Industrial Management Perspective

Print ISSN: 2251-9874, Online ISSN: 2645-4165
Volume 12, Serial Number 48, Winter 2023, Pages 131-158 (Original Article)
DOI: 10.52547/JIMP.12.4.131

A Simulation – Optimization Model of Network Failure Prone Manufacturing Systems with a Reliability-Based Maintenance and Revenue Sharing Approach

Mehdi Diranloo[*], Farnaz Azadjoo[**], Seyed Mojtaba Sajadi[***]

Abstract

Due to the effect of random factors such as machine failure on the competitiveness of production organizations and the importance of production planning, failure-prone manufacturing systems have emerged to deal with uncertainty. In order to maintain a competitive market share and increase productivity and safety, industrial systems have resorted to a maintenance strategy to reduce failure rates and increased reliability. Increasing production capacity, providing more flexibility and ensuring customer satisfaction in terms of quantity, quality and timing have made the use of subcontracting with a revenue sharing approach a viable option in this study. In this research, a network of machines with relationship limitation and failure and accidental repair is considered. To prevent shortages, intermediate buffers and a final buffer are used. Another important parameter is determining the optimal frequency of preventive maintenance, which results in minimizing the cost of preventive and corrective maintenance and repairs. The goal is to determine the optimal production rate and preventive maintenance variables and subcontractor variables. Discrete-event-simulation is used for this purpose. After modeling in Arena, the best values of decision variables are obtained in the opt-quest platform, which leads to a 22.5% reduction in total system costs.

Keywords: Simulation of Failure-Prone Production Systems, Preventive Maintenance; Production Rate; Reliability; Revenue Sharing Contract.

Received: Des. 10, 2021; Accepted: Apr. 11, 2021.
* Assistant Professor, Bojnourd University (Corresponding Author).
Email: m.deiranlou@ub.ac.ir
** Bachelor, Noshirvani University of Technology.
*** Associate Professor, University of Tehran.

چشم‌انداز مدیریت صنعتی

شاپای چاپی: ۹۸۷۴-۲۲۵۱، شاپای الکترونیکی: ۴۱۶۵-۲۶۴۵

سال دوازدهم، شماره ۴۸، زمستان ۱۴۰۱، ص‌ص ۱۳۱ – ۱۵۸ (**نوع مقاله: پژوهشی**)

DOI: 10.52547/JIMP.12.4.131

ارائه مدل شبیه‌سازی ـ بهینه‌سازی سیستم‌های تولیدی مستعد شکست شبکه‌ای با رویکرد نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان و اشتراک درآمدها

مهدی دیرانلو*، فرناز آزادجو، سید مجتبی سجادی*****

چکیده

با توجه به اثر عوامل تصادفی مانند خرابی ماشین‌ها بر قدرت رقابتی سازمان‌های تولیدی، اهمیت برنامه‌ریزی تولید دوچندان شده است. لذا سیستم‌های تولیدی مستعد شکست برای مقابله با این عدم قطعیت، پدید آمده‌اند. جهت حفظ سهم در بازار رقابت و افزایش بهره‌وری، سیستم‌های صنعتی به اسـتراتژی نگهداری و تعمیرات به‌منظور کاهش نرخ خرابی و افزایش قابلیت اطمینان روی آورده‌اند. به‌منظور افزایش ظرفیت تولید، فراهم‌آوردن انعطاف‌پذیری بیشتر و اطمینان از رضایت‌مندی مشتری از نظر کمیّت، کیفیت و زمان‌بندی، استفاده از پیمانکاری فرعی با رویکرد اشتراک درآمدها، گزینه‌ای مناسب در این پژوهش است. این پژوهش، سیستمی متشکل از شبکه‌ای از ماشین‌آلات با محدودیت رابطه و زمان خرابی و تعمیر تصادفی می باشد. به‌منظور جلوگیری از کمبود از بافرهای میانی و یک بافر نهایی استفاده می‌شود. پارامتر مؤثر دیگر تعیین دفعات بهینه نگهداری پیشگیرانه است که منتج به حداقل رساندن هزینه نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و اصلاحی می‌شود. هدف تعیین نرخ بهینه تولید و متغیرهای نگهداری پیشگیرانه و متغیرهای مربوط به پیمانکاران فرعی است. برای این منظور از شبیه‌سازی گسسته ـ پیشامد استفاده می‌شود. بعد از مدل‌سازی در نرم‌افزار ارنا بهترین مقادیر متغیرهای تصمیم در بستر Opt Quest به‌دست می‌آید که به کاهش ۲۲/۵ درصدی هزینه‌های کل سیستم منجر می‌شود.

کلیدواژه‌ها: شبیه‌سازی؛ سیستم‌های تولیدی مستعد شکست؛ نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه؛ نرخ تولید؛ قابلیت اطمینان؛ قرارداد اشتراک درآمدها.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۱۹، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۲۲.

* استادیار، دانشگاه بجنورد (نویسنده مسئول).

Email: m.deiranlou@ub.ac.ir

** کارشناس، دانشگاه صنعتی نوشیروانی.

*** دانشیار، دانشگاه تهران.

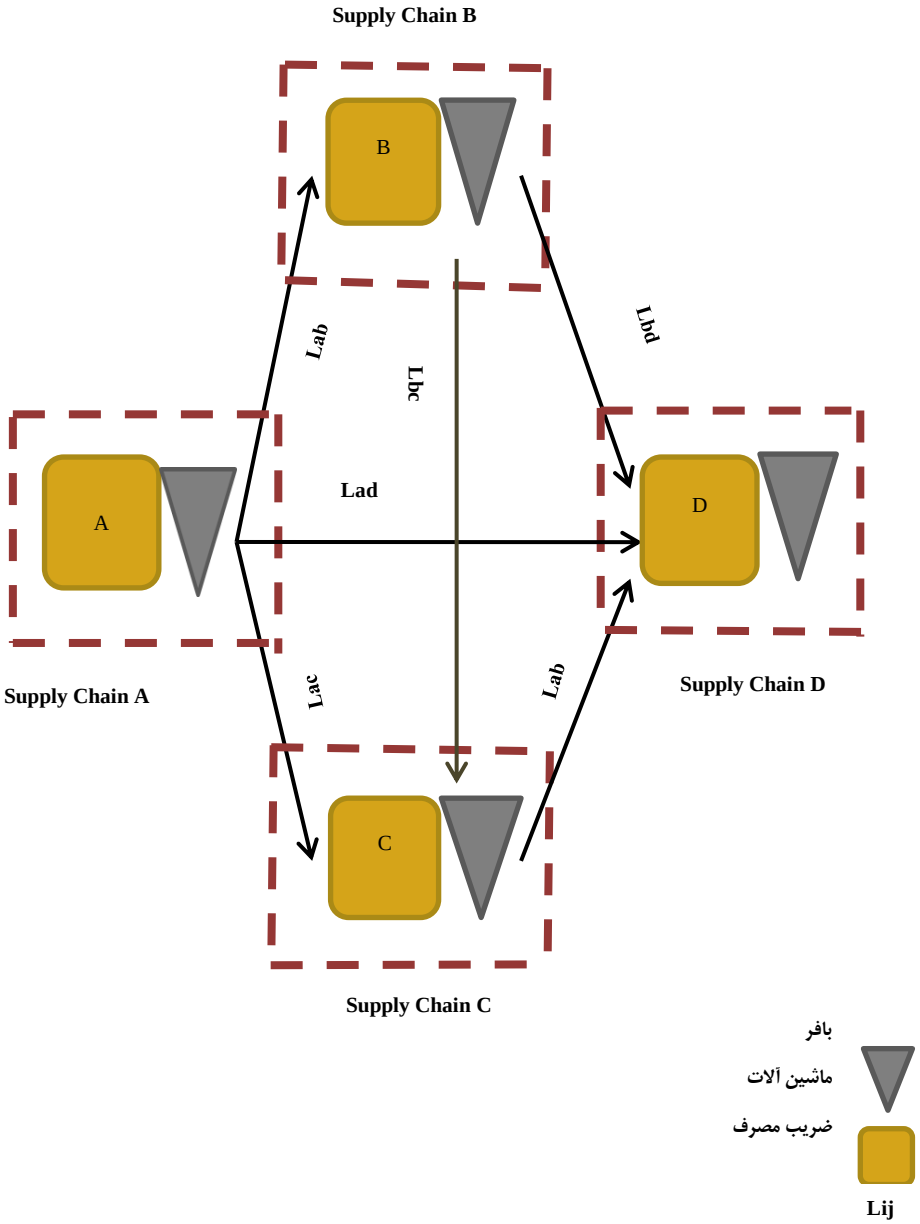
۱. مقدمه

در سال‌های اخیر به‌دلیل رقابت جهانی، الزامات نیازمندی‌های صنایع تولیدی مطرح شده است که در آن عملکردهای بهتر مانند قابلیت اطمینان بالاتر سیستم، کیفیت بهتر محصول، زمان تحویل کوتاه‌تر و غیره انتظار می‌رود؛ ازاین‌رو بهره‌برداری حداکثری از این ماشین‌آلات در طول زمان تولید اهمیت ویژه‌ای یافته است. در یک سیستم موجودی تولید، وقتی یک تولیدکننده مقدار تولید اقتصادی (EPQ)[1] خود را تعیین می‌کند، همیشه باید قابلیت اطمینان سیستم را در نظر بگیرد. ازآنجاکه خرابی اجتناب‌ناپذیر است، یک شرکت تولیدی همیشه باید یک برنامه احتمالی برای مقابله با چنین شرایطی داشته باشد. این موضوع در دهه‌های اخیر موردتوجه جامعه پژوهش قرارگرفته است. اهمیت و ضرورت روزافزون فعالیت نگهداری و تعمیرات در بسیاری از زمینه‌های صنعتی باعث افزایش علاقه به توسعه و اجرای مدل‌های بهینه‌سازی نگهداری و تعمیرات برای سیستم‌های روبه‌زوال تصادفی شده است. مسئله برنامه‌ریزی تولید و نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در سیستم‌های تولیدی مستعد خرابی در سال‌های اخیر به یکی از موضوعهای جذاب و مهم در حوزه پژوهش‌های برنامه‌ریزی تولید تبدیل شده است. سیستم‌های تولید مستعد شکست زیرمجموعه‌ای از سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر است. وقتی خرابی پیش‌بینی‌نشده در یک سیستم تولیدی اتفاق می‌افتد، باعث کاهش بهره‌وری و مشکلات عمده‌ای در سطح تولید می‌شود. برای به‌وجودآوردن یک سیستم قابل‌اطمینان به اتخاذ استراتژی‌هایی نیاز است که نه‌تنها تقاضای دریافتی را برآورده کند، بلکه سهم بازار را نیز افزایش می‌دهد. بازخورد سیاست‌های کنترل در مطالعات مختلف، اثربخش‌بودن آن‌ها را در مدیریت رویدادهای تصادفی در یک محیط تولیدی تصادفی و پویا نشان داده است. برای سیستم مداوم تک‌محصولی در سیستم تولید مستعد شکست، سیاست مشهور نقطه محدودکننده (HPP)[2] بهینه است. این سیاست بازخورد، میزان تولید را به‌عنوان تابعی از وضعیت سیستم عملیاتی آنی و سطح موجودی کنترل می‌کند. این امر به‌منظور حفظ سهم انبار در آستانه مطلوب در صورت وجود سیستم تولید مستعد شکست برای جلوگیری از کمبود در دوره‌های شکست صورت می‌گیرد. در طول چند دهه، مفهوم HPP به‌منظور ملاحظه‌ی جنبه‌های عملی مانند ماشین‌های چندحالته، تقاضای تصادفی، زنجیره تأمین، نگهداری پیشگیرانه و کنترل کیفیت در پژوهش‌های بسیاری موردتوجه پژوهشگران قرار گرفته است. در محیط‌های صنعتی واقعی، استفاده از پیمانکاری فرعی[3] گزینه‌ای جذاب برای افزایش ظرفیت تولید، فراهم‌آوردن انعطاف‌پذیری بیشتر و اطمینان از رضایت بهتر مشتری از نظر کمیّت، کیفیت و زمان‌بندی مناسب است. علی‌رغم هزینه‌های بالا، با کاهش فروش ازدست‌رفته و

