



Production and Operations Management
University of Isfahan E-ISSN: 2423-6950
Vol. 12, Issue 3, No. 26, Autumn 2021



<http://dx.doi.org/10.22108/jpom.2021.128313.1365>

(Research Paper)

Minimizing Energy Cost in Parallel Machines Considering Setup Time

Hemen Sanati

Department of Industrial and Systems Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, heman.sanati@in.iut.ac.ir

Ghasem Moslehi *

Department of Industrial and Systems Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, moslehi@cc.iut.ac.ir

Mohammad Reisi-Nafchi

Department of Industrial and Systems Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, reisi.m@iut.ac.ir

Purpose: In recent years, significant energy consumption and facing global warming have led to concern worldwide. Therefore, governments have turned to deterrent actions such as imposing daily tariffs in different intervals to tackle energy consumption. This article addresses unrelated parallel machine energy-efficient scheduling problems by considering sequence-independent setup times and energy consumption tariffs. The objective function is that jobs should be assigned to machines and processed in different intervals so that the cost of consumed energy becomes as less as possible. It should be noted that the assumed sequence-independent setup times are addressed in two different modes, setup times jointed to processing time and setup times disjointed from processing time.

Design/methodology/approach: To optimize the total energy consumption cost in unrelated parallel machine scheduling problems with sequence-independent setup times jointed to processing time and disjointed from processing time, mixed-integer linear programming (MILP) models have been proposed from two different points of view. The first model has been formulated according to the predecessor jobs of a special job, while the second model has been conducted based on the immediate predecessor job. Also, a fix and relax heuristic (FRH) algorithm has been conducted to solve large-scale instances. All mathematical models and the heuristic algorithm have been coded in the Visual C# 2017 environment and implemented using the CPLEX 12.8 Concert Technology on a PC with

* Corresponding author



32GB RAM and Intel Corei7 4.0 GHz CPU (4 cores). Also, a sizeable number of instances have been solved to evaluate the efficiency of mathematical models and the heuristic algorithm and to ensure their accuracy.

Findings: According to numerical analysis, both mathematical models solved the instances of up to 20 jobs and 80 machines optimally for sequence-independent setup-times jointed to processing time, and sequence-independent disjointed from processing time problems. However, generally speaking, the mathematical model based on predecessor jobs was more efficient than another mathematical model, especially in terms of run time. Moreover, the proposed fix and relax-based heuristic algorithm solved instances of up to 20 machines and 190 jobs for the disjointed setup times problem, and up to 20 and 220 instances for the jointed setup times problem. It should be noted that all instances were generated analogously to the literature.

Research limitations/implications: A vast number of exogenous factors contributed to the scheduling problems in the real world, which can disturb the scheduling process easily, frequent power outages, machine breakdown, and operator absence. Besides, considering all the real world's possibilities raises extreme complexity in problems. Therefore, similar to other studies, some assumptions were considered as follows:

- machines are always available at all times;
- idle is allowable for machines;
- the energy consumption rate of various machines is different for each job;
- each machine's energy consumption rate during processing and setups is different for each job, it is assumed as constant;
- preemption is not allowed in the job's processing and setups;
- all jobs are available at the beginning of the planning horizon; and
- each machine can process or do the setup for only one job at a time.

Practical implications: Given that unrelated parallel machines are one of the most practical scheduling environments, this article can be effective in production sites and operation lines that contain such a kind of machine. Besides, unrelated parallel machines cover identical and related parallel machines. Consequently, this paper is the building blocks of cost-effective and environmentally friendly scheduling programs. Also, the application of unrelated parallel machines is not merely restricted to production problems. In other words, unrelated parallel machine scheduling problems can be used in other real-world cases, such as airplane scheduling and elevator scheduling.

Originality/value - In this paper, unrelated parallel machine energy-efficient scheduling has been addressed considering sequence-independent setup times. Since it was a common belief that sequence-independent setup times could be included in processing times, sequence-independent setup times have been neglected so far. However, in this innovative study for the first time, an unrelated parallel machine energy efficient problem was investigated with sequence-independent setup times. Mathematical programming models and a heuristic algorithm were proposed for such a practical problem.

Keywords: Energy-efficient scheduling, Energy consumption tariffs, Unrelated parallel machines, Sequence independent setup-times, mixed-integer programming, Fix and relax heuristic (FRH) algorithm.



مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۲، شماره ۳، پیاپی ۲۶، پاییز ۱۴۰۰

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۷ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۱۵ ص ۱-۱۸



<http://dx.doi.org/10.22108/jpom.2021.128313.1365>

(مقاله پژوهشی)

کمینه‌سازی هزینه انرژی در ماشین‌های موازی با در نظر گرفتن زمان آماده‌سازی

همین صنعتی^۱، قاسم مصلحی^{۲*}، محمد رئیسی نافچی^۳

۱- کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، heman.sanati@in.iut.ac.ir

۲- استاد دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، moslehi@cc.iut.ac.ir

۳- استادیار دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، reisi.m@iut.ac.ir

چکیده: در سال‌های اخیر، افزایش چشم‌گیر مصرف انرژی و همچنین مواجه شدن با پدیده گرمایش زمین، باعث نگرانی‌هایی در سطح جهان شده است؛ از این رو، دولت‌ها با سیاست‌هایی مانند تعیین تعرفه مصرف انرژی در بازه‌های زمانی مختلف روز، سعی در کنترل مصرف انرژی دارند. محیط‌های تولیدی نیز به‌عنوان مصرف‌کنندگان بزرگ انرژی، از این قضیه مستثنا نیستند. ماشین‌های موازی، یکی از پرکاربردترین محیط‌های ماشینی در تولید است؛ اما تاکنون پژوهش‌هایی در پیشینه موضوع دیده نشده است که زمان‌بندی همراه با زمان آماده‌سازی را در این محیط، با هدف کمینه‌سازی هزینه انرژی در حالت وجود تعرفه مصرف، در بازه‌های زمانی مختلف بررسی کرده باشد؛ بنابراین در مقاله حاضر، مسئله زمان‌بندی کارای انرژی ماشین‌های موازی غیر مرتبط، با زمان‌های آماده‌سازی مستقل از توالی، در دو حالت منفصل از پردازش و متصل به پردازش، با تعرفه مصرف انرژی در بازه‌های زمانی مختلف بررسی می‌شود. برای هر کدام از این دو حالت، دو مدل ریاضی ارائه شده که در هر دو حالت، نمونه‌هایی تا ابعاد ۲۰ ماشین و ۸۰ کار، به صورت بهینه حل شده است. برای حل مسائل در ابعاد بزرگ‌تر، از الگوریتم ابتکاری مبتنی بر تثبیت و آزادسازی استفاده شده است. این الگوریتم برای هر کدام از مسائل، با آماده‌سازی منفصل از پردازش و متصل به پردازش به ترتیب، نمونه‌های تا ۲۰ ماشین و ۱۹۰ کار و نمونه‌هایی تا ۲۰ ماشین و ۲۲۰ کار را حل کرده است.

واژه‌های کلیدی: زمان‌بندی کارای انرژی، تعرفه مصرف انرژی، ماشین‌های موازی غیر مرتبط، زمان‌های آماده‌سازی مستقل از توالی، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، تثبیت و آزادسازی

۱- مقدمه

انرژی از لحاظ حفظ پایداری زندگی و جامعه، اهمیت زیادی دارد. با توجه به اعلام سازمان جهانی انرژی، تا سال ۲۰۴۰، تقاضای جهانی برای انرژی ۳۷٪ افزایش خواهد یافت (وو^۱ و چه^۲، ۲۰۱۹). راه‌های مختلفی برای کاهش هزینه‌های انرژی وجود دارد؛ به‌عنوان نمونه، جایگزین کردن وسایل فرسوده که مقدار مصرف آنها بیش از حد استاندارد است با وسایلی که مصرف انرژی کمتری دارد. این جایگزینی به هزینه زیادی نیاز دارد و بنابراین در اکثر موارد امکان‌پذیر نیست. در این مقاله روشی دیگر ارائه می‌شود که به هزینه زیادی نیاز ندارد و تنها با یک برنامه‌ریزی مناسب اجرایی است. زمان‌بندی کارای انرژی (EES^۳) روشی است که در این مقاله برای مصرف کارای انرژی از آن استفاده می‌شود. در صنایع مختلف، ماشین‌آلات زیادی وجود دارد که کارهای مشابه را با سرعت‌های متفاوت انجام می‌دهد که با نام ماشین‌های موازی غیر مرتبط^۴ شناخته می‌شود. سرعت‌های مختلف ماشین‌های موازی غیر مرتبط، باعث ایجاد مصرف انرژی متفاوت آنها می‌شود؛ از این رو، پیدا کردن یک توالی و زمان‌بندی مناسب که کارهای با میزان مصرف انرژی متفاوت را بر ماشین‌ها قرار دهد، اهمیت زیادی دارد.

