Research in Production and Operations Management
University of Isfahan E-ISSN: 2981-0329
Vol. 15, Issue 1, No. 36, Spring 2024
https://doi.org/10.22108/pom.2024.137960.1511

(Research paper)

Optimization Based on Simulation Studies of the Number of Machinery on the Workshop Production Scheduling Under Uncertainty Conditions and Space and Budget Constraints

Sadegh Shahbazi*
Industrial Engineering Department, Faculty of Management & Industrial Engineering, Malek Ashtar University & Technology, Esfahan, Iran, shahbazi@mut-es.ac.ir
Hossein Vahidy
Industrial Engineering Department, Faculty of Management & Industrial Engineering, Malek Ashtar University & Technology, Esfahan, Iran, drvahidy@mut-es.ac.ir

Purpose: There is a direct relationship between the number of machinery in any industrial problem, their costs of purchase, and the space they occupy. Accordingly, due considerations about the constraints are required in space and budget. Workshop production problems under uncertainty conditions including more than two pieces of machinery are regarded as NP-hard. Therefore, using common research in operation techniques, one cannot embark upon modelling and finding the optimal answer for such problems. Hence, this study aims to propose a conceptual mathematical model for the problem of industrial production. The research problem involves cost limitations while working out the solution through simulation studies.

Design/methodology/approach: First a mathematical model has been proposed for workshop production with cost and space constraints. Then by enlisting the help of Arena software, 14 simulation models have been designed for machine 'm' and work 'n' of different production sequences. Finally, by solving a numerical model example, the problem of nearing the optimal condition of the problem, considering minimizing the objective function of the tardiness and earliness costs, has been resolved. This measure has been adopted to determine the optimal number of

* Corresponding author, Orcid: 0000-0001-6790-0917 2981-0329/ © University of Isfahan
This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

machinery, considering work prioritization laws in work cells by executing the model and scatter search algorithm and designing relevant experiments.

Findings: Solving a numerical example considering the default number of machinery and the LPT optimization method resulted in the best answer when the total tardiness and earliness costs were intended. In contrast, in the case of increasing the number of machineries, both the LPT (longest process time) and CR (critical ratio) methods led to the best answers with the help of dispersed search algorithms in simulation studies. The results included the cost and space constraints.

Research implications: One of the prominent features of simulation is that with the minimum distance between the problem and the real world (not removing the limitations and complexities for solving the problem, which is usually done by removing the facts in other problem-solving methods, to reduce the complexity and the possibility of solving the problem) problem-solving and decision-making scenarios are applied. This helps managers in decision-making. Most of the time, the physical study of systems is very difficult and costly, or even impossible; therefore, an alternative model should be used to study the system.

Originality/value: A careful investigation of previous research and relevant literature reveals that none of the studies in the literature have simultaneously dealt with the problem of the number of machinery in conditions of cost and space limitations. Therefore, the present study incorporated the mentioned constraints in the scheduling problems and adopted simulation problem-solving methods. It resulted in delving and enriching the subject further.

Keywords: Optimization, Simulation, Workshop production, Scheduling, Machinery

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

پژوهش در مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۵، شماره ۱، پیاپی ۳۶، بهار ۱۴۰۳
دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۴ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۲ ص ۱۱۳-۱۳۶
https://doi.org/10.22108/pom.2024.137960.1511

(مقالهٔ پژوهشی)

بهینه‌سازی بر مبنای شبیه‌سازی تعداد ماشین‌آلات در مسئلهٔ زمان‌بندی تولید کارگاهی در شرایط عدم قطعیت و محدودیت بودجه و فضا

صادق شهبازی[1*]، حسین وحیدی[2]

۱- استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، مجتمع دانشگاهی مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران، shahbazi@mut-es.ac.ir
۲- استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، مجتمع دانشگاهی مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران، drvahidy@mut-es.ac.ir

چکیده: تعداد ماشین‌آلات در هر مسئله‌ای با هزینهٔ خرید و فضای مورد نیاز آنها ارتباط مستقیمی دارد و بنابراین با توجه به محدودیت بودجه و فضا، باید ملاحظات لازم انجام شود. مسئلهٔ تولید کارگاهی در حالت عدم قطعیت، با بیش از دو ماشین $NP\text{-}Hard$ به حساب می‌آید. بر این اساس با استفاده از تکنیک‌های معمولی تحقیق در عملیات، نمی‌توان به مدل‌سازی و یافتن جواب بهینه برای این مسئله اقدام کرد. در این تحقیق ابتدا مدل ریاضی مسئلهٔ تولید کارگاهی با محدودیت‌های فضا و هزینه بیان خواهد شد، سپس به کمک نرم‌افزار آرنا، ۱۴ مدل شبیه‌سازی برای m ماشین با n کار، که دارای توالی تولید مختلفی‌اند، طراحی می‌شود و درنهایت با حل یک مثال عددی، جواب نزدیک به بهینهٔ مسئله ازلحاظ حداقل‌کردن تابع هدف مجموع هزینهٔ دیرکرد و زودکرد به‌منظور تعیین تعداد بهینهٔ ماشین‌آلات، با در نظر گرفتن قوانین اولویت‌بندی کارها در سلول‌های کاری با اجرای مدل و الگوریتم جست‌وجوی پراکنشی و طراحی آزمایش‌ها بررسی می‌شود. با توجه به نتایج حاصل‌شده در حل مثال عددی، با در نظر گرفتن تعداد پیش‌فرض ماشین‌آلات، روش اولویت‌بندی LPT بهترین پاسخ را ازلحاظ مجموع هزینهٔ دیرکرد و زودکرد نتیجه می‌دهد؛ اما در صورت افزودن تعداد ماشین‌آلات، روش LPT و CR بهترین نتیجه را با کمک استفاده از الگوریتم جست‌وجوی پراکنده در شبیه‌سازی به ما خواهند داد که در این نتایج محدودیت‌های هزینه و فضا نیز رعایت شده است.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، شبیه‌سازی، تولید کارگاهی، زمان‌بندی، ماشین‌آلات

* نویسنده مسئول، Orcid: 0000-0001-6790-0917

2981-0329/ © University of Isfahan
This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

۱- مقدمه

مسئلهٔ تولید کارگاهی نوعی از مسائل توالی عملیات است که در آن کارها از ماشین‌های مشخص، ولی متمایز عبور می‌کنند. به عبارت دیگر، در این مسئله هر کاری که وارد سیستم می‌شود، باید ماشین‌های مشخص و از پیش تعیین شده‌ای را ملاقات کند و این ترتیب برای کارهای مختلف، با هم فرق می‌کند (پیندو[۱]، ۲۰۱۲). با نگاهی عمیق‌تر به سیستم تولید کارگاهی، متوجه می‌شویم که پویایی و عدم قطعیت از ویژگی‌های بارز این نوع سیستم تولید است. برای مقایسه باید اختلاف بین تولید کارگاهی را با روش خط تولید مقایسه کرد. در روش خط تولید، یکسری از محصولات با ترتیب مشخص و یکسان و به‌صورت انبوه تولید می‌شوند، به‌طوری که در بیشتر موارد حتی برای تولید محصولات جدید، به دریافت سفارش نیاز نیست و محصولات تولیدشده در انبار برای پاسخ به تقاضاهای آتی ذخیره می‌شوند که به این حالت، تولید برای ذخیره گفته می‌شود. در حالی که در سیستم‌های تولید کارگاهی، بیشتر با تولید محصولاتی مواجهیم که حالت پروژه‌ای دارند و هر محصول باید فرآیندهای منحصر به خود را برای تولید طی کند. به‌علاوه در بیشتر مواقع بعد از سفارش محصول جدید، اقدام به تولید آن در چنین سیستم‌هایی می‌شود (تولید برای سفارش).

از این رو مسئله ازلحاظ نوع داده‌های در دسترس، به دو دستهٔ قطعی و احتمالی و براساس ماهیت سیستم تولیدی، به دو دستهٔ ایستا و پویا تقسیم می‌شود. در صورتی که زمان ورود کارها و زمان‌های پردازش کاملاً معلوم باشد، مسئله دارای حالت قطعی و در غیر این صورت، احتمالی خواهد بود. به‌علاوه با توجه به در دسترس بودن کارها در ابتدای مسئله یا ورود تدریجی کارهای جدید در طول فرآیند، مسئله به دو دستهٔ ایستا و پویا تقسیم می‌شود.

تعیین بهینهٔ توالی کارها در تولید کارگاهی کسب و کارهای کوچک و متوسط، در بهره‌وری ماشین‌آلات، هزینه‌های مربوط به دیرکرد و زودکرد تحویل کارها تأثیرگذار است. برخلاف دیگر روش‌های بهینه‌سازی، در شبیه‌سازی به ایجاد یک مدل ریاضی دقیق نیازی نیست، بلکه با یک مدل مفهومی ریاضی به نتایج مطلوبی دست می‌یابیم و این کار، حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده را در صورتی تسهیل می‌کند که بتوان آن را به مدل شبیه‌سازی‌شده تبدیل کرد (سجادی و شهبازی[۲]، ۲۰۱۷).

در مسئلهٔ زمان‌بندی تک‌ماشین، با تولید دسته‌ای و خرابی تصادفی ماشین با تابع هدف مسئله، حداقل‌سازی مجموع حداکثر زودکرد و حداکثر دیرکرد مورد انتظار کارها، برای حل این مسئله از مدل‌سازی مسئلهٔ زمان‌بندی تک‌ماشین با تولید دسته‌ای و خرابی تصادفی و حل آن به‌وسیلهٔ روش شاخه و کران استفاده شده است (ملایی و همکاران[۳]، ۲۰۲۲).

دربارهٔ مسئلهٔ زمان‌بندی تولید کارگاهی، برای بهینه‌سازی شاخص‌های عملکردی مانند حداقل‌کردن دیرکرد انجام کارها، بهره‌وری تجهیزات و ... یکی از موضوعات مهمی که معمولاً سازمان‌ها و صنایع مطرح می‌کنند، بررسی تعیین تعداد بهینهٔ تجهیزات با در نظر گرفتن محدودیت فضا و بودجه است؛ زیرا بررسی می‌شود که آیا علاوه بر بحث توالی انجام کارها برای انجام به‌وسیلهٔ تجهیزات، می‌توان با بهینه‌سازی تعداد تجهیزات، میزان شاخص‌های عملکردی را بهبود داد؟ در بررسی‌هایی که پژوهشگر برای پاسخ به این سؤال انجام داده است، نشان می‌دهد

تحقیقات گذشته (در پیشینهٔ پژوهش این مقاله بیان شده است) بیشتر بر قوانین زمان‌بندی تأکید داشته و به‌صورت ترکیبی این موضوع را بررسی نکرده‌اند.

