

Multi-Objective Hybrid Metaheuristic Search Algorithm for Distributed Reentrant Permutation Flow Shop Scheduling Via Considering Preventive Maintenance under Uncertainty

Aliakbar Hasani*

Assistant professor, Department of Industrial Engineering and Management, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, aa.hasani@shahroodut.ac.ir

Abstract: Distributing the production activities among the supply chain facilities with regard to the considered criteria can have a significant impact on the productive management. In this paper, a comprehensive mathematical model for reentrant permutation flow shop scheduling via considering a preventive maintenance and distributed jobs on different facilities is proposed. The uncertainty of the time of preventive maintenance operation is handled using robust optimization technique based on the uncertainty budget approach. Job assignment to production facilities and job scheduling are determined in the proposed model by considering multiple objectives include C_{max} minimization, production cost minimization, and average tardiness. Due to the NP-hard nature of the proposed flow shop scheduling problem, a new hybrid meta-heuristic based on the novel adaptive large neighborhood search and the simulated annealing is adopted. The obtained results from an extensive numerical experimentation indicate the efficiency of the proposed model and solution algorithm to tackle the proposed problem.

Keywords: Distributed Scheduling, Reentrant Permutation Flow Shop, Preventive Maintenance, Uncertainty, Hybrid, Metaheuristic Algorithm

Introduction: In certain manufacturing industries, it has been observed that the classical assumption of flow shop scheduling, stating that each job visits each machine exactly once, is occasionally violated. The prime example can be noticed in the high-tech industries, i.e. semiconductor wafer fabrication in which the operation processes of the jobs are performed by re-visiting some workstations (Gupta & Sivakumar, 2006). The scheduling problem of this nature of processing is categorized as a distinct flow shop with reentrant line configuration, called reentrant flow shop scheduling (RFS) (Katragjini et al., 2015). The significance of RFS is the processing layers l . Each layer begins from the first workstation and completes on the last workstation. It means that once a job finished a layer of a set of operations, it will repeat its process to the next layer starting on the first workstation until all operations are completed. The RFS scheduling has been an active research area and attracted a considerable attention since the past decade due to the development and improvement of high-tech industry. The complexity of RFS cannot be circumvented since it involves more operations than the classical flow shop. Moreover, the cyclic operations where the jobs with higher layers may overlap other jobs in the same work station are essential to be considered. As a result, these complexities have triggered the development of the efficient scheduling approaches to improve the system performance. Various researchers surveyed the scheduling techniques in semiconductor manufacturing and providing the global view on reentrant scheduling problems. Another form of RFS is reentrant permutation flow shop (RPFS) where at each level no passing is permitted, that is, not only the machine sequence the same for all jobs, but also the job sequence is the same for each machine (Rifai et al., 2016). Despite the enormous literature on the RFS, most studies -if not all- base their research on the assumption that the process only involves a single production line. Some studies explored the problem on hybrid RFS where the production stages have more than one machines available to process the jobs. Nevertheless, hybrid RFS is based on the single production line. Nowadays, single factory firms are less common, with multi-plant companies and supply chains taking a more important role in practice. Several literatures mentioned that multiple production lines with more than one production center, named as distributed manufacturing system, enables companies to achieve higher product quality, lower production costs and lower management risks. However, existing studies focused more on the economic field and distributed finite capacity scheduling is seldom tackled.

* Corresponding author

Materials and Methods: In this section, a novel hybrid meta-heuristic via considering the specific assumptions of the flow shop problem as a NP-hard problem is proposed. The proposed solution algorithm incorporates adaptive large neighborhood search and the simulated annealing algorithms. Various new construction and deconstruction neighborhood structures are applied in the proposed adaptive large neighborhood search algorithm. Details of the proposed algorithm is presented in Fig.1.

Results and Discussion: The results of the proposed solution algorithm assessment are presented based on the two common performance assessment criteria which are proposed in the literature after 10 times runs of the applied solution algorithms. These criteria are the average number of obtained Pareto solution at each iteration of the algorithm and average number of Pareto solutions which are not dominated by solutions from other compared algorithms. In addition, computational time is considered as a third criteria for performance assessment of the proposed solution algorithm (See Table 1). Obtained results indicate the superiority of the proposed solution algorithm.

- | | |
|---|---|
| <p>1: Initialize feasible solution x</p> <p>2: Set $x^* \leftarrow x$, Insert x to A, Initialize weights</p> <p>3: While the stopping criteria is not reached do</p> <p style="padding-left: 20px;">4: Select a destory n^- and n^+ heuristic based on the adaptive weights w_n^- and w_n^+</p> <p style="padding-left: 20px;">5: Repeat</p> <p style="padding-left: 40px;">6: Apply (n^-, n^+) to yield x'</p> <p style="padding-left: 20px;">7: If $(x'$ is better than $x^*)$ then Set $x^* \leftarrow x'$</p> <p style="padding-left: 20px;">8 Else IF $\text{Random}(0,1) < e^{-\frac{\Delta F}{T}}$ then Set $x^* \leftarrow x'$</p> <p>9: End IF</p> <p>10: If $(x'$ is non-dominattedsolution) then Insert x' to A</p> | <p>11: End IF</p> <p>12: If $(x'$ meets the acceptance criteria) then Set $x'' \leftarrow x'$</p> <p>13: End if</p> <p>14: Randomly select x from (A, x'')</p> <p>15: Until the system in frozen</p> <p>16: Update w_n^- and w_n^+</p> <p>17: Decrease the temperature according to the predefined pattern and set it as T</p> <p>18: End while</p> <p>19: Return x^*</p> |
|---|---|

Fig. 1- Peseudo code of the proposed solution algorithm

Table 1- Performance assessment of the proposed solution algorithm

Compared Alg.			Proposed Alg.			Pro.	Compared Alg.			Proposed Alg.			Pro.
1	2	3	1	2	3		1	2	3	1	2	3	
0.7270	39.30	72.01	0.4129	25.95	57.12	15	0.6120	18.71	3392.26	0.5114	13.80	3019.18	75
0.6991	34.43	180.23	0.5972	28.80	152.11	30	0.6523	18.01	5900.74	0.5304	11.20	5631.07	90
0.9009	48.23	479.19	0.6543	38.10	398.06	45	0.6914	15.23	6801.69	0.5713	11.83	6594.29	105
0.9207	47.3	1308.21	0.7810	36.30	1200.47	60							

Conclusion: In this study, a comprehensive optimization model for an extended reentrant permutation flow shop scheduling via considering a preventive maintenance and distributed jobs on different facilities is proposed. To enhance the applicability of the proposed model, uncertainty of the time of preventive maintenance operation is handled using robust optimization technique based on the uncertainty budget approach. In the proposed mathematical model, multiple objectives include C_{max} minimization, production cost minimization, and average tardiness are considered. The aim of the proposed model is to determine the job assignment to production facilities and job scheduling. A new hybrid meta-heuristic based on the novel adaptive large neighborhood search and the simulated annealing is applied as a consequence of the NP-hard nature of the proposed flow shop scheduling problem,. The obtained results from an extensive numerical experimentation indicate the efficiency of the proposed model and solution algorithm to tackle the proposed problem.

References

Gupta, A. K., & Sivakumar, A. I. (2006). "Job Shop Scheduling Techniques In Semiconductor Manufacturing". *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 27(11), 1163-1169.

Katragjini, K., Vallada, E., & Ruiz, R. (2015). "Rescheduling Flowshops Under Simultaneous Disruptions". Paper presented at the 6th IESM Conference, Seville, Spain.

Rifai, A. P., Nguyen, H. T., & Dawal, S. Z. M. (2016). "Multi-Objective Adaptive Large Neighborhood Search For Distributed Reentrant Permutation Flow Shop Scheduling". *Applied Soft Computing*, 40(1), 42-57.

الگوریتم چندهدفه فرا ابتکاری ترکیبی برای مسأله زمان بندی جریان کارگاهی جایگشتی دوباره واردشونده توزیع شده با در نظر گرفتن نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در شرایط عدم قطعیت

علی اکبر حسنی *

استادیار، دانشکده مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، aa.hasani@shahroodut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، مدلی ریاضی برای مسأله برنامه ریزی زمان بندی جریان کارگاهی توزیعی جایگشتی با امکان برگشت دوباره کارها و لحاظ کردن برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه ارائه شده است. عدم قطعیت زمان انجام تعمیرات پیشگیرانه با استفاده از رویکرد بهینه سازی استوار بودجه ای لحاظ شده است. هدف از حل مسأله، تخصیص کارها به تسهیلات تولید و تعیین توالی عملیات آنها با لحاظ کردن معیارهای ارزیابی حداقل کردن زمان تکمیل آخرین کار، کل هزینه های تولید و متوسط مدت زمان دیرکرد در تحویل کارها است. با توجه به پیچیدگی های حل مسأله بررسی شده، از الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی مبتنی بر جستجوی همسایگی وسیع انطباق پذیر و شبیه سازی تبرید استفاده شده است. نتایج حل نشان دهنده کارایی مدل ارائه شده برای ارائه زمان بندی و تخصیص مناسب انجام کارها با توجه به معیارهای ارزیابی مدنظر و لحاظ کردن سطوح مختلف ریسک پذیری تصمیم گیرندگان است. نتایج حل مسائل نمونه و ارزیابی عملکرد الگوریتم حل، نشان دهنده کارایی آن است.

واژه های کلیدی: زمان بندی توزیع شده، جریان کارگاهی جایگشتی دوباره واردشونده، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، عدم قطعیت، الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی

مقدمه

در مدل‌های سنتی برنامه‌ریزی و زمان‌بندی توالی عملیات جریان کارگاهی، به‌طور معمول فرض بر آن است که هر کار تنها یک‌بار از یک ماشین عبور می‌کند (پیندو^۱، ۲۰۰۸). این در حالی است که با توسعه فرایندهای تولید و پیچیده‌شدن آن به‌ویژه در صنایع تولیدی با فناوری سطح بالا همچون تولید ویفر نیمه‌رسانا (وارگاس-ویلامیل و بیورا^۲، ۲۰۰۱)، تولید صفحات کریستال مایع (چوی، کیم و لی^۳، ۲۰۱۱)، مدارهای چاپی (بیسپو و تایور^۴، ۲۰۰۱) و یا حتی در حوزه‌های کاربردی مانند پردازش سیگنال (زو، یین، چنگ، وو و گو^۵، ۲۰۱۴) و خدمات نگهداری و تعمیرات (لین، لی و هو^۶، ۲۰۱۳)، امکان بازگشت دوباره کارها به ماشین وجود خواهد داشت. به این نوع از مسائل برنامه‌ریزی، مسائل جریان کارگاهی دوباره واردشونده گفته می‌شود (ریفی، گوین و داوال^۷، ۲۰۱۶). در جریان کارگاهی دوباره واردشونده، انجام فرایند کارها با مجموعه‌ای از لایه‌های انجام کار تعریف می‌شود (شامل عملیات کاری) که از ماشین ابتدایی تا ماشین پایانی شروع می‌شود. هر کار باید پس از پایان یک لایه، دیگر لایه‌های لازم را پشت سر گذارد (کوپتا و سیواکومار^۸، ۲۰۰۶). در نظر گرفتن امکان مراجعه دوباره کارها به ماشین باعث افزایش پیچیدگی مدل‌سازی و برنامه‌ریزی مسئله جریان کارگاهی نسبت به حالت کلاسیک آن خواهد شد. مسئله جریان کارگاهی دوباره واردشونده نیز با توجه به توالی انجام کارها روی ماشین‌ها به دو دسته عمومی و جایگشتی تقسیم می‌شود (ریفی، گوین و داوال^۷، ۲۰۱۶). در حالت جایگشتی، توالی انجام کارها روی ماشین‌ها برای تمامی کارها یکسان است. این حالت نیز در بسیاری صنایع با فناوری سطح بالا نظیر تولید نیمه‌رساناها دارای کاربرد خواهد بود. از سوی دیگر با توجه به پیچیدگی الزامات فضای تصمیم‌گیری برنامه‌ریزی و زمان‌بندی کارها در دنیای واقعی، نیاز است تا در راستای ارتقاء اثربخشی برنامه‌ها، دیگر تصمیمات مرتبط مانند برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات ماشین‌ها نیز در نظر گرفته شود (رویز، گارسیا-دپاز و ماروتو^۹، ۲۰۰۷). از سوی دیگر در طی سال‌های اخیر روند پراکنده‌کردن فرایندهای تولید در تسهیلات مختلف در سطح زنجیره تأمین با هدف کاهش قیمت تولید، ارتقاء کیفیت تولید، کاهش ریسک تولید و نزدیکی بیشتر به بازارهای هدف توسعه یافته است. این امر باعث شده است تا مسئله زمان‌بندی تولید در سطح زنجیره تأمین مطرح شود و تصمیمات مرتبط با بیکره‌بندی شبکه همچون انتخاب تسهیلات تولید بر آن تأثیرگذار باشند (مون، کیم و هور^{۱۰}، ۲۰۰۲). پراکنده و توزیع کردن فعالیت‌های تولید در طی سال‌های اخیر به شدت توجه سازمان‌های در حال رقابت در بازارهای جهانی را به‌خود جلب کرده است (نادری و رویز^{۱۱}، ۲۰۱۴). این در حالی است که در دنیای واقعی بسیاری از پارامترهای کلیدی برای تصمیم‌سازی در شرایط عدم قطعیت هستند و نیاز است تا تأثیر آنها در فرایند برنامه‌ریزی در نظر گرفته شود (کسپرسکی، کورپیسز و زیلینسکی^{۱۲}، ۲۰۱۲). لحاظ‌نکردن عدم قطعیت در فرایند برنامه‌ریزی باعث کاهش کارایی و اثربخشی تصمیمات در مرحله اجرا خواهد شد. علاوه بر آن تصمیم‌گیری هم‌زمان تخصیص کارها به تسهیلات و تعیین توالی آنها بر پیچیدگی‌های این مسئله در مقایسه با مسئله کلاسیک برنامه‌ریزی جریان کارگاهی می‌افزاید (نادری و رویز^{۱۱}، ۲۰۱۴). با توجه به جنبه‌های متعدد و درعین حال متنوع، مسئله برنامه‌ریزی و زمان‌بندی جریان کارگاهی که اشاره شد، نیاز است تا در فرایند ارزیابی با تعیین معیارهای ارزیابی مناسب، اثربخشی تصمیمات را به‌خوبی ارتقاء داد؛ از این رو

متأثیر از بسیاری الزامات در دنیای واقعی، مدل‌های چندهدفه و نیاز به معرفی جواب‌های مناسب با در نظر گرفتن چند تابع هدف به صورت هم‌زمان، توسعه یافته است (ینیسی و یاقماهان، ۱۳، ۲۰۱۴).

در این مقاله، مدلی جامع برای زمان بندی جریان کارگاهی جایگشتی دوباره واردشونده با سه معیار ارزیابی، ارائه شده است. برای افزایش اثربخشی برنامه ریزی، محدودیت‌های منبع در اختیار در شرایط اعمال تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه روی ماشین‌ها در نظر گرفته شده است. علاوه بر آن، به دلیل پیچیدگی زیاد ماشین‌ها در فرایند تولید محصولات فناورانه و اثرگذاری این سطح بالای تکنولوژی بر فرایند تعمیرپذیری ماشین‌ها، عدم قطعیت زمان تعمیر ماشین‌ها نیز با استفاده از رویکرد برنامه ریزی استوار بودجه‌ای لحاظ شده است. در نهایت، با توجه به پیچیدگی‌های زیاد مدل ارائه شده، روش حل کارایی با الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی توسعه یافته ارائه و ارزیابی شده است.

دیگر بخش‌های مقاله به صورت ذیل ارائه شده است. در بخش ۲، مبانی نظری و پیشینه پژوهش زمان بندی جریان کارگاهی جایگشتی دوباره واردشونده بررسی شده است. در بخش ۳، مسأله پژوهش و مدل ریاضی آن ارائه شده است. در بخش ۴، الگوریتم حل ترکیبی جدید پیشنهاد شده، بررسی شده است. مسائل نمونه بررسی و تنظیم پارامترهای الگوریتم حل در بخش ۵ ارائه شده است. نتایج محاسباتی در حل مسأله نمونه و اعتبارسنجی روش حل پیشنهادی نیز در بخش ۵ ارائه شده است. در نهایت جمع بندی و پیشنهادها برای انجام پژوهش‌های آتی در بخش ۶ ارائه شده است.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

نخستین بار گریو^{۱۴} و همکارانش (۱۹۸۳)، مسأله برنامه ریزی جریان کارهای دوباره واردشونده را معرفی کردند. پس از آن طی دهه‌های اخیر با توسعه صنعت نیمه‌رساناها توجه به آن زیاد شد و توسعه یافت. به دلیل امکان بازگشت دوباره کارها به یک ماشین، این مسأله پیچیدگی‌های حل بیشتری نسبت به مسأله کلاسیک برنامه ریزی جریان کارگاهی دارد. پن و چن^{۱۵} (۲۰۰۳) در مطالعه‌ای نشان داده‌اند مسأله برنامه ریزی جریان کارگاهی دوباره واردشونده حتی در ابعاد کوچک آن از نوع مسائل دارای پیچیدگی حل است. طی سال‌های اخیر، هم‌زمان با توسعه صنایع با فناوری سطح بالا نظیر توسعه نیمه‌رساناها، مسأله جریان کارگاهی دوباره واردشونده با امکان یکسان بودن توالی کارها روی همه ماشین‌ها و با نام جایگشتی به شدت توجه پژوهشگران را به خود جلب کرد (چن، پن و لین^{۱۶}، ۲۰۰۹؛ چن^{۱۷}، ۲۰۰۶؛ چن، پن و وو^{۱۸}، ۲۰۰۸). در مسائل زمان بندی عملیات دوباره واردشونده، توجه به دو مقوله کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری با در نظر گرفتن موعد تحویل کارها همواره مدنظر پژوهشگران بوده است (ریفی، گوین و داوال^{۱۹}، ۲۰۱۶). حداقل کردن زمان تکمیل آخرین کار با هدف حداکثر کردن بهره‌وری با افزایش میزان خروجی از متداول‌ترین معیارهای ارزیابی در زمان بندی جریان کارگاهی دوباره واردشونده است (چو، چو و دسپرز^{۱۹}، ۲۰۱۰؛ سان، ژانگ، گو و وانگ^{۲۰}، ۲۰۱۱)؛ برای مثال یانگ^{۲۱} و همکارانش (۲۰۰۸) مدل برنامه ریزی جریان کارگاهی دوباره واردشونده با چند ماشین مبتنی بر مسأله ساخت پل را با هدف حداقل کردن زمان تکمیل آخرین کار ارائه کرده‌اند. همچنين، سانگ ساوانگ، ستانان، فوجیموتو و جن^{۲۲} (۲۰۱۵) مدل برنامه ریزی دوسطحی

را برای حداقل کردن زمان تکمیل آخرین کار در مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی دوباره واردشونده را با در نظر گرفتن امکان توقف در فرایند تولید به دلیل نگهداری نکردن موجودی بافر و امکان توقف کار روی ماشین ارائه کرده‌اند. جیونگ و کیم^{۲۳} (۲۰۱۴) مسأله برنامه‌ریزی جریان کارگاهی دوباره واردشونده را با در نظر گرفتن زمانهای راه‌اندازی وابسته به توالی عملیات و یا هدف حداقل کردن کل دیرکردها ارائه کرده‌اند. کانگ و همکاران (۲۰۰۷) مدلی ریاضی برای مسأله برنامه‌ریزی جریان کارگاهی دوباره واردشونده با هدف حداقل کردن میانگین موزون کل دیرکردها و با در نظر گرفتن زمانهای راه‌اندازی وابسته به توالی عملیات ارائه کرده‌اند. کایهارا^{۲۴} و همکاران (۲۰۱۰) نیز مدلی برای حداقل کردن میانگین کل دیرکردها با در نظر گرفتن برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات فعال ارائه کرده‌اند. هوانگ^{۲۵} و همکاران (۲۰۱۴) مدلی با هدف حداقل کردن کل دیرکردها و زودکردها به صورت توأمان ارائه کرده‌اند. نتایج مطالعات اخیر انجام‌شده در حوزه برنامه‌ریزی جریان کارگاهی دوباره واردشونده حاکی از آن است که مواجهه با این مسأله تنها با لحاظ کردن یک معیار ارزیابی به‌خوبی الزامات مربوط به این فضای تصمیم‌گیری را در دنیای واقعی برآورده نمی‌سازد؛ از این رو مدل‌های برنامه‌ریزی جریان کارگاهی دوباره واردشونده چندهدفه طی سال‌های اخیر توسعه یافته‌اند (ریفی، گوین و داوال^۷، ۲۰۱۶). دوگاردین^{۲۶} و همکاران (۲۰۱۰) مدلی چندهدفه برای برنامه‌ریزی جریان کارگاهی دوباره واردشونده با دو هدف حداقل کردن زمان سیکل تولید و حداکثر کردن میزان استفاده از منابع ارائه کرده‌اند. همچنین در مطالعات دیگر، دو تابع هدف حداقل کردن زمان تکمیل آخرین کار و کل تأخیرها نیز در نظر گرفته شده‌اند (ابراهیمی، فاطمی قمی و کریمی^{۲۷}، ۲۰۱۴).

طی سال‌های اخیر و متأثر از الزامات فضای کسب‌وکار، مشاهده می‌شود که تصمیم‌پراکنده کردن فعالیت‌های تولید در تسهیلات مختلف و تخصیص کارها به تسهیلات در کنار تصمیم‌تعیین توالی انجام کارها توجه پژوهشگران را به‌خود جلب کرده است. این تصمیمات با هدف افزایش بهره‌وری و دستیابی به مزیت‌های گوناگون همچون کاهش هزینه‌ها و ریسک تولید انجام می‌شود؛ از این رو در ادبیات، مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی دوباره واردشونده توزیع‌شده توسعه یافته است (ریفی، گوین و داوال^۷، ۲۰۱۶). ریفی و همکارانش (۲۰۱۶) مدلی ریاضی برای زمان‌بندی کارها در جریان کارهای توزیع‌شده با در نظر گرفتن امکان بازگشت مجدد کارها به ماشین در حالت قطعیت کامل و بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های استفاده از منابع مانند برنامه نگهداری و تعمیرات ماشین، ارائه کرده‌اند. این در حالی است که با توجه به پیچیدگی‌های محیطی، تصمیم‌گیری درباره توسعه بیشتر مدل‌های جریان کارهای دوباره واردشونده توزیع‌شده لازم است.

