



## Multi-Objective Model for determining Optimal Buffer Size and Redundancy-Availability Allocation Simultaneously in Manufacturing Systems

### Maghsoud Amiri

\*Corresponding author, Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran. E-mail: amiri@atu.ac.ir

### Mohammad Taghi Taghavifard

Associate Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran. E-mail: dr.taghavifard@gmail.com

### Parham Azimi

Assistant Prof., Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial and Mechanical Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran. E-mail: p.azimi@yahoo.com

### Mojtaba Aghaei

Ph.D. Candidate, Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran. E-mail: mojtaba\_ghaei68@yahoo.com

### Abstract

**Objective:** This research was carried out with the aim of simultaneously examining the two categories of the most commonly encountered issues in the field of production and operations including the redundancy allocation and the buffers allocation. The study sought to optimize goals such as accessibility, system costs, and buffer capacity and for this purpose, variables such as the optimum capacity of buffers between machines, the number of high-reliability machines and their allocation, and the appropriate time schedule for maintenance and repair were investigated.

**Methods:** Considering the categorization of emergency and preventive failures for machinery, taking into account the cost of any failure for machinery, and considering the non-exponential and increasing distribution function for a variety of failures, it is very difficult to obtain and calculate mathematical functions related to the objectives of Availability and Cost explicitly. Therefore, a combination of simulation, experimental design, and neural network approach was used to estimate these two objective functions. In order to solve the proposed model, the NSGA-II algorithm was coded in MATLAB. Also, in order to analyze the efficiency of the suggested Algorithm, the MOPSO Algorithm was used and the Algorithms were compared with each other based on the performance measures of the algorithms.

**Results:** After applying the numerical example with the approach used, the results of the research indicate the validity of the proposed methodology for the problem under study.

**Conclusion:** Based on the set of solutions obtained from the algorithms used, different combinations of variables (including the number of machines per station, buffer capacity and duration of repairs) can be used to achieve the appropriate level of objectives.

**Keywords:** Buffer allocation problem, Redundancy allocation problem, Simulation, NSGA-II algorithm.

**Citation:** Amiri, M., Taghavifard, M.T., Azimi, P., & Aghaei, M. (2019). Multi-Objective Model for determining Optimal Buffer Size and Redundancy-Availability Allocation Simultaneously in Manufacturing Systems. *Industrial Management Journal*, 11(3), 427-460. (in Persian)

---

Industrial Management Journal, 2019, Vol. 11, No.3, pp. 427-460

DOI: 10.22059/imj.2019.276967.1007564

Received: February 27, 2019; Accepted: July 05, 2019

© Faculty of Management, University of Tehran



## مدل چندهدفه تعیین اندازه بهینه بافر و تخصیص افزونگی - دسترس پذیری به صورت همزمان در سیستم‌های تولیدی

### مقصود امیری

\* نویسنده مسئول، استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران. رایانامه: amiri@atu.ac.ir

### محمد تقی تقوی فرد

دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران. رایانامه: dr.taghavifard@gmail.com

### پرهام عظیمی

استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران. رایانامه: p.azimi@yahoo.com

### مجتبی آقایی

دانشجوی دکتری، مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران. رایانامه: mojtaba\_ghaei68@yahoo.com

## چکیده

**هدف:** این پژوهش با هدف بررسی همزمان دو دسته از مسائل پر کاربرد در حوزه تولید و عملیات شامل مسئله تخصیص افزونگی و تخصیص بافر انجام شده است. در این پژوهش، به دنبال بهینه‌سازی اهدافی از جمله دسترس‌پذیری، هزینه‌های سیستم و ظرفیت بافرها هستیم و بدین منظور متغیرهایی از جمله میزان بهینه ظرفیت بافرهای بین ماشین‌آلات، تعداد ماشین‌آلات با قابلیت اطمینان زیاد و تخصیص آنها و برنامه زمانی مناسب تعمیر و نگهداری بررسی شده است.

**روش:** با توجه به دسته‌بندی خرابی‌های اضطراری و پیشگیرانه برای ماشین‌آلات، لحاظ کردن هزینه هر نوع خرابی برای ماشین‌آلات و در نظرگیری تابع توزیع غیرنمایی و فزاینده برای انواع خرابی‌ها که به موجب آن، به دست آوردن و محاسبه توابع ریاضی مربوط به اهداف دسترس‌پذیری و هزینه به صورت صریح، بسیار سخت می‌شود، بنابراین رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی، طراحی آزمایش‌ها و شبکه عصبی به منظور برآورد این دو تابع هدف به کار گرفته شد. همچنین به منظور تحلیل کارایی الگوریتم مورد استفاده، از الگوریتم MOPSO استفاده شد و بر اساس شاخص‌های سنجش کارایی الگوریتم‌ها با یکدیگر مقایسه شدند.

**یافته‌ها:** بعد از پیاده‌سازی مثال عددی با رویکرد مورد استفاده، نتایج تحقیق، حاکی از اعتبار متدلوژی پیشنهادی برای مسئله مورد بررسی بود.

**نتیجه‌گیری:** بر اساس مجموعه جواب‌های به دست آمده از الگوریتم‌های استفاده شده، می‌توان ترکیب‌های مختلفی از متغیرهای مورد بررسی (شامل تعداد ماشین‌آلات در هر ایستگاه، ظرفیت بافر و مدت زمان انجام تعمیرها) را مورد استفاده قرار داد تا به سطح مناسبی از اهداف مسئله دست یابیم.

**کلیدواژه‌ها:** تخصیص بافر، تخصیص افزونگی، شبیه‌سازی، الگوریتم فراابتکاری NSGA-II.

**استناد:** امیری، مقصود؛ تقوی فرد، محمد تقی؛ عظیمی، پرهام؛ آقایی، مجتبی (۱۳۹۸). مدل چندهدفه تعیین اندازه بهینه بافر و تخصیص افزونگی - دسترس‌پذیری به صورت همزمان در سیستم‌های تولیدی. مدیریت صنعتی، ۱۱(۳)، ۴۲۷-۴۶۰.

مدیریت صنعتی، ۱۳۹۸، دوره ۱۱، شماره ۳، صص. ۴۲۷-۴۶۰

DOI: 10.22059/imj.2019.276967.1007564

دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۰۸، پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۱۴

© دانشکده مدیریت دانشگاه تهران

## مقدمه

از جمله مسائل مرتبط با طرح‌ریزی خط تولید، می‌توان به تعیین اندازه بافرهایی که در مقابل هر ایستگاه کاری خط تولید قرار دارند و به‌عنوان مسئله تخصیص بافر (BAP)<sup>۱</sup> شناخته می‌شوند و تعیین تعداد ماشین‌آلات در هر ایستگاه کاری که این مسئله نیز به‌عنوان مسئله تخصیص افزونگی (RAP)<sup>۲</sup> نام‌گذاری شده است، اشاره کرد (تی سادیراس، پاپادوپولوس و اوکلی<sup>۳</sup>، ۲۰۱۳). مسائل تخصیص افزونگی (RAP) مربوط به جست‌وجو برای ترکیب خاصی از اجزای جایگزین است که با ترکیب مناسب با اجزای تشکیل‌دهنده سیستم که به بهبود نیاز دارند، قابلیت اطمینان کل سیستم را افزایش می‌دهند (ماریانو و پیسه<sup>۴</sup>، ۲۰۱۵). در مسائل تخصیص افزونگی، زمانی که یک سیستم تعمیرپذیر باشد از واژه دسترس‌پذیری<sup>۵</sup> به‌جای قابلیت اطمینان<sup>۶</sup> استفاده می‌شود. دسترس‌پذیری به‌معنای درصدی از زمان است که سیستم تعمیرپذیر به‌صورت صحیح وظایف تعریف‌شده را انجام می‌دهد. به‌منظور افزایش دسترس‌پذیری سیستم دو راهکار عمده وجود دارد. راهکار نخست، بالا بردن قابلیت اطمینان اجزای سیستم و دیگری استفاده از اجزای مازاد در کنار اجزای اصلی سیستم به‌صورت موازی است. به‌علت محدودیت‌های اقتصادی و فناوریانه، بهترین و کارآمدترین روش برای افزایش دسترس‌پذیری سیستم، راهکار دوم یعنی استفاده از اجزای مازاد در کنار اجزای اصلی است (کائو و پراساد<sup>۷</sup>، ۲۰۰۰).

کارایی و دسترس‌پذیری خط تولید را می‌توان علاوه بر تخصیص افزونگی و انتخاب ماشین‌آلات با قابلیت اطمینان بالا، از طریق تعیین میزان بهینه بافرهای بین ماشین‌آلات بهبود بخشید. مدیریت اثربخش تخصیص اندازه بافر یکی از موضوع‌های کلیدی در سیستم‌های تولیدی است (یلکنسی کوزه و کیلینسی<sup>۸</sup>، ۲۰۱۵).

علاوه بر موارد گفته‌شده، می‌توان کارایی یک خط تولید را از طریق تدوین یک برنامه مناسب تعمیر و نگهداری بهبود بخشید. تعمیر و نگهداری پیشگیرانه از طریق برنامه‌های زمانی مناسب برای انجام فعالیت‌های نگهداری و تعمیر در مواقع خرابی‌های و شکست‌های ناگهانی، قابلیت اطمینان ماشین‌آلات موجود در خط تولید را در بازه‌های زمانی بلندمدت افزایش می‌دهد (یلکنسی کوزه و کیلینسی، ۲۰۱۵).

با توجه به این موارد، در این پژوهش به‌دنبال افزایش عملکرد کلی خط تولید از طریق تعیین میزان بهینه بافرهای بین ماشین‌آلات، انتخاب ماشین‌آلات با قابلیت اطمینان بالا و تخصیص آنها و تدوین برنامه‌ای مناسب تعمیر و نگهداری بهبود هستیم. بدین منظور در پژوهش حاضر، مسئله مورد بررسی تخصیص افزونگی و تخصیص بافر به‌صورت هم‌زمان با در نظر گرفتن موارد زیر است:

- در نظر گرفتن اهداف چندگانه شامل کمینه کردن هزینه‌ها (هزینه خرید ماشین‌آلات جدید، هزینه مرتبط با انواع تعمیرات و نگهداری و هزینه مرتبط با تخصیص ظرفیت‌های مختلف برای بافرها)، بیشینه‌سازی دسترس‌پذیری سیستم و کمینه‌سازی ظرفیت بافرهای تخصیص‌یافته در کل سیستم تولیدی.
- دسته‌بندی کردن خرابی‌های صورت‌گرفته به‌صورت اضطراری و پیشگیرانه برای تجهیزها و لحاظ کردن هزینه

1. Buffer Redundancy Allocation  
3. Tsadiras, Papadopoulos & O'Kelly  
5. Availability  
7. Kuo & Prasad

2. Server Allocation Problem  
4. Mariano & Pece  
6. Reliability  
8. Yelkenci Kose & Kilincci

هر نوع خرابی برای ماشین آلات و در نظر گیری تابع توزیع غیرنمایی (از جمله ویبول) برای انواع خرابی‌ها که به موجب آن، به دست آوردن و محاسبه توابع ریاضی مربوط به اهداف دسترس پذیری و هزینه به صورت صریح، بسیار سخت است. بنابراین از رویکرد ترکیبی شبیه سازی، طراحی آزمایش‌ها و شبکه عصبی به منظور برآورد این دو تابع هدف استفاده می‌شود.

- به کارگیری رویکرد فراابتکاری (الگوریتم NSGA-II) به عنوان یک الگوریتم کارا به منظور مدل ریاضی توسعه داده شده.

با توجه به موارد ذکر شده، به دنبال پاسخ به این پرسش هستیم که چگونه می‌توان از طریق ترکیب مسئله تخصیص افزونگی (اضافه کردن ماشین آلات به صورت موازی به هر ایستگاه) و نیز در نظر گرفتن موجودی بافر بین ایستگاه‌ها و در نظر گرفتن برنامه‌های زمانی انجام انواع تعمیرها و نگهداری، مدلی از یک خط تولید طراحی کنیم که بتوان در آن به بیشینه مقدار دسترس پذیری کل سیستم تولیدی در کنار کمینه سازی هزینه‌های خرید و نگهداری ماشین آلات (بر اساس موارد ذکر شده در ارتباط با خرابی ماشین آلات و نوع تعمیرهای مورد نیاز و نیز در نظر گیری هزینه هر بار خرابی) و نیز موجودی‌های بافر دست یابیم.

در ادامه، ساختار کلی پژوهش بدین شرح است. مبانی نظری و پیشینه پژوهش در بخش دوم ارائه شده است. در بخش سوم مدل سه هدفه ریاضی مرتبط با پژوهش توسعه داده شده و تشریح شده است. روش شناسی پژوهش در بخش چهارم شرح داده شده است. یک مثال کاربردی و تجزیه و تحلیل‌های مرتبط با آن در بخش پنجم از این پژوهش ارائه شده و در نهایت نتیجه گیری و پیشنهادها برای پژوهش‌های آتی در بخش ششم آورده شده است.

## پیشینه پژوهش

### تعیین ظرفیت بافر

مدیریت اثربخش تخصیص اندازه بافر یکی از موضوع‌های کلیدی در سیستم‌های تولیدی است (یلکنسی کوزه و کیلینسی، ۲۰۱۵). از جمله نخستین پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه می‌توان به پژوهش کوئینگزبرگ<sup>۱</sup> در سال ۱۹۵۹ اشاره کرد که به بررسی خطوط تولید و در نظر گیری ذخیره سازی مواد بین این خطوط پرداخت. گرشوین و اسکور<sup>۲</sup> (۲۰۰۰) در پژوهش خود دو مسئله کمینه سازی فضای تخصیص یافته به بافرها با در نظر گرفتن محدودیت نرخ تولید و بیشینه سازی نرخ تولید در ارتباط با محدودیت فضای کل بافرها را بررسی کردند. مانیتز<sup>۳</sup> (۲۰۰۸) فرایند تولید در خطوط مونتاژ چندمرحله‌ای با ظرفیت‌های بافر محدود و زمان‌های پردازش در ایستگاه‌های کاری به صورت توزیع‌های زمانی عمومی را بررسی کرده و برای تعیین خروجی این گونه از خطوط تولیدی روشی تخمینی ارائه کرد. امیری و محتشمی<sup>۴</sup> (۲۰۱۲) در پژوهش خود به بررسی حداکثر کردن نرخ تولید از طریق تعیین اندازه بهینه موجودی‌های بافر با استفاده از رویکرد تلفیقی متدولوژی سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک پرداختند. تی سادیراس و همکاران (۲۰۱۳) در پژوهش خود

1. Koenigsberg  
3. Manitz

2. Gershwin & Schor  
4. Amiri & Mohtashami

به منظور حل مسئله تخصیص بافر<sup>۱</sup> در یک خط تولید پایا از سیستم پشتیبان تصمیم مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده کردند. کاستا، آلفیری و فیچرا<sup>۲</sup> (۲۰۱۵)، به منظور حل مسئله تخصیص بافر در سیستم‌های تولیدی سری، از الگوریتم جست‌وجوی ممنوع موازی<sup>۳</sup> استفاده کردند. آمین، خان محمد، عبدالحامد و ال تمیمی<sup>۴</sup> (۲۰۱۸) در پژوهش خود به بررسی تأثیر ذخیره بافر و میزان تعمیرروی کارایی خط تولید پرداختند. در این پژوهش خط تولیدی بررسی شده شامل دو مرحله مجزا بوده که امکان در نظر گرفتن بافر بین این دو مرحله بررسی شده و برای تحلیل نتایج از رویکرد شبیه‌سازی استفاده کردند. نتایج پژوهش مؤید تأثیر مثبت در نظر گرفتن بافر و تعمیرات روی بهره‌وری خط تولیدی بوده است. ویس، آرنه شوارز و استولتز<sup>۵</sup> (۲۰۱۸) در مقاله خود به بررسی مسئله تخصیص بافر در خطوط تولیدی پرداخته و مدل‌ها، رویکردهای حل و نمونه‌های پژوهش را بررسی کردند. یویی، شینگ، هو، وو و سو<sup>۶</sup> (۲۰۱۸) در پژوهش خود مسئله تخصیص افزونگی را در کنار در نظر گرفتن بحث خرابی منابع مورد استفاده و تأثیر اضافه کردن بافر هنگام دسترسی نداشتن به مواد و منابع مورد نیاز در خط تولید به منظور ساخت محصول در یک خط تولید اتوماتیک را بررسی کردند. لیو، لی، زنگ و لی<sup>۷</sup> (۲۰۱۹) در پژوهش خود به بررسی مدل بهینه‌سازی یکپارچه بالانس خط تولید و مسئله تخصیص بافر پرداختند و به منظور حل مدل توسعه داده شده از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند.