با توجه به اهمیت موضوع، تعیین تعداد بهینهٔ ماشین‌آلات در حالت محدودیت بودجه، محدودیت فضا و همچنین وابستگی تعیین تعداد بهینهٔ ماشین‌آلات به زمان‌بندی کارها بر ماشین‌آلات در شرایط عدم قطعیت در زمان ورود کارها، احتمالی‌بودن مدت‌زمان انجام عملیات در هر سلول کاری، امکان ازکارافتادگی ماشین‌آلات و همچنین احتمال نیاز به دوباره‌کاری قطعات، امکان حل مسئله با کمک مدل‌سازی ریاضی بسیار پیچیده و حتی امکان‌ناپذیر است؛ بنابراین در این مقاله سعی شده است با استفاده از به‌کارگیری الگوریتم فراابتکاری جست‌وجوی پراکنده در شبیه‌سازی و همچنین با به‌کارگیری قوانین اولویت‌دهی کارها، مدلی ارائه داد که در شرایط عدم قطعیت (ورود تصادفی، زمان فرایند احتمالی و احتمال خرابی) و مشخص‌بودن زمان تحویل و جابه‌جایی و همچنین با توجه به محدودیت فضا و بودجه، جواب نزدیک به بهینه ازلحاظ تعداد بهینهٔ ماشین‌آلات را برای مسئلهٔ تولید کارگاهی، با هدف حداقل‌کردن مجموع هزینهٔ دیرکرد و زودکرد استخراج کرد.

۲- مبانی نظری و پیشینهٔ پژوهش

مسئلهٔ تولید کارگاهی در حالت قطعی و ایستا، با بیش از دو ماشین NP-Hard به حساب می‌آید (پیندو، ۲۰۱۲) و واردکردن عوامل ایجاد عدم قطعیت بر پیچیدگی مسئله می‌افزاید. بر این اساس، با استفاده از تکنیک‌های معمولی تحقیق در عملیات، نمی‌توان به مدل‌سازی و یافتن جواب بهینه برای این مسئله اقدام کرد. بیشتر مسائلی که در این زمینه مدل‌سازی شده‌اند، با استفاده از فرض‌های محدودکننده، به ساده‌سازی مسئله اقدام کرده‌اند که این امر باعث فاصله‌گرفتن از حالات واقعی می‌شود (ویرا و همکاران[۴]، ۲۰۰۰). روش‌های حل مسائل تولید کارگاهی به دستهٔ تکنیک‌های ریاضی و تقریب‌زنی تقسیم می‌شود (جین و میران[۵]، ۱۹۹۹). تکنیک‌های ریاضی جذابیت فراوانی در فرموله‌کردن و حل مسائل تولید کارگاهی دارند؛ با این حال این روش‌ها کارایی خود را در مسائل بزرگ‌مقیاس از دست می‌دهند. تکنیک‌های تقریب‌زنی روش‌های مناسبی برای حل مسائل تولید کارگاهی با کیفیت جواب پذیرفتنی و در زمان مناسب‌اند، ولی رسیدن به جواب بهینه را تضمین نمی‌کنند. دربارهٔ این مسئله از شبیه‌سازی استفاده می‌شود. گفتنی است که با شبیه‌سازی، سیستم با تمام پویایی‌هایش در نظر گرفته می‌شود، ولی این روش به‌تنهایی متدی برای رسیدن به جواب بهینه نیست (بانکز و نلسون[۶]، ۲۰۱۰). شبیه‌سازی درواقع رویکردی برای تحلیل حساسیت سیستم و مقایسهٔ بین راه‌حل‌های ممکن است. افزایش قدرت محاسباتی رایانه‌های امروزی، سبب شده است تا انجام این کار برای مسائل پیچیده‌تر و با تکرارهای زیاد امکان‌پذیر باشد. تعیین پارامترهای کنترلی مناسب برای مدل شبیه‌سازی‌شده، به بهبود عملکرد سیستم و رسیدن به جواب بهینه منجر می‌شود. برای این منظور با ترکیب روش‌های بهینه‌سازی با شبیه‌سازی، در عین در نظر گرفتن پویایی مدل، جواب مناسبی برای آن تولید می‌شود. روش‌های بهینه‌سازی براساس شبیه‌سازی به جای آنکه بر فرمول یا گراف تمرکز کنند، بر شیء تمرکز می‌کنند و می‌کوشند مسئله را از این طریق بهینه کنند. این روش حل مسئله، علاوه بر انعطاف‌پذیری بالا، دقت زیادی هم دارد.

مهم‌ترین پارامتر تغییردادنی در بهینه‌سازی مسائل زمان‌بندی براساس شیء، چگونگی اولویت‌دهی به کارها در صف ماشین‌هاست. در این روش جواب قطعی بهینه برای مسئله به دست نمی‌آید، ولی سیاست مناسبی برای اولویت‌دادن به کارها در پشت صف ماشین‌ها پیشنهاد می‌شود. در مرجع (بلک استون و همکاران[۷]، ۱۹۸۲) قوانین پیشنهادشده برای اولویت‌دهی به کارها در پشت صف ماشین‌ها، برای سیستم تولید کارگاهی بررسی و طبقه‌بندی و با استفاده از شبیه‌سازی، حالت‌های موجود برای سیستم ارزیابی شده است. این مقاله جزء اولین مقالات در زمینهٔ طبقه‌بندی قوانین اولویت‌دهی به کارهاست. در سال‌های اخیر مقالات زیادی در این زمینه ارائه شده است؛ برای مثال در آثار چان و همکاران[۸] (۲۰۰۳) و ونگ و رن[۹] (۲۰۰۶)، روش‌های جدیدتری برای این کار پیشنهاد شده است. روش‌های به کار گرفته شده برای بهینه‌سازی، براساس شبیه‌سازی به پنج دسته روش‌های جست‌وجوی شیب، تقریبی تصادفی، بهینه‌سازی مسیر نمونه، متد پاسخ سطح و روش‌های ابتکاری و فراابتکاری تقسیم می‌شوند (آزادیور[۱۰]، ۱۹۹۹).

با ترکیب شبیه‌سازی، قوانین اولویت‌دهی و روش‌های جست‌وجوی تصادفی، جواب مناسبی برای سیستم تولیدی به دست می‌آید؛ به این صورت که پس از مدل‌سازی سیستم با شبیه‌سازی، یک بردار کنترلی برای مسئله تعریف می‌شود که این بردار به‌صورت تصادفی تولید و به‌عنوان متغیر کنترلی به شبیه‌سازی داده و نتایج حاصل از آن مقدار تابع هدف مسئله در نظر گرفته می‌شود؛ سپس با کمک روش‌های جست‌وجو، تغییراتی در این بردار ایجاد و سعی می‌شود نتایج مناسب‌تری برای مسئله حاصل شود.

در این زمینه در اثر کلمت و همکاران[۱۱] (۲۰۰۹) با ترکیب شبیه‌سازی با روش‌های جست‌وجوی محلی، ازجمله قبول آستانه‌ای، شبیه‌سازی تبریدی، جست‌وجوی حریصانه و دیگر الگوریتم‌ها، اقدام به اولویت‌دهی به کارها در یک سیستم دارای زمان، آماده‌سازی شده است.

دوآمارال و همکاران[۱۲] (۲۰۲۲) در مقاله‌ای با عنوان «بهینه‌سازی شبیه‌سازی مبتنی بر متامدل: مروری بر ادبیات سیستماتیک»، با بررسی شکاف‌ها، فرصت‌ها و چشم‌اندازهای آینده، که در طول توسعهٔ این تحقیق پیدا شده است، نشان می‌دهند که این حوزهٔ تحقیقاتی در ۱۵ سال گذشته، در حال رشد بوده و توانسته است با تحلیل سناریوهای تصمیم‌گیری، کمک‌های شایانی به مدیریت بکند.

سجادی و شهبازی (۲۰۱۷) در تحقیقی با عنوان «بهینه‌سازی مبتنی بر مبنای شبیه‌سازی مسئلهٔ زمان‌بندی تولید کارگاهی در کسب‌وکارهای کوچک و متوسط با رویکرد نظام‌های صف با هدف کاهش هزینهٔ زودکرد و دیرکرد فعالیت‌ها»، پس از ارائهٔ یک مدل ریاضی و حل آن با کمک شبیه‌سازی، به این نتیجه دست یافتند که برخلاف دیگر روش‌های بهینه‌سازی، در شبیه‌سازی به ایجاد یک مدل ریاضی دقیق نیازی نیست، بلکه با یک مدل مفهومی ریاضی به نتایج مطلوبی دست می‌یابیم و این کار، حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده را در صورتی تسهیل می‌کند که بتوان آن را به مدل شبیه‌سازی‌شده تبدیل کرد.

شهبازی و همکاران[۱۳] (۲۰۱۷) در پژوهشی، یک مدل بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی را برای مدیریت و زمان‌بندی پروژه‌های توسعهٔ محصول جدید در مراکز تحقیق و توسعه ارئه دادند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد روش اولویت‌دهی به فعالیت‌ها، با کمک FCFS دارای بیشترین مقدار تابع هدف (سود زودکرد منهای هزینهٔ دیرکرد) است و تفاوت معنی‌داری با دیگر روش‌ها دارد. پس از استخراج بهترین روش، سناریوهای مختلف مربوط

به تعداد منابع در ایستگاه‌های کاری که زمان انتظار طولانی داشتند، تحلیل شد. این امر نشان می‌دهد دوبرابرکردن تعداد منابع در این ایستگاه‌ها، موجب بهبود تابع هدف و مثبت‌کردن آن می‌شود.