در دنیای واقعی، نمونه‌های متفاوتی از عدم قطعیت مانند عدم قطعیت در زمان انجام کارها، در دسترس بودن ماشین و ثابت بودن لیست کارها بر فعالیت‌های تولیدی و در پی آن مسأله زمان‌بندی تولید تأثیرگذار هستند (آرنات و ربدی^{۲۸}، ۲۰۰۸؛ کوپانوس، کاپون، گارسیا، اسپونا و پویجانر^{۲۹}، ۲۰۰۸)؛ در نتیجه نیاز است تا برای افزایش اثربخشی تصمیمات، عدم قطعیت‌ها در برنامه‌ریزی لحاظ شوند (کاتراجینی، والادا و رویز^{۳۰}، ۲۰۱۵). هنگام مواجهه با عدم قطعیت شدید و در پی آن دسترسی‌نداشتن به داده‌های کافی و معتبر برای برآورد تابع احتمال و رفتار پارامتر بررسی‌شده با استفاده از رویکردهای برنامه‌ریزی احتمالی و فازی، استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی استوار پیشنهاد

می شود. رویکرد بهینه سازی استوار مبتنی بر مفهوم بودجه عدم قطعیت تا حد مطلوبی شرایط دنیای واقعی را هنگامی که احتمال انحراف مقادیر همه پارامترهای غیرقطعی از مقادیر اسمی خود اندک باشد به خوبی پاسخ می دهد؛ بنابراین، تعداد پارامترهایی که مقادیر آنها نسبت به مقدار اسمی دارای انحراف است با حدی از پیش تعیین شده، تعیین می شود و بودجه عدم قطعیت نامیده می شود. سطح بودجه نشان دهنده درجه محافظه کاری تصمیم گیرنده است. مقادیر کمتر و بیشتر بودجه عدم قطعیت به ترتیب بیانگر حداکثر و حداقل مقدار ریسک پذیری تصمیم گیرنده هستند (حسنی، ذگردی و نیکبخش^{۳۱}، ۲۰۱۴).

باتوجه به ماهیت مسائل جریان کارگاهی دوباره واردشونده در حالت عمومی و در حالت توزیع شده که از نوع مسائل با پیچیدگی حل است، نیاز به توسعه و ارائه روش های حل کارآمد برای حل این مسائل در ابعاد بزرگ و باتوجه به پیچیدگی های ذاتی آن است (ریفی، گوین و داوال^۷، ۲۰۱۶)؛ از این رو پژوهشگران روش های فرا ابتکاری بیشتری نسبت به الگوریتم های حل دقیق و ابتکاری برای حل این نوع مسائل ارائه داده اند. لیو^{۳۲} (۲۰۱۰)، رائو و چو^{۳۳} (۲۰۰۹)، و لین و لی^{۳۴} (۲۰۱۲) الگوریتم ژنتیک را برای حل جریان کارگاهی دوباره تکرارشونده ارائه کرده است. زو^{۳۵} و همکاران (۲۰۱۴) الگوریتم ممتیک را برای حداقل کردن زمان تکمیل آخرین کار در مسئله جریان کارگاهی دوباره واردشونده جایگشتی ارائه کرده اند. بینگ^{۳۶} و همکاران (۲۰۱۴) الگوریتم گریدی پارتو تکرارشونده را برای مسئله جریان کارگاهی دوباره واردشونده با در نظر گرفتن اهداف حداقل کردن زمان تکمیل آخرین کار و کل تأخیرها ارائه کرده اند. چام نانلور^{۳۷} و همکاران (۲۰۱۴) الگوریتم ژنتیک ترکیبی بهبودیافته را برای حل مسئله جریان کارگاهی دوباره واردشونده با در نظر گرفتن پنجره زمانی ارائه کرده اند. چان، پراکاش، ما و ونگ^{۳۸} (۲۰۱۳) الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی مبتنی بر جستجوی ممنوعه و شبیه سازی تبرید را برای حل مسئله جریان کارگاهی توزیع شده ارائه کرده اند. چن^{۱۷} (۲۰۰۶) الگوریتم فرا ابتکاری جستجوی ممنوعه را برای حداقل کردن زمان تکمیل آخرین کار در مسئله جریان کارگاهی دوباره واردشونده ارائه کرده اند. چوی و کیم^{۳۹} (۲۰۰۸) مجموعه ای از الگوریتم های ابتکاری را برای حداقل کردن زمان تکمیل آخرین کار در مسئله جریان کارگاهی دوباره واردشونده ارائه کرده اند. سانگ ساوانگ و ستانان^{۲۲} (۲۰۱۵) الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی را مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و جستجوی ذرات برای حداقل کردن زمان تکمیل آخرین کار در مسئله جریان کارگاهی دوباره واردشونده ارائه کرده اند. جیو^{۴۰} و همکاران (۲۰۱۳) الگوریتم جستجوی ممنوعه را برای حداقل کردن زمان تکمیل آخرین کار در مسئله جریان کارگاهی دوباره واردشونده توزیع شده ارائه کرده اند. لین^{۴۱} و همکاران (۲۰۱۳) نیز الگوریتم گریدی اصلاح شده را برای آن مسئله ارائه کرده اند. نادری و رویز^{۱۱} (۲۰۱۰) الگوریتم جستجوی پراکنده را برای حل مسئله مشابه ارائه کرده اند.

علاقه مندان به مطالعه بیشتر در حوزه برنامه ریزی جریان کارگاهی دوباره واردشونده به مطالعات چوی^{۴۲} و همکاران (۲۰۰۹)، چیو^{۴۳} و همکاران (۲۰۱۰)، و بودهار و مزبانی^{۴۴} (۲۰۱۰) مراجعه کنند. برای مطالعه در زمینه مدل های برنامه ریزی و زمان بندی انجام کارها با انواع حالت های برگشت کارها به مطالعات بلمان و ارنست^{۴۵} (۱۹۸۲)، ازوی^{۴۶} و همکاران (۱۹۹۲)، لین و لی^{۳۴} (۲۰۱۱) نیز مراجعه شود.

تعریف مسأله پژوهش

در این مقاله مسأله برنامه‌ریزی جریان کارگاهی جایگشتی توزیع‌شده دارای کاربرد در صنایع تولید محصولات فناورانه الکترونیکی بررسی شده است. برای این منظور نیاز است تا علاوه بر تعیین توالی و زمان‌بندی عملیات تولید برای انجام کارها، مراکز تولید نیز انتخاب و فعالیت‌های تولیدی در این مراکز در راستای دستیابی به اهداف مدنظر به‌نحو مناسب توزیع شوند. لازم به ذکر است که انقطاع در انجام کارها مجاز نیست. مجموعه کارها کاملاً از یکدیگر مستقل هستند. ماشین‌ها همواره در دسترس نبوده و امکان بروز خرابی و یا توقف به دلیل فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات در نظر گرفته شده است. عدم قطعیت مدت زمان انجام فعالیت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه با رویکرد بهینه‌سازی استوار بودجه‌ای نمایش داده شده است. همه کارها در زمان صفر در کارگاه حضور دارند. در شکل شماره ۱ نمایی از جریان کارگاهی توزیع‌شده دوباره واردشونده شامل ۳ ماشین و ۲ سایت تولیدی مستقل و با امکان نگهداری موجودی بافر بدون ظرفیت هر ماشین نمایش داده شده است.

مدل‌سازی ریاضی

مجموعه‌ها

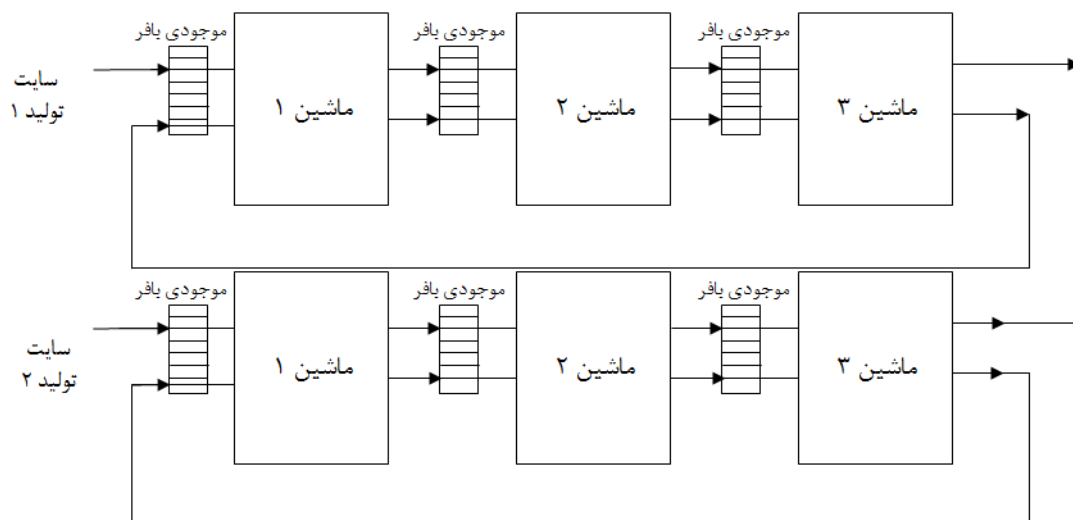
P : مجموعه سایت‌های تولید

M : مجموعه ماشین‌ها با مشخصات و ویژگی‌های برابر که در مجموعه تسهیلات تولید استقرار یافته‌اند

J : مجموعه کارها

L : مجموعه لایه‌ها با هدف نمایش امکان بازگشت دوباره یک کار به یک ماشین در حین فرایند تولید

O : مجموعه عملیات یکسان برای تمامی کارها که باید به‌صورت متوالی انجام شوند



شکل ۱- نمای شماتیک جریان کارگاهی دوباره وارد شونده (ریفی و همکاران، ۲۰۱۶)

پارامترها

pr_{jml} : زمان انجام کار j روی ماشین m در لایه l

s_{jml} : زمان راه اندازی ماشین m برای انجام کار j در لایه l

d_j : موعد تحویل کار j

B : عدد بزرگ مثبت

fc_{jp} : هزینه ثابت تخصیص کار j به تسهیل p

fc'_{jm} : هزینه هر واحد زمانی انجام کار j روی ماشین m

tpm_m^d و tpm_m^n : به ترتیب میانگین و انحراف از میانگین مدت زمان انجام تعمیرات پیشگیرانه روی ماشین m

t_m : زمان حمل و نقل بین ماشین $m-1$ و m

متغیرها

st_{ojmlp} : زمان آغاز فعالیت o از کار j روی ماشین m در لایه l در سایت تولیدی p

c_{ojmlp} : زمان تکمیل فعالیت o از کار j روی ماشین m در لایه l در سایت تولیدی p

c'_{ojmlp} : زمان تکمیل فعالیت o از کار j روی ماشین m در لایه l در سایت تولیدی p در صورت انجام تعمیرات

پیشگیرانه روی ماشین

tb_m : مدت زمان بین دو تعمیر پیشگیرانه متوالی

y_{ojmlt} : متغیر باینری نشان دهنده تخصیص عملیات o از کار j در لایه l به ماشین m در زمان t

x_{jp} : متغیر باینری نشان دهنده تخصیص کار j به سایت تولیدی p

$xx_{jz'p}$: متغیر باینری نشان دهنده انجام کار j بلافاصله قبل از کار z' در سایت تولیدی p انجام شود

$zx_{jz'p}$: متغیر باینری نشان دهنده انجام کار j قبل از کار z' در سایت تولیدی p انجام شود

$yx_{jj'mp}$: متغیر باینری نشان دهنده انجام تعمیرات پیشگیرانه بین دو کار j و j' روی ماشین m در سایت تولیدی p

Γ_0 : بودجه عدم قطعیت،

$Zf1_0, Rpf1_0, ysl_{ojmlp}, Zf1_0, Rpf1_0, ysl_{ojmlp}, Zf1_0, Rpf1_0, ysl_{ojmlp}, Zf1_0, Rpf1_0$: متغیرهای کمکی

در مدل قرین استوار برای نمایش عدم قطعیت در زمان انجام تعمیرات پیشگیرانه.

