



ارائه مدل حل مسئله برنامه ریزی زمانبندی کارگاه‌های 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 مسئول)

گروه مهندسی صنایع، واحد ساوه، دانشگاه آزاد اسلامی، ساوه، 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 انکارناپذیر در حجم کار درجریان ساخت و برآورده کردن به موقع تقاضای مشتریان دارد. یکی از رایج ترین مدل‌های تولیدی، مدل‌های کارگاه‌های هستند. مسئله مورد مطالعه در این پژوهش، بسط گسترده‌تری از مسئله کارگاه‌های 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 الگوریتم‌های فراابتکاری مورد توجه قرار گرفت. 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 کارگاه‌های، آلودگی محیط زیست، میزان مصرف انرژی.

۱- مقدمه

در حل مسائل زمان بندی همواره به این نکته توجه می شود 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 هر کار و ارسال سفارشات در کوتاهترین زمان می باشد. مسئله ی زمان بندی کار کارگاهی تعیین برنامه زمان بندی تعدادی عملیات در محیط چند ماشین 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. زمان بندی کار کارگاهی شامل سه حالت تک مسیره، چند مسیره و انعطاف پذیر می شود. در مدل کلاسیک زمان بندی کار کارگاهی باید n کار بر روی m ماشین غیرمرتبط تکمیل شوند. تمامی ماشین ها از ابتدای افق برنامه ریزی در دسترس بوده و قطع فعالیت ها مجاز نیست. این مسئله در زمره ی مسائل سخت^۱ طبقه بندی می شود (Nabovati, 2021). تعمیم وسیعتر مسئله کار کارگاهی، مسئله کار کارگاهی چند مسیره است که در آن هر کار می تواند از مسیرهای متفاوتی عبور کرده و به اتمام برسد. لزوماً تعداد ماشین ها در مسیرهای مختلف برای یک کار برابر نیست. این ساختار در اغلب واحدهای تولیدی منعطف، که در آنها ماشین های کنترل عددی قادر به انجام عملیات متفاوتی از یک کار هستند، مشاهده می شود.

مسئله مورد مطالعه در این پژوهش، بسط گسترده تری از مسئله کار کارگاهی چند مسیره می باشد که دارای ویژگی بررسی میزان مصرف انرژی می باشد. بدین ترتیب هدف تعیین توالی عملیات به ماشین ها بگونه ای 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 می گردد ولی شرایط را به محیط های تولیدی واقعی نزدیکتر می سازد. 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 ارائه ی 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 می باشد، 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

نمونه هایی از مطالعاتی که پیش از این در زمینه کار کارگاهی به انجام رسیده، در ادامه بیان می شود. اگونی^۲ (۲۰۰۴) با استفاده از یک الگوریتم یک جستجو بر مبنای الگوریتم ژنتیک و جستجوی ممنوعه حل مسئله زمان بندی جریان کارگاهی با محدودیت نگهداری و تعمیرات پرداخته است که در آن هدف کمینه سازی زمان تکمیل کل کارها است. کوبزن و استروسویچ^۳ (۲۰۰۶) مسئله جریان کارگاهی دو ماشین به منظور مینیمم کردن حداکثر زمان تکمیل کارها را با فرض اینکه مدت زمان نگهداری و تعمیرات ماشین ها به دوره ی شروع نگهداری و تعمیرات آنها بستگی دارد، مورد بررسی قرار داده اند. بیري^۴ (۲۰۰۶) نیز مسئله زمان بندی جریان کارگاهی دو ماشین وقتی ماشین اول برای یک فاصله زمانی داده شده در دسترس نیست با هدف کمینه سازی حداکثر زمان تکمیل کارها مورد مطالعه قرار داده است. رویز^۵ و همکارانش (۲۰۰۷) مسئله جریان کارگاهی با سه سیاست متفاوت در نگهداری و تعمیرات ماشین ها در نظر گرفته و شش روش ابتکاری و فراابتکاری برای حل آن ارائه نموده اند. زریب^۶ و همکارانش (۲۰۰۸) مسئله کار کارگاهی با در نظر گرفتن محدودیت دسترسی روی ماشین ها، مورد مطالعه قرار داده اند. آنها در مرحله اول یک الگوریتم ابتکاری بر مبنای قاعده اولویت برای حل مسئله تخصیص ارائه کرده اند که می تواند با الگوریتم جستجوی ممنوعه جواب داده شود. در مرحله دوم یک الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله توالی ارائه شده است. یانگ^۷ و همکارانش (۲۰۰۸) مسئله جریان کارگاهی دو ماشین با این فرض که فعالیت نگهداری و تعمیرات باید در یک زمان ثابت بعد از

