از جمله تعداد مشتریان، وزن هر مشتری، هزینه ثابت و مکانی است که مشتری در آن قرار دارد.

در شکل (۵) و شکل (۶) اثرات عوامل مسأله بر تعداد جواب بهینه الگوریتم ژنتیک آمده است. در این شکل می‌توان اثر سطوح مختلف این عوامل بر کارایی GA را مشاهده کرد.

جدول (۴): تحلیل واریانس، متغیر پاسخ: میانگین جواب‌های بهینه‌ی CPLEX و GA

Source	D.V.[a]	S.S.[b]	d.f.[c]	F	p
Corrected Model	CPLEX	۴۱۲۹/۰۰۵	۶۸	۷۸/۲۹۵	۰/۰۰۰
	GA	۴۸۲۰/۶۹۸	۸	۷۵/۶۸۶	۰/۰۰۰
Intercept	CPLEX	۲۵۵۴۴/۳۷۵	۱	۳۲۲۳۶/۱۹۸	۰/۰۰۰
	GA	۲۰۴۳۱/۲۵۳	۱	۲۱۸۱۲/۷۶۴	۰/۰۰۰
k	CPLEX	۲۷۰۲/۸۹۶	۳	۱۱۳۶/۹۴۵	۰/۰۰۰
	GA	۴۴۰۹/۳۴۱	۳	۱۵۶۹/۱۶۳	۰/۰۰۰
α	CPLEX	۵/۶۴۱	۲	۳/۵۵۹	۰/۰۳۰
	GA	۱/۱۳۰	۲	۰/۶۰۳	۰/۵۴۸
w	CPLEX	۳۸۸/۰۶۳	۳	۱۶۳/۲۳۵	۰/۰۰۰
	GA	۷۲/۶۵۴	۳	۲۵/۸۵۵	۰/۰۰۰
f	CPLEX	۳/۷۶۰	۱	۴/۷۴۵	۰/۰۳۰
	GA	۱۳/۱۲۸	۱	۱۴/۰۱۵	۰/۰۰۰
t	CPLEX	۱۳۵/۲۷۱	۳	۵۶/۹۰۰	۰/۰۰۰
	GA	۵۲/۳۶۲	۳	۱۸/۶۳۴	۰/۰۰۰
$\alpha * f$	CPLEX	۱/۵۹۹	۲	۱/۰۰۹	۰/۳۶۶
	GA	۱/۶۹۳	۲	۰/۹۰۴	۰/۴۰۶
$k * \alpha$	CPLEX	۶/۶۵۱	۶	۱/۳۹۹	۰/۲۱۵
	GA	۳/۴۹۵	۶	۰/۶۲۲	۰/۷۱۳
$\alpha * t$	CPLEX	۷/۸۳۹	۶	۱/۶۴۹	۰/۱۳۳
	GA	۴/۰۹۹	۶	۰/۷۲۹	۰/۶۲۶
$\alpha * w$	CPLEX	۹/۹۲۲	۶	۲/۰۸۷	۰/۰۵۴
	GA	۱۱/۶۲۰	۶	۲/۰۶۸	۰/۰۵۷
$k * f$	CPLEX	۳/۸۴۴	۳	۱/۶۱۷	۰/۱۸۵
	GA	۱۳/۵۹۱	۳	۴/۸۳۷	۰/۰۰۳
$f * t$	CPLEX	۲/۰۹۴	۳	۰/۸۸۱	۰/۴۵۳
	GA	۳/۴۴۵	۳	۱/۲۲۶	۰/۳۰۰
$w * f$	CPLEX	۱/۵۹۴	۳	۰/۶۷۰	۰/۵۷۱
	GA	۱/۸۲۰	۳	۰/۶۴۸	۰/۵۸۵
$k * t$	CPLEX	۱۸۷/۲۹۲	۹	۲۴/۹۹۹	۰/۰۰۰
	GA	۷۱/۳۳۶	۹	۸/۴۶۲	۰/۰۰۰
$k * w$	CPLEX	۷۴۲/۱۶۷	۹	۱۰۴/۰۶۲	۰/۰۰۰
	GA	۱۳۳/۷۹۴	۹	۱۵/۸۷۱	۰/۰۰۰
$w * t$	CPLEX	۲۹/۳۷۵	۹	۴/۱۱۹	۰/۰۰۰
	GA	۲۷/۱۹۰	۹	۳/۲۲۵	۰/۰۰۱
Error	CPLEX	۲۴۹/۶۲۰	۳۱۵		
	GA	۲۹۵/۰۴۹	۳۱۵		
Total	CPLEX	۳۰۰۱۴/۰۰۰	۳۸۴		
	GA	۲۵۵۴۷/۰۰۰	۳۸۴		
Corrected Total	CPLEX	۴۴۶۸/۶۲۵	۳۸۳		
	GA	۵۱۱۵/۷۴۷	۳۸۳		