### تخصیص افزونگی

مسائل تخصیص افزونگی (RAP) به جست‌وجو برای ترکیب خاصی از اجزای جایگزین مربوط است که با ترکیب مناسب با اجزای تشکیل دهنده سیستم که به بهبود نیاز دارند، قابلیت اطمینان کل سیستم را افزایش می‌دهند (ماریانو و پیسه، ۲۰۱۵). چرن<sup>۸</sup> (۱۹۹۲) اثبات کرد که مسائل تخصیص افزونگی به دسته مسائل NP-HARD تعلق دارد که نشان‌دهنده نیاز به استفاده از رویکردهای ابتکاری یا فراابتکاری برای حل این نوع از مسائل است، بنابراین برای حل این دسته از مسائل در پژوهش‌های گذشته روش‌های متعدد و متفاوتی توسعه داده شده است. نخستین بار آیدا، گن و یوکوتا<sup>۹</sup> (۱۹۹۴) و یوکوتا، گن و آیدا<sup>۱۰</sup> (۱۹۹۵) برای حل مسائل تخصیص افزونگی بدون امکان تخصیص اجزای غیرهم‌سان به هر زیرسیستم در سیستم‌های سری - موازی با چندین حالت خرابی، الگوریتم ژنتیک ساده‌ای ارائه کردند. توکلی مقدم، صفری و ساسانی<sup>۱۱</sup> (۲۰۰۸) برای مسائل تخصیص افزونگی با امکان تخصیص اجزای غیرهم‌سان به هر زیرسیستم و با امکان انتخاب سیاست افزونگی (RAPMC) برای هر زیرسیستم مدلی ارائه دادند و آن را با الگوریتم ممیتیک حل کردند. چمبری، رحمتی، نجفی و کریمی<sup>۱۲</sup> (۲۰۱۲)، در مقاله خود به توسعه مدل دوهدفه تخصیص افزونگی پرداختند. برای حل این مدل از دو الگوریتم NSGA-II و الگوریتم تجمع ذرات چندهدفه استفاده شده است. ژبانشنگ، زوتونگ، مینگفا و یینگ<sup>۱۳</sup> (۲۰۱۴) بر مبنای تئوری عدم اطمینان، مسئله تخصیص افزونگی سیستم سری - موازی با اجزای تعمیرپذیر را با

1. Buffer allocation problem

2. Costa, Alfieri &amp; Fichera

3. Parallel tabu search

4. Ameen, AlKahtani, Khan Mohammed, Abdulhameed &amp; El-Tamimi

6. Yue, Xing, Hu, Wu &amp; Su

5. Weiss, Arne Schwarz &amp; Stolletz

8. Chern

7. Liu, Lei, Zeng &amp; Li

10. Yokota, Gen &amp; Ida

9. Ida, Gen &amp; Yokota

11. Tavakkoli-Moghaddam, Safari &amp; Sassani

12. Chambari, Rahmati, Najafi &amp; Karimi

13. Jiansheng, Zutong, Mingfa &amp; Ying

در نظر گرفتن فاکتورهای غیرقطعی بررسی کردند که در آن نرخ خرابی، نرخ تعمیر و سایر پارامترهای مربوطه به‌عنوان متغیرهایی غیرقطعی در نظر گرفته شدند. ذوالفقاری، زینال همدانی و ابویی اردکان<sup>۱</sup> (۲۰۱۴) مسئله تخصیص افزونگی دودهدفه در یک سیستم با اجزای تعمیرپذیر و تعمیرناپذیر را بررسی کردند. اغلب، در مسئله تخصیص افزونگی برای اجزای افزونه از دو استراتژی فعال و آماده‌به‌کار استفاده می‌شود. ابویی اردکان، زینال همدانی و علینقیان<sup>۲</sup> (۲۰۱۵) در پژوهش خود در مسئله افزونگی تحت عنوان «افزونگی ترکیبی» استراتژی جدیدی را معرفی کرده و آن را در قالب یک مدل بهینه‌سازی تخصیص افزونگی چندهدفه بررسی کردند. کایدپور، امیری، رفیع زاده و شهرياری نیا<sup>۳</sup> (۲۰۱۷) در پژوهش خود به بررسی مسئله تخصیص افزونگی چندهدفه برای یک سیستم با اجزای تعمیرپذیر با در نظر گرفتن دسترس‌پذیری لحظه‌ای پرداختند. به‌منظور بررسی و حل مدل پژوهش از زنجیره‌های مارکوف و الگوریتم NSGAII استفاده شد. حیدری و سولیوان<sup>۴</sup> (۲۰۱۸) به‌منظور بهبود قابلیت اطمینان یک سیستم سری - موازی، استراتژی ترکیبی بررسی تجهیزهای مورد استفاده (شناسایی و حذف حالت‌های شکست که به افزایش قابلیت اطمینان منجر می‌شوند) و تخصیص قطعات (تجهیزات) مازاد را بررسی کرده و برای حل آن از الگوریتم دقیقی استفاده کردند. چانگ، کائو و کائو<sup>۵</sup> (۲۰۱۸) به‌منظور حل مسائل تخصیص افزونگی از رویکردی کارا مبتنی بر بهینه‌سازی شبیه‌سازی استفاده کردند. در این مقاله با توجه به اینکه در بعضی از شرایط دنیای واقعی، برای برخی از اجزای توابع هدف مثل قابلیت اطمینان سیستم، تحلیل و تخمین دقیقی در دسترس نیست، می‌توان توسط شبیه‌سازی تخمین این تابع را تخمین زده و از این رویکرد استفاده کرد. مثال عددی مورد استفاده در این پژوهش، مؤید کارایی این روش بوده است. هوانگ کولن و تهانی<sup>۶</sup> (۲۰۱۹) در پژوهش خود به بررسی مسئله تخصیص افزونگی - قابلیت اطمینان (RRAP) پرداخته و برای این نوع از مسائل مدلی جدید مبتنی بر رویکرد مبتنی بر امیدهای بقا ارائه کردند. ابعاد مسئله مورد بررسی در این پژوهش با استفاده از روش پیشنهادی کاهش یافته و به‌منظور تبدیل مدل بهینه‌سازی همراه با محدودیت به یک مدل بهینه‌سازی بدون محدودیت، از یک تابع جریمه استفاده شده و برای حل مدل مورد بررسی از الگوریتمی اکتشافی با نام فراوانی جست‌وجوی تصادفی استفاده کردند.

قاضی میرسعید، نجفی و شهرياری (۱۳۹۳) در پژوهش خود به ارائه روش حل دقیق برای بهبود پایایی سیستم‌های  $n$  از  $k$  در مسئله تخصیص مازاد با انتخاب راهبرد مازاد پرداختند. در این مقاله، انتخاب راهبرد مازاد برای هر زیرسیستم، متغیر تصمیم در نظر گرفته شده و کارایی روش پیشنهادی با حل مثالی معتبر در ادبیات موضوعی و مقایسه نتایج آن بررسی شده است.

شهرخی (۱۳۹۷) در پژوهشی به ارائه رویکردی برای محاسبه قابلیت اطمینان فازی بر پایه آهنگ خرابی فازی پرداخت. هدف از انجام این پژوهش ارائه روشی نوین برای مواجهه با عدم قطعیت در محاسبه قابلیت اطمینان قطعات از طریق بیان آهنگ خرابی قطعات به‌صورت عدد مثلثی فازی و به‌کارگیری محاسبه‌های فازی برای تبدیل آن به عدد قابلیت اطمینان فازی بوده است.

1. Zoulfaghari, Zeinal Hamadani, & Abouei Ardakan  
3. Kayedpour, Amiri, Rafizadeh & ShahryariNia  
5. Chang, Kuo-Hao. & Kuo

2. Abouei Ardakan, Zeinal Hamadani & Alinaghian  
4. Heydari & Sullivan  
6. Huang, Coolen & Tahani

## تعمیر و نگهداری در خط تولید

نگهداری و تعمیر برای موفقیت صنایع مدرن در عصر حاضر ابزاری کلیدی محسوب می‌شوند (البرباقی و تیواری<sup>۱</sup>، ۲۰۱۶). اجزای تشکیل دهنده سیستم‌ها و به خصوص سیستم‌های تولیدی به‌طور معمول در صورت خرابی، قابل تعمیر بوده و باید در تحلیل‌های مربوط به این سیستم‌ها هزینه‌های تعمیر و نگهداری در نظر گرفته شوند (ریگدون و باسو<sup>۲</sup>، ۲۰۰۰). انتخاب استراتژی تعمیر و نگهداری مناسب به فاکتورهای متعددی از جمله هزینه‌های از کارافتادگی (دستگاه‌ها)، قابلیت اطمینان (دسترس پذیری)، سیاست‌های کلی سازمان در خرید ماشین‌آلات و ... بستگی دارد (استنستورم پاریدا و کومار<sup>۳</sup>، ۲۰۱۶). اگرچه در ادبیات، مسائل مربوط به تعمیر، نگهداری و جایگزینی بسیار بررسی شده‌اند ولی در میان این پژوهش‌ها، استراتژی تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای سیستم‌های تولیدی از قبیل سیستم‌های سری - موازی در حوزه بهینه‌سازی تعمیر و نگهداری، سهم اندکی داشته‌اند (یحیی تبار و نجفی<sup>۴</sup>، ۲۰۱۶). اوکاشا و دان<sup>۵</sup> (۲۰۰۹) رویکرد بهینه‌سازی تعمیر و نگهداری جدیدی ارائه کردند که در آن اهداف قابلیت اطمینان سیستم و هزینه‌های طول عمر سیستم را بررسی کرده و با کمک الگوریتم ژنتیک مدل توسعه داده شده را حل کردند. ذوالفقاری و همکاران (۲۰۱۴) یک مدل ترکیبی غیرخطی عدد صحیح برای بهینه‌سازی دسترس پذیری سیستم با در نظر گرفتن اجزای تعمیرپذیر و تعمیرناپذیر به صورت هم‌زمان ارائه کردند. ژنگ، ژو، ژنگ و وو<sup>۶</sup> (۲۰۱۶) در پژوهش خود سیاست بهینه تعمیر و نگهداری برای سیستم‌هایی با تعمیر و نگهداری پیشگیرانه و دو دسته از خرابی‌ها ارائه کردند. یحیی تبار و نجفی (۲۰۱۷) از یک الگوریتم بهینه‌سازی تحت عنوان تولید مثل درجه دوم بر اساس علف هرز مهاجم به منظور کمینه‌سازی هزینه‌های تعمیر پیشگیرانه برای سیستم‌های سری - موازی استفاده کردند. اسماعیلیان و بکران (۱۳۹۳) در پژوهش خود به بررسی زمان بندی تعمیرات پیشگیرانه (PM) با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح و برنامه‌ریزی محدودیتی پرداختند. در این پژوهش دو مدل برنامه‌ریزی محدودیتی جدید برای زمان بندی تعمیرات پیشگیرانه پیشنهاد شده است که ضمن بی‌نیاز بودن به تعیین ترکیب انجام کارها توسط کارگران، در حالت چندمنبعی به کار برده می‌شود.

به‌عنوان جمع‌بندی کلی در رابطه با پژوهش‌های صورت گرفته می‌توان این‌گونه بیان کرد که در پژوهش‌های پیشین به جز چند مورد محدود (محتشمی<sup>۷</sup>، ۲۰۱۴؛ پورکریم گیلانی، عظیمی و اخوان نیاک<sup>۸</sup>، ۲۰۱۷ و عطار، رئیس و خلیلی دامغانی<sup>۹</sup>، ۲۰۱۶) به این نکته کمتر توجه شده است که با گذشت زمان و افزایش مدت زمان استفاده از دستگاه، نرخ خرابی دستگاه‌ها رو به افزایش بوده و از توابع توزیعی از جمله ویبول تبعیت می‌کنند. همچنین هزینه انجام تعمیرات با توجه به نوع خرابی صورت گرفته نیز از نکات درخور توجهی است که در پژوهش‌های پیشین کمتر بررسی شده است. در ارتباط با هزینه‌های مرتبط با خرابی‌ها، باید متناسب با وقوع هر نوع خرابی، تعمیرهای مد نظر روی سیستم انجام شود و هزینه هر نوع خرابی به صورت مجزا در مدل لحاظ شود (که می‌توان این مورد را وجه تمایز اصلی تابع هدف مرتبط با کمینه‌سازی هزینه‌ها در این پژوهش با تابع هدف مربوط به کمینه‌سازی هزینه‌ها در سایر پژوهش‌های مرتبط دانست).

1. Alrabghi &amp; Tiwari

3. Stenström, Parida &amp; Kumar

5. Okasha &amp; Dan

7. Mohtashami

9. Attar, Raissi &amp; Khalili-Damghani

2. Rigdon &amp; Basu

4. Yahyatabar &amp; Najafi

6. Zheng, Zhou, Zheng &amp; Wu

8. Pourkarim Guilani, Azimi &amp; Akhavan Niaki



همچنین در روش‌های انجام‌گرفته در پژوهش‌های پیشین، نحوه محاسبه حجم بهینه بافرها و ماشین‌آلات با مفروض‌های زیادی ساده شده‌اند که این ساده‌سازی سبب شده سیستم‌های مد نظر تا حدی از واقعیت خطوط تولیدی دور باشند که در عمل کاربرد آنها در مسائل علمی کاهش می‌یابد.

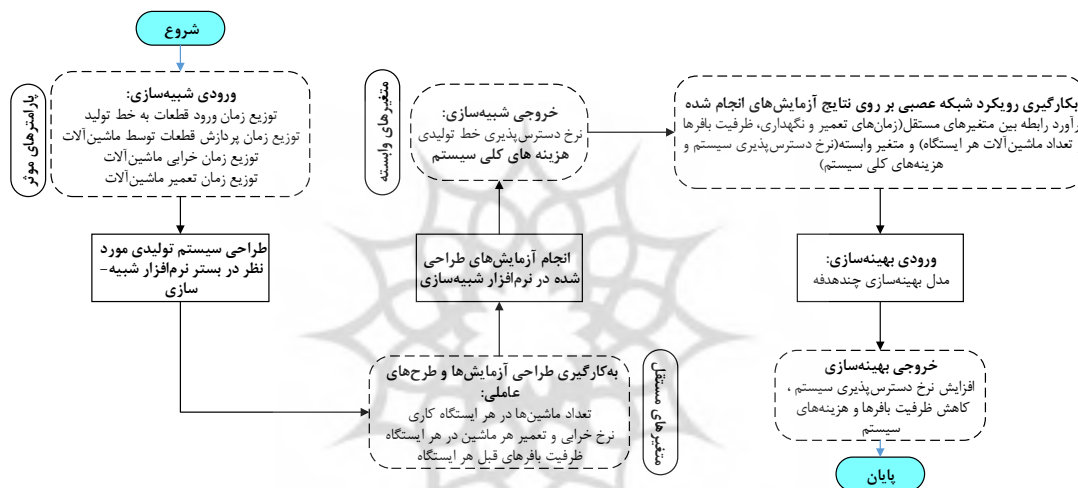
از جمله نوآوری‌های اصلی این پژوهش می‌توان به در نظر گرفتن هزینه‌های مرتبط با انواع خرابی‌ها برای اجزای سیستم مورد بررسی و تبعیت خرابی‌های اتفاق‌افتاده از توابع عمومی فزاینده اشاره کرد. زمانی که نرخ خرابی ماشین‌ها یا زمان پردازش توسط ماشین‌ها طی زمان به صورت ثابت باشد، به عبارتی توابع توزیع مورد استفاده به صورت نمایی یا ارلانگ باشند، می‌توان سیستم را از طریق روش‌هایی از جمله زنجیره مارکوف و تئوری چاقمن - کولموگروف قابلیت اطمینان (دسترس‌پذیری) محاسبه کرد (پورکریم گیلانی و همکاران، ۲۰۱۶). اما با توجه به اینکه در این پژوهش احتمال خرابی ماشین‌آلات به صورت فزاینده (تابع توزیع عمومی از جمله ویبول) در نظر گرفته شده، محاسبه تابع دسترس‌پذیری سیستم و هزینه‌های کلی سیستم مورد بررسی به صورت یک رابطه صریح ریاضی بسیار سخت می‌شود. با توجه به این مورد، برآورد تابع ریاضی مربوط به هزینه‌های کلی سیستم مورد بررسی به صورت رابطه‌ای صریح بسیار سخت می‌شود، زیرا در سیستم مورد بررسی متغیرهایی از جمله تعداد ماشین‌آلات در هر زیرسیستم، زمان‌های مربوط به انجام تعمیرات پیشگیرانه و ظرفیت بافرهای بین ایستگاه‌ها تأثیرگذار هستند.

به طور معمول از رویکرد طراحی آزمایش‌ها و رگرسیون می‌توان به منظور برآورد رابطه بین متغیرها در قالب یک رابطه صریح ریاضی استفاده کرد. ولی زمانی که تعداد متغیرهای مورد بررسی زیاد شود و هر یک از این متغیرها نیز سطوح چندگانه‌ای داشته باشند به طراحی تعداد بالایی آزمایش نیاز است که برای سیستم‌های بسیار پیچیده با تعداد بالای ماشین‌آلات این کار یا بسیار وقت‌گیر خواهد شد یا از لحاظ زمانی و هزینه مقدور نخواهد بود. بدین منظور در این پژوهش از رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی و شبکه عصبی استفاده شده است. بدین صورت که با طراحی و اجرای تعداد کمتری آزمایش بر اساس طرح پلاکت - برمان، خروجی حاصل از شبیه‌سازی بر اساس متغیرهای مورد بررسی، وارد شبکه عصبی شده و شبکه عصبی بر اساس فرایند آموزش به یافتن بهترین رابطه بین متغیرهای مورد بررسی (تعداد ماشین‌آلات در هر زیرسیستم، زمان‌های مربوط به انجام تعمیرات پیشگیرانه و ظرفیت بافرهای بین ایستگاه‌ها) و خروجی ناشی از آنها (دسترس‌پذیری سیستم و هزینه‌های سیستم) اقدام می‌کند و رابطه تخمین‌زده شده به عنوان تابع هدف مد نظر وارد الگوریتم ابتکاری خواهد شد. با این روش، به بررسی سیستم‌های پیچیده با تعداد زیادی متغیر تأثیرگذار قادر خواهیم بود.

