فصلنامه مدیریت راهبردی در سیستم های صنعتی (مدیریت صنعتی سابق)
دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج
سال نوزدهم/ شماره ۶۹ / پاییز ۱۴۰۳

ارائه مدل حل مسئله برنامه‌ریزی زمانبندی کارکارگاهی چند مسیره سبز با هدف بهینه کردن زمان اتمام کارها و مصرف انرژی با الگوریتم فراابتکاری وال

سیمین عروجی
گروه مهندسی صنایع، واحد ساوه، دانشگاه آزاد اسلامی، ساوه، ایران
حجت نبوتی (نویسنده مسؤل)
دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی شرق، دانشگاه گیلان، رودسر، ایران
Email: hojat.nabovati@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۲ * تاریخ پذیرش ۱۴۰۳/۰۳/۱۱

چکیده

توالی عملیات کارها بر روی ماشین‌آلات تولید نقش انکار ناپذیر در حجم کار درجریان ساخت و برآورده کردن به موقع تقاضای مشتریان دارد. یکی از رایج ترین مدلهای تولیدی، مدلهای کارکارگاهی هستند. مسئله مورد مطالعه در این پژوهش، بسط گسترده‌تری از مسئله کارکارگاهی چند مسیره می‌باشد که دارای ویژگی بررسی میزان مصرف انرژی که ارتباط مستقیم با آلودگی محیط زیست دارد، می‌باشد. بدین ترتیب هدف تعیین توالی عملیات و تخصیص کار به ماشین‌ها بگونه‌ای است تا مجموع وزنی زمان تحویل کارها و همچنین میزان صرف انرژی کارها کمینه گردد. باید توجه داشت لحاظ فرض مذکور اگرچه موجب پیچیدگی بیشتر مسئله می‌گردد ولی شرایط را به محیطهای تولیدی واقعی نزدیکتر می‌سازد. با توجه به پیچیدگی مسئله فوق و زمان بر بودن حل مسئله بصورت دقیق، استفاده از الگوریتم های فراابتکاری مورد توجه قرارگرفت. در این پژوهش به حل مسئله مدل غیرخطی با الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات و الگوریتم وال پرداخته شده است. برای بررسی کارایی الگوریتم‌های بیان شده یکی از ۳۰ مسئله معروف مورد بررسی قرار گرفته و به این نتیجه خواهیم رسید که به کمک الگوریتم وال، نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات زمان اتمام کلیه کارها با در نظر گرفتن مصرف انرژی ۱۸ درصد کمینه شده است که این نشان دهنده توانایی بالاتر الگوریتم پیشنهادی در حل این مساله می‌باشد و همچنین در خصوص زمان حل هر دو الگوریتم در زمان قابل قبول به نتایج مورد نظر دست یافتند.

کلمات کلیدی: الگوریتم بهینه سازی وال، برنامه‌ریزی کارکارگاهی، آلودگی محیط زیست، میزان مصرف انرژی.

۱- مقدمه

در حل مسائل زمان بندی همواره به این نکته توجه می‌شود که از آنجا که زمان پردازش و تکمیل یک سفارش برابر با بزرگترین زمان پایان رسیدن کار درون آن سفارش است، هدف کمینه کردن زمان تکمیل هرکار و ارسال سفارشات در کوتاهترین زمان می‌باشد. مسئله‌ی زمان‌بندی کار کارگاهی تعیین برنامه زمان‌بندی تعدادی عملیات در محیط چند ماشینه است که در آن هر کار مسیر معینی برای پردازش دارد و ممکن است در طول یک مسیر بیش از یک بار به یک ماشین برخورد کند. زمان‌بندی کار کارگاهی شامل سه حالت تک مسیره ، چند مسیره و انعطاف‌پذیر می‌شود. در مدل کلاسیک زمان‌بندی کار کارگاهی باید n کار بر روی m ماشین غیرمرتبط تکمیل شوند. تمامی ماشین‌ها از ابتدای افق برنامه‌ریزی در دسترس بوده و قطع فعالیت‌ها مجاز نیست. این مسئله در زمره‌ی مسائل سخت[1] طبقه بندی می‌شود (Nabovati, 2021). تعمیم وسیعتر مسئله کار کارگاهی، مسئله کار کارگاهی چند مسیره است که در آن هر کار می‌تواند از مسیرهای متفاوتی عبور کرده و به اتمام برسد. لزوماً تعداد ماشین‌ها در مسیرهای مختلف برای یک کار برابر نیست. این ساختار در اغلب واحدهای تولیدی منعطف، که در آنها ماشین‌های کنترل عددی قادر به انجام عملیات متفاوتی از یک کار هستند، مشاهده می‌شود.

مسئله مورد مطالعه در این پژوهش، بسط گسترده‌تری از مسئله کارکارگاهی چند مسیره می‌باشد که دارای ویژگی بررسی میزان مصرف انرژی می‌باشد. بدین ترتیب هدف تعیین توالی عملیات به ماشین‌ها بگونه‌ای است تا مجموع وزنی زمان تحویل کارها و همچنین میزان صرف انرژی کارها، کمینه گردد. باید توجه داشت لحاظ فرض مذکور اگرچه موجب پیچیدگی بیشتر مسئله می‌گردد ولی شرایط را به محیط‌های تولیدی واقعی نزدیکتر می‌سازد. با توجه به پیچیدگی مسئله فوق و عدم امکان حل مسئله بصورت ریاضی حتی در ابعاد کوچک، استفاده از الگوریتم های فراابتکاری در این پژوهش مورد توجه خاص قرار خواهد گرفت و ما به ارائه‌ی یک مدل جدید غیرخطی عدد صحیح می پردازیم که این مدل به بررسی دو هدف کاهش دادن زمان تولید همه قطعات و همچنین کاهش میزان مصرف برق می پردازد. لذا از آنجا که مدل فوق یک مدل غیرخطی و از مرتبه سخت می‌باشد، حل آن با نرم افزار های حل دقیق غیر ممکن خواهد بود، لذا به حل مدل مطرح شده با الگوریتم فراابتکاری وال و الگوریتم ازدحام ذرات می پردازیم و نتایج بدست آمده را باهم مقایسه خواهیم کرد.

۲- روش شناسی پژوهش

نمونه‌هایی از مطالعاتی که پیش از این در زمینه کارکارگاهی به انجام رسیده، در ادامه بیان می‌شود. اگونی[2] (۲۰۰۴) با استفاده از یک الگوریتم یک جستجو بر مبنای الگوریتم ژنتیک و جستجوی ممنوعه حل مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی با محدودیت نگهداری و تعمیرات پرداخته است که در آن هدف کمینه‌سازی زمان تکمیل کل کارها است. کوبزن و استروسویچ[3] (۲۰۰۶) مسئله جریان کارگاهی دو ماشینه به منظور مینیمم کردن حداکثر زمان تکمیل کارها را با فرض اینکه مدت زمان نگهداری و تعمیرات ماشین‌ها به دوره‌ی شروع نگهداری و تعمیرات آنها بستگی دارد، مورد بررسی قرار داده‌اند. بیری[4] (۲۰۰۶) نیز مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی دو ماشینه وقتی ماشین اول برای یک فاصله زمانی داده شده در دسترس نیست با هدف کمینه‌سازی حداکثر زمان تکمیل کارها مورد مطالعه قرار داده است. رویز[5] وهمکارانش (۲۰۰۷) مسئله جریان کارگاهی با سه سیاست متفاوت در نگهداری و تعمیرات ماشین‌ها در نظر گرفته و شش روش ابتکاری و فراابتکاری برای حل آن ارائه نموده‌اند. زریب[6] وهمکارانش(۲۰۰۸)مسئله کارکارگاهی با در نظرگرفتن محدودیت دسترسی روی ماشین‌ها، مورد مطالعه قرار داده‌اند. آنها در مرحله اول یک الگوریتم ابتکاری برمبنای قاعده اولویت برای حل مسئله تخصیص ارائه کرده‌اند که می تواند با الگوریتم جستجوی ممنوعه جواب داده شود. در مرحله دوم یک الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله توالی ارائه شده است. یانگ[7] و همکارانش (۲۰۰۸) مسئله جریان کارگاهی دو ماشینه با این فرض که فعالیت نگهداری و تعمیرات باید در یک زمان ثابت بعداز

