Industrial Management Perspective

Print ISSN: 2251-9874, Online ISSN: 2645-4165
Volume 13, Serial Number 50, Summer 2023, Pages 119-157 (Original Article)
DOI: 10.48308/JIMP.13.2.119

A Model of Simulation-Data Envelopment Analysis in Network Failure Manufacturing Systems Considering Reliability Centered Maintenance and Return of Defective Items

Fereshteh Tavan[*], Seyed Mojtaba Sajadi[**], Farzad Movahedi Sobhani[***], Amir Azizi[****]

Abstract

In this paper, we study a production system that is subject to network failures and produces perishable goods. We assume that the system has preventive and corrective maintenance activities and can return defective items for rework. Our objective is to find the optimal production rate that minimizes the total cost of production, inventory, spoilage, and maintenance over a long planning horizon. We consider the uncertainty of machine failures and use discrete event simulation and ARENA.14 software to estimate the performance measures of the system. We also use data envelopment analysis to evaluate the efficiency of the system and identify the best scenario. The results show the effectiveness of our proposed model.

Keywords: Maintenance; Reliability; Failure Prone Manufacturing Systems; Simulation, Data Envelopment Analysis.

Received: Jul. 10, 2022; Accepted: Nov. 21, 2022.

* Ph.D Student, Department of Industrial Engineering, Science and Research Unit, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
** Associate Professor, Faculty of Entrepreneurship, University of Tehran, Tehran, Iran (Corresponding Author).
Email: msajadi@ut.ac.ir
*** Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Science and Research Unit, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
**** Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Science and Research Unit, Islamic Azad University, Tehran, Iran .

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

چشم‌انداز مدیریت صنعتی
شاپای چاپی: ۹۸۷۴-۲۲۵۱، شاپای الکترونیکی: ۴۱۶۵-۲۶۴۵
سال سیزدهم، شماره ۵۰، تابستان ۱۴۰۲، ص‌ص ۱۱۹ – ۱۵۷ **(نوع مقاله: پژوهشی)**
DOI: 10.48308/JIMP.13.2.119

ارائه مدل شبیه‌سازی- تحلیل پوششی داده‌ها در سیستم‌های تولید مستعد شکست شبکه‌ای با درنظرگرفتن نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان و بازگشت کالاهای معیوب

فرشته توان*، سید مجتبی سجادی، فرزاد موحدی سبحانی***، امیر عزیزی*****

چکیده

نگهداری و تعمیرات و بحث تعیین نرخ بهینه تولید، دو مبحث مجزا هستند که امروزه به دلیل وابستگی متقابل بین آن‌ها، با هم ادغام و به‌عنوان دو جزء جداناپذیر مطرح می‌شوند. در این پژوهش سیستم تولیدی مستعد شکست شبکه‌ای غیرپایدار با فرض وجود کالاهای فسادپذیر که دارای فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و اصلاحی است، بررسی می شود. هدف از ارائه این پژوهش، تعیین نرخ بهینه تولید و به‌تبع آن کمینه‌کردن مجموع هزینه‌های تولید، کمبود، فساد، نگهداری تعمیرات پیشگیرانه و اصلاحی، دوباره‌کاری و نگهداری کالا در یک افق زمانی بلندمدت است. عدم‌قطعیت به‌دلیل خرابی‌های تصادفی ماشین‌آلات می‌شود تا حل چنین مسائلی با مدل‌های ریاضی بسیار پیچیده شود؛ بنابراین در این پژوهش از ابزار شبیه‌سازی گسسته پیشامد و نرم‌افزار ARENA.14 برای محاسبه شاخص‌های عملکردی سیستم استفاده شد. برای ارزیابی کارایی سیستم و تعیین سناریوی بهینه نیز از تکنیک تحلیل پوششی داده‌ها استفاده شده است که نتایج آن، کارایی مدل ارائه‌شده را نشان می‌دهد.

کلیدواژه: نگهداری و تعمیرات؛ قابلیت اطمینان؛ سیستم‌های تولیدی مستعد شکست؛ شبیه‌سازی؛ تحلیل پوششی داده‌ها.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۱۹، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۳۰.

* دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
** دانشیار، دانشکده کارآفرینی، دانشگاه تهران، تهران، ایران (نویسنده مسئول).
Email: msajadi@ut.ac.ir
*** استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
**** استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

۱. مقدمه

با توجه به پیشرفت و پیچیده‌شدن سیستم‌های تولیدی و نیز به علت وجود محیط‌های رقابتی در عرصه‌ی تولید، با وجود چالش‌هایی همچون ورود کالاهای خارجی، برنامه‌ریزی دقیق و بهینه‌سازی سیستم‌های تولیدی بیش‌ازپیش حائز اهمیت است که باعث شده است مدیران و مسئولان سازمان‌ها به مسئله تولید و بهینه‌سازی سیستم‌های تولیدی حساسیت بیشتری نشان دهند. خرابی ماشین‌آلات در سیستم‌های تولیدی امری اجتناب‌ناپذیر است و این موضوع در فرایند تولید اختلال ایجاد می‌کند [۲۹]؛ همچنین هزینه‌های روبه‌روشدن با کمبود کالا و مواد اولیه و قطعات یدکی، مشکلات توقف تولید، ازدست‌رفتن فرصت فروش کالا و کسر اعتبار سازمان را در بر خواهد داشت [۱۷]. به‌دلیل پیچیدگی سیستم‌های تولیدی، انواع مختلفی از مدل‌ها، مستقل از مدل‌های برنامه‌ریزی تولید به‌منظور مواجهه با شرایط عدم‌قطعیت شکل گرفته‌اند که سیستم‌های مستعد شکست از جمله این سیستم‌ها است [۱۹]. سیستم‌های تولیدی مستعد شکست، زیرمجموعه‌ای از مدل‌های برنامه‌ریزی تولید و سیستم‌های تولیدی انعطاف‌پذیر[1] هستند. در این نوع سیستم‌ها، ماشین‌ها با نرخ تولید متغیر به هم متصل شده‌اند تا نیاز مشتریان برآورده شود [۱۸]. در شرایط عدم‌قطعیت، افزایش نرخ تولید می‌تواند ذخیره اطمینانی مازادی را ایجاد کند که هزینه‌های تولید را به‌شدت بالا ببرد؛ درعین‌حال خرابی ماشین‌آلات را افزایش داده و روند تولید را با اختلال مواجه سازد [۱۵]. بر همین اساس، استقرار برنامه نگهداری و تعمیرات منظم و تعیین نرخ بهینه تولید در سیستم‌های تولیدی مستعد شکست، با درنظرگرفتن افزایش قابلیت اطمینان و دسترسی‌پذیری، امری حیاتی محسوب می‌شود [۴]. با توجه به اهمیت فرآیند تعمیر و نگهداری در آماده‌نگه‌داشتن تجهیزات و تأسیسات برای استفاده، لازم است روند و عملکرد شاخص‌های تعمیر و نگهداری به‌طور منظم ارزیابی شود تا تعمیر و نگهداری برنامه‌ریزی و ارتقا یابد [۲۱]. انتخاب استراتژی مناسب نگهداری و تعمیرات می‌تواند اثر زیادی بر هزینه‌های تولیدی و قیمت نهایی محصول تولیدی بگذارد و در بهره‌وری سیستم‌های تولیدی بسیار تأثیرگذار باشد [۱۱]؛ همچنین ایجاد سیستم نگهداری و تعمیرات می‌تواند به‌عنوان مزیت رقابتی در سیستم‌های تولیدی به‌حساب آید [۱۴]. مسئله‌ای که در این پژوهش بررسی خواهد شد ، مسئله بهینه‌سازی برنامه نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان در سیستم‌های ساخت و تولید چندماشینه چندمحصوله فسادپذیر با تقاضای وابسته به زمان در شرایط عدم‌قطعیت است. سیستم موردمطالعه متشکل از چند ماشین است که در هر مرحله یک نوع کالا تولید و در مرحله نهایی با هم مونتاژ می‌شوند و یک محصول را ایجاد می‌کنند. ماشین‌آلات به‌طور تصادفی خراب شده و تعمیر می‌شوند. برنامه‌ریزی انجام نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و تعیین میزان بهینه

1. Flexible Production Systems

تولید هر ماشین برای رفع خرابی‌های تصادفی و عدم‌ایجاد گلوگاه در خط تولید از اهداف این مسئله است.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در پژوهش پیش رو از مفاهیم نگهداری و تعمیرات، شبیه‌سازی رایانه‌ای و تحلیل پوششی داده‌ها استفاده شده است که در ادامه مفاهیم و پیشینه مختصری از آن‌ها آورده می‌شود.

نگهداری و تعمیرات. امروزه به‌دلیل نیاز به افزایش دردسترس‌بودن انرژی، کیفیت و ایمنی و همچنین کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، نگهداری سیستم‌های توزیع از بسیار حائز اهمیت است. بر این اساس، استراتژی نگهداری و تعمیرات در سیستم‌های توزیع از مهم‌ترین فعالیت‌های تصمیم‌گیری به‌شمار می‌رود [۳]. مدیران صنایع برای برنامه‌ریزی تولید، بررسی موارد اساسی مانند، تخمین میزان تولید و تعداد دستگاه‌های موردنیاز، نیروی انسانی و موارد مشابه را باید مدنظر قرار دهند. یکی از مهم‌ترین مشکلات، خرابی ناگهانی دستگاه‌ها است که می‌تواند به‌طور مستقیم بر تولید و کسر اعتبار سازمان تأثیر مستقیم داشته باشد [۱]. به‌منظور حفظ سهم در بازار رقابت و افزایش بهره‌وری، صنایع به یک استراتژی نگهداری و تعمیرات به‌منظور جلوگیری از خرابی‌های ناگهانی تجهیزات و ماشین‌آلات و افزایش قابلیت اطمینان روی آورده‌اند [۱۲]. استراتژی‌های مختلفی برای نگهداری و تعمیرات وجود دارد که از آن جمله می‌توان نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، نگهداری و تعمیرات اصلاحی[1]، نگهداری و تعمیرات مبتنی بر خرابی یا ازکارافتادگی ماشین‌آلات و نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان نام برد که در این پژوهش از استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و اصلاحی بهره گرفته شده است [۸].

سیستم تولیدی مستعد شکست. سیستم‌های تولیدی انعطاف‌پذیر[2] (FMS)، سیستم‌های تولیدی با سطح بالایی از یکپارچگی هستند که از اجزایی پیشرفته و پرهزینه تشکیل شده‌اند و روابط بین این اجزا بسیار پیچیده است [۲۳]. سیستم‌های تولیدی مستعد شکست[3]، زیرمجموعه‌ای از مدل‌های برنامه‌ریزی تولید و سیستم‌های تولیدی انعطاف‌پذیر هستند. در این نوع از سیستم‌ها ماشین‌ها به‌طور تصادفی خراب شده و دچار شکست می‌شوند. طبیعت تصادفی این سیستم‌ها به‌دلیل خرابی احتمالی ماشین‌ها و مدت‌زمان تعمیر، متغیر است که چهار وضعیت در حال عملیات[4]،

1. Corrective & Preventive Maintenance
2.Flexible Manufacturing Systems
3. Failure Prone Manufacturing System
4. Operational

توقف به‌دلیل خرابی ماشین[1]، فقدان مواد اولیه[2] و اشباع انبار محصول تولیدشده[3] را برای ماشین شکل می‌دهد. به‌دلیل این عدم‌قطعیت‌ها، مسائل با برنامه‌نویسی تصادفی مدل‌سازی، تکنیک‌های تحقیق در عملیات و شبیه‌سازی حل می‌شوند [۲۵]. در سیستم‌های ساخت و تولید انعطاف‌پذیر، سیاست کنترل بهینه یک سیستم ساخت و تولید انعطاف‌پذیر دارای ساختار خاصی به نام «سیاست نقطه کنترلی» است [۳۱] که توسط پژوهشگران زیادی سیاست‌های کنترلی، به نام «سیاست نقطه کنترل محدودکننده»[4] برای کنترل موجودی و تولید معرفی شد [۲]. سجادی و علیزاده (۲۰۱۹)، برای بهبود روش توسعه بهینه‌سازی شبیه‌سازی از روش‌های الگوریتم ژنتیک برای برنامه‌ریزی پایدار مسائل تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر استفاده کردند که نتایج این رویکرد حاکی از دقت بالای روش و کارایی آن است [۳۰]. به‌طورکلی شرکت‌ها و سازمان‌ها باید بهترین برنامه‌ریزی تولید ممکن را تدوین کنند و به اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی خود برسند [۷].

شبیه‌سازی رایانه‌ای. شبیه‌سازی، تقلیدی از عملکرد فرآیند یا سیستم واقعی با گذشت زمان است. شبیه‌سازی، صرف‌نظر از اینکه با دست یا به‌وسیله‌ی رایانه انجام شود، به ایجاد ساختگی تاریخچه سیستم و بررسی آن، به‌منظور دستیابی به نتیجه‌گیری‌هایی در مورد ویژگی‌های عملکرد سیستم واقعی مربوط می‌شود. این مدل معمولاً به شکل مجموعه‌ای از فرض‌های مربوط به عملکرد سیستم است. این فرض‌ها در چارچوب رابطه‌های ریاضی، منطقی و نمادین بین نهادها یا اهداف موردنظر سیستم بیان می‌شود؛ بنابراین ایجاد مدل شبیه‌سازی، هم به‌منزله‌ی ابزار تحلیل برای پیش‌بینی تأثیر تغییرات سیستم‌های موجود و هم به‌عنوان ابزار طراحی برای پیش‌بینی عملکرد سیستم جدید، در مجموعه‌های گوناگون شرایط کاربردپذیر است [۲۲]. مطابق تعریف شانون شبیه‌سازی عبارت است از: فرآیند طراحی مدلی از یک سیستم واقعی و انجام آزمایش‌هایی با این مدل که با هدف پی‌بردن به رفتار سیستم، یا ارزیابی استراتژی‌های گوناگون برای عملیات سیستم صورت می‌گیرد [۳۳]. یکی از ابزارهای شبیه‌سازی رایانه‌ای نرم‌افزار ارنا است. نرم‌افزار ارنا یکی از زبان‌های شبیه‌سازی گرافیکی به‌منظور شبیه‌سازی گسسته ـ پیشامد است. این نرم‌افزار یکی از رایج‌ترین نرم‌افزارها است که تحت سیستم‌عامل ویندوز است [۱۳]؛ بنابراین تمام ویژگی‌ها، عملیات، شکل و قالب آن برای کاربران این نرم‌افزار آشنا است. این نرم‌افزار با نرم‌افزارهای دیگر ویندوز از قبیل پردازشگر لغات، صفحات گسترده و بسته‌های CAD سازگار است [۲۰].

