

## **A New Method Based on Simulation-Optimization Approach to Find Optimal Solution in Dynamic Job-shop Scheduling Problem with Breakdown and Rework**

**F. Amirkhani<sup>1</sup>, A. Amiri<sup>2</sup>, R. Sahraeian<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> M.Sc. degree, Dept. of Industrial Engineering, Shaded University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Dept. of Industrial Engineering, Shaded University, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Dept. of Industrial Engineering, Shaded University, Tehran, Iran

### **Abstract:**

In this paper we propose an integrated algorithm based on combination of a discrete- event simulation and genetic algorithm. The simulation model is considered as a constraint-satisfaction procedure and if the streaming operations are initiated, then the meta-heuristic takes predefined steps to improve the solution. The latter is constructed through an interface, namely control matrix, implemented as interaction between the simulation model and refined solution of meta-heuristic. In run-time, the control matrix is accessed via simulation model for further modifications.

The proposed method is implemented on classical job-shop problems with objective of makespan and results are compared with mixed integer programming model. Moreover, the appropriate dispatching priorities are achieved for dynamic job-shop problem minimizing a multi-objective criteria. The results show that simulation-based optimization are highly capable to capture the main characteristics of the shop and produce optimal/near-optimal solutions with highly credibility degree.

**Keywords:** Genetic Algorithm; Simulation based optimization; Dynamic job-shop scheduling

مدیریت تولید و عملیات، دوره ۸، پیاپی (۱۴)، شماره (۱)، بهار و تابستان ۱۳۹۶

دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۰۲ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۰۷

صص: ۱۷۴-۱۵۷

## رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی برای یافتن توالی بهینه در مسئله پویای تولید کارگاهی دارای خرابی و دوباره‌کاری

فرزاد امیرخانی<sup>۱\*</sup>، امیرحسین امیری<sup>۲</sup>، راشد صحرایان<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

**چکیده:** در این مقاله سعی شده است با ادغام شبیه‌سازی و الگوریتم ژنتیک رویکردی پیشنهاد شود که بتوان از آن در هر مسئله تولید کارگاهی که قابلیت مدل‌شدن با شبیه‌سازی را داشته باشد استفاده کرد. در رویکرد پیشنهادی برای در نظرگیری محدودیت‌های مسئله از مدل شبیه‌سازی و برای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. بدین منظور ماتریسی به‌عنوان رابط تعریف می‌شود که هم‌زمان نقش بردار کنترلی برای مدل شبیه‌سازی و نمایش ماتریسی جواب برای الگوریتم ژنتیک را ایفا می‌کند. در این روش با استفاده از الگوریتم ژنتیک تغییراتی در ماتریس اعمال می‌شود و سپس ماتریس وارد مدل شبیه‌سازی شده و تابع هدف تعریف شده در مسئله به‌عنوان تابع برازش برای الگوریتم ژنتیک گزارش می‌شود و این روند تا رسیدن به شرایط اتمام الگوریتم ادامه پیدا می‌کند. روش پیشنهادی بر مسائل معیار تولید کارگاهی سنتی و با تابع هدف زمان اتمام آخرین کار آزمایش می‌شود و نتایج حاصل با نتایج روش برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مقایسه می‌شود. سپس اولویت‌دهی مناسب برای مینیمم‌کردن تابع هدف چندگانه، در یک سیستم تولید کارگاهی پویای دارای خرابی و دوباره‌کاری به دست می‌آید. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد روش بهینه‌سازی بر اساس شبیه‌سازی از توانایی بالایی برای مدل‌سازی و یافتن جواب مناسب در اکثر مسائل تولید کارگاهی برخوردار است.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی بر اساس شبیه‌سازی، سیستم تولید کارگاهی پویا

## ۱- مقدمه

زمان‌بندی یکی از اثرگذارترین عوامل تصمیم‌گیری در مسائل برنامه‌ریزی تولید است که هدف آن تخصیص منابع موجود به یک سری از فعالیت‌هاست؛ به طوری که یک یا چند تابع هدف تعریف‌شده برای مسئله به بهینگی برسد.

در سیستم‌های تولیدی برای کاهش هزینه موجودی در حال پردازش (WIP) و نیز کاهش تأخیرها، محصولات باید براساس اولویت‌های خاصی پردازش شوند. تعیین اولویت پردازش اساس مسائل زمان‌بندی است و عواملی مانند سطوح موجودی، پیش‌بینی تقاضا، احتیاجات منابع و شرایط سیستم تولیدی بر آن اثر می‌گذارند (بیکر و همکاران، ۲۰۰۷).

مسئله زمان‌بندی سیستم تولید کارگاهی نوع خاصی از مسائل زمان‌بندی است که در آن هر محصول فرایندهای از پیش تعیین‌شده و متوالی را روی ماشین‌ها طی می‌کند که این فرایندها از محصولی به محصول دیگر متفاوت است (پیندو، ۲۰۱۲). پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد این مسئله حتی با بسیاری از فرض‌های محدودکننده دارای پیچیدگی زیادی است و در صورت وجود سه ماشین یا بیشتر جزء مسائل NP-hard به حساب می‌آید (گری و همکاران، ۱۹۷۶).

پیچیدگی تنها مشکل موجود در حل مسئله تولید کارگاهی نیست و ماهیت این سیستم موجب می‌شود پویایی و عدم قطعیت از اجزای جدایی‌ناپذیر آن باشد (نور، ۲۰۰۷). در این مسئله اگر حداقل یکی از پارامترهای اثرگذار دارای حالت قطعی نباشد، مسئله دارای حالت احتمالی یا فازی است. از طرفی اگر در

ابتدای زمان‌بندی تمامی کارها و پارامترهای مرتبط با آنها مشخص باشد، مسئله ایستا و در غیر این صورت پویا خواهد بود (بیکر و همکاران، ۲۰۰۷). حالت پویا خود به دو زیر شاخه آنالاین و آفلاین تقسیم می‌شود که در حالت آفلاین در ابتدای زمان‌بندی اطلاعاتی درباره کارهایی که در آینده باید زمان‌بندی شوند وجود دارد؛ ولی در حالت آنالاین این اطلاعات هم در دسترس نیستند (جی و همکاران، ۲۰۰۶).

پس از تعریف‌های ارائه‌شده باید مشخص شود عوامل عدم قطعیت و پویایی در سیستم تولید کارگاهی چیست؟ این عوامل را می‌توان در سه دسته به صورت زیر طبقه‌بندی کرد:

الف) تقاضا: اصولاً در سیستم تولید کارگاهی محصول زمانی تولید می‌شود که سفارشی برای آن وجود داشته باشد (حالت تولید برای سفارش<sup>MTO</sup>)، زمان سفارش یک محصول جدید و فواصل زمانی سفارشات برای تولید محصولات جزء متغیرهای تصادفی این مسئله خواهد بود.

ب) ماهیت محصول تولیدی: به دلیل منحصر به فرد بودن فرایند تولید هر محصول و ماهیت شبه‌پروژه‌ای، اظهار نظر قطعی درباره فرایندهای مورد نیاز و زمان‌های فرایند محصولات در سیستم تولید کارگاهی امکان‌پذیر نیست؛ به علاوه جهت رعایت الزامات کیفی ممکن است درصدی از محصولات نیاز به دوباره‌کاری داشته باشند.

ج) محیط کارگاه: خرابی و دردسترس نبودن دستگاه‌ها از واقعیت‌هایی است که در اکثر مسائل تولیدی و به ویژه تولید کارگاهی جهت ساده‌تر شدن مسئله از آن چشم‌پوشی می‌شود. برای نزدیک شدن

جواب بهینه مدل و سیستم واقعی باید پارامترهای زمان بین دو خرابی (MTBF) و نیز زمان لازم برای تعمیر خرابی (MTTR) در مدل وارد شوند.

پس از بیان کلیاتی درباره مسئله و عوامل ایجاد عدم قطعیت در آن، در ادامه به بررسی روش‌های مدل‌سازی و حل مسئله پرداخته می‌شود؛ این روش‌ها به دو دسته مدل‌های تحلیلی و شبیه‌سازی تقسیم می‌شوند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۲). مدل‌های تحلیلی در قالب روابط ریاضی مدل‌سازی می‌شوند و براساس توابع هدف، میزان سختی و خطی و غیرخطی بودن روش‌های مشخصی برای بهینه‌سازی آنها وجود دارد.

یکی از مهم‌ترین مدل‌های تحلیلی در مسئله تولید کارگاهی توسط مان (۱۹۶۶) ارائه شده است که در آن با استفاده از برنامه‌ریزی اعداد صحیح مختلط<sup>۱۲</sup> اقدام به مدل‌سازی مسئله تولید کارگاهی شده است. به‌علاوه در سال‌های اخیر، روش‌های شاخه و کران توسط لائو<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۴) و بالاسورامانیان<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۲)، ابتکاری (پیندو، ۲۰۰۵) و فراابتکاری (تانگ و همکاران، ۲۰۱۱؛ گوا<sup>۵</sup>، ۲۰۰۸؛ چن<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۲؛ پزلا و همکاران، ۲۰۰۸) برای حل مسئله تولید کارگاهی براساس روش تحلیلی پیشنهاد شده است.