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 قرار داده‌اند. نادری^۸ و همکارانش (۲۰۰۹) مسئله زمان‌بندی کارگاه‌های با زمان آماده‌سازی وابسته به توالی و محدودیت عدم دسترسی روی ماشین‌ها به منظور مینیم کردن حداکثر زمان تولید با استفاده از دو الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و الگوریتم ژنتیک مورد مطالعه قرار داده‌اند. جباری زاده^۹ و همکارانش (۲۰۰۹) نیز مسئله جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با زمان آماده‌سازی وابسته به توالی و با لحاظ سه سیاست نگهداری و تعمیرات با استفاده از دو الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار داده‌اند. گریش^{۱۰} و جواهر (۲۰۰۹)، مسئله زمان‌بندی کارگاه‌های چندمسیره، توسط دو روش فراابتکاری، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم کلونی مورچگان، برای جابجایی بهینه‌ی عملیات‌ها به ماشین‌ها با معیار زمان اتمام کار کمینه‌ی ارائه کرده‌اند، در پژوهش ایشان همزمان حل با دو الگوریتم فراابتکاری به حل مسئله می‌پردازد که در نتیجه رقابت به زمان حل بین الگوریتم‌های فراابتکاری برمی‌گردد. مرادی^{۱۱} و همکارانش (۲۰۱۰) مسئله کارگاه‌های انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن 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 انعطاف‌پذیر با لحاظ نگهداری و تعمیرات دورهای 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 کارگاه‌های چند مسیره و با ارائه یک الگوریتم ابتکاری با هدف کمینه‌سازی زمان اتمام تمام کارها، با استفاده از الگوریتم ابتکاری انتقال گلوگاه، به ارزیابی ۴۳ مسئله مشهور در این زمینه می‌پردازند. حمیدرضا گل‌مکانی و علی نمازی^{۱۴} (۲۰۱۴) مدل جدیدی را برای کارگاه‌های چند مسیره با لحاظ تعمیرات و نگهداری دوره‌های 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 کارگاه‌های چند مسیره در دو حالت با لحاظ کردن تعمیرات و نگهداری و بدون لحاظ کردن آن پرداخته شده است. در نهایت، تعریف مسئله‌ی زمان‌بندی کارگاه‌های 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 شده است.

