

An Optimization of Multi-product Assembly Lines Using Simulation and Multi-Objective Programming Approach

Maedeh Mosayeb Motlagh *

M.S. Graduate student, Department of Industrial Management, School of Management and Accounting, Allameh Tabatabae'i University, Tehran

Parham Azimi 

PhD. Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Engineering School, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

Maghsoud Amiri 

PhD. Professor, Department of Industrial Management, School of Management and Accounting, Allameh Tabatabae'i University, Tehran, Iran

Accepted: 30/06/2019

Received: 14/03/2018

eISSN: 2476-602X

ISSN: 2251/8029

Abstract

This paper investigates unreliable multi-product assembly lines with mixed (serial-parallel) layout model in which machines failures and repairing probabilities are considered. The aim of this study is to develop a multi-objective mathematical model consisting the maximization of the throughput rate of the system and the minimization of the total cost of reducing mean processing times and the total buffer capacities with respect to the optimal values of the mean processing time of each product in each workstation and the buffer capacity between workstations. For this purpose, in order to configure the structure of the mathematical model, Simulation, Design of Experiments and Response Surface Methodology are used and to solve it, the meta-heuristic algorithms including Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) and Non-Dominated Ranked Genetic Algorithm (NRGA) are implemented. The validity of the multi-objective mathematical model and the application of the proposed methodology for solving the model is examined on a case study. Finally, the performance of the algorithms used in this study is evaluated. The results show that the proposed multi-objective mathematical model is valid for optimizing unreliable production lines and has the ability to achieve optimal (near optimal) solutions in other similar problems with larger scale and more complexity.

* Corresponding Author: Maede.motlagh@gmail.com

How to Cite: Mosayeb Motlagh, M., Azimi, P., Amiri, M. (2023). An Optimization of Multi-product Assembly Lines Using Simulation and Multi-Objective Programming Approach, *Industrial Management Studies*, 21(68), 67-112.

Introduction

A production line consists of a sequence of workstations, in each of which parts are processed by machines. In this setup, each workstation includes a number of similar or dissimilar parallel machines, and a buffer is placed between any two consecutive workstations. In production lines, the buffer capacity and processing time of machinery have a significant impact on the system's performance. The presence of buffers helps the system to maintain production despite possible conditions or accidents, such as machinery failure or changes in processing time. Previous research has investigated production lines without any possibility of machinery failure, referred to as "safe production lines." However, in real production lines, machinery failure is inevitable. Therefore, several studies have focused on "uncertain production lines," assuming the existence of a probability of failure in a deterministic or exponential distribution. This research examines uncertain production lines with a combined layout, resulting from the combination of parallel deployment of machines within each workstation, if necessary, and serial deployment of workstations. The objective of this research is to determine the optimal values (or values close to optimal) of the average processing time of each product in each workstation, as well as the volume of buffers, as decision variables. The approach aims to maximize the system's output while minimizing the costs associated with reducing the processing time of workstations and minimizing the total volume of buffers between stations. Moreover, simulation can be applied without interrupting the production line or consuming significant resources. In this research, due to the high cost and time involved, implementing the proposed changes on the system is not cost-effective for investigating the changes in the production system's output rate. Therefore, the simulation technique has been utilized to optimize the production line.

Research method

The present study aims to develop a multi-objective mathematical model, based on simulation, to optimize multi-product production lines. In the first step, the structure of the multi-objective mathematical model is defined, along with the basic assumptions. To adopt a realistic approach in the model structure, the simulation technique has been employed to address the first objective function, which is maximizing the output rate of the production line. To achieve this, the desired production system is simulated. The design of experiments is used to generate scenarios for implementation in the simulated model, and the response surface methodology is utilized to analyze the relationship between the input variables (such as the average processing time of each product type in each workstation and the buffer volume between stations) and the response variable (production rate).

Results




To implement the proposed methodology based on the designed multi-objective programming model, a case study of a three-product production line with 9 workstations and 8 buffers was conducted. Subsequently, to compare the performance of the optimization algorithms, five indicators were used: distance from the ideal solution, maximum dispersion, access rate, spacing, and time. For this purpose, 30 random problems, similar to the mathematical model of the case study, were generated and solved. Based on the results obtained, both algorithms exhibited similar performance in all indices, except for the maximum dispersion index.

Conclusions

In this article, the structure of a multi-objective mathematical model was sought in uncertain multi-product production lines with the combined arrangement of machines in series-parallel (parallel installation of machines in workstations if needed and installation of workstations in series). The objective was to determine the optimal values of the average processing time of each type of product in each workstation and the buffer volume of each station, with the goals of maximizing the production rate, minimizing the costs resulting from reducing the processing time, and the total volume of inter-station buffers simultaneously. To investigate the changes in the output rate of the production system, due to the high cost and time, it was deemed not cost-effective to implement the proposed changes on the system. Therefore, the combination of simulation techniques, design of experiments, and response surface methodology was used to fit the relevant metamodel. In the proposed approach of this research, taking a realistic view of production line modeling, the probability of machinery failure, as well as the possibility of reparability and return to the system, were considered in the form of statistical distribution functions. Additionally, all time parameters, including the arrival time between the parts, the start-up time of all the machines, the processing time, the time between two failures, and the repair time of the machines, were non-deterministic and subject to statistical distributions. Finally, to solve the structured mathematical model, two meta-heuristic algorithms (NSGA-II) and (NRGA) were considered.

Keywords: Unreliable Assembly lines, Multi-Objective Optimization, Simulation, Design of Experiments, Response Surface Methodology.

بهینه‌سازی خطوط تولید چند محصولی با رویکرد شبیه‌سازی و برنامه‌ریزی چندهدفه

- مآئده مسیب مطلق *  کارشناس ارشد مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران
- پرهام عظیمی  دانشیار دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
- مقصود امیری  استاد دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران

چکیده

این مطالعه، به بررسی خطوط تولید چند محصولی نامطمئن با چیدمان ترکیبی (سری-موازی) با احتمال خرابی ماشین‌آلات در هر ایستگاه کاری می‌پردازد. هدف از این پژوهش، توسعه یک مدل ریاضی چندهدفه شامل بیشینه‌سازی نرخ تولید و کمینه‌سازی هزینه‌های ناشی از کاهش زمان پردازش ایستگاه‌های کاری و هم‌چنین حجم کل بافرها، با توجه به مقادیر بهینه میانگین زمان پردازش هر محصول در هر ایستگاه و حجم بافر میان ایستگاه‌های کاری می‌باشد. بدین منظور جهت پیکره‌بندی ساختار مدل ریاضی از تکنیک‌هایی نظیر شبیه‌سازی، طراحی آزمایش‌ها و رویه سطح پاسخ و جهت حل آن از الگوریتم‌های فرا ابتکاری ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) و ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NRGA) استفاده شده است. اعتبار مدل ریاضی چند هدفه و کاربرد متدولوژی پیشنهادی حل مدل، در یک مطالعه موردی بررسی گردیده است. در نهایت، عملکرد الگوریتم‌های به کار گرفته‌شده در تحقیق حاضر مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد مدل ریاضی چند هدفه پیشنهادی جهت بهینه‌سازی خطوط تولید نامطمئن معتبر بوده و توانایی دستیابی به نقاط بهینه (نزدیک به بهینه) در سایر مسائل مشابه با ابعاد بزرگ‌تر و پیچیدگی بیشتر را دارا می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: خطوط تولید نامطمئن، بهینه‌سازی چندهدفه، شبیه‌سازی، طراحی آزمایش‌ها، متدولوژی سطح پاسخ.

مقدمه

یک خط تولید شامل توالی ایستگاه‌های کاری می‌باشد که در هر یک از آن‌ها، قطعات توسط ماشین‌آلات پردازش می‌شوند (Shi & Gershwin, 2009). در این مجموعه، هر ایستگاه کاری دربرگیرنده تعدادی ماشین‌های موازی مشابه یا غیرمشابه می‌باشد و بین هر دو ایستگاه کاری متوالی یک بافر قرار داده می‌شود. در خطوط تولید، ظرفیت بافر و زمان پردازش ماشین‌آلات، تأثیر قابل توجهی بر عملکرد سیستم دارد به گونه‌ای که وجود بافرها به سیستم کمک می‌کند تا علی‌رغم بروز شرایط و یا حوادث احتمالی نظیر خرابی ماشین‌آلات و یا تغییر زمان پردازش، به سیر تولید خود ادامه دهد (Altıparmak et al., 2007). اگرچه قرارگیری بافرها موجب افزایش کارایی سیستم و انعطاف‌پذیری می‌شود، اما از طرف دیگر، هزینه نگهداری سیستم را افزایش داده و به تبع آن سودآوری کل سیستم کاهش می‌یابد؛ بنابراین، تعیین ظرفیت بهینه بافر (مسئله تخصیص بافر) به منظور کاهش هزینه تولید با حفظ نرخ تولید مطلوب مورد توجه می‌باشد (Massim et al., 2010).

هم‌چنین، زمان پردازش ماشین‌آلات به‌طور مستقیم بر میزان تولید اثرگذار بوده به طوری که کاهش زمان پردازش منجر به افزایش نرخ تولید می‌گردد. این مهم از طریق تخصیص منابع اضافی (Mor & Mosheiov, 2014)، تنظیم سرعت ماشین‌آلات (Hsieh et al., 2015)، جایگزینی ماشین‌های پیشرفته‌تر و استفاده از اپراتورهای بامهارت بالاتر قابل دستیابی بوده که باعث افزایش میزان تولید سیستم بدون هرگونه کاهش در کیفیت محصولات می‌شود. از سوی دیگر، کاهش زمان پردازش می‌تواند هزینه‌های کل سیستم را افزایش دهد؛ بنابراین، بهبودسازی زمان پردازش یک چالش عمده در برنامه‌ریزی خطوط تولید است.

در بسیاری از تحقیقات پیشین، خطوط تولید بدون هیچ‌گونه احتمال خرابی ماشین‌آلات تحت عنوان «خطوط تولید مطمئن» مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Huang et al., 2002; Smith et al., 2010). این در حالی است که در خطوط تولید واقعی، خرابی ماشین‌آلات امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. لذا تعدادی از تحقیقات، «خطوط تولید نامطمئن»

را با فرض وجود احتمال خرابی به صورت قطعی یا توزیع نمایی در نظر گرفته‌اند (Diamantidis and Papadopoulos, 2009; Sabuncuoglu et al., 2006).

این تحقیق به مطالعه خطوط تولید نامطمئن با چیدمان ترکیبی (حاصل از تلفیق استقرار ماشین‌آلات به صورت موازی در هر یک از ایستگاه‌های کاری در صورت لزوم و استقرار ایستگاه‌های کاری به صورت سری) پرداخته است. هدف از این تحقیق تعیین مقادیر بهینه (نزدیک به بهینه) میانگین زمان پردازش هر محصول در هر ایستگاه کاری و همچنین حجم بافرها به عنوان متغیرهای تصمیم با رویکرد ماکزیمم سازی خروجی سیستم و همچنین مینیمم سازی هزینه‌های ناشی از کاهش زمان پردازش ایستگاه‌های کاری و مینیمم سازی حجم کل بافرهای بین ایستگاه‌ها می‌باشد.

یکی از دغدغه‌های مهم در مطالعه سیستم‌های تولیدی، در نظرگیری رویکرد واقع‌بینانه نسبت به مسائل دنیای واقعی جهت بهبود مستمر فعالیت‌های سیستم می‌باشد. در این راستا، امروزه از تکنیک‌های شبیه‌سازی جهت مطالعه سیستم‌ها استفاده می‌گردد. استفاده از شبیه‌سازی، این امکان را ایجاد می‌کند که بتوان سیستم‌ها را بدون ریسک و یا هزینه که در سیستم‌های واقعی وجود دارد، مدل و تحلیل نمود (Llerena & Malavasi, 2013). با استفاده از شبیه‌سازی، تجزیه و تحلیل ویژگی‌های سیستم دنیای واقعی و رفتارهای پیچیده سیستم امکان‌پذیر است (Hsieh, 2002). شبیه‌سازی می‌تواند بدون هرگونه ایجاد وقفه در خط تولید یا مصرف منابع قابل توجهی اعمال شود. در این تحقیق نیز، به منظور بررسی تغییرات نرخ خروجی سیستم تولید، به دلیل هزینه و زمان زیاد، اجرای تغییرات پیشنهادی بر روی سیستم مقرون به صرفه نمی‌باشد، لذا از تکنیک شبیه‌سازی به منظور بهینه‌سازی خط تولید استفاده خواهد شد.

در ادامه تحقیق پیش رو، مطالعات پیشین در حوزه تحقیق حاضر در بخش دوم عنوان گردیده است. در بخش سوم، روش‌شناسی پژوهش شامل تکنیک‌های ریاضی و روش‌های تجزیه و تحلیل داده‌های استفاده شده در این تحقیق از قبیل شبیه‌سازی، طراحی آزمایش‌ها و متدلوژی سطح پاسخ مطرح گردیده است. در بخش چهارم، رویکردهای حل مسئله شامل

استفاده از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب^۱ و الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب^۲ و همچنین بررسی عملکرد الگوریتم‌های استفاده‌شده بیان گردیده است. در بخش پنجم اعتبار مدل ریاضی و کاربرد آن در دنیای واقعی و نتایج ارزیابی کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی طی یک مطالعه موردی نشان داده شده است. در نهایت، نتیجه‌گیری تحقیق انجام گرفته در بخش ششم درج گردیده است.