[a]متغیر وابسته. [b]مجموع مربعات. [c]درجه آزادی

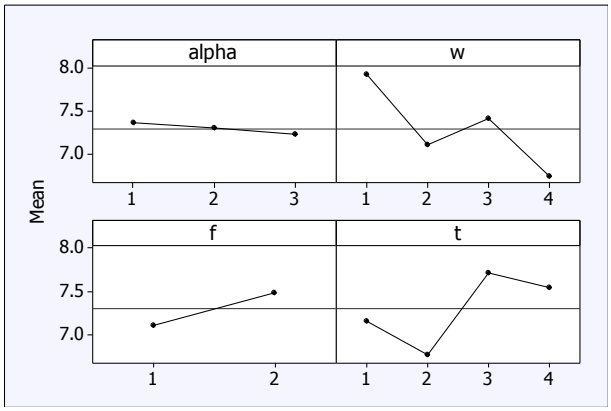


شکل (۵): اثر تعداد مشتری بر تعداد جواب بهینه الگوریتم GA

با توجه به شکل (۶) مشاهده می‌شود سخت‌ترین زیرگروه برای الگوریتم ژنتیک زیرگروهی است که در آن w در سطح ۴، t در سطح ۲، آلفا در سطح ۲ و f در سطح ۱ باشد. در این زیر گروه‌ها میانگین و پراکندگی وزن کار مشتریان زیاد است. در حالی که مشاهده می‌شود

1. Analysis of variance (ANOVA)

برای سطح یک w، که میانگین و پراکندگی مشتریان کم است، کارایی الگوریتم GA بالا رفته‌است.



شکل (۶): اثرات عوامل مختلف بر تعداد جواب بهینه الگوریتم GA

بنابر جدول (۴) کارایی این الگوریتم تحت تأثیر اثرات متقابل بعضی از عوامل قرار می‌گیرد؛ اثرات متقابل عواملی مانند هزینه ثابت و مکان قرار گرفتن مشتریان، تعداد مشتریان و هزینه ثابت، تعداد مشتریان و مکان آن‌ها، تعداد مشتریان و وزن آن‌ها و وزن مشتریان و مکان آن‌ها بر کارایی الگوریتم GA اثرگذار هستند.

۷- نتیجه و جمع‌بندی

در این مقاله مسأله یکپارچه تولید و توزیع با در نظر گرفتن ارسال سفارشات در حالت چند مشتری به صورت مسیریابی در یک زنجیره تامین با هدف حداقل‌سازی مجموع وزنی تعداد کارهای تاخیری و هزینه‌های ارسال مورد بررسی قرار گرفت و برای آن یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارایه شد. با توجه به عدم توانایی CPLEX در حل مسأله با تعداد مشتری بالا در زمان قابل قبول، برای حل این مسأله یک الگوریتم GA توسعه داده شد. در پیشنهادی یک روش ابتکاری برای تولید یکی از جواب‌های جمعیت اولیه ارایه گردید که بر اساس آزمایش‌های اولیه کمک زیادی به کاهش زمان همگرایی الگوریتم و بهبود جواب می‌کند. همچنین یک عملگر تقاطع ابتکاری بر اساس ویژگی‌های مسأله ارایه شد. نتایج تست محاسباتی بر اساس تعداد جواب های بهینه و درصد خطای GA و متوسط زمان حل، کارایی GA را نشان می دهد. همچنین تحلیل واریانس به منظور بررسی تاثیرگذاری سطوح عوامل مختلف انجام شد. به منظور انجام فعالیت های آتی می‌توان به توسعه روش های دقیق و کارا (نظیر شاخه و کران یا شاخه و برش) و یا سایر روش‌های فراابتکاری اشاره نمود. همچنین می‌توان مسأله را در حالت تخصیص موعد تحویل[1] مورد بررسی قرار داد.