دمیر و اردن[۱۴] (۲۰۲۰) از دو روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها، برای حل مسئلهٔ برنامه‌ریزی و زمان‌بندی برای کارهایی که به‌صورت تصادفی و با تاریخ تحویل مشخص به کارگاه می‌رسند، با هدف به حداقل رساندن زودکرد و دیرکرد کارها استفاده کرده‌اند. نتیجه نشان داد الگوریتم کلونی مورچه‌ها بهتر از الگوریتم ژنتیک عمل می‌کند. علاوه بر این، پیشنهاد شده است که رویکردهای یکپارچه کارایی بیشتری را نسبت‌به رویکردهای فردی فراهم می‌کنند.

آیاسی و همکاران[۱۵] (۲۰۲۰) در مقاله‌ای با عنوان «طراحی یک مدل بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی چند هدفهٔ تصادفی به‌منظور برنامه‌ریزی فروش و عملیات در حالت تولید مبتنی بر سفارش»، با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی، یک مدل چند هدفه را طراحی و فضای شدنی راه‌حل‌ها را برای مقادیر نزدیک به بهینه، به‌منظور مدیریت و کنترل سطح موجودی و نسبت انعطاف‌پذیری در ساختارهای فروش و عرضه، بررسی کرده‌اند.

ملایی و همکاران (۲۰۲۲) مسئلهٔ زمان‌بندی تک‌ماشین را با تولید دسته‌ای و خرابی تصادفی ماشین بررسی کرده اند. در این مسئله هر کار متعلق به یک خانوادهٔ کار است و هر خانوادهٔ کار، زمان آماده‌سازی معلوم و مستقل از توالی دارد. همچنین فرض می‌شود یک خرابی ماشین در طول افق برنامه‌ریزی اتفاق می‌افتد و زمان شروع و طول تصادفی، توزیع احتمال دلخواه و از قبل مشخص دارد. تابع هدف مسئلهٔ حداقل‌سازی مجموع حداکثر زودکرد و حداکثر دیرکرد مورد انتظار کارهاست. برای حل این مسئله از مدل‌سازی مسئلهٔ زمان‌بندی تک‌ماشین با تولید دسته‌ای و خرابی تصادفی و حل آن به‌وسیلهٔ روش شاخه و کران استفاده شده است.

آکل و همکاران[۱۶] (۲۰۲۲) در مقاله‌ای با عنوان «بهینه‌سازی هم‌زمان برنامه‌ریزی استراتژیک نیروی انسانی و برنامه‌ریزی نگه‌داری پیشگیرانه: رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی»، یک چارچوب شبیه‌سازی-بهینه‌سازی را پیشنهاد می‌کنند که در آن یک سیستم نگهداری از دارایی‌های با ارزش بالا ازطریق مدل شبیه‌سازی رویداد گسسته در مقیاس بزرگ مدل‌سازی می‌شود.

احمدیان و همکاران[۱۷] (۲۰۲۱) دربارهٔ مسئلهٔ تولید به‌موقع (JIT) در حالت مسئلهٔ زمان‌بندی کارگاهی که در آن هر عملیات یک سررسید مشخص دارد و هرگونه انحراف از زمان اتمام عملیات از سررسید آن، مستلزم جریمهٔ زودهنگام یا تأخیر است، یک الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر (VNS) را برای حل JIT-JSS ارائه دادند.

امیرخانی و همکاران[۱۸] (۲۰۱۷) در مقاله‌ای با عنوان «رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی برای یافتن توالی بهینه در مسئلهٔ پویای تولید کارگاهی دارای خرابی و دوباره‌کاری»، ادغام شبیه‌سازی و الگوریتم ژنتیک رویکردی را پیشنهاد کردند تا بتوان از آن در هر مسئلهٔ تولید کارگاهی استفاده کرد که قابلیت مدل‌شدن با شبیه‌سازی را داشته باشد. در رویکرد پیشنهادی برای در نظر گرفتن محدودیت‌های مسئله، از مدل شبیه‌سازی و برای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود.

در مرجع (طالبی و غزالی[۱۹]، ۲۰۰۹) الگوریتم‌های فراابتکاری از الگوریتم‌های تصادفی‌اند که برای یافتن پاسخ بهینه به کار می‌روند. روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی به دو دستهٔ الگوریتم‌های دقیق و الگوریتم‌های تقریبی تقسیم‌بندی می‌شوند. ازنظر دوکراوغلو و همکاران[۲۰] (۲۰۱۹)، الگوریتم‌های دقیق قادر به یافتن جواب بهینه

به‌صورت دقیق‌اند، اما دربارهٔ مسائل بهینه‌سازی سخت، کارایی کافی را ندارند و زمان اجرای آنها متناسب با ابعاد مسائل به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. الگوریتم‌های تقریبی قادر به یافتن جواب‌های خوب (نزدیک به بهینه) در زمان حل کوتاه برای مسائل بهینه‌سازی سخت‌اند. دو مشکل اصلی الگوریتم‌های ابتکاری، گیرافتادن آنها در نقاط بهینهٔ محلی، همگرایی زودرس به این نقاط است. الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مشکلات الگوریتم‌های ابتکاری ارائه شده‌اند. درواقع الگوریتم‌های فراابتکاری، یکی از انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی تقریبی‌اند که دارای راهکارهای برون‌رفت از نقاط بهینهٔ محلی‌اند و قابلیت کاربرد در طیف گسترده‌ای از مسائل را دارند. الگوریتم جست‌وجوی پراکنده یکی از این روش‌هاست.

در مرجع (نادری و رویز[۲۱]، ۲۰۱۴) جست‌وجوی پراکنشی یک الگوریتم فراابتکاری تکاملی مبتنی بر جمعیت است که از مجموعه جواب‌های مرجع استفاده می‌کند و با ترکیب آنها، جواب‌های جدیدی می‌سازد. این روش با ساخت یک جمعیت اولیه به نام Pop شروع می‌کند. این جمعیت اولیه باید معیارهای تنوع و کیفیت را برآورده کند؛ سپس با استفاده از جواب‌های خوب جمعیت اولیه، یک مجموعه مرجع (RefSet) با اندازهٔ متوسط ساخته می‌شود. جواب‌های انتخاب‌شده از جمعیت اولیه با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا جواب‌هایی برای شروع بهبود در یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر جمعیت ایجاد کنند. در این روش، مجموعهٔ مرجع و همچنین جمعیت جواب‌ها به‌روزرسانی می‌شوند تا همواره دارای کیفیت بالا و تنوع کافی باشند.

همان‌طور که در تحقیقات فوق مشاهده شد، هیچ‌کدام از تحقیقات هم‌زمان با مسئلهٔ زمان‌بندی، تعداد بهینهٔ ماشین‌آلات را در حالتی بررسی نکرده‌اند که در آنها با محدودیت فضا و بودجه روبه‌روییم؛ بنابراین تحقیق حاضر، موضوع مذکور را با اضافه‌کردن محدودیت‌های ذکرشده در مسئلهٔ زمان‌بندی، با روش حل شبیه‌سازی بررسی و تحلیل کرد.

۳- روش‌شناسی پژوهش

۳-۱ مدل مفهومی ریاضی

مدل ریاضی (برنامه‌نویسی ترکیبی عدد صحیح و غیرخطی) به‌منظور شناسایی بیشتر مسئله و همچنین استفاده از آن برای حل مسائل ارائه می‌شود. در حالت کلی ما مسئلهٔ زمان‌بندی تولید کارگاهی احتمالی را به‌صورت زیر مدل‌سازی می‌کنیم. این مساله دارای m ماشین و n کار است. هر کار شامل یک توالی از عملیات‌ها $O_{j,h}, h=1,2,...,h_j$ است که $O_{j,h}$ نشان‌دهندهٔ عملیات h از کار jام و h_j نشان‌دهندهٔ تعداد عملیات‌های مورد نیاز کار jام است. مجموعهٔ ماشین با $M=\{M_1;M_2,...,M_m\}$ نمایش داده می‌شود. اندیس i نشان‌دهندهٔ ماشین و اندیس j نشان‌دهندهٔ کار است و اندیس h برای عملیات به کار می‌رود. برای اجرای عملیاتh از کار jکه به‌صورت $O_{j,h}$ نشان داده می‌شود، یک ماشین اختصاص داده شده است که توانایی انجام آن عملیات را دارد. انجام عملیات $O_{j,h}$ دارای زمان پردازش مشخصی به‌صورت $P_{j,h}$ است که دارای توزیع مشخص خود است (برای مثال توزیع نرمال با میانگین $\mu_{j,h}$و انحراف معیار $\sigma_{j,h}$). ماشین اختصاص‌یافته به هر عملیات با استفاده از متغیر صفر و یک $y_{i,j,h}$ تعریف می‌شود. متغیر $y_{i,j,h}$ در صورتی که مقدار یک را داشته باشد، به این معنی است که ماشین i توانایی

انجام عملیات $O_{j,h}$ را دارد. برای در نظر گرفتن مسئلهٔ توالی، برای هر ماشین سری نوبت در نظر گرفته می‌شود. به هریک از عملیات‌های اختصاص‌یافته به یک ماشین یک نوبت اختصاص داده می‌شود. این نوبت‌ها توالی انجام عملیات‌ها ر ابا آن ماشین مشخص می‌کند. برای این منظور از متغیر صفر و یک $x_{i,j,h,k}$ استفاده می‌کنیم. در صورتی که این متغیر ارزش ۱ داشته باشد، این معنی را می‌رساند که عملیات $O_{j,h}$ بر ماشین i در نوبتk انجام می‌شود. هدف در این مسئله، حداقل‌کردن مجموع هزینه‌های زودکرد و دیرکرد است.