پیشینه پژوهش

تاکنون تحقیقات متعددی در زمینه بهبودسازی خطوط تولید با توجه به مدنظر قرار دادن زمان بهینه تولید و تخصیص بافرها مورد بررسی قرار گرفته است. گورل و آکتورک به تعیین زمان پردازش بهینه و تخصیص کار به ماشین‌آلات باهدف به حداقل رساندن هزینه‌های تولید در ماشین‌های کنترل عددی رایانه‌ای^۳ غیرمشابه موازی با در نظرگیری حد بالا برای زمان کل تولید در برنامه‌ریزی تولید پرداختند (Gurel and Akturk, 2007). آیدیلک و اله وردی یک الگوریتم برای مسائل برنامه‌ریزی خط تولید دو ماشینی جهت به حداقل رساندن زمان کل تولید پیشنهاد دادند. در این پژوهش، زمان پردازش به صورت تصادفی و در فواصل معین استفاده گردیده است (Aydilek and Allahverdi, 2013). اورک و همکاران مسئله برنامه‌ریزی تولید با عملیات انعطاف‌پذیر و زمان پردازش قابل کنترل در نظر گرفتند و در آن به‌طور هم‌زمان هزینه کل تولید و زمان کل تولید را به حداقل رساندند (Uruk et al., 2013).

مطالعات انجام گرفته در خصوص مسئله تخصیص بافر می‌تواند بر اساس توابع هدف به سه دسته اصلی طبقه‌بندی گردد: (۱) حداکثرسازی نرخ تولید سیستم (به‌عنوان مثال Alon et al., 2005؛ (۲) حداقل‌سازی ظرفیت بافرها (به‌عنوان مثال Yamashita & Altiok, 1998; Han & Park, 2002; MacGregor Smith and Cruz, 2005؛ (۳) حداقل‌سازی میزان کالای در جریان ساخت (به‌عنوان مثال So, 1997; Kim & Lee, 2001- Raman &

1. NSGA-II
2. NRG
3. CNC

(Jamaludin, 2008). همچنین، برخی از تحقیقات انجام گرفته در زمینه مسائل تخصیص بافر چندین تابع هدف را به طور هم‌زمان (مسائل چند هدفه) در نظر گرفته‌اند، (به‌عنوان مثال (Abdul-Kader et al., 2011; Chehade et al., 2010).

ناهاس و همکارانش به ارائه یک رویکرد جستجوی موضعی جهت حل مسئله تخصیص بافر در خطوط تولید نامطمئن پرداختند (Nahas et al., 2006). سادریس و پادوپولوس به ارائه یک شبکه عصبی مصنوعی مبتنی بر سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری در حل مسئله تخصیص بافر در خط تولید مطمئن پرداختند (Tsadiras & Papadopoulos, 2013). دمیر و همکارانش به ارائه دو رویکرد برای حل مسئله تخصیص بافر در خط تولید نامطمئن پرداختند. هدف آن‌ها پیشینه‌سازی نرخ تولید خط همراه با حداقل کردن اندازه کل بافر بوده است. یکی از رویکردهای مطرح‌شده توسط آن‌ها الگوریتم جستجوی دودویی و رویکرد دیگر الگوریتم جستجوی ممنوعه می‌باشد (Demir et al., 2013). کلب و گاتلیچ یک مسئله تخصیص بافر همراه با در نظرگیری زمان‌های پردازش به صورت غیرقطعی ارائه نمودند. هدف از این پژوهش، یافتن مقدار بهینه متوسط بافر در قالب چند نمونه مثال عددی می‌باشد (Kolb & Göttlich, 2015). اوسترله و همکاران یک مسئله چند هدفه جهت حداکثر سازی میزان تولید، حداقل سازی زمان بیکاری و هزینه کل محصولات حاصل از متوازن‌سازی خط تولید و تخصیص بافر در خطوط تولید نامطمئن با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری را مورد تحلیل قرار دادند (Oesterle et al., 2016).

با توجه به اهمیت در نظرگیری پیچیدگی مسائل دنیای واقعی و استفاده از رویکرد واقع‌بینانه جهت رؤیایی با مسائل مرتبط با سیستم‌های تولیدی، بسیاری از تحقیقات از تکنیک بهینه‌سازی از طریق شبیه‌سازی در مطالعات خود استفاده نموده‌اند. امیری و محتشمی یک متدولوژی مبتنی بر شبیه‌سازی برای مسئله تخصیص بافر در سیستم‌های تولید نامطمئن با در نظرگیری احتمال خرابی ماشین‌آلات پیشنهاد نمودند (Amiri & Mohtashami, 2012). بکر به ارائه یک مدل چند هدفه جهت بهینه‌سازی سیستم‌های تولیدی با توابع هدف پیشینه‌سازی نرخ تولید و کمینه‌سازی ظرفیت کل بافرها با رویکرد

استفاده از تکنیک شبیه‌سازی و الگوریتم‌های فراابتکاری نظیر الگوریتم ژنتیک پرداخته است (Bekker, 2013). کوس و کیلینچی، بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی برای تعیین اندازه بافر موردنیاز در خطوط تولید برای به حداکثر رساندن متوسط نرخ تولید سیستم را ارائه داده‌اند. این روش شامل استفاده از یک ابزار جستجو و یک ابزار ارزیابی می‌باشد. در این پژوهش از الگوریتم‌های ژنتیک و آنیلینگ شبیه‌سازی شده به‌عنوان ابزار جستجو برای ایجاد اندازه بافرهای موردنظر استفاده شده است (Kose & Kilincci, 2015). تیاجی در مقاله خود، مسئله تخصیص بافر را جزو اساسی‌ترین عوامل بیشتر سیستم‌های تولیدی می‌داند. در این مطالعه یک روش نوآورانه، با استفاده از تکنیک‌های شبیه‌سازی با رویکرد الگوریتم ژنتیک ارائه شده است که برای حل یک مشکل بسیار پیچیده ایستگاه‌های کاری مناسب می‌باشد (Tiacci, 2015). زندگی و همکارانش با بهره‌گیری از تکنیک شبیه‌سازی به بهینه‌سازی مسئله تخصیص بافر در خط تولید نامطمئن با سه تابع هدف حداکثر سازی نرخ تولید، مینیمم سازی ظرفیت بافرها و مینیمم سازی قطعات معیوب پرداختند (Zandieh et al., 2017).

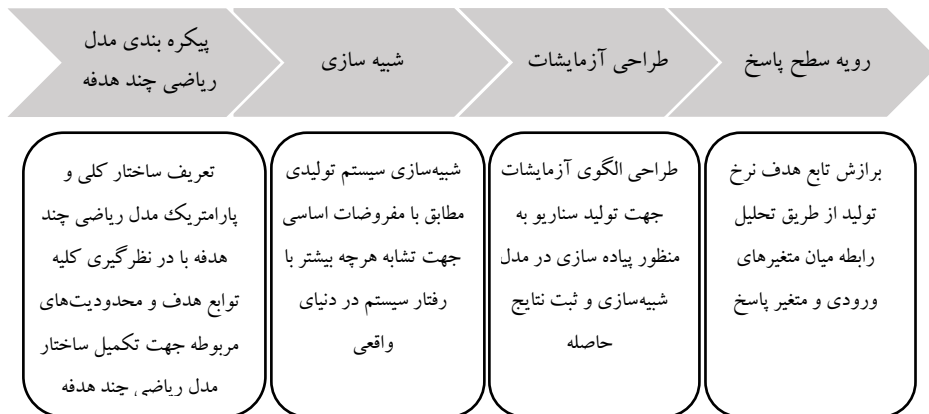
با توجه بررسی‌های صورت گرفته، هیچ‌یک از تحقیقات پیشین در خصوص سیستم‌های تولید نامطمئن، به‌طور هم‌زمان به یافتن مقادیر بهینه میانگین زمان پردازش ایستگاه‌های کاری و حجم بافر به‌عنوان متغیرهای تصمیم در یک مدل ریاضی نپرداخته‌اند. از این‌رو در این تحقیق، تلاش در جهت تعیین مقادیر بهینه میانگین زمان پردازش هر محصول در ایستگاه‌های کاری و حجم بافرها در یک مسئله با اهداف حداکثر سازی نرخ تولید و حداقل سازی هزینه ناشی از کاهش زمان پردازش و ظرفیت کل بافر، انجام گردیده است. علی‌رغم برخی تحقیقات پیشین که به بررسی مسائل برنامه‌ریزی در خطوط تولید مطمئن بدون در نظرگیری خرابی ماشین‌آلات پرداخته‌اند، در تحقیق حاضر، به جهت سازگاری هرچه بیشتر با محیط تولید در دنیای واقعی، خطوط تولید نامطمئن با چیدمان ترکیبی (سری - موازی) با احتمال خرابی ماشین‌آلات و همچنین تعمیرپذیری و بازگشت به سیستم، موردبررسی قرار می‌گیرند که از انواع توابع توزیع آماری جهت مواجهه با

پارامترهای زمانی تصادفی از جمله زمان ورود بین قطعات، زمان پردازش، زمان بین دو خرابی و زمان تعمیر ماشین‌آلات بهره گرفته شده است. همچنین، زمان راه‌اندازی کلیه ماشین‌آلات مستقر در ایستگاه‌های کاری غیرقطعی در نظر گرفته شده است. این در حالی است که در برخی از تحقیقات پیشین، پارامترهای اشاری در صورت حضور در فرض مسئله یا به صورت قطعی در نظر گرفته شده و یا در صورت تصادفی بودن، الزاماً از تابع توزیع نمایی پیروی نموده‌اند (Mohtashami, 2014). لذا، مهم‌ترین هدف این مقاله، توسعه یک رویکرد کارآمد جهت بهینه‌سازی خطوط تولید نامطمئن با چیدمان ترکیبی (سری-موازی) از طریق شبیه‌سازی خطوط تولید واقعی تحت فرضیه‌های واقع‌گرایانه می‌باشد.

روش‌شناسی پژوهش

مطالعه حاضر در پی توسعه یک مدل ریاضی چند هدفه مبتنی بر شبیه‌سازی جهت بهینه‌سازی خطوط تولید چند محصولی می‌باشد. در گام نخست ساختار مدل ریاضی چند هدفه به همراه مفروضات اساسی تعریف شده است. با توجه به اتخاذ رویکرد واقع‌گرایانه در ساختار مدل ریاضی، از تکنیک شبیه‌سازی جهت برازش تابع هدف اول مسئله مبنی بر ماکزیمم سازی نرخ خروجی خط تولید بهره گرفته شده است. لذا، پس از شبیه‌سازی سیستم تولیدی موردنظر، از تکنیک طراحی آزمایش‌ها جهت تولید سناریو به منظور پیاده‌سازی در مدل شبیه‌سازی شده و تکنیک رویه سطح پاسخ جهت تحلیل رابطه میان متغیرهای ورودی (میانگین زمان پردازش هر نوع محصول در هر ایستگاه کاری و همچنین حجم بافر میان ایستگاه‌ها) و متغیر پاسخ (نرخ تولید) استفاده گردیده است. شکل ۱ متدولوژی پیشنهادی پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

شکل ۱. متدولوژی پیشنهادی به منظور مطالعه سیستم‌های تولیدی و تبیین ساختار مدل ریاضی چند هدفه جهت اجرای فرآیند بهبودسازی



مدل‌سازی ریاضی مسئله

مفروضات اساسی سیستم تولیدی تحت مطالعه در این تحقیق به شرح ذیل می‌باشد:

- ۱- سیستم تولید به صورت شبکه صف با ورودی نامتناهی در نظر گرفته می‌شود.
- ۲- این سیستم شامل n ایستگاه کاری $(i=1, 2, \dots, n)$ ، با $n-1$ بافر $(k=1, 2, \dots, n-1)$ و m نوع محصول $(j=0, 1, \dots, m)$ می‌باشد.
- ۳- هر ایستگاه می‌تواند شامل ماشین‌های موازی باشد که همگی مشابه و دارای عملکرد یکسان بر روی قطعات هستند. این به این معنی است که مدت‌زمان راه‌اندازی و تنظیمات، مدت‌زمان پردازش، مدت‌زمان بین دو خرابی و زمان موردنیاز جهت تعمیر تمام ماشین‌آلات موازی در یک ایستگاه کاری مشخص، یکسان است.
- ۴- مدت‌زمان بین ورود مواد اولیه به سیستم می‌تواند به صورت قطعی و یا توابع توزیع عمومی در نظر گرفته شود.
- ۵- مدت‌زمان راه‌اندازی و تنظیمات هر یک از ماشین‌آلات می‌تواند به صورت قطعی و یا توابع توزیع عمومی در نظر گرفته شود.
- ۶- مدت‌زمان پردازش قطعات بر روی ماشین‌آلات می‌تواند به صورت قطعی و یا

توابع توزیع عمومی در نظر گرفته شود.

۷- احتمال خرابی ماشین آلات در این سیستم منظور گردیده است. لذا زمان بین خرابی‌های متوالی هر یک از ماشین‌ها می‌تواند به صورت قطعی و یا مطابق توابع توزیع عمومی در نظر گرفته شود.

۸- در صورت خرابی ماشین آلات، امکان تعمیر و بازگشت به سیستم وجود دارد. لذا مدت زمان لازم جهت تعمیر هر دستگاه، می‌تواند به صورت قطعی و یا توابع توزیع عمومی در نظر گرفته شود. با فرض مسدود بودن ورودی ماشین آلات خراب، از پذیرش هر نوع قطعه جهت انجام عملیات مربوطه اجتناب می‌گردد.

۹- در صورتی که بافر $i-1$ ، خالی از محصولات نیمه ساخته باشد، ماشین آلات ایستگاه i ، متوقف می‌گردند.

۱۰- در صورتی که حجم بافر i ، به حداکثر ظرفیت خود رسیده باشد، ماشین آلات ایستگاه i ، متوقف می‌گردند.

۱۱- در هر هنگام فضای کافی جهت انبار محصولات نهایی سیستم تولیدی (به عنوان خروجی سیستم) وجود دارد.