تابع هدف و محدودیت ها: در مدل ریاضی ارائه شده، سه تابع هدف به صورت توأم در نظر گرفته شده است که

عبارت اند از (روابط ۱ الی ۳):

$$\text{Min } C_{max} = \max_{j,m,l,p} \left(C_j = \max_{omlp} (C_{ojmlp}) \right) \quad (1)$$

$$\text{Min } UC = \sum_{p,j,l,m} fc'_{jm} \cdot (pr_{jml} + s_{jml}) \cdot x_{jp} + \sum_{j,p} fc_{jp} \cdot x_{jp} \quad (2)$$

$$\text{Min } \bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \max \{ (C_{jmlp} - td_j), 0 \} \quad (3)$$

تابع هدف (۱) زمان تکمیل آخرین کار را حداقل می‌کند. تابع هدف (۲) کل هزینه‌های تولید شامل هزینه‌های انجام فرایند و تخصیص کارها به هر ماشین را حداقل کند. تابع هدف (۳) نیز متوسط زمان دیرکردها را حداقل می‌کند. لازم به ذکر است که در مسأله جریان کارگاهی جایگشتی عمومی، حداقل کردن زمان تکمیل آخرین کار و جریان کارها در کارگاه هزینه‌های تولید را حداقل می‌کنند. این در حالی است که در مسأله جریان کارگاهی توزیع شده به دلیل در نظر گرفتن هزینه‌های راه‌اندازی در تسهیلات مختلف تولید و تصمیم‌گیری باتوجه به ارتقاء سطح استفاده از تسهیل و راه‌اندازی تسهیل جدید، دو معیار مذکور، هزینه‌های کل تولید را حداقل نمی‌کنند (لین و یینگ^{۴۷}، ۲۰۱۳).

$$\sum_p x_{jp} = 1 \quad \forall j \quad (4)$$

$$\sum_{j,l,o} y_{ojmlt} \leq 1 \quad \forall m,t \quad (5)$$

$$\sum_{m,l,o} y_{ojmlt} \leq 1 \quad \forall j,t \quad (6)$$

$$\sum_{o,m,l} y_{ojmlt} \leq x_{jp} \quad \forall j,t \quad (7)$$

$$St_{ojmlp} \geq 0 \quad \forall o,j,m,l,p \quad (8)$$

$$C'_{ojmlp} + st_{ojmlp} + pr_{jml} + s_{jml} + (y_{oimlt} - 1).B + (1 - yx_{jj'mp}).B \geq tb_m \quad \forall o,j,j',m,l,p \quad (9)$$

$$C'_{ojmlp} + st_{ojmlp} + pr_{jml} + s_{jml} + (y_{oimlt} - 1).B - yx_{jj'mp}.B \leq tb_m \quad \forall o,j,j',m,l,p \quad (10)$$

$$C'_{ojmlp} \geq C_{ojmlp} - \left[\frac{C_{ojmlp}}{tpm_m^n} \right] tpm_m^n + Zf_1 \times \Gamma_0 + Rpf_1 \quad \forall o,j,m,l,p \quad (11)$$

$$Zf_1 + Rpf_1 \geq tpm_m^d \times Ys1_{ojmlp} \quad \forall o,j,m,l,p \quad (12)$$

$$-Ys1_{ojmlp} \leq C_{ojmlp} \leq Ys1_{ojmlp} \quad \forall o,j,m,l,p \quad (13)$$

$$C'_{ojmlp} \leq C_{ojmlp} - \left[\frac{C_{ojmlp}}{tpm_m^n} \right] tpm_m^n + Zf_2 \times \Gamma_0 + Rpf_2 \quad \forall o,j,m,l,p \quad (14)$$

$$Zf_2 + Rpf_2 \geq tpm_m^d \times Ys2_{ojmlp} \quad \forall o,j,m,l,p \quad (15)$$

$$-Ys2_{ojmlp} \leq C_{ojmlp} \leq Ys2_{ojmlp} \quad \forall o,j,m,l,p \quad (16)$$

$$\left(\begin{array}{l} C_{ojmlp} - C_{oj'mlp} \\ + B \times (1 - \max(x_{jj'p}, z_{jj'p})) \end{array} \right) \geq \left(\begin{array}{l} St_{ojmlp} + pr_{jml} + s_{jml} + z_{jj'p} \times \Gamma_0 + Rpf_3 \\ + (y_{oimlt} - 1) \times B + yx_{jj'mp} \times tpm_m^n \end{array} \right) \quad \forall o,j,j',m,l,p \quad (17)$$

$$Zf_3 + Rpf_3 \geq tpm_m^d \times Ys3_{jj'mp} \quad \forall j,j',m,p \quad (18)$$

$$-Ys3_{jj'mp} \leq yx_{jj'mp} \leq Ys3_{jj'mp} \quad \forall j,j',m,p \quad (19)$$

$$\left(\begin{array}{l} C_{ojmlp} - C_{oj'mlp} \\ + B \cdot (\max(x_{jj'p}, z_{jj'p})) \end{array} \right) \geq \left(\begin{array}{l} St_{ojmlp} + pr_{jml} + s_{jml} + Zf_4 \times \Gamma_0 + Rpf_4 \\ + (y_{oimlt} - 1).B + yx_{jj'mp} tpm_m \end{array} \right) \quad \forall o,j,j',m,l,p \quad (20)$$

$$Zf_4 + Rpf_4 \geq tpm_m^d \times Ys4_{jj'mp} \quad \forall j,j',m,p \quad (21)$$

$$-Ys4_{jj'mp} \leq yx_{jj'mp} \leq Ys4_{jj'mp} \quad \forall j,j',m,p \quad (22)$$

$$yx_{jj'mp} \leq xx_{jj'p} \quad \forall j,j',m,p \quad (23)$$

$$zx_{jj'p} \geq xx_{jj'p} \quad \forall j,j',p \quad (24)$$

$$xx_{jjp} + xx_{j'jp} \leq 1 \quad \forall j, j', p \quad (25)$$

$$C_{ojmlp} \geq 0 \quad \forall o, j, m, l, p \quad (26)$$

$$C_{ojmlp} \leq st_{o,(j+1),mlp} \quad \forall m, l, p \quad (27)$$

$$St_{ojmlp} \geq C_{(o-1),jmlp} + t_m + (y_{oimlt} - 1).B \quad \forall j, m, l, p \quad (28)$$

محدودیت (۴) تضمین می کند هر کار تنها به یک تسهیل تولیدی تخصیص می یابد. محدودیت (۵) مقید می کند ماشین ها تک کاره هستند و هر ماشین در زمان t تنها یک کار را انجام می دهد. محدودیت (۶) نیز نشان می دهد در زمان t هر کار تنها روی یک ماشین انجام می شود. محدودیت (۷) وابستگی تخصیص عملیات به هر ماشین در صورت انتخاب آن را نشان می دهد. محدودیت (۸) آغاز هر کار بعد از زمان صفر را نشان می دهد. محدودیت های (۹) تا (۱۱) زمان انجام تعمیرات پیشگیرانه (مدت زمان دو تعمیر پیشگیرانه متوالی) را روی هر ماشین مشخص می کنند. در محدودیت (۱۱) عدم قطعیت زمان انجام تعمیرات پیشگیرانه با در نظر گرفتن بودجه عدم قطعیت لحاظ شده است. محدودیت های (۱۴) و (۱۵) به ترتیب نشان دهنده وابستگی بین انجام تعمیرات پیشگیرانه با انجام کار روی یک ماشین و توالی انجام کارهای تخصیص داده شده به یک ماشین است. محدودیت های (۱۷) و (۲۰) نشان می دهند زمان تکمیل عملیات o از کار z تابعی از زمان آغاز انجام یک کار، زمان آماده سازی، زمان انجام فرایند و زمان انجام تعمیرات پیشگیرانه است. محدودیت (۱۶) وضعیت انجام یک کار قبل از یک کار دیگر را نشان می دهد. محدودیت (۱۷) تضمین می کند زمان تکمیل عملیات o از کار z روی ماشین m در لایه l در سایت تولیدی p باید مخالف با صفر باشد. محدودیت (۱۸) اطمینان می دهد کار $z+1$ تنها زمانی می تواند روی ماشین m در سایت تولیدی p که فعالیت پیش نیاز آن انجام شده باشد. محدودیت (۱۹) اطمینان می دهد زمان آغاز عملیات o از کار z نمی تواند زودتر از زمان تکمیل عملیات قبل آن باشد. مجموعه محدودیت های خطی (۱۲)، (۱۳)، (۱۵)، (۱۶)، (۱۸)، (۱۹)، (۲۱) و (۲۲) نیز با توجه به مدل همتای (قرین) استوار مبتنی بر برنامه ریزی استوار بودجه ای (ارائه شده در پژوهش برتسیماس و سیم^{۴۸} (۲۰۰۴) برای لحاظ کردن عدم قطعیت در محدودیت های (۱۱)، (۱۴)، (۱۷) و (۲۰) زمان انجام تعمیرات پیشگیرانه مبتنی بر رویکرد بودجه بندی در نظر گرفته شده اند.

الگوریتم حل پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی

در این بخش، الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی جدیدی با توجه به ماهیت مسأله جریان کارگاهی که از نوع مسائل با پیچیدگی حل بالا بوده، ارائه شده است. الگوریتم ارائه شده مبتنی بر جستجوی همسایگی وسیع انطباق پذیر با اندازه جمعیت پویا و الگوریتم شبیه سازی تبرید است. در الگوریتم جستجوی همسایگی وسیع انطباق پذیر از مجموعه ای از روش های جدید برای تخریب و بازسازی جواب و فرایند سیستماتیک انتخاب، براساس سابقه عملکرد هریک از روش های تعمیر و تخریب استفاده شده است. فرایند تکرار پذیر جستجوی جواب مبتنی بر الگوریتم شبیه سازی تبرید

با دمای اولیه آغاز می‌شود و سپس این دما با نرخ مشخص کاهش خواهد یافت. نرخ تبرید کم باعث طولانی‌تر شدن فرایند جستجو و نرخ تبرید سریع باعث افزایش احتمال قرارگرفتن در دام بهینه محلی خواهد شد. شبه‌کد الگوریتم ترکیبی پیشنهادشده در شکل ۲ نمایش داده شده است.

نمایش جواب: هر جواب با ارائه‌ای دو بعدی نمایش داده خواهد شد و ابعاد آن در شکل ۳ نمایش داده شده است. با کدگشایی از این ساختار نمایش جواب مقادیر متغیرهای مربوط به تخصیص کارها به تسهیلات تولیدی و توالی عملیات کارها در هر تسهیل تعیین می‌شود. عملیات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه نیز مجموعه کار جدیدی است که در کنار کارهای اصلی تعریف می‌شود. این نحوه نمایش باعث تسهیل در در نظر گرفتن موقعیت اعمال تعمیر پیشگیرانه نسبت به دیگر کارها روی هر ماشین در هر سایت خواهد شد.

