Decisions & Operations Research

Volume 6, Issue 1, Spring 2021

Unrelated Parallel-Machine Scheduling with Preventive and Emergency Maintenance

Saeed Khalili*

PhD student of Industrial Engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.

Abstract

Considering maintenance strategy in models which schedule and allocate jobs to machines, will make the proposed models compatible with production environments. Furthermore, this will cause higher model efficiency in optimizing the production systems. To this end, a mathematical model for scheduling unrelated parallel machines is developed to minimize total weighted completion times. Also in this approach, availability constraints have been considered, and preemption is allowed. Due to executing preventive maintenance and emergency maintenance programs, machine inaccessible times have been added to job completion times. Since the proposed model has high complexity, in order to solve the problem, two meta-heuristic methods including simulated annealing and genetic algorithm are used. In addition, their performances are compared to each other. The results indicate the superiority of simulated annealing over genetic algorithm for this particular problem.

Keywords: Unrelated parallel-machine scheduling, Preventive and emergency maintenance, Total weighted completion times, Metaheuristic algorithms.

Paper Type: Original –Application

Received: 17/06/2020 Reviewed: 04/08/2020 Revised: 19/02/2021 Accepted: 09/03/2021

Citation:

Khalili, S. (2021). Unrelated parallel-machine scheduling with preventive and emergency maintenance. *Decisions & operations research*, *6*(1), 25-40.

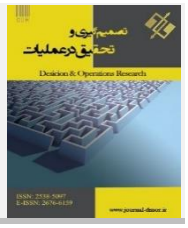
*** Corresponding Author**

Email Address: s.khalili1367@yahoo.com

DOI: 10.22105/dmor.2021.235558.1156

www.journal-dmor.ir

نشریه علمی
تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات
Decisions and Operational Research
دوره ۶، شماره (۱)، بهار ۱۴۰۰



زمان‌بندی ماشین‌های موازی نامرتبط با در نظر گرفتن توأمان برنامه‌ی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و اضطراری

سعید خلیلی*
دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

چکیده

در نظر گرفتن سیاست‌های نگهداری و تعمیرات (نت) در مدل‌های مربوط به مسئله‌ی زمان‌بندی و تخصیص کارها به ماشین‌آلات، علاوه بر سازگارکردن مدل‌های ارائه شده با محیط‌های تولیدی، سبب افزایش کارایی این مدل‌ها در بهینه‌سازی سیستم‌های تولید می‌شود. به همین منظور، در این مقاله یک مدل ریاضی جهت زمان‌بندی ماشین‌های موازی نامرتبط با هدف حداقل‌کردن مجموع وزنی زمان تکمیل کارها، توسعه داده شده است و در آن محدودیت عدم دسترسی به ماشین‌آلات نیز منظور شده است. در این مدل وقفه در کارها مجاز در نظر گرفته شده و زمان‌های عدم دسترسی به ماشین‌آلات، به دلیل اجرای برنامه‌های نت پیشگیرانه و اضطراری، به زمان تکمیل کارها اضافه شده است. از آن جایی که مدل ارایه شده دارای پیچیدگی بالایی می‌باشد، جهت حل آن از دو روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید استفاده گردیده و عملکرد آن‌ها با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان‌دهنده‌ی برتری روش شبیه‌سازی تبرید نسبت به الگوریتم ژنتیک برای حل این مساله می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: زمان‌بندی ماشین‌های موازی نامرتبط، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و اضطراری، مجموع وزنی زمان‌های تکمیل، الگوریتم‌های فراابتکاری.

نوع مقاله: پژوهشی-کاربردی

دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۲۸ داوری: ۱۳۹۹/۰۵/۱۴ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۲/۰۱ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۹

۱- مقدمه

در بسیاری از سیستم‌های تولیدی، به منظور حفظ شرایط عملیاتی تجهیزات، سرویس‌های منظم و برنامه‌ریزی شده نگهداری و تعمیرات (نت) اجرا می‌شوند. اجرای برنامه‌های نت به طور مناسب نقش بسیار مهمی در ارتقاء بهره‌وری و همچنین کاهش هزینه‌های عملیاتی و خرابی‌های پیش‌بینی نشده ایفا می‌کنند. فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات که روی ماشین‌ها انجام می‌شود موجب بهبود عملکرد ماشین‌ها و بهبود کیفیت محصولات می‌شود (یانگ[۱]، ۲۰۱۳). با این حال، فعالیت‌های تولیدی و نت به نوعی با یکدیگر در تعارض هستند زیرا مجموعه عملیات نت برنامه‌ریزی شده صرف هزینه گردیده و زمانی خاص را طلب می‌کند که در اغلب مواقع مستلزم توقف روند تولید می‌باشد. از جهت دیگر چنانچه قرار باشد فعالیت‌های نت بعد از سپری‌شدن یک سیکل کامل کاری و بدون انقطاع برنامه زمانی تولید اجرا گردد، احتمال خرابی تجهیزات با گذشت زمان افزایش می‌یابد. بنابراین در تولید صنعتی، سازگاری سیستم‌های تولید هوشمند با نوسانات بازار(نظیر تقاضای تصادفی) و اختلالات درونی(مانند از کار افتادگی ماشین‌ها) امری ضروری است. در محیط‌های صنعتی، ممکن است ماشین به

[۱] Yang

* نویسنده مسئول
آدرس رایانامه: s.khalili1367@yahoo.com
شناسه دیجیتال: 10.22105/dmor.2021.235558.1156

دلایل مختلف در طول افق برنامه‌ریزی در دسترس نباشد. به طور عام، عدم دسترسی به ماشین ممکن است به دلیلل تصادفی- نظیر خرابی یا ازکار افتادگی ماشین - یا قطعی- نظیر نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، تعمیرات اساسی و زمابندی قبلی باشد (علوی و ارتیبا[۱]، ۲۰۰۶). به همین دلیل یکی از محدودیت‌هایی که در ادبیات مسائل زمانبندی وجود دارد، محدودیت دسترسی به ماشین است. بدین معنی که دسترسی مداوم به ماشین‌ها در سراسر دوره‌ی زمان‌بندی مقدور نیست. غالبا هنگام برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید، این مساله مورد غفلت واقع شده یا به دلیل دشواری مساله‌ی زمان‌بندی، ترجیح داده می‌شود محدودیت دسترسی به ماشین‌ها در زمان‌بندی اعمال نشود. اهمیت برنامه‌ریزی با درنظر گرفتن این محدودیت در محیط‌هایی آشکار می‌شود که عدم دسترسی به ماشین‌ها در آن هزینه‌های زیادی به سیستم تولید تحمیل می‌کند. بنابراین لزوم درنظر گرفتن محدودیت دسترسی در مدل‌های واقع‌گرایانه‌ی زمان‌بندی کاملا واضح است. محدودیت‌های دسترسی قطعی در سیستم‌های تولید را عموما می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: محدودیت‌های دسترسی معین و محدودیت‌های دسترسی نامعین. در محدودیت دسترسی معین دوره‌ی عدم دسترسی از یک نقطه‌ی ثابت زمانی شروع و به یک نقطه‌ی زمانی معین ختم می‌شود. در محدودیت دسترسی نامعین، زمان شروع دوره‌ی عدم دسترسی نامعین است. به‌عبارت دیگر دوره‌ی عدم دسترسی انعطاف‌پذیر فرض می‌شود و در طول فرایند زمان‌بندی تعیین می‌گردد. البته فعالیت نگه‌داری و تعمیرات باید در پنجره‌ی زمانی مشخصی انجام شود (گائو و همکاران [۲]، ۲۰۰۶). در ادبیات مسائل زمان‌بندی با درنظر گرفتن محدودیت دسترسی به ماشین‌ها، کارها ممکن است از ویژگی‌های خاصی برخوردار باشند و در حین پردازش، وضعیت متفاوتی از خود بروز دهند. در حالت کلی و با توجه به این محدودیت، برای انجام یک عملیات سه شیوه وجود دارد: مجازبودن انقطاع عملیات، انقطاع جزئی عملیات و عدم مجازبودن انقطاع عملیات. مجازبودن انقطاع بدین معناست که امکان قطع‌کردن عملیات پردازش روی ماشین، به‌منظور انجام عملیاتی دیگر یا نگهداری و تعمیرات (نت) وجود دارد و عملیات می‌تواند بدون هیچ جریمه‌ای بعدا ادامه یابد (آگونه و پورتمن[۳]، ۲۰۰۶). در انقطاع جزئی عملیات چنانچه عملیات در یک بازه‌ی زمانی معین انجام شود انقطاع مجاز نیست، ولی اگر در خارج از این بازه‌ی زمانی انجام شود ممکن است انقطاع داشته باشد (غربی و هائوری[۴]، ۲۰۰۵). در حالت مجاز نبودن انقطاع عملیات، عملیات شروع‌شده روی یک ماشین باید تا زمان تکمیل بدون وقفه، ادامه یابد و انجام فعالیت نت روی آن ماشین، پیش از تکمیل این عملیات مجاز نیست (آگونه[۵]، ۲۰۰۴).

