Archive of SID

نام مجله فصلنامهٔ مطالعات مدیریت صنعتی

دوره نوزدهم، شماره ٦٠، بهار ١٤٠٠، ٢٨٤-٢٣٧

.atu.ac.ir

DOI:١٠,٢٢٠٥٤ /jims.٢٠٢١,٤٨٩٧٦,٢٤٢٥

مقاله پژوهشی /سخن سردبیر

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۰/۱۲

eISSN: ISSN:٢٢٥١٨٠٢٩

مدل ریاضی و الگوریتم فراابتکاری برای مساله زمانبندی جریان کارگاهی ترکیبی با منابع دوگانه محدود و در نظر گرفتن رد کارها

محمدرضا دبیری دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

مهدی یزدانی * استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

بهمن نادری دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

حسن حاله استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان، گلپایگان، ایران

چکیده

در دنیای واقعی بنگاه‌های اقتصادی با محیط تولیدی جریان کارگاهی ترکیبی، عموماً علاوه بر محدودیت در ماشین‌آلات با محدودیت نیروی انسانی، افزایش هزینه‌های حقوق و دستمزد و تلاش برای استفاده بهتر از نیروی کار روبه‌رو هستند. از جهتی نیازمندی‌های تحویل محصول به مشتریان با توجه به محدودیت‌های منابع مزبور، استفاده از رد کارها را به منظور اقناع نیازمندی‌های متمایز مشتریان ضروری ساخته است. لذا این تحقیق مساله زمانبندی جریان کارگاهی ترکیبی با منابع دوگانه محدود انسان و ماشین را با در نظر گرفتن رد کارها جهت کمینه سازی هزینه خالص کل (مجموع کل هزینه‌های رد کارها و هزینه‌های دیرکرد کارها) مورد مطالعه قرار داده است که کاربرد گسترده‌ای در بسیاری از مسائل صنعتی دارد. در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی‌خطی عدد صحیح مختلط برای مساله تحقیق توسعه داده شده است. علاوه بر این به علت NP-hard بودن مساله مورد بررسی، یک الگوریتم بهینه‌سازی پرنده استوایی دریایی بهبود یافته با یک روش رمزگشایی برای حل مسائل با اندازه بزرگ ارائه شده است. به منظور ارزیابی الگوریتم بهینه سازی پیشنهادی، ۵ الگوریتم شناخته شده در ادبیات تحقیق (سیستم ایمنی بدن مصنوعی مبتنی بر ایمونوگلوبولین، الگوریتم ژنتیک، کلونی زنبور عسل مصنوعی گسسته، بهینه‌سازی کرم میوه توسعه یافته و بهینه سازی موثر اصلاح‌شده پرندگان مهاجر) با مساله پیشنهادی تطبیق داده شده است. در نهایت عملکرد الگوریتم بهینه سازی پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های تطبیق یافته، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج و ارزیابی‌های انجام شده نشان از عملکرد خوب الگوریتم بهینه‌سازی پرنده استوایی دریایی بهبود یافته دارد.

کلیدواژه‌ها: زمانبندی جریان کارگاهی ترکیبی، الگوریتم فراابتکاری، رد کارها، الگوریتم بهینه‌سازی پرنده استوایی دریایی، منابع دوگانه محدود.

مقاله حاضر برگرفته از رساله دکتری رشته مهندسی صنایع دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین است.

* نویسنده مسئول: m_yazdani@qiau.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

از زمان پژوهش (جانسون[1]، ۱۹۵۴)، حوزه زمان‌بندی جریان کارگاهی حوزه‌ای بسیار فعال برای پژوهش بوده است. مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی، یک پروسه تصمیم‌گیری است که در آن تعداد n کار باید در تعداد m مرحله تولید به گونه ای تخصیص داده شوند تا مقیاس‌های مشخصی از عملکرد بهینه گردند. جریان کارگاهی متغیری ساده در مسائل زمان‌بندی است که تنها یک ماشین را در هر مرحله تولید در نظر می‌گیرد. با این حال، امروزه این چیدمان برای خیلی از زمینه‌های تولید بکار گرفته نمی‌شود (دودک و همکاران[2]، ۱۹۹۲). کارخانجات تولیدی واقعی اغلب به دنبال افزایش خروجی و بکارگیری ظرفیت کلی کارگاه هستند. جریان کارگاهی که در هر مرحله حداقل تعداد دو یا بیشتر ماشین موازی دارد به عنوان مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی ترکیبی[3] شناخته می‌شود. این مسئله یکی از مسائل زمان‌بندی می‌باشد که بسیار مورد مطالعه قرار گرفته است (رویز و وازکز-رودریگز[4]، ۲۰۱۰). مسئله زمانبندی جریان کارگاهی ترکیبی کاربردهای بسیاری در صنایع دنیای واقعی دارد، همچون شرکت تولید برچسب (لین و لیائو[5]، ۲۰۰۳)، صنعت نیمه‌رسانا (کواد و کوهن[6]، ۲۰۰۵)، تولید کاشی (رویز و ماروتو[7]، ۲۰۰۶)، پروسه ساخت فولاد (وانگ و همکاران[8]، ۲۰۱۲)، و غیره.

در بیشتر مسائل زمان‌بندی، تنها منبع در نظر گرفته شده به عنوان محدودیت، ماشین آلات است. با این حال، دیگر منابع همچون کارگران در صنایع واقعی محدود هستند، به طوری که در نظر گرفتن کارگر کافی علاوه بر ماشین و دیگر منابع مورد نیاز برای پردازش کارها، غیر منطقی است (مهراوران و لوگندران[9]، ۲۰۱۳). در تولید عملی، بسیاری از شرکت‌های تولید کننده با افزایش هزینه حقوق و دستمزد روبرو می‌شوند و استفاده بهتر از نیروی کار بسیار حیاتی است (لی و گو[10]، ۲۰۱۴).

---

1. Johnson
2. Dudek et al.
3. Hybrid flow-shop (HFS)
4. Ruiz & Vazquez-Rodriguez
5. Lin & Liao
6. Quadt & Kuhn
7. Ruiz & Maroto
8. Wang et al.
9. Mehravaran & Logendran
10. Lei & Guo

www.SID.ir

Archive of SID

در بسیاری از منابع کارگری واقعی در زمانبندی جریان کارگاهی ترکیبی چند مهارته هستند، یعنی، هر کارگر در یک یا چند مهارت تخصص می‌یابد. در این زمینه هر ماشین نیازمند مهارتی لازم برای کار کردن با آن است. این توسعه منبع کارگری، به عنوان کارگر چند مهارته شناخته می‌شود. در جریان کارگاهی ترکیبی واقعی اغلب کارگران چند مهارته را استخدام می‌کنند که می‌توانند به مراحل تولید مختلف اعزام شوند. به منظور دستیابی به یک طرح زمان‌بندی امکان‌پذیر با شرایط عملکرد بهینه، نیاز است که کارگران مهارتهای مختلف را آموزش دیده و مطابق با مهارت‌های خود به ماشین‌های مختلف فرستاده شوند (لی و همکاران[1]، ۲۰۱۶). به علاوه، به دلیل پیچیدگی ماشین‌ها و مهارت‌های متفاوت کارگران، یک کارگر می‌تواند تنها با بخشی از ابزارهای ماشین کار کند. در تولیدات واقعی، کارگران ماهر معمولاً محدود هستند. نحوه تخصیص کارگران محدود به ماشین-آلات بسیار مهم است. در منابع دوگانه محدود[2] به همراه مسئله زمانبندی جریان کارگاهی ترکیبی به تصمیم گیری در خصوص توالی کارها، تخصیص ماشین و تخصیص کارگر به طور مشترک پرداخته می‌شود. بنابراین، ضروری است منابع دوگانه محدود انسان و ماشین با زمانبندی جریان کارگاهی ترکیبی که در آن کارگران مهارت‌های عملکردی و کارایی مختلفی دارند مورد تحقیق واقع شود؛ در نتیجه، زمان پردازش واقعی هر کار نه تنها تحت تاثیر ظرفیت آن مرحله تولید، بلکه همچنین متاثر از کارایی کارگر است. کارگران می‌توانند بر طبق مهارت‌هایشان به مراحل تولید مختلف فرستاده شوند.

در دهه‌های اخیر، زمان‌بندی ماشین با رد[3] که به عبارتی پذیرش سفارش و زمان‌بندی[4] نیز نامیده می‌شود، توسط پژوهشگران بسیاری در حوزه زمان‌بندی تولید مورد توجه قرار گرفته است. مسئله زمان‌بندی ماشین با رد در محیط‌های تولید مختلف و/یا سیستم‌های خدمات که در آن‌ها تولید محدود و/یا ظرفیت خدمات و نیازمندی‌های تحویل سفارش وجود دارد، پذیرش تمام کارها ممکن است در تکمیل برخی کارها تاخیر ایجاد کرده و منجر به هزینه دیرکرد کارها شود. به منظور کاهش هزینه دیرکرد، برخی کارها را می‌توان رد کرد و برای جبران آن هزینه رد را پرداخت (کوردون و هوستین[5]، ۲۰۱۹؛ وانگ و یه[6]،

1. Lei et al.
2. Dual Resource Constrained (DRC)
3. Machine Scheduling with Rejection (MSR)
4. Order Acceptance and Scheduling (OAS)
5. Cordone & Hosteins
6. Wang & Ye

www.SID.ir

Archive of SID

۲۰۱۹, شیائو و همکاران[1]، ۲۰۱۵؛ سیلوا و همکاران [2]، ۲۰۱۸؛ وانگ و همکاران [3]، ۲۰۱۵). مساله زمان‌بندی ماشین با رد نیازمند این است که فرد به طور همزمان معین کند در کنار زمان‌بندی، کدام کار باید برای پردازش پذیرفته شود. بنابراین، در نظر گرفتن رد کارها با مسئله زمانبندی جریان کارگاهی ترکیبی ضروری می‌گردد. این مقاله هزینه رد برای هر کار را مد نظر قرار می‌دهد.

بیشترین مطالعات انجام شده مربوط به کمینه سازی بیشترین زمان تکمیل کارها[4] است که شامل ۶۰٪ از مقالات منتشر شده در ادبیات جریان کارگاهی ترکیبی می‌باشد (رویز و وازکز-رودریگز[5]، ۲۰۱۰). کمینه‌سازی بیشترین زمان تکمیل کارها، که بهره‌برداری از ماشین را افزایش می‌دهد، در نخستین روزهای تولیدکه هزینه‌ها می‌بایست کمینه شده و تولید در گلوگاه است معنا می‌یابد (فرامینان و همکاران[6]، ۲۰۱۴). در حال حاضر، اهداف مرتبط با سررسید بسیار مهمتر بوده و توجه کمتری شده است (پن و همکاران[7]، ۲۰۱۷؛ یو و همکاران[8]، ۲۰۱۸). از سوی دیگر، اتمام کار پس از مهلت سررسید می‌تواند منجر به از دست دادن مشتری شود. بنابراین، ما جریمه دیرکرد را برای هر واحد انحراف از زمان سررسید در نظر می‌گیریم.

تا جایی که می‌دانیم، هیچ پژوهش منتشر شده‌ای بر روی مساله زمانبندی جریان کارگاهی ترکیبی با منابع دوگانه محدود انسان و ماشین با در نظر گرفتن رد کارها متمرکز نشده است. بنابراین، مساله زمانبندی جریان کارگاهی ترکیبی با منابع دوگانه محدود انسان و ماشین با در نظر گرفتن رد کارها با هدف حداقل سازی هزینه کل (مجموع کل هزینه‌های رد کارها و هزینه‌های دیرکرد کارها) مسئله‌ای تازه است و تحقیق بر روی این موضوع اهمیت می‌یابد. این موضوع در تولیدات دنیای واقعی عموماً دیده می‌شود و کاربرد و عملیاتی بودن گسترده در بسیاری مسائل صنعتی دارد.

---

1. Xiao et al.
2. Silva et al.
3. Wang et al.
4. Makespan
5. Ruiz & Vazquez-Rodriguez
6. Framinan et al.
7. Pan et al.
8. Yu et al.

www.SID.ir

Archive of SID

سیستم تولید کاشی را می‌توان جریان کارگاهی ترکیبی نامید. در یک خط چیدمان کاشی دیواری دوبار پخت واقعی که هر دوی موضوع رد کارها و منابع دوگانه محدود انسان و ماشین را پوشش می‌دهد، شش مرحله تولید وجود دارد که شامل پرس (A)، کوره (B)، خط لعاب (C)، کوره (D)، پروسه مسطح‌سازی (E)، چینش و بسته‌بندی (F) و یک بافر میانی (۱) است. هر مرحله تولید ماشین‌های موازی مربوط به خود را دارد (۸ پرس، ۴ کوره، ۱۰ خط لعاب، ۴ کوره، ۸ ماشین مسطح‌ساز، ۱ ماشین چینش و بسته‌بندی). شش کارگر (W1، W2، W3، W4، W5 و W6) و ۶ مهارت اجرایی (مهارت پرس (K1)، مهارت کوره (K2)، مهارت خط لعاب (K3)، مهارت کوره (K4)، مهارت پروسه مسطح-سازی (K5)، مهارت چینش و بسته‌بندی (K6)) وجود دارد. هر ماشین در مرحله تولید A برای کار کردن نیازمند K1 ؛ B نیازمند K2 ؛ C نیازمند K3 ؛ D نیازمند K4 ؛ E نیازمند K5 ؛ F نیازمند K6 است.W1 در هر دوی K1 و K2 ؛ W2 در هر دوی K2 و K3؛ W3 در هر دوی K3 و K4 ؛ W4 در هر دوی K4 و K5 ؛ W5 در هر دوی K5 و K6؛ و W6 در مجموعه K1، K2، K3، K4، K5 و K6 مهارت دارند.

۱۷ کار به طور متوالی در پرس، کوره، خط لعاب، کوره، مسطح‌سازی، چینش و بسته‌بندی پردازش می‌شوند. هر کار می‌تواند با هر ماشینی در هر مرحله تولید پردازش شود. کارها شامل شمار بزرگی از کاشی‌های یک اندازه در پالت‌های متعدد هستند که باید تولید شوند.

در هنگام روبرو شدن با مثال‌های عملی دنیای واقعی ذکر شده در بالا، مدیران تولید باید شرایط زیر را به طور مشترک مد نظر قرار دهند:

(a) کدام کار باید از منظر هزینه فرصت‌ها و هزینه مدیریت رد شود؟ ؛ (b) زمان‌بندی کارهای پذیرفته شده؛ (c) تخصیص ماشین و (d) تخصیص کارگر، به طوری که هزینه خالص کل (مجموع کل هزینه‌های رد کارها و هزینه‌های دیرکرد کارها) کمینه گردد.

تا جایی که می‌دانیم، در پژوهش‌های مرتبط با زمان‌بندی تولید، به مطالعه این موضوع پرداخته نشده است.