در این تحقیق با توجه ماهیت خطوط تولید و لزوم بهره‌گیری از چندین تابع هدف به طور هم‌زمان، از رویکرد مدل‌سازی ریاضی چند هدفه بهره گرفته شده است که در آن سه هدف مدنظر قرار گرفته است. متغیرهای تصمیم در این پژوهش شامل میانگین زمان پردازش هر نوع محصول در هر ایستگاه کاری و همچنین حجم بافر میان ایستگاه‌ها می‌باشد. متغیرهای تصمیم یادشده کنترل‌پذیر بوده لذا می‌توان با تعیین دامنه مناسب برای هر یک از آن‌ها و اعمال تغییرات در مقادیر آن‌ها در حوزه دامنه تعریف شده طی انجام آزمایش‌ها از پیش طراحی شده، میزان تغییرات در متغیر پاسخ را مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق «نرخ تولید» به عنوان متغیر پاسخ اصلی در نظر گرفته شده است که به دنبال حداکثرسازی آن هستیم. همچنین به طور هم‌زمان حداقل سازی هزینه‌های ناشی از کاهش زمان پردازش و همچنین حداقل سازی حجم بافرها از دیگر اهداف این مطالعه می‌باشد.

با توجه به توضیحات فوق اولین و مهم‌ترین تابع هدف در این مطالعه، بهینه‌سازی نرخ تولید بر مبنای دو متغیر میانگین زمان پردازش هر ایستگاه کاری و حجم بافرها می‌باشد که به صورت زیر فرموله می‌گردد:

$$\text{Max} f_1 = f(t_{ij}, y_k) \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (j=0,1,\dots,m) \quad ; \quad (k=1,2,\dots,n-1) \quad (1)$$

در این رابطه متغیر t_{ij} نشان‌دهنده میانگین زمان پردازش محصول j در ایستگاه کاری i و y_k بیانگر حجم بافر k می‌باشد. f_1 تابع تخمین زنده نرخ تولید بر مبنای دو متغیر تصمیم می‌باشد. در واقع این تابع، متامدلی است که بر اساس شبیه‌سازی آزمایش‌های طراحی شده، نرخ خروجی شبیه‌سازی شده خط تولید را برآورد می‌نماید.

به لحاظ منطقی می‌توان دریافت که هرچه مدت زمان پردازش بهینه خط تولید نسبت به مدت زمان پردازش فعلی در هر ایستگاه کاهش یابد، هزینه‌های ناشی از این کاهش به دلیل صرف انرژی مصرفی بیشتر، به کارگیری اپراتور ماهرتر و یا نیاز به تعویض و یا جایگزینی ماشین‌آلات پیشرفته‌تر و غیره افزایش می‌یابد. لذا یکی دیگر از توابع هدف این مطالعه قابل طرح بوده که به کمینه شدن هزینه‌های ناشی از کاهش زمان پردازش ماشین‌آلات می‌پردازد و به قرار زیر است:

$$\text{Min} f_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^m C_i (T_{ij} - t_{ij}) \quad (2)$$

در رابطه فوق، پارامتر T_{ij} بیانگر میانگین زمان پردازش فعلی ماشین‌آلات ایستگاه i بوده و پارامتر C_i نشان‌دهنده هزینه ناشی از کاهش یک واحد زمانی از تولید محصولات در ایستگاه کاری i می‌باشد.

به طور مسلم با افزایش بیش از حد بافرها، توان عملیاتی نیز افزایش می‌یابد اما این امر منجر به افزایش کالای نیمه ساخته و اشغال فضای بیشتر در خط تولید و هم‌چنین افزایش هزینه موجودی می‌گردد که نه از لحاظ منطقی و نه اقتصادی امکان‌پذیر و مقرون به صرفه نمی‌باشد. لذا مینیمم‌سازی حجم بافرها امری ضروری است که به لحاظ ریاضی به صورت

زیر بیان می گردد:

$$\text{Min}f_3 = \sum_{k=1}^{n-1} y_k \quad (3)$$

در این مدل سه مجموعه محدودیت در نظر گرفته می شود. اولین محدودیت قید شده در مدل ریاضی این مطالعه مربوط به دامنه تغییرات متغیر میانگین زمان پردازش محصول z در ایستگاه کاری i می باشد که به صورت رابطه (۴) فرموله می گردد. در این رابطه L_{ij} حد پایین میانگین زمان پردازش محصول z در ایستگاه کاری i است. هم چنین حد بالای میانگین زمان پردازش همان میانگین مدت زمان پردازش فعلی در نظر گرفته شده که با T_{ij} مشخص گردیده است.

$$L_{ij} \leq t_i \leq T_{ij} \quad (4)$$

محدودیت دیگر این مطالعه در خصوص حجم بافرهای هر یک از ایستگاهها در خط تولید می باشد که به صورت زیر بیان می گردد که در آن L'_k حد پایین حجم بافر k و U'_k حد بالای حجم بافر می باشد.

$$L'_k \leq y_k \leq U'_k \quad (5)$$

مدل پارامتریک تکمیل شده این تحقیق مطابق ذیل می باشد:

$$\text{Max}f_1 = f(t_{ij}, y_k) \quad (i=1, \dots, n) ; (j=1, \dots, m) ; (k=1, \dots, n-1) \quad (1)$$

$$\text{Min}f_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^m C_i (T_{ij} - t_{ij}) \quad (2)$$

$$\text{Min}f_3 = \sum_{k=1}^{n-1} y_k \quad (3)$$

$$L_{ij} \leq t_i \leq T_{ij} \quad (4)$$

$$L'_k \leq y_k \leq U'_k \quad (5)$$

شبیه‌سازی

در مواردی که انجام آزمایش‌ها بر روی سیستم تولیدی امری دشوار، زمان‌بر و پرهزینه باشد و یا منجر به توقف خط تولید گردد، شبیه‌سازی کمک به سزایی در تجزیه و تحلیل تغییرات مورد نظر اعمال شده در خط تولید می‌نماید. استفاده از شبیه‌سازی، این امکان را ایجاد می‌کند که بتوان سیستم‌ها را بدون هرگونه ریسک و یا هزینه‌های مترتبه در سیستم واقعی مدل و تحلیل نمود (Malavasi & Llerena, 2013). شبیه‌سازی می‌تواند رفتار پیچیده سیستم‌های واقعی را در شرایط مختلف بررسی کند (Banks et al., 2005). در این تحقیق، از یک رویکرد مبتنی بر شبیه‌سازی به منظور برازش تابع رگرسیون برای هدف اول مسئله (f_1) استفاده گردیده است.

۳-۳. رویه سطح پاسخ با استفاده از تکنیک طراحی آزمایش‌ها

رویه سطح پاسخ، یک روش آماری و ریاضی جهت آنالیز رابطه بین متغیرهای مستقل و متغیر پاسخ بر مبنای روش طراحی آزمایش‌ها می‌باشد (Fallah-Jamshidi et al., 2010). به منظور تولید تعداد مناسب از آزمایش‌ها جهت تخمین متامدل، از الگوهای تکنیک طراحی آزمایش‌ها استفاده می‌شود که در هر یک از آزمایش‌ها طراحی شده، مقادیر معینی به متغیرهای تصمیم جهت سنجش تغییرات در متغیر پاسخ اختصاص می‌یابد. در مدل ریاضی این تحقیق، نرخ تولید (f_1) به عنوان متغیر پاسخ و t_{ij} و y_k به عنوان متغیرهای تصمیم هستند.

در صورتی که پاسخ به خوبی به وسیله یک تابع خطی مدل‌سازی شده باشد، تابع تقریب کننده مدل درجه اول تحت قالب زیر فرموله می‌گردد:

$$y = \beta_0 + \sum_{a=1}^M \beta_a x_a + \varepsilon \quad (۴)$$

از رایج‌ترین طرح‌های مدل درجه اول، طرح‌های عاملی دوسطحی (2^K) می‌باشد که در آن K متغیر تصمیم در دو سطح بالا و پایین تعریف می‌شوند. هرگاه مدل مرتبه اول نتواند داده‌های حاصل از طراحی آزمایش‌ها را به خوبی برازش نماید، باید از مدل‌های مرتبه بالاتر

نظیر مدل مرتبه دوم استفاده کرد. در چنین مواقعی خمیدگی به اندازه‌ای شدید است که مدل‌های درجه پایین کارایی لازم را ندارند. مدل‌های مرتبه دوم، شامل چندجمله‌ای‌های درجه دوم می‌باشد که مدل عمومی آن به صورت زیر می‌باشد:

$$y = \beta_0 + \sum_{b=1}^L \beta_b x_b + \sum_{b < c} \sum \beta_{bc} x_b x_c + \sum_{b=1}^L \beta_{bb} x_b^2 + \varepsilon \quad (7)$$

در این تحقیق به منظور تعیین میانگین مدت‌زمان پردازش بهینه هر نوع محصول در هر ایستگاه کاری و حجم بهینه بافرها، می‌بایست طرح مناسبی برای اجرای آزمایش‌ها انتخاب شود. با توجه به زیاد بودن تعداد عوامل در این مسئله اجرای طرح‌های دوسطحی کامل بسیار وقت‌گیر می‌باشد و هم‌چنین اجرای طرح‌های کسری دوسطحی به دلیل درجه تجزیه پایین جهت کاهش تعداد آزمایش‌ها، باعث کاهش دقت متامدل خواهد شد. لذا در این مسئله از تلفیق طرح‌های عاملی دوسطحی کسری و طرح باکس-بنکن استفاده می‌شود به گونه‌ای که در مرحله اول، یک طرح عاملی کسری دو سطح طراحی و اجرا می‌گردد تا از طریق آن متغیرهایی که تأثیر معناداری بر نرخ تولید دارند شناسایی شوند. سپس با استفاده از طرح باکس-بنکن اقدام به برآزش متامدل درجه دوم خواهد شد. طرح باکس-بنکن یکی از کارآمدترین طرح‌ها می‌باشد که نیاز به آزمایش‌های نسبتاً کمتری دارد (Ferreira et al., 2007). این طرح برای عوامل از سه سطح (۰، ۱، -۱) استفاده می‌کند. سطح متوسط (۰) از میانگین سطح بالا (+۱) و پایین (-۱) به دست می‌آید.

رویکرد حل مسئله

جهت حل مدل ریاضی چند هدفه در این مطالعه از دو نوع الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) و الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NRGA) استفاده شده است که در ذیل به تفصیل توضیح داده می‌شوند.

الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II)

در مرحله اول از این الگوریتم، یک جمعیت تصادفی به عنوان والدین ایجاد می‌شود. سپس

یک جمعیت فرزند با توجه به استراتژی انتخاب مربوطه، توسط عمل تقاطع و جهش تولید می‌شود. پس‌از آن، هر دو والدین و فرزندان به‌عنوان یک مجموعه با یکدیگر رقابت می‌کنند تا در تکرار بعدی باقی بمانند. بدین منظور تمامی اعضا بر اساس رتبه نامغلوب بودن، طبقه‌بندی می‌شوند. به این ترتیب هر عضو با تمام اعضای دیگر مقایسه می‌شود و هر عضوی که توسط سایر اعضای جمعیت در هیچ‌یک از اهداف مغلوب نگردد، باید در جبهه اول قرار گیرد. برای انتخاب اعضا برای جبهه بعدی، اعضای اختصاص داده به جبهه‌های ماقبل به‌صورت موقت نادیده گرفته می‌شوند. در نهایت اعضای هر مرز بر اساس مجموع فواصل ازدحامی بر اساس رابطه (۸) رتبه‌بندی می‌شوند. به این ترتیب، عضوی که دارای بیشترین فاصله ازدحامی است، دارای اولویت بالاتری در انتخاب می‌باشد. برای تولید فرزندان جدید برای تکرار بعدی، اعضای مستقر در جبهه‌های پیشین دارای اولویت انتخاب می‌باشند. همچنین در هر جبهه، عضوی که دارای مقدار فاصله ازدحامی بالاتر باشد، در اولویت حضور در تکرار بعدی می‌باشد.

$$CD_g^i = \frac{(f_g^{i+1} - f_g^{i-1})}{f_g^{max} - f_g^{min}} \quad (8)$$

در این تحقیق عملگر تقاطع استفاده شده جهت اجرای این الگوریتم، تک نقطه‌ای و عملگر جهش مورد استفاده از نوع یکنواخت می‌باشد.

الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NRGA)

الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب یکی دیگر از روش‌های کارآمد در بهبودسازی چندهدفه است (Mohammadi et al., 2017). گام‌های اجرای این الگوریتم به‌استثنای استراتژی انتخاب، مشابه با الگوریتم NSGA-II می‌باشد. در این الگوریتم، یک جبهه با مرتبه بالاتر حاوی مجموعه جواب‌های بهتری می‌باشد. بر این اساس هر عضو از جمعیت دارای یک رتبه‌بندی دولایه‌ای است که رتبه اول بیانگر رتبه مرز نامغلوبی و رتبه دوم بر اساس فاصله ازدحامی در آن جبهه می‌باشد. بر اساس رابطه (۹) هر عضو مستقر در جبهه

پیشین، شانس بیشتری برای حضور در نسل بعدی را دارد. همچنین، رابطه (۱۰) نشان می‌دهد که بین دو عضو از یک جبهه، هر کدام که دارای رتبه بیشتری دارد احتمال بیشتری برای انتخاب جهت نسل آینده را پیدا می‌کند.

$$P_f = \frac{2 \times \text{Rank}_f}{NF \times (NF+1)} ; (f = 1, 2, \dots, NF) \quad (9)$$

در رابطه فوق Rank_f بیانگر رتبه جبهه و NF تعداد کل جبهه‌ها می‌باشد.

$$P_{fs} = \frac{2 \times \text{Rank}_{fs}}{NS_f \times (NS_f+1)} ; (s = 1, 2, \dots, NS) \quad (10)$$

در رابطه بالا Rank_{fs} نشان‌دهنده رتبه هر جواب در جبهه f و NS_f تعداد کل جواب‌ها در آن جبهه می‌باشد.

در این تحقیق عملگر تقاطع، عملگر جهش همانند الگوریتم قبل می‌باشد.