1. Repairing
2. Starved
3. Blocked
4. Hedging Point Policy

نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینـان. نگهـداری و تعمیـرات مبتنـی بـر قابلیـت اطمینان[1] (RCM) فرآیندی اسـت کـه عملکـرد تجهیـزات و یـا سیسـتم را در شـرایط مطلـوب بهره‌برداری فعلی تضمین می کند؛ همچنین نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان روشی است سیستماتیک که با تدوین مطلوب استراتژی نگهداری و تعمیرات می‌توانـد درعین‌حـال کـه هزینه‌های مربوطه را حداقل می‌سازد، شاخص قابلیت اطمینان را به‌عنوان هدف اصـلی در سـطح مطلوب حفظ کند [۳۲][32]. ترکیب سیاست نگهداری و تعمیرات و کنترل موجودی نیز می‌تواند امروزه در تعیین میزان بهینه تولید و کارایی سیستم‌های تولیدی مستعد شکست موردتوجـه قـرار گیـرد [۳۶]. برنامـه‌ریزی تولیـد و قابلیـت اطمینـان ماشـین‌آلات از موضـوعات برجسـته در انعطاف‌پذیری سیستم‌های تولیدی هستند که به کاهش هزینه‌های تولید و افزایش کارایی منجـر می‌شوند [۶]. اهمیت روزافزون نگهداری و تعمیرات بـه توسـعه و اجـرای اسـتراتژی‌هـای بهینـه نگهداری و تعمیرات به‌منظور بهبود قابلیت اطمینان ماشـین‌آلات، کـاهش تعـداد دفعـات خرابـی ماشین‌آلات و به‌تبع آن کاهش هزینه‌های تعمیرات منجر شده اسـت [۱۶]. تـاکنون رویکردهـای مختلفی برای تعیین برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات پیشـگیرانه ارائـه شـده اسـت کـه رویکـرد تصادفی و فاصله‌ای از آن دسته هستند [۵]. رویکردهای نگهداری و تعمیرات را بر اسـاس جزئـی از سیستم که برای انجام تعمیرات انتخاب می‌شود، به دو گروه کلی تعمیرات سیستم‌هـای تـک-جزئی و چندجزئی تقسیم کردند. در رویکرد تعمیرات سیستم‌های تک‌جزئی، فرض مـی‌شـود کـه خرابی یک جزء تأثیری بر خرابی دیگر اجزا سیستم ندارد و اجزای سیستم از لحاظ خرابی مستقل هستند؛ بنابراین برای تعیین نوع خرابی به وضعیت و حالت همان جزء توجه می‌شـود. در صـورتی که در سیاست سیستم‌های چندجزئی فرض می‌شود کـه اجـزای سیسـتم از لحـاظ اقتصـادی یـا خرابی و یا ساختاری به یکدیگر وابسته هستند؛ بنابراین نوع تعمیرات هر جزء با توجه به وضـعیت کلی سیستم انتخاب می‌شود. در بعضی از روش‌ها قابلیت اطمینان، ملاک انجـام تعمیـرات اسـت که رویکرد خرابی محدودشده[2] از این جمله است. در این خط‌مشی هنگامی کـه نـرخ خرابـی یـا قابلیت اطمینان یک قطعه به سطح ازقبل‌تعیین‌شده‌ای برسد، تعمیرات پیشگیرانه انجام می‌گیرد و در هنگام بروز خرابی، تعمیرات اصلاحی انجام می‌شود. اجـرای ایـن سیاسـت، قابلیـت اطمینـان سیستم را در بالای سطح مشخص‌شـده‌ای نگـه مـی‌دارد [۱۰]. انتخـاب اسـتراتژی نگهـداری و تعمیرات یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های تصـمیم‌گیـری در صـنعت اسـت. RCM یـک اسـتراتژی نگهداری و تعمیرات تکامل‌یافته به‌شمار می‌رود که شامل تمام مزایای استراتژی‌هـای نگهـداری سنتی است. به‌طور دقیق‌تر، RCM مناسب‌ترین اسـتراتژی نگهـداری و تعمیـرات را بـرای کلیـه تجهیزات موجود در فرآیند ماشین‌آلات کارخانه بر اساس پارامترهای قابل‌اطمینان انتخـاب مـی-

1. Reliability Centered Maintenance
2. Failure Limit Policy

کند. اجرای RCM به جمع‌آوری و تجزیه‌وتحلیل داده‌های خرابی و نگهداری در دستگاه‌ها نیاز دارد [۳۷].

تحلیل پوششی داده‌ها. استفاده از سناریوهای مختلف در شبیه‌سازی به تحلیل‌گر کمک می‌کند که بهترین آن را انتخاب داشته باشد. با توجه به اینکه برای ساخت هر مدل شبیه‌سازی تعدادی ورودی در نظر گرفته شده و سپس تعدادی خروجی حاصل می‌شود، تحلیل کارایی این ورودی‌ها و خروجی نیاز به استفاده از تکنیکی دارد. تحلیل پوششی داده‌ها[1] (DEA) یکی از بهترین تکنیک‌های تحلیل کارایی محسوب می‌شود که نخستین بار توسط چارنز و همکاران[2] (۱۹۸۷) مطرح شد [۹]. به‌طورکلی دو رویکرد برای تخمین تابع تولید وجود دارد که عبارت‌اند از: روش‌های پارامتریک و ناپارامتریک [۱۳]. تکنیک‌های متفاوتی به‌منظور تخمین پارامترهای روش‌های پارامتریک ارائه شده است که از آن جمله می‌توان روش کاب داگالس[3] و روش رگرسیون را نام برد. در روش‌های پارامتریک تابع مشخصی به‌عنوان پیش‌فرض تابع تولید در نظر گرفته می‌شود؛ اما در روش‌های ناپارامتریک مثل DEA بدون درنظرگرفتن پیش‌فرض برای تابع تولید اقدام به ساختن یک تابع تولید تجربی می‌شود [۲۷]. هر دو روش پارامتریک و ناپارامتریک بر پایه مشاهدات استوار هستند ولی در تحلیل پارامتریک، یک معادله بهینه‌سازی برای تمام واحدهای سازمانی به‌کار می‌رود، درحالی‌که در روش تحلیل پوششی داده‌ها به‌منظور اندازه‌گیری کارایی برای هر واحد سازمانی یک عمل بهینه‌سازی صورت می‌گیرد [۴۰] تحلیل پوششی داده‌ها یک مدل ریاضی برای محاسبه نسبت کارایی واحدهای تصمیم‌گیرنده بر اساس ورودی‌ها و خروجی‌های چندگانه است. عدم‌حساسیت نسبت به مقیاس اندازه‌گیری، پرهیز از ایده‌آل‌گرایی، ارائه راهکارهای مدیریتی، تعیین کاراترین واحد با روش‌های رتبه‌بندی مانند اندرسون و پیترسون را می‌توان برخی از مزایای تحلیل پوششی داده برشمرد. اغلب زمانی که وزن ورودی و خروجی‌ها نامعین است و یا مقیاس‌های سنجش آن‌ها متفاوت است، برای تعیین میزان کارایی از DEA استفاده می‌شود. هدف DEA تعیین وزن ورودی و خروجی‌ها به‌گونه‌ای است که کارایی هر واحد نسبت به سایر واحدها حداکثر شود. DEA نسبت کارایی مجموعه‌ای از واحدهای تصمیم‌گیرنده[4] (DMU) مشابه دارای ورودی و خروجی‌های چندگانه را محاسبه می‌کند. در تحلیل پوششی داده‌ها سنجش کارایی بر اساس دو دیدگاه ورودی‌محور و خروجی‌محور بررسی می‌شود. در ماهیت ورودی یک واحد تصمیم‌گیرنده در صورتی که امکان کاهش هریک از ورودی‌ها بدون افزایش دیگر ورودی‌ها یا کاهش هریک از خروجی‌ها وجود داشته باشد، ناکارا است؛ همچنین در

1. Data Involvement Analysis
2. Charnes, A., W. Cooper, & Rhodes, E.
3. Cobb Doglas
4. Decision Making Unit

یک مدل خروجی‌محور یک واحد تصمیم‌گیرنده در صورتی ناکارا است که امکان افزایش هر یک از خروجی‌ها بدون افزایش یک ورودی یا کاهش یک خروجی دیگر وجود داشته باشد. چنانچه یک DMU مقدار کارایی[1] برابر داشته باشد، آن DMU کارا است و در غیر این صورت ناکارا است [۲۴].

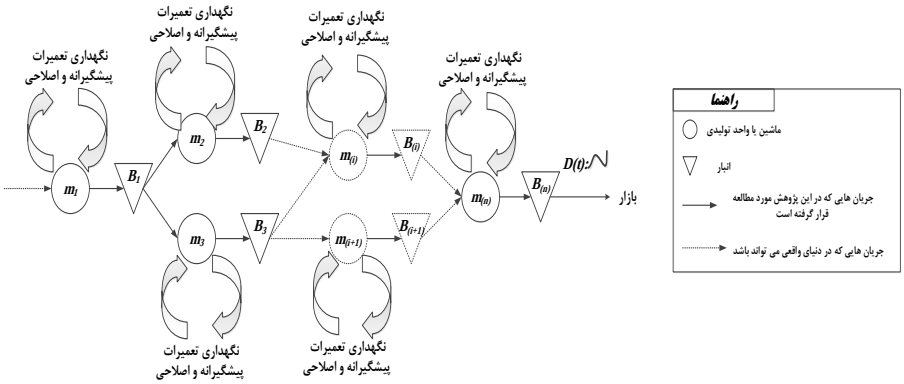
در مطالعات صورت‌گرفته تاکنون، انتخاب بهترین سیاست نگهداری و تعمیرات بر مبنای قابلیت اطمینان و بهینه‌سازی تولید به‌صورت هم‌زمان با فرض‌های غیرپایداربودن کالاها وابسته به عمر ماشین‌آلات، خرابی ماشین‌آلات، وجود سیستم‌های شبکه‌ای غیرقطعی و وجود محدودیت‌هایی از قبیل محدودیت ظرفیت انبار، محدودیت توان تولید توامان وجود ندارد و همین امر، وجه تمایز این پژوهش با پژوهش‌های قبلی است.

۳. روش‌شناسی پژوهش

مسئله موردبررسی در این پژوهش، همان‌طور که در شکل ۱، نشان داده شده است، یک سیستم مستعد شکست شبکه‌ای غیرقطعی با فرض وجود کالاهای غیرپایدار یا فاسدشدنی است که فرض خرابی و شکست ماشین‌آلات به آن وارد است. این سیستم متشکل از n ماشین غیرمشابه است که در هر مرحله از تولید، یک نوع محصول تولید می‌شود؛ به‌طوری‌که محصول تولیدشده در مرحله‌ی i با ضریب مصرف مشخصی (l_{ij}) در تولید محصول مرحله j مورداستفاده قرار خواهد گرفت. در زمان سالم‌بودن ماشین‌ها، محصولات با نرخ $U_i(t)$ تولید می‌شوند؛ سپس محصول تولیدشده مورد بازرسی کیفی قرار می‌گیرد و در صورت نیاز به بخش دوباره‌کاری ارسال می‌شود. درصورتی‌که محصول قابل‌تعمیر باشد، به بخش تعمیر ارسال می‌شود؛ درغیر این صورت به‌عنوان ضایعات در نظر گرفته شده و از سیستم خارج می‌شود. نرخ بازگشت کالا به مرحله دوباره‌کاری با عمر ماشین‌آلات نسبت مستقیم دارد؛ به‌عبارتی‌دیگر هر چه عمر ماشین‌آلات بیشتر شود، نرخ دوباره‌کاری محصولات نیز افزایش می‌یابد. بعد از هر مرحله از تولید، انباری وجود دارد که میزان موجودی باقیمانده در آن ذخیره می‌شود تا در زمان خرابی ماشین مرحله $(i-1)$، فرآیند تولید متوقف نشود. درواقع انبار از تأثیر مستقیم شکست ماشین بر تقاضا جلوگیری می‌کند؛ به‌عبارت‌دیگر با شکست ماشین، تقاضای جاری موردنیاز از انبار برداشته می‌شود تا ماشین تعمیر و به فرآیند تولید بازگردد.

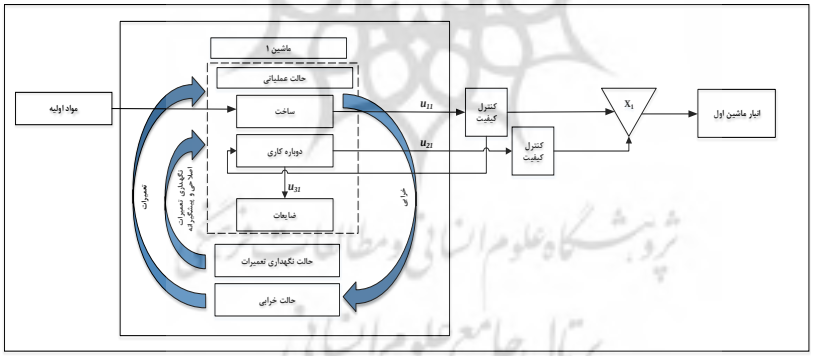
پرتال جامع علوم انسانی

1. Efficiency



شکل ۱. سیستم مستعد شکست شبکه‌ای

شکست ماشین‌آلات نیز امری غیرقابل‌اجتناب است. برای پیشگیری از خرابی‌های آنی بازدید دوره‌ای ماشین‌آلات و برنامه‌ریزی انجام نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه امری ضروری است. گاهی نیز ماشین‌آلات به‌صورت تصادفی و آنی دچار خرابی می‌شوند و ممکن است موجب توقف تولید شود که در این صورت بحث اجرای برنامه نگهداری و تعمیرات اصلاحی به میان می‌آید. در این پژوهش فرض بر این است که با انجام امور نگهداری و تعمیرات اصلاحی عمر ماشین‌آلات با ضریب ثابتی کاهش یافته است؛ ولی با انجام امور نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، عمر ماشین به حالت صفر کارخانه برمی‌گردد. شکل ۲، شمای کلی عملکرد هر یک از ماشین‌آلات را نشان می‌دهد.