در این مقاله، ما مدل توسعه یافته از مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی ترکیبی با منابع دوگانه انسان و ماشین و در نظرگرفتن رد کارها ارائه داده‌ایم، که به طور همزمان رد کار، منبع ماشین و منبع کارگر را مد نظر قرار می‌دهد. بنابراین، مدل پیشنهادی می‌تواند هزینه-های تولید را کاهش داده و به طور کامل از کارگران استفاده کند. مطالعه گوپتا[1] (۱۹۸۸)

1. Gupta

www.SID.ir

Archive of SID

ثابت کرده که مسئله نسبتاً ساده زمانبندی جریان کارگاهی ترکیبی حتی اگر تنها دو مرحله تولید داشته باشد (g=2) و یکی از مراحل شامل تنها یک ماشین باشد، یک مساله NP-hard است. بنابراین، مسئله پیچیده تر زمان‌بندی جریان کارگاهی ترکیبی با منابع دوگانه انسان و ماشین و با در نظر گرفتن رد کارها و هدف حداقل‌سازی هزینه خالص کل (مجموع کل هزینه‌های رد کارها و هزینه‌های دیرکرد کارها) همچنان NP-hard است. در هنگام روبرو شدن با بهینه سازی این نوع مسائل پیچیده، استفاده از روش‌های دقیق جهت بهینه سازی در زمان محاسباتی منطقی، بسیار دشوار است. بنابراین، برای حل مسائل بزرگ، ما نسخه بهبود یافته از یک الگوریتم موثر فراابتکاری به نام الگوریتم بهینه‌سازی پرنده استوایی دریایی[1] طراحی کرده‌ایم. ما از ساختارهای همسایگی ترکیبی، استراتژی‌های پذیرفته شده برای جستجوی بهتر فضای جواب، گریز از بهینه محلی جهت به دست آوردن جواب‌های بهتر استفاده می‌کنیم. به علاوه، از روش تاگوچی (مونتگومری[2]، ۲۰۰۵) برای تنظیم پارامترهای الگوریتم پیشنهادی استفاده می‌کنیم. الگوریتم‌های فراابتکاری به شدت وابسته به روش‌های رمزگشایی هستند (مِنگ و همکاران[3]، ۲۰۱۹). بنابراین، با نظر به هدف حداقل‌سازی هزینه خالص کل (مجموع کل هزینه‌های رد کارها و هزینه‌های دیرکرد کارها) ، ما یک روش رمزگشایی را طراحی می‌کنیم. در پایان، جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی و مقایسه آن با الگوریتم‌های مطرح در ادبیات تحقیق، مطالعات محاسباتی با در نظر گرفتن مثال‌های تولید شده انجام خواهد شد.

بخش‌های مختلف مقاله در ادامه به شرح زیر است. در بخش دوم به پیشینه پژوهش پرداخته می‌شود. در بخش سوم مساله تحقیق با شرح جزئیات مطرح و فرمولاسیون برنامه-ریزی خطی عدد صحیح ترکیبی بیان می‌شود. در بخش چهارم نسخه بهبود یافته از یک الگوریتم موثر فراابتکاری به نام الگوریتم بهینه‌سازی پرنده استوایی دریایی برای حل مساله پیشنهادی مورد مطالعه قرار خواهد گرفت و یک روش رمزگشایی طراحی شده است. در بخش پنجم نتایج و مقایسات محاسباتی الگوریتم‌ها و یافته‌های پژوهش بیان می‌شود. در بخش آخر نتیجه گیری و پیشنهادهای آتی مطرح خواهد شد.

1. Sooty Tern Optimization Algorithm (STOA)
2. Montgomery
3. Meng et al.

www.SID.ir

Archive of SID

پیشینه پژوهش

این بخش، مرور ادبیات مربوط به مسئله این مقاله را ارائه می‌دهد. ما این بخش را به دو زیربخش تقسیم می‌کنیم، که بخش اول مطالعات مرتبط با زمان‌بندی ماشین با رد کارها را توصیف می‌کند و بخش دوم مطالعات مرتبط با منابع دوگانه محدود را مطرح می‌سازد.

کارهای مرتبط با زمان‌بندی ماشین با رد کارها

مقالات متعددی در حیطه زمانبندی به زمانبندی ماشین همراه با مساله رد اختصاص داده شده است. پیشینه انجام شده در قسمت زیر تنها مطالعات مربوط به مساله زمانبندی ماشین همراه با مساله رد با معیارهای موعد تحویل-محور، و مطالعات مربوط به زمانبندی ماشین همراه با مساله رد با محیط جریان کارگاهی را در بر می‌گیرد. برای نخستین بار، بارتال و همکاران[1] (۲۰۰۰) به عنوان پیشگامان ایده امکان رد، مساله زمانبندی با ردکار را مطرح کردند. از آن پس، مساله زمانبندی همراه با رد، بیشتر مورد توجه قرار گرفت.

در مسائل مربوط به زمانبندی تک ماشینه با رد کارها می‌توان به پژوهش انگوئین و همکاران[2] (۲۰۱۴الف، ب)، گرامی پور و همکاران[3](۲۰۱۷) و سیلوا و همکاران[4](۲۰۱۸) اشاره کرد، که ماکسیمم سازی کل درآمدها منهای کل هزینه دیرکرد کارها را مورد مطالعه قرار دادند به طوری که امامی و همکاران[5](۲۰۱۶) و وانگ و یه[6] (۲۰۱۹) به مطالعه مساله زمانبندی ماشین‌های موازی غیر مشابه با رد کارها پرداختند. یاوری و همکاران [7] (۲۰۱۹) یک مساله مونتاژ دو ایستگاهه با رد کارها و هدف بیشینه کردن مجموع درآمدها منهای دیرکرد وزن کل با استفاده از دو الگوریتم فراابتکاری ژنتیک نیمه جایگشتی[8] و غیر نیمه جایگشتی[9] حل کردند. سونین و همکاران[10] (۲۰۱۵)، ژو و همکاران[11] (۲۰۱۵) و ژی و

1. Bartal et al.
2. Nguyen et al.
3. Geramipour et al.
4. Silva et al.
5. Emami et al.
6. Wang & Ye
7. Yavari et al.
8. Semi-permutation GA (SPGA)
9. Non-semi permutation GA (N-SPGA)
10. Thevenin et al.
11. Xu et al.

www.SID.ir

Archive of SID

وانگ[1](۲۰۱۶) مساله زمانبندی تک ماشینه با رد کارها و در نظر گرفتن هزینه‌های دیرکرد و رد کارها و هزینه و زمان راه اندازی کارها مطرح نمودند. در مطالعات مربوط به سیمون و همکاران[2](۲۰۱۶) و سونین و زوفری[3](۲۰۱۹) مساله زمانبندی تک ماشینه با رد کارها و هدف کمینه سازی مجموع هزینه‌های راه اندازی، جریمه زود کرد دیرکرد و جریمه رد کارها توسعه داده شد.

شابتی وکاسپر[4] (۲۰۱۲) مسئله زمانبندی جریان کارگاهی دو ماشینه با در نظر گرفتن رد کارها و تابع هدف کمینه‌سازی زمان تکمیل کارها و جریمه رد کارها را مطالعه و ثابت کردند که آن مساله NP-hard است. به طوری که دبیری و همکاران[5] (۲۰۱۹) به توسعه یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح ترکیبی برای مساله زمانبندی جریان کارگاهی چند ماشینه با موضوع رد کارها با هدف کمینه سازی مجموع زمان تکمیل و هزینه رد کارها پرداختند. عسگری و زندیه[6] (۲۰۱۴)، ژیااو و همکاران[7] (۲۰۱۵)، لین و ییینگ[8] (۲۰۱۵) و وانگ و همکاران[9](۲۰۱۷) مساله زمانبندی جریان کارگاهی با رد کارها و هدف ماکسیمم‌سازی سود با توجه به هزینه دیرکرد و رد کارها تحت مطالعه قرار دادند. لی و گو[10](۲۰۱۵) یک جستجوی همسایگی موازی[11] را به منظور حل مساله زمانبندی جریان کارگاهی با رد کارها و با اهداف کمینه سازی بیشترین زمان تکمیل تمام سفارشات به عنوان هدف اول و بیشینه سازی سود حاصل از جریمه دیرکرد وزنی کارهای پذیرفته شده و هزینه رد کارهای رد شده به عنوان هدف دوم به کار گرفتند. اسماعیل بیگی و همکاران[12](۲۰۱۶)، دو مدل برنامه ریزی ترکیبی عدد صحیح خطی در مساله زمانبندی جریان کارگاهی دو ماشینه با رد کارها و هدف ماکسیمم سازی سود با توجه به هزینه دیرکرد و رد کارها توسعه دادند. نتیجه گیری می‌شود که تحقیقات مورد بررسی در این

1. Xie & Wang
2. Thevenin et al.
3. Simon & Zufferey
4. Shabtay & Gasper
5. Dabiri et al.
6. Asgari & Zandieh
7. Xiao et al.
8. Lin & Ying
9. Wang et al.
10. Lei & Guo
11. Parallel Neighborhood Search (PNS)
12. Esmaeilbeigi etal.

www.SID.ir

Archive of SID

بخش موضوع رد کار را در زمانبندی محیط‌های تولید مختلف نمایش داده است به طوری که موضوع رد کار در زمانبندی محیط جریان کارگاهی ترکیبی یک موضوع جدیدی به شمار می‌آید.

کارهای مرتبط با منابع دوگانه محدود انسان و ماشین

جن و پاتریک[1] (۲۰۰۹) و اودو و ابیفانگ[2] (۱۹۹۹) تاکید کرده‌اند که فاکتورهای انسانی را نمی‌توان نادیده گرفت چرا که باعث افزایش کارایی تولید می‌شوند. پژوهش مربوط به تاریخ سررسید توسط تعدادی از پژوهشگران بیان شده است. مهرآوران و لوگندران[3] (۲۰۱۳) یک مدل ریاضیاتی عدد صحیح مختلط خطی و سه الگوریتم فراابتکاری پیشنهاد داده‌اند تا ضوابط دوگانه جریان کارگاهی غیر جایگشتی را با منابع دوگانه و زمان راه اندازی وابسته به توالی برای به حداقل رساندن جمع زمان اتمام وزنی و جمع دیرکرد وزنی حل کند. شهواری و لوگندران[4] (۲۰۱۷) یک مسئله پردازش دسته‌ای دو هدفه را با منابع دوگانه و ماشین‌های موازی غیرمرتبط برای به حداقل رسانی هزینه کل دیرکرد و زودکرد کارها به موازات هزینه کل پردازش دسته‌ای به علاوه بیشترین زمان تکمیل کارها مطالعه کرده‌اند. پیندا و همکاران[5] (۲۰۱۹) الگوریتم حریصانه مکرر سازنده‌ای را برای حل یک مسئله کار-کارگاهی منعطف با منابع دوگانه محدود[6] با هدفی که همزمان ضوابط زمان کل و زمان سررسید را در نظر می‌گیرد توسعه داده اند.

برخی پژوهشگران منابع دوگانه محدود را در مسئله زمان‌بندی کار-کارگاهی منعطف در نظر گرفته‌اند. یزدانی و همکاران (۱۳۹۳) مسئله زمان‌بندی کار-کارگاهی منعطف با منابع دوگانه محدود انسان و ماشین در نظر گرفته‌اند. آن‌ها الگوریتم ترکیبی توسعه داده شده از الگوریتم‌های جستجوی همسایگی متغیر و شبیه سازی تبرید برای کمینه سازی بیشترین زمان تکمیل پیشنهاد داده‌اند. لی و گو[7] (۲۰۱۴)، گائو و پن[8] (۲۰۱۶)، ژنگ و

1. Jan & Patrick
2. Udo & Ebiefung
3. Mehravaran & Logendran
4. Shahvari & Logendran
5. Pineda et al.
6. Dual-Resource Constrained Flexible Job-Shop Problem (DRCFJSP)
7. Lei & Guo
8. Gao & Pan

www.SID.ir

Archive of SID

وانگ[1] (۲۰۱۶) و ژانگ و همکاران[2] (۲۰۱۷) مسئله زمان‌بندی کار-کارگاهی منعطف با منابع دوگانه محدود به منظور کمینه سازی بیشترین زمان تکمیل مطالعه نمودند. منگ و همکاران[3] (۲۰۱۹) دو مدل برنامه ریزی خطی ترکیبی عدد صحیح[4] بر پایه‌ی ایده‌های مدل-سازی متفاوت و یک جستجوی محلی متغیر موثر را برای حل یک مسئله زمان‌بندی کار-کارگاهی منعطف با منابع دوگانه- انرژی برای کاهش انرژی مصرفی کل ارائه دادند. یزدانی و همکاران[5] (۲۰۱۹) الگوریتم ژنتیک مرتب سازی نامغلوب[6] و الگوریتم ژنتیک رتبه بندی نامغلوب[7] را ارائه دادند و یک مسئله زمان‌بندی کار-کارگاهی منعطف با منابع دوگانه محدود چند هدفه[8] با اهداف به حداقل رسانی بیشترین زمان تکمیل، حجم کاری ماشین بحرانی و حجم کار کل ماشین‌ها به طور همزمان مطرح کردند. گونگ و همکاران[9] (۲۰۱۸) یک الگوریتم ممتیک[10] را برای حل مسئله زمان‌بندی کار-کارگاهی منعطف با منابع دوگانه محدود چند هدفه برای حداقل سازی حداکثر زمان اتمام، حداکثر حجم کار ماشین‌ها و حجم کار کلی تمام ماشین‌ها پیشنهاد دادند.

پژوهش‌هایی برای محیط جریان کارگاهی توسط شماری از پژوهشگران مورد بحث قرار گرفته است. فیگیلسکا[11] (۲۰۱۴)، والدهر و ناست[12] (۲۰۱۷) و فیگیلسکا[13] (۲۰۱۸) مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی با منابع دوگانه به منظور کمینه سازی بیشترین زمان تکمیل مورد مطالعه قرار دادند.

تا جایی که می‌دانیم، تنها یک پژوهش موجود است که بر روی مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی ترکیبی با منابع دوگانه محدود تمرکز کرده است (گونگ و همکاران[14]،

1. Zheng & Wang
2. Zhang et al.
3. Meng et al.
4. Mixed-integer linear programming (MILP)
5. Yazdani et al.
6. Non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA)
7. Non-dominated ranking genetic algorithm (NRGA)
8. Multi-objective dual-resource constrained flexible job-shop scheduling problem (MODRCFJSP)
9. Gong et al.
10. Memetic algorithm (MA)
11. Figielska
12. Waldherr & Knust
13. Figielska
14. Gong et al.

www.SID.ir

Archive of SID

۲۰۱۹). پژوهش موجود عمدتاً بر روی انعطاف ماشین‌ها و کارگرها در کنار زمان پردازش تمرکز کرده و عوامل وابسته به انرژی مصرفی و هزینه کارگر به طور همزمان مورد نظر قرارگرفته‌شده‌اند. آن‌ها در نظر گرفته‌اند که هر کارگر تنها یک مهارت اجرایی واحد دارد. جریان کارگاهی ترکیبی واقعی اغلب کارگران ماهری را به کار می‌گیرد که می‌توانند بین مراحل تولید مختلف جابه جا شوند. نتیجه گیری می‌شود که موضوع محدودیت منابع انسانی چند مهارته با فرض جابه جایی بین مراحل تولید در محیط زمانبندی جریان کارگاهی ترکیبی یک موضوع جدیدی به شمار می‌آید. در حالی که هیچ کار پیشینی مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی ترکیبی منعطف با منابع دوگانه محدود را با ضوابط زمان سررسید بررسی نکرده و کارگران مهارت‌های اجرایی و کارایی‌های متفاوتی دارند که می‌توانند در مراحل مختلف جابه جا شوند.