از سوی دیگر مدل‌های شبیه‌سازی رفتار مدل را توصیف می‌کنند و برای آزمون‌های تحلیل حساسیت و ارزیابی سیستم به کار گرفته می‌شوند. این مدل‌ها قرابت زیادی به سیستم‌های واقعی تولید دارند و برای ساختن آنها نیازی به روابط ریاضی و در نظرگیری فرض‌های محدودکننده نیست. به‌عنوان مثال روش‌های اولویت‌دهی رایج در سیستم‌های تولید (FIFO)<sup>۱۹</sup>، SPT<sup>۲۰</sup>، LPT<sup>۲۱</sup>، EDD<sup>۲۲</sup> و... یا تعداد ماشین‌های

مناسب برای ایستگاه‌های کاری با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی بررسی و ارزیابی شده‌اند (وینود<sup>۲۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۱؛ چن<sup>۲۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۳؛ دومینیک<sup>۲۵</sup> و همکاران، ۲۰۰۴؛ ایکاسوقلی<sup>۲۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۰).

هر دو روش ذکر شده دارای مزایا و معایبی هستند که نولان<sup>۲۷</sup> و همکاران (۱۹۷۲) آن‌ها را بررسی و مورد مقایسه قرار داده است. بیشتر مدل‌های تحلیلی به دلیل خلاصه‌سازی بیش از حد، باعث از بین رفتن جزئیات سیستم می‌شوند؛ به‌علاوه در صورتی که پیچیدگی سیستم واقعی زیاد باشد این مدل‌ها توانایی خود را از دست می‌دهند؛ از طرفی نمی‌توان از مدل‌های شبیه‌سازی برای یافتن جواب مناسب برای سیستم استفاده کرد.

با ادغام روش شبیه‌سازی و تحلیلی می‌توان مدلی ساخت که مزایای هر دو روش را داشته باشد؛ این مدل‌ها، مدل‌های ترکیبی شبیه‌سازی-تحلیلی نامیده می‌شوند (سارگنت<sup>۲۸</sup>، ۱۹۹۴).

استفاده از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی در چند سال اخیر گسترش پیدا کرده است و پژوهشگران با کمک این روش سعی در کم کردن فاصله بین مدل و سیستم واقعی تولید داشته‌اند. در این زمینه (هالتوس<sup>۲۹</sup>، ۱۹۹۹) از شبیه‌سازی برای تحلیل اثر خرابی و قوانین اولویت‌دهی بر زمان‌های اتمام و میزان تأخیرها در سیستم تولید کارگاهی پویا استفاده کرده است. کلمت<sup>۳۰</sup> و همکاران (۲۰۰۷) با ترکیب مدل شبیه‌سازی و روش‌های جستجوی محلی سعی در کاهش زمان جریان و زمان نصب قطعه روی ماشین در یک سیستم تولید کارگاهی داشته‌اند. غلامی<sup>۳۱</sup> و همکاران (۲۰۰۹) یک سیستم تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر دارای خرابی را در نظر گرفته‌اند که زمان‌های ورود و فرایند در آن

قطعی و زمان خرابی‌ها تصادفی است. آنها با ترکیب شبیه‌سازی و الگوریتم ژنتیک سعی کرده‌اند تابع هدف چندگانه متشکل از زمان‌های اتمام و میانگین زمان‌های تأخیر را مینیمم کنند. کلمت و همکاران (۲۰۰۹) کیفیت و زمان رسیدن به جواب را در دو روش شبیه‌سازی-بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با هم مقایسه کرده‌اند و پس از بررسی مزایا و معایب دو روش، یک رویکرد ترکیبی براساس شبیه‌سازی و برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مسئله پیشنهاد کرده‌اند. مهدوی و همکاران (۲۰۱۰) از یک رویکرد تصمیم‌گیری براساس شبیه‌سازی در یک سیستم تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر استفاده کرده‌اند و با ترکیب آن با روش گرادیان سعی کرده‌اند آن را به سمت جواب بهینه برای تابع هدف زمان اتمام آخرین کار هدایت کنند. شهزاد و همکاران (۲۰۱۲) با شبیه‌سازی، یک سیستم تولید کارگاهی را مدل کرده‌اند و از داده‌کاوی برای کشف قوانین اولویت‌دهی مناسب در مسئله استفاده کرده‌اند؛ بدین منظور آنها از روش جستجوی ممنوع برای جستجوی فضای جواب مسئله استفاده کرده‌اند. امیرخانی و همکاران (۲۰۱۳) با شبیه‌سازی مسئله تولید کارگاهی دارای خرابی تصادفی و تغییر در قوانین اولویت‌دهی رایج در پشت صف هر ماشین با الگوریتم ژنتیک، سعی در یافتن روش اولویت‌دهی مناسب برای صف‌های مختلف در سیستم تولید داشته‌اند. کولکارنی و همکاران (۲۰۱۴) از ترکیب مدل شبیه‌سازی و برنامه‌ریزی خطی برای رسیدن به جواب بهینه در مسائل تولید کارگاهی معیار استفاده کرده‌اند. در جدول ۱ مهم‌ترین پژوهش‌های انجام شده در زمینه مدل‌سازی و حل مسائل تولید کارگاهی و تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر با روش شبیه‌سازی-بهینه‌سازی،

براساس شرایط مسئله و توابع هدف، طبقه‌بندی شده‌اند.

بررسی پژوهش‌های انجام شده در این حوزه نشان می‌دهد. برخلاف پتانسیل بالای رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی در مدل‌سازی و یافتن جواب مناسب برای مسئله تولید کارگاهی، مطالعات انجام شده در این حوزه از جامعیت لازم برخوردار نیست و روش‌های پیشنهاد شده قابلیت مدل‌سازی و یافتن جواب برای حالت خاصی از مسائل را دارند؛ از طرفی در بیشتر این پژوهش‌ها از عوامل ایجاد عدم قطعیت مانند خرابی‌ها و دوباره‌کاری‌ها که از ویژگی‌های ذاتی مسئله کارگاهی است چشم‌پوشی شده است.

مسئله در نظر گرفته شده در این پژوهش، یک مسئله پویای آفلاین است که در آن عوامل ایجاد عدم قطعیت مانند زمان‌های ورود سفارش‌های جدید، زمان‌های فرایند، فرایند‌های موردنیاز، زمان‌های خرابی، زمان لازم برای تعمیر و دوباره‌کاری‌ها به صورت تصادفی در نظر گرفته شده است و در آن اطلاعاتی از کارهایی که در آینده وارد سیستم خواهند شد در دسترس است.

در روش پیشنهادی برای این مسئله از یک ماتریس  $m \times n$  استفاده شده است که  $m$  تعداد ماشین‌های کارگاه و  $n$  تعداد کل محصولات موردپردازش روی ماشین‌هاست. این ماتریس جهت یافتن توالی بهینه از اصلی‌ترین تصمیم‌گیری لازم در مسائل زمان‌بندی که انتخاب اولویت پردازش کارها روی ماشین‌هاست استفاده می‌کند. ماتریس پیشنهاد شده به صورت هم‌زمان نقش نمایش ماتریسی برای الگوریتم ژنتیک و بردار کنترلی برای مدل شبیه‌سازی را ایفا می‌کند و براساس آن، جواب‌های مناسب برای مسئله از طریق عملگرهای الگوریتم ژنتیک تولید، و مقادیر تابع هدف آنها با استفاده از مدل شبیه‌سازی حاصل می‌شوند.

جدول(۱): مدل‌های ترکیبی به‌کارگرفته‌شده در مسائل تولید کارگاهی

تابع هدف	روش حل	شرایط مسئله					مقاله
		دوباره‌کاری	خرابی	زمان پردازش	ورود کارها	سیستم تولید	
Flow time Tardy jobs $\bar{T}$	Simulation+ dispatching rules	-	✓	قطعی	قطعی	JSP	هالتوس، ۱۹۹۹
Set up time Idle time	Simulation+ local search algorithms	-	-	احتمالی	احتمالی	JSP	کلمت و همکاران، ۲۰۰۷
$C_{max}$ $\bar{T}$	GA+ simulation	-	✓	قطعی	قطعی	FJSP	غلامی و همکاران، ۲۰۰۹
$C_{max}$	MIP vs. Simulation-based optimization	-	-	قطعی	قطعی	JSP	کلمت و همکاران، ۲۰۰۹
$C_{max}$	Simulation+ Gradient based optimization	-	-	احتمالی	احتمالی	FJSP	مهدوی و همکاران، ۲۰۱۰
$L_{max}$	Simulation based + +TS optimization data mining	-	-	احتمالی	قطعی	JSP	شهراد و همکاران، ۲۰۱۲
$C_{max}$	Simulation based optimization + GA+ dispatching rules	-	✓	احتمالی	احتمالی	JSP	امیرخانی و همکاران، ۲۰۱۳
$C_{max}$	Simulation based optimization +Linear programming	-	-	قطعی	قطعی	JSP	کولکارنی و همکاران، ۲۰۱۴
$C_{max}$ $\bar{T}$	Simulation based optimization + GA	✓	✓	قطعی احتمالی	قطعی احتمالی	JSP	روش پیشنهادی پژوهش

در این صورت در نظرگیری فرض‌های محدودکننده در مسئله که از مشکلات مدل‌های تحلیلی است از بین می‌رود و از طرف دیگر می‌توان جواب مناسب برای آن را با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک به دست آورد. بر این اساس نوآوری‌های موجود در این مقاله به شرح زیر است:

- استفاده از شبیه‌سازی- بهینه‌سازی برای اولویت‌دهی مناسب در مسئله پویای احتمالی

در چنین حالتی شرایط واقعی سیستم تولیدی با استفاده از مدل شبیه‌سازی‌شده در مسئله اعمال می‌شود و می‌توان انواع عوامل ایجاد عدم قطعیت در سیستم، از جمله زمان‌های ورود و فرایند تصادفی، خرابی‌ها و دوباره‌کاری‌ها را در مدل شبیه‌سازی شده وارد کرد و جواب مناسب برای آن را با جستجوی هوشمند از طریق الگوریتم ژنتیک به دست آورد.