عملگرهای جستجوی همسایگی: با توجه به انتخاب الگوریتم جستجوی همسایگی سریع، با استفاده از دو عملگر تخریب و تعمیر به صورت متوالی، جستجو برای یافتن جواب‌های جدید مبتنی بر جواب در اختیار، انجام خواهد شد. در توسعه عملگرهای تخریب و تعمیر تلاش شده است تا با توجه به فضای جواب مسأله در حال بررسی، عملگرها به خوبی بتوانند در ایجاد تنوع و تمرکز در فرایند جستجوی جواب ایفای نقش کنند. در ادامه، این عملگرها و نحوه پیاده‌سازی آنها توضیح داده شده است.

عملگر تخریب: با اعمال عملگر تخریب N روی جواب نمونه بررسی شده، امکان توسعه جواب در راستای رسیدن به جواب جدید فراهم می‌شود. این در حالی است که در استفاده از این عملگر باید توجه شود که دو مفهوم تنوع و عمق‌بخشیدن به فضای جستجو به خوبی مدنظر قرار گیرد. عملگر تخریب روی بخش‌های مختلف جواب نظیر توالی انجام کارها و یا تخصیص کارها به تسهیلات تولید به تنهایی و یا هر دو بخش به صورت توأم اعمال‌شدنی است. در جدول ۱، تکنیک‌های استفاده شده برای چگونگی اعمال این عملگر ارائه شده است. اندازه دامنه تخریب در هر مرحله از الگوریتم جستجوی همسایگی وسیع انطباق‌پذیر با هدف تنوع‌بخشی در ابتدای فرایند جستجو و تمرکز در مراحل پایانی، متفاوت در نظر گرفته خواهد شد (رابطه ۲۹).

$$DR = DR_{start} - (DR_{start} - DR_{end}) \cdot \left(\frac{I_{current}}{I_{max}} \right) \quad (29)$$

عملگر تعمیر: عملگر تعمیر N^+ عملیات اصلاح جواب ناقص ایجادشده به وسیله عملگر تخریب را انجام می‌دهد. هدف از اعمال عملگر تعمیر عبارت از ایجاد بهبود در جواب‌های به دست آمده و ایجاد تنوع در آنها با هدف یافتن جواب‌های نامغلوب جدید است. برای این منظور از تکنیک‌های مختلفی در اعمال عملگر تعمیر روی جواب استفاده می‌شود (جدول ۲). مجموعه جواب‌های پارتو ذخیره شده در مجموعه آرشیو، نقش مهمی در پیاده‌سازی عملگر تعمیر دارند.

انتخاب عملگرهای تعمیر و تخریب مبتنی بر رویکردی سیستماتیک انطباق‌پذیر است؛ یعنی سابقه عملکرد هر عملگر انتخاب شده، در شانس انتخاب آن در مراحل آتی الگوریتم جستجو تأثیرگذار است. انتخاب عملگرها با استفاده از چرخه رولت انجام می‌شود (رابطه ۳۰). به روزرسانی وزن هریک از عملگرها نیز با توجه به مشارکت

عملگر در بهبود مقدار تابع هدف با استفاده از رابطه (۳۱) انجام خواهد شد. ضریب تعدیل λ نیز میزان وابستگی وزن جدید را به سابقه عملگر بررسی شده نشان می دهد. رابطه (۳۲) نشان دهنده وزن عملگر در پیاده سازی آن است و تابعی از کیفیت جواب جدید به دست آمده است. برای این منظور چهار حالت در نظر گرفته شده است که به ترتیب عبارت اند از: (۱) جواب جدید بهترین جواب موجود را مغلوب کند؛ (۲) جواب جدید، جواب قبلی را مغلوب کند؛ (۳) جواب جدید، جواب قبلی را مغلوب نکند؛ اما با توجه به معیار انتخاب متأثر از شبیه سازی تبرید پذیرفته شود؛ (۴) جواب جدید رد شود. در رابطه (۳۱)، شاخص میزان مشابهت جواب جدید با جواب موجود نیز در نظر گرفته شده است. تنوع جواب های ایجاد شده تأثیر زیادی بر کیفیت جواب نهایی و توانمندی فرایند جستجوی همسایگی خواهد داشت. با توجه به بررسی مسأله ای چندهدفه و مواجهه با چند معیار ارزیابی به صورت هم زمان، میزان مشابهت با استفاده از محاسبه شاخص مسافت اقلیدسی سه بعدی انجام خواهد شد (رابطه ۳۴).

$$\phi_k^- = \frac{w_k^-}{\sum_{n=1}^h w_n^-} \quad \forall k \in N^- \quad (30)$$

$$w_n^l = \lambda w_n^{l-1} + (1-\lambda) \cdot (\sigma_n^{l-1} + \vartheta_n^{l-1}) \quad \forall n \in N^- \quad (31)$$

$$\sigma = f(\omega_i) \quad \forall i = 1, \dots, 4, \quad \omega_1 \geq \omega_2 \geq \omega_3 \geq \omega_4 \quad (32)$$

$$di(x, x') = \sqrt{\sum_{i=1}^3 (f_i(x) - f_i(x'))^2} \quad (33)$$

$$\vartheta = \max \begin{cases} \varepsilon_1 & \text{If } di_{(x,x')} > \varpi \cdot \sum_{e=1}^E f_e(x) \\ \varepsilon_2 & \text{If } 0 < di_{(x,x')} \leq \varpi \cdot \sum_{e=1}^E f_e(x) \quad \varepsilon_1 \geq \varepsilon_2 \geq \varepsilon_3 \\ \varepsilon_3 & \text{If } di_{(x,x')} = 0 \end{cases} \quad (34)$$

یافته های پژوهش و تحلیل نتایج

در این بخش، نتایج تحلیل داده ها و یافته های پژوهش در قالب نتایج محاسباتی حل مدل ریاضی (توابع هدف و محدودیت های ۱ تا ۲۸) با هدف بررسی اثر عدم قطعیت بر عملکرد زمان بندی کارها در مسأله جریان کارگاهی جایگشتی با برگشت دوباره کارها ارائه شده است. برای این منظور، ۲۱ مسأله نمونه اصلی و الگوی تولید داده ها از مطالعات ریفی^۷ و همکاران (۲۰۱۶) به عنوان نزدیک ترین مسأله مشابه بررسی شده در ادبیات موضوع که در این مطالعه نیز توسعه یافته است، برداشت شده است (جداول ۳ و ۴).

- 1: Initialize feasible solution x
- 2: Set $x^* \leftarrow x$
- 3: Insert x to A
- 4: Initialize weights
- 5: While the stopping criteria is not reached do
- 6: Select a destroy n^- and n^+ heuristic based on the adaptive weights w_n^- and w_n^+
- 7: Repeat
- 8: Apply (n^-, n^+) to yield x'
- 9: If $(x'$ is better than $x^*)$ then
- 10: Set $x^* \leftarrow x'$
- 11: Else IF $\text{Random}(0,1) < e^{-\frac{\Delta F}{T}}$
- 12: Set $x^* \leftarrow x'$
- 13: End IF
- 14: If $(x'$ is non-dominant solution) then
- 15: Insert x' to A
- 16: End IF
- 17: If $(x'$ meets the acceptance criteria) then
- 18: Set $x'' \leftarrow x'$
- 19: End if
- 20: Randomly select x from (A, x'')
- 21: Until the system is frozen
- 22: Update w_n^- and w_n^+
- 23: Decrease the temperature according to the predefined pattern and set it as T
- 24: End while
- 25: Return x^*

شکل ۲- شبه کد الگوریتم ترکیبی جستجوی همسایگی وسیع انطباق‌پذیر و شبیه‌سازی تبرید

۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	شماره کارها
۲	۳	۱	۴	۱	۲	۳	۴	۴	۱	تسهیل تولید تخصیص داده شده
۲	۱	۳	۲	۲	۱	۲	۱	۳	۱	توالی عملیات

شکل ۳- نمایش جواب در الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی ارائه شده برای برنامه‌ریزی ۱۰ کار در ۴ سایت تولید به صورت نمونه

جدول ۱- الگوی عملگرهای تخریب و نحوه پیاده سازی آنها روی جواب نمونه بررسی شده

عملگر تخریب	نحوه پیاده سازی
تخریب تصادفی	<p>برای تنوع بخشی به فرایند جستجو، یک بخش از ساختار جواب به صورت تصادفی تخریب خواهد شد. این فرایند تصادفی نقش مؤثری در خارج شدن از بهینه محلی خواهد داشت. انواع حالات تخریب تصادفی عبارت اند از:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ مجموعه های غیرهمسایه از ژن های با اندازه تصادفی انتخاب می شوند. ▪ یک مجموعه از ژن های همسایه با اندازه تصادفی انتخاب می شود.
تخریب تسهیلات با ظرفیت آزاد	<p>در این راستا، تخصیص های در نظر گرفته شده برای تسهیل تولیدی با بیشترین ظرفیت آزاد از جواب حذف خواهند شد. هدف از این اقدام، تخصیص کارهای مربوط بدین تسهیلات به تسهیلات با ظرفیت آزاد کمتر و در نهایت بستن تسهیلاتی که سطح بالایی از ظرفیت آنها اشغال نشده است. با کاهش تعداد تسهیلات تولیدی، کل هزینه های راه اندازی نیز کاهش خواهد یافت.</p>
تخریب تسهیلات با ظرفیت مازاد	<p>رویکرد این روش تخریب نقطه مقابل تخریب تسهیل با ظرفیت آزاد است. در این روش تخریب بخش هایی از جواب حذف می شود که مرتبط با تخصیص کارها با بیشترین ظرفیت است. با اعمال تصادفی این روش تخریب و سپس تخصیص کارهای انتخاب شده به دیگر تسهیلات با ظرفیت آزاد در برنامه ریزی ظرفیت تسهیلات تسطیح رخ می دهد. هدف نهایی از این اقدام، کاهش کلی زمان تکمیل آخرین کار و هزینه های سربار تولید است.</p>
تخریب بر مبنای زمان تکمیل آخرین کار	<p>بخش بحرانی جواب با توجه به معیار زمان تکمیل آخرین کار از جواب با هدف برنامه ریزی بهتر در فرایند تعمیر، برداشته می شود. این اقدام به تمرکز بیشتر در فرایند جستجو منجر می شود.</p>
تخریب مبتنی بر دیرکرد	<p>این عملگر، بخشی از جواب را حذف می کند که بیشترین مقدار دیرکرد ناشی از زمان تکمیل زیاد و یا موعد تحویل بسیار نزدیک را دارد.</p>
تخریب مبتنی بر دیرکرد در آغاز کار	<p>این عملگر بخشی از جواب را که دارای بیشترین مدت زمان دیرکرد در آغاز شدن کار است، انتخاب و حذف می کند. مدت زمان دیرکرد در آغاز کار برابر است با مدت زمان سپری شده از ورود کار به موجودی بافر تا آغاز عملیات تولیدی روی آن. این اقدام در کاهش هزینه های موجودی در جریان ساخت در پی کاهش سطح موجودی های بافر تأثیرگذار است.</p>