یکی از فرضیات مهم در مسائل زمان‌بندی، در نظر گرفتن زمان‌های آماده‌سازی به‌منظور واقعی تر شدن تصمیمات است. زمان‌های آماده‌سازی، شامل زمان‌های آماده‌سازی ماشین، پردازش و آماده‌سازی قطعات لازم برای پردازش محصول اصلی است که عملاً شامل آماده‌کردن تجهیزات، قراردادن محصول در مکان مدنظر، آماده‌کردن و بستن فیکسچرها و تمیزکاری پیش از پردازش است. در بسیاری از مواقع، آماده‌سازی هر کار مستقل از توالی در نظر گرفته می‌شود و بنابراین می‌توان آن را به مدت زمان پردازش اضافه کرد؛ اما با وجود مصرف انرژی، این فرض صحیح نیست؛ زیرا در مسائل کارای انرژی در دست بررسی، میزان مصرف انرژی ماشین‌ها هنگام انجام آماده‌سازی‌ها، می‌تواند با میزان مصرف انرژی ماشین‌ها هنگام پردازش کارها متفاوت باشد؛ بنابراین نمی‌توان آماده‌سازی یک کار را با زمان پردازش آن جمع کرد. از این رو باید زمان آماده‌سازی هر کار، به‌صورت یک مؤلفه جداگانه از زمان پردازش آن در نظر گرفته شود تا بتوان مقدار انرژی مصرف‌شده را به‌درستی محاسبه کرد.

از طرف دیگر، یکی از رایج‌ترین شیوه‌های محاسبه قیمت انرژی، در نظر گرفتن آن به‌صورت تعرفه‌ای (TOU^۵) است؛ به این معنی که افق زمانی، به تعداد معینی دوره تقسیم‌بندی می‌شود که هزینه مصرف انرژی در هر کدام از دوره‌ها متفاوت است؛ بنابراین اگر در این شرایط اقدام به پردازش کارها شود، لازم است زمان‌بندی طوری صورت گیرد که هدف بهینه‌سازی انرژی محقق شود. با توجه به مطالب ذکر شده در این مقاله، یک مسئله زمان‌بندی ماشین‌های موازی غیر مرتبط، با زمان‌های آماده‌سازی مستقل از توالی بررسی می‌شود که هدف آن، کمینه‌کردن کل هزینه انرژی مصرفی است. این مسئله تاکنون در پیشینه موضوع مشاهده نشده است؛ بنابراین سعی می‌شود، این خلأ در این مقاله برطرف شود. در ادامه مقاله در بخش دوم، به مرور پیشینه مرتبط با زمان‌های آماده‌سازی در ماشین‌های موازی غیر مرتبط و همچنین زمان‌بندی کارای انرژی در ماشین‌های موازی پرداخته می‌شود. در بخش سوم به تعریف مسئله و بیان فرضیات پرداخته می‌شود. مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مسائل مورد بررسی، در بخش چهارم ارائه خواهد شد. در بخش پنجم به ارائه الگوریتم ابتکاری برای هر کدام از مسائل پرداخته می‌شود. نتایج محاسباتی حاصل از اجرای مدل‌ها و الگوریتم‌های ابتکاری نیز در بخش پنجم ارائه خواهد شد. در انتها مطالب، نتیجه‌گیری و جمع‌بندی و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ارائه می‌شود.

۲- مرور پیشینه

با توجه به اهمیت زیاد بهینه‌سازی مصرف انرژی در اکثر محیط‌های زمان‌بندی، مطالعاتی درباره بهبود مصرف انرژی صورت گرفته است. مطالعاتی را که برای این قسمت، انتخاب و بررسی شده است، در سه دسته زیر قسمت‌بندی می‌شود:

- مطالعاتی که صرفاً مسئله زمان‌بندی ماشین‌های موازی غیر مرتبط با زمان‌های آماده‌سازی، از جمله مستقل از توالی و وابسته به توالی را بررسی کرده‌اند.

- مطالعاتی که مسئله زمان‌بندی کارای انرژی ماشین‌های موازی غیر مرتبط را بررسی می‌کند که نحوه در نظر گرفتن انرژی آنها عموماً به صورت تعریفی است.

- مطالعاتی که مسئله زمان‌بندی کارای انرژی در محیط‌های مختلف زمان‌بندی را با زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی بررسی کرده‌اند.

الوردی^۶ و سروش^۷ (۲۰۰۸) انواع آماده‌سازی‌ها، کاربرد آنها و اهمیت در نظر گرفتن آنها را در زمان‌بندی معرفی کردند؛ همچنین آنها در این پژوهش، به معرفی زمان‌های آماده‌سازی، اعم از مستقل از توالی و وابسته به توالی در محیط‌های تک‌ماشین، ماشین‌های موازی و کارگاه گردش‌کاری پرداختند. والادا^۸ و رویز^۹ (۲۰۱۲) برای مسئله زمان‌بندی ماشین‌های موازی غیر مرتبط با زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی و هدف کمیته‌کردن مجموع دیرکرد و زودکرد وزن‌دار کل، دو نوع مدل برنامه‌ریزی ریاضی را تحت عناوین مدل دواندیسسه و سه‌اندیسسه ارائه کردند. آنها با انجام آزمایش‌های عددی نشان دادند، در ابعاد حدی، مدل دواندیسسه نسبت به مدل سه‌اندیسسه عملکرد بهتری دارد؛ همچنین برای حل مسائل در ابعاد بزرگ‌تر نیز، یک الگوریتم ژنتیک ارائه کردند.

جیا^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۷) برای اولین بار از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع مورچگان^{۱۱}، برای حل مسئله پردازش دسته‌ای کارها بر ماشین‌های موازی، با اهداف کمیته‌کردن مقدار انرژی مصرف‌شده و دامنه عملیات، با در نظر گرفتن سیاست تعرفه مصرف انرژی استفاده کردند. به منظور نشان‌دادن کارایی الگوریتم ارائه‌شده، آنها نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های عددی بر داده‌های تصادفی را با نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم *NSGA-II*^{۱۲} مقایسه کردند؛ همچنین نقاط مرز پارتو را نیز به دست آوردند. الگوریتم آنها قادر به حل مسائل با ۱۰۰ کار، ۵ ماشین و ۱۲ دوره است.

تان^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۸) مسئله زمان‌بندی کارای انرژی برای پردازش دسته‌ای کارها، بر ماشین‌های موازی با سیاست تعرفه مصرف انرژی را به صورت بهینه حل کردند. چنگ^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۷) نیز مدل ارائه‌شده توسط دینگ^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۵) را بهبود دادند. ژوو^{۱۶} و همکاران (۲۰۱۸) مسئله پردازش کارهای دسته‌ای را بر ماشین‌های موازی، با اهداف کمیته‌کردن مقدار انرژی مصرف‌شده و دامنه عملیات، با سیاست در نظر گرفتن تعرفه انرژی بررسی کردند. آنها با به‌کارگیری الگوریتم تکامل دیفرانسیلی، مسائل تا ۳۰۰ کار، ۵ ماشین و ۶ دوره را حل کردند و نقاط مرز پارتو را نیز به دست آوردند. وو و چه (۲۰۱۹) مسئله زمان‌بندی کارای انرژی برای ماشین‌های موازی غیر مرتبط را بررسی کردند. آنها با به‌کارگیری الگوریتم تکامل دیفرانسیلی ممتیک^{۱۷} (*MDE*)، مسائل با ۷۰۰۰ کار و ۲۰۰ ماشین را حل کردند. شایان ذکر است، آنها از سیاست انرژی متفاوت کارها به منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی استفاده کردند و نقاط مرزی پارتو را نیز به دست آوردند.

رمضانیان^{۱۸} و همکاران (۲۰۱۹) مسئله زمان‌بندی کارای انرژی کارگاه گردش‌کاری جایگشتی را با زمان‌های

آماده‌سازی وابسته به توالی بررسی کردند. آنها برای این مسئله، یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط دوهدفه ارائه کردند که توابع هدف آن، کمینه‌کردن دامنه عملیات و مقدار انرژی مصرف‌شده است؛ همچنین در این مقاله با انجام مطالعه موردی بیان کردند که روش آنها می‌تواند به‌طور متوسط، ۱۵٪ مصرف انرژی را کاهش دهد. جیانگ^{۱۹} و وانگ^{۲۰} (۲۰۱۹) نیز مسئله زمان‌بندی کارای انرژی کارگاه گردش کاری جایگشتی را با زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی بررسی کردند. آنها علاوه بر انرژی مصرف‌شده برای انجام آماده‌سازی و پردازش کارها، انرژی مصرف‌شده برای انتقال کارها از انبار مواد اولیه به اولین ماشین و از آخرین ماشین به انبار محصول نهایی، انرژی لازم برای انتقال کارها بین ماشین‌ها و همچنین انرژی مصرف‌شده هنگام بیکاری ماشین را نیز در نظر گرفتند. نحوه در نظر گرفتن انرژی هنگام انجام آماده‌سازی‌ها در پژوهش جیانگ و وانگ (۲۰۱۹)، به این صورت است که ماشین‌ها برای انجام آماده‌سازی با میزانی متفاوت از پردازش کارها انرژی مصرف می‌کنند. آنها علاوه بر مدل ریاضی، برای این مسئله یک الگوریتم چندهدفه بهبودیافته تکاملی، مبتنی بر تجزیه (IMOEAD^{۲۱}) نیز ارائه کردند. آزمایش‌های عددی در پژوهش آنها برای نمونه‌های کوچک، بر داده‌های واقعی صورت گرفته است و برای نمونه‌های بزرگ نیز، از داده‌های تصادفی استفاده کرده‌اند.