## ۲- توصیف مسئله

### ۲-۱- سیستم تولید

مدلی که مان (۱۹۶۶) برای مسئله سنتی تولید کارگاهی ارائه کرده، از مهم‌ترین مدل‌های تحلیلی در ادبیات این مسئله است که در آن مفروضات زیر در نظر گرفته شده است:

- تمامی کارها از زمان آغاز فرایند در دسترس هستند.
- $n$  کار و  $m$  ماشین در سیستم وجود دارد.
- هر کار زمان فرآیند مشخصی دارد و باید با یک ترتیب خاص از تمامی  $m$  ماشین عبور کند.
- در هر لحظه ماشین می‌تواند فقط یک کار را انجام دهد.
- در صورت آزاد بودن ماشین و نیاز یک محصول به آن، هیچ دلیلی برای اجرانشدن فرایند مربوط به آن محصول روی ماشین وجود ندارد.
- هیچ زمان اتمام موردانتظاری وجود ندارد.
- تابع هدف مینیمم کردن زمان اتمام آخرین کار است.

براساس این مدل یک مسئله تولید کارگاهی با  $n$  کار و  $m$  ماشین، شامل  $m \cdot n \cdot (n - 1) / 2$  متغیر باینری و  $m \cdot n^2$  محدودیت خواهد بود. برای ارزیابی روش پیشنهادی بر مسئله تولید کارگاهی، در ابتدا از مسائل معیار کلاسیک موجود استفاده شده است که برای تعیین تعداد پارامترها و محدودیت‌ها در این مسائل از روابط مدل مان استفاده شده است.

پس از ارزیابی روش پیشنهادی برای مدل‌های کلاسیک سعی شده سه عامل ایجاد عدم قطعیت اشاره شده در مقدمه، به مسئله افزوده شود تا مدل از هر لحاظ به سیستم واقعی تولید نزدیک شود. برای

تولید کارگاهی به‌گونه‌ای که برای در نظرگیری محدودیت‌های مسئله از مدل شبیه‌سازی و برای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

- استفاده از منطق عمومی مسائل توالی عملیات، مبنی بر تصمیم‌گیری در باره اولویت پردازش کارها در صف ماشین‌ها و در نتیجه توانایی رویکرد پیشنهادی در یافتن جواب مناسب برای انواع مسائل قطعی / احتمالی و ایستا/پویا
  - تعریف یک ماتریس اولویت‌دهی که در مدل شبیه‌سازی نقش بردار کنترلی و در الگوریتم ژنتیک نقش نمایش ماتریسی جواب را ایفا می‌کند و ارتباط بین الگوریتم ژنتیک و مدل شبیه‌سازی را برقرار می‌کند.
  - در نظر گرفتن عامل دوباره‌کاری در کنار سایر عوامل ایجاد عدم قطعیت در مسئله
- ساختار مقاله به این صورت است که در بخش دوم رویکرد به‌کار گرفته برای حل مسئله تشریح می‌شود، در این قسمت ابتدا درباره کلیت روش شبیه‌سازی-بهینه‌سازی توضیحاتی ارائه می‌شود و سپس چگونگی مدل‌سازی و بهینه‌سازی مسئله توصیف می‌شود. بخش سوم مقاله به بررسی انواع سیستم‌های تولید کارگاهی به‌کار گرفته‌شده در مسئله و نیز تابع هدف موردنظر مقاله می‌پردازد. در بخش چهارم نتایج به‌دست‌آمده ارائه می‌شود و نتایج حاصل، با سایر روش‌های موجود در ادبیات مسئله مقایسه می‌شود. بخش آخر مقاله نیز به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادی آتی اختصاص داده شده است.

زمان بین دو ورود متوالی ۰/۵۵ واحد زمانی خواهد بود.

برای در نظرگیری خرابی ماشین‌ها در حین فرایند باید دو مقدار زمان بین دو خرابی متوالی و زمان تعمیر تعیین شود که مقادیر موجود برای این دو عامل در مقالات براساس توضیح‌نمایی تولید می‌شوند (هالئوس، ۱۹۹۹)؛ از این رو زمان بین دو خرابی توزیع‌نمایی با میانگین ۲۵۰ واحد زمانی برای هر ایستگاه و زمان تعمیر‌نمایی با میانگین ۲۰ واحد زمانی در نظر گرفته شده است.

با توجه به وجود عوامل اثرگذار در سیستم تولید کارگاهی به دلیل غیراتوماتیک بودن سیستم، از جمله تفاوت در اپراتورها، ماشین‌ها و چگونگی نصب قطعه روی ماشین وجود محصولات نامنطبق با معیارهای کیفی در این سیستم امری رایج است؛ با این حال در بیشتر مقالات فرض شده هر محصول فقط یک بار روی ماشین پردازش می‌شود. در اینجا برای نزدیک شدن مدل با سیستم واقعی تولید فرض شده ۱۰ درصد از محصولات هر ایستگاه کاری بعد از بازرسی کیفی نیاز به دوباره‌کاری پیدا می‌کنند که دوباره به صف ایستگاه ارجاع داده می‌شوند و فرایند مورد نظر دوباره بر آنها انجام می‌شود.

## ۲-۲- تابع هدف

توابع هدف مختلفی را می‌توان برای یک مسئله زمان‌بندی تعریف کرد که پرکاربردترین تابع هدف به کاررفته در مقالات مینیمم کردن زمان اتمام آخرین کار در سیستم ( $G_{max}$ ) است. برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی با مسائل معیار تولید کارگاهی کلاسیک، از این تابع هدف استفاده شده است. با این

این کار با مراجعه به ادبیات مسئله سعی شده است پارامترهای مناسب برای سیستم تولید احتمالی و پویا تعریف شود. سیستمی بین ۴ تا ۱۰ ماشین، پیچیدگی مناسبی برای مسئله ایجاد می‌کند (رانگساریتراتسامی<sup>۳۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۴)؛ بنابراین در این مقاله از ۸ ایستگاه کاری در سطح کارگاه استفاده شده است که در هر ایستگاه ۲ ماشین کاملاً مشابه وجود دارد که در صورت آزاد بودن هر کدام از ماشین‌های موجود در ایستگاه، باید کاری به آن تخصیص داده شود. با فرض اینکه تمامی محصولات برای اتمام فرایندهایشان باید از همه ماشین‌ها عبور کنند توالی کارها، براساس جایگشت هشت‌تایی و به صورت تصادفی تعیین می‌شود.

مناسب‌ترین توزیع برای زمان‌های بین دو ورود متوالی و نیز زمان پردازش کارها روی ماشین‌ها توزیع‌نمایی است (رانگساریتراتسامی و همکاران، ۲۰۰۴)؛ بنابراین زمان پردازش کارها بر ماشین‌ها دارای توزیع‌نمایی با میانگین یک واحد زمانی در نظر گرفته شده است. برای تولید زمان‌های بین ورود دو کار متوالی باید عامل ضریب بهره‌مندی ماشین‌ها هم لحاظ شود. از این رو برای تولید زمان بین دو ورود متوالی از رابطه (۱) استفاده شده است (رانگساریتراتسامی و همکاران، ۲۰۰۴).

$$\lambda = \frac{\mu_p \mu_g}{\rho n_m} \quad (1)$$

در این رابطه مقدار متوسط زمان فرایند ( $\mu_p$ ) برابر با یک واحد زمانی، متوسط تعداد ماشین‌های موردنیاز برای هر محصول ( $\mu_g$ ) برابر با ۸، ضریب بهره‌مندی از ماشین ( $\rho$ ) ۰/۹ و تعداد ماشین‌های موجود در کارگاه ( $n_m$ ) ۱۶ در نظر گرفته شده است و بر این اساس



