

مدل‌سازی ریاضی و حل مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با جریان‌های معکوس و محدودیت دسترسی به ماشین‌ها

سمیه قندی بیدگلی^{۱*}، ریحانه بنرودی^۲

۱. استادیار مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

خلاصه

به دلیل جایگاه ویژه زمان‌بندی سیستم‌های جریان کارگاهی در مراکز تولیدی، این مسائل در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه واقع شده‌اند. یکی از فرضیات رایج در این مسائل، در دسترس بودن ماشین‌ها در افق برنامه‌ریزی است. در محیط‌های صنعتی واقعی ممکن است یک ماشین به دلایلی نظیر لزوم انجام فعالیت نگهداری و تعمیرات یا نت پیشگیرانه، موقتاً در دسترس نباشد. با توجه به اهمیت این موضوع، در تحقیق حاضر مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با جریان‌های معکوس با لحاظ نمودن فعالیت نت پیشگیرانه بررسی شده است که در آن دو جریان کارها (مستقیم و معکوس) وجود دارد که ماشین‌های مشابهی را در دو جهت مخالف پوشش می‌دهند. موضوع ضروری برای مدل‌سازی مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر، در نظر گرفتن محدودیت دسترسی به ماشین‌ها به منظور انجام فعالیت نت پیشگیرانه می‌باشد. عملیات نت روی هر ماشین، مدت زمان ثابتی داشته و شروع و خاتمه آن در یک پنجره زمانی معین رخ می‌دهد. برای مسأله مورد بحث یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط ارائه گردیده است. در این مدل هدف، کمینه‌سازی حداکثر زمان تکمیل تمام کارها می‌باشد. با توجه به پیچیدگی مدل و NP-hard بودن مسأله مورد بررسی، جهت حل مسائل با ابعاد بزرگ الگوریتم فراابتکاری رقابت استعماری پیشنهاد شده است. به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، به حل مسائل نمونه عددی در اندازه‌های مختلف با استفاده از این الگوریتم، نرم‌افزار گمز و همچنین الگوریتم ژنتیک پرداخته شده است. نتایج محاسباتی، مؤید کارایی بسیار خوب الگوریتم رقابت استعماری برای حل مسأله مورد بررسی می‌باشد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۰/۰۷/۱۲

پذیرش ۱۴۰۱/۰۳/۰۵

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

زمان‌بندی جریان کارگاهی

انعطاف‌پذیر

جریان‌های معکوس

محدودیت دسترسی به

ماشین‌ها

فعالیت نگهداری و تعمیرات یا

نت پیشگیرانه

الگوریتم رقابت استعماری

۱. مقدمه

زمان‌بندی تولید حوزه وسیعی از مسائل اکثر سیستم‌های تولیدی و خدماتی را تحت پوشش قرار داده است. به همین دلیل ساختار این نوع مسائل بسیار متنوع هستند. هدف زمان‌بندی تولید، تخصیص منابع محدود در طول زمان برای انجام گروهی از فعالیت‌های مختلف است. این نوع مسائل دارای ویژگی‌های گوناگون، اهداف و اولویت‌های مختلف

هستند، به همین دلیل مدل‌سازی این‌گونه مسائل بسیار مشکل است. زمان‌بندی سیستم تولید کارگاهی جزء یکی از پیچیده‌ترین مباحث بهینه‌سازی ترکیبی به‌شمار می‌رود. در مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی کلاسیک، یک سری از ماشین‌ها با عملکرد و انواع متفاوت در مراحل مختلف قرار داشته و هر مرحله فقط شامل یک نوع ماشین می‌باشد. کارها ترتیب پردازش یکسانی روی تمام ماشین‌ها دارند که ثابت و از پیش تعیین شده است. در این مسأله فرض بر این است که

* نویسنده مسئول: سمیه قندی بیدگلی

تلفن: ۰۳۱-۵۵۲۳۶۸۴۰؛ پست الکترونیکی: s.ghandi@kashanu.ac.ir

تنها یک مسیر پردازش برای هر کار وجود دارد. مسئله جریان کارگاهی^۱ در واقع زمان‌بندی مجموعه‌ای از کارها روی مجموعه‌ای از ماشین‌ها با هدف کاهش یک معیار معین است. این مسئله برای اولین بار توسط جانسون در سال ۱۹۵۴ معرفی و فرمول‌بندی شد [۱]. همچنین جانسون الگوریتمی برای یافتن پاسخ بهینه مسئله مذکور در شرایط وجود ۲ ماشین و شرایط وجود سه ماشین در موارد محدود ارائه داد. بعدها نواز^۲ و همکاران [۲] یک الگوریتم ابتکاری به نام NEH (Nawaz-Enscore-Ham) برای حل مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی در شرایط وجود m ماشین و n کار معرفی کردند. از آنجا که مسئله FSP یک مسئله NP-Hard می‌باشد [۳]، تلاش‌های فراوانی برای توسعه الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری برای حل این مسئله انجام شده است. به‌عنوان مثال می‌توان به الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات جدید^۴ [۴]، کرم شب تاب گسسته^۵ [۵]، خفاش گسسته^۶ [۶] و نهنگ ترکیبی^۷ [۳] اشاره نمود.

مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر^۷ نقش بسیار مهمی در برنامه‌ریزی و تولید و نیز تخصیص منابع در صنعت دنیای امروز دارد. این مسئله به زمان‌بندی انجام مجموعه‌ای از کارهای شامل یک‌سری عملیات مشابه می‌پردازد. هر عملیات می‌تواند روی مجموعه‌ای از ماشین‌آلات موازی انجام شود. وجود انعطاف‌پذیری در مسائل زمان‌بندی راهکار مؤثری برای رفع مشکلات گلوگاهی، افزایش تولید، بهبود عملکرد سیستم و ایجاد مزیت رقابتی می‌شود که البته در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری در این مسائل باعث افزایش پیچیدگی می‌شود. به‌طوری‌که این مسئله در زمره مسائل NP-hard طبقه‌بندی گردیده و دستیابی به پاسخ بهینه حتی در ابعاد کوچک دشوار و بسیار زمان‌بر است. این مسئله برای اولین بار توسط آرتاناری^۸ [۷] در سال ۱۹۷۱ مورد مطالعه قرار گرفت. پس از آن روش‌های مختلفی برای حل مسئله مذکور ارائه گردیدند که به‌طور کلی به ۴ دسته زیر قابل دسته‌بندی می‌باشند [۸]:

- ۱) روش‌های دقیق شامل روش شاخه و کران^۹ [۹] و روش آزادسازی لاگرانژین [۱۰].
- ۲) روش‌های ابتکاری شامل قوانین تخصیص پویا^{۱۰} [۱۱] و تکامل دیفرانسیل گسسته^{۱۱} [۱۲].
- ۳) روش‌های فراابتکاری شامل الگوریتم ژنتیک^{۱۲} [۱۳]، الگوریتم بازپخت شبیه‌سازی شده^{۱۳} [۱۴، ۱۵] و روش جستجوی ممنوع^{۱۴} [۱۶].
- ۴) روش‌های ترکیبی شامل ترکیبی از روش‌های رقابت امپریالیستی

12. Genetic Algorithm (GA)
13. Simulated Annealing (SA)
14. Tabu Search (TS)
15. Adaptive Imperialist Competitive (AICA)
16. Population-Based Simulated Annealing (PBSA)
17. Improved Discrete Artificial Bee Colony (IDABC)
18. Novel differential evolution
19. Modified variable neighborhood search
20. Brennan
21. Abdeljaouad

1. Flow Shop Problem (FSP)
2. Nawaz
3. Novel particle swarm optimization (NPSO)
4. Discrete firefly
5. Discrete Bat Algorithm (DBA)
6. Hybrid Whale Algorithm (HWA)
7. Flexible Flow Shop Problem (FFSP)
8. Arthanary
9. Branch and bound (B&B)
10. Dynamic dispatching rules
11. Discrete Differential Evolution (DDE)

زمان تکمیل کارها است. ماگوئیر^۹ و همکاران [۳۲] مسأله کار کارگاهی با محدودیت دسترسی ماشین‌ها را در سال ۲۰۰۵ بیان نمودند. مسأله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر با محدودیت دسترسی نامعین در سال ۲۰۰۶ توسط گائو^{۱۰} و همکاران [۳۳] بررسی گردید. آن‌ها مسأله را به صورت چندهدفه و با اهداف کمینه‌سازی حداکثر زمان خاتمه، حداکثر بار کاری ماشین‌ها و مجموع بار کاری ماشین‌ها مطرح نمودند و برای حل آن، یک مدل ریاضی غیرخطی و یک الگوریتم ژنتیک ارائه دادند. زریبی^{۱۱} و همکاران [۳۴] در سال ۲۰۰۷، مسأله زمان‌بندی کار کارگاهی با ماشین‌های چندمنظوره و با وجود محدودیت دسترسی به ماشین‌ها را ارائه دادند. وانگ^{۱۲} و همکاران [۳۵] برای مسأله بیان شده توسط گائو و همکاران [۳۳] با محدودیت دسترسی معین و نامعین یک الگوریتم ابتکاری FBS ارائه نمودند. مرادی^{۱۳} و همکاران [۳۶] مسأله کار کارگاهی انعطاف‌پذیر با محدودیت دسترسی نامعین را با استفاده از الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار دادند. نهاوندی و عباسیان [۳۷] در سال ۲۰۱۱ مسأله زمان‌بندی کار کارگاهی چندهدفه انعطاف‌پذیر پویا را با در نظر گرفتن محدودیت دسترسی به ماشین‌ها از نوع قطعی (تحت عنوان محدودیت نت) و در حالت دسترسی نامعین با اهداف کمینه‌سازی حداکثر زمان خاتمه، متوسط زمان در جریان ساخت و متوسط دیرکرد مورد مطالعه قرار داده و همچنین الگوریتم ژنتیک توسعه یافته‌ای برای حل آن ارائه دادند. دالفارد و محمدی^{۱۴} [۳۸] از دو الگوریتم شبیه‌سازی تبرد و ژنتیک ترکیبی برای حل مسأله تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر چندهدفه با ماشین‌های موازی در محیط پویا با در نظر گرفتن محدودیت تعمیرات برای ماشین‌ها استفاده کردند، سپس نتایج خود را با نرم‌افزار لینگو مورد مقایسه قرار دادند. گل مکانی و نمازی [۳۹] برای مسأله زمان‌بندی کار کارگاهی چندمسیره، محدودیت نگهداری و تعمیرات را در حالت دسترسی نامعین ارائه دادند و سپس مدل را با الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی حل کردند. ضیایی^{۱۵} [۴۰] برای حل مسأله MOFJS با محدودیت دسترسی نامعین یک الگوریتم ابتکاری سریع مبتنی بر روش تجزیه ارائه نمود. مرتضوی و همکاران [۴۱] برای مسأله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر با محدودیت دسترسی به ماشین‌ها از نوع قطعی و در حالت دسترسی نامعین یک مدل ریاضی ارائه دادند. همچنین براندا^{۱۶} و همکاران [۴۲] در سال ۲۰۲۱ دو الگوریتم فراابتکاری ژنتیک اصلاحی و جستجوی هارمونی^{۱۶} را جهت حل مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی در شرایط عدم دسترسی به ماشین‌ها ارائه نمودند.