1. Economic Production Quantity
2. Hedging Point Policy
3. Subcontractor

موجودی موردنیاز توجیه می‌شود. پیچیدگی مسئله در تعامل بین تصمیمات تولید داخلی و پیمانکاری فرعی است که بخشی از تولید را بر عهده می‌گیرند. سیستم‌های تولید، پیچیدگی خود را تا حد زیادی از فرآیندهای برنامه‌ریزی و کنترل تولید که برای عملکرد صحیح یک شرکت مهم هستند، استخراج می‌کنند. این فرایندهای تصمیم‌گیری به اطلاعات موثق در مورد سیستم مانند خرابی‌ها، تعمیرات، ظرفیت تولید و همچنین محیطی که در آن تکامل می‌یابند مانند تقاضا، پیمانکاری نیاز دارند. مسئله مهم دیگر محدودیت ظرفیت تولید داخل است که برآورده‌شدن منظم تقاضای مشتری را دشوار می‌کند. چنین شرایطی بنگاه‌ها را ترغیب می‌کند که برای افزایش ظرفیت تولید و کاهش زمان تحویل، تحت نظارت قراردادهای پیمانکاری قرار گیرند که توسط چندین مطالعه مشاهده شده و گزارش شده است [۵، ۸]. به‌دلیل اهمیت این موضوع برای تولیدکنندگان، رویکردهای مختلفی در مبانی نظری به هدف کنترل بهینه سیستم‌های تولید تصادفی ایجاد شده است. سیستم پیشنهادی شامل شبکه‌ای از ماشین‌آلات است که دچار خرابی تصادفی می‌شوند و با گذر زمان روبه‌زوال می‌روند. مسئله تک‌دوره‌ای و دارای تقاضای احتمالی است. همان‌طور که در شکل ۱، نشان داده شده است، سیستم تولیدی به‌صورت شبکه‌ای از m ماشین غیرمشابه تشکیل شده است که در هر مرحله یک محصول تولید می‌شود. محصول مرحله ۱ در تولید محصول مرحله ۲، ۳ و ۴ مورداستفاده قرار می‌گیرد. با همین روال تا تولید محصول نهایی ادامه می‌دهد. هر ماشین شامل بافر میانی است که می‌توان در صورت نیاز و یا بروز خرابی برای جلوگیری از کمبود و کاهش اثر خرابی و زوال بر پاسخ به تقاضا، طبق سیاست‌هایی از آن‌ها استفاده کرد. در مطالعه عاملیان و همکاران[1] (۲۰۱۵) به‌منظور جلوگیری از کمبود، از بافر در این سیستم‌ها استفاده می‌شود [۳]. تعیین سطح موجودی بافر یکی از مهم‌ترین پارامترها است.

1. Amelian, et al.



شکل ۱. قرارگیری شبکه‌ای ماشین‌آلات با محدودیت‌ها

در زمان سالم‌بودن ماشین‌ها، محصولات با نرخ U_i تولید می‌شوند. بعد از قسمت تولید، انباری وجود دارد که میزان موجودی باقیمانده در آن انبار می‌شود تا در زمان خرابی ماشین

(i-1) تولید محصول متوقف نشود. وقتی ماشین iام شروع به تولید می‌کند، مواد از انبار مرحله (i-1)ام با نرخ تولید U_i برای یک فاصله زمانی $t_i = X_i / U_i$ مصرف خواهد شد. در زمان τ_i ، ماشین i شروع به خارج‌کردن محصول می‌کند که به‌طور فوری به سطح موجودی قابل‌دسترس برای مرحله (i+1) اضافه می‌شود. این موجودی تا زمان $\tau_i + t_i$ که ماشین سالم است، به‌طور پایدار در حال افزایش خواهد بود تا به نقطه Z* می‌رسد. این سطح بهینه را می‌تواند برای تصمیم‌گیری در مورد نرخ بهینه تولید مورداستفاده قرار گیرد؛ به‌عبارت‌دیگر متغیر تصمیم سیستم‌های مستعد شکست با توجه به این سطح بهینه مشخص می‌شود. این رابطه در قالب سیاست نقطه محدودکننده (HPP) شناخته شده است. سیاست کنترل تولید بر اساس خط‌مشی نقطه پوشش (HPP) در پژوهش توان و سجادی (۲۰۱۵) نشان داده شده است [۲۲]. کاربرد این سیستم در این پژوهش برای سیستم تولید کالاهای فاسدشدنی و اولویت مشتریانی است که با کمبود مواجه می‌شوند. سیاست HPP در زمینه محیط‌زیست هم نمود پیدا کرده است. در مطالعه افشار و همکاران (۲۰۱۸)، این سیاست کنترل بازخورد جدیدبرای کنترل موجودی و تولید معرفی شد [۱]. در این سیاست علاوه بر هزینه‌های موجودی و عقب‌ماندگی، هزینه‌های انتشار در زمینه محیط‌زیست در نظر گرفته شد. در مطالعه ملک‌پور و سجادی (۲۰۱۶)، یافتن نرخ بهینه تولید ماشین‌آلات بر اساس خط‌مشی نقطه پوشش به‌گونه‌ای است که میانگین هزینه‌های سیستم حداقل باشد [۱۵]. به‌دلیل عدم‌قطعیت در چنین سیستم‌هایی، در این پژوهش از شبیه‌سازی رویداد گسسته با کمک نرم‌افزار ARENA برای تخمین هزینه‌های سیستم استفاده شده است. نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و اصلاحی، دو رویکرد نگهداری و تعمیرات است که در این مطالعه پیش گرفته شده است. نگهداری پیشگیرانه علی‌رغم اینکه در مطالعات قبلی به‌صورت دوره‌ای و با نرخ‌های مشابه در نظر گرفته شده است، در این پژوهش بر اساس قابلیت اطمینان لحاظ می‌شود. مدل‌های نگهداری پیشگیرانه سنتی فرض می‌کنند که سیستم پس از اعمال نگهداری پیشگیرانه به‌خوبی قبل می‌شود؛ ولی رویکرد واقع‌بینانه‌تر و عمیق‌تر، نگهداری پیشگیرانه ناقص است که در آن ماشین به حالت بی‌نقص اولیه بازنمی‌گردد (نگهداری پیشگیرانه‌ی کامل و یا جایگزین ماشین‌آلات)؛ اما نسبت به حالت قبلی بهبود جزئی خواهد یافت (تعمیرات جزئی). این رویکرد توسط ختاب (۲۰۱۸) موردمطالعه قرار گرفته است [۱۴]. در این رویکرد جایگزینی ماشین‌آلات هم به‌عنوان یکی از امرهای مهم و پرهزینه به‌شمار می‌رود. از طریق عملیات PM[1] (عملیات پیشگیرانه) هزینه‌ی تحمیل‌شده به‌دلیل رخداد خطاها کاهش می‌یابد؛ اما این امر به تحمیل هزینه‌های عملیات PM منجر می‌شود. زمانی که در سیستم خطا رخ می‌دهد، به‌منظور برگرداندن سیسم به وضعیت بهره‌برداری عملیات، عملیات اصلاحی (CM[2])

1. Preventive Maintenance
2. Corrective Maintenance

که شامل حداقل تعمیرات اصلاحی و جایگزینی است، انجام می‌شود. PM نرخ خرابی افزایشی طول عمر تجهیزات را کاهش می‌دهد و باعث می‌شود که طول عمر تجهیزات کمتر از طول عمر مورد انتظار آن‌ها باشد. از طرف دیگر استراتژی نگهداری و تعمیرات می‌تواند عمر مفید ماشین‌آلات را افزایش دهد. برای جلوگیری از کمبود و حفظ سهم در رقابت، کاهش اثرات خرابی و زوال ماشین‌آلات بر کیفیت محصول و قابلیت اطمینان و همچنین به‌دلیل بالابودن هزینه‌های عدم‌تولید، تأمین‌کنندگان به یک جایگزین برای سیستم تولید تبدیل می‌شوند [۱۶]. سیاست قرارداد اشتراک درآمدها، سیاستی که در این مطالعه با تأمین‌کنندگان در پیش گرفته شده است. هدف اصلی از این پژوهش، تعیین نرخ بهینه تولید به‌گونه‌ای است که امید ریاضی مجموع هزینه‌های تولید، نگهداری، کمبود کالا کمینه شود. به‌منظور تعیین نرخ بهینه تولید به‌دلیل قطعیت نداشتن و پیچیدگی این‌گونه سیستم‌ها، بهینه‌سازی بر مبنای شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار ARENA انجام شده است.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در پژوهش راد و همکاران (۲۰۱۵)، روش‌های بهینه‌سازی ـ شبیه‌سازی برای تجزیه‌وتحلیل پیکربندی‌های مختلف سیستم و یا روش‌های عملیاتی جایگزین برای سیستم‌های عدم‌قطعیت لجستیکی یا تولیدی اثبات شده است [۱۷]. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی تولید چندمحصولی ـ چنددوره‌ای در یک موقعیت تصادفی پیشنهاد کردند که در آن از تکنیک بهینه‌سازی شبیه‌سازی استفاده شد. کنه و همکاران[1] (۱۹۹۷)، برای نخستین بار مسئله تقاضای متغیر را مطرح کردند [۱۱]. در این پژوهش، نرخ شکست وابسته به عمر ماشین بوده و از یک سیاست نگهداری پیشگیرانه برای بهبود عملکرد استفاده شده است. اگرچه این مسئله شامل یک ماشین و محصول بوده است؛ اما پیچیدگی شدید آن سبب شده است تا برای به‌دست‌آوردن جواب نزدیک به بهینه برای نخستین بار از شبیه‌سازی استفاده شود. بطحائی و همکاران (۱۴۰۰)، یک مدل ریاضی برای مسئله سیستم تولیدی همکارانه ساخت بر اساس سفارش با رعایت انصاف برای تخصیص بارهای تولید طراحی کردند. اهداف اصلی مدل، کمینه‌سازی هزینه‌های کل تولید و حداکثر استفاده از منابع به‌منظور تخصیص عادلانه بارهای تولید در شرایط عدم‌قطعیت بود. برای کنترل پارامترهای غیرقطعی از روش برنامه‌ریزی فازی استفاده شد [۴]. نتایج نشان داد با افزایش نرخ عدم‌قطعیت، هزینه‌های سیستم تولید افزایش یافته است. گلاک[2] (۱۹۹۴) نشان داد که برخی از مدل‌ها به تنظیم برای جلوگیری از نتایج غیرمنطقی نیاز دارند [۶]. هدف اصلی از این پژوهش بهینه‌سازی سیستم‌های مستعد شکست با فرض تعمیرات و نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان و