### ۳- روش حل مسئله

همان‌طور که گفته شد استفاده از روش ترکیبی شبیه‌سازی-تحلیلی برای مدل‌سازی و تلاش برای یافتن جواب بهینه برای مسئله براساس این مدل‌ها رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی نامیده می‌شود. اگر یک مسئله شبیه‌سازی-بهینه‌سازی همراه با محدودیت‌هایش به فرم زیر نمایش داده شود:

$$(5) \quad \max_{X \in \Phi} \min H(x)$$

به‌طوری که داشته باشیم:

$$(6) \quad H(x) = E(L(x), \varepsilon)$$

در این صورت  $(L(x), \varepsilon)$  برابر با مقدار تابع هدف برای یک نمونه خاص از مسئله و  $\varepsilon$  مقدار آثار تصادفی در سیستم است.  $X$  در این رابطه، بردار کنترلی برای مسئله و  $\Phi$  مجموعه محدودیت‌ها برای  $X$  است. در روش پیشنهادی، مسئله با شرایط گفته‌شده در قسمت قبل و با کمک شبیه‌سازی مدل شده و سپس سعی شده با ایجاد ارتباط بین این مدل و الگوریتم ژنتیک جواب مناسب برای آن به دست آید. یکی از عوامل اصلی در پیاده‌سازی مدل ترکیبی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی تعداد دفعاتی است که مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی با هم ارتباط برقرار می‌کنند. بر این اساس مدل‌های ترکیبی را می‌توان به دو گروه بدون تکرار و با تکرار تقسیم کرد. حالت بدون تکرار معمولاً برای ارزیابی و بررسی صحت جواب بهینه به کار گرفته می‌شود و در حالت با تکرار در هر مرحله از بازخورد مرحله قبلی برای بهبود جواب استفاده می‌شود. با توجه به درجه سختی مسائل زمان‌بندی، روش با تکرار برای این مسئله مناسب‌تر خواهد بود. در این رویکرد بعد از انجام شبیه‌سازی، بازخورهای موردنظر از آن گرفته شده و به مسئله

حال کاهش تأخیرها در سیستم نیز یکی از پارامترهای مهم برای واحدهای تولیدی است. معمولاً در زمان دریافت سفارش، زمان اتمام موردانتظار  $(D_i)$  برای هر کار توسط مشتری یا سازمان تعیین می‌شود و در صورتی که کار موردنظر دیرتر از زمان موردانتظار تمام شود هزینه‌هایی به سیستم تحمیل خواهد شد؛ از این رو میزان تأخیر در سیستم برای هر کار براساس رابطه (۲) تعیین می‌شود.

$$(2) \quad T_i = \max\{0, C_i - D_i\}$$

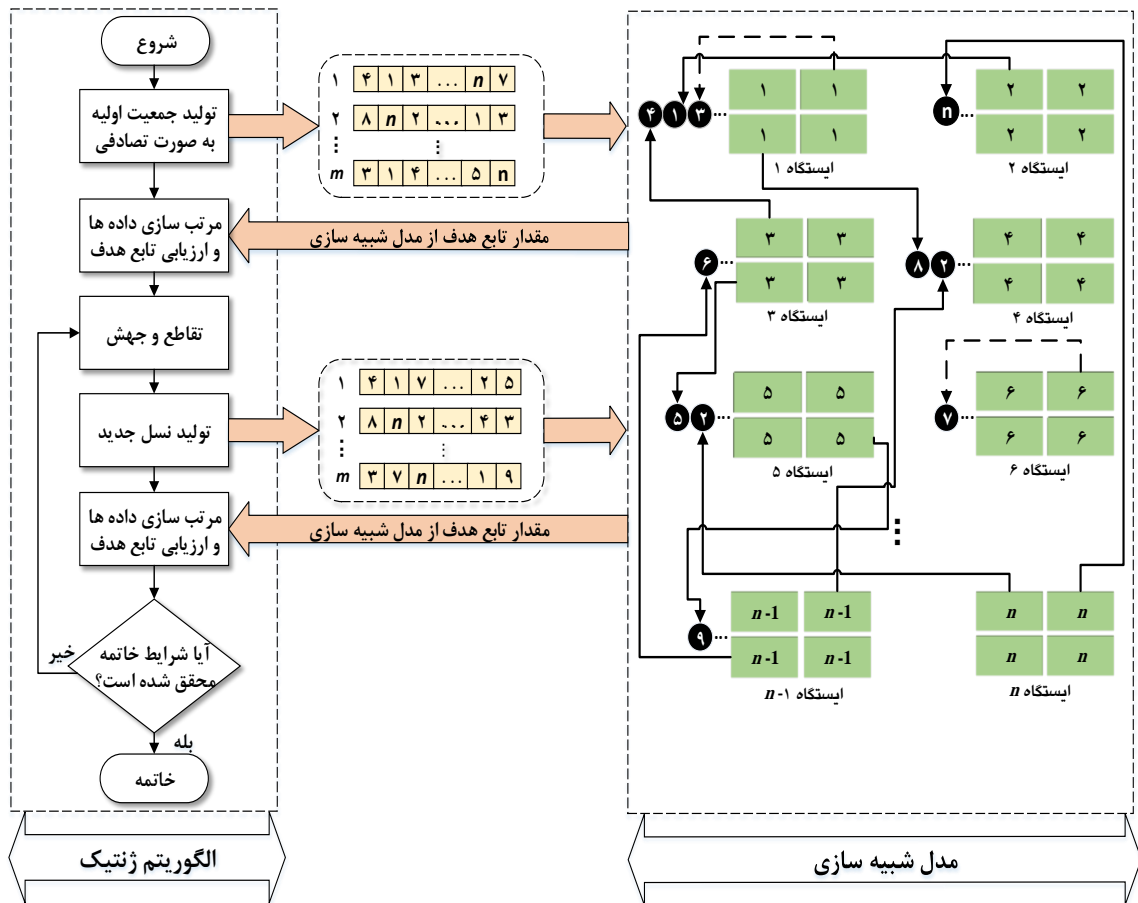
این رابطه  $C_i$  زمان اتمام کار  $i$  و  $D_i$  زمان اتمام مورد انتظار کار  $i$  است. برای حالت تصادفی و پویای مسئله، از تابع چند هدفه‌ای که ادیبی و همکاران (۲۰۱۰) به کار گرفته‌اند، براساس  $C_{max}$  و  $T$  استفاده شده است که مقادیر مناسبی را برای تصمیم‌گیری درباره عملکرد سیستم تولید می‌کند و به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود.

$$(3) \quad f = 5 \times C_{max} + 2 \times \sum_{i=1}^n T_i$$

با توجه به آزمایش‌های صورت‌گرفته در این مسئله، واریانس  $C_{max}$  کمتر از  $T$  است از این رو ضریب مناسب برای زمان اتمام آخرین کار برابر با ۵ و برای میزان تأخیرها این ضریب ۲ در نظر گرفته شده است (رانگساریتراسامی و همکاران، ۲۰۰۴).

برای تعیین زمان اتمام موردانتظار جهت تعیین میزان تأخیر از روش کل محتوای کار<sup>۹</sup> استفاده شده است که براساس رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$(4) \quad D_i = A_i + 3.6 \sum_{j=1}^m p_{ij}$$



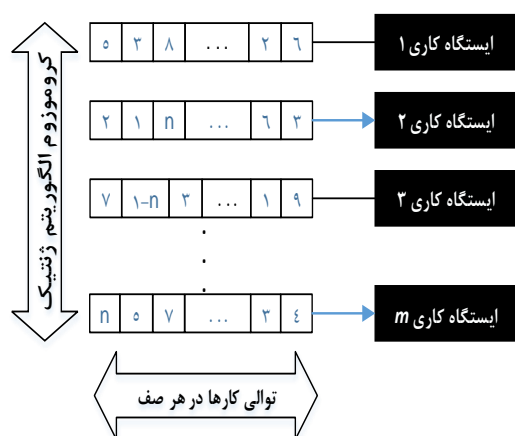
شکل ۱. رویکرد کلی به کار گرفته شده برای حل مسئله

اولویت به کدام کار باید تخصیص داده شود تا تابع هدف مورد نظر مینیمم شود. اگر در حالت قطعی، کارگاهی با  $m$  ماشین و  $n$  کار را در نظر بگیریم در این صورت  $n!$  حالت برای اولویت دهی به کارها وجود خواهد داشت که با وجود  $m$  صف، در کل  $(n!)^m$  راه حل متفاوت برای حل این مسئله وجود دارد؛ بنابراین برای بهینه سازی باید از یک روش جستجوی هدفمند استفاده شود تا در عین سرعت در رسیدن به جواب، فضای جواب را برای متغیرهای تصمیم گیرکمی تعریف شده در مسئله، به صورت مناسب جستجو کند؛ برای این منظور الگوریتم ژنتیک از کارایی مناسبی برخوردار است (پائول، ۱۹۹۸)؛ بنابراین رویه کلی در روش پیشنهادی به این صورت است که یک جمعیت اولیه به صورت تصادفی برای

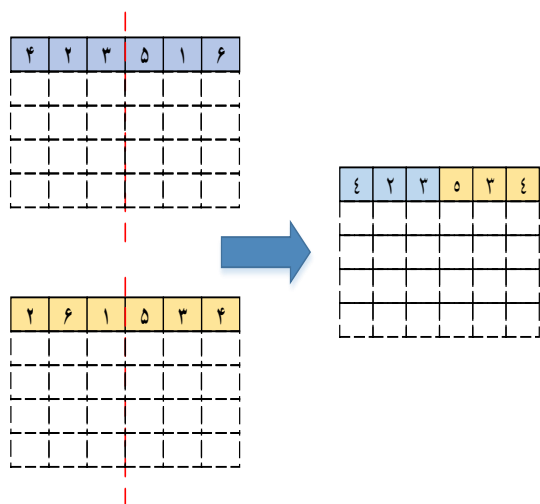
سعی می شود مدل به سمت جواب بهینه هدایت شود و نتایج دوباره در مدل شبیه سازی اعمال شود و این روند تا رسیدن به یک جواب مناسب تکرار می شود (شکل ۱). گفتنی است در قسمت شبیه سازی شکل ۱، پیکان های مشکی توپر مسیر حرکت محصولات روی ایستگاه های مختلف و پیکان های خط چین دوباره کاری ها را نمایش می دهند؛ مثلاً محصول شماره چهار پس از انجام شدن فرایند مورد نظرش روی ایستگاه کاری سه، در صف ایستگاه شماره یک قرار گرفته است و محصول سه در ایستگاه یک نیاز به دوباره کاری داشته و به همین دلیل به صف بازگردانده شده است.