لازم به ذکر است که مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با جریان‌های معکوس با در نظر گرفتن محدودیت دسترسی به ماشین‌ها که برای برخی کاربردهای عملی مانند محیط‌های ساخت و تولید

گرفت. آن‌ها در این مقاله به ارائه یک مدل ریاضی و معرفی یک روش جدید برای حل مسأله مذکور پرداختند. سلیمانی نیا و مهدی زاده^۱ [۲۵] در سال ۲۰۱۸ مدل ریاضی زمان‌بندی تولید کار کارگاهی انعطاف‌پذیر با جریان‌های معکوس را ارائه دادند و با توجه به NP-Hard بودن مسأله از الگوریتم ژنتیک برای حل آن استفاده نمودند. از دیگر تحقیقات صورت گرفته در این زمینه در سال ۲۰۱۹ می‌توان به مقاله تروچو^۲ و همکاران [۲۶] با موضوع بهینه‌سازی تصادفی دومرحله‌ای برای طراحی شبکه لجستیک معکوس در محل تأمین‌کنندگان پویا و همچنین کار چیلیشه^۳ و همکاران [۲۷] در مورد روش جریان‌محور اطلاعات برای زنجیره‌های تأمین تدارکات معکوس اشاره نمود. عقیقی^۴ و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۲۱ یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای مسأله زمان‌بندی باز کارگاهی شامل جریان‌های معکوس ارائه دادند که شامل دو جریان کار (مستقیم و معکوس) در دو جهت مخالف در یک ماشین است.

در محیط‌های صنعتی واقعی، یک ماشین ممکن است به دلایل مختلف در طول افق برنامه‌ریزی در دسترس نباشد. بعضی از این عدم در دسترس بودن‌ها به صورت تصادفی بوده (مانند خرابی یا از کارافتادگی پیش‌بینی نشده ماشین) و برخی دیگر به صورت قطعی می‌باشند (مانند نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، تعمیرات اساسی، پیش‌زمان‌بندی‌ها و تغییر ابزار). محدودیت دسترسی به ماشین در سیستم‌های تولیدی به دو دسته دسترسی معین (ثابت) و دسترسی نامعین (شناور) تقسیم می‌شود. در حالت دسترسی معین، زمان شروع بازه عدم دسترسی در ابتدای برنامه‌ریزی مشخص می‌باشد. اما در حالت دسترسی نامعین، بازه عدم دسترسی در یک پنجره زمانی مشخص شروع گردیده و زمان دقیق شروع آن، پس از حل مسأله و زمان‌بندی کارها تعیین می‌گردد. مسائل زمان‌بندی تک‌ماشینه و ماشین‌های موازی با محدودیت عدم دسترسی به طور وسیع مورد مطالعه قرار گرفته است. مسأله زمان‌بندی ماشین‌های موازی با دوره عدم دسترسی مختلف ماشین‌ها و امکان انقطاع عملیات اولین بار در سال ۱۹۸۴ توسط اشمیت^۵ [۲۹] مطرح شد. همچنین غربی و هائواری^۶ [۳۰] به بیان محدودیت دسترسی ماشین‌ها در مسأله زمان‌بندی ماشین‌های موازی پرداخته‌اند.

اخیراً مسأله زمان‌بندی با محدودیت دسترسی در محیط‌های پیچیده‌تر از قبیل جریان کارگاهی، کار کارگاهی و محیط‌های ترکیبی بیشتر مورد توجه واقع شده است. در تحقیق صورت گرفته توسط آگونه^۷ [۳۱] با استفاده از یک الگوریتم یکپارچه بر مبنای الگوریتم ژنتیک و جستجوی ممنوع به حل مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی با محدودیت نگهداری و تعمیرات پرداخته‌اند که در آن هدف کمینه‌سازی

9. Gao
10. Zribi
11. Wang
12. Moradi
13. Dalfard and Mohammadi
14. Ziaee
15. Branda
16. Harmony Search (HS)

1. Soleimaninia and Mehdizadeh
2. Trochu
3. Chileshe
4. Aghighi
5. Schmidt
6. Gharbi and Haouari
7. Aggoune
8. Mauguier

دسترسی به ماشین‌ها به‌منظور انجام فعالیت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در نظر گرفته شده است. این امر به گسترش مرزهای تحقیقاتی در حوزه تئوری زمان‌بندی کمک می‌نماید.

(۲) به‌منظور تسهیل کاربردهای عملی مسأله مذکور، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی مختلط^۱ برای این مسأله توسعه داده شده است.

(۳) باتوجه به پیچیدگی ذاتی موجود در مسأله مورد نظر، یک الگوریتم رقابت استعماری برای حل این مسأله به‌صورت مؤثر و کارآمد ارائه شده است.

ساختار مقاله به این صورت است که در بخش ۲، مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با جریان‌های معکوس با در نظر گرفتن محدودیت دسترسی به ماشین‌ها به‌منظور انجام فعالیت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه به‌صورت کامل معرفی گردیده است. در بخش ۳ اصول و اجزای الگوریتم رقابت استعماری برای مسأله مورد نظر بیان گردیده و نحوه ایجاد جواب مسأله با استفاده از این الگوریتم توضیح داده شده است. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم مذکور برای مسائل نمونه عددی در اندازه‌های مختلف در بخش ۴ ارائه و تحلیل گردیده و در بخش ۵، نکات مهم انجام شده در مقاله به‌صورت خلاصه مرور و نتایج به‌دست آمده توضیح داده شده‌اند. همچنین در این بخش پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی بیان گردیده است.

۲. مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با جریان‌های معکوس با در نظر گرفتن فعالیت نت پیشگیرانه

یک مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با جریان‌های معکوس می‌تواند به‌صورت n کار $\{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ توصیف گردد که کارهای مستقیم بایستی با ترتیب مشخص و یکسانی از مرحله اول به آخر پردازش گردند. همچنین کارهای معکوس نیز باید با ترتیب مشخص و یکسانی از مرحله آخر به اول انجام شوند. در هر مرحله چندین ماشین موازی، غیرمشابه و مستقل از هم وجود دارد که این باعث انعطاف‌پذیری در مسأله می‌شود. تمام کارهای مستقیم و معکوس از یکدیگر مستقل و در زمان صفر برای پردازش موجود هستند. زمان‌های آماده‌سازی بین عملیات و زمان حمل‌ونقل بین ماشین‌ها و مراحل ناچیز بوده و برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. همه ماشین‌ها از زمان صفر در دسترس می‌باشند اما محدودیت دسترسی نامعین به ماشین‌ها به‌منظور انجام فعالیت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه وجود دارد. در صورت شروع یک فعالیت نت، قطع آن مجاز نمی‌باشد. همچنین انجام فعالیت نت صرفاً در زمان بیکار بودن ماشین میسر می‌باشد. در یک زمان‌بندی امکان‌پذیر هر کار در هر لحظه تنها روی یک ماشین پردازش گردیده، هر ماشین در هر لحظه تنها قادر به پردازش یک کار بوده و انقطاع کارها مجاز نمی‌باشد. هدف تخصیص کارها در هر مرحله به ماشین‌های مناسب و تعیین توالی عملیات روی ماشین‌های هر مرحله به‌نحوی است که یک تابع هدف مشخص بهینه

پیشرفته نیاز می‌باشد، تاکنون در هیچ تحقیقی در نظر گرفته نشده است. با تجزیه و تحلیل مطالعات انجام شده در زمینه زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر، موارد زیر را می‌توان بیان نمود:

- مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با جریان‌های معکوس در تحقیقات بسیار کمی بررسی شده است. در حالی که مدل‌سازی این مسأله برای محیط‌های تولیدی و خدماتی امری ضروری می‌باشد.
 - اکثر مطالعات موجود در زمینه جریان‌های معکوس حالات خاصی از مسأله مانند زنجیره‌تأمین را در نظر گرفته و مدل نموده‌اند.
 - مقالات موجود در زمینه زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با محدودیت دسترسی بدون در نظر گرفتن فرضیات واقعی از قبیل جریان‌های معکوس انجام شده‌اند.
- طی مطالعات انجام شده این نتیجه حاصل شد که مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با جریان‌های معکوس و با در نظر گرفتن فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه تاکنون مورد پژوهش قرار نگرفته است. اغلب اجرای استراتژی تعمیر پس از مشاهده خرابی در مقایسه با استراتژی انجام فعالیت‌های پیشگیرانه منجر به افزایش هزینه‌های عملیاتی است و لذا نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه به‌عنوان یک استراتژی مؤثر در کاهش هزینه‌ها و تبعاً افزایش سودآوری، مورد استفاده واحدهای تولیدی قرار گرفته است. بنابراین برای نزدیک‌تر شدن به شرایط واقعی تولید، در نظر گرفتن محدودیت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه به‌عنوان یکی از محدودیت‌های مسائل زمان‌بندی از اهمیت بالایی برخوردار است. مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با جریان‌های معکوس و با در نظر گرفتن فعالیت‌های نت پیشگیرانه جهت بهینه نمودن عملیات تولید در صنایع تولید خودرو (مونتاژ و دیمونتاژ اجزای موتور خودرو) و سایر صنایع مشابه از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. در مورد مطرح شده مراحل مختلف مونتاژ باید به ترتیب از مرحله اول تا آخرین مرحله برای موتورهای خودروی تولیدی (کارهای مستقیم) انجام گردیده و در بعضی از مراحل بیش‌تر از یک ماشین وجود دارد که به‌صورت موازی عملیات مشابهی را انجام می‌دهند. همچنین در صورتی که یک موتور خودرو به‌دلیل نقص و ایرادی به شرکت عودت داده شود، جهت پیدا نمودن نقص و تعمیر یا تعویض قطعات معیوب، جداسازی (دیمونتاژ) قطعات موتورهای خودروی عودت داده شده (کارهای معکوس) از مرحله آخر تا مرحله اول مونتاژ انجام می‌گردد. همچنین در این مورد فعالیت‌های نت پیشگیرانه جهت افزایش قابلیت اطمینان ماشین‌آلات و کاهش هزینه‌های عملیاتی انجام می‌گردند. هر چند مسأله ذکر شده دارای کاربردهای عملی در بسیاری از صنایع می‌باشد، تاکنون در هیچ تحقیقی بررسی نگردیده است. باتوجه به این گپ تحقیقاتی، نوآوری‌های اصلی این مقاله به‌صورت زیر می‌باشند:

(۱) در این مقاله برای نخستین بار مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با جریان‌های معکوس با در نظر گرفتن محدودیت

گردد.

۱-۲ مدل ریاضی مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با جریان‌های معکوس با در نظر گرفتن فعالیت نت پیشگیرانه در این بخش، مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی مختلط پیشنهادی تشریح خواهد شد. نوآوری‌های صورت گرفته در این مدل، اضافه نمودن محدودیت دسترسی نامعین به ماشین‌ها به منظور انجام فعالیت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه به مدل مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با جریان‌های معکوس می‌باشد.