هدف از این مقاله ارائه مدل و روش حلی موثر در زمینه برنامه‌ریزی و زمان‌بندی هم‌زمان تولید و نت در ماشین‌های موازی نامرتبط است. به این منظور ساختار ادامه این مقاله به این صورت تهیه شده است که ابتدا در بخش دوم ادبیات و پیشینه موضوع ماشین‌های موازی نامرتبط و مباحث مربوطه بررسی می‌شوند. در بخش سوم، به تعریف پارامترها و متغیرها مدل پیشنهادی پرداخته و براساس آن مدل ارائه شده تشریح می‌گردد. در بخش چهارم جزییات ارائه شده در مورد روش‌های حل بیان گردیده است. در بخش پنجم جهت آزمایش و ارزیابی الگوریتم‌های پیشنهادی، از تست‌های کامپیوتری استفاده شده و در نهایت بخش ششم به نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی اختصاص می‌یابد.

۲- مرور بر ادبیات

ماشین‌های موازی به عنوان یکی از زیر مجموعه‌های اصلی و پایه در فن زمان‌بندی از جایگاه ویژه و مهمی برخوردارند و همواره زمان‌بندی این مدل بر مبنای معیارهای عملکرد مختلف مورد توجه محققین بوده است (پیندو [۶]، ۲۰۰۱). زمان‌بندی ماشین‌های موازی نامرتبط[۷] با هدف حداقل‌کردن مجموع وزنی زمان تکمیل کارها مجموعه‌ای از n کار را در نظر می‌گیرد که باید روی m ماشین موازی نامرتبط به منظور حداقل‌کردن مجموع وزنی زمان تکمیل کارها پردازش شوند. مساله‌ی حداقل‌کردن مجموع وزنی زمان تکمیل بر روی

---

[۱] Allaoui & Artiba
[۲] Gao et al.
[۳] Aggoune & Portmann,
[۴] Gharbi & Haouari
[۵] Aggoune
[۶] Pinedo
[۷] Unrelated parallel machine scheduling (UPMS)

دو ماشین یکسان مساله‌ای *NP hard* است (برونو و همکاران[۱]، ۱۹۷۴؛ غلنسترا و همکاران[۲]، ۱۹۷۷). مجموع وزنی زمان‌های تکمیل به معنای مجموع کل هزینه‌ی نگهداری و موجودی مربوط به برنامه‌ی زمانی می‌باشد. وزن کار j نشان‌دهنده‌ی یک فاکتور اولویت می‌باشد که بیانگر اهمیت کار j نسبت به باقی کارهای موجود در سیستم می‌باشد. از زمان معرفی این مساله به وسیله‌ی مکناتن[۳] (۱۹۵۹) روش‌های زیادی به منظور حل آن استفاده شده است. در ابتدا روش‌های دقیق بر مبنای شاخه و کران توسط عزیزاوقلو و کیرکا[۴] (۱۹۹۹) و برنامه‌ریزی ریاضی توسط چن وپاول[۵] (۱۹۹۹) استفاده شد، اما این روش‌ها برای حل مسائل با ابعاد بزرگ ضعیف بودند. به همین دلیل بسیاری از محققان در سال‌های اخیر، به استفاده از روش‌های تقریبی[۶] و فراابتکاری جهت حل مسائل زمان‌بندی ماشین‌های موازی روی آوردند. الگوریتم‌های تقریبی در حالت معمولی سعی در پیدا کردن جواب‌های بهینه با آزادسازی[۷] مساله دارند (هال و همکاران[۸]، ۱۹۹۷)، (اسکولز و اسکوتل[۹]، ۲۰۰۲) و (اسکوتل، ۲۰۰۱). چوداک[۱۰] (۱۹۹۹) و (افراتی و همکاران[۱۱]، ۲۰۰۰) برخی از این الگوریتم های تقریبی را برای مسائل زمان‌بندی ماشین‌های موازی توسعه داده‌اند. الگوریتم‌های بر پایه روش‌های فراابتکاری نیز شامل روش‌های زیادی مثل الگوریتم جستجوی محلی توسط (وردول و هارکنز[۱۲] ، ۲۰۰۲)، الگوریتم ژنتیک توسط (لین وهمکاران[۱۳]، ۲۰۱۱)، جستجوی ممنوعه توسط (وردول و هارکنز، ۲۰۰۲) و جستجوی حریصانه توسط (رودریگرز و همکاران[۱۴]، ۲۰۱۲) می‌باشد که گرچه در اکثر مواقع به جواب بهینه نمی‌رسند اما رسیدن به جواب نزدیک به بهینه را در مدت زمان معقول تضمین می‌کنند. (کروز و همکاران[۱۵]، ۲۰۰۹) راه‌حلی را برای مسئله‌ی ماشین‌های موازی وزن‌دار ارائه داده اند که مجموع وزنی زمان‌های تکمیل را حداقل می‌کند. آن‌ها از روش تبرید شبیه‌سازی شده برای حل این مساله استفاده کرده‌اند. اخیرا (لین و همکاران، ۲۰۱۱) از الگوریتم ژنتیک با سه معیار عملکرد متفاوت برای حل مسئله‌ی زمانبندی ماشین‌های موازی استفاده کرده‌اند. در عمل این روش پیشنهادی، جمعیت را با اضافه‌کردن بعضی از جواب‌های ایجادشده با روش‌های ابتکاری به وجود می‌آورد و بقیه‌ی جواب‌ها به صورت تصادفی برای ایجاد تنوع کافی به وجود می‌آید. روش انتخاب چرخ گردان[۱۶] برای انتخاب جمعیت جدید با پاسخ به برازندگی نسبی تابع احتمال استفاده می‌شود. طرح‌های تقاطع و جهش اولین بار به وسیله‌ی (چنگ و همکاران[۱۷]، ۱۹۹۵) مطرح شد. نخبه‌سالاری[۱۸] با حذف دو کروموزوم و اضافه‌کردن دو کروموزوم از بهترین کروموزوم‌های قبلی از مجموعه جمعیت جدید که از روش انتخاب چرخ گردان انتخاب شده‌اند، صورت می‌گیرد. در گذشته نیز مطالعات مقایسه‌ای بین الگوریتم ژنتیک و سایر الگوریتم‌های ابتکاری انجام شده است. نتایج نشان‌دهنده‌ی برتری الگوریتم پیشنهادی از سایر الگوریتم‌های رقیب می‌باشد.

اکثر کارهای انجام شده در زمینه‌ی زمان‌بندی فرض می‌کنند که ماشین‌ها به صورت پیوسته برای انجام عملیات در طول دوره‌ی زمان‌بندی در دسترس هستند ولی ممکن است، این فرض در محیط صنعت درست نباشد. زیرا ممکن است ماشین‌ها در طول دوره‌ی خاصی و به دلایل مختلف در دسترس نباشند. مثلاً ممکن است ماشین‌ها به علت خرابی یا به علت نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه در طول دوره‌ی زمانبندی در دسترس نباشند. زمانی که عدم دسترسی به ماشین مربوط به تعمیرات پیشگیرانه باشد، دو حالت اتفاق می‌افتد: حالت اول اینکه دوره‌هایی که باید تعمیرات انجام شود ثابت می‌باشد لذا برنامه‌ریزی با انجام این دوره‌ها از قبل صورت گرفته که حالت قطعی نامیده می‌شود و حالت دوم اینکه دوره‌های تعمیرات نیز مانند زمان‌بندی کارها متغیر تصمیم می‌باشد بدین ترتیب همزمان به تعیین زمان‌بندی کارها و نگه‌داری و تعمیر ماشین‌ها پرداخته می‌شود. زمانی که در دسترس نبودن ماشین مربوط به خرابی ماشین باشد با حالت احتمالی

---

[۱] Bruno et al.
[۲] Lenstra et al.
[۳] McNaughton
[۴] Azizoglu & Kirca
[۵] Chen & Powell
[۶] Approximate Algorithms
[۷] Relaxations
[۸] Hall et al.
[۹] Schulz & Skutella
[۱۰] Chudak
[۱۱] Afrati et al.
[۱۲] Vredeveld & Hurkens
[۱۳] Lin et al.
[۱۴] Rodriguez et al.
[۱۵] Cruz et al.
[۱۶] Roulette wheel selection
[۱۷] Cheng et al.
[۱۸] Elitism

مواجه بوده که در آن صورت خرابی ماشین و فرایند تعمیر ماشین تصادفی می‌باشد (ما و همکاران[۱]، ۲۰۱۰). مسئله‌ی زمان‌بندی با در نظر گرفتن محدودیت دسترسی به ماشین‌ها اولین بار توسط اشمیت مطرح و مسئله‌ی زمان‌بندی ماشین‌های موازی با دوره‌های عدم دسترسی مختلف به ماشین‌ها و انقطاع عملیات بررسی شد (اشمیت[۲]، ۱۹۸۴). سپس در سال ۱۹۹۱، مسئله‌ی زمان‌بندی ماشین‌های موازی با وجود حداکثر یک دوره عدم دسترسی برای هر ماشین مطرح گردید (لی[۳]، ۱۹۹۱). در سال۲۰۰۰ مسائل زمان‌بندی تک ماشینه، ماشین‌های موازی و جریان کارگاهی با در نظر گرفتن محدودیت دسترسی به ماشین‌ها توسعه یافت. معیارهای عملکردی مهم در این تحقیقات شامل کمینه کردن زمان‌های تکمیل وزن‌دهی شده (سورتراکول و همکاران[۴]، ۲۰۰۵)، کمینه کردن هزینه‌ی کلی عملیات نت و هزینه‌ی خرابی با توجه به حداقل سطح قابلیت اطمینان مورد نیاز (داس و همکاران[۵]، ۲۰۰۵) بوده است.