1. Kenné, et al.
2. Glock

قرارداد اشتراک درآمدها بود. وی خرابی ماشین‌آلات را بر اساس تاثیر آن روی عملکرد دستگاه و کیفیت کالای تولیدشده را به سه دسته تقسیم کرد: ۱. دستگاه در حالت عملیاتی باقی می‌ماند؛ بااین‌حال بخشی از کالاهای تولیدشده دارای نقص هستند؛ ۲. وضعیت دستگاه بین کاملاً کاربردی و غیرکاربردی قرار دارد؛ ازاین‌رو از خروجی آن کاسته می‌شود؛ ۳. دستگاه عملکردی ندارد. طاهری و همکاران (۱۴۰۰) ، نشان دادند که در یک سیستم موجودی با وجود خرابی ماشین، سیاست ارسال چندگانه و تولید کالای معیوب، برنامه‌ریزی سیستم موجودی و تعیین مقدار بهینه متغیر مدت‌زمان تولید، اهمیت بسیار زیادی دارد و بی‌توجهی به برنامه‌ریزی مناسب سیستم باعث ایجاد مشکلات مختلفی از قبیل رخدادن کمبود، افزایش هزینه‌های تعمیر، افزایش هزینه نگهداری و غیره خواهد شد. آن‌ها توسعه یک مدل مقدار اقتصادی تولید با وجود اقلام معیوب را در شرایط وجود سیاست ارسال چندگانه و خرابی احتمالی ماشین بررسی کردند [۲۱].

نگهداری پیشگیرانه. مبانی نظری گسترده‌ای در مورد برنامه‌های نگهداری پیشگیرانه برای بخش تولید وجود دارد که در آن پژوهشگران تصمیمات تولید و موجودی را با برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری ترکیب می‌کنند. در چنین سیستم‌هایی، تأسیسات تولیدی برای انجام برنامه‌ریزی پیشگیرانه برنامه‌ریزی‌شده خاموش می‌شود. سجادی و ملک‌پور (۲۰۲۰)، شبکه‌ای از ماشین‌آلات با سیاست کنترلی نقطه محدودکننده در کالاهای فاسدشدنی طراحی کردند. آن‌ها پس از فرموله‌کردن مدل تحلیلی بر اساس تعمیرات اصلاحی و خرابی، از ترکیب الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید و طراحی آزمایش تاگوچی برای تخمین سیاست کنترل بهینه بهره گرفتند [۱۰]. خطاب (۲۰۱۸)، در مطالعه خود علاوه بر ساختارهای هزینه پذیرفته‌شده به دیگر ساختارهای هزینه کلی پرداخت [۱۴]. خوانساری و همکاران (۱۳۹۶)، برای پوشش مسئله برنامه‌ریزی فعالیت‌های نت، یک مدل ترکیبی شبیه‌سازی فازی ارائه دادند [۲۰]. آن‌ها فعالیت‌های نت را با کمک نرم‌افزار ارنا در یک سیستم تولیدی سری چندمحصوله که سیاست کنترل موجودی (S, S) در آن حاکم است، شبیه‌سازی کردند. این پژوهش به مدیران این امکان را می‌داد تا با انتخاب سناریوی کارا، بهترین استراتژی با پایین‌ترین هزینه را انتخاب کنند.

پیمانکاری فرعی. ریورا – گومز و همکاران[1] (۲۰۱۸)، مشکل یکپارچه استراتژی‌های تولید، تعمیر و نگهداری و قراردادهای فرعی را بررسی کردند. آن‌ها فرض کردند که فرآیند زوال‌پذیر، هم قابلیت اطمینان ماشین تولیدی و هم کیفیت اقلام ساخته‌شده را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱۸]. حفیدی و همکاران (۲۰۱۸) نیز به همین مسئله پرداختند و یک مدل یکپارچه برای تعیین

1 . Gomez, et al.

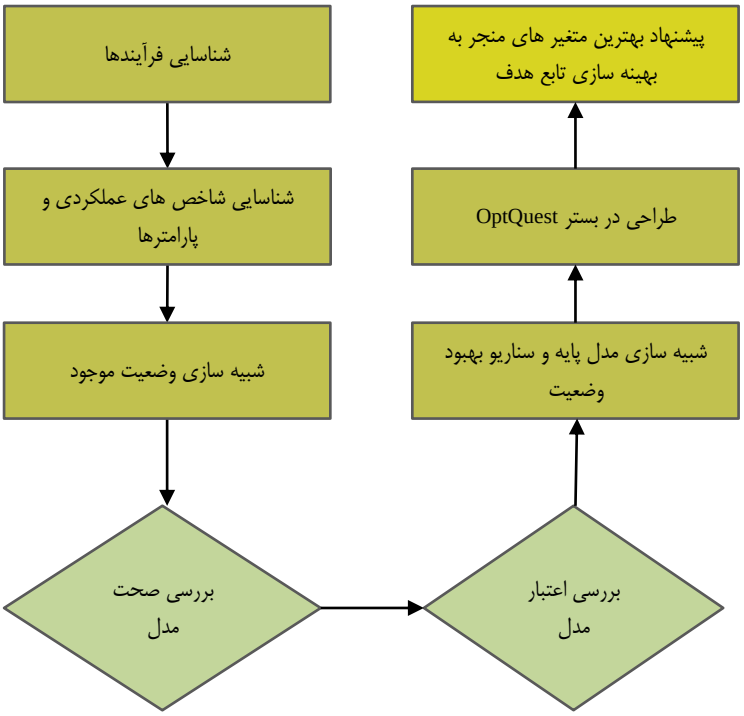
برنامه‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و تولید، ظرفیت پیمان‌کار فرعی و هزینه واحد تولید ارائه دادند که کل هزینه متحمل‌شده را به حداقل می‌رساند [۷].هایوز و همکاران[1] (۲۰۱۹) با درنظرگرفتن محدودیت‌های قابلیت اطمینان که وابستگی بین تولید و نرخ شکست را منعکس می‌کند، یک مدل یکپارچه برای هماهنگ‌کردن فعالیت‌های یک تولیدکننده و یک پیمانکار فرعی درحالی‌که سود خود را به حداکثر می‌رسانند، ارائه دادند [۹]. ایاسی و همکاران[2] (۲۰۲۰)، مدلی ریاضی برای جلوگیری از کمبود و مواجه‌شدن با عدم‌قطعیت تقاضا ارائه کردند [۲]. آن‌ها نشان دادند که ساختارهای فروش و زنجیره تأمین در صنایع ساخت به سفارش عموماً دارای اهداف متقابل و متضاد هستند که به‌راحتی قابل‌مقایسه نیستند. این پژوهش توسعه یک مدل S&OP نوآورانه در یک سیستم پویا پیچیده‌تر از نظر عدم‌قطعیت تقاضا و غیرقابل‌اعتمادبودن منابع پشتیبان بود.

با توجه به مطالعات پیشین، در این مدل، سیستم‌های تولیدی مستعد شکست با درنظرگرفتن نگهداری پیشگیرانه ناقص مبتنی بر قابلیت اطمینان و استفاده از پیمانکاران فرعی به‌عنوان جایگزین تولید در سیستم‌های روبه‌زوال با رویکرد جایگزینی و ترکیبی از المان‌هایی که به‌طور جداگانه در پژوهش‌های قبلی به آن پرداخته شده است، بررسی خواهد شد.

۳. روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش با استفاده از ابزار شبیه‌سازی و تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌های کمّی به یافتن پاسخ برای سؤال‌های پژوهش پرداخته شده است. در گام نخست فرآیندهای اصلی شناسایی شده و پس از مشخص‌شدن فرآیندها در گام دوم به تحلیل اطلاعات و تعیین پارامترها و شاخص‌های عملکردی سیستم پرداخته می‌شود. در گام سوم، فرآیندهای تعیین‌شده توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی ارنا مدل خواهد شد و نقاط قوت و ضعف سیستم شناسایی می‌شود. در گام بعد پس از طراحی مدل پایه و سناریوی بهبود وضعیت موجود و با توجه به محدودیت‌های سیستم موردمطالعه در بستر Opt Quest مدل تعریف می‌شود. با استفاده از این بستر، حالت‌های مختلف مقادیر زمان و هزینه آزمایش شده و درنهایت بهترین سناریوی ممکن از ترکیب آن‌ها ایجاد می‌شود [۲۳]. در گام پنجم متغیرهای بهینه و شاخص‌های عملکردی مدل منطبق با سناریوهای شناسایی‌شده که به بهینه‌سازی تابع هدف منجر می‌شود، تعیین خواهد شد.

1. Haoues, et al.
2. Aiassi, et al.



شکل ۲. فلوچارت روش پژوهش

مفروضات مدل

۱. افق زمانی و برنامه‌ریزی نامحدود است؛

۲. سیستم شامل m ماشین غیرمشابه با m-1 محصول نیمه‌نهایی و درنهایت یک نوع محصول نهایی است؛

۳. پیمانکاران همیشه دردسترس هستند و برای جبران کاهش ظرفیت سیستم تولید، از آن‌ها در محصول نهایی استفاده می‌شود؛

۴. پیمانکاران محصولات سالم را تأمین می‌کنند؛

۵. بعد از هر نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، نرخ خرابی ماشین با ضریب ثابتی از قابلیت اطمینان کاهش می‌یابد؛

۶. هیچگاه ماشین دچار کمبود اولیه نیست؛

۷. موارد نرخ ورود مشتریان، نرخ ورود قطعات، تقاضای تخصیص‌یافته به هر مشتری، مدت‌زمان تولید هر قطعه و خرابی تجهیزات باعث به‌وجودآمدن عدم‌قطعیت در سیستم شده است.