پارامترهای مدل

پارامترهای مدل به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$J = \{j_1, \dots, j_n\}$	مجموعه تمام کارها
$E_1 = \{j_1, \dots, j_{s_1}\}$	مجموعه کارهای مستقیم
$E_2 = \{j_{s_1} + 1, \dots, j_n\}$	مجموعه کارهای معکوس
$[ue_{ks}, ul_{ks}]$	زودترین و دیرترین زمان جهت تکمیل فعالیت نت در مرحله k ام روی ماشین k ام
j	شاخص کار $\{1, \dots, n\}$
k	شاخص مراحل $\{1, \dots, c\}$
s	شاخص ماشین‌ها در هر مرحله $\{1, \dots, m_k\}$
i	شاخص موقعیت (وضعیت) $\{1, \dots, n\}$
h	شاخص موقعیت (وضعیت) قبلی $\{1, \dots, i\}$
O_{kjs}	عملیات کار z در مرحله k ام روی ماشین s ام
P_{kjs}	زمان پردازش کار z در مرحله k ام روی ماشین s ام
pm_{ks}	فعالیت نت لازم در مرحله k ام روی ماشین s ام
tpm_{ks}	زمان لازم برای فعالیت نت در مرحله k ام روی ماشین s ام

متغیرهای تصمیم مدل

متغیرهای تصمیم مدل به صورت زیر تعریف می‌شوند

C_{max}	زمان تکمیل آخرین کار روی آخرین ماشین (makespan)
t_{kj}	زمان شروع کار z ام در مرحله k ام
P'_{kj}	زمان پردازش واقعی کار z ام در مرحله k ام
e_{kj}	زمان پایان کار z ام در مرحله k ام
spm_{ks}	زمان شروع فعالیت نت در مرحله k ام روی ماشین s ام
epm_{ks}	زمان پایان فعالیت نت در مرحله k ام روی ماشین s ام
X_{kjsi}	اگر کار z در موقعیت i روی ماشین s در مرحله k ام انجام شود، 1 در غیر اینصورت، 0
Y_{kjs}	اگر کار z در مرحله k زودتر از فعالیت نت روی ماشین s ام انجام شود، 1 در غیر اینصورت، 0

تابع هدف و محدودیت‌های مدل

تابع هدف و محدودیت‌های مدل به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\text{Min } Z = C_{max} \quad (1)$$

$$\sum_{s=1}^{m_k} \sum_{i=1}^n X_{kjsi} = 1 \quad \forall j, k \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{kjsi} \leq 1 \quad \forall i, k, s \in m_k \quad (3)$$

$$P'_{kj} = \sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^{m_k} P_{kjs} X_{kjsi} \quad \forall j, k \quad (4)$$

$$t_{kj} + P'_{kj} - t_{(k+1)j} \leq 0 \quad \forall k = 1, \dots, c-1; j = 1, \dots, s_1 \quad (5)$$

$$t_{kj} + P'_{kj} - t_{(k-1)j} \leq 0 \quad \forall k = 2, \dots, c; j = s_1 + 1, \dots, n \quad (6)$$

$$t_{cj} + P'_{cj} \leq C_{max} \quad \forall j = 1, \dots, s_1; i = 1, \dots, \quad (7)$$

$$t_{1j} + P'_{1j} \leq C_{max} \quad \forall j = s_1 + 1, \dots, n; i = 1, \dots, n \quad (8)$$

$$t_{kq} + M[1 - X_{kqs(i+1)}] \geq t_{kj} + P'_{kj} - M[1 - X_{kjs(i)}] \quad \forall j, q = 1, \dots, n; k = 1, \dots, c; i = 1, \dots, n-1; \quad (9)$$

$$\forall h = 1, \dots, i; s = 1, \dots, m_k$$

$$e_{kj} = t_{kj} + P'_{kj} \quad \forall k, j \quad (10)$$

$$epm_{ks} - spm_{ks} = tpm_{ks} \quad \forall k, \forall s = 1, \dots, m_k \quad (11)$$

$$ue_{ks} \leq epm_{ks} \leq ul_{ks} \quad \forall k, \forall s = 1, \dots, m_k \quad (12)$$

$$(spm_{ks} - t_{kj} - P_{kjs}) X_{kjsi} Y_{kjs} \geq 0 \quad \forall k, j, i; \forall s = 1, \dots, m_k \quad (13)$$

$$(t_{kj} - spm_{ks} - tpm_{ks}) X_{kjsi} (1 - Y_{kjs}) \geq 0 \quad \forall k, j, i; \forall s = 1, \dots, m_k \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{kjsi} \leq \sum_{j=1}^n X_{kjs(i-1)} \quad \forall k, s, \forall i \geq 2 \quad (15)$$

$$X_{kjsi} \in \{0,1\} \quad \forall k, j, i; \forall s = 1, \dots, m_k \quad (16)$$

$$Y_{kjs} \in \{0,1\} \quad \forall k, j; \forall s = 1, \dots, m_k \quad (17)$$

عبارت (۱) تابع هدف مسأله بوده و بیانگر این است که باید زمان تکمیل آخرین کار روی آخرین ماشین کمینه‌سازی شود. محدودیت (۲) بیانگر این است که هر کار در هر مرحله، تنها در یک موقعیت و تنها روی یک ماشین انجام شدنی است. محدودیت (۳) بیانگر این است که در یک موقعیت از یک مرحله و در یک ماشین، حداکثر یک کار انجام می‌شود. محدودیت (۴) نشان‌دهنده مقدار زمان پردازش واقعی کار z در مرحله k ام است. محدودیت (۵)، محدودیت پیش‌نیازی کارهای مستقیم بوده و تضمین می‌کند که برای کارهای مستقیم، زمان شروع فعالیت z ام در هر مرحله بزرگتر یا مساوی زمان شروع همان فعالیت در مرحله قبل به‌علاوه زمان پردازش فعالیت مذکور باشد. محدودیت (۶)، محدودیت پیش‌نیازی کارهای معکوس بوده و تضمین می‌کند که برای کارهای معکوس، زمان شروع فعالیت z ام در هر مرحله بزرگتر یا مساوی زمان شروع همان فعالیت در مرحله بعد به‌علاوه زمان پردازش فعالیت مذکور باشد. محدودیت‌های (۷) و (۸) هر کدام به ترتیب در مورد کارهای مستقیم و معکوس بیانگر این است که C_{max} برابر با زمان پایان آخرین کار انجام شده می‌باشد. محدودیت (۹) بیانگر این است که اگر کار q در مرحله k بعد از کار z ام انجام شود زمان شروع کار q برابر با زمان شروع کار z به‌علاوه زمان پردازش آن می‌باشد. محدودیت (۱۰) تضمین می‌کند بین زمان شروع و پایان یک کار هیچ

$$\forall k, j, i; \forall s = 1, \dots, m_k$$

$$tx_{kjsi} - spm_{ks}x_{kjsi} - tpm_{ks} \times X_{kjsi} - tXY_{kjsi} - spm_{ks}XY_{kjsi} - tpm_{ks} \times XY_{kjsi} \geq 0 \quad (14)$$

در نهایت دوازده معادله جدید زیر به مدل اضافه می گردند:

$$spm_{ks}XY_{kjsi} \leq spm_{ks} \quad \forall k, j, i; \forall s = 1, \dots, m_k \quad (21)$$

$$spm_{ks}XY_{kjsi} \leq XY_{kjsi} * M \quad \forall k, j, i; \forall s = 1, \dots, m_k \quad (22)$$

$$spm_{ks}XY_{kjsi} \geq spm_{ks} - M(1 - XY_{kjsi}) \quad \forall k, j, i; \forall s = 1, \dots, m_k \quad (23)$$

$$tXY_{kjsi} \leq t_{kj} \quad \forall k, j, i; \forall s = 1, \dots, m_k \quad (24)$$

$$tXY_{kjsi} \leq XY_{kjsi} * M \quad \forall k, j, i; \forall s = 1, \dots, m_k \quad (25)$$

$$tXY_{kjsi} \geq t_{kj} - M(1 - XY_{kjsi}) \quad \forall k, j, i; \forall s = 1, \dots, m_k \quad (26)$$

$$spm_{ks}x_{kjsi} \leq spm_{ks} \quad \forall k, j, i; \forall s = 1, \dots, m_k \quad (27)$$

$$spm_{ks}x_{kjsi} \leq X_{kjsi} * M \quad \forall k, j, i; \forall s = 1, \dots, m_k \quad (28)$$

$$spm_{ks}x_{kjsi} \geq spm_{ks} - M(1 - X_{kjsi}) \quad \forall k, j, i; \forall s = 1, \dots, m_k \quad (29)$$

$$tx_{kjsi} \leq t_{kj} \quad \forall k, j, i; \forall s = 1, \dots, m_k \quad (30)$$

$$tx_{kjsi} \leq X_{kjsi} * M \quad \forall k, j, i; \forall s = 1, \dots, m_k \quad (31)$$

$$tx_{kjsi} \geq t_{kj} - M(1 - X_{kjsi}) \quad \forall k, j, i; \forall s = 1, \dots, m_k \quad (32)$$

۳. اصول و اجزای الگوریتم رقابت استعماری برای مسأله

مورد بررسی

از آنجاکه مسأله مورد نظر در این مقاله یک مسأله سخت می باشد، در این پژوهش یک الگوریتم فراابتکاری رقابت استعماری جهت حل مسائلی با ابعاد بزرگ توسعه داده شده است. دلیل انتخاب این الگوریتم برای مسأله مورد بررسی این است که الگوریتم مذکور با موفقیت جهت حل مسائل عملی بهینه سازی همچون زمان بندی ماشین های موازی [۴۴]، زمان بندی جریان کارگاهی انعطاف پذیر [۴۵]، زمان بندی کارگاهی انعطاف پذیر [۴۶]، تبلیغات بیلورد [۴۷]، یادگیری و تحلیل شبکه های عصبی مصنوعی [۴۸] به کار برده شده است. در این بخش در ابتدا ساختار و مراحل الگوریتم مذکور ارائه گردیده و سپس اجزای این الگوریتم جهت حل مسأله زمان بندی جریان کارگاهی انعطاف پذیر با در نظر گرفتن جریان های معکوس و فعالیت های نت پیشگیرانه توضیح داده خواهد شد.

۳-۱ ساختار و مراحل الگوریتم رقابت استعماری

الگوریتم رقابت استعماری (ICA) یکی از الگوریتم های بهینه سازی تکاملی است که در سال ۲۰۰۷ توسط آتش پز و لوکاس [۴۹] معرفی گردید. این الگوریتم با مدل سازی ریاضی فرآیند تکامل اجتماعی، اقتصادی، فرهنگی و سیاسی به یافتن پاسخ بهینه مسائل مختلف

توقفی صورت نگیرد. محدودیت (۱۱) از وقفه ی زمانی بین شروع و پایان فعالیت نت روی هریک از ماشین ها جلوگیری می کند. محدودیت (۱۲) تضمین می کند فعالیت نت در محدوده از پیش تعیین شده تمام شود. در واقع زمان پایان فعالیت نت باید در پنجره زمانی تعریف شده قرار گیرد. محدودیت های (۱۳) و (۱۴) برای کار زو فعالیت نت pm_{ks} که هر دو روی ماشین s انجام می گردند، تضمین می کنند که عملیات مربوط به کار و فعالیت نت مذکور بر روی ماشین s به طور همزمان صورت نگیرد. محدودیت (۱۵) تضمین می کند که هیچ جایگاهی بر روی یک ماشین قبل از تخصیص جایگاه قبلی آن ماشین مورد استفاده قرار نگیرد. روابط (۱۶) و (۱۷) جهت تعریف متغیرهای تصمیم مسأله ایجاد گردیده اند.