اخیراً نیز در تعدادی از مقالات به اجرای برنامه های نت در مسایل زمانبندی پرداخته‌اند. به عنوان مثال فخرزاد و رجائی[۶] (۲۰۱۷) زمان‌بندی همزمان کارها و فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه در ماشین‌های موازی نامرتبط با در نظر گرفتن اثر زوال را مورد مطالعه قرار داده تا زمان بهینه فعالیت‌های نت و توالی بهینه کارها جهت حداقل‌کردن مجموع زمان اتمام کارها بدست آید. رزقی و رضائیان[۷] (۲۰۱۸) مسئله زمان‌بندی خط جریان مونتاژ دومرحله‌ای با درنظرگرفتن اثر استهلاک ماشین‌ها و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات را بررسی کرده و برای مسئله مورد نظر یک مدل ریاضی عدد صحیح ارائه کرده‌اند. همچنین برای حل مسئله در ابعاد متوسط و بزرگ نیز الگوریتم‌های فرا ابتکاری *HGA* و *HPSO* استفاده کرده‌اند. در مقاله‌ای دیگر (حسام و همکاران[۸]، ۲۰۱۹) مساله زمان‌بندی کارها و فعالیت‌های نگهداری وتعمیرات در یک سیستم تولیدی باماشین‌های موازی نامرتبط مورد ملاحظه قرار گرفته است. در این مقاله با در نظر گرفتن زمان‌های پردازش قابل کنترل یک مدل برنامه ریزی ریاضی چندهدفه برای کمینه نمودن هزینه‌های توسعه و فشرده سازی زمان ، نگهداری و تعمیرات، زمان اتمام کارها، دیرکرد ها و زودکردها ارائه و با روش برنامه ریزی آرمانی چند انتخابی مدل پیشنهادی حل شده است. سان و لی[۹] (۲۰۱۰) مسأله زمانبندی دو ماشین موازی را با این فرض که هر کدام از ماشین‌ها در بازه‌هایی از زمان برای انجام فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات در دسترس نبوده و نیز زمان کارکرد متوالی هر ماشین نمی‌تواند بیشتر از یک مدت از پیش تعیین شده باشد، بررسی کردند .آنها دو مدل متفاوت در نظر گرفتند :در مدل اول، فرض بر این است که فعالیتهای نگهداری و تعمیرات به صورت دوره‌های انجام شده و هدف کمینه کردن دامنه‌ی عملیات است و در مدل دوم، فرض شده است که زمان انجام این فعالیت‌ها در ابتدای زمان‌بندی مشخص بوده و هدف کمینه کردن مجموع زمان‌های تکمیل است؛ یک الگوریتم چندجمله‌ای برای مدل اول معرفی و برای مدل دوم نیز قاعده‌ی کلاسیک کوتاهترین زمان پردازش مطرح شده است. ژائو و همکاران[۱۰] (۲۰۱۱) مسأله دو ماشینه را با هدف کمینه کردن مجموع وزنی زمان‌های تکمیل و با این فرض که فقط یکی از ماشین‌ها در بازه‌های مشخصی از زمان در دسترس نیست، بررسی و یک روش تقریبی برای حل آن ارائه کردند. تان و همکاران[۱۱] (۲۰۱۳) مسأله دو ماشینه را با هدف کمینه کردن مجموع زمان‌های تکمیل و با این فرض که هر یک از ماشین‌ها در بازه‌های مشخصی از زمان در دسترس نیستند، بررسی کردند .آن‌ها نشان دادند که قاعده کوتاه‌ترین زمان پردازش برای حالتی که یکی از ماشین‌ها در بازه‌هایی از زمان از دسترس خارج شود و همچنین برای حالتی که هر یک از ماشین‌ها در بازهایی از زمان از دسترس خارج شود طوریکه این بازه‌ها همپوشانی نداشته باشند، منجر به جوابی خواهد شد که انحراف آن نسبت به جواب بهینه در بدترین حالت، مشخص است. ژو و یانگ[۱۲] (۲۰۱۳) مسأله دو ماشینه را با هدف کمینه کردن دامنه‌ی عملیات و با این فرض که یکی از ماشین‌ها به صورت دوره‌ای از دسترس خارج شده و ماشین دیگر همواره در دسترس است، بررسی کردند. وانگ و چنگ[۱۳] (۲۰۱۵) مسأله دو ماشینه را با هدف بیشنه‌کردن تعداد کارهایی که پردازش آنها بدون تأخیر به پایان میرسد، مورد بررسی قرار داده و با این فرض که یکی از ماشین‌ها در یک بازه زمانی

---

[۱] Ma et al.
[۲] Schmidt
[۳] Lee
[۴] Sortrakul et al.
[۵] Das et al.
[۶] Fakhrzad & Rajaei
[۷] Rezghi & Rezaeian
[۸] Hesam et al.
[۹] Sun & Li
[۱۰] Zhao et al.
[۱۱] Tan et al.
[۱۲] Xu & Yang
[۱۳] Wang & Cheng

مشخص در دسترس نمی‌باشد، یک روش ابتکاری برای حل آن پیشنهاد کردند. لی و کیم[۱] (۲۰۱۵) مسأله دو ماشینه را با هدف کمینه کردن مجموع دیرکرد کارها و با این فرض که هر ماشین پس از پردازش تعداد مشخصی کار باید به منظور انجام فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات از دسترس خارج شود، بررسی و یک الگوریتم شاخه و کران برای حل آن ارائه کردند. هی و همکاران[۲] در سال ۲۰۱۶ مسأله دو ماشینه را با هدف کمینه‌کردن دامنه‌ی عملیات مورد بررسی قرار داده و با این فرض که هر یک از دو ماشین به صورت دوره‌ای در بازه‌هایی از زمان با حداکثر فاصله مشخص از دسترس خارج می‌شوند، چندین الگوریتم ابتکاری برای حل آن ارائه کردند (لی و همکاران[۳]، ۲۰۱۵) مسأله را با هدف کمینه‌کردن مجموع دیرکرها و با این فرض که ماشین‌ها نیازمند فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات هستند، مورد بررسی قرار دادند .آن‌ها یک الگوریتم شاخه و کران و نیز یک الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله ارائه کردند .اخیرا نیز یین و همکاران[۴] (۲۰۱۷) مسأله را با هدف کمین کردن مجموع زمان‌های تکمیل مورد انتظار بررسی کرده و با این فرض که بعضی از ماشین‌ها ممکن است در بازهایی از زمان با احتمال مشخصی از دسترس خارج شده و نیز مدت زمان پردازش هر کار با تعویق پردازش افزایش می‌یابد، روش‌های تقریبی حل را توسعه دادند. در **جدول ۱** نیز مقالات مورد بررسی در بالا به صورت خلاصه و به تفکیک تابع هدف ، محدودیت‌ها و روش حل هریک از مدل‌های پیشنهادی در این مقالات آمده است.

در تحقیقات انجام شده در رابطه با مسئله‌ی ماشین‌های موازی نامرتبط، به محدودیت عدم دسترسی به ماشین‌آلات به طور کامل پرداخته نشده و اجرای برنامه‌های نت پیشگیرانه و اضطراری به طور همزمان، در هیچ پژوهشی مورد مطالعه قرار نگرفته است و در اکثر تحقیقات این حوزه تنها عملیات نت پیشگیرانه را در مدلسازی خود وارد کرده و از زمان‌های تخصیص داده شده به عملیات نت اضطراری صرف‌نظر شده است؛ این درحالیست که اتفاقاً بخش قابل توجهی از زمان‌های تخصیص یافته به عملیات نت، مخصوصاً در کارخانجات ایرانی، درگیر عملیات نت اضطراری می‌شود. لذا در این مقاله به ارائه مدلی، جهت حداقل‌کردن مجموع وزنی زمان‌های تکمیل در مسئله ماشین‌های موازی نامرتبط پرداخته شده است. در مدل پیشنهادی، زمان‌های صرف شده برای انجام فعالیت‌های نت پیشگیرانه و نت اضطراری به طور توأمان؛ در زمان‌بندی مسئله‌ی مذکور در نظر گرفته شده است. در ادامه با توجه به پیچیدگی مسئله، به حل مدل با الگوریتم‌های شبیه‌سازی تبرید و ژنتیک پرداخته و جواب‌های بدست آمده مورد مقایسه و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

۳- مدل‌سازی و تعریف مسأله

تحلیل توصیفی مساله‌ی زمانبندی ماشینهای موازی نامرتبط به این صورت می‌باشد: مجموعه‌ای از n کار در دسترس می‌باشد. هر کار $j \in J$ باید دقیقاً روی یک ماشین از مجموعه‌ی m ماشین موازی پردازش شود. و هر ماشین می‌تواند حداکثر یک کار را در یک زمان خاص پردازش کند. اگر کار j روی ماشین i پردازش شود به آن زمان پردازش t_{ij} تخصیص می‌یابد. علاوه بر این هر کار دارای وزن و اولویت مشخصی می‌باشد که این وزنها در مدل به صورت متغیر عدد صحیح غیر منفی w_j در نظر گرفته می‌شود. هدف، برنامه‌ریزی کارها به صورتی است که مجموع وزنی زمان تکمیل کارها مینیمم شود (رودریگرز و همکاران، ۲۰۱۳).