مطالعه کاربردی و یافته‌ها. در تقابل هزینه‌های کمبود و موجودی آن سطحی از موجودی به‌عنوان سطح بهینه شناخته می‌شود که برآیند هزینه‌ها در آن بهینه شود. این سطح را می‌توان به‌عنوان متغیر تصمیم در سیستم‌های مستعد شکست به‌جای نرخ تولید در نظر گرفت. متغیر تصمیم نرخ تولید سیستم‌های مستعد شکست با توجه به این سطح بهینه مشخص می‌شود. این رابطه در قالب سیاست نقطه محدودکننده شناخته شده است. در این پژوهش با استفاده از تکنیک‌های شبیه‌سازی و نرم‌افزار ارنا، نقطه بهینه جواب به‌دست می‌آید. در این سیستم، ماشین دارای نرخ تولید ماکزیممی است؛ به‌گونه‌ای که :

$$U_m^{max}(t) > d$$

$$U^{max}(t) > \sum l_{ij}\ U_j^{max} \qquad \text{رابطه (۱)}$$

روابط بالا، شرط پایداری مدل بوده و نشان‌دهنده توانایی سیستم در ارضای تقاضای ثابت نهایی و نیاز ماشین‌های میانی است. متغیر نشان‌دهنده حالت (سالم یا تحت‌تعمیر بودن) ماشین در زمان t نیز با $\varepsilon(t)$ نشان داده شده است.

$$\varepsilon(t) \begin{cases} 0 & \text{ماشین تحت عملیات} \\ ۱ & \text{ماشین تحت تعمیر} \end{cases}$$

درصورتی‌که ماشین در حال تعمیر باشد، نرخ تولید قطعاً صفر خواهد بود؛ ولی درصورتی‌که ماشین سالم باشد، بسته به اینکه مواد موردنیاز دردسترس باشد، تقاضایی وجود نداشته باشد، نرخ تولید بین صفر و حداکثر توان تولید ماشین متغیر خواهد بود. درواقع سؤال این مسئله همین موضوع است که در هر لحظه از زمان، نرخ تولید بهینه و طول دوره تعمیرات پیشگیرانه ماشین‌ها چه باشد؛ به‌گونه‌ای که مجموع هزینه نگهداری و کمبود کمینه شود.

سیاست کنترلی. در این پژوهش بر مبنای کار زی (۲۰۱۴)، سیاست کنترلی بهینه نقطه محدود به شکل زیر بسط یافته است.

$$\begin{cases} Z & \text{If } X(t) > Z \\ U^{max} & \text{If } X(t) + U^{max} < Z \\ Z - X(t) & \text{Otherwise} \end{cases} \qquad \text{رابطه (۲)}$$

$$\begin{cases} Z & \text{If } X(t) - d > Z \\ \boldsymbol{U^{max}} & \text{If } X(t) + \boldsymbol{U^{max}} - d < Z \\ Z - X(t) - d & \text{Otherwise} \end{cases}$$ رابطه (۳)

رابطه ۲، مربوط به سیاست کنترلی محصولات در جریان ساخت و انبارهای میانی بوده و رابطه ۳، مربوط به انبار نهایی است.

نرخ خرابی. متوسط فراوانی خرابی‌های تجهیز، «نرخ خرابی» نامیده می‌شود. نرخ خرابی افزایشی یک ماده بر فرسودگی آن دلالت دارد. تابع نرخ خرابی می‌تواند به‌صورت احتمال خرابی در یک فاصله زمانی بسیار کوتاه تفسیر شود؛ بنابراین زمانی که می‌دانید یک جزء در حال عملکرد در زمان t است، احتمال اینکه جزء در فاصله زمانی $(t, t + \Delta t)$ خراب شود، می‌تواند توسط رابطه ۴، محاسبه شود.

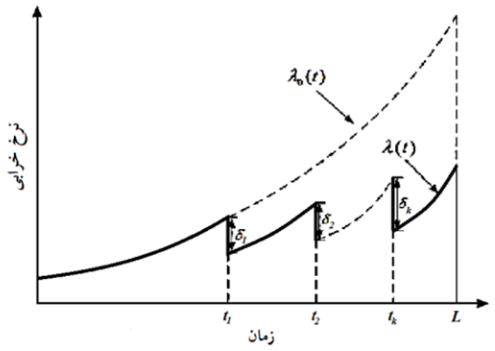
$$\lambda(t) = \frac{P(t<T\leq t+\Delta t}{P(T>t)} = \lim_{\Delta t\to 0} \frac{R(t)-R(t+\Delta t)}{\Delta t.R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}$$ رابطه (۴)

تابع توزیع خرابی. احتمال خرابی تجهیزات معمولاً با یکی از مدل‌های ثابت، خطی یا چندجمله‌ای مدل می‌شود. حالت چندجمله‌ای دقت بیشتری نسبت به دو حالت خطی و ثابت دارد و حالت کلی‌تری محسوب می‌شود. در این حالت تابع چگالی احتمال خرابی از توزیع ویبول پیروی می‌کند. توزیع ویبول یکی از پرکاربردترین و متداول‌ترین مدل‌ها در مبحث قابلیت اطمینان و مدل‌کردن احتمال خرابی تجهیزات به‌شمار می‌رود. کاربردهای آماری توزیع ویبول برای اندازه‌گیری قابلیت اطمینان توسط رابطه زیر شرح داده می‌شود.

$$R(t) = e^{-\frac{t}{\eta}} . \sum_{i=0}^{B-1} \frac{\left(\frac{t}{\eta}\right)^i}{i!} = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^B}$$ رابطه (۵)

نگهداری و تعمیرات امنیت را افزایش می‌دهد؛ به این معنا که وقتی روی یک تجهیز نگهداری و تعمیرات انجام می‌شود، نرخ خرابی تجهیز که می‌توانست به کاهش عمر تجهیزات، تخریب محیط یا تلفات اقتصادی منجر شود، کاهش می‌یابد. نرخ خرابی که توسط عملیات نگهداری و تعمیرات در زمان t بهبود یافته است، توسط S کاهش می‌یابد. فرض می‌شود درسراسر طول دوره‌ی عمر تعداد K دفعه PM انجام شود. در طول مدت‌زمان PM کاهش در تابع شدت برابر S است. نرخ خرابی قابل اصلاح بعد از K عمل PM در رابطه ۶، محاسبه شده است.

رابطه (۶) $\lambda(t) = \lambda_o(t) - \sum_1^K S_i$



شکل ۳- نرخ خرابی با و بدون PM [۱۲]

نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM) می‌تواند نرخ خرابی را کاهش دهد؛ اما نمی‌تواند امکان خرابی را به‌طور کامل حذف کند. نرخ خرابی بعد از انجام PM ممکن نیست که به‌طور دقیق، همانند نرخ خرابی تجهیز اصل و دست‌نخورده باشد.

محدودیت‌ها

الف) قابلیت اطمینان. بعد از عمل PM، باید قابلیت اطمینان تجهیز برابر یا بیشتر از قابلیت اطمینان موردنیاز شود؛ همان‌گونه که در رابطه ۷، نشان داده شده است.

رابطه ۷ $R_{equipment} \geq R_{required}$

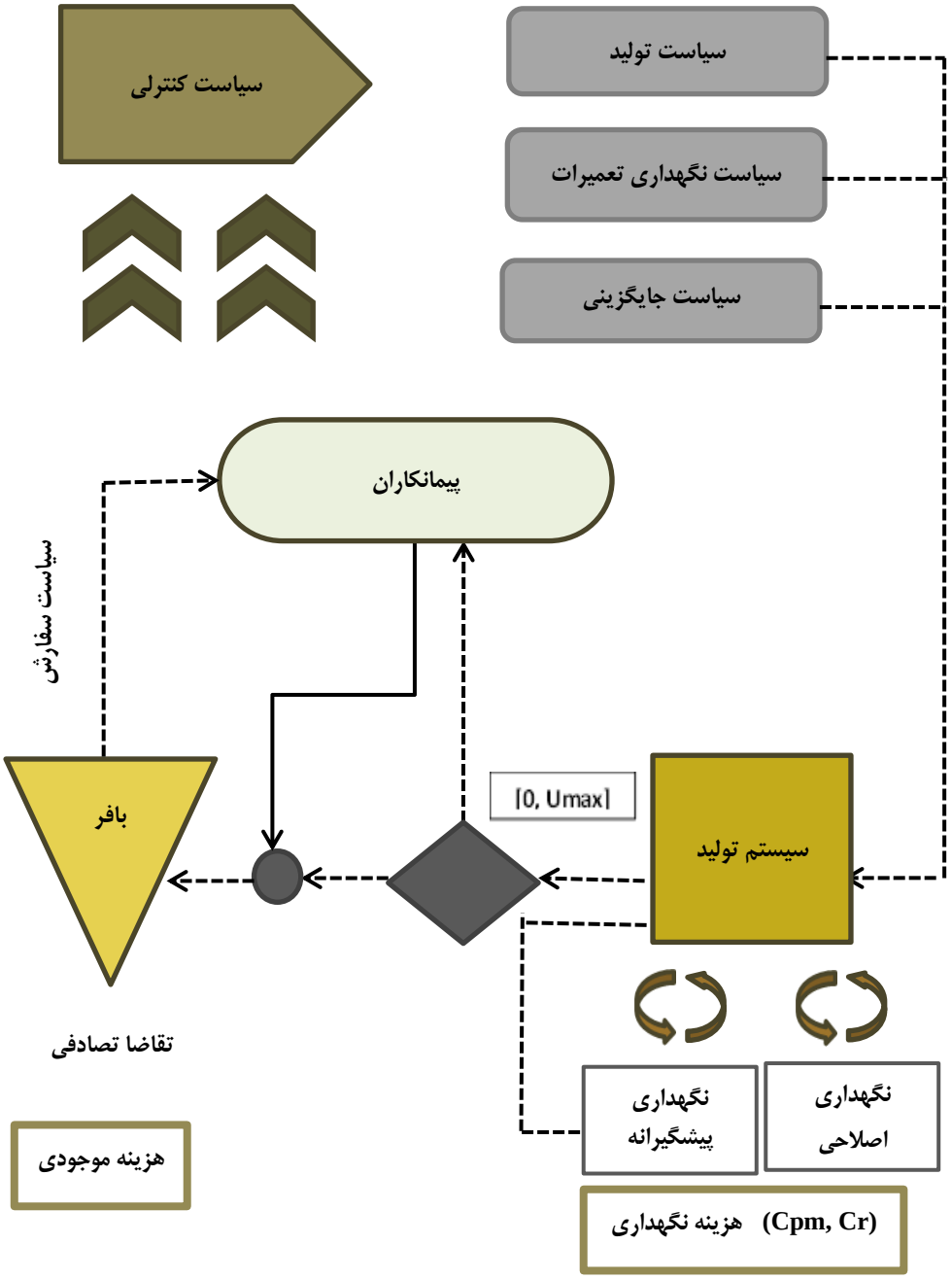
که در آن، $R_{equipment}$ قابلیت اطمینان تجهیز و $R_{required}$ قابلیت اطمینان موردنیاز است.