1. Aggoune, 2004
2. Kubzin & Strusevich, 2006
3. Breit, 2006
4. Ruiz, García-Díaz, & Maroto, 2007
5. Zribi, El Kamel, & Borne, 2008
6. Yang, Hsu, & Kuo, 2008

تکمیل حداقل یک تعداد ثابت از کارها انجام شود، با هدف کمینه‌سازی حداکثر زمان تولید مورد مطالعه قرارداده‌اند. نادری[۸] و همکارانش (۲۰۰۹) مسئله زمان‌بندی کارکارگاهی با زمان آماده سازی وابسته به توالی و محدودیت عدم دسترسی روی ماشین‌ها به منظور مینیم کردن حداکثر زمان تولید با استفاده از دو الگوریتم شبیه سازی تبرید و الگوریتم ژنتیک مورد مطالعه قرار داده‌اند. جباری زاده[۹] و همکارانش (۲۰۰۹) نیز مسئله جریا ن کارگاهی انعطاف پذیر با زمان آماده سازی وابسته به توالی و با لحاظ سه سیاست نگهداری و تعمیرات با استفاده از دو الگوریتم شبیه سازی تبرید و الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار داده‌اند. گریش[۱۰] و جواهر (۲۰۰۹)، مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی چندمسیره، توسط دو روش فراابتکاری، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم کلونی مورچگان، برای جایابی بهینه‌ی عملیات‌ها به ماشین‌ها با معیار زمان اتمام کار کمینه ارایه کرده اند، در پژوهش ایشان همزمان حل با دو الگوریتم فراابتکاری به حل مسئله می‌پردازد که در نتیجه رقابت به زمان حل بین الگوریتم های فراابتکاری برمی‌گردد.
مرادی[۱۱] و همکارانش (۲۰۱۰) مسئله کارکارگاهی انعطاف‌پذیر با در نظرگرفتن محدودیت دسترسی روی ماشین‌ها، مورد مطالعه قرار داده‌اند. آنها مسئله خود را با الگوریتم ژنتیک حل کردند. نادری[۱۲] و همکارانش (۲۰۱۱) نیز مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف پذیر با لحاظ نگهداری و تعمیرات دور های و با هدف حداقل کردن حداکثر زمان تولید مورد مطالعه قرار داده‌اند. آنها دو روش فراابتکاری الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله مذکور ارائه کرده‌اند. حمیدرضا گلمکانی و علی بیرجندی[۱۳] (۲۰۱۴) به بررسی مسئله کارکارگاهی چند مسیره و با ارائه یک الگوریتم ابتکاری با هدف کمینه سازی زمان اتمام تمام کارها، با استفاده از الگوریتم ابتکاری انتقال گلوگاه، به ارزیابی ۴۳مسئله مشهور در این زمینه می پردازند. حمیدرضاگلمکانی و علی نمازی[۱۴] (۲۰۱۴) مدل جدیدی را برای کارکارگاهی چند مسیره با لحاظ تعمیرات ونگهداری دورهای ثابت و همچنین تعمیرات و نگهداری وابسته به عمر ماشین‌ها، معرفی و به حل آن با روش فراابتکاری سیستم ایمنی مصنوعی پرداختند. ایشان در این پژوهش به بررسی مسائل زمان‌بندی کارکارگاهی چند مسیره در دو حالت با لحاظ کردن تعمیرات و نگهداری و بدون لحاظ کردن آن پرداخته شده است. در نهایت، تعریف مسئله‌ی زمان‌بندی کارکارگاهی چند مسیره با لحاظ تعمیرات و نگهداری انعطاف‌پذیر نیز معرفی و مدل ریاضی آن بیان می‌شود. نتایج حاصل از برتری الگوریتم پیشنهادی بر روی تعدادی از مسائل طراحی شده نیز در انتهای آورده شده‌است.
سدیکوتی و پسورا[۱۵] (۲۰۱۹) روش‌هایی را برای زمان‌بندی در محیط تولید از جمله تولید سلولی پیشنهاد کرده‌اند. با این حال، مطالعات بسیار کمی در زمینه تولید سلولی با تمرکز بر به حداقل رساندن طول عمر، جریان و مصرف مورد بررسی قرار گرفته است. لذا محققان پیشنهاد می کنند الگوریتم ژنتیک چند هدفه نامغلوب برای برنامه‌ریزی کارآمد انرژی به دلیل تمرکز بر شیوه‌های تولید پایدار و همچنین تأثیرات زیست محیطی اهمیت پیدا کند. همچنین محققان یادآور می شوند که عملکرد عملیاتی سیستم های تولید سلولی بستگی به درصد از دست رفته عملیات و روش برنامه‌ریزی دارد. عابدینی[۱۶] و همکاران (۲۰۲۰) ناهماهنگی‌هایی در برنامه‌ریزی فروشگاه جریان بین سه هدف به ترتیب به حداقل رساندن کل زمان تکمیل، حداکثر زمان اتمام و واریانس زمان اتمام را بررسی کردند. تجزیه و تحلیل کنترل آماری فرآیندایشان نشان داد که توازن مبادله، کنترل بهتری بر اهداف فردی از نظر متوسط سیستم های تولید چابک و قابل تنظیم مجدد برای مقابله با محصولات و خانواده های مختلف محصولات ایجاد می‌کند. برای طراحی و بهینه سازی سیستم‌های تولید و همچنین انتخاب مطابقت محصول مطلوب، روشهای تجزیه و تحلیل محصول مورد نیاز است. خانواده‌های مختلف محصولات ممکن است از نظر تعداد و ماهیت اجزاء تفاوت زیادی

7. Naderi, Zandieh, & Fatemi Ghomi, 2009
8. Jabbarizadeh, Zandieh, & Talebi, 2009
9. Girish & Jawahar, 2009
10. Moradi, Fatemi Ghomi, & Zandieh, 2010
11. Naderi, Zandieh, & Aminnayeri, 2011
12. Golmakani & Birjandi, 2014
13. Golmakani & Namazi, 2014
14. Saddikuti & Pesaru, 2019
15. Abedini, Li, Badurdeen, & Jawahir, 2020

داشته باشند. این واقعیت مانع از مقایسه کارآمد و انتخاب ترکیبات مناسب خانواده محصول برای سیستم تولید شد و روش جدیدی برای تجزیه و تحلیل موجود پیشنهاد شده است. فرجی امیری و بهرامیان[۱۷] (۲۰۲۱)در بحث کارهای کارگاهی که درآن به بررسی کارکارگاهی انعطاف پذیر با وجود حالت چند سرعته ماشین آلات و میزان مصرف مختلف می پردازد. در جدول ۱ به بررسی مقایسه پژوهاشهای انجام شده می پردازیم و مقایسه پژوهش حاضر را در انتهای جودل نشان خواهیم داد.