جدول ۲- الگوی عملگرهای تخریب و نحوه پیاده سازی آنها روی جواب نمونه بررسی شده

عملگر تخریب	نحوه پیاده سازی
تعمیر تصادفی	<p>برای تنوع بخشیدن به فرایند جستجو در اعمال عملگر تعمیر، از رویکرد انتخاب تصادفی با شانس برابر برای هر یک از اعضای مجموعه آرشیو در فرایند تعمیر جواب تخریب شده استفاده می شود. انواع حالات تعمیر تصادفی عبارت اند از:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ مجموعه ژن های انتخاب شده با ترتیب تصادفی در محل اولیه خود قرار داده می شوند. ▪ مجموعه ژن های انتخاب شده با ترتیب معکوس در محل اولیه خود قرار داده می شوند. ▪ مجموعه ژن های انتخاب شده با ترتیب اولیه خود در محلی دیگر قرار داده می شوند. ▪ مجموعه ژن های انتخاب شده با ترتیب تصادفی در محلی دیگر قرار داده می شوند.
ترکیب مبتنی بر آرشیو با هدف حداقل کردن زمان تکمیل آخرین کار	<p>از میان جواب های حاضر در مجموعه آرشیو، جواب با کمترین میزان زمان تکمیل آخرین کار، مبنای وارد کردن بخش های جدا شده از جواب در فرایند تخریب و در نهایت تعمیر جواب جدید خواهد بود. تلاش برای کاهش زمان تکمیل کارها در راستای کاهش میزان دیرکرد نیز مفید است.</p>
ترکیب مبتنی بر آرشیو باهدف حداقل کردن هزینه کل	<p>در این حالت، عملیات تعمیر جواب تخریب شده مبتنی بر جواب انتخاب شده از مجموعه آرشیو با کمترین هزینه خواهد بود.</p>

برای نمایش سطوح متفاوت محافظه کاری تصمیم گیرنده، پنج سطح شامل ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد کل بودجه عدم قطعیت برای هریک از مسائل نمونه اصلی نمایش داده شده در جدول ۳، لحاظ شده است؛ در نتیجه، ۱۰۵ مسأله نمونه در مجموع بررسی شده است. دو سطح ۰ و ۱۰۰ درصد بودجه به ترتیب نشان دهنده قطعیت و عدم قطعیت کامل است. سطوح میانی نیز حد متوسطی از محافظه کاری تصمیم گیرنده را نشان می دهند. تنظیم تمامی پارامترهای الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی پیشنهادی با استفاده از روش طراحی آزمایش های تاگوچی انجام شده است و نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است.

نخست، کیفیت جواب های به دست آمده از الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم فرا ابتکاری ارائه شده برای مسأله مشابه در ادبیات موضوع (جستجوی همسایگی سریع انطباق پذیر)، براساس دو معیار ارزیابی متداول ارائه شده در ادبیات موضوع و پس از ۱۰ بار اجرای الگوریتم های حل مدنظر، بررسی شده است. این دو معیار ارزیابی به ترتیب عبارت اند از: متوسط تعداد جواب های پارتو به دست آمده در هر اجرای الگوریتم (معیار ۱) و متوسط نرخ جواب های پارتو به دست آمده بر حسب درصد به وسیله یک الگوریتم به طوری که با جواب های پارتو دیگر الگوریتم بررسی شده، مغلوب نشود (معیار ۲). زمان حل بر حسب ثانیه نیز سومین معیار ارزیابی عملکرد الگوریتم ها لحاظ شده است. نتایج مقایسه عملکرد الگوریتم فرا ابتکاری پیشنهادی با روش حل محدودیت اپسیلون آگمنت با نرم افزار بهینه سازی گمز حاکی از کارایی روش حل پیشنهادی از منظر زمان حل و عملکرد برابر آن در حل مسائل با ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ است (جدول ۶).

جدول ۳- مسائل نمونه

دسته	بعد مسأله ($n \times p$)	بودجه عدم قطعیت	مسأله نمونه
۱	(۴×۲)	(۰-۲۵-۵۰-۷۵-۱۰۰)	(۱-۵)
	(۴×۳)	(۰-۲۵-۵۰-۷۵-۱۰۰)	(۶-۱۰)
	(۴×۴)	(۰-۲۵-۵۰-۷۵-۱۰۰)	(۱۱-۱۵)
۲	(۶×۲)	(۰-۲۵-۵۰-۷۵-۱۰۰)	(۱۶-۲۰)
	(۶×۳)	(۰-۲۵-۵۰-۷۵-۱۰۰)	(۲۱-۲۵)
	(۶×۴)	(۰-۲۵-۵۰-۷۵-۱۰۰)	(۲۶-۳۰)
۳	(۸×۲)	(۰-۲۵-۵۰-۷۵-۱۰۰)	(۳۱-۳۵)
	(۸×۳)	(۰-۲۵-۵۰-۷۵-۱۰۰)	(۳۶-۴۰)
	(۸×۴)	(۰-۲۵-۵۰-۷۵-۱۰۰)	(۴۱-۴۵)
۴	(۱۰×۲)	(۰-۲۵-۵۰-۷۵-۱۰۰)	(۴۶-۵۰)
	(۱۰×۳)	(۰-۲۵-۵۰-۷۵-۱۰۰)	(۵۱-۵۵)
	(۱۰×۴)	(۰-۲۵-۵۰-۷۵-۱۰۰)	(۵۶-۶۰)
۵	(۱۲×۲)	(۰-۲۵-۵۰-۷۵-۱۰۰)	(۶۱-۶۵)
	(۱۲×۳)	(۰-۲۵-۵۰-۷۵-۱۰۰)	(۶۶-۷۰)
	(۱۲×۴)	(۰-۲۵-۵۰-۷۵-۱۰۰)	(۷۱-۷۵)
۶	(۱۴×۲)	(۰-۲۵-۵۰-۷۵-۱۰۰)	(۷۶-۸۰)
	(۱۴×۳)	(۰-۲۵-۵۰-۷۵-۱۰۰)	(۸۱-۸۵)
	(۱۴×۴)	(۰-۲۵-۵۰-۷۵-۱۰۰)	(۸۶-۹۰)
۷	(۱۶×۲)	(۰-۲۵-۵۰-۷۵-۱۰۰)	(۹۱-۹۵)
	(۱۶×۳)	(۰-۲۵-۵۰-۷۵-۱۰۰)	(۹۶-۱۰۰)
	(۱۶×۴)	(۰-۲۵-۵۰-۷۵-۱۰۰)	(۱۰۱-۱۰۵)

محدودیت زمان ۲۰ هزار ثانیه ای برای دریافت جواب از نرم افزار اعمال شده است. امکان دریافت نتایج مربوط به معیار ۱ از نرم افزار میسر نبوده و مقایسه بر مبنای معیارهای ۲ و ۳ انجام می شود. علاوه بر آن، نتایج به دست آمده نشان می دهد که با افزایش ابعاد مسأله، کارایی روش حل اپسیلون محدودیت آگمنت از نظر زمان به شدت کاهش می یابد. برتری کامل کیفیت جواب و زمان حل حاصل از پیاده سازی الگوریتم فرا ابتکاری چندهدفه پیشنهادی برای حل مسائل با ابعاد بزرگ نیز کاملاً مشهود است.

جدول ۴- محدوده تولید پارامترها

پارامتر	محدوده داده	پارامتر	محدوده داده
pr	U(1,99)	fc'	U(5,10)
S	U(1,99)	tpm^n	U(10,40)
d	U(20,2000)	tpm^d	U(1,5)
fc	U(1000;2000)	t	U(2,4)

جدول ۵- فاکتورهای طراحی برای تنظیم پارامترها

فاکتور طراحی	سطوح
تکرار الگوریتم جستجوی همسایگی سریع	(۱۰۰-۱۵۰-۲۰۰)
دمای اولیه	(۱۰۰-۱۵۰-۴۰۰)
بیشینه تعداد تکرار در هر دما	(۱۰-۲۰-۳۰)
حد بالای ضریب پایان جستجو در یک دما	(۱۰-۱۵-۲۰)
حد بالای ضریب انجماد	(۲۰-۳۰-۵۰)

جدول ۶- ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی

مسأله نمونه	اپسیلون محدودیت آگمنت			الگوریتم پیشنهادی		
	معیار ۱	معیار ۲	معیار ۳	معیار ۱	معیار ۲	معیار ۳
۱۵	-	۳۰/۱۳	۲۱۰/۰۶	۰/۴۱۲۹	۲۵/۹۵	۵۷/۱۲
۳۰	-	۲۸/۷۰	۱۰۸۳۲/۰۴	۰/۵۹۷۲	۲۸/۸۰	۱۵۲/۱۱
۴۵	-	۳۶/۱۵	۳۴۸۵/۹۳	۰/۶۵۴۳	۳۸/۱۰	۳۹۸/۰۶
۶۰	-	۳۱/۱۲	۱۷۵۷۸/۴۹	۰/۷۸۱۰	۳۶/۳۰	۱۲۰۰/۴۷
۷۵	-	-	-	۰/۵۱۱۴	۱۳/۸۰	۳۰۱۹/۱۸
۹۰	-	-	-	۰/۵۳۰۴	۱۱/۲۰	۵۶۳۱/۰۷
۱۰۵	-	-	-	۰/۵۷۱۳	۱۱/۸۳	۶۵۹۴/۲۹

نتایج ارائه شده در جدول ۷ نشان دهنده برتری الگوریتم فرا ابتکاری پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم فرا ابتکاری مبتنی بر جستجوی همسایگی وسیع انطباق پذیر دارد. در جدول ۷، با هدف ارزیابی عملکرد و کارایی روش حل پیشنهادی، مقایسه عملکرد بین الگوریتم های ارزیابی شونده تنها برای بزرگ ترین سایز مسأله در هر دسته از نظر ابعاد و بودجه عدم قطعیت (نمایش داده شده در جدول ۳) ارائه شده است. نتایج مقایسه حاکی از اثربخشی فرآیند جستجوی محلی توسعه داده شده در عمق بخشیدن به جستجو است. الگوریتم جستجوی همسایگی وسیع انطباق پذیر از نظر زمان جست و جو برتر از فرا ابتکاری ترکیبی پیشنهادی است؛ اگرچه این برتری خود متأثر از کیفیت کم جواب آن قرار خواهد گرفت. نتایج اعمال آزمون آماری برای سنجش برابری عملکرد دو الگوریتم ارزیابی شونده برای تمامی مقایسه های ممکن بین عملکرد دو الگوریتم، حاکی از اختلاف آماری معنادار در سطح اطمینان ۹۵

درصد است (جدول ۸). باتوجه به نرمال بودن داده‌ها، از آزمون t مستقل استفاده شده است. فرض صفر و فرض مقابل به ترتیب عبارت‌اند از عملکرد دو الگوریتم و برتری الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم مقایسه‌شده.