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 می‌کنند 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 می‌شوند که عملکرد عملیاتی سیستم‌های 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 سیستم‌های تولید چابک و قابل تنظیم مجدد برای مقابله با محصولات و خانواده‌های مختلف محصولات ایجاد می‌کند. برای طراحی و بهینه‌سازی 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^{۱۶} (۲۰۲۱) در بحث کارهای کارگاهی که در آن به بررسی کارگاههای انعطاف پذیر با وجود حالت چند سرعت ماشین آلات و میزان مصرف مختلف می پردازد. در جدول ۱ به بررسی مقایسه پژوهشهای انجام شده می پردازیم و مقایسه پژوهش حاضر را در انتهای جدول 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 زمان بندی جریان کارگاهی با محدودیت نگهداری و تعمیرات	الگوریتم ژنتیک و جستجوی ممنوعه	کمینه سازی زمان تکمیل کل کارها
بیری	۲۰۰۶	مسئله زمان بندی جریان کارگاهی دو ماشین	حل دقیق	کمینه سازی حداکثر زمان تکمیل کارها
رویز و همکاران	۲۰۰۷	مسئله جریان کارگاهی	روش ابتکاری	کمینه سازی حداکثر زمان تکمیل کارها
زریب و همکاران	۲۰۰۸	مسئله کار کارگاهی با در نظر گرفتن محدودیت دسترسی روی ماشین ها	الگوریتم جستجوی ممنوعه ، الگوریتم ژنتیک	کمینه سازی حداکثر زمان تکمیل کارها
یانگ	۲۰۰۸	مسئله جریان کارگاهی دو ماشین	حل دقیق	کمینه سازی حداکثر زمان تولید
نادری و همکارانش	۲۰۰۹	مسئله زمان بندی کار کارگاهی 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 جریان کار کارگاهی انعطاف پذیر با زمان آماده سازی وابسته به توالی	الگوریتم شبیه سازی تبرید و الگوریتم ژنتیک	کمینه سازی حداکثر زمان تکمیل کارها
گریش و جواهر	۲۰۰۹	مسئله زمان بندی کار کارگاهی چندمسیره	الگوریتم ژنتیک و الگوریتم کلونی مورچگان	کمینه سازی حداکثر زمان تکمیل کارها
مرادی و همکارانش	۲۰۱۰	مسئله کار کارگاهی انعطاف پذیر با در نظر گرفتن محدودیت دسترسی روی ماشین ها	الگوریتم ژنتیک	کمینه سازی حداکثر زمان تکمیل کارها
نادری و همکارانش	۲۰۱۱	مسئله زمان بندی جریان کارگاهی انعطاف پذیر با لحاظ نگهداری و تعمیرات	الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک	حداقل کردن حداکثر زمان تولید
حمیدرضا گل مکانی و علی بیرجندی	۲۰۱۴	مسئله کار کارگاهی چند مسیره	الگوریتم ابتکاری انتقال گلوگاه	کمینه سازی زمان اتمام تمام کارها
حمیدرضا گل مکانی و علی نمازی	۲۰۱۴	مسئله کار کارگاهی چند مسیره با لحاظ تعمیرات و نگهداری دوره های ثابت	الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی	کمینه سازی حداکثر زمان تکمیل کارها
سدی کوتی و پسورا	۲۰۱۹	زمان بندی در محیط تولید	الگوریتم ژنتیک چند هدفه نامغلوب	حداقل رساندن طول عمر، جریان و مصرف
عابدینی و همکاران	۲۰۲۰	مسئله زمان بندی 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 کار کارگاهی انعطاف پذیر	الگوریتم ابتکاری	حداقل رساندن کل زمان تکمیل ماشین
پژوهش حاضر	۲۰۲۳	مسئله کار کارگاهی سبز با در نظر گرفتن مصرف انرژی	الگوریتم جدید فرا ابتکاری وال و الگوریتم ازدحام ذرات	کاهش زمان تکمیل با در نظر گرفتن مصرف انرژی

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 کارگاه‌های مورد بررسی است و می‌تواند شروع جدیدی برای سیستم‌های بعدی باشد. یک مدل جدیدتر که فرضیه‌ی مطرح شده در مدل پیشین را به مدل واقعی در صنعت نزدیک‌تر می‌کند مورد بررسی قرار می‌گیرد، این مدل می‌تواند در سیستم‌های تولیدی کارگاهی که شرایط فوق‌الذکر 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 فرضیه‌ها و علائم

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

- هیچ ماشینی در یک زمان نمی‌تواند بیش از یک کار را پردازش نماید و هر کار که فرآیندش روی ماشین شروع شود تا اتمام دسته‌ی 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 نمی‌گیرد مگر اینکه در مسئله حالت وقفه تعریف کنیم.
- ماشین‌ها در طول فرآیند می‌توانند 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 نمی‌دهیم 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.
- زمانهای 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 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 نظر کردن است و یا به صورت بخشی از فرآیند تعریف می‌شود.

ب) مدل ریاضی

مدل ریاضی مسئله زمان‌بندی کارگاه‌های 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. EC_i هزینه انرژی الکتریکی و T_{ikj} زمان مورد نیاز ماشین j برای عملیات k از کار i است. متغیرهای تصمیم‌گیری 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:

$$Z_{poqirk} = \begin{cases} 1 & \text{اگر عملیات } q \text{ از کار } p \text{ در مسیر } o \text{ زودتر از عملیات } k \text{ از کار } i \text{ در} \\ & \text{مسیر } r \text{ انجام شود مقدار یک و در غیر اینصورت صفر} \end{cases}$$

$$Y_{irkj} = \begin{cases} 1 & \text{عملیات } k \text{ از کار } i \text{ در مسیر } r \text{ به ماشین } j = A_{irk} \text{ اختصاص یابد} \\ & \text{مقدار یک و در غیر اینصورت صفر} \end{cases}$$

$$X_{ir} = \begin{cases} 1 & \text{اگر کار } i \text{ به مسیر } r \text{ اختصاص یابد مقدار یک و در غیر اینصورت صفر} \end{cases}$$

مدل کامل مسئله زمان بندی کار کارگاهی چند مسیره بصورت زیر خواهد بود:

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

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

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

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

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

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

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

$$\sum_{j,r,k} T_{i.k.j} \times EC_i \times Z_{i.j.r.k} = TEC_i \quad (i = 1.2. \dots n) \quad \text{رابطه (۸)}$$

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

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

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

مجموعه معادلات (۲)، صرفاً یک مسیر از میان مسیرهای مختلف را به هر کار 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 هزینه‌ی 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 بهینه‌سازی وال^{۱۸}

وال‌ها موجوداتی فوق‌العاده 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 غول‌پیکر مانند قاتلان، مینک، سای، گاو، راست‌باله و آبی وجود دارد. وال‌ها بیشتر به عنوان شکارچیان در نظر گرفته می‌شوند. آنها هرگز نمی‌خوابند زیرا باید از سطح اقیانوس‌ها 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 و ن دره گچ^{۱۹}، وال‌ها در مناطقی از مغز خود مانند سلولهای دوقلو، سلولهای مشترکی دارند. این سلول‌ها مسئول قضاوت، احساسات و رفتارهای اجتماعی در انسانها هستند. به عبارت دیگر سلولهای چرخش ما را از موجودات دیگر متمایز می‌کند. وال‌ها دو برابر از این سلول‌ها 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 می‌کنند. البته، آنها بیشتر در گروه مشاهده می‌شوند. بعضی از گونه‌های 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 تقریباً به اندازه یک اتوبوس مدرسه است. طعمه‌های مورد علاقه آن‌ها گله ماهی کریل و کوچک هستند. جالب‌ترین چیز در مورد وال کوهان دار نحوه شکار خاص او است. این فرایند یافتن غذا روش تغذیه شبکه حبابی نامیده می‌شود. در واقع وال ترجیح می‌دهد دسته ماهی‌های کوچک نزدیکتر به سطح آب را شکار کند. مشاهده شده است که این روش تغذیه با ایجاد حباب‌های متمایز دایره‌ای انجام می‌شود. وال‌ها حدود ۱۲ متر به سمت پایین شیرجه رفته و با ایجاد حباب‌هایی 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 حلقه‌های 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 بهینه‌سازی مدل شده است (Mirjalili & Lewis, 2016).

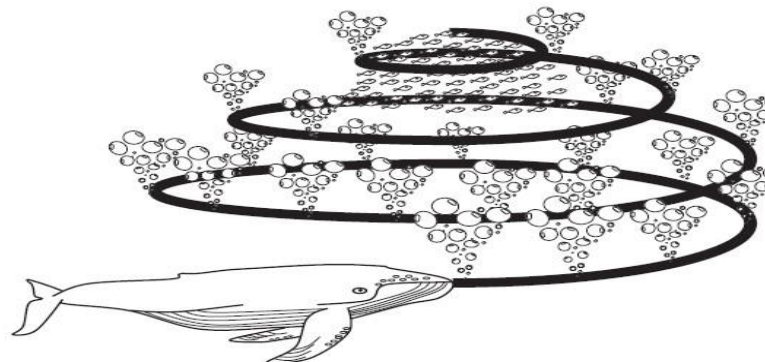
17. Whale Optimization Algorithm (WOA)