ب) سطح نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه. یکی از نوآوری‌های پژوهش جایگزینی ماشین‌آلات کارکرده به ماشین‌های جدید در سیستم‌های تولید مستعد شکست شبکه‌ای است که این ضرورت در شکل ۴، به‌خوبی نشان داده شده است. با گذر زمان در طی طول عمر ماشین‌ها در سیستم تولید مستعد شکست، نرخ خرابی افزایش می‌یابد. در این پژوهش جایگزینی ماشین‌ها به این اشاره دارد که پس از هر بار تعمیرات و نگهداری (اصلاحی و پیشگیرانه) حالت ماشین‌ها به‌خوبی حالت قبل خود نمی‌شوند. بعد از عمل PM نرخ خرابی تجهیز نمی‌تواند کمتر از PM

قبلی باشد. این به این معنا است که PM نمی‌تواند یک تجهیز جدید ایجاد کند. قید سطح PM توسط رابطه ۸، تعریف شده است.

$$0 \leq S_i \leq \Lambda_o(t_i) - \Lambda_o(t_{i-1}) \quad \text{رابطه (۸)}$$

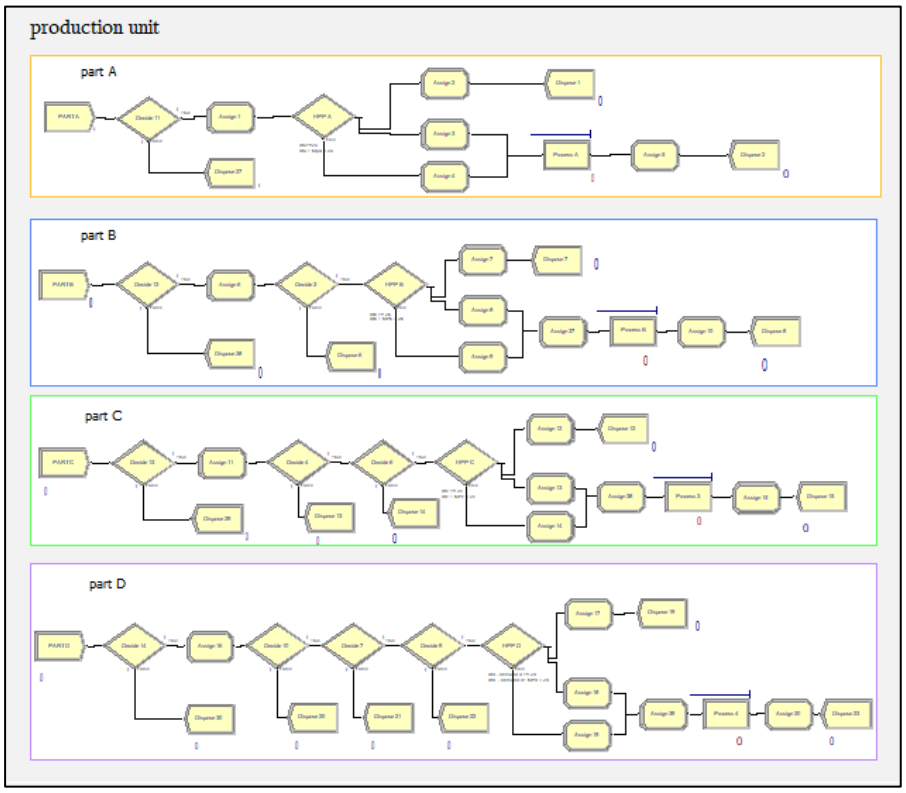
که در آن S_i سطح PM در زمان i [رخداد/ سال]،$\Lambda_o(t_i)$ نرخ خرابی بدون PM در زمان i [رخداد/ سال] و $\Lambda_o(t_{i-1})$ نرخ خرابی بدون PM در زمان $i-1$ [رخداد/ سال] است.



شکل ۴. نمای شماتیک مدل

شبیه‌سازی مدل

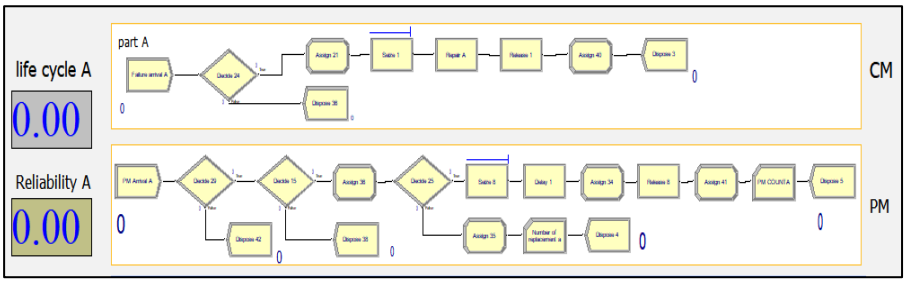
شبیه‌سازی بخش تولید. در سیستم موردمطالعه، پس از ورود قطعات وضعیت و حالت ماشین‌آلات بررسی می‌شود. برای ادامه تولید، اگر موجودی بافرها ضریب مصرف را شامل شوند، طبق سیاست کنترلی بهینه نقطه محدودکننده، نرخ تولید ماشین‌آلات تعیین می‌شوند و ماشین موردنظر و یک اپراتور مختص به آن مشغول به خدمت‌دهی می‌شوند. تولید به‌اندازه 1/U(t) واحد زمانی طول می‌کشد و موجودی بافر موردنظر به‌اندازه یک واحد افزایش می‌یابد. پس از هر بار تولید عمر ماشین‌آلات به‌اندازه مدت‌زمان تولید به‌صورت تجمعی افزایش می‌یابد تا جایی که ماشین نیاز به جایگزینی پیدا کند.



شکل ۵. مدل شبیه‌سازی بخش تولید

شبیه‌سازی نگهداری و تعمیرات. نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و اصلاحی، دو رویکرد نگهداری و تعمیرات پیش‌گرفته‌شده در این مطالعه است. با ورود تصادفی خرابی به سیستم و تغییر حالت عملیاتی به تعمیراتی، ماشین موردنظر و یک مکانیک برای تعمیرات مشغول خواهند شد و پس از طی مدت‌زمانی برای تعمیرات خرابی از سیستم خارج خواهد شد و حالت ماشین را

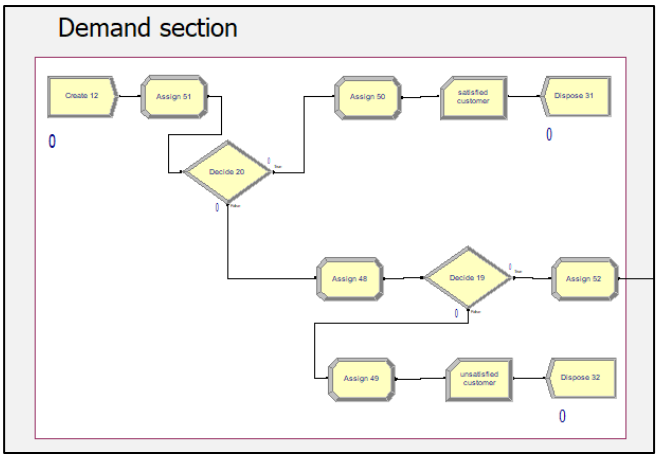
به حالت عملیاتی تبدیل خواهد کرد. یکی دیگر از اهداف این پژوهش یافتن جواب بهینه تعداد دفعات تعمیرات پیشگیرانه است. نگهداری پیشگیرانه علی‌رغم اینکه در مطالعات قبلی به‌صورت دوره‌ای و با نرخ‌های مشابه در نظر گرفته شده است، در این پژوهش بر اساس عمر ماشین‌آلات و قابلیت اطمینان لحاظ می‌شود که به کمک آن می‌توان از هزینه‌های غیرالزامی پرهیز کرد. کاهش طول دوره تعمیرات پیشگیرانه نشان‌دهنده این است که باید در فاصله‌های زمانی کوتاه‌تر ماشین را متوقف کرده و تعمیرات را اعمال کرد. این کار باعث توقف تولیدشده و احتمالاً به افزایش هزینه‌های کمبود منجر خواهد شد؛ از طرف دیگر افزایش طول دوره تعمیرات پیشگیرانه به افزایش تعداد تعمیرات اصلاحی می‌انجامد و درنتیجه افزایش کل هزینه سیستم را در پی خواهد داشت. مدل‌های نگهداری پیشگیرانه سنتی فرض می‌کنند که سیستم پس از اعمال نگهداری پیشگیرانه به‌خوبی قبل می‌شود؛ ولی رویکرد واقع‌بینانه‌تر و عمیق‌تر، نگهداری پیشگیرانه ناقص است که در آن ماشین به حالت بی‌نقص اولیه بازنمی‌گردد (نگهداری پیشگیرانه‌ی کامل و یا جایگزین ماشین‌آلات)؛ اما نسبت به حالت قبلی بهبود جزئی خواهد یافت (تعمیرات جزئی). این رویکرد توسط ختاب (۲۰۱۸)، موردمطالعه قرار گرفته است. پس از هر بار نگهداری پیشگیرانه، قابلیت اطمینان که وابسته به عمر ماشین‌آلات است، تغییر می‌کند تا جایی که از آستانه‌ای با عنوان «حد بالای قابلیت اطمینان مطلوب» کمتر نشود. اگر از این مقدار کمتر شود، جایگزینی صورت می‌گیرد و اگر بیشتر باشد، ماشین و مکانیک برای انجام نگهداری پیشگیرانه گرفته می‌شود.



شکل ۶. بخش نگهداری پیشگیرانه ماشین A

شبیه‌سازی تقاضاهای تصادفی. ورود تصادفی نمایی مشتری به سیستم به همراه تقاضای غیرقطعی و گسسته احتمالی است. به‌دلیل عدم‌قطعیت در تقاضا موجودی بافر نهایی بررسی می‌شود. اگر به میزان تقاضا موجودی بافر کافی باشد به تقاضا از بافر نهایی پاسخ داده می‌شود؛ ولی اگر موجودی بافر نهایی به اندازه تقاضا نباشد، سیستم دچار کمبود خواهد شد. در این پژوهش به کمبود به دو صورت فروش ازدست‌رفته و استفاده از پیمانکاران فرعی نگاه می‌شود و

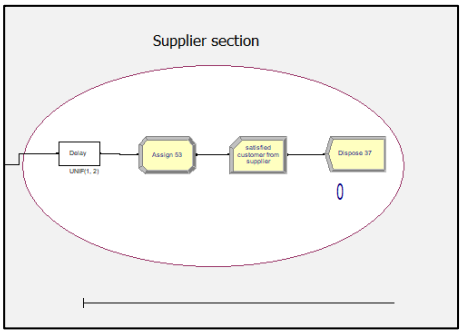
تولیدکننده با توجه به آستانه‌ای که برای کمبود در نظر گرفته است به تصمیم‌گیری بر این دو رویکرد می‌پردازد.