جدول ۱. خلاصه پیشینه پژوهش

محقق / سال تحقیق	محیط تولید	موضوع ردکارها	منبع انسانی	کارگران چند مهارته (امکان جابه جایی بین مراحل تولید)	هدف
انگوئین و همکاران (۲۰۱٤الف، ب)، گرامی پور و همکاران (۲۰۱۷) و سیلوا و همکاران (۲۰۱۸)	تک ماشینه	✓	×	×	– هزینه دیرکرد – هزینه رد کار
امامی و همکاران (۲۰۱٦) و وانگ و یه (۲۰۱۹)	ماشین‌های موازی	✓	×	×	– هزینه دیرکرد – هزینه رد کار
یاوری و همکاران	جریان کارگاهی	✓	×	×	– هزینه دیرکرد – هزینه رد کار
سونین و همکاران (۲۰۱۵)، ژو و همکاران (۲۰۱۵) و ژی و وانگ (۲۰۱٦)	تک ماشینه	✓	×	×	– هزینه دیرکرد – هزینه رد کار – هزینه راه اندازی
سیمون و همکاران	تک ماشینه	✓	×	×	– هزینه دیرکرد

www.SID.ir

Archive of SID

(۲۰۱۶) و سونین و زوفری (۲۰۱۹)					– هزینه رد کار – هزینه دیرکرد و زودکرد
شابتی وکاسپر (۲۰۱۲)	جریان کارگاهی	✓	×	×	– هزینه دیرکرد – بیشترین زمان تکمیل کارها – هزینه رد کار
دبیری و همکاران (۲۰۱۹)	جریان کارگاهی	✓	×	×	– بیشترین زمان تکمیل کارها – هزینه رد کار
عسگری و زندیه (۲۰۱٤)، ژیااو و همکاران (۲۰۱۵)، لین و ییِنگ (۲۰۱۵) و وانگ و همکاران (۲۰۱۷)	جریان کارگاهی	✓	×	×	– هزینه دیرکرد – هزینه رد کار
لی و گو(۲۰۱۵)	جریان کارگاهی	✓	×	×	– هزینه دیرکرد – بیشترین زمان تکمیل کارها – هزینه رد کار
اسماعیل بیگی و همکاران (۲۰۱٦)	جریان کارگاهی	✓	×	×	– هزینه دیرکرد – هزینه رد کار
مهرآوران و لوگندران (۲۰۱۳)	جریان کارگاهی	×	✓	×	– مجموع زمان اتمام وزنی – هزینه دیرکرد – هزینه رد کار
شهواری و لوگندران (۲۰۱۷)	ماشین‌های موازی	×	✓	×	– هزینه دیرکرد و زودکرد – بیشترین زمان تکمیل کارها
پیندا و همکاران (۲۰۱۹)	کار کارگاهی منعطف	×	✓	×	– هزینه دیرکرد – بیشترین زمان تکمیل کارها
یزدانی و همکاران (۱۳۹۳)	کار کارگاهی منعطف	×	✓	×	– بیشترین زمان تکمیل کارها

www.SID.ir

Archive of SID

لی و گو (۲۰۱٤)، گائو و پن (۲۰۱٦)، ژانگ و وانگ (۲۰۱٦) و ژانگ و همکاران (۲۰۱۷)	کار کارگاهی منعطف	×	✓	×	– بیشترین زمان تکمیل کارها
ژانگ و همکاران (۲۰۱۹)	کار کارگاهی منعطف	×	✓	×	– انرژی مصرفی
یزدانی و همکاران (۲۰۱۹)	کار کارگاهی منعطف	×	✓	×	– بیشترین زمان تکمیل کارها – انرژی مصرفی
گونگ و همکاران (۲۰۱۸)	کار کارگاهی منعطف	×	✓	×	– بیشترین زمان تکمیل کارها – انرژی مصرفی
فیگیلسکا (۲۰۱٤)، والدهر و ناست (۲۰۱۷) و فیگیلسکا (۲۰۱۸)	کار کارگاهی منعطف	×	✓	×	– بیشترین زمان تکمیل کارها
گونگ و همکاران (۲۰۱۹)	جریان کارگاهی ترکیبی	×	✓	×	– بیشترین زمان تکمیل کارها – انرژی مصرفی – هزینه کارگر
تحقیق حال حاضر	جریان کارگاهی ترکیبی	✓	✓	✓	– هزینه دیرکرد – هزینه رد کار

جدول ۱، جدول مقایسه‌ای مهمترین تحقیقات موجود در زمینه مساله مورد توجه در این تحقیق را به تفکیک مشخصه‌های حائز اهمیت مساله، نشان می‌دهد. از مطالب بالا روشن است که در پژوهش‌های اخیر به موضوع مساله زمانبندی جریان کارگاهی ترکیبی با منابع دوگانه محدود انسان و ماشین و در نظر گرفتن رد کارها پرداخته نشده است و تحقیق بر روی این موضوع اهمیت می‌یابد.

www.SID.ir

Archive of SID

روش شناسی پژوهش

شرح مساله

در مساله زمانبندی جریان کارگاهی ترکیبی با منابع دوگانه محدود انسان و ماشین با در نظر گرفتن رد کارها، تعداد m مرحله تولید به صورت سری وجود دارد که $m > 1$ است. یک مجموعه از n کار باید به طور متوالی در این مراحل تولید پردازش شده و جریان تولید یکسانی را دنبال کنند: مرحله ۱، مرحله ۲،...، مرحله m. اگر کل مجموعه کارها با N مشخص شود، S مجموعه کارهای رد نشده که پردازش خواهند شد و R مجموعه کارهای رد شده را ($N = S \cup R$) نشان می‌دهد. تعداد $|m_i| \geq 1$ ماشین موازی مشابه در هر مرحله تولید $i \in M$ وجود دارد، و هر ماشین می‌تواند توسط تعداد p $(p > 1)$ کارگر اجرا شود. کارگران مهارت‌های اجرایی و کارایی‌های مختلفی دارند؛ بنابراین، زمان پردازش هر کار تنها تحت تاثیر ظرفیت مرحله تولید نیست، بلکه همچنین از کارایی کارگر نیز تاثیر می‌گیرد. کارگران می‌توانند بر طبق مهارت‌هایشان در بین مراحل مختلف تولید جابه‌جا شوند. از آن‌جایی که ماشین‌های موازی در یک مرحله تولید، یکسان هستند، یک کار می‌تواند توسط هر ماشین $l \in m_i$ در مرحله تولید i پردازش شود. در یک زمان واحد یک ماشین می‌تواند تنها یک کار را پردازش کند، یک کار می‌تواند تنها توسط یک ماشین پردازش شود، هر کارگر می‌تواند تنها یک ماشین را اجرایی کند و یک ماشین می‌تواند تنها توسط یک کارگر اجرایی شود. تمام ماشین‌ها، کارگران و کارها در زمان صفر حاضر هستند و بریدگی کار مجاز نیست. ظرفیت بافرهای میانی بین مراحل تولید نامحدود است. زمان سفر بین مراحل تولید، زمان راه اندازی و زمان‌های قدم زدن کارگران بین مراحل تولید و بین ماشین‌های موازی در نظر گرفته نشده است.

مدل سازی ریاضی

نادری و همکاران[1] (۲۰۱۴) یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح ترکیبی را برای مساله زمانبندی جریان کارگاهی ترکیبی پیشنهاد دادند. در این پژوهش با هدف کمینه سازی بیشترین زمان تکمیل کارها، تمامی کارها مورد پذیرش و پردازش قرار گرفته و تنها منبع در نظر گرفته شده به عنوان محدودیت، ماشین آلات بود. اما در پژوهش حاضر، نیازمندی‌های تحویل سفارش، موضوع رد کارها، محدودیت منبع انسانی با جابه جایی بین مراحل

1. Naderi et al.

www.SID.ir

Archive of SID

تولید با هدف مرتبط با سررسید تحویل کارها در نظر گرفته شده است و تصمیم‌گیری بر این است که کدام کار نباید رد شود، کدام ماشین باید برای پردازش آن کارهای رد نشده تخصیص یابد و کدام کارگران باید برای پردازش آن کارهای رد نشده تخصیص یابند. به عبارتی توالی کارها رد نشده در هر ماشین و همچنین توالی آن کارها در هر کارگر نیز باید تصمیم گیری شود، به گونه‌ای که هزینه خالص کل کمینه گردد. فرض می‌شود داده‌های مسئله قطعی و از پیش تعیین شده است.

مجموعه‌ها	
M	مجموعه ایستگاه‌ها $\{1, \dots, m\}$
N	مجموعه کارها $\{1, \dots, n\}$
m_i	مجموعه ماشین‌ها در ایستگاه i، $i \in M$
P	مجموعه کارگرها $\{1, \dots, p\}$
p_i	مجموعه کارگرهایی که مهارت پردازش کارها در ایستگاه i را دارند، $i \in M$
v_w	مجموعه ایستگاه‌هایی که در دست کنترل کارگر w است، $w \in P$
پارامترها	
p_{jiw}	زمان پردازش کار $j \in N$ در ایستگاه $i \in M$ توسط کارگر $w \in P$
d_j	سررسید کار $j \in N$
fr_j	هزینه رد کار $j \in N$
ft_j	جریمه دیرکرد کار $j \in N$، جریمه برای هر واحد زمان تکمیلی که از d_j تجاوز می‌کند
MM	عدد بزرگ
متغیر تصمیم	
x_{jik}	متغیر باینری که اگر کار j در ایستگاه i بعد از کار k انجام گیرد برابر با ۱، در غیر اینصورت برابر با صفر است
y_{jil}	متغیر باینری که اگر کار j در ایستگاه i بر روی ماشین l انجام گیرد برابر با ۱، در غیر اینصورت برابر با صفر است
c_{ji}	متغیر پیوسته زمان تکمیل کار j در ایستگاه i
T_j	متغیر پیوسته دیرکرد کار j

www.SID.ir

Archive of SID

R_j	متغیر باینری که اگر کار j پذیرفته شود $R_j = 1$، در غیر اینصورت برابر با صفر است
u_{jiw}	متغیر باینری که اگر کار j در ایستگاه i توسط کارگر w انجام گیرد برابر با ۱، در غیر اینصورت برابر با صفر است
z_{jwk}	متغیر باینری که اگر کار j توسط کارگر w بعد از کار k انجام گیرد برابر با ۱، در غیر اینصورت برابر با صفر است

مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط[1] با هدف کمینه سازی هزینه خالص کل (مجموع کل هزینه‌های دیرکرد کارها و هزینه‌های رد کارها):

$$\text{Minimize} = \sum_i ((T_j . ft_j) + ((1 - R_j) . fr_j)) \quad (۱)$$

Subject to

$$\sum_{l \in m_i} y_{jil} = R_j \qquad \forall\, i \in M, j \in N \quad (۲)$$

$$\sum_{w \in p_i} u_{jiw} = R_j \qquad \forall\, i \in M, j \in N \quad (۳)$$

$$c_{ji} \geq c_{j(i-1)} + p_{jiw} . u_{jiw} \qquad \forall\, i \in M, j \in N, w \in p_i \quad (۴)$$

$$c_{ji} \geq c_{ki} + p_{jiw} . u_{jiw} - \text{MM}(3 - x_{jik} - y_{jil} - y_{kil}) \qquad \forall\, j,k \in N : j < k, i \in M, l \in m_i, w \in p_i \quad (۵)$$

$$c_{ki} \geq c_{ji} + p_{kiw} . u_{kiw} - (\text{MM} . x_{jik}) - \text{MM}(2 - y_{jil} - y_{kil}) \qquad \forall\, j,k \in N : j < k, i \in M, l \in m_i, w \in p_i \quad (۶)$$

1. Mixed integer linear programming (MILP)

www.SID.ir

Archive of SID

$$c_{ji} \geq c_{ki} + p_{jiw}.u_{jiw} - \mathrm{MM}(3 - z_{jwk} - u_{jiw} - u_{kiw}) \qquad \forall j,k \in N: j < k, i \in M, w \in p_i \qquad (۷)$$

$$c_{ki} \geq c_{ji} + p_{kiw}.u_{kiw} - (\mathrm{MM}.z_{jwk}) - \mathrm{MM}(2 - u_{jiw} - u_{kiw}) \qquad \forall j,k \in N: j < k, i \in M, w \in p_i \qquad (۸)$$

$$c_{ji} \geq c_{ks} + p_{jiw}.u_{jiw} - MM(2 - u_{jiw} - u_{ksw}) \qquad \forall j,k \in N, i,s \in M: i > s, w \in v_w \qquad (۹)$$

$$T_j \geq c_{jm} - d_j \qquad \forall j \in N \qquad (۱۰)$$

$$x_{jik}, y_{jil}, u_{jiw}, R_j \in \{0,1\} \qquad \forall j,k \in N: j < k, i \in M, w \in P \qquad (۱۱)$$

$$c_{ji}, T_j \geq 0 \qquad \forall i \in M, j \in N$$

تابع هدف (۱) هزینه خالص کل را به حداقل می‌رساند. محدودیت (۲) و (۳) تضمین کننده این است که هر کار رد نشده در طی تمام مراحل تولید عبورمی‌کند و توسط دقیقاً یک ماشین و یک کارگر واجد شرایط در هر مرحله تولید پردازش می‌شود. زمان‌های اتمام هر کار در محدودیت‌های (۴)، (۵)، (۶)، (۷)، (۸) و (۹) مشخص شده‌اند. از یک سو محدودیت (۴) اطمینان می‌دهد که عملیات i ام یک کار پس از اتمام عملیات قبلی آن آغاز به پردازش می‌کند، از سوی دیگر، مشخص می‌کند که کارهای رد شده (نشان داده شده با $R_j = 0$) زمان‌های اتمام صفر خواهند داشت چرا که p_{jiw} هیچ تاثیری بر روی زمان‌های اتمام قبلی نخواهد داشت. محدودیت‌های (۵) و (۶) خاطر نشان می‌کنند که ممکن نیست دو کار را در زمان واحد با ماشین یکسان پردازش کرد، و یک کار نمی‌تواند پیش از زمان اتمام هر کار قبلی در ماشین یکسان پردازش شود. MM عدد بزرگی است. محدودیت‌های (۷) و (۸) خاطر نشان می‌کنند که ممکن نیست دو کار را با کارگر یکسان در عملیات یکسان و در زمان یکسان پردازش کرد و یک کار نمی‌تواند پیش از زمان اتمام هر کار قبلی در عملیات یکسان با کارگر یکسان پردازش شود. مجموعه محدودیت (۹) خاطر نشان می‌کند که ممکن نیست دو کار را در عملیات‌های مختلف با کارگر یکسان در زمان یکسان پردازش کرد و یک کار نمی‌تواند پیش از زمان اتمام هر کار قبلی در عملیاتی متفاوت با کارگر یکسان پردازش گردد. مجموعه محدودیت (۱۰) دیرکرد هر کار را

www.SID.ir

Archive of SID

تضمین می‌کند. اگر یک کار مشخص رد شود، دیرکرد آن کار با نظر به تابع هدف آن برابر با صفر است. در پایان، محدودیت (۱۱) متغیرهای مدل را مشخص می‌کنند.