18. HafVan

19. Megaptera novaeangliae

20. Upward spirals

21. Double loops



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

الگوریتم بهینه سازی وال با مجموعه ای از جواب های تصادفی شروع می شود. در هر مرحله عامل های جستجو موقعیت خود را باتوجه به انتخاب تصادفی عامل جستجو یا بهترین جواب بدست آمده قبلی به روز می کنند. 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 می شود، در حالیکه بهترین جواب زمانیکه $|\vec{A}| > 1$ است انتخاب می شود. با توجه به مقدار p الگوریتم بهینه سازی وال می تواند بین انتخاب مارپیچی یا دورانی سوییچ کند. سرانجام الگوریتم با ارضا شدن معیار توقف پایان میابد.

```

Initialize the whales population  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
Calculate the fitness of each search agent
 $X^*$  = the best search agent
while ( $t < \text{maximum number of iterations}$ )
  for each search agent
    Update  $a$ ,  $A$ ,  $C$ ,  $l$ , and  $p$ 
    if1 ( $p < 0.5$ )
      if2 ( $|\vec{A}| < 1$ )
        Update the position of the current search agent by the Eq. (2.1)
      else if2 ( $|\vec{A}| \geq 1$ )
        Select a random search agent ( $X_{rand}$ )
        Update the position of the current search agent by the Eq. (2.8)
      end if2
    else if1 ( $p \geq 0.5$ )
      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 می‌تواند 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 می‌دهد 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 کاهش A، برخی از تکرارها به کاوش اختصاص می‌یابد و مابقی به بهره برداری اختصاص می‌یابد الگوریتم وال تنها دو پارامتر اصلی داخلی را برای تنظیم A و C در بر می‌گیرد.

۳- نتایج و بحث