شکل ۷. بخش تقاضای مدل شبیه‌سازی

شبیه‌سازی رفتار پیمانکاران با رویکرد اشتراک درآمدها. به‌دلیل پرهیز از کمبود و پایداربودن در عرصه‌ی رقابت، کاهش اثرات خرابی و زوال ماشین‌آلات بر کیفیت محصول و قابلیت اطمینان و همچنین به‌دلیل بالابودن هزینه‌های عدم‌تولید، تأمین‌کنندگان به یک جایگزین برای سیستم تولید تبدیل می‌شوند. سیاست درپیش‌گرفته‌شده در این مطالعه با تأمین‌کنندگان، سیاست قرارداد اشتراک درآمدها[1] است. در قرارداد اشتراک درآمدها، پیمانکاران یک قیمت عمده‌فروشی برای تولیدکنندگان تعیین می‌کند و پارامتری دیگر، شامل درصد ثابتی از درآمد فروش زنجیره است که توسط تولیدکنندگان تعیین می‌شود. تعامل بین درآمد پیمانکاران و درآمدی که تولیدکننده از برون‌سپاری به‌دست می‌آورد به محاسبه متغیر تصمیم رویکرد اشتراک درآمدها منجر می‌شود. مشتریان در این بخش مدتی را منتظر تحویل کالا توسط پیمانکاران می‌مانند و سپس مشتریان راضی از سیستم خارج می‌شوند.

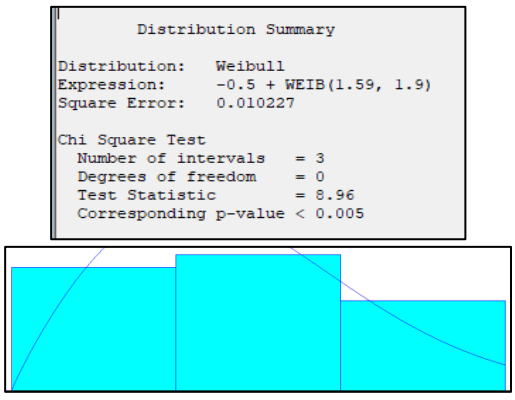
1. Revenue Sharing Contract



شکل ۸. بخش پیمانکاران مدل شبیه‌سازی

تنظیم شرایط اجرای مدل. با توجه به ایام کاری در سیستم یادشده که به‌صورت ۸ ساعت در روز است، مدل شبیه‌سازی‌شده برای ۱۹۸روز کاری اجرا شده است. در این مدل تعداد تکرار بهینه در شبیه‌سازی در زمان به حالت پایدار رسیدن نمودار هزینه محاسبه شد.

ورودی‌های مدل شبیه‌سازی. یکی از ورودی‌های اساسی موردنیاز به‌منظور شبیه‌سازی سیستم موردمطالعه، میانگین فواصل بین دو ورود متوالی و همچنین توزیع آماری موردنظر آن است. آزمون مربع کای که کمترین مربعات خطا را دارد برای تابع توزیع استفاده شد. با دردست‌داشتن داده‌های تعداد دفعات خرابی در یک سال که معادل ۱۹۸ روز کاری در طول زمانی یک نوبت ۸ ساعته در یک سیستم تولیدی ثبت شده است و آزمون برازش توابع شکست ماشین‌آلات به‌دست آمده است. برای مثال، در شکل ۹، نتیجه حاصل از آزمون برای شکست ماشین A و D مشاهده می‌شود.



شکل ۹. خروجی تابع توزیع مناسب برای شکست ماشین A و D

متغیرهای مدل به‌صورت جدول ۱، فرض شده است.

جدول ۱. توزیع‌های آماری مدل

متغیرهای مدل	نوع توزیع آماری
نرخ ورود تقاضا	EXPO(8)
میزان احتمالی تقاضا	DISC(0.2, 8, 0.4, 9 , 0.6 , 10 , 0.8 , 11 , 1 , 12)
نرخ ورود شکست	-0.5+ WEIB(η , Ɓ)
مدت‌زمان تعمیر اصلاحی	EXPO(10)
مدت‌زمان تعمیر پیشگیرانه	UNIF(0.3,1)
مدت‌زمان تحویل از پیمانکاران	UNIF(1, 2)
قابلیت اطمینان ماشین i در لحظه t R_i (t)	$e^{-\left(\frac{LC}{\eta}\right)^{B}}$

ملاک اعتبارسنجی و صحت مدل. با توجه به منطق مدل و حرکت نهادها در مدل، تطابق مدل و منطق، اثبات شده است. در خصوص صحت مدل ساخته‌شده نیز نرم‌افزار ارنا از طریق منوی Run و گزینه‌ی Check Model این بررسی را بر روی مدل ساخته‌شده انجام می‌دهد و در صورت وجود اشکال در مدل آن را اعلام می‌کند.

اعتبارسنجی مدل‌های شبیه‌سازی به معنای انطباق مدل شبیه‌سازی‌شده با مسئله دنیای واقعی است. برای این منظور:

ـ این مسئله از مثال عددی استفاده شده است. مدل به‌صورت غیراحتمالی در نقاط حدی مسئله حل می‌شود و جواب مدل شبیه‌سازی با جواب غیراحتمالی مقایسه می‌شود؛

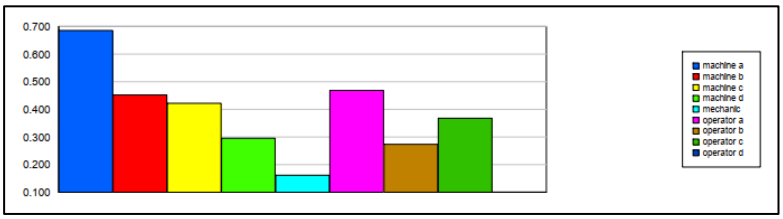
ـ ابتدا با ابزار Highlight Active Module در نرم‌افزار ارنا، روندها و جریان حرکت ماژول‌ها مرحله‌به‌مرحله بررسی و ردیابی شد. در روش Tracing مدل شبیه‌سازی run می‌شود و تغییر حالت سیستم با مدل سیستم تولیدی مستعد شکست چک می‌شود؛

ـ رویدادهای مدل شبیه‌سازی با رویدادهای سیستم غیراحتمالی مطابق با مثال عددی مقایسه می‌شوند تا مشخص شود که آیا مشابه هستند یا خیر؟ برای مثال، تعداد خرابی شبیه‌سازی سیستم تولیدی مستعد شکست شبیه‌سازی‌شده با تعداد احتمالی مثال عددی آن مقایسه می‌شود.

گزارش‌های خروجی مدل. پس از شبیه‌سازی ۱۹۸ روز کاری با روزی ۸ ساعت کار با ۵ بار تکرار با داده‌های شبیه‌سازی‌شده در قسمت گزارش‌هایی که نرم‌افزار ارنا ارائه می‌دهد، می‌توان نتایج را دید و تحلیل کرد. بر اساس این گزارش‌ها شاخص‌های برای هر بخش به‌دست آمده است. در شکل ۱۰، درصد بهره‌برداری به تفکیک هر منبع مشاهده می‌شود.

جدول ۲. بخش اول خروجی مدل

Schedule Utilization	Average	Half width	Minimum Average	Maximum Average
Machine a	0/6858	0/22	0/3830	0/8238
Machine b	0/4521	0/14	0/2627	0/5379
Machine c	0/4219	0/17	0/1836	0/5377
Machine d	0/2956	0/04	0/2436	0/3223
Mechanic	0/1613	0/00	0/1600	0/1644
Operator a	0/4683	0/22	0/1671	0/6075
Operator b	0/2733	0/13	0/0849	0/3584
Operator c	0/3680	0/17	0/1307	0/4863
Operator d	0/1004	0/05	0/0324	0/1263

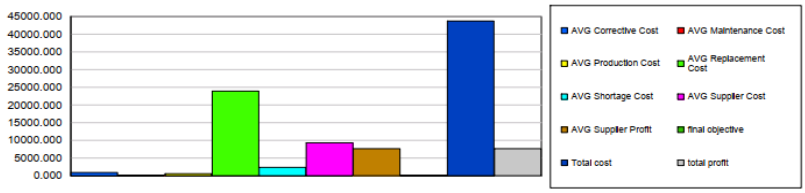


شکل ۱۰. درصد استفاده از هر منبع

در شکل ۱۱، هزینه‌های سیستم به تفکیک نشان داده شده است.

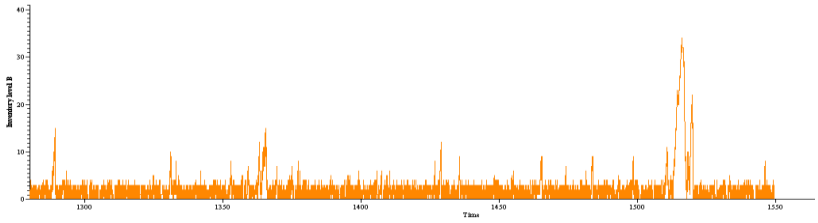
Output

Output	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
AVG Corrective Cost	897.19	31.92	872.82	929.20
AVG Maintenance Cost	19.8394	0.65	18.9049	20.0730
AVG Production Cost	542.80	247.78	199.03	706.07
AVG Replacement Cost	23914.14	15,499.81	2146.46	33491.16
AVG Shortage Cost	2361.11	822.06	1250.00	2930.56
AVG Supplier Cost	9291.51	3,683.30	4235.24	12075.16
AVG Supplier Profit	7628.25	3,023.96	3477.10	9913.60
final objective	5.6791	0.36	5.1983	5.9314
Total cost	43761.99	18,316.03	18075.09	55599.83
total profit	7628.25	3,023.96	3477.10	9913.60

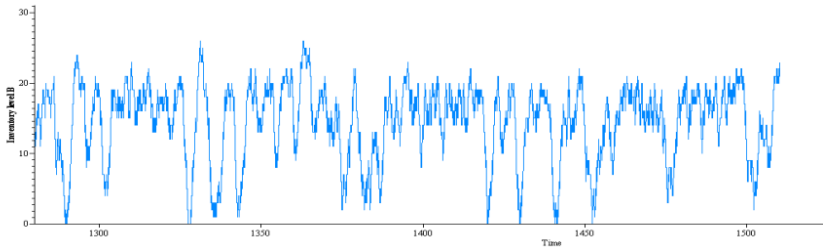


شکل ۱۱. هزینه‌های سیستم

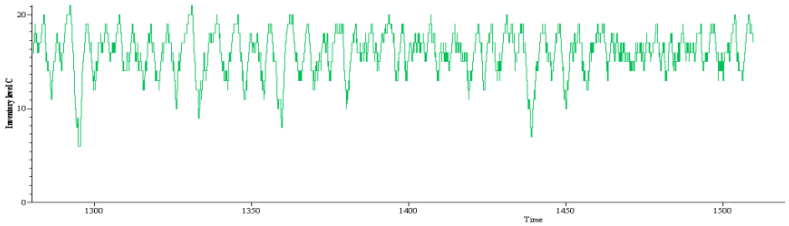
نمودارهای مربوط به موجودی بافرها با سیاست نقطه محدودکننده در طول هر روز کاری در سیستم موردنظر به‌صورت زیر است.