مجموعه‌ها:

i : مجموعه ماشین‌ها

j : مجموعه کارها

h: : مجموعه عملیات‌ها

k : مجموعه نوبت‌ها

پارامترها:

W: هزینهٔ هر واحد زمانی زودکرد

V: هزینهٔ هر واحد زمانی دیرکرد

d_j: تاریخ تحویل کار j ام

$\mu_{j,h}$: میانگین مدت‌زمان انجام عملیات h ام از کار j ام

$\sigma_{j,h}$: انحراف معیار مدت‌زمان انجام عملیات h ام از کار j ام

$O_{j,h}$: عملیات h ام از کار j ام

m : تعداد ماشین‌ها

n : تعداد کارها

$P_{j,h}$: زمان پردازش احتمالی عملیات $O_{j,h}$ که توزیع آماری مختص به خورد را دارد؛ برای مثال توزیع نرمال با میانگین و واریانس زیر:

$$P_{j,h} \approx N(\mu_{j,h}, \sigma_{j,h})$$

M: یک عدد بزرگ

متغیرهای این مدل عبارت‌اند از:

E_j: میزان واحد زمانی زودکرد کارj ام

T_j: میزان واحد زمانی زودکرد j ام

C_j: تاریخ تکمیل کار j ام

$x_{i,j,h,k}$: متغیر باینری ۰ یا ۱ . اگر عملیات $O_{j,h}$ بر ماشین iدر نوبت k انجام شود، برابر ۱ و در غیر این صورت ۰.

$t_{i,j}$: زمان شروع عملیات $O_{j,h}$

$Tm_{i,k}$: زمان شروع کار ماشین iدر نوبت k

k_i: تعداد عملیات‌های اختصاص‌یافته به ماشین i

با توجه به مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای مسئله به‌صورت زیر مدل‌سازی می‌شود:

$$MinZ = WE_j + VT_j \quad (۱)$$

S.t:

$$E_j = max\{0, d_j - C_j\} \quad (۲)$$

$$T_j = max\{0, C_j - d_j\} \quad (۳)$$

$$C_j = t_{j,h_j} + p_{j,h_j} \quad (۴)$$

$$t_{j,h} + p_{j,h} \le t_{j,h+1} \quad (۵)$$
$$\forall\, j = 1,2,\dots,n; h = 1,2,\dots,h_j - 1$$

$$Tm_{i,k} + p_{j,k}.x_{i,j,h,k} \le Tm_{i,k+1} \quad (۶)$$
$$\forall\, i = 1,..,m; j = 1,\dots,n; h = 1,\dots,h_j;$$
$$k = 1,\dots,k_i - 1;$$

$$Tm_{i,k} \le t_{i,k} + (1 - x_{i,j,h,k}).M \quad (۷)$$
$$\forall\, i = 1,..,m; j = 1,\dots,n; h = 1,\dots,h_j;$$
$$k = 1,\dots,k_i;$$

$$Tm_{i,k} + (1 - x_{i,j,h,k}).M \le t_{j,h} \quad (۸)$$
$$\forall\, i = 1,..,m; j = 1,\dots,n; h = 1,\dots,h_j;$$
$$k = 1,\dots,k_i;$$

$$\sum_j \sum_k x_{i,j,h,k} = 1 \quad (۹)$$
$$\forall\, i = 1,\dots m; k - 1,\dots,k_i;$$

$$\sum_k x_{i,j,h,k} = y_{i,j,h} \quad (۱۰)$$
$$\forall\, i = 1,\dots m; j = 1,\dots,n; h = 1,\dots,h_j;$$

$$t_{j,h} \ge 0\ \forall\, j = 1,\dots,n; h = 1,\dots,h_j; \quad (۱۱)$$

$$x_{i,j,h,k} \in \{0,1\} \quad (۱۲)$$
$$\forall\, i = 1,\dots,m; j = 1,\dots,n;_i$$
$$h = 1,\dots,h_j; k = 1,\dots,k$$

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی

رابطهٔ ۱ بیانگر تابع هدف است که حداقل‌کردن مجموع هزینه‌های دیرکرد و زودکرد است و رابطهٔ ۲ میزان زودکرد هر کار را تعریف می‌کند. رابطهٔ ۳ میزان دیرکرد هر کار و رابطهٔ ۴ زمان تکمیل هر کار را تعریف می‌کند. همچنین رابطهٔ ۵، محدودیت‌های پیش‌نیازی را معرفی می‌کند. این محدودیت زمان شروع هر عملیات را به اتمام عملیات قبلی، از همان کار محدود می‌کند. رابطهٔ ۶ این الزام را به وجود می‌آورد که یک ماشین در صورتی کار در نوبت $k+1$ را انجام می‌دهد که کار آن ماشین در نوبت k به اتمام رسیده باشد. رابطه‌های ۷ و ۸ این الزام را به وجود می‌آورند که در صورتی یک عملیات شروع می‌شود که هم محدودیت پیش‌نیازی (عملیات قبلی آن به اتمام رسیده باشد) و هم محدودیت ماشین (ماشین مورد نیاز آن بیکار باشد) رعایت شده باشند. رابطهٔ ۹ موجب می‌شود که برای یک عملیات، تنها یک نوبت از بین نوبت‌های ممکن انتخاب شود. رابطهٔ ۱۰ موجب می‌شود که برای هر عملیات از ماشین اختصاص‌یافته به آن عملیات، نوبت اجرای عملیات تعیین شود. رابطه‌های ۱۱ و ۱۲ نوع متغیرها را معرفی می‌کنند.

در مسئلهٔ جاری علاوه بر روابط بالا، دو محدودیت زیر نیز افزوده می‌شود:

الف- محدودیت مربوط به بودجه:

$$\sum_{i=1}^{n} b_i . n_i \leq B \quad (۱۳)$$

که در رابطهٔ فوق b_i هزینهٔ خرید ماشین i و B کل بودجه در دسترس است.

ب- محدودیت مربوط به فضا

$$\sum_{i=1}^{n} s_i . n_i \leq S \quad (۱۴)$$

که در رابطهٔ فوق s_i فضای مورد نیاز ماشین i و S کل فضای در دسترس است.

۳-۲ اعتبارسنجی مدل ریاضی

با توجه به اینکه هدف از انجام این تحقیق، ایجاد مدل شبیه‌سازی است، بنابراین بیان مدل ریاضی تنها برای توضیح متغیرها، پارامترها، محدودیت‌ها و اهداف مدل شبیه‌سازی به زبان ریاضی است که به‌اصطلاح مدل مفهومی ریاضی گفته می‌شود و پژوهشگر قصد حل مدل ریاضی را ندارد، بنابراین اعتبارسنجی مدل ریاضی زمانی مطرح می‌شود که قرار باشد مدل ریاضی به‌جای مدل شبیه‌سازی حل شود.

۳-۳ روش شبیه‌سازی برای حل مسئله

همان‌طور که در قسمت مبانی نظری تحقیق بیان شد، مسئلهٔ تولید کارگاهی در حالت قطعی و ایستا با بیش از دو ماشین NP-Hard به حساب می‌آید و واردکردن عوامل ایجاد عدم قطعیت بر پیچیدگی مسئله می‌افزاید. بر این اساس، با استفاده از تکنیک‌های معمولی تحقیق در عملیات، نمی‌توان به مدل‌سازی و یافتن جواب بهینه برای این مسئله اقدام کرد. بیشتر مسائلی که در این زمینه مدل‌سازی شده‌اند، با استفاده از فرض‌های محدودکننده اقدام به ساده‌سازی مسئله کرده‌اند که این امر باعث فاصله‌گرفتن از حالات واقعی می‌شود. در مسئلهٔ بررسی‌شده در این تحقیق علاوه بر شرایط فوق، مدت‌زمان انجام کارها، احتمال خرابی تجهیزات و احتمال نیاز به دوباره‌کاری دارای ویژگی‌های عدم قطعیت‌اند که این موضوع پیچیدگی مسئله را دوچندان می‌کند؛ بنابراین بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی به پژوهشگر کمک می‌کند بدون حذف شرایط واقعی مسئله، جواب مناسبی را برای مسئله پیدا کند.

۳-۴ روش‌های اولویت‌دهی

تصمیم‌گیری دربارهٔ انتخاب یک کار از بین کارهای موجود در صف، در زمان آزادشدن ماشین برای بارگذاری بر آن، از مهم‌ترین تصمیمات در محیط کارگاهی است. در سال‌های اخیر روش‌های زیادی برای این منظور پیشنهاد و بررسی و ارزیابی شده است. در این روش‌ها از معیارهای مختلفی برای اولویت‌دهی به کارها استفاده و کارهای با اولویت بالاتر زودتر وارد ماشین می‌شود.

در این مقاله از هفت قانون اولویت‌دهی متداول استفاده شده است که مطابق جدول ۱ عبارت‌اند از:

جدول ۱- روش‌های اولویت‌دهی به کار گرفته شده

Table 1- Prioritization methods

توضیح روش	روش‌های اولویت‌دهی به کار گرفته شده
خروج از صف به ترتیب ورود	FIFO
خروج آخرین ورودی به‌عنوان اول خروجی صف	LIFO
اولویت‌دهی براساس کوتاه‌ترین زمان پردازش	SPT
اولویت‌دهی براساس طولانی‌ترین زمان پردازش	LPT
اولویت‌دهی براساس زودترین زمان اتمام مورد انتظار	EDD
اولویت‌دهی براساس میزان بحرانی‌بودن کار	CR
اولویت‌دهی براساس متوسط زمان تأخیر در تحویل کار	SLACK

برای تولید زمان اتمام مورد انتظار برای استفاده در قانون زودترین زمان اتمام مورد انتظار کار، از روش کل محتوای کار استفاده می‌شود که از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$d_j = A_i + \sum_{i=1}^{h_j} p_{j,h} \quad (۱۵)$$

در این رابطه j شمارهٔ کار، d_j زمان مورد انتظار تخمین‌زده برای تحویل کار j، A_j زمان ورود کار j ام و $p_{j,i}$ زمان پردازش کار j بر ماشین i ام است.