مهم ترین تصمیمی که در یک مسئله توالی باید گرفته شود این است که در پشت صف ماشین ها

نظر داشت که اگر از روش معمول تقاطع استفاده شود امکان تولید کروموزوم‌های نامناسب وجود دارد؛ مثلاً اگر کروموزومی با ۶ ژن را در نظر بگیریم ایجاد تقاطع تکی باعث تولید دو اولویت برای کارهای ۴ و ۳ در یکی از فرزندان می‌شود و اولویت کار یک حذف می‌شود (شکل ۳).



شکل ۲. چگونگی تعریف کروموزوم‌ها



شکل ۳. ایجاد کروموزوم نامناسب در حالت تقاطع معمولی

بنابراین برای تولید کروموزوم‌های مناسب بعد از تعیین محل تقاطع، قسمت اول والد اول نگه داشته می‌شود، سپس اعداد مربوط به ژن‌های بخش اول والد اول از والد دوم حذف می‌شود و قسمت دوم

تعیین اولویت‌دهی کارهای موجود در صف ماشین‌ها تولید می‌شود. سپس این اعضای این جمعیت به‌عنوان یک بردار کنترلی وارد مدل شبیه‌سازی می‌شوند و توابع هدف موردنظر برای مسئله از مدل شبیه‌سازی استخراج می‌شوند و به‌عنوان مقدار تابع برازندگی به الگوریتم ژنتیک داده می‌شوند و الگوریتم ژنتیک تغییراتی روی این جمعیت ایجاد می‌کند و دوباره مدل براساس تغییرات حاصله شبیه‌سازی می‌شود و این روند ادامه پیدا می‌کند.

### ۳-۱- الگوریتم ژنتیک

گام‌های اصلی جهت پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک برای یک مسئله تعیین چگونگی نمایش، تقاطع، جهش و شرایط خاتمه برای مسئله است. بدین منظور شرایط زیر برای مدل برقرار شده است:

الف) نمایش: برای تعریف کروموزوم‌ها در الگوریتم ژنتیک به جای تعریف رشته‌ای از اعداد، از یک ماتریس  $m \times n$  استفاده شده است که هر سطر در آن اولویت کارها در صف پشت یک ماشین را مشخص می‌کند و بر این اساس به تعداد ماشین‌های موجود در کارگاه، سطر برای ماتریس وجود خواهد داشت. هر کار شماره مخصوص خود را دارد و زمانی که ماشین در یکی از ایستگاه‌ها آزاد شد، کاری که در پشت صف ماشین اولویت بالاتری دارد روی آن پردازش می‌شود (شکل ۲).

با این شرایط جمعیت معینی از کروموزوم‌ها تولید می‌شود و مقادیر تابع هدف آنها از مدل شبیه‌سازی شده به دست می‌آید و مرتب می‌شود.

ب) تقاطع: پس از انتخاب والدین با چرخه رولت، برای تعداد مشخصی از افراد جامعه عمل تقاطع تکی و دوتایی با احتمال برابر انجام می‌شود. باید این را در

در این شرایط، استفاده از دو نرم‌افزار متفاوت برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی می‌تواند سرعت رسیدن به جواب را تحت تأثیر قرار دهد. با بررسی‌های انجام‌شده در این حوزه برای شبیه‌سازی سیستم تولید، از جعبه‌ابزار سیم‌ایونتز<sup>۳۸</sup> از مجموعه سیمولینک<sup>۴۰</sup> متلب استفاده شده است. این جعبه‌ابزار برای شبیه‌سازی سیستم‌های گسسته پیشامد طراحی شده و اجزای مختلف سیستم در آن، به صورت بلاک‌هایی قابل تعریف است. در این جعبه‌ابزار می‌توان کدنویسی‌های مورد نیاز برای مدیریت تخصیص‌ها را انجام داد. ترکیب این امکانات با سیستم کدنویسی متلب، قابلیت انعطاف‌پذیری فراوانی ایجاد می‌کند. شبیه‌سازی برای روش حل ارائه شده در سیم‌ایونتز از بخش‌های زیر تشکیل شده است:

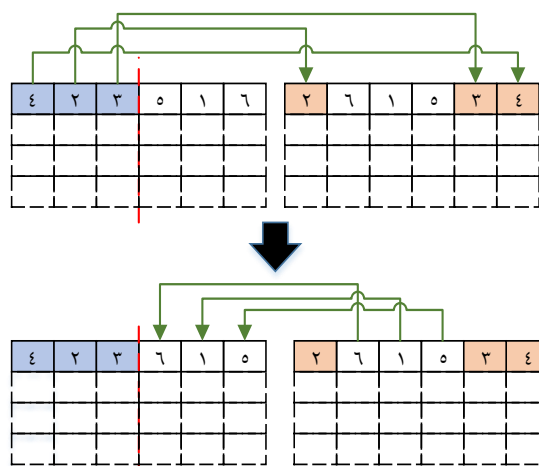
• بخش اول: تولید نهادها

در مدل پیشنهادی محصولاتی که برای تکمیل فرایندهایشان نیازمند ماشین‌های کارگاه هستند به عنوان نهاد در نظر گرفته شده‌اند. ماتریس arrival با ابعاد  $1 \times n - 1$  بر اساس تابع توزیع فواصل زمانی بین ورود دو محصول متفاوت ایجاد شده و با اتصال آن به بلاک «تولید نهاد بر اساس زمان» اقدام به تولید نهاد برای مدل می‌کند. در مسائلی که سیستم تولیدی حالت ایستا دارد و در دسترس بودن تمامی کارها از ابتدای فرایند از مفروضات مسئله است این بردار مقدار صفر به خود می‌گیرند.

• بخش دوم: تخصیص تخصیص‌های لازم به هر نهاد

با اختصاص یک سری از داده‌ها به هر نهاد می‌توان در مواقع نیاز در قسمت‌های مختلف مدل از آنها

کروموزوم اول براساس ژن‌های باقیمانده از والد دوم و به همان ترتیب در قسمت دوم کروموزوم اول وارد می‌شود (شکل ۴). این کار برای والد دوم تکرار می‌شود و به این ترتیب از تکرار و حذف اولویت‌ها در کروموزوم‌ها جلوگیری می‌شود.



شکل ۴. نحوه انجام تقاطع تکی

(ج) جهش: بدین منظور به صورت تصادفی تعدادی از اعضای جامعه انتخاب می‌شوند و برای هر سطر والد، دو نقطه به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و اعداد مربوط به آن نقاط تصادفی با یکدیگر عوض می‌شوند.

(د) شرایط اتمام: شرایط خاتمه الگوریتم برای حالت قطعی و احتمالی با هم فرق می‌کند که در هر بخش به آن اشاره خواهد شد.

۳-۲- مدل شبیه‌سازی شده مسئله

برای استفاده از روش حل ترکیبی، باید مدل شبیه‌سازی و روش بهینه‌سازی به صورت مناسب و سریعی با یکدیگر ارتباط برقرار کنند تا با اعمال شرایط بردار کنترلی در مدل و حصول تابع هدف موردنظر، روش حل به سمت جواب بهینه حرکت کند.

گرفت محصول دوم فرایند دوم موردنیازش را طی می‌کند که با مراجعه به ماتریس‌های مسیر و زمان پردازش می‌توان اطلاعات مربوط به فرایندهای هر کار را در هر مرحله از این سه ماتریس استخراج کرد و به آنها تخصیص داد (شکل ۶).

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & \dots & m-1 & m \\ m+1 & m+2 & m+3 & \dots & 2m-1 & 2m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (n-1)*m+1 & \dots & \dots & \dots & n*m-1 & n*m \end{bmatrix}$$

شکل ۶. ماتریس نشانگر

- موعدها تحویل برای هر کار به منظور تعیین میزان تأخیرها به صورت ماتریس  $1 \times n$  و با نام DD تعیین و به نهادها تخصیص داده می‌شود. برای مشخص کردن موعدها تحویل محصولات از روش TWK استفاده شده است.

- اولویت کارها در صف ماشین‌ها: چون اولویت هر کار روی هر ماشین ویژگی منحصر به فرد آن است  $m$  خصیصه برای هر کار تعریف می‌شود و اعداد مربوط به اولویت‌دهی از بردار کنترلی دریافت و در آن ذخیره می‌شود.