در این قسمت از پژوهش، مسئله زمان‌بندی کارگاه‌های 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 و در 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 دارای ۷ کار می‌باشد. هر کدام از این ۷ کار می‌تواند از دو مسیر ۱ و ۲ حرکت کرده و پردازش شوند. هر کدام از این مسیرها شامل چند عملیات می‌باشند 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 بر روی آن ماشین آورده شده است.

جدول شماره (۲): اطلاعات مسئله کارگاه‌های 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 می باشد که زمان پردازش مخصوص به خود را داراست، مثلاً کار یک دارای دو مسیر می باشد که مسیر اول در اولین پردازش بر روی ماشین M1 قرار گرفته که زمان این پردازش ۲۱ واحد زمانی می باشد، 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، ماشین های 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 زمان بندی کارگاهی 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 می شود که زیر مسئله تخصیص مسیرها به کارها، به دلیل انعطاف پذیری ایجاد شده در کارگاهی به وجود می آید که شدیداً بر پیچیدگی مسئله می افزاید. هدف کمینه سازی حداکثر زمان تکمیل با سایر مفروضات زیر است.

- هر ماشین در هر لحظه تنها می تواند یک عملیات را پردازش کند.
 - همه ی ماشین ها 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 می شود و زمان حمل و نقل قابل چشم پوشی است.
 - قطع کردن عملیات مجاز نیست.
- جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم های 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 گیگا هرتز و رم ۸ گیگا بایت می باشد.

الف) حل مسئله با الگوریتم فرابتکاری وال

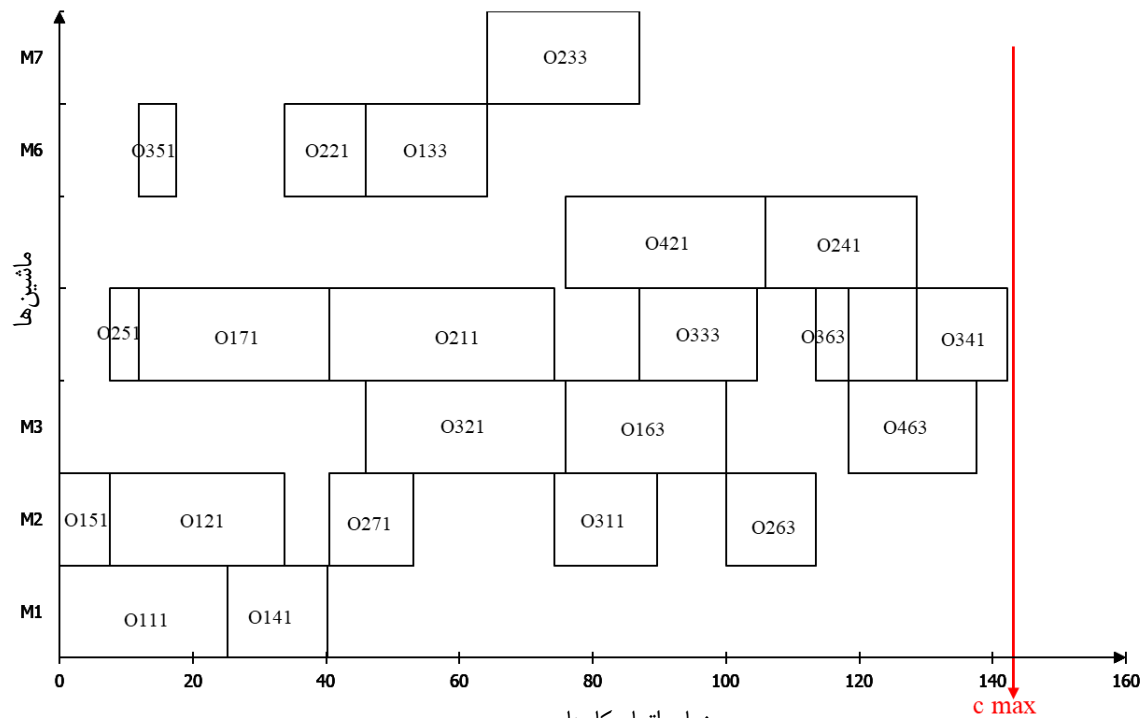
نتایج حاصل از حل الگوریتم وال به صورت یک فایل اکسل می باشد که در جدول شماره ۳ آمده است.

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 عملیات ۱ 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 ۴: زمان اتمام کارها از الگوریتم وال

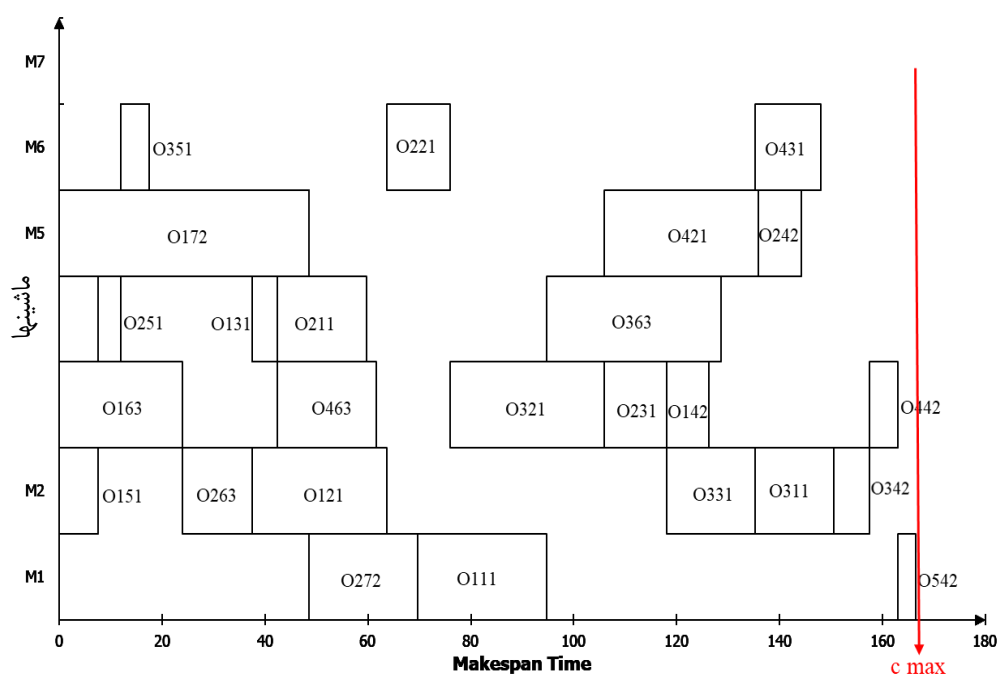
حل مسئله با الگوریتم فراابتکاری ازدحام ذرات: نتایج حاصل از حل الگوریتم ازدحام ذرات به صورت یک فایل اکسل می‌باشد که در جدول شماره ۴ آمده است (Nabovati, Haleh, & Vahdani, 2020).