برای به دست آوردن نرخ بحرانی از رابطهٔ زیر استفاده می‌شود:

$$CR_{ji} = \frac{D_j}{p_{ji}} \quad (۱۶)$$

برای به دست آوردن متوسط زمان تأخیر در تحویل کالا (SLACK) از رابطهٔ زیر استفاده می‌شود:

$$SLACK_{ji} = (D_j - ArrivalTime_j) - p_{ji} \quad (۱۷)$$

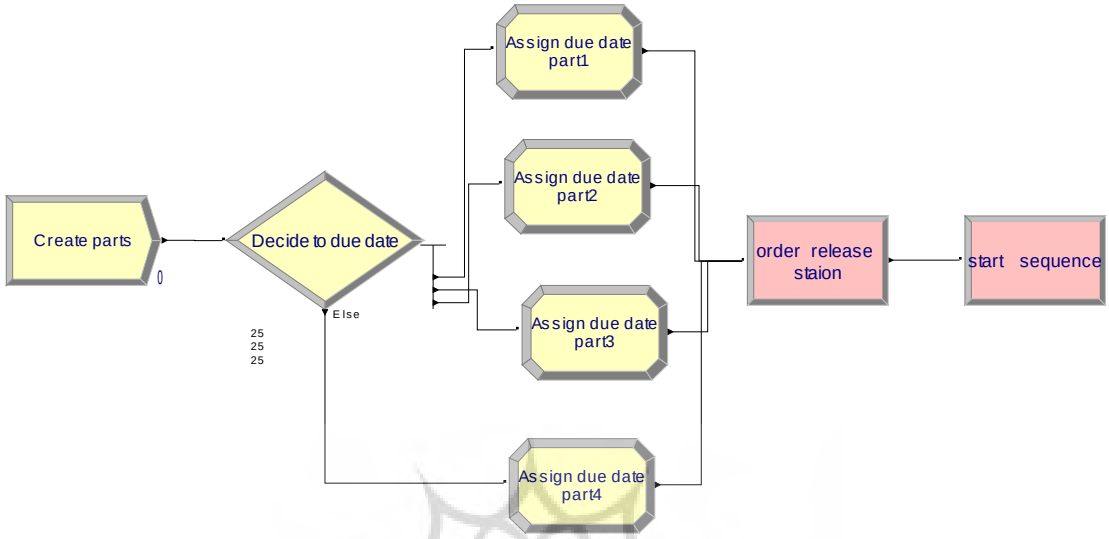
۳-۵ معرفی نرم‌افزار شبیه‌سازی ارنا (Arena)

نرم‌افزار ارنا بستهٔ نرم‌افزاری برای شبیه‌سازی سیستم‌های گسستهٔ پیشامد است که شرکت systems modeling آن را به بازار ارائه کرده و نرم‌افزاری کامل برای انجام مطالعات شبیه‌سازی است و تمام قدم‌های یک مطالعهٔ شبیه‌سازی را پشتیبانی می‌کند. این نرم‌افزار قابلیت مدل‌سازی شیءگرا را نیز دارد و در عین حال به‌راحتی با سیستم‌عامل ویندوز پشتیبانی می‌شود. ارنا نرم‌افزاری کاربردی، با قابلیت مدل‌سازی بالا و ابزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی است که به کاربران اجازه می‌دهد تا مدل شبیه‌سازی را ایجاد و روی آن آزمایش انجام دهند و در عین حال رابط کاربری آسانی دارد.

۳-۶ مدل شبیه‌سازی شده در نرم افزار Arena 14

شبیه‌سازی، بیان رفتار پویای یک سیستم در حالت پایدار به‌واسطهٔ حرکت آن از یک وضعیت به وضعیت دیگر براساس قواعد عملیاتی تعریف شده است. اصولاً در شبیه‌سازی، از کامپیوتر برای ارزیابی عددی یک مدل استفاده می‌شود و در آن داده‌ها به‌جهت تخمین ویژگی‌های مدنظر مدل جمع‌آوری می‌شوند. شبیه‌سازی کامپیوتری در عام‌ترین معنایش، فرایند طراحی مدلی ریاضی- منطقی از سیستم واقعی و آزمایش این مدل با کامپیوتر است. در این

تحقیق نیز، پس از مدل‌سازی سیستم مربوط به مسئلهٔ تولید کارگاهی، آن را در نرم‌افزار Arena 14 پیاده‌سازی می‌کنیم و سپس پس از بررسی صحت و اعتبار مدل با دادن داده‌های ورودی به مسئله و همچنین تغییر قوانین اولویت‌دهی به کارها، به مقدار بهینهٔ مدنظر نزدیک می‌شویم. شکل ۱ بخشی از مدل شبیه‌سازی‌شدهٔ مسئله را نشان می‌دهد.



شکل ۱- بخشی از مدل شبیه‌سازی‌شدهٔ زمان‌بندی تولید کارگاهی

Figure 1- Part of the simulated job shop production scheduling model

۳-۷ اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی

شایان ذکر است که دربارهٔ اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی‌شده، مدل در حالت اولیه بدون محدودیت‌های فضا و بودجه و در حالت پایهٔ FIFO اجرا و با توجه به خروجی به دست آمده دربارهٔ زمان تکمیل قطعات و مقایسهٔ آن با شرایط واقعی در کارگاه تولیدی، تأیید شد؛ برای مثال تابع هدف مسئله که بیانگر حداقل‌کردن مجموع هزینه‌های دیرکرد و زودکرد انجام کارهاست، در حالت پایهٔ شبیه‌سازی (اولویت براساس زمان ورود کارها و تعداد موجود هر تجهیز، ۱ عدد و اجرای ۱۰۰ بار شبیه‌سازی در هر تکرار) برابر حداقل ۸۸۷۰/۲۵ و حداکثر ۹۳۱۵/۹۵ واحد پولی است که در حالت واقعی کارگاه این عدد ۹۲۱۴واحد پولی بوده است (این نتایج در جدول ۵ و بخش مثال عددی مشاهده‌شدنی است). گفتنی است موضوع محدودیت‌های بودجه و فضا به‌منظور محاسبهٔ تعداد تجهیزات در ماژول OptQuest اضافه و اجرا می‌شود که نتایج آن را تصمیم‌گیران بررسی می‌کنند.

۴- مثال عددی

به‌منظور نشان‌دادن مکانیزم، کارکرد مدل یک کارگاه تولیدی در نظر گرفته شده است که در آن چهار نوع قطعهٔ ۱، ۲ ، ۳ و ۴ تولید می‌شود. در این مدل درصد تولید روزانهٔ هر قطعه مشخص است. هریک از قطعات، موعد تحویل مشخصی دارند. قطعات بر ماشین‌ها براساس قوانین زمان‌بندی مشخصی قرار می‌گیرند. در این کارگاه پنج سلول تولیدی داریم. توالی قطعات و زمان عملیات هر قطعه در هر سلول بر هر ماشین مطابق جدول ۲ است:

جدول ۲- اطلاعات مربوط به مثال عددی

Table 2- Information related to numerical example

توالی /زمان قطعه	درصد	موعد تحویل (ساعت)	فرایند تولید قطعات (شمارهٔ سلول)					
توالی قطعهٔ ۱			۱	۲	۳	۴		
زمان قطعهٔ ۱ (دقیقه)	۲۰	۷	ثابت ۸	مثلثی ۸-۶-۴	مثلثی ۲۰-۱۵-۵	یکنواخت بین ۸ تا ۱۱		
توالی قطعهٔ ۲			۱	۲	۴	۲	۳	۵
زمان قطعهٔ ۲ (دقیقه)	۳۰	۶	یکنواخت بین ۱۰تا ۱۴	مثلثی ۸-۶-۴	مثلثی ۲۱-۱۸-۱۵	مثلثی ۱۲-۹-۶	مثلثی ۱۵-۱۱-۹	یکنواخت بین ۴ تا ۷
توالی قطعهٔ ۳			۲	۱	۳	۴		
زمان قطعهٔ ۳ (دقیقه)	۲۵	۸	ثابت ۹	ثابت ۱۰	یکنواخت بین ۱۸ تا ۲۵	ثابت ۱۰		
توالی قطعهٔ ۴			۲	۴	۵			
زمان قطعهٔ ۴ (دقیقه)	۲۵	۷	مثلثی ۱۰-۸-۶	ثابت ۷	یکنواخت بین ۴ تا ۸			

زمان بین دو ورود قطعات متوالی (تمامی انواع) دارای توزیع نمایی با میانگین ۱۰ دقیقه است. اولین قطعه در زمان صفر وارد می‌شود. به‌طور پیش‌فرض، سلول ۱، ۲، ۴ و ۵ هرکدام شامل یک ماشین است. سلول شمارهٔ ۳ دارای دو ماشین است. (ماشین دستی و ماشین خودکار که ماشین خودکار در ۷۰درصد زمان ماشین دستی، فرایند عملیاتی را انجام می‌دهد). زمان انتقال بین سلول‌ها ۱/۵ دقیقه فرض شده است. قطعات تولیدی ایستگاه پنجم به احتمال ۳درصد به دوباره‌کاری نیاز دارند و بعد از آن سالم می‌شوند. ماشین دستی سلول ۳ خرابی با توزیع پواسون با نرخ ۱ بار در ساعت دارد و زمان تعمیر آن دارای توزیع یکنواخت ۵ الی ۱۰ دقیقه است. هزینهٔ دیرکرد هر کار، ۲۰ واحد پول و هزینهٔ زودکرد هر کار ۵ واحد پول است.

همچنین قیمت هر ماشین مطابق جدول زیر است:

جدول ۳- اطلاعات مربوط به هزینه‌های ماشین

Table 3- Information about the costs of the Machine

ماشین	قیمت (واحد پول)
ماشین سلول ۱	۸۰۰
ماشین سلول ۲	۲۰۰
ماشین سلول ۳ (دستی)	۳۰۰
ماشین سلول ۳(خودکار)	۵۰۰
ماشین سلول ۴	۴۰۰
ماشین سلول ۵	۵۰۰

تعداد ماشین‌های سلول ۱، ۲، ۴ و ۵ حداقل ۱ و حداکثر ۳ ماشین است. دربارهٔ سلول ۳، تعداد ماشین خودکار حداقل ۱ و حداکثر ۳ و ماشین دستی حداقل ۱ و حداکثر ۳ ماشین در نظر گرفته شده است. بودجهٔ تأییدشده برای آنها حداکثر ۸۵۰۰ واحد پول است.