شکل ۱. شمای کلی عملکردی هر یک از ماشین‌آلات در سیستم موردمطالعه (ماشین اول)

مفروضات مسئله. مفروضات مسئله در این پژوهش به‌صورت زیر است:

ـ تقاضای محصولات میانی برای به‌کارگیری در تولید محصول بعدی، در سیستم ثابت و معلوم و تقاضای محصول نهایی، متغیر و وابسته به زمان است؛
ـ نرخ تولید گسسته است؛
ـ مدل موردمطالعه تک‌محصولی است که از مونتاژ چندین محصول دیگر تشکیل شده است؛
ـ فرایند تولید روبه‌جلو است و برگشت به عقب مجاز نیست؛
ـ ماشین‌های میانی هیچ‌گاه با کمبود مواد اولیه مواجه نخواهند شد؛
ـ برای محصول نهایی کمبود از هر دو نوع پس‌افت و فروش ازدست‌رفته مجاز است؛
ـ درصورتی‌که محصول میانی مرحله i، به اندازه کافی (ضریب مصرف) در انبار موجود نباشد، تولید محصول مرحله بعد متوقف خواهد شد و نرخ تولید صفر می‌شود؛
ـ زمان خرابی (شکست) و تعمیر کلیه‌ی ماشین‌ها نمایی است؛
ـ برای محصول نهایی، فساد کالا مجاز است و اگر محصول تا تاریخ موردنظر مصرف نشود، جزو کالاهای فاسد به‌حساب می‌آید؛
ـ ضریب کالاهای معیوب، تابعی از طول عمر ماشین‌آلات است؛
ـ در صورت تحویل کالای منقضی به مشتری و وجود تقاضای پس‌افت در سیستم، آن مشتری که کالای منقضی دریافت کرده است، در اولویت صف تأمین تقاضای پس‌افت قرار می‌گیرد؛
ـ ماشین‌آلات به دو علت متوقف می‌شوند و تحت تعمیر قرار می‌گیرند:
حالت اول: توقف ماشین‌آلات به علت انجام تعمیرات پیشگیرانه؛
حالت دوم: توقف ماشین‌آلات به علت انجام تعمیرات اضطراری؛
ـ زمان لازم برای تعمیر ماشین‌آلات به‌دلیل تفاوت در نوع خرابی، تفاوت در سرعت کار تعمیرکاران و بسیاری از عوامل دیگر متفاوت است؛
ـ برنامه‌ریزی برای انجام تعمیرات پیشگیرانه بسته به نوع ماشین‌آلات و سوابق خرابی آن نیز متفاوت است؛
ـ در زمان شروع مطالعه سیستم، تمامی ماشین‌ها سالم و آماده انجام عملیات هستند.

علائم و نمادها. نمادهای به‌کاررفته در مدل‌سازی سیستم موردمطالعه به‌صورت جدول ۱، است.

جدول ۱. علائم و اختصارات

علائم	توضیحات
M_i	ماشین iام $(i = 1, 2, \dots, n)$
B_i	انبار مربوط به ماشین iام
n	تعداد محصولات یا ماشین‌ها

علائم	توضیحات
d	نرخ تقاضای احتمالی برای محصول نهایی
l_{ij}	ضریب مصرف محصول i که در تولید محصول j توسط ماشین j مورداستفاده قرار می‌گیرد.
a_i	عمر ماشین iام
$u_i(t)$	نرخ تولید ماشین iام $(i = 1, 2, \dots, n)$
$u_i^{\max}$	حداکثر نرخ تولید ماشین iام
u_n^{max}	حداکثر نرخ تولید ماشین نهایی
u_{R_i}	نرخ دوباره‌کاری ماشین iام
R_i	تعداد محصولات دوباره‌کاری‌شده ماشین iام $(i = 1, 2, \dots, n)$
R	نرخ بازگشت کالا در واحد زمان
$\xi(t)$	نرخ انتقال حالت ماشین
$Q(t)$	ماتریس انتقال حالت ماشین
Z_{1i}	نقطه کنترلی سطح موجودی انبار iام برای تولید با حداکثر توان تولیدی
Z_{2i}	سطح آستانه انبار iام (ظرفیت انبار iام)
Z_{pi}	نقطه کنترلی سطح موجودی انبار iام برای اجرای عملیات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، $(i = 1, 2, \dots, n)$
Z_{ti}	نقطه کنترلی زمان بین دو تعمیر اصلاحی برای اجرای عملیات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، $(i = 1, 2, \dots, n)$
Z_b	نقطه کنترلی کمبود پس‌افت در ماشین نهایی
K	حداکثر کمبود مجاز برای ماشین نهایی
$\ell_i^-(t)$	تعداد فروش ازدست‌رفته در واحد زمان
h_{R_i}	هزینه دوباره‌کاری محصول ماشین iام به ازای هر محصول $(i = 1, 2, \dots, n)$
CM_i	هزینه نگهداری و تعمیرات اصلاحی ماشین iام به ازای هر بار تعمیر $(i = 1, 2, \dots, n)$
PM_i	هزینه نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه ماشین iام به ازای هر بار تعمیر $(i = 1, 2, \dots, n)$
S_{1i}	تعداد دفعات انجام نگهداری و تعمیرات اصلاحی ماشین iام $(i = 1, 2, \dots, n)$
S_{2i}	تعداد دفعات انجام نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه ماشین iام $(i = 1, 2, \dots, n)$
h_i	هزینه‌ی نگهداری موجودی در واحد زمان برای هر واحد محصول i $(i = 1, 2, \dots, n)$
$\hat{\pi}_i$	هزینه‌ی کمبود به ازای هر واحد تقاضای ارضانشده محصول i $(i = n)$
$\hat{\ell}_i$	هزینه‌ی هر واحد فروش ازدست‌رفته محصول i در واحد زمان $(i = n)$
C_p	هزینه‌ی فساد در واحد زمان به ازای هر واحد محصول i $(i = n)$
C_i	هزینه تولید هر واحد محصول i $(i = 1, 2, \dots, n)$
$U(t)$	بردار سیاست کنترلی
$x_i(t)$	سطح موجودی انبار iام در زمان t $(i = 1, 2, \dots, n)$
$K(t)$	تابع هزینه‌ی میانگین هزینه‌ی طول اجرای شبیه‌سازی موردانتظار
$P(t)$	تعداد کالای فاسدشده از محصول i $(i = n)$

معادلات و روابط ریاضی. حال با استفاده از نمادهایی که در بالا ذکر شد، مدل ریاضی مسئله‌ی موردبررسی تشریح می‌شود و فرمول‌ها و معادلات مربوطه توضیح داده خواهد شد.

معادلات مربوط به وضعیت ماشـین. نمـاد $\xi_i(t)$ وضـعیت ماشـین iام را در لحظـه t نشـان می‌دهد که از فرایند تصادفی نیمه‌مارکوفی با مقادیر $\{1,2.3\} = \xi_i(t)$ تبعیت می‌کند؛ همچنین ماتریس $Q(t)$ نشان‌دهنده تغییر وضعیت ماشین از هر یک از حالات تعریف‌شده در $\xi_i(t)$ است [۲۸].

$$\xi_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{ماشین } i\text{ام عملیاتی باشد} \\ 2 & \text{ماشین } i\text{ام تحت تعمیر باشد} \\ 3 & \text{ماشین } i\text{ام تحت عملیات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه باشد} \end{cases} \quad (۱)$$

$$Q(t) = \begin{bmatrix} -(q_{12i}(a_i) + q_{13i}) & q_{12i}a_i & q_{13i} \\ q_{21i} & -q_{21i} & 0 \\ q_{31i} & 0 & -q_{31i} \end{bmatrix} \quad (۲)$$

خرابی ماشین‌آلات با نرخ شکست $q_{12i}a_i$ اتفاق می‌افتند که با افزایش سن ماشین‌آلات این نرخ شکست نیز افزایش می‌یابد. زمانی که خرابی رخ می‌دهد، ماشین تحت تعمیر قرار می‌گیرد و به حالت عملیاتی برمی‌گردد. به‌منظور مقابله با ایجاد گلوگاه و زوال سیسـتم و عمردهـی مجـدد، انجام عملیات نگهداری و تعمیرات الزامی است. تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه سن ماشـین‌آلات را به حالت اولیه برمی‌گرداند؛ به‌طوری‌که سن ماشین صفر می‌شود.

نرخ خرابی $q_{21i} = q_{12i}a_i$ است که نشان می‌دهد تغییر حالت از حالت عملیـاتی‌بـودن بـه حالت خرابی ماشین به سن ماشین‌آلات بستگی دارد؛ همچنین تغییر حالت از حالت عملیاتی‌بودن به حالتی که ماشین تحت عملیات نگهداری و تعمیـرات پیشـگیرانه قـرار گیـرد، فقـط در زمـان عملیاتی‌بودن سیستم امکان‌پذیر است؛ یعنی $q_{23i} = 0$؛ درنتیجه بعد از انجام عملیات نگهـداری تعمیرات پیشگیرانه تبدیل به حالت ۲ یعنی خرابی ماشـین و انجـام عملیـات تعمیـرات اصـلاحی امکان‌پذیر نیست $q_{32i} = 0$.

معادلات مربوط به نرخ تولید. نرخ تولید هـر ماشـین بـا توجـه بـه عملیـاتی‌بـودن یـا تحـت تعمیربودن آن به‌صورت زیر مطرح می‌شود:

$$u_i(t) = \begin{cases} 0 & \text{اگر ماشین تحت تعمیر باشد} \\ [0, U_{max}] & \text{اگر ماشین در حال عملیات باشد} \end{cases} \quad (۳)$$

معادلات مربوط به حداکثر نرخ تولید. در این پژوهش، فرآیند تولید روبه‌جلو است و برگشت به عقب مجاز نیست که این مورد در فرمول ۴، بیان می‌شود. زمانی که ماشین تحت تعمیر باشد، یعنی $\xi_i(t) = 0$، تولید متوقف می‌شود و نرخ تولید برابر صفر است؛ اما در صورت سالم‌بودن ماشین، بسته به اینکه تقاضا موجود باشند یا انبار میانی مرحله بعدی ظرفیت انبارش داشته باشد یا نه، نرخ تولید بین صفر و حداکثر توان تولید ماشین، متغیر خواهد بود. هر ماشین دارای حداکثر نرخ تولید است که به‌صورت فرمول‌های ۵ و ۶، تعریف می‌شود که شرط پایایی سیستم و توانمندبودن آن در ارضای تقاضای ماشین‌های میانی و همچنین تقاضای محصول نهایی به‌حساب می‌آیند [۳۲].

$$l_{ij} = 0 \quad if \quad j < i \tag{۴}$$

$$u_i^{max}(t) > \sum l_{ij}\, u_j^{max} \tag{۵}$$

$$u_n^{max}(t) > d \tag{۶}$$

معادلات مربوط به سطح موجودی. معادلات مربوط به سطح موجودی محصولات میانی به‌صورت فرمول ۷ و محصول نهایی به‌صورت فرمول ۸، تعریف می‌شوند. فرمول ۹ نیز نشان‌دهنده میزان موجودی بازگشت‌داده‌شده به مرحله دوباره‌کاری است.

$$x_i(t) = \int (u_i(t) + u_{R_i}(t) - \sum_{j>i} l_{ij} u_i(t))\, dt \;, x_i(0) = x_i^0, 1 \le i < n \;, \quad x_i(t): integer \tag{۷}$$

$$x_n(\mathrm{t}) = \int u_n(t) + u_{R_n}(t) - d\big(x_n(t)\big) - P(t) \tag{۸}$$

$$x_R(t) = R_i - u_{R_i}(t) \tag{۹}$$

$$x_i(t) \ge 0 \tag{۱۰}$$

$$d\big(x_n(t)\big) = \begin{cases} d & x_n(t) \ge -K \\ 0 & \text{در غیر صورت این} \end{cases} \tag{۱۱}$$

محدودیت‌های مرتبط با سطح موجودی محصولات میانی و محصول نهایی در انبارها نیز به‌ترتیب به‌صورت معادلات زیر بیان می‌شوند [۳۲].

$$-K \le x_n(t) \le Z_{1n} \tag{۱۲}$$

$$0 \le x_i(t) \le Z_{1i} \qquad i \ne n \tag{۱۳}$$

معادله ۱۲، نشان می‌دهد که تنها تعداد K واحد کمبود از نوع پس‌افت مجاز است و تقاضای مازاد به‌صورت فروش ازدست‌رفته تلقی می‌شود. در مورد انبارهای میانی این مطلب صادق نیست.

تابع هدف مسئله که در ادامه آمده است، به‌گونه‌ای تعریف می‌شود که امید ریاضی مجموع هزینه‌های تولید، نگهداری، کمبود (پس‌افت و فروش ازدست‌رفته)، نگهداری و تعمیرات (اصلاحی و پیشگیرانه) دوباره‌کاری و فساد کالا در واحد زمان کمینه شود:

$$J(\alpha,u,x,p)=Min\left\{\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\,E\int_0^T\left[h_i\,x_i^+(t)+\hat{\pi}_i\,x_i^-(t)+\hat{\ell}_i\ell_i^-(t)+C_p\,P(t)+\sum_i^n C_iX_i+\sum_i^n CM_iS_{1i}+\sum_i^n PM_iS_{2i}+\sum_i^n h_{R_i}R_i\right]dt\mid \mathrm{X}(0)=\mathrm{X}_0,\ \zeta(0)=1\right\} \quad (۱۴)$$

$$x_i^-(t)=Max(-x_i(t),0) \quad (۱۵)$$

$$\ell_i^-(t)=Max(\text{lost sale},0) \quad (۱۶)$$

معادلات مربوط به سن ماشین‌آلات. در این سیستم، سن ماشین‌آلات به میزان تولید وابسته است و با افزایش تولید سن ماشین‌آلات با ضریب مشخصی افزایش می‌یابد که این مفهوم در فرمول ۱۷، بیان شده است.

$$\boldsymbol{a_i}(t)=ku_i(t) \quad (۱۷)$$

معادلات مربوط به سیاست کنترلی تولید. برنامه‌ریزی سیستم‌های تولیدی مستعد شکست از جمله سیستم‌های پیچیده است. ریشل[1] (۱۹۷۵)، نشان داد که جواب بهینه سیستم‌هایی ازاین‌دست حل زوج معادلات همیلتون ـ جاکوبی بلمن[2] است. در سیستم‌های پیچیده که امکان حل تحلیلی وجود ندارد، می‌توان از سیاست نقطه محدودکننده که در اجرا بسیار ساده و قابل‌درک است برای کمینه‌کردن تابع هدف مسئله استفاده کرد. سیاست کنترلی در این پژوهش به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$u_{i\neq n}(\mathrm{t})=\begin{cases}0 & x_i(t)>z_{1i}\\ u_i^{max} & x_i(t)+u_i^{max}<z_{1i}^*\\ [z_{1i}-x_i(t)] & Otherwise\end{cases} \quad (۱۸)$$

1 Rishel
2 Hamilton-Jacobi-Bellman

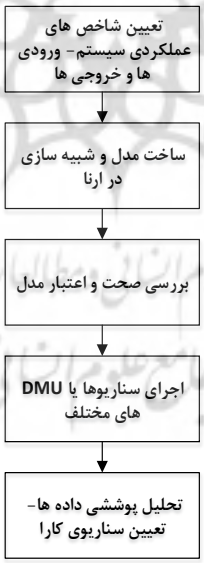
$$u_{i=n}(\mathrm{t}) = \begin{cases} 0 & x_i - d > z_{1i}^* \\ u_i^{max} & x_i + u_i^{max} + u_{rem}^{max} - d < z_{1i}^* \\ z_{1i} - (x_i - d) & Otherwise \end{cases} \quad (۱۹)$$

نرخ تولید هر ماشین به Z_{1i}^* وابسته است که به‌عنوان سطح آستانه موجودی هر انبار محسوب می‌شود؛ بنابراین به‌عنوان متغیر تصمیم تعریف می‌شود [۳۹].