تنظیم پارامتر

عملکرد الگوریتم‌ها وابستگی بسیاری به پارامترهای ورودی دارد (Lu et al., 2016). پارامترهای ورودی دو الگوریتم مورد استفاده در حل مدل ریاضی این تحقیق شامل تعداد جمعیت اولیه (Popsiz)، نرخ تقاطع (P_c)، نرخ جهش (P_m) و تعداد تکرار (Iteration) می‌باشد. در این مطالعه، روش تاگوچی برای تنظیم پارامترها استفاده می‌شود که در آن عوامل به دو گروه قابل کنترل (سیگنال) و نویز تقسیم می‌شوند. حداقل تعداد آزمایش‌ها از حاصل جمع درجه آزادی عوامل، درجه آزادی تعاملات و یک درجه آزادی برای میانگین کل محاسبه می‌شود. در این تحقیق برای هر یک از پارامترها چهار سطح در نظر گرفته شده است. از این رو، یک آرایه که با حداقل ۱۳ آزمایش قابل انتخاب می‌باشد. لذا با مراجعه به آرایه‌های متعامد استاندارد مشخص می‌شود که در آرایه‌های متعامد L16 این شرایط برقرار است. هدف از روش تاگوچی، به حداقل رساندن تأثیرات نویز و بررسی سطح مطلوب عوامل سیگنال است. در این مطالعه، نوع «هر چه کمتر بهتر» از طریق نسبت سیگنال به نویز (S/N) مطابق رابطه (۱۱) استفاده می‌شود که در آن n تکرار تعداد

آزمایش‌ها و λ مقدار متغیر پاسخ را نشان می‌دهد.

$$\left(\frac{S}{N}\right) = -\log_{10}\left(\frac{\sum y^2}{n}\right) \quad (11)$$

در این مقاله، متغیر پاسخ در نظر گرفته شده جهت روش تاگوچی، حاصل تقسیم دو معیار فاصله از جواب ایدئال (MID) و حداکثر پراکندگی (Max Spread) می‌باشد. دو معیار ذکر شده به تفصیل در بخش ۴-۴ شرح داده خواهند شد.

$$MOCV = \frac{MID}{Max_spread} \quad (12)$$

بررسی عملکرد الگوریتم‌های مورد استفاده در تحقیق

پس از اجرای الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب و الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب و به دست آوردن جواب‌های بهینه مسئله، اقدام به بررسی و مقایسه عملکرد این دو الگوریتم با یکدیگر از طریق شاخص‌های زیر می‌گردد.

۱- معیار فاصله‌گذاری (Spacing): این معیار میزان فاصله نسبی جواب‌های متوالی را با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه می‌کند (Scott, 1995). در این معیار، هر الگوریتمی که جواب‌های نامغلوب نهایی آن دارای مقدار فاصله‌گذاری کوچک‌تری باشند عملکرد بهتری خواهد داشت.

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} \quad (13)$$

در این فرمول d_i مطابق ذیل محاسبه می‌گردد.

$$d_i = \min_{k \in N \wedge k \neq 1} \sum_{m=1}^M |f_m^i - f_m^k|, \bar{d} = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{|n|} \quad (14)$$

۲- حداکثر پراکندگی (Max Spread): این معیار پراکندگی جواب‌ها در هر جبهه را اندازه‌گیری می‌کند. رابطه (۱۵) رویه محاسباتی این شاخص را نشان می‌دهد (Zitzler, 1999). هر چه مقدار حاصل از این معیار بزرگ‌تر باشد، عملکرد مناسب‌تری را

بیان می‌دارد.

$$Max - Spread = \sqrt{\sum_{j=1}^m (f_j^{max} - f_j^{min})^2} \quad (۱۵)$$

۳- نرخ دسترسی (RAS): این معیار نرخ دسترسی‌پذیری هم‌زمان به اهداف می‌باشد که توسط رابطه (۱۶) محاسبه می‌گردد. یک الگوریتم با نرخ دسترسی کمتر کارآمدتر می‌باشد (Karimi et al., 2010).

$$RAS = \left(\sum_{i=1}^n |f_i - f_i^{best}| \right) / n \quad (۱۶)$$

۴- فاصله از جواب ایدئال (MID): این معیار به منظور محاسبه میانگین فاصله جواب‌های یک جبهه از نقطه ایدئال استفاده می‌شود. مطابق با رابطه (۱۷) مشخص است که هر چه این معیار کمتر باشد، حاکی از کیفیت بالاتر الگوریتم مورد نظر است (Karimi et al., 2010).

$$MID = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i, \quad c_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m f_{ji}^2} \quad (۱۷)$$

۵- معیار زمان اجرای الگوریتم (Time): زمان اجرای الگوریتم یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی کارایی الگوریتم است (Deb, 2001). بدیهی است زمان اجرای کمتر، سرعت بالاتر در رسیدن به مجموعه جواب‌های بهینه را نشان می‌دهد. مقادیر به دست آمده از شاخص‌های فوق برای دو الگوریتم مورد نظر این تحقیق، توسط شاخص درصد انحراف نسبی (RPD) مطابق با رابطه (۱۸) نرمالایز می‌شوند.

$$RPD_j = \frac{|sol_{ij} - sol_{i,best}|}{sol_{i,best}} \quad (۱۸)$$

در رابطه بالا، sol_{ij} بیانگر شاخص i در الگوریتم j بوده و $sol_{i,best}$ نشان‌دهنده بهترین مقدار مکتسبه شاخص i در بین کلیه الگوریتم‌های تحت مقایسه می‌باشد. بدیهی است هرچه مقدار RPD کمتر و به صفر نزدیک‌تر باشد، بهتر است.

مطالعه موردی

در این مقاله، به منظور پیاده‌سازی مدل ریاضی طراحی شده و اجرای متدولوژی پیشنهادی و استفاده از رویکردهای حل مسئله اشاره شده، یک خط تولید واقعی چند محصولی ساخت قطعات برنجی از طریق ریخته‌گری تحت فشار، مورد مطالعه قرار گرفته است. این خط تولید شامل سه نوع محصول با توالی تولید متفاوت شامل ۹ ایستگاه کاری (اعم از ایستگاه مذاب گیری و عملیات ریخته‌گری (دایکست)، ایستگاه پرس کاری، ایستگاه پولیش کاری، ایستگاه شات بلاست، سه ایستگاه ماشین کاری، ایستگاه شستشو و ایستگاه تست و کنترل) و ۸ بافر بین ایستگاه‌های کاری می‌باشد. توالی عملیات تولید سه نوع محصول این خط تولید بر اساس مستندات موجود در خط تولید مطابق جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱. توالی عملیات تولید محصولات

| محصول | ایستگاه مرحله ۱ | ایستگاه مرحله ۲ | ایستگاه مرحله ۳ | ایستگاه مرحله ۴ | ایستگاه مرحله ۵ | ایستگاه مرحله ۶ | ایستگاه مرحله ۷ |
|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| حلقه‌ای (نوع ۱) | دایکست | پولیش | شات بلاست | ماشین کاری ۱ | ماشین کاری ۲ | شستشو | تست و کنترل |
| فکی (نوع ۲) | دایکست | پرس | پولیش | شات بلاست | ماشین کاری ۳ | شستشو | تست و کنترل |
| ترمینال کوچک (نوع ۳) | دایکست | پرس | شستشو | تست و کنترل | - | - | - |

در برخی از ایستگاه‌های کاری به دلیل عدم وابستگی عملکرد ایستگاه به نوع محصولات، از اندیس $z = 0$ برای نوع محصول استفاده گردیده است. جدول ۲ و جدول ۳ خلاصه تمام اطلاعات داده شده مربوط به ایستگاه‌های کاری شامل هزینه کاهش میانگین زمان پردازش میانگین زمان پردازش فعلی ایستگاه‌ها و توزیع آماری پارامترهای زمانی در هر ایستگاه کاری بر اساس سوابق زمان‌سنجی موجود در مستندات خط تولید است. حجم هر واحد از محصولات تولیدی برابر با ۰,۰۰۳ مترمکعب (۳۰۶۰ سانتیمتر مکعب) است. تابع توزیع مدت‌زمان بین ورود مواد اولیه به سیستم برابر با $NegExp(10)$ است.

جدول ۲. زمان پردازش فعلی انواع محصولات در ایستگاه‌های کاری و هزینه ناشی از کاهش هر واحد زمان پردازش

| ایستگاه کاری | واحد زمان پردازش | میانگین زمان پردازش فعلی | | | توزیع زمان پردازش فعلی | | |
|--------------|------------------|--------------------------|-------------|-------------|------------------------|----------------|----------------|
| | | محصول نوع ۱ | محصول نوع ۲ | محصول نوع ۳ | محصول نوع ۱ | محصول نوع ۲ | محصول نوع ۳ |
| دایکست | ۱۰۰ | ۴۸ | ۵۰ | ۲۸ | Normal(۴۸,۵) | Normal(۵۰,۶) | Uniform(۲۸,۳۲) |
| پرس کاری | ۱۸۰ | - | ۲۸ | ۱۱ | - | Uniform(۲۶,۳۰) | Normal(۱۱,۲) |
| پولیش کاری | ۲۰۰ | ۲۳ | ۳۱ | - | Normal(۲۳,۳) | Uniform(۲۸,۳۴) | - |
| شات بلاست | ۲۳۰ | ۷۸۰ | | | Normal(۷۸۰,۸۶) | | |
| ماشین کاری ۱ | ۱۳۰ | ۴۱ | - | - | Uniform(۳۹,۴۳) | - | - |
| ماشین کاری ۲ | ۱۶۰ | ۲۱ | - | - | Uniform(۱۹,۲۳) | - | - |
| ماشین کاری ۳ | ۱۹۰ | - | ۳۴ | - | - | Uniform(۳۲,۳۶) | - |
| شستشو | ۸۰ | ۶۰ | | | Uniform(۵۶,۶۴) | | |
| تست و کنترل | ۱۹۰ | ۷ | | | Normal(۷,۲) | | |

جدول ۳. توزیع زمان راه‌اندازی و تنظیمات، زمان بین خرابی‌های متوالی و زمان تعمیر هر یک از ایستگاه‌های کاری

| ایستگاه کاری | مدت زمان راه‌اندازی و تنظیمات | مدت زمان بین خرابی‌های متوالی | مدت زمان تعمیر |
|--------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------|
| دایکست | Normal(۱۵,۲)* / Normal(۱۸۰۰,۳۶۰)** | Negexp(۷۲۸۲۰) | weibull(۳۱۰۴,۷۵) |
| پرس کاری | Normal(۱۰,۲)* | Weibull(۶۳۶۶۷,۲۰) | Negexp(۲۸۰۳) |
| پولیش کاری | Normal(۱۲,۲)* | Weibull(۵۸۶۳۸,۳۴) | Negexp(۱۹۵۲) |
| شات بلاست | Normal(۵۳,۵)*** | Negexp(۷۳۵۸۰) | Weibull(۳۳۲۲,۸۴) |
| ماشین کاری ۱ | Normal(۱۰,۲)* | Negexp(۲۹۶۰۸) | Negexp(۲۷۰۰) |
| ماشین کاری ۲ | Normal(۹,۲)* | Negexp(۲۲۵۹۰) | Weibull(۳۶۷۶,۴۲) |

| ایستگاه کاری | مدت زمان راه‌اندازی و تنظیمات | مدت زمان بین خرابی‌های متوالی | مدت زمان تعمیر |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------|
| ماشین کاری ۳ | Normal(۱۰,۲)* | Negexp (۲۹۳۰۳) | Negexp (۲۵۵۰) |
| شستشو | Normal(۲۰,۲)**** | Weibull (۴۲۱۰۳,۲۲) | Negexp (۲۱۹۹) |
| تست و کنترل | Normal(۱۵,۲)**** | Negexp (۷۲۳۸۰) | Weibull (۴۳۴۰,۵۲) |

*مدت زمان راه‌اندازی و تنظیمات مندرج به ازای هر واحد محصول و بدون وابستگی به نوع محصول می‌باشد.
 **مدت زمان راه‌اندازی و تنظیمات مندرج به ازای هر ۵۰ واحد محصول و بدون وابستگی به نوع محصولات می‌باشد.
 ***مدت زمان راه‌اندازی و تنظیمات مندرج به ازای هر ۴ واحد محصول و بدون وابستگی به نوع محصولات می‌باشد.
 ****مدت زمان راه‌اندازی و تنظیمات مندرج به ازای هر ۳ واحد محصول و بدون وابستگی به نوع محصولات می‌باشد.

حجم فعلی بافرهای این سیستم تولیدی بر اساس مستندات خط تولید مطابق جدول ۴ می‌باشد.

جدول ۴. ظرفیت فعلی بافرها

| بافر | ظرفیت فعلی (M ³) |
|------|------------------------------|
| ۱ | ۰,۲ |
| ۲ | ۰,۱۵ |
| ۳ | ۰,۳ |
| ۴ | ۰,۴ |
| ۵ | ۰,۴ |
| ۶ | ۰,۲ |
| ۷ | ۰,۳ |
| ۸ | ۰,۲ |

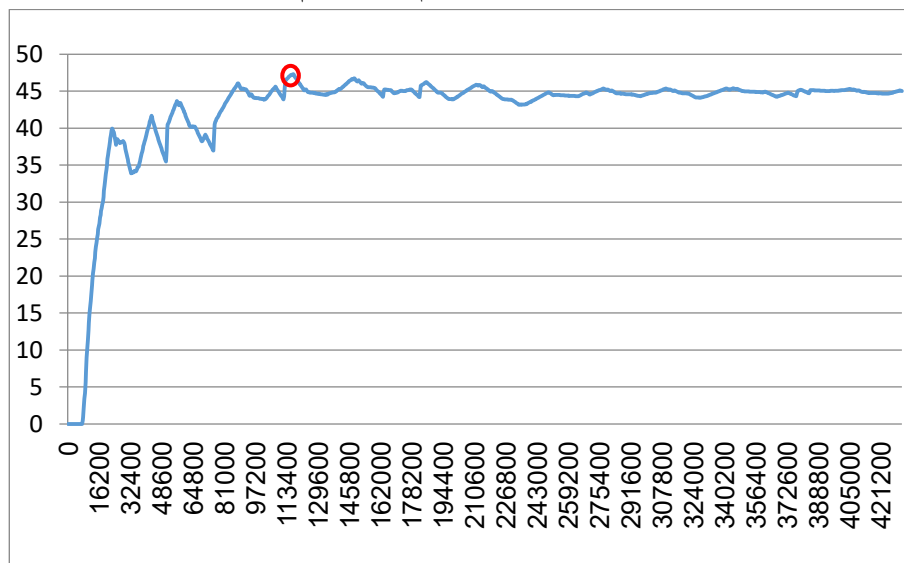
مدل شبیه‌سازی سیستم

پس از مشخص شدن ساختار سیستم تولید، اقدام به شبیه‌سازی خط تولید در نرم‌افزار می‌شود. نرم‌افزار شبیه‌سازی مورد استفاده در این مطالعه، نرم‌افزار ED است.