جدول شماره (۱): مقایسه پژوهش های انجام شده کار کارگاهی

نام محققان	سال	نوع مساله	تابع هدف	روش حل
اگونی	۲۰۰۴	مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی با محدودیت نگهداری و تعمیرات	الگوریتم ژنتیک و جستجوی ممنوعه	کمینه‌سازی زمان تکمیل کل کارها
بیری	۲۰۰۶	مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی دو ماشینه	حل دقیق	کمینه‌سازی حداکثر زمان تکمیل کارها
رویز وهمکاران	۲۰۰۷	مسئله جریان کارگاهی	روش ابتکاری	کمینه‌سازی حداکثر زمان تکمیل کارها
زریب و همکاران	۲۰۰۸	مسئله کارکارگاهی با در نظرگرفتن محدودیت دسترسی روی ماشین‌ها	الگوریتم جستجوی ممنوعه ، الگوریتم ژنتیک	کمینه‌سازی حداکثر زمان تکمیل کارها
یانگ	۲۰۰۸	مسئله جریان کارگاهی دو ماشینه	حل دقیق	کمینه‌سازی حداکثر زمان تولید
نادری و همکارانش	۲۰۰۹	مسئله زمان‌بندی کارکارگاهی با زمان آماده سازی وابسته به توالی	الگوریتم شبیه سازی تبرید و الگوریتم ژنتیک	مینیم کردن حداکثر زمان تولید
جباری زاده و همکارانش	۲۰۰۹	مسئله جریا ن کارگاهی انعطاف پذیر با زمان آماده سازی وابسته به توالی	الگوریتم شبیه سازی تبرید و الگوریتم ژنتیک	کمینه‌سازی حداکثر زمان تکمیل کارها
گریش و جواهر	۲۰۰۹	مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی چندمسیره	الگوریتم ژنتیک و الگوریتم کلونی مورچگان	کمینه‌سازی حداکثر زمان تکمیل کارها
مرادی و همکارانش	۲۰۱۰	مسئله کارکارگاهی انعطاف‌پذیر با در نظرگرفتن محدودیت دسترسی روی ماشین‌ها	الگوریتم ژنتیک	کمینه‌سازی حداکثر زمان تکمیل کارها
نادری و همکارانش	۲۰۱۱	مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف پذیر با لحاظ نگهداری و تعمیرات	الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک	حداقل کردن حداکثر زمان تولید
حمیدرضا گلمکانی و علی بیرجندی	۲۰۱۴	مسئله کارکارگاهی چند مسیره	الگوریتم ابتکاری انتقال گلوگاه	کمینه سازی زمان اتمام تمام کارها
حمیدرضاگلمکانی و علی نمازی	۲۰۱۴	مسئله کارکارگاهی چند مسیره با لحاظ تعمیرات ونگهداری دورهای ثابت	الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی	کمینه‌سازی حداکثر زمان تکمیل کارها
سدیکوتی و پسورا	۲۰۱۹	زمان‌بندی در محیط تولید	الگوریتم ژنتیک چند هدفه نامغلوب	حداقل رساندن طول عمر، جریان و مصرف
عابدینی و همکاران	۲۰۲۰	مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی چندمسیره	الگوریتم ژنتیک چند هدفه نامغلوب	حداقل رساندن کل زمان تکمیل، حداکثر زمان اتمام و واریانس زمان اتمام
فرجی امیری و بهرامیان	۲۰۲۱	مسئله کارکارگاهی انعطاف پذیر	الگوریتم ابتکاری	حداقل رساندن کل زمان تکمیل ماشین
پژوهش حاضر	۲۰۲۳	مسئله کارکارگاهی سبز با در نظر گرفتن مصرف انرژی	الگوریتم جدید فراابتکاری وال و الگوریتم ازدحام ذرات	کاهش زمان تکمیل با در نظر گرفتن مصرف انرژی

16. Amiri & Behnamian, 2020

در این پژوهش به دنبال مدل جدیدی هستیم که می‌تواند به صورت مستقیم در صنایعی که شامل تولید کارگاهی هستند مورد استفاده قرار گیرد. همچنین این مدل به عنوان اولین مدل مطرح شده در سیستم سبز کار کارگاهی مورد بررسی است و می تواند شروع جدیدی برای سیستم های بعدی باشد. یک مدل جدیدتر که فرضیه‌ی مطرح شده در مدل پیشین را به مدل واقعی در صنعت نزدیک‌تر می‌کند مورد بررسی قرار می گیرد، این مدل می تواند در سیستم های تولیدی کارگاهی که شرایط فوق الذکر مطرح شده در مدل را دارند به طور مستقیم مورد بررسی قرار گیرد. و همچنین روش حل جدید الگوریتم فراابتکاری وال با کارایی بالا جهت حل بهینه مسئله بکار گرفته شده و با الگوریتم ازدحام ذرات نتایج مقایسه شده است.

الف) تعاریف و فرضیه ها و علائم

در تمامی مسائل زمان بندی، تعدادی کار و تعدادی ماشین محدود در نظر گرفته می‌شوند. n تعداد کارها و m تعداد ماشین ها بوده و i اندیس کارها و j اندیس مربوط به ماشین‌ها می‌باشد. در مسائل زمان‌بندی فرضیه های مختلفی برای ماشین‌ها و کارها در نظر گرفته شده که در ادامه به بررسی آنها می پردازیم.

- هیچ ماشینی در یک زمان نمی‌تواند بیش از یک کار را پردازش نماید و هر کار که فرآیندش روی ماشین شروع شود تا اتمام دسته ی مورد نظر آن فرآیند روی همان ماشین قرار دارد.
- زمانی که عملیات یک کار روی ماشین شروع می‌شود، تا اتمام آن عملیات، عملیات دیگری روی آن ماشین صورت نمی گیرد مگر اینکه در مسئله حالت وقفه تعریف کنیم.
- ماشین‌ها در طول فرآیند می توانند دچار بیکاری شوند.
- هیچ ماشینی در طول فرآیند خراب نمی‌شود و همواره در دسترس است.
- از هر ماشین فقط یک عدد وجود دارد و اجازه نمی دهیم که یک کار برای پردازش ماشینی را از بین ماشین‌ها انتخاب کند مگر اینکه فرض وجود ماشین‌های موازی را تعریف کنیم.
- تمام کارها شناخته شده‌اند و قبل از زمان‌بندی سازماندهی لازم برای آنها صورت گرفته است.
- تمام کارها از نظر ارزش با یکدیگر برابر هستند و تمام آنها باید فرآیندهای خود را به اتمام برسانند.
- هر کاری باید به ماشین مربوطه در اولین زمان ممکن تخصیص یابد تا فرآیندش شروع شود.
- زمآنهای فرآیند مستقل از زمان‌بندی و نحوه قرار گرفتن کارها در ترتیب مربوطه هستند.
- اگر یک کار شامل عملیات مختلفی روی ماشین‌های مختلف باشد، هیچگاه نمی‌توانیم دو عملیات پشت سر هم آن کار را به طور همزمان اجرا کنیم
- زمانی که جهت حمل و نقل کارها بین ماشین‌ها صرف می‌شود قابل صرف نظر کردن است یا به عنوان بخشی از زمان فرایند آن کار روی ماشین قبلی فرض می‌شود.
- زمان آماده سازی ماشین‌ها برای کارهای متفاوت قابل صرف نظر کردن است و یا به صورت بخشی از فرآیند تعریف می‌شود.