متغیرهای تصمیم. در هر مرحله از تولید پنج نقطه کنترلی Z_{1i} ، Z_{2i}، Z_{pi} ، Z_{ti} و Z_b وجود دارد. Z_{1i} به این معنا است که اگر سطح موجودی ماشین iام به Z_1 برسد، سیستم با حداکثر توان تولید می‌کند. Z_{2i} به‌عنوان حداکثر ظرفیت انبار ماشین iام است. Z_{pi} نقطه کنترلی نگهداری تعمیرات است که اگر سطح موجودی ماشین iام به $\mathrm{Z_p}$ برسد و زمان بین دو تعمیر آن ماشین نیز به Z_t رسیده باشد، نگهداری تعمیرات پیشگیرانه انجام می‌شود که به لحاظ منطقی Z_1 باید زیر $\mathrm{Z_p}$ باشد. یک متغیر دیگر به نام Z_b نیز وجود دارد که نقطه کنترلی کمبود پس‌افت است. این Zها به‌عنوان متغیر تصمیم در مسئله هستند.

اهداف. هدف از انجام این پژوهش، کاهش میانگین مجموع هزینه‌های تولید، نگهداری، انجام نگهداری و تعمیرات اصلاحی، انجام نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، کمبود پس‌افت، کمبود از نوع فروش ازدست‌رفته، دوباره‌کاری‌ها، ضایعات و فساد کالا است.

الگوی مفهومی روند انجام پژوهش به‌صورت شکل ۳، است.



شکل ۲. الگوی مفهومی روند انجام پژوهش

در مطالعات صورت‌گرفته تاکنون، انتخاب بهترین سیاست نگهداری و تعمیرات بر مبنای قابلیت اطمینان و بهینه‌سازی تولید به‌صورت هم‌زمان با درنظرگرفتن ریسک‌های موجود با فرض‌های غیرپایداربودن کالاها، خرابی ماشین‌آلات، وجود سیستم‌های شبکه‌ای غیرقطعی و وجود محدودیت‌هایی از قبیل محدودیت ظرفیت انبار، محدودیت توان تولید توامان وجود ندارد و همین امر، وجه تمایز این پژوهش با پژوهش‌های قبلی است.

در این پژوهش، ابتدا در مورد سیستم‌های تولیدی شبکه‌ای غیرقطعی همراه با فرضیات آن به‌تفصیل بحث خواهد شد؛ سپس با درنظرگرفتن محدودیت‌ها و هدف مسئله، مدل شبیه‌سازی با نرم‌افزار ارنا انجام می‌گیرد. پس از آن با به‌کارگیری تحلیل پوششی داده‌ها کارایی مدل ارائه‌شده بررسی خواهد شد.

مدل‌سازی شبیه‌سازی. به‌علت پیچیدگی حل مسئله سیستم‌های مستعد شکست شبکه‌ای و نیز عدم‌قطعیت آن‌ها، شبیه‌سازی ابزار مناسبی برای حل این‌گونه مسائل است. در پژوهش حاضر، شبیه‌سازی سیستم مفروض با استفاده از نرم‌افزار ARENA 14.0 صورت گرفت. مراحل شبیه‌سازی سیستم مستعد شکست شبکه‌ای موردمطالعه در این پژوهش در قالب هشت مرحله مجزا بیان می‌شود.

تعریف متغیرها و پارامترهای مدل. در ابتدای مدل‌سازی شبیه‌سازی، پارامترها و متغیرهای مدل مفروض، تعیین می‌شوند. مقادیر متغیرهای تصمیم پنج نقطه کنترلی Z_{1i} ، Z_{2i} ، Z_{pi} ، Z_{ti} و Z_b ، قبل از شروع مدل‌سازی، تعریف و برای یک بار مقداردهی می‌شود. در طول اجرای شبیه‌سازی، با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی ممنوع، مقادیر آن‌ها تغییر می‌کند. متغیرهای دیگر مدل، اعم از کل هزینه نگهداری موجودی، کل هزینه کمبود، کل هزینه تولید و فساد کالا و غیره نیز تعریف می‌شوند که در طول اجرای شبیه‌سازی مقادیر آن‌ها تعیین می‌شود.

پارامترهای سیستم جزو پارامترهای سراسری مدل بوده و مقادیر آن‌ها در طول اجرای شبیه‌سازی با سناریوهای متفاوت، ثابت است. از جمله این پارامترها می‌توان نرخ تقاضای محصول نهایی، ضریب مصرف ماشین‌های میانی، هزینه‌ی نگهداری، کمبود، فساد و تولید به‌ازای هر واحد محصول در دوره، میزان موجودی اولیه انبار و غیره اشاره کرد.

شبیه‌سازی مدل به‌ازای هر ماشین در قالب سه مرحله انجام گرفته است که شامل شبیه‌سازی خط تولید، شبیه‌سازی نگهداری تعمیرات پیشگیرانه و شبیه‌سازی نگهداری و تعمیرات اصلاحی است که به‌ازای هر ماشین به‌طور جداگانه انجام شده است.

ورود قطعات. ورود هر نهاده به‌عنوان شروع یک فرآیند تولید در هر دوره شبیه‌سازی است. قطعات با نرخ ثابت u_i^{max} و برحسب دقیقه، وارد سیستم (هر ماشین) می‌شوند؛ بنابراین فاصله زمانی بین دو ورود[1] برابر با $\frac{1}{u_i^{max}}$ است.

$$Time\ Between\ Arrival = \frac{1}{u_i^{max}} \quad (۲۰)$$

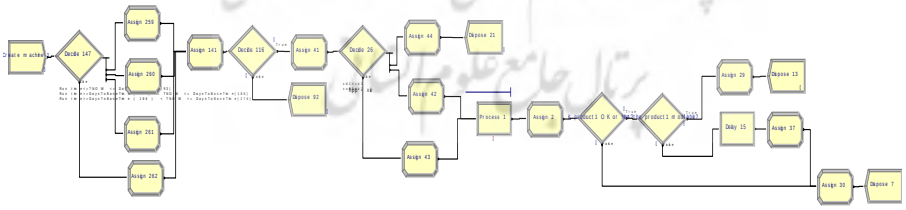
تولید محصولات میانی. بعد از تولید نهاده و ورود قطعات، ابتدا متغیرهای مدل تعریف می‌شود؛ سپس، حالت ماشین، موردبررسی قرار می‌گیرد. اگر ماشین تحت تعمیر اصلاحی یا پیشگیرانه باشد، تولید متوقف شده و قطعه از سیستم خارج می‌شود؛ در غیر این صورت، پیش از تولید محصول، سطح کلیه مواد موردنیاز دردسترس (میزان محصولات مرحله‌ی i که به‌منظور تولید یک واحد محصول j موردنیاز است)، چک می‌شود. درصورتی‌که میزان موجودی در دست به اندازه کافی نباشد، تولید متوقف می‌شود. در غیر این صورت فرآیند تولید ادامه می‌یابد. در این زمان، بر اساس سیاست کنترلی طبق فرمول ۱۸، ممکن است سه حالت رخ دهد:

۱. اگر میزان موجودی دردست در زمان t ($x_i(t)$)، بیشتر از ظرفیت انبار (Z_{1i}^*) باشد، فرایند تولید متوقف می‌شود و تولید صورت نمی‌گیرد.

۲. درصورتی‌که رابطه‌ی $x_i(t) + u_i^{max} < Z_{1i}^*$ برقرار باشد، تولید با حداکثر توان تولید انجام می‌شود؛

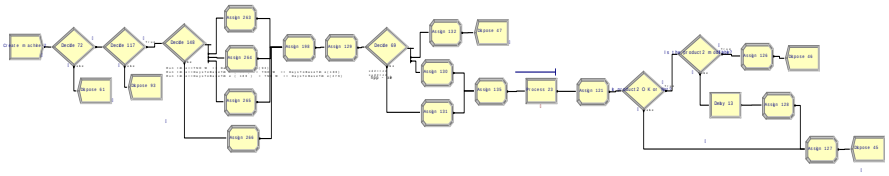
۳. در غیر این صورت با نرخ $[Z_{1i} - x_i(t)]$ تولید صورت می‌گیرد.

سپس فرایند تولید محصول انجام می‌شود. بدین صورت که ماشین، منبع موردنیاز را اختیار کرده و پس از مدتی تأخیر بابت تولید کالا، منبع آزاد می‌شود. نوع تأخیر، ثابت بوده و مدت‌زمان به‌کارگیری منبع برابر با عکس نرخ تولید و بر حسب دقیقه است که نشان‌دهنده فاصله میان تولید دو کالا است. بعد از تولید، یک واحد به موجودی انبار i، اضافه می‌شود. شکل‌های ۴ تا ۶ مدل شبیه‌سازی فرایند تولید محصولات میانی را نشان می‌دهند.

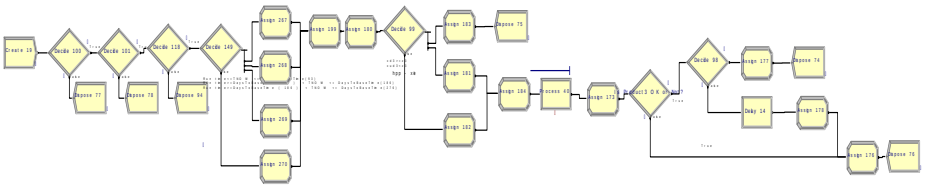


شکل ۳. مدل شبیه‌سازی ماشین اول

1. Time between Arrival



شکل ۴. مدل شبیه‌سازی ماشین دوم



شکل ۵. مدل شبیه‌سازی ماشین سوم

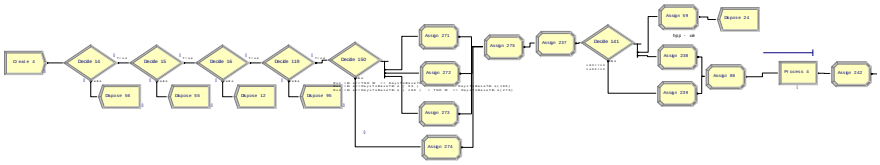
تولید محصول نهایی. روند تولید محصول نهایی، مشابه فرایند تولید محصولات میانی است؛ با این تفاوت که سیاست کنترلی مورداستفاده در آن طبق فرمول ۱۹، محاسبه می‌شود. بر این اساس، سه حالت زیر ممکن است رخ دهد:

۱. اگر میزان موجودی در دست در زمان t منهای تقاضا ($x_i(t) - d$)، بیشتر از ظرفیت انبار (Z_i^*) باشد، تولید صورت نمی‌گیرد؛

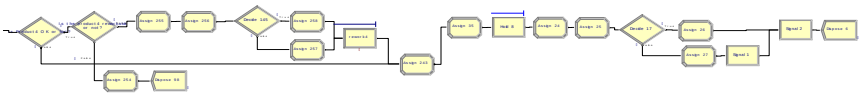
۲. درصورتی‌که رابطه $x_i(t) + u_i^{max} + u_{rem}^{max} - d < Z_{1i}^*$ برقرار باشد، تولید با حداکثر توان تولید انجام می‌شود؛

۳. در غیر این صورت با نرخ $[Z_{1i} - (x_i(t) - d)]$ فرایند تولید ادامه می‌یابد.

تفاوت دیگر این مرحله از تولید با تولید محصولات میانی این است که در آن فساد کالا نیز لحاظ می‌شود. بعد از تولید کالای نهایی، زمان ورود به انبار ثبت می‌شود. هنگامی‌که مشتری وارد سیستم شود، به‌منظور ارضای تقاضا، یک واحد محصول از انبار آزاد می‌شود. اگر کالای آزادشده، بیشتر از مدت تعیین‌شده در انبار مانده باشد، آن کالا جزو کالاهای فاسد در نظر گرفته می‌شود و دیگر قابل‌استفاده نخواهد بود؛ در غیر این صورت محصول تولیدشده، جزو کالاهای سالم است؛ سپس فاسد یا سالم بودن کالا بررسی می‌شود. شکل‌های ۷ و ۸، فرایند تولید محصول نهایی را نشان می‌دهند.



شکل ۶. مدل شبیه‌سازی ماشین چهارم (قسمت اول)



شکل ۷. مدل شبیه‌سازی ماشین چهارم (قسمت دوم)

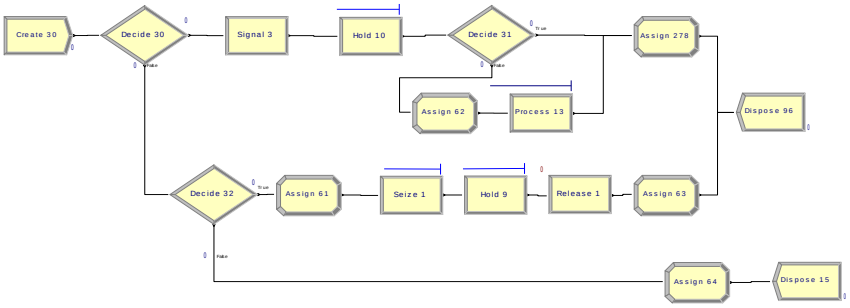
ورود مشتری و فرایند تأمین تقاضا و کمبود. الگوی ورود مشتریان برای دریافت کالای نهایی در این سیستم احتمالی است. وقتی مشتری وارد سیستم می‌شود، موجودی انبار چک می‌شود که در این قسمت دو حالت رخ می‌دهد:

۱. درصورتی‌که موجودی در انبار وجود داشته باشد، سیگنالی برای آزادکردن کالا به مرحله‌ی نهایی تولید فرستاده می‌شود. در این هنگام مشتری منتظر دریافت محصول می‌ماند؛ سپس کالا به مشتری تحویل داده می‌شود. اگر کالای تحویل‌شده، سالم باشد، مشتری سیستم را ترک می‌کند. در این زمان، یک واحد از کالای سالم و میزان موجودی انبار محصول نهایی کم می‌شود. اگر کالای تولیدشده فاسد باشد و به مشتری تحویل داده شود، مشتری دوباره در سیستم منتظر می‌ماند تا کالای سالم دریافت کند؛

۲. درصورتی‌که موجودی کافی در انبار نباشد، مشتریان منتظر تولید و دریافت کالا می‌مانند. اگر تعداد این مشتریان در صف بیشتر از k شود، مشتری جدید از ایستادن در صف، صرف‌نظر کرده و سیستم را ترک می‌کند.

نکته قابل‌توجه در شبیه‌سازی این قسمت از مدل، این است که مشتریانی که کالای فاسدشده دریافت کرده‌اند در صف مشتریانی قرار می‌گیرند که با کمبود کالا مواجه شده‌اند. هر دو نوع مشری در صف منتظر می‌مانند تا کالا تولید شود؛ سپس به ترتیب اولویت، کالای خود را دریافت و سیستم را ترک می‌کنند.