۲-۲ خطی سازی مدل ریاضی ارائه شده

در مدل ارائه شده محدودیت های (۱۳) و (۱۴) به دلیل وجود ضرب دو متغیر صفر و یک X_{kjsi} و Y_{kjs} غیر خطی بوده و باید خطی سازی گردند. طبق آنچه که در کتاب چن^۱ و همکاران [۴۳] گفته شده است، این رابطه غیرخطی به این صورت خطی سازی می گردد که به جای ضرب دو متغیر صفر و یک $(Y_{kjs}X_{kjsi})$ در محدودیت های (۱۳) و (۱۴) یک متغیر جدید صفر و یک XY_{kjsi} قرار گرفته و این دو محدودیت به صورت زیر تغییر می یابند:

$$(spm_{ks} - t_{kj} - P_{kjs})XY_{kjsi} \geq 0 \quad \forall k, j, i; \forall s = 1, \dots, m_k \quad (13)$$

$$(t_{kj} - spm_{ks} - tpm_{ks})X_{kjsi} - (t_{kj} - spm_{ks} - tpm_{ks})XY_{kjsi} \geq 0 \quad \forall k, j, i; \forall s = 1, \dots, m_k \quad (14)$$

همچنین سه معادله جدید زیر نیز به مدل اضافه می گردند:

$$XY_{kjsi} \leq X_{kjsi} \quad \forall k, j, i; \forall s = 1, \dots, m_k \quad (18)$$

$$XY_{kjsi} \leq Y_{kjs} \quad \forall k, j, i; \forall s = 1, \dots, m_k \quad (19)$$

$$XY_{kjsi} \geq (X_{kjsi} + Y_{kjs}) - 1 \quad \forall k, j, i; \forall s = 1, \dots, m_k \quad (20)$$

محدودیت های تغییر یافته (۱۳) و (۱۴) باز هم به دلیل وجود ضرب متغیر صفر و یک XY_{kjsi} و متغیرهای پیوسته spm_{ks} و t_{kj} غیر خطی بوده و باید خطی سازی گردند. موارد دیگری که باعث غیرخطی بودن محدودیت تغییر یافته (۱۴) می گردند، ضرب متغیر صفر و یک X_{kjsi} و متغیرهای پیوسته spm_{ks} و t_{kj} می باشند. این روابط غیرخطی به این صورت خطی سازی می گردند که به جای ضرب متغیر صفر و یک XY_{kjsi} و متغیرهای پیوسته spm_{ks} و t_{kj} به ترتیب متغیرهای جدید $spm_{ks}XY_{kjsi}$ و tXY_{kjsi} در نظر گرفته شده و در هر دو محدودیت قرار می گیرند. همچنین به جای ضرب متغیر صفر و یک X_{kjsi} و متغیرهای پیوسته spm_{ks} و t_{kj} به ترتیب متغیرهای جدید $spm_{ks}x_{kjsi}$ و tx_{kjsi} در نظر گرفته شده و در محدودیت (۱۴) قرار گرفته و این دو محدودیت به صورت نهایی زیر تغییر می یابند:

$$spm_{ks}XY_{kjsi} - tXY_{kjsi} - P_{kjs} \times XY_{kjsi} \geq 0 \quad (13)$$

کمتر) از استعمارگر برسند. در این حالت، کشور استعمارگر و کشور مستعمره جای خود را با همدیگر عوض کرده و الگوریتم با کشور استعمارگر جدید ادامه می‌یابد.

(۵) محاسبه قدرت کل امپراطوری: قدرت (هزینه) یک امپراطوری برابر است با قدرت کشور استعمارگر به اضافه درصدی از قدرت کل مستعمرات آن. بدین ترتیب برای هزینه کل یک امپراطوری داریم:

$$T.C_n = \text{cost}(\text{imperialist}_n) + \alpha \times \text{mean}\{\text{cost}(\text{colonies of empire}_n)\} \quad (34)$$

که در آن $T.C_n$ هزینه کل امپراطوری n ام و α عددی مثبت است که معمولاً بین صفر و یک و نزدیک به صفر در نظر گرفته می‌شود. کوچک در نظر گرفتن این ضریب باعث می‌شود که هزینه کل یک امپراطوری، تقریباً برابر با هزینه حکومت مرکزی آن (کشور استعمارگر) شود. همچنین افزایش این ضریب باعث افزایش تأثیر میزان هزینه مستعمرات یک امپراطوری در تعیین هزینه کل آن می‌گردد.

(۶) رقابت استعماری: رقابت استعماری بخش مهمی از الگوریتم ICA را تشکیل می‌دهد. در طی رقابت استعماری، امپراطوری‌های ضعیف، به تدریج قدرت خود را از دست داده و به مرور زمان با تضعیف شدن از بین می‌روند. رقابت استعماری باعث می‌شود که به مرور زمان، به حالتی برسیم که در آن تنها یک امپراطوری باقی بماند. به مرور زمان، امپراطوری‌های ضعیف مستعمرات خود را از دست داده و امپراطوری‌های قویتر این مستعمرات را تصاحب کرده و بر قدرت خویش می‌افزایند. نحوه کار بدین صورت است که برای تصاحب یک یا چند مورد از ضعیف‌ترین مستعمرات ضعیف‌ترین امپراطوری، رقابتی میان کلیه امپراطوری‌ها ایجاد می‌گردد. مستعمرات مذکور، لزوماً توسط قوی‌ترین امپراطوری تصاحب نمی‌گردند. بلکه امپراطوری‌های قوی‌تر، احتمال تصاحب بیشتری دارند. انتخاب امپراطوری قوی‌تر با مکانیزم انتخاب چرخ رولت^۴ صورت می‌گیرد. در صورتی که یک امپراطوری تمام مستعمرات خود را از دست بدهد، خود نیز به مستعمره امپراطوری قوی‌تر تبدیل می‌شود.

(۷) بررسی شرط توقف الگوریتم: اگر در شرایطی که همه امپراطوری‌ها مستعمرات خود را از دست داده و تنها یک امپراطوری باقی بماند، الگوریتم رقابت استعماری متوقف می‌گردد. در غیر این صورت الگوریتم از مرحله ۲ ادامه می‌یابد.

۳-۲. الگوریتم ICA توسعه داده شده برای مسأله مورد بررسی در این بخش اجزای مهم الگوریتم رقابت استعماری توسعه داده شده برای حل مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن جریان‌های معکوس و فعالیت‌های نت پیشگیرانه توضیح داده خواهد شد.

بهینه‌سازی می‌پردازد. جواب‌های اولیه در الگوریتم رقابت استعماری با عنوان «کشور» شناخته می‌شوند. این الگوریتم با روند خاصی که در ادامه می‌آید، جواب‌های اولیه (کشورها) را به تدریج بهبود داده و در نهایت جواب مناسب مسأله بهینه‌سازی (کشور مطلوب) را در اختیار می‌گذارد. پایه‌های اصلی این الگوریتم را سیاست جذب^۱، رقابت استعماری^۲ و انقلاب^۳ تشکیل می‌دهند. در واقع این الگوریتم جواب‌های مسأله بهینه‌سازی را در قالب کشورها نگریسته و سعی می‌کند در طی فرآیندی تکرار شونده این جواب‌ها را رفته رفته بهبود داده و در نهایت به جواب بهینه مسأله برسند. مراحل الگوریتم عبارتند از:

(۱) تشکیل امپراطوری‌های اولیه: N_{imp} تا از بهترین اعضای جمعیت اولیه (کشورهای دارای کمترین مقدار تابع هدف) به عنوان استعمارگر انتخاب گردیده و هر کدام در یک امپراطوری قرار می‌گیرند. N_{col} جواب باقی‌مانده، در واقع کلونی‌هایی می‌باشند که براساس مقدار تابع هدف مرتب گردیده و یک به یک به عنوان مستعمره زیر سلطه‌ی امپراطوری‌ها می‌روند. این شیوه تا زمان مستعمره گردیدن تمام کلونی‌ها تکرار می‌گردد. هر کلونی دارای دو ویژگی موقعیت (x) و مقدار تابع هدف و هر امپراطوری دارای سه ویژگی α ، مقدار تابع هدف و کلونی‌های مستعمره خود است.

(۲) اعمال سیاست جذب برای کشورهای مستعمره: این سیاست با هدف نزدیک نمودن کشورهای مستعمره به سمت کشور استعمارگر در راستای ابعاد اجتماعی، اقتصادی، فرهنگی و سیاسی انجام می‌گیرد. در راستای این سیاست، کشور مستعمره از موقعیت فعلی خود، به اندازه D واحد در جهت خط واصل مستعمره به استعمارگر حرکت کرده و به موقعیت جدید کشانده می‌شود. D عددی تصادفی با توزیع یکنواخت (و یا هر توزیع مناسب دیگر) می‌باشد. اگر فاصله میان استعمارگر و مستعمره با d نشان داده شود، داریم:

$$x_{new} = x_{old} + u(0, \beta d) \quad (33)$$

که در آن β عددی بزرگتر از یک و نزدیک به ۲ می‌باشد. وجود ضریب $\beta \geq 1$ باعث می‌شود تا کشور مستعمره در حین حرکت به سمت کشور استعمارگر، از جهت‌های مختلف به آن نزدیک شود.

(۳) اعمال سیاست انقلاب به صورت تصادفی: بروز انقلاب تغییرات ناگهانی را در ویژگی‌های یک کشور ایجاد می‌کند. انقلاب با جابجایی یک کشور مستعمره انتخاب شده به صورت تصادفی به یک موقعیت تصادفی جدید مدل‌سازی می‌شود. این کار بدین صورت انجام می‌گردد که تعدادی از درایه‌های جواب به تصادف انتخاب شده و مقدار آن‌ها تغییر می‌کند. انقلاب باعث جلوگیری از مشکل گیر افتادن در نقطه بهینه محلی شده و یک جواب را به منطقه بهتری از فضای جستجو هدایت می‌نماید.

(۴) تعویض بهترین کشور مستعمره و کشور استعمارگر در صورت لزوم: در حین حرکت مستعمرات به سمت کشور استعمارگر، ممکن است بعضی از این مستعمرات به موقعیتی بهتر (با مقدار تابع هدف

3. Revolution
4. Roulette wheel selection

1. Assimilation
2. Imperialistic Competition

ایجاد یک جواب امکان پذیر امری مهم و ضروری می باشد. بدین منظور متناظر با هر یک از این ماتریس ها، سه ماتریس k ، m و pm با مقادیر گسسته بایستی ایجاد گردند. باتوجه به این توضیحات در ادامه نحوه تبدیل مقادیر هریک از ماتریس ها در ساختار پیوسته به ساختار گسسته توضیح داده می شود.

۲-۲-۳. تبدیل مقادیر ماتریس با ساختار پیوسته \bar{S} به ماتریس با ساختار گسسته S

برای این تبدیل بایستی ابتدا مقادیر موجود در هر سطر از ماتریس \bar{S} به صورت صعودی مرتب گردند. ترتیب پردازش کارها در هر مرحله به صورت کوچکترین عدد تا بزرگترین عدد در سطر مربوطه در داخل این ماتریس است. به عنوان مثال توالی پردازش کارها برای اولین مرحله (اولین سطر از ماتریس \bar{S}) از شکل (۱) به ترتیب از چپ به راست به صورت ۲-۴-۵-۳ خواهد بود. زیرا عدد متناظر با کار ۲ در ماتریس \bar{S} ، کوچکترین عدد در میان تمامی شش عدد بوده و به همین دلیل به عنوان اولین کار پردازش خواهد شد. به همین ترتیب توالی سایر کارها برای مرحله ۱ براساس مقدار عدد متناظر در سطر اول این ماتریس به صورت صعودی مشخص می گردد.

۳-۲-۳. تبدیل مقادیر ماتریس با ساختار پیوسته \bar{m} به ماتریس با ساختار گسسته m

با فرض اینکه مقادیر موجود در ماتریس \bar{m} مقادیری در بازه $[0, 1]$ باشند، با استفاده از رابطه زیر می توان مقادیر ماتریس مذکور را به مقادیر گسسته برای ماتریس m تبدیل نمود:

$$m(k, j) = \lfloor m_k \times \bar{m}(k, j) + 1 \rfloor \quad (35)$$

که در آن $m(k, j)$ و $\bar{m}(k, j)$ به ترتیب مقادیر موجود در سطر k و ستون j از ماتریس های m و \bar{m} می باشند. در واقع $m(k, j)$ نشان دهنده شماره ماشینی در مرحله k می باشد که کار شماره j بر روی آن پردازش می گردد. در رابطه (۳۶) مقدار m_k بیانگر تعداد ماشین های موجود در مرحله k می باشد. همچنین $\lfloor x \rfloor$ بیانگر بزرگترین عدد صحیح کوچکتر یا مساوی با x می باشد. به عنوان مثال باتوجه به مقدار $\bar{m}(1, 4)$ در شکل (۱) که برابر با مقدار ۰.۸۲ می باشد، مقدار $m(1, 4)$ به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$m(1, 4) = \lfloor m_1 \times \bar{m}(1, 4) + 1 \rfloor = \lfloor 2 \times 0.82 + 1 \rfloor = 2$$

۴-۲-۳. تبدیل مقادیر ماتریس با ساختار پیوسته \bar{pm} به ماتریس با ساختار گسسته pm

با استفاده از رابطه زیر می توان مقادیر پیوسته ماتریس \bar{pm} را به مقادیر گسسته برای ماتریس pm تبدیل نمود:

$$pm(k, s) = ue_{ks} + \bar{pm}(k, s) \times (ul_{ks} - ue_{ks}) \quad (36)$$

که در آن $pm(k, s)$ و $\bar{pm}(k, s)$ مقادیر موجود در سطر k و ستون s از ماتریس های pm و \bar{pm} می باشند. در واقع $pm(k, s)$ نشان دهنده زمان تکمیل فعالیت نگهداری و تعمیرات بر روی s امین ماشین از مرحله k می باشد. در این رابطه همچنین مقادیر ue_{ks} و ul_{ks} به ترتیب بیانگر زودترین و دیرترین زمان تکمیل فعالیت نگهداری و تعمیرات بر روی s امین ماشین از مرحله k می باشند.