ب) مدل ریاضی

مدل ریاضی مسئله زمان‌بندی کار کارگاهیِ چند مسیره، یک مدل از نوع برنامه‌ریزی غیر خطی عدد صحیح می‌باشد. فرض کنید n معرف تعداد کارها و m معرف تعداد ماشین‌ها باشد. برای انجام هر کار i چندین مسیر وجود دارد. تعداد کل مسیرهای کار i را با r_i و تعداد کل عملیات کار i در مسیر r را با N_{ir} نشان می‌دهیم. A_{irk} معرف ماشین مورد نیاز برای انجام عملیات k ام از کار i ام در مسیر r ام و t_{irkj} زمان مورد نیاز برای انجام عملیات k ام از کار i ام در مسیر r ام روی ماشین j ام است. ECi هزینه انرژی الکتریکی و T_{ikj} زمان مورد نیاز ماشین j برای عملیات k از کار i است. متغیرهای تصمیم‌گیریِ زمان شروع و ختم عملیات k ام از کار i ام در مسیر r ام را به ترتیب با S_{irk} و E_{irk} نشان می‌دهیم. جهت مدل‌سازی مسئله، سه نوع متغیر صفر و یک به شرح زیر تعریف می‌شود:

اگر عملیات q ام از کار p ام در مسیر o زودتر از عملیات k ام از کار i ام در مسیر r انجام شود مقدار یک و در غیر اینصورت صفر

$$Z_{poqirk} = \begin{cases} ۱ \\ ۰ \end{cases}$$

عملیات k ام از کار i ام در مسیر r ام به ماشین $j = A_{irk}$ ام اختصاص یابد مقدار یک و در غیر اینصورت صفر

$$Y_{irkj} = \begin{cases} ۱ \\ ۰ \end{cases}$$

اگر کار i به مسیر r اختصاص یابد مقدار یک و در غیر اینصورت صفر

$$X_{ir} = \begin{cases} ۱ \\ ۰ \end{cases}$$

مدل کامل مسئله زمان‌بندی کار کارگاهیِ چند مسیره بصورت زیر خواهد بود:

$$\min Z = \sum_{i=1}^{n} TEC_i$$ رابطه (۱)

$$\sum_{r=1}^{r_i} X_{ir} = 1 \qquad (i = 1.2. \dots . n)$$ رابطه (۲)

$$S_{irk} \geq E_{irk-1} \qquad (i = 1.2. \dots . n; \quad r = 1.2. \dots r_i; \quad k = 2.3. \dots . N_{ir})$$ رابطه (۳)

$$S_{irk}X_{ir} + t_{irkj}X_{ir} \leq C_{max} \; (i = 1.2. \dots . n; \quad r = 1.2. \dots r_i; \quad k = N_{ir}; \quad j = A_{irk})$$ رابطه (۴)

$$E_{irk} - S_{irk} = t_{irkj}X_{ir} \; (i = 1.2. \dots . n; \quad r = 1.2. \dots r_i; \quad k = 1.2.3. \dots . N_{ir}; \quad j = A_{irk})$$ رابطه (۵)

$$\sum_{kj} Y_{irkj} = N_{ir}X_{ir} \qquad (i = 1.2. \dots . n; r = 1.2. \dots r_i)$$ رابطه (۶)

$$\left(S_{irk} - S_{poq} - t_{poqj}\right)Y_{irkj}Y_{poqj}Z_{poq.irk} \geq 0 \qquad i \neq p. \;\; j = A_{irk} = A_{poq}$$ رابطه (۷)

$$\sum_{j,r,k} T_{i.k.j} \times \; Ec_i \times \; Z_{i.j.r.k} = TEC_i \qquad (i = 1.2. \dots . n)$$ رابطه (۸)

$$\left(S_{poq} - S_{irk} - t_{irkj}\right)Y_{irkj}Y_{poqj}\left(1 - Z_{poq.irk}\right) \geq 0 \;\; i \neq p. \;\; j = A_{irk} = A_{poq}$$ رابطه (۹)

$$E_{irk} \geq 0 \, , S_{irk} \geq 0 \qquad (i = 1.2. \dots . n; \quad r = 1.2. \dots . r_i; \quad k = 1.2. \dots . N_{ir})$$ رابطه (۱۰)

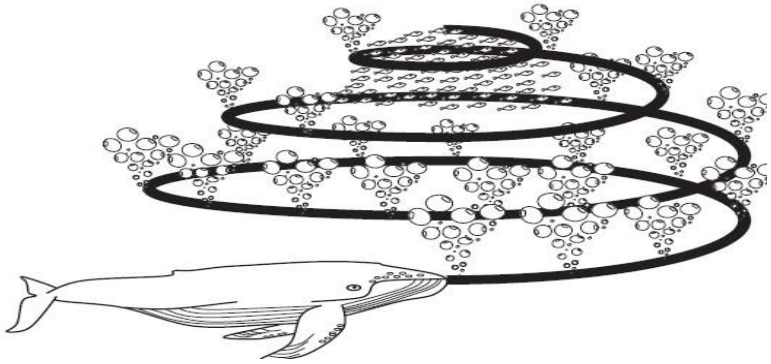
$$X_{ir} \; . \;\; Y_{irkj} \; . \;\; Z_{poq.irk} \in \{0.1\}$$ رابطه (۱۱)

مجموعه معادلات (۲)، صرفاً یک مسیر از میان مسیرهای مختلف را به هرکار تخصیص می‌دهد. مجموعه نامعادلات (۳) موجب می‌شود تا هر یک از عملیات تنها وقتی شروع شود که عملیات قبلی‌اش تکمیل شده باشد. مجموعه نامعادلات (۴) موجب می‌شود تا زمان اتمام عملیات آخر از هر یک از کارها کمتر یا مساوی با زمان انجام کلیه کارها، C_{max}، باشد. مجموعه معادلات (۵) تضمین می‌کند تا بین زمان شروع و زمان تکمیل یک کار هیچ توقفی صورت نگیرد. مجموعه معادلات (۶) ماشین‌های مورد نیاز برای تکمیل عملیات کارها در یک مسیر مشخص شده را، تعیین می‌کند. مجموعه نامعادلات (۷) و (۹) با هم تضمین می‌کنند که دو عملیات مختلف از دو کار مختلف بر روی یک ماشین خاص بصورت همزمان صورت نگیرد. معادله (۸) به هزینه ی وابسته به زمان و انرژی صرف شده به ازای هر ماشین ساعت را محاسبه می‌کند و در نهایت (۱۰) و (۱۱) نیز معرف نوع متغیرهای تصمیم‌گیری هستند.

ج) روش حل: الگوریتم بهینه سازی وال[۱۸]

وال‌ها موجوداتی فوق العاده هستند. آنها به عنوان بزرگترین پستانداران جهان شناخته می‌شوند. وال بالغ می‌تواند تا ۳۰ متر طول و ۱۸۰ تن وزن داشته باشد. گونه اصلی مختلف از این پستانداران غول پیکر مانند قاتلان، مینک، سای، گاو، راست باله و آبی وجود دارد. وال‌ها بیشتر به عنوان شکارچیان در نظر گرفته می‌شوند. آنها هرگز نمی‌خوابند زیرا باید از سطح اقیانوس ها نفس بکشند. درحقیقت، نیمی از مغز فقط میخوابد. نکته جالب در مورد وال‌ها این است که آنها به عنوان حیوانات بسیار باهوش و دارای احساسات در نظر گرفته می‌شوند. مطابق گفته هاف ون دره گچ[۱۹]، وال ها در مناطقی از مغز خود مانند سلولهای دوقلو، سلولهای مشترکی دارند. این سلول ها مسئول قضاوت، احساسات و رفتارهای اجتماعی در انسانها هستند. به عبارت دیگر سلولهای چرخش ما را از موجودات دیگر متمایز می‌کند. وال ها دو برابر از این سلول ها نسبت به انسان بالغ دارند که عامل اصلی هوشمندی آنهاست. ثابت شده است که وال همانطور که انسان می‌تواند فکر کند، یاد بگیرد، قضاوت کند، ارتباط برقرار کند و حتی احساساتی شود، اما بدیهی است که از سطح هوشمندی بسیار پایین تری برخوردار است. مشاهده شده است که وال‌ها (غالباً والهای قاتل) قادر به توسعه گویش خود هستند. نکته جالب دیگر رفتار اجتماعی وال‌ها است. آنها به تنهایی یا گروهی زندگی می کنند. البته، آنها بیشتر درگروه مشاهده می‌شوند. بعضی از گونه های آنها (به عنوان مثال وال‌های قاتل) در تمام مدت زندگی خود می‌توانند در یک خانواده زندگی کنند. یکی از بزرگترین وال‌ها، وال کوهان دار[۲۰] است. یک وال کوهان دار بزرگسال تقریبا به اندازه یک اتوبوس مدرسه است. طعمه‌های مورد علاقه آن‌ها گله ماهی کریل و کوچک هستند. جالب ترین چیز در مورد وال کوهان دار نحوه شکار خاص او است. این فرایند یافتن غذا روش تغزیه شبکه حبابی نامیده می‌شود. در واقع وال ترجیح می‌دهد دسته ماهی های کوچک نزدیکتر به سطح اب را شکار کند. مشاهده شده است که این روش تغذیه با ایجاد حباب های متمایز دایره ای انجام می‌شود. وال‌ها حدود ۱۲ متر به سمت پایین شیرجه رفته و با ایجاد حباب هایی به شکل مارپیچی در اطراف طعمه به سمت سطح شنا می‌کنند، دانشمندان دو مانور مرتبط با شبکه حبابی را مشخص کرده و آن‌ها را مارپیچ به سمت بالا [۲۱] و حلقه های دوتایی[۲۲] نامیدند. این روش تغذیه روش خاصی است که تنها در وال‌ها دیده شده است. در الگوریتم وال مانور مارپیچ شبکه‌ی حبابی به صورت ریاضی برای انجام بهینه سازی مدل شده است (Mirjalili & Lewis, 2016).