---

[۱] Lee & Kim
[۲] He et al.
[۳] Lee et al.
[۴] Yin et al.

جدول ۱- مرور بر ادبیات مسائل زمانبندی ماشین‌های موازی.

Table 1- Literature review of parallel machine scheduling problems.

نوع سنده اول مقاله/ سال انتشار	تابع هدف مدل پیشنهادی	محدودیت‌های مدل پیشنهادی	روش حل مدل
اشمیت/ 1984	مینیمم سازی زمان‌های تکمیل	امکان انقطاع عملیات	الگوریتم زمانی 0
لی/ 1991	مینیمم سازی زمان کل کارها	حداکثر یک دوره عدم دسترسی همزمان از تمام ماشین‌ها	الگوریتم ابتکاری طولانی ترین زمان پردازش اصلاح شده(MLPT)
سورتراکول/ 2005	مینیمم سازی مجموع وزنی زمان‌های تکمیل	وجود برنامه نت پیشگیرانه	الگوریتم ژنتیک
داس / 2007	ماکزیمم سازی قابلیت اطمینان سیستم و مینیمم سازی کل هزینه نگهداری	برنامه نت پیشگیرانه	روش حل دقیق برای ابعاد کوچک مسئله
مارکو/ 2009	مینیمم سازی مجموع وزنی زمان‌های تکمیل	محدودیت‌های مدل پایه ماشین‌های موازی	الگوریتم (SA) شبیه سازی تبرید
سان/ 2010	کمینه کردن دامنه‌ی عملیات و مجموع زمان‌های تکمیل	عدم دسترسی به ماشین‌ها به دلیل برنامه نت و محدودیت زمان کارکرد ماشینها	الگوریتم چندجمله‌ای و قاعده‌ی کلاسیک کوتاه‌ترین زمان پردازش
ژائو / 2011	کمینه کردن مجموع وزنی زمان‌های تکمیل	عدم دسترسی به فقط یکی از ماشین ها در بازه‌های زمانی مشخص	روش تقریبی ابتکاری
ژو/ 2013	کمینه کردن دامنه‌ی عملیات	عدم دسترسی به یکی از ماشین‌ها به صورت دوره‌ای ودسترسی همیشگی به ماشین دیگر	الگوریتم زمان بندی لیست LS ، طولانی‌ترین زمان پروسهLPT
ونگ/ 2015	بیشنه کردن تعداد کارهای بدون تأخیر	عدم دسترسی به فقط یکی از ماشین‌ها در بازه‌های زمانی مشخص	یک روش ابتکاری
لی و کیم/ 2015	کمینه کردن مجموع دیرکرد کارها	هر ماشین پس از پردازش تعداد مشخصی کار باید به منظور انجام فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات از دسترس خارج شود	الگوریتم شاخه و کران
لی و ونگ/ 2015	کمینه کردن مجموع دیرکردها	نیاز ماشین ها به فعالیت های نگهداری و تعمیرات هستند	الگوریتم شاخه و کران و یک الگوریتم ژنتیک
یین/ 2015	کمینه کردن مجموع زمان های تکمیل	عدم دسترسی بعضی از ماشین‌ها در بازه‌هایی از زمان با احتمال مشخص	توسعه روش‌های تقریبی
فخرزاد / 2017	حداقل‌کردن مجموع زمان اتمام کارها	نت پیشگیرانه با در نظر گرفتن اثر زوال و زمان آماده‌سازی	الگوریتم (SA) شبیه سازی تبرید
رزقی / 2018	حداقل‌کردن کل تاخیر موزون و هزینه‌های نگهداری	اثر استهلاک ماشین‌ها و فعالیت‌های نت پیشگیرانه	الگوریتم ژنتیک ترکیبی (HGA) و بهینه سازی ازدحام ذرات ترکیبی (HPSO)
حسام / 2019	کمینه نمودن هزینه‌های توسعه، نگهداری و تعمیرات، زمان اتمام کارها، دیرکردها و زودکردها	در نظر گرفتن زمان‌های پردازش قابل کنترل	برنامه‌ریزی آرمانی چند انتخابی

فرضیات مسئله به صورت زیر ارائه می‌شوند:

- *وقفه در کارها مجاز است*
- *فاصله زمانی بین خرابی ماشین‌آلات خط تولید از توزیع نمایی پیروی می‌کند.*
- *نرخ خرابی هر ماشین با توجه به ویژگی‌هایش تعیین می‌شود (به دلیل نامرتبط بودن ماشین‌ها).*
- *به ازای گذشت هر H_i واحد زمانی از فعالیت ماشین i ام، یک نوبت برنامه نت پیشگیرانه بر روی ماشین i ام اجرا می‌شود.*
- *بر اساس فرضیات مطرح شده، اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مسئله به صورت زیر تعریف می‌شوند:*

اندیس‌ها:

- *ماشین‌ها* $i=1,2,\ldots,m$
- *کارها* $j,k=1,2,\ldots,n$

پارامترها و متغیرهای تصمیم:

- $\boldsymbol{m}$: *تعداد کل ماشین‌ها.*
- n: *تعداد کل کارها.*
- $\boldsymbol{H_i}$: *مدت زمان کارکرد ماشین i ام تا قبل از نیاز به اجرای برنامه نت پیشگیرانه.*
- w_j: *وزن کار j ام.*
- $\boldsymbol{c_j}$: *زمان تکمیل کار j ام.*
- $\boldsymbol{t_{ij}}$: *زمان پردازش ماشین i ام بر روی کار j ام.*
- $\boldsymbol{t_{PMi}}$: *زمان لازم جهت انجام فعالیت‌های دوره ای نت پیشگیرانه روی ماشین i ام.*
- t_{BMi}: *زمان لازم جهت انجام فعالیت‌های نت اضطراری روی ماشین i ام (زمان تعمیر ماشین i ام).*
- $\boldsymbol{N_{ij}}$: *متوسط تعداد دفعات خرابی ماشین i ام تا تکمیل کار j ام.*
- x_i: *متغیر تصادفی پیوسته مربوط به فاصله زمانی بین دو خرابی ماشین i ام.*
- $f(x_i)$: *تابع چگالی احتمال مربوط به فاصله زمانی بین دو خرابی ماشین i ام.*
- $\boldsymbol{T_{PMj}}$: *زمان صرف شده جهت انجام برنامه نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه (دوره‌ای) تا زمان تکمیل کار j ام (به ازای هر Hi واحد زمانی کارکرد ماشین i ام، یک دوره نت انجام می‌شود).*
- $\boldsymbol{T_{BMj}}$: *زمان صرف شده جهت انجام برنامه‌ی نگه‌داری و تعمیرات اضطراری (براثرخرابی اتفاقی دستگاه‌ها) تا زمان تکمیل کار j ام.*
- x_{ij}: *چنانچه کار j ام روی ماشین i ام انجام شود؛ مقدار یک ۱ و در غیر اینصورت مقدار صفر ۰ می‌گیرد.*

مدل پیشنهادی که برگرفته از مدل رودریگرز و همکاران (۲۰۱۳) می‌باشد، با در نظر گرفتن محدودیت عدم دسترسی به ماشین‌آلات به دلیل اجرای برنامه‌های نت پیشگیرانه و اضطراری، سبب نزدیکی بیشتر مدل با شرایط واقعی حاکم بر محیط‌های تولیدی شده است.