۱-۲-۳. نحوه نمایش جواب در الگوریتم ICA توسعه داده شده یکی از مؤلفه های مهم در الگوریتم های فراابتکاری نحوه نمایش جواب می باشد. ساختار نمایش جواب، در مسائل مختلف، متفاوت بوده و متناسب با ویژگی های مسأله مورد بررسی، تعریف می گردد. برای مسأله مورد بررسی در این پژوهش، از سه ماتریس \bar{S} ، \bar{m} و \bar{pm} استفاده شده است که ماتریس های \bar{S} و \bar{m} به صورت یک ماتریس $c \times n$ است که در آن c نشان دهنده تعداد مراحل و n نیز جایگشتی از کل کارها (مستقیم و معکوس) است. در واقع، ماتریس \bar{S} بیانگر ترتیب پردازش کارها در هر مرحله بوده و ماتریس \bar{m} نشان دهنده ماشینی است که کار متناظر در ماتریس \bar{S} روی آن پردازش گردیده است. همچنین ماتریس \bar{pm} یک ماتریس $\max(m_k) \times c$ می باشد که در آن m_k بیانگر تعداد ماشین های موجود در مرحله k می باشد. ماتریس \bar{pm} نشان دهنده زمان تکمیل فعالیت نگهداری و تعمیرات بر روی هر یک از ماشین های مراحل مختلف است. از آنجاکه الگوریتم ICA در یک دامنه پیوسته کار می کند، ساختار جواب برای این الگوریتم و در نتیجه اعداد موجود در سه ماتریس مذکور بایستی به صورت مقادیر تصادفی در بازه صفر و یک باشند. به عنوان مثال در شکل (۱) این ماتریس ها برای مثالی با ۶ کار، ۳ مرحله، ۲ ماشین در مرحله ۱ و ۳ ماشین در مراحل ۲ و ۳ نشان داده شده اند.

توالی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
مرحله ۱	۰/۷۱	۰/۲۳	۰/۹۳	۰/۸۹	۰/۹۹	۰/۵۷
مرحله ۲	۰/۰۴	۰/۳۹	۰/۱۹	۰/۹۱	۰/۹۶	۰/۲۸
مرحله ۳	۰/۵۹	۰/۳۲	۰/۱۶	۰/۴۵	۰/۷۸	۰/۹۶

ماتریس \bar{S}

مرحله ۱	۰/۵۵	۰/۱۱	۰/۶۳	۰/۸۲	۰/۹۹	۰/۴۵
مرحله ۲	۰/۱۵	۰/۴۱	۰/۵۷	۰/۷۳	۰/۲۸	۰/۸۸
مرحله ۳	۰/۵۶	۰/۴۲	۰/۱۷	۰/۷۱	۰/۹۵	۰/۲۵

ماتریس \bar{m}

شماره ماشین	۱	۲	۳
مرحله ۱	۸	۶	
مرحله ۲	۷	۴	۹
مرحله ۳	۷	۶	۳

ماتریس \bar{pm}

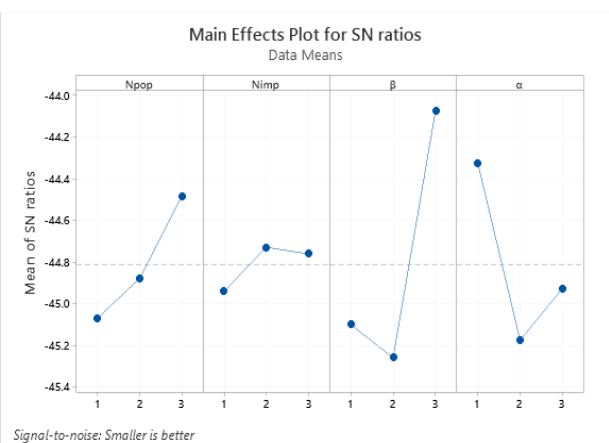
شکل (۱). ماتریس های \bar{S} ، \bar{m} و \bar{pm} برای مثالی با ۶ کار، ۳ مرحله، ۲ ماشین در مرحله ۱ و ۳ ماشین در مراحل ۲ و ۳

از آنجاکه ساختار نمایش مسأله زمان بندی جریان کارگاهی به صورت گسسته می باشد، استفاده از روشی مناسب جهت تبدیل مقادیر پیوسته موجود در این سه ماتریس به مقادیر گسسته جهت

پس از اجرای حالت‌های پیشنهادی، مقادیر معیارها نرمال‌سازی شده و جمع وزنی آن‌ها به نرم‌افزار Minitab داده می‌شود. در نهایت پس از تحلیل این داده‌ها براساس نسبت سیگنال به نویز^۱، نرم‌افزار مینی‌تب بهترین حالت را از بین ۸۱ حالت اعلام نمود. خروجی‌های این نرم‌افزار در شکل (۳) نشان داده شده است. در تحلیل نسبت سیگنال به نویز، با استفاده از تغییر نتایج، بهترین و قوی‌ترین شرایط کاری تعیین می‌گردند. به عبارت دیگر، این نسبت پراکندگی در اطراف یک مقدار مشخص را بیان می‌کند. برای مسأله مورد بررسی در این مقاله با تابع هدف کمینه‌سازی هرچه این نسبت بیشتر باشد، پراکندگی کمتر بوده و در نتیجه اثر پارامتر مربوطه مهم‌تر می‌باشد. باتوجه به این توضیحات و براساس مقادیر نشان داده شده در شکل (۳) بهترین مقادیر برای پارامترهای الگوریتم ICA عبارت از $N_{pop} = 10, 90$ ، $N_{imp} = 10$ ، $\beta = 2$ و $\alpha = 0/1$ می‌باشند.

جدول (۱). پارامترهای الگوریتم ICA و سطوح هریک از آن‌ها

سطوح	اندازه جمعیت	تعداد امپراطوری‌ها	ضریب β	ضریب α
۱	۵۰	۵	۱/۲	۰/۱
۲	۷۰	۱۰	۱/۶	۰/۳
۳	۹۰	۱۵	۲	۰/۵



شکل (۳). نمودار پارامترهای اصلی ارائه شده توسط روش تاگوچی برای نسبت سیگنال به نویز

۴. نتایج محاسباتی

در این مقاله به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم رقابت استعماری، نتایج حاصل از اجرای این الگوریتم برای حل مثال‌های عددی ایجاد شده به‌صورت تصادفی با نتایج حاصل از اجرای نرم‌افزار GAMS و الگوریتم ژنتیک [۵۱] مقایسه می‌گردد. علت انتخاب این روش، مشابهت مسأله در نظر گرفته شده در مرجع مذکور با مسأله مورد بررسی در این مقاله می‌باشد. نوآوری اصلی مدل و روش حل ارائه شده در مقاله حاضر نسبت به مدل معرفی شده در مرجع [۵۱] در نظر گرفتن محدودیت دسترسی به ماشین‌ها به‌منظور انجام فعالیت‌های

باتوجه به این توضیحات در شکل (۲) ماتریس‌های با ساختار گسسته S ، m و pm معادل با ماتریس‌های با ساختار پیوسته شکل (۱) برای مثالی با ۶ کار، ۳ مرحله، ۲ ماشین در مرحله ۱ و ۳ ماشین در مراحل ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند.

توالی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
مرحله ۱	۳	۱	۵	۴	۶	۲
مرحله ۲	۱	۴	۲	۵	۶	۳
مرحله ۳	۴	۲	۱	۳	۵	۶

ماتریس S

مرحله ۱	۲	۱	۲	۲	۲	۱
مرحله ۲	۱	۲	۲	۳	۱	۳
مرحله ۳	۲	۲	۱	۳	۳	۱

ماتریس m

شماره ماشین	۱	۲	۳
مرحله ۱	۸	۶	
مرحله ۲	۷	۴	۹
مرحله ۳	۷	۶	۳

ماتریس pm

شکل (۲). ماتریس‌های S ، m و pm برای مثالی با ۶ کار، ۳ مرحله، ۲ ماشین در مرحله ۱ و ۳ ماشین در مراحل ۲ و ۳

در شکل (۲) عدد ۵ در سطر اول و ستون سوم از ماتریس S بیان‌کننده این است که کار شماره ۵، سومین کاری می‌باشد که در مرحله ۱ پردازش می‌گردد. همچنین عدد ۲ در سطر و ستون متناظر از ماتریس m بیانگر این است که کار مذکور (کار شماره ۵) روی ماشین شماره ۲ از مرحله ۱ پردازش می‌گردد. همچنین عدد ۹ در سطر دوم و ستون سوم از ماتریس pm نشان‌دهنده این است که عملیات نت ماشین شماره ۳ از مرحله ۲ در زمان $t = 9$ تکمیل می‌گردد. همان‌طور که در شکل مشخص است از آنجاکه تعداد ماشین‌ها در مرحله ۱ برابر با دو عدد می‌باشد، در ستون سوم از سطر ۱ مقداری قرار نمی‌گیرد. ۳-۲-۵. تنظیم پارامترهای الگوریتم ICA توسعه داده شده

از آنجاکه خروجی الگوریتم‌های فراابتکاری به‌شدت به مقادیر ورودی آن‌ها وابسته است، در این مقاله برای تنظیم پارامترهای الگوریتم ICA از روش تاگوچی استفاده گردیده است. ۴ پارامتر قابل تنظیم در این الگوریتم عبارت از اندازه جمعیت (N_{pop})، تعداد امپراطوری‌ها (N_{imp})، ضریب β و ضریب α می‌باشند که برای هریک از این پارامترها، ۳ سطح از مقادیر مختلف تعریف گردیدند (جدول (۱)). بنابراین تعداد حالات ایجاد شده عبارت از 3^4 یا ۸۱ حالت می‌باشد. روش تاگوچی برای یافتن بهترین مقادیر این پارامترها، این حالت‌ها را به ۹ حالت کاهش می‌دهد [۵۰].

۴-۱. تجزیه و تحلیل آماری

به‌منظور تجزیه و تحلیل آماری و تأیید عملکرد برتر الگوریتم ICA نسبت به الگوریتم ژنتیک آزمون آماری غیرپارامتریک کروسکال-والیس^۱ [۵۲] برای تشخیص تفاوت معنادار بین رفتار این دو الگوریتم استفاده می‌گردد. لازم به ذکر است که آزمون‌های پارامتریک به‌دلیل فرضیات آن‌ها در مورد استقلال، نرمال بودن و همسانی متغیرها در اینجا قابل استفاده نمی‌باشند [۵۳]. آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه کروسکال-والیس^۲ یک آزمون غیرپارامتریک مقایسه زوجی و یک آنالوگ از آنالیز واریانس یک‌طرفه پارامتری^۳ است [۵۲]. در این بخش ۳۵ تست با استفاده از جواب‌های حاصل از ۵ بار اجرای هر الگوریتم به‌عنوان جمعیت تست روش موردنظر استفاده می‌کردند. فرض صفر در نظر گرفته شده عبارت از این است که "عملکرد الگوریتم ICA برای شماره مسئله i و معیار عملکردی z معادل عملکرد الگوریتم GA می‌باشد". در صورت رد فرض صفر برای یک مسئله و یک معیار به‌خصوص (یعنی در صورتی که $p\text{-value} < \alpha$ باشد)، الگوریتم ICA برای مسئله و معیار موردنظر به‌صورت تصادفی برتر از الگوریتم GA می‌باشد.