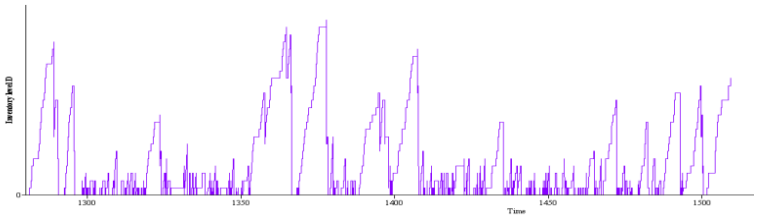
شکل ۱۲. نمودار تغییر موجودی بافر A در واحد زمان



شکل ۱۳. نمودار تغییر موجودی بافر B در واحد زمان

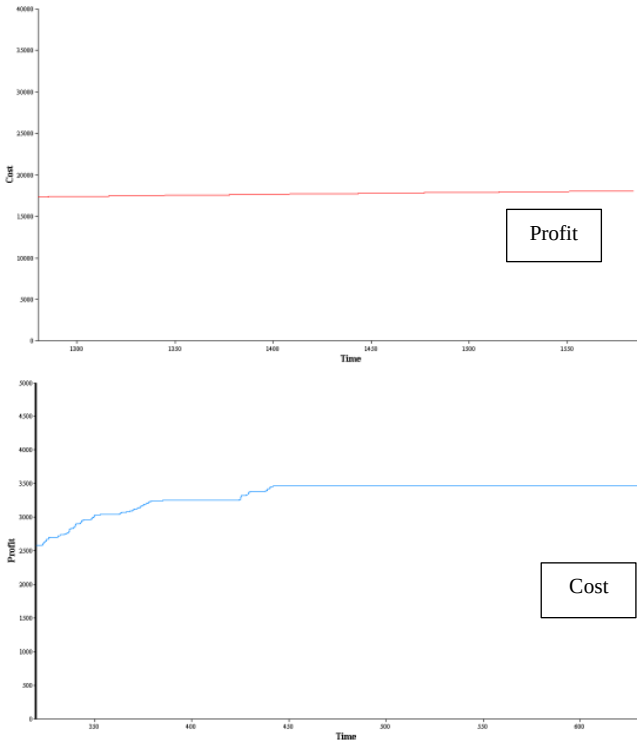


شکل ۱۴. نمودار تغییر موجودی بافر C در واحد زمان



شکل۱۵. نمودار تغییر موجودی بافر D در واحد زمان

توابع هزینه‌های کل سیستم و سود حاصل از قرارداد اشتراک درآمدها در طول شبیه‌سازی سیستم یادشده (۵ روز کاری با ۵ تعداد تکرار) در شکل ۱۶، نشان داده شده است.



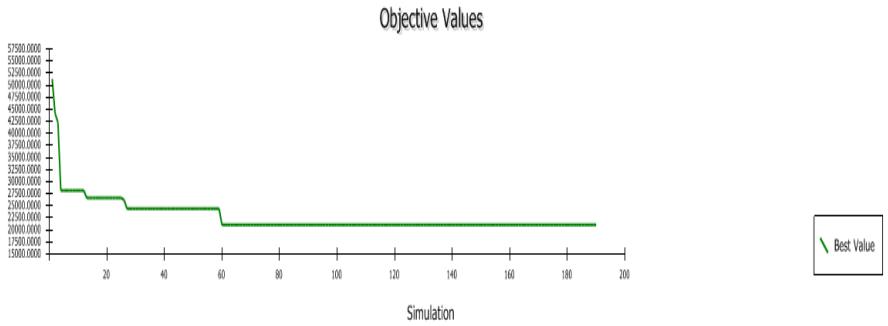
شکل ۱۶. نمودار مربوط به هزینه و سود در طول

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

مدل اول. در این بخش فقط کمینه هزینه‌های کل سیستم بدون درنظرگرفتن درآمدهای حاصله از قرارداد اشتراک درآمدها با متغیرهای تصمیم متناظرش بهینه می‌شود تا جایی که تابع هدف به حالت پایدار برسد. متغیرهای تصمیم در این مرحله به‌صورت جدول ۳، است.

جدول ۳. مقدار متغیرهای تصمیم قبل و بعد از بهینه‌سازی

متغیر	مقدار	مقدار	متغیر تصمیم	مقدار اولیه	مقدار بهینه‌شده
Z_a	۴۰	۴۴	S_c	۰/۰۲۴۷	۰/۰۲۶۵
Z_b	۳۰	۳۰	S_d	۰/۰۲۴۷	۰/۰۲۵۸
Z_c	۲۰	۱۹	K_a	۱۷۳	۱۵۹
Z_d	۲۵	۲۴	K_b	۱۱۱	۱۱۹
S_a	۰/۰۲۴۷	۰/۰۲۲۸	K_c	۸۸	۹۶
S_b	۰/۰۲۴۷	۰/۰۲۴۸	K_d	۸۸	۸۴



شکل ۱۷. خروجی نهایی Opt Quest در مدل اول

با جایگزینی متغیرهای بهینه‌شده در بالا در مدل ارنا، همان‌طور که انتظار می‌رفت، کاهش در هزینه‌های کل سیستم بعد از بهینه‌سازی مدل اول در مقایسه با هزینه‌های کل مدل اولیه پژوهش، مشهود است.

تابع هزینه کل در مدل بهینه‌ی اول

final objective	7.0395	2.10	5.7465	9.7619
Total cost	31575.90	23,042.55	14162.17	57761.19
total profit	5123.84	4,517.89	1424.54	10265.40

تابع هزینه کل در مدل اولیه

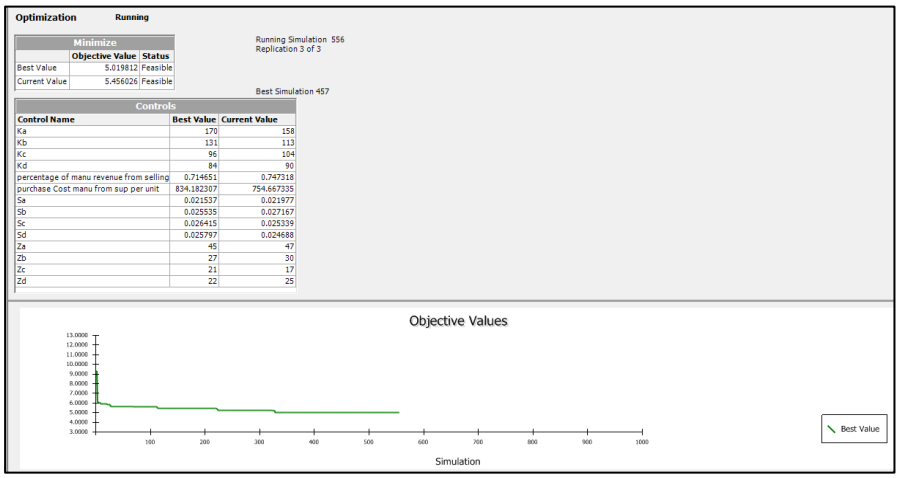
final objective	5.6791	0.36	5.1983	5.9314
Total cost	43761.99	18,316.03	18075.09	55599.83
total profit	7628.25	3,023.96	3477.10	9913.60

بنابراین در مدل دوم، با توجه به کاهش در تابع هزینه‌های کل، خروجی مدل اول به‌عنوان ورودی مدل دوم قرار می‌گیرد.

مدل دوم. این مدل به‌دنبال حداقل‌کردن تابع هدف نهایی است که حاصل تقسیم حداقل هزینه‌های کل سیستم بر روی حداکثر مجموع درآمدهای حاصله از قرارداد اشتراک درآمدها است. با جایگزینی متغیرهای تصمیم بهینه به‌دست‌آمده در مدل بالا، مقادیر تصمیم بهینه جدید با درنظرگرفتن هر دو تابع هدف یادشده در مدل به‌دست خواهد آمد.

جدول ۴. مقدار متغیرهای تصمیم ورودی و بعد از بهینه‌سازی مدل دوم

متغیر تصمیم	مقدار ورودی مدل دوم با احتساب مدل اول	مقدار بهینه‌شده درمدل دوم	متغیر تصمیم	مقدار ورودی مدل دوم با احتساب مدل اول	مقدار بهینه‌شده در مدل دوم
Z_a	۴۴	۴۵	S_d	۰/۰۲۵۸	۰/۰۲۵۷
Z_b	۳۰	۲۷	K_a	۱۵۹	۱۷۰
Z_c	۱۹	۲۱	K_b	۱۱۹	۱۳۱
Z_d	۲۴	۲۲	K_c	۹۶	۹۶
S_a	۰/۰۲۲۸	۰/۰۲۱۵	K_d	۸۴	۸۴
S_b	۰/۰۲۴۸	۰/۰۲۵۵	percentage of manu revenue from selling	۰/۵۴۹۴	۰/۷۱
S_c	۰/۰۲۶۵	۰/۰۲۶۴	purchase Cost manu from sup per unit	۱۰۰۰	۸۳۴/۱۸

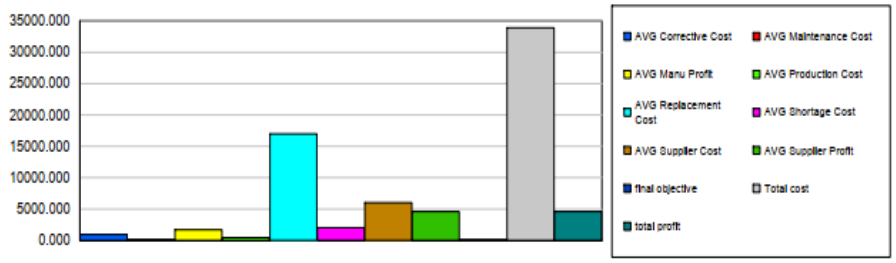


شکل ۱۸. خروجی نهایی Opt Quest در مدل دوم

با جایگزینی متغیرهای تصمیم بهینه به‌دست‌آمده در مدل‌ها و شبیه‌سازی مدل ارنا با احتساب تمامی متغیرها در جدول ۵ و ۶ ، به‌دست آمده است.