- بخش سوم: ارسال نهادها به صف ماشین‌ها محصولات که وارد کارگاه شده‌اند با یکی از فرایندهایشان به پایان رسیده و به فرایندهای دیگری نیاز دارند باید به صف ماشین بعدی موردنیازشان هدایت شوند. در این بخش براساس خصیصه Route هر محصول در صف ماشین موردنیاز قرار می‌گیرد.

- بخش چهارم: سیستم صف و ماشین‌ها اولویت‌دهی به کارها در صف ماشین‌ها براساس خصیصه هر کار اعمال می‌شود.

- بخش پنجم: تعیین فرایند بعدی برای کارها

استفاده نمود. در بخش دوم مدل سعی می‌شود اطلاعات زیر در قالب خصیصه ضمیمه‌ی نهادها شود:

- شماره هر محصول برای پیگیری‌های بعدی در قالب ماتریس J\_Number و در ابعاد  $1 \times n$  ایجاد و به هر کار تخصیص داده می‌شود.

- زمان‌های پردازش کارها روی ماشین‌ها در قالب ماتریس P\_time و در ابعاد  $n \times m$  در نظر گرفته می‌شود (شکل ۵).

$$\begin{bmatrix} P_{11} & \dots & P_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & \dots & P_{nm} \end{bmatrix}$$

شکل ۵. ماتریس زمان پردازش

با توجه به اینکه با ورود کارها به سیستم تولیدی باید زمان‌های فرایند اول هر کار مشخص شود، ستون اول این ماتریس در نظر گرفته می‌شود و به عنوان خصیصه زمان فرایند به کارها تخصیص داده می‌شود.

- مسیر کارها روی ماشین‌ها، در ماتریسی مشابه ماتریس زمان‌های پردازش تعریف می‌شود و با نام Route در نظر گرفته می‌شود.

- ماتریس نشانگر برای نمایش وضعیت کار در سطح کارگاه و با نام amalg در نظر گرفته شده است. در این ماتریس اعداد ۱ تا  $n \times m$  در قالب یک ماتریس  $n \times m$  مرتب شده‌اند. با مشخص کردن این خصیصه برای هر کار می‌توان تعیین کرد هر محصول در سیستم تولید در حال تکمیل فرایند چندم است.

برای مثال در صورتی که مقدار این خصیصه برای محصول دوم برابر با  $m + 2$  باشد با توجه به قرارگیری این آرایه در سطر دوم که نشان‌دهنده شماره محصول و ستون دوم که نشان‌دهنده شماره فرایند انجام شده بر محصول است می‌توان نتیجه

شده و در مرحله بعدی رویکرد پیشنهادی روی یک سیستم پویای غیرقطعی اجرا شده است.

#### ۴-۱- مقایسه نتایج حاصل برای مسائل معیار با سایر روش‌های فراابتکاری موجود

در این بخش سعی می‌شود عملکرد روش پیشنهادی در همگرایی به مقادیر بهینه با قسمتی از الگوریتم‌های متاهیورستیک جدید پیشنهاد شده مقایسه شود.

برای این کار از روش‌هایی که اسدزاده و همکاران (۲۰۱۰)، کیساری و همکاران (۲۰۱۳) و بانهارنساگون و همکاران (۲۰۱۰) پیشنهاد کرده‌اند، استفاده شده است. آنها به ترتیب از تکنیک‌های الگوریتم ژنتیک، کولونی مورچه (ABC) و بهینه‌سازی براساس تدریس-آموزش (TLBO) برای حل مسئله استفاده کرده‌اند.

برای تعیین سه عامل تعداد جمعیت اولیه، درصد تقاطع و درصد جهش الگوریتم ژنتیک در این قسمت از روش تاگوچی استفاده شده است؛ بدین صورت که برای هر کدام از عوامل ذکر شده ۴ سطح و برای هر سطح ۳ تکرار در نظر گرفته شد و با در نظر گرفتن مقادیر کوچک‌تر- بهتر، مناسب‌ترین مقدار برای این سه عامل با ۱۰۰ مرتبه اجرای الگوریتم ژنتیک و استفاده از روش تاگوچی به صورت جدول ۲ حاصل شد.

جدول (۲): پارامترهای الگوریتم ژنتیک

پارامتر	مقدار
تعداد تکرارها	۱۰۰
جمعیت اولیه	۳۰
درصد تقاطع	۰/۷۰
درصد جهش	۰/۱۵

بعد از اتمام هر کدام از فرایندهای محصولات، باید تغییراتی در خصیصه‌ها ایجاد شود. در این راستا شماره فرایند، زمان فرایند و ماشین بعدی مورد نیاز برای هر محصول باید مشخص شود. بدین منظور از کدنویسی در داخل مدل شبیه‌سازی استفاده شده است. بر این اساس خصیصه مربوط به شماره فرایند برای هر محصول بررسی می‌شود و با توجه به اتمام فرایند مورد نظر بر محصول یک واحد به خصیصه مرتبط با شماره فرایند افزوده می‌شود. به تبع این افزایش، تغییرات در ویژگی مربوط به ماشین بعدی و زمان فرایند مورد نیاز برای فرایند بعدی به محصول تخصیص داده می‌شود. در قسمت پایانی این کد، در صورتی که یک محصول تمامی فرایندهای مورد نیاز را طی کرده باشد از سیستم خارج می‌شود و در غیر این صورت به بخش سوم تحویل داده می‌شود تا وارد صف ماشین مورد نیاز بعدی شود.

• بخش ششم: مرحله ثبت اطلاعات زمان اتمام و تأخیرها

در این مرحله زمان اتمام تولید محصول و میزان تأخیر هر پاسخ تولید شده براساس خصیصه اولویت‌دهی ثبت می‌شود و مقدار تابع هدف براساس رابطه (۳) به دست می‌آید و در اختیار بخش بهینه‌سازی قرار می‌گیرد.

#### ۴- نتایج محاسبات

رویکرد پیشنهادی در سه مرحله ارزیابی شده است. در مرحله اول روش پیشنهادی با قسمتی از روش‌های فراابتکاری جدید موجود مقایسه شده است. در مرحله دوم کیفیت و زمان حل نتایج حاصل از روش پیشنهادی با روش‌های دقیق حل مسئله بررسی

جدول (۳): مقایسه نتایج حاصل از روش پیشنهادی با تعدادی از الگوریتم‌های متاهیورستیک

مسئله	ابعاد	*BKS	[31] PaGA	[32] ABC	TLBO [33]	روش پیشنهادی
orb01	۱۰×۱۰	۱۰۵۹	۱۱۴۹	۱۰۵۹	۱۰۵۹	۱۱۱۲
orb02	۱۰×۱۰	۸۸۸	۹۲۹	۸۸۸	۸۸۸	۹۱۱
orb03	۱۰×۱۰	۱۰۰۵	۱۱۲۹	۱۰۰۵	۱۰۰۵	۱۰۵۴
orb04	۱۰×۱۰	۱۰۰۵	۱۰۶۲	۱۰۰۵	۱۰۰۵	۱۰۴۷
orb05	۱۰×۱۰	۸۸۷	۹۳۶	۸۸۶	۸۸۶	۹۰۹
orb06	۱۰×۱۰	۱۰۱۰	۱۰۶۰	۱۰۱۰	۱۰۱۰	۱۰۶۰
orb07	۱۰×۱۰	۳۹۷	۴۱۶	۳۹۷	۳۹۷	۴۱۶
orb08	۱۰×۱۰	۸۹۹	۱۰۱۰	۸۹۹	۸۹۹	۹۵۶
orb09	۱۰×۱۰	۹۳۴	۹۹۴	۹۳۴	۹۳۴	۹۴۲
orb10	۱۰×۱۰	۹۴۴	-	۹۴۴	۹۴۴	۹۶۱

\*Best known solution

بدون زمان گزارش می‌شود. به دلیل اینکه زمان رسیدن به جواب دارای حالت تصادفی است آنها الگوریتم ژنتیک را ۲۰ مرتبه اجرا کرده‌اند و از زمان رسیدن به جواب میانگین گرفته‌اند. همین رویه دوباره با روش پیشنهادی اجرا شد و نتایج حاصل برای مقایسه به جدولی که آنها ارائه کرده‌اند، اضافه شد (جدول (۴)).

بر اساس نتایج به دست آمده در واحد زمان، مشخص است که در مسائل با مقیاس کوچک، رویکرد برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط در کوتاه‌ترین زمان ممکن به جواب بهینه مسئله می‌رسد؛ ولی الگوریتم شبیه‌سازی-بهینه‌سازی تقریبی از جواب بهینه را ارائه می‌کند. با افزایش ابعاد مسئله به تدریج برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط از رسیدن به جواب بهینه دقیق باز می‌ماند و روش شبیه‌سازی-بهینه‌سازی جواب‌های بهتری را حاصل می‌کند.

به طوری که در مسئله معیاری با ۲۰ ماشین و ۱۰۰ کار رویکرد برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط قادر به یافتن جواب مناسب برای مسئله نیست؛ بنابراین با افزایش ابعاد مسئله، رویکرد پیشنهادی حتی بر مسئله سنتی تولید کارگاهی با زمان‌های ورود و فرایند قطعی و

نتایج محاسبات بر مسائل Orb01-Orb10 کتابخانه تحقیق در عملیات نشان می‌دهد که روش پیشنهادی مبتنی بر ژنتیک نتایج بهتری نسبت به روش مشابه PaGA تولید می‌کند؛ لیکن نسبت به روش‌های کلونی مورچه و تدریس-آموزش بدتر عمل می‌کند.