نحوه کار بدین صورت است که ابتدا مقدار تمام معیارهای عملکردی بدون در نظر گرفتن الگوریتم ایجادکننده این مقادیر مرتب‌سازی گردیده و سپس رتبه نسبی هر مقدار به الگوریتم مربوطه تخصیص داده می‌شود. مجموع رتبه‌ها برای هر الگوریتم محاسبه گردیده و سپس یک آماره H با استفاده از فرمولی که بیانگر واریانس رتبه‌های هر دو الگوریتم بوده و تقریباً دارای توزیع مربع کای می‌باشد، محاسبه می‌گردد. در نهایت مقدار $p\text{-value}$ به‌صورت $Pr(x_1^2 \geq H)$ تعیین گردیده و در صورتی که کمتر از مقدار سطح اطمینان α باشد، فرض صفر رد می‌گردد.

نتایج محاسباتی حاصل از اجرای تست کروسکال-والیس برای دو الگوریتم ICA و GA، ۳۵ مسئله و ۳ معیار در جدول (۳) نشان داده شده است. از آنجاکه معیارها از نوع حداقل‌سازی می‌باشند، مقادیر رتبه کمتر از ۱ (که به‌صورت پررنگ نشان داده شده‌اند) بیانگر برتری الگوریتم رقابت‌استعماری نسبت به الگوریتم ژنتیک در معیار و مسئله مورد بررسی می‌باشد. همچنین مقدار $(1 - p)$ بیانگر سطح اطمینان برتری یک الگوریتم نسبت به الگوریتم دیگر می‌باشد. نتایج جدول (۳) بیانگر این امر است که الگوریتم رقابت‌استعماری توسعه داده شده در این مقاله با سطح اطمینان ۹۰٪ برای تمامی مسائل و معیارها عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک مورد مقایسه دارد. این نتایج کاملاً در تناسب و انطباق با نتایج جدول (۲) و شکل (۴) بوده و براساس تمامی این تحلیل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم ICA معرفی شده در این مقاله، یک روش مناسب برای حل مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی در نظر گرفته شده می‌باشد.

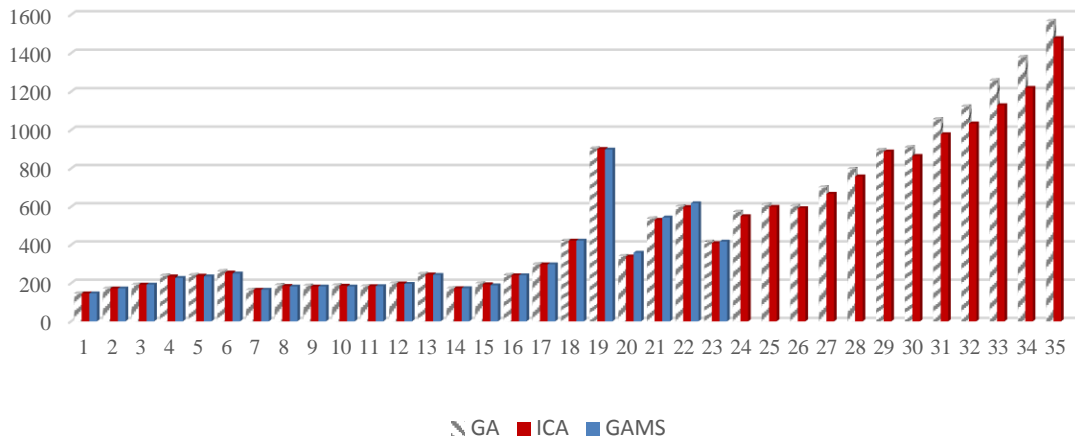
نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه می‌باشد. اندازه جمعیت اولیه الگوریتم GA برابر با ۱۵۰ جواب می‌باشد که به‌صورت تصادفی تولید گردیده و سپس با اعمال عملگرهای تقاطع و جهش هریک با احتمال ۰/۹ و ۰/۳، جمعیت مرحله بعد تولید می‌شود. این کار تا زمان برقراری شرط توقف الگوریتم ادامه می‌یابد.

برنامه الگوریتم‌ها با استفاده از نرم‌افزار Matlab نوشته شده و بر روی سیستمی با حافظه Intel Pentium® IV 2.8 GHz و 2.45 GB رم اجرا گردیده است. لازم به ذکر است که داده‌های مسئله با استفاده از نرم‌افزار اکسل و با استفاده از روشی مشابه مقاله [۲۰] ایجاد گردیده‌اند. دلیل این کار، نبودن داده‌های جامع در ادبیات موضوع می‌باشد. به‌منظور تولید مسائل تصادفی، سه دسته مسئله کوچک، متوسط و بزرگ طراحی گردیده‌اند که مسئله‌های کوچک و متوسط هریک شامل ۱۰ نمونه و مسئله‌های بزرگ شامل ۱۵ نمونه می‌باشند. برای مسائل کوچک تعداد کل کارها بین ۲ تا ۶، برای مسائل متوسط تعداد کل کارها بین ۸ تا ۲۰ و برای مسائل بزرگ تعداد کل کارها بین ۲۸ تا ۵۰ در نظر گرفته شده‌اند. حداکثر تعداد ماشین‌های هر مرحله برابر با ۳ ماشین در نظر گرفته شده و زمان‌های پردازش مربوط به مسائل ایجادشده به‌صورت تصادفی در بازه [1, 99] با توزیع یکنواخت تعیین شده است. زمان مورد نیاز برای انجام فعالیت نت دارای توزیع یکنواخت در بازه [1, 49] بوده و زودترین و دیرترین زمان جهت تکمیل فعالیت نت نیز دارای توزیع یکنواخت در بازه [50, 200] می‌باشد. به‌منظور از بین بردن تبعات حاصل از تصادفی بودن نتایج، هریک از مجموعه مسائل نمونه، ۵ بار اجرا شده و متوسط نتایج به‌دست آمده مبنای مقایسه‌ها قرار گرفته است. زمان حل نرم‌افزار GAMS بر روی ۱۰۰۰۰ ثانیه تنظیم شده است و در صورت عدم دستیابی به جواب بهینه تا زمان تنظیم شده، بهترین مقدار به‌دست آمده به‌عنوان جواب این نرم‌افزار در نظر گرفته می‌شود. در جدول (۲) نتایج حاصل از اجرای الگوریتم ICA، الگوریتم GA و نرم‌افزار گمز برای مثال‌های عددی با اندازه‌های مختلف آورده شده است. در این جدول $|E_1|$ و $|E_2|$ به‌ترتیب عبارت از اندازه مجموعه (تعداد) کارهای مستقیم و معکوس بوده و C بیانگر تعداد مراحل می‌باشد. مقدار C_{max}^* مقدار makespan برای بهترین جواب حاصل توسط یک الگوریتم به‌خصوص می‌باشد. مقادیر \bar{C}_{max} و \bar{Time} نیز به‌ترتیب نشان‌دهنده میانگین مقادیر جواب makespan و زمان حل برای تمامی جواب‌های حاصل توسط یک الگوریتم به‌خصوص می‌باشد. در شکل (۴) سه روش به‌صورت گرافیکی مقایسه گردیده‌اند. براساس نتایج نشان داده شده در جدول (۲) و شکل (۴) این نتیجه حاصل می‌گردد که الگوریتم ICA توسعه داده شده از نظر هر ۳ معیار در نظر گرفته شده بهتر از دو روش دیگر عمل می‌نماید. مقادیر نشان داده شده به‌صورت پررنگ در جدول (۲) برتری الگوریتم مذکور را نسبت به دو روش دیگر تأیید می‌نماید. در این جدول مقادیر پررنگ برجسته، مقادیر بهینه حاصل توسط روش مورد نظر می‌باشند.

3. parametric one-way ANOVA

1. Kruskal and Wallis

2. Kruskal-Wallis one-way analysis of variance by ranks test



شکل (۴). مقایسه معیار C_{max}^* برای نرم‌افزار گمز، الگوریتم GA و الگوریتم ICA در مسائل با اندازه‌های مختلف

جدول (۲). نتایج محاسباتی عملکرد نرم‌افزار گمز، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم رقابت استعماری در مسائل با اندازه‌های مختلف

Problem Size	اطلاعات مسأله			نتایج GAMS			نتایج GA			نتایج ICA		
	Pro. No	$ E_1 $	$ E_2 $	C	C_{max}^*	Time	C_{max}^*	\bar{C}_{max}	\bar{Time}	C_{max}^*	\bar{C}_{max}	\bar{Time}
Small	۱	۲	۲	۲	۱۴۶	۲/۹۱	۱۴۶	۱۴۶/۶	۲۰/۴	۱۴۶	۱۴۶/۵	۱۷/۵
	۲	۲	۲	۳	۱۷۲	۴/۰۸	۱۷۲	۱۷۲/۹	۲۴/۴	۱۷۲	۱۷۲/۷	۱۸/۵
	۳	۲	۲	۴	۱۹۲	۱۰/۵۶	۱۹۲	۱۹۶/۹	۲۷/۸	۱۹۲	۱۹۴/۳	۲۳/۵
	۴	۲	۲	۵	۲۲۷	۸/۱۵	۲۴۰	۲۴۹/۸	۳۳/۲	۲۳۵	۲۳۸/۸	۲۷/۵
	۵	۲	۲	۶	۲۳۵	۱۹/۳۵	۲۴۳	۲۴۴/۵	۴۱/۸	۲۳۹	۲۴۲/۸	۳۰/۳
	۶	۲	۲	۷	۲۴۸	۳۶/۷۳	۲۶۳	۲۷۳/۳	۴۹/۹	۲۵۵	۲۵۵/۸	۳۵/۹
	۷	۳	۳	۲	۱۶۵	۱۰۰/۳۳	۱۶۵	۱۶۶/۵	۶۳/۳	۱۶۵	۱۶۵/۹	۴۴/۹
	۸	۳	۳	۳	۱۸۴	۱۰۰/۳۴	۱۹۰	۱۹۷/۸	۶۷/۱	۱۸۵	۱۸۵/۵	۶۰/۷
	۹	۳	۳	۴	۱۸۲	۱۰۰/۳۸	۱۸۷	۱۸۸/۷	۸۳/۱	۱۸۲	۱۸۵/۹	۷۰/۴
	۱۰	۳	۳	۵	۱۸۲	۷۱۷/۸۷	۱۸۹	۱۹۱/۱	۹۴/۴	۱۸۶	۱۸۹/۳	۷۵/۳
Medium	۱۱	۴	۴	۲	۱۸۴	۱۰۰۵/۷۳	۱۸۴	۱۸۵/۷	۱۰۰/۸	۱۸۴	۱۸۵/۱	۸۶/۹
	۱۲	۴	۴	۳	۱۹۶	۱۰۰۰/۷۲	۱۹۹	۲۰۳/۸	۱۲۱/۸	۱۹۸	۱۹۸/۴	۹۶/۷
	۱۳	۴	۴	۴	۲۴۳	۱۰۰۰/۶۵	۲۴۹	۲۵۷/۲	۱۳۳/۲	۲۴۵	۲۵۱/۱	۱۲۰/۸
	۱۴	۵	۵	۲	۱۷۳	۱۰۰۱/۲۰	۱۷۳	۱۷۴/۲	۱۵۷/۹	۱۷۳	۱۷۳/۹	۱۳۲/۹
	۱۵	۵	۵	۳	۱۸۸	۱۰۰۱/۳۱	۱۹۹	۲۰۶/۹	۱۷۹/۱	۱۹۴	۱۹۶/۱	۱۶۰/۸
	۱۶	۵	۵	۴	۲۴۱	۱۰۰۱/۲۳	۲۴۳	۲۴۹/۶	۱۸۶/۹	۲۴۱	۲۴۲/۷	۱۸۱/۲
	۱۷	۷	۷	۲	۲۹۸	۱۰۰۲/۹۷	۲۹۹	۳۱۰/۱	۲۳۳/۱	۲۹۸	۳۰۰/۱	۲۰۱/۱
	۱۸	۷	۷	۳	۴۲۲	۱۰۰۴/۴۷	۴۲۲	۴۳۸/۵	۲۶۶/۸	۴۲۲	۴۳۷/۲	۲۴۹/۳
	۱۹	۱۰	۱۰	۲	۸۹۸	۱۰۱۱/۰۸	۹۰۵	۹۰۶/۸	۲۹۰/۴	۹۰۱	۹۰۳/۳	۲۶۹/۲
	۲۰	۱۰	۱۰	۳	۳۵۹	۱۰۰۰۰	۳۴۲	۳۵۰/۶	۳۴۲/۱	۳۳۹	۳۴۳/۶	۳۰۹/۶
Large	۲۱	۱۴	۱۴	۲	۵۴۳	۱۰۰۰۰	۵۳۹	۵۶۱/۶	۴۰۷/۷	۵۳۱	۵۴۰/۱	۳۴۰/۶
	۲۲	۱۴	۱۴	۳	۶۱۸	۱۰۰۰۰	۶۰۲	۶۱۱/۶	۴۶۸/۳	۵۹۸	۵۹۹/۸	۴۰۱/۹
	۲۳	۱۶	۱۶	۲	۴۱۷	۱۰۰۰۰	۴۱۷	۴۲۵/۳	۵۸۱/۵	۴۰۹	۴۱۷/۹	۴۳۸/۱
	۲۴	۱۶	۱۶	۳	-	-	۵۷۳	۵۸۵/۱	۶۵۶/۳	۵۵۰	۵۵۷/۱	۴۸۱/۸
	۲۵	۱۷	۱۷	۲	-	-	۶۱۱	۶۳۷/۹	۷۲۲/۱	۵۹۹	۶۰۹/۲	۵۹۷/۵
	۲۶	۱۷	۱۷	۳	-	-	۶۰۴	۶۲۹/۴	۷۵۱/۷	۵۹۲	۵۹۶/۱	۶۶۳/۲
	۲۷	۱۸	۱۸	۲	-	-	۷۰۲	۷۲۰/۳	۸۱۹/۲	۶۶۷	۶۹۹/۱	۷۰۵/۳
	۲۸	۱۸	۱۸	۳	-	-	۷۹۸	۸۱۲/۴	۸۶۰/۱	۷۵۸	۷۶۱/۱	۸۲۴/۸
	۲۹	۲۰	۲۰	۲	-	-	۸۹۷	۹۲۲/۱	۹۲۹/۹	۸۸۸	۸۹۵/۱	۸۶۸/۲