رویکرد حل مسئله

پیچیدگی زیاد مساله زمانبندی جریان کارگاهی ترکیبی با منابع دوگانه محدود انسان و ماشین با در نظر گرفتن رد کارها دلیلی روشن برای استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری جهت بهینه سازی آن است. چرا که برای ابعاد بزرگ این مسئله، استفاده از روش‌های دقیق جهت بهینه سازی در زمان محاسباتی منطقی، بسیار دشوار است. در این بخش الگوریتم بهینه‌سازی پرنده استوایی دریایی بهبود یافته برای بهینه سازی مساله ارائه شده است. این بخش به چهار زیر بخش تقسیم شده است. در بخش اول پیش زمینه الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی را ارائه می‌کنیم. در زیر بخش دوم جزئیات مربوط به الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی گسسته و روش جستجوی محلی گزارش شده است. در زیر بخش سوم روند الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی بهبود یافته را بیان خواهیم کرد و در زیر بخش چهارم نحوه رمزگذاری و رمزگشایی جوابها را مطرح می‌کنیم.

پیش زمینه الگوریتم بهینه‌سازی پرنده استوایی دریایی

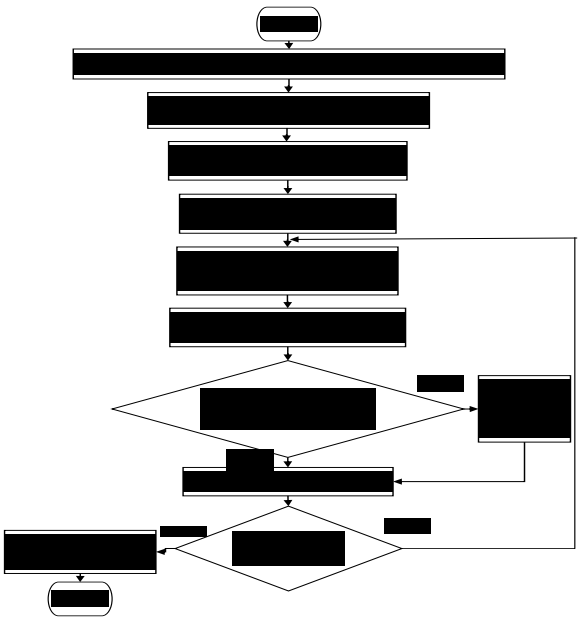
دیمن و کائور[1] (۲۰۱۹) الگوریتم بهینه‌سازی پرنده استوایی دریایی را که از رفتار مهاجرت و حمله یک نوع پرنده در طبیعت با نام پرستو دریایی پشت دودی نشأت گرفته است، ارائه دادند. رفتارهای مهاجرت و حمله پرنده استوایی دریایی، دو موضوع مهم این الگوریتم می‌باشد. یک پرنده استوایی دریایی در هنگام مهاجرت باید شرایط زیر را در نظر بگیرد. از جمله پرهیز از برخورد بین همسایگان (به عنوان مثال، دیگر پرنده استوایی دریایی)، جنبش به سمت بهترین همسایه (به عنوان مثال، مناسب‌ترین پرنده استوایی دریایی) و همگرایی به لایق ترین عامل جستجو. همچنین پرندگان استوایی دریایی در طی مهاجرت با حرکت مارپیچی به طعمه‌های خود حمله می‌کنند. نمودار جریان الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که از این نمودار جریان

1. Dhiman & Kaur

www.SID.ir

Archive of SID

مشخص است، الگوریتم پرنده استوایی دریایی با جمعیت تولید شده تصادفی شروع شده و بعد از این مراحل ابتدایی، وارد فاز اصلی می‌شود.



شکل ۱. نمودار جریان الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی

شایان ذکر است در هر نسل، هر جواب از این جمعیت با به روز کردن موقعیت خود منجر به حرکت می‌شود. در الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی، $\vec{C}_s$ می‌تواند به عنوان بهترین موقعیت $\vec{P}_s$ در نظر گرفته شود که با عامل جستجو دیگر در هنگام جستجو فضای جستجو تداخل نکند. به منظور مدل سازی ریاضی این نوع رفتار، موقعیت هر عامل جستجو، به صورت زیر به روز می‌شود:

$$\vec{C}_s = A \times \vec{P}_s(x) \qquad (۱۲)$$

www.SID.ir

Archive of SID

که x تکرار فعلی، $\vec{P}_s$ موقعیت فعلی عامل جستجو، $\vec{C}_s$ موقعیت عامل جستجو بوده که با عامل جستجو دیگر در هر تکرار تداخل نداشته و A نشان دهنده تابع خطی بوده که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$A = f_c - (x \times (\frac{f_c}{Max_{iteration}})) \quad x = 1,..,Max_{iteration} \qquad (۱۳)$$

که f_c کنترل فرکانس متغیر A می‌باشد. در این الگوریتم $\vec{M}_s$ می‌تواند به عنوان موقعیت عامل جستجو $\vec{P}_s$ به سمت بهترین عامل جستجوی مناسب $\vec{P}_{bc}$ در نظر گرفته شود. این نوع رفتار می‌تواند به صورت زیر ارائه شود:

$$\vec{M}_s = B \times (\vec{P}_{bc}(x) - \vec{P}_s(x)) \qquad (۱۴)$$

که B مسئول تعادل مناسب بین تنوع و تمرکز است. به لحاظ ریاضی، B می‌تواند به صورت زیر تعریف شود:

$$B = 2 \times A^2 \times rd \qquad (۱۵)$$

که rd عدد تصادفی است که در محدوده $[0, 1]$ قرار دارد.

عوامل جستجو می‌توانند موقعیت‌های خود را با توجه به بهترین عامل جستجو در طول فرایند تکرار به روز کنند. $\vec{D}_s$ اشاره به فاصله از عامل جستجو و بهترین عامل جستجو دارد که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\vec{D}_s = |\vec{C}_s + \vec{M}_s| \qquad (۱۶)$$

در معادلات (۱۷)، (۱۸)، (۱۹) و (۲۰)، رفتار مارپیچی شکل هر پرنده استوایی دریایی در x، y و z برای حمله به طعمه را نشان می‌دهد.

$$x' = r \times \cos(k) \qquad (۱۷)$$

$$y' = r \times \sin(k) \qquad (۱۸)$$

$$z' = r \times \mathrm{k} \qquad (۱۹)$$

$$r = u \times e^{kv} \qquad (۲۰)$$

که r شعاع هر چرخش مارپیچی، k یک عدد تصادفی در محدوده $[0\leq k\leq 2\pi]$ می‌باشد، u, v ثابت‌هایی برای تعریف شکل کروی بوده و e مبنای لگاریتم طبیعی است. به روز کردن موقعیت‌های همه عوامل جستجو توسط معادله (۲۱) مطرح می‌شود:

$$\vec{P}_s(x) = (\vec{D}_s \times x' \times y' \times z') + \vec{P}_{bc}(x) \qquad (۲۱)$$

www.SID.ir

Archive of SID

الگوریتم بهینه‌سازی پرنده استوایی دریایی بهبود یافته

جهت بهبود کیفیت الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی، ما از ترکیب الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی گسسته با روش جستجوی محلی، یک الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی بهبود یافته[1] برای حل مساله پیشنهادی ارائه می‌کنیم.

تطبیق الگوریتم بهینه‌سازی پرنده استوایی دریایی بهبود یافته با مساله جریان کارگاهی ترکیبی با منابع دوگانه محدود با در نظر گرفتن رد کارها

جمعیت اولیه

اندازه جمعیت الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی بهبود یافته در هر تکرار ثابت است که به عنوان N_{pop} تعریف می‌شود. برای جمعیت اولیه، $N_{pop}-1$ جواب به طور تصادفی بین (0,1) تولید می‌شود، در حالی که یک جواب دیگر توسط زودترین موعد تحویل[2] ساخته می‌شود. با این استراتژی، می‌توان بر هر دو مشخصه کیفیت و تنوع تمرکز کرد. برای ساخت جواب توسط زودترین موعد تحویل، کارها براساس زودترین زمان تحویلشان اولویت بندی می‌گردند و برای ساخت $N_{pop}-1$ جواب، برای هر کار یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ تولید می‌شود. برای تبدیل جوابهای پیوسته به کار جایگشتی گسسته، از قانون کوچکترین ارزش موقعیت[3] استفاده می‌شود. برای مثال، نمایش جواب یک مساله با ۴ کار در جدول ۲ مشخص شده است. فرض کنید p یک جواب برداری از اعداد پیوسته بدست آمده در تکراری از الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی گسسته و q یک جواب جایگشتی گسسته می‌باشد.

جدول۲. نمایش جواب مساله

	کار			
	۱	۲	۳	٤
p	۰/۳۲	۰/۲۵	۰/٦۸	۰/٤٦
q	۲	۱	٤	۳

1. Improved Sooty Tern Optimization Algorithm (ISTOA)
2. Earliest Due Date (EDD)
3 Smallest Position Value (SPV)

www.SID.ir

Archive of SID

کوچکترین ارزش در p، ۰/۲۵ است که مربوط به کار دوم می‌باشد، بنابراین مطابق قانون کوچکترین ارزش موقعیت، کار دوم در اولین موقعیت q قرار می‌گیرد. دومین کوچکترین ارزش در p، ۰/۳۲ است که مربوط به کار اول می‌باشد، بنابراین کار اول در دومین موقعیت در q قرار می‌گیرد. به همین ترتیب، تمامی کارها در q به صورت جایگشتی جایگذاری می‌شوند. بنابراین توالی کارها $q = (2,1,4,3)$ است. واضح است جوابهایی با اینگونه نمایش جواب، بدون شک یک زمانبندی موجهی را برای مساله جریان کارگاهی ترکیبی با منابع دوگانه محدود انسان و ماشین با در نظر گرفتن رد کارها مشخص می‌کند.

الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی گسسته

الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی به عنوان فرا ابتکاری الهام گرفته از زیست شناسی است که برای حل مسائل پیوسته پیشنهاد شده است. برای بکارگیری الگوریتم بهینه‌سازی پرنده استوایی دریایی برای حل مسائل زمانبندی، بایستی ساختار الگوریتم برای محیط گسسته تنظیم شود، بنابراین ما از قانون کوچکترین ارزش موقعیت جهت تبدیل عوامل جستجو[1] به کار جایگشتی[2] گسسته استفاده می‌کنیم. شایان ذکر است، که هیچ پیشینه‌ای وجود ندارد که الگویتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی گسسته[3] برای حل مسائل مربوط به زمانبندی مورد مطالعه قرار گرفته باشد. شبه کد الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی گسسته در شکل ۲ نشان داده شده است. شایان ذکر است موقعیت هر عوامل جستجو بوسیله معادله (۲۱) بهنگام می‌شوند و $max - iteration$ به عنوان بیشترین تعداد همسایگی جستجو شده برای هر جواب در هر تکرار الگوریتم پیشنهادی در زمان محاسباتی تعیین شده می‌باشد.

1. Search Agents
2. Job Permutation
3. Discrete Sooty Tern Optimization Algorithm (DSTOA)

www.SID.ir

Archive of SID

پروسه الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی گسسته

۱. P_s را به عنوان جمعیتی از عوامل جستجو در نظر بگیرید.
۲. از قانون کوچکترین ارزش موقعیت (SPV) جهت تبدیل عوامل جستجو به کار جایگشتی گسسته استفاده کنید
۳. تابع هدف هرکدام از عوامل جستجو را محاسبه کنید
۴. P_{bc} را به عنوان بهترین جواب مشخص کنید
۵. x را برابر ۱ قرار دهید
۶. **تا زمانی که** $x<Max-iteration$
۷. **برای i** از ۱ تا $|P_s|$
۸. با استفاده از معادله (۲۱)، موقعیت $P_s(i)$ را بروز رسانی کنید
۹. **پایان**
۱۰. پارامترهای A, B را بروز رسانی کنید
۱۱. از قانون کوچکترین ارزش موقعیت (SPV) جهت تبدیل عوامل جستجو به کار جایگشتی گسسته استفاده کنید
۱۲. تابع هدف هرکدام از عوامل جستجو را محاسبه کنید
۱۳. اگر جواب بهتری نسبت به جواب بهینه قبلی کسب شده است، P_{bc} را بروز رسانی کنید
۱۴. $x = x + 1$
۱۵. **پایان**
۱۶. بازگشت P_s

پایان

شکل ۲. پروسه الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی گسسته

روش جستجوی محلی

ما از ترکیب ساده استراتژی تمرکز و تنوع برای ساخت یک روش جستجوی محلی پیشنهادی استفاده می‌کنیم. از ترکیب عملگرهای معکوس[1] و تبادل[2] در استراتژی تنوع استفاده می‌شود به طوری که α یک پارامتر کنترلی محسوب می‌شود. در استراتژی تمرکز، استراتژی ما بر این پایه است که کاری با بیشترین هزینه دیرکرد به عنوان مساله آورترین کار انتخاب شده و با عملگر درج حریصانه[3] دوباره زمانبندی می‌شود. به طور کلی ترکیب

1. Inversion Operator
2. Swap (S)
3. Insertion Greedy (IG)

www.SID.ir

Archive of SID

عملگرهای معکوس و تبادل در استراتژی تنوع و عملگر درج حریصانه در استراتژی تمرکز به عنوان اپراتورهای حرکتی در نظر گرفته می‌شوند. π را یک جواب تعریف کنید. شکل ۳ روش جستجوی محلی را نشان می‌دهد.

پروسه روش جستجوی محلی

۱. π را یک جواب در نظر بگیرید
۲. دو عدد تصادفی ای صحیح در بین دو عدد ۱وn تولید کرده سپس یکی را در s و دیگری را در e قرار دهید، به طوری که $s < e$ باشد
/استراتژی تنوع/
۳. **اگر** α بزرگتر از عدد تصادفی ای در بازه ۰ و۱ باشد، سپس با استفاده از s وe ، $\tilde{\pi}$ را برابر اعمال عملگر تبادل بر روی π قرار دهید
۴. در غیر اینصورت، $\tilde{\pi}$ را برابر اعمال عملگر معکوس در بازه e تا s بر روی π قرار دهید
۵. **پایان**
۶. تابع هدف π و $\tilde{\pi}$ را محاسبه کنید
۷. **اگر** تابع هدف $\tilde{\pi}$ < تابع هدف π
۸. آنگاه $\tilde{\pi}$ را برابر π قرار دهید.
۹. **پایان**
/استراتژی تمرکز/
۱۰. k را برابر صفر قرار دهید
۱۱. **تا زمانی که** $k < |\pi| + 1$
۱۲. کاری با بیشترین هزینه دیرکرد را به عنوان مساله آورترین کار انتخاب کرده و از π خارج کرده و در بهترین موقعیت با کمترین تابع هدف گنجانده و حاصل را در $\tilde{\pi}$ قرار دهید
۱۳. **اگر** تابع هدف $\tilde{\pi}$ < تابع هدف π
۱۴. آنگاه $\tilde{\pi}$ را در π قرار دهید.
۱۵. **پایان**
۱۶. $k = k + 1$
۱۷. **پایان**
۱۸. **پایان**
۱۹. بازگشت π
پایان

شکل ۳. فرآیند روش جستجوی محلی

روند الگوریتم بهینه‌سازی پرنده استوایی دریایی بهبود یافته

پس از توصیف جزئیات الگوریتم بیان شده در بخش‌های قبل، در این بخش روند کامل الگوریتم در شکل ۴ ارائه شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

پروسه الگوریتم بهینه‌سازی پرنده استوایی دریایی بهبود یافته

۱. ورودی: P_s

۲. خروجی: P_{bc}

//مقدار دهی پارامترها//

۳. پارامترهای N_{pop} , $Max-iteration, \alpha, A, B, f_c, u, v$ را مقداردهی کنید

//مقدار دهی جمعیت//

۴. $P_s := \{P_s(1), P_s(2), \dots, P_s(N_{pop})\}$ جواب به طور تصادفی تولید می شود، در حالی که یک جواب دیگر توسط $N_{pop}-1$ زودترین موعد تحویل ساخته می‌شود.