### روش‌شناسی پژوهش

پژوهش پیش رو از نوع پژوهش‌های بهینه‌سازی است که به کمک روش‌های پژوهش در عملیات (برنامه‌ریزی غیرخطی، برنامه‌ریزی چندهدفه و مدل‌سازی)، طراحی آزمایش‌ها، شبکه عصبی، شبیه‌سازی و الگوریتم‌های فراابتکاری سعی در نیل به اهداف خود دارد. از حیث هدف کاربردی و از حیث روش (جهت‌گیری‌های پژوهش)، توسعه‌ای محسوب می‌شود. متدولوژی مد نظر برای توسعه در این پژوهش استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه در محیط قطعی و استفاده از طراحی آزمایش‌ها، شبکه‌های عصبی، شبیه‌سازی و الگوریتم فراابتکاری خواهد بود. مدل توسعه‌داده شده قادر به برآورد نرخ

دسترس پذیری کل سیستم، هزینه‌های مرتبط با خرید و تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات و نیز هزینه‌های موجودی کالای در جریان ساخت در بافرها و ظرفیت کل بافرها خواهد بود. این پژوهش از لحاظ استراتژی‌های پژوهش و زمان گردآوری، پیمایشی و از نوع مقطعی است. متدولوژی پیشنهادی در این پژوهش توسعه یک مدل ترکیبی بهینه‌سازی با استفاده از ترکیب مسئله تخصیص افزونگی و تخصیص بهینه بافر در یک سیستم تولیدی سری موازی در قالب یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه و برنامه‌ریزی غیرخطی و حل آن با الگوریتم‌های فراابتکاری است که در نهایت به بهینه‌سازی دسترس پذیری سیستم، کمینه‌سازی هزینه‌های خرید و نگهداری و تعمیر و نیز موجودی بافر منجر می‌شود. شکل ۱ چارچوب نظری پژوهش را نشان داده است. در ادامه، با توجه به چارچوب نظری پژوهش، مواردی پیرامون روش پژوهش تشریح می‌شوند.

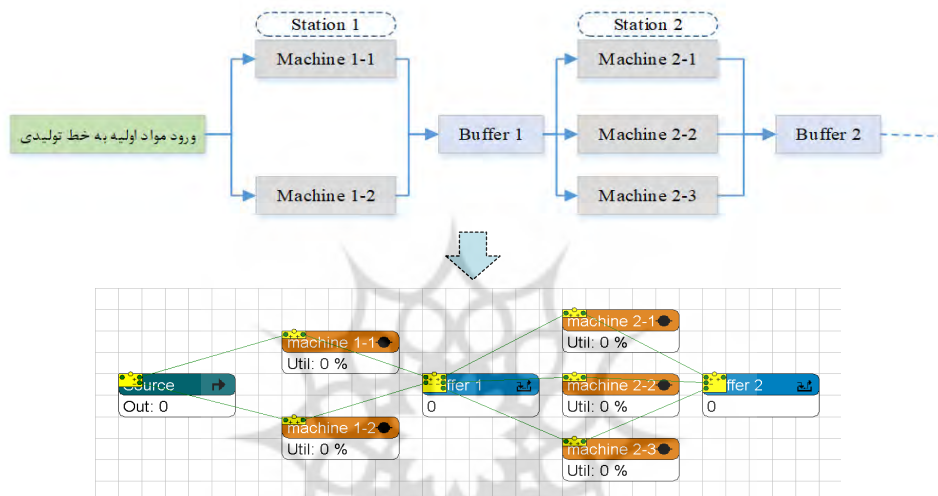


شکل ۱. چارچوب نظری پژوهش

### شبیه‌سازی

همان‌طور که اشاره شد، زمانی که سیستم‌ها اجزایی داشته باشند که خرابی‌های آنها با نرخ‌هایی به صورت فزاینده اتفاق بیفتند (عدم وجود نرخ خرابی به صورت ثابت)، استفاده از روش‌هایی مانند زنجیره‌های مارکوف به منظور محاسبه قابلیت اطمینان (دسترس‌پذیری در سیستم‌های تعمیرپذیر) دیگر کارایی نخواهد داشت و استفاده از این روش‌ها بسیار سخت خواهد شد. یکی از روش‌هایی که می‌توان از آن در این حوزه استفاده کرد رویکرد بهینه‌سازی بر مبنای شبیه‌سازی است (پورکریم گیلانی و همکاران، ۲۰۱۷). شبیه‌سازی گسسته پیشامد نیز یکی از انواع شبیه‌سازی است و هنگامی از آن استفاده می‌شود که اتفاق‌های سیستم در بازه‌های گسسته زمان رخ دهد. این روش برای محاسبه و تخمین پارامترهای سیستم‌ها روش کارایی است (لاوو، کن و غربی، ۲۰۰۹). در این پژوهش، از یکی از نرم‌افزارهای مورد استفاده در این نوع از شبیه‌سازی با عنوان ED<sup>۲</sup> استفاده شده است. در پژوهش اخیر پژوهشگرانی از جمله عطار و همکاران (۲۰۱۷) و پورکریم گیلانی و همکاران (۲۰۱۶)، کاربردهای موفق از این نرم‌افزار را می‌توان یافت. در این پژوهش به منظور

شبیه‌سازی سیستم مورد بررسی، از اتم‌های<sup>۱</sup> مختلفی که در نرم‌افزار شبیه‌سازی تعبیه‌شده، استفاده شده است. سیستم مورد بررسی، یک خط تولیدی سری موازی است که دارای K زیرسیستم (ایستگاه) بوده و بین آنها مکان‌هایی برای ذخیره محصول‌های نیمه‌ساخته در نظر گرفته شده است، بنابراین اتم‌هایی که در این پژوهش استفاده می‌شوند شامل اتم منبع<sup>۲</sup> (برای ورود مواد اولیه به خط تولید بر اساس تابع توزیع مشخص)، اتم خدمت‌دهنده<sup>۳</sup> (برای نشان دادن ماشین‌های موجود در هر ایستگاه) و اتم صف<sup>۴</sup> (برای نشان دادن بافرهای بین ایستگاه‌ها) است. شکل ۲، بخشی از یک خط تولید که توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی شده است را نشان می‌دهد.



شکل ۲. شبیه‌سازی بخشی از یک خط تولید با سیستم سری - موازی

در این پژوهش با توجه به رویکرد مد نظر و نبودن مقاله‌های مشابه به‌منظور محاسبه دسترس‌پذیری سیستم، از روشی ابتکاری استفاده شده است. در این روش به‌منظور محاسبه دسترس‌پذیری کل سیستم، از دو مفهوم خروجی نهایی خط تولید به‌عنوان محصول ساخته‌شده و خروجی قطعات در حال ساخت هر ایستگاه از فرایند تولید به دلایل مختلف از جمله در حال کار (یا خراب) بودن تمامی ماشین‌های ایستگاه بعد و نیز پر بودن بافر ایستگاه بعد استفاده شده است. زمانی که تمامی ماشین‌های یک ایستگاه در حال ارائه خدمت باشند یا تمامی آنها در حالت خرابی و انجام تعمیر باشند و هم‌زمان بافر قبل از این ایستگاه نیز از لحاظ ظرفیت تکمیل شده باشد، ایستگاه مد نظر (مجموع ماشین‌ها و بافر قبل از ایستگاه) از دسترس خارج شده و به‌ناچار خروجی ایستگاه قبل از آن تا زمان در دسترس شدن ایستگاه مد نظر از فرایند تولید خارج می‌شود، بنابراین دسترس‌پذیری سیستم را می‌توان از تقسیم مجموع خروجی نهایی سیستم بر مجموع خروجی نهایی سیستم و خروجی‌های هر ایستگاه از فرایند تولید محاسبه کرد. به‌طور مثال، به‌منظور محاسبه دسترس‌پذیری سیستمی همانند شکل ۳، به دو اتم sink در مدل نیاز است؛ یکی از این اتم‌ها به‌منظور نشان دادن

۱. به هر جزء موجود در این نرم‌افزار اتم گفته می‌شود.

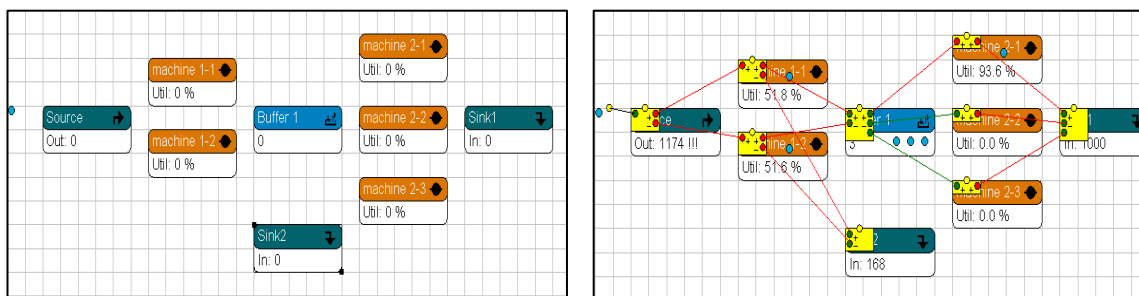
2. Source  
4. Queue

3. Server

خروجی نهایی خط تولید و دیگری برای نشان دادن خروجی‌های ایستگاه اول به دلیل در دسترس نبودن ایستگاه دوم. دسترس پذیری این سیستم در زمان مورد بررسی به صورت زیر محاسبه می‌شود.

خروجی قطعات نیمه‌ساخته از ایستگاه‌های کاری در فرایند تولید + خروجی نهایی از خط تولید) / (خروجی نهایی خط تولید) =  $A(t)$

$$A(t) = 1000 / (1000 + 168) = \%85/61$$



شکل ۳. نحوه محاسبه مقدار دسترس پذیری در مدل شبیه‌سازی شده

در این پژوهش، تابع هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها نیز باید همانند تابع هدف بیشینه دسترس پذیری، برآورد شود. این تابع متشکل از سه قسمت است. قسمت نخست شامل هزینه خرید ماشین‌آلات جدید، قسمت دوم مربوط به هزینه تخصیص بافرها بین ایستگاه‌ها و قسمت سوم شامل هزینه‌های مربوط به هر بار خرابی پیشگیرانه و تعمیرات مربوط به آن است. در واقع این تابع هدف نیز متامدلی است که با استفاده از طراحی آزمایش‌ها، شبیه‌سازی و شبکه عصبی روی مدل شبیه‌سازی شده خط تولیدی مد نظر، برازش داده می‌شود، زیرا با توجه به اینکه نرخ خرابی ماشین‌آلات از تابع توزیع ویبول تبعیت می‌کند و با توجه به پیچیدگی سیستم نمی‌توان با استفاده از روابط دقیق ریاضی مقدار هزینه‌های مرتبط با خرابی‌ها را پیش‌بینی کرد. در این تابع با قرار دادن مقادیر مختلف تعداد ماشین نوع  $i$  در ایستگاه  $i$  ام، ظرفیت بافر ایستگاه  $i$  ام و مدت زمان تعمیر پیشگیرانه بر روی ماشین  $i$  در ایستگاه  $i$ ، کل هزینه خط تولیدی مد نظر بر مبنای ترکیب‌های مختلف برآورد می‌شود.

### طراحی آزمایش‌ها

به‌منظور حل مدل توسعه‌داده‌شده، برای آزمایش مدل شبیه‌سازی و تخمین مقادیر مربوط به توابع هدف دسترس پذیری و هزینه‌ها، به یک طرح آزمایشی مناسب نیاز است. تعداد متغیرهای مورد بررسی در انتخاب طرح آزمایش بسیار تأثیرگذار است (مونتگومری<sup>۱</sup>، ۲۰۱۲). طرح‌های پلاکت - برمان از جمله «طرح‌های کسری دوسطحی» هستند که به‌لحاظ تعداد اجراء طرح‌های بسیار کارایی هستند، اما به دلیل برازش یک متامدل که به‌لحاظ آزمون‌های روایی و آماری رضایت‌بخش باشند، مناسب نیستند. همچنین به این دلیل که اجرای طرح‌های کسری دوسطحی، به دلیل کاهش تعداد آزمایش‌ها، به طراحی با درجه تجزیه پایین نیاز دارد، باعث کاهش دقت مدل برازش شده خواهد شد. در این پژوهش، از رویکرد ترکیبی طرح پلاکت - برمان و شبکه عصبی استفاده می‌شود، زیرا قصد داریم مدل پیشنهادی برای مسائل با ابعاد بزرگ نیز

کارایی داشته باشد و به دنبال این هستیم که هم‌زمان تأثیر تمامی متغیرها (از تأثیر زیاد تا تأثیر کم) روی اهداف مد نظر بررسی شود. با توجه به اینکه در شبکه عصبی، آموزش داده‌ها بر اساس تعدادی آزمایش اولیه انجام می‌شود، می‌توان ایراد به کارگیری طرح پلاکت - برمان (کاهش دقت متا مدل برآوردشده به دلیل کاهش تعداد آزمایش‌ها) را با کاهش خطای تابع برآوردشده از طریق آموزش مناسب شبکه عصبی برطرف کرد. در پژوهش بررسی شده پارامترهایی که به منظور انجام آزمایش‌های شبیه‌سازی استفاده می‌شوند شامل تعداد ماشین‌های هر ایستگاه، ظرفیت بافر هر ایستگاه و مدت زمان تعمیر پیشگیرانه برای هر ماشین در هر ایستگاه هستند.

### شبکه عصبی مصنوعی

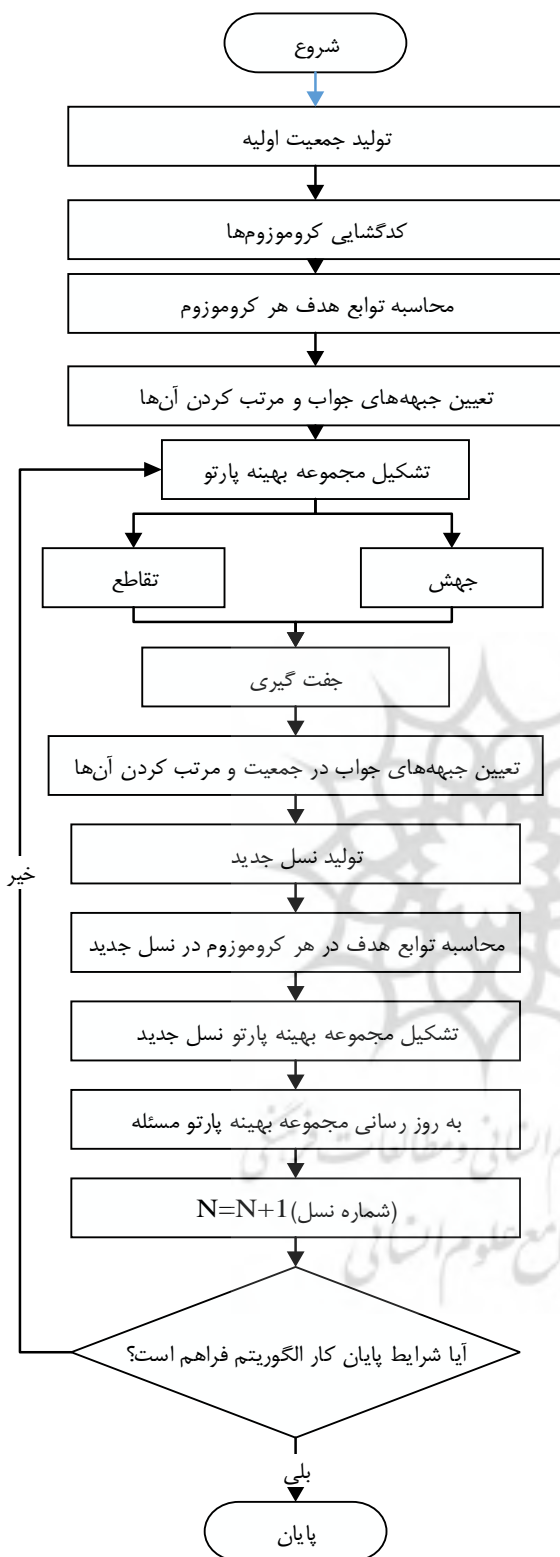
امروزه شبیه‌سازی ابزاری عمومی برای آنالیز و طراحی سیستم‌های پیچیده است. این عمومیت به علت انعطاف‌پذیری و همچنین توانایی آن برای مدل کردن دقیق سیستم‌های واقعی است. اگرچه شبیه‌سازی در مقایسه با مدل‌های ریاضی، برای مدل کردن سیستم‌های پیچیده و پویا، به فرض‌های محدودکننده کمتری نیاز دارد، خود این مدل‌های شبیه‌سازی معمولاً پیچیده بوده و دارای ابعاد زیادی هستند. همچنین نمی‌توان با استفاده از مدل شبیه‌سازی رابطه بین پارامترهای طراحی و معیارهای عملکرد را به طور صریح مشخص کرد. از این رو مدل شبیه‌سازی به فرایند سعی و خطایی تبدیل می‌شود که در آن مجموعه ورودی‌ها برای پیش‌بینی مجموعه خروجی‌ها استفاده می‌شود. اگر عملکرد دلخواه به دست آمد، یک طرح سیستم مناسب به دست آمده است، در غیر این صورت تا زمانی که عملکرد مطلوب به دست آید، این عمل تکرار می‌شود. متأسفانه طبیعت تکراری این فرایند موجب افزایش هزینه‌های محاسباتی می‌شود. پژوهشگران برای جلوگیری از این مشکل و آسان‌تر کردن و فهم روابط بین ورودی‌ها و نمایش دقیق خروجی‌های یک سیستم، گاهی از مدل کمکی ساده‌تری به نام فرامدل استفاده می‌کنند. یکی از اهداف عمده فرامدل‌ها، شبیه‌سازی روابط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها در فضای مقادیری است که پارامترها می‌توانند به خود بگیرند و در عین حال به لحاظ محاسباتی از مدل شبیه‌سازی کارتر باشند. یکی از روش‌های تولید فرامدل‌ها استفاده از شبکه عصبی مصنوعی است. شبکه‌های عصبی مصنوعی از جمله روش‌هایی هستند که قادر به تخمین موارد غیرخطی متعدد در داده‌ها بوده و برای دامنه وسیعی از مسائل غیرخطی چارچوب محاسبه‌ای انعطاف‌پذیری هستند. یکی از مزیت‌های بارز این‌گونه از مدل‌ها در مقایسه با مدل‌های غیرخطی دیگر، این است که شبکه‌های عصبی مصنوعی یک تقریب زنده عام هستند که می‌توانند هر نوع تابعی را با دقت دلخواه تقریب بزنند (اسفه و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۷). هدف از به کارگیری شبکه‌های عصبی در این پژوهش، تخمین توابع هدف مربوط به اهداف دسترس‌پذیری و هزینه‌های کلی سیستم بر مبنای آزمایش‌های طراحی شده و اجراشده در مدل شبیه‌سازی است. شبکه‌های عصبی مورد استفاده در این پژوهش شامل Net Forward Feed، Net Pattern، Net Fit و RBF هستند که بر مبنای مقدار خطای نهایی برای هر یک از این انواع، شبکه‌ای انتخاب می‌شود که برای هر یک از توابع هدف در نظر گرفته شده با کمترین خطای برآورد، بهترین برآورد را نشان دهد.