زمان گرم شدن سیستم

هنگامی که مدل شبیه‌سازی اجرا می‌گردد، نرم‌افزار این مدل را به‌عنوان یک خط تازه تأسیس و بدون هیچ موجودی از کالاهای نیمه ساخته در نظر می‌گیرد که باگذشت زمان، سیستم به تدریج به حالت پایدار می‌رسد. در این مطالعه، برای تعیین دوره گرم شدن، نرخ خروجی خط در زمان‌های مختلف ثبت می‌شود. سپس مقادیر ثبت شده بر زمان سپری شده در همان لحظه تقسیم می‌شود. در نهایت، با ترسیم نمودار گرافیکی، روند انتقال از حالت ناپایدار به حالت پایدار بررسی می‌گردد. شکل ۲ نشان می‌دهد که پس از گذشت ۱۱۶۷۰۰ ثانیه (ساعت ۳۲,۴۱) سیستم به ثبات نسبی می‌رسد.

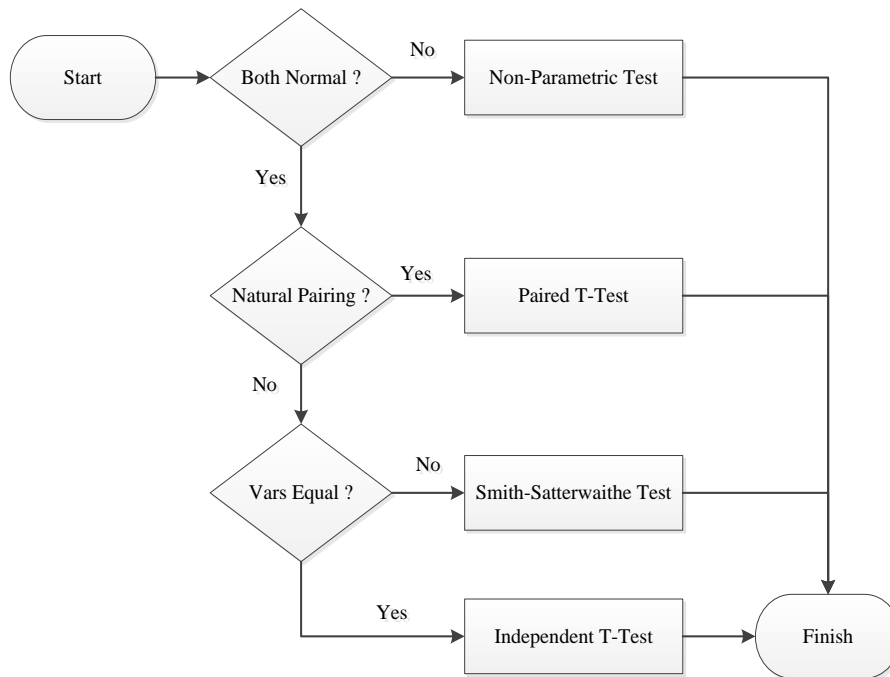
شکل ۲. تعیین زمان گرم شدن سیستم



اعتبار سنجی مدل شبیه‌سازی

به منظور بررسی اعتبار مدل شبیه‌سازی شده و اطمینان از سازگاری آن با سیستم واقعی، می‌بایستی از یک آزمون مناسب استفاده گردد. در این مطالعه، روش اعتبارسنجی چانگ (Chung, 2000) مطابق شکل ۳ استفاده شده است.

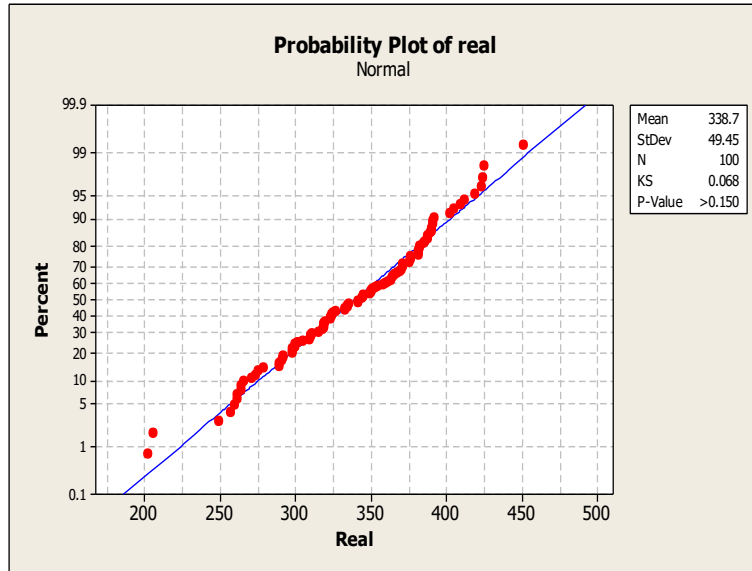
شکل ۳. مدل اعتبارسنجی چانگ



اولین گام در روش اعتبارسنجی چانگ آزمایش نرمال بودن داده‌ها می‌باشد. شکل ۴ و ۵ آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (K-Test) جهت بررسی نرمال بودن داده‌های جمع‌آوری شده از نرخ خروجی خط تولید واقعی طی ۱۰۰ روز کاری (۷,۵ ساعت کار مفید در هر روز) و مدل شبیه‌سازی شده در ۱۰۰ تکرار ۷,۵ ساعته را نشان می‌دهند.

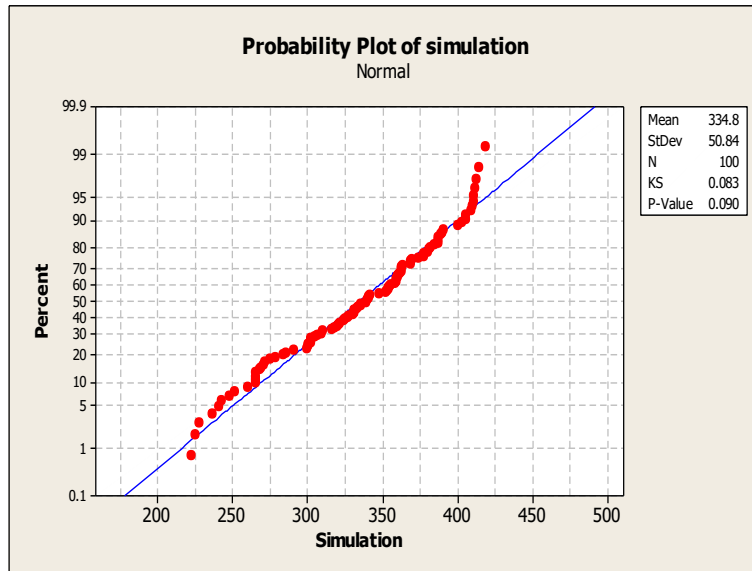
شکل ۴. نمودار آزمون کلموگروف-اسمیرنوف برای داده‌های جمع‌آوری شده از خط تولید در

فضای واقعی



شکل ۵. نمودار آزمون کلموگروف-اسمیرنوف برای داده‌های جمع‌آوری شده از مدل

شبیه‌سازی شده خط تولید



بر اساس نتایج حاصله، مقدار p-value هر دو مجموعه بیشتر از ۰,۰۵ می‌باشد. لذا فرض صفر مبتنی بر نرمال بودن داده‌های جمع‌آوری شده از خط تولید واقعی و مدل شبیه‌سازی شده در سطح اطمینان ۹۵٪ پذیرفته می‌شود. با توجه به نرمال بودن داده‌های واقعی و داده‌های حاصل از مدل شبیه‌سازی در خصوص نرخ خروجی خط تولید و همچنین عدم هم‌زمانی جمع‌آوری داده‌های واقعی و شبیه‌سازی، به‌منظور ادامه روند اعتبار سنجی می‌بایستی از آزمون برابری واریانس‌ها استفاده گردد. مطابق نتایج مندرج در جدول ۵ مقدار آماره آزمون برابر با ۰,۹۵ می‌باشد که از مقدار بحرانی آن (۱,۴۸) کمتر است. لذا فرض صفر مبتنی بر برابر بودن واریانس دودسته داده قابل قبول می‌باشد.

جدول ۵. نتایج آزمون برابری واریانس‌ها

| | واقعی | شبیه‌سازی |
|---------------|-----------|-----------|
| میانگین | ۳۳۸,۷ | ۳۳۴,۸ |
| واریانس | ۲۴۴۴۴,۸۴۶ | ۲۵۸۴,۵۴۸ |
| تعداد مشاهدات | ۱۰۰ | |
| درجه آزادی | ۹۹ | ۱۰۰ |
| F | ۰,۹۵ | ۹۹ |
| P-Value | ۰,۷۸۳ | |
| F بحرانی | ۱,۴۸۶۲۳ | |

با توجه به نتایج به‌دست آمده، آخرین مرحله جهت سنجش اعتبار مدل شبیه‌سازی استفاده از آزمون تی مستقل می‌باشد. مطابق با نتایج جدول ۶ مقدار آماره آزمون برابر با ۰,۵۶ می‌باشد که از مقدار بحرانی آن (۱,۹۷۲) کمتر است. لذا فرض صفر مبتنی بر برابر بودن میانگین‌های داده‌های حاصل از محیط واقعی و داده‌های حاصل از مدل شبیه‌سازی خط تولید قابل قبول می‌باشد.

جدول ۶. نتایج آزمون تی مستقل

| | واقعی | شبیه سازی |
|---------------|----------|-----------|
| میانگین | ۳۳۸,۷ | ۳۳۴,۸ |
| واریانس | ۲۴۴۴,۸۴۶ | ۲۵۸۴,۵۴۸ |
| تعداد مشاهدات | ۱۰۰ | |
| درجه آزادی | ۱۹۸ | |
| T | ۰,۵۶ | ۱۰۰ |
| P-Value | ۰,۵۷۶ | |
| T بحرانی | ۱,۹۷۲ | |

با توجه به مراحل طی شده جهت اعتبار سنجی می توان نتیجه گرفت که مدل طراحی شده به خوبی با خط تولید واقعی مطابقت داشته و صحت عملکرد مدل شبیه سازی شده خط تولید محرز می باشد.

طراحی آزمایش ها

به منظور تعیین میانگین مدت زمان بهینه پردازش هر نوع محصول در هر ایستگاه کاری و حجم بهینه بافرها، می بایست طرح مناسبی برای اجرای آزمایش ها انتخاب شود. با توجه به زیاد بودن تعداد عوامل در این مسئله (۲۱ عامل)، اجرای طرح های دوسطحی کامل، نیازمند $2^{21} = 2097152$ آزمایش است که بسیار وقت گیر می باشد و هم چنین اجرای طرح های کسری دوسطحی به دلیل درجه تجزیه پایین جهت کاهش تعداد آزمایش ها، باعث کاهش دقت متامدل خواهد شد. هم چنین اجرای طرح های درجه دوم مانند باکس-بنکن یک بلوکه برای ۲۱ عامل، نیازمند ۳۴۸ آزمایش می باشد. لذا در این مسئله در مرحله اول با استفاده از طرح های عاملی دوسطحی کسری ($2^{21-15} = 2^6$) متغیرهایی که دارای اثر معنادار بر نرخ خروجی خط تولید هستند، مشخص گردیده سپس با بهره گیری از الگوهای باکس-بنکن مدل مرتبه دوم برازش می گردد. بازه تعریف شده برای هر یک از متغیرها با توجه به نظر کارشناسان و مهندسين خط تولید، توان اقتصادی و فضای در دسترس تعیین گردیده

است. جدول ۷ سطوح متغیرهای تصمیم جهت اجرای آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۷. سطوح متغیرهای تصمیم جهت اجرای آزمایش‌ها

| ردیف | متغیر | سطح پایین | سطح میانی | سطح بالا |
|------|----------|----------------|------------------|----------------|
| | | - ۱ | ۰ | + ۱ |
| ۱ | t_{11} | Normal(۳۶,۵) | Normal(۴۲,۵) | Normal(۴۸,۵) |
| ۲ | t_{12} | Normal(۴۱,۶) | Normal(۴۵,۵,۶) | Normal(۵۰,۶) |
| ۳ | t_{13} | Uniform(۲۰,۲۴) | Uniform(۲۴,۲۸) | Uniform(۲۸,۳۲) |
| ۴ | t_{22} | Uniform(۱۹,۲۳) | Uniform(۲۳,۲۶) | Uniform(۲۶,۳۰) |
| ۵ | t_{23} | Normal(۸,۲) | Normal(۹,۵,۲) | Normal(۱۱,۲) |
| ۶ | t_{31} | Normal(۱۷,۳) | Normal(۲۰,۳) | Normal(۲۳,۳) |
| ۷ | t_{32} | Uniform(۲۱,۲۷) | Uniform(۲۶,۲۹) | Uniform(۲۸,۳۴) |
| ۸ | $t_{4.}$ | Normal(۵۸۵,۸۶) | Normal(۶۸۲,۵,۸۶) | Normal(۷۸۰,۸۶) |
| ۹ | t_{51} | Uniform(۲۸,۳۲) | Uniform(۳۱,۴۰) | Uniform(۳۹,۴۳) |
| ۱۰ | t_{61} | Uniform(۱۳,۱۷) | Uniform(۱۵,۲۱) | Uniform(۱۹,۲۳) |
| ۱۱ | t_{72} | Uniform(۲۳,۲۷) | Uniform(۲۶,۳۳) | Uniform(۳۲,۳۶) |
| ۱۲ | $t_{8.}$ | Uniform(۴۱,۴۹) | Uniform(۴۷,۵۸) | Uniform(۵۶,۶۴) |
| ۱۳ | $t_{9.}$ | Normal(۵,۲) | Normal(۶,۲) | Normal(۷,۲) |
| ۱۴ | y_1 | ۰,۲ | ۰,۴ | ۰,۶ |
| ۱۵ | y_2 | ۰,۱۵ | ۰,۳۵ | ۰,۵۵ |
| ۱۶ | y_3 | ۰,۳ | ۰,۵ | ۰,۷ |
| ۱۷ | y_4 | ۰,۴ | ۰,۶ | ۰,۸ |
| ۱۸ | y_5 | ۰,۴ | ۰,۵۵ | ۰,۷ |
| ۱۹ | y_6 | ۰,۲ | ۰,۴ | ۰,۶ |
| ۲۰ | y_7 | ۰,۳ | ۰,۵ | ۰,۷ |
| ۲۱ | y_8 | ۰,۲ | ۰,۴ | ۰,۶ |

طراحی آزمایش‌های مرحله اول

جهت طراحی آزمایش‌ها از الگوهای دوسطحی کسری برای ۲۱ عامل ($2^6 = 2^{21-15}$) استفاده شده است. مدت‌زمان اجرای هر آزمایش شبیه‌سازی برابر ۴۴ ساعت (معادل یک

هفته کاری) در نظر گرفته شده است و نرخ تولید مندرج به ازای هر آزمایش برابر میانگین نتایج شبیه سازی در ۱۰ بار تکرار هر آزمایش می باشد. جدول ۸ نتایج تحلیل واریانس مدل درجه اول (اثرات اصلی) برازش شده بر ترکیبات مذکور را نمایش می دهد.