۵. **تا زمانی که** $t<t_{max}$

//فرآیند الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی گسسته//

۶. فرآیند الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی گسسته را برای P_s اجرا کنید

//فرآیند روش جستجوی محلی//

۷. **برای** i از ۱ تا N_{pop}

۸. $\pi =: P_s(i)$

۹. روش جستجوی محلی را برای π اجرا کرده و در $P_s(i)$ قرار دهید

۱۰. **پایان**

۱۱. **پایان**

۱۲. تابع هدف عوامل جستجو در P_s را محاسبه کرده و بهترین را به عنوان P_{bc} در نظر بگیرید

۱۳. بازگشت P_{bc}

پایان

شکل ٤. فرآیند الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی بهبود یافته

نمایش جواب

همانطور که در قسمت‌های قبل بیان شد هدف از مساله زمانبندی جریان کارگاهی ترکیبی با منابع دوگانه محدود انسان و ماشین و در نظر گرفتن رد کارها، تصمیم گیری روی مجموعه کارهای پذیرفته شده و توالی آنها بر روی ماشین‌ها و کارگران است. بنابراین در روش رمزگذاری و رمزگشایی جواب در مساله بیان شده، می‌بایست هر سه تصمیم مزبور لحاظ شود. لذا ما در این مقاله یک نمایش جواب طراحی می‌کنیم. در ابتدا جواب براساس جایگشتی[1] مطابق $\pi = \{\pi(1), \pi(2), \dots, \pi(n)\}$ نمایش داده شده و در هر تکرار g، ساعت زمانبندی T_g را داریم. هر کار j یک اولویتی دارد که از عبارت

1. Permutation

www.SID.ir

Archive of SID

$pv_j := \{\hat{\jmath} : \pi(\hat{\jmath}) = j\}$بدست می‌آید. fs_j، اولین ایستگاهی که کار j باید فرآیند بشود را نشان می‌دهد. لیست LAJ، مجموعه کارهای در دسترس در زمان T_g می‌باشد. AM_{il}^g، زمان اتمام فرآیند روی ماشین M_{il} در تکرار g ام را نشان می‌دهد. AP_w^g، زمان اتمام فرآیند به وسیله کارگر P_w در تکرار g ام را نشان می‌دهد. شبه کد روش رمزگشایی در شکل ۵ نشان داده شده است. قدم‌های اصلی روش رمزگشایی بیان شده به شرح زیر خلاصه می‌شود: در زمان زمانبندی T_g، تمامی کارهای در دسترس که باید فرآیند بشوند را مشخص نمایید ($LAJ := \{j | C_j^g \leq T_g\}$). انتخاب کارها جهت فرآیند شدن را مطابق اولویتهایشان در نظر بگیرید .($j^* = Arg(min_{j \in LAJ}(pv_j))$). تمامی ماشین‌ها و کارگرها برای کارهای در دسترس مطابق با کمترین بار کاری در مرحله تولید تنظیم نمایید $((l^*, w^*) = Arg(min_{l \in m_{fs_{j^*}}, w \in p_{fs_{j^*}}} (\max(AM_{(fs_{j^*},l)}^g, AP_w^g) + p_{(j^*,fs_{j^*},w)})))$ به طوری که آن عبارت تضمین می‌کند که در یک زمان واحد یک کار می‌تواند تنها توسط یک ماشین پردازش شود و یک ماشین می‌تواند تنها توسط یک کارگر اجرایی شود.کارها باید بر روی m مرحله تولید $(LS_j := \{M | j \in \pi\})$ و $fs_{j^*} := \min\{LS_{j^*}\}$ زمانبندی شود. هنگامی که $M_{(fs_{j^*},l^*)}$ و P_{w^*} کار j^* را جهت فرآیند شدن در بر می‌گیرد، زمان تکمیل کار j^* در تکرار g ام مطابق $C_{j^*}^{g+1} := AM_{(fs_{j^*},l^*)}^{g+1}$، زمان تکمیل عملیات بر روی M_{il} مطابق $AM_{(fs_{j^*},l^*)}^{g+1} := \max(AM_{(fs_{j^*},l^*)}^g, AP_{w^*}^g, T_g) + p_{(j^*,fs_{j^*},w^*)}$ و زمان تکمیل عملیات به وسیله کارگر w^* مطابق $AP_{w^*}^{g+1} := C_{j^*}^{g+1}$ را ثبت نمایید به طوری که آن عبارت تضمین می‌کند که در یک زمان واحد یک ماشین می‌تواند تنها یک کار را پردازش کند و هر کارگر می‌تواند تنها یک ماشین را اجرایی کند، همانطور که $LS_{j^*} := LS_{j^*} - \{fs_{j^*}\}$ می‌باشد. اگر کاری مرحله تولید اول را شرع نکرده باشد، سپس T_g مطابق با $min_{l \in m_1}\left(AM_{1l}^{g+1}\right)$ و در سایر موارد مطابق با $min_{j \in \hat{\pi}}\left(C_j^{g+1}\right)$ بروز رسانی $T_g := min_{j \in \hat{\pi}}\left(C_j^{g+1}\right)$ می‌شود. مطابق شکل ۶ تصمیم گیری به رد کارها مطابق رابطه $\acute{\pi} = \{j^* | \, reject\ cost(job\ j^*) < tardiness\ cost\ job\ j^*\}$ صورت می‌پذیرد به طوری که آن عبارت تضمین کننده رد کارها می‌باشد و پس از خارج کردن آن کارها از سیستم، زمان بندی مجدد برای کارهای باقی مانده صورت می‌گیرد.

www.SID.ir

Archive of SID

پروسه

ورودی: جواب π

خروجی: هزینه خالص کل

۱. قرار دهید $g \coloneqq 1$، $T_g \coloneqq 0$؛ $iter \coloneqq 1$؛ برای هر $j \in \pi$، $pv_j \coloneqq \{\hat{j} : \pi(\hat{j}) = j\}$؛ $LS_j \coloneqq \{M | j \in \pi\}$؛ $C_j^g \coloneqq \{0 | j \in$
$\acute{\pi} \coloneqq \emptyset$؛ $\hat{\pi} \coloneqq \pi$؛ $LAJ \coloneqq \emptyset$؛ $AM_{il}^g \coloneqq \{0 | i \in P, l \in m_i\}$؛ $AP_w^g \coloneqq \{0 | w \in P\}$؛ π؛

۲. **تا زمانی که** $iter = 1$

۳. **برای هر** کار $j \epsilon \hat{\pi}$، $fs_j \coloneqq \min\{LS_j\}$

۴. **برای هر** کار $j \epsilon \hat{\pi}$، $LAJ \coloneqq \{j | C_j^g \leq T_g\}$

۵. $j^* = Arg(min_{j \in LAJ}(pv_j))$؛

۶. $(l^*, w^*) = Arg(min_{l \in m_{fs_{j^*}}, w \in p_{fs_{j^*}}}(\max(AM_{(fs_{j^*}, l)}^g, AP_w^g) + p_{(j^*, fs_{j^*}, w)}))$؛

۷. کار j^* به ماشین l^* و کارگر w^* با کمترین زمان بارکاری تخصیص دهید.

۸. $AM_{(fs_{j^*}, l^*)}^{g+1} \coloneqq \max(AM_{(fs_{j^*}, l^*)}^g, AP_{w^*}^g, T_g) + p_{(j^*, fs_{j^*}, w^*)}$؛

۹. $C_{j^*}^{g+1} \coloneqq AM_{(fs_{j^*}, l^*)}^{g+1}$؛

۱۰. $AP_{w^*}^{g+1} \coloneqq C_{j^*}^{g+1}$؛

۱۱. $LS_{j^*} \coloneqq LS_{j^*} - \{fs_{j^*}\}$؛

۱۲. $g \coloneqq g + 1$؛

۱۳. **اگر** $LS_{j^*} = \emptyset$

۱۴. $\hat{\pi} \coloneqq \hat{\pi} - \{j^*\}$؛

۱۵. **پایان**

۱۶. **اگر** هزینه دیرکرد کار j^*<هزینه رد کار j^*

۱۷. $\hat{\pi} \coloneqq \pi$؛

۱۸. $\acute{\pi} \coloneqq \acute{\pi} + \{j^*\}$؛

۱۹. $\hat{\pi} \coloneqq \hat{\pi} - \{j^*\}$؛

۲۰. قرار دهید $g \coloneqq 1$؛ $LS_j \coloneqq \{M | j \in \pi\}$؛ $C_j^g \coloneqq \{0 | j \in \pi\}$؛ $AP_w^g \coloneqq \{0 | w \in P\}$؛ $AM_{il}^g \coloneqq \{0 | i \in P, l \in$
$m_i\}$؛ $LAJ \coloneqq \emptyset$؛

۲۱. **پایان**

۲۲. **اگر** $|\hat{\pi}| = \emptyset$

۲۳. $iter \coloneqq 2$؛

۲۴. **در غیر اینصورت**

۲۵. **اگر** $min_{j \in \hat{\pi}}(fs_j) = 1$

۲۶. $T_g \coloneqq min_{l \in m_1}(AM_{1l}^{g+1})$؛

۲۷. **در غیر اینصورت**

۲۸. $T_g \coloneqq min_{j \in \hat{\pi}}(C_j^{g+1})$؛

۲۹. **پایان**

۳۰. **پایان**

۳۱. **پایان**

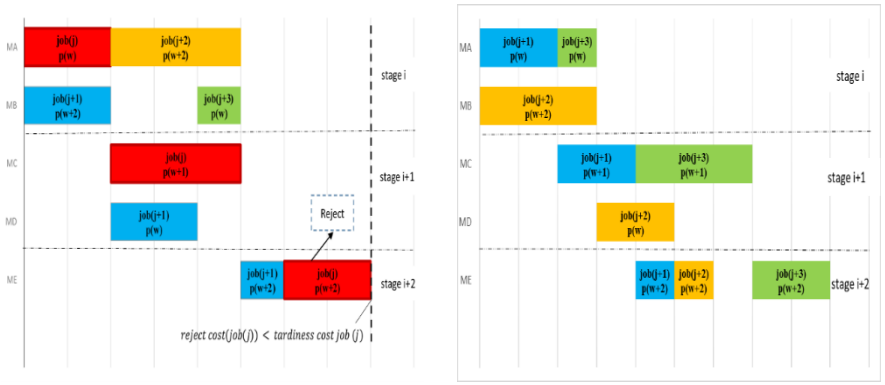
۳۲. **هزینه خالص کل را مطابق** $\sum_{a \in \pi}$ **tardiness cost** ***job a*** $+ \sum_{b \in \hat{\pi}}$ **reject cost** ***job b*** **محاسبه کنید**

پایان

شکل ۵. شبه کد رمزگذاری و رمزگشایی جواب‌ها

www.SID.ir

Archive of SID



a) کار ***j*** ام را از سیستم خارج کنید

b) کارهای باقی مانده را زمانبندی کنید

شکل ٦. تصمیم گیری به رد کارها و زمانبندی مجدد به کارهای باقی مانده

یافته‌های پژوهش

در این بخش عملکرد الگوریتم پیشنهادی ارزیابی می‌شود. ما از پنج الگوریتم فرا ابتکاری موجود در ادبیات تحقیق شامل، سیستم ایمنی بدن مصنوعی مبتنی بر ایمونوگلوبولین[۱] (چانگ و لیائو[۲]، ۲۰۱۳)، الگوریتم ژنتیک[۳] (محسن و ایرج[۴]، ۲۰۱۴)، کلونی زنبور عسل مصنوعی گسسته[۵] (پان و همکاران[۶]، ۲۰۱۴)، بهینه سازی توسعه یافته کرم میوه[۷] (پان و همکاران[۸]، ۲۰۱۷) و بهینه سازی موثر اصلاح شده پرندگان مهاجر[۹] (زانگ و همکاران[۱۰]، ۲۰۱۷) که برای مسائل زمانبندی جریان کارگاهی ترکیبی، اثربخشی قابل قبولی را نشان داده‌اند جهت ارزیابی و مقایسه الگوریتم پیشنهادی استفاده می کنیم. پنج الگوریتم مزبور از جهت رمزگذاری، رمزگشایی جواب‌ها و ارزیابی تابع هدف با مساله پیشنهادی تطبیق داده می‌شود تا مقایسه صورت پذیرد.

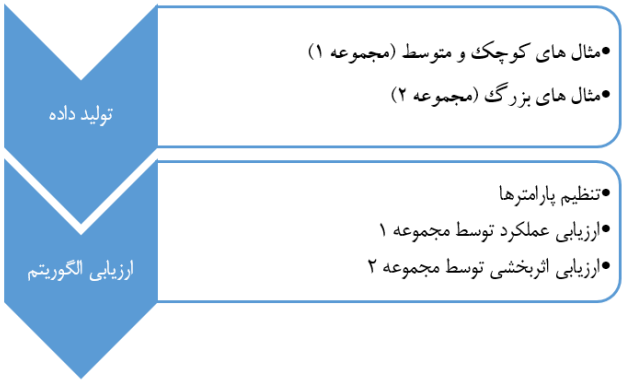
1. Immunoglobulin-based Artificial Immune System (IAIS)
2 Chung & Liao
3. Genetic Algorithm (GA)
4. Mohsen & Iraj
5. Discrete Artificial Bee Colony (DABC)
6. Pan et al.
7. Improved Fruit Fly Optimization (IFFO)
8. Pan et al.
9. Effective Modified Migrating Birds Optimization (EMBO)
10. Zhang et al.

www.SID.ir

Archive of SID

شایان ذکر است مدل‌های ریاضی توسط نرم‌افزار GAMS 24.1.2 و الگوریتم‌های آزمایش شده توسط نرم‌افزار MATLAB 2012 کدگذاری شده و آزمایش‌ها روی سیستمی با پردازندهٔ Core i7 @ 2.8 GHz و با حافظه 16.0 GB انجام می‌شود. شکل ۷ کلیه مراحل ارزیابی آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

شکل ۷. مراحل ارزیابی آزمایش‌ها



نحوه تولید داده‌ها

هیچگونه محکی درمسائل زمانبندی جریان کارگاهی ترکیبی با منابع دوگانه محدود انسان و ماشین با در نظر گرفتن رد کارها وجود ندارد، بنابراین برای امتحان از کارایی و اثربخشی الگوریتم‌های بیان شده، دو مجموعه از مثال‌های آزمایشی، مجموعه اول شامل ۵ مثال تصادفی تولید شده برای ترکیبی از $n=\{4,6,8,10\}$و $m=\{2,5\}$ در دسته مثال‌های سایز کوچک و متوسط (در مجموع ۴۰ مثال)، مجموعه دوم شامل ۱۰ مثال تصادفی تولید شده برای ترکیبی از $n=\{15,20,25\}$ و $m=\{10,15\}$ در دسته مثال‌های سایز بزرگ (در مجموع ۶۰ مثال) و تعداد ماشین‌ها در هر ایستگاه به طور تصادفی بین بازه $[1,3]$ مشابه تحقیق (زوحلی و همکاران[1]، ۲۰۱۹) استفاده می‌شود. ساختار تولید داده برای زمان تحویل (d_j)، هزینه رد کار (fr_j) و زمان پردازش هرکار بر روی هر ایستگاه توسط کارگر w (p_{jiw}) ، مشابه تحقیق (ژیااو و همکاران[2]، ۲۰۱۵) (موضوع رد کار در محیط جریان کارگاهی) در نظر گرفته شده که به ترتیب به صورت تصادفی در بازه $[0,(m+n)*$

1. Zohali et al.
2. Xiao et al.

www.SID.ir

Archive of SID

[50، [1،500] و [1،100] تولید می‌شود. همچنین با توجه به محیط جریان کارگاهی ترکیبی، بازه تولید هزینه دیرکرد (ft_j) نسبت به ساختار استفاده شده در تحقیق مشابه ([0.5,1.5])، بزرگتر در نظر گرفته شده که به صورت تصادفی بین بازه [3،5] تولید می‌شود. تعداد کارگرها $2 \times m$ و تعداد مهارت‌های هر کارگر به طور تصادفی بین [1,3] می‌باشد.