### الگوریتم‌های فرا ابتکاری

همان‌طور که ذکر شد هر دو مسئله تخصیص افزونگی (چرن، ۱۹۹۲) و تخصیص بافر (هوانگ، گوانگ، پائو و چو<sup>۱</sup>، ۲۰۰۲) از جمله مسائل NP-HARD هستند، بنابراین در این پژوهش از الگوریتم NSGA-II که از الگوریتم‌های پرکاربرد در این حوزه است، استفاده شده است.

### الگوریتم NSGA-II

الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب<sup>۲</sup> (NSGA-II) یکی از الگوریتم‌های کارآمد و مشهور بهینه‌یابی چندهدفه است که در سال ۲۰۰۱ ارائه کرد. روش کار و الگوریتم کلی NSGA-II بدین شرح است: ایجاد جمعیت اولیه، محاسبه معیارهای برازندگی، مرتب کردن جمعیت بر اساس شرط‌های غلبه کردن، محاسبه فاصله ازدحامی، انتخاب. به محض اینکه جمعیت اولیه بر اساس شرط‌های غلبه کردن مرتب شد، مقدار فاصله ازدحامی در آن محاسبه خواهد شد و انتخاب از میان جمعیت اولیه آغاز می‌شود (کوئلو کوئلو، لامونت و ون لدهویزن<sup>۳</sup>، ۲۰۰۷). شکل ۴ فلوجارت عمومی الگوریتم NSGA-II را نشان می‌دهد. در ادامه به بررسی نمایش جواب‌ها، عملگر تقاطع و جهش در مسئله مورد بررسی پرداخته می‌شود.



شکل ۴. فلوجارت عمومی الگوریتم NSGA-II

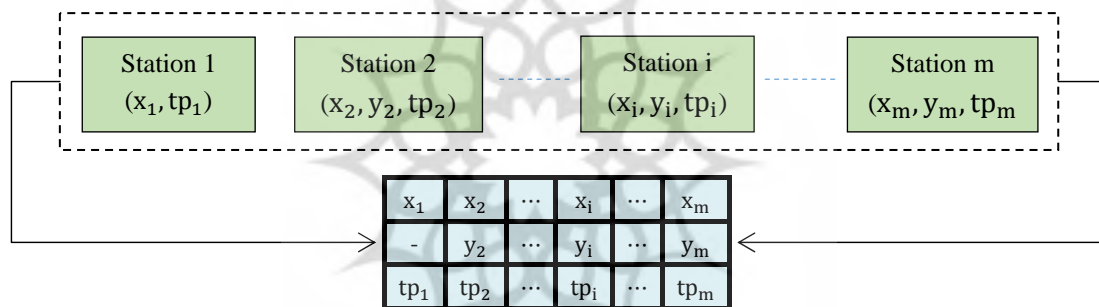
منبع: اسفه و همکاران (۲۰۱۷)

1. Huang, Guang, Pao & Chou  
3. Coello Coello, Lamont & Van Veldhuizen

2. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

## نمایش جواب

کروموزوم‌ها مجموعه‌ای از ژن‌ها هستند که در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. تعداد ژن‌های موجود در یک کروموزوم با تعداد متغیرهای تصمیم مورد بررسی برابر است. تشریح ساختار کروموزوم از بخش‌های مهم یک الگوریتم است. با در نظر گرفتن هر کروموزوم به‌عنوان یک جواب، برای مسئله مورد بررسی هر کروموزوم را می‌توان یک جواب مسئله دانست که نشان‌دهنده ترکیبی از تعداد ماشین‌های در نظر گرفته‌شده برای هر ایستگاه کاری، ظرفیت بافر برای هر ایستگاه کاری و مدت زمان انجام تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای هر یک از ماشین‌ها در هر ایستگاه کاری است. با توجه به این موارد، در این پژوهش راه‌حل‌های کدگذاری‌شده به‌صورت یک ماتریس  $3 \times m$  بوده که عناصر مربوط به نخستین سطر از این ماتریس، نشان‌دهنده تعداد ماشین‌های در نظر گرفته‌شده برای هر ایستگاه کاری، عناصر مربوط به سطر دوم نشان‌دهنده ظرفیت بافر برای هر ایستگاه کاری و در نهایت عناصر سطر سوم نشان‌دهنده مدت زمان انجام تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای هر یک از ماشین‌ها در هر ایستگاه کاری است. شکل ۵ ساختار نمونه‌ای از کروموزوم برای هر ایستگاه کاری را نشان می‌دهد.



شکل ۵. ساختار کروموزوم برای هر ایستگاه کاری

## تقاطع

عملگر تقاطع فضای راه حل جدید را بررسی کرده و امکان تولید راه‌حل‌های جدید به نام فرزندان را از طریق جفت کردن کروموزوم‌ها میسر می‌کند (پسندیده<sup>۱</sup>، ۲۰۱۵). در این پژوهش به‌منظور تولید جمعیت از تقاطع چند نقطه‌ای استفاده شده است. علاوه بر این، پس از تولید جمعیت اولیه، اپراتور انتخاب چرخ رولت برای انتخاب والد برای عمل تقاطع استفاده می‌شود. در این عملیات، برای هر ژن در کروموزوم والدین، یک عدد باینری تصادفی تعیین می‌شود. اگر این عدد تصادفی برابر با ۱ باشد، مقادیر ژن پدر و مادر با یکدیگر مبادله می‌شوند. در غیر این صورت تبادلی بین والدین اتفاق نخواهد افتاد (توکلی مقدم، صفری و ساسانی، ۲۰۰۸). شکل ۶ عملگر تقاطع در الگوریتم NSGA-II برای مسئله مورد بررسی را نشان می‌دهد. در این ساختار، همان‌طور که در بخش کروموزوم‌ها تشریح شد، به‌طور مثال سیستمی با ۵ ایستگاه کاری و ۴ بافر بین آنها در نظر گرفته شده است. برای کروموزوم‌های هر یک از والدین، سه سطر مختلف در نظر گرفته می‌شود. در سطر نخست تعداد ماشین‌آلات در هر ایستگاه کاری، در سطر دوم ظرفیت در نظر گرفته‌شده برای هر

بافر و در نهایت در سطر سوم مدت زمان انجام تعمیرات پیشگیرانه برای ماشین آلات هر ایستگاه ذکر می شود و بر اساس عملگر تقاطع چندنقطه ای فرایند تقاطع صورت می پذیرد.

۳	۴	۱	۲	۳	۳	والد ۲	۳	۲	۱	۲	۳	۲	والد ۱
۴۵	۴۰	۲۰	۱۵	۳۵	-		۳۵	۲۰	۲۵	۲۰	۳۰	-	
۶۰۰۰	۱۰۰۰	۱۲۰۰۰	۶۵۰۰	۸۰۰۰	۷۰۰۰		۵۰۰۰	۱۲۰۰۰	۹۰۰۰	۱۳۰۰۰	۶۰۰۰	۸۰۰۰	
↓													
						۰	۱	۱	۰	۰	۰	تقاطع	
						۱	۰	۰	۰	۱	۰	چند	
						۰	۰	۱	۱	۰	۰	نقطه	
↓													
۳	۲	۴	۲	۳	۳	فرزند ۲	۳	۲	۳	۲	۳	۲	فرزند ۱
۳۵	۴۰	۲۰	۱۵	۶۰	-		۵۰	۲۰	۲۵	۲۰	۴۰	-	
۶۰۰۰	۱۰۰۰۰	۹۰۰۰	۸۵۰۰	۸۰۰۰	۷۰۰۰		۵۰۰۰	۱۲۰۰۰	۷۰۰۰	۱۱۰۰۰	۶۰۰۰	۸۰۰۰	

شکل ۶. عملگر تقاطع

### جهش<sup>۱</sup>

جهش فرایندی است که طی آن با تغییر در یک یا چند ژن مربوط به یک کروموزوم والد، یک کروموزوم فرزند تولید می شود (ذوالفقاری و همکاران، ۲۰۱۴). در این پژوهش، عملگر جهش برای هر نسل از کروموزوم ها یک عدد تصادفی ایجاد می کند، سپس اگر عدد ایجاد شده کمتر از نرخ جهش در نظر گرفته شده باشد ژن ها به طور تصادفی جهش می یابند. شکل ۷ عملگر جهش را نشان می دهد. در این شکل عددهای تصادفی ایجاد شده به ایجاد جهش در تعداد ماشین آلات ایستگاه های چهارم و ششم و نیز زمان انجام تعمیرات پیشگیرانه برای ماشین آلات ایستگاه دوم منجر می شود و این تغییرها، خود را در کروموزوم فرزند ایجاد شده نشان می دهند.

۲	۳	۲	۱	۲	۳	والد ۱
-	۳۰	۲۰	۲۵	۲۰	۳۵	
۸۰۰۰	۶۰۰۰	۱۳۰۰۰	۹۰۰۰	۱۲۰۰۰	۵۰۰۰	
↓						
۰/۱۷	۰/۲۶	۰/۵۵	۰/۰۶	۰/۳۷	۰/۰۹	عدد تصادفی
-	۰/۳۶	۰/۲۸	۰/۸	۰/۳۸	۰/۲۲	
۰/۵۲	۰/۰۴	۰/۱۶	۰/۲۷	۰/۴۸	۰/۳۶	
↓						
۲	۳	۲	۳	۲	۴	فرزند
-	۳۰	۲۰	۲۵	۲۰	۳۵	
۸۰۰۰	۵۰۰۰	۱۳۰۰۰	۹۰۰۰	۱۲۰۰۰	۵۰۰۰	

شکل ۷. عملگر جهش



## طراحی آزمایش‌های تاگوچی

در این پژوهش به منظور تعیین سطح مناسب پارامترهای الگوریتم مورد استفاده از طراحی آزمایش‌های تاگوچی استفاده شده است. جدول زیر دامنه جست‌وجوی سطوح پارامترهای ورودی الگوریتم مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول ۱. سطوح مربوط به پارامترهای الگوریتم NSGA-II

الگوریتم	پارامترها (فاکتورها)	توضیحات	دامنه	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
NSGA-II	nPOP	اندازه جمعیت اولیه	۱۰۰-۲۰	۲۰	۵۰	۱۰۰
	Pc	درصد تقاطع	۰/۹-۰/۷	۰/۷	۰/۸	۰/۹
	Pm	درصد جهش	۰/۳-۰/۱	۰/۱	۰/۲	۰/۳
	Iteration	تعداد تکرار	۱۵۰-۵۰	۵۰	۱۰۰	۱۵۰

با توجه به چندهدفه بودن مدل مورد بررسی، متغیر پاسخ در نظر گرفته شده برای الگوریتم NSGA-II به منظور حل مدل، تعداد جواب‌های پارتو ناشی از حل الگوریتم بوده است. برخی از خصوصیت‌های طرح ارائه شده برای این مسئله به شرح زیر است:

در این طرح فقط اثرهای اصلی برآورد می‌شوند، برای برآورد اثرهای اصلی عوامل سه سطحی به دو درجه آزادی و همچنین یک درجه آزادی برای برآورد میانگین کل نیاز است، بنابراین برای هر درجه آزادی حداقل به یک درجه آزادی نیاز داریم. در نتیجه حداقل تعداد آزمایش مورد نیاز ۹ آزمایش است.

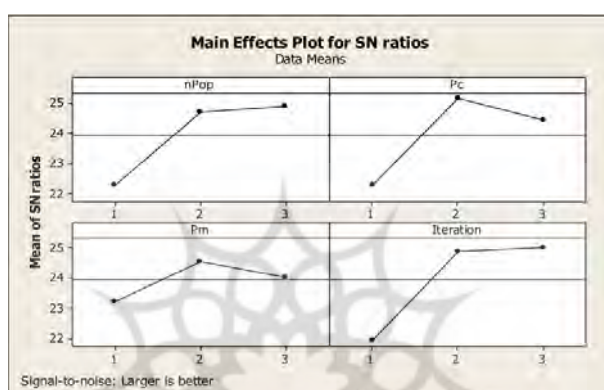
طرحی که برای این مسئله در نظر گرفته شد، دارای ۱۸ آزمایش بوده که در نتیجه ۹ آزمایش بیشتر داریم. اگر از حداقل تعداد آزمایش‌ها استفاده شود، در مقایسه با طرح ارائه شده، اطلاعات کمتری وجود دارد. همچنین می‌توان برآوردهای اثرهای اصلی را برای پیش‌بینی پاسخ هر ترکیب از سطوح عوامل استفاده کرد. طرح مطلوب طرحی است که واریانس خطای پیش‌بینی آن با طرح فاکتوریل کاملاً یکسان باشد. وقتی هدف غربال عامل‌ها یا ویژگی‌شناسی فرایند باشد معمولاً بهتر است که تعداد سطوح عامل مد نظر کم در نظر گرفته شود (که در اغلب موارد از سه سطح استفاده می‌شود) که در این پژوهش نیز برای پارامترهای مورد بررسی سه سطح در نظر گرفته شده است.

به‌طور مثال در یکی از آزمایش‌های طراحی شده برای هر چهار پارامتر جمعیت، جهش و ... سطح ۱ در نظر گرفته شده و برای این آزمایش تعداد جواب پارتو به دست آمده نیز محاسبه می‌شود. همین کار را برای ۱۷ آزمایش دیگر نیز انجام می‌دهیم. برای مثال در آزمایش دوم برای پارامتر جمعیت از سطح نخست استفاده شود و برای سه پارامتر دوم از سطح دوم استفاده شود. در نهایت به منظور تعیین چگونگی تأثیر هر عامل روی متغیر پاسخ به منظور مشخص کردن سطوح بهینه و تحلیل داده‌ها از نسبت سیگنال به نویز استفاده می‌شود. مشخصه‌های مورد بررسی از نوع متغیرهای پیوسته هستند. در اینجا هدف از این آزمایش‌ها یافتن ترکیبی از سطوح عوامل کنترلی است، به گونه‌ای که برای متغیر کمی تابع هدف مقدار میانگین تا حد امکان بزرگ‌تر شده و هم‌زمان انحراف معیار برای متغیر پاسخ بالا حداقل شود. برای دستیابی به این هدف، معیار عملکرد تاگوچی یعنی نسبت سیگنال به نویز به عنوان متغیر پاسخ در نظر گرفته

می شود. متغیر پاسخ باید تا حد امکان بزرگ تر شود، بنابراین متغیر مرتبط با آن با حالت «بزرگ تر بهتر است» است. با توجه به موارد مطرح شده، نسبت سیگنال به نویز برای این متغیر به صورت رابطه زیر خواهد بود:

$$\eta = \left(\frac{S}{N}\right) = -10 \log \left(\frac{1}{n}\right) \sum_i \left(\frac{1}{y_i^2}\right) \quad \text{رابطه (۱)}$$

پس از لحاظ کردن دامنه های مشخص شده برای پارامترها در کد طراحی شده برای مدل مورد بررسی، آزمایش های طراحی شده در نرم افزار متلب اجرا شده و بر اساس نتایج به دست آمده، شکل ۸ چگونگی تغییر مقادیر شاخص  $S/N$  را در سطوح مختلف پارامترها نشان می دهد.



شکل ۸. نمودار اثر اصلی برای مقادیر شاخص  $S/N$

بر اساس نتایج به دست آمده از انجام آزمایش های تاگوچی، سطوح ایده آل فاکتورهای برای الگوریتم NSGA-II به شرح جدول ۲ است.