جدول ۷- ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی

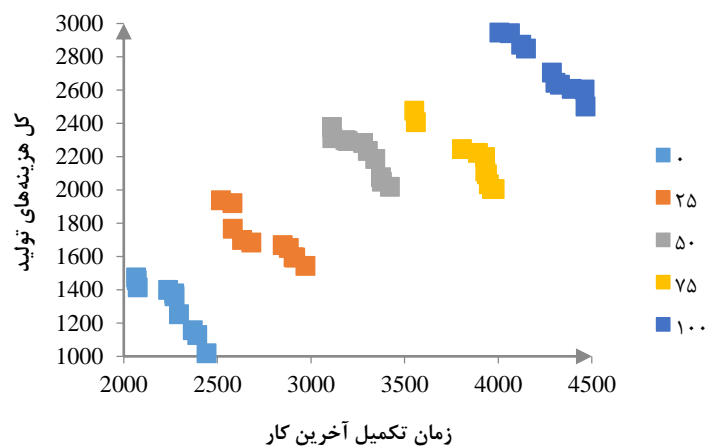
تعداد ماشین	الگوریتم مقایسه‌شده			الگوریتم پیشنهادی		
	معیار ۱	معیار ۲	معیار ۳	معیار ۱	معیار ۲	معیار ۳
۱۵	۰/۷۲۷۰	۳۹/۳۰	۷۲/۰۱	۰/۴۱۲۹	۲۵/۹۵	۵۷/۱۲
۳۰	۰/۶۹۹۱	۳۴/۴۳	۱۸۰/۲۳	۰/۵۹۷۲	۲۸/۸۰	۱۵۲/۱۱
۴۵	۰/۹۰۰۹	۴۸/۲۳	۴۷۹/۱۹	۰/۶۵۴۳	۳۸/۱۰	۳۹۸/۰۶
۶۰	۰/۹۲۰۷	۴۷/۱۳	۱۳۰۸/۲۱	۰/۷۸۱۰	۳۶/۳۰	۱۲۰۰/۴۷
۷۵	۰/۶۱۲۰	۱۸/۷۱	۳۳۹۲/۲۶	۰/۵۱۱۴	۱۳/۸۰	۳۰۱۹/۱۸
۹۰	۰/۶۵۲۳	۱۸/۰۱	۵۹۰۰/۷۴	۰/۵۳۰۴	۱۱/۲۰	۵۶۳۱/۰۷
۱۰۵	۰/۶۹۱۴	۱۵/۲۳	۶۸۰۱/۶۹	۰/۵۷۱۳	۱۱/۸۳	۶۵۹۴/۲۹

در شکل ۴، مجموعه نقاط پارتوی یافت‌شده برای بهینه‌سازی هم‌زمان، حداقل‌سازی زمان تکمیل آخرین کار و هزینه‌های کل زمان‌بندی برای پنج بودجه عدم قطعیت و بزرگ‌ترین مسأله نمونه در حال بررسی (مسائل ۱۰۵-۱۰۱) نشان داده شده است.

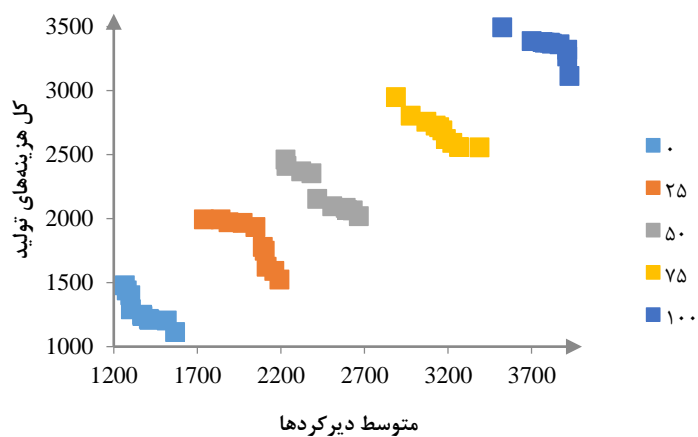
جدول ۸- ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی (آزمون t مستقل) در سطح معنادار بودن ۰/۰۵

مسأله نمونه	مقادیر p -value مقایسه دو الگوریتم از منظر		
	معیار ۱	معیار ۲	معیار ۳
۱-۱۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
۱۶-۳۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
۳۱-۴۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
۴۶-۶۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
۶۱-۷۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
۷۶-۹۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
۹۱-۱۰۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰

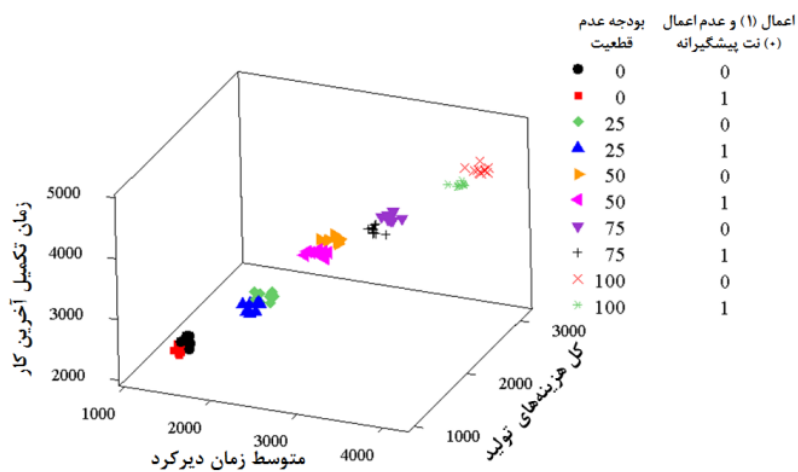
همان‌طور که مشاهده می‌شود، حداقل کردن زمان تکمیل آخرین کار لزوماً باعث کاهش هزینه‌ها نمی‌شود؛ این در حالی است که با افزایش بودجه عدم قطعیت، هزینه‌های کلی برنامه‌ریزی نیز افزایش می‌یابد. این موضوع حاکی از برنامه‌ریزی محافظه‌کارانه در برابر شدت یافتن عدم قطعیت است. از سوی دیگر، افزایش بودجه عدم قطعیت زمان تعمیر ماشین‌ها تأثیر منفی بر زمان تکمیل آخرین کار خواهد داشت؛ به‌طوری‌که در نتیجه آن زمان تکمیل آخرین کار کاهش می‌یابد (شکل ۴). در شکل ۵، افزایش هزینه‌ها در نتیجه کاهش متوسط کل دیرکردها برای بزرگ‌ترین مسأله نمونه مشاهده می‌شود. علاوه بر آن مشاهده می‌شود که با افزایش بودجه عدم قطعیت، هزینه انجام کارها و متوسط دیرکردها نیز افزایش یافته‌اند. در نهایت تأثیر اعمال کردن و نکردن برنامه‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بر عملکرد برنامه‌ریزی و زمان‌بندی انجام‌شده در شکل ۶ برای مسأله نمونه در ابعاد بزرگ مشاهده می‌شود. نتایج حاکی از اثرگذاری معنادار اعمال نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بر شاخص‌های عملکردی مدنظر به‌صورت معنادار است.



شکل ۴- جبهه جواب پارتو باتوجه به معیارهای ارزیابی زمان تکمیل آخرین کار و هزینه‌های کل برنامه‌ریزی برای بودجه‌های عدم قطعیت



شکل ۵- جبهه جواب پارتو باتوجه به معیارهای ارزیابی متوسط دیرکردها و هزینه‌های کل برنامه‌ریزی برای بودجه‌های عدم قطعیت



شکل ۶- ارزیابی اعمال کردن و نکردن سیاست نت پیشگیرانه

نتیجه گیری

در این مقاله مدل ریاضی جامعی برای مسأله برنامه‌ریزی جریان کارگاهی جایگشتی دوباره واردشونده توزیع شده با در نظر گرفتن برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و عدم قطعیت زمان انجام تعمیرات قرار گرفته است. در مدل ارائه شده سه تابع هدف حداقل کردن زمان تکمیل آخرین کار، هزینه‌های کل برنامه‌ریزی و متوسط زمان دیرکردها لحاظ شده است. با توجه به ماهیت توزیع شده مسأله بررسی شده، تصمیمات انتخاب تسهیلات تولید، تخصیص کارها به تسهیلات پراکنده توزیع و تعیین توالی انجام کارها به صورت هم‌زمان اتخاذ می‌شود. به دلیل فناوری سطح بالای ماشین آلات تولیدی و عدم قطعیت زیاد در زمان تعمیر آنها، عدم قطعیت مذکور با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی استوار بودجه‌ای برای نمایش سطوح مختلف عدم قطعیت استفاده شده است. با توجه به پیچیدگی‌های حل زیاد مدل ارائه شده، یک الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی جدید مبتنی بر جستجوی همسایگی وسیع انطباق‌پذیر و شبیه‌سازی تبرید ارائه شده است. نتایج حل حاکی از کارایی مدل ریاضی و روش حل ارائه شده برای مواجهه با پیچیدگی‌های مسأله در حال بررسی است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش سطح عدم قطعیت، سطح محافظه‌کاری تصمیمات ایجاد شده به نحو معناداری افزایش خواهد یافت. عملکرد الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم مشابه ارائه شده در ادبیات موضوع سنجیده شده و نتایج حاکی از کارایی روش حل پیشنهادی از نظر کیفیت جواب است. دلیل این برتری بهبود ایجاد شده در فرایند جستجوی محلی الگوریتم پیشنهادی به واسطه توسعه روش‌های تخریب و تعمیر جواب همسایگی است.

با توجه به اهمیت مقوله آماده‌سازی ماشین آلات و تأثیر آن در فرایند برنامه‌ریزی، در نظر گرفتن زمان آماده‌سازی وابسته به توالی عملیات اثربخشی تصمیمات را در دنیای واقعی ارتقاء می‌دهد. همچنین در نظر گرفتن دیگر پویایی‌های محیط تصمیم‌گیری همچون لیست کارهای پویا و امکان تغییر در مجموعه کارها و یا متفاوت بودن زمان حضور کارها در سیستم، یکی دیگر از زمینه‌های پژوهشی است که برای پژوهشگران پیشنهاد می‌شود. با توجه به پیچیدگی‌های زیاد حل مسأله برنامه‌ریزی جریان کارگاهی، توسعه روش حل کارآمد برای حل مسائل توسعه یافته در ابعاد بزرگ و ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی با توجه به معیارهای ارزیابی بسیار متنوع ارائه شده در ادبیات موضوع برای روش‌های حل فرا ابتکاری چندهدفه زمینه پژوهش دیگری است که معرفی می‌شود.

References

- Arnaut, J. P., & Rabadi, G. (2008). "Rescheduling of Unrelated Parallel Machines under Machine Breakdowns". *International Journal of Applied Management Science*, 1(1), 75–89.
- Bellman, R., & Ernest, R. (1982). *Mathematical Aspects of Scheduling and Applications*. Oxford: Pergamon Press.
- Bertsimas, D., & Sim, M. (2004). "The price of robustness". *Operations Research*, 52(1), 35-53.
- Bispo, C. F., & Tayur, S. (2001). "Managing Simple Re-Entrant Flow Lines: Theoretical Foundation and Experimental Results". *IIE Trans.*, 33(8), 609–623.
- Boudhar, M., & Meziani, N. (2010). "Two-Stage Hybrid Flow Shop with Recirculation". *Int. Trans. Oper. Res.*, 17(2), 239-255.