در مدل پیشنهادی بالا **عبارت ۱** تابع هدف مدل بوده و بیانگر حداقل‌کردن مجموع وزنی زمان تکمیل کارها می‌باشد. **رابطه (۲)** اطمینان می‌دهد که هر کار دقیقا روی یک ماشین برنامه‌ریزی **رابطه (۳)** بیان می‌کند که زمان تکمیل کار j که روی ماشین i زمان‌بندی می‌شود، از مجموع زمان‌های پردازش کار j ام و کارهای ماقبل آن بر روی ماشین i و زمانهای لازم برای اجرای برنامه‌های نت پیشگیرانه و اضطراری براساس قانون *WSPT* (*weighted shortest processing time*) به دست می‌آید. در این محدودیت کار k که قبل از کار j روی ماشین i انجام شده است با $k \prec ij$ نشان داده می‌شود. در **رابطه (۴)**، $\left[\frac{t_{ij}+\sum_{k<ij}(t_{ik}.x_{ik})}{H_i}\right]$ بیانگر تعداد دفعات مورد نیاز برای انجام عملیات نت پیشگیرانه بر روی ماشین i ام تا زمان تکمیل کار j ام است. همچنین در **رابطه (۵)**، N_{ij} بیانگر متوسط تعداد دفعات خرابی ماشین i ام تا زمان تکمیل کار j ام می‌باشد.

$$Min \sum_{(j=1)}^{n} w_j . c_j . \quad (۱)$$

$$\sum_{i=1}^{m} x_{ij} \quad 1 \qquad j \quad 1 \; ..n. \quad (۲)$$

$$C_j = \sum_{i=1}^{m} x_{ij} . \; t_{ij} + \sum_{k \prec ij} (t_{ik} . x_{ik}) + T_{PMj} + T_{BMj} \quad . \quad (۳)$$

$$T_{PMj} = \frac{t_{ij} + \sum_{k \prec ij} (t_{ik} . x_{ik})}{H_i} \; .t_{PMi} . \quad (۴)$$

$$T_{BMj} = N_{ij} . (t_{BMi}) = \int_{0}^{t_{ij} + \sum_{k \prec ij} (t_{ik} . x_{ik})} x_i . f(x_i) . dx_i \; . (t_{BMi}) . \quad (۵)$$

در این مدل با توجه به فرض نمایی بودن تابع چگالی خرابی ماشین‌ها، مقادیر $f(x_i)$ به صورت زیر بدست می‌آید:

$$f(x_i) = \lambda \, e^{-\lambda x} . \quad (۶)$$

با جای‌گذاری **رابطه (۶)** در **رابطه (۵)**، زمان صرف شده جهت انجام برنامه‌ی نگه‌داری و تعمیرات اضطراری تا زمان تکمیل کار j ام از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$T_{BMj} = N_{ij} . (t_{BMi}) = \left(\int_{0}^{t_{ij} + \sum_{k \prec ij} (t_{ik} . x_{ik})} x_i . \lambda \, e^{-\lambda x_i} . dx_i \right) . (t_{BMi}) . \quad (۷)$$

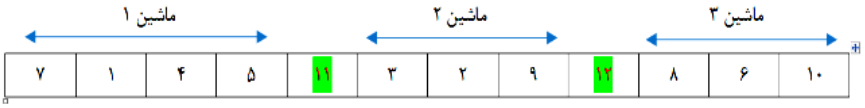
۴- روش حل

۱-٤- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک به عنوان یک روش کارا برای حل مسائل بهینه‌سازی شناخته شده که به نوعی اکثر روش‌های فراابتکاری جدیدتر که به روش‌های تکاملی معروفند، شکل توسعه یافته این الگوریتم به شمار می‌آیند. در این قسمت به تشریح جزئیات الگوریتم ژنتیک ارایه شده می‌پردازیم:

۱-۱-٤- تعریف کروموزوم (کد نمایش جواب)

نحوه‌ی نمایش جواب باید به گونه‌ای باشد که تخصیص و توالی بهینه‌ی کارها را مشخص کند و محدودیت‌های مسئله را برآورده کند یعنی یک کار تنها می‌تواند روی یک ماشین انجام شود و هر ماشین نمی‌تواند همزمان بیش از یک کار انجام دهد. یکی از بهترین و پرکاربردترین نحوه‌ی کدینگ جواب اولیه برای مسائل ماشین‌های موازی جایگشت ۱ تا $n+m-1$ عدد می‌باشد. برای مسائل با n کار و m ماشین یک ترتیب بهم ریخته از اعداد ۱ تا $n+m-1$ می‌تواند یک پاسخ شدنی مساله باشد. مثلا برای ۱۰ کار و ۳ ماشین ترتیب به هم ریخته‌ی اعداد ۱ تا ۱۲(۱-۳+۱۰) می‌تواند یک جواب اولیه برای مساله مورد نظر باشد. همانطور که در **شکل ۱** مشاهده می‌شود، اعداد بزرگتر از n نشان‌دهنده‌ی تخصیص کارها به ماشین‌ها و ترتیب قرارگیری این اعداد نیز توالی کارها روی ماشین‌ها را نشان می‌دهند.



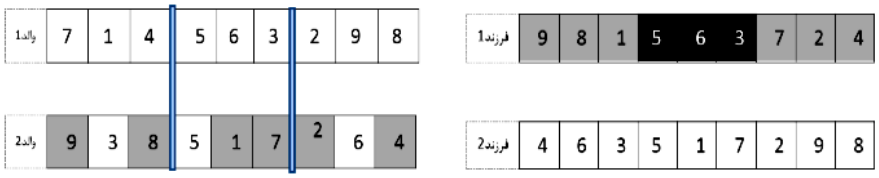
شکل ۱- نمونه‌ای از نمایش جواب.
Figure 1- Example of displaying the answer.

۲-۱-٤- ایجاد جمعیت اولیه

متداول‌ترین روش برای تولید جمعیت جواب اولیه، تولید جمعیت تصادفی به دلیل سرعت اجرا و نیز ایجاد تنوع در جواب‌ها است. بنابراین در این قسمت به تعداد جمعیت در نظر گرفته شده، جواب تصادفی تولید می‌کنیم و مقدار تابع هدف را نیز برای هر یک از آنها حساب می‌کنیم.

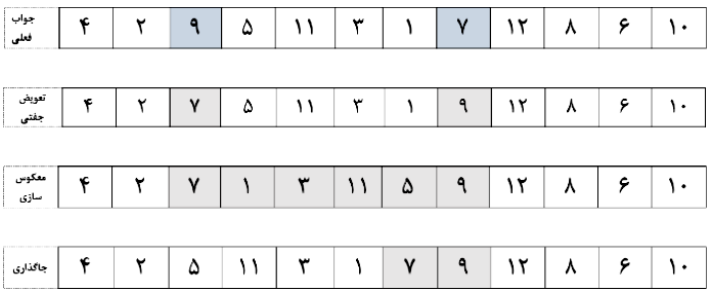
۳-۱-٤- تقاطع و جهش

در این مقاله از عملگر تقاطع ترتیب (OX) بیان شده در مقاله (نوروزی و همکاران[1]، ۲۰۱۳) استفاده شده است. همانطور که در **شکل ۲** نشان داده شده، دو نقطه برشی بطور تصادفی انتخاب می‌شود. قسمت میانی کروموزوم عیناً بدون تغییر از والد به فرزند متناظر منتقل شده و ژن‌های دیگر به همان ترتیبی که در والد دیگر (والد غیر متناظر) وجود دارند از چپ به راست به کروموزوم فرزند منتقل می‌شوند.



شکل ۲- عملگر تقاطع مورد استفاده.
Figure 2- The used crossover operator.

در این مقاله از سه عملگر جهش تعویض جفتی(جابجایی)، معکوس سازی و جاگذاری استفاده شده است. که یکی از آن‌ها به تصادف انتخاب و بر روی جواب مربوطه اعمال می شود. عملگر تعویض جفتی جواب فعلی و دو درایه از آن را می‌گیرد و جواب جدید را با تعویض مکان این دو درایه به وجود می‌آورد. عملگر معکوس سازی جواب فعلی و دو درایه از آن را می‌گیرد و جواب جدید را با معکوس کردن آن‌ها به وجود می‌آورد. عملگر جایگذاری نیز مکان درایه اول جواب فعلی را با مکان درایه دوم جواب فعلی تعویض کرده و سایر درایه‌ها را از چپ به راست مرتب می‌کند. نحوه عملکرد این عملگرها نیز در **شکل ۳** نشان داده شده است.



شکل ۳- سه عملگر جهش مورد استفاده.
Figure 3- The three used mutant operators.

[1] Noroozi et al.