شکل ۹، فرایند تأمین تقاضا را نشان می‌دهد.

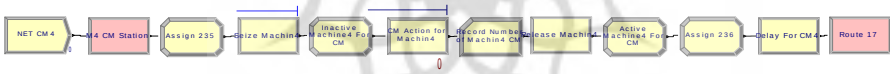


شکل ۸. فرایند تأمین تقاضا

اجرای سیاست نگهداری و تعمیرات. اهدافی که با اجرای سیاست نگهداری و تعمیرات دنبال می‌شود و نشان از اهمیت برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات است، عبارت‌اند از:

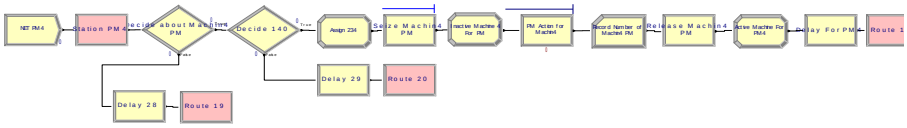
- ارتقای سطح بهره‌وری؛
- رفع گلوگاه‌های ناشی از خرابی ماشین‌آلات؛
- بهبود کیفیت عملیاتی سیستم؛
- بهبود کیفیت محصول و یا خدمات.

در این سیستم خرابی ماشین‌آلات به سن ماشین‌آلات و میزان تولید آن وابسته است. بر همین اساس با گذشت زمان تعداد دفعات خرابی‌های تصادفی افزایش یافته و نگهداری تعمیرات اصلاحی نیز افزایش می‌یابد. در زمان خرابی ماشین‌آلات تولید متوقف شده و عملیات تعمیرات اصلاحی با دراختیارگرفتن ماشین آغاز می‌شود. شبیه‌سازی عملیات نگهداری تعمیرات اصلاحی برای تمامی ماشین‌آلات یکسان و به‌صورت شکل ۱۰، است.



شکل ۹. فرایند انجام نگهداری و تعمیرات اصلاحی

برنامه‌ریزی برای انجام نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در فواصل زمانی مشخص یکی از اهداف این مسئله است. اگر ماشین در حال انجام نگهداری و تعمیرات اصلاحی باشد، این موجودیت از سیستم خارج می‌شود؛ به این معنا که نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه صورت نمی‌گیرد. در غیر این صورت با دراختیارقرارگرفتن ماشین موردنظر عملیات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه انجام می‌شود و تا زمان مشخص بعدی منتظر انجام عملیات است. با انجام عملیات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، عمر ماشین‌آلات به صفر بازگردانده می‌شود که دستگاه یا ماشین را به حالت صفر کارخانه برمی‌گرداند. شکل ۱۱، نشان‌دهنده اعمال نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه است.



شکل ۱۰. فرایند اعمال نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه

آزمایش صحت مدل. در این قسمت از پژوهش، آزمایش صحت و اعتبار مدل موردمطالعه که یکی از مهم‌ترین اقدامات در مدل‌سازی و شبیه‌سازی است، صورت می‌گیرد.

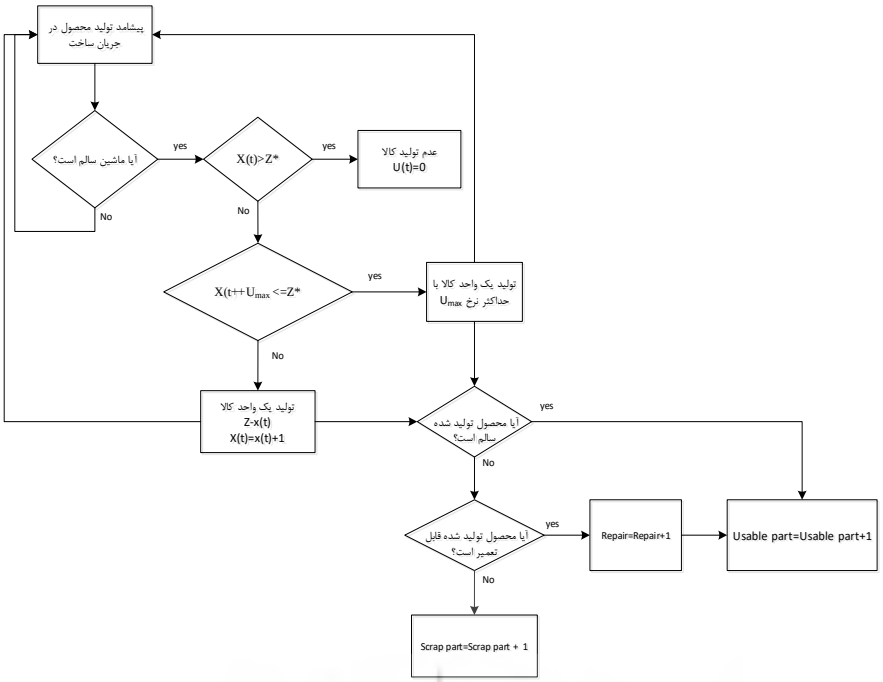
منظور از تعیین صحت مدل این است که مدل شبیه‌سازی رایانه‌ای با مدل ذهنی مقایسه شود. در اینجا سؤال‌هایی مطرح می‌شود که پاسخ به آن‌ها، صحت یا عدم‌صحت مدل را نشان می‌دهد:

۱. آیا مدل به‌درستی در قالب کد کامپیوتری تعریف شده است؟

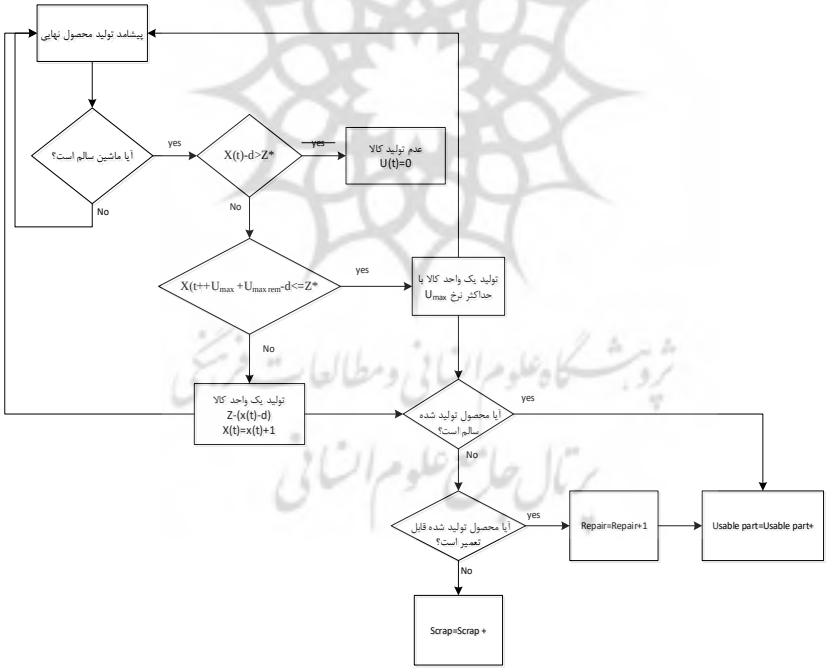
۲. آیا کد رایانه‌ای ساختار منطقی مدل و پارامترهای ورودی آن را به‌طور صحیح معرفی می‌کند؟

به این منظور از نمودارهای جریان برای هر پیشامد که کلیه اقدامات و مراحل لازم را نشان می‌دهد، استفاده شده است. این نمودارها منطبق با آنچه در بخش قبل آمده است، ترسیم می‌شود. این نمودارها عبارت‌اند از: نمودار پیشامد تولید محصول در جریان ساخت؛ پیشامد تولید محصول نهایی؛ پیشامد شکست و خرابی ماشین‌آلات؛ پیشامد انجام نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه؛ پیشامد ورود مشتری و پیشامد فساد کالا.

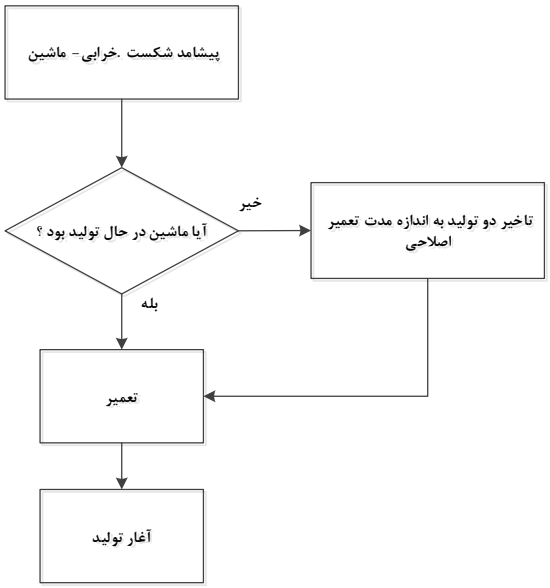
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی



شکل ۱۱. نمودار جریان تولید محصول در جریان ساخت

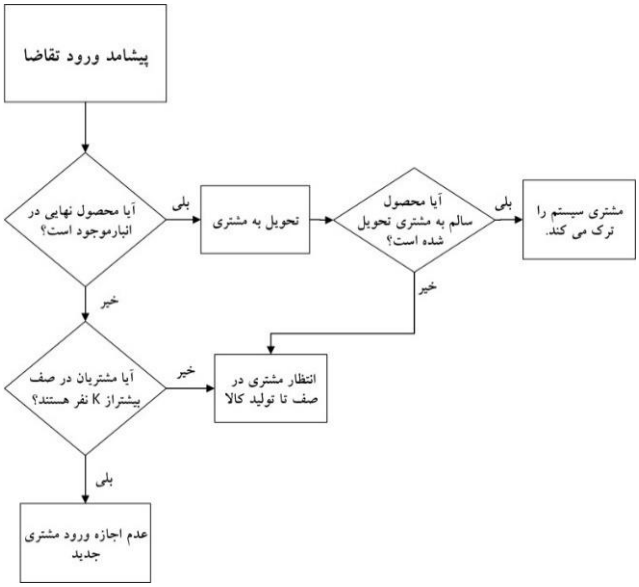


شکل ۱۲. نمودار جریان تولید محصول نهایی

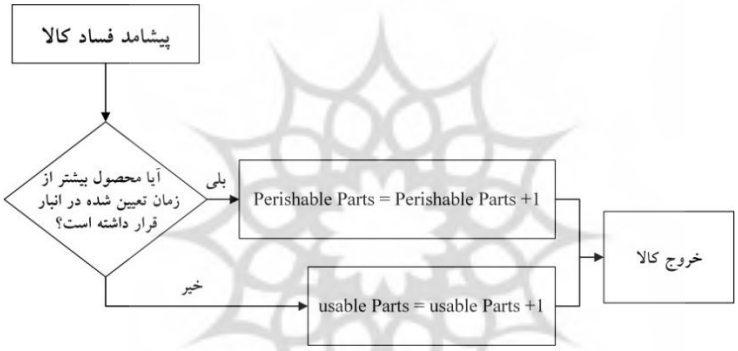


شکل ۱۳. نمودار جریان شکست (خرابی) ماشین‌آلات

شکل ۱۴. نمودار نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه



شکل ۱۵. نمودار جریان ورود مشتری



شکل ۱۶. پیشامد فساد کالا

منطقی‌بودن مدل با استفاده از پارامترهای ورودی مختلف، بررسی و مسیر حرکت نهاده‌ها به‌دقت در نظر گرفته شده است. در پایان شبیه‌سازی نیز تمام پارامترهای ورودی بررسی شده است تا تغییری در پارامترها رخ نداده باشد. به‌علاوه در حین اجرای مدل، فرمول‌های مطرح‌شده در این فصل، اعم از بررسی نرخ تولید انجام شده است تا نهاده‌ها، مسیر اشتباه را طی نکنند.

تعیین اعتبار مدل. تعیین اعتبار مدل شبیه‌سازی، به علت اتخاذ تصمیم از نتایج مدل، بسیار حائز اهمیت است. منظور از تعیین اعتبار مدل، فرآیند کلی مقایسه رفتار مدل شبیه‌سازی‌شده با رفتار سیستم واقعی است. تطبیق مدل با سیستم واقعی ناظر بر مقایسه مکرر آن با سیستم واقعی

و انجام اصلاحات در آن است. به‌منظور مقایسه مدل با واقعیت از آزمون‌های متنوعی استفاده می‌شود که برخی ذهنی و برخی دیگر عینی هستند. در آزمون‌های ذهنی، افرادی که با یک یا چند جنبه عملکرد سیستم آشنایی کافی دارند، در مورد ورودی و خروجی آن داوری می‌کنند. آزمون‌های عینی، نیازمند داده‌های مربوط به رفتار سیستم و داده‌های متناظر فراهم‌شده از به‌کارگیری مدل هستند [۱۷].

در زمینه فرآیند تعیین اعتبار مدل، نیلور و فینگر[1] (۱۹۶۷)، روشی مشتمل بر سه گام را پیشنهاد کرده‌اند که درعمل مورداستفاده فراوان قرار گرفته است [۲۶]. این روش به شرح زیر است:

ـ گام نخست: طراحی مدل صوری. نخستین هدف طراح مدل شبیه‌سازی، این است که مدل ساخته‌شده از لحاظ ظاهری در چشم آگاهان و استفاده‌کنندگان از آن منطقی جلوه کند. به این منظور از تحلیل حساسیت استفاده می‌شود. برای مثال، اگر نرخ ورود مشتری به سیستم را تغییر داده شود، انتظار می‌رود که طول صف نیز تغییر کند. در این مدل می‌توان تحلیل حساسیت‌های دیگری را نیز به‌کار برد. برای مثال، تغییر در ضرایب مصرف هر ماشین و میزان موجودی اولیه در انبار می‌تواند موجب تغییر در هزینه‌های کلی شود. این تغییرات صوری در مدل، با افزایش نرخ ورود مشتری انجام شده است که نشان می‌دهد طول صف کاهش می‌یابد؛ همچنین تغییر در ضریب مصرف در تغییر هزینه‌های کلی نقش بسیاری دارد.