ژو^{۲۲} و همکاران (۲۰۲۰) مسئله زمان‌بندی کارای انرژی تک‌دسته‌ای را با زمان‌های آزادسازی، به‌صورت تعرفه‌ای بررسی کردند. توابع هدف مدنظر در این مقاله، شامل کمینه‌کردن هزینه انرژی کل و دامنه عملیات بوده است. برای این مسئله، ژو و همکاران (۲۰۲۰) یک مدل ریاضی و همچنین یک الگوریتم فراابتکاری را برای به‌دست آوردن مرز پارتو ارائه کردند. در همان سال اوزتوپ^{۲۳} و همکاران (۲۰۲۰)، مسئله دو هدفه زمان‌بندی کارای انرژی کارگاه گردش کاری جایگشتی را بررسی کردند. در این پژوهش فرض بر این است که هر ماشین می‌تواند در سرعت‌های مختلف، کارها را پردازش و انرژی مصرف کند. توابع هدف مدنظر در این مقاله، شامل کمینه‌کردن کل انرژی مصرفی و زمان جریان کل است. آنها علاوه بر مدل ریاضی، چندین الگوریتم ابتکاری نیز ارائه کردند که قادر به حل نمونه‌های با ۲۰ ماشین و ۵۰ کار است. سایر پژوهش‌های انجام‌شده درباره موضوع زمان‌بندی کارای انرژی، همراه با مشخصه‌های اصلی آنها مانند محیط زمان‌بندی، نوع زمان‌های آماده‌سازی، نحوه در نظر گرفتن انرژی و ارائه مدل ریاضی در جدول ۱ نیز ارائه شده است.

جدول ۱- خلاصه نوآوری مقالات پیشینه موضوع

نوآوری					مرجع
تعرفه مصرف انرژی به صورت دوره‌ای	نوع آماده‌سازی	ارائه الگوریتم ابتکاری یا فراابتکاری	ارائه مدل ریاضی	ماشین‌های موازی غیر مرتبط	
-	وابسته به توالی	✓	✓	✓	والادا و رویز (۲۰۱۲)
✓	-	✓	✓	✓	دینگ و همکاران (۲۰۱۵)
-	-	✓	✓	✓	زیدی و محمدحسینی (۲۰۱۵)
-	وابسته به توالی	✓	✓	✓	آولوس روزالس و همکاران (۲۰۱۵)
✓	-	✓	✓	✓	چه و همکاران (۲۰۱۷)
✓	-	-	✓	✓	چنگ و همکاران (۲۰۱۷)
✓	-	✓	✓	✓	ژو و همکاران (۲۰۱۸)

نوآوری					مرجع
تعرفه مصرف انرژی به صورت دوره‌ای	نوع آماده‌سازی	ارائه الگوریتم ابتکاری یا فراابتکاری	ارائه مدل ریاضی	ماشین‌های موازی غیر مرتبط	
✓	-	✓	-	-	وانگ و همکاران (۲۰۱۸)
✓	-	-	✓	✓	تان و همکاران (۲۰۱۸)
-	وابسته به توالی	✓	✓	✓	فانجول-پیرو و همکاران (۲۰۱۹)
-	وابسته به توالی	✓	✓	-	رمضانیان و همکاران (۲۰۱۹)
-	وابسته به توالی	✓	✓	-	ژو و لیو (۲۰۱۹)
-	-	-	✓	✓	ابی‌کرم و همکاران (۲۰۱۹)
-	-	✓	-	✓	وو و چه (۲۰۱۹)
✓	-	✓	✓	✓	صابری و همکاران (۲۰۲۰)
-	وابسته به توالی	✓	-	-	ژانگ و همکاران (۲۰۲۱)
✓	مستقل از توالی	✓	✓	✓	مقاله حاضر

مقاله حاضر را می‌توان توسعه پژوهش صابری و همکاران (۲۰۲۰) در نظر گرفت که در آن فرض آماده‌سازی کارها به منظور تطبیق بیشتر با شرایط دنیای واقعی، اضافه شده است. به این ترتیب نوآوری این مقاله، در نظر گرفتن فرض زمان آماده‌سازی مستقل از توالی در محیط ماشین‌های موازی، در حالت وجود تعرفه متفاوت مصرف انرژی در بازه‌های زمانی مختلف است. در ادامه برای این مسئله، مدل ریاضی و همچنین الگوریتم ابتکاری ارائه می‌شود.

۳- تعریف مسئله، مفروضات و پیچیدگی

هدف اصلی مقاله، بررسی مسئله زمان‌بندی کارای انرژی ماشین‌های موازی غیر مرتبط با زمان‌های آماده‌سازی مستقل از توالی است؛ به این معنی که برای مسئله نام‌برده، مدل‌های ریاضی و همچنین الگوریتم ابتکاری ارائه شود که کارها به ماشین‌ها طوری تخصیص پیدا کند و روی هر ماشین چیده شود که مقدار کل هزینه انرژی مصرف‌شده برای پردازش و انجام آماده‌سازی کارها حداقل شود.

مسئله فوق از آنجا مطرح می‌شود که در محیط‌های کارگاهی، عدم توجه به تخصیص و تعیین توالی مناسب کارها روی ماشین‌ها و در عین وجود زمان آماده‌سازی برای کارها در روی ماشین‌ها و بدون توجه به تعرفه متفاوت مصرف انرژی در بازه‌های زمانی مختلف، می‌تواند به هزینه‌های زیاد مصرف انرژی برای تولیدکننده منجر شود. از این رو، بررسی این مسئله می‌تواند به کاهش هزینه‌های تولید و قیمت تمام‌شده کمک کند. بر این اساس فرض می‌شود، تعداد معینی کار و تعدادی ماشین موازی غیر مرتبط وجود دارد که کارها باید روی ماشین‌ها پردازش شود. هر کار برای انجام پردازش، به آماده‌سازی مستقل از توالی نیاز دارد. ماشین‌ها برای پردازش کارها و همچنین انجام آماده‌سازی به انرژی نیاز دارند. میزان مصرف انرژی برای آماده‌سازی و پردازش هر کار روی هر ماشین متفاوت است. نحوه در نظر گرفتن قیمت انرژی در این مقاله به صورت تعرفه‌ای است؛ همچنین یک ضرب‌الاجل برای اتمام کلیه کارها در نظر گرفته شده است، این ضرب‌الاجل، در قالب تعیین تعداد مشخصی دوره با هزینه مصرف انرژی معین بیان شده است. زمان‌های آماده‌سازی مورد بررسی در این پژوهش، در دو حالت منفصل از پردازش و متصل به

پردازش بررسی می‌شود. در حالت آماده‌سازی منفصل از پردازش، ممکن است فاصله‌ای بین آماده‌سازی و پردازش یک کار قرار گیرد؛ البته در برخی حالات در دنیای واقع نیاز است، اتمام آماده‌سازی و شروع پردازش به هم متصل باشد و وقفه‌ای بین آنها نباشد که در ادامه از آن با عنوان آماده‌سازی متصل به پردازش یاد می‌شود. به‌طور کلی در این مقاله، دو نوع مسئله زمان‌بندی کارای انرژی ماشین‌های موازی غیر مرتبط با زمان‌های آماده‌سازی منفصل از پردازش (PDS^{24}) و مستقل از توالی متصل به پردازش (PJS^{25}) بررسی می‌شود.

فرضیات مسائل به صورت زیر است:

- ماشین‌ها همواره در دسترس هستند.
 - بیکاری عمدی برای ماشین‌ها مجاز است.
 - میزان مصرف انرژی برای یک کار مشخص، در ماشین‌های مختلف متفاوت است.
 - میزان مصرف انرژی هر ماشین در طول آماده‌سازی و پردازش برای هر کار ثابت است؛ ولی با هم فرق دارد.
 - انقطاع در پردازش و آماده‌سازی کارها مجاز نیست.
 - در ابتدای افق برنامه‌ریزی، تمام کارها در دسترس است.
 - در طول فرایند تولید، ماشین‌ها همواره در دسترس هستند.
 - هر ماشین در هر لحظه، می‌تواند فقط بر یک کار آماده‌سازی یا پردازش انجام دهد.
- برای تعیین پیچیدگی مسائل موردبررسی، اگر مقدار آماده‌سازی‌ها برابر صفر فرض شود، آنگاه هرکدام از مسائل PDS و PJS به مسئله بدون آماده‌سازی کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه دینگ و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند این مسئله به شدت NP-hard است؛ بنابراین مسائل PDS و PJS نیز به شدت NP-hard هستند.

۴- مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط

برای هرکدام از مسائل PDS و PJS، دو مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه شده است که در ادامه توضیح داده می‌شود. مدل‌های مسئله PDS به صورت PDSM_1 و PDSM_2 نام‌گذاری می‌شوند و مدل‌های مسئله PJS با انجام اصلاحات لازم بر مدل‌های متناظر در مسئله PDS ایجاد و به ترتیب PJSM_1 و PJSM_2 نامیده می‌شوند. پارامترها و متغیرهای تصمیم مورد استفاده، برای ارائه این مدل‌ها به صورت زیر هستند:

N	تعداد کارها
M	تعداد ماشین‌ها
K	تعداد دوره‌ها
t_{ij}	مدت‌زمان پردازش کار j روی ماشین i
s_{ij}	مدت‌زمان آماده‌سازی کار j روی ماشین i
d_k	هزینه مصرف انرژی در دوره k
T_k	طول دوره k
ρ_{ij}	میزان مصرف انرژی پردازش کار j روی ماشین i
ρ'_{ij}	میزان مصرف انرژی آماده‌سازی کار j روی ماشین i

$i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N$	اگر کار z روی ماشین i پردازش شود، برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر	v_{ij}
$k=1, 2, \dots, K; j=1, 2, \dots, N$	اگر قسمتی از پردازش کار z در دوره k انجام شود، برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر	w_{kj}
$k=1, 2, \dots, K; j=1, 2, \dots, N$	اگر قسمتی از آماده‌سازی کار z در دوره k انجام شود، برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر	w'_{kj}
$j=1, 2, \dots, N; h=1, 2, \dots, N; j \neq h$	اگر روی ماشین یکسان، کار z قبل از کار h پردازش شود، برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر	y_{jh}
$i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N$ $k=1, 2, \dots, K$	قسمتی از مدت‌زمان پردازش کار z روی ماشین i در دوره k	x_{ijk}
$i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N$ $k=1, 2, \dots, K$	قسمتی از مدت‌زمان آماده‌سازی کار z روی ماشین i در دوره k	x'_{ijk}

تابع هدف و محدودیت‌های مدل $PDSM_1$ که براساس رابطه تقدم و تأخر بین کارها ارائه می‌شود، مطابق روابط (۱) تا (۱۸) است.