رابطهٔ ریاضی محدودیت فوق در ارنا به شرح زیر است:

(۱۸)

[Cell 1 Machine]*800+[Cell 2 Machine] * 200+[Cell 3 New]*500+[Cell 3 Old]*300+[Cell 4 Machine]*400+[Cell 5 Machine]*500 <= 8500

فضای مورد نیاز برای هر ماشین نیز مطابق جدول زیر است:

جدول ۴- اطلاعات مربوط به مساحت ماشین

Table 4- Information about the area of the Machine

ماشین	مساحت (متر مربع)
ماشین سلول ۱	۵۰
ماشین سلول ۲	۳۰
ماشین سلول ۳ (دستی)	۳۰
ماشین سلول ۳ (خودکار)	۴۰
ماشین سلول ۴	۴۵
ماشین سلول ۵	۵۰

حداکثر فضای در دسترس برای ماشین‌آلات ۸۰۰ متر مربع است.

رابطهٔ ریاضی محدودیت فوق در ارنا به شرح زیر است:

(۱۹)

[Cell 1 Machine]*50+[Cell 2 Machine] * 30+[Cell 3 New]*40+[Cell 3 Old]*30+[Cell 4 Machine]*45+[Cell 5 Machine]*50 <= 800

رابطهٔ ۱۹ بیان می‌کند که برای مثال هر ماشین واقع در سلول یک، ۵۰ متر مربع فضا نیاز دارد و متناسب با تعداد ماشین در نظر گرفته شده برای سلول اول، این فضا افزایش می‌یابد. همین موضوع برای سلول‌های بعدی نیز وجود دارد و تعداد ماشین‌های تخصیص داده شده به هر سلول، متناسب با مساحت مورد نیاز نباید در کل از ۸۰۰ مترمربع، که محدودیت فضاست، تجاوز کند.

۵- تحلیل یافته‌های پژوهش با کمک طراحی آزمایش‌ها

۵-۱ نتایج اجرای شبیه‌سازی

همان‌طور که در قسمت شرح مسئله بیان شد، مدل ریاضی بررسی‌شده در این تحقیق دارای تابع هدف بر مبنای مجموع هزینه‌های دیرکرد و زود کرد است. برای حل این مسئله پس از شبیه‌سازی در نرم‌افزار Arena 14، در سلول‌ها قوانین اولویت‌دهی کارها در نظر گرفته شده است که در صورت ایجاد صف یکی از قوانین برای صف (در تمام سلول‌ها به‌طور مشترک) در نظر گرفته شود. نتایج به دست آمده برای مسئلهٔ عددی مطرح‌شده پس از ۴ بار آزمایش با تکرار ۱۰۰ مرتبه به ازای هر قانون، اولویت‌بندی برای حالت بدون محدودیت‌های بودجه و فضا و همچنین اجرای شبیه‌سازی با کمک الگوریتم جست‌وجوی پراکنده در حالت داشتن محدودیت‌های بودجه و فضا، به شرح جدول ۵ است:

جدول ۵- نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی

Table 5- Simulation results

روش اولویت‌دهی	مقدار تابع هدف بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های بودجه و فضا و با فرض یک عدد از هر نوع ماشین				مقدار بهینهٔ تابع هدف و بهینهٔ تعداد ماشین‌آلات با توجه با توجه به محدودیت‌های بودجه و فضا (با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی پراکنده در شبیه‌سازی)			
	نوع ماشین	تعداد ماشین	تعداد تکرار	مقدار Z	نوع ماشین	تعداد ماشین	تعداد تکرار	مقدار بهینهٔ تابع هدف
FIFO	۱	۱	۱۰۰	۹۲۱۳/۵۷	۱	۱	۲۱۹	۴۸۵۸/۷۸
	۲	۱		۹۳۱۵/۹۵	۲	۱		
	۳ جدید	۱		۹۲۴۷/۵۳	۳ جدید	۱		
	۳ قدیم	۱		۸۸۷۰/۲۵	۳ قدیم	۱		
	۴	۱			۴	۱		
	۵	۱			۵	۱		
LIFO	۱	۱	۱۰۰	۹۰۱۷/۶۲	۱	۱	۲۱۰	۴۸۸۰/۸۹
	۲	۱		۹۲۱۴/۲۲	۲	۱		
	۳ جدید	۱		۹۰۵۸/۴۲	۳ جدید	۱		
	۳ قدیم	۱		۹۲۹۲/۱۲	۳ قدیم	۱		
	۴	۱			۴	۱		
	۵	۱			۵	۱		
SPT	۱	۱	۱۰۰	۹۳۶۲/۱۱	۱	۱	۱۹۲	۴۸۳۳/۴۲
	۲	۱		۹۳۵۷/۶۷	۲	۱		
	۳ جدید	۱		۹۳۷۱/۲۷	۳ جدید	۱		
	۳ قدیم	۱		۹۲۰۰/۶۴	۳ قدیم	۱		
	۴	۱			۴	۱		
	۵	۱			۵	۱		
LPT	۱	۱	۱۰۰	۹۰۰۱/۲۲	۱	۱	۱۷۷	۴۷۶۹/۶۴
	۲	۱		۸۸۶۱/۶۷	۲	۱		
	۳ جدید	۱		۸۷۱۰/۹۴	۳ جدید	۱		
	۳ قدیم	۱		۹۱۰۰/۲۴	۳ قدیم	۱		
	۴	۱			۴	۱		
	۵	۱			۵	۱		
EDD	۱	۱	۱۰۰	۸۹۴۳/۴۱	۱	۱	۲۰۶	۴۷۹۱/۵۸
	۲	۱		۹۲۹۹/۷۵	۲	۱		
	۳ جدید	۱		۹۰۳۸/۱۳	۳ جدید	۱		
	۳ قدیم	۱		۹۲۵۴/۹۶	۳ قدیم	۱		
	۴	۱			۴	۱		
	۵	۱			۵	۱		
CR	۱	۱	۱۰۰	۹۳۱۴/۸۴	۱	۱	۱۹۴	۴۷۶۹/۶۴
	۲	۱		۹۱۸۷/۶۴	۲	۱		
	۳ جدید	۱		۹۷۱۰/۹۴	۳ جدید	۱		
	۳ قدیم	۱		۹۲۷۴/۰۳	۳ قدیم	۱		
	۴	۱			۴	۱		

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

روش اولویت‌دهی	مقدار تابع هدف بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های بودجه و فضا و با فرض یک عدد از هر نوع ماشین				مقدار بهینهٔ تابع هدف و بهینهٔ تعداد ماشین‌آلات با توجه به محدودیت‌های بودجه و فضا (با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی پراکنده در شبیه‌سازی)		
	نوع ماشین	تعداد ماشین	تعداد تکرار	مقدار Z	تعداد تکرار	تعداد بهینهٔ ماشین	مقدار بهینهٔ تابع هدف
SLACK	۵	۱				۳	۴۸۰۳/۴۴
	۱	۱	۱۰۰	۹۲۳۰/۰۷	۲۱۳	۳	
	۲	۱		۹۴۷۴/۲۵		۲	
	۳ جدید	۱		۹۱۱۷		۳	
	۳ قدیم	۱		۹۳۱۷		۲	
	۴	۱				۱	
	۵	۱				۱	

۶- بحث

به‌منظور بررسی نتایج به دست آمده از مدل شبیه‌سازی‌شده و مثال عددی، بحث دربارهٔ در نظر گرفتن ماشین‌آلات پیش‌فرض مدل و همچنین تعداد بهینهٔ پیشنهادی تعداد ماشین‌آلات توسط مدل، به شرح زیر ارائه می‌شود:

۶-۱ طراحی آزمایش‌ها به کمک تحلیل واریانس برای حالت پیش‌فرض تعداد ماشین‌آلات

به‌منظور تعیین بهترین توالی، ابتدا آنالیز واریانس به‌منظور بررسی تساوی میانگین بر داده‌های فوق انجام گرفته است:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = \mu_6 = \mu_7$$

H_1 : حداقل یکی از میانگین‌ها با بقیه متفاوت است

با توجه به جدول ۶، چون مقدار P-value کوچک‌تر از ۰/۰۵ است، بنابراین فرض صفر رد می‌شود و بین میانگین‌ها اختلاف معنی‌دار وجود دارد.

جدول ۶- آنالیز واریانس

Table 6- Analysis of variance

منبع	DF	Adj SS	MS	F-value	P-value
فاکتور اولویت‌بندی	۶	۵۷۷۰۹۰	۹۲۸۴۸	۳/۲۹	۰/۰۱۹
خطا	۲۱	۵۹۲۶۰۰	۲۸۲۱۹		
کل	۲۷	۱۱۴۹۶۹۱			

به‌منظور دسته‌بندی گروه‌های متفاوت از روش توکی استفاده شده و نتایج در جدول ۷ به دست آمده است:

جدول۷- دسته‌بندی نتایج با کمک روش توکی

Table 7- Classification of results using Tukey's method

فاکتور	میانگین	گروه	گروه
۶	۹۳۷۲	A	
۳	۹۳۲۲/۹	A	
۷	۹۲۸۴/۶	A	B
۱	۹۱۶۱/۸	A	B
۲	۹۱۴۵/۶	A	B
۵	۹۱۳۴/۱	A	B
۴	۸۹۱۸/۵		B

همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، دو گروه ایجاد شده است و چون تابع هدف بر مبنای هزینه است، بنابراین گروه دوم پذیرش می‌شود که هزینهٔ کمتری دارد. به‌عبارتی روش LPT دارای کمترین هزینه است، ولی ازلحاظ آماری، نتایج روش‌های FIFO، LIFO،EDD و SLACK نیز پذیرفتنی است.

۶-۲ مقایسهٔ نتایج با فرض تعداد پیش‌فرض ماشین‌آلات و تعداد بهینهٔ ماشین‌آلات

با توجه به نتایج حاصل‌شده در دو مرحلهٔ قبل، با در نظر گرفتن تعداد پیش‌فرض ماشین‌آلات، روش LPT با توجه به تابع هدف حداقل‌کردن مجموع هزینه‌های دیرکرد و زودکرد انجام کارها، با حداقل عدد برابر ۸۷۱۰/۹۴ واحد پولی، بهترین پاسخ را می‌دهد؛ اما اگر بخواهیم با افزودن تعداد ماشین‌آلات، هزینهٔ دیرکرد و زودکرد را حداقل کنیم، روش LPT و CR بهترین نتیجه را با کمک استفاده از الگوریتم جست‌وجوی پراکنده در شبیه‌سازی برای تابع هدف به ما خواهند داد که در این نتایج، محدودیت‌های هزینه و فضا نیز رعایت شده است، این عدد برای هر دو روش ۴۷۶۹/۶۴ واحد پولی است.

۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق ابتدا مدل مفهومی ریاضی مسئلهٔ تعیین توالی کارها در تولید کارگاهی، با هدف حداقل‌کردن هزینه‌های زودکرد و دیرکرد و با محدودیت‌های اضافی فضا و بودجه بیان شد. در ادامه، مدل شبیه‌سازی مسئله طراحی و سپس با یک مثال عددی با کمک نرم‌افزار ارنا اجرا و بررسی و تحلیل شد، همچنین توالی نزدیک به بهینه نیز، به‌منظور حداقل‌کردن هزینه با کمک نرم‌افزار Minitab و آنالیز واریانس مشخص شد که روش LPT با توجه به تعداد ماشین‌های پیش‌فرض و روش‌های LPT و CR با توجه به تعداد بهینهٔ ماشین‌آلات با در نظر گرفتن محدودیت هزینه و فضا و استفاده از الگوریتم جست‌وجوی پراکنده، کمترین هزینه را دارند. در حالت ماشین‌آلات پیش‌فرض، ازلحاظ آماری نتایج روش‌های FIFO، LIFO،EDD و SLACK نیز پذیرفتنی است. همان‌طور که مشاهده شد، یکی از ویژگی‌های بارز شبیه‌سازی این است که با حداقل فاصلهٔ مسئله با دنیای واقعی (یعنی حذف‌نکردن محدودیت‌ها و پیچیدگی‌ها برای حل مسئله که معمولاً حذف واقعیات در دیگر روش‌های حل مسئله، به‌منظور کاهش پیچیدگی و امکان حل مسئله، انجام می‌شود)، نسبت‌به حل مسئله و همچنین اعمال سناریوهای تصمیم‌گیری اقدام می‌شود که

این موضوع کمک شایانی تصمیم‌گیری مدیران می‌کند. به‌طور کلی بیشتر اوقات مطالعهٔ فیزیکی سیستم‌ها بسیار مشکل و هزینه‌بر و یا حتی ناممکن است؛ بنابراین در این شرایط باید از مدل جایگزین برای مطالعهٔ سیستم استفاده کرد. در صورتی که مدل ساده باشد، از روش‌های تحلیلی برای حل مدل استفاده می‌شود، در مدل‌های پیچیده یا مدل‌هایی که امکان مدل‌سازی آن به روش‌های تحلیلی وجود نداشته باشد، از شبیه‌سازی استفاده می‌شود. استفاده از شبیه‌سازی علاوه بر زمان‌بندی تولید کارگاهی در دیگر فرایندهای تولیدی نظیر Flow Shop و ... نیز استفاده می‌شود. همچنین برای زمان‌بندی مسائل حمل و نقل زمینی و هوایی نیز، از این تکنیک استفاده می‌شود.

References

Ahmadian, M. M., Salehipour, A., & Cheng, T. C. E. (2021). A meta-heuristic to solve the just-in-time job-shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research,* 288(1), 14-29. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.04.017

Aiassi, R., Sajadi, S. M., Hadji-Molana, S. M., & Zamani-Babgohari, A. (2020). Designing a stochastic multi-objective simulation-based optimization model for sales and operations planning in built-to-order environment with uncertain distant outsourcing. *Simulation Modelling Practice and Theory,* 104(1), 102-103. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2020.102103

Akl, A. M., El Sawah, S., Chakrabortty, R. K., & Turan, H. H. (2022). A joint optimization of strategic workforce planning and preventive maintenance scheduling: a simulation–Optimization approach. *Reliability Engineering & System Safety,* 219(1), 108-175. https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108175

Amirkhani, F., Amiri, A., & sahraeian, R. (2017). A New Method Based on Simulation-Optimization Approach to Find Optimal Solution in Dynamic Job-shop Scheduling Problem with Breakdown and Rework. *Research in Production and Operations Management*, 8(1), 157-174. https://doi.org/10.22108/jpom.2017.21551

Azadivar, F. (1999).*Simulation optimization methodologies.* Presented at the Proceedings of the 31st conference on winter simulation: Simulation a bridge to the future. Phoenix, Arizona, United States.

Banks, J. & Nelson, B. L. (2010). *Discrete-Event System Simulation.* Prentice Hall.

Blackstone, J. H., Phillips, D. T. & Hogg, G. L. (1982). A state-of-the-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations. *International Journal of Production Research*, 20(1), 27-45. https://doi.org/10.1080/00207548208947745

Chan, F. T. S., Chan, H. K., Lau, H. C. W., & Ip, R. W. L. (2003).Analysis of dynamic dispatching rules for a flexible manufacturing system. *Journal of Materials Processing Technology*, 138(1-3), 325-331. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00093-1

Demir, H. I., & Erden, C. (2020). Dynamic integrated process planning, scheduling and due-date assignment using ant colony optimization. *Computers & Industrial Engineering,* 149(1), 106799. https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106799

Do Amaral, J. V. S., Montevechi, J. A. B., de Carvalho Miranda, R., & de Sousa Junior, W. T. (2022). Metamodel-based simulation optimization: A systematic literature review. *Simulation Modelling Practice and Theory,* 114(1), 102403. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2021.102403

Dokeroglu, T., Sevinc, E., Kucukyilmaz, T., & Cosar, A. (2019). A survey on new generation metaheuristic algorithms. *Computers & Industrial Engineering,* 137(1), 106040. https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106040

Jain, A. & Meeran, S. (1999). *A State-Of-The-Art Review of Job-Shop SchedulingTechniques.*

Available at: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.54.8522

Klemmt, A., Horn, Weigert, S. G. & Wolter, K.-J. (2009). Simulation-based optimization vs. mathematical programming: A hybrid approach for optimizing scheduling problems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *25*, 917-925. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2009.04.012

Molaee, E., Sadeghian, R., & Fattahi, P. (2022). Modeling a single machine scheduling problem with batch production and the random breakdown and solving it by branch and bound method. *Production and Operations Management,* 13(2), 121-136. https://doi.org/10.22108/JPOM.2022.126335.1315

Pinedo, M. L. (2012). *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*. Springer. https://doi.org/10.22108/jpom.2022.126335.1315

Naderi, B., & Ruiz, R. (2014). A scatter search algorithm for the distributed permutation flowshop scheduling problem. *European Journal of Operational Research,* 239(2), 323-334.

Sajadi, S. M., & Shahbazi, S. (2017). Seeking Simulation-based Optimization of Job shop Scheduling in Small and Medium Enterprises to Minimize the Cost of Tardiness and Earliness of Activities. *Industrial Management Journal*, 9(1), 129-146. https://doi.org/10.22059/imj.2017.128474.1006891

Shahbazi, S., Sajadi, S. M., & Jolai, F. (2017). A Simulation-Based Optimization Model for Scheduling New Product Development Projects in Research and Development Centers. *Iranian Journal of Management Studies*, 10(4), 883-904. https://doi.org/10.22059/ijms.2017.240381.672790

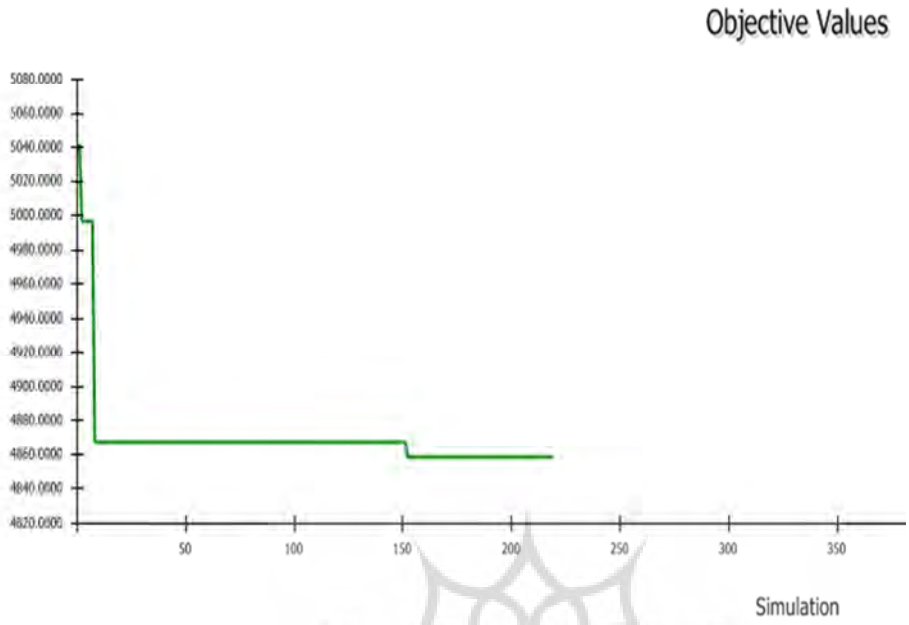
Talbi, E.G. (2009). *Metaheuristics: From Design to Impelementation*. John Wiley and sons.