ـ گام دوم: تعیین اعتبار فرض‌های مدل. فرض‌های مدل به دو رده کلی تقسیم می‌شوند: فرض‌های ساختاری و فرض‌های مربوط به داده‌ها. فرض‌های ساختاری به بررسی مسائل عملکرد سیستم مربوط می‌شوند و معمولاً با ساده‌سازی و تجرید واقعیت سروکار دارند. برای مثال، در این مدل فرض شده است مشتریانی که کالای فاسد دریافت می‌کنند در اولویت صف مشتریانی قرار بگیرند که سفارش عقب‌افتاده دارند؛ همچنین آن‌ها یک صف تشکیل دهند. این فرآیند با مشاهده عملی در مورد خط‌مشی سازمان بررسی می‌شود. فرض‌های مربوط به داده‌ها باید بر پایه گردآوری مطمئن و تحلیل آماری آن‌ها، به طریق صحیح استوار باشد. درصورتی‌که جمع‌آوری داده‌ها مربوط به یک سیستم واقعی بود، میزان اعتمادپذیری داده‌ها از طریق مشورت با مدیران سیستم و به‌کارگیری آزمون‌های آماری عینی به‌منظور همگنی داده‌ها درجه اعتمادپذیری آن‌ها را افزایش می‌دهد. در شبیه‌سازی به کمک ارنا، فرض‌های مربوط به شکست ماشین‌آلات و همچنین ایجاد یک صف مشترک برای مشتریان با استفاده از دیتا ماژول‌ها و ماژول‌های اصلی امکان‌پذیر است. در این پژوهش، تمامی فرض‌های سیستم مفروض از زبان ریاضی به زبان شبیه‌سازی ارنا تبدیل شده است.

1. Neylor & Finger

ـ گام سوم: تعیین اعتبار تبدیل‌های ورودی بـه خروجـی مـدل. آزمـون مـدل نهـایی و درحقیقت تنها آزمون عینی آن به‌طورکلی، تعیین این مطلب است که اگـر ورودی‌هـای مـدل بـا داده‌های واقعی تطبیق کند و اگر خطمشی به‌کارگرفته‌شده در اجرای مدل نیز با عملکرد سیسـتم هماهنگ باشد، آیا مدل، توانایی پیش‌بینی رفتار آتی سیستم واقعی را دارد یاخیر؟ در این پژوهش، خروجی مدل شبیه‌سازی با به‌کارگیری ورودی‌های تعیین‌شده به‌طور دستی محاسبه شده و رفتـار سیستم شبیه‌سازی‌شده با توجه به این خروجی‌ها بررسی شده است. نتایج نشان داد که پاسخ‌های به‌دست‌آمده با پاسخ‌های مدل شبیه‌سازی‌شده تطابق دارد.

تعیین اعتبار مدل به روش آماری. برای تعیین اعتبار مدل به روش آمـاری، بـا درنظـرگـرفتن افزایش در سه متغیر اعم از زمان نگهداری و تعمیـرات، میـزان کمبـود مجـاز و سـطح انبارهـا و مقایسه هزینه‌های به‌دست‌آمده از طریق مدل شبیه‌سازی، از تحلیل t زوجی استفاده شده است تا مشخص شود که آیا با سطح اطمینان ۹۵ درصد، تغییـر در متغیرهـا، موجـب تغییـر معنـاداری در هزینه‌ها می‌شود یا خیر؟

جدول ۲، نتایج افزایش در هر یک از سه متغیر بالا را نشان می‌دهد.

جدول ۲. جدول هزینه‌های کل (خروجی) مدل شبیه‌سازی

تکرار شبیه‌سازی	مدل اصلی	مدل ۱ (افزایش زمان نت)	مدل ۲ (افزایش کمبود پس‌افت)	مدل ۳ (افزایش Z_i)
۱	۱,۱۵۴,۶۹۱	۱,۲۶۷,۷۳۱	۱,۱۹۶,۹۱۰	۱,۲۰۳,۷۸۹
۲	۱,۱۵۴,۱۴۷	۱,۲۶۹,۱۳۶	۱,۲۹۴,۳۲۹	۱,۲۹۱,۶۴۸
۳	۱,۲۵۸,۴۵۰	۱,۲۶۹,۵۸۹	۱,۲۸۳,۸۸۲	۱,۲۷۶,۷۶۳
۴	۱,۲۰۷,۱۶۰	۱,۲۱۳,۳۰۴	۱,۳۶۵,۳۳۲	۱,۲۳۵,۹۰۰
۵	۱,۲۱۱,۰۲۵	۱,۲۵۱,۹۲۰	۱,۲۳۱,۱۹۵	۱,۲۹۶,۴۴۴

پیش از انجام آزمون t زوجی، آزمون F برای بررسی عدم‌اختلاف معنـادار واریانس‌هـا انجـام شده است.

$$\begin{cases} H_0: \sigma_1 = \sigma_2 \\ H_1: \sigma_1 \neq \sigma_2 \end{cases}$$

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

جدول ۳. آزمون F برای بررسی برابری واریانس‌ها با افزایش زمان نگهداری تعمیرات ماشین‌ها و مدل پایه

	مدل پایه	مدل ۱ (افزایش زمان نت)
Mean	۱,۱۹۷,۰۹۵	۱,۲۵۴,۳۳۶
Variance	۱,۹۲۵,۶۰۳,۲۵۰	۵۸۰,۱۳۷,۱۰۸
Observations	۵	۵
df	۴	۴
F	۳/۳۲	
P(F<=f) one-tail	۰/۱۴	
F Critical one-tail	۶/۳۹	

با توجه به نتـایج جـدول ۳، چـون $P(F <= f)one - tail > P - value = ۰/۰۵$ است لذا فرض برابری واریانس‌ها پذیرفته می‌شود و دلیلی برای رد آن نیست.

جهت بررسی تفاوت هزینه‌های کل در مدل پایه با افزایش زمان نگهداری و تعمیرات پیشـگیرانه از آزمون t زوجی استفاده می‌شود:

$$\begin{cases} H_0: \mu_1 = \mu_2 \\ H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \end{cases}$$

جدول ۴. آزمون t زوجی برای بررسی تفاوت افزایش زمان نگهداری و تعمیرات و مدل پایه

	مدل پایه	مدل ۱ (افزایش زمان نت)
Mean	۱,۱۹۷,۰۹۵	۱,۲۵۴,۳۳۶
Variance	۱,۹۲۵,۶۰۳,۲۵۰	۵۸۰,۱۳۷,۱۰۸
Observations	۵	۵
Pearson Correlation	-۰/۱۷	
Hypothesized Mean Difference	۰/۰۰	
Df	۴/۰۰	
t Stat	-۲/۳۹	
P(T<=t) one-tail	۰/۰۴	
t Critical one-tail	۲/۱۳	

با توجه به نتـایج جـدول ۴، چـون $P(T <= t)one - tail < P - value = 0.05$، می‌توان گفت اختلاف معناداری بین هزینه‌های افزایش زمان نگهداری و تعمیـرات و مـدل پایـه وجود دارد؛ بنابراین فرض برابری میانگین‌ها رد می‌شود.

همانند تحلیل‌های جداول ۳ و ۴، جدول‌های آزمون F، برای مقایسه واریانس هزینه‌های کل در مدل با افزایش کمبود پس‌افت در ماشین نهایی و مدل پایه و نیز آزمون t زوجی برای مقایسه میانگین‌های آن‌ها انجام شده است. نتایج در جداول به‌صورت زیر آورده شده است:
آزمون F برای بررسی عدم‌اختلاف معنادار واریانس‌ها انجام شده است.

$$\begin{cases} H_0: \sigma_1 = \sigma_2 \\ H_1: \sigma_1 \neq \sigma_2 \end{cases}$$

جدول ۵. آزمون F برای بررسی برابری واریانس‌ها با افزایش کمبود مجاز ماشین نهایی و مدل پایه

	مدل پایه	مدل ۲ (افزایش زمان کمبود پس‌افت)
Mean	۱,۱۹۷,۰۹۵	۱,۲۷۴,۳۲۹
Variance	۱۹۲۵۶۰۳۲۵۰	۴,۱۵۶,۷۸۹,۱۶۱
Observations	۵	۵
Df	۴	۴
F	۰/۴۶	
P(F<=f) one-tail	۰/۲۴	
F Critical one-tail	۰/۱۶	

با توجه به نتایج جدول ۵، چون $P(F <= f) one - tail > P - value = 0/05$ است، فرض برابری واریانس‌ها پذیرفته می‌شود و دلیلی برای رد آن وجود ندارد.
برای بررسی تفاوت هزینه‌های کل در مدل پایه با افزایش کمبود پس‌افت مجاز در ماشین نهایی از آزمون t زوجی استفاده می‌شود:

$$\begin{cases} H_0: \mu_1 = \mu_2 \\ H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \end{cases}$$

جدول ۶. آزمون t زوجی برای بررسی تفاوت افزایش کمبود مجاز ماشین نهایی و مدل پایه

	مدل پایه	مدل ۲ (افزایش زمان کمبود پس‌افت)
Mean	۱,۱۹۷,۰۹۵	۱,۲۷۴,۳۲۹
Variance	۱,۹۲۵,۶۰۳,۲۵۰	۴,۱۵۶,۷۸۹,۱۶۱
Observations	۵	۵
Pearson Correlation	۰/۲۹	
Hypothesized Mean Difference	۰	
Df	۴	
t Stat	-۲/۶۰	
P(T<=t) one-tail	۰/۰۳	
t Critical one-tail	۲/۱۳	

با توجه به نتـایج جـدول ۶، چـون $P(T <= t)one - tail < P - value = 0.05$ ، می‌توان گفت اختلاف معناداری بین هزینه‌های افزایش کمبود پس‌افت مجاز و مدل پایـه وجـود دارد؛ بنابراین فرض برابری میانگین‌ها رد می‌شود.

آزمون F نیز برای بررسی عدم‌اختلاف معنـادار واریانس‌هـای هزینـه کـل افـزایش سـطح انبـار ماشین‌ها و مدل پایه انجام شده است.

$$\begin{cases} H_0: \sigma_1 = \sigma_2 \\ H_1: \sigma_1 \neq \sigma_2 \end{cases}$$

جدول ۷. آزمون F برای بررسی برابری واریانس‌ها با افزایش سطح انبار ماشین‌ها و مدل پایه

	مدل پایه	مدل ۳ (افزایش Zi)
Mean	۱,۱۹۷,۰۹۵	۱,۲۶۰,۹۰۹
Variance	۱,۹۲۵,۶۰۳,۲۵۰	۱,۵۸۶,۸۰۵,۳۷۸
Observations	۵	۵
Df	۴	۴
F	۱/۲۱	
P(F<=f) one-tail	۰/۴۳	
F Critical one-tail	۶/۳۹	

با توجه به نتـایج جـدول ۷، چـون $P(F <= f)one - tail > P - value = 0.05$ است، فرض برابری واریانس‌ها پذیرفته می‌شود و دلیلی برای رد آن وجود ندارد.

جهت بررسی تفاوت هزینه‌های کل در مدل پایه با افزایش کمبود پس‌افت مجاز در ماشین نهایی از آزمون t زوجی استفاده می‌شود:

$$\begin{cases} H_0: \mu_1 = \mu_2 \\ H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \end{cases}$$

جدول ۸. آزمون t زوجی برای بررسی تفاوت افزایش سطح انبار ماشین‌ها و مدل پایه

	مدل پایه	مدل ۳ (افزایش Zi)
Mean	۱,۱۹۷,۰۹۵	۱,۲۶۰,۹۰۹
Variance	۱,۹۲۵,۶۰۳,۲۵۰	۱,۵۸۶,۸۰۵,۳۷۸
Observations	۵	۵
Pearson Correlation	۰/۳۳	
Hypothesized Mean Difference	۰	
Df	۴	
t Stat	−۲/۹۴	
P(T<=t) one-tail	۰/۰۲	
t Critical one-tail	۱۳/۲	

با توجه به نتـایج جـدول ۸، چـون $P(T <= t)one - tail < P - value = 0.05$، می‌توان گفت اختلاف معناداری بین هزینه‌های افزایش سطح انبار ماشین‌ها و مـدل پایـه وجـود دارد؛ بنابراین فرض برابری میانگین‌ها رد می‌شود.

محاسبه هزینه‌های سیستم. به‌منظور محاسبه هزینه‌های سیستم، اعـم از هزینـه‌های تولیـد، نگهداری، کمبود (از نوع پس‌افت و فروش ازدست‌رفته)، فساد، دوباره‌کاری و ضایعات و همچنـین هزینه‌های انجام نگهداری و تعمیرات به‌ازای تعداد دفعات انجام نگهـداری تعمیـرات اصـلاحی و پیشگیرانه به تفکیک محاسبه می‌شود. در ادامه، نحوه محاسبه هزینه کل هر یک از مـوارد بـالا، بیان خواهد شد و درنهایت محاسبه هزینه کل سیستم کـه بـه‌عنوان تـابع هـدف مسـئله اسـت، موردبررسی قرار می‌گیرد.

محاسبه هزینه تولید. تعریف هزینه تولید بدین صورت است: زمانی کـه یـک واحـد کـالای i، تولید می‌شود، هزینه آن به هزینه کل تولید محصول i اضافه می‌شـود؛ سـپس کـل هزینـه‌های تولید با یکدیگر جمع شده و میانگین زمانی[1] آن محاسبه می‌شود.

$$Production\ cost\ i\ =\ Production\ cost\ i\ +\ unit\ production\ cost\ i \quad (۲۱)$$

$$Total\ Production\ Cost = \sum_{i=1}^{n} (Production\ cost\ i) \quad (۲۲)$$

محاسبه هزینه‌ی نگهداری. هزینه کل نگهداری محصول i، به این صورت محاسـبه می‌شـود که در هر زمان، هزینه نگهداری هر واحـد محصـول در حـداکثر میـزان موجـودی انبـار ضـرب می‌شود؛ سپس هزینه نگهداری محصول هر فرایند، با یکدیگر جمع شده و میانگین آن در طـول دوره شبیه‌سازی محاسبه می‌شود.

$$Total\ Holding\ Cost = \sum_{i=1}^{n} [unit\ holdig\ cost\ i\ \times MX(X_i(t), 0)] \quad (۲۳)$$

محاسبه هزینه‌ی کمبود و فساد. هزینه فساد کالا و کمبود که شامل هزینه‌ی کمبود پس‌افـت و فروش ازدست‌رفته است، مشابه هزینه نگهداری محاسبه و به‌ترتیب به‌صورت فرمول‌هـای زیـر بیان می‌شود:

1. Time Persistent

$$Total\ Perishable\ Cost = \sum_{i=1}^{n} [unit\ perishable\ cost\ i \times MX(perishable\ parts, 0)] \quad (۲۴)$$

$$Total\ Backlog\ Cost = \sum_{i=1}^{n} [unit\ backlog\ cost\ i \times MX(backlog, 0)] \quad (۲۵)$$

$$Total\ Lost\ sale\ Cost = \sum_{i=1}^{n} [unit\ lost\ sale\ cost\ i \times MX(lost\ sale, 0)] \quad (۲۶)$$

محاسبه هزینه‌های دوباره‌کاری و ضایعات. تعریف هزینه دوباره‌کاری و ضایعات بدین‌صورت است: زمانی که یک واحد کالای i به مرحله دوباره‌کاری می‌رسد یا جزو ضایعات محسوب می‌شود، هزینه آن، به هزینه‌ی کل دوباره‌کاری و ضایعات محصول i اضافه می‌گردد؛ سپس کل هزینه‌های دوباره‌کاری و ضایعات به‌صورت جداگانه با یکدیگر جمع شده و میانگین زمانی[1] آن محاسبه می‌شود.