[1] Due Date Assignment

مراجع

[۱] راستی برزکی، مرتضی. حجازی، سید رضا، کمینه کردن مجموع وزنی تعداد کارهای تاخیری با درنظر گرفتن مجموع هزینه‌های تخصیص موعد تحویل گروهی و هزینه‌های ارسال، نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، در دست چاپ.

[2] Rasti-Barzoki, M., & Hejazi, S. R. (2013). 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, 228: 345-357.

[3] Thomas, D. J., & Griffin, P. M. (1996). Coordinated supply chain management, European journal of operational research, 94: 1-15

[4] Chen, Z.-L., & Vairaktarakis, G. L. (2005). Integrated scheduling of production and distribution operations, Management Science, 51: 614-628.

[5] Pundoor, G., & Chen, Z. L. (2005). Scheduling a production–distribution system to optimize the tradeoff between delivery tardiness and distribution cost, Naval Research Logistics (NRL), 52: 571-589.

[6] Rasti-Barzoki, M., Hejazi, S. R., & Mazdeh, M. M. (2013). A branch and bound algorithm to minimize the total weighed number of tardy jobs and delivery costs, Applied Mathematical Modelling, 37: 4924-4937.

[۷] راستی برزکی، مرتضی.، حجازی، سیدرضا.، مهدوی مزده، محمد.، یک FPTASبرای کمینه کردن مجموع وزنی تعداد کارهای تاخیری با درنظر گرفتن مجموع هزینه‌های تخصیص موعد تحویل گروهی، تخصیص منابع و برنامه ریزی توزیع در زنجیره تامین، نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، در دست چاپ.

[8] Sarmiento, A. M., & Nagi, R. (1999). A review of integrated analysis of production–distribution systems, IIE transactions, 31: 1061-1074.

[9] Erengüç, Ş. S., Simpson, N. C., & Vakharia, A. J. (1999). Integrated production/distribution planning in supply chains: An invited review, European journal of operational research, 115: 219-236.

[10] Goetschalckx, M., Vidal, C. J., & Dogan, K. (2002). Modeling and design of global logistics systems: A review of integrated strategic and tactical models and design algorithms, European journal of operational research, 143: 1-18.

[11] Bilgen, B., & Ozkarahan, I. (2004). Strategic tactical and operational production-distribution models: a review, International Journal of Technology Management, 28: 151-171.

[12] Chen, Z.-L. (2004). Integrated production and distribution operations: Taxonomy, models, and review, International Series in Operations Research and Management Science: 711-746.

[13] Hall, N. G., & Potts, C. N. (2003). Supply chain scheduling: Batching and delivery, Operations Research, 51: 566-584.

[14] M'Hallah, R., & Bulfin, R. (2003). Minimizing the weighted number of tardy jobs on a single machine, European Journal of Operational Research, 145: 45-56.

[۱۵] تقوی‌فرد، محمدتقی. کیوان، شیخ.، آرین، شهسواری (۱۳۸۸). ارایه روش اصلاح‌شده کلونی مورچگان جهت حل مسأله مسیریابی وسایل نقلیه به همراه پنجره زمانی، نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید عملیات، ۳۰:۲۰-۲۳.

[16] Barbarosoglu, G., & Ozgur, D. (1999). A tabu search algorithm for the vehicle routing problem, Computers & Operations Research, 26: 255-270.