جدول ۸ نتایج تحلیل واریانس مدل رگرسیون درجه اول

| منبع | درجه آزادی | مجموع توان های دوم | متوسط مربع ها | F-value | P-value |
|--------------|------------|--------------------|---------------|---------|----------|
| رگرسیون | ۲۱ | ۰۰۵E+۶,۹۱۵ | ۳۲۹۲۹,۶۴ | ۷,۷۷ | ۰۸E-۱,۱۲ |
| باقی مانده | ۴۲ | ۰۰۵E+۱,۷۸۱ | ۴۲۴۰,۶۵ | | |
| کل | ۶۳ | ۰۰۵E+۸,۶۹۶ | | | |
| R-square | | | ۰,۷۹۵۲ | | |
| Adj R-square | | | ۰,۶۹۲۸ | | |

چنانچه مشاهده می شود P-value کل مدل کوچک تر از ۰,۰۱ است. این امر حاکی از آن است که این مدل رگرسیون در سطح اطمینان ۹۵٪ و حتی ۹۹٪ معنادار است؛ اما شاخص Adj R-square مقدار ۰,۶۹ را نشان می دهد. این عدد نشان می دهد که تنها ۶۹ درصد از تغییرات متغیر پاسخ ناشی از عوامل است. با توجه به پایین بودن مقدار این شاخص، انجام تحلیل پاسخ برای دستیابی به چند جمله ای درجه بالاتر امری ضروری می باشد. با توجه به مقادیر P-value حاصله، برخی از متغیرها به لحاظ آماری و در سطح اطمینان ۹۵٪ معنادار نیستند؛ لذا نمی توان آن ها را به عنوان متغیرهای اثرگذار دانست؛ بنابراین می توان آن ها را از ارزیابی های بعدی حذف نمود. در نتیجه متغیرهایی که دارای مقدار $P\text{-value} < 0,05$ باشند باید مورد تحلیل دقیق تری قرار گیرند و متغیرهای با مقدار P-value بیشتر از ۰,۰۵ در برازش مدل چند جمله ای درجه بالاتر حذف می گردند. با حذف این عوامل که به لحاظ آماری معنادار نیستند و تأثیر ناچیزی بر نرخ تولید دارند، ۱۰ عامل t_{11} ، t_{12} ، t_{13} ، t_{22} ، t_{23} ، t_{24} ، t_{31} ، t_{32} و t_{34} باقی می مانند.

طراحی آزمایش‌های مرحله دوم

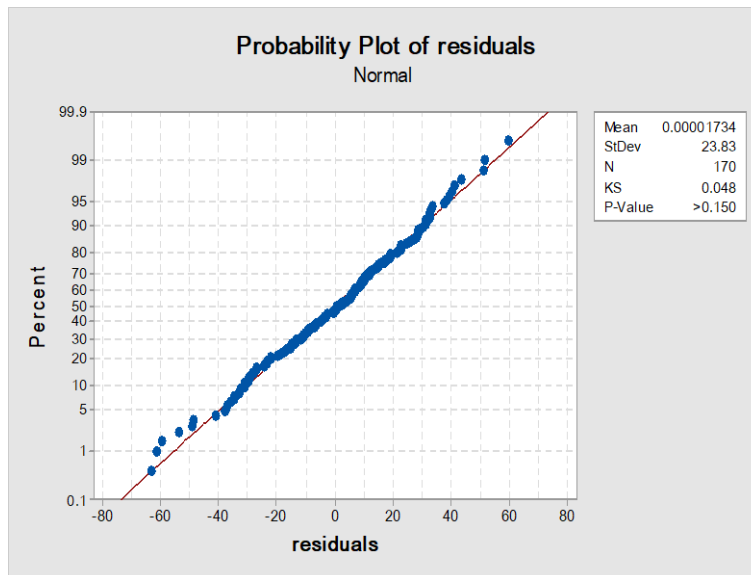
در این مرحله از طرح باکس-بنکن با سه سطح برای هر یک از متغیرها استفاده می‌شود. مدت‌زمان اجرای هر آزمایش شبیه‌سازی برابر ۴۴ ساعت (معادل یک هفته کاری) در نظر گرفته شده است و نرخ تولید مندرج به ازای هر آزمایش برابر میانگین نتایج شبیه‌سازی حاصل از ۱۰ بار تکرار هر آزمایش می‌باشد. جدول ۹ نتایج تحلیل واریانس مدل رگرسیون پله‌ای درجه دوم کامل برآزش شده بر ترکیبات اشاره‌شده را نمایش می‌دهد.

جدول ۹. نتایج تحلیل واریانس مدل رگرسیون پله‌ای درجه دوم کامل

| منبع | درجه آزادی | مجموع توان‌های دوم | متوسط مربع‌ها | F-value | P-value |
|--------------|------------|--------------------|---------------|---------|------------|
| رگرسیون | ۳۷ | $0.05E+8,809$ | ۲۳۸۰۹,۳۷ | ۳۲,۹۲ | $5.0E-1,7$ |
| باقی‌مانده | ۱۳۲ | ۹۵۴۶۰,۵۶ | ۷۲۳,۱۹ | | |
| Total | ۱۶۹ | $0.05E+9,764$ | | | |
| R-square | | ۰,۹۰۲۲ | | | |
| Adj R-square | | ۰,۸۷۴۸ | | | |

آماره آزمون F با مقدار ۳۲,۹۲ در این جدول سطح معناداری بالایی را برای مدل رگرسیون نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود مقدار P-value کل مدل کوچک‌تر از ۰,۰۱ است. این امر حاکی از آن است که این مدل رگرسیون در سطح اطمینان ۹۵٪ و حتی ۹۹٪ معنادار است. هم‌چنین مقدار $0,87$ برای شاخص Adj R-square این متامدل حاکی از آن است که ۸۷ درصد از تغییرات نرخ تولید خط ناشی از تغییرات متغیرهای تصمیم‌گیری می‌باشد. جهت بررسی نرمال بودن باقی‌مانده‌های رگرسیون از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف استفاده شده است که نتایج آن در شکل ۶ قابل مشاهده می‌باشد.

شکل ۶. نتایج آزمون نرمال بودن باقی مانده‌ها



چنانچه مشاهده می‌شود مقدار آماره آزمون کلموگروف-اسمیرنوف برابر $0,048$ و P -value مدل بیش از $0,05$ است. لذا فرض صفر مثبتی بر نرمال بودن باقی مانده‌ها در سطح اطمینان 95% پذیرفته می‌شود.

مدل سازی مسئله

درنهایت، اولین تابع هدف مبنی بر حداکثر سازی نرخ تولید، با برازش مدل رگرسیون بر اساس نتایج آزمایش‌ها به صورت رابطه (۱۹) به دست می‌آید.

بهبودسازی خطوط تولید چند محصولی با رویکرد شبیه‌سازی...؛ مسیب مطلق و همکاران | ۹۹

$$\begin{aligned} \text{Max} f_1 = & -130721932 + 98117t_{11} + 672311t_{12} + 3268793t_{13} - 53915502y_1 - \\ & 4268304t_{22} + 170724403y_2 - 9095833t_{31} + 13313652t_{32} + 153528701y_3 - \\ & + 206331388y_4 - 63021t_{11} * t_{12} - 1937500t_{11} * y_2 + 1586811t_{11} * t_{31} - 60119t_{11} * t_{32} - \\ & 1471354t_{11} * y_4 - 64931t_{12} * t_{13} - 1826389t_{12} * y_3 - 1663194t_{12} * y_4 \\ & + 63393t_{13} * t_{32} + 2549107y_1 * t_{32} - 27031250y_1 * y_2 + 1133929y_1 * t_{32} \\ & + 31406250y_1 * y_3 + 1705357t_{32} * y_4 + 4177083y_2 * t_{31} - 2991071y_2 * t_{32} - \\ & 29296875y_2 * y_3 + 2250000t_{31} * y_3 + 2885417t_{31} * y_4 + 2544643t_{32} * y_3 - \\ & 31406250y_3 * y_4 - 41878t_{12}^2 - 30803168y_1^2 - 54547830y_2^2 - 205711t_{32}^2 - \\ & 66854904y_3^2 - 114444270y_4^2 \end{aligned} \quad (19)$$

تابع هدف دوم مسئله به کمینه شدن هزینه‌های ناشی از کاهش زمان پردازش ماشین‌آلات می‌پردازد و به‌قرار زیر است:

$$\text{Min} f_2 = 100[(48-t_{11}) + (50-t_{12}) + (30-t_{13})] + 180[(28-t_{22})]200 + [(23-t + \quad (20) \\ r_1) (31-t_{32})]$$

تابع هدف سوم این مسئله در خصوص مینیمم‌سازی مجموع حجم بافرها می‌باشد که به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\text{Min} f_3 = y_1 + y_2 + y_3 + y_4 \quad (21)$$

محدودیت‌های این مدل ریاضی بر اساس حدود متغیرهای تصمیم تعریف می‌شوند. این محدودیت‌ها در جدول ۱۰ آورده شده است.

جدول ۱۰. محدودیت‌های مسئله

| ردیف | متغیر تصمیم | حد پایین | حد بالا |
|------|-------------|----------|---------|
| ۱ | t_{11} | ۳۶ | ۴۸ |
| ۲ | t_{12} | ۴۱ | ۵۰ |
| ۳ | t_{13} | ۲۲ | ۳۰ |

| ردیف | متغیر تصمیم | حد پایین | حد بالا |
|------|-------------|----------|---------|
| ۴ | t_{22} | ۲۱ | ۲۸ |
| ۵ | t_{31} | ۱۷ | ۲۳ |
| ۶ | t_{32} | ۲۴ | ۳۱ |
| ۶ | y_1 | ۰,۲ | ۰,۶ |
| ۷ | y_2 | ۰,۱۵ | ۰,۵۵ |
| ۸ | y_3 | ۰,۳ | ۰,۷ |
| ۹ | y_4 | ۰,۴ | ۰,۸ |

اعتبارسنجی مدل ریاضی

با توجه به در نظر گیری میانگین زمان پردازش هر محصول در هر ایستگاه کاری و همچنین حجم بافرها به عنوان متغیرهای تصمیم در این تحقیق از یک سو و استفاده از رویکردهای متفاوت جهت تعریف متغیرها در سایر پژوهش‌ها از سویی دیگر، رویکرد مشابه با مطالعه حاضر در دسترس نمی‌باشد. لذا به منظور بررسی اعتبار و قابلیت تعمیم دهی مدل ریاضی پیشنهادی، اقدام به تعریف و حل آن در ابعاد کوچک گردیده است.

در ابتدا با داده‌های مربوط به محصول نوع ۲ و نوع ۳ مقادیر کمی پارامترهای مدل برآورد شده است. علت انتخاب محصول نوع ۳ پردازش در تعداد کمتری از ایستگاه‌های کاری و علت انتخاب محصول نوع ۲ بیشترین اشتراک با محصول نوع ۳ در توالی تولید است که این مسئله منجر به حداکثر اشتراک بین محدودیت‌ها در فضای جواب می‌گردد. در گام بعد مسئله چند هدفه ایجاد شده از روش معیار جامع (LP-METRIC) و با استفاده نرم‌افزار لینگو حل می‌گردد. رابطه زیر روش معیار جامع برای اهداف غیر هم بعد را نمایش می‌دهد.

$$\text{Min} \left(\sum_{j=1}^m \left| \frac{f_j(x) - f_j^*}{f_j^* - f_j^-} \right|^p \right)^{\frac{1}{p}} ; (x \in S) \quad (22)$$

در رابطه فوق $f_j(x)$ تابع هدف j ام مسئله، f_j^* مقدار بهینه این تابع بدون در نظر گرفتن

سایر اهداف و fz نمایانگر مقدار ضد ایدئال تابع هدف z می باشد.

مقدار بهینه حاصل از جواب هر یک از توابع هدف به صورت مجزا به در جدول ۱۱ آورده شده است.