جدول ۲. سطوح ایده آل فاکتورهای برای الگوریتم NSGA-II

سطح ایده آل	توضیحات	پارامترها (فاکتورها)	الگوریتم
۱۰۰	اندازه جمعیت اولیه	nPOP	NSGA-II
۰/۸	درصد تقاطع	Pc	
۰/۲	درصد جهش	Pm	
۱۵۰	تعداد تکرار	Iteration	

## مدل پژوهش

### مفروضات

مفروضات اساسی که در این پژوهش مبنای مدل توسعه داده شده قرار گرفته اند عبارتند از:

- سیستم تولیدی مد نظر شامل  $m_i$  ایستگاه کاری ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) و  $k - 1$  بافر ( $b_i, i = 1, \dots, k - 1$ ) است که هر جفت متوالی از ایستگاه ها را از یکدیگر جدا می کند.

۲. ایستگاه  $m_i$  زمانی که بافر  $b_{i-1}$  (بافر قبل از آن) خالی باشد یا بافر  $b_i$  (بافر بعد از آن) پر باشد و همچنین ایستگاه پس از آن مشغول انجام فعالیت یا تحت عملیات تعمیر باشد از کار باز می‌ایستد.
۳. زمان‌های پردازش ماشین‌آلات در هر ایستگاه از توابع توزیع عمومی تبعیت می‌کنند.
۴. فرض بر این است که دستگاه‌های موجود در خط تولید همگی مدتی عمر مفید خود را سپری کرده باشند (به این دلیل که در شرایط نو بودن دستگاه‌ها توابع توزیع عمر آنها به نمایی منفی نزدیک بوده و انجام تعمیرات پیشگیری احتمال خرابی را افزایش می‌دهد).
۵. زمان لازم برای اعمال تعمیرات پیشگیری باید از زمان لازم برای انجام تعمیرات اضطراری کمتر باشد.
۶. احتمال خرابی ماشین‌آلات به صورت افزایشی در نظر گرفته شده و از تابع توزیع عمومی از جمله ویبول تبعیت می‌کنند.
۷. زمان‌های انجام تعمیرات برای هر یک از ماشین‌آلات در نظر گرفته شده و تابع توزیع فراوانی آنها بر اساس داده‌های سیستم برآورد می‌شوند.
۸. زمانی که یکی از ماشین‌های ایستگاه‌ها دچار خرابی می‌شود، فرایند تولید از طریق ماشین دیگر موجود در ایستگاه ادامه می‌یابد.
۹. مقادیر مربوط به وزن‌ها و هزینه‌ها برای ماشین‌آلات قطعی هستند.
۱۰. هزینه‌های مربوط به سیستم شامل هزینه‌های خرید ماشین‌آلات جدید، هزینه‌های مرتبط با خرابی‌ها و تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات، هزینه رکود سیستم در صورت از کار افتادگی خط و هزینه نگهداری موجودی بافرها می‌شود.
۱۱. شایان ذکر است که هزینه نگهداری و تعمیر انواع خرابی‌های ماشین‌آلات، دربرگیرنده هزینه‌های مربوط به تعمیرهای پیشگیرانه و اصلاحی است که زمان انجام هر یک از این تعمیرها باید با تابع نرخ خرابی اجزا متناسب باشد.
۱۲. به منظور خرید ماشین‌آلات برای افزودنی محدودیتی در تهیه ماشین‌آلات از بازار وجود ندارد.
۱۳. ماشین‌آلات مورد استفاده در این پژوهش برای هر ایستگاه فقط می‌توانند از یک نوع باشند.
۱۴. اجزای (ماشین‌آلات) مورد استفاده در سیستم تولیدی مورد بحث با در نظر گرفتن رویکرد سنتی، فقط می‌توانند دو حالت ممکن کاملاً در حال کار و کاملاً خراب را قبول کنند.

### پارامترها و متغیرهای مدل

پارامترها و متغیرهای مورد استفاده در این پژوهش به شرح ذیل هستند:

$x_{ij}$	تعداد ماشین نوع $j$ در سیستم $i$ (ایستگاه کاری $i$ )
$y_i$	ظرفیت بافر ایستگاه کاری $i$
$tp_{ij}$	مدت‌زمان تعمیر و نگهداری پیشگیرانه ماشین نوع $j$ در ایستگاه کاری $i$

$n$	تعداد ماشین نوع $z$ مربوط به ایستگاه $i$
$m$	تعداد ایستگاه‌های کاری خط تولید
$C_{ij}$	هزینه خرید ماشین نوع $z$ مرتبط با ایستگاه کاری $i$
$l_{ij}$	تعداد ماشین موجود نوع $z$ در ایستگاه کاری $i$
$u_i$	حد بالای ظرفیت بافر $i$
$l_i$	حد پایین ظرفیت بافر $i$
$u_y$	حد بالا برای ظرفیت کل بافرها از نظر تعداد
$uv_i$	حد بالای حجم کل قطعات نیمه‌ساخته در ایستگاه $i$
$lv_i$	حد پایین حجم کل قطعات نیمه‌ساخته در ایستگاه $i$
$v_i$	حجم هر قطعه در ایستگاه $i$
$uvy$	حد بالا برای کل بافر از لحاظ حجم
$uw_i$	حد بالای وزن کل تجهیزات در ایستگاه $i$
$lw_i$	حد پایین وزن کل تجهیزات در ایستگاه $i$
$w_i$	وزن هر یک از تجهیزات در ایستگاه $i$
$uwy$	حد بالای وزن مجموع بافر در کل خط تولید
$lc_i$	حد بالای هزینه برای هر بافر در ایستگاه $i$
$uc_i$	حد پایین هزینه برای هر بافر در ایستگاه $i$
$c_i y_i$	هزینه بافر برای هر ایستگاه
$ucy$	حد بالای هزینه تمام بافرها در خط تولید
$u_{ij}$	حد بالای تعداد ماشین‌آلات نوع $z$ در ایستگاه کاری $i$
$l_{ij}$	حد پایین تعداد ماشین‌آلات نوع $z$ در ایستگاه کاری $i$
$ux_i$	حد بالای تعداد کل ماشین‌آلات مختلف نوع $z$ در زیرسیستم $i$
$ux$	حد بالای تعداد ماشین‌آلات در کل خط تولید
$w_{ij}$	وزن ماشین‌آلات نوع $z$ در ایستگاه کاری $i$
$lw_{ij}$	حد پایین وزن ماشین‌آلات نوع $z$ در ایستگاه کاری $i$
$uw_{ij}$	حد بالای وزن ماشین‌آلات نوع $z$ در ایستگاه کاری $i$
$uwx_{ij}$	حد بالای وزن مجموع ماشین‌آلات مختلف $z$ در زیرسیستم $i$
$uwx$	حد بالا برای وزن کل ماشین‌آلات خط تولید
$v_{ij}$	حجم ماشین‌آلات نوع $z$ در ایستگاه کاری $i$
$lv_{ij}$	حد پایین حجم ماشین‌آلات نوع $z$ در ایستگاه کاری $i$

$uv_{ij}$	حد بالای حجم ماشین‌آلات نوع $z$ در ایستگاه کاری $i$
$uvx_i$	حد بالای حجم کل ماشین‌آلات مختلف نوع $z$ در ایستگاه کاری $i$
$uvx$	حد بالای حجم کل ماشین‌آلات خط تولید
$c_{ij}$	هزینه خرید ماشین‌آلات نوع $z$ در ایستگاه کاری $i$
$lc_{ij}$	حد پایین هزینه خرید ماشین‌آلات نوع $z$ در ایستگاه کاری $i$
$uc_{ij}$	حد بالای هزینه خرید ماشین‌آلات نوع $z$ در ایستگاه کاری $i$
$ucx_i$	حد بالای هزینه خرید مجموع تعداد ماشین‌آلات نوع $z$ در زیرسیستم $i$
$ucx$	حد بالا برای هزینه خرید ماشین‌آلات در کل خط تولید
$l_{f_{xyt}}$	حد پایین نرخ دسترس‌پذیری برای کل خط تولید
$ucxy$	کل بودجه‌ای که تصمیم‌گیرنده می‌خواهد در کل خط تولید سرمایه‌گذاری کند.
$uwxy_i$	حد بالای وزن کلی ماشین‌آلات با انواع مختلف $z$ و وزن بافر در ایستگاه کاری $i$
$uwxy$	حد بالای وزن کلی ماشین‌آلات با انواع مختلف $z$ و وزن بافر در کل خط تولید
$uvxy_i$	حد بالای حجم کل ماشین‌آلات با انواع مختلف $z$ و وزن بافر در ایستگاه کاری $i$
$uvxy$	حد بالای حجم کل ماشین‌آلات با انواع مختلف $z$ و وزن بافر در کل خط تولید
$f_1$	تابع تخمین‌زننده نرخ دسترس‌پذیری بر اساس متغیرهای تصمیم $x_{ij}, p_{ij}, y_i$
$f_2$	تابع تخمین‌زننده هزینه‌های خط تولیدی بر اساس متغیرهای تصمیم $x_{ij}, p_{ij}, y_i$
$f_3$	تابع کمینه‌سازی ظرفیت کلی بافرها در خط تولید

### فرموله کردن مدل پیشنهادی

زمانی که نرخ خرابی ماشین‌ها یا زمان پردازش توسط ماشین‌ها طی زمان ثابت باشد، به عبارتی توابع توزیع مورد استفاده به صورت نمایی یا ارلانگ باشند، از طریق روش‌هایی از جمله زنجیره مارکوف و تئوری چاپمن - کولموگروف می‌توان قابلیت اطمینان (دسترس‌پذیری) سیستم را محاسبه کرد (پورکریم گیلانی و همکاران، ۲۰۱۶). اما با توجه به اینکه در این پژوهش احتمال خرابی ماشین‌آلات به صورت افزاینده (تابع توزیع عمومی از جمله ویبول) در نظر گرفته شده، محاسبه تابع دسترس‌پذیری سیستم و هزینه‌های کلی سیستم مورد بررسی به صورت یک رابطه صریح ریاضی بسیار سخت می‌شود، بنابراین از یک رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی، طراحی آزمایش‌ها و شبکه عصبی به منظور به دست آوردن تخمینی از توابع اهداف دسترس‌پذیری و هزینه استفاده شده است. با توجه به موارد ذکر شده همان‌طور که در مدل توسعه داده شده مشاهده خواهید کرد، توابع هدف دسترس‌پذیری و هزینه به صورت یک برآوردگر ارائه شده‌اند.

$$\text{Max}(Z_1) = f_1(x_{ij}, y_i, p_{ij}), \forall i = 1, \dots, m; \forall j = 1, \dots, n \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$\text{Min}(Z_2) = f_2(x_{ij}, y_i, p_{ij}), i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$\text{Min}(Z_3) = \sum_{i=1}^{m-1} y_i \quad \text{رابطه (۴)}$$

Subject to:

$$l_i \leq y_i \leq u_i, \forall i = 1, 2, \dots, m - 1 \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\sum_{i=1}^{m-1} y_i \leq uy \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$lv_i \leq v_i y_i \leq uv_i, \forall i = 1, 2, \dots, m - 1 \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\sum_{i=1}^{m-1} v_i y_i \leq uvy \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$lw_i \leq w_i y_i \leq uw_i, \forall i = 1, 2, \dots, m - 1 \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$\sum_{i=1}^{m-1} w_i y_i \leq uwy \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$lc_i \leq c_i y_i \leq uc_i, \forall i = 1, 2, \dots, m - 1 \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$\sum_{i=1}^{m-1} c_i y_i \leq ucy \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$l_{ij} \leq x_{ij} \leq u_{ij}, \forall i = 1, 2, \dots, m; \forall j = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq ux_i, \forall i = 1, 2, \dots, m \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq ux \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$lw_{ij} \leq w_{ij} x_{ij} \leq uw_{ij} \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$\sum_{j=1}^n w_{ij} x_{ij} \leq uw x_i, \forall i = 1, 2, \dots, m \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_{ij} x_{ij} \leq uw x \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$lv_{ij} \leq v_{ij} x_{ij} \leq uv_{ij}, \forall i = 1, 2, \dots, m; \forall j = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$\sum_{j=1}^n v_{ij}x_{ij} \leq uvx_i, \forall i = 1, 2, \dots, m \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n v_{ij}x_{ij} \leq uvx \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

$$lc_{ij} \leq c_{ij}(x_{ij} - l_{ij}) \leq uc_{ij}, \forall i = 1, 2, \dots, m; \forall j = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

$$\sum_{j=1}^n c_{ij}(x_{ij} - l_{ij}) \leq ucx_i, \forall i = 1, 2, \dots, m \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij}(x_{ij} - l_{ij}) \leq ucx \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

$$f_1(x_{ij}, y_i, tp_{ij}) \geq l_{f_{x_{ij}, y_i, tp_{ij}}} \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

$$f_2(x_{ij}, y_i, tp_{ij}) \leq ucxy \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

$$\sum_{j=1}^n w_{ij}x_{ij} + w_i y_i \leq uwxy_i, \forall i = 1, 2, \dots, m \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_{ij}x_{ij} + \sum_{i=1}^{m-1} w_i y_i \leq uwxy \quad \text{رابطه (۲۸)}$$

$$\sum_{j=1}^n v_{ij}x_{ij} + v_i y_i \leq uvxy_i, \forall i = 1, 2, \dots, m \quad \text{رابطه (۲۹)}$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n v_{ij}x_{ij} + \sum_{i=1}^{m-1} v_i y_i \leq uvxy \quad \text{رابطه (۳۰)}$$

$$x_{ij}, y_i, tp_{ij} \geq 0 \text{ and integer} \quad \text{رابطه (۳۱)}$$

در مدل بالا، متغیرهای تصمیم شامل ماشین‌های نوع  $z$  که در ایستگاه  $i$  استفاده خواهند شد، ظرفیت بافر هر ایستگاه و زمان مربوط به انجام تعمیر و نگهداری پیشگیرانه ماشین نوع  $z$  در ایستگاه  $i$  هستند. رابطه ۲، به‌عنوان تابع هدف اول مدل به حداکثر کردن دسترس‌پذیری کل خط تولید می‌پردازد که در آن نشان‌دهنده تعداد ماشین نوع  $z$  است که باید در زیرسیستم  $i$  ام (ایستگاه  $i$  ام) وجود داشته باشد،  $m_i$  نشان‌دهنده تعداد ایستگاه‌های خط تولید،  $n$  نشان‌دهنده تعداد ماشین نوع  $z$  ام در ارتباط با ایستگاه  $i$  ام،  $y_i$  نشان‌دهنده ظرفیت بافر مربوط به ایستگاه  $i$  ام،  $tp_{ij}$  نشان‌دهنده مدت‌زمان تعمیرات پیشگیرانه ماشین نوع  $z$  ام در زیرسیستم  $i$  ام و  $f_1(x_{ij}, y_i, tp_{ij})$  تابع تخمین‌زننده نرخ

دسترس‌پذیری بر مبنای  $x_{ij}$ ,  $y_i$  و  $tp_{ij}$  است. به بیان دیگر  $f_1(x_{ij}, y_i, tp_{ij})$  تابعی از تعداد ماشین‌ها، ظرفیت بافرهای خط و مدت زمان تعمیرات پیشگیرانه روی ماشین‌ها است. در واقع  $f_1(x_{ij}, y_i, tp_{ij})$  متامدلی است که با استفاده از طراحی آزمایش‌ها و شبیه‌سازی روی مدل شبیه‌سازی شده خط تولیدی مد نظر، برازش داده می‌شود. در این تابع با قرار دادن مقادیر مختلف تعداد ماشین نوع  $i$  در ایستگاه  $i$  ام، ظرفیت بافر ایستگاه  $i$  ام و مدت زمان تعمیر پیشگیرانه روی ماشین  $i$  در ایستگاه  $i$  نرخ دسترس‌پذیری خط تولیدی مد نظر بر مبنای ترکیب‌های مختلف برآورد می‌شود. رابطه ۳، تابع هدف دوم مدل، هزینه‌ها را حداقل می‌کند که تابع تخمین‌زننده این تابع هدف نیز همانند تابع هدف اول محاسبه می‌شود. رابطه ۴ به‌عنوان تابع هدف سوم مدل، ظرفیت کل بافرها در خط تولید مد نظر را حداقل می‌کند. رابطه ۵ حدود بالا و پایین ظرفیت هر بافر از نظر تعداد در هر ایستگاه را نشان می‌دهد. رابطه ۶ حد بالای ظرفیت کل بافرها در خط تولید و رابطه ۷ حد پایین و بالای حجم بافرها در هر ایستگاه را نشان می‌دهد. رابطه ۸ حد بالای حجم بافرها در کل خط تولید و رابطه ۹ حد بالا و پایین وزن بافرها در هر ایستگاه را نشان می‌دهد. رابطه ۱۰ حد بالای وزن بافرها در کل خط تولید را نشان داده و رابطه ۱۱ حدود بالا و پایین بهای تمام‌شده بافرهای هر ایستگاه را نشان می‌دهد. رابطه ۱۲ حد بالای بهای تمام‌شده کل قطعات نیمه‌ساخته در خط تولید را نشان می‌دهد و رابطه ۱۳ نشان‌دهنده حدود پایین و بالای تعداد ماشین‌های نوع  $i$  در هر ایستگاه است. رابطه ۱۴ حد بالای تعداد ماشین‌های نوع  $i$  در ایستگاه  $i$  را نشان داده و رابطه ۵ حد بالای تعداد کل ماشین‌ها در خط تولید را نشان می‌دهد. رابطه ۱۶ حد بالای وزن ماشین‌های نوع  $i$  در هر ایستگاه را نشان می‌دهد و رابطه ۷ نشان‌دهنده حد بالای وزن انواع ماشین‌ها در ایستگاه  $i$  است. رابطه ۱۸ حد بالای وزن کل ماشین‌های خط تولید و رابطه ۱۹ حد بالا و پایین حجم ماشین‌های نوع  $i$  در هر ایستگاه را نشان می‌دهد. رابطه ۲۰ حد بالای حجم انواع ماشین‌ها در ایستگاه  $i$  را نشان می‌دهد و رابطه ۲۱ نشان‌دهنده حد بالای حجم کل ماشین‌ها خط تولید است. رابطه ۲۲ حد بالا و پایین هزینه خرید ماشین‌آلات جدید نوع  $i$  در زیرسیستم  $i$  را نشان می‌دهد. رابطه ۲۳ حد بالای هزینه خرید ماشین‌آلات از انواع مختلف در ایستگاه  $i$  و رابطه ۲۴ حد بالای هزینه خرید ماشین‌آلات در کل خط تولید را نشان می‌دهد. محدودیت ۲۵ پایین برای میزان دسترس‌پذیری کل خط تولید را نشان می‌دهد. محدودیت ۲۶ حد بالا برای همه انواع هزینه‌ها از جمله هزینه خرید ماشین‌های جدید، هزینه‌های تخصیص بافرها، هزینه‌های تعمیرات پیشگیرانه و اضطراری کل خط تولید را نشان می‌دهد، در واقع، این محدودیت، کل بودجه‌ای را نشان می‌دهد که تصمیم‌گیرنده می‌خواهد در کل خط تولید سرمایه‌گذاری کند. رابطه ۲۷ حد بالای مجموع وزن ماشین‌هایی با انواع مختلف  $i$  در زیرسیستم  $i$  و وزن بافرهای هر ایستگاه را نشان می‌دهد. در واقع این محدودیت نشان‌دهنده کل وزنی است که تصمیم‌گیرنده مایل است در ایستگاه  $i$  داشته باشد. رابطه ۲۸ حد بالای مجموع وزن ماشین‌های موجود در خط، وزن ماشین‌هایی که به سیستم اضافه می‌شوند و نیز وزن کل بافرهای خط تولید را نشان می‌دهد که تصمیم‌گیرنده مایل است در خط لحاظ کند. رابطه ۲۹ حد بالای مجموع حجم ماشین‌هایی با انواع مختلف  $i$  در زیرسیستم  $i$  و حجم بافرهای هر ایستگاه را نشان می‌دهد. در واقع این محدودیت نشان‌دهنده کل حجمی است که تصمیم‌گیرنده مایل است در ایستگاه  $i$  داشته باشد. رابطه ۳۰ حد بالای مجموع حجم ماشین‌های موجود در خط، حجم ماشین‌هایی که به سیستم اضافه می‌شوند و نیز حجم کل بافرهای خط تولید را نشان می‌دهد که تصمیم‌گیرنده مایل است در خط لحاظ کند و جزئی از محدودیت‌های فضای تولیدی به شمار می‌رود.