$$Rework\ cost\ i = Rework\ cost\ i + unit\ Rework\ cost\ i \quad (۲۷)$$

$$Total\ Rework\ Cost = \sum_{i=1}^{n} (Rework\ cost\ i) \quad (۲۸)$$

$$Scrap\ cost\ i = Scrap\ cost\ i + unit\ Scrap\ cost\ i \quad (۲۹)$$

$$Total\ Scrap\ Cost = \sum_{i=1}^{n} (Scrap\ cost\ i) \quad (۳۰)$$

محاسبه هزینه‌های نگهداری و تعمیرات اصلاحی و پیشگیرانه. هزینه نگهداری و تعمیرات اصلاحی و پیشگیرانه به تعداد دفعات انجام عملیات نگهداری و تعمیرات از هر دو نوع اصلاحی و پیشگیرانه وابسته است. بدین صورت که هزینه انجام نگهداری و تعمیرات به‌ازای هر بار خرابی برای انجام نگهداری و تعمیرات اصلاحی و یا توقف ماشین به‌منظور انجام نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه محاسبه و در پایان میانگین زمانی آن محاسبه می‌شود.

$$Total\ Corrective\ Maintenance\ Cost = \sum_{i=1}^{n} [unit\ Corrective\ maintenance\ cost\ i \times MX(Number\ of\ Corrective\ maintenance, 0)] \quad (۳۱)$$

1. Time Persistent

$$Total\ Priventive\ Maintenance\ Cost = \sum_{i=1}^{n}[unit\ Priventive\ maintenance\ cost\ i \times MX(Number\ of\ Priventive\ maintenance, 0)] \quad (۳۲)$$

محاسبه هزینه‌های کلی سیستم. به‌منظور محاسبه هزینه تمام‌شده سیستم، با استفاده از دیتا ماژول Statistic، میانگین هزینه‌های تولید، نگهداری، کمبود و فساد، دوباره‌کاری و ضایعات، تعمیر و نگهداری اصلاحی و پیشگیرانه در طول دوره محاسبه شده و با یکدیگر جمع می‌شوند. فرمول ۳۳، نحوه محاسبه هزینه کلی سیستم را در نرم‌افزار ارنا نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned} average\ total\ cost &= (Total\ Production\ cost) + (Total\ backlog\ cost) \\ &+ (Total\ holding\ cost) + (Total\ lost\ sale\ cost) \\ &+ (Total\ perishable\ Cost) + (Total\ Rework\ Cost) \\ &+ (Total\ Scrap\ Cost) \\ &+ (Total\ Corrective\ Maintenance\ Cost) \\ &+ (Total\ Priventive\ Maintenance\ Cost) \end{aligned} \quad (۳۳)$$

تعیین تعداد تکرارها و اجرای شبیه‌سازی. تعیین تعداد تکرارها و مدت‌زمان اجرای مناسب، به‌منظور انجام تجزیه‌وتحلیل بر روی خروجی‌های مدل، امری ضروری است. به‌منظور تعیین تعداد تکرارهای شبیه‌سازی از شاخص ضریب تغییرات استفاده می‌شود که نسبت انحراف معیار به میانگین داده‌ها را نشان می‌دهد.

$$n \geq \left[2t_{\frac{\alpha}{2};n-1}\frac{C.V}{L}\right]^2 \quad (۳۴)$$

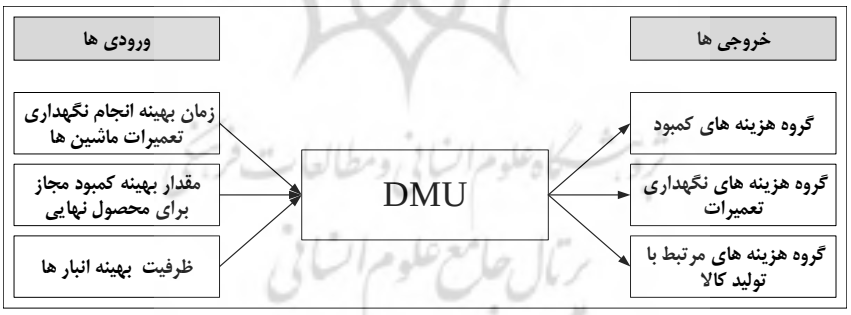
بنابراین مقدار n باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که رابطه‌ی بالا برقرار باشد [۱۳]. درصورتی‌که فاصله اطمینان نسبی ۲۳ درصد مدنظر باشد، با احتمال ارتکاب خطای نوع اول، یعنی $\alpha = 0.05$، حداقل تکرارهای موردنیاز ۵ است؛ بدین معنا که هر سناریو، ۵ بار تکرار می‌شود. در این مثال، با توجه به تعداد تکرارها، برآورد ضریب تغییرات حدود ۱۲ درصد است. یادآوری این نکته لازم است که در مثال عددی بالا، در رابطه با تعیین پارامترهای سیستم، بالانس خط در نظر گرفته شده است. چون در شبیه‌سازی این سیستم از ۵ تکرار مستقل و هم‌توزیع[1] (IID) برای اجرای هر سناریو در مدل استفاده شده است، هم سیستم و هم آماره‌ها مقداردهی اولیه می‌شوند؛

1. Identical Independent Distributed

بنابراین هر تکرار با سیستم خالی در زمان صفر شروع می‌شود و پس از ۳۶۵ روز خاتمه می‌یابد. مولد اعداد تصادفی باعث می‌شود که مقادیر تولیدشده در تکرارها مستقل و هم‌توزیع باشند.

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

پس از شبیه‌سازی سیستم به صورتی که در قسمت قبل مطرح شد، نتایج توسط DEA تحلیل می‌شود. دلیل به‌کارگیری تحلیل پوششی داده‌ها این است که هر سناریو می‌تواند یک تابع هدف مجزا تولید کند؛ بنابراین برای تعیین کارایی هر یک از سناریوها و تصمیم‌گیری در مورد سناریوی بهینه از این ابزار بهره گرفته شده است. DEA با بهره‌گیری از تکنیک برنامه‌ریزی خطی و بهینه‌سازی، برای تعیین کارایی هر واحد استفاده و به‌منظور هدف‌گذاری در افزایش کارایی برای هر یک از واحدها، یک مجموعه مرجع برای واحد ناکارا تعیین و کارایی واحدهای مختلف را نسبت به مرز کارایی مقایسه می‌کند. در این پژوهش، با توجه به هدف مسئله و متغیرهای تصمیم در مسئله سیستم تولیدی موردمطالعه، ۹ متغیر تصمیم مسئله، اعم از زمان انجام نگهداری تعمیرات پیشگیرانه ماشین اول تا چهارم، میزان کمبود محصول نهایی و ظرفیت انبار ماشین اول تا چهارم به‌عنوان ورودی‌های مسئله و ۳ خروجی تابع هدف مسئله شامل سه نوع هزینه (مجموع هزینه‌های کمبود از هر دو نوع پس‌افت و فروش ازدست‌رفته، مجموع هزینه‌های نگهداری تعمیرات اصلاحی و پیشگیرانه و مجموع هزینه‌های مرتبط با کالای تولیدشده) بررسی شدند. DMUها یا هر واحد تصمیم‌گیری (هر یک از سناریوها) ترکیبی از حالت‌های مختلف ورودی‌ها است که با واردشدن آن‌ها به مدل و پردازش آن‌ها خروجی‌های منحصربه‌فردی تولید خواهد شد که با هم مقایسه می‌شوند. این ورودی‌ها با درصد مشخصی به نسبت، تغییر داده شده و خروجی مدل بررسی می‌شود.



شکل ۱۷. شماتیک فرایند تعیین کارایی مدل

برای تعیین رابطه عددی بین تعداد DMUها و تعداد ورودی‌ها و خروجی‌ها از رابطه زیر استفاده می‌شود [۱۷]:

اگر تعداد ورودی‌ها m و تعداد خروجی‌ها s در نظر گرفته شود، حداقل تعداد DMU موردنیاز برای محاسبه کارایی به‌صورت زیر است:

$$n \geq Max\{3(m+s), m \times s\} \quad (۳۵)$$

در این پژوهش با فرض درنظرگرفتن ۹ ورودی و ۳ خروجی، حداقل DMU موردنیاز برای تعیین کارایی ۳۶ است که به‌دلیل بالابردن دقت محاسبه، تعداد ۶۹ واحد تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده است. نوع مدل پوششی به‌کار رفته در این پژوهش، بازده به مقیاس متغیر و بر اساس مدل CCR و رویکرد ورودی‌محور است. اگر کارایی واحدی برابر ۱ باشد، کارایی قوی است؛ در غیر این صورت واحدهایی با کارایی کمتر از ۱ ناکارا هستند. بر اساس رتبه‌بندی صورت‌گرفته، نخستین رتبه به سناریوی شماره ۳ و آخرین رتبه به سناریوی ۶۹ اختصاص یافته است.

در هر برنامه‌ریزی خطی DEA، روش حل در پی حداکثرکردن کارایی واحد هدف است. این رویه جست‌وجو هنگامی که کارایی واحد هدف یا دست‌کم یکی دیگر از واحدها معادل یک شد، متوقف می‌شود؛ بنابراین برای هر واحد ناکارا، حداقل یک واحد دیگر وجود دارد که با همان وزن‌های واحد هدف به‌دست‌آمده از حل مدل، دارای کارایی یک است. به این واحدهای کارآمد، گروه مرجع واحد ناکارا گفته می‌شود. با استفاده از مقدار کارایی نسبی می‌توان به ایجاد واحد مجازی برای واحدهای ناکارا اقدام کرد و بر اساس آن راهکارهایی برای بهبود کارایی این واحدها ارائه کرد. نرم‌افزار DEA FRONTIER برای تجزیه‌وتحلیل داده‌ها مورداستفاده قرار گرفته است. مقدار کارایی و گروه مرجع با توجه به مدل تعریف‌شده در جدول ۹، مشاهده می‌شود.

جدول ۹. جدول کارایی

شماره DMU	کارایی	مرجع	شماره DMU	کارایی	مرجع
۱	۱	۱	۱۳	۰/۹۹۵۵۶۴	۱,۱۶,۴۰,۵۵
۲	۰/۹۹۰۴۹۳	۱,۹,۲۸	۱۴	۰/۹۸۳۲۱	۵,۱۶,۵۸
۳	۱	۳	۱۵	۱	۱۵
۴	۰.۹۷۷۴۰۱	۱,۹,۲۸,۶۹	۱۶	۱	۱۶
۵	۱	۵	۱۷	۰/۹۸۸۸۹۲	۵۰,۵۸,۶۷,۶۹
۶	۰/۹۷۴۳۶۹	۱,۵۸,۶۹	۱۸	۰/۹۶۷۸۰۲	۱,۹,۶۹
۷	۱	۷	۱۹	۱	۱۹
۸	۰/۹۸۵۹۶۱	۱,۴۰,۵۸,۶۹	۲۰	۰/۹۹۵۳۳۳	۱,۴۰,۵۸,۵۸
۹	۱	۹,۶۹	۲۱	۱	۲۱
۱۰	۱	۱۰	۲۲	۰/۹۸۴۳۲۵	۵,۶۹
۱۱	۱	۱۱	۲۳	۱	۱,۳,۲۳,۶۹

شماره DMU	کارایی	مرجع	شماره DMU	کارایی	مرجع
۱۲	۰/۹۸۶۶۶۸	۱,۱۵,۴۵,۵۹,۶۹	۲۴	۰/۹۸۱۹۹۷	۱,۴۰,۵۸,۶۹
۲۵	۱	۲۵	۴۸	۱	۳,۵,۴۸,۵۲,۶۹
۲۶	۱	۲۶	۴۹	۱	۴۹,۶۹
۲۷	۰/۹۹۶۵۸۶	۳,۲۳,۶۹	۵۰	۱	۵۰
۲۸	۱	۲۸	۵۱	۰/۹۹۱۴۰۵	۱,۱۶,۴۰,۵۵,۵۸
۲۹	۱	۲۹	۵۲	۱	۵,۵۲,۵۸
۳۰	۰/۹۹۳۶۵۴	۳۷,۶۹	۵۳	۰/۹۹۸۰۶۸	۱,۱۹,۶۹
۳۱	۰/۹۸۰۸۵۷	۳,۶۹	۵۴	۰/۹۹۷۶۱۵	۱۹,۶۹
۳۲	۱	۳۲	۵۵	۱	۱,۱۶,۵۵
۳۳	۱	۳۳	۵۶	۰/۹۸۸۶۰۲	۱۶,۵۸
۳۴	۰/۹۹۳۲۵۹	۷	۵۷	۱	۵۷,۶۹
۳۵	۰/۹۹۱۷۳۱	۵	۵۸	۱	۵۸,۶۹
۳۶	۱	۹,۳۶	۵۹	۱	۵,۴۸,۵۹,۶۳,۶۹
۳۷	۱	۳۷	۶۰	۰/۹۸۱۷۷۳	۱,۵۸,۶۹
۳۸	۰/۹۸۲۳۰۴	۹,۳۷,۶۹	۶۱	۱	۶۱,۶۹
۳۹	۰/۹۹۳۳۷۴	۵	۶۲	۰/۹۸۲۷۵۹	۱۹,۶۹
۴۰	۱	۴۰	۶۳	۱	۵,۶۳,۶۹
۴۱	۱	۴۱	۶۴	۰/۹۸۷۴۵۶	۱۶
۴۲	۰/۹۷۳۳۳	۹,۳۷,۶۹	۶۵	۱	۶۵,۶۹
۴۳	۱	۴۳	۶۶	۰/۹۸۹۷۳۱	۱۹,۶۵,۶۹
۴۴	۰/۹۹۱۶۷۶	۵,۱۶,۳۷,۵۸,۶۹	۶۷	۱	۶۷
۴۵	۱	۱,۴۰,۴۵,۵۵,۵۸	۶۸	۱	۶۸
۴۶	۰/۹۷۷۹۶۹	۱۵,۵۹,۶۱,۶۳,۶۹	۶۹	۱	۶۹
۴۷	۰/۹۹۴۳۹۷	۱,۱۶,۴۰,۵۵			

با توجه به جدول ۹، توابع هدف سناریوهای کارا اعم از مجموع هزینه‌های کمبود از هر دو نوع پس‌افت و فروش ازدست‌رفته، مجموع هزینه‌های نگهداری تعمیرات اصلاحی و پیشگیرانه و مجموع هزینه‌های مرتبط با کالای تولیدشده محاسبه و از کمترین مقادیر تا بیشترین مقدار مرتب شده است که در جدول ۱۰ به بخشی از آن اشاره شده است.