(PDSM_1)

$$\text{Min} \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N d_k (\rho'_{ij} x'_{ijk} + \rho_{ij} x_{ijk}) \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^M v_{ij} = 1 \quad j=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^K x_{ijk} = t_{ij} v_{ij} \quad i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K x'_{ijk} = s_{ij} v_{ij} \quad i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^N (x_{ijk} + x'_{ijk}) \leq T_k \quad i=1, 2, \dots, M; k=1, 2, \dots, K \quad (5)$$

$$y_{jh} + y_{hj} \geq v_{ij} + v_{ih} - 1 \quad j=1, 2, \dots, N; h=1, 2, \dots, N; j \neq h \quad (6)$$

$$\sum_{k'=1}^{k-1} (w_{k'h} + w'_{k'h}) \leq 2k(2 - y_{jh} - w_{kj}) \quad i=1, 2, \dots, M \quad (7)$$

$$\sum_{k'=1}^{k-1} w_{k'j} \leq k(1 - w'_{kj}) \quad j=1, 2, \dots, N; h=1, 2, \dots, N; j \neq h \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^M x_{ijk} \leq T_k w_{kj} \quad k=2, 3, \dots, K; j=1, 2, \dots, N \quad (9)$$

$$w_{kj} \leq \sum_{i=1}^M x_{ijk} \quad k=1, 2, \dots, K; j=1, 2, \dots, N \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^M x'_{ijk} \leq T_k w'_{kj} \quad k=1, 2, \dots, K; j=1, 2, \dots, N \quad (11)$$

$$w'_{kj} \leq \sum_{i=1}^M x'_{ijk} \quad k=1, 2, \dots, K; j=1, 2, \dots, N \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^M x_{ijk} \geq T_k - T_k(2 - w_{(k-1)j} - w_{(k+1)j}) \quad k=2, 3, \dots, K-1; j=1, 2, \dots, N \quad (13)$$

$$\sum_{k'=k+2}^M w_{k'j} \leq M_{big}(1 - w_{kj} + w_{(k+1)j}) \quad k=1, 2, \dots, K-2; j=1, 2, \dots, N \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^M x'_{ijk} \geq T_k - T_k(2 - w'_{(k-1)j} - w'_{(k+1)j}) \quad k=2, 3, \dots, K-1; j=1, 2, \dots, N \quad (15)$$

$$\sum_{k'=k+2}^M w'_{k'j} \leq M_{big}(1 - w'_{kj} + w'_{(k+1)j}) \quad k=1, 2, \dots, K-2; j=1, 2, \dots, N \quad (16)$$

$$v_{ij}, w_{kj}, w'_{kj}, y_{jh} \in \{0, 1\} \quad i=1, 2, \dots, M; k=1, 2, \dots, K \quad (17)$$

$$x_{ijk}, x'_{ijk} \geq 0 \quad j=1, 2, \dots, N; h=1, 2, \dots, N; j \neq h \quad (18)$$

در مدل *PDSM_1*، رابطه (۱) تابع هدف مسئله است و نشان‌دهنده مقدار کل هزینه انرژی مصرفی است که باید حداقل شود. رابطه (۲) تضمین می‌کند، هر کار باید دقیقاً به یک ماشین تخصیص داده شود. برای اینکه تکه‌های مختلف پردازش و آماده‌سازی هر کار در دوره‌های مختلف، فقط به یک ماشین تخصیص پیدا کند، روابط (۳) و (۴) منظور شده است؛ همچنین روابط (۳) و (۴) بیان می‌کنند، جمع قسمت‌های مختلف پردازش و آماده‌سازی هر کار در دوره‌های مختلف، باید برابر مدت‌زمان پردازش و آماده‌سازی آن کار روی ماشین مربوطه باشد. رابطه (۵) تضمین می‌کند، میزان اشغال هر دوره نباید از طول آن دوره تجاوز کند. رابطه (۶) بیان می‌کند، تقدم بین کارها با ماشینی هماهنگ باشد که به آن تخصیص داده می‌شود؛ به این معنی که یک کار موقعی می‌تواند قبل از کار دیگری پردازش شود که هر دو به یک ماشین تخصیص پیدا کند. رابطه (۷) بیان می‌کند، اگر روی ماشین i کار z قبل از کار h انجام شود، آنگاه در همه دوره‌های قبل از کار z نباید هیچ قسمتی از پردازش و آماده‌سازی کار h انجام شود؛ به عبارت دیگر، برای اینکه بین آماده‌سازی و پردازش یک کار، بخشی از آماده‌سازی یا پردازش کار دیگری قرار نگیرد، روابط (۶) و (۷) منظور شده‌اند. همچنین به منظور اینکه آماده‌سازی هر کار قبل از پردازش آن انجام شود، رابطه (۸) منظور شده است.

روابط (۹) و (۱۰) به ترتیب بیان می‌کنند، اگر قسمتی از پردازش یک کار در دوره‌ای انجام شود، آنگاه متغیر مربوط به تخصیص آن کار، به آن دوره مقدار یک می‌گیرد و اگر هیچ قسمتی از پردازش آن در دوره‌ای انجام نشد، مقدار صفر اختیار می‌کند. به طور مشابه روابط (۱۱) و (۱۲) نیز بیان می‌کنند، اگر قسمتی از آماده‌سازی یک کار در دوره‌ای انجام شود، آنگاه متغیر مربوط به تخصیص آماده‌سازی آن کار به آن دوره برابر یک می‌شود و در غیر این صورت، مقدار صفر اختیار می‌کند. رابطه (۱۳) بیان می‌کند، اگر قسمتی از پردازش کار z در دوره‌های $k-1$ و $k+1$ انجام شد، آنگاه باید پردازش کار z تمام دوره k را پوشش دهد. رابطه (۱۴) بیان می‌کند، اگر قسمتی از پردازش کار z در دوره‌ای انجام شد و در دوره بعدی انجام نشد، آنگاه نباید هیچ جزئی از پردازش کار z در دوره‌های بعدی انجام شود؛ به بیان دیگر می‌توان گفت، روابط (۱۳) و (۱۴) باعث جلوگیری از انقطاع پردازش کارها می‌شوند. به طریق

مشابه، روابط (۱۵) و (۱۶) از انقطاع آماده‌سازی جلوگیری می‌کنند. روابط (۱۷) و (۱۸) نشان‌دهنده نوع و دامنه متغیرهای تصمیم هستند. مقدار پارامتر M_{big} در روابط (۱۴) و (۱۶)، برابر $K-k-1$ در نظر گرفته شده است. برای ارائه مدل $PDSM_2$ به تمام پارامترها و متغیرهای مورد استفاده در مدل $PDSM_1$ نیاز است؛ با این تفاوت که در مدل $PDSM_2$ به جای متغیر y_{jh} از متغیر y_{ijh} استفاده می‌شود که تعریف آن به صورت زیر است:

$$y_{ijh} \quad \text{اگر روی ماشین } i \text{ کار } j \text{ بلافاصله قبل از کار } h \text{ پردازش}$$

$$j=1, 2, \dots, N; h=1, 2, \dots, N$$

$$j \neq h; i=1, 2, \dots, M$$

شود، برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است.