همچنین در ارتباط با مدل تشریح شده باید گفت که پس از انجام بررسی منابع موجود اعم از مقاله‌ها، پایان‌نامه‌ها و کتاب‌های مرتبط با موضوع، عمده محدودیت‌های این پژوهش از مقاله‌ها و ادبیات موجود در ارتباط با موضوع، جمع‌آوری شده و در قالب یک مدل کلی ارائه شده است. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به پژوهش محتشمی (۲۰۱۴)، امیری و محتشمی (۲۰۱۲)، محتشمی (۱۳۹۰)، پورکریم گیلانی و همکاران (۲۰۱۷) و عطار و همکاران (۲۰۱۷) اشاره کرد. در خصوص توابع هدف نیز دو تابع هدف اول با توجه به مفروض‌های مورد استفاده در این پژوهش و با رویکرد تشریح شده برآورد می‌شوند که این دو تابع، در پژوهش‌های پیشین بدین صورت بررسی نشده‌اند و برای نخستین بار در این پژوهش بدین صورت بررسی می‌شوند.

## تجزیه و تحلیل داده‌ها

### مثال عددی

در این بخش به منظور تشریح کاربرد روش‌شناسی ارائه شده، یک مثال عددی آورده می‌شود. شکل ۹ یک خط تولید با ۷ ایستگاه کاری را نشان می‌دهد که از ۱۰ ماشین و ۵ بافر تشکیل شده است. در این خط تولیدی، مواد اولیه نوع ۱ به ماشین اول (ایستگاه اول) وارد شده و سپس توسط ماشین‌های ایستگاه سوم نیز پردازش می‌شود. مواد اولیه نوع ۲ به ماشین دوم (ایستگاه دوم) وارد شده و سپس توسط ماشین ۴ (ایستگاه چهارم) پردازش می‌شود. ماشین‌های ۶ و ۷ (ایستگاه پنجم) خروجی‌های ایستگاه‌های ۳ و ۴ را مونتاژ کرده و به ایستگاه ششم (ماشین‌های ۸ و ۹) ارسال می‌کند. در ادامه پردازش‌های تکمیلی روی محصول توسط ایستگاه هفتم (ماشین ۱۰) انجام شده و خروجی این ایستگاه محصول نهایی خواهد بود. با توجه به اینکه در این پژوهش، ماشین‌آلات مورد استفاده در خط تولید تعمیرپذیر در نظر گرفته شده‌اند و نیز عنوان شد که برای تعمیر ماشین‌آلات از دو رویکرد پیشگیرانه و اضطراری استفاده می‌شود، بنابراین برای لحاظ کردن هزینه برطرف کردن انواع خرابی‌های صورت گرفته، به مشخص شدن هزینه‌های مرتبط با این دو نوع تعمیر نیاز است. بنابراین، بر اساس خط تولید طراحی شده در شکل ۹، در جدول ۳ مقادیر مربوط به هزینه‌های مرتبط با انجام انواع تعمیرات به‌عنوان پارامترهای ورودی به مدل مورد بررسی در نظر گرفته شده است.

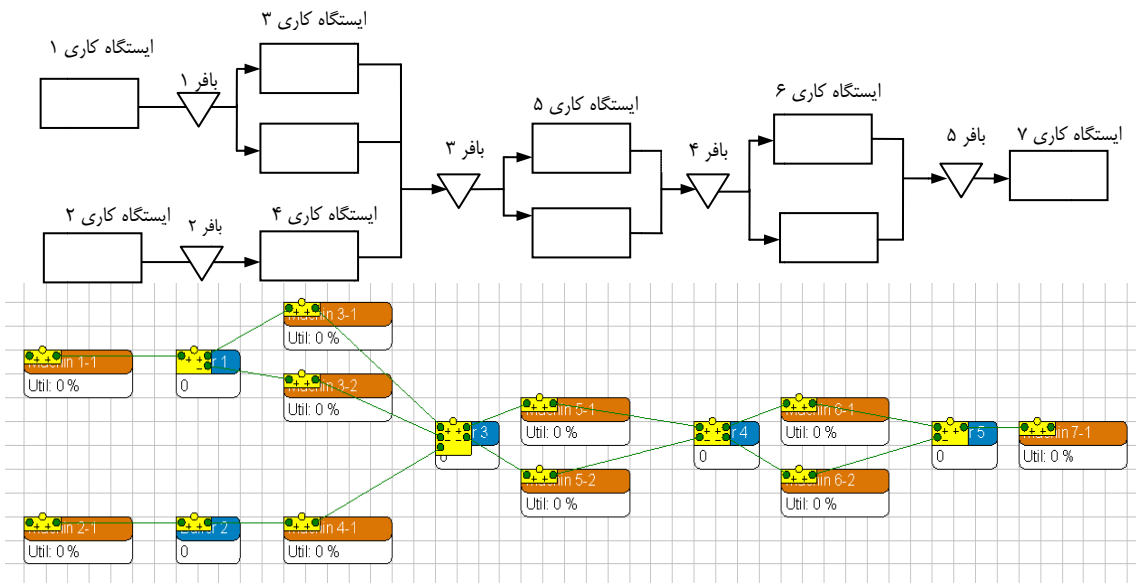
برای جلوگیری از خرابی‌های اضطراری و به‌منظور بالا بردن عمر مفید سیستم‌ها، مطمئناً اعمال تعمیرات پیشگیری در شرایط به‌خصوصی لازم و مفید است. میزان اعمال تعمیرات پیشگیری باید در حد اقتصادی و قابل قبول باشد؛ زیرا انجام آنها شامل هزینه‌های نیروی انسانی، مواد، قطعات، هزینه توقف ماشین‌آلات و رکود سیستم و سایر هزینه‌های معمول در نگهداری و تعمیرات خواهد بود. از سوی دیگر طولانی شدن فواصل بین تعمیرات پیشگیری نیز باعث خواهد شد که به‌علت بروز خرابی‌های اضطراری، خسارت ایجاد شود. در این میان لازم است در هر سیستم تولیدی و برای هر ماشین، برای انجام تعمیرات پیشگیری که به‌ازای آن جمع هزینه‌های تعمیرات اضطراری و پیشگیری به حداقل می‌رسد، فاصله زمانی بهینه محاسبه شود. فرض بر این است که ماشین‌آلات موجود در خط تولید همگی مدتی از عمر مفید خود را سپری کرده باشند، زیرا در شرایط نو بودن دستگاه‌ها توابع توزیع عمر آنها نزدیک به نمایی منفی بوده و انجام تعمیرات پیشگیری احتمال خرابی را افزایش می‌دهد. ذکر این نکته ضروری است که زمانی کارایی ماشین با اعمال تعمیرات پیشگیرانه افزایش پیدا خواهد کرد که زمان لازم برای اعمال این تعمیرات روی این ماشین‌آلات از زمان لازم برای

اعمال تعمیرات اضطراری کمتر باشد. با توجه به موارد ذکرشده، توابع توزیع مربوط به زمان‌های بین دو خرابی به صورت توابع توزیع همانند جدول ۴ در نظر گرفته شده است. در جدول ۵، علاوه بر زمان‌های بین خرابی‌های ماشین‌آلات و نیز زمان‌های تعمیر آنها، زمان‌های پردازش قطعات توسط ماشین‌آلات مختلف نیز ارائه شده است.

در جدول ۵ نیز حدود پایین و بالا برای متغیرهای مورد بررسی، هزینه خرید ماشین‌آلات جدید، هزینه اضافه کردن به ظرفیت بافرها، وزن و حجم ماشین‌آلات و بافرها ارائه شده است. پس از گردآوری پارامترهای مورد نیاز مسئله به انجام طراحی آزمایش‌ها در نرم‌افزار مینی تب ۱۷ با به‌کارگیری روش پلاکت - برمان اقدام می‌شود که بخشی از آزمایش‌های طراحی شده در جدول ۶ مشاهده می‌شود. برای هر یک از این آزمایش‌ها، مقادیر مربوط به توابع هدف دسترس‌پذیری و هزینه‌های کلی خط تولید (شامل هزینه خرید ماشین‌آلات جدید، هزینه انجام انواع تعمیرات، هزینه تخصیص ظرفیت بیشتر برای بافرها و هزینه رکود سیستم به علت در دسترس نبودن هر یک از ایستگاه‌ها) محاسبه شد. دو ستون آخر مربوط به جدول ۶ نتایج حاصل از اجراهای شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. گفتنی است، مدت زمان هر آزمایش شبیه‌سازی شده ۱/۰۰۰/۰۰۰ واحد زمانی در نظر گرفته شده است.

پس از انجام شبیه‌سازی، نتایج مربوطه به‌عنوان پارامترهای ورودی، به شبکه‌های عصبی وارد شدند. همان‌طور که پیش‌تر نیز توضیح داده شد، هنگامی که توابع خرابی‌ها برای ماشین‌آلات از توابع توزیع افزایشی مثل ویبول تبعیت کنند، محاسبه تابع هدف که از این توابع تأثیر می‌پذیرند سخت است، بنابراین از شبکه‌های عصبی برای برآورد رابطه بین پارامترهای ورودی و متغیرهای پاسخ استفاده شد.

شبکه‌های عصبی مورد استفاده و تعریف‌شده به‌ترتیب feed forward net و pattern net و fit net و RBF هستند. با توجه به اینکه با استفاده از شبکه RBF به جواب‌های نامرتبلی دست یافته شد، این شبکه از انجام محاسبه‌ها حذف شد. شبکه‌های عصبی مختلف هنگام فیت کردن یک مدل، برای داده‌های مختلف، نتایج متفاوتی ارائه می‌دهند. در بررسی هر چهار مدل شبکه عصبی و با توجه به مقدار خطای نهایی هر یک از شبکه‌های عصبی، بهترین فیت با استفاده از شبکه عصبی feed forward net به دست آمد که این شبکه عصبی به‌عنوان شبکه پیش‌فرض تعریف شد. به منظور تعیین تعداد لایه‌ها و نودهای هر لایه مخفی، از تکرار و تحلیل مقادیر به‌صورت تجربی بر اساس سعی و خطا استفاده شد. همچنین به‌منظور آموزش، اعتبارسنجی و آزمون نتایج حاصل از شبکه عصبی مورد استفاده از تابع محرک سیگموئید استفاده شد. بر اساس محاسبه‌های صورت‌گرفته تعداد لایه‌ها و تعداد نودهای موجود در هر لایه (همان‌طور که در جدول ۷ آورده شده است) که کمترین مقدار RMSE و MAE را داشتند انتخاب شدند. نتایج حاصل از ضریب هم‌بستگی اعتبارسنجی و ضریب هم‌بستگی آموزش برای این مقادیر مناسب‌تر از مقادیر دیگر بوده، بنابراین ساختار شبکه عصبی بدین صورت استفاده شد. شکل ۱۰، شبکه مورد استفاده برای مسئله بررسی شده با لایه‌های پنهان و تعداد نورون‌های هر لایه را نشان می‌دهد. جدول ۷ نیز ساختار مناسب شبکه عصبی مورد استفاده را نشان می‌دهد. جدول ۷ بیانگر این امر است که شبکه عصبی مورد استفاده دارای حداکثر دقت و میزان خطای کمتر از ۵ درصد بوده و از هم‌بستگی بالایی (۰/۹۹۹) برخوردار است.



شکل ۹. خط تولیدی فرضی به همراه مدل شبیه‌سازی شده

جدول ۳. مقادیر مربوط به هزینه‌های مرتبط با انجام انواع تعمیرات

ایستگاه اول	ایستگاه دوم	ایستگاه سوم	ایستگاه چهارم	ایستگاه پنجم	ایستگاه ششم	ایستگاه هفتم	پارامترها
۲۲۰۰۰	۲۴۰۰۰	۲۱۰۰۰	۲۹۰۰۰	۱۶۰۰۰	۳۴۰۰۰	۱۶۰۰۰	هزینه اعمال یک ساعت تعمیر پیشگیرانه ( $C_p$ ) (به ریال)
۵۵۰۰۰	۵۸۰۰۰	۴۵۰۰۰	۷۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۷۵۰۰۰	۳۵۰۰۰	هزینه اعمال یک ساعت تعمیر اضطراری ( $C_e$ ) (به ریال)
۲۱۰۰۰	۲۳۰۰۰	۱۸۰۰۰	۲۴۰۰۰	۱۴۰۰۰	۲۳۰۰۰	۱۵۰۰۰	هزینه یک ساعت رکود سیستم ناشی از در دسترس نبودن ایستگاه ( $C_D$ ) (به ریال)

جدول ۴. توابع توزیع مدت زمان‌های پردازش، مدت زمان‌های بین خرابی‌های متوالی و مدت زمان‌های تعمیر

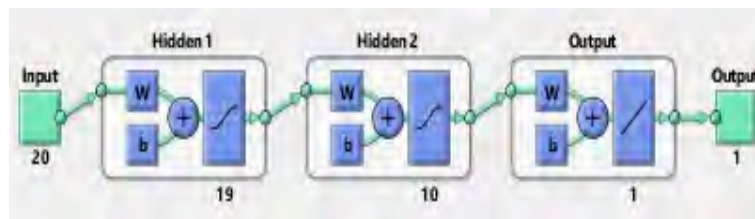
ایستگاه	مدت زمان پردازش	مدت زمان بین خرابی‌ها		مدت زمان تعمیر	
		مدت زمان بین خرابی‌های پیشگیرانه	مدت زمان بین خرابی‌های اضطراری	مدت زمان تعمیر پیشگیرانه	مدت زمان تعمیر اضطراری
اول	Normal (۱۸,۳)	Weibull (۱۱۰۰۰,۹۰,۱۵)	Gama (۲۲۰۰۰,۲۶۰,۴۰)	Weibull (۱۰۰۰,۲۵۰,۷۰)	Gama (۳۰۰۰,۲۳۰,۲۵)
دوم	Exp (۲۷)	Gama (۱۰۰۰۰,۲۲۰,۱۵)	Weibull (۱۸۰۰۰,۲۶۰,۴۰)	Gama (۱۵۰۰,۳۴۰,۴۰)	Weibull (۳۵۰۰,۲۵۰,۳۰)
سوم	Exp (۳۳)	Weibull (۱۵۰۰۰,۳۵۰,۵۰)	Gama (۲۵۰۰۰,۴۰۰,۲۰)	Exponential (۱۲۰۰)	Gama (۲۵۰۰,۲۴۰,۲۸)
چهارم	Normal (۳۵,۵)	Gama (۱۰۵۰۰,۲۰۰,۷۵)	Weibull (۱۸۵۰۰,۲۴۰,۳۰)	Weibull (۲۰۰۰,۲۵۰,۷۰)	Weibull (۴۰۰۰,۲۲۰,۳۵)
پنجم	Normal (۴۰,۷)	Weibull (۱۳۰۰۰,۳۷۰,۱۱۰)	Gama (۲۰۰۰۰,۳۵۰,۴۵)	Gama (۱۰۰۰,۲۴۵,۲۵)	Gama (۲۰۰۰,۲۳۰,۳۸)
ششم	Exp (۳۳)	Gama (۱۲۰۰۰,۴۱۰,۲۰)	Weibull (۱۹۵۰۰,۳۵۰,۷۰)	Exponential (۲۰۰۰)	Exponential (۴۰۰۰,۳۴۰,۶۰)
هفتم	Normal (۱۷,۲)	Weibull (۷۰۰۰,۲۵۰,۷۰)	Gama (۱۳۰۰۰,۳۶۰,۱۱۰)	Gama (۵۰۰,۲۲۰,۵۰)	Weibull (۱۵۰۰,۳۵۰,۶۰)