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

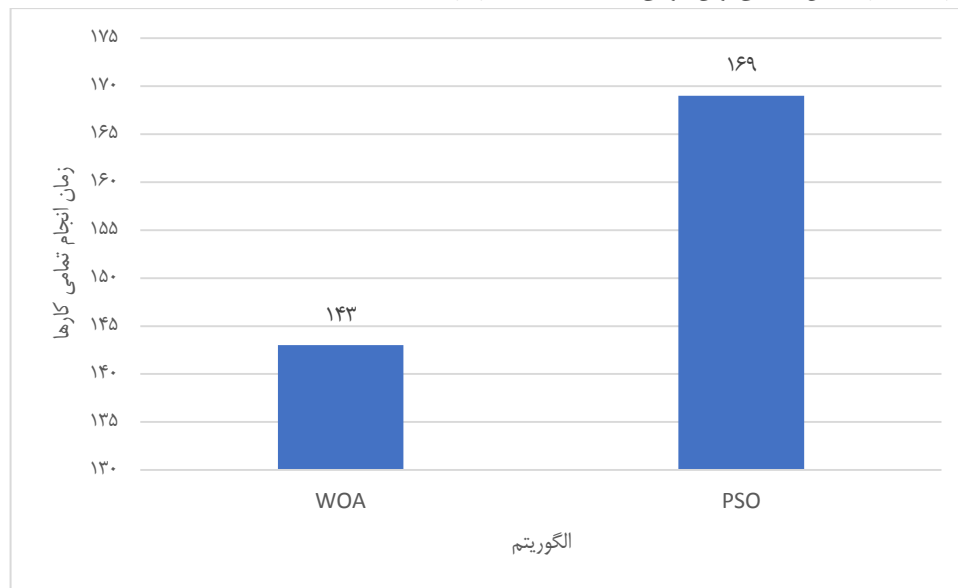
۶	۳	۲	۲	۲۴	۳۸
۶	۳	۳	۴	۳۸	۴۲
۶	۳	۴	۳	۴۲	۶۲
۷	۲	۱	۵	۰	۴۹
۷	۲	۲	۱	۴۹	۷۰
۷	۲	۳	۹	۷۰	۷۰
۷	۲	۴	۹	۷۰	۷۰
۲	۱	۱	۲	۳۸	۶۴
۲	۱	۲	۶	۶۴	۷۶
۲	۱	۳	۳	۷۶	۱۰۶
۲	۱	۴	۵	۱۰۶	۱۳۶
۲	۱	۵	۹	۱۳۶	۱۳۶
۳	۱	۱	۴	۴۲	۶۰
۳	۱	۲	۳	۱۰۶	۱۱۸
۳	۱	۳	۲	۱۱۸	۱۳۵
۳	۱	۴	۶	۱۳۵	۱۴۸
۱	۱	۱	۱	۷۰	۹۵
۱	۱	۲	۴	۹۵	۱۲۹
۱	۱	۳	۲	۱۳۵	۱۵۱
۱	۱	۴	۹	۱۵۱	۱۵۱
۴	۲	۱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



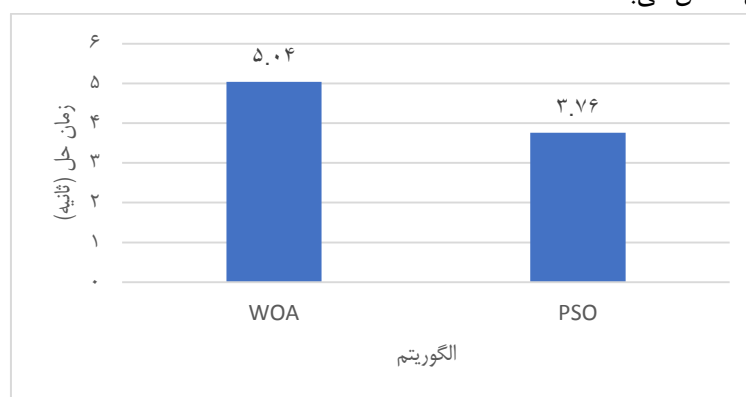
زمان اتمام کارها

در نمودارهای گان بالا زمان اتمام کارها برای تمامی ماشین‌ها در هر دو الگوریتم با رنگ قرمز مشخص شده است. زمان اتمام کارها با الگوریتم ازدحام ذرات پرندگان برابر با ۱۶۹ می‌باشد در حالیکه زمان اتمام کارها با الگوریتم وال برابر با ۱۴۳ است. خط عمودی نمودار گان شماره ماشین و خط افقی زمان انجام کارها را نشان می‌دهد. روی هر یک از بخش‌های 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 بخش‌ها می‌توان توالی عملیات را تفسیر کرد.



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 برخوردار 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 (۳.۷۶ ثانیه) این درحالی است که زمان حل الگوریتم وال توسط نرم افزار متلب برابر با ۵.۰۴ ثانیه می‌باشد.

پیشنهادهای برای تحقیقات آینده

در اغلب مسائل زمان بندی، با هدف کاستن از پیچیدگی مسائل، بسیاری از شرایط و محدودیت های محیط های تولید واقعی نادیده گرفته می شود. در صورتیکه این شرایط و محدودیت ها در مسائل زمان بندی لحاظ شوند، برنامه ریزی حاصل، برنامه مفیدتر و موثرتری خواهد بود. البته شایان ذکر است که این فرآیند موجب بسیار پیچیده تر شدن و سخت تر شدن حل مسئله می شود. موارد ذیل در این زمینه پیشنهاد می گردد:

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

۴- 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.