مدل $PDSM_2$ براساس تقدم و تأخر، بلافاصله قبل و یا بعد ارائه می‌شود و بنابراین هر کار، باید دارای یک کار بلافاصله قبل باشد و این امکان برای کار اولی فراهم نیست که روی هر ماشین قرار می‌گیرد؛ بنابراین در مدل $PDSM_2$ علاوه بر کارهای اصلی، به یک کار مجازی نیاز است که با اندیس 0 نشان داده می‌شود. فرمول‌بندی مدل $PDSM_2$ به قرار زیر است:

$$\text{(PDSM}_2\text{)}$$

$$\text{in} \quad \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^N d_k (\rho'_{ij} x'_{ijk} + \rho_{ij} x_{ijk}) \quad (19)$$

$$(16)(2), (3), (4), (5), (8), (9), (10), (11), (12), (13), (14), (15),$$

$$\sum_{\substack{h=0 \\ h \neq j}}^N y_{ihj} = v_{ij} \quad i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N \quad (20)$$

$$\sum_{\substack{j=0 \\ j \neq h}}^N y_{ihj} = v_{ih} \quad i=1, 2, \dots, M; h=1, 2, \dots, N \quad (21)$$

$$\sum_{j=1}^N y_{i0j} \leq 1 \quad i=1, 2, \dots, M \quad (22)$$

$$\sum_{k'=1}^{k-1} (w_{k'h} + w'_{k'h}) \leq 2k(2 - w_{kj} - \sum_{i=1}^M y_{ijh}) \quad j=0, 1, \dots, N; h=1, 2, \dots, N$$

$$j \neq h; k=2, 3, \dots, K \quad (23)$$

$$y_{ijh} \in \{0, 1\} \quad j=1, 2, \dots, N; h=1, 2, \dots, N; j \neq h; i=1, 2, \dots, M \quad (24)$$

$$x_{ijk}, x'_{ijk} \geq 0; w_{kj}, w'_{kj} \in \{0, 1\} \quad i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N \quad (25)$$

$$0 \leq v_{ij} \leq 1 \quad i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N \quad (26)$$

برای اینکه هر کار دارای یک کار بلافاصله قبل و یک کار بلافاصله بعد باشد، به ترتیب روابط (۲۰) و (۲۱) منظور شده‌اند. رابطه (۲۲) برای اطمینان از این در نظر گرفته شده است که بعد از کار مجازی حداکثر یک کار،

به عنوان اولین کار روی هر ماشین پردازش شود. روابط (۲۴)، (۲۵) و (۲۶) نشان دهنده نوع و دامنه متغیرهای تصمیم مدل $PDSM_2$ هستند. شایان ذکر است، با توجه به ساختار مدل (روابط (۲۰) و (۲۱)) از آن جهت که مقدار متغیرهای y_{ijh} صفر و یک است، مقدار متغیرهای v_{ij} نیز صفر و یک خواهد شد؛ بنابراین در رابطه (۲۶) متغیر v_{ij} به صورت پیوسته بین صفر و یک در نظر گرفته شده است. مدل های برنامه ریزی عدد صحیح مختلط مسئله PJS که $PJSM_1$ و $PJSM_2$ نامیده می شوند، با اضافه کردن هر دو رابطه (۲۷) و (۲۸) به مدل های $PDSM_1$ و $PDSM_2$ به دست می آیند.

$$\sum_{i=1}^M (x_{ijk} + x'_{ijk}) \geq T_k - T_k(2 - w'_{(k-1)j} - w_{(k+1)j}) \quad \begin{matrix} j=1, 2, \dots, N \\ k=2, 3, \dots, K-1 \end{matrix} \quad (27)$$

$$\sum_{k'=k+2}^K w_{k'j} \leq (K - k)(1 - w'_{kj} + w_{(k+1)j}) \quad \begin{matrix} j=1, 2, \dots, N \\ k=1, 2, \dots, K-2 \end{matrix} \quad (28)$$

رابطه (۲۷) بیان می کند، اگر قسمتی از آماده سازی کار z در دوره $k-1$ انجام شود و قسمتی از پردازش آن در دوره $k+1$ صورت گیرد، آنگاه باید تمام دوره k توسط آماده سازی و پردازش کار z اشغال شده باشد. رابطه (۲۸) بیان می کند، اگر قسمتی از آماده سازی کار z در دوره ای انجام شد؛ ولی هیچ بخشی از پردازش آن در دوره بعد انجام نشد، آنگاه در تمام دوره های بعد، نباید هیچ بخشی از پردازش کار z انجام شود. به بیان دیگر، روابط (۲۷) و (۲۸) این امکان را فراهم می کنند که بتوان پردازش هر کار را بدون وقفه، بعد از اتمام آماده سازی آن شروع کرد. شایان ذکر است، در مدل های ارائه شده در بالا، هر رابطه ای را که متغیرهای مربوط به مدت زمان آماده سازی، شامل متغیرهای w'_{kj} و x'_{ijk} در آنها وجود دارد، می توان نوآوری مقاله حاضر در نظر گرفت.

۵- ارائه الگوریتم ابتکاری

با توجه به، شدت NP-hard بودن مسائل مورد بررسی، در این بخش یک الگوریتم ابتکاری مبتنی بر تثبیت و آزادسازی مدل ریاضی، با نام FRH^{26} ، توسعه داده شده است. الگوریتم FRH ارائه شده، از دو مرحله اصلی تشکیل شده است. در مرحله اول الگوریتم مشخص می شود، کدام کارها باید روی کدام ماشین پردازش شود. در مرحله دوم الگوریتم، محیط زمان بندی مسئله از ماشین های موازی غیر مرتبط، به محیط تک ماشین تغییر پیدا می کند و به تعداد ماشین های موجود، مسئله تک ماشین حل خواهد شد تا با رعایت محدودیت های مدل، توالی کارهای حاصل از مرحله اول، طوری روی هر ماشین تعیین شود که مقدار کل هزینه انرژی مصرف شده، حداقل شود. در **Error!** **Reference source not found.** شبهه کد مرحله اول الگوریتم FRH برای مسائل PDS و PJS نمایش داده شده است. در قسمت نتایج محاسباتی، نشان داده خواهد شد که مدل های $PDSM_1$ و $PJSM_1$ عملکرد بهتری را نسبت به مدل های $PDSM_2$ و $PJSM_2$ دارند؛ بنابراین الگوریتم ابتکاری FRH بر مبنای مدل های $PDSM_1$ و $PJSM_1$ توسعه داده شده است.

گام اول:	حل آزادشده مدل $PDSM_I$ ($PJSM_I$) با در نظر گرفتن تمام متغیرهای دودویی به صورت پیوسته.
گام دوم:	تثبیت تمامی متغیرهای v_{ij} به دست آمده از گام اول که مقدار یک دارند.
گام سوم:	حل مدل $PDSM_I$ ($PJSM_I$) با در نظر گرفتن متغیرهای v_{ij} به صورت صفر یا یک و سایر متغیرها به صورت پیوسته.
گام چهارم:	تخصیص کارها به ماشین‌ها بر اساس متغیرهای v_{ij} به دست آمده از گام سوم.

شکل ۱- شبه کد مرحله اول الگوریتم FRH

برای حل مسائل تک‌ماشین، مدل ریاضی مسائل زمان‌بندی کارای انرژی، با زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی منفصل از پردازش و متصل به پردازش در حالت تک‌ماشین، به ترتیب با $PDSM_IS$ و $PJSM_IS$ نمایش داده می‌شوند. این مدل‌ها با حذف اندیس ماشین از متغیرها و پارامترهای مدل به سادگی قابل بازنویسی هستند.

نکته درخور توجه در مرحله دوم الگوریتم FRH ، تعیین مقادیر تعداد دوره‌هایی است که باید گسسته در نظر گرفته شود و دیگری تعداد دوره‌هایی است که باید تثبیت شود. اگر تعداد دوره‌هایی که به صورت عدد صحیح در نظر گرفته می‌شود زیاد باشد، مدت‌زمان اجرای مدل‌ها بیشتر می‌شود. از طرف دیگر اگر تعداد دوره‌های عدد صحیح در نظر گرفته شده با تعداد دوره‌های تثبیت شده برابر باشد، خطای الگوریتم افزایش پیدا می‌کند (صابری علی‌آباد^{۲۷} و همکاران، ۲۰۲۰).

از آنجایی که منطق پیوسته بودن، مطابق روابط (۱۳) و (۱۴) مدل ریاضی $PDSM_I$ ، حداقل باید برابر سه دوره متوالی باشد، تعداد دوره‌های تثبیت، برابر سه دوره در نظر گرفته شده است. از طرف دیگر برای افزایش سرعت اجرا، تعداد دوره‌های صفر یا یک برابر، یکی کمتر از دو برابر تعداد دوره‌های تثبیت شده در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است مطالب گفته شده فقط برای یک مسئله تک‌ماشین است؛ بنابراین لازم است که مقادیر توابع هدف مسائل تک‌ماشین با همدیگر جمع شوند تا مقدار کل هزینه انرژی مصرف شده به دست آید. در شکل ۲، شبه کد مرحله دوم الگوریتم FRH برای مسئله زمان‌بندی کارای انرژی تک‌ماشین، با آماده‌سازی‌های مستقل از توالی منفصل از پردازش نمایش داده شده است.

گام اول:	قرار دهید $A=5$, $B=3$ و $\Delta=3$.
گام دوم:	تمامی متغیرهای w_{kj} , w'_{kj} و y_{jh} پیوسته در نظر گرفته شوند.
گام سوم:	مقدار متغیرهای w_{kj} , w'_{kj} و y_{jh} برای دوره‌های $k \in \{A-4, A-3, A-2, A-1, A\}$ به صورت صفر و یک در نظر گرفته شوند.
گام چهارم:	مدل $PDSM_IS$ را حل کنید.
گام پنجم:	مقادیر w_{kj} و w'_{kj} را برای دوره‌های $k \in \{B-2, B-1, B\}$ تثبیت کنید. اگر پردازش یا آماده‌سازی کاری که در انتهای دوره B قرار گرفته به طور کامل انجام نشده بود، مقدار γ را برابر تعداد دوره‌هایی قرار دهید که پردازش یا آماده‌سازی این کار بعد از دوره B در آنها به طور کامل قرار می‌گیرد، در غیر این صورت γ را برابر صفر قرار دهید. سپس قرار دهید $\Delta = \Delta + \gamma$.
گام ششم:	مقدار y_{jh} را برای کارهای $h \in \{1, 2, \dots, N\}$, $j \neq h$ نیز تثبیت کنید که حداقل یکی از متغیرهای مربوط به پردازش یا آماده‌سازی آنها تثبیت شده است.
گام هفتم:	قرار دهید $B = \text{Min}\{K, B+\Delta\}$ و $A = \text{Min}\{K, A+\Delta\}$.
گام هشتم:	اگر $A \geq K$ به گام ۹ بروید و در غیر این صورت به گام ۳ بازگردید.
گام نهم:	پایان

شکل ۲- شبه کد مرحله دوم الگوریتم FRH

۶- ارائه نتایج

در این بخش با انجام آزمایش‌های عددی، عملکرد روش‌های ارائه‌شده برای هرکدام از مسائل مورد بررسی، ارزیابی می‌شود. تمامی مدل‌های ارائه‌شده در محیط برنامه‌نویسی *Visual C# 2017*، کدنویسی شده که با استفاده از قابلیت *Concert Technology* حل‌کننده *CPLEX 12.8*، در رایانه‌ای دارای ۴ هسته *CPU* با مشخصات *32GB*، *Intel core i7 4.0 GHz* *RAM* با محدودیت زمانی ۳۶۰۰ ثانیه برای هر نمونه اجرا شده است.