۳۰	۲۰	۲۰	۳	-	-	۹۱۱	۹۲۰/۱	۱۱۷۹/۵	۸۶۵	۸۸۳/۱	۹۱۱/۶
۳۱	۲۵	۲۵	۴	-	-	۱۰۵۷	۱۱۲۳/۸	۱۳۰۳/۹	۹۷۸	۱۰۴۳/۳	۱۱۰۳/۸
۳۲	۲۵	۲۵	۵	-	-	۱۱۲۳	۱۲۱۹/۵	۱۷۵۰/۱	۱۰۳۴	۱۱۲۹/۸	۱۴۱۵/۹
۳۳	۲۵	۲۵	۶	-	-	۱۲۵۹	۱۲۷۳/۷	۱۹۱۷/۳	۱۱۲۹	۱۱۸۷/۶	۱۶۷۸/۱
۳۴	۲۵	۲۵	۷	-	-	۱۳۸۰	۱۴۰۱/۴	۲۰۱۳/۹	۱۲۱۹	۱۲۶۷/۹	۱۸۲۴/۸
۳۵	۲۵	۲۵	۸	-	-	۱۵۶۷	۱۵۹۰/۲	۲۲۳۴/۲	۱۴۷۸	۱۵۰۳/۸	۱۹۸۲/۳

جدول (۳). نتایج تست کروسکال-والیس برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌های ICA و GA برای مسائل و معیارهای مختلف

شماره مسئله	مقدار	معیار عملکردی			شماره مسئله	مقدار	معیار عملکردی			شماره مسئله	مقدار	معیار عملکردی		
		C_{max}^*	$\overline{C_{max}}$	\overline{Time}			C_{max}^*	$\overline{C_{max}}$	\overline{Time}			C_{max}^*	$\overline{C_{max}}$	\overline{Time}
۱	رتبه	5/47	3/97	3/79	۱۳	رتبه	6/46	3/95	6/86	۲۵	رتبه	4/99	3/35	5/39
	p	5/53	7/03	7/21		p	4/54	7/05	4/14		p	6/01	7/65	5/61
۲	رتبه	4/88	3/45	5/63	۱۴	رتبه	4/60	3/10	4/66	۲۶	رتبه	4/69	6/98	5/47
	p	6/12	7/55	5/37		p	6/40	7/90	6/34		p	6/31	4/02	5/53
۳	رتبه	5/49	5/97	4/97	۱۵	رتبه	5/69	4/40	6/75	۲۷	رتبه	4/89	5/47	3/16
	p	5/51	5/03	6/03		p	5/31	6/60	4/25		p	6/11	5/53	7/84
۴	رتبه	6/58	6/12	5/22	۱۶	رتبه	5/71	4/38	6/67	۲۸	رتبه	3/27	6/57	4/34
	p	4/42	4/88	5/78		p	5/29	6/62	4/33		p	7/73	4/43	6/66
۵	رتبه	5/22	6/67	5/12	۱۷	رتبه	5/59	6/09	3/94	۲۹	رتبه	6/29	3/72	4/73
	p	5/78	4/33	5/88		p	5/41	4/91	7/06		p	4/71	7/28	6/27
۶	رتبه	6/81	6/01	4/80	۱۸	رتبه	5/88	4/74	4/84	۳۰	رتبه	6/62	3/19	6/37
	p	4/19	4/99	6/20		p	5/12	6/26	6/16		p	4/38	7/81	4/63
۷	رتبه	3/97	6/18	4/25	۱۹	رتبه	4/68	3/75	6/50	۳۱	رتبه	3/16	4/56	4/00
	p	7/03	4/82	6/75		p	6/32	7/25	4/50		p	7/84	6/44	7/00
۸	رتبه	4/04	3/47	6/23	۲۰	رتبه	5/71	6/68	5/16	۳۲	رتبه	6/22	5/51	4/82
	p	6/96	7/53	4/77		p	5/29	4/32	5/84		p	4/78	5/49	6/18
۹	رتبه	4/02	5/65	3/83	۲۱	رتبه	5/19	4/17	3/84	۳۳	رتبه	3/80	6/08	5/19
	p	6/98	5/35	7/17		p	5/81	6/83	7/16		p	7/20	4/92	5/81
۱۰	رتبه	3/51	6/23	4/01	۲۲	رتبه	3/23	4/85	6/69	۳۴	رتبه	4/09	5/21	5/98
	p	7/49	4/77	6/99		p	7/77	6/15	4/31		p	6/91	5/79	5/02
۱۱	رتبه	5/62	5/49	5/13	۲۳	رتبه	5/32	4/86	5/69	۳۵	رتبه	3/64	4/47	6/43
	p	5/38	5/51	5/87		p	5/68	6/14	5/31		p	7/36	6/53	4/57
۱۲	رتبه	4/36	3/92	3/82	۲۴	رتبه	3/07	3/37	6/91					
	p	6/64	7/08	7/18		p	7/93	7/63	4/09					

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این مقاله یک مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با جریان‌های معکوس و با در نظر گرفتن محدودیت دسترسی به ماشین‌ها به منظور انجام فعالیت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بررسی گردید. یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای این مسأله توسعه داده شده و یک الگوریتم فراابتکاری رقابت استعماری برای این مسأله ارائه گردید. از آنجاکه خروجی الگوریتم‌های فراابتکاری به شدت به مقادیر ورودی آن‌ها وابسته است، برای تنظیم پارامترهای الگوریتم ICA از روش تاگوچی استفاده گردید. نتایج الگوریتم ICA در مثال‌های عددی با اندازه‌ها و داده‌های مختلف با نتایج حاصل از نرم‌افزار گمز و الگوریتم ژنتیک براساس معیارهای زمان، بهترین مقدار makespan و میانگین مقدار makespan برای تمامی جواب‌های یافت شده مقایسه گردید. نتایج حاصل نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم ICA نسبت به نرم‌افزار گمز و الگوریتم ژنتیک می‌باشد.

برای مطالعات آتی، می‌توان مسأله زمان‌بندی معرفی شده را با در نظر گرفتن مفروضات واقعی مانند قابلیت انقطاع کارهای مستقیم و معکوس، در نظر گرفتن سایر فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات مانند نت اصلاحی^۱ یا نت اضطراری^۲، محدودیت بافر بین مراحل یا ماشین‌های مختلف، زمان آماده‌سازی وابسته به توالی، زمان آزادسازی کارها و یا فعالیت تعمیر و نگهداری احتمالی مدل‌سازی نمود.

همچنین می‌توان مسأله مورد بررسی را در حالت چندهدفه بررسی نمود. در این مقاله محدودیت‌های مربوط به منابع نت در نظر گرفته نشده‌اند. بنابراین در نظر گرفتن مواردی مانند زمان تأخیر تدارکات^۳ و زمان تأخیر مدیریتی^۴ جهت نزدیک شدن به شرایط دنیای واقعی مفید می‌باشند. به عنوان پیشنهاد آخر می‌توان از سایر الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری جهت حل مسأله مورد نظر در این مقاله استفاده نمود.