17. Whale Optimization Algorithm (WOA)
18. HafVan
19. Megaptera novaeangliae
20. Upward spirals
21. Double loops



شکل شماره (۱): نحوه‌ی شکار کردن طعمه توسط وال کوهان دار

الگوریتم بهینه سازی وال با مجموعه ای از جواب های تصادفی شروع می‌شود. در هر مرحله عامل‌های جستجو موقعیت خود را باتوجه به انتخاب تصادفی عامل جستجو یا بهترین جواب بدست آمده قبلی به روز می‌کنند. برای بدست آوردن به ترتیب فاز جستجو و استخراج پارامتر a از ۲ به ۰ کاهش میابد. برای به روز رسانی عامل های جستجو یک عامل جستجو به طور تصادفی زمانیکه $|\vec{A}| < 1$ است انتخاب می‌شود، در حالیکه بهترین جواب زمانیکه $|\vec{A}| > 1$ است انتخاب می‌شود. با توجه به مقدار p الگوریتم بهینه سازی وال می‌تواند بین انتخاب مارپیچی یا دورانی سوییچ کند. سرانجام الگوریتم با ارضا شدن معیار توقف پایان میابد.

```
Initialize the whales population Xi (i = 1, 2, ..., n)
Calculate the fitness of each search agent
X*=the best search agent
while (t < maximum number of iterations)
    for each search agent
    Update a, A, C, l, and p
        if1 (p<0.5)
            if2 (|A| < 1)
                Update the position of the current search agent by the Eq. (2.1)
            else if2 (|A| ≥ 1)
                Select a random search agent (X_rand)
                Update the position of the current search agent by the Eq. (2.8)
            end if2
        else if1 (p≥0.5)
                Update the position of the current search by the Eq. (2.5)
        end if1
    end for
    Check if any search agent goes beyond the search space and amend it
    Calculate the fitness of each search agent
    Update X* if there is a better solution
    t=t+1
end while
return X*
```

شکل شماره (۲): شبه کد الگوریتم وال

شبه کد الگوریتم وال در شکل ۲ ارائه شده است. از نقطه نظر تئوری، الگوریتم وال می تواند به عنوان یک بهینه ساز کلی در نظر گرفته شود زیرا این امر شامل قابلیت اکتشاف و بهره برداری است. علاوه بر این، مکانیسم پیشنهادی این الگوریتم فضای جستجو را در همسایگی بهترین راه حل تعریف می‌کند و به سایر عوامل جستجو اجازه می دهد تا از بهترین سابقه موجود در آن دامنه بهره برداری کنند. تنوع سازگار بردار جستجو A به الگوریتم وال اجازه میدهد تا به طور هموار بین اکتشاف و بهره برداری حرکت کند: با کاهشA، برخی از تکرارها به کاوش اختصاص می یابد و مابقی به بهره برداری اختصاص می یابد الگوریتم وال تنها دو پارامتر اصلی داخلی را برای تنظیم A و C در بر می گیرد.

۳- نتایج و بحث

در این قسمت از پژوهش، مسئله زمان‌بندی کارکارگاهی چند مسیره با هدف تعیین توالی انجام کارها بگونه‌ای که زمان اتمام کارها حداقل گردد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. هر کار می‌تواند از مسیرهای متفاوتی عبور کرده و به اتمام رسد. تعداد ماشین‌هایی که یک کار در مسیرهای مختلف با آنها مواجه می‌شود لزوماً برابر نیست. به عبارت دیگر، ممکن است در یک مسیر، کارها، با عبور از دو ماشین (هر ماشین یک عملیات) به اتمام رسد ودر مسیری دیگری همان کار با عبور از چهار ماشین (هر ماشین یک عملیات و جمعاً چهار عملیات) انجام شود. واضح است که هر ماشین تنها یک عملیات در هر لحظه می‌تواند انجام دهد.

در زیر یک نمونه مثال از جداول (Golmakani & Birjandi, 2014) آورده شده. همانطور که مشاهده می‌شود، مسئله زیر دارای۷ کار می‌باشد. هر کدام از این۷کار می‌تواند از دو مسیر۱و۲ حرکت کرده و پردازش شوند. هرکدام از این مسیرها شامل چند عملیات می باشند که با Oi نشان داده شده‌اند. هر عملیات شامل کار توسط یک ماشین است که در جدول زیر شماره‌ی هر کدام از ماشین‌ها و زمان مورد نیاز پردازش کار مربوطه برروی آن ماشین آورده شده است .

جدول شماره (۲): اطلاعات مسئله کارکارگاهی چند مسیره

LRJSP: 7. 7. 17											
		O1		O2		O3		O4		O5	
J1	route 1	M1	21	M4	26	M2	17				
	route 2	M3	19	M5	13	M6	15	M7	18		
J2	route 1	M2	35	M6	32	M3	25	M5	23		
	route 2	M5	21	M7	36	M4	25	M6	15	M1	13
J3	route 1	M4	23	M3	32	M2	18	M6	14		
	route 2	M7	35	M2	15	M1	21	M4	18		
	route 3	M6	25	M7	33	M4	27				
J4	route 1	M1	26	M5	42	M4	27				
	route 2	M3	21	M5	24	M2	22	M3	20	M1	14
J5	route 1	M2	37	M4	26	M6	43				
	route 2	M5	32	M3	25	M1	19	M4	26		
	route 3	M4	21	M7	13	M5	28	M3	32	M1	12
J6	route 1	M6	33	M2	36						
	route 2	M7	12	M5	24	M4	25				
	route 3	M3	24	M2	18	M4	13	M3	16		
J7	route 1	M4	22	M2	14						
	route 2	M5	18	M1	21						

مطابق جدول شماره ۲ دارای هفت کار می باشیم. هر کار از چند مسیر قابل انجام می‌باشد که زمان پردازش مخصوص به خود را داراست، مثلا کار یک دارای دو مسیر می‌باشد که مسیر اول در اولین پردازش بر روی ماشین M1 قرار گرفته که زمان این پردازش ۲۱ واحد زمانی می‌باشد، همچنین این پردازش یک هزینه نیز دارا ست ، این هزینه در جدول جداگانه هزینه هریک از ماشین آلات اعلام شده است. به این ترتیب، برای تمام هفت کار از هر مسیر برای هر پردازش، ماشین‌های مختلف با زمان و هزینه متفاوتی روبه رو خواهیم بود. در این پایان نامه به حل این مساله خواهیم پرداخت. با توجه به تعریف مسئله ی زمان‌بندی کارکارگاهیِ چند مسیره به دو زیر مسئله تخصیص مسیر (تخصیص مسیر به کارها) و تعیین توالی عملیات (تعیین توالی پردازش عملیات کارها روی هر ماشین) تجزیه می‌شود که زیر مسسله تخصیص مسیرها به کارها، به دلیل انعطاف‌پذیری ایجاد شده در کارکارگاهی به وجود می‌آید که شدیداً بر پیچیدگی مسئله می افزاید. هدف کمینه سازی حداکثر زمان تکمیل با سایر مفروضات زیر است.