Vieira, G. E., Herrmann, J. W. & Lin, E. (2000). Predicting the performance of escheduling strategies for parallel machine systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 19(4), 256-266. https://doi.org/10.1016/S0278-6125(01)80005-4

Weng, M. X. & Ren, H. (2006).An efficient priority rule for scheduling job shops to minimize mean tardiness. *IIE Transactions*, *38*(9), 789-795. https://doi.org/10.1080/07408170600710523

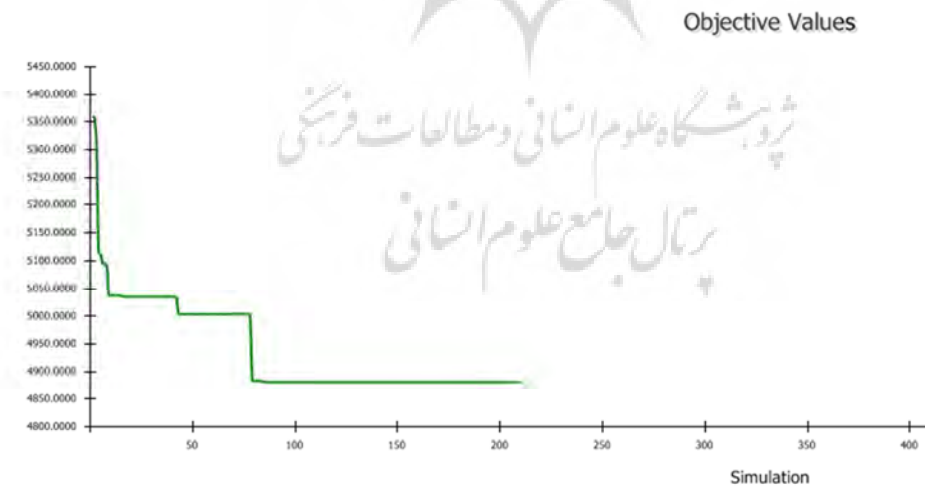
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

پیوست ۱ : نمودارهای شبیه‌سازی با روش‌های مختلف اولویت‌دهی کارها با در نظر گرفتن محدودیت فضا و بودجه و با کمک الگوریتم جست‌وجوی پراکنده



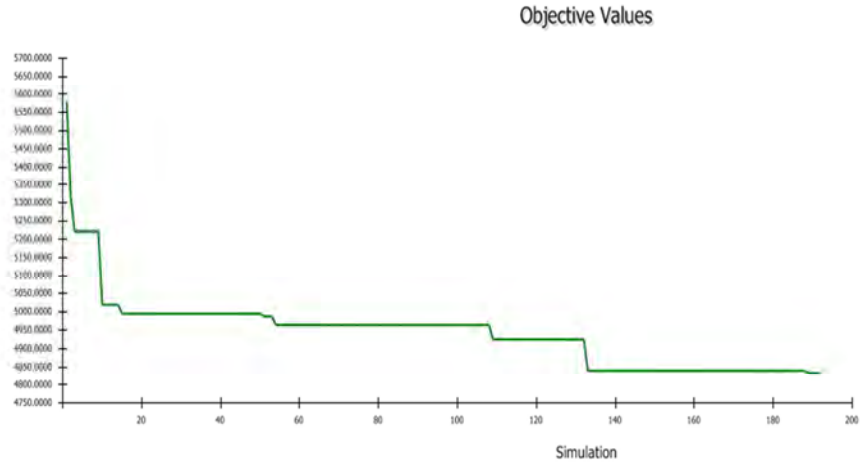
شکل ۱: نمودار شبیه‌سازی با روش FIFO برای اولویت‌دهی کارها با در نظر گرفتن محدودیت فضا و بودجه و با کمک الگوریتم جست‌وجوی پراکنده

figure1: Simulation diagram with FIFO method for prioritizing tasks considering space and budget limitations and with the help of scatter search algorithm.



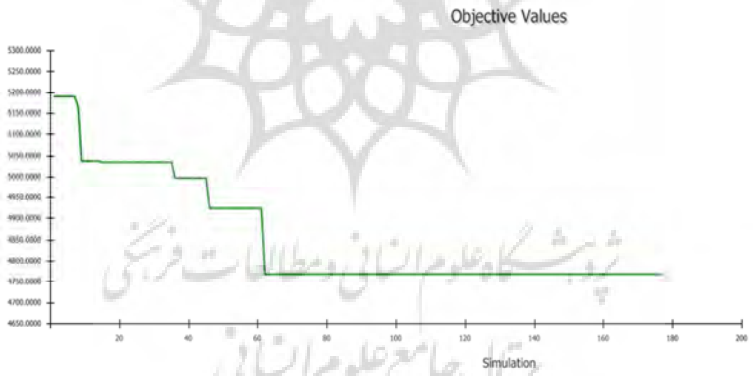
شکل ۲: نمودار شبیه‌سازی با روش LIFO برای اولویت‌دهی کارها با در نظر گرفتن محدودیت فضا و بودجه و با کمک الگوریتم جست‌وجوی پراکنده

figure2: Simulation diagram with LIFO method for prioritizing tasks considering space and budget limitations and with the help of scatter search algorithm.



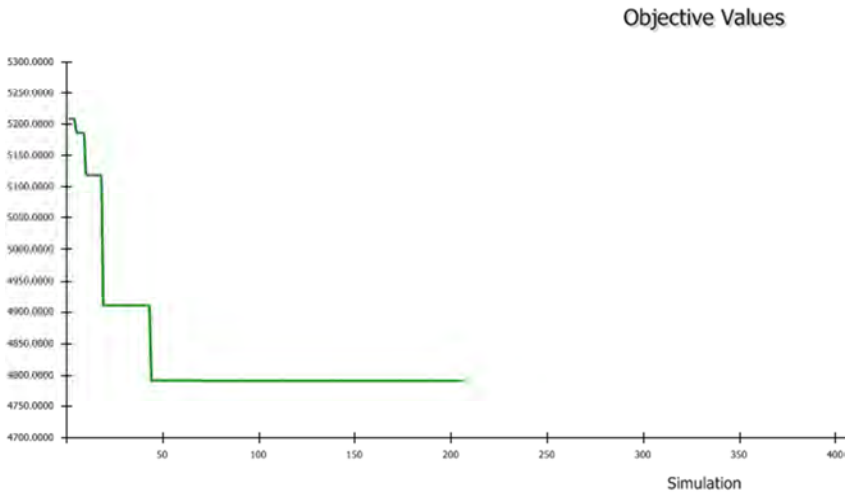
شکل۳: نمودار شبیه‌سازی با روش SPT برای اولویت‌دهی کارها با در نظر گرفتن محدودیت فضا و بودجه و با کمک الگوریتم جست‌وجوی پراکنده

figure3: Simulation diagram with SPT method for prioritizing tasks considering space and budget limitations and with the help of scatter search algorithm.



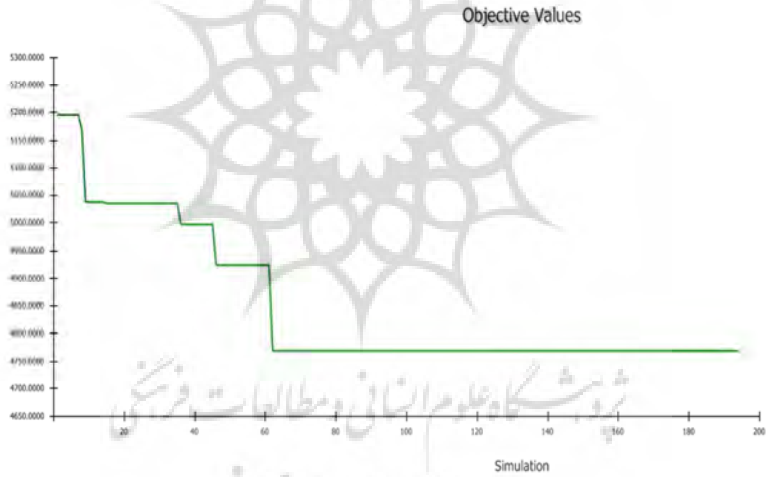
شکل ۴: نمودار شبیه‌سازی با روش LPT برای اولویت‌دهی کارها با در نظر گرفتن محدودیت فضا و بودجه و با کمک الگوریتم جست‌وجوی پراکنده

figure4: Simulation diagram with LPT method for prioritizing tasks considering space and budget limitations and with the help of scatter search algorithm.



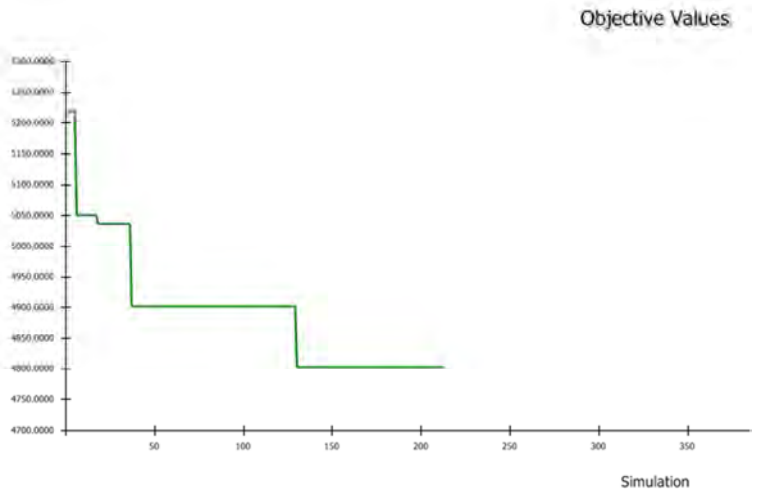
شکل ۵: نمودار شبیه‌سازی با روش EDD برای اولویت‌دهی کارها با در نظر گرفتن محدودیت فضا و بودجه و با کمک الگوریتم جست‌وجوی پراکنده

figure5: Simulation diagram with EDD method for prioritizing tasks considering space and budget limitations and with the help of scatter search algorithm.



شکل ۶: نمودار شبیه‌سازی با روش CR برای اولویت‌دهی کارها با در نظر گرفتن محدودیت فضا و بودجه و با کمک الگوریتم جست‌وجوی پراکنده

figure6: Simulation diagram with CR method for prioritizing tasks considering space and budget limitations and with the help of scatter search algorithm.



شکل۷: نمودار شبیه‌سازی با روش SLACK برای اولویت‌دهی کارها با در نظر گرفتن محدودیت فضا و بودجه و با کمک الگوریتم جست‌وجوی پراکنده

figure7: Simulation diagram with SLACK method for prioritizing tasks considering space and budget limitations and with the help of scatter search algorithm.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

[1] Pinedo
[2] Sajadi & Shahbazi
[3] Molaee et al.
[4] Vieira et al.
[5] Jain & Meeran
[6] Banks & Nelson
[7] Blackstone et al.
[8] Chan et al.
[9] Weng & Ren
[10] Azadivar
[11] Klemmt et al.
[12] Do Amaral et al.
[13] Shahbazi et al.
[14] Demir & Erden
[15] Aiassi et al.
[16] Akl et al.
[17] Ahmadian et al.
[18] Amirkhani et al.
[19] Talbi & Ghazali
[20] Dokeroglu et al.
[21] Naderi & Ruiz