مراجع

- [6] Luo, Q., et al., Discrete bat algorithm for optimal problem of permutation flow shop scheduling. The Scientific World Journal, 2014. 2014.
- [7] Arthanary, T., An extension of two machine sequencing problem. Opsearch, 1971. 8: p. 10-22.
- [8] Lee, T. and Y. Loong, A review of scheduling problem and resolution methods in flexible flow shop. International Journal of Industrial Engineering Computations, 2019. 10(1): p. 67-88.
- [9] Madhushini, N. and C. Rajendran, Branch-and-bound algorithms for scheduling in an m-machine no-wait flowshop. Sādhanā, 2020. 45(1): p. 1-11.
- [۱۰] اسدی گنگرچ ابراهیم و نهاوندی نسیم (۱۳۹۴). توسعه روش آزادسازی لاگرانژین برای حل مسأله زمان‌بندی در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، دوره ۳، شماره ۶، صفحه ۱۳۱-۱۲۱.
- [11] Gholami, M., M. Zandieh, and A. Alem-Tabriz, Scheduling hybrid flow shop with sequence-dependent setup times and machines with random breakdowns. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009. 42(1): p. 189-201.
- [12] Acero-Dominguez, M.J. and C. Paternina-Arboleda. Scheduling jobs on a k-stage flexible flow shop using a TOC-based (bottleneck) procedure. in Proceedings of the 2004 IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium, 2004. 2004. IEEE.
- [13] Costa, A., F.A. Cappadonna, and S. Fichera, A novel genetic algorithm for the hybrid flow shop scheduling with parallel batching and eligibility constraints. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014. 75(5): p. 833-847.
- [14] Janiak, A., et al., Metaheuristic approaches to the hybrid flow shop scheduling problem with a cost-related criterion. International journal of production economics, 2007. 105(2). p. 407-424.
- [۱۵] بهنامیان، جواد و دیانت، فاطمه (۱۳۹۵). مقایسه سه روش فراابتکاری برای کمینه نمودن زمان چرخه در مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی مختلط دوره‌ای با در نظر گرفتن اثر یادگیری، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، دوره ۴، شماره ۸، صفحه ۱۱۷-۱۰۵.
- [16] Wang, X. and L. Tang, A tabu search heuristic for the hybrid flowshop scheduling with finite intermediate buffers. Computers & Operations Research, 2009. 36(3): p. 907-918.
- [17] Jolai, F., M. Rabiee, and H. Asefi, A novel hybrid meta-heuristic algorithm for a no-wait flexible flow shop scheduling problem with sequence dependent setup times. International Journal of Production Research, 2012. 50(24): p. 7447-7466.
- [18] Cui, Z. and X. Gu, An improved discrete artificial bee colony algorithm to minimize the makespan on hybrid
- [1] Johnson, S.M., Optimal two-and three-stage production schedules with setup times included. Naval research logistics quarterly, 1954. 1(1): p. 61-68.
- [2] Nawaz, M., E.E. Enscore Jr, and I. Ham, A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem. Omega, 1983. 11(1): p. 91-95.
- [3] Abdel-Basset, M., et al., A hybrid whale optimization algorithm based on local search strategy for the permutation flow shop scheduling problem. Future Generation Computer Systems, 2018. 85.(۰۳)
- [4] Lian, Z., X. Gu, and B. Jiao, A novel particle swarm optimization algorithm for permutation flow-shop scheduling to minimize makespan. Chaos, Solitons & Fractals, 2008. 35(5): p. 851-861.
- [5] Sayadi, M., R. Ramezani, and N. Ghaffari-Nasab, A

3. Logistics Delay Time (LDT)

4. Administrative Delay Time (ADT)

1. Emergency Maintenance (EM)

2. Corrective Maintenance (CM)

- constraints. *International Journal of Production Economics*, 2008. 112 (۱): p. 151-160.
- [35] Wang, S. and J. Yu, An effective heuristic for flexible job-shop scheduling problem with maintenance activities. *Computers & Industrial Engineering*, 2010. 59(3): p. 436-447.
- [36] Moradi, E., S.F. Ghomi, and M. Zandieh, An efficient architecture for scheduling flexible job-shop with machine availability constraints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010. 51(1-4): p. 325-339.
- [۳۷] نهاوندی، نسیم و عباسیان، محمد (۱۳۹۰). مسأله زمان‌بندی کار کارگاهی چندهدفی انعطاف‌پذیر پویا با درنظر گرفتن محدودیت نگهداری و تعمیرات، نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، جلد ۲۲، شماره ۱، صفحه ۲۶-۱۳.
- [38] Dalfard, V.M. and G. Mohammadi, Two meta-heuristic algorithms for solving multi-objective flexible job-shop scheduling with parallel machine and maintenance constraints. *Computers & Mathematics with Applications*, 2012. 64(6): p. 2111-2117.
- [۳۹] نمازی، علی و گلمکانی، حمیدرضا (۱۳۹۱). زمان‌بندی کار کارگاهی چندمسیره با درنظر گرفتن محدودیت نگهداری و تعمیرات (نت)، نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، جلد ۲۳، شماره ۴، صفحه ۴۵۹-۴۷۰.
- [40] Ziaee, M., An efficient heuristic algorithm for flexible job shop scheduling with maintenance constraints. *Applied Mathematics and Sciences: An International Journal (MathSJ)*, 2014. 1(1): p. 19-31.
- [۴۱] مرتضوی، جواد و همکاران (۱۳۹۷). ارائه مدل ریاضی برای مسأله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر با محدودیت دسترسی به ماشین‌ها، *نخبگان علوم و مهندسی*، دوره ۳، شماره ۱، صفحه ۵۲-۶۱.
- [42] Branda, A., et al., Metaheuristics for the flow shop scheduling problem with maintenance activities integrated. *Computers & Industrial Engineering*, 2021. 151: p. 106989.
- [43] Chen, D.-S., R.G. Batson, and Y. Dang, *Applied integer programming*. Hoboken, NJ, 2010.
- [44] Lei, D., et al., An imperialist competitive algorithm with memory for distributed unrelated parallel machines scheduling. *International Journal of Production Research*, 2020. 58(2): p. 597-614.
- [45] Li, M., D. Lei, and J. Cai, Two-level imperialist competitive algorithm for energy-efficient hybrid flow shop scheduling problem with relative importance of objectives. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2019. 49: p. 34-43.
- [46] Karimi, S., et al., Scheduling flexible job-shops with transportation times: Mathematical models and a hybrid imperialist competitive algorithm. *Applied mathematical modelling*, 2017. 41: p. 667-682.
- [47] Sadeh, D.H., M. Nooraie, and B. Hajikarimi, Billboard advertising optimization by using imperialist competitive algorithm (Case study: Tehran city). *African Journal of Business Management*, 2013. 7(36): p. 3706-3713.
- [48] Biabangard-Oskouyi, A., et al., Application of imperialist competitive algorithm for materials property characterization from sharp indentation test. *International Journal of Engineering Simulation*, 2009. 10(1): p. 11-12.
- [49] Atashpaz-Gargari, E. and C. Lucas. Imperialist flow shop problems. *Neurocomputing*, 2015. 148: p. 248-259.
- [۱۹] شفیع رودباری، عرفان و همکاران (۱۳۹۹). مدل‌سازی شبکه زنجیره‌تأمین معکوس چندرده‌ای و حل توسط الگوریتم ترکیبی، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، دوره ۸، شماره ۱۶، صفحه ۱۸۵-۱۹۷.
- [20] Abdeljaouad, M.A., et al., Job-shop production scheduling with reverse flows. *European Journal of Operational Research*, 2015. 244(1): p. 117-128.
- [21] Salema, M.I.G., A.P. Barbosa-Povoa, and A.Q. Novais, Simultaneous design and planning of supply chains with reverse flows: A generic modelling framework. *European journal of operational research*, 2010. 203(2): p. 336-349.
- [22] Krikke, H., J. Bloemhof-Ruwaard, and L.N. Van Wassenhove, Concurrent product and closed-loop supply chain design with an application to refrigerators. *International journal of production research*, 2003. 41(16): p. 3689-3819.
- [23] Realf, M.J., J.C. Ammons, and D.J. Newton, Robust reverse production system design for carpet recycling. *Iie Transactions*, 2004. 36(8): p. 767-776.
- [24] Brennan, L., S.M. Gupta, and K.N. Taleb, Operations planning issues in an assembly/disassembly environment. *International Journal of Operations & Production Management*, 1994.
- [25] Soleimaninia, F. and E. Mehdizadeh, Mathematical Modeling and Solving Flexible Job-Shop Production Scheduling with Reverse Flows. *Advances in Industrial Engineering* : (۱)۵۲ .۲۰۱۸ , p. 87-96.
- [26] Trochu, J., A. Chaabane, and M. Ouhimmou, A two-stage stochastic optimization model for reverse logistics network design under dynamic suppliers' locations. *Waste Management*, 2019. 95: p. 569-583.
- [27] Chileshe, N., R.S. Jayasinghe, and R. Rameezdeen, Information flow-centric approach for reverse logistics supply chains. *Automation in Construction*, 2019. 106: p. 102858.
- [28] Aghighi, S., et al., Open-shop production scheduling with reverse flows. *Computers & Industrial Engineering*, 2021. 153: p. 107077.
- [29] Schmidt, G., Scheduling on semi-identical processors. *Zeitschrift für Operations Research*, 1984. 28(5): p. 153-162.
- [30] Gharbi, A. and M. Haouari, Optimal parallel machines scheduling with availability constraints. *Discrete Applied Mathematics*, 2005. 148(1): p. 63-87.
- [31] Aggoune, R., Minimizing the makespan for the flow shop scheduling problem with availability constraints. *European Journal of Operational Research*, 2004. 153(3): p. 534-543.
- [32] Mauguere, P., J.-C. Billaut ,and J.-L. Bouquard, New single machine and job-shop scheduling problems with availability constraints. *Journal of scheduling*, 2005. 8(3): p. 211-231.
- [33] Gao, J., M. Gen, and L. Sun, Scheduling jobs and maintenances in flexible job shop with a hybrid genetic algorithm. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2006. 17(4): p. 493-507.
- [34] Zribi, N., A. El Kamel, and P. Borne, Minimizing the makespan for the MPM job-shop with availability

معکوس، نشریه مهندسی صنایع (دانشکده فنی دانشگاه تهران)، دوره

۵۲، شماره ۱، صفحه ۹۶-۸۷.

[52] Kruskal, W.H. and W.A. Wallis, Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American statistical Association*, 1952. 47(260): p. 583-621.

[53] Derrac, J., et al „A practical tutorial on the use of nonparametric statistical tests as a methodology for comparing evolutionary and swarm intelligence algorithms. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2011. 1(1): p. 3-1.

competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition. in 2007 IEEE congress on evolutionary computation. 2007. Ieee

[۵۰] قندی بیدگلی، سمیه و کریمی، فرزانه (۱۳۹۹). یک رویکرد بهینه‌سازی

مبتنی بر شبیه‌سازی جهت بالانس خط مونتاژ دوطرفه مختلط در شرایط

تصادفی بودن زمان انجام کارها (مطالعه موردی: شرکت به آفرینان

داتیس تیوا)، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید،

دوره ۸، شماره ۱۶، صفحه ۲۱۳-۱۹۹.

[۵۱] سلیمانی نیا، فاطمه و مهدی زاده، اسماعیل (۱۳۹۷). مدل‌سازی ریاضی

و حل مسأله زمان‌بندی تولید کار کارگاهی انعطاف‌پذیر با جریان‌های



DOI: 10.22084/ier.2023.25010.2048

Mathematical Modeling and Solving the Flexible Flow Shop Scheduling Problem with Reverse Flows and the Limitation of Access to Machines

S. Ghandi Bidgoli^{1*}, R. Bonroodi²

¹ Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

² Master student of Industrial Engineering, Faculty of Industrial and Systems Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received 04 October 2021

Accepted 26 May 2022

Keywords:

Flexible Flow Shop Scheduling (FFSS)

Reverse Flows

The Limitation of Access to Machines

Preventive Maintenance (PM)

Imperialist Competitive Algorithm (ICA)

ABSTRACT

Due to the special position of flow shop scheduling systems in production centers, these issues have received a lot of attention in recent years. One common assumption in these cases is the availability of machines on the planning horizon. In real industrial environments, a machine may be temporarily unavailable for reasons such as the need for preventative maintenance. Due to the importance of this issue, in the present study the flexible flow shop scheduling problem with reverse flows is investigated by considering the activity of preventive maintenance in which there are two flows of jobs (direct and reverse) that cover the same machines in opposite directions. An essential issue for modeling the flexible flow shop-scheduling problem is to consider the limitations of access to machines in order to perform preventive maintenance. The maintenance operation on each machine has a fixed duration and its beginning and end occur in a certain time window. For the mentioned problem, a Mixed Integer NonLinear Programming (MINLP) model is presented. The objective of this model is to minimize the maximal completion time of the jobs (i.e., the makespan). Due to the complexity of the model and the NP-hardness of the proposed problem, the Imperialist Competitive Algorithm (ICA) is proposed to solve large-scale problems. In order to evaluate the performance of the proposed algorithm, numerical sample problems in different sizes are solved using this algorithm, the General Algebraic Modeling System (GAMS) software as well as the genetic algorithm. Computational results demonstrate the effectiveness of the Imperialist Competitive Algorithm for the considered problem.

* Corresponding author. S. Ghandi Bidgoli
Tel.: 031-55336840; E-mail address: s.ghandi@kashanu.ac.ir