#### ۴-۲- مقایسه نتایج حاصل برای مسائل معیار با

##### سایر روش‌های حل دقیق مسئله

در بخش اول سعی شده است رویکرد پیشنهادی روی مسائل معیار تولید کارگاهی سنتی در ابعاد مختلف اجرا شود و با نتایج حاصل از روش‌های دقیق حل مقایسه شود. در این زمینه کلمت و همکاران قسمتی از این مسائل را با دو روش برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و شبیه‌سازی-بهینه‌سازی حل کرده‌اند و با هم مقایسه کرده‌اند. آنها برای پایان الگوریتم حداکثر زمان اجرا ۳۰۰ ثانیه را در نظر گرفته‌اند و در صورتی که جواب دقیق بهینه در زمان تعیین شده به دست آید، الگوریتم متوقف می‌شود و زمان رسیدن به جواب در داخل پارانتز گزارش می‌شود و در غیر این صورت مقدار تابع هدف حاصل شده در ۳۰۰ ثانیه

جدول (۴): مقایسه نتایج رویکرد پیشنهادی با روش MIP و روش کلمت و همکاران برای مسائل معیار

مسئله	کار × ماشین	تعداد متغیرهای باینری	تعداد محدودیت‌ها	جواب حاصله (زمان)	نتایج به دست آمده توسط کلمت و همکاران (زمان)	جواب MIP (زمان)	جواب مسئله
FT06	۶×۶	۹۰	۲۱۶	۵۸	۵۸	۵۵ (۰/۲۵)	۵۵۵
LA01	۱۰×۵	۲۲۵	۵۰۰	۶۶۶ (۱۲/۷۵)	۶۶۶ (۵/۵۵)	۶۶۶ (۵/۵۵)	۶۶۶
LA05	۱۰×۵	۲۲۵	۵۰۰	۵۹۳ (۸/۲۸۵)	-	۵۹۳ (۶/۱۵)	۵۹۳
ABZ6	۱۰×۱۰	۴۵۰	۱۰۰۰	۹۷۷	۹۷۳	۹۴۳ (۱۵۵)	۹۴۳
LA09	۱۵×۵	۵۲۵	۱۱۲۵	۹۵۱ (۵۰/۳۹۵)	۹۵۱	۹۵۱ (۵۰/۶۵)	۹۵۱
LA21	۱۵×۱۰	۱۰۵۰	۲۲۵۰	۱۱۲۶	۱۱۱۳	۱۱۰۲	۱۰۴۶
LA22	۱۵×۱۰	۱۰۵۰	۲۲۵۰	۹۹۲	۹۸۶	۹۴۲	۹۲۷
LA26	۲۰×۱۰	۱۹۰۰	۴۰۰۰	۱۲۹۸	۱۲۹۶	۱۳۳۴	۱۲۱۸
LA27	۲۰×۱۰	۱۹۰۰	۴۰۰۰	۱۳۴۶	۱۳۵۱	۱۴۳۹	۱۲۳۵
LA31	۳۰×۱۰	۴۳۵۰۰	۹۰۰۰	۱۸۲۴	۱۸۰۹	۱۹۱۲	۱۷۸۷
TA71	۱۰۰×۲۰	۹۹۰۰۰	۲۰۰۰۰۰	۶۱۶۳	۶۱۴۴	-	-

مهم‌ترین مزیت مقایسه نتایج با مسائل معیار، امکان مقایسه نتایج به دست آمده با جواب‌های موجود برای مسائل معیار است. در صورتی که داده‌های تصادفی در مسئله اثرگذار باشد تولید نتایج قبلی تقریباً غیرممکن خواهد بود. از طرفی برای سنجش میزان بهبود حاصل شده توسط رویکرد پیشنهادی نیاز است نتایج حاصل با سایر نتایج به دست آمده مقایسه شود. بر این اساس برای مقایسه نتایج به دست آمده با ثابت در نظر گرفتن سایر عوامل، مدل شبیه‌سازی مسئله با پنج روش اولویت‌دهی رایج در ادبیات مسئله (FIFO, LIFO, SPT, CR, LPT) مقایسه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد روش کوتاه‌ترین زمان فرایند (SPT) بین روش‌های سنتی اولویت‌دهی به کارها، جواب‌های مناسب‌تری را برای مسئله حاصل می‌کند. مقایسه روش‌های سنتی اولویت‌دهی به کارها با رویکرد پیشنهادی نشان می‌دهد استفاده از رویکرد پیشنهادی در سیستم موجب کاهش مقدار تابع هدف مسئله می‌شود.

بدون در نظر گرفتن عوامل ایجاد عدم قطعیت، جواب‌های بهتری نسبت به روش مدل‌سازی تحلیلی ارائه می‌کند. در صورت نزدیک‌تر کردن مسئله به سیستم واقعی تولید، یعنی وارد کردن عوامل عدم قطعیت و افزایش ابعاد مسئله که بر پیچیدگی مسئله می‌افزاید، روش تحلیلی توانایی خود را از دست خواهد داد.

#### ۴-۳- نتایج حاصل برای مسئله پویا

در ادامه روند ارزیابی متد پیشنهادی بر مسائل تولید کارگاهی یک سیستم تولیدی با شرایط ذکر شده در قسمت ۳-۱ با استفاده از شبیه‌سازی مدل شده است و سعی شده با الگوریتم ژنتیک اولویت‌دهی به کارها به گونه‌ای انجام شود که تابع هدف تعریف شده در رابطه ۳-۳ منبسط شود. شرایط خاتمه برای الگوریتم ژنتیک در این مسئله ۱۰۰ مرتبه تکرار الگوریتم در نظر گرفته شده است و بعد از ۱۰۰ مرتبه تکرار بهترین جواب به دست آمده برای مسئله گزارش می‌شود.



جدول (۵): نتایج به دست آمده برای مسئله پویا با پارامترهای تصادفی

ماشین × کار	شماره مسئله	روش پیشنهادی	FIFO	LIFO	SPT	LPT	CR
۸×۵۰	۱	۴۱۵/۳۰	۵۸۵/۵۷	۷۸۳/۷۱	۴۸۲/۲۴	۱۳۶۹/۷	۷۹۰/۳۶
	۲	۵۰۳/۰۱	۶۳۴/۸۸	۸۴۷/۲۱	۵۴۶/۵۴	۱۴۰۸/۱	۸۲۷/۳
	۳	۴۹۲/۲	۶۸۹/۲	۹۲۴/۱۲	۵۵۳/۴۶	۱۴۲۶	۸۱۰/۹
۸×۱۰۰	۱	۱۹۸۶/۸	۳۷۴۷/۳	۴۳۴۳/۱	۲۱۸۳/۳	۶۳۱۸	۳۲۱۸/۸
	۲	۲۰۶۱	۳۸۸۶/۷	۴۴۸۶/۶	۲۳۶۷/۲	۶۴۸۵/۱	۳۴۰۸/۴
	۳	۲۱۰۰/۷	۳۹۱۱/۱۱	۴۴۹۰/۴	۲۳۰۴/۲	۶۵۴۵/۹	۳۴۱۱/۳
۸×۲۰۰	۱	۱۵۵۳۴	۱۸۰۴۹	۲۳۶۸۹	۱۵۷۲۸	۲۸۵۹۹	۱۶۰۰۵
	۲	۱۶۳۶۷	۱۹۲۰۶	۲۵۱۱۶	۱۶۵۵۵	۳۰۹۷۳	۱۷۲۶۱
	۳	۱۵۸۲۷	۱۸۵۱۵	۲۳۹۸۱	۱۴۱۶۳/۲	۲۹۴۴۷	۱۶۶۸۳

### ۵- نتیجه گیری و پیشنهادها برای مطالعات آتی

در این مقاله روش های مختلف مدل سازی و حل مسائل تولید کارگاهی در دو دسته کلی روش های شبیه سازی و روش های تحلیلی طبقه بندی شد و به تشریح روش بهینه سازی براساس شبیه سازی برای حل

مسئله تولید کارگاهی پرداخته شد. در ادامه روشی برای اولویت دهی به کارها در سیستم تولید کارگاهی پیشنهاد شد که با استفاده از آن می توان انواع مسائل قطعی و احتمالی تولید کارگاهی با شرایط مختلف را مدل سازی کرد و توالی مناسب را برای آن به دست آورد.

در مرحله اول رویکرد پیشنهادی جهت بررسی میزان همگرایی با قسمتی از روش های فراابتکاری موجود مقایسه شد. در مرحله بعدی این روش بر مسائل معیار موجود در سیستم تولید کارگاهی سستی اجرا شد و نتایج حاصل از آن با نتایج حاصل از روش برنامه ریزی عدد صحیح مختلط مقایسه شد. در مرحله بعد یک سیستم کارگاهی انعطاف پذیر با ماشین های یکسان در هر ایستگاه که دارای خرابی و دوباره کاری

نیز هست، در نظر گرفته شد و تابع هدف به دست آمده ناشی از توالی پیشنهادی، با مقدار تابع هدف ناشی از روش های رایج اولویت دهی مقایسه شد. این روش محدودیتی در تعیین توالی مناسب برای انواع مسائل تولید کارگاهی ندارد و هر نوع سیستم تولیدی که بتوان آن را با شبیه سازی مدل کرد می توان با این رویکرد توالی مناسب را برای آن به دست آورد.