جدول ۱۱. مقادیر بهینه توابع هدف به صورت مجزا

| تابع هدف | جواب بهینه |
|-------------------|------------|
| $\text{Max } f_1$ | ۱۴۳۶ |
| $\text{Min } f_2$ | ۰ |
| $\text{Min } f_3$ | ۱,۰۵ |

برای به دست آوردن مقادیر جبهه کارای جواب توسط روش معیار جامع، از مقادیر مختلف پارامتر p (مقادیر گشتاوری) برای محاسبه پاسخ‌های متفاوت استفاده می‌شود. نتایج حاصل از هر بار حل توسط روش معیار جامع و با در نظرگیری کلیه محدودیت‌های مسئله در جدول ۱۲ آورده شده است.

جدول ۱۲. نتایج حل مدل با در نظرگیری مقادیر مختلف پارامتر p

| p | ۱ | ۲ | ۵ | ۱۰ | ∞ |
|----------|------|------|------|------|----------|
| f_{LP} | ۰,۴۶ | ۰,۴۱ | ۰,۲۹ | ۰,۲۲ | ۰ |
| f_1 | ۸۲۶ | ۹۷۱ | ۱۰۷۴ | ۱۱۴۷ | ۱۱۸۲ |
| f_2 | ۴۹۵ | ۴۴۶ | ۴۲۲ | ۴۰۸ | ۳۹۸ |
| f_3 | ۱,۷۶ | ۱,۸۰ | ۱,۸۲ | ۱,۸۴ | ۱,۸۵ |

مقادیر حاصل از حل مدل نشان می‌دهد که جنس متغیرهای تعریف شده در مدل قابلیت دسترسی به اهداف پژوهش را به خوبی دارا هستند. همچنین محدودیت‌های مسئله دارای فضای اشتراکی برای جواب‌های کارا می‌باشند، لذا می‌توان از مدل پارامتریک پیشنهادی در پژوهش جهت مسائل بهبودسازی خطوط تولید با رویکرد مشابه و در ابعاد بزرگ‌تر و با پیچیدگی بیشتر استفاده نمود.

حل مدل ریاضی مسئله

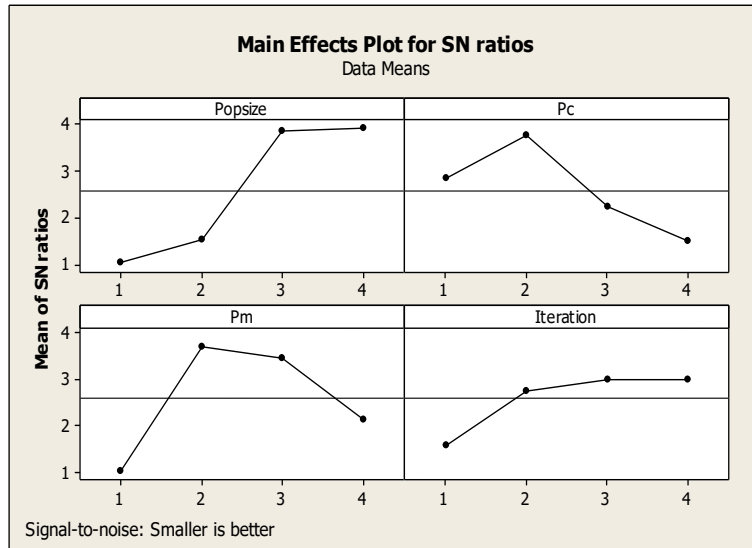
پس از به دست آوردن مدل ریاضی مسئله و برازش تابع هدف اصلی مدل (نرخ تولید محصولات) مبتنی بر متدولوژی رویه سطح پاسخ و تکنیک‌های طراحی آزمایش‌ها و شبیه‌سازی، اقدام به حل مدل توسط الگوریتم‌های NSGA-II و NPGA می‌شود. تنظیم پارامترهای این دو الگوریتم در چهار سطح مطابق با جدول ۱۳ تعریف شده است. انتخاب سطوح اولیه بر اساس مطالعات آزمایشی است که نمای کلی در مورد کیفیت الگوریتم‌ها را در سطوح مختلف پارامترها ارائه می‌دهد.

جدول ۱۳. عوامل قابل کنترل و سطوح آنها

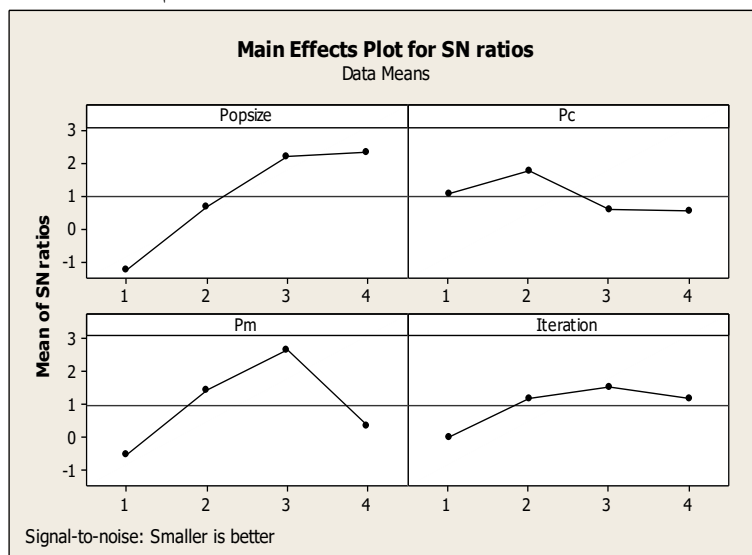
| الگوریتم | پارامترها | توضیحات | سطح ۱ | سطح ۲ | سطح ۳ | سطح ۴ |
|----------|----------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| NSGA-II | Popsiz | تعداد جمعیت اولیه | ۲۰ | ۷۰ | ۱۰۰ | ۱۵۰ |
| | P _c | نرخ تقاطع | ۰٫۷ | ۰٫۸ | ۰٫۹۸ | ۰٫۹۹ |
| | P _m | نرخ جهش | ۰٫۱ | ۰٫۱۵ | ۰٫۲ | ۰٫۲۵ |
| | Iteration | تعداد تکرار الگوریتم | ۳۰۰ | ۴۰۰ | ۵۰۰ | ۶۰۰ |
| NRGA | Popsiz | تعداد جمعیت اولیه | ۱۰۰ | ۱۵۰ | ۲۰۰ | ۲۵۰ |
| | P _c | نرخ تقاطع | ۰٫۶ | ۰٫۷ | ۰٫۸ | ۰٫۹ |
| | P _m | نرخ جهش | ۰٫۱ | ۰٫۲ | ۰٫۳ | ۰٫۴ |
| | Iteration | تعداد تکرار الگوریتم | ۳۰۰ | ۵۰۰ | ۷۰۰ | ۹۰۰ |

تعداد درجات آزادی با توجه به حضور چهار پارامتر سه سطحی، ۱۳ می‌باشد و آرایه متعامد L16 برای طراحی آزمایش‌ها مناسب می‌باشد. شکل ۷ و ۸ چگونگی تغییر مقادیر شاخص S/N را بر مبنای متغیر پاسخ (MOCV) و حالت «هر چه کمتر بهتر» است در سطوح مختلف پارامترهای ورودی هر الگوریتم نشان می‌دهند.

شکل ۷: نمودار تغییرات شاخص S/N برای پارامترهای الگوریتم NSGA-II



شکل ۸: نمودار تغییرات شاخص S/N برای پارامترهای الگوریتم NPGA



سطوحی که در آن‌ها شاخص S/N به بیشینه مقدار خود رسیده باشد، به‌عنوان سطوح بهینه انتخاب می‌شوند که در جدول ۱۴ مشخص شده است.

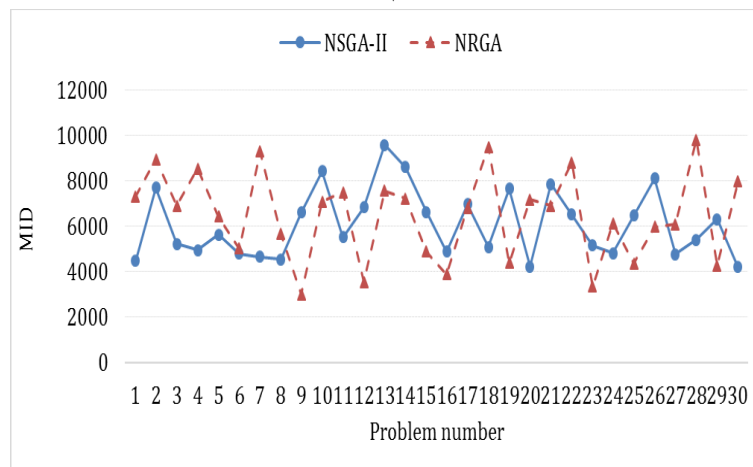
جدول ۱۴. سطوح بهینه پارامترهای الگوریتم‌ها

| الگوریتم | Popsize | P_c | P_m | تکرار |
|----------|---------|-------|-------|-------|
| NSGA-II | ۱۵۰ | ۰٫۸ | ۰٫۱۵ | ۶۰۰ |
| NRGA | ۲۵۰ | ۰٫۷ | ۰٫۳ | ۷۰۰ |

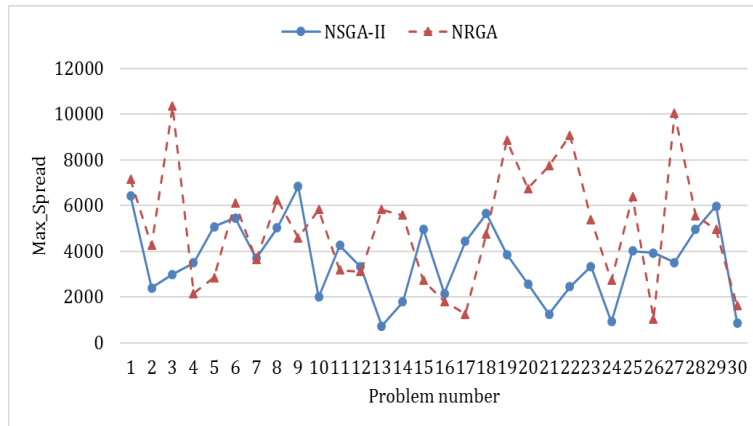
بررسی عملکرد الگوریتم‌های تحقیق

به منظور تشریح کارایی الگوریتم‌های NSGA-II و NRGA، با توجه به ساختار مدل ریاضی به دست آمده، ۳۰ مسئله مشابه با مطالعه موردی به طور تصادفی تولید شده است. با توجه به مسائل تصادفی تولید شده، عملکرد الگوریتم‌های مورد استفاده در این تحقیق توسط شاخص‌های فاصله از جواب ایدئال (MID)، حداکثر پراکندگی (Max Spread)، نرخ دسترسی (RAS)، فاصله‌گذاری (Spacing) و زمان (Time) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نمودار گرافیکی مقایسه الگوریتم‌ها نسبت به هر یک از شاخص‌ها در شکل‌های (۹) الی (۱۳) نمایش داده شده است.

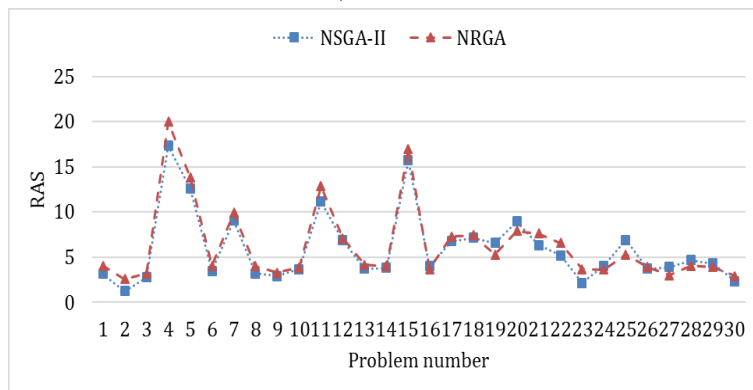
شکل ۹. نمودار گرافیکی مقایسه الگوریتم‌ها بر اساس معیار فاصله از جواب ایدئال



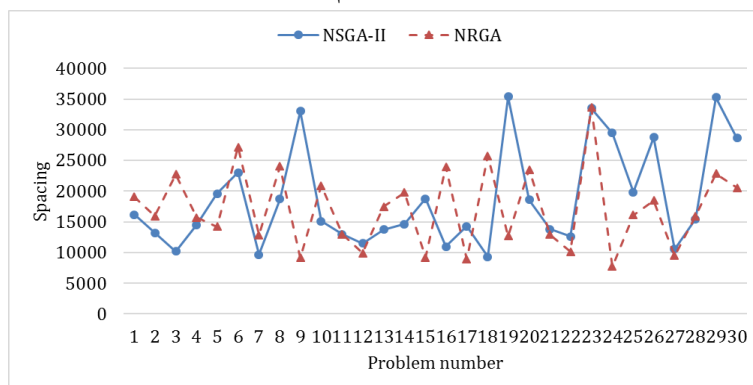
شکل ۱۰. نمودار گرافیکی مقایسه الگوریتم‌ها بر اساس معیار حداکثر پراکندگی



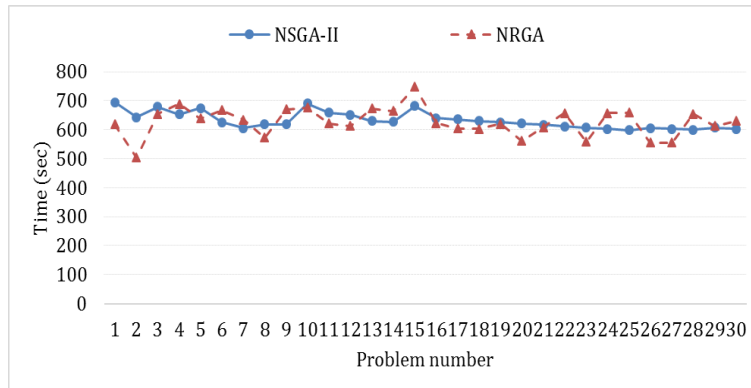
شکل ۱۱. نمودار گرافیکی مقایسه الگوریتم‌ها بر اساس معیار نرخ دسترسی



شکل ۱۲. نمودار گرافیکی مقایسه الگوریتم‌ها بر اساس معیار فاصله‌گذاری



شکل ۱۳: نمودار گرافیکی مقایسه الگوریتم‌ها بر اساس معیار زمان محاسباتی



مقایسه الگوریتم‌ها با استفاده از رویکرد آماری

به منظور مقایسه الگوریتم‌ها در هر معیار از تحلیل واریانس (ANOVA) مقادیر نرمالایز شده هر شاخص توسط RPD استفاده می‌شود. P -value حاصل از تحلیل واریانس برای هر معیار در جدول ۱۵ درج شده است. P -value کمتر از $0/05$ نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین عملکرد الگوریتم‌ها در شاخص موردنظر می‌باشد. در غیر این صورت، تفاوت معناداری بین عملکرد الگوریتم‌ها وجود ندارد. ب؛ براین، فرض صفر برابری میانگین الگوریتم‌ها در هر معیار است.