جدول ۵. حد پایین و بالای متغیرهای تصمیم، هزینه خرید ماشین آلات، حجم و وزن بافرها

متغیر تصمیم	حد پایین	حد بالا	هزینه	وزن (kg)	حجم (m <sup>3</sup> )
X <sub>1</sub>	۱	۷	۵۵۰۰۰۰	۳۵۰	۴
X <sub>2</sub>	۱	۶	۵۰۰۰۰۰	۴۵۰	۳
X <sub>3</sub>	۲	۷	۴۷۵۰۰۰	۴۰۰	۳
X <sub>4</sub>	۱	۷	۵۸۰۰۰۰	۵۰۰	۴
X <sub>5</sub>	۲	۸	۳۹۰۰۰۰	۴۴۰	۳
X <sub>6</sub>	۲	۷	۵۴۰۰۰۰	۵۶۰	۲
X <sub>7</sub>	۱	۶	۵۶۰۰۰۰	۶۰۰	۳
X <sub>9</sub> (Y <sub>1</sub> )	۰	۴۰	۲۷۰۰۰	۲۰	۰/۳
X <sub>1۰</sub> (Y <sub>2</sub> )	۰	۵۰	۳۲۰۰۰	۲۵	۰/۳۵
X <sub>1۱</sub> (Y <sub>3</sub> )	۰	۴۵	۲۸۰۰۰	۲۲	۰/۲۵
X <sub>1۲</sub> (Y <sub>4</sub> )	۰	۶۰	۳۵۰۰۰	۳۰	۰/۳
X <sub>1۳</sub> (Y <sub>5</sub> )	۰	۵۵	۳۰۰۰۰	۲۸	۰/۴
X <sub>1۴</sub> (Tp <sub>1</sub> )	Weibull (۷۰۰۰,۹۰,۱۵)	Weibull (۱۵۰۰۰,۹۰,۱۵)	۲۰۰۰۰	-	-
X <sub>1۵</sub> (Tp <sub>2</sub> )	Gama (۶۰۰۰,۲۲۰,۱۵)	Gama (۱۴۰۰۰,۲۲۰,۱۵)	۲۵۰۰۰	-	-
X <sub>1۶</sub> (Tp <sub>3</sub> )	Weibull (۱۱۰۰۰,۳۵۰,۵۰)	Weibull (۱۹۰۰۰,۳۵۰,۵۰)	۲۲۰۰۰	-	-
X <sub>1۶</sub> (Tp <sub>4</sub> )	Gama (۶۵۰۰,۲۰۰,۷۵)	Gama (۱۴۵۰۰,۲۰۰,۷۵)	۳۰۰۰۰	-	-
X <sub>1۷</sub> (Tp <sub>5</sub> )	Weibull (۹۰۰۰,۳۷۰,۱۱۰)	Weibull (۱۷۰۰۰,۳۷۰,۱۱۰)	۱۵۰۰۰	-	-
X <sub>1۸</sub> (Tp <sub>6</sub> )	Gama (۸۰۰۰,۴۱۰,۲۰)	Gama (۱۶۰۰۰,۴۱۰,۲۰)	۳۵۰۰۰	-	-
X <sub>1۹</sub> (Tp <sub>7</sub> )	Weibull (۳۰۰۰,۲۵۰,۷۰)	Weibull (۱۱۰۰۰,۲۵۰,۷۰)	۳۰۰۰۰	-	-

جدول ۶. طراحی آزمایش‌ها با طرح پلاکت - برمان و نتایج حاصل از پیاده‌سازی آنها

Run	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	Av.	Cost
۱	+	-	-	-	-	+	-	+	-	۷۴/۹۰	۵۲۹۱۷۳۰۰۲
۲	+	+	-	-	-	-	+	-	+	۸۶/۰۸	۶۷۷۲۹۱۵۸۴
۳	+	+	+	-	-	-	-	+	-	۶۹/۰۸	۶۵۳۰۹۲۷۸۶
۴	+	+	+	+	-	-	-	-	+	۸۰/۶۲	۶۷۴۲۴۱۸۹۳
∴											
۴۵	-	-	+	-	+	-	-	+	+	۵۹/۴۸	۱۶۷۷۱۹۲۷۵
۴۶	-	-	-	+	-	+	-	-	+	۲۴/۰۷	۲۷۶۸۴۴۴۳۷
۴۷	-	-	-	-	+	-	+	-	-	۳۰/۸۸	۲۱۶۶۷۵۵۳۳
۴۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۷۲/۷۵	۲۸۸۵۸۳۳۸۹



شکل ۱۰. شبکه عصبی آموزش داده شده برای تخمین توابع هدف

جدول ۷. ساختار مناسب شبکه عصبی بعد از سعی و خطا

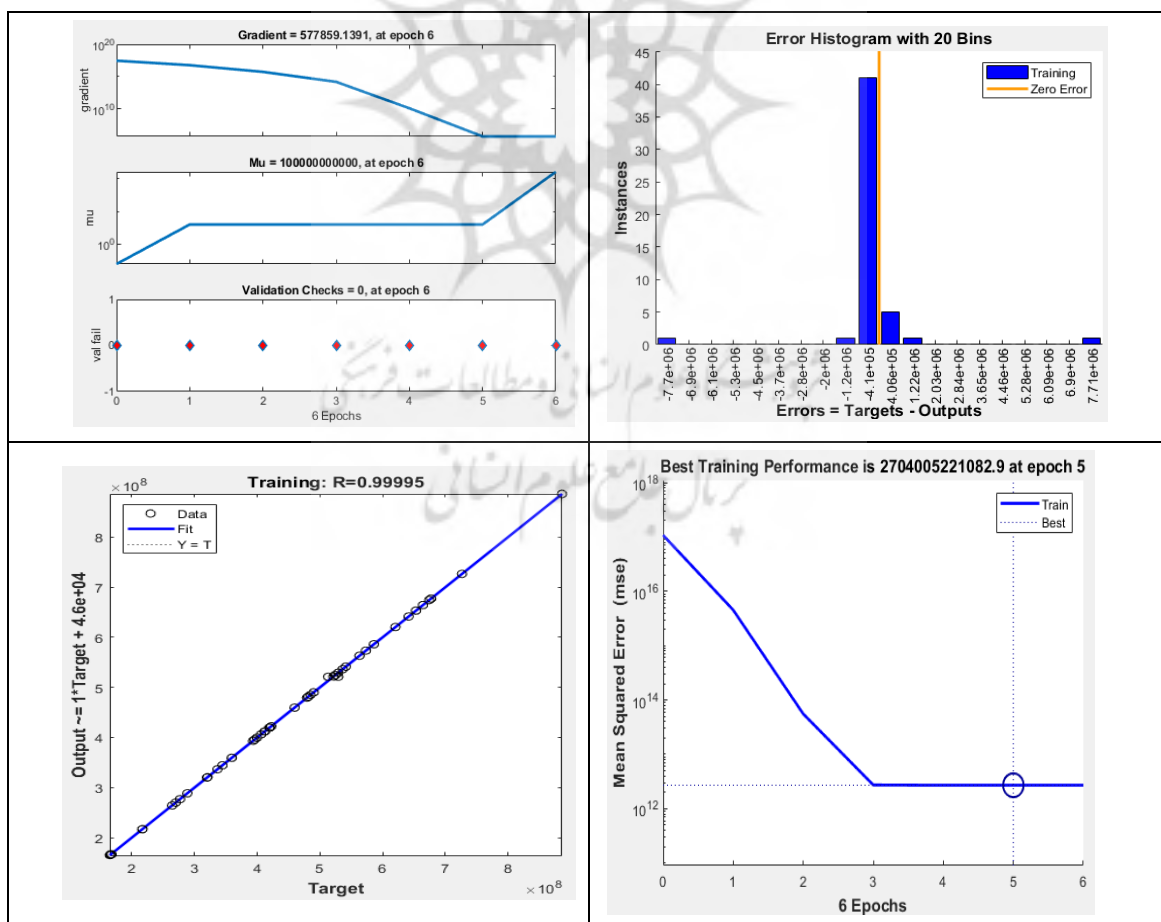
مرحله	تابع محرک	ساختار لایه ها	RMSE	MAE	ضریب هم بستگی اعتبار سنجی	ضریب هم بستگی آموزش
آموزش	سیگموئید	۲۰-۱۹-۱۰-۱	۰/۰۲۵	۰/۰۰۹	۰/۹۹۷	۰/۹۸
اعتبار سنجی	سیگموئید	۲۰-۱۹-۱۰-۱	۰/۰۲۷	۰/۰۱۸	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸
تست	سیگموئید	۲۰-۱۹-۱۰-۱	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۹۹	۰/۹۹۷

## نتیجه گیری و پیشنهادها

در این پژوهش به دنبال این بودیم تا با ترکیب مسئله تخصیص افزونگی و مسئله تخصیص بافر در خط تولید به سیستمی نائل شویم که در عین اینکه از بیشترین دسترس پذیری برخوردار باشد، به اهداف تولیدی از قبیل کمینه سازی موجودی های کالای در جریان ساخت در بافرها، کمینه سازی هزینه های سیستم از جمله هزینه خرید ماشین آلات، هزینه انواع تعمیرهای پیشگیرانه و اصلاحی با توجه به محدودیت های مرتبط با سیستم نیز منجر شود. بنابراین، نوآوری عمده این پژوهش را می توان در ترکیب مسئله تخصیص افزونگی و تخصیص بافر و نیز در نظر گرفتن انواع خرابی ها برای ماشین آلات و هزینه های انواع خرابی های صورت گرفته نام برد. با توجه به این موارد، این پژوهش به دنبال طراحی یک خط تولید با توالی ایستگاه های مختلف کاری بوده که در این سیستم تولیدی، امکان اضافه کردن ماشین های مازاد به صورت موازی وجود دارد و نیز بین ایستگاه ها، برای انبارش (ذخیره موقت) کالای در جریان ساخت (بافر) مکان های مجزایی وجود دارد.

متغیرهای مستقل (قابل کنترل) در این پژوهش که با تحلیل آنها می توان برای حل مسئله به پاسخ های صحیحی دست یافت، عبارت اند از تعداد ماشین آلات در هر ایستگاه کاری، ظرفیت بافرها و زمان های انجام تعمیرهای پیشگیرانه روی هر ماشین. همچنین متغیر وابسته (پاسخ) مورد انتظار نیز عبارت اند از نرخ دسترس پذیری سیستم و هزینه های کلی سیستم. با توجه به اهداف مورد استفاده در مدل پژوهش و نامشخص بودن رابطه ریاضی آنها، ابتدا با استفاده از مفاهیم و روش های شبیه سازی، طراحی آزمایش ها، شبکه های عصبی به برآورد این دو تابع هدف (دسترس پذیری سیستم و هزینه های کلی سیستم) اقدام کرده و برای تجزیه و تحلیل های آماری و شبیه سازی و طراحی آزمایش ها به ترتیب از نرم افزارهای مینی تب ۱۷ و ED استفاده شد. بدین منظور، برای تعیین رابطه بین متغیرهای پاسخ و مستقل، در مرحله نخست بعد از بررسی کامل سیستم مورد بررسی به تشکیل مدل شبیه سازی در نرم افزار اقدام کردیم. در این پژوهش به منظور شبیه سازی سیستم تولیدی مورد بررسی، از نرم افزار ED استفاده شد. پس از وارد کردن تمامی اطلاعات مورد

نیاز (از جمله زمان های پردازش، زمان های خرابی، زمان های تعمیرها، ظرفیت بافرها و ...)، در مرحله بعد با به کارگیری رویکرد طراحی آزمایش ها و روش شبکه عصبی رابطه بین این دو نوع متغیر مشخص شد. شبکه های عصبی مدل های وابسته به داده های ورودی هستند. وقتی مدل بر اساس داده های موجود تعلیم داده شد، برای هر ترکیب ورودی جدید در بازه داده های ورودی اولیه با توجه به بازه تغییرهای خروجی، بر اساس داده های ورودی اولیه بهترین جواب ارائه می شود. می توان از یک شبکه عصبی تعلیم دیده شده، به عنوان یک تابع وابسته به ورودی استفاده کرد و این تابع در سایر قسمت های مدل به طور دقیق مشابه یک تابع معمولی استفاده می شود، یعنی در صورتی که هر مقداری به عنوان ورودی به این شبکه داده شود دقیقاً مشابه یک تابع، مقدار خروجی خواهد داشت. شکل ۱۱ شاخص های کارایی شبکه های عصبی پیشنهاد شده را نشان می دهد، بنابراین پس از به کارگیری شبکه های عصبی برای برآورد هر یک از دو تابع هدف دسترس پذیری و هزینه های کلی سیستم، توابع برآورد شده را به عنوان متاملد برازش شده برای هدف دسترس پذیری و هدف هزینه ها در نرم افزار متلب کد کرده و هدف مدل (کمینه سازی ظرفیت بافرها) دیگر و محدودیت های مدل نیز به کدهای برنامه نویسی شده اضافه می شوند و در غالب الگوریتم NSGA-II کدنویسی نهایی می شوند. نتایج حاصل این الگوریتم برای مسئله مد نظر به شرح جدول ۸ است. شکل ۱۲ نیز نشان دهنده مجموعه جواب پارتو بر اساس نتایج پیاده سازی الگوریتم NSGA-II است.

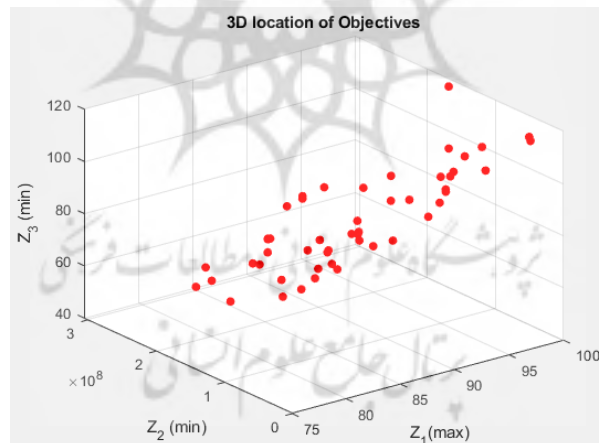


شکل ۱۱. شاخص های کارایی شبکه های عصبی پیشنهاد شده

جدول ۸. بخشی از مجموعه جواب‌های پارتو به دست آمده بر اساس ترکیب مقادیر مختلفی از متغیرهای تصمیم

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$
۳	۳	۵	۵	۴	۵	۱	۲۵	۲	۱۱	۱۹	۳۳
۳	۳	۴	۳	۴	۵	۱	۲۰	۳	۲	۱۰	۲۱
۳	۳	۵	۶	۵	۵	۱	۱۹	۳	۴	۵	۲۲
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
۳	۳	۴	۴	۴	۴	۱	۵	۳	۳	۱۷	۳۱
۳	۳	۴	۵	۴	۵	۱	۱۸	۲	۴	۲	۲۰
۳	۳	۴	۴	۴	۴	۱	۲۳	۳	۳	۹	۲۲

$tp_1$	$tp_2$	$tp_3$	$tp_4$	$tp_5$	$tp_6$	$tp_7$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$
۹۹۱۱	۱۱۱۲۲	۱۷۲۴۵	۱۱۰۴۰	۹۸۷۹	۹۹۸۲	۴۸۶۸	۹۹/۹۸	۲۶۸۵-۸۲۳۶	۱۱۷
۱۰۰۶۷	۱۰۹۶۴	۱۶۴۱۰	۱۰۷۱۹	۱۰۳۵۳	۹۹۸۴	۳۴۲۰	۷۵/۰۲۹	۹۱۱۵۵۹۱۳	۷۲
۱۰۰۶۳	۱۰۹۵۳	۱۶۷۱۲	۱۰۸۷۵	۱۰۶۵۵	۹۶۶۱	۳۷۹۸	۹۵/۱۳۲	۳۰۵۸۷۹۲۶۳	۶۴
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
۱۱۵۳۸	۱۱۱۷۱	۱۶۹۵۵	۱۱۰۳۲	۱۰۲۶۹	۹۴۰۰	۳۵۸۶	۹۰/۴۸۷	۲۱۳۶۳۵۴۹	۱۰۵
۱۰۰۵۸	۱۲۱۱۳	۱۶۵۲۴	۱۰۷۴۴	۱۰۱۸۲	۹۹۳۸	۳۶۹۰	۸۵/۰۷۵	۲۱۸۶۴۷۲۳۱	۶۰
۱۰۲۷۳	۱۱۲۵۴	۱۶۹۴۵	۱۰۷۶۴	۱۰۲۵۴	۹۹۳۶	۳۵۵۴	۸۲/۶۸۲	۶۴۱۹۵۲۴۶	۸۱