ارزیابی الگوریتم

این بخش به صورت عددی، عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی پرنده استوایی دریایی بهبود یافته پیشنهادی را در مقابل ۵ الگوریتم شناخته شده در ادبیات تحقیق که در بخش قبل ذکر شد، مورد ارزیابی قرار می‌دهد. به منظور ارزیابی الگوریتم‌ها، ما از مکانیزم رمز گذاری، رمزگشایی و تابع هدف ذکر شده در بخش‌های قبل استفاده کرده ایم.

در ابتدا، تنظیم پارامترهای الگوریتم پیشنهادی صورت گرفته، سپس عملکرد کلی فراابتکاری‌های آزمایش شده را در برابر جواب بهینه مدل مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. در نهایت، الگوریتم پیشنهادی با ۵ الگوریتم ذکر شده مقایسه می‌شود.

شرط توقف بر اساس زمان و برابر با زمان محاسباتی مورد نیاز تعیین شده است که با توجه به ابعاد هر مسئله به صورت $3 \times n \times m$ تعیین خواهد شد.

ما از درصد انحراف نسبی[1] به عنوان معیار اندازه گیری عملکرد استفاده می‌کنیم که به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$RPD(F) = \frac{(F - F^*)}{F^*} \times 100 \qquad (۲۲)$$

در این رابطه F جواب مربوط به الگوریتم مشخص در یک مثال مشخص و F^* بهترین جواب موجود بین الگوریتم‌ها یا جواب بهینه در آن مثال می‌باشد.

تنظیم پارامترها

عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری به میزان قابل توجهی تحت تاثیر تنظیم پارامترهایشان قرار دارند. برای تنظیم پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی پرنده استوایی دریایی بهبود یافته از

1 Relative Percentage Deviation (RPD)

www.SID.ir

Archive of SID

روش تاگوچی (مونتگومری[1]، ۲۰۰۵) استفاده می‌شود. رویکرد تاگوچی از سنجش نسبت سیگنال به نویز (S/N) به شکل زیر استفاده می‌کند:

$$S/N\ ratio = -10 \times \log(RPD)^2 \quad (۲۳)$$

الگوریتم پیشنهادی دارای چهار پارامتر کلیدی است و هر کدام از آن‌ها چهار سطح هستند که در جدول ۳ ذکر شده اند.

جدول ۳. سطوح پارامترها برای الگوریتم بهینه سازی استوایی دریایی بهبود یافته

پارامترها	سطح پارامتر			
	۱	۲	۳	٤
N_{pop}	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰
Max-iteration	۱	۲	٤	۸
α	/۲ ۰	/۵ ۰	/۸ ۰	/۹۵ ۰
f_c	۱	۲	۳	٤

تعداد ۱۶ ترکیب پارامترها (آرایه متعامد ۱۶ سطری L_{16}) برای تعیین بهترین ترکیب پارامتر استفاده می‌شود. برای هر ترکیب پارامتر، الگوریتم ۱۰ بار مستقل اجرا شده و میانگین مقدار درصد انحراف نسبی از ۱۰ اجرا برای متغیر پاسخ[2] مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش تاگوچی بر روی مسئله مجموعه ۲، انجام می‌شود. سطح با بالاترین نسبت S/N بین همه سطوح مربوطه، به عنوان بهترین سطح انتخاب می‌شوند. شکل ۸ سطوح مختلف پارامترها را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، N_{pop} مهمترین پارامتر عملکرد الگوریتم می‌باشد. ترکیب مورد نظر از مقادیر پارامتر برای الگوریتم ارائه شده به شرح جدول ۴ است:

1. Montgomery
2. Means responses

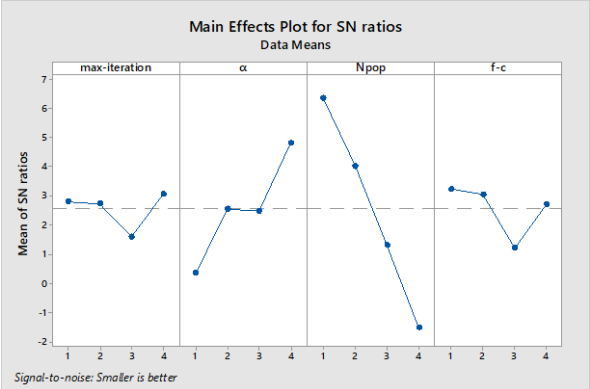
www.SID.ir

Archive of SID

جدول ٤. ترکیب مورد نظر از مقادیر پارامتر

پارامترها	مقدار
N_{pop}	۱۵
Max-iteration	۸
α	۰/۹۵
f_c	۱

شکل ۸. نسبت سیگنال به نویز برای سطوح پارامترها



مثال با اندازه کوچک و متوسط

این بخش به ارزیابی الگوریتم‌های تست شده برای عملکرد مثال‌های سایز کوچک و متوسط می‌پردازد. به منظور انجام این کار، ما از ۳۰ مثال از مجموعه ۱ که به صورت بهینه توسط مدل ریاضی پیشنهادی در محدوده زمانی ۳۶۰۰ ثانیه حل می‌شود، استفاده کرده ایم، به طوری که مدل مربوطه در دیگر مثال‌ها (۳۱ تا ۴۰) در زمان تعیین شده قادر به حل نمی باشد. جدول ۵ نتایج مدل ریاضی را بر روی مثال‌های مجموعه ۱ نشان می‌دهد، ستون "زمان" میانگین زمان سپری شده برای حل بهینه مثال و ستون "شکاف" شکاف نسبی گزارش شده توسط GAMS پس از زمان محاسباتی ۳۶۰۰ ثانیه را نشان می‌دهد.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۵. نتایج محاسباتی مدل ریاضی

مثال	n	m	زمان (ثانیه)	شکاف (درصد)	مثال	n	m	زمان (ثانیه)	شکاف (درصد)
۱			۵/٤	۰	٦			٤/۸	۰
۲			۹	۰	۷			۹/۱	۰
۳	٤	۲	۹/۲	۰	۸	٤	۵	۱۱/٤	۰
٤			۵/۲	۰	۹			۷/۹	۰
۵			۱۰/٤	۰	۱۰			۸/۸	۰
۱۱			۲۳/٤	۰	۱٦			۱۰۱/۵	۰
۱۲			۳۹/۷	۰	۱۷			٤۱	۰
۱۳	٦	۲	۷۵/٦	۰	۱۸	٦	۵	٦۷/۷	۰
۱٤			۲۷/۲	۰	۱۹			۳۰/۵	۰
۱۵			٤٤/۵	۰	۲۰			۸٤/٦	۰
۲۱			۷۳۳/٤	۰	۲٦			٤۹۸/۲	۰
۲۲			۳۱٤٤/۹	۰	۲۷			۳۰۸٦	۰
۲۳	۸	۲	۱۰۰٦	۰	۲۸	۸	۵	۲۲۳۲	۰
۲٤			۱۰۸٦/۷	۰	۲۹			۱۷۵۱	۰
۲۵			٤۰۷	۰	۳۰			۲۸٤۹	۰
۳۱			۳٦۰۰	۱۳/۲	۳٦			۳٦۰۰	٤۲/٤
۳۲			۳٦۰۰	۹/۵	۳۷			۳٦۰۰	۲۰/۲
۳۳	۱۰	۲	۳٦۰۰	۲۵/٦	۳۸	۱۰	۵	۳٦۰۰	۳٤/۵
۳٤			۳٦۰۰	۱۸/٤	۳۹			۳٦۰۰	۲۷/۳
۳۵			۳٦۰۰	۲۹/۲	٤۰			۳٦۰۰	۱۱/۵

www.SID.ir

Archive of SID

پراکندگی قابل توجهی در زمان سپری شده برای حل دقیق مسائل مجموعه ۱ مشاهده می‌گردد به نحوی که این زمان بین ۴/۸ و ۳۱۴۴/۹ ثانیه متغیر بوده است. همانطوری که سایز مساله افزایش پیدا می‌کند، نرم افزار حل دقیق GAMS قادر به پیداکردن جواب بهینه مساله در یک زمان منطقی نمی‌باشد. لذا سایزهای بزرگ مساله شامل ۱۰ کار و ۱۰ مرحله تولید می‌باشد.

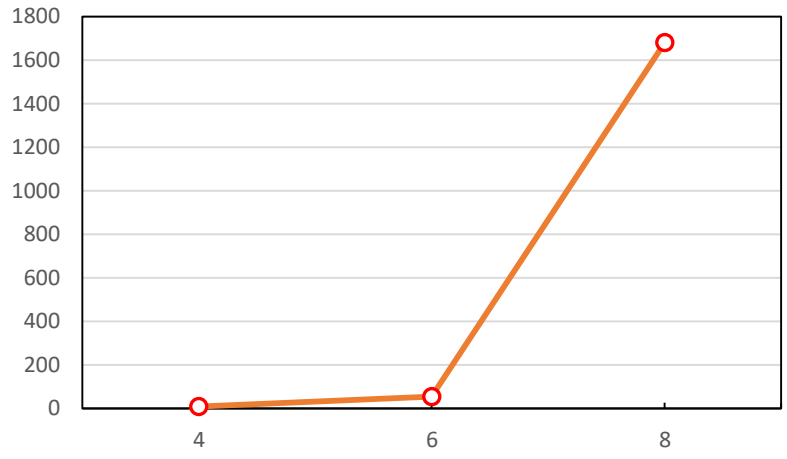
تحلیل مدل

در این بخش، حساسیت مدل ریاضی پیشنهادی نسبت به پارامترهای تعداد کارها (n) و تعداد ماشین‌ها (m) مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور، اندازه فضای جواب مدل پیشنهادی مطابق عبارت زیر محاسبه می‌شود:

$$|Model| = 2^n \times (n!)^m \prod_{i=1}^{m} \binom{n+m_i-1}{m_i-1} \binom{n+p_i-1}{p_i-1} \quad (۲۴)$$

شکل‌های ۹ و ۱۰ مقادیر میانگین زمان سپری شده برای حل بهینه مسائل در سایزهای مختلف به ترتیب مربوط به تعداد کارها و تعداد ماشین‌ها را نشان می‌دهد. با افزایش مقادیر پارامتری تعداد کار، زمان اجرا به صورت نمایی افزایش می‌یابد که پیچیدگی بالای مساله مورد نظر مشخص است.

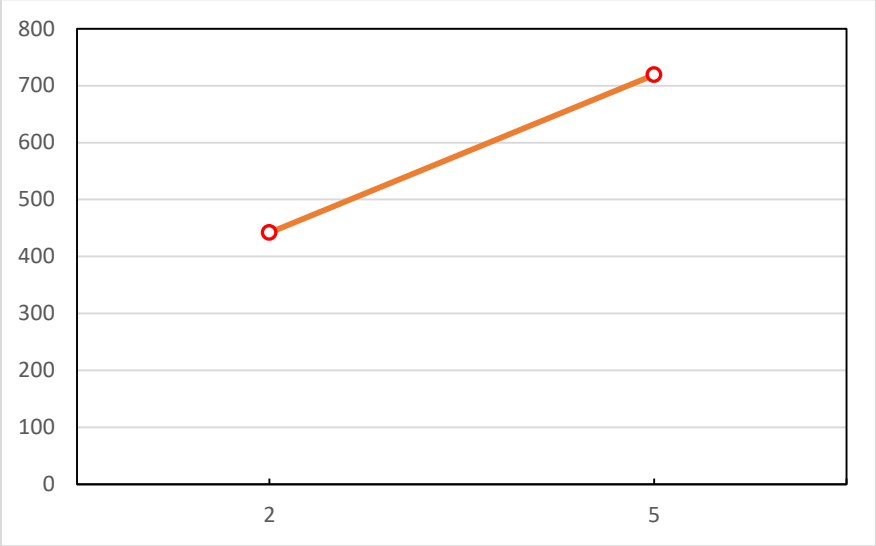
شکل۹. میانگین زمان سپری شده با افزایش تعداد کارها



www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۱۰. میانگین زمان سپری شده با افزایش تعداد ماشین‌ها



در این مرحله نتایج الگوریتم‌های سیستم ایمنی بدن مصنوعی مبتنی بر ایمونوگلوبولین (IAIS)، الگوریتم ژنتیک (GA)، کلونی زنبور عسل مصنوعی گسسته (DABC)، بهینه سازی توسعه یافته کرم میوه (IFFO)، بهینه سازی موثر اصلاح شده پرندگان مهاجر (EMBO) و الگوریتم بهینه‌سازی پرنده استوایی دریایی بهبود یافته (ISTOA) با نتایج بهینه حاصل از مدل ریاضی مقایسه می‌شود. جدول ۶ متوسط شکاف بهینگی الگوریتم‌های تست شده در هر مساله را نشان می‌دهد.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ٦. مقایسه بین جواب بهینه و جواب الگوریتم‌ها

n	m	میانگین درصد انحراف نسبی					
		DABC	IAIS	IFFO	GA	EMBO	ISTOA
٤	٢	٠/٠٠	٠/٠٠	٠/٠٠	٠/٠٠	٠/٠٠	٠/٠٠
	٥	٠/٠٠	٠/٠٠	٠/٠٠	٠/٠٠	٠/٠٠	٠/٠٠
٦	٢	٠/٠٣	٠/٠٤	٠/٠٢	٠/٠٦	٠/٠١	٠/٠٠
	٥	٢/١٣	٠/٠١	٠/٠١	٠/٠٤	٠/١٨	٠/٠٦
٨	٢	١/٦٠	٠/٦٨	٠/٢٣	٠/٠٦	٠/١٢	٠/٠٤
	٥	٠/٧٤	٠/٨٨	١/٠٢	٠/٩٠	٠/٤٨	٠/٠٩
میانگین		٠/٧٤	٠/٢٦	٠/٢١	٠/١٧	٠/١٣	٠/٠٣

الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی بهبود یافته، ۲۶ مثال حدود ۹۰ درصد را به صورت بهینه حل می‌کند و منجر به شکاف بهینگی ۰/۰۳ درصد در این مثال‌های کوچک می‌شود. الگوریتم‌های دیگر، بین ۲۰ تا ۲۱ مثال را به صورت بهینه حل می‌کند. با توجه به شکاف بهینگی در این نمونه‌های کوچک، همه الگوریتم‌های تست شده در شکاف بهینگی کمتر از ۱ درصد قابل قبول می‌باشند.