- هر ماشین در هر لحظه تنها می‌تواند یک عملیات را پردازش کند.
- همه‌ی ماشین‌ها از زمان صفر در دسترس اند و خراب نمیشوند.
- انبار پای کار، مجاز و ظرفیت آن نامحدود است.
- زمانهای آماده سازی بین عملیات ناچیز است یا شامل زمان پردازش می‌شود و زمان حمل و نقل قابل چشم پوشی است.
- قطع کردن عملیات مجاز نیست.

جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های پیشنهاد شده، در این قسمت از یک نمونه مسئله مطابق جدول ۱ از مسائل (Golmakani & Birjandi, 2014) و توسط الگوریتم های وال و ازدحام ذرات حل شده است. برای کدنویسی و اجرای الگوریتم بکار گرفته شده از برنامه متلب ۲۰۱۸ استفاده شده است. پردازشگر اجرا کننده الگوریتم فرابتکاری، یک کامپیوتر با مشخصات اینتل ۷ هسته ۳.۲ گیکا هرتز و رم ۸ گیگا بایت می باشد.

الف) حل مسئله با الگوریتم فراابتکاری وال

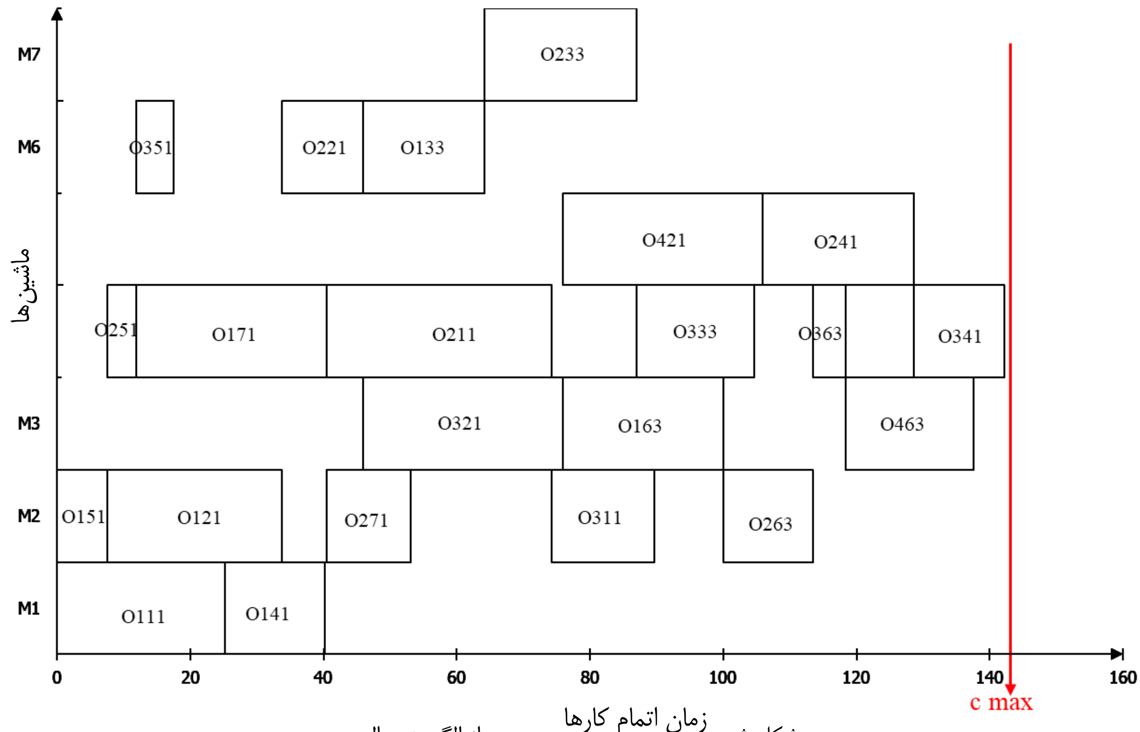
نتایج حاصل از حل الگوریتم وال به صورت یک فایل اکسل می‌باشد که در جدول شماره ۳ آمده است.

جدول شماره (۳): خروجی اکسل حاصل از الگوریتم وال

J	R	O	M	St	Ft
۵	۱	۱	۲	۰	۸
۵	۱	۲	۴	۸	۱۲
۵	۱	۳	۶	۱۲	۱۷
۵	۱	۴	۹	۱۷	۱۷
۵	۱	۵	۹	۱۷	۱۷
۲	۱	۱	۲	۸	۳۴
۲	۱	۲	۶	۳۴	۴۶
۲	۱	۳	۳	۴۶	۷۶
۲	۱	۴	۵	۷۶	۱۰۶
۲	۱	۵	۹	۱۰۶	۱۰۶
۷	۱	۱	۴	۱۲	۴۰
۷	۱	۲	۲	۴۰	۵۳
۷	۱	۳	۹	۱۰۶	۱۰۶
۱	۱	۱	۱	۰	۲۵
۱	۱	۲	۴	۴۰	۷۴
۱	۱	۳	۲	۷۴	۹۰
۱	۱	۴	۹	۱۰۶	۱۰۶
۳	۳	۱	۶	۴۶	۶۴
۳	۳	۲	۷	۶۴	۸۷

۳	۳	۳	۴	۸۷	۱۰۵
۳	۳	۴	۹	۱۰۶	۱۰۶
۶	۳	۱	۳	۷۶	۱۰۰
۶	۳	۲	۲	۱۰۰	۱۱۳
۶	۳	۳	۴	۱۱۳	۱۱۸
۶	۳	۴	۳	۱۱۸	۱۳۸
۴	۱	۱	۱	۲۵	۴۰
۴	۱	۲	۵	۱۰۶	۱۲۹
۴	۱	۳	۴	۱۲۹	۱۴۲
۴	۱	۴	۹	۱۴۲	۱۴۲
۴	۱	۵	۹	۱۴۲	۱۴۲

به عنوان مثال برای سطر اول خواهیم داشت: کار شماره ۵ ، مسیر شماره ۱ را انتخاب می‌کند، این کار در عملیات۱ قرار دارد و از ماشین ۲ استفاده می‌کند، زمان شروع کار آن روی ماشین ۲ در زمان ۰ و زمان پایان آن روی همان ماشین زمان ۸ میباشد.