۴-۱-۴- ارزیابی و انتخاب

در هر نسل، کرومزوم‌ها با اندازه‌گیری برازندگی‌شان با توجه به تابع هدف اصلی ارزیابی می‌شوند. از آنجا که با یک مساله‌ی مینیمم‌سازی مواجه هستیم، مقدار تابع هدف هر کرومزوم را به تابع برازندگی آن تبدیل کرده تا یک کرومزوم بهتر، برازندگی بیشتری داشته باشد. برای اندازه‌گیری برازندگی هر کرومزوم بر اساس تحقیق (لین و همکاران، ۲۰۱۱) از **رابطه (۸)** استفاده شده است:

$$fitness(k) \quad \frac{1}{\sum_{j=1}^{n} w_j . c_j}, \qquad k \quad 1, \ .., p_s \ \frac{1}{2}. \tag{۸}$$

که p_s اندازه‌ی جمعیت می‌باشد. وقتی که $\sum_{j=1}^{n} w_j . c_j$ برابر با صفر شود مقدار $fitness(k)$ را برابر با ۱ گرفته که در آن صورت الگوریتم ژنتیک به دلیل رسیدن به نقطه‌ی بهینه در این نقطه متوقف می‌شود. سپس از روش انتخابی چرخ رولت باگچی[۱] (۱۹۹۹) برای انتخاب کرومزوم‌های والدین استفاده شده است و احتمال انتخاب هر کرومزوم از **رابطه (۹)** محاسبه می‌شود.

$$prop_k \quad \frac{fitness(k)}{\sum_{s=1}^{p_s} fitness(s)}, \qquad k \quad 1, \ , p_s. \tag{۹}$$

۲-٤- الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

این الگوریتم برای اولین بار توسط (کیرکپاتریک و همکاران[۲]، ۱۹۸۴) معرفی شد و بعد از آن در حل بسیاری از مسائل مثل مکان‌یابی و مسیریابی، زمان‌بندی و غیره مورد استفاده قرار گرفت. شبیه سازی تبرید یک تکنیک جستجو است که می تواند برای تولید راه حل خوب برای مسائل ترکیبی مختلف مورد استفاده قرار گیرد. منشا آن در علم مواد و فیزیک است. انگیزه‌ی استفاده از روش تبرید شبیه‌سازی شده یک هم‌ارزی بین سرد شدن تدریجی مواد جامد و مساله‌ی بهینه‌سازی است (جولای و همکاران[۳]، ۲۰۱۳). *SA* توانایی فراراز بهینه‌ی محلی به سمت بهینه‌ی جهانی دارد. این توانایی با پذیرش احتمالی جواب همسایه که مقداری بدتر از جواب فعلی دارد، حاصل می‌شود. احتمال پذیرش با پارامترهای کنترل، تعیین می‌شود و در طول فرآیند *SA* کاهش می‌یابد. در روند شبیه‌سازی تبرید، اجازه‌ی حرکت به سمت جواب بدتر وجود دارد. دلیل اجازه دادن به چنین حرکت‌هایی این است که به روند این فرصت داده شود تا از بهینه‌ی محلی فرار کرده و کمی دیرتر یک جواب بهتر را پیدا کند. روش شبیه‌سازی تبرید از یک حیث نسبت به سایر روش‌های فراابتکاری دارای برتری است و آن حساسیت کم این روش نسبت به مقادیر اولیه پارامترهای آن می‌باشد. این ویژگی باعث شده که این روش تا حد زیادی از خطر افتادن در دام نقاط بهینه موضعی مصون باشد (واحدی و همکاران[٤]، ۲۰۱۳). در این قسمت به تشریح جزئیات الگوریتم شبیه سازی تبرید ارایه شده می‌پردازیم.

۱-۲-٤- نحوه نمایش جواب

برای نمایش جواب این الگوریتم از همان روشی که در بخش ۱-۱-۴ برای نمایش جواب الگوریتم ژنتیک به کار برده شد، استفاده شده است.

---

[۱] Bagchi
[۲] Kirkpatrick
[۳] Jolai et al.
[٤] Vahedi et al.

۲-۲-٤- ایجاد جواب اولیه

در این الگوریتم نیز به دلیل سرعت اجرا از مکانیزم تولید جواب تصادفی استفاده شده است. به این ترتیب که در ابتدای اجرای الگوریتم یک جواب تصادفی تولید و مقدار تابع هدف برای آن محاسبه می‌گردد.

۳-۲-٤- تولید همسایگی

جستجوی همسایگی در واقع مکانیزم جستجو در اطراف جواب فعلی برای یافتن جواب جدید و مناسبتر است. یک ساختار جستجوی همسایگی مناسب می‌تواند بر کیفیت جواب و فرار از نقاط بهینه محلی تاثیر بگذارد (بانک و همکاران[۱]، ۲۰۱۲). انواع مختلفی از ایجاد همسایگی وجود دارد که در این مقاله به دلیل کاربرد زیاد و کیفیت پاسخ مناسب در الگوریتم شبیه سازی تبرید صرفاً از سه عملگر تعویض جفتی(جابجایی)، معکوس‌سازی و جایگذاری توضیح داده شده در بخش ۴-۱-۳ استفاده شده است.

پس از تخصیص کارها به ماشین‌ها ترتیب *wspt* پاسخ مناسبی برای مسأله تک ماشینه با هدف مجموع وزنی زمان تکمیل کارهاست (رودریگرز و همکاران، ۲۰۱۳). با توجه به این نکته یکی از رویکردهای مناسب برای جستجوی جواب همسایه در مسأله ماشین‌های موازی نامرتبط با نت دوره‌ای و پیشگیرانه پس از یافتن جواب می‌تواند استفاده از ترتیب *wspt* به عنوان یک جواب در حین اجرای الگوریتم باشد. لذا در این مقاله از روش *wspt* به عنوان یکی از روشهای جستجوی همسایه در حین اجرای هر دو الگوریتم استفاده شده است.

٤-۲-٤- تعیین دمای اولیه و نرخ کاهش دما

اگر دمای شروع الگوریتم مقدار بالایی باشد احتمال پذیرش جواب بدتر، بیشتر می شود بنابراین مکانیزم جستجو می‌تواند تمام همسایگی‌ها را بررسی کند اما ممکن است زمان یافتن پاسخ مناسب طولانی شود. در برخی موارد اطلاعات کافی برای تعیین دمای شروع وجود دارد اما در مسائل واقعی تخمین چنین دمایی مشکل است. در این مقاله از رابطه ۱۰ برای تعیین دمای شروع استفاده شده است.

$$T_0 = -\frac{max(\Delta f)}{ln(Ps_0)}. \qquad (۱۰)$$

که Ps_0 احتمال اولیه برای قبول یک جواب غیر بهینه توسط این الگوریتم و $max(\Delta f)$ تقریبی از بیشترین میزان تغییر تابع هدف است. نرخ کاهش دما (α) یکی از مهم‌ترین پارامترهای الگوریتم *SA* است. پیشنهاد می‌شود که به سیستم اجازه دهیم تا در دمای فعلی خود و قبل از کاهش دما به حالت ایستای خود نزدیک گردد و بعد از آن دما به صورت آهسته به صفر نزدیک شود، در این صورت می‌توان از تعداد تکرارهای زیاد در دمای کم یا از تعداد تکرارهای کم در دمای زیاد استفاده کرد و یا تعادلی بین تعداد تکرارها و دما برقرار کرد.

روش های متفاوتی برای نرخ سردسازی ارائه شده است که ساده‌ترین و متداولترین نوع آن که در این مقاله از آن استفاده شده است شامل یک تابع کاهشی هندسی به صورت $T_{t+1}=\alpha T_t$ $(0<\alpha<1)$ می‌باشد. با استفاده از مقادیر بزرگتر α می‌توان نتیجه‌ی بهتری را به دست آورد چون فرآیند سرد شدن آهسته‌تر صورت می‌گیرد (یانگ، ۲۰۱۰).

۵- آزمایش محاسباتی

در این قسمت جهت آزمایش و ارزیابی الگوریتم‌های پیشنهادی از تست‌های کامپیوتری استفاده شد. مدل ریاضی مسئله در نرم‌افزار *GAMS v23.6.2* والگوریتم‌ها در *MATLAB R2013a* کدنویسی و تحت سیستمی با مشخصات *CPU:Corei3,2.4GHz* و *4GB RAM:* اجرا شدند. مقادیر عددی داده‌های ورودی مسئله و نحوه‌ی تولید آن‌ها در **جدول ۲** نشان داده شده است.

[۱] Bank et al.

جدول ۲- مقادیر داده‌های مساله برای تولید مساله نمونه.

Table 2- Problem data values for sample problem generation.

نحوه‌ی تولید آن‌ها	پارامترها
discrete. U [1,100]	زمان پردازش (t_{ij})
discrete. U [1,10]	وزن کارها (w_j)
discrete. U [50,100]	زمان لازم جهت نت پیشگیرانه (t_{PMi})
discrete. U [100,200]	زمان لازم جهت نت اضطراری (t_{BMi})
discrete. U [(1/4) *(C'/I), (3/4) *(C'/I)]	دوره‌های نت (Hi)
Continuous (1,5)	نرخ خرابی ماشین‌ها (λ)

که C' تخمینی از جمع زمان پردازش کارها می‌باشد. قبل از اجرای الگوریتم‌ها باید آنها را تنظیم کرد، یعنی لازم است پارامترهای مناسبی برای الگوریتم‌ها انتخاب شود. بدین منظور برای الگوریتم ژنتیک با چندین تست سطوحی برای نرخ تقاطع و نرخ جهش در نظر گرفته شده به همین شکل برای پارامترهای الگوریتم شبیه سازی تبرید شامل دمای اولیه و نرخ کاهش دما هر کدام سه سطح طبق توضیحات و رابطه ارائه شده در بخش٤-٢-٤ انتخاب شده‌اند. هر الگوریتم به ازای هر کدام از $3^2=9$ حالت بوجود آمده برای هر حالت ۱۰ بار به ازای مدل‌های برابر آزمایش شده و میانگین تابع هدف و زمان حل به دست آمده است. در نهایت با توجه به میانگین تابع هدف و زمان حل نرخ تقاطع ۰/۷ و نرخ جهش ۰/۰۷ برای الگوریتم ژنتیک و مقدار دمای اولیه‌ی ۲۵۰ و نرخ کاهش دمای ۰/۹۷ برای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید انتخاب شده است. نتایج متوسط در **جدول ۳** نشان داده شده است.