ضمائم

جدول (۵): نتایج حل مسائل تولید شده گروه یک، $\propto = 0$

Sub group	k	Avg. CPU Time		$\frac{GA - Opt.}{Opt.}$		No. of opt. by GA	No. of opt. by CPLEX
		CPLEX	GA	Avg.	Max.		
111	3	0.12	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	0.30	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	16.30	0.21	0.010	0.057	5	10
	9	807.34	0.30	0.029	0.079	3	8
112	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	0.39	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	22.47	0.21	0.002	0.019	9	10
	9	1072.81	0.30	0.009	0.077	4	7
113	3	0.07	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	0.23	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	14.98	0.21	0.010	0.036	5	10
	9	57.52	0.33	0.024	0.135	4	10
114	3	0.08	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	0.51	0.10	0.000	0.000	10	10
	7	21.93	0.22	0.006	0.034	7	10
	9	154.86	0.29	0.015	0.089	5	10
121	3	0.08	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	0.30	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	68.54	0.22	0.001	0.000	9	10
	9	387.81	0.29	0.010	0.086	5	9
122	3	0.08	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	0.53	0.10	0.000	0.000	10	10
	7	23.17	0.21	0.002	0.009	8	10
	9	1191.15	0.34	0.016	0.063	3	9
123	3	0.07	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	0.23	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	4.84	0.22	0.000	0.026	10	10
	9	92.16	0.32	0.019	0.077	5	10
124	3	0.07	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	0.25	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	5.68	0.20	0.008	0.033	8	10
	9	98.71	0.27	0.030	0.090	2	10
211	3	0.10	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	2.80	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	808.74	0.21	0.000	0.017	10	10
	9	-	-	-	-	0	0
212	3	0.09	0.11	0.008	0.085	9	10
	5	13.52	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	1173.19	0.20	0.005	0.023	3	7
	9	-	-	-	-	0	0
213	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	1.05	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	55.29	0.21	0.004	0.017	7	10
	9	1108.16	0.28	0.006	0.031	4	9
214	3	0.10	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	4.11	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	88.81	0.23	0.004	0.018	6	9
	9	833.24	0.32	0.008	0.054	2	4
221	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	2.72	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	662.48	0.22	0.000	0.009	9	10
	9	2484.70	0.27	0.026	0.026	0	1
222	3	0.10	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	11.10	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	831.60	0.26	0.001	0.016	7	8
	9	-	-	-	-	0	0
223	3	0.08	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	1.32	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	54.06	0.25	0.001	0.017	9	10
	9	945.78	0.30	0.015	0.043	4	8
224	3	0.08	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	2.43	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	44.18	0.23	0.000	0.003	9	10
	9	939.27	0.27	0.006	0.038	2	3
311	3	0.10	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	6.08	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	476.56	0.22	0.000	0.037	9	9
	9	-	-	-	-	0	0
312	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	8.87	0.11	0.014	0.140	9	10
	7	1219.36	0.21	0.002	0.014	6	7
	9	-	-	-	-	0	0
313	3	0.07	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	0.86	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	61.27	0.21	0.000	0.021	9	10

[17] Li, Chung-Lun, Vairaktarakis, George, & Lee, Chung-Yee. (2005). Machine scheduling with deliveries to multiple customer locations, European Journal of Operational Research, 164: 39-51.

[18] Van Buer, M. G., Woodruff, D. L., & Olson, R. T. (1999). Solving the medium newspaper production/distribution problem, European Journal of Operational Research, 115: 237-253.

[19] Li, C.-L., & Vairaktarakis, G. (2007). Coordinating production and distribution of jobs with bundling operations, IIE Transactions, 39: 203-215.

[20] Armstrong, R., Gao, S., & Lei, L. (2008). A zero-inventory production and distribution problem with a fixed customer sequence, Annals of Operations Research, 159: 395-414.

[21] Devapriya, P., Ferrell, W., & Geismar, N. (2006). Optimal fleet size of an integrated production and distribution scheduling problem for a perishable product, Working Paper, Clemson University.

[22] Geismar, H. N., Laporte, G., Lei, L., & Sriskandarajah, C. (2008). The integrated production and transportation scheduling problem for a product with a short lifespan, INFORMS Journal on Computing, 20: 21-33.

[23] Chang, Y.-C., & Lee, C.-Y. (2004). Machine scheduling with job delivery coordination, European Journal of Operational Research, 158: 470-487.

[24] Ullrich, C. A. (2013). Integrated machine scheduling and vehicle routing with time windows, European Journal of Operational Research, 227: 152-165.

[25] Hamidinia, A., Khakabimamaghani, S., Mazdeh, M. M., & Jafari, M. (2012). A genetic algorithm for minimizing total tardiness/earliness of weighted jobs in a batched delivery system, Computers & Industrial Engineering, 62: 29-38.

[26] Cakici, E., Mason, S. J., & Kurz, M. E. (2012). Multi-objective analysis of an integrated supply chain scheduling problem, International Journal of Production Research, 50: 2624-2638.

[27] Garcia, J., Lozano, S., Smith, K., Kwok, T., & Villa, G. (2002). Coordinated scheduling of production and delivery from multiple plants and with time windows using genetic algorithms, Paper presented at the Neural Information Processing, ICONIP'02. Proceedings of the 9th International Conference, 3: 1153-1158

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

[29] Chen, Z.-L. (2010). Integrated production and outbound distribution scheduling: review and extensions, Operations Research, 58: 130-148.

[30] Pinedo, M. (2008). Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems, 3rd Edition, Springer.

[31] Holland, J. H. (1975). Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence: U Michigan Press.

[32] Goldberg, D. E., & Holland, J. H. (1988). Genetic algorithms and machine learning, Machine learning, 3: 95-99.

[33] Davis, L. (1991). A genetic algorithms tutorial, Handbook of genetic algorithms: 1-101.

[34] Pétrowski, A. and Taillard, E., (2006). Metaheuristics for hard optimization: Springer.

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

	9	406.09	0.44	0.000	0.037	3	3
314	3	0.07	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	2.62	0.12	0.000	0.000	10	10
	7	303.41	0.23	0.004	0.013	6	10
	9	766.81	0.32	0.008	0.020	2	4
321	3	0.08	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	3.22	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	463.05	0.21	0.001	0.000	7	9
	9	-	-	-	-	0	0
322	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	4.93	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	628.53	0.22	0.001	0.012	8	9
	9	-	-	-	-	0	0
323	3	0.07	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	0.84	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	46.59	0.24	0.001	0.018	9	10
	9	549.25	0.30	0.005	0.041	3	5
324	3	0.07	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	2.15	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	81.52	0.23	0.001	0.022	8	10
	9	542.06	0.42	0.004	0.016	2	4
411	3	0.11	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	10.92	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	1424.38	0.24	0.002	0.010	6	9
	9	-	-	-	-	0	0
412	3	0.10	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	16.16	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	1559.12	0.20	0.000	0.006	3	3
	9	-	-	-	-	0	0
413	3	0.07	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	1.69	0.10	0.000	0.000	10	10
	7	353.79	0.23	0.001	0.005	8	10
	9	-	-	-	-	0	0
414	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	2.80	0.11	0.000	0.003	10	10
	7	438.95	0.23	0.000	0.013	10	10
	9	1646.66	0.26	0.000	0.000	1	2
421	3	0.08	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	7.00	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	1136.61	0.20	0.000	0.010	8	8
	9	-	-	-	-	0	0
422	3	0.10	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	15.86	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	1294.15	0.20	0.000	0.003	7	7
	9	-	-	-	-	0	0
423	3	0.10	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	2.84	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	284.85	0.23	0.001	0.010	8	10
	9	1344.83	0.30	0.002	0.022	6	7
424	3	0.07	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	3.23	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	287.43	0.22	0.000	0.018	9	9
	9	1147.58	0.28	0.003	0.009	2	3

جدول (۶): نتایج حل مسائل تولید شده گروه دو، $\propto = 0.5$

Sub group	k	Avg. CPU Time		$\frac{GA - Opt.}{Opt.}$		No. of opt. by GA	No. of opt. by CPLEX
		CPLEX	GA	Avg.	Max.		
111	3	0.07	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	0.31	0.10	0.000	0.000	10	10
	7	11.90	0.22	0.007	0.015	7	10
	9	491.95	0.31	0.009	0.103	5	9
112	3	0.08	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	0.86	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	33.84	0.21	0.001	0.022	9	10
	9	736.15	0.35	0.007	0.032	4	8
113	3	0.07	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	0.23	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	9.47	0.21	0.008	0.054	8	10
	9	204.17	0.31	0.023	0.085	3	10
114	3	0.08	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	0.28	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	1.52	0.24	0.006	0.031	9	10
	9	381.52	0.29	0.025	0.104	2	10
121	3	0.08	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	0.33	0.10	0.000	0.000	10	10
	7	10.50	0.22	0.003	0.021	6	10
	9	1049.14	0.32	0.015	0.076	4	9
122	3	0.08	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	0.28	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	18.43	0.24	0.003	0.041	7	10
	9	1177.77	0.29	0.012	0.078	3	9
123	3	0.07	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	0.20	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	4.34	0.21	0.010	0.039	6	10
	9	147.53	0.29	0.021	0.111	4	10
124	3	0.07	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	0.28	0.10	0.000	0.000	10	10
	7	10.68	0.24	0.000	0.006	10	10
	9	41.35	0.32	0.041	0.352	5	10
211	3	0.11	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	9.38	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	655.78	0.24	0.000	0.018	9	9
	9	-	-	-	-	0	0
212	3	0.10	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	6.27	0.10	0.000	0.000	10	10
	7	1252.74	0.22	0.008	0.046	6	8
	9	-	-	-	-	0	0
213	3	0.08	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	0.63	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	50.50	0.22	0.004	0.016	6	10
	9	1442.15	0.34	0.011	0.021	2	7
214	3	0.07	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	3.57	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	256.94	0.24	0.000	0.032	9	10
	9	736.83	0.25	0.006	0.006	0	1
221	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	4.31	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	706.70	0.23	0.001	0.032	7	8
	9	-	-	-	-	0	0
222	3	0.10	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	8.68	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	757.39	0.23	0.000	0.025	5	6
	9	-	-	-	-	0	0
223	3	0.08	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	1.43	0.11	0.000	0.000	10	10
	7	98.90	0.21	0.000	0.000	10	10
	9	1525.51	0.38	0.000	0.042	5	6
224	3	0.08	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	2.46	0.10	0.000	0.000	10	10
	7	46.48	0.24	0.001	0.009	8	9
	9	527.16	0.27	0.001	0.020	1	2
311	3	0.10	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	2.75	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	888.14	0.25	0.001	0.026	9	10
	9	-	-	-	-	0	0
312	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	8.72	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	1403.21	0.22	0.000	0.026	9	10
	9	-	-	-	-	0	0
313	3	0.07	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	0.94	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	147.73	0.23	0.000	0.016	10	10
	9	1419.02	0.34	0.016	0.030	2	6
314	3	0.08	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	1.57	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	413.81	0.21	0.000	0.009	9	10
	9	815.70	0.32	0.006	0.024	2	4
321	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	5.32	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	580.00	0.20	0.002	0.024	9	10
	9	-	-	-	-	0	0
322	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	2.75	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	572.33	0.22	0.000	0.009	10	10
	9	-	-	-	-	0	0
323	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	0.70	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	192.55	0.23	0.001	0.029	9	10
	9	1219.40	0.33	0.005	0.047	6	9
324	3	0.08	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	2.42	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	144.22	0.22	0.000	0.000	9	10
	9	1347.06	0.27	0.008	0.015	2	4
411	3	0.10	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	6.11	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	1239.39	0.21	0.002	0.016	5	7
	9	-	-	-	-	0	0
412	3	0.10	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	13.59	0.16	0.000	0.000	10	10
	7	1620.45	0.20	0.001	0.005	2	3
	9	-	-	-	-	0	0

	3	0.14	0.11	0.000	0.000	10	10
413	5	2.35	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	311.88	0.21	0.001	0.018	7	10
	9	2219.93	0.33	0.002	0.005	2	3
	3	0.07	0.11	0.000	0.000	10	10
414	5	4.53	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	555.06	0.25	0.011	0.080	5	9
	9	-	-	-	-	0	0
	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
421	5	4.31	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	1542.41	0.23	0.001	0.011	6	7
	9	-	-	-	-	0	0
	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
422	5	19.74	0.16	0.000	0.000	10	10
	7	1582.00	0.22	0.000	0.000	4	4
	9	-	-	-	-	0	0
	3	0.08	0.11	0.000	0.000	10	10
423	5	3.15	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	277.14	0.21	0.004	0.014	7	10
	9	671.00	0.28	0.000	0.034	2	2
	3	0.07	0.11	0.000	0.000	10	10
424	5	2.97	0.16	0.003	0.026	9	10
	7	281.01	0.22	0.000	0.009	9	10
	9	-	-	-	-	0	0

جدول (۷): نتایج حل مسائل تولید شده گروه سه، $\propto = 1$

Sub group	k	Avg. CPU Time		$\frac{GA - Opt.}{Opt.}$		No. of opt. by GA	No. of opt. by CPLEX
		CPLEX	GA	Avg.	Max.		
	3	0.08	0.11	0.000	0.000	10	10
111	5	0.33	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	17.75	0.22	0.001	0.025	9	10
	9	952.73	0.28	0.023	0.038	2	9
	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
112	5	0.64	0.16	0.000	0.000	10	10
	7	45.73	0.22	0.001	0.025	8	10
	9	1113.31	0.35	0.018	0.041	3	8
	3	0.08	0.11	0.000	0.000	10	10
113	5	0.30	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	12.91	0.23	0.001	0.006	8	10
	9	100.07	0.38	0.025	0.144	4	10
	3	0.07	0.11	0.000	0.000	10	10
114	5	0.28	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	21.98	0.22	0.004	0.036	8	10
	9	194.11	0.32	0.010	0.048	6	10
	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
121	5	0.26	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	7.89	0.21	0.006	0.029	7	10
	9	545.20	0.28	0.015	0.077	2	9
	3	0.08	0.11	0.000	0.000	10	10
122	5	0.29	0.15	0.000	0.005	10	10
	7	30.43	0.21	0.000	0.000	10	10
	9	962.79	0.36	0.007	0.057	5	9
	3	0.08	0.11	0.000	0.000	10	10
123	5	0.22	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	4.95	0.22	0.006	0.034	7	10
	9	177.76	0.29	0.017	0.118	4	10
	3	0.07	0.11	0.000	0.000	10	10
124	5	0.24	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	4.34	0.22	0.003	0.014	9	10
	9	185.25	0.32	0.014	0.068	5	10
	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
211	5	7.49	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	503.60	0.22	0.003	0.024	6	8
	9	-	-	-	-	0	0
	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
212	5	8.90	0.15	0.005	0.045	9	10
	7	294.58	0.20	0.000	0.000	4	4
	9	-	-	-	-	0	0
	3	0.07	0.11	0.000	0.000	10	10
213	5	2.56	0.16	0.000	0.000	10	10
	7	374.30	0.23	0.001	0.029	8	10
	9	1315.09	0.27	0.026	0.055	0	1
	3	0.10	0.11	0.000	0.000	10	10
214	5	3.98	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	124.52	0.22	0.001	0.040	9	10
	9	1465.44	0.36	0.004	0.019	2	4
	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
221	5	5.52	0.16	0.000	0.000	10	10
	7	346.65	0.22	0.000	0.002	7	8
	9	-	-	-	-	0	0
	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
222	5	4.97	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	488.96	0.21	0.002	0.017	8	9
	9	-	-	-	-	0	0
	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
223	5	0.93	0.16	0.000	0.000	10	10
	7	80.29	0.23	0.000	0.013	9	10
	9	751.05	0.31	0.013	0.039	2	4
	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
224	5	3.63	0.15	0.005	0.047	9	10
	7	183.57	0.22	0.001	0.008	9	10
	9	436.89	0.25	0.000	0.000	1	1
	3	0.10	0.11	0.000	0.000	10	10
311	5	4.17	0.16	0.000	0.000	10	10
	7	1021.96	0.21	0.000	0.000	10	10
	9	-	-	-	-	0	0
	3	0.10	0.11	0.000	0.000	10	10
312	5	5.51	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	449.22	0.21	0.001	0.008	5	6
	9	-	-	-	-	0	0
	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
313	5	1.12	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	201.12	0.24	0.002	0.031	8	10
	9	845.57	0.26	0.006	0.015	1	3
	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
314	5	3.41	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	421.84	0.22	0.001	0.017	7	9
	9	3581.08	0.31	0.003	0.026	0	1
	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
321	5	5.77	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	449.38	0.21	0.000	0.037	10	10
	9	710.78	0.27	0.001	0.011	0	1
	3	0.08	0.11	0.000	0.000	10	10
1322	5	6.72	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	404.53	0.22	0.000	0.014	9	9
	9	-	-	-	-	0	0
	3	0.08	0.11	0.000	0.000	10	10
323	5	3.82	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	132.54	0.23	0.005	0.024	8	10
	9	819.79	0.33	0.000	0.067	4	4
	3	0.08	0.11	0.000	0.000	10	10
324	5	2.72	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	160.01	0.21	0.000	0.001	10	10
	9	774.73	0.37	0.006	0.012	2	3
	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
411	5	6.08	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	1594.37	0.23	0.001	0.006	6	7
	9	-	-	-	-	0	0
	3	0.11	0.11	0.023	0.226	9	10
412	5	17.88	0.16	0.000	0.000	10	10
	7	1381.89	0.24	0.021	0.080	2	3
	9	-	-	-	-	0	0
	3	0.10	0.11	0.000	0.000	10	10
413	5	4.86	0.16	0.000	0.000	10	10
	7	236.43	0.21	0.001	0.011	7	8
	9	-	-	-	-	0	0
	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
414	5	7.25	0.16	0.000	0.000	10	10
	7	1042.57	0.22	0.001	0.007	8	9
	9	2408.61	0.27	0.012	0.000	0	1
	3	0.09	0.11	0.000	0.000	10	10
421	5	13.79	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	793.17	0.22	0.000	0.012	10	10
	9	-	-	-	-	0	0
	3	0.10	0.11	0.000	0.000	10	10
422	5	10.59	0.16	0.000	0.000	10	10
	7	842.07	0.20	0.000	0.000	2	3
	9	-	-	-	-	0	0
	3	0.08	0.11	0.000	0.000	10	10
423	5	4.29	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	215.11	0.23	0.000	0.000	8	9
	9	2426.97	0.27	0.001	0.000	0	1