شکل شه ... ب از الگوریتم وال

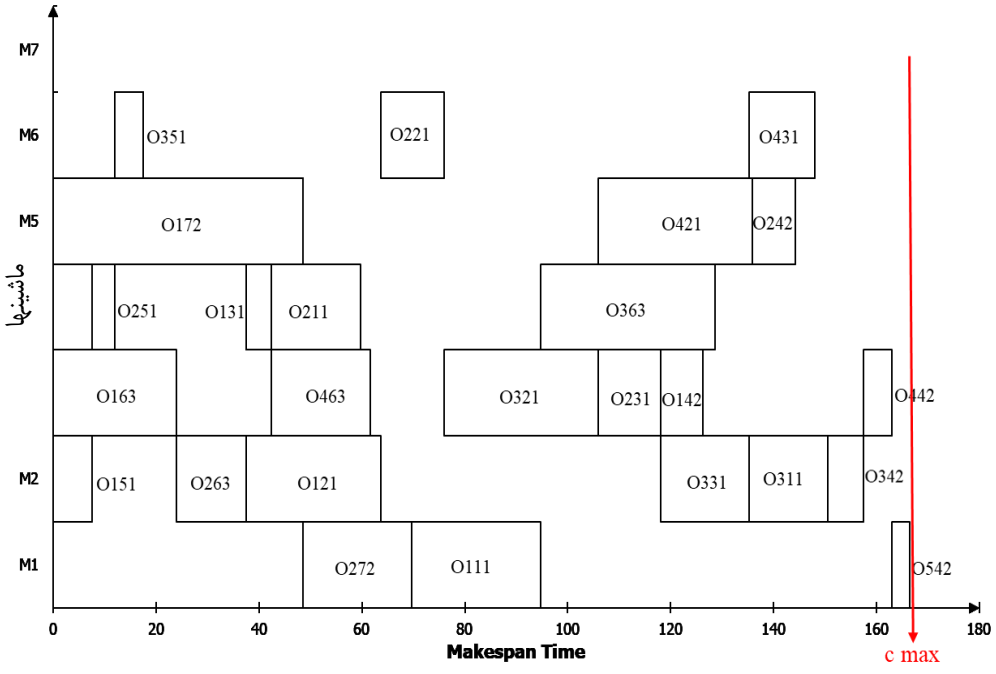
حل مسئله با الگوریتم فراابتکاری ازدحام ذرات: نتایج حاصل از حل الگوریتم ازدحام ذرات به صورت یک فایل اکسل می‌باشد که در جدول شماره ۴ آمده است (Nabovati, Haleh, & Vahdani, 2020).

جدول شماره (۴): خروجی اکسل حاصل از الگوریتم ازدحام ذرات

J	R	O	M	St	Ft
۵	۱	۱	۲	۰	۸
۵	۱	۲	۴	۸	۱۲
۵	۱	۳	۶	۱۲	۱۷
۵	۱	۴	۹	۱۷	۱۷
۵	۱	۵	۹	۱۷	۱۷
۶	۳	۱	۳	۰	۲۴

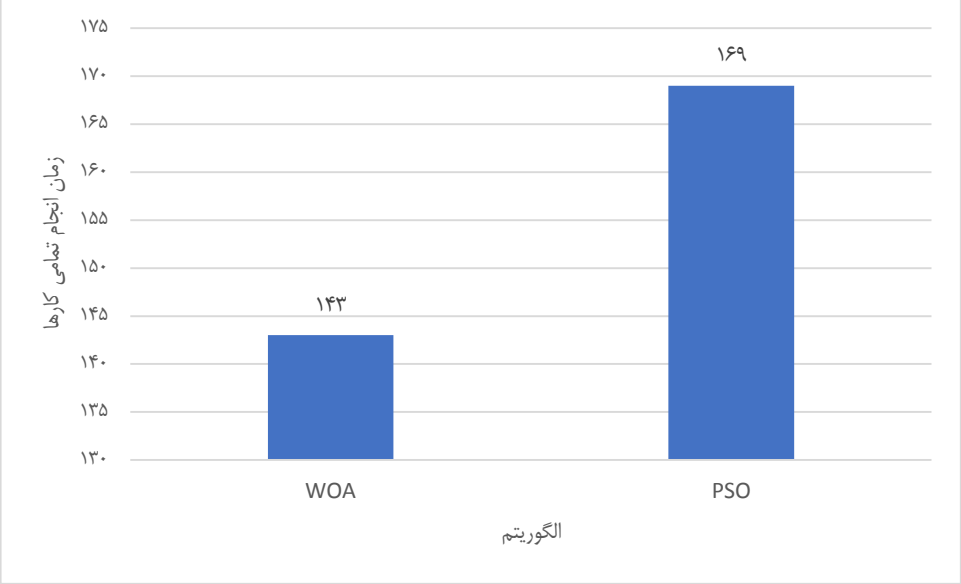
۶	۳	۲	۲	۲۴	۳۸
۶	۳	۳	۴	۳۸	۴۲
۶	۳	۴	۳	۴۲	۶۲
۷	۲	۱	۵	۰	۴۹
۷	۲	۲	۱	۴۹	۷۰
۷	۲	۳	۹	۷۰	۷۰
۷	۲	۴	۹	۷۰	۷۰
۲	۱	۱	۲	۳۸	۶۴
۲	۱	۲	۶	۶۴	۷۶
۲	۱	۳	۳	۷۶	۱۰۶
۲	۱	۴	۵	۱۰۶	۱۳۶
۲	۱	۵	۹	۱۳۶	۱۳۶
۳	۱	۱	۴	۴۲	۶۰
۳	۱	۲	۳	۱۰۶	۱۱۸
۳	۱	۳	۲	۱۱۸	۱۳۵
۳	۱	۴	۶	۱۳۵	۱۴۸
۱	۱	۱	۱	۷۰	۹۵
۱	۱	۲	۴	۹۵	۱۲۹
۱	۱	۳	۲	۱۳۵	۱۵۱
۱	۱	۴	۹	۱۵۱	۱۵۱
۴	۲	۱	۳	۱۱۸	۱۲۶
۴	۲	۲	۵	۱۳۶	۱۴۴
۴	۲	۳	۲	۱۵۱	۱۵۷
۴	۲	۴	۳	۱۵۷	۱۶۳
۴	۲	۵	۱	۱۶۳	۱۶۶

شکل شماره (۴) توالی عملیات جواب های حاصل از الگوریتم ازدحام ذرات



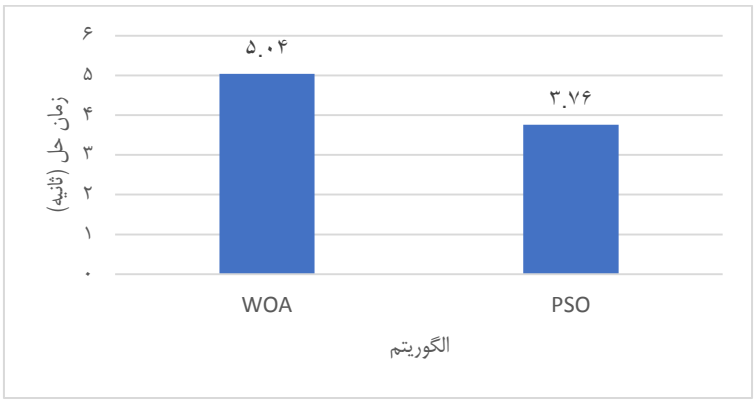
زمان اتمام کارها

در نمودارهای گان بالا زمان اتمام کارها برای تمامی ماشین ها در هردو الگوریتم با رنگ قرمز مشخص شده است. زمان اتمام کارها با الگوریتم ازدحام ذرات پرندگان برابر با ۱۶۹ می باشد در حالیکه زمان اتمام کارها با الگوریتم وال برابر با ۱۴۲ است. خط عمودی نمودار گان شماره ماشین و خط افقی زمان انجام کارها را نشان می دهد. روی هر یک از بخش های توالی نشان داده شده در نمودار گان شماره آن توالی نوشته شده است، برای مثال برای ماشین ۲، O_{151} به این معنی است که عملیات ۱ مربوط به کار ۵ از مسیر ۱ حرکت می‌کند، این عملیات روی ماشین ۲ در لحظه ۰ شروع شده و در زمان ۸ به پایان می‌رسد. به همین ترتیب برای سایر بخش ها می‌توان توالی عملیات را تفسیرکرد.