- Chamnanlor, C., Sethanan, K., Chien, C. F., & Gen, M. (2014). "Re-Entrant Flow Shop Scheduling Problem with Time Windows Using Hybrid Genetic Algorithm Based on Auto-Tuning Strategy". *Int. J. Prod. Res.*, 52(9), 2612-2629.
- Chan, F. T., Prakash, A., Ma, H., & Wong, C. (2013). "A Hybrid Tabu Sample-Sort Simulated Annealing Approach For Solving Distributed Scheduling Problem". *Int. J. Prod. Res.*, 51(9), 2602-2619.
- Chen, J. S. (2006). "A Branch and Bound Procedure For The Reentrant Permutation Flow-Shop Scheduling Problem". *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 29(11), 1186-1193.
- Chen, J. S., Pan, J. C. H., & Lin, C. M. (2009). "Solving The Reentrant Permutation Flow-Shop Scheduling Problem with A Hybrid Genetic Algorithm". *Int. J. Ind. Eng. Theory*, 16(1), 23-31.
- Chen, J. S., Pan, J. C. H., & Wu, C. K. (2008). "Hybrid Tabu Search For Re-Entrant Permutation Flow-Shop Scheduling Problem". *Expert Syst. Appl.*, 34(3), 1924-1930.
- Choi, H. S., Kim, H. W., Lee, D. H., Yoon, J., Yun, C. Y., & Chae, K. B. (2009). "Scheduling Algorithms For Two-Stage Reentrant Hybrid Flow Shops: Minimizing Makespan Under The Maximum Allowable Due Dates". *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 42(1), 963-997.
- Choi, H. S., Kim, J. S., & Lee, D. H. (2011). "Real-Time Scheduling For Reentrant Hybrid Flow Shops: A Decision Tree Based Mechanism And Its Application To A Tft-Lcd Line". *Expert Syst. Appl.*, 38(4), 3514-3521.
- Choi, S. W., & Kim, Y. D. (2008). "Minimizing Makespan on An M-Machine Re-Entrant Flowshop". *Comput. Oper. Res.*, 35(5), 1684-1696.
- Chu, F., Chu, C., & Desprez, C. (2010). "Series Production In A Basic Re-Entrant Shop To Minimize Makespan or Total Flow Time". *Comput. Ind. Eng.*, 58(2), 257-268.
- Dugardin, F., F. Yalaoui, & Amodeo, L. (2010). "New Multi-Objective Method To Solve Reentrant Hybrid Flow Shop Scheduling Problem". *Eur. J. Oper. Res.*, 203(1), 22-31.
- Ebrahimi, M., Fatemi Ghomi, S., & Karimi, B. (2014). "Hybrid Flow Shop Scheduling with Sequence Dependent Family Setup Time and Uncertain Due Dates". *Appl. Math. Modell.*, 38(9), 2490-2504.
- Eskandarpour, M., Nikbakhsh, E., & Zegordi, S. H. (2014). "Variable Neighborhood Search For The Bi-Objective Post-Sales Network Design Problem: A Fitness Landscape Analysis Approach". *Computers & Operations Research*, 52(2), 300-314.
- Gao, J., Chen, R., & Deng, W. (2013). "An Efficient Tabu Search Algorithm For The Distributed Permutation Flowshop Scheduling Problem". *Int. J. Prod. Res.*, 51(3), 641-651.
- Graves, S. C., Meal, H. C., Stefek, D., & Zeghmi, A. H. (1983). "Scheduling of Re-Entrant Flow Shops". *J. Oper. Manage.*, 3(4), 197-207.
- Gupta, A. K., & Sivakumar, A. I. (2006). "Job Shop Scheduling Techniques In Semiconductor Manufacturing". *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 27(11), 1163-1169.
- Hasani, A., Zegordi, S. H., & Nikbakhsh, E. (2014). "Robust Closed-Loop Global Supply Chain Network Design under Uncertainty: The Case of the Medical Device Industry". *International Journal of Production Research*, 50(16), 4649-4669.
- Huang, R. H., Yu, S. C., & Kuo, C. W. (2014). "Reentrant Two-Stage Multiprocessor Flow Shop Scheduling With Due Windows". *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 71(5), 1263-1276.
- Jeong, B., & Kim, Y. D. (2014). "Minimizing Total Tardiness In A Two-Machine Re-Entrant Flowshop with Sequence-Dependent Setup Times". *Comput. Oper. Res.*, 47(1), 72-80.
- Kaihara, T., Fujii, N., Tsujibe, A., & Nonaka, Y. (2010). "Proactive Maintenance Scheduling in a Re-Entrant Flow Shop Using Lagrangian Decomposition Coordination Method". *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, 59(1), 453-456.

- Kang, Y. H., Kim, S. S., & Shin, H. J. (2007). "A Scheduling Algorithm For The Reentrant Shop: An Application In Semiconductor Manufacture". *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 35(5), 566-574.
- Kasperski, A., Kurpisz, A., & Zieliński, P. (2012). "Approximating A Two-Machine Flow Shop Scheduling Under Discrete Scenario Uncertainty". *European Journal of Operational Research*, 217(1), 36-43.
- Katragjini, K., Vallada, E., & Ruiz, R. (2015). "Rescheduling Flowshops Under Simultaneous Disruptions". Paper presented at the 6th IESM Conference, Seville, Spain.
- Kopanos, G. M., Capon-Garcia, E., Espuna, A., & Puigjaner, L. (2008). "Costs For Rescheduling Actions: A Critical Issue For Reducing The Gap Between Scheduling Theory and Practice". *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 47(22), 8785-8795.
- Lin, D., Lee, C., & Ho, W. (2013). "Multi-Level Genetic Algorithm For The Resource-Constrained Re-Entrant Scheduling Problem in The Flow Shop". *Eng. Appl. Artif. Intell.*, 26(4), 1282-1290.
- Lin, D., & Lee, C. K. M. (2011). "A Review of The Research Methodology For The Re-Entrant Scheduling Problem". *Int. J. Prod. Res.*, 49(8), 2221-2242.
- Lin, D., & Lee, C. K. M. (2012). "A Multi-Level Ga Search With Application To The Resourceconstrained Re-Entrant Flow Shop Scheduling Problem. World Acad". *Sci. Eng. Technol.*, 64(4), 746-750.
- Lin, S. W., & Ying, K. C. (2013). "Minimizing Makespan and Total Flowtime In Permutation Flowshops By A Bi-Objective Multi-Start Simulated-Annealing Algorithm". *Computer and Operation Research*, 3(6), 1625-1647.
- Liu, C. H. (2010). "A Genetic Algorithm Based Approach For Scheduling of Jobs Containing Multiple Orders in a Three-Machine Flowshop". *Int. J. Prod. Res.*, 48(15), 4379-4396.
- Moon, C., Kim, J., & Hur, S. (2002). "Integrated Process Planning and Scheduling with Minimizing Total Tardiness In Multi-Plants Supply Chain". *Comput. Ind. Eng.*, 43(1), 331-349.
- Naderi, B., & Ruiz, R. (2010). "The Distributed Permutation Flowshop Scheduling Problem". *Comput. Oper. Res.*, 37(4), 754-768.
- Naderi, B., & Ruiz, R. (2014). "A Scatter Search Algorithm For The Distributed Permutation Flowshop scheduling problem". *European Journal of Operation Research*, 239(2), 323-334.
- Nikbakhsh, E., Eskandarpour, M., & Zegordi, S. H. (2012). "Designing A Robust Post-Sales Reverse Logistics Network". Paper presented at the Electrical Engineering and Intelligent System, Berlin.
- Pan, J. H., & Chen, J. S. (2003). "Minimizing Makespan In Re-Entrant Permutation Flow-Shops". *J. Oper. Res. Soc.*, 54(6), 642-653.
- Pinedo, M. (2008). "Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems". Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Rau, H., & Cho, K. H. (2009). "Genetic Algorithm Modeling For The Inspection Allocation In Reentrant Production Systems". *Expert Syst. Appl.*, 35(8), 11287-11295.
- Rifai, A. P., Nguyen, H. T., & Dawal, S. Z. M. (2016). "Multi-Objective Adaptive Large Neighborhood Search For Distributed Reentrant Permutation Flow Shop Scheduling". *Applied Soft Computing*, 40(1), 42-57.
- Ruiz, R., García-Díaz, J. C., & Maroto, C. (2007). "Considering Scheduling And Preventive Maintenance In The Flowshop Sequencing Problem". *Computers & Operations Research*, 34(11), 3314-3330.
- Sangsawang, C., Sethanan, K., Fujimoto, T., & Gen, M. (2015). "Metaheuristics Optimization Approaches For Two-Stage Reentrant Flexible Flow Shop With Blocking Constraint". *Expert Syst. Appl.*, 42(5), 2395-2410.

- Sun, Y., Zhang, C., Gao, L., & Wang, X. (2011). "Multi-Objective Optimization Algorithms For Flow Shop Scheduling Problem: A Review and Prospects". *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 55(5), 723-739.
- Uzsoy, R., Lee, C. Y., & Martin-Vega, L. A. (1992). "A Review of Production Planning and Scheduling Models In The Semiconductor Industry". *IIE Trans.*, 24(4), 47-60.
- Vargas-Villamil, F. D., & Rivera, D. E. (2001). "A Model Predictive Control Approach For Realtime Optimization of Reentrant Manufacturing Lines". *Comput. Ind.*, 45(1), 45-57.
- Xu, J., Yin, Y., Cheng, T. C. E., Wu, C. C., & Gu, S. (2014). "A Memetic Algorithm For The Re-Entrant Permutation Flowshop Scheduling Problem To Minimize The Makespan". *Applied Soft Computing*, 24(1), 277-283.
- Yang, D. L., Kuo, W. H., & Chern, M. S. (2008). "Multi-Family Scheduling in A Two-Machine Reentrant Flow Shop With Setups". *Eur. J. Oper. Res.*, 187(3), 1160-1170.
- Yenisey, M. M., & Yagmahan, B. (2014). "Multi-Objective Permutation Flow Shop Scheduling Problem: Literature Review, Classification and Current Trends". *Omega*, 45(1), 119-135.
- Ying, K. C., Lin, S. W., & Wan, S. Y. (2014). "Bi-Objective Reentrant Hybrid Flowshop Scheduling: An Iterated Pareto Greedy Algorithm". *Int. J. Prod. Res.*, 52(19), 1-13.

¹ Pinedo

² Vargas-Villamil & Rivera

³ Choi, Kim, & Lee

⁴ Bispo & Tayur

⁵ Xu, Yin, Cheng, Wu, & Gu

⁶ Lin, Lee, & Ho

⁷ Rifai, Nguyen, & Dawal

⁸ Gupta & Sivakumar

⁹ Ruiz, García-Díaz, & Maroto

¹⁰ Moon, Kim, & Hur

¹¹ Naderi & Ruiz

¹² Kasperski, Kurpisz, & Zieliński

¹³ Yenisey & Yagmahan

¹⁴ Graves

¹⁵ Pan & Chen

¹⁶ Chen, Pan, & Lin

¹⁷ Chen

¹⁸ Chen, Pan, & Wu

¹⁹ Chu, Chu, & Desprez

²⁰ Sun, Zhang, Gao, & Wang

²¹ Yang

²² Sangsawang, Sethanan, Fujimoto, & Gen

²³ Jeong & Kim

²⁴ Kaihara

²⁵ Huang

²⁶ Dugardin

²⁷ Ebrahimi, Fatemi Ghomi, & Karimi

²⁸ Arnaut & Rabadí

²⁹ Kopanos, Capon-Garcia, Espuna, & Puigjaner

³⁰ Katragjini, Vallada, & Ruiz

³¹ Hasani, Zegordi, Nikbakhsh

³² Liu

³³ Rau & Cho

³⁴ Lin & Lee

³⁵ Xu

- ³⁶ Ying
- ³⁷ Chamnanlor
- ³⁸ Chan, Prakash, Ma, & Wong
- ³⁹ Choi & Kim
- ⁴⁰ Gao
- ⁴¹ Lin
- ⁴² Choi
- ⁴³ Chu
- ⁴⁴ Boudhar & Meziani
- ⁴⁵ Bellman & Ernest
- ⁴⁶ Uzsoy
- ⁴⁷ Lin & Ying
- ⁴⁸ Bertsimas, D., & Sim