داده‌های مورد نیاز برای تولید نمونه‌های تصادفی، مانند مدت‌زمان پردازش کارها، میزان مصرف انرژی ماشین‌ها هنگام پردازش کارها و تعرفه مصرف انرژی، مشابه پیشینه موضوع (دینگ و همکاران (۲۰۱۵)؛ چنگ و همکاران (۲۰۱۷) و صابری علی‌آباد و همکاران (۲۰۲۰)) در نظر گرفته شده است. زمان‌های آماده‌سازی، مطابق بکتور^{۲۸} و ساراج^{۲۹} (۲۰۱۹) در سه سطح کوچک، بزرگ و متوسط به صورت تصادفی از توزیع یکنواخت گسسته در بازه‌های [۵، ۲۵]، [۲۵، ۵۰] و [۵۰، ۵۰] تولید می‌شوند که به ترتیب آماده‌سازی، نوع ۱، نوع ۲ و نوع ۳ نامیده می‌شوند. میزان مصرف انرژی زمان‌های آماده‌سازی، به صورت ضرایب تصادفی از میزان مصرف انرژی پردازش کارها، مطابق رابطه (۲۹) تولید شده است.

$$\rho'_{ij} = \varepsilon_3 \rho_{ij} \quad (29)$$

در رابطه (۲۹) مقدار پارامتر ε_3 به صورت تصادفی در بازه‌های [۰، ۰]، [۰، ۰/۵] و [۰، ۱] در نظر گرفته شده است. ضرب‌الاجل تمام کلیه کارها که با B نشان داده شده، به عنوان حد بالای دامنه عملیات در نظر گرفته شده است (دینگ و همکاران، ۲۰۱۵). این ضرب‌الاجل با در نظر گرفتن مدت‌زمان‌های آماده‌سازی با انجام اصلاحات لازم، مشابه دینگ و همکاران (۲۰۱۵) و مطابق رابطه (۳۰) محاسبه شده است.

$$B = \alpha \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (t_{ij} + s_{ij})}{M^2} \quad (30)$$

همچنین دو نوع تعرفه برای مصرف انرژی در نظر گرفته شده است (دینگ و همکاران (۲۰۱۵)؛ چنگ و همکاران (۲۰۱۷) و صابری علی‌آباد و همکاران (۲۰۲۰)) که نوع اول مربوط به کشور چین و نوع دوم مربوط به کشورهای اروپایی است. در تعرفه کشور چین که با $TOU1$ نمایش داده می‌شود، هر روز به شش دوره مختلف تقسیم می‌شود و در تعرفه کشورهای اروپایی، هر روز به ۲۴ دوره تقسیم می‌شود و با $TOU2$ نشان داده می‌شود. تعداد ماشین‌های در نظر گرفته‌شده برابر ۵، ۱۰ و ۲۰ ماشین است (دینگ و همکاران (۲۰۱۵)؛ چنگ و همکاران (۲۰۱۷) و صابری علی‌آباد و همکاران (۲۰۲۰)). تعداد کارها نیز از دو برابر تعداد ماشین‌ها شروع می‌شود و افزایش می‌یابد. به ازای هرکدام از ترکیبات تعرفه، آماده‌سازی، تعداد ماشین و تعداد کار ۱۰ نمونه تصادفی تولید و حل شده است.

نتایج حاصل از اجرای مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مسئله PDS با دوره‌های $TOU1$ و $TOU2$ ، به ترتیب در **Error! Reference source not found.** و جدول ۳ آورده شده است. ستون m/n در این جدول‌ها بیانگر تعداد ماشین و تعداد کار است؛ همچنین منظور از ستون $\#opt$ ، تعداد نمونه‌هایی است که از ۱۰ نمونه تولیدشده برای هر ترکیب کار و ماشین به صورت بهینه حل شده است. میانگین مدت‌زمان صرف‌شده برای حل نمونه‌ها نیز، برحسب ثانیه در ستون $T(s)$ آورده شده است. در این ستون‌ها مدت‌زمان‌های کمتر از یک ثانیه با «>

0 نشان داده شده است. در ردیف‌های مربوط به نمونه‌های حل نشده، علامت «-» درج شده است. نتایج مدل‌های مسئله PJS با دوره‌های TOU1 و TOU2 به ترتیب در جدول ۴ و جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۲- نتایج مدل‌های ریاضی برای مسئله PDS با دوره TOU1

Setup3					Setup2					Setup1				
PDSM_2		PDSM_1		m/n	PDSM_2		PDSM_2		m/n	PDSM_2		PDSM_1		m/n
T(s)	#opt	T(s)	#opt		T(s)	#opt	T(s)	#opt		T(s)	#opt	T(s)	#opt	
>0	10	>0	10	5/10	>0	10	>0	10	5/10	>0	10	>0	10	5/10
7	1	8	10	5/20	2	10	1	10	5/15	1	3	7	10	5/25
-	-	602	1	5/30	145	2	174	10	5/20	-	-	332	6	5/35
1	10	>0	10	10/20	-	-	267	1	5/25	>0	10	>0	10	10/20
7	10	3	10	10/30	3	10	3	10	10/20	6	10	5	10	10/40
252	2	135	6	10/40	108	10	70	10	10/25	-	-	675	5	10/55
53	10	31	10	20/40	54	1	516	10	10/30	5	10	3	10	20/40
651	10	440	10	20/55	-	-	193	3	10/35	179	10	218	10	20/65
1284	2	866	2	20/65	157	2	96	2	20/40	-	-	589	6	20/85

جدول ۳- نتایج مدل‌های ریاضی برای مسئله PDS با دوره TOU2

Setup3					Setup2					Setup1				
PDSM_2		PDSM_1		m/n	PDSM_2		PDSM_2		m/n	PDSM_2		PDSM_1		m/n
T(s)	#opt	T(s)	#opt		T(s)	#opt	T(s)	#opt		T(s)	#opt	T(s)	#opt	
9	10	3	10	5/10	13	10	3	10	5/10	2	10	>0	10	5/10
873	2	378	10	5/15	2879	1	1055	9	5/15	-	-	1041	3	5/20
-	>0	2764	1	5/20	1478	4	1467	8	10/20	-	-	103	10	10/20
132	1	561	9	10/20	-	-	-	-	-	-	-	1354	3	10/25

جدول ۴- نتایج مدل‌های ریاضی برای مسئله PJS با دوره TOU1

Setup3					Setup2					Setup1				
PJSM_2		PJSM_1		n	PJSM_2		PJSM_2		N	PJSM_2		PJSM_1		N
T(s)	#opt	T(s)	#opt		T(s)	#opt	T(s)	#opt		T(s)	#opt	T(s)	#opt	
>0	10	>0	10	5/10	>0	10	>0	10	5/10	>0	10	>0	10	5/10
145	9	6	10	5/20	2	10	1	10	5/15	821	4	2	10	5/25
-	-	329	1	5/30	501	3	171	10	5/20	-	-	587	5	5/40
1	10	>0	10	10/20	-	-	390	4	5/25	>0	10	>0	10	10/20
4	10	4	10	10/30	2	10	2	10	10/20	4	10	3	10	10/40
160	2	432	7	10/40	67	10	46	10	10/25	-	-	244	5	10/55
29	10	31	10	20/40	40	1	192	9	10/30	3	10	2	10	20/40
648	10	433	10	20/55	-	-	109	3	10/35	106	10	101	10	20/65
1275	2	855	2	20/65	91	2	53	2	20/40	-	-	611	6	20/90

جدول ۵- نتایج مدل‌های ریاضی برای مسئله PJS با دوره TOU2

Setup3				Setup2						Setup1				
PJSM_2		PJSM_1		PJSM_2		PJSM_2		PJSM_2		PJSM_1		PJSM_1		
T(s)	#opt	T(s)	#opt	m/n	T(s)	#opt	T(s)	#opt	m/n	T(s)	#opt	T(s)	#opt	m/n
۲	۱۰	۱	۱۰	۵/۱۰	۳	۱۰	۱	۱۰	۵/۱۰	۱	۱۰	۰>	۱۰	۵/۱۰
۱۹۲	۱	۸۰۶	۲	۵/۲۰	۱۰۴۶	۱۰	۴۹۴	۱۰	۵/۱۵	۴۸۰	۱	۷۷۹	۴	۵/۲۰
۲۱۹	۹	۱۰۰	۹	۱۰/۲۰	۸۰۱	۹	۳۸۷	۹	۱۰/۲۰	۹۷	۱۰	۱۸	۱۰	۱۰/۲۰
۱۸۴۹	۱	۳۵۱	۱	۱۰/۲۵	-	-	-	-	-	-	-	۱۳۸۰	۱	۱۰/۳۰