جدول ۱۵. مقادیر P تجزیه واریانس برای هر معیار

| Criterion | P-value | نتایج آزمون |
|------------|---------|---------------------------|
| MID | ۰,۳ | فرض صفر موردقبول می‌باشد. |
| Max-Spread | ۰,۰۱۳ | فرض صفر رد می‌شود. |
| RAS | ۰,۷ | فرض صفر موردقبول می‌باشد. |
| Spacing | ۰,۴۱ | فرض صفر موردقبول می‌باشد. |
| Time | ۰,۶ | فرض صفر موردقبول می‌باشد. |

همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر دو الگوریتم در همه معیارها به‌استثنا حداکثر پراکندگی، دارای عملکرد مشابه می‌باشند.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، به یافتن ساختار یک مدل ریاضی چند هدفه در خطوط تولید چند محصولی نامطمئن با چیدمان ترکیبی ماشین‌آلات به صورت سری-موازی (استقرار ماشین‌آلات به صورت موازی در ایستگاه‌های کاری در صورت نیاز و استقرار ایستگاه‌های کاری به صورت سری) که جهت تعیین مقادیر بهینه میانگین زمان پردازش هر نوع محصول در هر ایستگاه کاری و حجم بافر هر ایستگاه، با اهداف حداکثر سازی نرخ تولید، حداقل سازی هزینه‌های ناشی از کاهش زمان پردازش و حجم کل بافرهای میان ایستگاهی به طور هم‌زمان پرداخته شده است. به منظور بررسی تغییرات نرخ خروجی سیستم تولید، به دلیل هزینه و زمان زیاد، اجرای تغییرات پیشنهادی بر روی سیستم مقرون به صرفه نمی‌باشد، لذا از تلفیق تکنیک‌های شبیه‌سازی، طراحی آزمایش‌ها و رویه سطح پاسخ جهت برآزش متامدل مربوطه استفاده گردیده است. در رویکرد پیشنهادی این تحقیق با اتخاذ نگاهی واقع‌گرایانه به مدل‌سازی خطوط تولید، احتمال خرابی ماشین‌آلات و همچنین امکان تعمیرپذیری و بازگشت به سیستم، در قالب انواع توابع توزیع آماری در نظر گرفته شده است. همچنین کلیه پارامترهای زمانی از جمله زمان ورود بین قطعات، زمان راه‌اندازی کلیه ماشین‌آلات، زمان پردازش، زمان بین دو خرابی و زمان تعمیر ماشین‌آلات، غیرقطعی و تابع توزیع‌های آماری می‌باشند. در نهایت جهت حل مدل ریاضی ساختاریافته، دو الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) و ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NRGA) در نظر گرفته شده‌اند. به منظور پیاده نمودن متدولوژی پیشنهادی بر اساس مدل برنامه‌ریزی چند-هدفه طراحی شده، از یک مطالعه موردی خط تولید سه محصولی با ۹ ایستگاه کاری و ۸ بافر، بهره گرفته شده است. در انتها، به منظور مقایسه عملکرد الگوریتم‌های اشاری بر اساس ۵ شاخص فاصله از جواب ایدئال (MID)، حداکثر پراکندگی (Max Spread)، نرخ دسترسی (RAS)، فاصله‌گذاری (Spacing) و زمان (Time)، ۳۰ مسئله تصادفی مشابه با مدل ریاضی مطالعه موردی، تولید گردید. با توجه به نتایج به دست آمده عملکرد هر دو الگوریتم در تمامی شاخص‌ها به جز شاخص حداکثر پراکندگی مشابه یکدیگر است.

تعارض منافع

تعارض منافع ندارم.

ORCID

Maedeh Mosayeb



<http://orcid.org/0000-0001-7212-3948>

Motlagh

Parham Azimi



<http://orcid.org/0000-0002-9164-6880>

Maghsoud Amiri



<http://orcid.org/0000-0002-0650-2584>

منابع

- Abdul-Kader, W., Ganjavi, O., & Baki, F. (2011). A nonlinear model for optimizing the performance of a multi-product production line. *International Transactions in Operational Research*, 18(5), 561-577.
- Alon, G., Kroese, D. P., Raviv, T., & Rubinstein, R. Y. (2005). Application of the cross-entropy method to the buffer allocation problem in a simulation-based environment. *Annals of Operations Research*, 134(1), 137-151.
- Altıparmak, F., Dengiz, B., & Bulgac, A. A. (2007). Buffer allocation and performance modeling in asynchronous assembly system operations: An artificial neural network metamodeling approach. *Applied Soft Computing*, 7(3), 946-956.
- Amiri, M., & Mohtashami, A. (2012). Buffer allocation in unreliable production lines based on design of experiments, simulation, and genetic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(1-4), 371-383.
- Aydilek, H., & Allahverdi, A. (2013). A polynomial time heuristic for the two-machine flowshop scheduling problem with setup times and random processing times. *Applied Mathematical Modelling*, 37(12), 7164-7173.
- Banks, J., Carson II, J. S., Automation, B., Nelson, B. L., & Nicol, D. M. (2005) *Discrete-Event System Simulation FOURTH EDITION*.
- Bekker, J. (2013). Multi-objective buffer space allocation with the cross-entropy method. *International Journal of Simulation Modelling*, 12(1), 50-61.
- Chehade, H., Yalaoui, F., Amodeo, L., & Dugardin, F. (2010, October). Buffers sizing in assembly lines using a Lorenz multiobjective ant colony optimization algorithm. In *Machine and Web Intelligence (ICMWI), 2010 International Conference on* (pp. 283-287). IEEE.
- Chung, C. A. (2000). *Simulation modeling handbook: a practical approach*.
- Deb, K. (2001). *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms* (Vol. 16). John Wiley & Sons.
- Demir, L., Tunalı, S., Eliiyi, D. T., & Løkketangen, A. (2013). Two approaches for solving the buffer allocation problem in unreliable production lines. *Computers & Operations Research*, 40(10), 2556-2563.
- Diamantidis, A.C., Papadopoulos, C.T. (2009). Exact analysis of a two-station onebuffer flow line with parallel unreliable machines. *European Journal of Operational Research* 197, 572-580.
- Fallah-Jamshidi, S., Amiri, M., & Karimi, N. (2010). Nonlinear continuous

- multi-response problems: a novel two-phase hybrid genetic based metaheuristic. *Applied Soft Computing*, 10(4), 1274-1283.
- Ferreira, S. C., Bruns, R. E., Ferreira, H. S., Matos, G. D., David, J. M., Brandao, G. C., da Silva, E.P., Portugal L.A., Dos Reis P.S., Souza A.S., & Dos Santos, W. N. L. (2007). Box-Behnken design: an alternative for the optimization of analytical methods. *Analytica chimica acta*, 597(2), 179-186.
- Gurel, S., & Akturk, M. S. (2007). Optimal allocation and processing time decisions on non-identical parallel CNC machines: ϵ -constraint approach. *European Journal of Operational Research*, 183(2), 591-607.
- Han, M. S., & Park, D. J. (2002). Optimal buffer allocation of serial production lines with quality inspection machines. *Computers & Industrial Engineering*, 42(1), 75-89.
- Hsieh, S. J. T. (2002). Hybrid analytic and simulation models for assembly line design and production planning. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 10(1-2), 87-108.
- Hsieh, P. H., Yang, S. J., & Yang, D. L. (2015). Decision support for unrelated parallel machine scheduling with discrete controllable processing times. *Applied Soft Computing*, 30, 475-483.
- Huang, M. G., Chang, P. L., & Chou, Y. C. (2002). Buffer allocation in flow-shop-type production systems with general arrival and service patterns. *Computers & Operations Research*, 29(2), 103-121.
- Karimi, N., Zandieh, M., & Karamooz, H. R. (2010). Bi-objective group scheduling in hybrid flexible flowshop: a multi-phase approach. *Expert Systems with Applications*, 37(6), 4024-4032.
- Kim, S., & Lee, H. J. (2001). Allocation of buffer capacity to minimize average work-in-process. *Production Planning & Control*, 12(7), 706-716.
- Kolb, O., & Göttlich, S. (2015). A continuous buffer allocation model using stochastic processes. *European Journal of Operational Research*, 242(3), 865-874.
- Kose, S. Y., & Kilincci, O. (2015). Hybrid approach for buffer allocation in open serial production lines. *Computers & Operations Research*, 60, 67-78.
- Llerena, A. Malavasi, B. (2013). *Hypothesis Test of a New Line Balancing Approach with Dynamic Allocation of Assembly Operation*. University of Skovde, Bachelor Degree Projection.
- Lu, C., Xiao, S., Li, X., & Gao, L. (2016). An effective multi-objective discrete grey wolf optimizer for a real-world scheduling problem in welding production. *Advances in Engineering Software*, 99, 161-176.
- MacGregor Smith, J., & Cruz, F. R. B. (2005). The buffer allocation

- problem for general finite buffer queueing networks. *IIE Transactions*, 37(4), 343-365.
- Massim, Y., Yalaoui, F., Amodeo, L., Châtelet, É., & Zeblah, A. (2010). Efficient combined immune-decomposition algorithm for optimal buffer allocation in production lines for throughput and profit maximization. *Computers & Operations Research*, 37(4), 611-620.
- Mohammadi, S., Monfared, M. A. S., & Bashiri, M. (2017). An improved evolutionary algorithm for handling many-objective optimization problems. *Applied Soft Computing*, 52, 1239-1252.
- Mohtashami, A. (2014). A new hybrid method for buffer sizing and machine allocation in unreliable production and assembly lines with general distribution time-dependent parameters. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 74(9-12), 1577-1593.
- Mor, B., & Mosheiov, G. (2014). Batch scheduling of identical jobs with controllable processing times. *Computers & Operations Research*, 41, 115-124.
- Nahas, N., Ait-Kadi, D., & Nourelfath, M. (2006). A new approach for buffer allocation in unreliable production lines. *International journal of production economics*, 103(2), 873-881.
- Oesterle, J., Bauernhansl, T., & Amodeo, L. (2016). Hybrid multi-objective optimization method for solving simultaneously the line balancing, equipment and buffer sizing problems for hybrid assembly systems. *Procedia CIRP*, 57, 416-421.
- Raman, N. A., & Jamaludin, E. K. R. (2008). *Implementation of Toyota Production System (TPS) in the production line of a local automotive parts manufacturer*. In Proceedings of International Conference on Mechanical, Manufacturing Engineering.
- Sabuncuoglu, I., Erel, E., & Gocgun, Y. (2006). Analysis of serial production lines: characterisation study and a new heuristic procedure for optimal buffer allocation. *International Journal of Production Research*, 44(13), 2499-2523.
- Scott, J. R. (1995). *Fault tolerant design using single and multi-criteria genetic algorithms*. Master's thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology.
- Shi, C., & Gershwin, S. B. (2009). An efficient buffer design algorithm for production line profit maximization. *International Journal of Production Economics*, 122(2), 725-740.
- Smith, J. M., Cruz, F. R., & Van Woensel, T. (2010). Topological network design of general, finite, multi-server queueing networks. *European Journal of Operational Research*, 201(2), 427-441.
- So, K. C. (1997). Optimal buffer allocation strategy for minimizing work-in-process inventory in unpaced production lines. *IIE transactions*, 29(1),

81-88.

- Tiacci, L. (2015). Simultaneous balancing and buffer allocation decisions for the design of mixed-model assembly lines with parallel workstations and stochastic task times. *International Journal of Production Economics*, 162, 201-215.
- Troitiño Malavasi, B. M., & Muñoz Llerena, A. (2013). Hypothesis test of a new line balancing approach with dynamic allocation of assembly operations.
- Tsadiras, A. K., Papadopoulos, C. T., & O'Kelly, M. E. (2013). An artificial neural network based decision support system for solving the buffer allocation problem in reliable production lines. *Computers & industrial engineering*, 66(4), 1150-1162.
- Uruk, Z., Gultekin, H., & Akturk, M. S. (2013). Two-machine flowshop scheduling with flexible operations and controllable processing times. *Computers & Operations Research*, 40(2), 639-653.
- Yamashita, H., & Altıok, T. (1998). Buffer capacity allocation for a desired throughput in production lines. *IIE transactions*, 30(10), 883-892.
- Zandieh, M., Joreir-Ahmadi, M. N., & Fadaei-Rafsanjani, A. (2017). Buffer allocation problem and preventive maintenance planning in non-homogenous unreliable production lines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(5-8), 2581-2593.
- Zitzler, E. (1999). Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: Methods and applications.

استناد به این مقاله: مسیب مطلق، مائده، عظیمی، پرهام، امیری، مقصود. (۱۴۰۲). بهینه‌سازی خطوط تولید چند محصولی با رویکرد شبیه‌سازی و برنامه‌ریزی چندهدفه، *مطالعات مدیریت صنعتی*، ۲۱(۶۸)، ۶۷-۱۱۲.

DOI: 10.22054/jims.2019.30723.2015



Industrial Management Studies is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.