جدول ۵. خروجی نهایی مدل

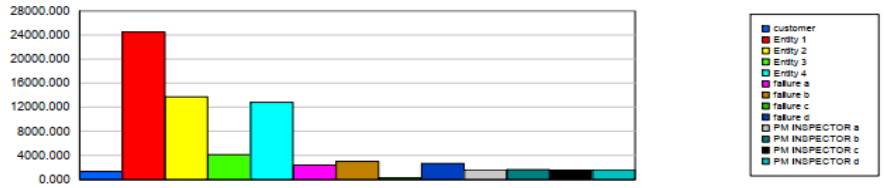
Output	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
AVG Corrective Cost	906/56	65/25	867/23	997/25
AVG Maintenance Cost	20/4799	1/14	18/8370	20/8907
AVG manu profit	1694/24	802/34	649/72	2281/41
AVG Production Cost	434/33	220/76	159.29	611/10
AVG Replacement Cost	17001/26	13675/33	441/92	27241/16
AVG Shortage Cost	1997/22	1012/29	611/11	2763/89
AVG Supplier Cost	6000/08	2681/09	2354/07	7759/30
AVG Supplier Profit	4581/82	2047/35	1797/63	5925/21
Final Objective	5/4457	0.48	4/8916	5/9090
Total Cost	33897/80	15556/41	14461/29	45343/97
Total Profit	4581/82	2047/35	1797/63	5925/21



شکل ۱۹. خروجی نهایی مدل

جدول ۶. خروجی نهایی مدل

Number in	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
Customer	1299/00	608/41	480/00	1714/00
Entity 1	24487/00	10199/69	11876/00	32894/00
Entity 2	13719/80	5161/59	7137/00	17730/00
Entity 3	4112/60	1021/63	2803/00	4900/00
Entity 4	12804/20	4962/59	6341/00	16850/00
Failure a	2372/80	152/29	2207/00	2541/00
Failure b	2978/40	1660/04	2200/00	5362/00
Failure c	221/20	23/58	193/00	236/00
Failure d	2626/40	465/31	2363/00	3269/00
PM Inspector a	1577.00	84/44	1489/00	1637/00
PM Inspector b	1601/20	7/10	1594/00	1609/00
PM Inspector c	1592/40	68/60	1524/00	1659/00
PM Inspector d	1573/80	48/38	1530/00	1609/00



شکل۲۰- خروجی نهایی مدل

در پاسخ به سؤال‌های پژوهش برای سیستم یادشده با فرض نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه مبتنی بر قابلیت اطمینان و استفاده از پیمانکاران فرعی سیاست بهینه تعیین شده است و با انجام پژوهش با فرضیه‌های مشخص کاهش ۲۲/۵ درصدی در هزینه‌های کل سیستم مشهود است. تعداد دفعات نگهداری پیشگیرانه و میزان موجودی بافرها برای سیاست کنترل موجودی به‌عنوان اصلی‌ترین متغیرهای تصمیم در این مدل به‌دست آمده‌اند. هزینه بهینه تهیه محصول از پیمانکاران و میزان درصد درامدهایی که تولیدکننده نگه می‌دارد، به‌عنوان متغیر اصلی در رویکرد قرارداد اشتراک درآمدها محاسبه شده است.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

هدف از این پژوهش بهینه‌سازی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان در سیستم‌های تولیدی مستعد شکست شبکه‌ای و تعیین سیاست‌های پیمانکاران کالاهای نهایی با رویکرد اشتراک درآمدها است که با توجه به مطالعات انجام‌شده، به‌دست. در این پژوهش سیستمی متشکل از شبکه‌ای از ماشین‌آلات با محدودیت رابطه و زمان خرابی و تعمیر تصادفی در نظر گرفته شد. به‌منظور جلوگیری از کمبود از بافرهای میانی و یک بافر نهایی استفاده شد. تعیین سطح موجودی بافر از پارامتر مؤثراست. هدف تعیین نرخ بهینه تولید و متغیرهای نگهداری پیشگیرانه و متغیرهای مربوط به پیمانکاران فرعی برای به‌حداقل‌رساندن هزینه‌های کل سیستم بود. برای این منظور از شبیه‌سازی گسسته ـ پیشامد استفاده شد و بعد از مدل‌سازی در نرم‌افزار ارنا بهترین مقادیر متغیرهای تصمیم در بستر Opt Quest به‌دست آمد که به کاهش ۲۲/۵ درصدی هزینه‌های کل سیستم منجر شد. در طی فرایند پژوهش مواردی مدنظر واقع شده است که می‌توانند پیشنهادهایی برای انجام پژوهش‌های آتی و توسعه در زمینه برنامه‌ریزی سیستم‌های تولید مستعد شکست باشد که در ادامه به آن این موارد اشاره می‌شود:

ـ امکان استفاده از پیمانکاران فرعی در بافرهای میانی؛

ـ تقاضای وابسته به نرخ قیمت و بررسی اثر آن در سیستم‌های تولید مستعد شکست شبکه‌ای؛

ـ بررسی اثر اقتصاد چرخشی برای بازگشت محصولات معیوب در سیستم‌های تولید مستعد شکست شبکه‌ای.

منابع

1. Afshar-Bakeshloo, M., Bozorgi-Amiri, A., Sajadi, S. M., & Jolai, F. (2018). A multi-objective Environmental Hedging Point Policy with customer satisfaction criteria. *Journal of Cleaner Production, 179,* 478-494.
2. Aiassi, R., Sajadi, S. M., Hadji-Molana, S. M., & Zamani-Babgohari, A. (2020). Designing a stochastic multi-objective simulation-based optimization model for sales and operations planning in built-to-order environment with uncertain distant outsourcing. *Simulation Modelling Practice and Theory, 104,* 102103.
3. Amelian, S., Sajadi, S. M., & Alinaghian, M. (2015). Optimal production and preventive maintenance rate in a failure-prone manufacturing system using discrete event simulation. *International Journal of Industrial and Systems Engineering, 20(4),* 483-496.
4. Seyed Bathaee, M. S., Ghahremani-Nahr, J., Nozari, H., & Najafi, S. E. (2022). Designing a Mathematical Model of a Collaborative Production System Based on Make to Order under Uncertainty. Journal of Industrial Management Perspective, 12(Issue 1, Spring 2022), 193-224. doi: 10.52547/jimp.12.1.193 (In persian)
5. Dror, Moshe, Kenneth R. Smith, and Candace Arai Yano. Deux Chemicals Inc. Goes Just-in-Time. *Interfaces 39.6 (2009):* 503-515.
6. Glock, C.H., 20136- Berg, M., Posner, M.J.M., Zhao, H. (1994). Production-inventory systems with unreliable machines. *Oper. Res. 42(1),* 111–118.
7. Hafidi, N., El Barkany, A., & Mahmoudi, M. (2018). Modelling and Optimization of Integrated Planning of Production and Maintenance with Subcontract Constraint. *International Journal of Engineering Research in Africa 40,* 184–203.
8. Hajej, Zied, Nidhal Rezg, & Ali Gharbi. (2014). Forecasting and maintenance problem under subcontracting constraint with transportation delay." *International Journal of Production Research, 52(22),* 6695-6716.
9. Haoues, M., Dahane, M., & Mouss, N. K. (2019). Optimization of Single Outsourcer–Single Subcontractor Outsourcing Relationship under Reliability and Maintenance Constraints. *Journal of Industrial Engineering International.*
10. Hatami-Marbini, A., Sajadi, S. M., & Malekpour, H. (2020). Optimal control and simulation for production planning of network failure-prone manufacturing systems with perishable goods. *Computers & Industrial Engineering, 146,* 106614.
11. Kenné, J. P., Gharbi, A., & Boukas, E. K. (1997). Control policy simulation based on machine age in a failure prone one-machine, one-product manufacturing system. *International Journal of Production Research, 35(5),* 1431-1445.
12. Keynia F. (2017). Preventive and Corrective Maintenance to the Lifetime Efficiency of Power Transformer Considering the Effect of Aging on Reliability. Journal of Engineering & Mnagement., *7(3),* 20-31 (In persian)
13. Khairy, A. H. K. (2008). *Complex System Maintenance Handbook.* Springer Science & Business Media.
14. Khatab, A. (2018). Maintenance optimization in failure-prone systems under imperfect preventive maintenance. *Journal of Intelligent Manufacturing, 29(3),* 707-717.

15. Malekpour, H., Sajadi, S. M., & Vahdani, H. (2016). Using discrete-event simulation and the Taguchi method for optimising the production rate of network failure-prone manufacturing systems with perishable goods. *International Journal of Services and Operations Management, 23(4)*, 387-406.
16. Peymankar, M., Dehghanian, F., Ghiami, Y., & Abolbashari, M. H. (2018). The effects of contractual agreements on the economic production quantity model with machine breakdown. *International Journal of Production Economics, 201*, 203-215.
17. Rad, M. F., Sajadi, S. M., & Kashan, A. H. (2015). Determination of optimal production rate in stochastic manufacturing systems by simulation optimisation approach. *International Journal of Industrial and Systems Engineering, 20(3)*, 306-322.
18. Rivera-Gómez, H., Gharbi, A., Kenné, J. P., Montaño-Arango, O., & Hernandez-Gress., E. S. (2018). Subcontracting Strategies with Production and Maintenance Policies for a Manufacturing System Subject to Progressive Deterioration. *International Journal of Production Economics, 200*, 103–118.
19. Rivera-Gómez, Héctor, et al. (2016). Production control problem integrating overhaul and subcontracting strategies for a quality deteriorating manufacturing system. *International Journal of Production Economics, 171*, 134-150.
20. Sadat khansari, E., Haji Molana, M., Sajadi, M., (2017). Designing an integrated fuzzy simulation model to optimize preventive maintenance and repairs of multi-product manufacturing businesses. *14th International Industrial Engineering Conference*, IIEC14_338 (In persian)
21. Taheri, S., Mokhtari, H., Fallahi, A. (2021). An Economic Production Quantity Model with Probabilistic Machine Breakdown and Multiple Shipments Policy. *The Journal of Industrial Management Perspective, 11(4)*, 223-252. (In persian)
22. Tavan, F., & Sajadi, S. M. (2015). Determination of optimum of production rate of network failure prone manufacturing systems with perishable items using discrete event simulation and Taguchi design of experiment. *Journal of Industrial Engineering and Management Studies, 2(1)*, 16-26.
23. Mousavi, S., Sajadi, S., AlemTabriz, A., Najafi, S. (2021). Designing a Hierarchical Network of Temporary Urban Medical Centers in a Disaster through a Hybrid Approach of Mathematical Model – Simulation. *The Journal of Industrial Management Perspective, 11(2)*, 99-124. (In persian)