در روش پیشنهادی فقط بر تعیین اولویت در صف پشت ماشین ها تمرکز شده است؛ در حالی که اگر نوع ماشین های موجود در سیستم تولید کارگاهی انعطاف پذیر متفاوت باشد باید تعیین شود کدام کار روی کدام ماشین پردازش می شود. برای انجام مطالعات آتی در این زمینه می توان این امر را نیز وارد مسئله کرد و درباره اولویت و تخصیص بهینه کارها به ماشین ها تصمیم گیری کرد؛ همچنین برای افزایش کارایی الگوریتم ژنتیک می توان قسمتی از جواب های مسئله که به دلیل رعایت پیش نیازها نشدنی می شوند با در نظرگیری گراف انفصال اثر فضای جواب مسئله حذف کرد تا سرعت و کارایی اجرای الگوریتم افزایش پیدا کند.

flexible job shop". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 20(4), 481-498.

Holthaus, O. (1999). "Scheduling in job shops with machine breakdowns: an experimental study". *Computers & Industrial Engineering*, 36(1), 137-162.

Ji, M., He, Y., & Cheng, T. E. (2006). "Scheduling linear deteriorating jobs with an availability constraint on a single machine". *Theoretical Computer Science*, 362(1), 115-126.

Keesari, H. S., & Rao, R. V. (2014). "Optimization of job shop scheduling problems using teaching-learning-based optimization algorithm". *OPSEARCH*, 51(4), 545-561.

Klemmt, A., Horn, S., Beier, E., & Weigert, G. (2007, May). "Investigation of modified heuristic algorithms for simulation-based optimization". Proceedings of 30th International Spring Seminar on Electronics Technology, (pp. 24-29). IEEE.

Klemmt, A., Horn, S., Weigert, G., & Wolter, K. J. (2009). "Simulation-based optimization vs. mathematical programming: A hybrid approach for optimizing scheduling problems". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25(6), 917-925.

Kulkarni, K., & Venkateswaran, J. (2014, December). Iterative simulation and optimization approach for job shop scheduling. *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference* (pp. 1620-1631). IEEE Press.

Liao, C. J., & Chen, W. J. (2004). "Scheduling under machine breakdown in a continuous process industry". *Computers & Operations Research*, 31(3), 415-428.

Mahdavi, I., Shirazi, B., & Solimanpur, M. (2010). "Development of a simulation-based decision support system for controlling stochastic flexible job shop manufacturing systems". *Simulation Modelling Practice and Theory*, 18(6), 768-786.

Manne, A. S. (1960). "On the job-shop scheduling problem". *Operations Research*, 8(2), 219-223.

Nolan, R. L., & Sovereign, M. G. (1972). "A recursive optimization and simulation approach to analysis with an application to transportation systems". *Management Science*, 18(12), 676-690.

Noor, S. (2007). Operational scheduling of traditional and flexible manufacturing systems using genetic algorithms, artificial neural networks and simulation, Ph.D Thesis, University of Bradford

Paul, R. J., & Chaney, T. S. (1998). "Simulation optimisation using a genetic algorithm". *Simulation Practice and Theory*, 6(6), 601-611.

Pezzella, F., Morganti, G., & Ciaschetti, G. (2008). "A genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem". *Computers & Operations Research*, 35(10), 3202-3212.

## منابع

Adibi, M. A., Zandieh, M., & Amiri, M. (2010). "Multi-objective scheduling of dynamic job shop using variable neighborhood search". *Expert Systems with Applications*, 37(1), 282-287.

Amirkhani, F., R. Sahraeian, (2103). "Integrating Simulation and Optimization to Schedule a Dynamic Job shop problem", Proceedings of 9th International Conference on Industrial Engineering, Tehran, Iran

Asadzadeh, L., & Zamanifar, K. (2010). "An agent-based parallel approach for the job shop scheduling problem with genetic algorithms". *Mathematical and Computer Modelling*, 52(11), 1957-1965.

Baker, K. R., & Trietsch, D. (2013). *Principles of sequencing and scheduling*. John Wiley & Sons.

Balasubramanian, J., & Grossmann, I. E. (2002). "A novel branch and bound algorithm for scheduling flowshop plants with uncertain processing times". *Computers & Chemical Engineering*, 26(1), 41-57.

Banharnsakun, A., Sirinaovakul, B., & Achalakul, T. (2012). "Job Shop Scheduling with the Best-so-far ABC". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(3), 583-593.

Baykasoğlu, A., & Özbakır, L. (2010). "Analyzing the effect of dispatching rules on the scheduling performance through grammar based flexible scheduling system". *International Journal of Production Economics*, 124(2), 369-381.

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), 325-331.

Chen, J. C., Wu, C. C., Chen, C. W., & Chen, K. H. (2012). "Flexible job shop scheduling with parallel machines using Genetic Algorithm and Grouping Genetic Algorithm". *Expert Systems with Applications*, 39(11), 10016-10021.

Dominic, P. D., Kaliyamoorthy, S., & Kumar, M. S. (2004). "Efficient dispatching rules for dynamic job shop scheduling". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 24(1-2), 70-75.

Gao, J., Sun, L., & Gen, M. (2008). "A hybrid genetic and variable neighborhood descent algorithm for flexible job shop scheduling problems". *Computers & Operations Research*, 35(9), 2892-2907.

Garey, M. R., Johnson, D. S., & Sethi, R. (1976). The complexity of flowshop and jobshop scheduling. *Mathematics of Operations Research*, 1(2), 117-129.

Gholami, M., & Zandieh, M. (2009). "Integrating simulation and genetic algorithm to schedule a dynamic

approach for shop scheduling problem". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(6), 1173-1181.

Tang, J., Zhang, G., Lin, B., & Zhang, B. (2011). "A hybrid algorithm for flexible job-shop scheduling problem". *Procedia Engineering*, 15, 3678-3683.

Vinod, V., & Sridharan, R. (2011). "Simulation modeling and analysis of due-date assignment methods and scheduling decision rules in a dynamic job shop production system". *International Journal of Production Economics*, 129(1), 127-146.

Zhang, R., & Wu, C. (2012). "Bottleneck machine identification method based on constraint transformation for job shop scheduling with genetic algorithm". *Information Sciences*, 188, 236-252.

Pinedo, M. (2005). *Planning and scheduling in manufacturing and services* (Vol. 24). New York: Springer.

Pinedo, M. L. (2012). *Scheduling: theory, algorithms, and systems*. Springer Science & Business Media.

Rangsaritratamee, R., Ferrell, W. G., & Kurz, M. B. (2004). "Dynamic rescheduling that simultaneously considers efficiency and stability". *Computers & Industrial Engineering*, 46(1), 1-15.

Sargent, R. G. (1994, December). "A historical view of hybrid simulation /analytic models". *Proceedings of the 26th conference on Winter simulation* (pp. 383-386). Society for Computer Simulation International.

Shahzad, A., & Mebarki, N. (2012). "Data mining based job dispatching using hybrid simulation-optimization

پی نوشت:

<sup>1</sup> Work In Process

<sup>2</sup> Baker et al.

<sup>3</sup> Pinedo

<sup>4</sup> Garey et al.

<sup>5</sup> Noor

<sup>6</sup> Ji et al.

<sup>7</sup> Make To Order

<sup>8</sup> Mean Time Between Failure

<sup>9</sup> Mean Time To Repair

<sup>10</sup> Zhang et al.

<sup>11</sup> Manne

<sup>12</sup> Mixed Integer Programming

<sup>13</sup> Liao

<sup>14</sup> Balasubramanian

<sup>15</sup> Tang

<sup>16</sup> Gao

<sup>17</sup> Chen

<sup>18</sup> Pezzella

<sup>19</sup> First In First Out

<sup>20</sup> Shortest Processing

<sup>21</sup> Longest Processing Time

<sup>22</sup> Earliest Due Date

<sup>23</sup> Vinod

<sup>24</sup> Chan

<sup>25</sup> Dominic

<sup>26</sup> Baykasoğlu

<sup>27</sup> Nolan

<sup>28</sup> Sargent

<sup>29</sup> Holthaus

<sup>30</sup> Klemmt

<sup>31</sup> Gholami

<sup>32</sup> Kulkarni

<sup>33</sup> Rangsaritratamee

<sup>34</sup> Due Date

<sup>35</sup> Total Work Continent

<sup>36</sup> Paul

<sup>37</sup> Fitness Function

<sup>38</sup> Toolbox

<sup>39</sup> Simevents

<sup>40</sup> Simulink

<sup>41</sup> Time based entity Generator

<sup>42</sup> Artificial Bee Colony

<sup>43</sup> Teaching- Learning Optimization

<sup>44</sup> Smaller the better

<sup>45</sup> OR Library

<sup>46</sup> Disjunctive graph