مثال‌های بزرگ

همانطور که در جدول ۶ نشان داده شد، هیچ تفاوت معنی داری بین الگوریتم‌ها به منظور حل مثال‌های کوچک و متوسط وجود ندارد. در ادامه، مجموعه ۲ شامل ۶۰ مثال بزرگ توسط الگوریتم‌ها به منظور ارزیابی جامع عملکرد، حل می‌شود. هر مثال ۵ مرتبه توسط هر الگوریتم حل می‌شود. جدول ۷ نتایج متوسط، بهترین و بدترین درصد انحراف نسبی الگوریتم‌ها را در مثال‌های مختلف نشان می‌دهد. از نظر میانگین درصد انحراف نسبی، الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی بهبود یافته با درصد انحراف نسبی ۰/۸۹ درصد بهترین است. الگوریتم توسعه یافته کرم میوه، الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی گسسته و الگوریتم ژنتیک به ترتیب با ۳/۹۲، ۴/۴۷ و ۴/۸۸ درصد در رتبه‌های بعدی قرار دارند. بدترین عملکرد مربوط به الگوریتم سیستم ایمنی بدن مصنوعی مبتنی بر

www.SID.ir

Archive of SID

ایمونوگلوبولین با درصد انحراف نسبی ۶/۹۶ درصد می‌باشد. در رابطه با بهترین و بدترین درصد انحراف نسبی، الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی بهبود یافته دوباره در رتبه اول قرار دارد و این مساله نشان دهنده عملکرد قوی الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی بهبود یافته است. شکل ۱۱ نمودار همگرایی (تابع هدف) بدست آمده از الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی بهبود یافته برای اندازه مساله ۲۵ کار و ۱۵ ماشین را نشان می‌دهد.

برای ارزیابی عملکرد آماری، نتایج ستون "متوسط" استفاده می‌شود. نتایج نشان دهنده تفاوت آماری معنی دار میان عملکرد الگوریتم‌های تست شده با p-value صفر می‌باشد. به منظور مقایسه دقیق تر عملکرد، شکل ۱۲، درصد انحراف نسبی و تست حداقل تفاوت معنی‌دار[1] را نشان می‌دهد. الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی بهبود یافته به لحاظ آماری عملکرد بهتری نسبت به ۵ الگوریتم دیگر دارد. الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی گسسته و الگوریتم توسعه یافته کرم میوه دارای عملکرد مشابهی بوده و عملکرد آن‌ها بهتر از سه الگوریتم دیگر است. شکل ۱۳ و ۱۴ نیز نشان دهنده میانگین درصد انحراف نسبی الگوریتم‌ها به ترتیب مربوط به n و m می‌باشد. همانطور که مشهود است، الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی بهبود یافته در همه ابعاد مساله قابل اطمینان است. عملکرد خوب الگوریتم بهینه سازی پرنده استوایی دریایی بهبود یافته از رفتارهای مربوط به مهاجرت و حمله پرنده استوایی دریایی و همچنین ویژگی‌های مربوط به روش جستجوی محلی، تعادل مناسب بین جستجوی عمومی فضای جواب[2] و تمرکز[3] حاصل می گردد.

1. Least Significant Difference (LSD)
2. Exploration
3. Intensification

www.SID.ir

Archive of SID

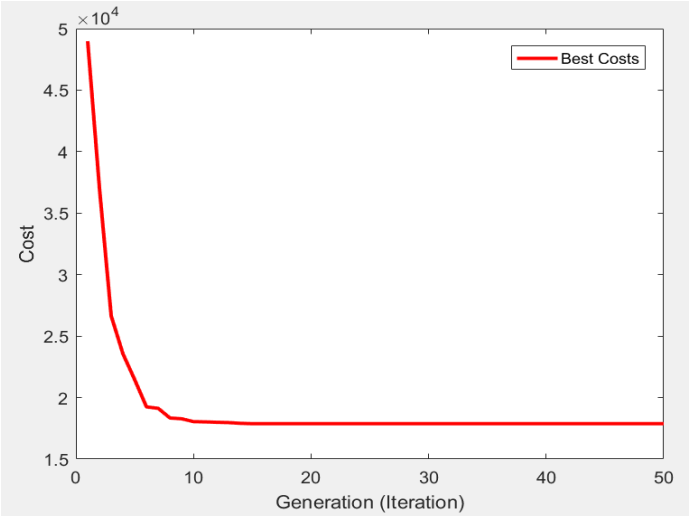
جدول ۷. درصد انحراف نسبی بدست آمده توسط الگوریتم‌ها

		درصد انحراف نسبی								
n	m	بهترین			میانگین			بدترین		
		DABC	IAIS	IFFO	DABC	IAIS	IFFO	DABC	IAIS	IFFO
۱۵		۱/۰۷	۰/۲۳	۰/۹۵	۳/۰۳	٤/۲۲	۳/۲۰	۷/۵۹	۱۰/۷۰	۷/۹۸
۲۰	۱۰	۰/۱۳	۲/٦۸	۰/۲۵	۲/۸٦	۵/۱۲	۳/۱۲	۵/۹٦	۹/۵۳	٤/٦٤
۲۵		۰/۹٦	۳/۲۰	۰/۷۷	٤/۰۳	٦/٦٦	۳/۲۱	۵/۸٦	۱۱/۵۱	۵/۱۵
۱۵		۰/۱۲	۳/۷٦	۰/۱٤	۳/۰۸	۷/٦۷	۳/۲۰	٦/۸۰	۱۱/۱۵	۵/۷۱
۲۰	۱۵	۰/۲۱	۰/۳۳	۰/۲۵	۵/۳۱	۸/٤۰	٤/۲۹	۱۲/۱۲	۱۵/۷٦	۱۰/۵۸
۲۵		۰/۰۸	۰/۳۳	۰/۳۱	۸/۵۱	۹/٦۹	٦/۵۱	۱۱/۷۲	۱۸/٤٤	۱۱/۵۷
میانگین		۰/٤۳	۱/۷۵	۰/٤٤	٤/٤۷	٦/۹٦	۳/۹۲	۸/۳٤	۱۲/۸٤	۷/٦۰
		GA	EMBO	ISTOA	GA	EMBO	ISTOA	GA	EMBO	ISTOA
۱۵		۰/۷۷	۰/۷۲	۰/۰۷	٤/۰۸	٤/۲۰	۰/٦۱	۸/۸٤	٦/٦۷	۱/۰۳
۲۰	۱۰	۰/۷۸	۰/۵٦	۰/۲٤	۳/۹۲	٤/۳۲	۰/۸٦	٦/۷٤	٦/۳۳	۱/٦۸
۲۵		۱/۳۳	۱/۱۱	۰/۲۸	٤/۳۱	۵/۱۳	۰/۹۸	٦/۰۵	٦/۵٦	۱/٦٤
۱۵		۰/۳۰	۰/۳٤	۰/۲۱	٤/۰۳	٤/۲۲	۰/۵۵	۸/۸٦	۷/۹۹	۰/۷۸
۲۰	۱۵	۰/۵۰	۰/٤۲	۰/۲٤	۵/۳۷	۵/٤۲	۰/۹۰	۱۲/۰۲	۱۰/۸۰	۱/٤۷
۲۵		۰/٦۸	۰/٤۸	۰/۰۹	۷/٦۲	۹/۵۳	۱/٤٦	۱۳/۷۲	۱٤/۳٦	۲/۹٤
میانگین		۰/۷۲	۰/٦۰	۰/۱۸	٤/۸۸	۵/٤۷	۰/۸۹	۹/۳۷	۸/۷۸	۱/٦۰

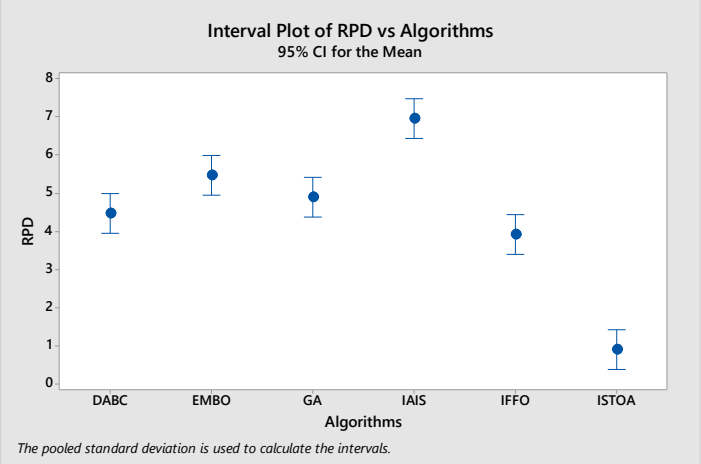
www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۱۱. نمودار همگرایی بدست آمده از بهینه سازی پرنده استوایی دریایی بهبود یافته برای اندازه مساله ۲۵ کار و ۱۵ ماشین



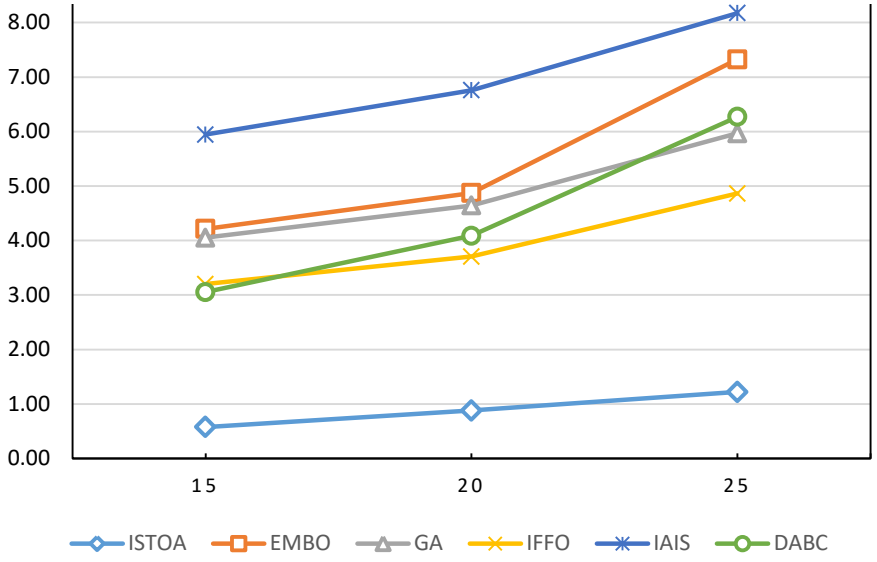
شکل ۱۲. میانگین درصد انحراف نسبی و فاصله درصد انحراف نسبی و تست حداقل تفاوت معنی‌دار برای الگوریتم‌ها



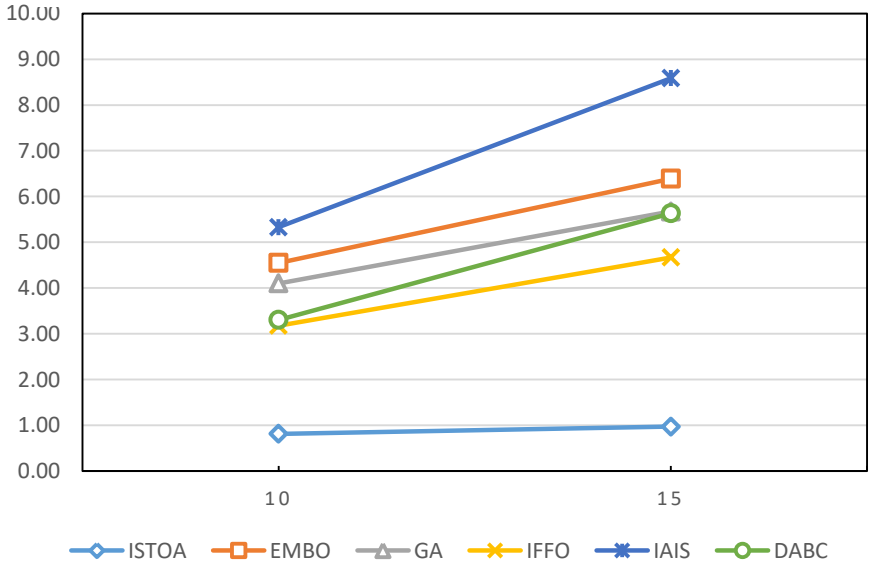
www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۱۳. میانگین درصد انحراف نسبی الگوریتم‌ها مربوط به تعداد کارها



شکل ۱٤. میانگین درصد انحراف نسبی الگوریتم‌ها مربوط به تعداد مرحله تولید



www.SID.ir

Archive of SID

نتیجه‌گیری و پژوهش‌های آینده

در این مقاله، به مساله زمانبندی جریان کارگاهی ترکیبی با منابع دوگانه محدود انسان و ماشین با در نظر گرفتن رد کارها با هدف حداقل سازی هزینه خالص کل (مجموع کل هزینه‌های رد کارها و هزینه‌های دیرکرد کارها) پرداخته شد که در هیچ پژوهشی مورد بررسی قرار نگرفته است. این موضوع در تولیدات دنیای واقعی عموماً دیده می‌شود و کاربرد و عملیاتی بودن گسترده در بسیاری مسائل صنعتی دارد. در این مقاله، یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح ترکیبی برای مساله ارائه شده است. سپس، یک الگوریتم بهینه-سازی پرنده استوایی دریایی بهبود یافته و یک روش نمایش جواب از دیدگاه رمزگذاری و رمزگشایی پیشنهادی ارائه شد.

به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم، دو مجموعه مثال‌های آزمایشی تولید شد. مثال-های مجموعه اول (سایز کوچک و متوسط) توسط مدل ریاضی پیشنهادی حل شد. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی می‌تواند راه حل بهینه ای را برای اکثر مثال‌ها با زمان محاسبات منطقی بیابند.

به منظور ارزیابی الگوریتم بهینه سازی پیشنهادی، ۵ الگوریتم شناخته شده در ادبیات تحقیق (سیستم ایمنی بدن مصنوعی مبتنی بر ایمونوگلوبولین، الگوریتم ژنتیک، کلونی زنبور عسل مصنوعی گسسته، بهینه سازی توسعه یافته کرم میوه و بهینه سازی موثر اصلاح شده پرندگان مهاجر) را با مساله پیشنهادی تطبیق داده و عملکرد الگوریتم بهینه سازی پیشنهادی در برابر الگوریتم‌های تطبیق یافته بر روی هر دو مجموعه مثال‌ها (سایز کوچک و متوسط و سایز بزرگ) مقایسه شد. در مثال‌های کوچک، آزمایشات نشان داد که الگوریتم‌های مزبور معمولا بسیار موثرند. با این حال، در مثال‌های بزرگ، نتایج محاسبات نشان داد که الگوریتم پیشنهادی عملکرد بسیار بهتری نسبت به الگوریتم‌های تطبیق یافته دارند.