۷- بحث و تحلیل نتایج

با توجه به جداول ۱ و ۲، واضح است که مدل PDSM_1 نسبت به مدل PDSM_2 کارایی بیشتری دارد و قادر به حل تعداد نمونه بیشتری به صورت بهینه است و همچنین از حیث زمان اجرا نیز، مطلوبیت بیشتری دارد. به طور مشابه در مسئله PJS نیز مدل PJSM_1 نسبت به مدل PJSM_2 عملکرد بهتری دارد و با مقایسه جداول‌های ۱ و ۳ با جداول ۲ و ۴، می‌توان دریافت که تعداد نمونه‌های حل شده توسط مدل‌های ارائه شده برای مسائل PDS و PJS با تعرفه‌های TOU2، خیلی کمتر از تعداد نمونه‌های حل شده با تعرفه TOU1 است؛ زیرا که در تعرفه‌های TOU2 هر روز به ۲۴ دوره مختلف تقسیم می‌شود؛ در حالی که در تعرفه TOU1، هر روز به ۶ دوره تقسیم می‌شود که این افزایش تعداد دوره در هر روز، باعث افزایش پیچیدگی مسائل و کاهش قدرت حل مدل‌های ریاضی می‌شود.

با توجه به نتایج، آماده‌سازی نوع ۱ که مقادیر کوچک‌تری نسبت به دو نوع دیگر آماده‌سازی دارد، نیازمند محاسبات کمتری است و همین امر موجب می‌شود تا تعداد نمونه‌های بهینه حل شده با آماده‌سازی نوع ۱، بیشتر از دو نوع دیگر باشد. در بین آماده‌سازی‌های نوع ۲ و نوع ۳، به دلیل اینکه آماده‌سازی نوع ۳ می‌تواند اعداد کوچک‌تری را شامل شود؛ بنابراین محاسبات آن راحت‌تر است و تعداد نمونه‌های حل شده از این نوع، نسبت به نوع ۲ بیشتر است.

به طور کلی با توجه به نتایج ارائه شده در جداول‌های ۱ تا ۴، می‌توان دریافت که مدت زمان مدل‌های حل ریاضی ارائه شده، حساسیت بالایی نسبت به میزان بزرگی مقادیر آماده‌سازی و همچنین تعداد دوره‌ها از خود نشان می‌دهند؛ به این معنی که افزایش مقدار آماده‌سازی، موجب افزایش پیچیدگی مسئله و متعاقباً افزایش مدت زمان حل مدل‌های ریاضی ارائه شده می‌شود. از طرف دیگر، افزایش تعداد دوره‌ها نیز موجب افزایش چشم‌گیر مدت زمان حل مدل‌های ریاضی می‌شود. از این رو توصیه می‌شود که با توجه به شرایط مسئله، تعداد دوره‌ها را کاهش داد. یکی از راه‌های کاهش دوره، کاهش افق برنامه ریزی است؛ مثلاً به جای اینکه مدیران بخواهند برای یک روز کامل برنامه ریزی کنند، روز کاری را به دو شیفت قبل از ظهر و بعد از ظهر تبدیل کنند و در هر نوبت، نصف کارها را زمان بندی و پردازش کنند. شکستن روز کاری به شیفت‌های مختلف، اگرچه به راحتی موجب کاهش تعداد دوره‌ها می‌شود، بعضاً ممکن است که افزایش هزینه را نیز در پی داشته باشد؛ بنابراین مدیران می‌توانند با برقراری موازنه^{۳۰} بین هزینه و مدت زمان حل مدل‌های ریاضی، برنامه‌های مختلفی ارائه دهند.

در جدول ۶ و جدول ۷ نتایج الگوریتم FRH برای مسائل PDS و PJS ارائه شده است. خطای الگوریتم FRH برای نمونه‌هایی که جواب بهینه آنها موجود بوده، مطابق رابطه (۳۱) و برای سایر نمونه‌ها، مطابق رابطه (۳۲)

محاسبه شده است.

$$RPD = \frac{FRH - Opt}{Opt} \times 100 \quad (31)$$

$$RPD = \frac{FRH - LB}{LB} \times 100 \quad (32)$$

حد پایین در نظر گرفته شده در رابطه (۳۲) برای مسئله PDS بر مبنای آزادسازی خطی، مدل PDSM_1 و برای مسئله PJS بر مبنای آزادسازی خطی، مدل PJS_1 محاسبه شده است.

جدول ۶- نتایج الگوریتم FRH برای مسئله PDS

TOU2									TOU1									
Setup3			Setup2			Setup1			Setup3			Setup2			Setup1			
RPD	T(s)	#opt	RPD	T(s)	#opt	RPD	T(s)	#opt	RPD	T(s)	#opt	RPD	T(s)	#opt	RPD	T(s)	#opt	m/n
۰/۷	۰>	۱۰	۲/۰	۰>	۱۰	۰/۵	۰>	۱۰	۱/۱	۰>	۱۰	۲/۱	۰>	۱۰	۱/۵	۰>	۱۰	۵/۱۰
۲/۹	۱۰۷۶	۱۰	۲/۱	۹۰۰	۱۰	۳/۸	۸۶۹	۱۰	۱/۰	۷۹۳	۱۰	۱/۵	۱۰۷۴	۱۰	۲/۸	۷۴۳	۱۰	۵/۵۰
-	-	-	-	-	-	۱/۸	۲۰۰۲	۵	-	-	-	-	-	-	۱/۵	۲۱۴۶	۹	۵/۹۰
۰/۸	۰>	۱۰	۱/۷	۰>	۱۰	۰/۰	۰>	۱۰	۲/۲	۰>	۱۰	۱/۷	۰>	۱۰	۱/۶	۰>	۱۰	۱۰/۲۰
۱/۹	۲۴۳۶	۱۰	۱/۶	۲۶۰۷	۱۰	۳/۹	۲۱۲۴	۹	۰/۷	۱۷۳۲	۹	۲/۷	۱۸۶۱	۱۰	۴/۳	۱۵۰۳	۱۰	۱۰/۸۰
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۰/۳	۱۹۲۳	۷	۱۰/۱۳۰
۱/۷	۳	۱۰	۲/۹	۳	۱۰	۰/۶	۲	۱۰	۳/۴	۰>	۱۰	۲/۱	۰>	۱۰	۲/۶	۰>	۱۰	۲۰/۴۰
۲/۳	۲۲۳۱	۱۰	۲/۳	۲۳۶۳	۸	۲/۱	۱۴۵۹	۹	۳/۵	۱۴۷۲	۱۰	۳/۰	۱۷۹۲	۱۰	۵/۸	۱۳۵۱	۱۰	۲۰/۱۲۰
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱/۴	۲۵۶۶	۹	۲۰/۱۹۰

جدول ۷- نتایج الگوریتم FRH برای مسئله PJS

TOU2									TOU1									
Setup3			Setup2			Setup1			Setup3			Setup2			Setup1			
RPD	T(s)	#opt	RPD	T(s)	#opt	RPD	T(s)	#opt	RPD	T(s)	#opt	RPD	T(s)	#opt	RPD	T(s)	#opt	m/n
۱/۷	۰>	۱۰	۱/۶	۰>	۱۰	۲/۳	۰>	۱۰	۰/۷	۰>	۱۰	۰/۹	۰>	۱۰	۱/۷	۰>	۱۰	۵/۱۰
۰/۲	۳۰۴	۱۰	۱/۳	۸۸۶	۱۰	۰/۶	۱۸۰	۱۰	۳/۱	۸۶۰	۱۰	۱/۹	۱۴۴۴	۱۰	۳/۴	۲۹۸	۱۰	۵/۵۰
-	-	-	۴/۲	۲۲	۱۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱/۱	۲۱۱۸	۱۰	۵/۱۰۰
۱/۵	۱	۱۰	۱/۶	۱۱۵	۱۰	۰/۳	۱	۱۰	۱/۹	۰	۱۰	۱/۷	۰>	۱۰	۱/۶	۰>	۱۰	۱۰/۲۰
۱/۷	۷۷۴	۱۰	۰/۶	۷	۱۰	۲/۵	۶۵۲	۱۰	۲/۴	۹۹۴	۱۰	۲/۲	۱۴۸۹	۱۰	۴/۳	۱۱	۱۰	۱۰/۸۰
-	-	-	۳/۸	۳۸۰	۱۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱/۷	۲۴۴۹	۱۰	۱۰/۱۳۰
۰/۶	۱	۱۰	۳/۳	۱۲۸۴	۱۰	۱/۴	۳	۱۰	۲/۹	۰>	۱۰	۱/۱	۰>	۱۰	۲/۶	۰>	۱۰	۲۰/۴۰
۲/۴	۷۶۴	۱۰	-	-	-	۲/۶	۱۷۲۲	۱۰	۲/۴	۷۷	۱۰	۷/۸	۱۶۵۵	۹	۳/۰	۷۶۹	۱۰	۲۰/۱۲۰
۰/۵	۱۱۸۰	۱۰	-	-	-	۲/۲	۱۸۲۴	۹	۱/۸	۹۹۱	۱۰	۷/۶	۲۳۷۴	۹	۲/۴	۱۰۸۷	۱۰	۲۰/۱۳۰
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲/۵	۲۵۰۲	۸	۲۰/۲۲۰

با توجه به جداول ۵ و ۶ می‌توان مشاهده کرد، نتایج الگوریتم ابتکاری FRH برای مسائل PDS و PJS مشابه نتایج محاسباتی مدل‌های ریاضی است؛ یعنی تعداد نمونه‌های حل شده با تعرفه‌های TOU1، به ازای هر سه نوع آماده‌سازی، بیشتر از نمونه‌های حل شده با دوره‌های TOU2 است؛ همچنین به ازای هر دو نوع تعرفه در نظر

گرفته شده، آماده سازی های نوع ۱، کمترین پیچیدگی و بیشترین تعداد نمونه حل شده را دارد. در بین آماده سازی های نوع ۲ و نوع ۳ نیز، تعداد نمونه های حل شده با آماده سازی نوع ۳ بیشتر است؛ همچنین به وضوح می توان مشاهده کرد، مدت زمان اجرای الگوریتم با تعرفه TOU1، کمتر از زمان اجرای الگوریتم با تعرفه TOU2 به ازای آماده سازی و تعداد ماشین یکسان است.