جدول ۳- پارامترهای الگوریتم GA و SA.

Table 3- Parameters of the GA and SA algorithms.

نحوه‌ی تولید آن‌ها	پارامترها
discrete. U [1,100]	زمان پردازش (t_{ij})
discrete. U [1,10]	وزن کارها (w_j)
discrete. U [50,100]	زمان لازم جهت نت پیشگیرانه (t_{PMi})
discrete. U [100,200]	زمان لازم جهت نت اضطراری (t_{BMi})
discrete. U [(1/4) *(C'/I), (3/4) *(C'/I)]	دوره‌های نت (Hi)
Continuous (1,5)	نرخ خرابی ماشین‌ها (λ)

برای الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید باید پارامترهای مختلفی مانند اندازه جمعیت و تعداد تکرار در ژنتیک و دمای شروع الگوریتم و تعداد تکرار در شبیه‌سازی تبرید را با آزمایش‌های مختلف انتخاب کرد. پارامترهای انتخاب شده برای الگوریتم‌ها با توجه به آزمایش های متعدد انجام شده به دست آمد و در **جدول ٤** نشان داده شده است.

جدول ۴- سطوح انتخابی با توجه به آزمایش‌های انجام شده.

Table 4- Selectable levels according to the tests performed in the table.

SA	GA
تعداد تکرار:500	تعداد تکرار: 500
تکرار داخلی: 100	اندازه جمعیت: 100
دمای اولیه: 250	نرخ تقاطع: 0/7
نرخ کاهش دما: 0/97	نرخ جهش: 0/07

یکی از متداول‌ترین شرط توقف الگوریتم‌های فرابتکاری تعداد تکرار است در اینجا نیز شرط توقف الگوریتم‌ها رسیدن به ۵۰۰ تکرار می‌باشد. برای حل دقیق مدل نیز زمان حل پایین‌تر از ۲ ساعت در نظر گرفته شد و مقادیر بالاتر از این زمان با علامت ستاره مشخص

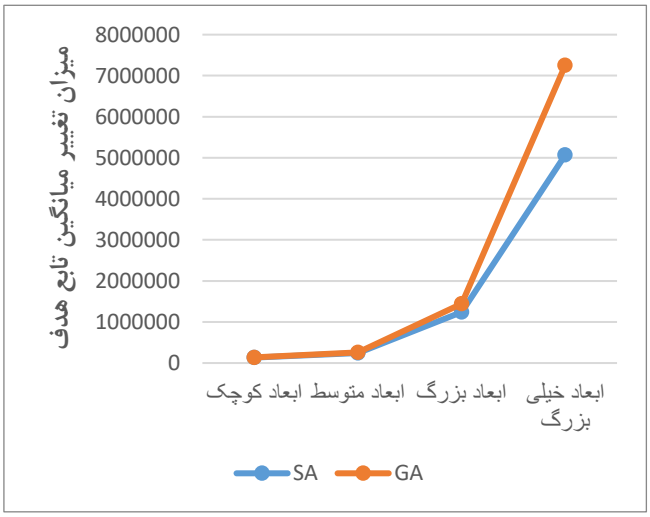
شد. الگوریتم‌های پیشنهادی در چهار سطح مختلف با تعداد کارهای ۲۰۰ و ۲۵۰ و ۵۰۰ و ۱۰۰۰ و هر کدام با سه سطح، تعداد ماشین‌های ۵ و ۳۰ و ۵۰ مورد آزمایش قرار گرفتند. که نتایج حاصله در **جدول ۵** و **شکل**‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵- نتایج محاسباتی.

Table 5- Computational results.

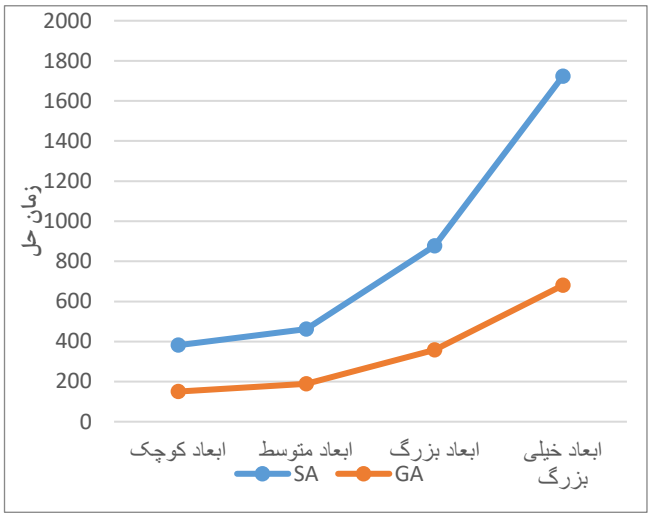
ابعاد مسئله	n	m	جواب بهینه GAMS v23.6.2	SA			GA		
			مقدارتابع هدف	مقدارتابع هدف	زمان اجرا (S)	انحراف %	مقدارتابع هدف	زمان اجرا (S)	انحراف %
کوچک	200	5	357017.6	371893.3	367.9	4.16	386317.2	120.3	8.2
		30	14161.9	14599.9	377.5	3.09	15358.9	160.2	8.45
		50	11581.1	12163.6	398.4	5.03	12845.8	170.4	10.92
میانگین بعد کوچک			127586.8	132885.6	381.6		138173.9	150.3	
متوسط	250	5	659753.5	673217.9	441.8	2.04	715241.8	187.4	8.41
		30	31110.7	32072.9	457.3	3.09	36128.4	188.7	16.12
		50	15103.1	16067.1	488.3	6.38	18042.6	191.1	19.41
میانگین بعد متوسط			235322.4	240452.6	462.4		256470.9	189.1	
بزرگ	500	5	3349383	3488941	859.1	4.16	4025264	350.5	20.17
		30	149646.3	157522.4	870	5.26	190429.2	357.8	27.25
		50	76828.6	82611.4	903.9	7.56	112851.3	365.7	46.2
میانگین بعد بزرگ			1191953	1243025	877.6		1442848	358	
خیلی بزرگ	1000	5	*	13461057	1752.9	*	20678566	686.5	*
		30	*	1245067	1693.8	*	370583.6	674.2	*
		50	*	495255.4	1724.1	*	713738.2	680.1	*
میانگین بعد خیلی بزرگ			*	5067126	1723.6		7254296	680.2	

با توجه به نتایج جداول و نمودارهای ارایه شده، در مجموع روش شبیه سازی تبرید جواب بهتری را نسبت به الگوریتم ژنتیک ارایه می‌کند زیرا میانگین جواب آن در تمامی حالات از میانگین جواب الگوریتم ژنتیک برتر است. البته زمان حل الگوریتم *GA* نسبت به الگوریم *SA* در ابعاد مختلف مسئله کمتر است اما این اختلاف زمانی چندان زیاد و محسوس نمی‌باشد.



شکل ۴- مقایسه مقادیر تابع هدف دو روش GA و SA در ابعاد مختلف مسئله.

Figure 4- Comparison of the objective function values of GA and SA methods in different dimensions of the problem.



شکل ۵- مقایسه زمان‌های پردازش دو روش GA و SA در ابعاد مختلف مسئله.

Figure 5- Comparison of processing times of GA and SA methods in different aspects of the problem.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله به بررسی مسئله‌ی زمان‌بندی ماشین‌های موازی نامرتبط با در نظرگرفتن نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و اضطراری پرداخته شد. برای مسئله یاد شده یک مدل ریاضی ارائه گردید که هدف، تخصیص کارها به ماشین‌ها با کمینه کردن مجموع وزنی زمان تکمیل کارها بود. در این مدل وقفه در کارها مجاز در نظر گرفته شد. از آنجایی که مدل ارائه شده دارای پیچیدگی بالایی بود، جهت حل آن از دو روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید استفاده شد و عملکرد آن‌ها با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. بر اساس این مقایسه الگوریتم شبیه‌سازی تبرید پیشنهادی قادر است به حل نزدیک به بهینه برسد ولی نسبت به الگوریتم ژنتیک زمان پردازش بالاتری دارد که این میزان از اختلاف زمان حل قابل قبول می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل و شناسایی خلاءهای تحقیقاتی موجود زمینه‌هایی همچون در نظر گرفتن محدودیت قابلیت یا شایستگی ماشین‌ها، در نظر گرفتن تغییر در سرعت ماشین‌ها پس از انجام فعالیت‌های نت، زمان آماده‌سازی وابسته به توالی، استفاده از عملگرهای تقاطع بهتر در الگوریتم ژنتیک جهت جستجوی قسمت‌های بیشتری از ناحیه‌ی جواب به منظور انجام تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود.

منابع

Afrati, F., Bampis, E., Kenyon, C., & Milis, I. (2000). A PTAS for the average weighted completion time problem on unrelated machines. *Journal of scheduling*, *3*(6), 323-332.

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

Aggoune, R., & Portmann, M. C. (2006). Flow shop scheduling problem with limited machine availability: a heuristic approach. *International journal of production economics*, *99*(1-2), 4-15.

Allaoui, H., & Artiba, A. (2006). Scheduling two-stage hybrid flow shop with availability constraints. *Computers & operations research*, *33*(5), 1399-1419.

Azizoglu, M., & Kirca, O. (1999). On the minimization of total weighted flow time with identical and uniform parallel machines. *European journal of operational research*, *113*(1), 91-100.

Azizoglu, M., & Kirca, O. (1999b). Scheduling jobs on unrelated parallel machines to minimize regular total cost functions. *IIE transactions*, *31*(2), 153-159.

Bagchi, T. P. (1999). *Multiobjective scheduling by genetic algorithms*. Springer.

Bank, M., Fatemi Ghomi, S., Jolai, F., & Behnamian, J. (2012). Application of particle swarm optimization and simulated annealing algorithms in flow shop scheduling problem under linear deterioration. *Advances in engineering software*, *47*(1), 1-6.

Bruno, J., Coffman Jr, E. G., & Sethi, R. (1974). Scheduling independent tasks to reduce mean finishing time. *Communications of the ACM*, *17*(7), 382-387.

Chen, Z.-L *&* Powell, W. B. (1999). Solving parallel machine scheduling problems by column generation. *INFORMS journal on computing*, *11*(1), 78-94.

Cheng, R., Gen, M., & Tozawa, T. (1995). Minmax earliness/tardiness scheduling in identical parallel machine system using genetic algorithms. *Computers & industrial engineering*, *29*(1), 513-517 .

Chudak, F. A. (1999). A min-sum 3/2-approximation algorithm for scheduling unrelated parallel machines. *Journal of Scheduling*, *2*(2), 73-77.

Cruz-Chávez, M. A., Juárez-Pérez, F ,.Ávila-Melgar, E. Y., & Martínez-Oropeza, A. (2009). Simulated annealing algorithm for the weighted unrelated parallel machines problem. *2009 electronics, robotics and automotive mechanics conference (CERMA)*. Cuernavaca, Mexico: IEEE. DOI: 10.1109/CERMA.2009.46

Das, K., Lashkari, R., & Sengupta, S. (2007). Machine reliability and preventive maintenance planning for cellular manufacturing systems. *European journal of operational research, 183*(1), 162-180.

Fakhrzad, M. B., & Rajaei, B. (2017). Preventive maintenance in unrelated parallel machine scheduling with deterioration effect and setup times. *Industrial management studies, 15*(45), 1-43. (**In Persian**). https://journals.atu.ac.ir/article_7604.html

Gao, J., Gen, M., & Sun, L. (2006). Scheduling jobs and maintenances in flexible job shop with a hybrid genetic algorithm. *Journal of intelligent manufacturing, 17*(4), 493-507.

Gharbi, A., & Haouari, M. (2005). Optimal parallel machines scheduling with availability constraints. *Discrete applied mathematics, 148*(1), 63-87.

Hall, L. A., Schulz, A. S., Shmoys, D. B., & Wein, J. (1997). Scheduling to minimize average completion time: off-line and on-line approximation algorithms. *Mathematics of operations research, 22*(3), 513-544.

He, J., Li, Q., & Xu, D. (2016). Scheduling two parallel machines with machine-dependent availabilities. *Computers & operations research, 72*, 31-42.

Hesam, A., Emami, S., & Nemati Keshteli, R. (2019). Scheduling of jobs and maintenance activities in an unrelated parallel machines environment. *Journal of modeling in engineering, 17*(58), 233-247. (**In Persian**). https://journals.semnan.ac.ir/article_4014.html

Jolai, F., Asefi, H., Rabiee, M., & Ramezani, P. (2013). Bi-objective simulated annealing approaches for no-wait two-stage flexible flow shop scheduling problem. *Scientia Iranica, 20*(3), 861-872. (**In Persian**). https://core.ac.uk/download/pdf/82523859.pd

Kirkpatrick, S. (1984). Optimization by simulated annealing: quantitative studies. *Journal of statistical physics, 34*(5-6), 975-986.

Lee, C.-Y. (1991). Parallel machines scheduling with nonsimultaneous machine available time. *Discrete applied mathematics, 30*(1), 53-61.

Lee, J. Y., & Kim, Y. D. (2015). A branch and bound algorithm to minimize total tardiness of jobs in a two identical-parallel-machine scheduling problem with a machine availability constraint. *Journal of the operational research society, 66*(9), 1542-1554.

Lee, W. C., Wang, J. Y., & Lee, L. Y. (2015). A hybrid genetic algorithm for an identical parallel-machine problem with maintenance activity. *Journal of the operational research society, 66*(11), 1906-1918.

Lenstra, J. K., Rinnooy Kan, A., & Brucker, P. (1977). Complexity of machine scheduling problems. *Annals of discrete mathematics, 1*, 343-362.

Lin, Y., Pfund, M. E., & Fowler, J. W. (2011). Heuristics for minimizing regular performance measures in unrelated parallel machine scheduling problems. *Computers & operations research, 38*(6), 901-916.

Ma, Y., Chu, C., & Zuo, C. (2010). A survey of scheduling with deterministic machine availability constraints. *Computers & industrial engineering, 58*(2), 199-211.

McNaughton, R. (1959). Scheduling with deadlines and loss functions. *Management science, 6*(1), 1-12.

Noroozi, A., Mokhtari, H., & Kamal Abadi, I. N. (2013). Research on computational intelligence algorithms with adaptive learning approach for scheduling problems with batch processing machines. *Neurocomputing, 101*, 190-203. (**In Persian**). https://dl.acm.org/doi/abs/10.1016/j.neucom.2012.08.011

Pinedo, M. (2001). *Scheduling: theory, algorithms, and systems*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall Inc.

Rezghi, A., & Rezaeian, J. (2018). Two stage assembly flow shop scheduling problem with preventive maintenance, aging effect and release time. *Journal of industrial engineering, 52*(1), 49-60. (**In Persian**). https://jieng.ut.ac.ir/article_66290.html

Rodriguez, F. J., Blum, C., García-Martínez, C., & Lozano, M. (2012). GRASP with path-relinking for the non-identical parallel machine scheduling problem with minimising total weighted completion times. *Annals of operations research, 201*(1), 383-401.

Rodriguez, F. J., Lozano, M., Blum, C., & GarcíA-MartíNez, C. (2013). An iterated greedy algorithm for the large-scale unrelated parallel machines scheduling problem. *Computers & operations research, 40*(7), 1829-1841.

Schmidt, G. (1984). Scheduling on semi-identical processors. *Zeitschrift für operations research, 28*(5), 153-162.

Schulz, A. S., & Skutella, M. (2002). Scheduling unrelated machines by randomized rounding. *SIAM journal on discrete mathematics, 15*(4), 450-469.

Skutella, M. (2001). Convex quadratic and semidefinite programming relaxations in scheduling. *Journal of the ACM (JACM), 48*(2), 206-242.

Sortrakul, N., Nachtmann, H. L., & Cassady, C. R. (2005). Genetic algorithms for integrated preventive maintenance planning and production scheduling for a single machine. *Computers in industry, 56*(2), 161-168.

Sun, K., & Li, H. (2010). Scheduling problems with multiple maintenance activities and non-preemptive jobs on two identical parallel machines. *International journal of production economics, 124*(1), 151-158.

Tan, Z., Chen, Y., & Zhang, A. (2013). On the exact bounds of SPT for scheduling on parallel machines with availability constraints. *International journal of production economics, 146*(1), 293-299.

Vahedi-Nouri, B., Fattahi, P., Rohaninejad, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). Minimizing the total completion time on a single machine with the learning effect and multiple availability constraints. *Applied mathematical modelling, 37*(5), 3126-3137.

Vredeveld, T., & Hurkens, C. (2002). Experimental comparison of approximation algorithms for scheduling unrelated parallel machines. *INFORMS journal on computing, 14*(2), 175-189.

Wang, X., & Cheng, T. (2015). A heuristic for scheduling jobs on two identical parallel machines with a machine availability constraint. *International journal of production economics, 161*, 74-82.

Xu, D., & Yang, D. L. (2013). Makespan minimization for two parallel machines scheduling with a periodic availability constraint: mathematical programming model, average-case analysis, and anomalies. *Applied mathematical modelling, 37*(15), 7561-7567.

Yang, S. J. (2013). Unrelated parallel-machine scheduling with deterioration effects and deteriorating multi-maintenance activities for minimizing the total completion time. *Applied mathematical modelling, 37*(5), 2995-3005.

Yang, X. S. (2010). *Engineering optimization: an introduction with metaheuristic applications*. John Wiley & Sons.
Yin, Y., Wang, Y., Cheng, T., Liu, W., & Li, J. (2017). Parallel-machine scheduling of deteriorating jobs with potential machine disruptions. *Omega*, *69*, 17-28.
Zhao, C., Ji, M., & Tang, H. (2011). Parallel-machine scheduling with an availability constraint. *Computers & industrial engineering*, *61*(3), 778-781.

Licensee Decisions & Operations Research. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).