جدول ۲. بخشی از مقادیر توابع هدف برای سناریوهای کارا

شماره DMU	مجموع هزینه‌های کمبود	مجموع هزینه‌های نگهداری تعمیرات	مجموع هزینه‌های مرتبط با کالای تولیدشده	مجموع کل هزینه‌ها
۶۷	۱۰۹۱۹/۴۵	۱۰۴۲/۷۰۱	۱۱۲۸۳۱۸	۱۱۴۰۲۸۰/۲۶۸
۶۵	۱۳۸۰۰/۸۵	۹۳۶/۱۸۶	۱۱۲۵۵۴۵	۱۱۴۰۲۸۱.۹۰۳
۶۹	۱۳۲۱۹/۳۵	۹۶۷/۱۳۱	۱۱۳۲۹۰۲	۱۱۴۷۰۸۸/۴۱۳
۵۷	۱۱۲۷۷/۰۱	۹۱۰/۳۴	۱۱۳۶۰۷۳	۱۱۴۸۲۶۰/۰۶۳
۶۱	۱۲۹۲۵/۰۱	۸۸۲/۱۱۹	۱۱۳۵۲۴۸	۱۱۴۹۰۵۴/۹۱
۴۱	۹۳۸۷/۰۴۵	۸۶۷/۷۸۵	۱۱۴۰۵۰۳	۱۱۵۰۷۵۷/۸۸۸
۲۳	۱۰۹۳۶/۹۱	۹۵۵/۹۴۱	۱۱۳۹۶۱۵	۱۱۵۱۵۰۸/۰۳۴
۲۵	۹۵۸۳/۷۷۶	۹۲۳/۲	۱۱۴۴۵۰۵	۱۱۵۵۰۱۱.۶۳۴
۲۹	۱۰۱۵۱/۳۵	۸۷۳/۵۵۱	۱۱۵۱۳۶۵	۱۱۶۲۳۹۰/۴
۴۹	۱۱۶۱۸/۱۶	۹۴۶/۴۳۳	۱۱۵۰۰۵۴	۱۱۶۲۶۱۸/۸۳۶
۱۰	۱۰۵۸۵/۸۵	۹۹۲/۹۹۴	۱۱۵۱۰۸۱	۱۱۶۲۶۶۰/۲۹۹
۲۱	۹۵۰۹/۹۲۸	۸۲۳/۳۲۹	۱۱۵۲۵۷۴	۱۱۶۲۹۰۷/۳۶۵
۳۶	۱۰۸۹۴/۶۵	۹۹۶/۴۲۴	۱۱۵۱۸۲۹	۱۱۶۳۷۱۹/۹۸۵
۵۰	۱۳۹۸۰/۳۹	۹۵۵/۰۷۹	۱۱۵۰۲۳۳	۱۱۶۵۱۶۸/۳۹۶

به توجه به جدول ۱۰، هزینه‌های سیستم در قالب سه بخش به‌صورت جداگانه برای هر سناریو محاسبه شده است. شماره سناریو بر اساس حداقل کل هزینه‌ها (مجموع هزینه‌های تولید، نگهداری، دوباره کاری، ضایعات، فساد کالا، کمبود از نوع پس‌افت و فروش ازدست‌رفته، نگهداری تعمیرات اصلاحی و پیشگیرانه) مرتب شده و ۱۵ سناریوی نخست در جدول ۱۰، آورده شده است؛ اما این مطلب نشان‌دهنده حداقل‌بودن هر ۳ قسمت از هزینه ها نیست؛ بلکه همان‌طور که مشخص است، در برخی از سناریوها با وجود حداقل‌بودن هزینه کل، یک قسمت از هزینه بیش از هزینه دیگر سناریوها است؛ بنابراین انتخاب سناریوی بهینه و کارا بسته به نوع سیاست گذاری تصمیم گیرنده است که هدف خود را روی حداقل‌کردن کدام دسته از هزینه‌ها تنظیم کند.

با توجه به سیاست انتخابی تصمیم‌گیرنده، مقادیر پارامتر مربوط به سناریوی بهینه در فرمول‌های ۱۸ و ۱۹، قرار داده می‌شود و نرخ بهینه تولید به‌دست می‌آید.

۵. نتیجه گیری و پیشنهادها

در پژوهش حاضر، سیستم تولیدی مستعد شکست شبکه‌ای غیرقطعی با فرض وجود کالاهای غیرپایدار، بررسی و تحلیل شده است. در این سیستم، ماشین‌ها به‌صورت تصادفی خراب می‌شوند

که به‌منظور جلوگیری از ایجاد گلوگاه در ماشین‌های میانی و نهایی و کمبود تقاضای ماشین‌آلات استراتژی نگهداری تعمیرات شامل نگهداری تعمیرات اصلاحی و پیشگیرانه با برنامه نگهداری تعمیرات دوره‌ای مشخص برای آن‌ها اجرایی می‌شود. به‌دلیل وجود عدم‌قطعیت در سیستم‌های تولیدی مستعد شکست، مانند سیستم موردمطالعه، از ابزار شبیه‌سازی به‌منظور محاسبه شاخص‌های عملکردی سیستم و به‌تبع آن محاسبه هزینه‌های سیستم بهره گرفته شد؛ سپس با استفاده از تکنیک تحلیل پوششی داده‌ها، سناریوهای مختلف موردبررسی قرار گرفت و کارایی هر یک بررسی شد. ۶۹ سناریو بررسی شد که ۳۸ سناریو به‌عنوان سناریوهای کارا شناخته شدند. سناریوهای ناکارا نیز می‌تواند با مرجعیت سناریوهای کارا تغییر در ورودی‌ها به‌عنوان سناریوی کارا قرار گیرد. با اجرای این پژوهش، می‌توان ضمن معرفی الگوهای عملکردی به مدیران صنایع تولیدی، امکان برنامه‌ریزی برای توسعه ظرفیت خدمات تولیدی را فراهم کرد. تحلیل حساسیت و نیز به‌کارگیری روش‌های بهینه سازی از جمله الگوهای فراابتکاری برای تعیین سناریوی کارا و بهینه می‌تواند در پژوهش‌های آتی مدنظر قرار گیرد؛ همچنین استفاده از رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی و مقایسه کارایی سناریوهای در حالت فعلی و حالت بهینه، درنظرگرفتن جنبه‌های زیست‌محیطی و حلقه‌بسته به این معنا که محصولات تولیدی مجدداً در چرخه تولید قرار گیرند نیز می‌تواند از جمله پیشنهادها برای پژوهش‌های آتی باشد. با توجه به اینکه مسئله موردمطالعه بسیاری از جزئیات دنیای واقعی را در نظر گرفته است، می‌تواند در بسیاری از صنایع تولیدی مورداستفاده قرار گیرد و از دغدغه مدیران و کارشناسان صنایع برای بهینه‌سازی تولید و حفظ بازار رقابتی بکاهد؛ همچنین به‌دلیل به‌کارگیری مفروضات مختلف روی مسئله می‌توان مدل را از هر جهت توسعه داد تا به دنیای واقعی نزدیک‌تر شود.

تعارض منافع. برای ارائه مطالب و نگارش این مقاله هیچ‌گونه کمک مالی از هیچ فرد، نهاد و سازمانی دریافت نشده است و نتایج و دستاوردهای این مقاله به نفع یا ضرر سازمان یا فردی خاص نخواهد بود. حضور نویسندگان در این پژوهش به عنوان شاهدی بی‌طرف ولی متخصص بوده است و نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافعی ندارند.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

منابع

1. Ahmadi, S, H., & Grossi Mokhtarzadeh, N. (2014). Investigating and prioritizing the level of sensitivity of devices for repairs and preventive maintenance with the Martel and Zaras model (case study: Fire Production Machinery Company). *Industrial Management, 2(5),* ۱-22. (In Persian)
2. 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.
3. Afzali, P., Keynia, F., & Rashidinejad, M. (2019). A new model for reliability-centered maintenance prioritisation of distribution feeders. *Energy, 171,* 701-709.
4. 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.
5. Amelian, S. S., Sajadi, S. M., Navabakhsh, M., & Esmaelian, M. (2019). Multi-objective optimization of stochastic failure-prone manufacturing system with consideration of energy consumption and job sequences. *International journal of environmental science and technology, 16(7),* 3389-3402.
6. Amelian, S. S., Sajadi, S. M., Navabakhsh, M., & Esmaelian, M. (2022). Multi-objective optimization for stochastic failure-prone job shop scheduling problem via hybrid of NSGA-II and simulation method. *Expert Systems, 39(2),* e12455.
7. Behnamfar, R., Sajadi, S. M., & Tootoonchy, M. (2022). Developing environmental hedging point policy with variable demand: A machine learning approach. *International Journal of Production Economics, 254,* 108640.
8. Caballé, N., Castro, I., Pérez, C. & Lanza-Gutiérrez, J. M. (2015). A condition-based maintenance of a dependent degradation-threshold-shock model in a system with multiple degradation processes. *Reliability Engineering & System Safety, 134,* 98-109.
9. Charnes, A., W. Cooper, & Rhodes, E., (1987). Measuring the efficiency of decision-making units. *European Journal of Operational Research, 2,* 429–444.
10. Chopra, A. (2021). Applications and barriers of reliability centered maintenance (RCM) in various industries: a review. *Industrial Engineering Journal, 14(1),* 15-24
11. Davari, A., Ganji, M., & Sajadi, S. M. (2022). An integrated simulation-fuzzy model for preventive maintenance optimisation in multi-product production firms. *Journal of Simulation, 16(4),* 374-391.
12. Deiranlou, M., Azadjou, F. & Sajjadi, S.M. (1401). Presenting the simulation-optimization model of production systems prone to network failure with the approach of maintenance and repairs based on reliability and revenue sharing. *The Journal of Industrial management perspective 12(4),* 131-158 (In Persian).
13. Dhyne, E., Petrin, A., Smeets, V., & Warzynski, F. (2020). Theory for extending single-product production function estimation to multi-product settings. Work. Pap., Yale Univ., New Haven, CT Google Scholar Article Location.
14. Eslami, S., Sajadi, S. M., & Kashan, A. H. (2014). Selecting a preventive maintenance scheduling method by using simulation and multi criteria decision making. *International Journal of Logistics Systems and Management, 18(2),* 250-269.

15. Fatahi, A., Sajadi, S. M., Yazdian, S. A. (1401). Simulation-based optimization in multi-product three-level production systems with multi-purpose machines (case study: pipes and fittings, single-wall and double-wall). *Sharif industrial engineering and management, 28(۱)*, 37-49 (in Persian).
16. Gao, Z., Wang, H., & Zhang, H. (2022). The Decision of Production Systems with Quality-Contingent Demand and Condition-Based Maintenance. *Systems, 10(۱)*, 20.
17. Haj Shirmohammadi, A. (1385). *Principles of planning and control of production and inventories*. Isfahan, Arkan Danesh publications (In Persian).
18. 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.
19. Heydari Dahoui, J., Sajjadi, S.M. & Tavan, F. (2021). Designing the processes of small and medium businesses in the field of perishable goods in order to design an optimal production policy with a simulation approach. *Management research in Iran, 19(3)*, 7-35 (In Persian).
20. Kelton, D., Sadoski, R. & Stark, D. (2013). Translated by Bagheri, M., Ali Sabouye, A. & Hossein Hejazi, T. *Simulation with ERNA software*. Ferdowsi University of Mashhad Press, first edition (In Persian).
21. Kheradranjbar, M., Mohammadi, M., & Rafiee, S. (2022). Evaluating the Efficiency of Building Repair and Maintenance System Using Data Envelopment Analysis Method. *Journal of Structural and Construction Engineering, 8(Special Issue 4)*, 252-269.
22. Mahluji, H. (2008). *Simulation of Discrete Systems – Contingency*. Scientific Publications of Sharif University of Technology, Tehran (In Persian).
23. 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.
24. Mehrgan, M. (1391). *Quantitative models in evaluating the performance of organizations.* Tehran, Academic Book Publishing (in Persian).
25. Mousavi, S., Sajjadi, S.M., Tabriz, A. & Najafi, S.I. (1400). Hierarchical network design of urban temporary treatment centers in crisis conditions with the integrated approach of mathematical model-simulation. *The Journal of Industrial Management Perspectives 11(2)*, 12-99(in Persian).
26. Naylor, T.H., & Finger, J.M. (1981). Verification of Computer Simulation Studies. *Management Science, 24*, 180-189.
27. Pratap, S., Daultani, Y., Dwivedi, A., & Zhou, F. (2021). Supplier selection and evaluation in e-commerce enterprises: a data envelopment analysis approach. *Benchmarking: An International Journal, 29(1)*, 325-341.
28. Polotski, V., Kenne, J. P., & Gharbi, A. (2019). Joint production and maintenance optimization in flexible hybrid Manufacturing–Remanufacturing systems under age-dependent deterioration. *International Journal of Production Economics, 216*, 239-254.
29. Sajjadi, S.M. (1389). Determining the production rate in production systems prone to network failure with fixed demand rate, PhD thesis, Faculty of Industrial Engineering, Amirkabir University of Technology (In Persian).

30. Sajadi, S. M., Alizadeh, A., Zandieh, M., & Tavan, F. (2019). Robust and stable flexible job shop scheduling with random machine breakdowns: multi-objectives genetic algorithm approach. *International journal of mathematics in operational research*, *14(2)*, 268-289.
31. Sajadi, S.M. Seyed Esfahani, M.M. S¨ rensen, K. (2011). Production control in a failure-prone manufacturing network using discrete event simulation and automated response surface methodology. *Int J Adv Manuf Technol, 53(۱-4)*, 35–46.
32. Shamayleh, A., Awad, M., & Abdulla, A. O. (2019). Criticality-based reliability-centered maintenance for healthcare. *Journal of Quality in Maintenance Engineering.*
33. Shannon R.E. (1975). System Simulation: The Art and Science. Prentice-Hall.
34. Swaan Arons, H.D., Attila Boer, C., Storage and retrieval of discrete - event simulation. *Simulation Practice and Theory*, *8(8)*, 555-576, 2001.
35. 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(۱)*, 16-26.
36. Van Jaarsveld, W., Dekker, R., (2011). Spare parts stock control for redundant systems using reliability centered maintenance data. *Reliab Eng Syst Saf, 96*, 1576–86.
37. Vishnu, C. R., & Regikumar, V. (2016). Reliability Based Maintenance Strategy Selection in Process Plants: A Case Study. *Procedia Technology, 25*, 1080-1087.
38. Wong, W. P. (2021). A Global Search Method for Inputs and Outputs in Data Envelopment Analysis: Procedures and Managerial Perspectives. *Symmetry, 13(7)*, 1155.
39. Xie, X. (1989). Optimal control in a failure prone manufacturing system", Automatic Control, *IEEE, 31*, 116-126.
40. Zhu, J. (Ed.). (2016). *Data envelopment analysis: A handbook of empirical studies and applications (Vol. 238).* New York: Springer.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی