Archive of SID

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

نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید

سال ششم، شماره دوازدهم، بهار و تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۶۳-۸۱
www.ier.basu.ac.ir

DOI: 122/0084/ier.2018.15440.1715

ارائه یک الگوریتم رقابت استعماری ترکیبی برای زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع با در نظر گرفتن مسیریابی وسایل نقلیه

لیلا ایزدی[۱]، فردین احمدی‌زر[۲،*]، جمال ارکات[۳]

۱. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، کردستان، ایران.
۲. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، کردستان، ایران.
۳. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، کردستان، ایران.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
دریافت ۱۳۹۶/۱۰/۲۳
پذیرش ۱۳۹۷/۰۴/۱۰

کلمات کلیدی:
زمان‌بندی یکپارچه
مسیریابی وسایل نقلیه
ارسال دسته‌ای
هزینه نگه‌داری
الگوریتم رقابت استعماری
قواعد غلبه

خلاصه

در این مقاله، مسئله زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع با در نظر گرفتن مسیریابی وسایل نقلیه بررسی می‌شود. یک کارخانه که چند خط تولید موازی در اختیار دارد، سفارش‌های مشتریان را دریافت می‌کند؛ پس از تولید محصولات سفارش داده شده، آن‌ها به‌صورت دسته‌ای به‌وسیله ناوگانی از وسایل نقلیه برای مشتریان ارسال می‌شوند. برخلاف شیوه ارسال مستقیم سفارشات از کارخانه برای هر یک از مشتریان، ارسال دسته‌ای به علت استفاده حداکثری از ظرفیت وسایل حمل و نقل باعث کاهش هزینه‌های حمل می‌شود، اما ممکن است منجر به افزایش هزینه‌های نگه‌داری و دیرکرد شود. هدف، یافتن یک برنامه زمانی یکپارچه‌ی تولید و توزیع است به‌گونه‌ای که هزینه‌های آماده‌سازی، نگه‌داری، توزیع و دیرکرد حداقل شود. ابتدا، مسئله به‌صورت یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط مدله می‌شود. به دلیل NP-hard بودن آن، یک الگوریتم ترکیبی از الگوریتم رقابت استعماری و قواعد غلبه برای حل مسائل با ابعاد بزرگ ارائه می‌شود. به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، تعدادی مسئله نمونه تولید و حل می‌شوند. نتایج محاسباتی حاکی از آن است که الگوریتم عملکرد خوبی برای مسائل با ابعاد بزرگ دارد.

۱- مقدمه

زمان‌بندی نوعی فرآیند تصمیم‌گیری است که با هدف بهینه‌سازی یک و یا چند هدف انجام می‌گیرد و در بازار رقابتی کنونی به یک نیاز اساسی برای بقای کارخانجات و محیط‌های تولیدی تبدیل شده است [۱ و ۲]. در بازار رقابت جهانی موجود، کارخانجات مجبورند مقدار موجودی کم‌تری داشته باشند، اما همچنان باید به نیازهای مشتریان پاسخ دهند. کاهش سطح موجودی منجر به ایجاد یک رابطه نزدیک‌تر بین فعالیت‌های تولید و توزیع می‌شود و این موضوع بیانگر اهمیت زیاد مدل‌های یکپارچه است [۳ و ۴]. هم‌چنین، هزینه‌های بالای موجودی و تمایل به روش تولید به‌موقع، شرکت‌ها را وادار به کاهش موجودی در زنجیره توزیعشان می‌نماید. در نتیجه، اثر هماهنگی فعالیت‌های تولید و توزیع، به عنوان یک زمینه باز و پر چالش برای تحقیق باقی مانده است، چرا که تحقیقات اندکی در این زمینه انجام شده است [۵].

هال و پاتس [۶] در سال ۲۰۰۳ میلادی انواع مختلفی از مسائل زمان‌بندی، دسته‌بندی و توزیع را بررسی کردند. آن‌ها تصمیم‌گیری هماهنگ بین تأمین‌کننده و تولید کننده را مورد بررسی قرار داده و ثابت کردند مسئله تولید و توزیع با تصمیمات هماهنگ از مسائل رام نشدنی است. نتایج تحقیق نشان داد که تصمیمات هماهنگ

* نویسنده مسئول: فردین احمدی‌زر
تلفن: ۳۳۶۶۰۰۷۳-۰۸۷؛ پست الکترونیکی: f.ahmadizar@uok.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

باعث کاهش هزینه‌های سیستم می‌شود؛ این کاهش هزینه - بسته به تابع هدف - تا صد درصد نیز می‌رسید. هم‌چنین، کارایی سیستم با هماهنگی بین تولید و توزیع افزایش می‌یابد. چن و همکاران [۷] در سال ۲۰۰۸ میلادی یک مدل ریاضی غیرخطی برای بررسی زمان‌بندی تولید و مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره زمانی برای محصولات فسادپذیر پیشنهاد دادند. از مفروضات مسئله این بود که تقاضای خرده‌فروشان تصادفی بوده و فساد محصولات از زمان تولید آغاز می‌شد؛ بنابراین، سود تأمین‌کننده غیرقطعی و وابسته به ارزش و حجم تراکنش محصولات فسادپذیر پس از حمل به محل خرده‌فروش است.

چن [۸] در سال ۲۰۱۰ میلادی مرور جامعی بر مقالاتی که در زمینه زمان‌بندی تولید و توزیع کارها بود، انجام داده است. بعضی از مقالات مرور شده حالتی را بررسی کرده بودند که چند مشتری وجود دارد و برای تحویل سفارش‌هایشان از روش مسیریابی وسایل نقلیه استفاده شده بود. بعضی از این مقالات توابع هدفی مبتنی بر زمان تحویل کارها را لحاظ کرده‌اند (به عنوان مثال، گارسیا و همکاران [۹] و گارسیا و همکاران [۱۰]) و بقیه به سایر توابع هدف پرداخته‌اند (به عنوان مثال، چانگ و لی [۱۱]، چن و وایراکتاراکیس [۱۲] و لی و وایراکتاراکیس [۱۳]).

خدابنده و همکاران [۱۴] در سال ۱۳۹۲ مسئله زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع را بررسی کردند که در آن محصولات سفارش داده شده توسط یک ماشین تولید شده و توزیع با روش مسیریابی وسایل نقلیه انجام گردیده است. هدف، یافتن یک زمان‌بندی است که هزینه‌های ثابت و متغیر تحویل کالاها و مجموع وزنی کارهای تأخیری را حداقل کند. برای حل این مسئله یک روش ابتکاری و یک الگوریتم ژنتیک ارائه گردیده است.

اولریخ [۱۵] در سال ۲۰۱۳ میلادی زمان‌بندی تولید و توزیع را با هدف حداقل کردن مجموع تأخیرها ادغام نمود. مسئله کلی شامل دو زیر مسئله است. زیر مسئله اول، زمان‌بندی کارها روی ماشین‌های موازی یکسان با زمان‌های آماده‌سازی[1]وابسته به ماشین را بررسی می‌کند؛ اما زیر مسئله دوم بر روی تحویل کارهای تکمیل شده توسط ناوگانی از وسایل نقلیه که از نظر ظرفیت و زمان آماده‌سازی با یکدیگر متفاوت هستند، تمرکز دارد. برای حل مسئله کلی یک الگوریتم ژنتیک معرفی شده است. مطالعات عددی نشان داد که جواب مسئله ادغامی بهتر از ادغام جواب‌های دو زیر مسئله است.

در صنایع غذایی، به دلیل طبیعت فسادپذیر محصولات که استفاده از سیستم تولید به‌موقع را ایجاب می‌کند، استفاده از یک برنامه‌ریزی ادغامی بسیار مفید است. آموریم و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۳ میلادی برنامه‌ریزی تولید و توزیع در سطح عملیاتی را ادغام نموده و دسته‌بندی[2]محصولات ارسالی را با اندازه بندی دسته تولیدی[3]مقایسه نمودند. این مقایسه در یک سیستم تولید بر اساس سفارش که در آن فسادپذیری کالاها نیز لحاظ می‌شد، انجام گرفت. نتایج نشان داد که اندازه بندی دسته تولیدی جواب‌های بهتری نسبت به دسته‌بندی می‌دهد. چنگ و همکاران [۱۷] در همین سال یک فرآیند تولید و توزیع را که مرحله تولید آن به صورت مسئله زمان‌بندی ماشین‌های موازی یکسان و مرحله توزیع به صورت مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با ظرفیت محدود مدل می‌شد، مطالعه کرده‌اند. هدف، زمان‌بندی فعالیت‌ها است به طوری که مجموع موزون زمان‌های تکمیل و هزینه‌های توزیع حداقل شود. چانگ و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۴ میلادی یک مسئله زمان‌بندی تولید و توزیع یکپارچه را بررسی کرده‌اند که در آن، تولید هر کار توسط یکی از ماشین‌های موازی غیر یکسان انجام می‌شود و سپس -بدون موجودی میانی- به‌وسیله وسایل حمل با ظرفیت محدود به دست مشتری مربوطه می‌رسد. در این مقاله، یک مدل ریاضی و یک الگوریتم کلونی مورچگان برای حل مسئله ارائه شد. همچنین، بلو-فیلهو و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۵ میلادی یک الگوریتم ابتکاری برای حل مسئله تولید و توزیع کالاهای فسادپذیر در سطح عملیاتی ارائه داده‌اند.

لی و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۶ میلادی مسئله زمان‌بندی تولید و توزیع چند هدفه با یک ماشین تولیدی و چندین وسیله حمل را مورد بررسی قرار داده‌اند. هدف، حداقل کردن هزینه تحویل و مجموع زمان‌های انتظار مشتری است. اخیراً دوپریا و همکاران [۲۱] مسئله‌ای کاربردی را بررسی کرده‌اند که در آن، کالاهای فسادپذیر باید بعد از تولید و قبل از اینکه غیرقابل استفاده شوند، با کمترین هزینه توزیع شوند. محققین یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و نیز یک روش ابتکاری مبتنی بر الگوریتم‌های تکاملی برای حل مسئله ارائه داده‌اند.

خلاصه‌ای از ادبیات مرور شده در جدول (۱) ارائه شده است. همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، در تحقیقاتی که در زمینه یکپارچه‌سازی تولید و توزیع در سطح عملیاتی انجام گرفته است، کم‌تر به مسئله موجودی و تأثیر آن بر هزینه‌های سیستم توجه شده است؛ در حالی که یکی از بخش‌های عمده هزینه‌های لجستیک مربوط به هزینه نگه‌داری موجودی می‌باشد و ارسال دسته‌ای کالاها فقط هنگامی توجیه اقتصادی دارد که منجر به افزایش بی‌رویه هزینه نگه‌داری کالاهای تکمیل شده نگردد. این مقاله برای اولین بار، با در نظر گرفتن هزینه‌های موجودی، علاوه بر هزینه‌های تولید، حمل و نقل و تأخیر در تحویل کارها، سعی در نزدیک‌تر شدن هرچه بیشتر مسئله مورد بررسی به دنیای واقعی دارد. علاوه بر ارائه یک مدل ریاضی، تعدادی از قواعد غلبه مسئله استخراج شده و با یک الگوریتم رقابت استعماری که یکی از روش‌های فراابتکاری نسبتاً جدید است، ادغام شده و برای حل مسئله ارائه می‌شود. الگوریتم پیشنهادی از یک شیوه

1. Set up
2. Batching
3. Lot sizing

www.SID.ir

Archive of SID

جدول (۱): خلاصه ادبیات موضوع و جایگاه تحقیق حاضر

منبع	روش حل	مسئله زمان‌بندی مورد بررسی	توضیحات	در نظر گرفتن هزینه نگه‌داری
چن و همکاران [۷]	روش Nelder–Mead محدود شده بهبودیافته با یک هیوریستیک	$1 \mid\mid$ Max profit	در نظر گرفتن تقاضا به صورت تصادفی برای محصولات فسادپذیر	-
گارسیا و همکاران [۹]	GRASP	$1 \mid\mid$ Max profit	-	-
گارسیا و همکاران [۱۰]	الگوریتم جریان هزینه مینیمم و یک هیوریستیک	$Pm \mid\mid$ Max profit	چند محل تولید و وسایل حمل یکسان	-
چانگ و لی [۱۱]	یک هیوریستیک	$1 \mid\mid$ Min the time the vehicle finally returns to the production site	وجود یک وسیله حمل با ظرفیت محدود	-
لی و وایراکتاراکیس [۱۳]	یک هیوریستیک و یک approximation scheme	$bun \mid\mid$ Min distribution cost + customer cost	در نظر گرفتن روش جوی شیر برای توزیع	-
خدابنده و همکاران [۱۴]	یک هیوریستیک و یک الگوریتم ژنتیک	$1 \mid\mid \alpha(\text{distribution cost}) + (1-\alpha)\sum U_j$	-	-
اولریخ [۱۵]	الگوریتم ژنتیک	$Pm \mid\mid \sum T_j$	در نظر گرفتن زمان‌های خدمت‌دهی به مشتری و امکان تحویل سفارش یک مشتری در چند محموله	-
چنگ و همکاران [۱۷]	روش شاخه و کران و تولید ستونی	$Qm \mid\mid \alpha(\text{distribution cost}) + (1-\alpha)\sum w_j C_j$	امکان تحویل سفارش یک مشتری در چند محموله	-
آموریم و همکاران [۱۶]	مدل ریاضی	$Pm \mid\mid$ Min distribution cost + setup cost	مقایسه ارسال دسته‌ای با اندازه بندی دسته تولیدی در سیستم تولید بر اساس سفارش	-
چانگ و همکاران [۱۸]	مدل ریاضی و یک الگوریتم کلونی مورچگان	$Qm \mid\mid \alpha(\text{distribution cost}) + (1-\alpha)\sum w_j D_j$	-	-
بلو-فیلهو و همکاران [۱۹]	یک هیوریستیک	$Pm \mid\mid$ Min production cost + distribution cost	محصولات فسادپذیر، در نظر گرفتن زمان آماده‌سازی ماشین‌آلات	-
لی و همکاران [۲۰]	NSGA-II	$1 \mid\mid$ Min distribution cost & customer waiting times	هر مشتری فقط یک محصول سفارش می‌دهد	-
دوپریا و همکاران [۲۱]	مدل ریاضی و یک روش مبتنی بر الگوریتم‌های تکاملی	$1 \mid\mid$ Min distribution cost	محصولات فسادپذیر، هر وسیله حمل چند بار قابل استفاده است	-
مقاله حاضر	الگوریتم رقابت استعماری با قواعد غلبه	$Pm \mid\mid$ Min production cost + holding cost+ transportation cost + tardiness cost	وسایل حمل متفاوت	*

بازنمایی[1] جدید برای مسئله زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع بهره می‌برد که تا حد ممکن باعث صرفه‌جویی در حافظه مورد نیاز می‌شود. به علاوه، یک روش رمزگشایی[2] جدید ارائه شده است که به الگوریتم کمک می‌کند تا به صورت هوشمند، جواب خوبی را از بین جواب‌های قابل استخراج انتخاب کند.

1. Representation
2. Decoding

ساختار ادامه مقاله به این صورت است: بخش ۲ به بیان مسئله می‌پردازد. در بخش ۳، مسئله به صورت یک مدل ریاضی ارائه می‌شود. در بخش ۴ قواعد غلبه و ویژگی‌های جواب بهینه ذکر می‌شود و بخش ۵ به تشریح روش پیشنهادی ارائه شده برای حل مسئله می‌پردازد. در بخش ۶، نتایج محاسباتی و نهایتاً در بخش ۷، نتیجه‌گیری خواهد آمد.

www.SID.ir

Archive of SID

۲- بیان مسئله

یک کارخانه که دارای چند خط تولید یکسان موازی است، به تولید چند نوع محصول اشتغال دارد. هر یک از محصولات توسط یکی از این خطوط تولید و سپس برای مشتری ارسال می‌شود. قبل از پردازش هر محصول باید ماشین‌آلات خط تولید آماده‌سازی و تنظیم شوند. زمان مورد نیاز برای آماده‌سازی بستگی به آخرین محصولی که توسط همین خط تولید شده است، دارد؛ هر چه این دو محصول از نظر طراحی و مشخصات فنی مشابهت بیش‌تری داشته باشند، زمان کم‌تری برای آماده‌سازی نیاز خواهد بود. آماده‌سازی هر یک از خطوط تولید هزینه‌ای را تحمیل می‌کند که متناسب با مدت زمان آماده‌سازی است.

مشتریان این کارخانه در نقاط جغرافیایی مختلف قرار دارند. هر مشتری می‌تواند بیش از یک نوع محصول را سفارش دهد. به‌منظور کاهش هزینه حمل و استفاده بیشتر از ظرفیت وسایل حمل، سفارش مشتریان به‌صورت دسته‌ای ارسال می‌شوند. دسته، محموله‌ای است که شامل سفارش یک یا چند مشتری است و در یک وسیله حمل بارگیری شده و به دست مشتریان می‌رسد. هر وسیله حمل یک تور را طی می‌کند که از محل انبار کارخانه آغاز می‌شود، سپس یک به یک به محل مشتریانی که باید سفارش آن‌ها را تحویل دهد می‌رود و سرانجام مجدداً به انبار کارخانه بازمی‌گردد. وسایل حمل ظرفیت‌های گوناگون و قیمت‌های متناسب با ظرفیتشان دارند. ارسال سفارش به مشتریان دارای دو نوع هزینه حمل (ثابت و متغیر) و هزینه دیرکرد است. هزینه ثابت حمل، هزینه استفاده از وسیله حمل و هزینه متغیر حمل متناسب با مدت زمان صرف شده برای حمل است. هر مشتری یک زمان سررسید برای دریافت سفارش خود تعیین کرده است. در صورتی که کارخانه در تحویل سفارش به مشتریان تأخیر داشته باشد، باید جریمه تأخیر متناسب با مدت زمان تأخیر را به آن‌ها بپردازد.

از آنجا که هر دسته شامل چند سفارش است، اگر یکی از سفارش‌ها زودتر از بقیه تولید شود باید تا زمان تکمیل تولید سایر سفارش‌های این دسته، در انبار کارخانه منتظر بماند. انبار شدن این کالا منجر به ایجاد هزینه نگه‌داری می‌شود که متناسب با مدت زمان نگه‌داری و ضریب هزینه نگه‌داری کالا می‌باشد.

هدف این مسئله، یافتن یک زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع با حداقل هزینه‌های تنظیم ماشین، هزینه نگه‌داری، هزینه‌های ثابت و متغیر حمل و هزینه دیرکرد است.

مفروضات مسئله:

- زمان آماده‌سازی و تنظیم ماشین‌آلات، وابسته به توالی کارها است.
- تعداد وسایل حمل حداقل به اندازه تعداد مشتریان می‌باشد.
- وسایل حمل از ابتدای بازه زمانی در محل تولید حضور دارند و از هرکدام از آن‌ها فقط یک بار استفاده می‌شود.
- ظرفیت هر وسیله حمل، بیش از اندازه بیشترین مقدار سفارش مشتری‌ها است.
- سفارش هر مشتری یک‌باره تحویل داده می‌شود.

آموریم و همکاران [۱۴] اثبات کرده‌اند که مسئله برنامه‌ریزی در سطح عملیاتی تولید و توزیع که در آن توزیع به شکل مسیریابی وسایل نقلیه انجام شود NP-hard است؛ بنابراین، مسئله مورد بررسی در این مقاله نیز NP-hard می‌باشد.

۳- فرمول‌بندی ریاضی

در این بخش، تعریف پارامترها و متغیرها و مدل ریاضی مسئله برنامه‌ریزی تولید و توزیع یکپارچه ارائه شده است.

پارامترها:

j	اندیس محصولات
i	اندیس مشتری‌ها (شماره ۰ و f+۱ نشان‌دهنده محل کارخانه است)
ij	محصول j که توسط مشتری i سفارش داده شده
k	اندیس خطوط تولید
v	اندیس وسیله حمل
f	تعداد مشتری‌ها
m	تعداد خطوط تولیدی
P	تعداد کل محصولات تولیدی
V	تعداد وسایل حمل
n_i	مجموعه محصولات سفارش داده شده توسط مشتری i
p_{ij}	زمان تولید محصول j که توسط مشتری i سفارش داده شده، برابر با حاصل‌ضرب تقاضای مشتری i از محصول j در زمان تولید هر واحد محصول j (p_j)
α_i	جریمه یک واحد زمانی تأخیر در تحویل سفارش مشتری i
β	هزینه یک واحد زمانی تنظیم ماشین
$setup_{jj'}$	زمان تنظیم ماشین‌آلات بین تولید دو محصول j و j'
$setup_{0j}$	زمان تنظیم ماشین‌آلات اگر اولین محصول تولیدی j باشد.
$tt_{ii'}$	زمان سفر از محل مشتری i به محل مشتری i'
h_{ij}	هزینه نگه‌داری کار ij برای یک واحد زمانی
F_v	هزینه ثابت استفاده از وسیله حمل v
c^v	هزینه یک واحد زمانی سفر طی شده وسیله حمل v
dem_{ij}	مقدار سفارش محصول j توسط مشتری i
d_i	زمان سررسید برای تحویل سفارش مشتری i
cap_v	ظرفیت وسیله حمل v، حداکثر تعداد کالایی که می‌تواند بارگیری کند.
q	یک مقدار عددی به اندازه کافی بزرگ

متغیرهای مربوط به زمان‌بندی:

C_{ij}	زمان تکمیل تولید کار ij
y_{kij}	یک متغیر دودویی که اگر کار ij اولین کاری باشد که در خط k تولید شود، مقدار ۱ می‌گیرد.

www.SID.ir

Archive of SID

$x_{iji'j'}$ یک متغیر دودویی که اگر کار ij دقیقاً قبل از کار $i'j'$ انجام شود، مقدار ۱ می‌گیرد.

u_{ij} یک متغیر دودویی که اگر کار ij آخرین کار پردازش شده روی یک خط تولید باشد مقدار ۱ می‌گیرد.

Ht_{ij} مدت زمان نگه‌داری کار ij در انبار

متغیرهای مربوط به مسیریابی وسیله نقلیه:

w_i^v متغیر دودویی که اگر سفارش مشتری i توسط وسیله v تحویل شود، مقدار ۱ می‌گیرد.

$z_{ii'}^v$ متغیر دودویی که اگر وسیله حمل v سفارش مشتری i را دقیقاً قبل از سفارش مشتری i' تحویل دهد، مقدار ۱ می‌گیرد.

$z_{0,f+1}^v$ متغیر دودویی که اگر از وسیله حمل v استفاده نشود، مقدار ۱ می‌گیرد.

S_v زمان شروع به حرکت وسیله حمل v از کارخانه به سمت مشتریان

T_i مقدار تأخیر در تحویل سفارش مشتری iام

Dd_i زمان تحویل سفارش مشتری iام

$$\min \sum_{i=1}^{f} \alpha_i T_i + \sum_{k=1}^{m}\sum_{i=1}^{f}\sum_{j\in n_i} \beta\, setup_{0j}\, y_{kij} + \sum_{i=1}^{f}\sum_{j\in n_i}\sum_{i'=1}^{f}\sum_{\substack{j\in n_{i'}\\ j\neq j'}} \beta\, setup_{jj'}\, x_{iji'j'} + \sum_{i=1}^{f}\sum_{j\in n_i} Ht_{ij} h_{ij} + \sum_{v=1}^{V} F_v (1 - z_{0,f+1}^v) + \sum_{v=1}^{V}\sum_{\substack{i=0\\ i\neq i'}}^{f}\sum_{i'=1}^{f+1} c^v tt_{ii'} z_{ii'}^v \quad (۱)$$

تابع هدف (۱) مجموع هزینه‌های تأخیر، آماده‌سازی ماشین، هزینه نگه‌داری، هزینه ثابت و متغیر حمل و نقل را حداقل می‌کند.

$$\sum_{i=1}^{f}\sum_{j\in n_i} y_{kij} \le 1, k = 1,\ldots,m \quad (۲)$$

$$\sum_{k=1}^{m} y_{ki'j'} + \sum_{i=1}^{f}\sum_{j\in n_i} x_{iji'j'} = 1, i' = 1,\ldots,f,\ j' \in n_{i'}, ij \neq i'j' \quad (۳)$$

$$\sum_{i'=1}^{f}\sum_{\substack{j'\in n_{i'}\\ ij\neq i'j'}} x_{iji'j'} + u_{ij} = 1, i = 1,\ldots,f,\ j \in n_i \quad (۴)$$

$$C_{ij} \ge (p_{ij} + setup_{0j}) y_{kij}, i = 1,\ldots,f;\ j \in n_i;\ k = 1,\ldots,m \quad (۵)$$

$$C_{ij} \ge C_{i'j'} + p_{ij} + setup_{j'j} + q(x_{i'j'ij} - 1) \quad (۶)$$
$$, i, i' = 1,\ldots,f;\ j \in n_i;\ j' \in n_{i'};\ ij \neq i'j'$$

محدودیت (۲) بیان می‌کند حداکثر یک کار باید در ابتدای توالی کارهای انجام شده توسط هر ماشین وجود داشته باشد. (۳) بیان می‌کند هر کار، یا کار اولی است که توسط ماشین انجام می‌شود و یا بعد از یک کار دیگر انجام می‌شود. (۴) بیان می‌کند هر کار، یا آخرین کاری است که توسط ماشین انجام می‌شود و یا بعد از آن کار دیگری انجام می‌شود. (۵) و (۶) زمان اتمام تولید هر کار را محدود می‌کند.

$$\sum_{v=1}^{V} w_i^v = 1, i = 1,\ldots,f \quad (۷)$$

$$w_0^v \ge w_i^v, v = 1,\ldots,V; i = 1,\ldots,f \quad (۸)$$

$$\sum_{\substack{i=0\\ i'\neq i}}^{f} z_{ii'}^v = w_{i'}^v, v = 1,\ldots,V, i' = 1,\ldots,f+1 \quad (۹)$$

$$\sum_{\substack{i=1\\ i'\neq i}}^{f+1} z_{i'i}^v = w_{i'}^v, v = 1,\ldots,V; i' = 0,\ldots,f \quad (۱۰)$$

$$w_i^v \le 1 - z_{0,f+1}^v, v = 1,\ldots,V; i = 1,\ldots,f \quad (۱۱)$$

$$c_v \ge \sum_{i=1}^{f}\sum_{j\in n_i} dem_{ij} w_i^v, v = 1,\ldots,V \quad (۱۲)$$

$$S_v \ge C_{ij} - q(1 - w_i^v), i = 1,\ldots,f,\ j \in n_i, v = 1,\ldots,V \quad (۱۳)$$

محدودیت (۷) تضمین می‌کند سفارش هر مشتری حتماً توسط یک وسیله حمل به او تحویل داده شود. (۸) بیان می‌کند اگر کاری توسط وسیله v تحویل داده می‌شود، این وسیله حتماً باید از انبار کارخانه شروع به حرکت کند تا زیر تورها حذف شود. (۹) بیان می‌کند وسیله نقلیه‌ای که سفارش مشتری i را تحویل می‌دهد یا از محل انبار کارخانه به سمت محل مشتری حرکت می‌کند و یا از محل یک مشتری دیگر. (۱۰) بیان می‌کند این وسیله حمل بعد از تحویل سفارش به مشتری مورد نظر یا به انبار کارخانه بازمی‌گردد و یا سفارش یک مشتری دیگر را می‌رساند. (۱۱) بیان می‌کند اگر سفارش مشتری i توسط وسیله v تحویل داده می‌شود، آن وسیله حتماً باید به کار گرفته شود (هزینه ثابت آن در تابع هدف منظور گردد). (۱۲) تضمین می‌کند تعداد کالاهایی که توسط یک وسیله حمل تحویل داده می‌شود از ظرفیت وسیله حمل بیشتر نباشد. (۱۳) تضمین می‌کند زمان شروع به حرکت وسیله v بیشتر یا مساوی زمان اتمام تولید کالاهایی باشد که توسط آن حمل می‌شود.

$$Dd_i \ge Dd_{i'} + tt_{i'i} - q(1 - z_{i'i}^v), \quad (۱۴)$$
$$i, i' = 1,\ldots,f, i \neq i', v = 1,\ldots,V$$

$$Dd_i \ge S_v + tt_{0i} - q(1 - w_i^v), i = 1,\ldots,f, v = 1,\ldots,V \quad (۱۵)$$

$$T_i \ge Dd_i - d_i, i = 1,\ldots,f \quad (۱۶)$$

$$Ht_{ij} \ge S_v - C_{ij} - q(1 - w_i^v), i = 1,\ldots,f,\ j \in n_i, v = 1,\ldots,V \quad (۱۷)$$

$$T_i, S_v, C_{ij}, Ht_{ij}, Dd_i \ge 0, i = 1,\ldots,f,\ j \in n_i, v = 1,\ldots,V \quad (۱۸)$$

$$x_{ij,i'j'}, y_{kij}, z_{ii'}^v, u_{ij}, w_i \in \{0,1\} \quad (۱۹)$$

محدودیت (۱۴) بیان می‌کند که زمان تحویل سفارش هر مشتری باید حداقل به اندازه زمان تحویل کار قبلی که توسط آن وسیله تحویل داده می‌شود به علاوه زمان حرکت بین محل این دو مشتری باشد. (۱۵) بیان می‌کند زمان تحویل سفارش هر مشتری

www.SID.ir

Archive of SID

باید حداقل به اندازه زمان شروع به حرکت وسیله حمل به علاوه زمانی که طول می‌کشد تا وسیله حمل از انبار کارخانه به محل مشتری می‌رسد باشد. (۱۶) بیانگر مقدار تأخیر در تحویل سفارش هر مشتری است. (۱۷) بیان می‌کند زمان نگه‌داری یک محصول در کارخانه به اندازه فاصله زمانی بین حرکت وسیله حملی که آن را ارسال می‌کند و زمان تکمیل ساخت آن است. (۱۸) و (۱۹) تعریف متغیرهای مثبت و دودویی است.

۴- قواعد غلبه

با افزایش دانش ما از مسئله و دانستن ویژگی‌های جواب بهینه مسئله و به‌کارگیری آن‌ها، الگوریتم حل بهتری ارائه می‌شود. در ادامه برخی قواعد غلبه مسئله آمده است:

لم ۱- تابع هدف مسئله (۱) قاعده‌مند[1] نیست.

اثبات- تابع هدف این مسئله شامل چهار قسمت است: هزینه آماده‌سازی، هزینه نگه‌داری، هزینه تأخیر و هزینه حمل و نقل. هزینه تأخیر یک معیار قاعده‌مند است، یعنی هزینه تأخیر با افزایش زمان تکمیل کار کاهش نمی‌یابد. هزینه‌های آماده‌سازی و تنظیمات دستگاه و هزینه حمل و نقل به زمان تکمیل کار وابسته نیست؛ اما هزینه نگه‌داری می‌تواند با افزایش زمان تکمیل کار کاهش یابد: اگر زمان تکمیل کارهای متعلق به یک دسته افزایش یابد، زمان تکمیل این کارها به زمان اعزام وسیله حملی که با آن ارسال می‌شوند نزدیک‌تر می‌شود، بنابراین مدت زمان نگه‌داری از این کالاها در انبار و در نتیجه هزینه نگه‌داری کاهش می‌یابد و تابع هدف که مجموعی از این چهار هزینه (آماده‌سازی، نگه‌داری، تأخیر و حمل و نقل) است هم ممکن است کاهش یابد. در نتیجه تابع هدف این مسئله قاعده‌مند نمی‌باشد.

لم ۲- جواب نهایی لزوماً بدون تأخیر[2] نیست.

اثبات- یک جواب بدون تأخیر را در نظر بگیرید، اگر به این جواب یک میزان تأخیر غیرضروری قبل از پردازش یک کار وارد کنیم زمان تکمیل پردازش این کار و کارهای بعد از آن افزایش می‌یابد. با توجه به لم ۱، این موضوع ممکن است باعث بهبود جواب مسئله شود.

لم ۳- در جواب بهینه، کارهایی که یک دسته را تشکیل می‌دهند لزوماً به‌صورت پیوسته پردازش نمی‌شوند.

اثبات- در نظر بگیرید یک جواب وجود دارد که در آن کارهایی که یک دسته را تشکیل می‌دهند به صورت پیوسته تولید می‌شوند. اگر یک کار متعلق به این دسته قبلاً و در بین کارهای متعلق به دسته‌های قبلی (دسته‌ای که شامل کارهای مشابه با کار مورد نظر باشد) انجام شوند، هزینه‌های آماده‌سازی کم‌تر شده و متعاقباً ممکن است مجموع هزینه‌ها کاهش یابد.

ویژگی ۱- در جواب بهینه زمان شروع به اعزام یک دسته برابر با زمان تکمیل تولید آخرین کار متعلق به آن دسته است.

اثبات- در نظر بگیرید جوابی وجود دارد که در آن زمان ارسال هر دسته برابر با زمان تکمیل آخرین کار متعلق به آن دسته است. اگر اعزام این دسته‌ها به تعویق افتد، تولید کننده باید دسته تکمیل شده را در انبار نگه‌داری کند که باعث افزایش هزینه نگه‌داری و بدتر شدن تابع هدف می‌شود. از طرف دیگر، زمان تحویل سفارش مشتری‌ها افزایش می‌یابد و ممکن است باعث افزایش هزینه تأخیر و در نتیجه افزایش مجموع هزینه‌ها شود.

ویژگی ۲- در نظر بگیرید یک جواب داریم که در آن ماشین پس از پردازش کار ij برای مدت زمان IT بیکار است و این کار قرار است با وسیله حمل v ارسال شود. اگر $S_v \geq C_{ij} + IT'$ که $0 < IT' \leq IT$ باشد، باید پردازش کار ij به تعویق بیفتد تا در زمان $C_{ij} + IT'$ تکمیل شود.

اثبات- فرض کنید S_1 یک جواب باشد که در آن ماشین پس از پردازش کار ij برای مدت زمان IT بیکار است، این کار قرار است توسط وسیله حمل v ارسال شود. می‌گیریم IT' بازه زمانی است که $0 < IT' \leq IT$، برای آن $S_v \geq C_{ij} + IT'$ است. فرض کنید که S_2 یک جواب مشابه است که در آن پردازش کار ij به تعویق میفتد تا در زمان $C_{ij} + IT'$ تکمیل شود. در S_2، زمان ارسال کار ij همان S_v است. به وضوح مشخص است که این دو جواب فقط در هزینه نگه‌داری کار ij با یکدیگر تفاوت دارند: در S_1 این هزینه برابر با $h_{ij}(S_v - C_{ij})$ است، در حالی که در S_2 برابر با $h_{ij}(S_v - C_{ij} - IT')$ است؛ بنابراین S_2 بر S_1 غلبه می‌کند و اثبات تکمیل است.

کورولاری ۱- در هر جواب بهینه ماشین بعد از پردازش یک کار بیکار نمی‌ماند، مگر آنکه این کار آخرین کار متعلق به یک دسته باشد.

ویژگی ۳- در نظر بگیرید یک جواب داریم که در آن ماشین m کار ij را دقیقاً بعد از کار $i'j$ که هر دو متعلق به یک دسته و از یک نوع محصول هستند و توسط وسیله حمل v ارسال می‌شوند، پردازش می‌کند. اگر $h_{i'j}\,p_{ij} > h_{ij}\,p_{i'j}$ باید، باید در پردازش جای دو کار با هم عوض شوند.

اثبات- فرض کنید که S_1 یک جواب باشد که در آن کار $i'j$ دقیقاً بعد از کار ij پردازش می‌شوند و این دو کار متعلق به یک دسته هستند و با ماشین m پردازش می‌شوند. از ویژگی ۲ داریم که ماشین بین پردازش این دو کار، بیکاری ندارد. فرض کنید $h_{i'j}\,p_{ij} > h_{ij}\,p_{i'j}$. می‌گیریم S_2 یک جواب است که در آن جای این دو کار در توالی پردازش با هم عوض شده‌اند اما زمان تکمیل پردازش بقیه کارها دقیقاً برابر زمان تکمیل پردازش آن‌ها در S_1 می‌باشد. به وضوح مشخص است که این دو جواب فقط در هزینه نگه‌داری دو کار ij و $i'j$ با یکدیگر تفاوت دارند. می‌گیریم ST نقطه‌ای از زمان است که در آن کار $i'j$ در S_1 و کار ij در S_2 آغاز

1. Regular
2. non-delay

www.SID.ir

Archive of SID

شده‌اند. هزینه‌های نگه‌داری برای دو کار $i'j$ و ij به ترتیب در S_1 و S_2 به صورت زیر هستند:

$$Holding\cos t(S_1) = h_{i'j}(S_v - ST - p_{i'j}) + h_{ij}(S_v - ST - p_{i'j} - p_{ij}) \quad \text{I}$$

$$Holding\cos t(S_2) = h_{ij}(S_v - ST - p_{ij}) + h_{i'j}(S_v - ST - p_{ij} - p_{i'j}) \quad \text{II}$$

بعد از محاسبه تفاوت بین I و II به دست می‌آید:

$Holding\cos t(S_1) - Holding\cos t(S_2) = h_{i'j}p_{ij} - h_{ij}p_{i'j} > 0$؛

بنابراین S_2 بر S_1 غلبه می‌کند و اثبات تکمیل است.

ویژگی ۴- در نظر بگیرید یک جواب داریم که در آن دو کار $i'j'$ و ij به طور متوالی انجام می‌شوند. اگر کار $i'''j'''$ بعد از کار ij و کار $i''j''$ قبل از کار $i'j'$ انجام شوند طوری که $i,i',i'',i''' \in F$ and $j \neq j' \neq j'' \neq j'''$ و همه این کارها متعلق به یک دسته بوده و توسط یک ماشین پردازش شوند و اگر داشته باشیم:

$h_{ij}p_{i'j'} + setup_{j''j} + setup_{jj'} + setupj'j''' < h_{i'j'}p_{ij} + setup_{j''j'} + setup_{j'j} + setup_{jj'''}$

باید جای دو کار $i'j'$ و ij در توالی تولید با هم عوض شود.

اثبات- فرض کنید S_1 یک جواب باشد که در آن کارهای $i''j''$، $i'j'$، ij و $i'''j'''$ به ترتیب و پشت سر هم روی ماشین m پردازش می‌شوند. فرض کنید

$h_{ij}p_{i'j'} + setup_{j''j} + setup_{jj'} + setupj'j''' < h_{i'j'}p_{ij} + setup_{j''j'} + setup_{j'j} + setup_{jj'''}$

می‌گیریم S_2 یک جواب است که در آن جای دو کار $i'j'$ و ij با هم دیگر عوض شده باشد و بقیه کارها در زمان مشابه و برابر با آنچه در S_1 بود تکمیل شوند. این دو جواب فقط در هزینه نگهداری دو کار $i'j'$ و ij و هزینه آماده‌سازی بین کارهای $i''j''$، $i'j'$، ij و $i'''j'''$ با یکدیگر فرق دارند. می‌گیریم $C(S_1)$ نشان‌دهنده مجموع هزینه‌های نگه‌داری دو کار $i'j'$ و ij هم‌چنین هزینه‌های آماده‌سازی بین کارهای $i''j''$ ، $i'j'$ ، ij و $i'''j'''$ در جواب S_1 باشد و $C(S_2)$ نشان‌دهنده مجموع مقادیر این هزینه‌ها در جواب S_2 باشد؛ بنابراین:

$$C(S_1) = h_{i'j'}(S_v - C_{i'j'}) + h_{ij}(S_v - C_{ij}) + setup_{j''j'} + setup_{j'j} + setup_{jj'''} \quad \text{I}$$

$$C(S_2) = h_{i'j'}(S_v - C_{i'j'}) + h_{ij}(S_v - C_{ij}) + setup_{j''j} + setup_{jj'} + setup_{j'j'''} \quad \text{II}$$

در S_1 داریم $C_{ij} = C_{i'j} + p_{ij}$ و در S_2 داریم $C_{i'j'} = C_{ij} + p_{i'j'}$؛ با جایگذاری این دو معادله در دو تابع I و II داریم

$h_{ij}p_{i'j'} + setup_{j''j} + setup_{jj'} + setupj'j''' - (h_{i'j'}p_{ij} + setup_{j''j'} + setup_{j'j} + setup_{jj'''}) > 0$

بنابراین، S_2 بر S_1 غلبه می‌کند و اثبات تکمیل می‌شود.

۵- روش حل پیشنهادی برای حل مسئله

به‌منظور حل مسئله مورد بررسی، الگوریتمی ترکیبی از الگوریتم رقابت استعماری (ICA) با قواعد غلبه طراحی شده است. چنین ایده ادغامی قبلاً هم برای حل بعضی مسائل زمان‌بندی به کار گرفته شده است [۲۲-۲۵]. الگوریتم رقابت استعماری که توسط آتش‌پز گرگری و لوکاس [۲۶] در سال ۲۰۰۷ ارائه شده، یک الگوریتم فراابتکاری جدید است که از فرآیند رقابت استعماری الهام گرفته است. قابلیت‌های برتر متاهیوریستیک ICA مانند همگرایی سریع‌تر و رسیدن به جواب بهینه کلی بهتر قبلاً به اثبات رسیده است [۲۷ و ۲۸].

الگوریتم رقابت استعماری، با یک جمعیت اولیه آغاز می‌شود که هرکدام از این جواب‌ها یک کشور نامیده می‌شود. در جواب اولیه، تعدادی از قدرتمندترین کشورها (جواب‌های با بهترین تابع هدف) به عنوان استعمارگر انتخاب می‌شوند و بقیه کشورها مستعمره این استعمارگران شده و امپراتوری‌ها تشکیل می‌شوند. با گذشت زمان و پیشرفت فرآیند جست‌وجو، هر استعمارگر تلاش می‌کند تا مستعمراتش را جذب کند، این موضوع به شکل شبیه شدن مستعمرات به استعمارگر و بنابراین تشدید جست‌وجو مدل می‌شود. به علاوه، یک انقلاب سیاسی یا اجتماعی در یک کشور باعث تغییر خصوصیات آن می‌شود، بدون آنکه به استعمارگرش شبیه شود. انقلاب باعث ایجاد تنوع در فضای جست‌وجو می‌شود. اگر در یک امپراتوری، یک مستعمره به موقعیتی بهتر از استعمارگر برسد، جای این دو با هم عوض می‌شود. تمام امپراتوری‌ها برای به دست آوردن مالکیت مستعمرات یکدیگر با هم رقابت می‌کنند. این فرآیند آن‌قدر تکرار می‌شود تا فقط یک امپراتوری (جواب بهینه) باقی بماند [۲۷ و ۲۹].

ساختار الگوریتم حل پیشنهادی را می‌توان به شکل زیر خلاصه کرد:

۱- تولید تصادفی جواب‌های اولیه (که می‌توانند شدنی یا غیر شدنی باشند) و اعمال قواعد غلبه روی آن‌ها و تعیین استعمارگران و مستعمرات آنها.
۲- انجام فرآیند جذب با حرکت مستعمرات به سمت استعمارگرهایشان.
۳- انجام فرآیند انقلاب.
۴- بهبود جواب‌ها به کمک قواعد غلبه. اگر یک مستعمره به موقعیتی بهتر از استعمارگرش رسید، جای آن‌ها با یکدیگر عوض می‌شود.
۵- رقابت بین امپراتوری‌ها.
۶- حذف امپراتورهایی که هیچ مستعمره‌ای ندارند.

تکرار گام‌های ۲ تا ۶ تا زمانی که شرط پایان الگوریتم احراز شود.

۵-۱- ارزش‌دهی آغازین

۵-۱-۱- بازنمایی جواب

در این مقاله، یک شکل جدید از بازنمایی جواب ارائه می‌شود، این بازنمایی جواب قبلاً در هیچ‌یک از مقالات مربوط به زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع به کار گرفته نشده است. از مزیت‌های این روش این است که نسبت به سایر بازنمایی‌های جواب، تعداد درایه

www.SID.ir

Archive of SID

کم‌تری دارد و فضای کم‌تری را برای محاسبات اشغال می‌کند. هم‌چنین، می‌توان این شکل از بازنمایی جواب را به روش‌های مختلف رمزگشایی کرد و بهترین جواب را از آن استخراج نمود.

هر جواب (کشور) با یک ماتریس دو سطری نمایش داده می‌شود؛ مانند شکل (۱)، سطر اول یک جایگشت از اعداد ۱ تا N (تعداد کل کارها) است که توالی پردازش کارها از آن استخراج می‌شود. سطر دوم شامل f (تعداد مشتری‌ها) درایه a_i از اعداد حقیقی است که در بازه $[1, V+1)$ (V تعداد وسایل حمل است) قرار دارند. اینکه سفارش کدام مشتری‌ها باید توسط هر وسیله حمل تحویل داده شود و مسیر هر وسیله حمل چگونه است از سطر دوم استخراج می‌شود.

۱	۲	...	N

a_1	a_2	...	a_f

شکل (۱): نحوه بازنمایی جواب

۵-۱-۲- نحوه رمزگشایی جواب

در این مقاله، یک روش رمزگشایی جدید ارائه شده است که جوابی ارائه می‌دهد که در جهت حداقل ساختن تابع هدف مسئله می‌باشد. روش رمزگشایی از جواب که در این مقاله ارائه شده است، این امکان را می‌دهد که به‌صورت هوشمند یک جواب خوب از میان جواب‌های ممکن انتخاب شود.

سطر اول از جواب یک جایگشت از کارها است که زمان‌بندی کارها از این سطر استخراج می‌شود. در این مقاله، رمزگشایی از این سطر به نحوی است که هزینه‌های تولید شامل تنظیم ماشین و نگه‌داری کمتر شود. برای کاهش هزینه نگه‌داری (زمان نگه‌داری)، باید بارگذاری کارها روی ماشین‌ها بالانس شود. اگر بارگذاری روی خطوط تولید بالانس شود، زمان‌های تکمیل آخرین کار روی خطوط از هم اختلاف کمی خواهند داشت و زمان انتظار کالاهای تکمیل شده برای تکمیل تولید سایر کارهای دسته‌شان کاهش می‌یابد. اگر متوسط بار کاری هر خط تولید را $A = \frac{\sum_{i=1}^{f}\sum_{j=1}^{n_i} p_{ij}}{m}$ در نظر بگیریم، روش رمزگشایی از جواب به این قرار خواهد بود: کارها به ترتیب ظهور در سطر اول جواب بررسی و زمان‌بندی می‌شوند؛ هر کار به خط تولیدی تخصیص داده می‌شود که منجر به کمترین زمان آماده‌سازی شود، مشروط به آنکه مقدار بار کاری که قبلاً به آن خط تخصیص داده شده است بیشتر از A نباشد.

مسیریابی وسایل نقلیه از سطر دوم و به نحوی استخراج می‌شود که هزینه ثابت حمل و نقل حداقل شود. سطر دوم شامل اعداد حقیقی در بازه $[1, V+1)$ است، تخصیص مشتری‌ها به وسایل حمل به کمک بخش صحیح عدد اعشاری و مسیریابی وسیله به کمک بخش اعشاری انجام می‌شود. سفارش مشتری‌هایی که درایه‌های مربوط به آن‌ها بخش صحیح یکسان داشته باشند یک دسته را تشکیل می‌دهند و توسط یک وسیله حمل ارسال می‌شوند. هر دسته‌ای که تکمیل شود با وسیله حملی ارسال می‌شود که کمترین هزینه استفاده را در بین وسایل حمل موجود داشته باشد و به این نحو کمترین هزینه ثابت حمل به سیستم تحمیل می‌شود. مسیر هر وسیله حمل بر اساس ترتیب صعودی بخش اعشاری درایه مشتریان مربوط به آن است.

برای روشن شدن بیشتر نحوه رمزگشایی به مثال زیر توجه کنید. یک کارخانه دارای دو خط تولید موازی یکسان است و سه محصول توسط این خطوط تولید می‌شود. زمان آماده سازی ماشین-آلات بین تولید محصولات به قرار جدول (۲) است (زمان آماده سازی بعد از کار صفر به معنای زمان آماده‌سازی و تنظیم ماشین‌آلات برای تولید اولین کاری که روی خط تولید پردازش می‌شود، است).

جدول (۲): زمان‌های آماده‌سازی و تنظیم ماشین‌آلات

به از	۰	محصول ۱	محصول ۲	محصول ۳
۰	-	۱۸	۱۵	۲۰
محصول ۱	-	-	۱۵	۲۰
محصول ۲	-	۱۸	-	۱۵
محصول ۳	-	۱۰	۱۵	-

اطلاعات مربوط به سفارش‌های دریافت شده نیز به قرار جدول (۳) می‌باشند.

جدول (۳): سفارش‌های دریافت شده از مشتریان

زمان پردازش	نوع محصول سفارش داده شده	شماره کار	شماره مشتری
۳	۱	۱	۱
۴	۲	۲	۲
۵	۳	۳	
۴	۱	۴	۳
۷	۲	۵	
۵	۲	۶	۴
۶	۳	۷	۵

حال یک جواب دلخواه که در شکل (۲) نشان داده شده است را در نظر بگیرید:

۳	۱	۵	۷	۴	۲	۶

۲/۲	۴/۱	۳/۱۵	۴/۲	۳/۷

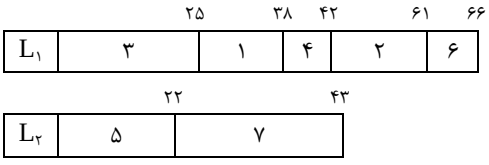
شکل (۲): بازنمایی یک جواب

سطر اول جواب، توالی تولید کارها و سطر دوم مسیریابی را مشخص می‌سازد. زمان‌بندی حاصله از رمزگشایی این جواب به روش زیر به دست می‌آید. متوسط بار کاری هر خط (A) برابر با

www.SID.ir

Archive of SID

۱۷ می‌باشد. کار ۳ در ابتدای توالی قرار دارد، هر دو خط تولید یکسان هستند؛ کار ۳ تصادفاً به خط اول تخصیص داده می‌شود. کار بعدی در توالی، کار ۱ می‌باشد که از نوع محصول اول می‌باشد. برای تخصیص این کار به خطوط تولید باید زمان تنظیم ماشین را در دو حالت با هم مقایسه کرد، اول اینکه این کار به عنوان اولین کار خط دوم در نظر گرفته شود و یا اینکه این کار بعد از کار ۳ در خط تولید اول پردازش شود. بر اساس جدول زمان‌های تنظیم، اگر کار ۱ بعد از کار ۳ پردازش شود زمان تنظیم کم‌تر خواهد بود و زمان پردازش کارهای تخصیص داده شده به خط اول از A بیشتر نیست؛ پس کار ۱ روی خط اول پردازش می‌شود. کار بعدی در توالی، کار ۵ است که از محصول نوع دو می‌باشد. با مقایسه دو حالت که کار ۵ به عنوان اولین کار روی خط دوم تولید شود و یا بعد از کار ۱ روی خط اول، مشاهده می‌شود هزینه آماده‌سازی هر دو حالت یکی است و زمان پردازش کارهای تخصیص داده شده به دو خط از A بیشتر نیست؛ پس به طور تصادفی حالت اول انتخاب می‌شود. کارهای ۷، ۴، ۶ و ۲ هم به همین شکل به خطوط تولید تخصیص داده می‌شوند. زمان‌بندی به دست آمده، در گانت چارت شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل (۳): زمان‌بندی استخراج شده از جواب مورد نظر

مسیریابی وسایل حمل به شکل زیر انجام می‌شود. سفارش‌ها در سه دسته ارسال می‌شوند: دسته‌های مشتری ۱، مشتری‌های ۳ و ۵، مشتری‌های ۲ و ۴. درایه مربوط به این مشتری‌ها عدد صحیح یکسان دارند. از گانت چارت مشاهده می‌شود که زمان‌های تکمیل این سه دسته به ترتیب ۳۸، ۴۳ و ۶۶ هستند. ارزان‌ترین وسیله حمل، سفارش مشتری یک را تحویل می‌دهد. دومین وسیله ارزان ابتدا سفارش مشتری ۳ و سپس سفارش مشتری ۵ را تحویل می‌دهد. ارزان‌ترین وسیله حمل باقیمانده نیز در زمان ۶۶، ابتدا سفارش مشتری ۲ و سپس سفارش مشتری ۴ را تحویل می‌دهد.

۵-۱-۳-تولید جمعیت اولیه

برای شروع الگوریتم، به تعداد اندازه جمعیت[1] جواب اولیه تصادفی تولید می‌کنیم. در این پژوهش، تعداد جمعیت اولیه ضریبی از مجموع تعداد کارها و مشتریان (N+f) است. از آنجا که جواب‌ها به‌صورت تصادفی تولیدشده‌اند، ممکن است بعضی از آنها شدنی نباشند؛ بخش دوم جواب که مربوط به مسیریابی وسایل حمل است ممکن است محدودیت (۱۲) را نقض کند. این محدودیت تضمین می‌کند بار حمل شده توسط هر وسیله از ظرفیت آن کم‌تر باشد. در روش حل پیشنهادی این مقاله، جواب‌های غیرموجه هم بررسی می‌شوند. با این کار، در فرآیند یافتن جواب، بین منطقه موجه و غیرموجه جست‌وجو می‌کنیم و احتمال دست‌یابی به جواب بهینه- که معمولاً روی مرز فضای جواب است- افزایش می‌یابد.

در الگوریتم پیشنهادی یک مقدار جریمه در تابع هزینه منظور شده است تا هزینه مربوط به جواب‌های غیرموجه را افزایش دهد. مقدار جریمه در نظر گرفته شده برای تکرارهای اولیه کم است تا تنوع فضای جست‌وجوی جواب افزایش یابد. در تکرارهای آخر، مقدار این جریمه افزایش می‌یابد تا به همگرایی الگوریتم به یک جواب شدنی کمک کند؛ بنابراین جریمه $w(t)$ به صورت یک تابع نمایی بر حسب شماره تکرار الگوریتم t در نظر گرفته شده و در معادله (۲۰) نمایش داده شده است:

$$w(t) = e^{0.3t} \qquad (۲۰)$$

تابع هدف نهایی مسئله به شکل معادله (۲۱) است:

$$f(x,t) = f(x) + w(t)R \qquad (۲۱)$$

که در آن $f(x)$ تابع هدف اولیه مسئله و $f(x,t)$ تابع هدف نهایی مسئله و R مقدار انحراف از محدودیت اشاره شده است.

۵-۱-۴- ارزش‌دهی آغازین امپراتوری‌ها

از میان جمعیت اولیه، تعداد (N_{imp}) از قدرتمندترین کشورها به عنوان استعمارگر انتخاب شده و بقیه (N_{col}) به عنوان مستعمره در نظر گرفته می‌شوند و بین استعمارگرها تقسیم می‌شوند. طبق مقاله مروری که توسط حسینی و الخالد [۳۰] در ارتباط با الگوریتم رقابت استعماری نوشته شده است، بهتر است ۱۰-۱۳٪ از جمعیت اولیه را استعمارگران تشکیل دهند. اگر مجموع هزینه‌های یک جواب را با $\cos t(s)$ نشان دهیم؛ برای توزیع مستعمرات بین استعمارگران، هزینه نرمال شده هر استعمارگر از طریق معادله (۲۲) محاسبه می‌شود:

$$normal\cos t(imp) = \max\{\cos t\} - \cos t(imp) \qquad (۲۲)$$

که $\max\{\cos t\}$ بیشترین هزینه در میان استعمارگران است. قدرت نرمال شده یک استعمارگر از معادله (۲۳) محاسبه می‌شود:

$$normal\ power(imp) = normal\cos t(imp) \Big/ \sum_{q=1}^{N_{imp}} normal\cos t(q) \qquad (۲۳)$$

با داشتن قدرت نرمال شده استعمارگر، توزیع آغازین مستعمرات میان استعمارگران به نسبت قدرت نرمال شده آن‌ها انجام می‌شود. تعداد NC_{imp} مستعمره به طور تصادفی انتخاب شده و به یک استعمارگر تخصیص می‌یابد، این مقدار از طریق معادله (۲۴) و به طوری تعیین می‌شود که مجموع NC_{imp} ها برابر با N_{col} شود:

$$NC_{imp} = round(normal\ power(imp) * N_{col}) \qquad (۲۴)$$

۵-۲- جذب

در الگوریتم رقابت استعماری، استعمارگران سعی می‌کنند مستعمراتشان را مانند خودشان کنند؛ این کار جذب نامیده می‌شود. جذب، به صورت حرکت تمام مستعمرات یک استعمارگر در تمام

1. pop size

www.SID.ir

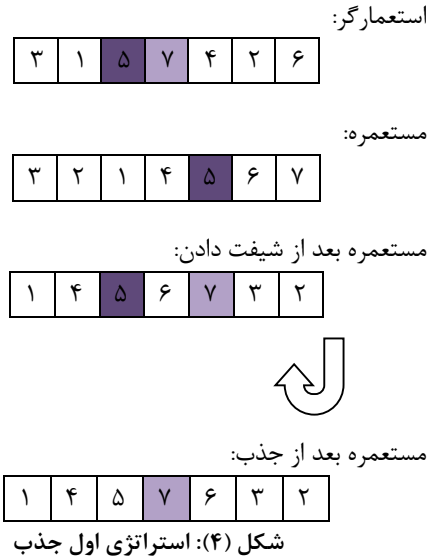
Archive of SID

ابعاد بهینه‌سازی به سمت استعمارگرشان، مدل‌سازی می‌شود. به بیان دیگر، استعمارگران سعی می‌کنند مستعمراتشان را از نظر خصوصیات سیاسی-اجتماعی مانند فرهنگ، زبان و عقاید شبیه به خودشان بکنند. نقش جذب در این الگوریتم، تشدید جست‌وجو است.

هر جواب مسئله از دو بخش تشکیل شده است، برای هر سطر از جواب یک استراتژی جذب جداگانه در نظر گرفته شده است که متناسب با ماهیت آن بخش و نوع بازنمایی جواب باشد. احتمال انتخاب هرکدام از این روش‌های جذب بر اساس تعداد درایه‌های آن بخش است: احتمال انتخاب روش اول جذب برابر با $\frac{N}{N+f}$ و احتمال انتخاب روش دوم برابر با $\frac{f}{N+f}$ است.

۵-۲-۱- استراتژی اول جذب

اگر سطر اول که توالی پردازش کارها است برای جذب انتخاب شود، از روش جذب توسعه داده شده توسط شکرالله پور و همکاران [۳۱] استفاده می‌شود. ابتدا به طور تصادفی یکی از کارها در سطر اول استعمارگر انتخاب می‌شود. کار انتخاب شده در سطر اول مستعمره آن‌قدر شیفت داده می‌شود تا به موقعیتی برابر با موقعیت آن کار در استعمارگر برسد، بقیه کارها هم مانند این کار شیفت داده می‌شوند. در آخر، کار موجود در موقعیت سمت راست کار انتخابی در استعمارگر را یافته و در مستعمره نیز این کار با یک تعویض دوتایی در این موقعیت (سمت راست کار انتخابی) جایگذاری می‌شود. در شکل (۴) این روش جذب به خوبی نمایش داده شده است. کار ۵ به صورت تصادفی انتخاب شده است.



شکل (۴): استراتژی اول جذب

۵-۲-۲- استراتژی دوم جذب

اگر سطر دوم یعنی مسیریابی وسایل نقلیه برای جذب انتخاب شود، یک استراتژی که برای اعداد حقیقی مناسب است به کار گرفته می‌شود. در این استراتژی، ابتدا یکی از درایه‌های سطر دوم به طور تصادفی انتخاب می‌شود. سپس، تفاضل درایه مربوطه در استعمارگر و مستعمره (δ) یافته و در پارامتر جذب (λ) ضرب می‌شود. هر چه مقدار پارامتر λ کم‌تر باشد منجر به تشدید و هر چه قدر بیشتر در نظر گرفته شود منجر به تنوع بیشتر در منطقه جست‌وجو می‌شود. سپس، مقدار x به‌طور تصادفی از توزیع (۲۵) انتخاب می‌شود و به درایه مربوط به مستعمره اضافه می‌شود؛ یعنی مستعمره به اندازه عدد تصادفی x به سمت استعمارگر حرکت می‌کند.

$$x \sim U(0, \lambda * \delta) \qquad (۲۵)$$

اگر پارامتر λ به نحوی مقداردهی شود که مقدار نهایی درایه مورد نظر در مستعمره از عدد V+۱ بیشتر شود، بخش عدد صحیح درایه برابر با V در نظر گرفته می‌شود؛ زیرا مقادیر سطر دوم بازنمایی جواب باید در بازه [۱,V+۱) قرار داشته باشد.

۵-۳- انقلاب

انقلاب، یک تغییر اساسی در ساختار سازمانی است که در یک زمان کوتاه رخ می‌دهد. در فرآیند انقلاب، ممکن است در یک کشور تغییرات ناگهانی در خصوصیات اجتماعی-سیاسی رخ دهد که این تغییرات در جهت حرکت به سمت خصوصیات استعمارگرش نباشد. در الگوریتم رقابت استعماری، انقلاب به‌صورت حرکت تصادفی بعضی مستعمرات، برای تولید جواب‌های جدید در منطقه جوابی که تاکنون مشاهده نشده است مدل می‌شود. نقش انقلاب در این الگوریتم، تنوع منطقه جست‌وجو است تا مانع همگرایی زودرس به یک جواب بهینه محلی شود. نرخ انقلاب p_{rev} در این الگوریتم، بیانگر درصدی از مستعمرات است که در آن‌ها انقلاب رخ می‌دهد.

دو استراتژی برای انقلاب پیشنهاد شده است که هر کدام متناسب با یک بخش از جواب است. ابتدا یکی از سطرهای جواب به‌صورت تصادفی انتخاب شده و سپس استراتژی انقلاب متناسب با آن سطر انجام می‌شود.

۵-۳-۱- استراتژی اول انقلاب

اگر سطر اول برای انقلاب انتخاب شود، دو درایه از این جایگشت به‌طور تصادفی انتخاب شده و جای آن‌ها با هم عوض می‌شود.

۵-۳-۲- استراتژی دوم انقلاب

اگر سطر دوم برای انقلاب انتخاب شود، یکی از درایه‌ها به‌طور تصادفی انتخاب شده و به جای آن یک عدد حقیقی تصادفی در بازه [۱,V+۱) تولید شده و جایگزین می‌شود.

۵-۴- رقابت استعماری

استعمارگران برای به دست آوردن مستعمره‌های همدیگر با یکدیگر رقابت دارند. رقابت استعماری برای کسب مالکیت ضعیف‌ترین مستعمره از ضعیف‌ترین امپراتوری صورت می‌گیرد. برای شروع رقابت، قدرت هر امپراتوری توسط تابعی بر حسب قدرت استعمارگر و مستعمراتش محاسبه می‌شود.

قدرت هر امپراتوری توسط تابعی از مجموع قدرت استعمارگر و مستعمراتش از طریق معادله (۲۶) محاسبه می‌شود:

www.SID.ir

Archive of SID

$$TC_n = \cos t(imperialist) + \varsigma * mean\{\cos t(colonies of\ imperialist)\} \quad (۲۶)$$

که TC_n مجموع هزینه nامین امپراتوری و ς یک عدد مثبت بین صفر و یک است که معمولاً به صفر نزدیک است. طبق مقاله مروری [۳۰]، بهترین مقدار برای این پارامتر ۰/۱ یا ۰/۱۵ است. طی رقابت بین کشورهای استعمارگر، کم‌کم امپراتوری‌های ضعیف‌تر مستعمراتشان را از دست داده و حذف می‌شوند.

به‌منظور مدل کردن فرآیند رقابت بین امپراتوری‌ها، نیاز به محاسبه مجموع هزینه نرمال شده امپراتوری از طریق معادله (۲۷) است:

$$NTC_n = \max_i\{TC_i\} - TC_n \quad (۲۷)$$

که NTC_n مجموع هزینه نرمال شده nامین امپراتوری است؛ بنابراین، احتمال مالکیت مستعمره برای هر امپراتوری از طریق معادله (۲۸) محاسبه می‌شود:

$$p_n = \left| \frac{NTC_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} NTC_i} \right| \quad (۲۸)$$

که مجموع احتمالات برابر با یک می‌شود. ضعیف‌ترین مستعمرات بر اساس احتمال مالکیت امپراتوری‌ها بینشان توزیع می‌شود. این کار به روش ذیل انجام می‌شود.

بردار ستونی P (۲۹) با اندازه N_{imp} وجود دارد که شامل احتمال‌های مالکیت مستعمره توسط امپراتوری‌ها است:

$$P = [p_1, p_2, \ldots, p_{N_{imp}}] \quad (۲۹)$$

بردار R (۳۰) با همان اندازه P وجود دارد که هر کدام از درایه‌های آن به صورت تصادفی از بازه [۱و۰] انتخاب شده‌اند:

$$R = [r_1, r_2, \ldots, r_{N_{imp}}] \quad (۳۰)$$

بردار D به شکل معادله (۳۱) تعریف می‌شود:

$$D = P - R = [D_1, D_2, \ldots, D_{N_{imp}}] = [P_1 - R_1, P_2 - R_2, \ldots, P_{N_{imp}} - R_{N_{imp}}] \quad (۳۱)$$

پس از محاسبه بردار D، ضعیف‌ترین مستعمره به امپراتوری با بزرگ‌ترین شاخص تخصیص داده می‌شود. محاسبه نکردن تابع توزیع تجمعی باعث افزایش سرعت فرآیند توزیع الگوریتم رقابت استعماری در مقایسه با چرخ رولت الگوریتم ژنتیک- که مشابه آن است- می‌شود.

۵-۵- همگرایی الگوریتم

مشابه سایر الگوریتم‌های تکاملی، الگوریتم رقابت استعماری ادامه می‌یابد تا یکی از شرایط پایان الگوریتم محقق شود. در این پژوهش، شرط پایان الگوریتم باقی ماندن فقط یک امپراتوری یا رسیدن زمان اجرا به حداکثر مقدار ۶۰۰ ثانیه است.

۶- مطالعه عددی

در این بخش، کارایی الگوریتم ارائه شده ارزیابی می‌شود. برای این منظور، ابتدا پارامترهای مسئله به طور قاعده‌مند مقداردهی می‌شوند سپس نمونه مسائلی با سایزهای مختلف تولید و به کمک الگوریتم پیشنهادی حل می‌شوند. جواب‌های به دست آمده از الگوریتم با جواب‌های مدل ریاضی مقایسه شده و نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در نهایت، کارایی الگوریتم بررسی می‌شود.

۶-۱-تولید داده‌ها

برای بررسی عددی الگوریتم، باید ابتدا به پارامترها بر اساس ادبیات موضوع مقادیری نسبت داده شود. برای تولید داده، مقالات هاسه و کیمز [۳۲] و آموریم و همکاران [۱۶] و بلو-فیلهو و همکاران [۱۹] که به تحقیق حاضر نزدیک‌تر هستند، بررسی شدند. مقادیر مربوط به تعدادی از پارامترهای مقاله حاضر که در مقالات قبلی موجود نبودند، به‌تناسب با دیگر پارامترها تخصیص داده شدند. مقادیر مربوط به پارامترها به قرار زیر می‌باشند.

در مقاله هاسه و کیمز [۳۲]، زمان تولید هر محصول $p_j = 1, j = 1,2,..,P$ است و زمان تولید سفارش هر مشتری از هر محصول برابر با مقدار سفارش ضرب در زمان تولید یک واحد محصول است. مقدار تقاضای یک مشتری از هر محصول از توزیع یکنواخت $U(40,60)$ پیروی می‌کند.

در مقاله آموریم و همکاران [۱۶] و بلو-فیلهو و همکاران [۱۹]، علاوه بر داده‌های مقاله هاسه و کیمز، برخی دیگر از داده‌ها هم به قرار ذیل تولید شده‌اند. زمان آماده‌سازی دستگاه از توزیع یکنواخت $U(1,5)$ پیروی می‌کند و هزینه هر واحد زمانی آن برابر با ۶۶/۶۷ است. کارخانه در محلی با مختصات (۵۰ و ۵۰) قرار گرفته است و محل مشتری‌ها از نقطه (۰و۰) تا (۱۰۰و۱۰۰) پراکنده شده‌اند. هم‌چنین، تعداد وسایل حمل به اندازه تعداد مشتریان است و زمان خدمت در محل مشتری‌ها صفر در نظر گرفته شده است.

سایر پارامترهای مسئله به این شکل تولید شده‌اند. هزینه نگه‌داری یک واحد از محصول j از توزیع یکنواخت $U(0.01,0.05)$ پیروی می‌کند و هزینه نگه‌داری کل سفارش یک مشتری از این محصول (h_{ij}) برابر با حاصل‌ضرب مقدار سفارش داده شده از محصول در هزینه نگه‌داری یک واحد از آن است.

سه نوع وسیله حمل با ظرفیت، هزینه ثابت و متغیر مختلف در نظر گرفته شده‌اند. هر چه قدر ظرفیت یک وسیله بیشتر باشد، هزینه ثابت و متغیر استفاده از آن بیشتر است. میانگین سرعت حرکت وسایل حمل برابر ۶۰Km/h در نظر گرفته شده است و فاصله مکانی محل‌های مشتریان به شکل اقلیدسی محاسبه می‌شوند. جریمه تأخیر تحویل سفارش به مشتریان از توزیع یکنواخت $U \sim (1,10)$ پیروی می‌کند.

۶-۲-نتایج محاسباتی

برای تعیین کارایی، الگوریتم پیشنهادی با C# کد نویسی شد و جواب‌های به دست آمده از آن با جواب‌های مدل ریاضی که در محیط GAMS ۲۴٫۸ با حل کننده CPLEX حل شده، مقایسه شد. این الگوریتم توسط یک لپ‌تاپ دارای پردازنده سری core i7

www.SID.ir

Archive of SID

و CPU دارای سرعت ۲/۵۰GHz و ۱۲GB حافظه کوتاه‌مدت اجرا شد. چند سری مسئله با ابعاد مختلف تولید شدند: تعداد خطوط تولید بین ۲ تا ۴، تعداد محصولات بین ۲ تا ۱۰ و تعداد مشتریان بین ۵ تا ۱۵ بوده است. تعداد ۱۰۰ نمونه تولید گردید و هر مسئله ۵ بار توسط الگوریتم حل شد.

برای الگوریتم رقابت استعماری پیشنهادی، باید برخی پارامترها که شامل ضریب اندازه جمعیت، درصد تعداد استعمارگران از جمعیت، ضریب جذب β، ضریب تأثیر هزینه مستعمرات در محاسبه قدرت امپراتوری ζ و نرخ انقلاب p_{rev} هستند، مقداردهی شوند. برای تعیین بهترین مقدار برای این پارامترها، باید تنظیم پارامتر صورت گیرد. برای این منظور، تعدادی مسائل از سایزهای مختلف انتخاب شدند؛ به پارامترهای مورد نظر مقادیر مختلفی داده شد و هر مسئله ۵ بار با هر مقدار پارامتر حل شد و بهترین مقدار پارامتر تعیین شد. در جدول (۴) مقادیر مختلف داده شده به این پارامترها و مقدار انتخابی آن‌ها آمده است.

برای سنجش کارایی الگوریتم ارائه شده و قواعد غلبه، مسائل تولید شده به سه روش زیر حل شده و نتایج به‌دست‌آمده از آن‌ها با یکدیگر مقایسه شدند:

- حل مسئله با نرم‌افزار GAMS با حل کننده CPLEX با سقف زمانی ۷۲۰۰ ثانیه
- حل مسئله با الگوریتم رقابت استعماری
- حل مسئله با الگوریتم رقابت استعماری ادغام شده با قواعد غلبه

مسائل حل شده و نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف در جدول‌های (۵) و (۶) آمده است. مسائل با اندازه کوچک و متوسط در جدول (۵) و مسائل با اندازه بزرگ در جدول (۶) ارائه شده‌اند. هر نمونه مسئله توسط روش‌های ذکر شده فوق حل شده و نتایج در هر سطر جدول آمده، میانگین، حداقل و حداکثر جواب به دست آمده از هر روش با کوچک‌ترین جواب به دست آمده مقایسه شده و درصد انحراف آن از کوچک‌ترین جواب - به عنوان معیار کیفیت جواب، ذکر شده است؛ هم‌چنین، میانگین زمان حل هم ذکر شده است. در هر سطر، جواب بهینه –در صورت وجود- به شکل پررنگ نوشته شده است. در ستون اول جدول، خصوصیات نمونه مسائل حل شده ذکر شده است که شامل تعداد خطوط تولید، تعداد انواع محصولات تولیدی، تعداد مشتری‌ها و تعداد کل کارها است. در ستون دوم جواب به دست آمده از حل MILP و زمان حل آن نوشته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جواب به دست آمده برای مسائل با ابعاد کوچک‌تر دقیق می‌باشد اما با بالا رفتن ابعاد مسائل از دقت جواب‌ها کاسته شده و در حداکثر زمان حل (۷۲۰۰ ثانیه) نرم‌افزار GAMS قادر به یافتن جواب بهینه نبوده و فقط یک جواب شدنی ارائه داده است. همان‌طور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود در ۱۵ نمونه مسئله GAMS قادر به یافتن جواب بهینه بوده است.

در ستون سوم، نتایج الگوریتم رقابت استعماری با عملگرهای جذب و انقلاب پیشنهادی نوشته شده است. نتایج ذکر شده در این ستون در جدول (۵) نشان می‌دهد که این الگوریتم برای مسائل با اندازه کوچک‌تر، جواب‌هایی با انحراف کم یا بسیار کم از جواب MILP ارائه داده است؛ اما با بالاتر رفتن ابعاد مسئله جواب‌هایی کمتر از جواب MILP ارائه داده است. نتایج جدول (۵) نشان می‌دهد که این الگوریتم برای ۹ نمونه مسئله به جواب بهینه رسیده است و فاصله‌ای بین بهترین جواب و بدترین جواب آن نمی‌باشد. برای مسائل کوچک - جدول (۵) - کیفیت ICA و GAMS تقریباً یکسان بوده اما ICA از نظر زمان حل بر GAMS برتری دارد؛ اما برای مسائل بزرگ - جدول (۶) - ICA هم از نظر کیفیت جواب و هم از نظر زمان حل بر GAMS برتری دارد که این موضوع نشانگر کارایی عملگرهای جذب و انقلاب پیشنهادی می‌باشد.

سؤالی که پیش می‌آید این است که آیا الگوریتم رقابت استعماری با قواعد غلبه نتایج بهتری از الگوریتم رقابت استعماری ارائه می‌دهد یا خیر. به‌علاوه، مقایسه عملکرد الگوریتم رقابت استعماری با و بدون قواعد غلبه این امکان را به وجود می‌آورد که اثربخشی و کارایی قواعد غلبه سنجیده شود.

نتایج الگوریتم ادغامی رقابت استعماری با قواعد غلبه در ستون چهارم آمده است؛ در ۱۵ نمونه مسئله به جواب بهینه رسیده است و برای تمام نمونه مسائل (بزرگ یا کوچک) به بهترین جواب (در میان سه روش حل) دست یافته است. در مقایسه با ICA، حتی بدترین جواب این الگوریتم بهتر از بهترین جواب ICA است. این الگوریتم چه از نظر کیفیت و چه از نظر زمان حل با فاصله زیاد از دو روش حل دیگر بهتر می‌باشد.

جدول (۴): تنظیم پارامترها

نوع پارامتر	سطوح مختلف	مقدار انتخاب شده
پارامتر اندازه جمعیت	۱۰۰، ۱۲۵	۱۰۰
درصد تعداد استعمارگران	۰/۱، ۰/۱۵	۰,۱
ضریب جذب β	۱، ۰/۵، ۱/۵، ۲	۲
ضریب تأثیر هزینه استعمارگر ζ	۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱۵، ۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۴	۰,۱
نرخ انقلاب	۰/۱، ۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳، ۰/۵	۰,۱

www.SID.ir

Archive of SID

جدول (۵): نتایج محاسباتی روش‌های پیشنهادی برای مسائل با ابعاد کوچک و متوسط

نمونه مسأله		MILP		الگوریتم رقابت استعماری				الگوریتم ادغامی رقابت استعماری و قواعد غلبه			
(k,p,f)	(k,p,f,N)	کیفیت	زمان	حداقل	میانگین	حداکثر	زمان	حداقل	میانگین	حداکثر	زمان
(۵و۲و۲)	(۷و۵و۲و۲)	۰	۹۶	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۱۰۴	۰	۰	۰	۱۶۵
	(۸و۵و۲و۲)	۰	۱۴۷	۰	۰	۰	۱۸۴	۰	۰	۰	۱۲۴
	(۶و۵و۲و۲)	۰	۴	۰	۰	۰	۷۶	۰	۰	۰	۸۵
	(۶و۵و۲و۲)	۰	۱۱	۰	۰	۰	۸۷	۰	۰	۰	۱۰۱
	(۷و۵و۲و۲)	۰	۷۴	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۱۷۵	۰	۰	۰	۹۸
	میانگین	۰	۷۱/۸	۰	۰	۰	۱۲۵	۰	۰	۰	۱۱۴
(۴و۳و۲)	(۱۰و۴و۳و۲)	۰	۲۲۵۸	۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۱۰۷
	(۶و۴و۳و۲)	۰	۱	۰	۰	۰	۴۷	۰	۰	۰	۵۴
	(۷و۴و۳و۲)	۰	۲۱۰	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۷۷	۰	۰	۰	۶۲
	(۷و۴و۳و۲)	۰	۳۶	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۶۹	۰	۰	۰	۶۸
	(۶و۴و۳و۲)	۰	۱	۰	۰	۰	۵۴	۰	۰	۰	۵۱
	میانگین	۰	۵۰۱/۲	۰	۰	۰	۶۹,۴	۰	۰	۰	۶۸,۴
(۵و۳و۲)	(۹و۵و۳و۲)	۰	۳۶۵۰	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۱	۱۸۱	۰	۰	۰	۱۵۰
	(۱۲و۵و۳و۲)	۰	۲۵۴۸	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۲۲۲	۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۳۰۵
	(۱۰و۵و۳و۲)	۰	۷۲۰۰	۰	۰	۰	۱۳۸	۰	۰	۰	۸۸
	(۱۱و۵و۳و۲)	۰	۲۹۶۹	۰	۰	۰	۲۱۳	۰	۰	۰	۱۰۴
	(۱۰و۵و۳و۲)	۰	۵۶۱۶	۰	۰	۰	۱۲۴	۰	۰	۰	۱۷۰
	میانگین	۰	۴۳۹۶	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۱۷۵	۰	۰	۰	۱۶۳
(۶و۳و۲)	(۱۴و۶و۳و۲)	۰/۱۲	۱۵۰۳	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۲	۴۳۵	۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۱۸۴
	(۱۱و۶و۳و۲)	۰/۱۲	۱۲۵۱	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۳	۲۱۹	۰	۰/۰۱	۰/۰۴	۱۲۶
	(۱۳و۶و۳و۲)	۰/۰۹	۱۵۹۸	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۳۹۹	۰	۰	۰/۰۱	۲۲۰
	(۱۲و۶و۳و۲)	۰/۱۳	۱۵۷۳	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۳	۳۳۵	۰	۰	۰/۰۱	۱۲۸
	(۱۲و۶و۳و۲)	۰/۱۲	۱۶۴۶	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۳	۲۶۱	۰	۰/۰۱	۰,۰۲	۱۳۴
	میانگین	۰/۱۱	۱۵۱۴	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۱۱	۳۲۹	۰	۰	۰/۰۱	۱۵۸
(۷و۳و۲)	(۱۵و۷و۳و۲)	۰/۱	۲۰۴۸	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۳	۲۴۳	۰	۰/۰۱	۰,۰۲	۲۳۹
	(۱۴و۷و۳و۲)	۰/۰۱	۱۴۹۵	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۳	۴۵۰	۰	۰/۰۱	۰,۰۳	۲۸۴
	(۱۷و۷و۳و۲)	۰/۲۲	۱۶۵۸	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۵۶۴	۰	۰/۰۵	۰,۰۶	۳۱۷
	(۱۸و۷و۳و۲)	۰/۰۶	۱۴۱۸	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۵۸۵	۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۴۶۱
	(۱۶و۷و۳و۲)	۰/۳	۲۲۶۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۴۳۸	۰	۰/۰۲	۰/۰۵	۲۷۹
	میانگین	۰/۱۴	۱۷۷۶	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸	۴۵۶	۰	۰/۰۲	۰/۰۲	۲۶۸
(۶و۴و۲)	(۱۸و۶و۴و۲)	۰/۴	۱۳۱۲	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۴۵۵	۰	۰	۰	۲۹۵
	(۱۶و۶و۴و۲)	۰/۲۱	۱۲۷۸	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۲	۴۷۱	۰	۰	۰	۳۴۶
	(۱۴و۶و۴و۲)	۰/۱۱	۱۶۳۹	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۱۱	۳۸۷	۰	۰	۰	۲۵۱
	(۱۵و۶و۴و۲)	۰/۱۶	۱۶۰۴	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۴۱۳	۰	۰	۰	۲۱۰
	(۱۹و۶و۴و۲)	۰/۳۹	۲۰۸۷	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۳۹	۵۸۳	۰	۰	۰	۴۳۷
	میانگین	۰/۲۵	۱۵۸۴	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۷	۴۶۱	۰	۰	۰	۳۰۷
(۵و۵و۳)	(۱۷و۵و۵و۳)	۰/۳۳	۱۳۲۵	۰/۳۳	۰/۳۷	۰/۳۷	۴۶۹	۰	۰	۰/۰۳	۲۸۲
	(۱۹و۵و۵و۳)	۰/۲۴	۱۶۴۰	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۴	۳۱۹	۰	۰	۰	۳۰۹
	(۱۸و۵و۵و۳)	۰/۲۳	۱۴۱۰	۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۲۲	۳۲۹	۰	۰/۰۲	۰/۰۸	۲۶۳
	(۱۵و۵و۵و۳)	۰/۰۷	۱۱۶۵	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۸	۴۰۰	۰	۰	۰	۳۵۲
	(۱۷و۵و۵و۳)	۰/۱۸	۱۳۴۶	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۴۰۶	۰	۰	۰	۳۷۰
	میانگین	۰/۲۱	۱۳۷۷	۰/۲	۰/۲۲	۰/۲۲	۳۸۴	۰	۰	۰/۰۲	۳۱۵
(۶و۵و۳)	(۲۰و۶و۵و۳)	۰,۱۹	۱۵۵۱	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۲	۵۲۲	۰	۰/۰۲	۰/۰۴	۳۹۸
	(۱۹و۶و۵و۳)	۰/۲۲	۸۵۹	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۱	۵۷۱	۰	۰	۰	۳۳۳
	(۲۲و۶و۵و۳)	۰/۲۵	۱۰۶۱	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۶۰۰	۰	۰/۰۴	۰/۰۹	۴۷۸
	(۲۰و۶و۵و۳)	۰/۲۳	۱۰۸۹	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳	۵۷۴	۰	۰/۰۴	۰/۰۷	۴۰۸
	(۲۱و۶و۵و۳)	۰/۳۹	۱۲۱۰	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۳۹	۵۴۷	۰	۰/۰۴	۰/۰۷	۴۱۱
	میانگین	۰/۲۶	۱۱۵۴	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۵۶۲	۰	۰/۰۲	۰/۰۷	۴۰۵
(۷و۵و۳)	(۲۲و۷و۵و۳)	۰/۳	۱۲۸۷	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۲۸	۵۵۶	۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۵۵۳
	(۲۳و۷و۵و۳)	۰/۳۱	۱۲۰۴	۰/۳۱	۰/۳۱	۰/۳۱	۶۰۰	۰	۰/۰۷	۰/۱۳	۵۸۷
	(۲۴و۷و۵و۳)	۰/۴	۱۲۵۴	۰/۳۸	۰/۳۹	۰/۳۹	۶۰۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۴	۶۰۰
	(۲۵و۷و۵و۳)	۰/۱۹	۱۰۷۹	۰/۱۷	۰/۱۸	۰/۱۸	۶۰۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۳	۶۰۰
	(۲۴و۷و۵و۳)	۰/۳	۱۰۴۲	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۳	۶۰۰	۰	۰/۰۳	۰/۰۵	۵۹۵
	میانگین	۰/۳	۱۱۷۳	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۲۹	۵۹۱	۰	۰/۰۲	۰/۰۵	۵۸۷

www.SID.ir

Archive of SID

(۱۰و۴و۳)	(۲۸و۱۰و۴و۳)	۰/۱۴	۱۲۴۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۶	۶۰۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۵	۶۰۰
	(۲۴و۱۰و۴و۳)	۰/۱۲	۱۲۸۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳	۶۰۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۶۰۰
	(۲۷و۱۰و۴و۳)	۰/۳	۱۵۴۸	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۶۰۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۳	۶۰۰
	(۲۷و۱۰و۴و۳)	۰/۴	۱۵۶۴	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۲	۶۰۰	۰	۰/۰۶	۰/۰۹	۶۰۰
	(۲۹و۱۰و۴و۳)	۰/۳۵	۱۴۶۲	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۱	۶۰۰	۰	۰/۰۵	۰/۰۷	۶۰۰
	میانگین	۰/۲۶	۱۴۲۰	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۸	۶۰۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۵	۶۰۰
میانگین کلی		۰/۱۵	۱۴۹۶	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۳۷۵	۰	۰	۰/۰۲	۲۹۸,۵

جدول (۶): نتایج محاسباتی روش‌های پیشنهادی برای مسائل با ابعاد بزرگ

نمونه مسأله		MILP		الگوریتم رقابت استعماری				الگوریتم ادغامی رقابت استعماری و قواعد غلبه			
(k,p,f)	(k,p,f,N)	کیفیت	زمان	حداقل	میانگین	حداکثر	زمان	حداقل	میانگین	حداکثر	زمان
(۹و۵و۳)	(۲۸و۹و۵و۳)	۰/۳۱	۱۳۴۸	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۸	۶۰۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۳	۶۰۰
	(۳۲و۹و۵و۳)	۰/۱۹	۲۰۷۷	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۶	۶۰۰	۰	۰/۰۴	۰/۰۷	۶۰۰
	(۳۱و۹و۵و۳)	۰/۱۴	۲۱۰۴	۰,۱	۰,۱	۰/۱۱	۶۰۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۶۰۰
	(۲۹و۹و۵و۳)	۰/۲۵	۴۰۲۲	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۷	۶۰۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۲	۶۰۰
	(۳۲و۹و۵و۳)	۰/۱۹	۱۳۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۶۰۰	۰	۰	۰	۶۰۰
	میانگین	۰/۲۲	۲۱۷۰	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۷	۶۰۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۶۰۰
(۱۱و۵و۳)	(۲۹و۱۱و۵و۳)	۰/۲۳	۱۹۸۷	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۸	۶۰۰	۰	۰/۰۷	۰/۱۱	۶۰۰
	(۳۵و۱۱و۵و۳)	۰/۲۱	۲۱۴۷	۰/۲۱	۰/۲۴	۰/۲۹	۶۰۰	۰	۰/۰۵	۰,۱	۶۰۰
	(۳۱و۱۱و۵و۳)	۰/۴۳	۱۶۵۵	۰/۱۷	۰/۳۲	۰/۴	۶۰۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۶	۶۰۰
	(۳۳و۱۱و۵و۳)	۰/۱۲	۱۵۵۵	۰/۳۲	۰/۳۴	۰/۳۸	۶۰۰	۰	۰/۰۶	۰/۱۲	۶۰۰
	(۳۴و۱۱و۵و۳)	۰/۲۲	۱۷۴۰	۰/۲	۰/۲۵	۰/۳۲	۶۰۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۷	۶۰۰
	میانگین	۰/۲۴	۱۵۰۵	۰/۲۱	۰/۲۶	۰/۳۱	۶۰۰	۰	۰/۰۴	۰/۰۹	۶۰۰
(۱۲و۵و۳)	(۳۳و۱۲و۵و۳)	۰/۱۵	۲۰۸۲	۰/۰۳	۰/۱	۰/۱۴	۶۰۰	۰	۰/۰۶	۰/۱۳	۶۰۰
	(۳۶و۱۲و۵و۳)	۰/۲	۲۰۲۸	۰/۱۴	۰/۱۸	۰/۲۶	۶۰۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۶۰۰
	(۴۲و۱۲و۵و۳)	۰/۲۳	۲۴۲۶	۰/۱	۰/۱۷	۰/۲۳	۶۰۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۳	۶۰۰
	(۴۴و۱۲و۵و۳)	۰/۱۳	۴۹۱۵	۰/۰۹	۰/۱۶	۰/۲۲	۶۰۰	۰	۰/۰۵	۰/۱۴	۶۰۰
	(۳۶و۱۲و۵و۳)	۰/۳۶	۲۱۲۲	۰/۱۶	۰/۲۳	۰/۲۷	۶۰۰	۰	۰/۰۵	۰/۰۹	۶۰۰
	میانگین	۰/۳۱	۲۷۱۴	۰/۱	۰/۱۷	۰/۲۲	۶۰۰	۰	۰/۰۳	۰/۰۸	۶۰۰
(۱۳و۵و۳)	(۴۱و۱۳و۵و۳)	۰/۲۹	۷۲۰۰	۰/۲۳	۰/۲۹	۰/۳۵	۶۰۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۴	۶۰۰
	(۴۵و۱۳و۵و۳)	۰/۳۶	۶۹۷۶	۰/۰۸	۰/۱۷	۰/۲۲	۶۰۰	۰	۰	۰	۶۰۰
	(۴۵و۱۳و۵و۳)	۰/۰۹	۵۲۳۷	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۱۶	۶۰۰	۰	۰/۰۴	۰/۰۹	۶۰۰
	(۴۴و۱۳و۵و۳)	۰/۱۱	۹۷۱	۰/۲۲	۰/۲۸	۰/۳۷	۶۰۰	۰	۰/۰۴	۰/۰۷	۶۰۰
	(۴۶و۱۳و۵و۳)	۰/۲۱	۴۵۰۱	۰/۱۹	۰/۲۸	۰/۴۱	۶۰۰	۰	۰/۰۴	۰/۰۷	۶۰۰
	میانگین	۰/۲۱	۴۹۷۷	۰/۱۵	۰/۲۲	۰/۳	۶۰۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۷	۶۰۰
(۱۵و۵و۳)	(۵۲و۱۵و۵و۳)	۰/۱۵	۷۲۰۰	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۱۲	۶۰۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۶۰۰
	(۵۱و۱۵و۵و۳)	۰/۲۷	۶۵۷۶	۰/۱	۰/۱۲	۰/۱۴	۶۰۰	۰	۰/۰۷	۰/۱۳	۶۰۰
	(۴۸و۱۵و۵و۳)	۰/۰۹	۲۸۸۱	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۱۱	۶۰۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۴	۶۰۰
	(۵۳و۱۵و۵و۳)	۰/۱۴	۵۵۸۰	۰/۱۶	۰/۱۹	۰/۲۲	۶۰۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۳	۶۰۰
	(۵۰و۱۵و۵و۳)	۰/۳۵	۷۲۰۰	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۸	۶۰۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۶	۶۰۰
	میانگین	۰/۲	۵۸۸۷	۰/۰۸	۰/۱	۰/۱۳	۶۰۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۵	۶۰۰
(۱۰و۷و۴)	(۴۶و۱۰و۷و۴)	۰/۳۸	۵۴۸۷	۰/۰۵	۰/۱۲	۰/۱۸	۶۰۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۶۰۰
	(۴۸و۱۰و۷و۴)	۰/۴	۷۲۰۰	۰/۰۹	۰/۱۵	۰/۲۱	۶۰۰	۰	۰/۰۶	۰/۱۲	۶۰۰
	(۵۱و۱۰و۷و۴)	۰/۰۸	۲۵۶۴	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۱۱	۶۰۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۴	۶۰۰
	(۴۹و۱۰و۷و۴)	۰/۰۸	۷۲۰۰	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۱۳	۶۰۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۳	۶۰۰
	(۵۰و۱۰و۷و۴)	۰/۳۳	۲۵۴۶	۰/۲۸	۰/۳۱	۰/۳۳	۶۰۰	۰	۰/۰۳	۰/۰۵	۶۰۰
	میانگین	۰/۲۵	۴۹۹۹	۰/۱	۰/۱۵	۰/۱۹	۶۰۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۵	۶۰۰
(۱۲و۷و۴)	(۵۸و۱۲و۷و۴)	۰/۴۱	۷۲۰۰	۰/۳۹	۰/۴۷	۰/۵۴	۶۰۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۴	۶۰۰
	(۵۹و۱۲و۷و۴)	۰/۲۲	۷۲۰۰	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۳	۶۰۰	۰	۰/۰۳	۰/۰۷	۶۰۰
	(۶۱و۱۲و۷و۴)	۰/۲۶	۲۵۳۰	۰/۱۹	۰/۲۱	۰/۲۳	۶۰۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۳	۶۰۰
	(۶۳و۱۲و۷و۴)	۰/۱۹	۵۳۳۵	۰/۲	۰/۲۲	۰/۲۵	۶۰۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۶۰۰
	(۵۶و۱۲و۷و۴)	۰/۳۳	۷۲۰۰	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۱۱	۶۰۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۶۰۰
	میانگین	۰/۲۸	۵۸۹۳	۰/۲۳	۰/۲۵	۰/۲۹	۶۰۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۶۰۰
(۱۵و۷و۴)	(۶۹و۱۵و۷و۴)	۰/۳۹	۷۲۰۰	۰/۱۴	۰/۱۶	۰/۱۷	۶۰۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۵	۶۰۰
	(۷۱و۱۵و۷و۴)	۰/۲۳	۷۲۰۰	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۱	۶۰۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۶۰۰
	(۷۲و۱۵و۷و۴)	۰/۱۱	۷۲۰۰	۰/۲۲	۰/۲۳	۰/۲۳	۶۰۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۳	۶۰۰

www.SID.ir

Archive of SID

	(۷۴و۱۵و۷و۴)	۰/۲۴	۶۷۵۹	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۸	۶۰۰	۰	۰/۰۳	۰/۰۸	۶۰۰
	(۷۶و۱۵و۷و۴)	۰/۴۲	۷۲۰۰	۰/۱۹	۰/۲۵	۰/۳۳	۶۰۰	۰	۰/۰۴	۰/۰۷	۶۰۰
	میانگین	۰/۲۷	۴۴۵۵	۰/۱۳	۰/۱۶	۰/۱۸	۶۰۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۵	۶۰۰
(۱۲و۱۰و۴)	(۸۰و۱۲و۱۰و۴)	۰/۴۲	۷۱۱۲	۰/۲۹	۰/۳۱	۰/۳۳	۶۰۰	۰	۰/۰۴	۰/۱	۶۰۰
	(۸۲و۱۲و۱۰و۴)	۰/۶۳	۷۲۰۰	۰/۰۶	۰/۱۶	۰/۲۳	۶۰۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۶۰۰
	(۸۳و۱۲و۱۰و۴)	۰/۴۹	۷۲۰۰	۰/۲۷	۰/۳۲	۰/۳۶	۶۰۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۳	۶۰۰
	(۸۷و۱۲و۱۰و۴)	۰/۴۶	۱۹۳۸	۰/۲۸	۰/۳۲	۰/۳۷	۶۰۰	۰	۰/۰۵	۰/۱۲	۶۰۰
	(۸۸و۱۲و۱۰و۴)	۰/۲۸	۸۳۶	۰/۳۶	۰/۳۸	۰/۴۱	۶۰۰	۰	۰/۰۵	۰/۰۸	۶۰۰
	میانگین	۰/۴۵	۴۸۵۷	۰/۲۵	۰/۳	۰/۳۴	۶۰۰	۰	۰/۰۳	۰/۰۷	۶۰۰
(۱۵و۱۰و۴)	(۹۸و۱۵و۱۰و۴)	۰/۵۴	۷۲۰۰	۰/۲	۰/۲۲	۰/۲۴	۶۰۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۳	۶۰۰
	(۱۰۰و۱۵و۱۰و۴)	۰/۴۳	۷۲۰۰	۰/۱۴	۰/۱۷	۰/۱۹	۶۰۰	۰	۰/۰۵	۰/۰۸	۶۰۰
	(۱۰۵و۱۵و۱۰و۴)	۰/۶۶	۷۲۰۰	۰/۲۶	۰/۳	۰/۳۳	۶۰۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۶۰۰
	(۱۰۷و۱۵و۱۰و۴)	۰/۶۶	۷۲۰۰	۰/۳۸	۰/۴۹	۰/۵۸	۶۰۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۲	۶۰۰
	(۱۰۹و۱۵و۱۰و۴)	۰/۵۴	۷۲۰۰	۰/۳۴	۰/۴	۰/۴۳	۶۰۰	۰	۰	۰/۰۱	۶۰۰
	میانگین	۰/۵۶	۷۲۰۰	۰/۲۷	۰/۳۲	۰/۳۵	۶۰۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۳	۶۰۰
	میانگین کلی	۰/۲۸	۴۴۶۵	۰/۱۵	۰/۱۹	۰/۲۳	۶۰۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۵	۶۰۰

مسئله زمان‌بندی یک مسئله در سطح عملیاتی است و نیاز به حل سریع آن است. با توجه به اینکه زمان حل الگوریتم پیشنهادی خیلی کم‌تر از زمان حل دقیق است؛ هم‌چنین، در حل دقیق برای بعضی مسائل حتی پس از گذشت حداکثر زمان نیز جواب خوبی به دست نیامده است، استفاده از این الگوریتم از نظر زمان به صرفه می‌باشد. از طرف دیگر، با توجه به درصد اختلاف کم بین جواب دقیق و جواب الگوریتم پیشنهادی در مثال‌های کوچک و متوسط، استفاده از این الگوریتم از نظر دقت جواب هم مناسب می‌باشد. با توجه به درصد خطای پایین الگوریتم، می‌توان این‌طور استنباط کرد که مقدار خطا برای مسائل با اندازه بزرگ و خیلی بزرگ که حل دقیق ندارند نیز زیاد نیست؛ پس می‌توان از این الگوریتم برای حل مسائل با اندازه بزرگ هم استفاده نمود.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مسئله زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع مورد بررسی قرار گرفت که توزیع به صورت مسیریابی وسیله نقلیه در نظر گرفته شده بود. هدف، یافتن بهترین برنامه تولید و توزیع بود به شکلی که مجموع هزینه‌های تولید، توزیع، تأخیر و نگه‌داری حداقل شوند. در پژوهش‌هایی که قبلاً انجام گرفته به هزینه نگه‌داری که یکی از هزینه‌های عمده و تأثیرگذار است توجهی نشده بود. در این مقاله، برای اولین بار هزینه نگه‌داری کالاهای تولیدی در انبار کارخانه تا زمان ارسال آن‌ها برای مشتری مورد بررسی قرار گرفت. مدل ریاضی مسئله و قواعد غلبه به صورت چند لم و ویژگی‌های جواب بهینه ارائه شد. به علت پیچیدگی بالای مسئله، نرم‌افزارهای حل دقیق قادر به حل مدل ریاضی در ابعاد بزرگ نبودند؛ به همین علت یک الگوریتم ترکیبی از رقابت استعماری و قواعد غلبه که جواب‌های نزدیک به بهینه را در زمان کوتاه‌تری ارائه می‌دهد پیشنهاد شد. برای الگوریتم یک روش رمزگشایی جدید که قادر به تولید جواب‌های با کیفیت بالا است نیز ارائه گردید. بعد از کدنویسی این الگوریتم با #C و مقایسه نتایج الگوریتم با حل دقیق به دست آمده از GAMS، کارایی این الگوریتم سنجیده شد. نتایج نشان می‌دهد که میزان خطا برای مثال‌های کوچک و متوسط کم است. بنابراین می‌توان چنین استنباط کرد که برای مسائل با ابعاد بزرگ در دنیای واقعی، که قادر به حل دقیق آن در زمان قابل قبول نیستیم، می‌توان از الگوریتم پیشنهادی استفاده نمود.

در تحقیقات آتی، می‌توان امکان برون‌سپاری بعضی از سفارش‌ها به پیمانکاران جزء را در نظر گرفت. برون‌سپاری به دلایلی از قبیل پائین بودن ظرفیت تولید و یا تمرکز کارخانه بر فعالیت‌های اصلی و مرکزی‌اش انجام می‌گیرد. پیمانکار یا پیمانکاران جزء را می‌توان نزدیک به محل کارخانه و یا نزدیک به محل جغرافیایی مشتریان انتخاب نمود و به تبع آن، ارسال سفارش‌های برون‌سپاری شده به مشتریان نیز می‌تواند از محل کارخانه یا از محل پیمانکار انجام گیرد. همچنین در تحقیقات آتی، می‌توان امکان انتخاب عمده‌فروشان یا انبارهای توزیع را در نظر گرفت. در واقع، بجای آنکه محصولات تولیدی از محل کارخانه توزیع شوند، مراکزی را به عنوان واسط در نزدیکی بازارهای مصرف احداث نمود تا ارسال کالا به مشتریان را بر عهده گیرند.

مراجع

[1] Pinedo, M., (2015). Scheduling, Springer.

[2] Hosseinzadeh, M., Sahraeian, R., (2017). "Solving a Multi-Agent Scheduling Problem in a Flow Shop Environment Considering Rejection and Deteriorating Jobs Using a Meta-Heuristic Algorithm", Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems, 5(10): 17-29.

[3] Chang, Y.C., Li, V.C., Chiang, C.J., (2014). "An ant colony optimization heuristic for an integrated production and distribution scheduling problem", Engineering Optimization, 46(4): 503-520.

[4] Sarmiento, A.M., Nagi, R., (1999). "A Review of Integrated Analysis of Production–Distribution Systems", IIE Transactions, 31(11): 1061-1074.

www.SID.ir

Archive of SID

[5] Cóccola, M.E., Zamarripa, M., Méndez, C.A., Espu˜na, A., (2013). "Toward integrated production and distribution management in multi-echelon", Computers and Chemical Engineering 57: 78-94.

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

[7] Chen, H.K., Hsueh, C.F., Chang, M.S., (2008). "Production scheduling and vehicle routing with time windows for perishable food products", Computers & Operations Research, 36: 2311-2319.

[8] Chen, Z.L., (2010). "Integrated Production and Outbound Distribution Scheduling: Review and Extensions", Operations Research 58(1): 130-148.

[9] Garcia, J.M., Smith, K., Lozano, S., Guerrero, F., (2002). "A comparison of GRASP and an exact method for solving a production and delivery scheduling problem", Advances in Soft Computing, Physica, (14): 431-447.

[10] Garcia, J.M., Lozano, S., Canca. D., (2004). "Coordinated scheduling of production and delivery from multiple plants", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 20 (3): 191-198.

[11] Chang, Y.C., Lee, C.Y., (2004). "Machine scheduling with job delivery coordination", European Journal of Operational Research, 158 (2): 470-487.

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

[13] Li, C.L., Vairaktarakis, G.L., (2007). "Coordinating production and distribution of jobs with bundling operations", IIE Transactions, 39 (2): 203-215.

[14] Khodabandeh, M., Hejazi, S.R., Rasti-Barzoki, M., (2014). "A Genetic Algorithm for an Integrated Production and Distribution Scheduling Problem with VRP", Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems, 1(2): 167-181.

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

[16] Amorim, P., Belo-Filho, M.A.F., Toledo, F.M.B., Almeder, C., Almada-Lobo, B., (2013). "Lot sizing versus batching in the production and distribution planning of perishable goods", International Journal of Production Economics, 146: 208-218.

[17] Chang, Y.C., Chang, K.H. Chang, T.K. (2013). "Applied column generation-based approach to solve supply chain scheduling problems", International Journal of Production Research, 51 (13): 4070-4086.

[18] Chang, Y.C., Li, V.C., Chiang, C.J., (2014). "An ant colony optimization heuristic for an integrated production and distribution scheduling problem", Engineering Optimization, 46(4): 503-520.

[19] Belo-Filho, M.A.F., Amorim, P., Almada-Lobo. (2015). "An adaptive large neighbor-hood search for the operational integrated production and distribution problem of perishable products", International Journal of Production Research, 53 (20): 6040-6058.

[20] Li, K., Zhou, C., Leung, Y.T.J., Ma, Y., (2016). "Integrated production and delivery with single machine and multiple vehicles", Expert Systems with Applications, 57: 12-20.

[21] Devapriya, P., Ferrell, W., Geismar, N., (2017). "Integrated Production and Distribution Scheduling with a Perishable Product", European Journal of Operational Research, 259(3): 906-916.

[22] Chang, P.C., Chen, SH., Mani, V., (2009). "A hybrid genetic algorithm with dominance properties for single machine scheduling with dependent penalties", Applied Mathematical Modelling, 33: 579-596.

[23] Chang, P.C., Chen, S.H., (2011). "Integrating dominance properties with genetic algorithms for parallel machine scheduling problems with setup times", Applied Soft Computing, 11: 1263-1274.

[24] Ahmadizar, F., Hosseini, L., (2012). "Bi-criteria single machine scheduling with a time- dependent learning effect and release times", Applied Mathematical Modelling, 36(62): 6203-6214.

[25] Ahmadizar, F., Amiri, Z., (2018). "Outsourcing and scheduling for a two-machine flow shop with release times", Engineering Optimization, 50(3): 483-498.

[26] Atashpaz-Gargari, E., Lucas, C., (2007). "Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition", IEEE Congress on Evolutionary Computation, singapore: 4661-4667.

[27] Atashpaz Gargari, E., Hashemzadeh, F., Rajabioun, R., Lucas, C., (2008). "Colonial competitive algorithm: A novel approach for PID controller design in MIMO distillation column process", International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics (IJICC), 1(3): 337-355.

[28] Behnamian, J., Zandieh, M., (2001). "A discrete colonial competitive algorithm for hybrid flowshop scheduling to minimize earliness and quadratic tardiness penalties", Expert Systems with Applications, 38: 14490-14498.

[29] Ahmadizar, F., Farhadi, S., (2015). "Single-machine batch delivery scheduling with job release dates, due windows and earliness, tardiness, holding and delivery costs", Computers &OperationsResearch, 53: 194-205.

[30] Hosseini, S.M., Al Khaled, A., (2014). "A survey on the Imperialist Competitive Algorithm meta-

www.SID.ir

Archive of SID

heuristic: Implementation in engineering domain and directions for future research", Applied Soft Computing, 24: 1078-1094.

[31]Shokrollahpour, E., Zandieh, M., Dorri, B., (2011). "A novel imperialist competitive algorithm for bi-criteria scheduling of the assembly flowshop problem", International Journal of Production Research, 49:3087-103.

[32]Haase, K., Kimms, A., (2000). "Lot sizing and scheduling with sequence-dependent setup costs and times and efficient rescheduling opportunities", International Journal of Production Economics, 66: 159-169.

www.SID.ir

Archive of SID

www.SID.ir

Archive of SID

IERPS Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

ISSN: 2345-2269

Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

Spring and Summer 2018 Volume 6. No. 12. pp.63-81
www.ier.basu.ac.ir

DOI: 122/0084/ier.2018.15440.1715

A Hybrid Imperialist Competitive Algorithm for Integrated Scheduling of Production and Distribution with Vehicle Routing

L. Izadi[1], F. Ahmadizar[1,*], J. Arkat[1]

[1] Department of Industrial Engineering, University of Kurdistan, Kurdistan, Iran.

ARTICLE INFO

***Article history*:**

Received 13 January 2018
Accepted 01 July 2018

***Keywords*:**

Integrated scheduling
Vehicle routing
Batch delivery
Holding cost
Imperialist competitive algorithm
Dominance properties

ABSTRACT

In this paper, integrated scheduling of production and distribution with vehicle routing problem is considered. A manufacturer with parallel production lines receives customer orders; after producing them, they are then delivered to the customers in batches by a fleet of vehicles. Unlike a direct delivery of products from the manufacturer to each customer, batch delivery reduces the transportation costs because of the maximum utilization of the vehicle capacities, but it may increase the holding and tardiness costs. The objective is to find an integrated schedule of production and distribution so as to minimize the setup, holding, distribution and tardiness costs. The problem is first formulated as a mixed integer linear programming model. In view of its NP-hardness, a procedure by incorporating dominance properties with imperialist competitive algorithm is then proposed to solve large-sized problem instances. To evaluate the performance of the proposed algorithm, several instances are generated and solved. Computational results demonstrate that the algorithm has a good performance for large problems.

* Corresponding author. Fardin Ahmadizar
Tel.: 087-33660073; *E-mail address: f.ahmadizar@uok.ac.ir*

www.SID.ir