از جمله یافته‌های مدیریتی این تحقیق می‌توان به این نکته اشاره نمود که در هنگام مواجه شدن بنگاه‌های اقتصادی با محیط تولیدی جریان کارگاهی ترکیبی با محدودیت ماشین آلات، محدودیت نیروی انسانی و افزایش هزینه حقوق و دستمزد و تلاش برای استفاده بهتر از نیروی کار، با مدنظر قرار دادن شرایطی از جمله: رد کارها از منظر هزینه فرصت‌ها و هزینه مدیریت؛ زمان‌بندی کارهای پذیرفته شده؛ تخصیص ماشین و تخصیص

www.SID.ir

Archive of SID

کارگر به طور مشترک، به حداقل سازی هزینه خالص کل (مجموع کل هزینه‌های رد کارها و هزینه‌های دیرکرد کارها) می‌انجامد. از دیدگاه مدیریتی، این مقاله یک ابزار برنامه ریزی (روش حل و مدل) را برای کاهش هزینه خالص برای شرکت‌های با محیط جریان کارگاهی ترکیبی با منابع دوگانه محدود انسان و ماشین و در نظرگرفتن رد کارها ارائه می‌کند. برای شرکت‌های کوچک با کمتر از ۱۰ کار، مدل ریاضیاتی و نرم افزار بهینه سازی، ابزارهای برنامه ریزی قابل اطمینانی هستند(جدول ۶). با این حال، این ابزارها چندان موثر نیستند. بنابراین، شرکت‌های بزرگ نیازمند تکنیک‌های راه حل مناسب تری هستند. روش پیشنهادی ما، جوابی را ارائه داده که هزینه خالص کل را در مقایسه با روش‌های تطبیق یافته در حالت متوسط تا ۳ درصد کاهش می‌دهد (جدول ۷) و در بدترین سناریو، جوابی را ارائه داده که ۶ درصد بهتر از روش‌های تطبیق یافته می‌باشد. این مساله نشان می‌دهد که روش پیشنهادی نیز در بدترین حالت، قوی است، چون شکاف بین روش پیشنهادی و روش‌های تطبیق یافته در بدترین حالت (۶ درصد) از متوسط (۳ درصد) بیشتر است.

شرکت‌های تولیدی توجه بسیار زیادی به مصرف انرژی و تولید پاک دارند. بنابراین مساله چند هدفه زمانبندی جریان کارگاهی ترکیبی با منابع دوگانه محدود انسان و ماشین با در نظر گرفتن رد کارها که به طور همزمان به کمینه سازی مصرف انرژی و هزینه خالص کل می‌پردازد، می‌تواند یک موضوع مناسب برای تحقیقات آتی باشد. با انجام تحقیقات آتی، می‌توان به دیگر ویژگی‌های خاص مساله زمانبندی جریان کارگاهی ترکیبی با منابع دوگانه محدود انسان و ماشین با در نظر گرفتن رد کارها و طراحی الگوریتم‌های موثر برای آن دست یافت.

www.SID.ir

Archive of SID

منابع

یزدانی، مهدی؛ زندیه، مصطفی؛ توکلی مقدم؛ رضا (۱۳۹۳). «یک الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی برای مسئله زمانبندی کار کارگاهی منعطف با منابع دوگانه محدود انسان و ماشین». فصلنامه مطالعات مدیریت صنعتی، ۱۲(۳۳)، ۷۴-۴۳.

Asgari, T. M., & Zandieh, M. (2014). A cloud-based simulated annealing algorithm for order acceptance problem with weighted tardiness penalties in permutation flow shop scheduling. Journal of industrial engineering and management studies (JIEMS), 1(1): 1-19.

Andrade-Pineda, J. L., Canca, D., Gonzalez-R, P. L., & Calle, M. Scheduling a dual-resource flexible job shop with makespan and due date-related criteria. Annals of Operations Research, 1-31.

Bartal, Y., Leonardi, S., Marchetti-Spaccamela, A., Sgall, J., & Stougie, L. (2000). Multiprocessor scheduling with rejection. SIAM Journal on Discrete Mathematics, 13(1), 64-78.

Cordone, R., & Hosteins, P. (2019). A bi-objective model for the single-machine scheduling problem with rejection cost and total tardiness minimization. Computers & Operations Research, 102, 130-140.

Dabiri, M., Darestani, S. A., & Naderi, B. (2019). Multi-machine flow shop scheduling problems with rejection using genetic algorithm. International Journal of Services and Operations Management, 32(2), 158-172.

Dudek, R. A., Panwalkar, S. S., & Smith, M. L. (1992). The lessons of flowshop scheduling research. Operations Research, 40(1), 7-13.

Dhiman, G., & Kaur, A. (2019). STOA: A bio-inspired based optimization algorithm for industrial engineering problems. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 82, 148-174.

Emami, S., Sabbagh, M., & Moslehi, G. (2016). A Lagrangian relaxation algorithm for order acceptance and scheduling problem: a globalised robust optimisation approach. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 29(5), 535-560.

Esmaeilbeigi, R., Charkhgard, P., & Charkhgard, H. (2016). Order acceptance and scheduling problems in two-machine flow shops: new mixed integer programming formulations. European Journal of Operational Research, 251(2), 419-431.

Framinan, J. M., Leisten, R., & García, R. R. (2014). Manufacturing scheduling systems. An integrated view on Models, Methods and Tools, 51-63.

www.SID.ir

Archive of SID

Figielska, E. (2018). Scheduling in a two-stage flowshop with parallel unrelated machines at each stage and shared resources. Computers & Industrial Engineering, 126, 435-450.

Geramipour, S., Moslehi, G., & Reisi-Nafchi, M. (2017). Maximizing the profit in customer's order acceptance and scheduling problem with weighted tardiness penalty. Journal of the Operational Research Society, 68(1), 89-101.

Gupta, J. N. (1988). Two-stage, hybrid flowshop scheduling problem. Journal of the operational Research Society, 39(4), 359-364.

Gao, L., & Pan, Q. K. (2016). A shuffled multi-swarm micro-migrating birds optimizer for a multi-resource-constrained flexible job shop scheduling problem. Information Sciences, 372, 655-676.

Gong, G., Chiong, R., Deng, Q., Han, W., Zhang, L., Lin, W., & Li, K. (2019). Energy-efficient flexible flow shop scheduling with worker flexibility. Expert Systems with Applications, 112902.

Gong, X., Deng, Q., Gong, G., Liu, W., & Ren, Q. (2018). A memetic algorithm for multi-objective flexible job-shop problem with worker flexibility. International Journal of Production Research, 56(7), 2506-2522.

Johnson, S. M. (1954). Optimal two-and three-stage production schedules with setup times included. Naval research logistics quarterly, 1(1), 61-68.

Jan, D., & W Patrick, N. (2009). Ergonomics contributions to company strategies. Applied Ergonomics, 40, 745-752.

Lin, S. W., & Ying, K. C. (2015). Order acceptance and scheduling to maximize total net revenue in permutation flowshops with weighted tardiness. Applied Soft Computing, 30, 462-474.

Lei, D., & Guo, X. (2015). A parallel neighborhood search for order acceptance and scheduling in flow shop environment. International Journal of Production Economics, 165, 12-18.

Li, J., Huang, Y., & Niu, X. (2016). A branch population genetic algorithm for dual-resource constrained job shop scheduling problem. Computers & Industrial Engineering, 102, 113-131.

Lin, H. T., & Liao, C. J. (2003). A case study in a two-stage hybrid flow shop with setup time and dedicated machines. International Journal of Production Economics, 86(2), 133-143.

Lei, D., & Guo, X. (2014). Variable neighbourhood search for dual-resource constrained flexible job shop scheduling. International Journal of Production Research, 52(9), 2519-2529.

Montgomery, D. C. (2005). Design and Analysis of Experiments, Six Edition, John Wiley&Sons.

www.SID.ir

Archive of SID

Mehravaran, Y., & Logendran, R. (2013). Non-permutation flowshop scheduling with dual resources. Expert Systems with Applications, 40(13), 5061-5076.

Meng, L., Zhang, C., Zhang, B., & Ren, Y. (2019). Mathematical Modeling and Optimization of Energy-Conscious Flexible Job Shop Scheduling Problem With Worker Flexibility. IEEE Access.

Naderi, B., Gohari, S., & Yazdani, M. (2014). Hybrid flexible flowshop problems: Models and solution methods. Applied Mathematical Modelling, 38(24), 5767-5780.

Nguyen S, Zhang M, Johnston M (2014) Enhancing branch-and-bound algorithms for order acceptance and scheduling with genetic programming. In: Nicolau M, Krawiec K, Heywood MI, Castelli M, Garcia-Sanchez P, Merelo JJ, Rivas Santos VM, Sim K (eds) Genetic programming, 1st edn. Springer, Berlin, pp 124–136

Nguyen, S., Zhang, M., Johnston, M. (2014) A sequential genetic programming method to learn forward construction heuristics for order acceptance and scheduling. In: 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). IEEE, pp. 1824–1831.

N. Mohsen, M. Iraj, Multi-job lot streaming to minimize the weighted completion time in a hybrid flow shop scheduling problem with work shift constraint, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 70 (2014) 501-514.

Pan, Q. K., Gao, L., Li, X. Y., & Gao, K. Z. (2017). Effective metaheuristics for scheduling a hybrid flowshop with sequence-dependent setup times. Applied Mathematics and Computation, 303, 89-112.

Pan, Q. K., Ruiz, R., & Alfaro-Fernández, P. (2017). Iterated search methods for earliness and tardiness minimization in hybrid flowshops with due windows. Computers & Operations Research, 80, 50-60.

Pan, Q. K., Wang, L., Li, J. Q., & Duan, J. H. (2014). A novel discrete artificial bee colony algorithm for the hybrid flowshop scheduling problem with makespan minimisation. Omega, 45, 42-56.

Pan, Q. K., Wang, L., Mao, K., Zhao, J. H., & Zhang, M. (2012). An effective artificial bee colony algorithm for a real-world hybrid flowshop problem in steelmaking process. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 10(2), 307-322.

Quadt, D., & Kuhn, H. (2005). Conceptual framework for lot-sizing and scheduling of flexible flow lines. International Journal of Production Research, 43(11), 2291-2308.

www.SID.ir

Archive of SID

Ruiz, R., & Vázquez-Rodríguez, J. A. (2010). The hybrid flow shop scheduling problem. European journal of operational research, 205(1), 1-18.

Ruiz, R., & Maroto, C. (2006). A genetic algorithm for hybrid flowshops with sequence dependent setup times and machine eligibility. European Journal of Operational Research, 169(3), 781-800.

Silva, Y. L. T., Subramanian, A., & Pessoa, A. A. (2018). Exact and heuristic algorithms for order acceptance and scheduling with sequence-dependent setup times. Computers & Operations Research, 90, 142-160.

Shabtay, D., & Gasper, N. (2012). Two-machine flow-shop scheduling with rejection. Computers & Operations Research, 39(5), 1087-1096.

Shahvari, O., & Logendran, R. (2017). A bi-objective batch processing problem with dual-resources on unrelated-parallel machines. Applied Soft Computing, 61, 174-192.

Silva, Y. L. T., Subramanian, A., & Pessoa, A. A. (2018). Exact and heuristic algorithms for order acceptance and scheduling with sequence-dependent setup times. Computers & Operations Research, 90, 142-160.

Thevenin, S., Zufferey, N., & Widmer, M. (2015). Metaheuristics for a scheduling problem with rejection and tardiness penalties. Journal of Scheduling, 18(1), 89-105.

Thevenin, S., Zufferey, N., & Widmer, M. (2016). Order acceptance and scheduling with earliness and tardiness penalties. Journal of Heuristics, 22(6), 849-890.

Thevenin, S., & Zufferey, N. (2019). Learning Variable Neighborhood Search for a scheduling problem with time windows and rejections. Discrete Applied Mathematics, 261, 344-353.

Udo, G. G., & Ebiefung, A. A. (1999). Human factors affecting the success of advanced manufacturing systems. Computers & Industrial Engineering, 37, 297-300.

Wang J., Zhuang X., Wu B. (2017) A New Model and Method for Order Selection Problems in Flow-Shop Production. In: Choi TM., Gao J., Lambert J., Ng CK., Wang J. (eds) Optimization and Control for Systems in the Big-Data Era. International Series in Operations Research & Management Science, vol 252. Springer, Cham

Wang, S., & Ye, B. (2019). Exact methods for order acceptance and scheduling on unrelated parallel machines. Computers & Operations Research, 104, 159-173.

www.SID.ir

Archive of SID

Wang, S., & Ye, B. (2019). Exact methods for order acceptance and scheduling on unrelated parallel machines. Computers & Operations Research, 104, 159-173.

Waldherr, S., & Knust, S. (2017). Decomposition algorithms for synchronous flow shop problems with additional resources and setup times. European Journal of Operational Research, 259(3), 847-863.

Xu, L., Wang, Q., & Huang, S. (2015). Dynamic order acceptance and scheduling problem with sequence-dependent setup time. International Journal of Production Research, 53(19), 5797-5808.

Xiao, Y., Yuan, Y., Zhang, R. Q., & Konak, A. (2015). Non-permutation flow shop scheduling with order acceptance and weighted tardiness. Applied Mathematics and Computation, 270, 312-333.

Xie, X., & Wang, X. (2016). An enhanced ABC algorithm for single machine order acceptance and scheduling with class setups. Applied Soft Computing, 44, 255-266.

Xiao, Y., Yuan, Y., Zhang, R. Q., & Konak, A. (2015). Non-permutation flow shop scheduling with order acceptance and weighted tardiness. Applied Mathematics and Computation, 270, 312-333.

Yavari, M., Marvi, M. & Akbari, A.H. (2019). Semi-permutation-based genetic algorithm for order acceptance and scheduling in two-stage assembly problem. Neural Comput & Applic doi:10.1007/s00521-019-04027-w

Yazdani, M., Zandieh, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2019). Evolutionary algorithms for multi-objective dual-resource constrained flexible job-shop scheduling problem. OPSEARCH, 1-24.

Yu, C., Semeraro, Q., & Matta, A. (2018). A genetic algorithm for the hybrid flow shop scheduling with unrelated machines and machine eligibility. Computers & Operations Research, 100, 211-229.

Zhang, B., Pan, Q. K., Gao, L., Zhang, X. L., Sang, H. Y., & Li, J. Q. (2017). An effective modified migrating birds optimization for hybrid flowshop scheduling problem with lot streaming. Applied Soft Computing, 52, 14-27.

Zohali, H., Naderi, B., & Mohammadi, M. (2019). The economic lot scheduling problem in limited-buffer flexible flow shops: Mathematical models and a discrete fruit fly algorithm. Applied Soft Computing, 80, 904-919.

www.SID.ir

Archive of SID

Zhang, J., Wang, W., & Xu, X. (2017). A hybrid discrete particle swarm optimization for dual-resource constrained job shop scheduling with resource flexibility. Journal of Intelligent Manufacturing, 28(8), 1961-1972.

Zheng, X. L., & Wang, L. (2016). A knowledge-guided fruit fly optimization algorithm for dual resource constrained flexible job-shop scheduling problem. International Journal of Production Research, 54(18), 5554-5566.

www.SID.ir