شکل شماره (۵): مقایسه زمان اتمام تمامی کارها با در نظر گرفتن مصرف انرژی در دو الگوریتم WOA و PSO

شکل ۵ مقدار متوسط حاصل از حل با دو روش را نشان میدهد. از آنجا که تابع هدف مسئله از نوع مینیمم سازی است، هر چه مقدار تابع هدف کمتر باشد، به جواب بهتری رسیده‌ایم. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار تابع هدف حاصل از الگوریتم وال پیشنهادی از مقدار کمتری نسبت به حل با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات برخودار است که این نشان دهنده توانایی بالاتر الگوریتم پیشنهادی در حل مسائل می‌باشد.



شکل شماره (۶): مقایسه زمان حل مسئله توسط دو الگوریتم WOA و PSO

در شکل ۶ متوسط زمان صرف شده برای حل توسط الگوریتم وال و الگوریتم ازدحام ذرات پیشنهادی باهم مقایسه شده است . این نمودار به وضوح نشان میدهد که نرم افزار متلب برای حل الگوریتم ازدحام ذرات به زمان کمتری نیاز دارد.(۳.۷۶ثانیه) این درحالتی است که زمان حل الگوریتم وال توسط نرم افزار متلب برابر با ۵.۰۴ ثانیه می‌باشد.

پیشنهادات برای تحقیقات آینده

در اغلب مسائل زمان‌بندی، با هدف کاستن از پیچیدگی مسائل، بسیاری از شرایط و محدودیت‌های محیط‌های تولید واقعی نادیده گرفته می‌شود. در صورتیکه این شرایط و محدودیت‌ها در مسائل زمان‌بندی لحاظ شوند، برنامه‌ریزی حاصل، برنامه مفیدتر و موثرتری خواهد بود. البته شایان ذکر است که این فرآیند موجب بسیارپیچیده‌تر شدن و سخت‌تر شدن حل مسئله می‌شود. موارد ذیل در این زمینه پیشنهاد می گردد:

- اضافه کردن زمان‌های آماده سازی و توقفات وابسته فنی برای هر ماشین
- در نظر گرفتن زمان‌های آماده سازی
- لحاظ کردن محدودیت انبارها، تعمیرات نگهداری پیش‌بینانه و همچنین زمان تعمیرات برای هرماشین.

٤- منابع

Abedini, A., Li, W., Badurdeen, F., & Jawahir, I. (2020). A metric-based framework for sustainable production scheduling. *Journal of Manufacturing Systems, 54*, 174-185.

Aggoune, R. (2004). Minimizing the makespan for the flow shop scheduling problem with availability constraints. *European Journal of Operational Research, 153*(3), 534-543.

Amiri, M. F., & Behnamian, J. (2020). Multi-objective green flowshop scheduling problem under uncertainty: Estimation of distribution algorithm. *Journal of cleaner production, 251*, 119734.

Breit, J. (2006). A polynomial-time approximation scheme for the two-machine flow shop scheduling problem with an availability constraint. *Computers & Operations Research, 33*(8), 2143-2153.

Girish, B., & Jawahar, N. (2009). Scheduling job shop associated with multiple routings with genetic and ant colony heuristics. *International journal of production research, 47*(14), 3891-3917.

Golmakani, H. R., & Birjandi, A. R. (2014). Multiple route job shop scheduling using particle swarm optimisation approach. *International Journal of Procurement Management, 7*(2), 119-144.

Golmakani, H. R., & Namazi, A. (2014). An artificial immune algorithm for multiple-route job shop scheduling problem with preventive maintenance constraints. *International Journal of Operational Research, 19*(4), 457-478.

Jabbarizadeh, F., Zandieh, M., & Talebi, D. (2009). Hybrid flexible flowshops with sequence-dependent setup times and machine availability constraints. *Computers & Industrial Engineering, 57*(3), 949-957.

Kubzin, M. A., & Strusevich, V. A. (2006). Planning machine maintenance in two-machine shop scheduling. *Operations Research, 54*(4), 789-800.

Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). The whale optimization algorithm. *Advances in engineering software, 95*, 51-67.

Moradi, E., Fatemi Ghomi, S., & Zandieh, M. (2010). An efficient architecture for scheduling flexible job-shop with machine availability constraints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 51*, 325-339.

Nabovati, H. (2021). A Developed Cuckoo Search Algorithm for Solving a new Model of the Machine and Vehicle Scheduling. *Journal of Strategic Management in Industrial Systems, 16*(56), 48 to 56.

Nabovati, H., Haleh, H., & Vahdani, B. (2020). Multi-objective invasive weeds optimisation algorithm for solving simultaneous scheduling of machines and multi-mode automated guided vehicles. *European Journal of Industrial Engineering, 14*(2), 165-188. doi:10.1504/ejie.2020.105696

Naderi, B., Zandieh, M., & Aminnayeri, M. (2011). Incorporating periodic preventive maintenance into flexible flowshop scheduling problems. *Applied Soft Computing, 11*(2), 2094-2101.

Naderi, B., Zandieh, M., & Fatemi Ghomi, S. (2009). Scheduling sequence-dependent setup time job shops with preventive maintenance .*The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 43*, 170-181.

Ruiz, R., García-Díaz, J. C., & Maroto, C. (2007). Considering scheduling and preventive maintenance in the flowshop sequencing problem. *Computers & Operations Research*, *34*(11), 3314-3330.

Saddikuti, V., & Pesaru, V. (2019). NSGA based algorithm for energy efficient scheduling in cellular manufacturing. *Procedia Manufacturing, 39*, 1002-1009.

Yang, D.-L., Hsu, C.-J., & Kuo, W.-H. (2008). A two-machine flowshop scheduling problem with a separated maintenance constraint. *Computers & Operations Research, 35*(3), 876-883.

Zribi, N., El Kamel, A., & Borne, P. (2008). Minimizing the makespan for the MPM job-shop with availability constraints. *International Journal of Production Economics*, *112*(1), 151-160.

Presenting a Problem-Solving Model for Green Multi-Route Workshop Scheduling with the Aim of Optimizing Work Completion Time and Energy Consumption with Whale's Meta-Heuristic Algorithm.

Simin Orji
Department of Industrial Engineering, Saveh Branch, Islamic Azad University, Saveh, Iran
Hojat Nabovati (Corresponding Author)
Department of Industrial Engineering, Saveh Branch, Islamic Azad University, Saveh, Iran
E-mail: hojat.nabovati@iau.ac.ir

Abstract
The sequence of work operations on production machines plays a crucial role in managing the volume of jobs in process and ensuring the timely fulfillment of customer demand. One of the most common production models is the workshop model. This research focuses on an extension of the multi-path job shop problem, specifically examining energy consumption, which is directly linked to environmental pollution. The objective is to determine the sequence of operations and assign jobs to machines in a way that minimizes the weighted sums of delivery time and energy consumption. It is important to note that while this assumption complicates the problem, it also aligns more closely with real-world production environments. Given the complexity of this issue and the time required to solve it exactly, this study emphasizes the use of meta-heuristic algorithms. We discuss the solution of the nonlinear model using two meta-heuristic algorithms: the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm and the Wall algorithm. To evaluate the effectiveness of these algorithms, we examined one of the 30 well-known benchmark problems. Our findings indicate that the Wall algorithm reduced the total time to complete all tasks by 18% compared to the Particle Swarm Optimization algorithm. The proposed Wall algorithm demonstrates superior capability in solving these complex problems. Moreover, in terms of CPU time, both algorithms produced satisfactory results within an acceptable timeframe.

Keywords: Whale optimization algorithm, Job-shop planning, environmental pollution, energy consumption.