شکل ۱۲. مجموعه جواب پارتو ناشی از حل الگوریتم NSGA-II

همچنین به منظور اعتبارسنجی متامدل شبیه‌سازی شده، از رویکرد ارائه شده توسط دوریوکس و پیروال<sup>۱</sup> (۲۰۰۳) استفاده شده است. بدین منظور تعدادی از پیکره‌بندی‌های (ترکیب‌های متخلف از متغیرهای تصمیم برای خط تولیدی مد نظر) مربوط به خروجی الگوریتم NSGA-II (۲۰ عدد) به طور تصادفی انتخاب شدند. سپس این پیکره‌بندی‌ها در نرم‌افزار شبیه‌سازی، مدل‌سازی و اجرا شدند. در مرحله بعد خروجی‌های حاصل از مدل شبیه‌سازی شده با خروجی‌های حاصل از ۲۰ جواب انتخاب شده از الگوریتم فرا ابتکاری با استفاده از رابطه ۳۲ مقایسه شدند. رابطه ۳۲ میزان خطای

مطلق برای این مقایسه را محاسبه می کند. میزان خطای مطلق محاسبه شده برای این مقایسه های مدل شبیه سازی و متامدل ناشی از پژوهش برابر با ۱/۹۶ درصد بوده که این مقدار کمتر از ۳ درصد (مبنای تصمیم گیری) است و این مقدار میزان دقت متامدل به دست آمده را تأیید می کند.

$$\text{رابطه ۳۲} \quad \left| \frac{\text{خروجی شبیه سازی} - \text{خروجی مدل توسعه داده شده}}{\text{خروجی شبیه سازی}} \times 100 \right| = \text{خطای مطلق}$$

### مقایسه کارایی الگوریتم NSGA-II و الگوریتم MOPSO

به منظور ارزیابی و مقایسه کارایی الگوریتم های فرا ابتکاری چندهدفه دو دسته شاخص وجود دارد که عبارتند از شاخص های هم گرایی و شاخص های پراکندگی. شاخص های مربوط به دسته نخست عبارتند از تعداد جواب پارتو (NOS)<sup>۱</sup>، متوسط فاصله از جواب ایده آل (MID)<sup>۲</sup> و سطح پوشش مجموعه ها (CS)<sup>۳</sup>. شاخص های مربوط به دسته دوم عبارتند از فاصله گذاری یا یکنواختی (S)<sup>۴</sup>، بیشترین گستردگی (MD)<sup>۵</sup> و در انتها معیار زمان محاسباتی الگوریتم ها را نیز می توان به عنوان یک معیار دیگر در نظر گرفت. در شاخص های مورد استفاده،  $f_{1i}$ ،  $f_{2i}$  و  $f_{3i}$  به ترتیب مقادیر تابع هدف اول، دوم و سوم برای پاسخ  $i$  در پارتوی نهایی هر الگوریتم هستند و  $n$  نیز نشان دهنده تعداد پاسخ های نامغلوب هر پارتو است. از بین شاخص های ذکر شده، در این پژوهش برای مثال مورد بحث و مقایسه نتایج الگوریتم های مورد استفاده، از شاخص های متوسط فاصله از جواب ایده آل، تعداد جواب های پارتو، شاخص کیفیت و شاخص زمان اجرای الگوریتم استفاده می شود.

### متوسط فاصله از جواب ایده آل (MID)

این معیار، اندازه نزدیکی پاسخ های پارتو به نقطه ایده آل ( $f_1^{best}$ ،  $f_2^{best}$ ،  $f_3^{best}$ ) را نشان می دهد. در واقع میانگین فاصله اقلیدسی پاسخ ها را از نقطه ایده آل محاسبه می کند.  $f_1^{best}$ ،  $f_2^{best}$  و  $f_3^{best}$  بهترین مقادیر هر تابع هدف است که توسط هر الگوریتم به دست آمده است. هر الگوریتم که مقدار کمتری از MID داشته باشد مناسب تر و با کیفیت تر است. مقدار این شاخص از رابطه زیر به دست می آید.

$$\text{رابطه ۳۳} \quad MID = \frac{\sum_{i=1}^n c_i}{N}$$

$$c_i = \sqrt{(f_{1i} - f_1^{best})^2 + (f_{2i} - f_2^{best})^2 + (f_{3i} - f_3^{best})^2}$$

### تعداد جواب های پارتو (NOS)

این شاخص نشانگر تعداد پاسخ های پارتو یافت شده از طریق الگوریتم بوده و هر چه تعداد جواب های پارتو یک الگوریتم بیشتر باشد، نشان دهنده کارایی بهتر الگوریتم مد نظر است.

1. Number of solution

3. Cover Surface

5. Maximum Spread or Diversity

2. Mean Ideal Distance

4. Spacing



### شاخص کیفیت<sup>۱</sup>

برای محاسبه شاخص اندازه کیفیت بدین گونه عمل می‌کنیم که ابتدا پاسخ‌های پارتوی به‌دست‌آمده از تمامی الگوریتم‌ها را با یکدیگر تلفیق کرده و سپس از میان آنها پاسخ‌های نامغلوب را نگه داشته و بقیه پاسخ‌ها (مغلوب‌ها) را حذف می‌کنیم. سپس سهم هر یک از الگوریتم‌ها را در تولید پاسخ‌های نامغلوب نهایی به دست می‌آوریم. هرچه یک الگوریتم در تولید پاسخ‌های نامغلوب نهایی سهم بیشتری داشته باشد، اندازه کیفیت آن بیشتر بوده و بنابراین از نظر این شاخص کارا تر محسوب می‌شود.

### شاخص زمان اجرای الگوریتم

شاخص زمان اجرای الگوریتم نیز از جمله مهم‌ترین شاخص‌ها در مقایسه کارایی الگوریتم‌های مختلف است و هر چه مقدار آن کمتر باشد (در صورت برابر بودن سایر شاخص‌ها)، الگوریتم مد نظر کارا تر خواهد بود. بر اساس مقادیر محاسبه‌شده در جدول ۹، کارایی الگوریتم مورد استفاده در مقایسه با الگوریتم MOPSO که این الگوریتم نیز یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های مورد استفاده برای این نوع از مسائل است، تأیید شد.

جدول ۹. نتایج محاسباتی مقادیر معیارهای عملکردی برای الگوریتم‌های مورد استفاده

الگوریتم	شاخص‌های مورد استفاده		
	متوسط فاصله از جواب ایده‌آل	تعداد جواب‌های پارتو	کیفیت
NSGA-II	۱/۳۰۲	۳۲	۰/۵۶۲
MOPSO	۰/۶۸۲	۱۸	۰/۴۳۸

به‌منظور انجام پژوهش‌های بیشتر در این حوزه، می‌توان برخی مفروض‌های جدید از جمله در نظر گرفتن انواع مختلفی از ماشین‌آلات برای هر ایستگاه و در نظر گرفتن سایر استراتژی‌های افزونگی به‌منظور نزدیک‌تر کردن مسئله مورد بررسی به دنیای واقعی را به مسئله مورد بررسی اضافه کرد. همچنین می‌توان از مبانی این پژوهش به‌منظور مدل‌سازی و حل مسائل پیچیده در خطوط تولید زمانی که بین اجزای هر زیرسیستم (ایستگاه) به یکدیگر وابستگی وجود داشته باشد (که تحت عنوان سیستم‌های به‌اشتراک‌گذاری بار نیز نامیده می‌شوند) و در نظر گرفتن اجزای سیستم چندحالتی و تعمیرپذیر، استفاده کرد. همچنین در این پژوهش از الگوریتم فرا ابتکاری NSGA-II استفاده شد که پژوهشگران می‌توانند از سایر الگوریتم‌های پرکاربرد در این حوزه از جمله الگوریتم چندهدفه بهینه‌سازی انبوه ذرات استفاده کنند.

### منابع

اسماعیلیان، مجید؛ بکران، هاجر (۱۳۹۳). زمان‌بندی تعمیرات پیشگیرانه با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح و برنامه‌ریزی محدودیتی. مدیریت صنعتی، ۶ (۳)، ۴۳۳-۴۵۲.

شهرخی، محمود (۱۳۹۷). ارائه رویکردی برای محاسبه قابلیت اطمینان فازی بر پایه آهنگ خرابی فازی. مدیریت صنعتی، ۱۰(۲)، ۱۸۳-۲۰۰.

قاضی میرسعید، سید محمود؛ نجفی، امیرعباس؛ شهریاری، حمید (۱۳۹۳). ارائه روش حل دقیق برای بهبود پایایی سیستم‌های k از n در مسئله تخصیص مازاد با انتخاب راهبرد مازاد. مدیریت صنعتی، ۶(۱)، ۹۷-۱۱۰.

## References

- Abouei Ardakan, M., Zeinal Hamadani, A. & Alinaghian, M. (2015). Optimizing bi-objective redundancy allocation problem with a mixed redundancy strategy. *ISA Transactions*, 55, 116-128.
- Alrabghi, A., & Tiwari, A. (2016). A novel approach for modeling complex maintenance systems using discrete event simulation. *Reliability Engineering and System Safety*, 154, 160-170.
- Ameen, W., AlKahtani, M., Khan Mohammed, M., Abdulhameed, O., & El-Tamimi, A.M. (2018). Investigation of the effect of buffer storage capacity and repair rate on production line efficiency. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 30, 243-249.
- Amiri, M., & Mohtashami, A. (2012). Buffer allocation in unreliable production lines based on design of experiments, simulation, and genetic algorithm. *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, (62), 371-383.
- Attar, A., Raissi, S., & Khalili-Damghani, K. (2017). A simulation-based optimization approach for free distributed repairable multi-state availability-redundancy allocation problems. *Reliability Engineering and System Safety*, 157, 177-191.
- Chambari, A., Rahmati, S.H., Najafi A.A., & Karimi, A. (2012). A bi-objective model to optimize reliability and cost of system with a choice of redundancy strategies. *Computers & Industrial Engineering*, 63(1), 109-119.
- Chang, Kuo-Hao., & Kuo P.Y. (2018). An efficient simulation optimization method for the generalized redundancy allocation problem. *European Journal of Operational Research*, 265, 1094-1101.
- Chern, M. S. (1992). On the computational complexity of reliability redundancy allocation in a series system. *Operations Research Letters*, 11(5), 309-315.
- Coello Coello C.A., Lamont G.B. & Van Veldhuizen D.A. (2007). *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. Second Edition. Springer Science & Business Media.
- Costa, A., Alfieri, A., & Fichera, S. (2015). A parallel tabu search for solving the primal buffer allocation problem in serial production systems. *Computers & Operations Research*, (64), 97-112.
- Durieux, S., & Pierreval, H. (2003). Regression meta-modeling for the design of automated manufacturing system composed of parallel machines sharing a material handling resource. *International Journal of Production Economics*, 89(1), 1-10.
- Esfe, M.H., Razi, P., Hajmohammad, M.H., Rostamian, S.H., Sami Sarsam, W., Akbar Abbasian Arani, A., & Dahari, M. (2017). Optimization, modeling and accurate prediction of thermal conductivity and dynamic viscosity of stabilized ethylene glycol and water mixture Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids by NSGA-II using ANN. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 82, 154-160.

- Esmaelian, M., & Bakran, H. (2014). Preventive maintenance scheduling with integer programming and constraint programming. *Industrial Management Journal*, 6(3), 433-452.
- Gershwin, S. B., & Schor, J. E. (2000). Efficient algorithms for buffer space allocation. *Annals of Operations Research*, (93), 117-144.
- Ghazi Mirsaeid, S.M., Najafi, A.A., & Shahriari, H. (2014). An exact method for solving reliability redundancy allocation problem of k-out-of-n systems with a choice of redundancy strategy. *Industrial Management Journal*, 6(1), 97-110.
- Heydari, M., Sullivan, KM. (2018). An Integrated Approach to Redundancy Allocation and Test Planning for Reliability Growth. *Computers & Operations Research*, 92, 182-193.
- Huang, M., Guang, C., Pao, L., & Chou, Y. (2002). Buffer allocation in flow shop-type production system with general arrival and service patterns. *Computer and Operation Research*, 29(2), 103-121.
- Huang, X., Coolen, F. P.A., Tahani, C.M. (2019). A heuristic survival signature based approach for reliability-redundancy allocation. *Reliability Engineering and System Safety*, 185, 511-517.
- Ida, K., Gen, M. and Yokota, T. (1994). System Reliability Optimization with Several Failure Modes by Genetic Algorithm, *Proceeding of the 16th International Conference on Computers and Industrial Engineering*, Ashikaga of Japan, 82.
- Jiansheng G., Zutong, W., Mingfa, Z., Ying, W. (2014). Uncertain multi-objective redundancy allocation problem of repairable systems based on artificial bee colony algorithm. *Chinese Journal of Aeronautics*, 27(6), 1477-1487.
- Kayedpour, F., Amiri, A., Rafizadeh, M., & ShahryariNia, A. (2016). Multi-objective redundancy allocation problem for a system with repairable components considering instantaneous availability and strategy selection. *Reliability Engineering & System Safety*, 160, 132-151.
- Koenigsberg, E. (1959). Production Lines and Internal Storage -A Review. *Management Science*, 5(4), 410-433.
- Kuo, W., & Prasad, R. (2000). An annotated overview of system reliability optimization. *IEEE Transactions on Reliability*, 49(2), 176-187.
- Lavoie, P., Kenne, J., & Gharbi, A. (2009). Optimization of production control policies in failure-prone homogenous transfer lines. *IIE Transactions*, 41(3), 209-222.
- Liu, X., Lei, M., Zeng, Q., & Li, A. (2019). Integrated Optimization of Mixed-Model Assembly Line Balancing and Buffer Allocation Based on Operation Time Complexity. *Procedia CIRP*, 81, 1040-1045.
- Manitz, M. (2008). Queuing model based analysis of assembly lines with finite buffers and general services times. *Computers & Operations Research*, 35(8), 2520-2536.
- Mariano, C.H., & Pece, C.A.Z. (2015). Simulation Optimization Approach to Solve a Complex Multi-objective Redundancy Allocation Problem. In: Mujica Mota M., De La Mota I., Guimarans Serrano D. (eds) *Applied Simulation and Optimization*. Springer, Cham.
- 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, 1577-1593.

- Montgomery, D.C. (2012). *Design and Analysis of Experiments*, 8<sup>th</sup> Edition, Wiley.
- Okasha, N.M., & Dan, M. (2009). Lifetime-oriented multi-objective optimization of structural maintenance considering system reliability, redundancy and life-cycle cost using GA. *Structural Safety*, 31, 460–74.
- Pourkarim Guilani, P., Azimi, P., Niaki, S.T.A., Akhavan Niaki, S.A. (2016). Redundancy allocation problem of a system with increasing failure rates of components based on Weibull distribution: A simulation-based optimization approach. *Reliability Engineering and System Safety*, 152, 187–196.
- Pasandideh, S.H.R., Akhavan Niaki, S.T., & Asadi, K. (2015). Bi-objective optimization of a multi-product multi-period three-echelon supply chain problem under uncertain environments: NSGA-II and NPGA. *Information Science*, 292, 57–74.
- Rigdon, S.E., Basu, A.P. (2000). *Statistical Methods for the Reliability of Repairable Systems*. Wiley, New York.
- Shahrokhi, M. (2018). Developing an Approach to Calculate Fuzzy Reliability Based on Fuzzy Failure Rate. *Industrial Management Journal*, 10(2), 183-200.
- Stenström, C., Parida, A., & Kumar, U. (2016). Measuring and monitoring operational availability of rail infrastructure. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: *Journal of Rail and Rapid Transit*, 230(5), 1457–1468.
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Safari, J., Sassani, F. (2008). Reliability optimization of series-parallel systems with a choice of redundancy strategies using a genetic algorithm. *Reliability Engineering & System Safety*, 93 (4), 550-556.
- Tsadiras, A.K., Papadopoulos, C.T., & O’Kelly, M.E.J. (2013). An artificial neural network based decision support system for solving the buffer allocation problem in reliable production lines. *Computers & Industrial Engineering*, (66), 1150–1162.
- Weiss, S., Arne Schwarz, J., & Stolletz R. (2018). The Buffer Allocation Problem in production lines: Formulations, solution methods, and instances. *IIE Transactions*. DOI: 10.1080/24725854.2018.1442031.
- Yahyatabar, A., & Najafi, A.A. (2017). A quadratic reproduction based Invasive Weed Optimization algorithm to minimize periodic preventive maintenance cost for series-parallel systems. *Computers & Industrial Engineering*, 110, 436-461.
- Yelkenci Kose, S., & Kilincci, O. (2015). Hybrid approach for buffer allocation in open serial production lines, *Computers & Operations Research*, 60(c), 67-78
- Yokota, T., Gen, M. and Ida, K. (1995). System Reliability of Optimization Problems with Several Failure Modes by Genetic Algorithm. *Japanese Journal of Fuzzy Theory and systems*, 7, 117-135.
- Yue, H., Xing, K., Hu H., Wu W., Su H. (2018). Resource failure and buffer space allocation control for automated manufacturing systems. *Information Sciences*, 450, 392–408.
- Zheng, Z., Zhou, W., Zheng, Y., & Wu, Y. (2016). Optimal maintenance policy for a system with preventive repair and two types of failures, *Computers & Industrial Engineering*, 98, 102-112.
- Zoufaghari, H., Zeinal Hamadani, A., & Abouei Ardakan, M. (2014). Bi-objective redundancy allocation problem for a system with mixed repairable and non-repairable components. *ISA Transactions*, 53, 17–24.