حداکثر متوسط خطای الگوریتم FRH در میان تمام دسته نمونه های ارائه شده در جدول های ۵ و ۶ برای مسائل PDS و PJS، به ترتیب برابر ۵/۸ و ۷/۸ درصد است که گویای مطلوبیت دقت الگوریتم است.

۸- نتیجه گیری

در این مقاله مسئله زمان بندی کارای انرژی ماشین های موازی غیر مرتبط، با در نظر گرفتن زمان های آماده سازی مستقل از توالی بررسی شد. آماده سازی مورد بررسی نیز، در دو حالت منفصل از پردازش و متصل به پردازش بررسی شد. برای هر کدام از مسائل، دو نوع مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط ارائه و با انجام آزمایش های عددی گوناگون، نتایج مدل ها ارزیابی شد. مدل های ارائه شده در هر دو حالت آماده سازی منفصل از پردازش و متصل به پردازش، نمونه های تا ۲۰ ماشین و ۸۰ کار را به صورت بهینه حل کرده است؛ همچنین در این مقاله، به منظور حل مسائل در ابعاد بزرگ، یک الگوریتم ابتکاری مبنی بر تثبیت و آزاد سازی نیز ارائه شد که این الگوریتم، بر مبنای تجزیه محیط زمان بندی ماشین های موازی غیر مرتبط، به تعدادی مسئله تک ماشین بنا شده بود. الگوریتم ارائه شده برای مسئله با آماده سازی منفصل از پردازش، قادر به حل نمونه های تا ۲۰ ماشین و ۱۸۰ کار است و برای مسئله متصل به پردازش، نمونه های با ابعاد ۲۰ ماشین و ۲۲۰ کار را حل می کند.

از جمله پیشنهادهایی که می توان برای تحقیقات آتی ارائه داد، می توان به بررسی مسئله زمان بندی کارای انرژی ماشین های موازی غیر مرتبط به زمان های آماده سازی مستقل از توالی اشاره کرد که در آن، کارها به صورت پویا در دسترس قرار می گیرد؛ همچنین با توجه به اینکه بررسی مسائل زمان بندی کارای انرژی با زمان های آماده سازی مستقل از توالی، تاکنون در هیچ پژوهشی مشاهده نشده و برای اولین بار در این مقاله، این مسئله مهم بررسی شده است؛ بنابراین بررسی مسئله زمان بندی کارای انرژی با زمان های آماده سازی مستقل از توالی، در سایر محیط های زمان بندی می تواند پیشنهاد دیگری برای مطالعات آتی باشد.

References

- Abikarram, J. B., McConky, K., & Proano, R. (2019). Energy cost minimization for unrelated parallel machine scheduling under real time and demand charge pricing. *Journal of Cleaner Production*, 208, 232-242.
- Allahverdi, A., & Soroush, H. (2008). The significance of reducing setup times/setup costs. *European Journal of Operational Research*, 187(3), 978-984 .
- Avalos-Rosales, O., Angel-Bello, F., & Alvarez, A. (2015). Efficient metaheuristic algorithm and reformulations for the unrelated parallel machine scheduling problem with sequence and machine-dependent setup times. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(9-12), 1705-1718.
- Bektur, G., & Saraç, T. (2019). A mathematical model and heuristic algorithms for an unrelated parallel machine scheduling problem with sequence-dependent setup times, machine eligibility restrictions and a common server. *Computers & Operations Research*, 103, 46-63 .

- Che, A., Zhang, S., & Wu, X. (2017). Energy-conscious unrelated parallel machine scheduling under time-of-use electricity tariffs. *Journal of Cleaner Production*, 156(1), 688-697.
- Cheng, J., Chu, F., & Zhou, M. (2017). An improved model for parallel machine scheduling under time-of-use electricity price. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 15(2), 896-899 .
- Ding, J.-Y., Song, S., Zhang, R., Chiong, R., & Wu, C. (2015). Parallel machine scheduling under time-of-use electricity prices: New models and optimization approaches. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 13(2), 1138-1154 .
- Fanjul-Peyro, L., Ruiz, R., & Perea, F. (2019). Reformulations and an exact algorithm for unrelated parallel machine scheduling problems with setup times. *Computers & Operations Research*, 101, 173-182.
- Jia, Z.-h., Zhang, Y.-l., Leung, J. Y.-T., & Li, K. (2017). Bi-criteria ant colony optimization algorithm for minimizing makespan and energy consumption on parallel batch machines. *Applied Soft Computing*, 55, 226-237 .
- Jiang, E.-d., & Wang, L. (2019). An improved multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition for energy-efficient permutation flow shop scheduling problem with sequence-dependent setup time. *International Journal of Production Research*, 57(6), 1756-1771.
- Öztop, H., Tasgetiren, M. F., Eliiyi, D. T., Pan, Q.-K., & Kandiller, L. (2020). An energy-efficient permutation flowshop scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, 150, 113279 .
- Ramezani, R., Vali-Siar, M. M., & Jalalian, M. (2019). Green permutation flowshop scheduling problem with sequence-dependent setup times: a case study. *International Journal of Production Research*, 1-23 .
- Saberi-Aliabad, H., Reisi-Nafchi, M., & Moslehi, G. (2020). Energy-efficient scheduling in an unrelated parallel-machine environment under time-of-use electricity tariffs. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119393 .
- Tan, M., Duan, B., & Su, Y. (2018). Economic batch sizing and scheduling on parallel machines under time-of-use electricity pricing. *Operational Research*, 18(1), 105-122 .
- Vallada, E., & Ruiz, R. (2012). Scheduling unrelated parallel machines with sequence dependent setup times and weighted earliness–tardiness minimization. *Just-in-Time Systems*, 67-90.
- Wang, S., Wang, X., Yu, J., Ma, S., & Liu, M. (2018). Bi-objective identical parallel machine scheduling to minimize total energy consumption and makespan. *Journal of Cleaner Production*, 193, 424-440.
- Wu, X., & Che, A. (2019). A memetic differential evolution algorithm for energy-efficient parallel machine scheduling. *Omega*, 82(10), 155-165.
- Zeidi, J.R., and MohammadHosseini, S. (2015). Scheduling unrelated parallel machines with sequence-dependent setup times, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(9-12), 1487-1496.
- Zhang, H., Xu, G., Pan, R., and Ge, H. (2021). A novel heuristic method for the energy-efficient flexible job-shop scheduling problem with sequence-dependent set-up and transportation time, *Engineering Optimization*, 1-22.
- Zhou, S., Jin, M., & Du, N. (2020). Energy-efficient scheduling of a single batch processing machine with dynamic job arrival times. *Energy*, 209, 118420 .
- Zhou, S., Li, X., Du, N., Pang, Y., & Chen, H. (2018). A multi-objective differential evolution algorithm for parallel batch processing machine scheduling considering electricity consumption cost. *Computers & Operations Research*, 96, 55-68.
- Zhou, B., & Liu, W. (2019). Energy-efficient multi-objective scheduling algorithm for hybrid flow shop with fuzzy processing time. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 233(3), 1282–1297.

- ¹ Wu
- ² Che
- ³ Energy Efficient Scheduling
- ⁴ unrelated parallel machine
- ⁵ Time of Use
- ⁶ Allahverdi
- ⁷ Souroush
- ⁸ Vallada
- ⁹ Ruiz
- ¹⁰ Jia
- ¹¹ Ant Colony
- ¹² Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
- ¹³ Tan
- ¹⁴ Cheng
- ¹⁵ Ding
- ¹⁶ Zhou
- ¹⁷ Memetic Differential Evolutionary Algorithm
- ¹⁸ Ramezani
- ¹⁹ Jiang
- ²⁰ Wang
- ²¹ Improved Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition
- ²² Zhou
- ²³ Öztöp
- ²⁴ Processing time Disjointed from Setup times
- ²⁵ Processing time Jointed to Setup times
- ²⁶ Fix and Relax Heuristic
- ²⁷ Saberi-Aliabad
- ²⁸ Bektur
- ²⁹ Saraç
- ³⁰ Trade-off