424	3	0.08	0.11	0.000	0.000	10	10
	5	3.40	0.15	0.000	0.000	10	10
	7	374.96	0.24	0.001	0.011	7	9
	9	2344.38	0.32	0.000	0.006	2	2

شکل (۷): جهش بهم‌ریختگی تصادفی

IERPS Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

ISSN: 2345-2269

Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

Fall & Winter 2014 Volume 1. No.2. PP. 167-181

www.ier.basu.ac.ir

A Genetic Algorithm for an Integrated Production and Distribution Scheduling Problem with VRP

M. Khodabandeh, S. R. Hejazi, M. Rasti-Barzoki*

Department of Industrial & System Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan

A R T I C L E I N F O

Article history:

Received 29 August 2013
Accepted 3 March 2014

***Keywords*:**

Supply chain scheduling
Tardy job
Genetic Algorithm

A B S T R A C T

In this paper, an integrated production and distribution problem with goal of minimizing total weighted number of tardy jobs and transportation costs is considered. There is *k* customer and a production facility in which jobs are processed and delivered to customers in batches with routing. Delivering the products in batches reduces the delivery cost but it may increase the number of tardy jobs. The mentioned problem which complexity's is strongly NP-Hard is considered for the first time. In this paper, a mixed integer programing model and a genetic algorithm with a heuristic crossover is developed to solve problem. Full factorial computational test and analysis of variance is performed for evaluation of these two methods. The obtained results show that the genetic algorithm is efficient for the problem.

* Corresponding author. Morteza Rasti-Barzoki
Tel.: +98 3113915515; *E-mail addresses*: rasti@cc.iut.ac.ir